

Investigation of Changes in Climatic Indicators with an Emphasis on Dust and the Impact of Teleconnection Indices on These Changes in Western Iran

Fatemeh Vatanparast Galeh Juq¹, Bromand Salahi^{2*} 

1. Ph.D of Climatology, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

2. **Corresponding Author**, Professor of Climatology, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Email: Salahi@uma.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-6185>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 20 January 2025 Revised: 10 March 2025 Accepted: 15 April 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Climate variables, spatiotemporal changes, teleconnection indices, Mantel test, geo-detector index.	Understanding changes in climate and the factors affecting their occurrence is of great importance. In this study, the trend of spatiotemporal changes in the parameters of average temperature, precipitation, relative humidity, number of dust days, maximum speed, and wind direction from 1987-2023 at 13 stations in the western half of Iran was investigated using Mann-Kendall statistical methods and Sen's slope, and their relationship with each other was analyzed using the Pearson correlation method. Using the Mantel linear test and the Geo-Detector (GDM) geographical classification method, the effects of teleconnection indices, including QBO, IOD, BEST, and NAO, on the aforementioned parameters were investigated. The results of the spatial fluctuation analysis using Sen's slope test showed that more than 85 percent of the area of the study area had an increasing trend in all parameters. The Mann-Kendall test showed that the highest increase and decrease in the parameters were related to the Sarpol-e-Zahab and Dezful stations, respectively. Pearson correlation analysis showed that the highest values of the correlation coefficients were between relative humidity and all parameters, which was inverse and significant at the 0.001% error level. Among the parameters, wind speed played the greatest role in the occurrence of dust storms, and its effects were observed in 74.9% of the study area. According to the results of the Mantel test, among the parameters studied, the highest correlation of the teleconnection indices with dust frequency was established, covering 69% of the study area. Ranking of the dominant factors on climate change with the geo-detector index identified the independent factor IOD as the superior and influential factor in the distribution of these changes. The findings of this study can help understand the climatic factors that influence changes in climate parameters.
How to Cite: Vatanparast Galeh Juq, F. and Salahi, B. (2026). Investigation of Changes in Climatic Indicators with an Emphasis on Dust and the Impact of Teleconnection Indices on These Changes in Western Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 1-24.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.50874.2096	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Understanding the temporal and spatial trends of climate impacts and recognizing the factors influencing their occurrence is of great importance. The temporal and spatial variation of dust events is dependent on numerous climatic and terrestrial factors (Guan et al., 2017). In recent decades, global warming and climate change have caused an increase in temperature, a decrease in rainfall, and frequent droughts. Following the occurrence of these droughts, the dust phenomenon has also increased (Achakulwisut et al., 2018). Climatic characteristics and their dominant elements play an important role in the occurrence and distribution of phenomena (Mahdavi, 2018). Most studies related to the analysis of trends in climate variables have been based on Mann-Kendall tests and linear regression. Therefore, the main objectives of the present study are to use two methods, the Mantel test and the Geo-Detector index, to investigate the temporal and spatial changes of climate variables with an emphasis on the frequency of days with dust storms in the western half of Iran.

MATERIALS AND METHODS

To determine the correlation between climate variables with horizontal visibility, data on average temperature, precipitation, relative humidity, maximum speed and wind direction were used for the 36-year statistical period (1987-2023). To investigate the climatic causes affecting these climate variables, monthly time series data of bivariate ENSO (BEST), Indian Ocean Dipole (IOD), QBO index and time series of North Atlantic Oscillation (NAO) index were used. The Mann-Kendall method and Sen's slope were used to investigate the temporal trends of selected climate variables. To analyze the linear relationship between climate variables and teleconnection data, the Mantel test (a widely used method for testing the linear correlation between two matrices) was used (Meng et al., 2022; Yang et al., 2023). Finally, the factor detector was used to determine the contribution of teleconnection patterns to climate variables.

RESULTS

The results of determining the trends of temperature, precipitation, relative humidity, dust occurrence, maximum speed, and wind direction metrics for the statistical period 1987-2023 showed that the changes in correlation coefficients fluctuated greatly during the statistical period. The trend of dust occurrence correlation in many of the studied stations is almost in line with the trend of changes in climate variables, which indicates that climate changes are in line with these fluctuations in the selected stations in western Iran. The results of determining the trend using the nonparametric slope test showed that the precipitation parameter at Kangavar, Kermanshah, and Dezful stations has a decreasing trend, which can lead to a decrease in water resource storage and a decrease in river discharge. The existence of an upward trend in the temperature parameter for 53% of the study area can cause an increase in evaporation and transpiration, followed by a decrease in water resources and pressure on groundwater. Wind speed had the most significant relationship with the frequency of dust storms, and in 96.2% of the study area, it had the highest correlation coefficient with dust occurrence.

CONCLUSION

Since climate is affected by multiple parameters, climate change cannot be the result of only several specific components, and it is the effect of various parameters that causes climate change in a region. The findings of this study can help decision-makers in developing strategies and measures for sustainable water resource management, reducing and controlling the risks of dust, drought, and flooding, and discovering climate factors affecting changes in climate variables.

REFERENCES

References (in Persian)

Mahdavi, M. (2018). Applied Hydrology. Tehran University Publications, first volume, pp 342. [In Persian].

References (in English)

Achakulwisut, L., Mickley, J., Annenberg, S.C. (2018). Drought sensitivity of fine dust in the US Southwest: Implications for air quality and public health under future climate change. *Environmental Research Letters*, 13, pp 1-12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf20>.

Guan, Q., Sun, X., Yang, J., Pan, B., Zhao S., Wang, L. (2017). Dust storms in northern China: long-term spatiotemporal characteristics and climate controls. *Journal of Climate*, 30(17), pp 6683-6700. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0795.1>.

Meng, L., Xu, C., Wu, F., He, H. (2022). Microbial co-occurrence networks driven by low abundance microbial taxa during composting dominate lignocellulose degradation. *Sci. Total Environ*, 845, 157197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157197>.

Yang, Q., Zhang, P., Li, X., Yang, S., Chao, X., Liu, H., Ba, S. (2023). Distribution patterns and community assembly processes of eukaryotic microorganisms along an altitudinal gradient in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River. *Water Res*, 239, 120047. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120047>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

بررسی تغییرات فراسنج‌های اقلیمی با تأکید بر گردوغبار و اثر نمایه‌های پیوند از دور بر آن‌ها در غرب ایران

فاطمه وطن پرست قلعه‌جوق^۱، برومند صلاحی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
 ۲. استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)
 ایمیل: Salahi@uma.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-6185>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: فراسنج‌های اقلیمی، تغییرات زمانی و مکانی، نمایه‌های پیوند از دور، آزمون Mantel، نمایه Geo-Detector.	امروزه درک تغییرات پیامدهای اقلیمی و عوامل مؤثر بر وقوع آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه، روند تغییرات زمانی - مکانی فراسنج‌های اقلیمی (میانگین دما، بارش، رطوبت نسبی، تعداد روزهای گردوغبار، حداکثر سرعت و جهت باد) طی دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۲۳ در ۱۳ ایستگاه نیمه غربی ایران با استفاده از روش‌های آماری من - کندال و شیب سن بررسی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر با روش همبستگی پیرسون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس اثر نمایه‌های پیوند از دور شامل QBO، IOD، BEST و NAO با استفاده از آزمون خطی Mantel و روش طبقه‌بندی جغرافیایی Geo-Detector (GDM) بر روی فراسنج‌های نام‌برده بررسی شد. نتایج تحلیل نوسانات مکانی با استفاده از آزمون شیب سن برای بیش از ۸۵ درصد از مساحت پهنه مورد مطالعه روند افزایشی را در همه فراسنج‌ها نشان داد. مطابق با یافته‌های آزمون من - کندال بیشترین تغییرات افزایشی و کاهش در فراسنج‌ها به‌ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سرپل ذهاب و دزفول است. تحلیل همبستگی پیرسون ثابت کرد بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی بین رطوبت نسبی با همه فراسنج‌ها وجود دارد که این ارتباط معکوس بوده و در سطح خطای ۰/۰۰۱ درصد معنادار است. همچنین، پارامتر سرعت باد در بین فراسنج‌ها بیشترین نقش را در رخداد طوفان‌های گردوغباری داشته و اثرات آن در ۷۴/۹ درصد از مساحت پهنه مورد مطالعه دیده می‌شود. بر مبنای نتایج حاصل از آزمون منتل، در بین فراسنج‌های مورد بررسی، بیشترین همبستگی بین نمایه‌های پیوند از دور با فراوانی گردوغبار برقرار است که ۶۹ درصد از مساحت پهنه را در بر گرفته است. رتبه‌بندی عوامل غالب بر تغییرات اقلیمی با نمایه آشکارساز Geo-Detector، عامل مستقل IOD را به‌عنوان عامل برتر و تأثیرگذار در پراکنش این تغییرات شناسایی نمود. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به درک عوامل اقلیمی که بر تغییرات در پارامترهای آب‌وهوایی تأثیر می‌گذارند، کمک کند.

استناد: وطن پرست قلعه‌جوق، فاطمه و صلاحی، برومند. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات فراسنج‌های اقلیمی با تأکید بر گرد و غبار و اثر نمایه‌های پیوند از دور بر آن‌ها در غرب ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۱-۲۴

مقدمه

ادراک و فهم روند نوسانات زمانی و مکانی پیشامدهای اقلیمی و شناخت عوامل تأثیرگذار بر وقوع آن‌ها از ارزشمندی بسیاری برخوردار است و دگرگونی فعالیت زمانی - مکانی رخداد گردوغبار مشروط به عوامل پرشمار اقلیمی و زمینی است (گوان^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). پارامترهای اقلیمی در قاعده زمان و مکان بنا به دلایل زیادی دگرگون می‌شوند که باید نحوه تغییرات آن‌ها بر اساس مشاهدات و با بهره‌مندی از شیوه‌های آماری شناسایی شوند (میستری^۲، ۲۰۱۹). طی دهه‌های اخیر پدیده گرمایش جهانی و دگرگونی‌های آب‌وهوایی منجر به افزایش درجه حرارت، کاهش بارندگی و خشک‌سالی‌های پی‌درپی شده است. به‌دنبال رخداد خشک‌سالی‌های مکرر پدیده گردوغبار نیز زیاد شده است (آچاکولویسوت^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، ویژگی‌های اقلیمی و عناصر غالب آن نقش مهمی در پراکنش و پیدایش پدیده‌های اساسی اجرا می‌نماید (مهدوی، ۱۳۹۷).

ازجمله پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه روند تغییرات فراسنجهای اقلیمی و اثر آن‌ها بر طوفان‌های گردوغبار، پژوهش ماساتوشی^۴ (۲۰۰۲) است که اعلام کرد درجه حرارت زیاد، سرعت زیاد باد و کاهش بارش شرایط مساعدی برای وقوع طوفان‌های گردوغبار فراهم می‌کند. پیدایش و شدت این طوفان‌ها در مونگولیای چین متأثر از شرایط اقلیمی مثل سرعت باد و مقدار رطوبت خاک بوده است (لی^۵ و همکاران، ۲۰۰۴). رابطه این طوفان‌ها در یافته‌های گو^۶ و همکاران (۲۰۱۰) طی دوره آماری (۲۰۰۷-۱۹۵۴) برای شمال چین با دما معکوس و با بارش معکوس و معنادار بود و در شمال چین رابطه منفی را با رطوبت نسبی نمایان ساخت (فنگ می^۷ و همکاران، ۲۰۱۰). وجود رابطه معکوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد بین گردوغبار بیابان تکلمکان با بارش دستاوردهای حاصل از پژوهش فنگجیان^۸ و همکاران (۲۰۰۸) است. در بررسی‌های ژو^۹ و همکاران (۲۰۲۳) وجود روند کاهشی در فراوانی گردوغبار حوضه تاریم از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱ به اثبات رسید. در مطالعات گوپتا^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰) نمایه‌های بارش فرین روندی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای حوضه رودخانه سبرمتی غرب هند نشان داد.

در داخل ایران مهرابی و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی رابطه بین فراسنجهای اقلیمی (درجه حرارت، رطوبت نسبی، بارش، سرعت و جهت حداکثر باد) و وقوع ریزگردهای استان خوزستان با روش رگرسیون خطی بیان نمودند میزان همبستگی‌ها از غرب به شرق افزایش داشته است. این فراسنجه‌ها در بررسی جبالبارزی و همکاران (۱۴۰۲) برای تالاب جازموریان طی سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ بیشترین تغییرات را در قسمت مرکزی این تالاب نشان داد. گزارش بیشترین میزان همبستگی بین فراوانی روزهای گردوغبار و فراسنجهای اقلیمی در ایستگاه‌های ازنا، الیگودرز و کوه‌دشت استان لرستان طی دوره (۲۰۱۴-۲۰۰۰) با آزمون من - کندال^{۱۱} و اسپیرمن از دستاوردهای انصاری قوجقار و همکاران

¹- Guan

²- Mistry

³- Achakulwisut

⁴- Masatoshi

⁵- Li

⁶- Gu

⁷- Fengmei

⁸- Fengjin

⁹- Zhou

¹⁰- Gupta

¹¹- Man Kendall

(۱۳۹۸) است. در استان چهارمحال و بختیاری تحلیل تغییرات بارش با آزمون من - کندال و شیب سن^۱ طی دوره (۱۹۸۶-۲۰۱۵) روند معناداری را نشان نداد (آروین و همکاران، ۱۳۹۵). ناهمساز با آن دما و بارش حوضه آبخیز گدارخوش طی دوره آماری (۱۳۹۱-۱۳۷۰) در مطالعات مرتضوی قیصوری و همکاران (۱۳۹۷) با آزمون من - کندال روند معناداری را در سطح اطمینان ۹۹ درصد نمایش داد و به گونه وارون این آزمون در ارزیابی تغییرات حداکثر بارش روزانه و سالانه حوضه آبریز کرخه و دز طی دوره (۲۰۱۹-۱۹۵۹) روند مشخصی را نمایش نداد (حسنوند و همکاران، ۱۴۰۱). به کارگیری روش‌های تخمین گر شیب سن و رگرسیون خطی در استان خراسان جنوبی طی دوره (۱۳۹۷-۱۳۵۴) برای بارش و دمای حداقل تغییرات بیشتری را نسبت به سایر فراسنج‌ها برآورد نموده است (کاوایان و همکاران، ۱۴۰۰). روش رگرسیون خطی در پژوهش قربانی و همکاران (۱۴۰۱) برای دمای حداقل و حداکثر ایران طی دوره (۲۰۱۶-۱۹۸۷) بیشترین شیب‌های افزایشی را برای فصل بهار و تابستان نشان داد. این روش همچنین به عنوان یک شیوه کارآمد در پژوهش ربیعی غفار و همکاران (۱۴۰۳) جهت بررسی تغییرات زمانی و مکانی احتمال وقوع بارش ایران در طول دوره آماری (۱۳۹۴-۱۳۴۹) مورد استفاده قرار گرفت. خسروی و آذری (۱۴۰۱) با استفاده از آزمون‌های من - کندال و پتیت در حوضه کشف رود طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۴ بیان کردند که دمای بیشینه در فصل بهار و تابستان روند افزایشی و بارش در زمستان روند کاهشی داشته است. بررسی تغییرات نمایه‌های حدی دما و بارش ایران از سال ۱۳۹۵۱ تا ۲۰۲۰ با آزمون ناپارامتری اسپیرمن در پژوهش جمالی و همکاران (۱۴۰۳) برای اکثر ایستگاه‌ها کاهش بارش همراه با افزایش دما را نشان داد.

الگوهای پیوند از دور بازتاب دگرگونی‌ها در امواج جوی و جایگاه جت استریم‌ها طی قاعده گسترده بوده و بر دما، بارش، مسیر گذر طوفان‌ها، جایگاه و سختی رودبدها در گستره وسیعی اثرگذار است. بدین سبب آن‌ها غالباً رخداد الگوهای هوایی بی‌قاعده را موجب می‌شوند که به صورت هم‌زمان در گستره دورتری رخ می‌دهند. با نگرش به اینکه الگوهای پیوند از دور از ویژگی‌های آب‌وهوایی در بعد سیاره‌ای می‌باشند و به علت اینکه از حیث اقلیمی همه نواحی وابسته به هم هستند. از این رو، شناسایی ارتباط این الگوها می‌تواند در تفسیر رابطه میان عناصر اتمسفری مفید باشد. همچنین، فهم فراوانی رخدادها در مرحله زمانی مختلف را راحت‌تر نماید (فرج زاده، ۱۳۹۲).

از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه، پژوهش شین^۲ (۲۰۲۲) می‌باشد که اثر پیوند از دور اقیانوس آرام و قطب شمال بر فعالیت طوفان گردوغبار آسیای مرکزی را بررسی کرد و با اینکه طی سال ۲۰۱۶-۱۹۷۱ در عراق القادی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) ارتباط نزدیکی را بین ENSO با فعالیت‌های گردوغبار نشان دادند. در یافته‌های زو^۴ و همکاران (۲۰۲۴) نمایه‌های NAO و ENSO اثر قابل توجهی را بر فعالیت گردوغبار شمال چین طی بهار آینده نشان داد. طوفان‌های گردوغبار ایستگاه‌های غرب و جنوب غرب ایران طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۸۷ در بررسی‌های وطن‌پرست قلعه جوق و صلاحی (۱۴۰۲) بیانگر ارتباط قوی و معکوس آن در فاز منفی و ارتباط مستقیم آن در فاز مثبت با نمایه NAO بود. امیدوار و همکاران (۱۴۰۳) رابطه بین طوفان‌های گردوغبار استان کرمان را با چندین نمایه پیوند از دور در طول دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ بررسی کردند. نتایج بیانگر بیشترین تأثیرپذیری ایستگاه‌های کرمان، انار و شهربابک از نمایه AO بود. در پژوهش وطن‌پرست قلعه جوق و همکاران (۱۴۰۳) بررسی تأثیر همزمان نمایه‌های

1- Sen's Slope Estimator Nonparametric Method

2- Xin

3- Al-Qadi

4- Xu

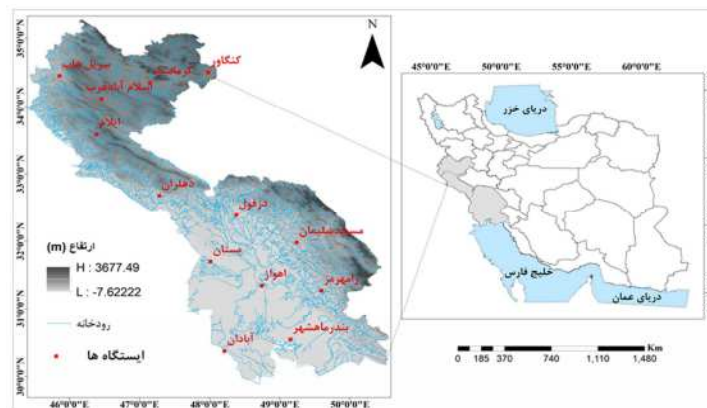
IOD، ENSO و QBO بر نوسان طوفان‌های گردوغبار نیمه غربی ایران در طول دوره (۱۹۸۷-۲۰۲۲) نشان داد فاز سرد ENSO با فاز منفی QBO بیشترین تأثیر را بر افزایش گردوغبار دارد.

بر اساس مرور منابع انجام‌شده، می‌توان دریافت بیشتر مطالعاتی که در زمینه تشخیص روند فراسنج‌های اقلیمی هست، بر پایه آزمون‌های ناپارامتری قدیمی چون من - کندال و رگرسیون خطی استوار بوده است و با استناد به دستاوردهای پژوهش پیشین، نقش چیره شونده الگوهای پیوند از دور چون ENSO، IOD و QBO بر وقوع طوفان‌های گردوغبار نیمه غرب ایران محرز و مسلم شده است. از سوی دیگر، در این پژوهش‌ها تنها ارتباط کلی با یک ضریب همبستگی بررسی شده و ارزیابی این ارتباط و تحلیل زمانی - مکانی آن در داخل ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، خلأ بررسی‌های پیشین را می‌توان ارزیابی این دیدگاه در کنار بررسی دو روش کارآمد آزمون متل و نمایه Geo-Detector دانست تا با شناخت و پیش‌بینی اثر الگوهای پیوند از دور به برنامه‌ریزی و مدیریت پیامدها در هنگام وقوع گردوغبار دست یافت. در راستای بهبود پیش‌بینی‌ها، اهداف اصلی این پژوهش شامل استفاده از این دو روش جهت بررسی دقیق نوسانات زمانی - مکانی فراسنج‌های اقلیمی و همچنین بررسی فراگیرتر اثر نمایه‌های پیوند از دور بر روی آن‌ها با تأکید بر بررسی ریزبینانه‌تر ارتباط این فراسنج‌ها و نمایه‌ها بر فراوانی روزهای توأم با طوفان‌های گردوغبار در نیمه غرب ایران است تا مشخص شود رخداد گردوغبار بیشتر متأثر از کدام فراسنج اقلیمی و الگوهای پیوند از دور است.

داده‌ها

معرفی محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، ایستگاه‌های همدید نیمه غرب ایران که شامل ۱۳ ایستگاه واقع در استان خوزستان، ایلام و کرمانشاه هست مورد پژوهش قرار گرفته است. نام، جایگاه و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: جایگاه جغرافیایی و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه. منبع: نگارندگان

روش کار

جهت دریافت داده‌های هواشناسی به‌منظور آشکار نمودن میزان همبستگی بین فراسنج‌های اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار، پنج پارامتر میانگین دما، بارش، رطوبت نسبی، حداکثر سرعت و جهت باد به‌دلیل ایفای بیشترین نقش در رخداد طوفان گردوغبار ایستگاه‌های منتخب برای سال‌های آماری ۳۷ ساله (۱۹۸۷-۲۰۲۳) برگزیده شد. لازم به

یادآوری است که روزهای توأم با طوفان‌های گردوغبار در این پژوهش، از داده‌های دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر و کدهای هوای حاضر بیان‌کننده رخداد طوفان گردوغبار (۶ تا ۹ و ۳۰ تا ۳۵) پالایه شده‌اند که در طول روز با ۸ بار دیده‌بانی در سازمان هواشناسی به فاصله هر سه ساعت جمع‌آوری می‌شوند. بنابراین، هر روز که در آن یکی از کدهای گردوغباری اتفاق بیافتد و دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر برسد، آن روز به‌عنوان روز همراه با طوفان گردوغباری شناخته شد و درنهایت طی همراه تعداد این رخدادهای محاسبه و به‌عنوان فراوانی ماهانه گردوغبار هر سال در نظر گرفته شد.

جهت بررسی علل آب‌وهوایی بالقوه در پشت این فراسنجهای اقلیمی، داده‌های سری زمانی ماهانه نمایه دومتغیره (BEST) دربرگیرنده دو جزء اقیانوسی و جوی جهت محاسبه و ارائه نمایه انسو (ENSO)، نمایه حالت دوقطبی (IOD)، نمایه QBO از پایگاه اینترنتی <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list> و سری زمانی نمایه نوسان اطلس شمالی (NAO) از پایگاه تشخیص اقلیمی سازمان ملی آب‌وهوا در ناسا به آدرس www.cdc.noaa.gov.htm برداشت گردید. انتخاب این نمایه‌ها با نگرش به اهمیت آن‌ها در رخداد گردوغبار نیمه غربی ایران طی دستاوردهای حاصل از پژوهش‌های پیشین صورت گرفته است. برای مقایسه‌پذیر بودن داده‌های مربوط به فراسنجهای اقلیمی با دورپیوندها، داده‌های روزهای توأم با طوفان‌های گردوغبار، دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد به‌صورت ماهانه محاسبه و آماده‌سازی شد و داده‌ها مطابق با رابطه ۱ استانداردسازی شدند (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴).

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

که در رابطه بالا، Z نمره استاندارد شده فراسنجه اقلیمی، X_i میانگین فراسنجهای اقلیمی برای همراه، $\bar{X}$ فراسنجه اقلیمی روز موردنظر در طول دوره آماری و δ انحراف از معیار ماه موردنظر است.

تحلیل روند

آزمون گرافیکی و ناپارامتریک من - کندال ابتدا توسط من (۱۹۴۵) و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) بسط یافت. برای روشن نمودن هرگونه روند یا جهش ناگهانی در رفتار یک سری زمانی می‌توان از این آزمون استفاده نمود. همچنین جهت برآورد شیب واقعی یک‌روند در سری زمانی استفاده از روش ناپارامتریک شیب سن می‌تواند یک روش مناسب باشد که این روش ابتدا توسط تیل^۱ (۱۹۵۰) ارائه و سپس به‌وسیله سن (۱۹۶۸) توسعه و گسترش داده شده است. این دو روش نیازی به توزیع نرمال داده ندارند و نسبت به خطاهای اندازه‌گیری و نقاط دورافتاده حساس نیستند و تخمین بهتری از روند طولانی‌مدت آب‌وهوا ارائه می‌دهند (دای^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). در این پژوهش از روش من - کندال و شیب سن برای تعیین وجود روندهای زمانی - مکانی فراسنجهای اقلیمی منتخب و میزان معنی‌دار بودن آن در سری زمانی سالانه استفاده شد. علاوه بر این، از روش من - کندال برای محاسبه مقدار آماره Z نیز استفاده شد که در آن $Z > 0$ روند افزایشی و $Z < 0$ روند کاهشی در داده‌ها را نشان می‌دهد و اگر $|Z| \geq 1/96$ باشد، به این معنی که این روند سطح اطمینان ۹۵٪ را برآورده می‌کند (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). $|Z| \geq 2/58$ و $|Z| \geq 3/29$ سطح

^۱ - Til

^۲ - Dai

^۳ - Wang

اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد (وو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). سپس به‌صورت جزئی‌تر برای تعیین جهت روند، نوع و زمان تغییر در داده گردوغبار نیز به‌کار برده شدند تا با استفاده از این روندهای چندساله مشخص شود آیا ایستگاه‌های منتخب تحت تأثیر قابل‌توجهی از این فراسنج‌ها در رخداد گردوغبار هستند یا خیر؟

تحلیل همبستگی پیرسون و آزمون منتل^۲

تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون یک روش رایج برای بررسی رابطه خطی بین دو مجموعه از متغیرها است (هوانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱؛ سونگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). با استفاده از این آزمون ارتباط بین فراسنج‌های اقلیمی باهم مورد تحلیل قرار گرفت. جهت بررسی و ارزیابی ارتباط خطی بین شش فراسنج اقلیمی یادشده با داده‌های پیوند از دور از آزمون منتل که روشی پرکاربرد در بوم‌شناسی برای آزمایش همبستگی خطی بین دو ماتریس است، استفاده شد (منگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). لازم به یادآوری است که محاسبه ضرایب همبستگی و ترسیم نمودارها در محیط نرم‌افزار R انجام شده است.

روش Geo-Detector

روش Geo-Detector (GDM)، مدلی است که برای شناسایی و استفاده از تفاوت‌های جغرافیایی استفاده می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷). درواقع یک روش اندازه‌گیری جهانی است که از مفهوم تحلیل واریانس (ANOVA) برای تشخیص ناهمگونی طبقه‌ای استفاده کرده و علل ریشه‌ای آن را توضیح می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۲). به این مفهوم که اگر متغیر مستقل (X) و متغیر وابسته (Y) نظم مشخصی را در سری زمانی یا توزیع مکانی خود نشان دهند؛ بنابراین متغیر وابسته Y به‌طور قابل‌توجهی متأثر از متغیر مستقل X خواهد بود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ وی^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). به‌عبارت‌دیگر، در این روش فرض بر این است که اگر یک عامل مستقل تأثیر قابل‌توجهی بر یک متغیر وابسته داشته باشد، توزیع فضایی آن‌ها نیز باید مشابه هم باشد (وانگ و هو^۷، ۲۰۱۲). از چهار نوع آشکارساز تشکیل شده است: آشکارساز عامل (فاکتور)، آشکارساز تعامل، آشکارساز اکولوژیکی و آشکارساز خطر (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه، ما از آشکارساز فاکتور برای کشف موارد خاص استفاده کردیم و سهم الگوهای پیوند از دور بالقوه تأثیرگذار (متغیرهای مستقل) در فراسنج‌های اقلیمی (متغیرهای وابسته)، توسط کمیت آماری q نشان داده شد. مقدار q در فاکتور آشکارساز نشان‌دهنده مقدار عددی میزان مستقل بودن است و متغیر X، متغیر وابسته Y را توضیح می‌دهد که فاکتور آن را دارد و بالاترین مقدار q کمک‌کننده اصلی است. اندازه‌گیری آماری q با رابطه (۲) بیان می‌شود (ژانگ^۸ و همکاران، ۲۰۲۲؛ رن^۹ و همکاران، ۲۰۲۴).

¹ - Wu

² - Mantel test

³ - Huang

⁴ - Song

⁵ - Meng

⁶ - Wei

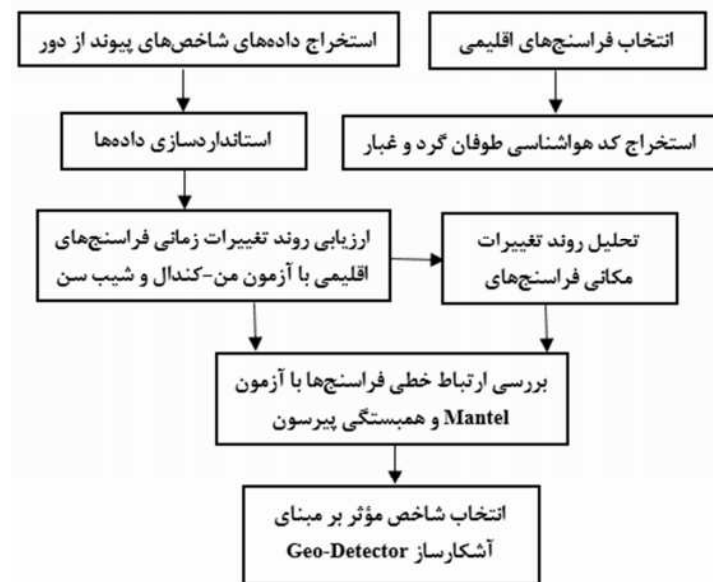
⁷ - Wang and Hu

⁸ - Zhang

⁹ - Ren

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

در رابطه بالا h نشان‌دهنده طبقه‌بندی یا پارتیشن متغیر مستقل X و یا متغیر وابسته Y است. N_h و N به ترتیب نشان‌دهنده تعداد واحدهای لایه h و کل محدوده است. σ_h^2 و σ^2 به ترتیب نشان‌دهنده واریانس متغیر وابسته Y در لایه h و کل محدوده است. فرایند پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: روند نمای پژوهش. منبع: نگارندگان

نتایج و بحث

تغییرات زمان-روند در فراسنج‌های اقلیمی

جهت شناسایی و سنجش جریان‌های کاهشی یا افزایشی فراسنج‌های اقلیمی در ایستگاه‌های غرب کشور از دو روش ناپارامتریک برآوردکننده شیب سن و من - کندال استفاده گردید. جدول ۱ روندهای خطی و نتایج آماری روش‌های من - کندال و شیب سن و شکل ۳ نیز روند دگرگونی‌ها بر مبنای من - کندال برای فراوانی گردوغبار را نمایش می‌دهد. برگرفته از آزمون من - کندال برای فراوانی گردوغبار یک روند کلی افزایشی از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ در ایستگاه‌های اهواز، بستان، اسلام‌آباد غرب، ایلام، رامهرمز، دهلران، کنگاور، سرپل ذهاب و مسجدسلیمان با دامنه روند منطقه‌ای بین ۰/۴۶ تا ۳/۲۴ وجود دارد و میانگین منطقه‌ای میزان تغییرات یادشده در ایستگاه‌های منتخب برابر با مقدار ۱/۶۷ است. دگرگونی‌های افزایشی در ایستگاه سرپل ذهاب بسیار قابل توجه بوده و از آنجا که مقدار Z آن بزرگ‌تر از عدد ۲/۵۸ هست، وجود روند صعودی در سطح اطمینان ۹۹ درصد در این ایستگاه پذیرفته می‌شود. در مقابل ایستگاه‌های آبادان، بندر ماهشهر، دزفول و کرمانشاه ساز مخالف داشته و یک روند کلی کاهشی را با دامنه روند منطقه‌ای بین ۰/۲۶ تا ۱/۰۶ به نمایش گذاشته‌اند و میانگین تغییرات آن‌ها برابر با ۰/۶۰ است. بیشترین شیب روند در دزفول با مقدار Z کمتر از ۱/۹۶ وجود دارد که وجود روند نزولی در سطح اطمینان ۹۵ درصد در آن به‌روشنی

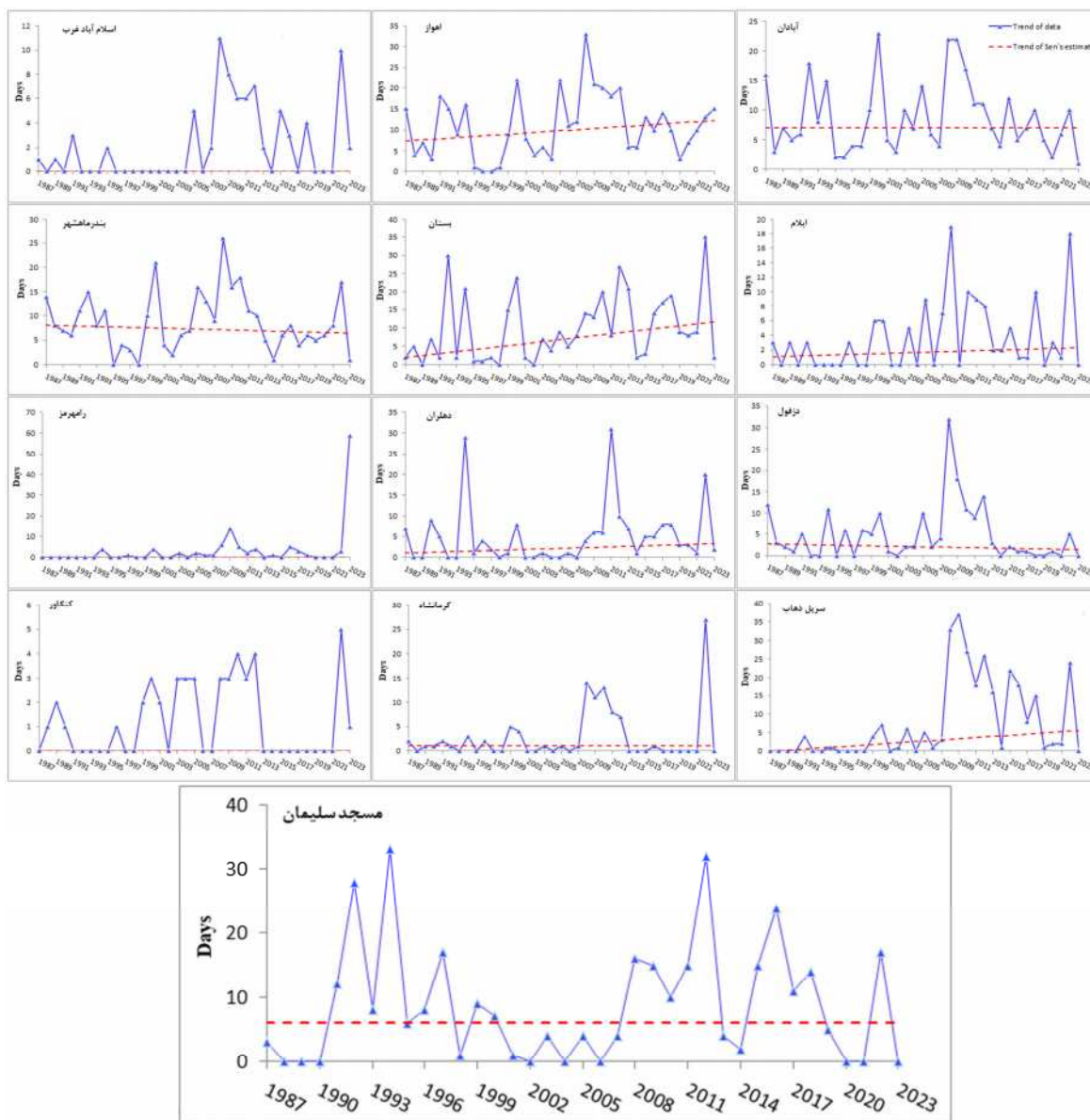
قابل مشاهده است. سرعت و جهت باد نیز در این ایستگاه‌ها روند کاهشی را نشان می‌دهد و همانند فراوانی گردوغبار، روند مثبت سرعت و جهت باد در ایستگاه سرپل ذهاب قابل توجه است. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش و کاهش فراوانی روزهای توأم با گردوغبار در ایستگاه‌ها هماهنگ با افزایش و کاهش سرعت و جهت باد بوده است. بنابراین، کاهش سرعت باد در مهار رخداد گردوغبار کارساز است.

میانگین دما از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ بیشترین اندازه تغییرات را برای ایستگاه‌های دزفول (روند کاهشی) و سرپل ذهاب (روند افزایشی) نشان می‌دهد. به دیگر سخن، با نگرش به تغییرات رخ داده طی سال‌های اخیر، دستاورد کاهش میانگین دما و بارش در ایستگاه‌های آبادان، کنگاور، کرمانشاه و دزفول و افزایش میانگین این فراسنج‌ها در ایستگاه‌های اهواز، بستان، رامهرمز، سرپل ذهاب و اسلام‌آباد غرب می‌تواند به صورت تغییر اقلیم و خشک‌سالی باشد. نم نسبی هم در ایستگاه‌ها به جز ایستگاه‌های کرمانشاه و دزفول با صعود در روند همراه هست که می‌تواند فراهم‌کننده روانش نم از پهنه‌های آبی به خشکی‌ها باشد. این یافته‌های حاصل‌شده بیان می‌کنند که شیوه‌های رایج می‌توانند کلیات جریان را پیش‌بینی نمایند؛ ولی برای رسیدن به ریز تغییرات داده‌ها شاید به کارگیری روش سن بسیار کارا باشد.

نتایج بررسی روند تغییرات گردوغبار با آزمون تخمین گر شیب سن، نمایش داد بیشترین مقدار شیب مثبت خط روند دربرگیرنده ایستگاه‌های بستان و سرپل ذهاب است. به عبارتی، ۸۵ درصد ایستگاه‌ها روند مثبت در سطح ۵ درصد و ۱۵ درصد ایستگاه‌ها روند منفی را در این سطح داشته‌اند. شدیدترین جریان‌های منفی برای جهت باد در ایستگاه آبادان با آماره Z برابر با ۱- می‌باشد. در مقابل شدیدترین روند صعودی برای جهت باد در سرپل ذهاب و مسجدسلیمان به ترتیب با مقدار Z برابر با ۵/۸ و ۲/۸ قابل مشاهده است (جدول ۱). سطح اهمیت این یافته با روند بین سالانه برای آزمون من - کندال تقریباً مطابقت دارد.

جدول ۱: روند شش فراسنج اقلیمی در طول دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۲۳ برای ایستگاه‌های منتخب غرب ایران. منبع: نگارندگان

آماره من-کندال Z						شیب سن					
سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار	سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار
-۰/۰۳	-۱/۰۰	-۰/۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۹	-۰/۱۱	-۰/۰۳	-۱/۰۰	-۰/۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۹	-۰/۱۱
۰/۰۱	۱/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۰۱	۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۰۱	۱/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۰۱	۰/۳۱	۰/۱۲
۰/۱۰	۳/۰۰	۰/۲۹	۰/۰۰۱	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۱۰	۳/۰۰	۰/۲۹	۰/۰۰۱	۰/۴۴	۰/۳۱
-۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۱۷	-۰/۰۴	-۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۱۷	-۰/۰۴
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۰۱	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۰۱	۰/۲۲	۰/۰۳
۰/۰۷	۲/۸	۰/۴۴	۰/۰۰۱	۰/۶۱	۰/۲۰	۰/۰۷	۲/۸	۰/۴۴	۰/۰۰۱	۰/۶۱	۰/۲۰
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۰۳	۱/۴۳	۰/۱۲	۰/۰۰۱	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۱/۴۳	۰/۱۲	۰/۰۰۱	۰/۲۵	۰/۰۶
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۱۶	۵/۸۱	۰/۵۱	۰/۰۰۱	۰/۳۰	۳/۱۹*	۰/۱۶	۵/۸۱	۰/۵۱	۰/۰۰۱	۰/۳۰	۳/۱۹*
۰/۰۷	۲/۸	۰/۴۴	۰/۰۰۱	۰/۶۱	۰/۲۰	۰/۰۷	۲/۸	۰/۴۴	۰/۰۰۱	۰/۶۱	۰/۲۰

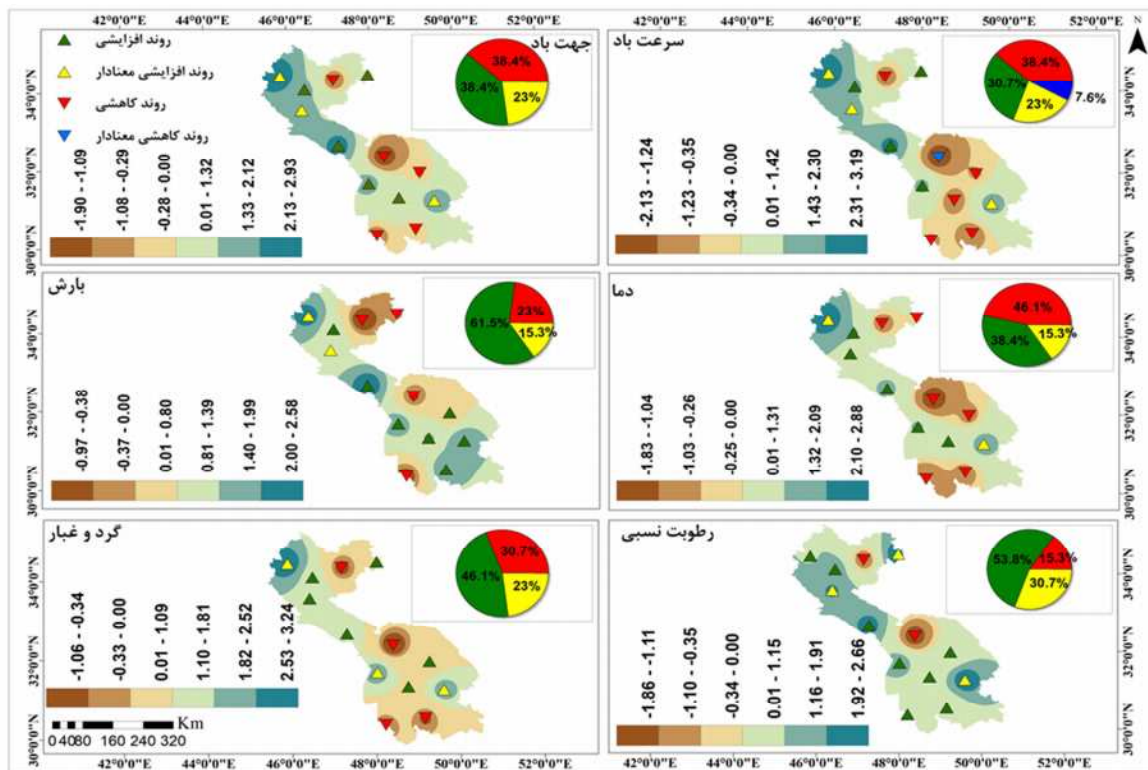


شکل ۳: تغییرات سالانه فراوانی روزهای توأم با گردوغبار در ایستگاه‌های غرب ایران از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳. منبع: نگارندگان

تغییرات مکانی فراسنج‌های اقلیمی

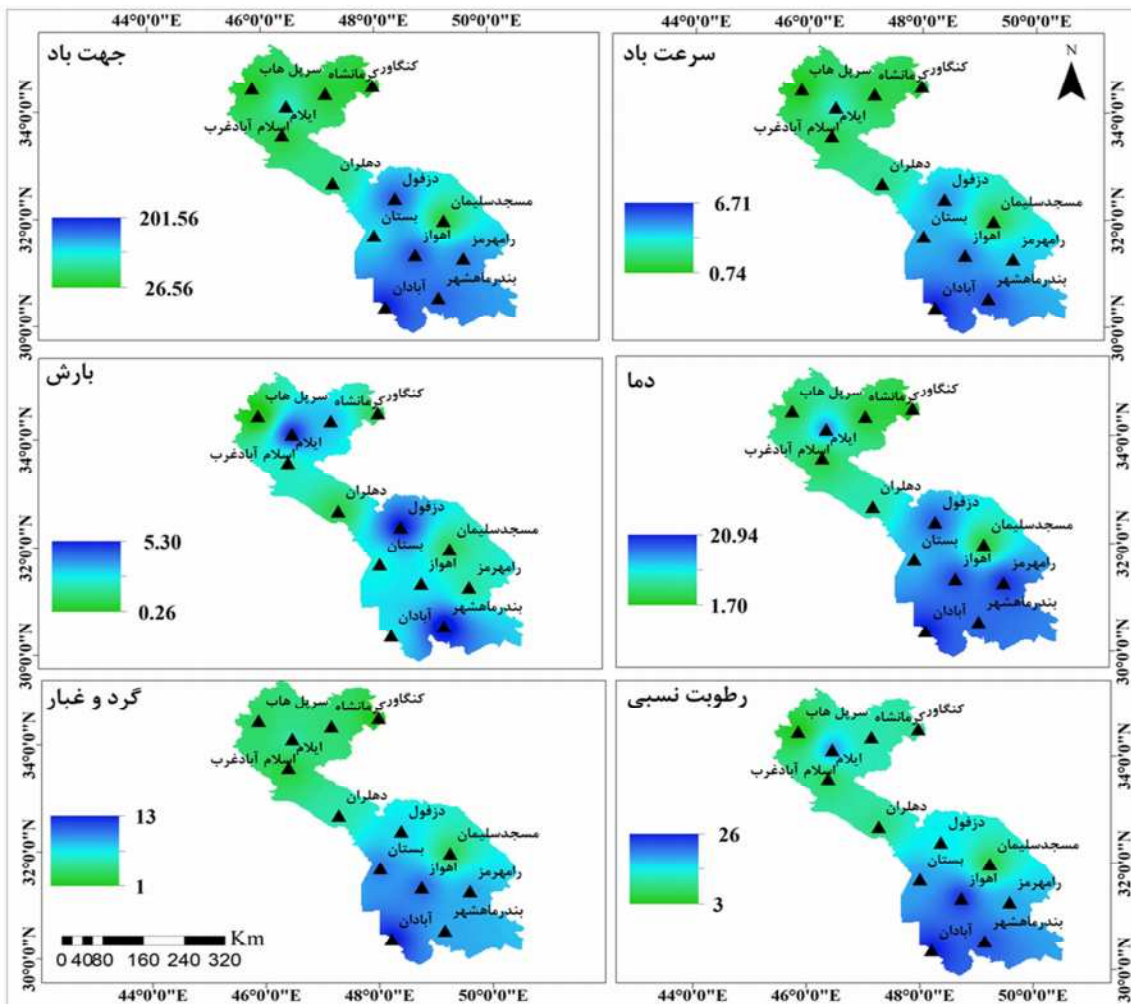
شکل (۴) روند و توزیع فضایی فراسنج‌های اقلیمی در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب را از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ نمایش می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود، از نظر سرعت باد، مناطق با تنوع بالا در ایستگاه‌های استان خوزستان متمرکز شده‌اند. در حالت کلی، ۶۱/۴ درصد ایستگاه‌ها (۷ مورد) روند افزایشی در سرعت باد داشته‌اند که از این مقدار حدود ۳۸/۴ درصد بدون معنی‌داری بوده، اما همبستگی معنادار در ۲۳ درصد مساحت باقیمانده در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد قابل‌ملاحظه است. افزون بر آن، در ۵ ایستگاه دیگر جریان روند در جهت نزولی بوده و این دگرگونی‌های پدید آمده در ۳۰/۷ درصد مساحت فاقد معناداری و در ۷/۶ درصد پهنه معناداری را در سطح اطمینان

۹۵ درصد نمایش می‌دهد. جریان صعودی برای فراسنج جهت باد در منطقه شامل ۳۸/۴ درصد بوده و برابر با همین مقدار نیز سیر نزولی را سپری کرده است؛ با این تفاوت که روند نزولی در هیچ ایستگاهی با نرخ معناداری خاصی همراه نبوده، درحالی‌که ۲۳ درصد مساحت پهنه سیر صعودی و معنادار را تجربه داشته‌اند. در بررسی تغییرات دما روند کاهشی مورد توجه، اما بدون معناداری برای شش ایستگاه (۴۶/۱ درصد) قابل‌مشاهده است. درحالی‌که ۵۳/۷ درصد ایستگاه‌ها هم روند مثبتی را داشته‌اند که از این میزان تنها ۱۵/۳ درصد در سطح اطمینان ۹۵ (رامهرمز) و ۹۹ درصد (سرپل ذهاب) معنادار بوده‌اند. بر پایه این یافته‌های آماری، نوسانات صعودی در فراسنجهای اقلیمی سبب ازدیاد فراوانی رویدادهای خشک‌سالی، گرما و درنهایت منجر به ایجاد شرایط خشک‌تر می‌شود. در بیشتر ایستگاه‌های جنوبی پهنه موردپژوهش احتمال روند صعودی در تغییرات مکانی پارامتر دما و بارش بیشتر است و افزایش دمای زیاد در آن‌ها گواه رخداد تغییر اقلیم بیشتر در منطقه و ظهور جنبه‌های ناشناخته فراوان است. جهت افزایشی پارامتر بارش و رطوبت ایستگاه‌ها، حدود ۶۱/۵ درصد از مساحت پهنه را برای بارش و حدود ۵۳/۸ درصد را برای رطوبت نسبی در بر می‌گیرد. با این وجود سیر کاهشی برابر با ۲۳ درصد از مساحت گستره در بارش و ۱۵/۳ درصد برای رطوبت بوده است. روند صعودی فراوانی روزهای توأم با گردوغبار در ۴۶/۱ درصد ایستگاه‌ها متمرکز شده است که از این میزان حدود ۲۳ درصد ایستگاه‌ها با معناداری همراه بوده و باین‌حال در ۳۰/۷ درصد مساحت پهنه مورد پژوهش جهت نزولی هیچ‌گونه معناداری خاصی را نمایش نداده است. در حالت کلی، می‌توان گفت که همه متغیرها در پهنه مورد پژوهش از الگوی افزایشی بیشتری نسبت به جریان کاهشی پیروی می‌کنند.



شکل ۴: توزیع فضایی روند تغییرات سالانه فراسنجهای اقلیمی. منبع: نگارندگان

شکل ۵ ویژگی، توزیع و پراکنش فضایی میانگین مقادیر سالانه فراسنج‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با شکل در پارامترهای فراوانی گردوغبار، حداکثر سرعت و جهت باد هماهنگ با عرض جغرافیایی افزایش از شمال به جنوب کاملاً آشکار است. به بیان دیگر، ایستگاه‌های آبادان و اهواز بالاترین میانگین سرعت باد را با ۶/۷ متر بر ثانیه و تعداد ۱۳ روز گردوغبار به خود اختصاص داده‌اند. این ایستگاه‌ها در دما و رطوبت نسبی نیز با میانگین دمای ۲۰/۹ درجه سانتی‌گراد و ۲۶ درصد رطوبت از دیگر ایستگاه‌ها سبقت گرفته‌اند. در مقابل ایستگاه‌های واقع در استان کرمانشاه کمترین میانگین را شامل می‌شوند، به گونه‌ای که میانگین دما و رطوبت نسبی در اسلام‌آباد غرب و سرپل ذهاب به ترتیب برابر با ۱/۷ درجه سانتی‌گراد و ۳ درصد می‌باشد. اما میزان بارش علاوه بر قسمت‌های جنوبی در بیشتر قسمت‌های شمالی هم میانگین بالاتری را نسبت به پهنه‌های جنوب شرقی و شمال غربی نمایش می‌دهد. بر پایه یافته‌ها می‌توان گفت که میانگین تمامی پارامترها از جنوب به سمت شمال در حال کاهش بوده است و از میان همه متغیرها سرعت و جهت باد سازوکاری ویژه با فراوانی رخداد گردوغبار داشته است.



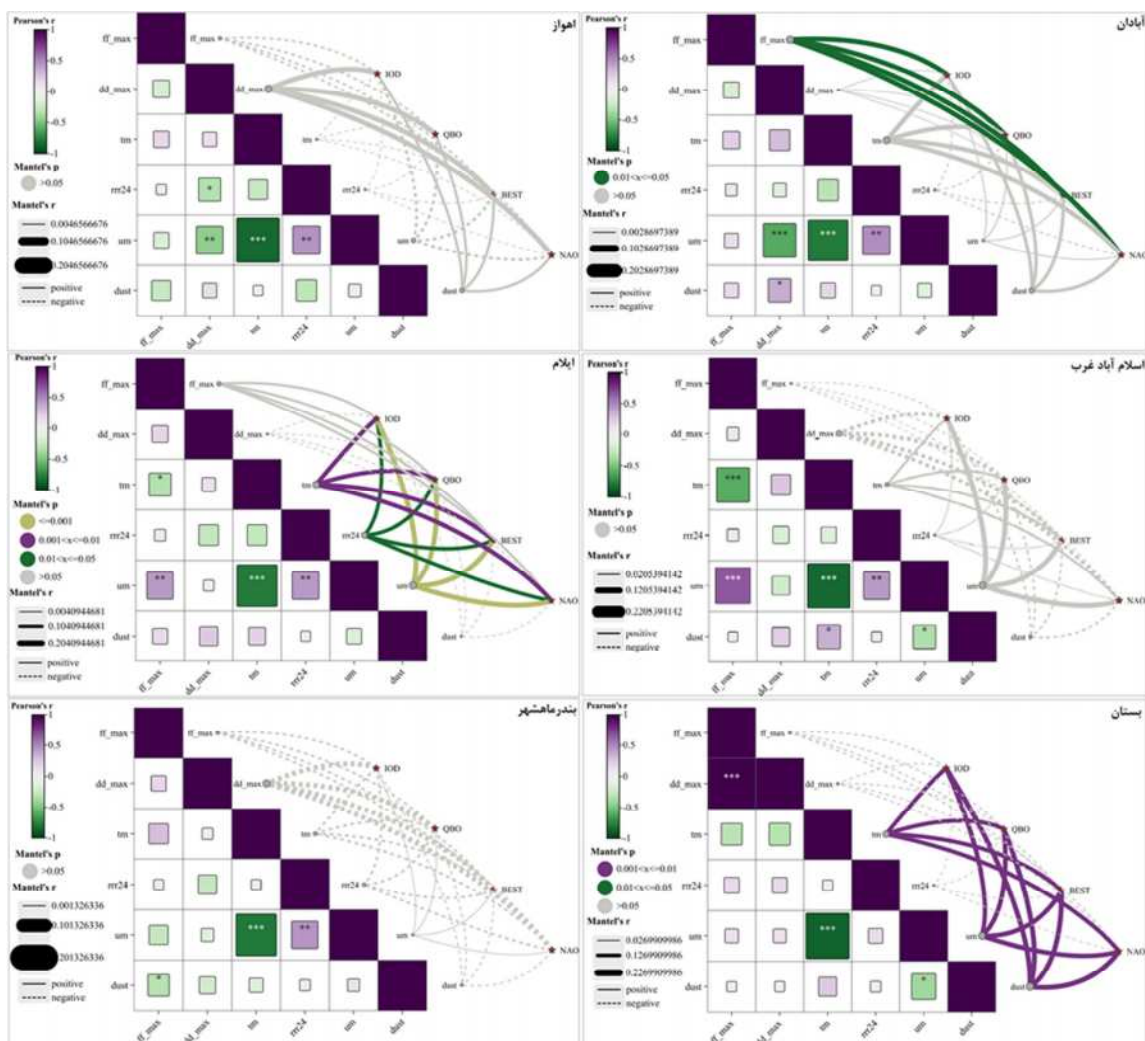
شکل ۵: توزیع مکانی میانگین سالانه فراسنج‌های اقلیمی. منبع: نگارندگان

همبستگی بین فراسنج‌های اقلیمی با الگوهای پیوند از دور

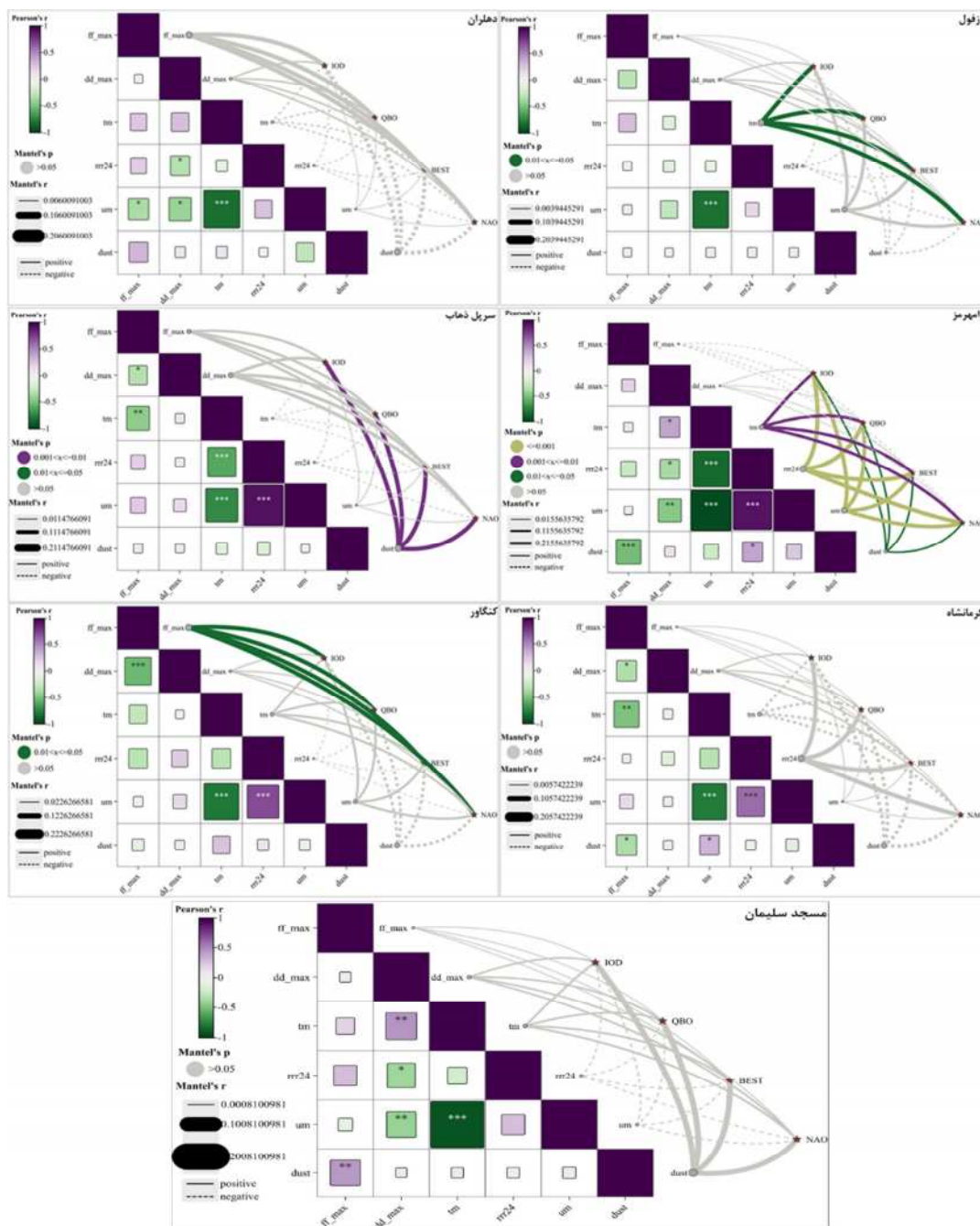
برنامه‌ریزی در زمینه مدیریت بحران‌ها نیازمند داشتن مهارت کافی در آن است. بسیاری از این مهارت‌ها بر اساس سیگنال‌های پیوند از دور و الگوهای گردشی قابل‌پیش‌بینی برآمده از آن‌ها قابل‌اجرا است و این شناخت همواره با شیوه‌های بسیاری در حال تکامل هست. در شکل‌های ۶ و ۷، نیمه سمت راست شکل، همبستگی پیرسون بین فراسنج‌های اقلیمی و نیمه چپ نیز میزان ارتباط بین این فراسنج‌ها و چهار الگوی پیوند از دور بر مبنای آزمون منتل است. پایه‌ریزی این آزمون برای کشف اثرگذاری بیشتر یک پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر بوده است. یادآور می‌شود که خط‌چین‌ها ارتباط منفی و خطوط صاف ارتباط مثبت را بیان می‌کنند. تجزیه و تحلیل همبستگی میان فراسنج‌ها بر مبنای پیرسون، برای همه ایستگاه‌ها بیشترین مقادیر همبستگی را بین رطوبت نسبی با دما برآورد کرده است که با ضرایب همبستگی معکوس بین ۰/۷۲ در سرپل ذهاب تا ۰/۹۶ در رامهرمز همراه بوده و این ارتباط در تمامی ایستگاه‌ها در سطح اطمینان ۰/۰۱ درصد بسیار معنی‌دار است که ارمغان این نوسان محیطی خشک‌سالی، گسترش بیابان‌زایی و تغییر در پوشش گیاهی زمین است. برون‌داد بررسی همبستگی بین فراوانی گردوغبار با سایر فراسنج‌های اقلیمی، برای ایستگاه‌های آبادان و ایلام بیشترین مقدار همبستگی را برای جهت باد به‌ترتیب با مقدار ۰/۳۶ و ۰/۲۳ نشان می‌دهد که این مقدار همبستگی به‌صورت مستقیم بوده و تنها در آبادان در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد معنادار است. در اسلام‌آباد غرب و بستان نیز بیشترین ضرایب همبستگی بین گردوغبار با دما (ارتباط مثبت) و رطوبت (ارتباط منفی) قابل مشاهده است که در اسلام‌آباد غرب هر دو پارامتر و در بستان پارامتر رطوبت در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد معنادار است. در بندر ماهشهر گردوغبار با سرعت باد و در اهواز و سرپل ذهاب علاوه بر سرعت باد با بارش نیز بیشترین مقدار ضرایب همبستگی معکوس مشاهده می‌شود که در بندر ماهشهر با معناداری در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد برآورد شده است. در حالی که ایستگاه‌های دهلران، مسجدسلیمان و رامهرمز بین گردوغبار با سرعت باد بیشترین همبستگی را نشان می‌دهند که مقدار آن در مسجدسلیمان با معناداری خوب در سطح اطمینان ۰/۰۱ درصد بوده و در دهلران ارتباط به‌صورت مثبت و در رامهرمز به شکل منفی و برابر با ۰/۵۲ می‌باشد. در ایستگاه‌های کرمانشاه و کنگاور بیشترین همبستگی با سرعت باد به‌صورت معکوس و دما به‌صورت مستقیم وجود دارد که در کرمانشاه برای سرعت باد و دما به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۳۳ بوده و در سطح اطمینان ۰/۰۵ معنی‌دار است و در کنگاور به‌ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۲۷ و بدون معنادار بوده است. این در حالی است که رخداد گردوغبار ایستگاه دزفول با همه فراسنج‌ها همبستگی بسیار ضعیفی را برآورد کرده است.

نتایج آزمون منتل نشان می‌دهد که ایستگاه‌هایی که بیشترین مقدار همبستگی (خطوط و منحنی پررنگ‌تر نسبت به سایر پارامترها) را با متغیر سرعت باد و چهار نمایه پیوند از دور BEST، IOD، QBO و NAO دارند شامل آبادان، دهلران، سرپل ذهاب و کنگاور است که این ارتباط به‌صورت مستقیم بوده و در آبادان و کنگاور در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد (رنگ سبز) معنادار است. بنابراین، در این ایستگاه‌ها اثرگذاری الگوهای پیوند از دور بر سرعت باد به‌وضوح مشخص است. جهت باد نیز بیشترین مقدار ضرایب همبستگی را برای ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، بندر ماهشهر به‌صورت معکوس و اهواز و سرپل ذهاب به‌صورت مستقیم و بدون معناداری نشان می‌دهد. پارامتر دما در ایستگاه‌های آبادان، ایلام، بستان، رامهرمز و دزفول همبستگی مستقیم دارد که در ایلام و بستان در سطح اطمینان ۰/۰۱ درصد (رنگ بنفش) و در رامهرمز و دزفول در سطح اطمینان ۰/۰۵ درصد معنادار است که نشان می‌دهد با افزایش فعالیت نمایه‌های یادشده بر میزان درجه حرارت افزوده می‌شود. برای پارامتر بارش، بیشترین ضرایب

همبستگی به شکل مثبت در ایستگاه‌های ایلام، رامهرمز و کرمانشاه مشاهده می‌شود که در ایلام و رامهرمز به ترتیب با سطح اطمینان ۰/۰۵ و ۰/۰۰۱ (رنگ زرد) درصد معنی‌دار است. رطوبت نسبی در اسلام‌آباد غرب، دزفول، ایلام، رامهرمز و بستان بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی را به خود اختصاص داده‌اند که این ضرایب به صورت مثبت بوده و در ایلام و رامهرمز در سطح ۰/۰۰۱ درصد و بستان در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. بین فراوانی رخداد طوفان‌های گردوغبار با الگوهای پیوند از دور، بیشترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، مسجدسلیمان، بستان، رامهرمز و سرپل ذهاب، کرمانشاه، کنگاور و دهلران وجود دارد که این ارتباط در کرمانشاه، کنگاور و دهلران به صورت معکوس بوده و در باقی ایستگاه‌ها مستقیم است و در سرپل ذهاب در سطح اطمینان ۰/۰۱ و رامهرمز در سطح ۰/۰۵ درصد معنادار است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوهای پیوند از دور در بین این فراسنج‌ها بیشترین تأثیر را بر دگرگونی فراوانی گردوغبار داشته‌اند و تداعی بخش این موضوع است که افزایش و کاهش فعالیت این الگوها به گونه‌ای معنی‌دار بر تعداد روزهای گردوغبار اثر گذاشته است.



شکل ۶: تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون بین فراسنج‌های اقلیمی و تجزیه و تحلیل آزمون Mantel بین فراسنج‌های اقلیمی و نمایه‌های پیوند از دور. علامت‌های "+++", "++", "+" و "****" معنی‌داری را به ترتیب در سطح $p < 0/05$, $p < 0/01$ و $p < 0/001$ نشان می‌دهد. منبع: نگارندگان



شکل ۷: تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون بین فراسنجهای اقلیمی و تجزیه و تحلیل آزمون Mantel بین فراسنجهای اقلیمی و نمایه‌های پیوند از دور. علامت‌های "***"، "**"، و "*" معنی‌داری را به ترتیب در سطح $p < 0/05$ ، $p < 0/01$ و $p < 0/001$ نشان می‌دهد. منبع: نگارندگان

تأثیر نمایه‌های پیوند از دور در فراسنجهای اقلیمی

برای توضیح بیشتر در مورد اینکه کدام نمایه پیوند از دور بر فراسنجهای اقلیمی اثر دارند، از نمایه آشکارساز ژنوتکتور استفاده کردیم و در شکل ۸ برای یک نمونه از فراسنجه‌ها (فراوانی روزهای توأم با گردوغبار) ارتباط بین فاکتورها با فراسنجه‌ها آورده شده است. با توجه به نتایج تشخیص فاکتورهای تأثیر در ایستگاه‌های منتخب، عوامل

کلیدی مؤثر بر ستون متغیرهای (دما، بارش، رطوبت، گردوغبار، سرعت و جهت باد و گرد) عبارت‌اند از فاکتورهای BEST، QBO، NAO که در جدول‌های (۲ تا ۵) نشان داده شده است. برحسب نتایج حاصله نمایه BEST تنها در فراوانی گردوغبار ایستگاه‌های اهواز و مسجدسلیمان و پارامتر سرعت باد در کنگاور بیشترین مشارکت را داشته است که از نظر آماری برای کنگاور و بستان در سطح اطمینان ۰/۰۵ و برای اهواز در سطح اطمینان ۰/۰۱ معنادار هستند. نمایه NAO نیز در آبادان تأثیر قابل‌توجهی بر سرعت باد و فراوانی گردوغبار ایستگاه مسجدسلیمان در سطح اطمینان ۰/۰۰۱ داشته و در کرمانشاه و بندر ماهشهر در سطح اطمینان ۰/۰۱ و ۰/۰۵ تأثیرات معنادار بر الگوهای فضایی گردوغبار داشته است. نمایه QBO نسبت به دو نمایه دیگر تأثیرات بیشتری بر فراسنج‌های اقلیمی ایستگاه‌ها داشته که تأثیرات آن بر روی گردوغبار دربرگیرنده ایستگاه‌های آبادان، بستان و مسجدسلیمان با معناداری در سطح اطمینان ۰/۰۰۱ می‌باشد. این عامل همچنین بر روی جهت باد اهواز و بستان و گردوغبار بستان و بندر ماهشهر در سطح اطمینان ۰/۰۱ تأثیرگذار بوده است.

با توجه به نتایج حاصل از تست آشکارساز عامل، بدیهی است که در بین چهار فاکتور یادشده، فاکتوری که بیشترین تأثیر را بر فراسنج‌ها دارد و مشارکت‌کننده اصلی است عامل مستقل IOD می‌باشد، به‌گونه‌ای که این عامل در ایلام و اسلام‌آباد غرب تأثیر قابل‌توجهی بر همه متغیرهای وابسته داشته است. همچنین، بر پارامتر بارش در بستان و مسجدسلیمان و رخداد گردوغبار ایستگاه‌های رامهرمز و کرمانشاه با معناداری در سطح اطمینان ۰/۰۵ و کنگاور در سطح اطمینان ۰/۰۰۱ اثرگذار بوده است. بنابراین، در این عرض جغرافیایی، دگرگونی فراسنج‌ها تا حد زیادی می‌تواند برآمده از دخالت IOD باشد.

جدول ۲: تأثیر نمایه BEST بر فراسنج‌های مختلف مورد بررسی. منبع: نگارندگان

q – statistic value							
ایستگاه		سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار
X1	آبادان	۰/۹۹	۱	۱	۰/۸۰*	۱	۰/۹۵**
X2	اهواز	۱	۰/۹۸	۱	۰/۷۸	۱	۰/۹۹
X3	بستان	۰/۹۸	۰/۹۶	۱	۰/۵۲	۱	۰/۸۹*
X4	بندر ماهشهر	۱	۰/۹۹	۱	۰/۶۴	۱	۰/۹۸
X5	ایلام	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۱	۰/۳۰	۰/۶۱	۰/۵۱
X6	اسلام‌آباد غرب	۰/۶۲	۰/۵۰	۰/۶۳	۰/۳۷	۰/۶۳	۰/۴۲
X7	دزفول	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۴۳	۰/۶۸	۰/۶۳
X8	رامهرمز	۰/۳۰	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۱۴	۰/۴۸	۰/۱۷
X9	دهلران	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۶۳
X10	کرمانشاه	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۶۷	۰/۸۸	۰/۶۹
X11	کنگاور	۰/۸۳*	۰/۶۷	۰/۹۲	۰/۵۹	۰/۹۲	۰/۶۷
X12	سرپل ذهاب	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۴۲
X13	مسجدسلیمان	۰/۹۹	۱	۱	۰/۵۷	۱	۰/۹۹

*, ** و *** معنی‌داری به ترتیب در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ هستند.

جدول ۳: تأثیر نمایه NAO بر فراسنجهای مختلف مورد بررسی. منبع: نگارندگان

q –statistic value						
ایستگاه	سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار
آبادان	۰/۹۹	۱	۱	۰/۸۴	۱	۰/۹۹
اهواز	۱	۰/۹۸	۱	۰/۶۲	۱	۰/۹۹
بستان	۰/۹۷	۰/۹۵	۱	۰/۷۳	۱	۰/۹۸
بندر ماهشهر	۱	۰/۹۸	۱	۰/۷۷	۱	۰/۹۹**
ایلام	۰/۸۰	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۲۳	۰/۸۱	۰/۵۱
اسلام آباد غرب	۰/۵۰	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۳۱	۰/۵۰	۰/۳۵
دزفول	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۵۰
رامهرمز	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۵۴	۰/۴۴
دهلران	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۶۶	۰/۳۷	۰/۶۶	۰/۶۳
کرمانشاه	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۸۹	۰/۷۱*
کنگاور	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۹۲	۰/۳۸	۰/۹۲	۰/۵۸
سرپل ذهاب	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۳۰	۰/۲۷
مسجد سلیمان	۰/۸۰*	۱	۱	۰/۸۱	۱	۰/۹۷***

*، ** و *** معنی داری به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ هستند.

جدول ۴: تأثیر نمایه QBO بر فراسنجهای مختلف مورد بررسی. منبع: نگارندگان

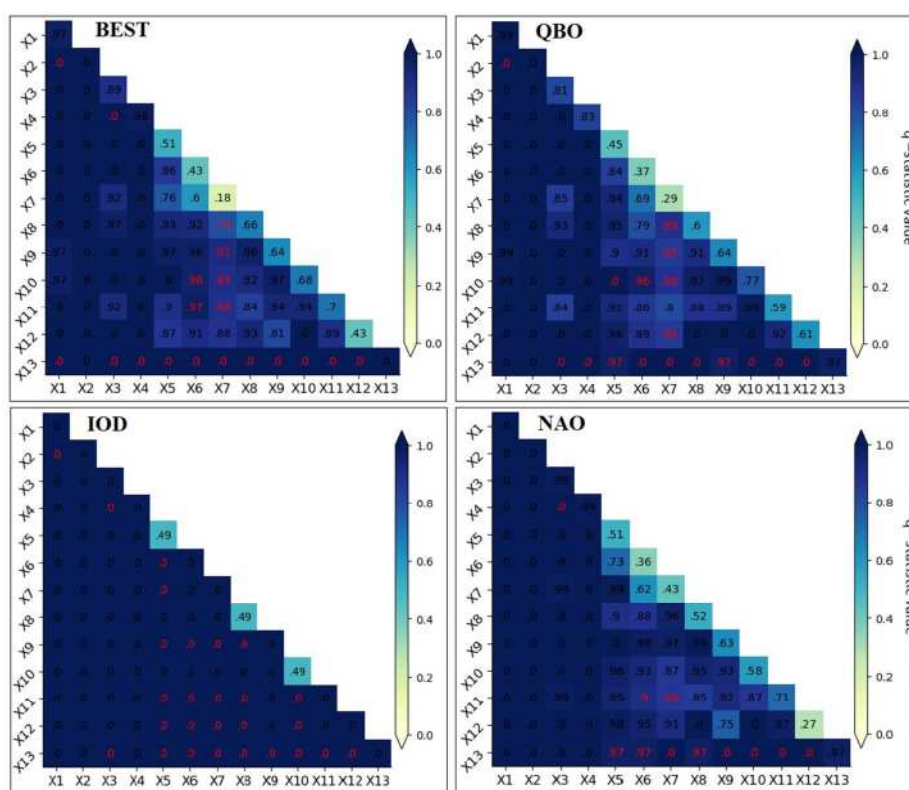
q –statistic value						
ایستگاه	سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار
آبادان	۰/۹۱***	۱	۱	۰/۵۲	۱	۰/۹۸
اهواز	۱	۰/۸۸**	۱	۰/۵۸	۱	۰/۹۹
بستان	۰/۹۰***	۰/۸۳**	۱	۰/۳۵	۱	۰/۸۱**
بندر ماهشهر	۱	۰/۹۷	۱	۰/۴۹	۱	۰/۸۳**
ایلام	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۱۸	۰/۶۳	۰/۴۵
اسلام آباد غرب	۰/۶۴	۰/۵	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۶۴	۰/۳۷
دزفول	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۶۷	۰/۶۰
رامهرمز	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۲۹
دهلران	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۴۱	۰/۷۴	۰/۶۴
کرمانشاه	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۷۸	۰/۴۱	۰/۷۸	۰/۵۹
کنگاور	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۴۹	۰/۹۶	۰/۷۶
سرپل ذهاب	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۶۱
مسجد سلیمان	۰/۹۷***	۱	۱	۰/۴۶	۱	۰/۹۷

*، ** و *** معنی داری به ترتیب در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ هستند.

جدول ۵: تأثیر نمایه IOD بر فراسنج‌های مختلف مورد بررسی. منبع: نگارندگان

q-statistic value						
ایستگاه	سرعت باد	جهت باد	دما	بارش	رطوبت	گرد و غبار
آبادان	۱	۱	۱	۰/۹۹	۱	۰/۸۵
اهواز	۱	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۱	۰/۸۶
بستان	۱	۰/۹۹	۱	۰/۹۹*	۱	۰/۹۹
بندر ماهشهر	۱	۱	۱	۰/۹۹	۱	۰/۹۸
ایلام	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*
اسلام‌آباد غرب	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*	۰/۹۹*
دزفول	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۴۸	۰/۴۸
رامهرمز	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹*
دهلران	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
کرمانشاه	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹*	۰/۹۹	۰/۹۹*
کنگاور	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹***
سرپل ذهاب	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
مسجدسلیمان	۱	۱	۱	۰/۹۹*	۱	۰/۹۸

*, **, و *** معنی‌داری به ترتیب در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ هستند.



شکل ۸: تأثیر نمایه‌های پیوند از دور بر فراوانی روزهای توأم با گردوغبار ایستگاه‌های نیمه غرب ایران. منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

فراسنجه‌های اقلیمی نه تنها نقش مهمی در تحلیل وقایع اقلیمی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای دارند، بلکه به تصمیم‌گیران در ارزیابی اثرات بخش‌های متنوع نیز کمک می‌کنند. بررسی و تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش در رابطه با فراسنجه‌های اقلیمی، علاوه بر اینکه می‌تواند حاکی از تابعیت رفتار آن‌ها از تأثیرات انسانی، موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی و ناهم‌واری منطقه غرب باشد، به‌تازگی تحت تأثیر شدید الگوهای پیوند از دور نیز قرار گرفته است. نتایج تعیین روند فراسنجه‌های دما، بارش، رطوبت نسبی، رخداد گردوغبار، حداکثر سرعت و جهت باد برای دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۲۳) نشان داد که تغییرات ضریب همبستگی در طول دوره آماری دارای نوسان زیادی بوده است و روند همبستگی رخداد گردوغبار در بسیاری از ایستگاه‌ها با جهت تغییرات فراسنجه‌های اقلیمی تقریباً همسو است که بیانگر هم‌راستا بودن دگرگونی‌های اقلیمی با این نوسانات در ایستگاه‌های منتخب غرب ایران است و این تغییرات بیانگر تغییر اقلیم در منطقه است.

نتایج تعیین روند با آزمون ناپارامتری شیب سن نشان داد که متغیر بارش به‌عنوان یک فاکتور و منبع تأمین آب در ایستگاه‌های کنگاور، کرمانشاه و دزفول در این پهنه جغرافیایی روند کاهشی دارد که از پیامدهای آن می‌توان به کاهش ذخیره منابع آب و کاهش آب‌دهی رودخانه‌ها اشاره نمود. وجود روند صعودی در پارامتر دما برای ۵۳ درصد از گستره مورد پژوهش می‌تواند سبب افزایش تبخیر و تعرق، خشک‌سالی و به‌دنبال آن کاهش منابع آب شود و به آب‌های زیرزمینی فشار وارد بیاورد. سرعت باد به‌عنوان مؤلفه‌ای بوده که بیشترین ارتباط معنادار را در فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار داشته و در ۹۶/۲ درصد از مساحت پهنه مورد بررسی بیشترین میزان ضرایب همبستگی را با رخداد گردوغبار شامل شده است و با نتایج پژوهش چوبین و همکاران (۱۴۰۱) در استان آذربایجان غربی که نتیجه گرفتند ارتباط بین سرعت باد و AOD در حدود ۶۴ درصد هست تقریباً همساز است و بعد از آن دمای بالا در ۳۰/۷ درصد از مساحت محدوده بیشترین نقش را در افزایش وقوع فراوانی گردوغبار داشته است. با نتایج پژوهش خسروشاهی و همکاران (۱۴۰۲) که نتیجه گرفتند روزهای گردوغباری در اقلیم‌های نیمه‌خشک تا فراخشک ایران به‌دنبال افزایش دما روند افزایشی دارد و همچنین، نتایج پژوهش بالویی و همکاران (۱۴۰۳) که بیان کردند دما روند مثبت و رو به افزایش طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در استان خوزستان خواهد داشت، همساز است. در پژوهش پیش رو، کاهش بارندگی هم اثر افزایشی بر گردوغبار گستره غرب ایران داشته و با نتایج پژوهش کاویان و همکاران (۱۴۰۰) که نشان دادند پارامتر بارندگی و دمای حداقل استان خراسان جنوبی در جهت حرکت به سمت خشک‌سالی بوده است و با نتایج پژوهش متولی زاده نائینی و مدرس (۱۴۰۰) برای مناطق خشک ایران تقریباً مشابهت و همسویی دارد. از آنجاکه اقلیم خود از پارامترهای متعددی اثرپذیر است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی نمی‌تواند فقط منتج از تعدادی مؤلفه خاص باشد و این تأثیر فراسنجه‌های گوناگون است که تغییرات اقلیمی یک منطقه را خلق می‌کنند. همچنین، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در تدوین استراتژی‌ها و اقدامات مدیریت منابع آب پایدار، کاهش و مهار خطرات گردوغبار، خشک‌سالی و سیل کمک نماید.

منابع

آروین، عباسعلی؛ قانقرمه، عبدالعظیم؛ حاجی‌پور، داور؛ حیدری، مهران. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات برخی عناصر اقلیمی در استان چهارمحال و بختیاری. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶(۴۱)، ۱۵۳-۱۷۶. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2658-fa.html>

- امیدوار، کمال؛ جاویدنیا، مرتضی؛ محمدی راوری، فروغ. (۱۴۰۳). واکاوی رابطه بین طوفان‌های گردوغبار با شاخص‌های پیوند از دور در فصول مختلف طی دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۱۷ در استان کرمان. *مجله نیوار*، ۴۸ (۱۲۶-۱۲۷)، ۱-۱۷. <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.437613.1280>
- انصاری قوجقار، محمد؛ عراقی‌نژاد، شهاب؛ بذرافشان، جواد؛ هورفر، عبدالحسین. (۱۳۹۸). بررسی روند فراوانی روزهای همراه با توفان‌های گردوغبار و ارتباط آن با عناصر اقلیمی (مطالعه موردی: استان لرستان). *مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۵۰ (۹)، ۲۳۸۹-۲۳۰۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.259959.667940>
- بالویی، فاطمه؛ کابلی‌زاده، مصطفی؛ محمدی، شاهین. (۱۴۰۳). پایش تغییرات زمانی - مکانی خشک‌سالی هواشناسی و تحلیل روند متغیرهای اقلیمی در استان خوزستان بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳ (۴۰)، ۷۳-۹۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.46574.1987>
- جبالبارزی، بهاره؛ زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن؛ برخوری، سعید. (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات زمانی - مکانی عناصر اقلیمی مؤثر بر وقوع پدیده گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: تالاب جازموریان). *مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۳ (۴)، ۱۰۹-۱۲۹. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-806-fa.html>
- جمالی، محمد؛ گوهری، سیدعلیرضا؛ اخوان صراف، غزل. (۱۴۰۳). ارزیابی مکانی و زمانی روند شاخص‌های حدی دما و بارش ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۳)، ۷۴۳-۷۵۲. <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374814.1156>
- چوبین، بهرام؛ ساجدی حسینی، فرزانه؛ رحمتی، امید؛ مهدی زاده یوشانلوئی، منصور؛ جلالی، محمد. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات زمانی و مکانی تعداد روزهای رخداد گردوغبار در استان آذربایجان غربی، تعیین عوامل اثرگذار و شناسایی منشأ. *مجله مدیریت بیابان*، ۱۰ (۲)، ۷۱-۸۶. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.550729.1378>
- حسنوند، زیبا؛ یاراحمدی، داریوش؛ میرهاشمی، حمید. (۱۴۰۱). تحلیل روند تغییرات سری زمانی بیشینه بارش روزانه و سالانه حوضه آبریز کرخه و دز. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱ (۳۲)، ۱۴۹-۱۶۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38193.1788>
- خسروشاهی، محمد؛ سعیدی‌فر، زهرا؛ شهبازی، خسرو؛ زندی‌فر، سمیرا؛ لطفی‌نسب اصل، سکینه؛ گوهردوست، آزاده؛ درگاهیان، فاطمه؛ نعیمی، مریم؛ انصافی‌مقدم، طاهره؛ کاشی زنوزی، لیلا؛ ابراهیمی خوسفی، زهره؛ خداقلی، مرتضی. (۱۴۰۲). بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی روزهای گردوغباری و تعیین سهم عناصر اقلیمی بر گسترش آن در اقلیم‌های نیمه‌خشک تا فراخشک ایران. *مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۳۰ (۴)، ۵۲۱-۵۴۱. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2024.130966>
- خسروی، آمنه؛ آذری، محمود. (۱۴۰۱). تعیین روند زمانی و مکانی و نقطه تغییر دما و بارش در حوضه کشف رود. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۲ (۶۶)، ۲۸۹-۳۰۶. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3335-fa.html>
- ربیعی غفار، زهرا؛ عساکره، حسین؛ خسروی، یونس. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات زمانی - مکانی احتمال وقوع بارش با تداوم‌های مختلف در ایران. *مجله مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی*، ۵ (۲)، ۱-۱۹. <https://doi.org/10.22124/gscaj.2024.24732.1245>
- فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ رجای نجف‌آبادی، سعید. (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیک الگوهای توفان‌های گردوغبار بوشهر از ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ (مطالعه موردی: روز ۵ اسفندماه ۱۳۸۸). *فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۵ (۱۸)، ۱-۱۲.
- قربانی، خلیل؛ برارخان‌پور احمدی، صدیقه. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی در چندک‌های حدی کمینه و بیشینه دما در ایران. *مجله پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*، ۳ (۱۲)، ۵۳-۶۸. <https://doi.org/10.30488/ccr.2023.375498.1107>
- قیصوری، مرتضی؛ سلطانی گردفرامری، سمیه؛ قاسمی، محسن. (۱۳۹۷). بررسی و پیش‌بینی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی بر دبی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گدارخوش). *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۷ (۱۷)، ۱۳۷-۱۵۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.19571.1222>
- کاویان، عطاله؛ شاهدهی، کاکا؛ چمنی، رضا؛ دهقانی، مرتضی. (۱۴۰۰). ارزیابی روند تغییرات زمانی - مکانی متغیرهای اقلیمی استان خراسان جنوبی با استفاده از GIS و تکنیک‌های آماری. *مجله ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۹ (۳۳)، ۵۴-۶۷.
- متولی‌زاده، معین؛ مدرس، رضا. (۱۴۰۰). فراوانی طوفان‌های گردوغبار در ارتباط با تغییرات اقلیمی در منطقه خشک ایران. *مجله علوم آب‌وخاک*، ۲۵ (۴)، ۲۳۹-۲۵۲. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4087-fa.html>
- محمودی، پیمان؛ خسروی، محمود؛ مسعودیان، سیدابوالفضل؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۴). رابطه بین الگوهای پیوند از دور و یخبندان‌های فراگیر ایران. *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۱۳ (۴۰)، ۱۷۵-۱۹۴. <https://doi.org/10.22111/gdij.2015.2105>
- مهدوی، محمد. (۱۳۹۷). هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوازدهم، جلد اول، ۳۴۲.

- مهرابی، شهباز؛ سلطانی، سعید؛ جعفری، رضا. (۱۳۹۴). بررسی رابطه بین پارامترهای اقلیمی و وقوع ریزگردها (مطالعه موردی: استان خوزستان). مجله علوم آب و خاک، ۱۹(۷۱)، ۶۹-۸۱. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2998-fa.html>
- وطن پرست قلعه جوق، فاطمه؛ صلاحی، برومند. (۱۴۰۲). پایش تغییرات طوفان‌های گردوغبار و ارتباط آن‌ها با شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) در ایستگاه‌های منتخب غرب و جنوب غرب ایران. کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۱۱(۲)، ۱۴۹-۱۶۴. <https://doi.org/10.22034/grd.2024.21203.1608>
- وطن پرست قلعه جوق، فاطمه؛ صلاحی، برومند؛ زینالی، بتول. (۱۴۰۳). تحلیل تأثیر هم‌زمان چرخه‌های انسو، دوقطبی اقیانوس هند و نوسان شبه دو ساله بر نوسان طوفان‌های گردوغبار در نیمه غربی ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۹)، ۱۰۹-۱۲۶. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.45793.1966>
- Achakulwisut, L., Mickley, J., Annenberg, S.C. (2018). Drought sensitivity of fine dust in the US Southwest: Implications for air quality and public health under future climate change. *Environmental Research Letters*, 13, pp 1-12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf20>.
- Al-Qadi, T. A., Muslih, K. D., Shiltagh, A.G. (2021). Analysis of Correlation and Coupling between El Niño-Southern Oscillation and Dust Storms in Iraq from 1971 to 2016. *Iraqi Geological Journal*, 54(1E), pp 103-113. <http://dx.doi.org/10.46717/igj.54.1E.9Ms-2021-05-30>.
- Dai, X., Wang, L., Li, X., Gong, J., Cao, Q. (2023). Characteristics of the extreme precipitation and its impacts on ecosystem services in the Wuhan Urban Agglomeration. *Sci. Total Environ*, 864, 161045 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161045>.
- Fengjin, X., Caiping Z., Yaoming, L. (2008). Dust storms evolution in Taklimakan Desert and its correlation with climatic parameters. *Journal of Geographical Sciences*, 18, pp 514-425. <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-008-0415-8>.
- Fengmei, Y., Chongy, E. (2010). Correlation analysis between sand-dust events and meteorological factors in shapotou, Northern China. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 20(3), pp 49-52.
- Gu, Y., Liou, K.N., Chen, W., Liao, H. (2010). Direct climate effect of black carbon in China and its impact on dust storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7). <https://doi.org/10.1029/2009JD013427>.
- Guan, Q., Sun, X., Yang, J., Pan, B., Zhao S., Wang, L. (2017). Dust storms in northern China: long-term spatiotemporal characteristics and climate controls. *Journal of Climate*, 30(17), pp 6683-6700. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0795.1>.
- Gupta, S., Gupta, A., Himanshu, S.K., Singh, R. (2020). Analysis of the Extreme Rainfall Events Over Upper Catchment of Sabarmati River Basin in Western India Using Extreme Precipitation Indices, In *Advances in Water Resources Engineering and Management*. Springer, pp 103-111. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2_8.
- Huang, C., Huang, X., Peng, C., Zhou, Z., Teng, M., Wang, P. (2019). Land use/cover change in the Three Gorges Reservoir Area, China: reconciling the land use conflicts between development and protection. *CATENA*, 175, pp 388-399. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.002>.
- Huang, H., Cui, H., Ge, Q. (2021). Will a nonstationary change in extreme precipitation affect dam security in China? *Journal of Hydrol*, 603, 126859. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126859>.
- Kendall, M. (1975). *Multivariate Analysis*. Charles Griffin.
- Li, N., GU, W. (2004). Threshold value response of soil moisture to dust storms. *Functioning and management*. Cambridge Universe- a case study of Midwestern Inner Mongolia. *Journal of Nat. Disast*, 13(1), pp 44-49.
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrical. Journal of the Econometric Society*, pp 245-259.
- Masatoshi, Y. (2002). Climatology of yellow sand (Asian sand, Asian dust or Kosa) in East Asia. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45, pp 59-70. <https://doi.org/10.1360/ym2002-45-S1-59>.
- Meng, L., Xu, C., Wu, F., He, H. (2022). Microbial co-occurrence networks driven by low abundance microbial taxa during composting dominate lignocellulose degradation. *Sci. Total Environ*, 845, 157197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157197>.
- Mistry, M. N. (2019). A high-resolution global gridded historical dataset of climate extreme indices. *Data*, 4(1), pp 41. <https://doi.org/10.3390/data4010041>.
- Ren, Z., Zhao, H., Mu c, X., Xu, Q., Shi, K., Yang, G. (2024). Spatiotemporal variations of extreme weather events and climate drivers in the Three Gorges Reservoir Area and its surrounding regions from 1960 to 2020. *Atmospheric Research*, 304, 107379. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107379>.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, pp 1379-1389.

- Song, X., Zhang, J., Zou, X., Zhang, C., AghaKouchak, A., Kong, F. (2019). Changes in precipitation extremes in the Beijing metropolitan area during 1960–2012. *Atmos. Res.*, 222, pp 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.02.006>.
- Thiel, H. (1950). A Rank-invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis: Part 3. *Proceeding of Koninklijke Nederland's Academies van Wetenschappen* A. 53, pp 1397-1412.
- Wang, J., Li, X., Christakos, G., Liao, Y., Zhang, T., Gu, X., Zheng, X. (2010). Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the Neural Tube defects study of the Heshun Region, China. *Int. Journal of Geogr. Inf. Sci.*, 24, pp 107–127. <https://doi.org/10.1080/13658810802443457>.
- Wang, J. F., Hu, Y. (2012). Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 33, pp 114–115. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.015>.
- Wang, J. F., Zhang, T. L., Fu, B. J. (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 67, pp 250–256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.052>
- Wang, J., Xu, C. (2017). Geodetector: Principle and perspective. *Acta Geogr. Sin.*, 72, pp 116–134. <http://dx.doi.org/10.11821/dlxb201701010>.
- Wang, L., Chen, S., Zhu, W., Ren, H., Zhang, L., Zhu, L. (2021). Spatiotemporal variations of extreme precipitation and its potential driving factors in China's North-South transition Zone during 1960–2017. *Atmos. Res.*, 252, 105429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105429>.
- Wang, D., Dong, Z., Ling, Z., Jiang, F., Zhu, S., Chen, J. (2022). Spatiotemporal variability of extreme precipitation at different time scales and quantitative analysis of associated driving teleconnection factors: insights from Taihu Basin, China. *Ecol. Indic.*, 142, 109287. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109287>.
- Wei, W., Zou, S., Duan, W., Chen, Y., Li, S., Zhou, Y. (2023). Spatiotemporal variability in extreme precipitation and associated large-scale climate mechanisms in Central Asia from 1950 to 2019. *Journal of Hydrol.*, 620, 129417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129417>.
- Wu, Q., Zuo, Q., Han, C., Ma, J. (2022). Integrated assessment of variation characteristics and driving forces in precipitation and temperature under climate change: a case study of Upper Yellow River basin, China. *Atmos. Res.*, 272, 106156. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106156>.
- Xin, X. (2022). Recent extreme dust storms in Central Asia are associated with tropical Pacific and Arctic teleconnections. *Bibcode*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFM.A55O1314X/abstract>.
- Xu, F., Wang, S., Li, Y., Feng, J. (2024). Synergistic effects of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) on dust activities in North China during the following spring. *Atmos. Chem. Phys.*, 24, pp 10689–10705. <https://doi.org/10.5194/acp-24-10689-2024>.
- Yang, Q., Zhang, P., Li, X., Yang, S., Chao, X., Liu, H., Ba, S. (2023). Distribution patterns and community assembly processes of eukaryotic microorganisms along an altitudinal gradient in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River. *Water Res.*, 239, 120047. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120047>.
- Zhang, S., Zhou, Y., Yu, Y., Li, F., Zhang, R., Li, W. (2022). Using the Geodetector Method to Characterize the Spatiotemporal Dynamics of Vegetation and Its Interaction with Environmental Factors in the Qinba Mountains, China. *Remote Sens.*, 14(22), 5794. <https://doi.org/10.3390/rs14225794>.
- Zhou, Y., Xin, G., Jiaqiang, L. (2023). Characteristics of Dust Weather in the Tarim Basin from 1989 to 2021 and Its Impact on the Atmospheric Environment. *Remote Sens.*, 15(7), 1804. <https://doi.org/10.3390/rs15071804>.

Flood Sensitivity Assessment Analysis Using Random Forest and Artificial Neural Network: A Case Study of Ilam Province

Farzaneh Gholami¹, Mojgan Entezari^{2*} , Reza Zakeri Nejad³, Haji Karimi⁴

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

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

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

3. Assistant Professor of GIS and RS, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran

4. Professor of Hydrogeology, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 03 May 2025 Revised: 21 October 2025 Accepted: 07 November 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Machine Learning, Flood Sensitivity Map, Random Forest, Artificial Neural Network, Ilam Province.	Flood is one of the most catastrophic natural hazards worldwide that can easily have devastating effects on human lives and property. The frequent occurrence of this hazard makes it necessary to develop accurate flood hazard maps for better information dissemination and disaster preparedness and mitigation. The proposed research work is to analyze the flood susceptibility assessment in a mountainous environment. Therefore, this study aims to apply machine learning models (MLM) and geographic information systems (GIS) techniques to predict flood hazard areas in Ilam province. Two ML algorithms were used for flood susceptibility mapping of Ilam province: random forests (RF) and artificial neural networks (ANN). Sixteen continuous parameters and different categorical variables were identified to assess the correlation between these variables and flood events in the study area and were used as inputs to run the two models. A total of 1042 flood and non-flood points were randomly selected, 70% and 30% of which were used as training and validation datasets. Also, the results of the error rate of the proposed algorithms were considered, clearly showing that in the RF model, MAE, which is equal to 0.0889, and RMSE equal to 0.1872, have the lowest value, R2, which is equal to 0.8423, has the highest value, which performed better compared to the ANN model. The value of the research lies in the fact that the proposed models can also be used to assess natural disasters such as earthquakes, landslides, etc. In addition, this work makes a significant contribution to the efforts to reduce the risk of natural disasters. Therefore, it will help to increase environmental sustainability.
How to Cite: Gholami, F. , Entezari, M. , Zakeri Nejad, R. and Karimi, H. (2026). Flood Sensitivity Assessment Analysis Using Random Forest and Artificial Neural Network: A Case Study of Ilam Province. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 25-54.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.51893.2111 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Flooding is one of the most destructive natural disasters in the world due to its severe property destruction and loss of life (Zanchetta & Coulibaly, 2020), and causes severe damage to infrastructure worldwide every year (Desai et al., 2015). Awareness of the flood phenomenon and its consequences is crucial for controlling and reducing flood risk (Marz et al., 2010). Flood susceptibility maps facilitate risk management decision-making (Wang et al., 2020). The Niger Basin was assessed using three machine learning models and twenty factors. It was found that areas near the river are more prone to flooding, and the extreme gradient boosting model performed best (Adeyemi & Komolafe, 2025). The Ili River Basin was investigated using machine learning models, and about 58.8% of the basin is located in flood-prone areas (Zhang et al., 2025). Ilam Province is one of the flood-prone areas of the country which can be He pointed out the November 2015 flood and the spring 2019 flood, which were unprecedented in the last 100 years and caused widespread destruction of homes and urban and rural infrastructure. Despite warnings and precautions, the November 2015 flood claimed the lives of several people in late 2019 (Salamat Hormozi et al., 2017).

DATA AND METHODOLOGY

The method of the present research includes creating a flood inventory map, identifying variables affecting floods and multi-lineage detection, validation, and accuracy analysis, or evaluation of flood sensitivity maps, etc. The models used to produce flood sensitivity index maps include the random forest model and the artificial neural network. The results of machine learning prediction and statistical modeling are significantly affected by the accuracy of historical flood location data (Liu et al., 2021). Flood-vulnerable areas in this model are divided into two zones based on historical and geoenvironmental data (Benkirane et al., 2020). Due to the topography and mountainous nature of the region, as well as the lack of Sentinel 1 satellite images at the time of the flood in the area, Google Earth Engine software did not perform well. For this reason, and using expert opinions, the Maxent model was used to extract flood points. Here, the geographical locations of 424 historical floods were taken from the Regional Water Organization of Ilam Province, and the Maxent model was used to prepare a flood inventory map. These floods were divided into two groups. The first group included 70% of the flood data and was used as the training dataset, and the second group included 30% of the remaining data and was used as the validation dataset. In addition, 617 flood-free points were randomly selected from high-altitude areas with low or no flood probability. In this study, R software was used to determine the importance of parameters, and two models, RF and ANN, were implemented in the R programming environment.

RESULTS AND DISCUSSION

16 input layers were entered as independent variables into the modeling process. The importance of all factors was determined and is shown in Figure 1. The relevance of each factor for both models was assessed using R software.

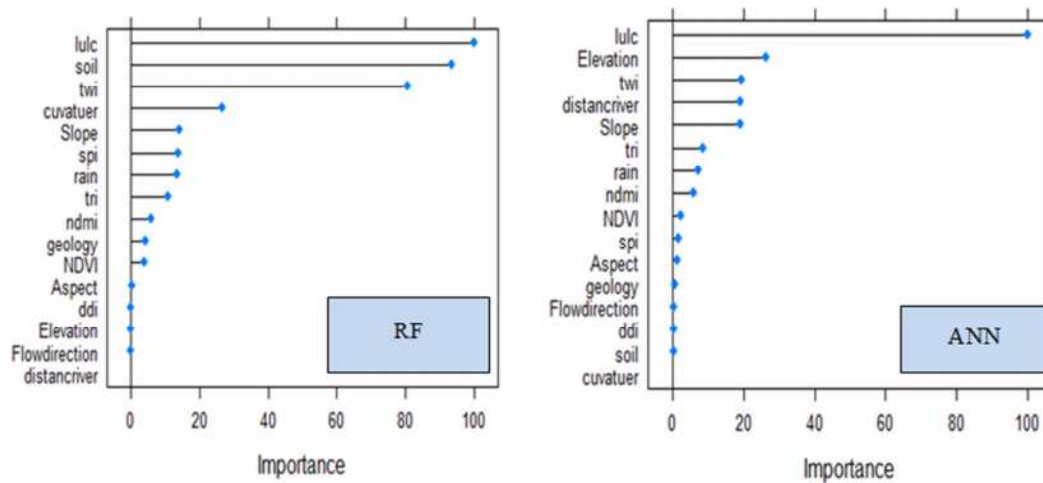


Figure 1: Relative importance of conditioning factors: (a) RF. (b) ANN Source: Authors

Using criteria such as MAE, R-squared, and RMSE, the model results were quantitatively validated against the flood inventory map. Table 1.

Table 1: Accuracy evaluation of the two RF and ANN models for training data through different error criteria

Model	RF	ANN
RMSE	0.1872	0.2591
R squared	0.8407	0.7056
MAE	0.0889	0.1628

Flood susceptibility maps were generated for both the random forest and artificial neural network models. The maps showed a continuous probability scale from 0 to 1.

Table 2: Flood susceptibility statistics with the RF and ANN models

Percentage(%)	Area (km2)	Flood susceptibility	Model
10.2	1958.08	High	ANN
1.8	355.158	Moderate	
88	16933.53	None/Low	
13.9	2687.99	High	RF
23.2	4460.82	Moderate	
62.9	12097.98	None/Low	

CONCLUSION

The random forest and artificial neural network models were built using a spatial database, whose data includes 16 topographic and geoenvironmental factors affecting floods and 1041 previous flood events. The experiments did not show evidence of multicollinearity between the identified conditioning factors. The validation findings showed that the two models performed significantly better. However, RF was more efficient than ANN in terms of computational efficiency, prediction accuracy, and other evaluation criteria. This was shown by the value of $R^2 = 0.8407$. This is because training the model with RF requires less execution time. The identification of key factors such as land use, elevation, and topographic wetness index (TWI) has enhanced the understanding of flood dynamics in the study area, and the results also showed that approximately 10.2% to 13.9% of the total area is highly vulnerable to flooding.

REFERENCES

References (in Persian)

Salamat Hormozi, Vahid, Omidvar, Kamal, Kavsi, Reza, Hamzenejad. Mojtaba, (2017). Identification and synoptic-dynamic analysis of atmospheric patterns of the November 2015 flood in Ilam and Lorestan provinces. *Newar.* , 27-9, (97-96)41, 27-9. [In Persian]

References (in English)

- Adeyemi, A. B., & Komolafe, A. A. (2025). Flood hazard zones prediction using machine-learning-based geospatial approach in the lower Niger River basin, Nigeria. *Natural Hazards Research*, 5(2), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.01.002>
- Arora, A., Arabameri, A., Pandey, M., Siddiqui, M. A., Shukla, U. K., Bui, D. T., ... & Bhardwaj, A. (2021). Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. *Science of the Total Environment*, 750, 141565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141565>
- Benkirane, M., Laftouhi, N. E., El Mansouri, B., Salik, I., Snineh, M., El Ghazali, F. E., ... & Zamrane, Z. (2020). An approach for flood assessment by numerical modeling of extreme hydrological events in the Zat watershed (High Atlas, Morocco). *Urban Water Journal*, 17(5), 381-389.
- Desai, B., Maskrey, A., Peduzzi, P., De Bono, A., & Herold, C. (2015). Making development sustainable: the future of disaster risk management, global assessment report on disaster risk reduction.
- Liu, J., Wang, J., Xiong, J., Cheng, W., Sun, H., Yong, Z., & Wang, N. (2021). Hybrid models incorporating bivariate statistics and machine learning methods for flash flood susceptibility assessment based on remote sensing datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4945.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.
- Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V. P., Wright, D. B., Villarini, G., ... & Stedinger, J. R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(6), 03122001.
- Sarkar, D., & Mondal, P. (2020). Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region. *Applied Water Science*, 10(1), 1-13.
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., & Peng, L. (2020). Flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks. *Journal of Hydrology*, 582, 124482.
- Zanchetta, A. D., & Coulibaly, P. (2020). Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. *Water*, 12(2), 570.
- Zhang, M., Fu, X., Liu, S., & Zhang, C. (2025). Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Actionable Flood Risk Assessment: Multi-Scenario Projection in the Ili River Basin in China Under Climate Change. *Remote Sensing*, 17(7), 1189.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

تحلیل ارزیابی حساسیت به سیل با استفاده از جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی: مطالعه موردی استان ایلام

فرزانه غلامی^۱، مژگان انتظاری^{۲*} , رضا ذاکری نژاد^۳، حاجی کریمی^۴

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
۲. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)
ایمیل: m.entezari@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0014-0209>
۳. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
۴. استاد هیدروژئولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: یادگیری ماشین، نقشه حساسیت سیل، جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، استان ایلام.	سیل یکی از مخاطرات طبیعی فاجعه‌بار در سراسر جهان است که به راحتی می‌تواند اثرات مخربی بر جان و دارایی انسان‌ها داشته باشد. رویدادهای مکرر این خطر، توسعه نقشه‌های دقیق خطر سیل را برای اطلاع‌رسانی بهتر و آمادگی در برابر بلایا و کاهش آن ضروری می‌سازد. کار تحقیقاتی پیشنهادی، جهت تجزیه و تحلیل ارزیابی حساسیت سیل در یک محیط کوهستانی است. بنابراین، این مطالعه با هدف به کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین (MLM) و فن‌های سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای پیش‌بینی مناطق خطر سیل در استان ایلام است. دو الگوریتم ML برای نقشه‌برداری حساسیت سیل استان ایلام استفاده شد: جنگل‌های تصادفی (RF) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN). شازده پارامتر پیوسته و متغیرهای طبقه‌بندی شده مختلف را برای ارزیابی همبستگی بین این متغیرها و حوادث سیل در منطقه مورد مطالعه شناسایی و به عنوان ورودی برای اجرای دو مدل استفاده شدند. در مجموع، ۱۰۴۲ نقطه سیل و غیرسیل تصادفی انتخاب شدند که ۷۰٪ و ۳۰٪ به عنوان مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی استفاده شدند. همچنین، نتایج نرخ خطای الگوریتم‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده به وضوح نشان داد که در مدل RF، MAE که برابر با ۰/۰۸۸۹ و RMSE برابر با ۰/۱۸۷۲ دارای کمترین مقدار، R2 که برابر ۰/۸۴۲۳ بیشتر مقدار که در مقایسه با مدل ANN عملکرد بهتری داشت. ارزش پژوهش در این واقعیت نهفته است که مدل‌های پیشنهادی می‌تواند برای ارزیابی بلایای طبیعی مانند زلزله، رانش زمین و غیره نیز مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، این کار کمک قابل توجهی به تلاش برای کاهش خطر بلایای طبیعی می‌کند. بنابراین، این امر به افزایش پایداری محیطی کمک خواهد کرد.

استناد: غلامی، فرزانه، مژگان، ذاکر نژاد، رضا و کریمی، حاجی. (۱۴۰۵). تحلیل ارزیابی حساسیت به سیل با استفاده از جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی: مطالعه موردی استان ایلام. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۵۴-۲۵.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51893.2111



مقدمه

مخاطرات طبیعی روز به روز در حال افزایش است و به صورت قابل توجهی در سطح جهانی و ملی مورد توجه قرار گرفته است (آدین^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). سیل به دلیل تخریب شدید اموال و تلفات جانی حاصل از آن (وانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ زانچتا و کولیبالی^۳، ۲۰۲۰)، از مخرب ترین، شایع ترین (میشرا^۴ و همکاران، ۲۰۲۲) و پرهزینه ترین بلاهای طبیعی در جهان است (تریپاتی^۵، ۲۰۱۵؛ آرورا^۶ و همکاران، ۲۰۲۱) و هر ساله خسارت های شدیدی به زیرساخت ها در سراسر جهان وارد می کند و همچنین موجب تضعیف اقتصاد در سطح کلان می گردد (دسای^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). بر اساس داده های آماری پایگاه داده رویدادهای اضطراری (EM-DAT) در سال ۲۰۲۱، حدود ۱۷۵۰۰۰ مرگ و میر به دلیل وقوع سیل اتفاق افتاد و ۲،۲ میلیارد نفر در طی ۲۷ سال، تحت تاثیر مخاطرات ناشی از سیل قرار گرفتند. علاوه بر این، براساس استراتژی های بین المللی کاهش بلایا (UNISDR) در سال ۲۰۱۵، سیل هر ساله باعث ایجاد حدود ۳۰ میلیارد دلار خسارت به آمریکا وارد می کند، همچنین عاملی مؤثر بر تغییرات جمعیتی محسوب می شود (نو و همکاران، ۲۰۲۲). سیل بر اثر عوامل و دلایل طبیعی و انسانی رخ می دهد (چانگ و چن^۹، ۲۰۱۶). علاوه بر رویدادهای شدید آب و هوایی ناشی از تغییرات اقلیمی، فعالیت های انسانی سهم زیادی در بروز سیل های شدید مکرر دارند. فعالیت های انسانی، مانند تغییر سریع پوشش زمین، رشد جمعیت و ساخت جاده، سطوح غیر قابل نفوذ را افزایش داده و منجر به سیل های رایج و شدیدتر می شود (رحمان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). به تازگی دخالت انسان در محیط زیست باعث وقوع سیلاب شده است که این سیلاب ها بیش از قبل رخ می دهد و اساساً به دلیل تخریب محیط زیست در مقیاس وسیع به واسطه رشد جمعیت، تجاوز به دشت های سیلابی کنار رودخانه، شهرنشینی، جنگل زدایی و غیره است (باند^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰). آگاهی از پدیده سیل و پیامدهای آن برای کنترل سیل، کاهش خطر و به طور کلی مدیریت سیل بسیار مهم است. همچنین، پیش بینی سیل جهت پیش بینی خسارت و کاهش خطرات ضروری است و استفاده از علوم مختلف مانند جغرافیا، هیدرولوژی، هیدرولیک، مهندسی عمران و اقتصاد محیط زیست برای درک این پدیده ضروری است (مرز^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۰).

نقشه حساسیت سیل، تصمیم گیری مدیریت ریسک را تسهیل می کند و به اجرای استراتژی های کاهش سیل کمک می کند و راهنمایی برای توسعه پوشش زمین، استفاده از زمین در مناطق آسیب پذیر سیل ارائه می کند (وانگ^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۰). بخش مهمی از مدیریت ریسک بلایا، ترسیم حساسیت به سیل است که به دولت ها و جوامع در پیش بینی، واکنش و کاهش اثرات مخرب حوادث سیل کمک می کند. فراوانی و شدت سیل در حال افزایش می باشد و توسعه مدیریت مؤثر در زمینه سیل را ضروری می نماید (کومار^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۴). مدل های پیش بینی سیل

¹ Uddin² Wang³ Zanchetta & Coulibaly⁴ Mishra⁵ Tripathi⁶ Arora⁷ Desai⁸ Nevo⁹ Chang & Chen¹⁰ Rahman¹¹ Band¹² Merz¹³ Wang¹⁴ Kumar

اهمیت چشمگیری برای ارزیابی خطر و مدیریت رویدادهای شدید دارد. همچنین، پیش‌بینی قوی و دقیق به استراتژی‌های مدیریت منابع آب، پیشنهادات و تجزیه و تحلیل سیاست‌ها و مدل‌سازی تخلیه بیشتر کمک می‌کند (شیه^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). نقشه‌برداری خطر سیل، یک عنصر ضروری جهت مدیریت ریسک سیل است (مرز و همکاران، ۲۰۱۰؛ متئو گارسیا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، انجام تحقیقات در رابطه آسیب‌پذیری سیل و توسعه اقدامات پیشگیرانه برای کاهش شدت آن ضروری است؛ زیرا می‌تواند برای به حداقل رساندن اثرات سیل مفید باشد. بنابراین، اقدامات کاهش سیل باید برای شناسایی مناطقی بسیار آسیب‌پذیر در برابر سیل متمرکز شود تا اثرات آن کاهش یابد. از این رو، به نقشه‌برداری حساسیت به سیل نیاز است تا بتواند اثرات سیل را کاهش دهد. فهرست سیل و نقشه‌های حساسیت به سیل اهمیت فراوانی در کاهش خطرات سیلاب و ایجاد بستری مناسب برای مدیریت صحیح سیلاب دارد. قابل درک است که جوامع همواره در تلاش بوده‌اند تا با استفاده از ابزارهای مدیریت سیل، احتمال وقوع سیل را کاهش دهند. عباس‌زاده تهرانی و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی، میزان دبی سیلاب‌های حوضه آبریز رودخانه مادرسو (دوغ) از طریق به‌کارگیری RS و GIS بررسی کردند. نتایج نشان داد تغییرات کاربری اراضی بر کاهش میزان سیلاب منطقه تاثیرگذار بوده است. طهماسبی (۱۴۰۰) با استفاده از روش‌های کمی و به کمک نرم‌افزار Arc، Envi، GIS و Fragtats روش‌های کیفی و فن‌های دلفی، وضعیت سیل‌خیزی شهر ایلام بررسی کرد. نتایج آن نشان داد که عملکرد، شوراهای شهر و سازمان‌های مدیریت بحران شهر، پاسخگوی احتمالی مقابله با بحران نیستند. لاهوتی نسب و قاسمیه (۱۴۰۳) با استفاده از مدل‌های DEMATEL-AHP و SVM سیل‌خیزی حوضه آبخیز برزک کاشان بررسی نمودند. نتایج نشان داد که عامل بارش مؤثرترین متغیر بر سیل‌خیزی است و مناطق شمال، شمال غرب و غرب حوضه دارای بیشترین پتانسیل در وقوع سیل و سیل‌خیزی هستند. سگیانتو^۳ و همکاران (۲۰۲۰) به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر سیل و ارزیابی علل سیل در حوضه آبخیز تویونوم^۴، آچه جایا^۵ پرداختند. نتایج نشان داد افزایش چشمگیری در استفاده از زمین‌های مسکونی، زمین‌های بایر، مزارع برنج و تالاب‌ها (آب‌ها) داشته است و نفوذناپذیری و اشباح باعث افزایش خطرات سیل منطقه شده است.

شیرانی و ذاکری‌نژاد^۶ (۲۰۲۱) با استفاده از مدل خطی چندمتغیره مختلط تاپسیس به اولویت‌بندی ۲۴ زیرحوضه در حوضه جراحی-زهره^۷ در جنوب غربی ایران^۸ پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل وزن‌دهی نشان داد که اطلاعات ناهمواری، شیب و بارندگی بیشترین تأثیر را بر رویدادهای سیل داشته است. حوضه‌های فرعی سیدیون، امام‌زاده جعفر و تخت درازا^۹ بیشتر در معرض خطر سیل قرار دارد. سیدی^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲) در دو منطقه حوضه گرگانرود و کارون^{۱۱} در ایران^{۱۲}، نقشه مدل حساسیت سیل (FSM) را با ۲۱ پارامتر تهیه کردند و مدل جنگل آبشاری (CFM) در هر دو حوضه را ارزیابی کردند. نتایج حاصل‌شده با نتایج شش روش دیگر یادگیری ماشین از جمله ماشین بردار

¹ Xie

² Mateo-Garcia

³ Sugianto

⁴ Teunom

⁵ Aceh Jaya

⁶ Shirani & Zakerinejad

⁷ Jarahi-Zohre

⁸ IRAN

⁹ Seidyon, Emamzadeh Jafar, and Takht Deraza

¹⁰ Seydi

¹¹ Gorganrud and Karun

¹² Iran

پشتیبان (SVM)، شبکه عصبی عمیق (DNN)، جنگل تصادفی (RF)، دستگاه تقویت گرادیان نور (LightGBM)، درخت تصمیم (DT)، تقویت گرادیان شدید (XGBoost) و تقویت طبقه‌بندی (CatBoost) مقایسه شد. نتایج نشان داد که CFM بالاترین دقت را در مقایسه با سایر مدل‌ها در هر دو منطقه داشت. ساب^۱ و همکاران (۲۰۲۳) از سه فن یادگیری ماشین (RF، LightGBM و CatBoost) برای تهیه نقشه‌های حساسیت به سیل (FSMs) در حوضه رودخانه وی گیاتابون^۲ (VGTB) در ویتنام^۳ استفاده کردند. نقشه حساسیت سیل مدل‌ها نشان دادند که ۱۰ تا ۱۳ درصد از کل منطقه به شدت مستعد سیل است، مناطق پایین دست (اعم از شهری و کشاورزی) در سطوح بالایی و بسیار بالایی از حساسیت قرار دارد. صلواتی^۴ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، همراه با هسته خطی (LK)، طبقه‌بندی کننده پایه (BC) و بهینه‌سازی فرا پارامتری (HPO) در حوضه آبخیز هراز^۵ در استان مازندران^۶ ایران^۷ به بررسی و شناسایی مناطق مستعد سیل پرداختند. عامل شیب، فاصله از رودخانه بیشترین اهمیت را دارا بودند. همچنین، مدل SVR-HPO نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری داشت. با استفاده از مدل‌های نسبت فرکانس، منطق فازی (FL)، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی حساسیت سیل در حوضه آبریز جیا بهارالی^۸ بررسی شد. نتایج نشان داد که حدود یک سوم از حوضه یادشده در مناطق سیل‌خیز متوسط تا بسیار زیاد قرار دارد (دبنات^۹ و همکاران، ۲۰۲۴). حوضه رودخانه نیجر^{۱۰} در نیجریه^{۱۱} با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تقویت گرادیان شدید (XGBoost) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و بیست عوامل تأثیرگذار جهت شناسایی مناطق مستعد سیل ارزیابی شد. نقشه‌های خطر سیل نشان داد که مناطق نزدیک رودخانه، به‌ویژه در بخش مرکزی و جنوبی حوضه، بیشتر مستعد سیل هستند و مدل تقویت گرادیان شدید بهترین عملکرد داشت (آدیمی و کومولافه^{۱۲}، ۲۰۲۵). با ادغام نقاط قوت شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN)، شبکه‌های کپسولی (CapsNet^{۱۳}) و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA^{۱۴})، مناطق پرخطر شهرهای گوانگژو، شنژن و فوشان^{۱۵} شناسایی شد. یافته‌ها نشان داد مناطق پرخطر بیشتر در مناطق مرکزی شهرهای گوانگژو، شنژن و فوشان متمرکز شده است. عوامل فاصله تا بیمارستان‌ها و فاصله تا بدنه‌های آبی به‌عنوان محرک‌های اصلی خطر سیل شناسایی شدند، درحالی‌که عوامل طبیعی مانند شاخص انتقال رسوب، شاخص قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی تأثیرات نسبتاً کمتری داشتند (وانگ^{۱۶} و همکاران، ۲۰۲۵). حوضه رودخانه ایلی^{۱۷} در چین^{۱۸} با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی و تقویت گرادیان شدید^{۱۹} بررسی شد. نتایج نشان داد

¹ Saber

² Vu Gia-Thu Bon

³ Vietnam

⁴ Salvati

⁵ Haraz

⁶ Mazandaran

⁷ Iran

⁸ Jia Bharali

⁹ Debnath

¹⁰ Niger

¹¹ Nigeria

¹² Adeyemi & Komolafe

¹³ capsule networks

¹⁴ whale optimization algorithm

¹⁵ Guangzhou, Shenzhen, and Foshan

¹⁶ Wang

¹⁷ Ili

¹⁸ China

¹⁹ XGBoost, Random Forest (RF)

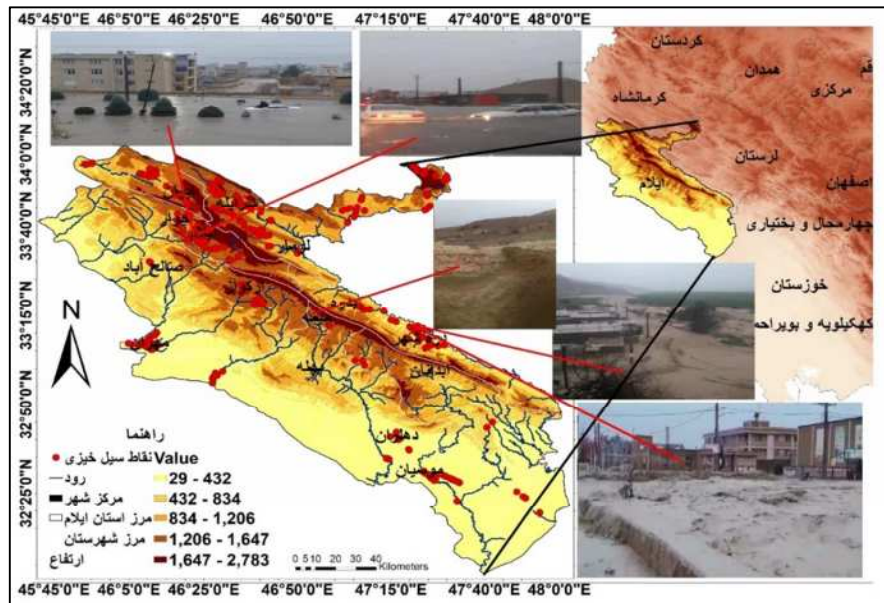
که حدود ۵۸,۸٪ از حوضه در مناطق پرخطر و بسیار پرخطر سیل واقع شده است (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). استان ایلام یکی از مناطق سیل‌خیز کشور است که با توجه به شدت و مدت بارندگی در حین یا پس از بارندگی، مقدار دبی رودخانه‌ها به سرعت بالا آمده و آب از بستر عادی رودخانه‌ها سرریز نموده و باعث سیلابی شدن منطقه می‌شود. می‌توان به سیل آبان ۱۳۹۴ و همچنین سیل بهار ۱۳۹۸ اشاره نمود که در ۱۰۰ سال اخیر بی‌سابقه بودند و تخریب گسترده منازل و زیرساخت‌های شهری و روستایی را به همراه داشته است و علی‌رغم هشدارها و تمهیدات انجام گرفته، سیل آبان ۱۳۹۴ و اواخر سال ۱۳۹۸ جان چندین نفر را گرفت (سلامتی هرمزی و همکاران، ۱۳۹۶).

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

استان ایلام در غرب کشور ایران، هم مرز با کشور عراق می‌باشد که مساحتی حدود ۲۰,۱۵۰ کیلومتر مربع و ۲,۱ درصد از مساحت کل کشور را پوشش می‌دهد. با مختصات ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول واقع است شکل (۱). نواحی شمال و شمال شرق استان ایلام کوهستانی و نواحی جنوب غرب و غرب استان از اراضی پست و کم ارتفاع تشکیل یافته است. توده هوای غربی از دریای مدیترانه و دریای سیاه باعث بارندگی‌های پاییزی و زمستانی در استان می‌شوند و جریانات سودانی و دریای سرخ و صحرای عربستان نیز در بارش‌های زمستانی و بهاری مؤثرند و در تابستان سبب گرم شدن هوا می‌شود. براساس اطلاعات و آمار ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک ایلام، حداکثر مطلق دما ۴۰/۶ درجه سلسیوس و حداقل مطلق دما ۱۲/۶- درجه سلسیوس بوده و میانگین بارندگی سالانه این ایستگاه ۵۹۵ میلی‌متر است و دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. به‌طورکلی، استان ایلام به لحاظ واحدهای ژئومورفولوژیکی به دو واحد (کوهستان) شامل تاقدیس‌های کبیرکوه، دینارکوه، مانشت، قلارنگ و ... (و دشت) شامل دشت عباس، دشت دهلران و ناودیس‌های مرکزی تقسیم می‌شود. از جمله مهم‌ترین رودخانه‌هایی که در محدوده جغرافیایی استان ایلام که از دامنه‌های شمالی و جنوبی کبیرکوه سرچشمه می‌گیرند، می‌توان به رودخانه سیمره، دویرج، چنگوله، آبدانان، چناره، میمه و سیاه گاوو... اشاره کرد (نیک‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). استان ایلام یکی از استان‌های سیل‌خیز است که به‌دلیل ویژگی‌های توپوگرافی و اقلیمی معمولاً تحت تأثیر سیلاب قرار می‌گیرد. سیل‌های متعددی در گذشته رخ داده که می‌توان به سیلاب‌های سال‌های ۶۸-۷۳ - ۹۴ - ۹۷-۹۸ و ۴۰۲ اشاره کرد و خسارات شدیدی به جان انسان‌ها و زیر بناها وارد کرده است.

¹ Zhang



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه. منبع: نگارندگان

روش‌شناسی

روش‌شناسی شامل سازماندهی کلی این پژوهش است که شامل ایجاد نقشه موجودی سیل، شناسایی متغیرهای موثر بر سیل و تشخیص چندخطی، اعتبارسنجی و تحلیل دقت یا ارزیابی نقشه‌های حساسیت به سیل و غیره است. جدول (۱). مدل‌های به‌کار برده‌شده برای تولید نقشه شاخص حساس به سیل (FSI) عبارتند از مدل جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی شکل (۲).

نقشه موجودی سیل

جهت موثر بودن استراتژی‌های مدیریت و کاهش سیل، درک و تجزیه و تحلیل نقشه موجودی سیل بسیار مهم است. وقوع سیل‌های گذشته، به‌عنوان متغیرهای ورودی مهم برای محاسبه حساسیت سیل عمل می‌کند (کاستاچ^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). تولید نقشه فهرست موجودی سیل (FIM) به‌طور کلی، از داده‌های سیل قبلی یک منطقه ساخته شده است (احمد^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). مدیریت سیل به‌طور ویژه نیاز به درک خوبی از روندهای تاریخی سیل، انتظارات آینده و شناسایی مکان‌هایی دارد که احتمالاً تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرند. نقشه‌برداری سیل، اطلاعاتی فراهم می‌کند تا اطمینان حاصل شود که آمادگی، واکنش و بازایی به‌طور مؤثر برای کاهش تأثیر سیل انجام شده است (پلات^۳، ۲۰۰۲). نقشه‌برداری موجودی سیل اولین گام به سمت نقشه‌برداری حساسیت است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶). تهیه نقشه موجودی سیل نیازمند یک رویکرد داده‌محور است. برای آموزش و اعتبارسنجی موثر مدل، موجودی سیل به‌عنوان یک جزء حیاتی عمل می‌کنند (اسلام^۴ و همکاران، ۲۰۲۱؛ مجددی^۵ و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Costache

² Ahmed

³ Plate

⁴ Islam

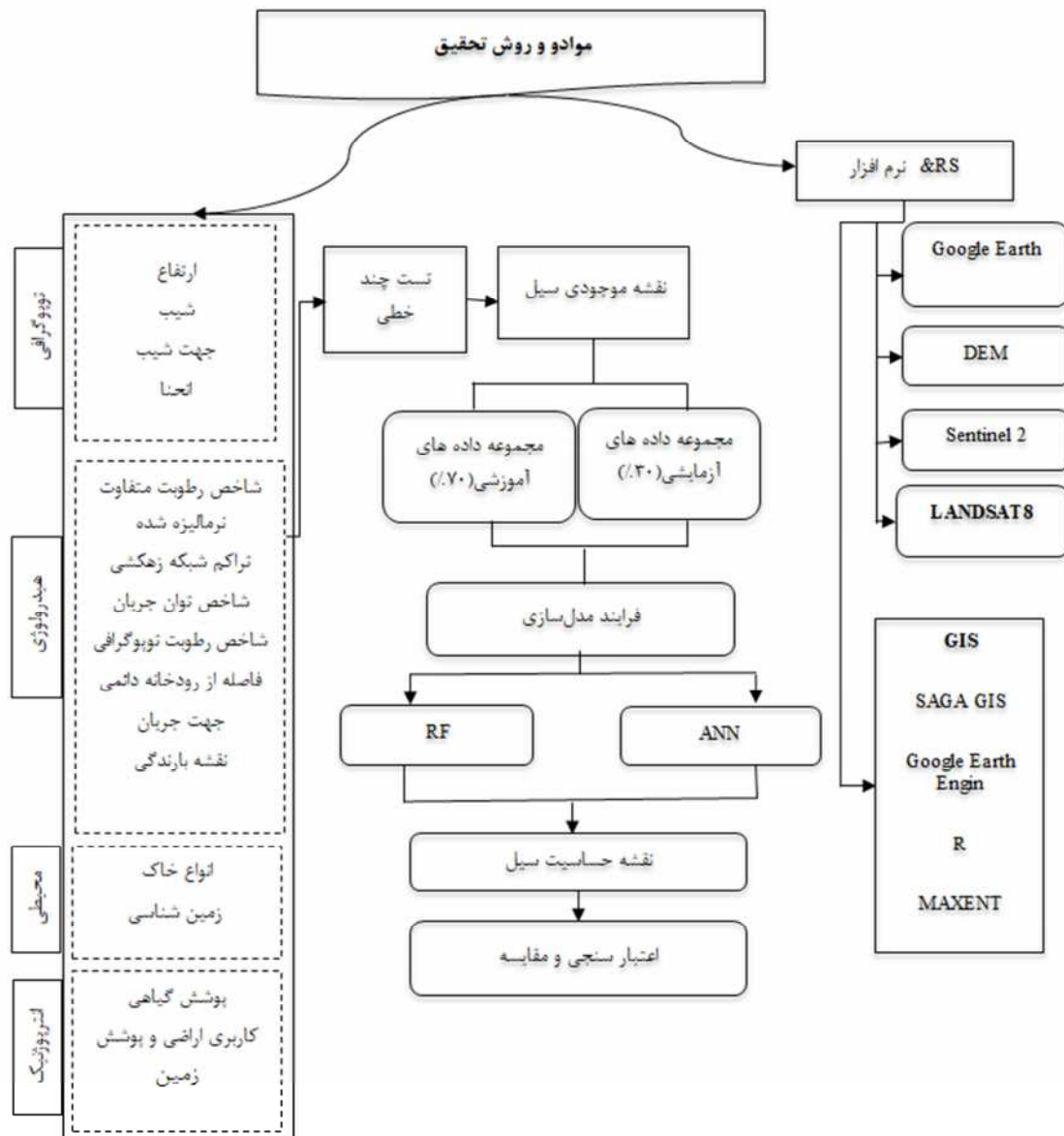
⁵ Mojaddadi

صحت رخدادهای گذشته سیل، دقت و قابلیت اطمینان آسیب‌پذیری سیل در آینده را تعیین می‌کند (سارکار و موندال^۱، ۲۰۲۰). نتایج پیش‌بینی یادگیری ماشین و مدل‌سازی آماری به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر دقت داده‌های مکان سیل تاریخی قرار می‌گیرد (لیو^۲ و همکاران ۲۰۲۱). مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل، در این مدل، بر اساس داده‌های تاریخی و ژئومحیطی به دو منطقه (۱) غیرقابل سیل (۲) سیل‌خیز تقسیم می‌شوند (بنکیران^۳ و همکاران ۲۰۲۰). با توجه به توپوگرافی و کوهستانی بودن منطقه و همچنین نبود تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ در زمان وقوع سیل در منطقه، نرم‌افزار گوگل ارث انجین^۴ (GEE) عملکرد خوبی نداشتند. به همین دلیل و با استفاده از نظر کارشناسان، از مدل مکسنت جهت استخراج نقاط سیل استفاده شد. در اینجا، موقعیت جغرافیایی ۴۲۴ سیل تاریخی از سازمان آب منطقه‌ای استان ایلام و مدل مکسنت^۵ برای تهیه نقشه موجودی سیل گرفته شد. این سیلاب‌ها به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل ۷۰ درصد از داده‌های سیل بود که به‌عنوان مجموعه داده آموزشی استفاده شد و علاوه بر این، ۶۱۷ نقطه بدون سیل به‌طور تصادفی از مناطق مرتفع با احتمال کم سیل یا بدون سیل انتخاب شدند. تجزیه و تحلیل دقیق حساسیت سیل، مستلزم یک نقشه دقیق موجودی سیل است که مکان وقوع سیل را نشان دهد. در این مطالعه، ۴۲۴ نقطه مکان سیل شناسایی شد.

جدول ۱: عوامل موثر در سیلاب برای نگاشت حساسیت سیل

منابع	نقشه‌های مورد نیاز	داده ها
Search.asf.alaska.edu/#/	ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی TWI، شاخص توان جریان SPI، شیب، جهت شیب، انحنا، تراکم شبکه زهکشی و فاصله از رودخانه دائمی، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت متفاوت نرمالیزه‌شده، همگرایی، جهت جریان، زمین‌شناسی	۱ ALOSPALSAR (D.E.M./12.5 m)
Google Earth Engine	نقشه NDVI	۲ Sentinel 2 (10 m) Google Earth Engin
Google Earth Engine	نقشه LU/LC	۳ Land use/Land cover(10 m)
داده‌های هواشناسی	نقشه بارندگی	۴ داده‌های بارندگی
(مرکز داده ISRIC، اطلاعات خاک جهان)	بافت خاک	۵ داده‌های خاک
سازمان زمین‌شناسی ایران	زمین‌شناسی	۶ اطلاعات زمین‌شناسی

¹ Sarkar& Mondal² Liu³ Benkirane⁴ Google Earth Engine⁵ Maxent



شکل ۲: مواد و روش پژوهش منبع: نگارندگان

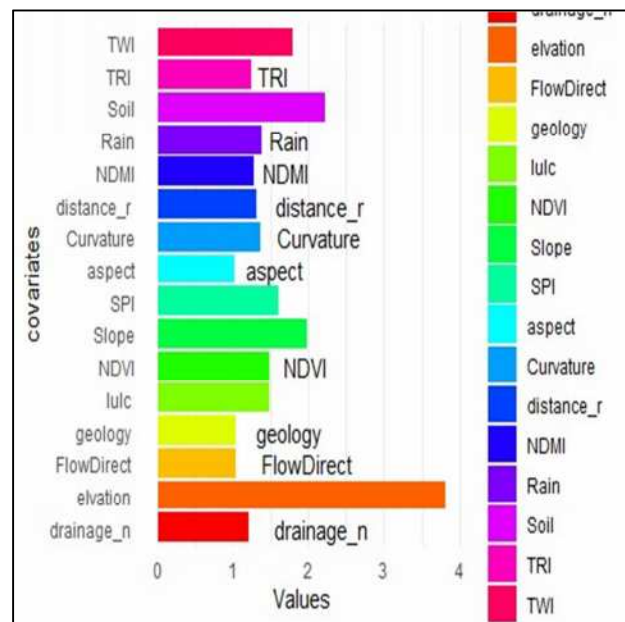
یافته‌های پژوهش

ارزیابی چندخطی

در این مطالعه، ما با این فرض پیش رفتیم که هیچ وابستگی خطی بین متغیرها وجود نخواهد داشت که تأثیر مخربی بر مدل‌های حساسیت منطقه مورد مطالعه داشته باشد شکل (۳). جدول (۲) نتایج تجزیه و تحلیل چندخطی ۱۶ عامل مناسب سیل را نشان می‌دهد. TOL همه متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه بالاتر از ۰/۲۶۲ است که نشان‌دهنده عدم وجود چندخطی بین این متغیرها است. بنابراین، ما از همه آنها در مرحله مدل‌سازی استفاده کردیم.

جدول ۲: تجزیه و تحلیل چندخطی عوامل سیل ۱

متغیر	VIF	آمار خطی
		T_i
TWI	۱/۷۸	۰/۵۶۱
NDMI	۱/۲۶	۰/۷۹۰
NDVI	۱/۴۸	۰/۶۷۷
Rain	۱/۳۷	۰/۷۲۷
Slope	۱/۹۷	۰/۵۰۶
Soil	۲/۲۱	۰/۴۵۱
SPI	۱/۶	۰/۶۲۳
TRI	۱/۲۳	۰/۸۱۳
aspect	۱/۰۲	۰/۹۷۸
Curvature	۱/۳۶	۰/۷۳۳
distance_r	۱/۳۱	۰/۷۶۴
drainage_n	۱/۱۹	۰/۸۳۷
elvation	۳/۸۱	۰/۲۶۲
FlowDirect	۱/۰۳	۰/۹۷۲
geology	۱/۰۳	۰/۹۷۰
lulc	۱/۴۸	۰/۶۷۵



شکل ۳: نمودار تجزیه و تحلیل چندخطی متغیر

تعیین اهمیت پارامترها

الگوریتم‌های مختلفی برای تعیین اهمیت متغیرهای موثر بر یک پدیده وجود دارد. در این پژوهش از نرم‌افزار R برای تعیین اهمیت پارامترها استفاده شده است.

معرفی پارامترهای منتخب و نقشه‌های آن‌ها

شاخص‌های سیل بر اساس ویژگی‌ها، مقیاس منطقه مورد مطالعه و در دسترس بودن داده‌ها انتخاب شدند (بویی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). بر اساس ویژگی‌های سیلاب‌های تاریخی در منطقه مورد مطالعه و مشاهدات میدانی متعدد، ۱۶ عامل تأثیرگذار - ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه‌ها، میانگین بارندگی ماهانه، کاربری زمین، بافت خاک، شاخص قدرت رودخانه، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، جهت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت جریان و انحنا برای نقشه‌برداری حساسیت سیل انتخاب شد. شرح مفصلی از داده‌ها و منابع آنها ارائه شده است و نقشه‌های همه عوامل انتخاب‌شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

ارتفاع: ارتفاع یکی از پارامترهای پرکاربرد و یکی از عوامل کلیدی کنترل سیلاب یک منطقه است (بویی و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور معمول، ارتباط واضحی بین ارتفاع و سیل وجود دارد؛ زیرا مناطق با ارتفاعات پایین‌تر در مقایسه با مناطق با ارتفاعات بالاتر در معرض وقوع خطر سیل هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دو^۲ و همکاران، ۲۰۱۵) شکل (۴الف).

^۱ Bui

^۲ Dou

شیب: یکی از عوامل توپوگرافی است که در مطالعات هیدرولوژیکی موثر است. رابطه شیب با بارندگی این است که نفوذ بارندگی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شیب است (رحمتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). هر چه زاویه بیشتر باشد، نفوذ آب سطحی کمتر و سرعت جریان آب و رواناب بیشتر می‌شود (محمدی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). نشان‌دهنده تمایل زمین به ریختن آب به مناطق مجاور پایین‌تر است (گروبر و پکهام^۳، ۲۰۰۹). مناطق مستعد سیل بیشتر در زمین‌های مسطح یافت می‌شوند (چوبین^۴ و همکاران، ۲۰۱۹) شکل (۴ب).

جهت شیب: این عامل به‌طور کلی جهت پایین شیب (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹) را نشان می‌دهد. این هم بر شدت بارندگی و هم بر توسعه مورفولوژیکی تأثیر می‌گذارد (یوسفی^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). جهت زمین می‌تواند نقش مهمی در نقشه حساسیت سیل داشته باشد؛ زیرا به جهت جریان آب مربوط می‌شود (اسلام و همکاران، ۲۰۲۱) شکل (۴پ).

انحنای رودخانه: انحنای رودخانه از سه قسمت تشکیل شده است: سطح مقعر، محدب و صاف. به‌عنوان عواملی که بر جریان رواناب موثر است و می‌تواند در تشخیص مناطق حساس به سیل مفید باشد (لی^۶ و همکاران، ۲۰۱۲a). انحنای پلان بر جریان آب در یک منطقه معین تأثیر می‌گذارد. پس از محاسبه این عامل، مقادیر صفر نشان‌دهنده خطر بسیار مهم سیل است. شکل (۴ت).

فاصله از رودخانه: جریان رودخانه‌ها مسیرهای اصلی تخلیه سیل هستند (اوپرمن^۷ و همکاران، ۲۰۰۹)؛ زیرا مناطق آسیب‌پذیر سیل معمولاً در مجاورت رودخانه و نه‌رها واقع شده‌اند (آندریانی^۸ و همکاران، ۲۰۲۱). شکل (۴ث).

تراکم شبکه زهکشی: هنگامی بارندگی، تراکم زهکشی بر جریان‌های اوج تأثیر می‌گذارد. سیلاب‌های منطقه‌ای اغلب به مقدار پیک دبی و منطقه زهکشی مرتبط هستند (آیالو و کرایفسکی^۹، ۲۰۱۷). سیستم‌های زهکشی ضعیف اغلب منجر به طغیان رودخانه و جاری شدن سیل مداوم در یک منطقه می‌شود (۲۰۱۸ کومولافه^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۸). شکل (۴ج).

بارندگی: بارش متغیر اصلی هیدرولوژیکی است که جو را با فرایندهای سطحی زمین پیوند می‌دهد (۱۰ تگواراپو^{۱۱}، ۲۰۱۲). و با احتمال وقوع سیل تأثیر می‌گذارد (ورما^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۲). داده‌های بارندگی معمولاً در مطالعات تهیه نقشه سیل گنجانده می‌شوند؛ زیرا به‌طور مستقیم با پتانسیل سیل در ارتباط هستند (برا^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۲). شکل (۴چ).

¹ Rahmati

² Mohammadi

³ Gruber & Peckham

⁴ Choubin

⁵ Yousefi

⁶ Lee

⁷ Opperman

⁸ Andaryani

⁹ Ayalew & Krajewski

¹⁰ Komolafe

¹¹ Teegavarapu

¹² Verma

¹³ Bera

کاربری اراضی: کاربری اراضی عاملی است که بر میزان نفوذ و رواناب حاصل از بارندگی موثر است (کازاکیس^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). شکل (۴ح).

بافت خاک: نفوذ آب که نقش مهمی در تولید رواناب بارندگی ایفا می‌کند، به‌طور مستقیم توسط خواص خاک تنظیم می‌شود (فیلیپس^۲ و همکاران، ۲۰۱۹) شکل (۴خ).

شاخص قدرت رودخانه: SPI یکی دیگر از پارامترهای مورفومتریک است که برای پیش‌بینی سیل استفاده می‌شود شکل (۴د).

شاخص پوشش گیاهی متفاوت نرمالیزه‌شده (NDVI^۳): NDVI با تصاویر سنتینل ۲ با وضوح مکانی ۱۰ متر با استفاده از باند مادون قرمز نزدیک (NIR- B8) و نوار قرمز (B4) محاسبه شد (آمادیو^۴ و همکاران، ۲۰۱۶؛ فاین^۵ و همکاران، ۲۰۱۷e). پوشش گیاهی نقش بسزایی در بررسی حساسیت به سیل دارد (موهان^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). شکل (۴ذ).

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۷): شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) معیاری است که برای تعیین کمیت تأثیر توپوگرافی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (پور علی^۸ و همکاران، ۲۰۱۶) و تحت تأثیر تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک است (وینزeler^۹ و همکاران، ۲۰۲۲). با استفاده از عامل شیب و انباشت جریان می‌توانید مناطق با پتانسیل سیل‌خیزی بالا را شناسایی نمایید (بویو همکاران، ۲۰۲۰). شکل (۴ر).

شاخص رطوبت متفاوت نرمالیزه‌شده (NDMI^{۱۰}): شاخص رطوبت تفاوت نرمال‌شده توسعه‌یافته توسط ویلسون و سادر (۲۰۰۲)، با هدف جستجوی رطوبت خاک است. به‌طور معمول در مناطق پرآب و غرقاب رطوبت خاک زیاد خواهد بود (ساهو و بنگال^{۱۱}، ۲۰۱۸). برای محاسبه NDMI با استفاده از لندست ۸، فرمول (۱) به شرح زیر است:

$$NDMI = \frac{Band5(Near\ Infrared) - Band6(middle\ Infrared)}{Band5(Near\ Infrared) + Band6(middle\ Infrared)} \quad (1)$$

در NDMI، مقادیر بالا نشان‌دهنده وجود رطوبت بیشتر خاک در زیرتوده‌های آبی عظیم و مقادیر پایین نشان‌دهنده رطوبت کم خاک است. شکل (۴ز).

شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI^{۱۲}): یک عامل کمک‌کننده مهم در تهیه نقشه حساسیت و نشان‌دهنده تغییر ارتفاع در یک منطقه مشخص از زمین است. هرچه مقدار TRI بالاتر باشد، زمین ناهموارتر است (آیدین و ایبان^{۱۳}، ۲۰۲۳). شکل (۴ژ).

¹ Kazakis

² Phillips

³ Normalized difference vegetation index

⁴ Amadio

⁵ Fayne

⁶ Mohajane

⁷ Topographic Wetness Index

⁸ Pourali

⁹ Winzeler

¹⁰ Normalized difference moisture index

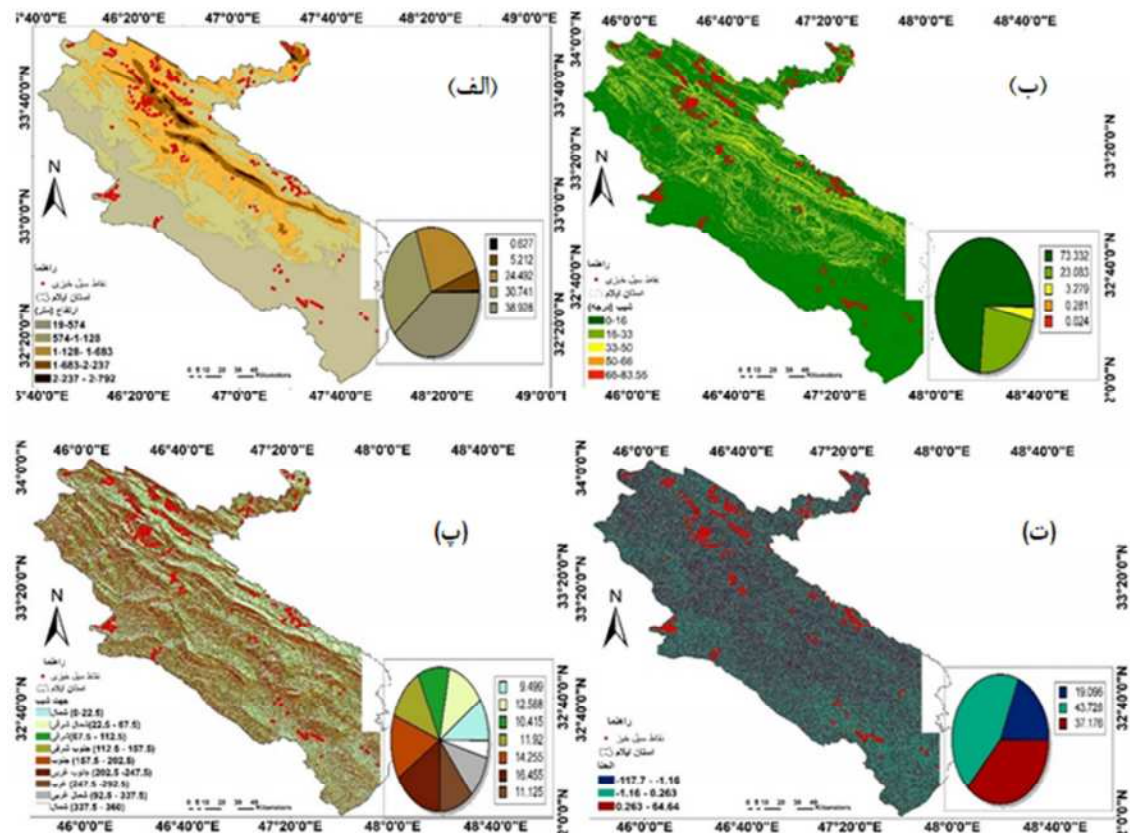
¹¹ Sahu & Bengal

¹² Topographic roughness index

¹³ Aydin & Iban

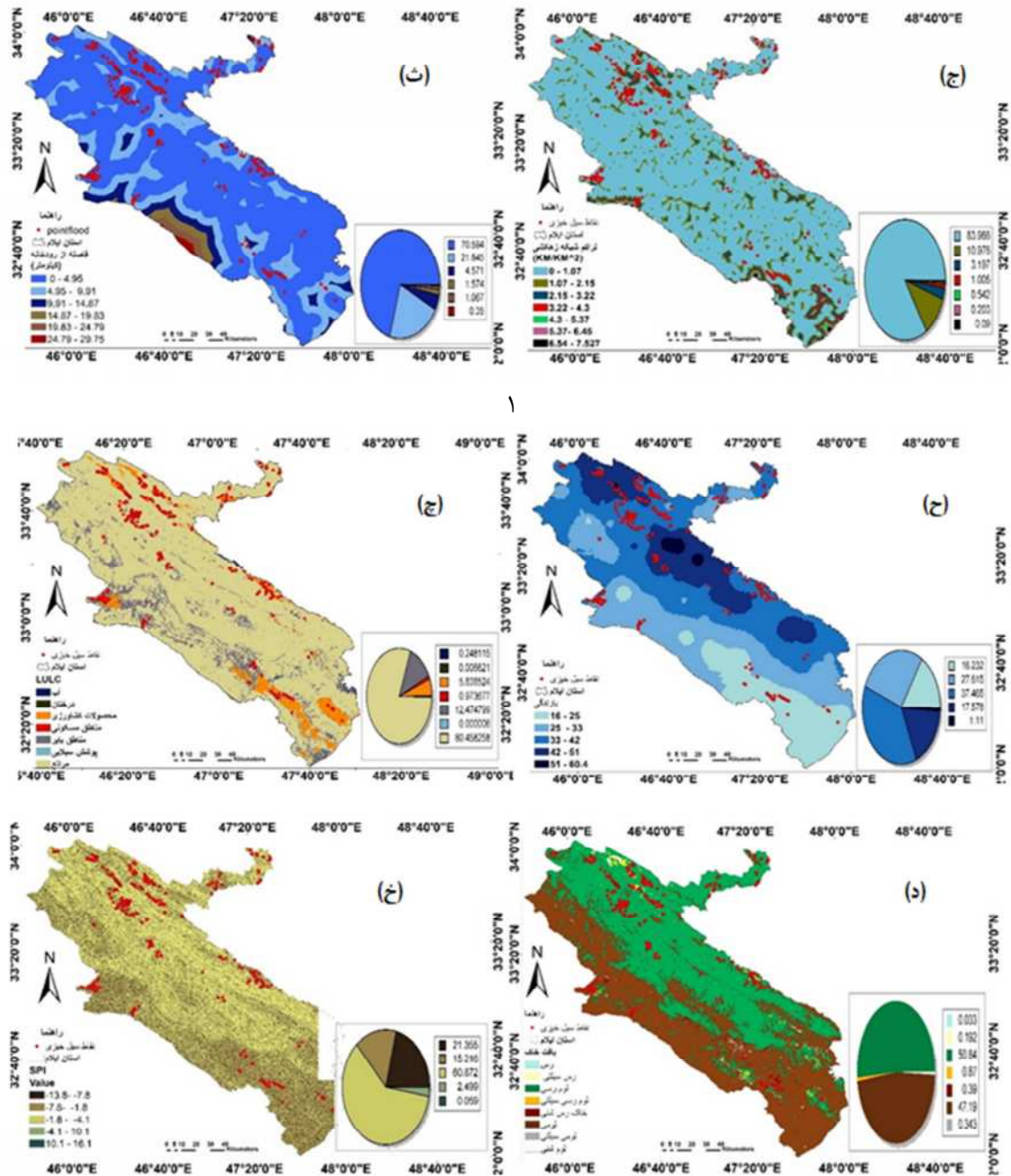
زمین‌شناسی: زمین‌شناسی یکی از عوامل موثر در وقوع سیلاب است که در این مطالعه در نظر گرفته شده است و در مورد منطقه مورد مطالعه اطلاعاتی پیرامون ماهیت سنگ‌شناسی، ساختار منطقه و هندسه آن ارائه می‌دهد (چن و همکاران، ۲۰۱۸). تنوع سنگ‌شناسی می‌تواند میزان آسیب‌پذیری سیل را تقویت یا کاهش دهد (کازاکیس و همکاران، ۲۰۱۵). شکل (۴س).

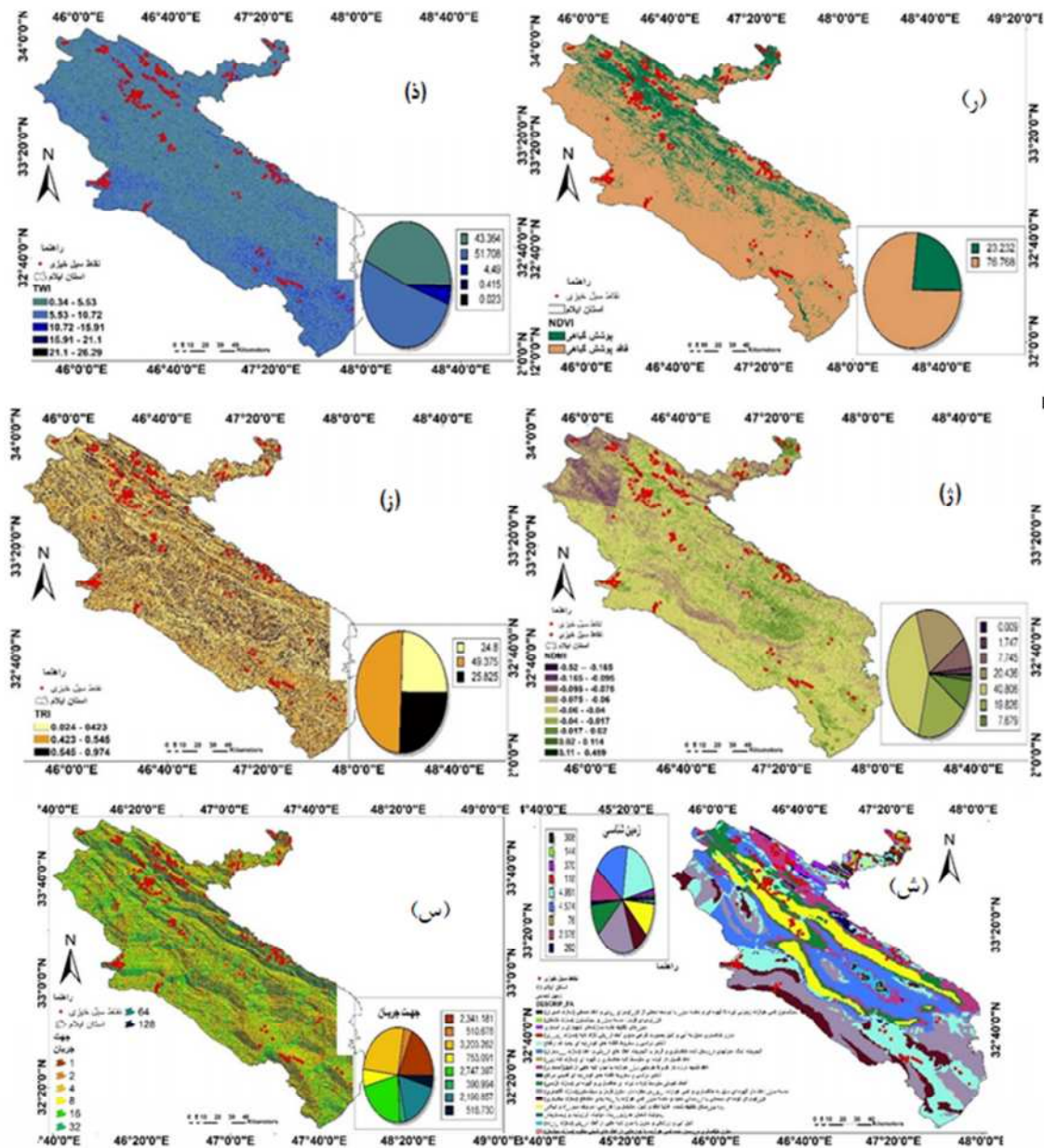
جهت جریان: یکی دیگر از عوامل مهم هیدرولوژیکی برای ارزیابی سیل است؛ زیرا مسیر جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و انباشت آب را تعیین می‌کند (خوریونیس^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ الجویدی^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه، جهت جریان از DEM (12.5 متر) تهیه شد. شکل (۴ش).



¹ Khoirunisa

² Al-Juaidi





شکل ۴: نقشه عوامل مورد استفاده جهت حساسیت سیل: (الف) ارتفاع، (ب) شیب، (پ) جهت شیب، (ت) انحناء، (ث) فاصله از رودخانه،

(ج) تراکم شبکه زهکشی، (چ) بارندگی، (ح) LULC، (خ) بافت خاک، (د) SPI، (ذ) NDVI، (ر) TWI، (ز) NDMI، (س) TRI.

زمین‌شناسی، (ش) جهت جریان. منبع: نگارندگان

انتخاب مدل

در این مطالعه از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی حساسیت سیل استفاده شد. دو مدل، RF و ANN در محیط برنامه نویسی R پیاده‌سازی شد. از بسته‌های موجود و کتابخانه‌های متداول R برای به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین، چارچوبی را برای ساخت و ارزیابی این مدل‌ها ارائه کرد.

مدل جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک مدل یادگیری ماشین نسبتاً جدید با سازگاری قوی با مجموعه داده‌ها است که می‌تواند داده‌های گسسته و پیوسته را پردازش کند (یانگ و لی^۱، ۲۰۲۲). مدل RF نسبت به چندخطی بودن حساس نیست و نتایج آن در صورت وجود داده‌های گم‌شده یا نامتعادل نسبتاً ثابت است (چن^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ یانگ و لی^۳، ۲۰۲۲e) که به‌طور گسترده برای مدل‌سازی حساسیت به سیل استفاده شده است (اسلام و همکاران، ۲۰۲۱).

مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۴)

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین فن‌های یادگیری ماشین است که توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیر هدف و متغیرهای توضیحی دارند (کیا^۵ و همکاران، ۲۰۱۲) که چندبعدی هستند (کمپولو^۶ و همکاران، ۲۰۰۳). امروزه، شبکه‌های عصبی مصنوعی اغلب برای مدل‌سازی بلایای سیل استفاده می‌شود (ژانگ و چن^۷، ۲۰۱۹).

معیارهای ارزیابی مدل

ارزیابی دقت مدل یک گام مهم در هر فن نقشه‌برداری پیش‌بینی است؛ زیرا اهمیت علمی مدل را مشخص می‌کند. این ارزیابی شامل مقایسه پیش‌بینی مدل‌ها بر روی داده‌های دیده‌نشده (داده‌های آزمایش) با نتایج شناخته‌شده از مجموعه داده آموزشی جداگانه است (چن^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). ضریب تعیین (رایت^۹، ۱۹۲۱) را می‌توان به‌عنوان نسبت واریانس در متغیر وابسته که از متغیرهای مستقل قابل‌پیش‌بینی است، تفسیر کرد. مقادیر مثبت ضریب تعیین در بازه [۰، ۱] که ۱ به معنای پیش‌بینی کامل است. مقادیری مانند $R^2 = 0.8$ به وضوح عملکرد بسیار خوب مدل رگرسیون را بدون توجه به محدوده مقادیر حقیقت زمین و توزیع آنها نشان می‌دهد. در این مطالعه، مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی برای ساخت و اعتبارسنجی مدل‌های حساسیت به سیل استفاده شد. MAE، R-squared یا R^2 و RMSE با استفاده از معادلات زیر برای تعیین دقت پیش‌بینی محاسبه شدند (معادل ۲، ۳، و ۴):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{Y} - Y_i)^2} \quad (4)$$

به ترتیب برای مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده. در هر موقعیتی، مقادیر بالای R^2 ، کوچک‌ترین مقدار MAE و RMSE نشان‌دهنده برازندگی بیشتر مدل است. تناسب بیشتر مدل همیشه با مقادیر کمتر MAE و RMSE و مقادیر بیشتر R^2 نشان داده می‌شود.

¹ Yang & Li

² Chen

³ Yang & Li

⁴ Artificial Neural Networks (ANN)

⁵ Kia

⁶ Campolo

⁷ Zhang & Chen

⁸ Chen

⁹ Wright

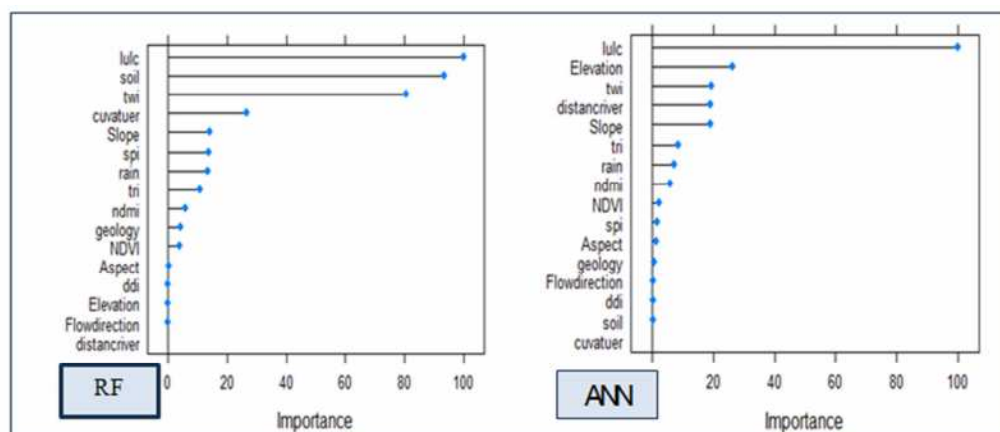
تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری سیل

لایه‌های رستری حساسیت به سیل در RStudio تولیدشده برای نقشه‌برداری وارد محیط GIS شدند. مدل‌های حساسیت به سیل حاصل از الگوریتم‌های RF و ANN، در ابتدا به‌طور پیش‌فرض به یک مقیاس احتمال پیوسته اختصاص داده شدند. برای دقت تفسیر و شناسایی مناطق حساس متمایز، از روش طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی استفاده شد. این روش به‌طور موثر داده‌ها را بر اساس توزیع داده‌های طبیعی و همسو با الگوهای فضایی وقوع سیل، طبقه‌بندی کرد. برای تکمیل احتمالات عددی، به هر کلاس یک برچسب کیفی از خیلی کم تا خیلی زیاد در مقیاس طبقه‌بندی اختصاص داده شد. این مبحث، روشی مناسب برای برقراری ارتباط اطلاعات مکانی پیچیده ارائه می‌دهد.

نتایج و بحث

اهمیت نسبی عوامل شرطی برای تهیه نقشه حساسیت سیل

مجموعه مدل‌های مبتنی بر درخت، با در نظر گرفتن اثرات تعاملی بین متغیرهای مستقل و اهمیت نسبی رتبه‌بندی آن‌ها در فرآیند مدل‌سازی، مزیت قابل توجهی ارائه می‌کنند (Mišić, ۲۰۲۰). ۱۶ لایه ورودی به‌عنوان متغیرهای مستقل وارد فرآیند مدل‌سازی شدند. اهمیت تمامی عوامل، تعیین شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. ارتباط هر عامل برای هر دو مدل با استفاده از نرم‌افزار R ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در هر دو مدل RF و ANN کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شد و در مدل RF عوامل انحنا، بافت خاک، تراکم شبکه زهکشی، جهت جریان، زمین‌شناسی، جهت شیب و در مدل ANN عوامل فاصله از رودخانه، جهت جریان، ارتفاع و تراکم شبکه زهکشی و جهت شیب به‌عنوان کم نفوذترین عوامل معرفی شدند. به‌طور کلی، مدل‌ها الگوی مشابهی را در اولویت‌بندی عوامل شرطی‌سازی برای حساسیت به سیل از خود نشان ندادند. این یافته‌ها از پژوهش‌های قبلی حمایت می‌کند که نشان می‌دهد کاربری اراضی عامل مهمی در حساسیت به سیل است (رحیمی و رحیمی داشلی‌برون، ۱۳۹۳؛ رشیدیان، ۱۴۰۱؛ ثقفیان و همکاران، ۱۳۸۵).



شکل ۵: اهمیت نسبی عوامل شرطی‌سازی: (الف) RF، (ب) ANN

معیارهای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل

این پژوهش با استفاده از معیارهایی مانند، MAE، Rsquared و RMSE، نتایج مدل را در برابر نقشه موجودی سیل به‌صورت کمی اعتبارسنجی کرد. نقشه‌های حساسیت سیل با استفاده از دو مدل RF و ANN تهیه شد. یافته‌های

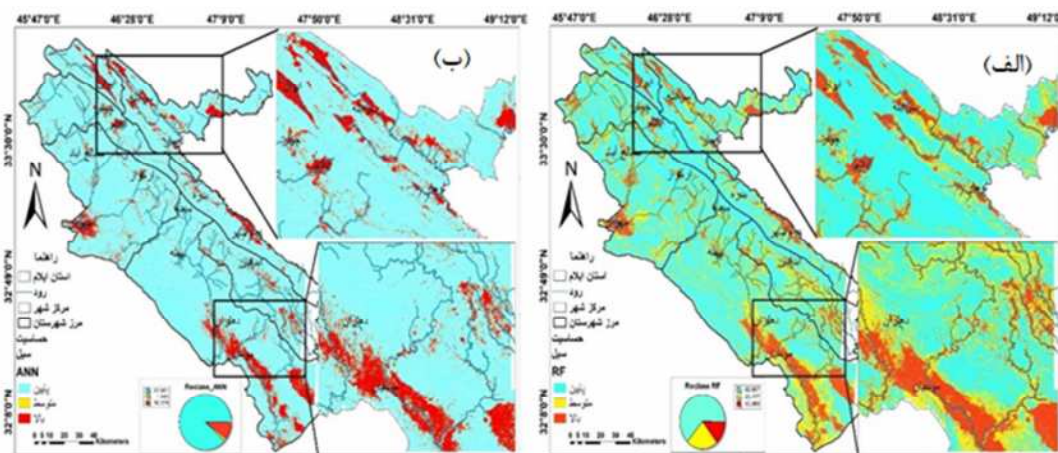
MAE، Rsquared و RMSE برای هر دو مدل یادشده نیز در جدول (۳) تجزیه و تحلیل شدند. نتایج به وضوح نشان داد که مدل RF دارای کمترین مقدار MAE که برابر با ۰/۰۸۸۹ و کمترین مقدار RMSE برابر با ۰/۱۸۷۲، بیشترین مقدار R squared که برابر ۰/۸۴۲۳ در مقایسه با مدل ANN عملکرد بهتری داشت جدول (۳). در نتیجه، مدل RF رابطه بسیار خوبی بین نقاط سیل واقعی و نقاط سیلاب پیش‌بینی‌شده در مقایسه با مدل ANN به‌کاررفته در مطالعه داشت. این نشان می‌دهد که مدل‌های RF دارای درجه بسیار بالایی از مقبولیت همراه با نقص‌های کمتر در هنگام مدل‌سازی نقشه حساسیت سیل (FSM) است.

جدول ۳: ارزیابی دقت دو مدل RF و ANN برای داده‌های آموزشی از طریق معیارهای خطای مختلف

مدل	RF	ANN
RMSE	۰,۱۸۷۲	۰,۲۵۹۱
R squared	۰,۸۴۲۳	۰,۷۰۵۶
MAE	۰,۰۸۸۹	۰,۱۶۲۸

تهیه نقشه حساسیت سیل

نقشه‌های حساسیت به سیل برای هر دو مدل RF و ANN تولید شد. نقشه‌ها یک مقیاس احتمال پیوسته از ۰ (کمترین حساسیت) تا ۱ (بالاترین حساسیت) را نشان دادند. برای افزایش تفسیرپذیری، نقشه‌ها با استفاده از روش شکست طبیعی به ۳ دسته طبقه‌بندی شدند. این نکته قابل توجه است که محدوده سیلاب برای هر طبقه بین دو مدل متفاوت است. به هر طبقه یک برچسب (حساسیت کم، متوسط، بالا) اختصاص داده شد. شکل ۵ (الف و ب) تجزیه و تحلیل نقشه حساسیت سیل را برای هر دو مدل نشان داد که در مدل RF، بالاترین و کمترین کلاس حساسیت به ترتیب ۱۳/۹٪ و ۶۲/۹٪ از کل مساحت را تشکیل می‌دهند. در حالی که این مقادیر برای مدل ANN ۱۰/۲٪ و ۸۸٪ بود. جدول (۴).



شکل ۵: (الف) نقشه حساسیت سیل با مدل ANN (ب) نقشه حساسیت سیل با مدل RF منبع: نگارندگان

جدول ۴: آماری از حساسیت سیل با مدل RF و ANN

مدل	حساسیت به سیل	مساحت (km^2)	درصد (%)
ANN	بالا	۱۹۵۸/۰۸	۱۰/۲
	متوسط	۳۵۵/۱۵۸	۱/۸
	بدون / پایین	۱۶۹۳۳/۵۳	۸۸
RF	بالا	۲۶۸۷/۹۹	۱۳/۹
	متوسط	۴۴۶۰/۸۲	۲۳/۲
	بدون / پایین	۱۲۰۹۷/۹۸	۶۲/۹

این مطالعه با موفقیت یک چارچوب جامع جهت ارزیابی خطر سیل را برای استان ایلام ارائه می‌کند. در این پژوهش، برای اولین بار با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، نقشه‌های موثر و قابل اعتماد خطر سیل برای منطقه تهیه شد. این نقشه‌ها بر مؤلفه خطر مدیریت ریسک بلایا تمرکز دارد و احتمال وقوع سیل در سراسر استان ایلام را نشان می‌دهند.

چندین مطالعه، فناوری‌های سنجش‌ازدور را با یادگیری ماشینی ادغام کرده‌اند تا نقشه‌های حساسیت خطر سیل را توسعه دهند. به‌عنوان مثال، حسن الزمان^۱ (۲۰۲۲) از سه مدل یادگیری ماشین گروهی، یعنی جنگل تصادفی (RF)، ساده بیز (NB) و افزایش گرادیان شدید (XG) برای ایجاد نقشه‌های حساسیت به سیل استفاده کرد که عملکرد مدل RF برای FSM بهتر از مدل‌های دیگر بود. سابرو^۲ و همکاران (۲۰۲۳) از سه فن یادگیری ماشین (RF، LightGBM، و CatBoost) برای تهیه نقشه‌های حساسیت به سیل (FSMs) استفاده کردند. ۱۰ تا ۱۳ درصد از کل منطقه به‌شدت مستعد سیل است. همچنین، رن و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین را با استفاده از مجموعه داده‌های نامتعادل نقاط سیل و غیر سیل مشتق‌شده از موجودی سیل مبتنی بر ماهواره بررسی کردند. آنها کشف کردند که دقت مدل زمانی به حداکثر می‌رسد که مجموعه داده متعادل باشد و نقاط سیلابی و غیرسیلابی برابری داشته باشد. بر اساس نتایج آنها، این مطالعه مجموعه داده‌ای از ۱۵۰۰ نقطه سیل و غیرسیل را برای آموزش و آزمایش الگوریتم‌های یادگیری ماشین انتخاب کرد. احمد^۳ و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین گروهی، تقویت گرادیان شدید (XGBoost) و جنگل تصادفی (RF) حساسیت سیل بررسی کردند. نزدیکی به رودخانه‌ها و نواحی پست‌تر از عوامل مهم در قوع سیلاب هستند و مدل RF از نظر دقت پیش‌بینی بهتر از XGBoost عمل کرد.

یک محدودیت کلیدی روش‌های موجود برای نقشه‌برداری حساسیت سیل، اتکای آن‌ها به فهرست سیل رویدادهای گذشته است که معمولاً از طریق تصاویر ماهواره‌ای پس از سیل یا بررسی‌های میدانی به‌دست می‌آیند. چنین موجودی‌هایی اغلب نمی‌توانند میزان کامل سیل را در اوج خود ثبت کنند و حداکثر سیل‌های احتمالی آینده (PMF) را در نظر نمی‌گیرند که تحت پیش‌بینی‌های فعلی تغییرات آب‌وهوایی بسیار محتمل است. این پژوهش این شکاف‌ها را با استفاده از پهنه‌بندی مدل Maxent برطرف کرد. نقاط سیل با استفاده از مدل Maxent تهیه شد.

از موجودی سیل به‌دست‌آمده، مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی ایجاد شد و سپس با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ANN و RF)، نقشه‌های حساسیت سیل در استان ایلام تهیه شد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد

¹ Hasanuzzaman² Saber³ Ahmad

که RF بهتر از ANN عمل می‌کند. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که مدل RF دارای کمترین مقدار MAE برابر ۰/۰۸۸۹، کمترین مقدار RMSE برابر است با ۰/۱۸۷۲ و بالاترین مقدار Rsquared برابر با ۰/۸۴۲۳ در مقایسه با مدل ANN است. یافته‌های این مطالعه با مطالعات قبلی که همچنین دقت بالاتری را برای RF در مقایسه با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین ثبت کرده‌اند، مطابقت دارد (احمد و همکاران، ۲۰۲۵؛ وی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ حسن الزمان^۲، ۲۰۲۲).

مدل RF نشان داد که مساحت ۲۶۸۷،۹۹ کیلومتر مربع از استان ایلام "بسیار" مستعد خطر سیل است، درحالی‌که ۴۴۶۰،۸۲ کیلومتر مربع در محدوده با حساسیت متوسط سیل واقع شده است. مدل ANN، ۱۹۵۸،۰۸ کیلومتر مربع و مساحت ۳۵۵،۱۵۸ کیلومتر مربعی را به‌عنوان مناطق حساس به سیل "بالا" و "متوسط" شناسایی کرد (جدول ۱۳). نتایج نشان داد که بر اساس مدل‌های RF، ANN، به‌ترتیب ۱۳/۹٪، ۱۰/۲٪ از محدوده مورد مطالعه در منطقه حساس به سیل "بالا" قرار دارند. بیشتر مناطق با حساسیت بالا در منطقه ورودی دره‌های مهم استان به دشت‌ها یافت شد. برای دو مدل، یک الگوی توزیع جغرافیایی سازگار از مناطق مستعد سیل با توجه به منطقه شامل گروه‌های «متوسط» و «بالا» مشاهده شد. با این حال، در مدل ANN، آمار طبقه ب «بالا» به‌طور جزئی کمتر از مدل RF است. نتایج نشان داد که شهر بیشتر در مناطق با حساسیت بالا و مناطق مرتفع کوهستانی و تپه‌ای بر مناطق با حساسیت کم و یا بدون خطر سیل واقع شدند.

نتیجه‌گیری

سیل یک بلای طبیعی است که زندگی مردم را تهدید می‌کند، انتظار می‌رود سیل‌ها به‌دلیل تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی با تعداد و شدت بیشتر رخ دهند. به همین دلیل، بهبود روش‌های پیش‌بینی و پیشگیری از سیل برای کاهش خطرات جانی و اثرات منفی اجتماعی و اقتصادی سیل‌ها بسیار مهم است. این امر مستلزم رویکردی جدید، قدرتمند و مؤثر برای کاهش آسیب‌های وارده به زندگی و اقتصاد انسان است. این مطالعه با رویکرد از یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مناطقی با احتمال وقوع سیل تمرکز دارد.

با توجه به اینکه بخش وسیعی از استان ایلام کوهستانی و دارای ارتفاع بالایی است، در امتداد دره‌های مهم استان سیل رخ داده است. وقتی دره‌ها وارد دشت‌ها می‌شوند، به‌دلیل تغییرات مورفولوژی و باز شدن دشت‌ها، آب از بستر طبیعی رودخانه‌ها خارج شده و وارد پهنه‌های دشتی سیل‌گیر می‌شوند.

مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با استفاده از یک پایگاه داده فضایی ساخته شده‌اند که داده‌ها شامل ۱۶ عوامل توپوگرافی و ژئومحیطی مؤثر سیل و ۱۰۴۱ وقوع سیل قبلی است. آزمایش‌ها شواهدی مبنی بر چندخطی بودن بین عوامل شرطی‌سازی شناسایی شده نشان نداد. یافته‌های اعتبارسنجی نشان داد که دو مدل استفاده‌شده عملکرد قابل‌توجهی داشتند. با این حال، RF از نظر محاسباتی، دقت پیش‌بینی و سایر معیارهای ارزیابی کارآمدتر از ANN است که با مقدار $R^2 = 0/8423$ نشان داد. زیرا آموزش مدل با RF به زمان اجرای کمتری نیاز دارد. بنابراین، مدل RF ممکن است یک نقشه حساسیت به سیل و یک روش بالقوه برای پیش‌بینی سیل در عصر داده‌های بزرگ به‌دلیل ظرفیت آن برای رسیدگی به انواع مختلف متغیرها ایجاد کند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی

¹ Vu

² Hasanuzzaman

مطابقت دارد (احمد و همکاران، ۲۰۲۵؛ وی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ حسن الزمان^۲، ۲۰۲۲). و کارایی RF را در مدیریت مجموعه داده‌های متنوع و پیچیده با نیاز به پارامتر کمتر در مقایسه با ANN برجسته می‌کند. شناسایی عوامل کلیدی مانند کاربری اراضی، ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) درک پویایی سیل را در منطقه مورد مطالعه تقویت کرده است و همچنین نتایج نشان داد که تقریباً ۱۰/۲٪ تا ۱۳/۹٪ از کل منطقه به‌شدت در برابر سیل آسیب‌پذیر است. نقشه‌های حاصل ممکن است به عنوان مبنایی برای ایجاد طرح‌هایی برای به حداقل رساندن حساسیت سیل عمل کند.

نقشه‌های حساسیت سیل که از طریق این مطالعه ایجاد شده است، اطلاعات مهمی را برای مقامات در جهت توسعه زیرساخت و تیم‌های مدیریت بلایا ارائه می‌دهد. این نقشه‌ها شناسایی مناطق بسیار حساس به سیل را امکان‌پذیر می‌سازد و برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های توسعه متمرکز بر کاهش خطرات سیل را هدایت می‌کند. علاوه بر این، آنها به مقامات برنامه‌ریزی کاربری زمین در انتخاب مکان‌هایی برای توسعه آینده که کمتر مستعد سیل هستند، کمک خواهند کرد. برای مقامات مدیریت بلایا، نقشه‌ها به شناسایی جوامعی که قبلاً در معرض خطر سیل بوده‌اند، کمک می‌کند. به این ترتیب، نقشه‌های حساسیت به سیل به‌عنوان یک ابزار حیاتی برای تصمیم‌گیری آگاهانه و کاهش خطر سیل استفاده خواهد شد. تحقیقات آینده باید بر ترکیب داده‌های هیدرولوژیکی و آب‌وهوایی زیرحوضه‌های استان در معرض سیل برای افزایش دقت مدل و بررسی پتانسیل الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری حساسیت سیل تمرکز کند. این مطالعه، زمینه را برای توسعه روش‌های قوی و مبتنی بر داده‌ها برای مدیریت خطر سیل در مناطق مشابه در مکان دیگر فراهم می‌کند.

منابع

- ثقفیان، بهرام؛ فرازجو، حسن؛ سپهری، عادل؛ نجفی‌نژاد، علی. (۱۳۸۵). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر سیل خیزی حوزه آبریز سد گلستان، تحقیقات منابع آب ایران، سال دوم، ش ۱، صص: ۲۸-۱۸.
- رحیمی، داریوش؛ رحیمی داشلی‌برون، یونس. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات اقلیم و کاربری اراضی بر سیلاب در شمال ایران (حوضه مادرسو)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۷، ش ۱، صص: ۸۹-۱۰۲.
- رشیدیان، مجتبی. (۱۴۰۱). ارزیابی اثرات تغییر کاربری حال و آینده بر روی ریسک سیلاب، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- سلامتی هرمزی، وحید؛ امیدوار، کمال؛ کاوسی، رضا؛ حمزه نژاد. مجتبی. (۱۳۹۶). شناسایی و تحلیل همدیدی - دینامیکی الگوهای جوی سیلاب آبان ۱۳۹۴ در استان‌های ایلام و لرستان. نیوار، دوره ۴۱، ش (۹۶-۹۷)، صص: ۲۷-۹.
- طهماسبی، قباد. (۱۴۰۰). مدیریت بحران مخاطرات شهری با تأکید بر خطر وقوع سیل (مطالعه موردی: شهر ایلام)، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- عباس‌زاده تهرانی، نادیا؛ مخدوم فرخنده، مجید؛ مهدوی، محمد. (۱۳۸۹). بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان دبی سیلاب‌ها با کاربرد فناوری سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبریز رودخانه مادرسو (پارک ملی گلستان))، پژوهش‌های محیط زیست، دوره ۱، ش ۲، صص: ۱۴-۱.
- لاهوئی نسب، سیده فائز؛ قاسمیه، هدی. (۱۴۰۳). کاربرد DEMATEL-AHP و SVM در شناسایی مناطق مستعد سیلاب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بزرگ کاشان). تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، ش ۱۰، صص: ۱۹۶۰-۱۹۳۹.

¹ Vu

² Hasanuzzaman

- نیکپور، نورالله؛ ثروتی، محمدرضا؛ حسینزاده، محمدمهدی؛ ده‌بزرگی، مریم. (۱۳۹۳). بررسی ژئومورفولوژی (مورفوتکتونیک) بخش میانی تاقدیس کبیر کوه واقع در استان ایلام (از پشته اریشت تا امام زاده شاه محمد کوه نشین)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- Adeyemi, A. B., & Komolafe, A. A. (2025). Flood hazard zones prediction using machine-learning-based geospatial approach in the lower Niger River basin, Nigeria. *Natural Hazards Research*, 5(2), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.01.002>
- Ahmad, I., Farooq, R., Ashraf, M. *et al.* Improving flood hazard susceptibility assessment by integrating hydrodynamic modeling with remote sensing and ensemble machine learning. *Nat Hazards* 121, 7839–7868 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07109-2>
- Ahmed, I. A., Talukdar, S., Shahfahad, Parvez, A. *et al.* (2022). Flood susceptibility modeling in the urban watershed of Guwahati using improved metaheuristic-based ensemble machine learning algorithms. *Geocarto International*, 37(26), 12238–12266.
- Al-Juaidi, A. E., Nassar, A. M., & Al-Juaidi, O. E. (2018). Evaluation of flood susceptibility mapping using logistic regression and GIS conditioning factors. *Arab J Geosci*, 11(24), 765. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4095-0>
- Amadio, M., Mysiak, J., Carrera, L., & Koks, E. (2016). Improving flood damage assessment models in Italy. *Natural Hazards*, 82, 2075–2088. DOI 10.1007/s11069-016-2286-0
- Andaryani, S., Nourani, V., Haghighi, A. T., & Keesstra, S. (2021). Integration of hard and soft supervised machine learning for flood susceptibility mapping. *Journal of Environmental Management*, 291, 112731. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112731>
- Arora, A., Arabameri, A., Pandey, M. *et al.* (2021). Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. *Science of the Total Environment*, 750, 141565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141565>
- Ayalew, T. B., & Krajewski, W. F. (2017). Effect of river network geometry on flood frequency: a tale of two watersheds in Iowa. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8), 06017004.
- Aydin, H. E., & Iban, M. C. (2023). Predicting and analyzing flood susceptibility using boosting-based ensemble machine learning algorithms with Shapley Additive exPlanations. *Natural Hazards*, 116(3), 2957–2991.
- Band, S. S., Janizadeh, S., Chandra Pal, S., *et al.* (2020). Flash flood susceptibility modeling using new approaches of hybrid and ensemble tree-based machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(21), 3568.
- Benkirane, M., Laftouhi, N. E., El Mansouri, B. *et al.*, ... & Zamrane, Z. (2020). An approach for flood assessment by numerical modeling of extreme hydrological events in the Zat watershed (High Atlas, Morocco). *Urban Water Journal*, 17(5), 381–389.
- Bera, A., Meraj, G., Kanga, S., *et al.* (2022). Vulnerability and risk assessment to climate change in Sagar Island, India. *Water*, 14(5), 823.
- Bui, D. T., Pradhan, B., Nampak, H., *et al.* (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on a neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*, 540, 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.027>
- Bui, Q. T., Nguyen, Q. H., Nguyen, X. L., *et al.* (2020). Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural networks for flood susceptibility mapping. *Journal of Hydrology*, 581, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124379>
- Campolo, M., Soldati, A., & Andreussi, P. (2003). Artificial neural network approach to flood forecasting in the River Arno. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 381–398.
- Chen, S., Arrouays, D., Mulder, V. L., *et al.* & Walter, C. (2022). Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409, 115567. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>
- Chen, W., Li, Y., Xue, W., *et al.* (2020). Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Science of The Total Environment*, 701, 134979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134979>
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., & Naghibi, S. A. (2018). A comparative study of landslide susceptibility maps produced using support vector machine with different kernel functions and entropy data mining models in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 647–664. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1010-y>
- Choubin, B., Moradi, E., Golshan, M., *et al.* (2019). An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. *Science of the Total Environment*, 651, 2087–2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>
- Costache, R., Pham, Q. B., Arabameri, A., *et al.* (2022). Flash-flood propagation susceptibility estimation using weights of evidence and their novel ensembles with multicriteria decision making and machine learning. *Geocarto International*, 37(25), 8361–8393.

- Debnath, J., Sahariah, D., Nath, N., *et al.* (2024). Modelling on assessment of flood risk susceptibility at the Jia Bharali River basin in Eastern Himalayas by integrating multicollinearity tests and geospatial techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(2), 2393-2419.
- Desai, B., Maskrey, A., Peduzzi, P., *et al.* (2015). Making development sustainable: the future of disaster risk management, global assessment report on disaster risk reduction (UNISDR).
- Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., *et al.* (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. *Natural Hazards*, 78, 1749-1776. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1799-2>
- Duque, E. L., & Aquino, P. T. (2020). Anthropometric analysis in automotive manual transmission gearshift quality perception. In CTI SYMPOSIUM 2018: 17th International Congress and Expo 3-6 December 2018, Berlin, Germany (pp. 97-109). *Springer Berlin Heidelberg*.
- Fayne, J. V., Bolten, J. D., Doyle, C. S., *et al.* (2017). Flood mapping in the lower Mekong River Basin using daily MODIS observations. *International journal of remote sensing*, 38(6), 1737-1757.
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in soil science*, 33, 171-194. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-2)
- Hasanuzzaman, M., Islam, A., Bera, B., & Shit, P. K. (2022). A comparison of performance measures of three machine learning algorithms for flood susceptibility mapping of river Silabati (tropical river, India). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103198. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103198>
- Islam, A. R. M. T., Talukdar, S., Mahato, S., *et al.* (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101075.
- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>
- Khoirunisa, N., Ku, C. Y., & Liu, C. Y. (2021). A GIS-based artificial neural network model for flood susceptibility assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1072.
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., *et al.* (2018). A comparative assessment of decision tree algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Science of the Total Environment*, 627, 744-755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.266>
- Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B. *et al.* (2012). An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67, 251-264. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1504-z>
- Komolafe, A. A., Herath, S., & Avtar, R. (2018). Methodology to assess potential flood damages in urban areas under the influence of climate change. *Natural Hazards Review*, 19(2), 05018001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000278)
- Kumar, A., Houze, R. A., Rasmussen, K. L., & Peters-Lidard, C. (2014). Simulation of a flash flooding storm at the steep edge of the Himalayas. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 212-228.
- Lee, M. J., Kang, J. E., & Jeon, S. (2012a, July). Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. In 2012, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 895-898). IEEE DOI: [10.1109/IGARSS.2012.6351414](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351414)
- Liu, J., Wang, J., Xiong, J., *et al.* (2021). Hybrid models incorporating bivariate statistics and machine learning methods for flash flood susceptibility assessment based on remote sensing datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4945. DOI: [10.3390/rs13234945](https://doi.org/10.3390/rs13234945)
- Mahmood, S. H. (2024). Estimating Models and Evaluating their Efficiency under Multicollinearity in Multiple Linear Regression: A Comparative Study. *Zanco Journal of Human Sciences*, 28(5), 264-277.
- Mateo-Garcia, G., Veitch-Michaelis, J., Smith, L., *et al.* (2021). Towards global flood mapping onboard low-cost satellites with machine learning. *Scientific reports*, 11(1), 7249.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.
- Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V. P., Wright, D. B., Villarini, G., ... & Stedinger, J. R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(6), 03122001.
- Mišić, V. V. (2020). Optimization of tree ensembles. *Operations Research*, 68(5), 1605-1624.
- Mohajane, M., Essahlaoui, A. L. I., Oudija, F., *et al.* (2018). Land use/land cover (LULC) using Landsat data series (MSS, TM, ETM+, and OLI) in Azrou Forest, in the Central Middle Atlas of Morocco. *Environments*, 5(12), 131.

- Mohammadi, A., Kamran, K. V., Karimzadeh, S., *et al.* (2020). Flood detection and susceptibility mapping using Sentinel-1 time series, alternating decision trees, and bag-adtree models. *Complexity*, 2020, 1-21. <https://doi.org/10.1155/2020/4271376>
- Mojaddadi, H., Pradhan, B., Nampak, H., Ahmad, N., & Ghazali, A. H. B. (2017). Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1080-1102.
- Nevo, S., Morin, E., Gerzi Rosenthal, A., *et al.* (2022). Flood forecasting with machine learning models in an operational framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 4013-4032.
- Opperman, J. J., Galloway, G. E., Fargione, J., *et al.* (2009). Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers. *Science*, 326(5959), 1487-1488.
- Phillips, T. H., Baker, M. E., Lautar, K., *et al.* (2019). The capacity of urban forest patches to infiltrate stormwater is influenced by soil physical properties and soil moisture. *Journal of Environmental Management*, 246, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.127>
- Plate, E. J. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1-2), 2-11.
- Pourali, S. H., Arrowsmith, C., Chrisman, N., *et al.* (2016). Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9, 39-54. <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>
- Rahman, M., Ningsheng, C., Mahmud, G. I., *et al.* (2021). Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101224.
- Rahmati, O., Falah, F., Naghibi, S. A., *et al.* (2019). Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. *Science of the total environment*, 672, 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.496>
- Ren, H., Pang, B., Bai, P., *et al.* (2024). Flood susceptibility assessment with random sampling strategy in ensemble learning (RF and XGBoost). *Remote Sensing*, 16(2), 320.
- Saber, M., Boulmaiz, T., Guermoui, M., *et al.* (2023). Enhancing flood risk assessment through integration of ensemble learning approaches and physically-based hydrological modeling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2203798.
- Sahu, A. S., & Bengal, N. W. (2018). Detection of water-logged areas using geoinformatics techniques and relationship study in Panskura-Tamluk flood plain (India). *Trans. Inst. Indian Geographers*, 40(1), 9-24.
- Salvati, A., Nia, A. M., Salajegheh, A., *et al.* (2023). Flood susceptibility mapping using support vector regression and hyper-parameter optimization. *Journal of Flood Risk Management*, e12920. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12920>
- Sarkar, D., & Mondal, P. (2020). Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region. *Applied Water Science*, 10(1), 1-13.
- Seydi, S. T., Kanani-Sadat, Y., Hasanlou, M., *et al.* (2022). Comparison of Machine Learning Algorithms for Flood Susceptibility Mapping. *Remote Sensing*, 15(1), 192.
- Shirani, K., & Zakerinejad, R. (2021). Watershed prioritization for the identification of spatial hotspots of flood risk using the combined TOPSIS-GIS-based approach: a case study of the Jarahi-Zohre catchment in Southwest Iran. *AUC GEOGRAPHICA*, 56(1), 120-128.
- Sugianto, S., Deli, A., Miswar, E., *et al.* (2022). The Effect of Land Use and Land Cover Changes on Flood Occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*, 11(8), 1271.
- Teegavarapu, R. S. (2012). *Floods in a changing climate: Extreme precipitation*. Cambridge University Press.
- Tripathi, P. (2015). Flood disaster in India: an analysis of trend and preparedness. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research*, 2(4), 91-98.
- Uddin, K., Gurung, D. R., Giriraj, A., & Shrestha, B. (2013). Application of remote sensing and GIS for flood hazard management: a case study from Sindh Province, Pakistan. *American Journal of Geographic Information Systems*, 2(1), 1-5.
- Verma, S., Bhatla, R., Shahi, N. K., & Mall, R. K. (2022). Regional modulating behavior of Indian summer monsoon rainfall in context of spatio-temporal variation of drought and flood events. *Atmospheric Research*, 274, 106201. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106201>
- Vu, V. T., Nguyen, H. D., Vu, P. L., *et al.* (2023). Predicting land use effects on flood susceptibility using machine learning and remote sensing in coastal Vietnam. *Water Practice and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.088>
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., & Peng, L. (2020). Flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks. *Journal of Hydrology*, 582, 124482.
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., *et al.* (2021). Flood susceptibility mapping by integrating frequency ratio and index of entropy with multilayer perceptron and classification and regression tree. *Journal of Environmental Management*, 289, 112449. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124482>
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water resources management*, 25, 3465-3484. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112449>

- Wang, Y., Zhang, P., Xie, Y., *et al.* (2025). Toward explainable flood risk prediction: Integrating a novel hybrid machine learning model. *Sustainable Cities and Society*, 120, 106140. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106140>
- Winzeler, H. E., Owens, P. R., Read, Q. D., *et al.* (2022). Topographic wetness index as a proxy for soil moisture in a hillslope catena: flow algorithms and map generalization. *Land*, 11(11), 2018.
- Wright, S. (1921). Correlation and causation. *Journal of agricultural research*, 20(7), 557.
- Xie, K., Ozbay, K., Zhu, Y., & Yang, H. (2017). Evacuation zone modeling under climate change: A data-driven method. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(4), 04017013.
- Yang, Y., & Li, X. (2022). Automatic Correction of Parameters of Rice Phenology Prediction Model Based on Random Forest Algorithm. *Procedia Computer Science*, 208, 435-441. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.10.061>
- Yousefi, S., Pourghasemi, H. R., Emami, S. N., *et al.* (2020). A machine learning framework for multi-hazard modeling and mapping in a mountainous area. *Scientific Reports*, 10(1), 12144.
- Zanchetta, A. D., & Coulibaly, P. (2020). Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. *Water*, 12(2), 570.
- Zhang, J., & Chen, Y. (2019). Risk assessment of flood disaster induced by typhoon rainstorms in Guangdong province, China. *Sustainability*, 11(10), 2738.
- Zhang, M., Fu, X., Liu, S., & Zhang, C. (2025). Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Actionable Flood Risk Assessment: Multi-Scenario Projection in the Ili River Basin in China Under Climate Change. *Remote Sensing*, 17(7), 1189.

Analysis of changes in the frequency of maximum temperatures in Iran

Farahnaz Khorramabadi¹, Mohammad Sadegh Keikhsravi-Kiany^{2*} , Seyed Abolfazl Masoodian³

1. PhD student of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran
 2. **Corresponding Author**, Assistant Professor of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran
 Email: ms.keikhsravikiany@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-6264>
 3. Professor of Climatology, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 06 May 2025 Revised: 28 May 2025 Accepted: 06 June 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Extreme temperatures, Global warming, Era5 database, Iran.	In recent years, there has been a notable increase in the intensity and frequency of extreme temperatures, encompassing both extreme heat events-such as hot days, hot nights, and heat waves-and extreme cold events, including cold days and cold nights. This study analyzes changes in the frequency of maximum temperatures in Iran utilizing daily temperature data from the Era5 database, covering the period from 11/10/1357 to 10/10/1402. Following the year 1377, the frequency distribution of maximum temperatures exhibited a notable shift towards higher values, accompanied by a reduction in seasonal temperature differentiation. This transition resulted in a change in the temperature distribution from a biexponential to a uni exponential model, as well as an increase in leftward skewness within the temperature distribution. The frequency of 37 degrees Celsius experienced the most significant increase, recorded at 0.5 percent, while the frequency of 1 degree Celsius demonstrated the most substantial decrease, exceeding 0.3 percent. These observed changes may be attributable to local factors, such as urbanization and desertification, as well as broader influences stemming from global climatic phenomena, including significant El Niño events. An examination of the thickness of the 850-500 hectopascal layer indicates that the spike in maximum temperatures in Iran in 1998 is not merely a localized occurrence but rather a manifestation of global climate change that has disrupted the previous climatic equilibrium. These changes indicate the widespread and continuous effects of global warming on the climate of Iran and beyond.
How to Cite: Khorramabadi, F., Keikhsravi-Kiany, M. S. and Masoodian, S. A. (2026). Analysis of changes in the frequency of maximum temperatures in Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 55-74.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.51939.2114	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

One of the most important challenges in human preparedness to face climate change is understanding the behaviour of extremes at the local scale. Extreme temperatures affect energy, health systems, and agriculture, thereby straining resources and the economy. Understanding the probability distribution of temperatures in the coming years, including extreme temperatures, plays an important role in the adaptation of humans and ecosystems to climate change (Guirguis et al., 2018: 1). In addition, under climate warming conditions, the characteristics of climate extremes will change; in particular, the intensity and frequency of high temperatures and heavy precipitation will increase, which will have potentially harmful effects on nature, the economy, and society (Delgado-Torres et al., 2023: 1). The impact of global warming on extreme climates (such as heat waves and extreme precipitation) is greater than on average climates, and the probability of extreme weather events will continue to increase in the future. The increase in extreme weather events has adverse effects on human society, health and well-being, economy, and natural ecosystems (Darand, 2020: 1). In recent years, various studies and research have been conducted on temperature changes and extreme weather events around the world (Easterling et al., 1997; Seneviratne et al., 2021; Sanchez et al., 2023). In the present study, an attempt has been made to analyze and investigate the frequency of temperature changes in Iran in detail.

DATA AND METHODOLOGY

To conduct the present study, the daily maximum temperature data of the ERA5 database from 11/10/1357 to 10/10/1402 for 16436 days over 44 to 64 degrees east and 25 to 40 degrees north with a spatial resolution of 0.25×0.25 , was utilized. Only the pixels covering the Iranian territory were utilized to examine Iran's temperature characteristics. To extract the daily maximum temperature from the ERA5 database, we extracted the hourly temperature for each day and considered the largest value among the 24 data on each day as the maximum temperature of that day. Also, to investigate the relationship between temperature changes and atmospheric thickness, geopotential data of 850 and 500 hectopascal levels, respectively as ground surface and middle layer atmospheric levels, were taken from the ECMWF database daily and at a spatial resolution of 0.25×0.25 degrees in (NC) format. Programming operations in the Python software environment were also used to process and analyze the data.

RESULTS AND DISCUSSION

In the initial phase of this study, an analysis of the general structure of maximum temperatures in Iran was conducted by calculating the average maximum temperature for each day across the country. The resulting time series of temperature data was smoothed using a 365-day moving window. This examination of the smoothed time series revealed a notable increase in maximum temperature in the year 1377, which is distinctly observable within the data (Figure 1). To assess whether this temperature increase in 1377 is consistent across the entirety of Iran, a maximum temperature dataset with dimensions of $81 \times 61 \times 16436$ was utilized. The smoothed time series for maximum temperature was computed for each grid cell using the same 365-day window, followed by the standardization of the smoothed temperature array. Subsequently, a principal component analysis (PCA) was performed on this standardized dataset. The results indicated that the scores of the first principal component were consistently positive before 1377 and predominantly negative thereafter. Furthermore, the investigation into temperature anomalies across Iran demonstrated that a significant temperature increase has been recorded in 45% of the country's area since 1377. To explore the potential causes of these temperature changes—whether they are attributable to factors such as urbanization, deforestation, desertification, the desiccation of lakes, and other anthropogenic influences, or whether broader climatic patterns are at play—data on geopotential height values over the Northern

Hemisphere at the 850 and 500 hectopascal levels were extracted. The atmospheric thickness in these two layers over Iran and the Northern Hemisphere was subsequently calculated. The findings indicate that atmospheric thickness over Iran has experienced a significant increase since 1377. Consequently, the year 1377 can be regarded as a jumping point in the temperature time series for the Northern Hemisphere, as the temperature values in the lower atmosphere are directly influenced by atmospheric thickness; thus, an increase in atmospheric thickness correlates with an increase in temperature.

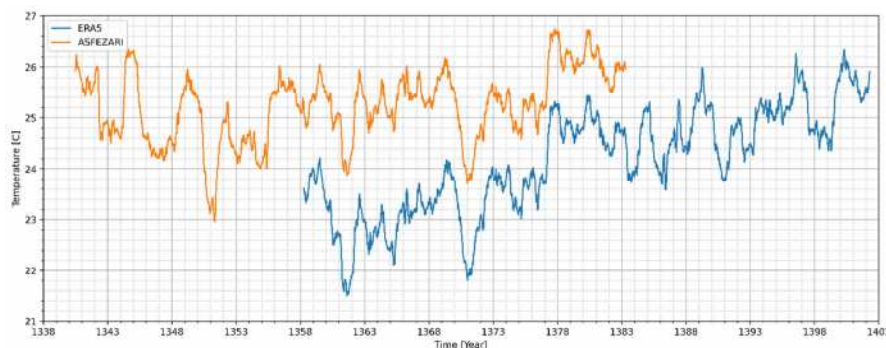


Figure 1. Smoothed time series of maximum temperature in Iran based on Asfazari data Era5 dataset.

CONCLUSION

This study analyzed daily maximum temperature data from 11/10/1357 to 10/10/1402, covering a total of 16,436 days, to investigate changes in maximum temperature characteristics in Iran. The smoothed time series revealed a significant increase in maximum temperatures in 1377, which was evident across most regions of Iran. Upon standardizing the data, the principal component analysis indicated that the scores for the first component were consistently positive before 1377 but became negative thereafter. This shift resulted in a frequency distribution of maximum temperatures that leaned towards higher values, with an increased occurrence of temperatures exceeding 23 degrees. Additionally, the seasonal temperature variation diminished, transforming the temperature distribution from biexponential to uni exponential, which reflects a reduced difference between hot and cold seasons. The thickness of the 500-850 hectopascal layer suggests that this temperature shift has also impacted the lower half of the atmosphere, highlighting the global nature of the warming phenomenon. Furthermore, the temperature jump in 1377 may be associated with the strong El Niño event that occurred that year, potentially influencing broader global climate change, disrupting the previous climate equilibrium, and leading to a new climatic state.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References [in Persian]

- Alizadeh-Choozari, O., Najafi, MS. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*. 43(2), 569-584. [In Persian]
- Keikhosravi Kiany, MS. (2016). Climatology of snow cover in Iran using remote sensing data. Supervisor: Masoodian, Seyed Abolfazl, Isfahan University, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Department of Natural Geography. [In Persian]
- Masoodian, SA., Montazeri, M. (2015). Global warming and the thickness of the lower half of the atmosphere. *Geographical Research*. 117(2), 1-12. [In Persian]

Masoodian, SA (2020). An Analysis of Frequency Distribution of LST in Iran. *Geography and Development*. 60(18), 21-30. [In Persian]

References [in English]

- Al-Ataby, I. K., & Al-Tmimi, A. I. (2020). Estimate the probability density function of maximum temperature for the Middle East. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29(4).
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 549-561.
- Chowdhury, R., Chadalavada, S., Pakdel, H., & McDougall, K. (2022). Extreme Temperatures and Temperature-Duration-Frequency (TDF) Relationship in Australia
- Darand, M. (2020). Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran. *Meteorological Applications*, 27(6), e1968.
- Delgado-Torres, C., Donat, M. G., Soret, A., González-Reviriego, N., Bretonnière, P. A., Ho, A. C., ... & Doblas-Reyes, F. J. (2023). Multi-annual predictions of the frequency and intensity of daily temperature and precipitation extremes. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034031
- Dong, X., Zhang, S., Zhou, J., Cao, J., Jiao, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River basin (1960–2017), China. *Water*, 11(11), 2334.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., ... & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.
- Kiany, M. S. K., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2021). Climatology and variability of the start, end, and length of the frost-free season across Iran. *Climate Research*, 84, 59-73.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3-4), 1539-1562.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R., & Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50, 3853-3864.
- Javanshiri, Z., Pakdaman, M., & Falamarzi, Y. (2021). Homogenization and trend detection of temperature in Iran for the period 1960–2018. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1233-1250.
- Li, Z., Xue, H., Dong, G., Liu, X., & Lian, Y. (2024). Spatiotemporal Variation in Extreme Climate in the Yellow River Basin and its Impacts on Vegetation Coverage. *Forests*, 15(2), 307.
- Lin ML, Tsai CW, Chen CK. 2021. Daily maximum temperature forecasting in changing climate using a hybrid of multi-dimensional complementary ensemble empirical mode decomposition and radial basis function neural network. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 38(12):100923.
- Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes in annual temperatures in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1079-1092.
- Mohammadi, H., Khalili, K., Rezaie, H., & Amini-Rakan, A. (2024). Analysis of Trend and Detection of Change Points in Lake Urmia Level and Climatological Parameters Using R Software. *Water Harvesting Research*, 7(2), 220-233.
- Murthy KVN, Saravana R, Kumar GK, Kumar KV. 2021. Modelling and forecasting for monthly surface air temperature patterns in India, 1951–2016: Structural time series approach. *Journal of Earth System Science*. 130(1):21
- Penha, R., & Hines, J. W. (2001, May). Using principal component analysis modeling to monitor temperature sensors in a nuclear research reactor. In Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001).
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Derczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013
- Singirankabo, E., Iyamuremye, E., Habineza, A., & Nelson, Y. (2023). Statistical modelling of maximum temperature in Rwanda using extreme value analysis. *Open Journal of Mathematical Sciences*, 7, 180-195.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464
- Van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

واکاوی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران

فرحناز خرم آبادی^۱، محمدصادق کیخسروی کیانی^{۲*} , سید ابوالفضل مسعودیان^۳

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان

۲. استادیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)

ایمیل: ms.keikhosravikiany@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-6264>

۳. استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: گرماهای فرین، سرماهای فرین، پایگاه (Era5) تغییرات فراوانی، ایران.	در سال‌های اخیر، شدت و فراوانی گرماهای فرین، شامل روزهای گرم، شب‌های گرم و موج‌های گرما و سرماهای فرین، شامل روزهای سرد و شب‌های سرد، افزایش یافته است. بنابراین، بررسی ابعاد تغییر اقلیم در ایران از منظر تغییرات فراوانی دما حائز اهمیت است. در این پژوهش، تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران با استفاده از داده‌های دمای روزانه پایگاه (Era5) برای دوره زمانی ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به کمک عملیات‌های برنامه‌نویسی در محیط پایتون مورد بررسی قرار گرفت. پس از سال ۱۳۷۷، توزیع فراوانی دمای بیشینه به سمت مقادیر بالاتر جابه‌جا شده و تمایز فصلی دما کاهش یافته است که این امر موجب تغییر توزیع دما از حالت دونمایی به تک‌نمایی و افزایش چولگی به چپ در توزیع دما شده است. فراوانی دمای ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش (۵/۰ درصد) و دمای ۱ درجه سلسیوس بیشترین کاهش (بیش از ۳/۰ درصد) را نشان داده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از عوامل محلی مانند شهرسازی و بیابان‌زایی یا عوامل کلان‌تری نظیر پدیده‌های اقلیمی جهانی مانند رخداد نیرومند النینو باشد. بررسی ستبرای لایه ۸۵۰-۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که جهش دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ نه تنها یک پدیده محلی، بلکه یک تغییر اقلیمی جهانی است که توانسته تعادل اقلیمی پیشین را بر هم زده و وارد یک تعادل جدید کند. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده تأثیرات گسترده و پیوسته گرمایش جهانی بر اقلیم ایران و فراتر از آن است.

استناد: خرم آبادی، فرحناز، کیخسروی کیانی، محمدصادق و مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۵). واکاوی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۷۴-۵۵.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51939.2114



مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های آمادگی بشر برای روبه‌رو شدن با تغییر اقلیم، شناخت رفتار فرین‌ها در مقیاس محلی است. فرین‌های دمایی بر انرژی، نظام بهداشتی و کشاورزی اثر می‌گذارند و از این راه منابع و اقتصاد را تحت فشار می‌گذارند. شناخت توزیع احتمال دمای سال‌های پیش‌رو و از آن جمله دماهای فرین نقش مهمی در سازگاری انسان‌ها و زیست‌بوم‌ها با تغییر اقلیم دارد (گویرگیز و همکاران^۱، ۲۰۱۸، ۱). افزون بر این، در شرایط گرمایش اقلیم، ویژگی‌های فرین‌های اقلیمی دستخوش تغییر می‌شود؛ به‌ویژه شدت و فراوانی دماهای بالا و بارش‌های سنگین افزایش می‌یابد که این امر آثار بالقوه زیان‌باری برای طبیعت، اقتصاد و جامعه به‌همراه خواهد داشت (دلگادوتورس و همکاران^۲، ۲۰۲۳، ۱). دما یکی از اجزای مهم سیستم آب‌وهوایی بوده و نشانگر واکنش آب‌وهوا به انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط انسان است. طبق پنجمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی، میانگین دمای جهانی در حال افزایش است و در قرن بیست‌ویکم همچنان افزایش خواهد یافت. پیش‌بینی شده که تا سال ۲۱۰۰ میزان افزایش دمای جهان از ۲ به ۴ درجه سلسیوس خواهد رسید. این افزایش دما به معنای افزایش فراوانی دمایی روزها و شب‌های داغ و تداوم بیشتر دماهای فرین خواهد بود (چاودوری و همکاران^۳، ۲۰۲۲، ۱). تأثیر گرمایش زمین بر اقلیم‌های فرین (مثل امواج گرما و بارش‌های فرین) بیشتر از اقلیم میانگین بوده و احتمال وقوع رویدادهای آب-وهوایی فرین در آینده همچنان افزایش خواهد یافت. افزایش رویدادهای آب‌وهوایی فرین تأثیرات نامطلوبی بر جامعه بشری، سلامت و رفاه، اقتصاد و زیست‌بوم‌های طبیعی دارد (دارند، ۲۰۲۰، ۱). میانگین جهانی دمای هوا در طی سده بیستم ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است. واکاوی‌ها نشان می‌دهد که این افزایش تا اندازه‌ای ناشی از افزایش شتابان‌تر دمای کمینه یا کاهش دمای کمینه با آهنگی کندتر از دمای بیشینه است که منجر به کاهش دامنه دمای روزانه در بسیاری از نقاط جهان شده است (ایسترلینگ و همکاران^۴، ۱۹۹۷، ۳۶۴). شرایط آب‌وهوایی خاورمیانه بسته به فصل و جغرافیا بسیار متفاوت است، اما به‌طور کلی با دو کلمه توصیف می‌شود: گرم و خشک، البته زمستان‌ها معتدل همراه با بارندگی اندک است. خاورمیانه منطقه‌ای است که جنوب غربی آسیا، غرب آسیا و شمال شرقی آفریقا را در بر می‌گیرد. اگرچه بخش زیادی از منطقه خاورمیانه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با زمستان‌های مرطوب و تابستان‌های خشک است، اما آب‌وهوای خشک حاکم بر کل منطقه است. آب‌وهوای خاورمیانه از تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد ترکیه و ایران، تا تابستان‌های گرم‌تر و زمستان‌های خنک شمال بین‌النهرین و سواحل مدیترانه، تا دماهای فرین بیابان عرب متفاوت است (الاتابی و همکاران^۵، ۲۰۲۰، ۵۱۸). در سال‌های اخیر، آسیا شاهد افزایش چشمگیر شدت و فراوانی گرماهای فرین شامل روزهای گرم، شب‌های گرم و موج‌های گرما و کاهش سرماهای فرین، شامل روزهای سرد و شب‌های سرد بوده است (سنویراتنه و همکاران^۶، ۲۰۲۱، ۱۵۵۶). ایران نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در سال‌های اخیر با مجموعه‌ای از مشکلات بی‌سابقه اقلیمی ازجمله کاهش آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، وقوع توفان‌های گردوغبار، ثبت رکوردهای دمایی، خشک‌سالی و همچنین سیل شدید، دست‌وپنجه نرم می‌کند (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹، ۱). در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و رویدادهای فرین مرتبط با آن، به یکی از چالش‌های اساسی جهان تبدیل شده‌اند. پدیده‌هایی نظیر توفان، سیل، خشک‌سالی و گرمایش جهانی تأثیرات عمیقی

¹ - Guirguis et al.

² - Delgado-Torres et al.

³ - Chowdhury

⁴ - Easterling et al.

⁵ - Al-Ataby et al.

⁶ - Seneviratne et al.

بر پوشش گیاهی و پهنه‌های وسیع جغرافیایی داشته و زیست‌بوم‌ها را با تهدیدات جدی مواجه کرده‌اند. گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل این تغییرات، موجب افزایش شدت و فراوانی رویدادهای اقلیمی شدید شده است (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۴، ۱). در طی سال‌های گذشته و به‌ویژه سال‌های اخیرتر، مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با تغییرات دما و فراوانی آن در بسیاری از قلمروهای جغرافیایی در جهان انجام گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ای مورتی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) به مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوهای ماهانه دمای هوا در هند طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۶ پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از مدل سری‌های زمانی ساختاری (STS)، تغییرات دمای هوا در این بازه زمانی تحلیل و پیش‌بینی شد. نتایج پژوهش نشان داد که دمای هوا در هند روندی افزایشی داشته و پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های مشاهده‌شده و رفتارهای اقلیمی انطباق و هماهنگی بالایی دارد (مورتی و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۱). لین و همکاران^۳ (۲۰۲۱) در پژوهش خود با استفاده از مدل ترکیبی MCEEMD-RBFNN، تغییرات دمای شدید در تایوان به‌ویژه در شهر تایپه را تحلیل و پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در این منطقه روند افزایشی داشته و مدل مورد استفاده پیش‌بینی دقیقی از این تغییرات ارائه داده و به درک بهتر تغییرات اقلیمی و مدیریت مخاطرات آن کمک کرده است (لین و همکاران، ۲۰۲۱، ۱). دونگ و همکاران^۴ (۲۰۱۹) شدت و فراوانی دما و بارش‌های حدی و الگوهای گردش جوی مرتبط در حوضه رودخانه زرد چین را طی سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۱۷ بررسی کردند. نتایج نشان داد که شدت بارش‌های حدی افزایش یافته، مدت زمان بارش‌های شدید کاهش پیدا کرده و تغییرات رخدادهای دمای سرد نسبت به دمای گرم چشمگیرتر بوده است. همچنین، الگوهای جوی ENSO و AO تأثیر بیشتری بر رخدادهای دمایی حدی داشته است (دونگ و همکاران، ۲۰۱۹، ۱). سینگیرانکابو و همکاران^۵ (۲۰۲۰) با هدف مدل‌سازی آماری رفتار مقادیر فرین دمای بیشینه در رواندا، داده‌های روزانه ۹ ایستگاه هواشناسی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ را تحلیل کردند. نتایج نشان داد توزیع‌های گامبل و بتا بهترین برازش را داشته و سطوح بازگشت دما روند افزایشی را نشان می‌دهند (سینگیرانکابو و همکاران، ۲۰۲۰، ۱۸) و نندرویل و همکاران^۶ (۲۰۲۱) با استفاده از مفهوم نسبت احتمالات در شبیه‌سازی‌های اقلیمی، نقش تغییرات میانگین اقلیم و تغییرپذیری اقلیمی را در رخدادهای حدی دما و بارش بررسی کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد رخدادهای شدید دمایی ماهانه بیشتر تحت تأثیر گرم شدن میانگین اقلیم قرار دارند، درحالی‌که رخدادهای بارش سنگین به تغییرپذیری اقلیمی وابسته‌اند. بر اساس پژوهش‌های یادشده، مشخص شده است که گرمایش جهانی مستقیماً با افزایش وقوع رویدادهای گرمایی شدید مرتبط است، درحالی‌که نوسانات آب‌وهوایی نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و فراوانی دماهای بیشینه ایفا می‌کند (وندرویل و همکاران، ۲۰۲۱، ۵۰۱). در ایران مطالعات مختلفی بر روی تغییرات دما و فرین‌های دمایی انجام شده است و همگی نشان‌دهنده‌ی روند افزایش دما هستند (علیزاده چوبری و نجفی ۱۳۹۶؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ فلاح قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹؛ عساکره و همکاران، ۲۰۲۰؛ جوانشیری و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات محدودی نیز در ایران به منظور بررسی تغییرات محیطی از روی تغییرات توزیع فراوانی دما به کمک داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. برای نمونه، در پژوهشی مسعودیان (۱۴۰۰) به کمک تحلیل مؤلفه‌ی اصلی بر روی طبقات دمایی بر پایه‌ی داده‌های دمای ماهواره آکوا الگوهای توزیع فراوانی دمای رویه را در ایران استخراج نمود که از

¹ - Li et al.

² - Murthy et al.

³ - Lin et al.

⁴ - Dong et al.

⁵ - Seneviratne

⁶ - Van der Wiel

این نظر ۴ الگوی مؤلفه‌ی اصلی ۷۵ درصد از پراش داده‌ها را تبیین می‌کند (مسعودیان، ۱۴۰۰، ۲۳). اما هنوز به‌طور تفصیلی تغییرات دما از منظر بررسی تغییرات فراوانی دما انجام نشده است. بررسی تغییرات فراوانی دما می‌تواند ساختار تغییرات دما را در سری زمانی آشکار سازد و این که کدام دسته از طبقات دمایی دچار تغییر و جابه‌جایی شده‌اند. مطالعه کنونی از وجوه مختلفی پر اهمیت است. این که در این مطالعه تغییرات فراوانی دما به‌صورت زمانی و مکانی بررسی شده است، می‌تواند شناخت و درک ما را از اثرات تغییر اقلیم آشکارتر نماید. همچنین، بررسی نقاط جهش تغییر فراوانی دما به‌صورت مکانی ازجمله برجستگی‌های مهم در مطالعه کنونی است، چرا که این مسئله هنوز در کشور واکاوی نشده است.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌های شبکه‌ای دمای بیشینه روزانه پایگاه ERA5 از روز ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به مدت ۱۶۴۳۶ روز و بر روی چهارچوب ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی و ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی که شبکه‌ای به ابعاد ۶۱×۸۱ با تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ از تارنمای این پایگاه استخراج شد. به این ترتیب آرایه داده‌ها به ابعاد $۱۶۴۳۶ \times ۶۱ \times ۸۱$ پایه و اساس بررسی ویژگی‌های دمای بیشینه ایران بوده است. از آنجا که از مجموع ۴۹۴۱ یاخته موجود در هر روز ۲۴۸۸ یاخته در مرز سیاسی خشکی اصلی ایران جای می‌گرفت، تنها همین یاخته‌ها در پردازش ویژگی‌های دمایی ایران منظور شد. در این صورت مجموع داده‌هایی که برای بررسی دمای بیشینه ایران به‌کار برده شده برابر ۴۰۸۹۲۷۶۸ مقدار بوده است. درعین‌حال برای نمایش نقشه‌ها تمام یاخته‌های چهارچوب لحاظ شده‌اند. برای استخراج دمای بیشینه روزانه از پایگاه داده ERA5 برای هر روز دمای ساعتی را استخراج و از میان ۲۴ داده در هر روز بزرگ‌ترین مقدار را به‌عنوان دمای بیشینه همان روز در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور بررسی ارتباط میان تغییرات دمایی و سبترای جو داده‌های ژئوپتانسیل ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌ترتیب به‌عنوان ترازهای سطح زمین و لایه‌ی میانی هواسپهر از پایگاه داده ECMWF به‌صورت روزانه و در تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه‌ی قوسی در فرمت (nc) بر روی پهنه مکانی ۴۴ تا ۶۳ درجه طول جغرافیایی و ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی برداشت گردید. برای پردازش و تحلیل داده‌ها نیز از عملیات‌های برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار پایتون بهره گرفته شد. همچنین، در گام پایانی به منظور تحلیل داده‌ها تحلیل مؤلفه اصلی به‌کار گرفته شد. چراکه واکاوی مؤلفه اصلی به‌عنوان یکی از شگردهای مدلسازی داده‌پایه، مجموعه‌ای از متغیرهای همبسته را به مجموعه کوچک‌تری از متغیرهای تازه تبدیل می‌کند که ناهمبسته‌اند و درعین‌حال بخش بزرگی از اطلاعات اولیه را در خود دارند. از این‌رو، می‌توان از مؤلفه‌های اصلی برای کاهش بعد داده‌ها بهره برد و ناهنجاری‌های موجود در داده‌های اولیه را به‌خوبی آشکارسازی و پیش‌بینی کرد (پنها^۱ و همکاران، ۲۰۰۱، ۱).

منطقه‌ی مورد مطالعه

ایران کشوری است با وسعت تقریبی ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع و میان عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه‌ی شرقی قرار دارد. میانگین ارتفاع کشور از سطح تراز دریا در حدود ۱۲۵۰ متر است. میانگین تقریبی بارش سالانه کشور در حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. میانگین دمای کمینه، میانگین و بیشینه‌ی ایران نیز به-

^۱ - Penha et al.,

ترتیب برابر با ۱۰/۸۵، ۱۸/۰۲ و ۲۵/۱۹ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. به‌طور تقریبی نیز میانگین درصد گستره‌ی پوشش برف در ایران در حدود ۱/۹۶ درصد است که عدد بسیار کوچکی است (کیانی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیخسروی، ۱۳۹۵). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کل گستره‌ی ایران زمین را شامل می‌شود.

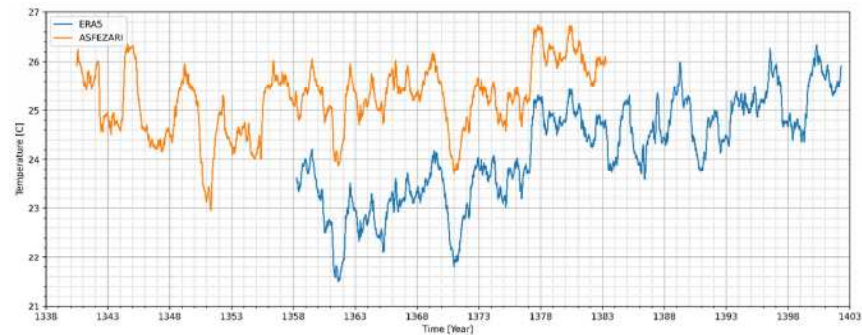


شکل ۱: منطقه مورد مطالعه. منبع: نویسندگان

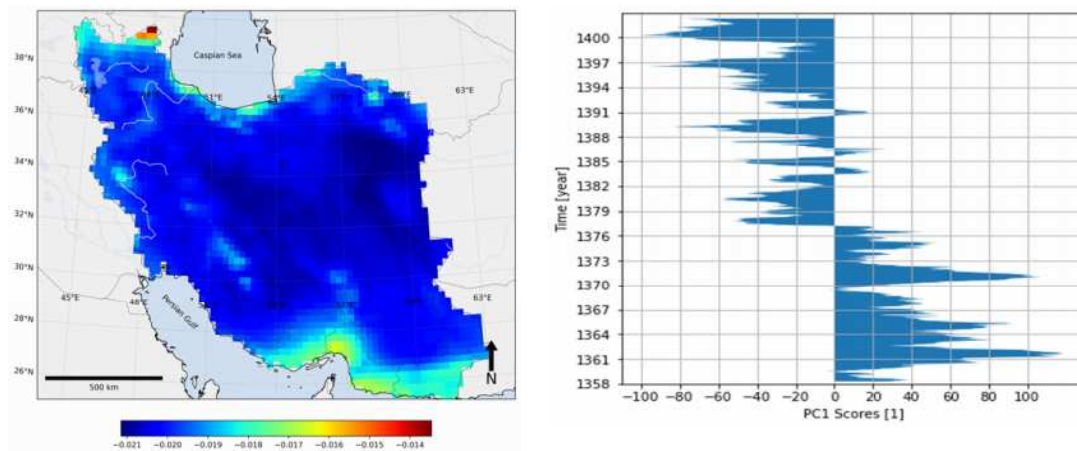
یافته‌های پژوهش

در گام نخست، برای بررسی وضعیت کلی دمای بیشینه‌ی ایران برای هر روز میانگین دمای بیشینه بر روی ایران محاسبه و سری زمانی دمای ایران با پنجره‌ی ۳۶۵ روزه هموار شد. بررسی سری زمانی هموارشده نشان می‌دهد دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ جهش داشته است که به‌صورت کاملاً آشکار در سری زمانی قابل رؤیت است. اما از آنجا که نمودار (شکل ۲) حاصل میانگین‌گیری بر روی ۲۴۸۸ یاخته درون ایران است، می‌بایست نگاه ژرف‌تری به این موضوع انداخت تا میزان عمومیت این ویژگی در ایران ارزیابی شود. به‌طور کلی، از دیدگاه آب و هواشناختی اگر در سری زمانی پهنه‌ای یک متغیر ویژگی معینی دیده شود، انتظار می‌رود همان ویژگی در همه یا اغلب نقاط آن پهنه وجود داشته باشد؛ در غیر این صورت ویژگی یادشده ناگزیر باید در طی فرایند میانگین‌گیری ناپدید شود. برای بررسی میزان عمومیت این ویژگی در ایران یا به بیان دیگر برای بررسی این که آیا جهش دمایی سال ۱۳۷۷ در کل گستره ایران نیز دیده می‌شود یا خیر، نخست به کمک آرایه دمای بیشینه به ابعاد $۱۶۴۳۶ \times ۶۱ \times ۸۱$ برای تک تک یاخته‌ها سری زمانی هموارشده دمای بیشینه روی پنجره ۳۶۵ روزه محاسبه شد و آرایه‌ای به ابعاد $۱۶۰۷۲ \times ۶۱ \times ۸۱$ به‌دست آمد. در مرحله دوم، از این آرایه تنها داده‌های یاخته‌هایی که در مرز ایران قرار داشتند بیرون کشیده شد و آرایه زمان - مکان به ابعاد ۱۶۰۷۲×۲۴۸۸ آماده شد. نظر به این که ایران به‌دلیل تنوع ناهمواری و گستردگی عرض جغرافیایی از نظر میانگین و پراش دما نایک‌نواخت است. در مرحله سوم، آرایه دمای هموارشده استانداردسازی شد، به‌طوری‌که میانگین همه یاخته‌ها صفر و انحراف معیار آنها یک شود. در مرحله چهارم، یک واکاوی مؤلفه اصلی روی این آرایه استانداردشده انجام گرفت. این بررسی روشن ساخت که: (۱) نمرات مؤلفه اول تا پیش از ۱۳۷۷/۰۳/۱۰ همواره مثبت بوده و پس از آن مگر در سه بازه زمانی کوتاه (۱۳۸۳/۰۵/۲۹ تا ۱۳۸۴/۰۳/۲۷ و ۱۳۸۵/۰۸/۱۵ تا

۱۳۸۶/۰۳/۲۲ و ۱۳۹۰/۰۷/۳۰ تا ۱۳۹۱/۰۵/۱۰) همواره منفی بوده است (شکل ۳، الف). همچنین، بررسی بردار ویژه مؤلفه اول در ایران گویای آن است که مقادیر منفی کم‌وبیش در همه بخش‌های کشور به روشنی قابل رؤیت است (شکل ۳، ب).



نمودار ۲: سری زمانی هموار شده دمای بیشینه ایران بر اساس داده‌های اسفزاری و داده‌های ERA5. منبع: نویسندگان

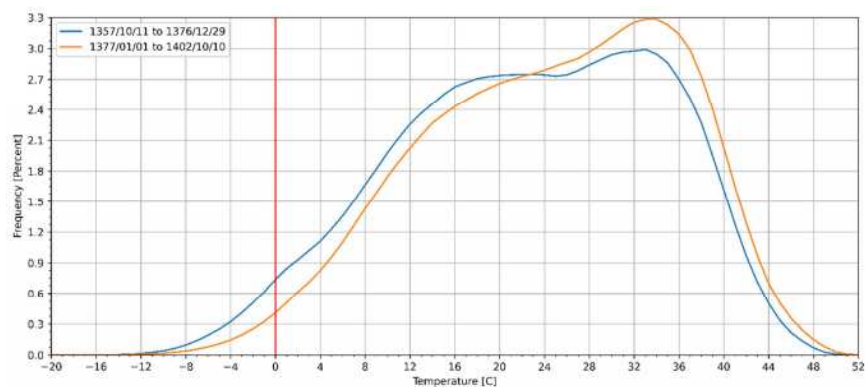


نمودار ۳: بردار ویژه مؤلفه اول و نمرات مؤلفه اول در گستره‌ی ایران. منبع: نویسندگان

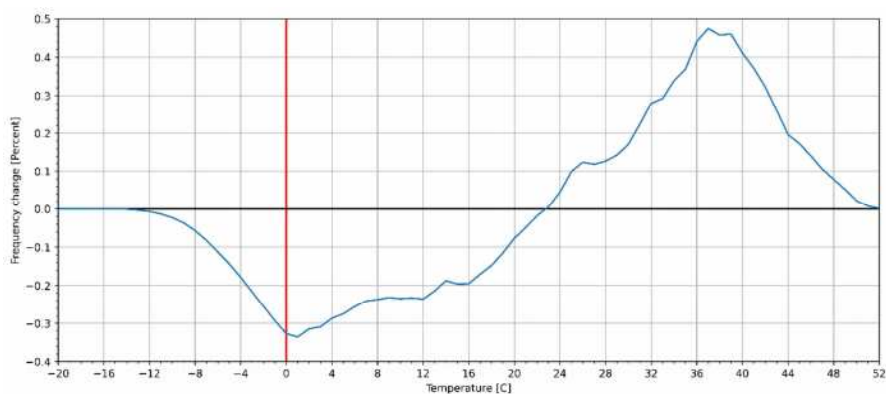
تغییر فراوانی دمای بیشینه پیش و پس از سال ۱۳۷۷

همان‌گونه که دیده می‌شود، سری زمانی دمای بیشینه در سال ۱۳۷۷ جهش نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این جهش ناشی از تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه بوده باشد. از این رو شایسته است توزیع فراوانی دمای بیشینه پیش و پس از سال ۱۳۷۷ شمارش و با یکدیگر سنجیده شود. برای دستیابی به این هدف، سری زمانی دمای بیشینه به دو بخش افراز شد: نخست از ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا ۱۳۷۶/۱۲/۲۹ به مدت ۷۰۱۹ روز و دوم از ۱۳۷۷/۰۱/۰۱ تا ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ به مدت ۹۴۱۷ روز. با توجه به این که تعداد یاخته‌ها در مرز سیاسی ایران ۲۴۸۸ یاخته است، دو آرایه به ابعاد 7019×2488 و 9417×2488 برای این دو بازه زمانی به‌دست آمد. چون در سراسر بازه زمانی دمای بیشینه در درون مرزهای ایران بین $22/4$ تا $53/9$ درجه سلسیوس بوده است، دسته‌های دمایی از 23 تا 54 درجه سلسیوس با بازه یک درجه سلسیوس برای شمارش فراوانی به‌کار گرفته شد. از آنجا که یاخته‌ها ناهم‌اندازه هستند و مساحت کوچک‌ترین یاخته 596 کیلومتر مربع و مساحت بزرگ‌ترین یاخته 699 کیلومتر مربع است، مساحت نسبی

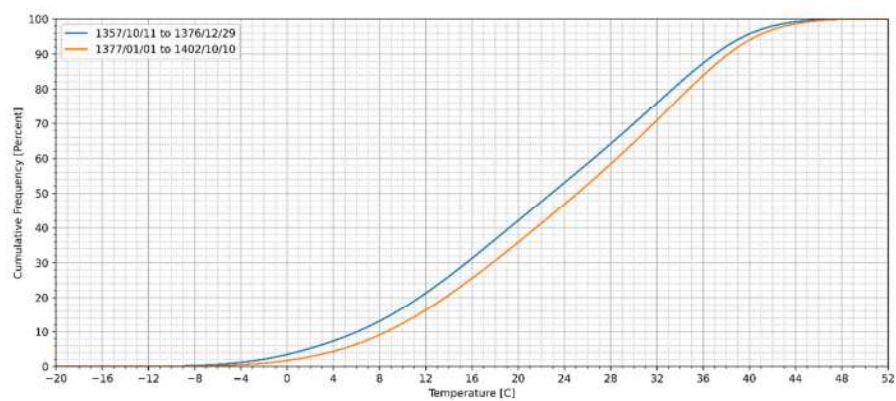
یاخته‌ها به‌عنوان وزن فراوانی دمای ثبت‌شده بر روی هر یاخته درنظر گرفته شد. از این‌رو، اگر در یک روز معین فراوانی وزنی یک بازه دمایی معین بر روی ایران برابر یک باشد، به این معنا است که سراسر ایران آن بازه دمایی را تجربه می‌کرده است و اگر نیم باشد یعنی نیمی از ایران در آن بازه دمایی قرار داشته است. سپس فراوانی مطلق به درصد فراوانی تبدیل شد تا داده‌های دو بخش ناهم‌اندازه با یکدیگر سنجش‌پذیر شوند. شکل ۴ برونداد این پردازش است. از این نمودار دو نکته بسیار با ارزش درباره توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران آشکار می‌شود: نخست این که توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران به راست جابه‌جا شده است. به سبب این جابه‌جایی فراوانی دماهای زیر ۲۳ درجه سلسیوس نسبت به گذشته کاهش و فراوانی دماهای بیش از ۲۳ درجه سلسیوس افزایش یافته است. دوم آن که تمایز فصلی دما که در گذشته بارزتر بوده و توزیع دما گواه آن است تضعیف شده و توزیع دما به سوی توزیع تک‌نمایی در حال تغییر شکل است. به بیان دیگر، تفاوت میان فصل گرم و فصل سرد در حال کاهش است. این ویژگی باعث شده تا چولگی به سمت چپ در توزیع دمای بیشینه بیشتر نمایان شود. شکل ۴ به روشنی نشان می‌دهد که میانه دمای بیشینه دو درجه سلسیوس افزایش یافته است. پیش از سال ۱۳۷۷ میانه دمای بیشینه ایران ۲۲/۹ درجه سلسیوس بوده است در حالی که پس از سال ۱۳۷۷ میانه به ۲۵/۱ درجه سلسیوس رسیده است. همین ویژگی درباره‌ی میانگین هم درست است. به بیان دیگر، میانگین دمای بیشینه ایران که پیش از سال ۱۳۷۷ برابر ۲۳ درجه سلسیوس بوده، پس از این سال به ۲۵ درجه سلسیوس رسیده است. فراوانی دمای بیشینه ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش را نشان می‌دهد و نسبت به گذشته نزدیک به ۵/۰ درصد افزایش یافته است. در برابر آن فراوانی دمای بیشینه یک درجه سلسیوس بیشترین کاهش را نشان داده و نسبت به گذشته بیش از ۳/۰ درصد کاهش یافته است (شکل ۵). تفاضل دو نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که میانگین جابه‌جایی به راست دمای بیشینه ۱/۹ درجه سلسیوس بوده است. فراوانی دماهای زیر صفر که پیش از سال ۱۳۷۷ حدود ۲/۷ درصد بوده است، پس از سال ۱۳۷۷ نصف شده و به ۱/۳ درصد کاهش یافته است (شکل ۶). همچنین، برای بررسی دقیق‌تر ابعاد تغییرات دمایی سال‌های قبل و بعد از سال ۱۳۷۷ خورشیدی، مقدار جابه‌جایی دما بر روی هر یک از صدک‌های دمایی برای دو دوره محاسبه شد. همان‌گونه که در نمودار شکل ۷ دیده می‌شود، صدک‌های دمایی ده تا شصت درصد بین ۲ تا ۲/۵ درجه سلسیوس جابه‌جایی به راست داشته‌اند (شکل ۷). همچنین، همان‌گونه که دیده می‌شود صدک‌های دمایی ۹۰ تا ۱۰۰ کمترین افزایش دمایی را داشته‌اند. در واقع این نمودار نشان می‌دهد همه‌ی طبقات دمایی که در اینجا به‌صورت صدک آورده شده است، در دوره‌ی ۱۳۷۷ به بعد نسبت به دوره‌ی ۱۳۷۷ به قبل افزایش یافته‌اند که این نمودار به روشنی گویای آن است که دما در دوره‌ی بعد از سال ۱۳۷۷ نسبت به دوره‌ی پیش از آن به‌طور معناداری افزایش یافته است که بازتاب آن بر روی صدک‌های دمایی کاملاً روشن و آشکار است.



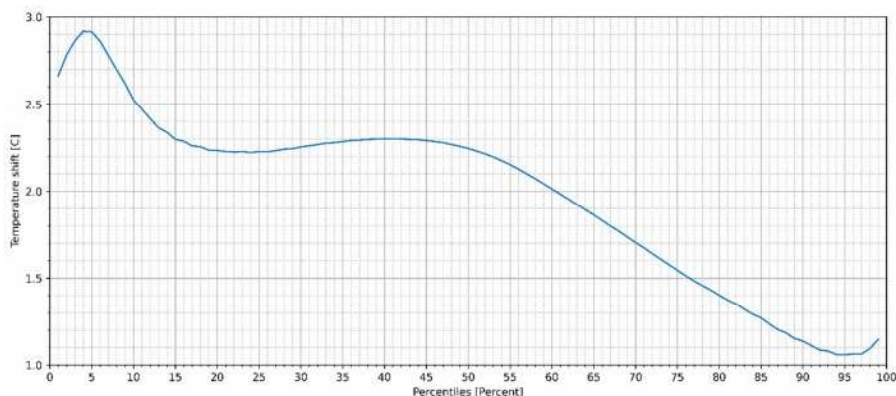
شکل ۴: توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان



شکل ۵: درصد تغییر توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

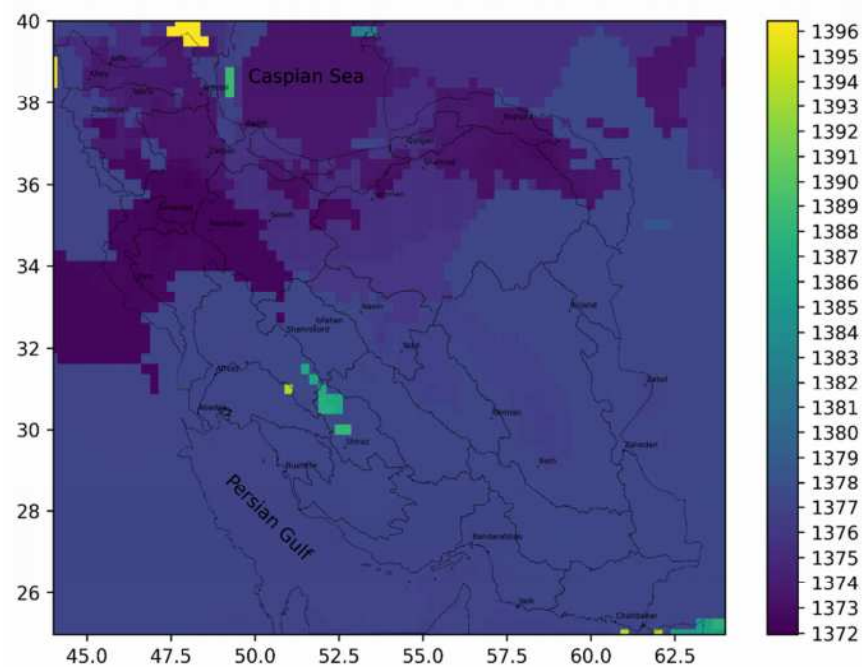


شکل ۶: درصد فراوانی انباشته (برابر و کمتر) دمای بیشینه ایران پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

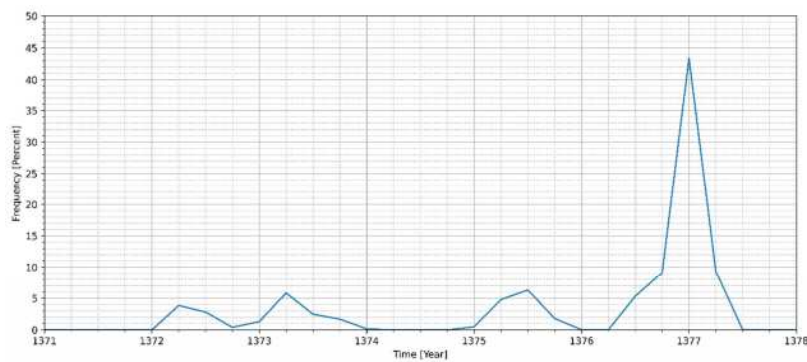


شکل ۷: مقدار جابه‌جایی دما در صدک‌های مختلف دمایی پیش و پس از سال ۱۳۷۷. منبع: نویسندگان

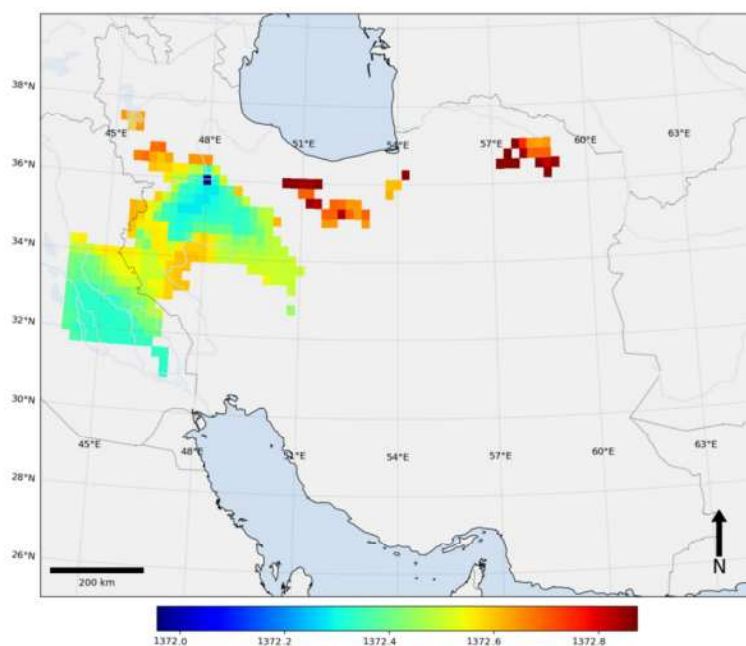
برای بررسی جهش در داده‌ها در گستره‌ی ایران بر روی هر یاخته زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای هموارشده روی پنجره ۳۶۵ روزه بر حسب سال محاسبه گردید. یافته‌ها نشان می‌دهد در غالب نقاط ایران یک جهش دمایی بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۷ به روشنی قابل رؤیت است (شکل ۸)، همین مسئله نیز بر روی نمودار سری زمانی داده‌ها دیده می‌شود به گونه‌ای که نزدیک به ۴۵ درصد از گستره‌ی ایران در سال ۱۳۷۷ خورشیدی دارای یک جهش دمایی است (شکل ۹). بازهم برای بررسی دقیق‌تر این مسئله قلمروهای مختلف ایران بر حسب سالی که جهش دمایی در آن رخ داده است، استخراج و ترسیم گردید. مقادیر جعبه رنگ بر حسب سال می‌باشند. جالب این که الگوهایی که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ دیده می‌شود، همه دارای الگوی جغرافیایی است. برای نمونه در سال ۱۳۷۲ خورشیدی بخش‌های غربی ایران دارای جهش در دمای بیشینه هستند (شکل ۱۰)؛ اما در سال ۱۳۷۳ خورشیدی جهش دمایی به بخش‌های شمالی کشور کشیده شده است. در سال ۱۳۷۵ خورشیدی جهش دمایی بر روی قسمت‌های مرکزی و شمالی دیده می‌شود (شکل ۱۱). اما بارزترین جهش مربوط به سال ۱۳۷۷ خورشیدی است که این جهش دمایی در دو سوم جنوبی ایران به روشنی خود را نشان داده است (شکل ۱۲).



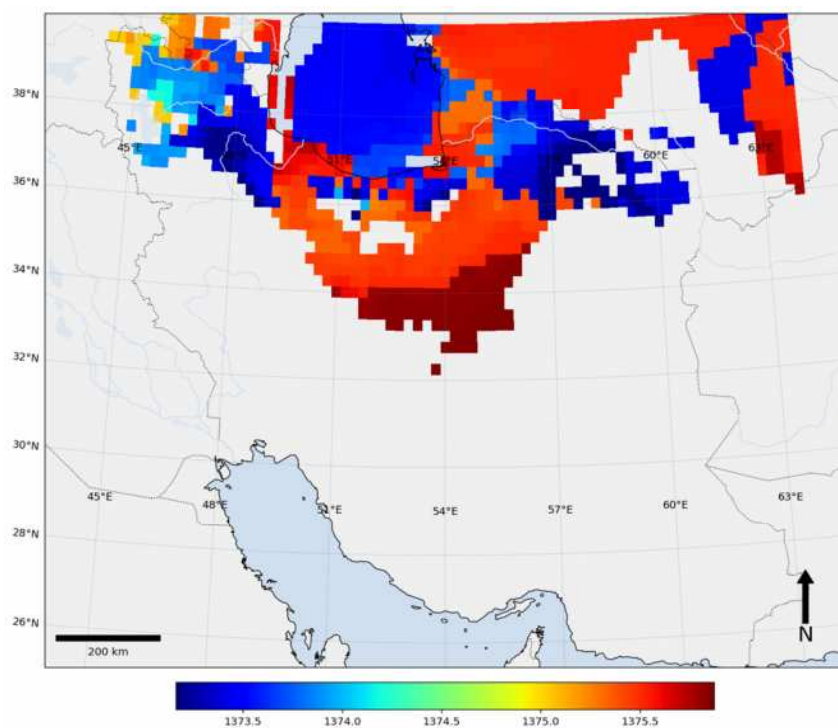
شکل ۸: زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای هموار شده روی پنجره ۳۶۵ روزه. منبع: نویسندگان



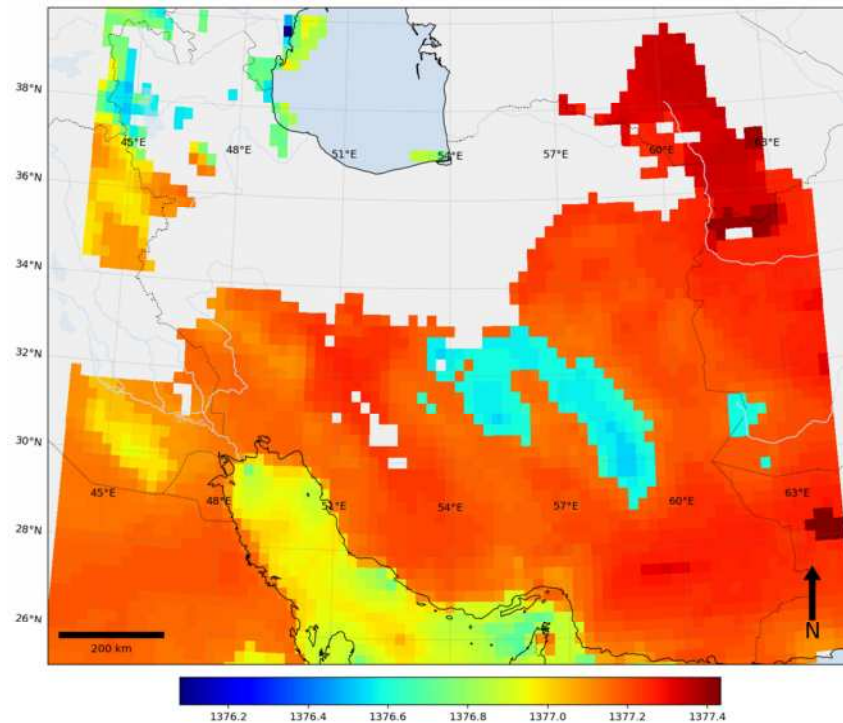
شکل ۹: درصد فراوانی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌ها. منبع: نویسندگان



شکل ۱۰: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال ۱۳۷۲). منبع: نویسندگان



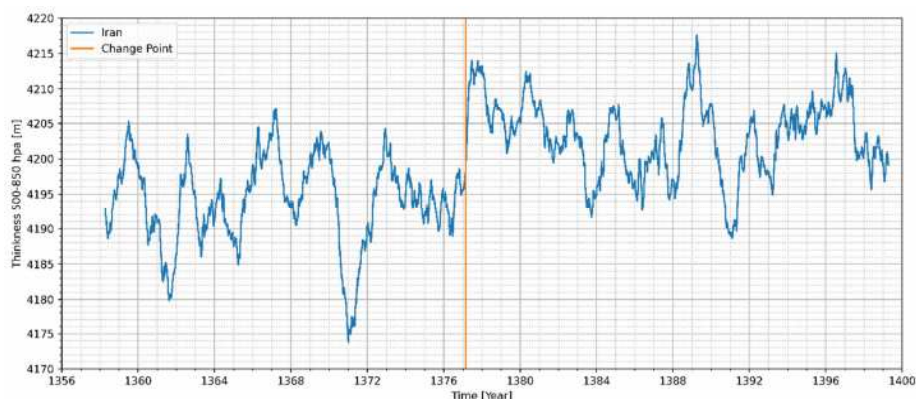
شکل ۱۱: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵). منبع: نویسندگان



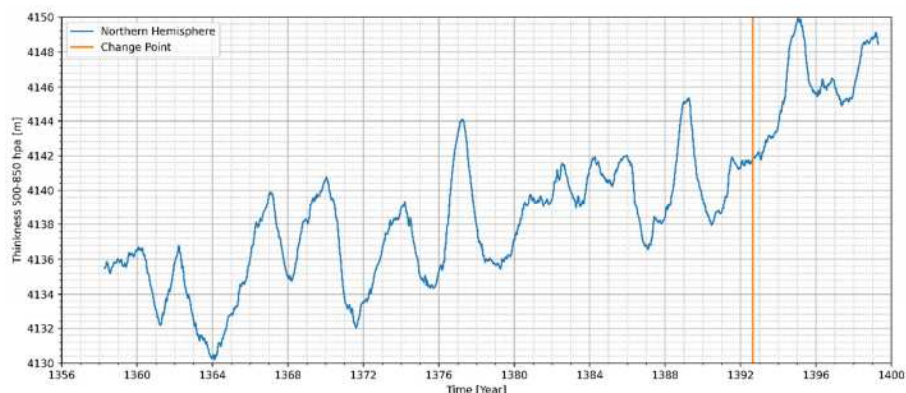
شکل ۱۲: قلمرو جغرافیایی زمان رخداد مهم‌ترین جهش در داده‌های دمای بیشینه (سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۷). منبع: نویسندگان

دمای بیشینه کمیتی است که در نزدیکی سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. از این رو طبعاً می‌تواند از تغییراتی که در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد، بسیار اثر بپذیرد. گسترش شهرها، جنگل‌زدایی، بیابان‌زایی، خشکیدن دریاچه‌ها و عللی از این دست می‌توانند دمای بیشینه محل را دگرگون سازند. پس ناروا نخواهد بود اگر جهش دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ را ناشی از چنین عللی بپنداریم. از سوی دیگر، این گمان هم ناروا نیست که جهش دمای بیشینه ایران ناشی از بازیگران کلان‌تری باشد که در گستره‌های منطقه‌ای یا جهانی کار می‌کنند. در این صورت دور نیست که جهش دما محدود به سطح زمین نبوده بلکه سبب آن فراخی از هواسپهر را درگیر کرده باشد. برای بررسی این نظر میانگین وزنی هموارشده (پنجره ۳۶۵ روزه) سبب برای لایه ۸۵۰-۵۰۰ هکتوپاسکال بر فراز ایران و نیم‌کره شمالی بررسی شد. بسیار شایان توجه است که سری زمانی سبب را در ۱۳۷۷/۰۲/۲۳ جهش نشان می‌دهد (شکل ۱۳). در سری زمانی نیم‌کره شمالی نیز در سال ۱۳۷۷ جهش دیده می‌شود؛ اما مهم‌ترین جهش این سری زمانی در ۱۳۹۲/۰۸/۱۹ رخ داده است (شکل ۱۴). این واقعیت که نه تنها دمای سطحی بلکه دمای نیمه زیرین هواسپهر جهش یافته است، می‌تواند نشانگر آن باشد که گرمایش نه پدیده‌ای محلی و منطقه‌ای بلکه پدیده‌ای جهانی است. در مطالعه‌ای نیز مسعودیان و منتظری (۱۳۹۴) تغییرات سبب برای هواسپهر را برای ترازهای ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال برای دوره زمانی سال‌های ۱۳۵۷ تا ۱۳۹۲ بر روی ایران و نیم‌کره شمالی واکاوی نمودند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد در سال ۱۳۷۷ خورشیدی بر روی نیم‌کره شمالی یک جهش قابل توجه و یک نقطه عطفی در سری زمانی سبب برای هواسپهر قابل‌رؤیت است و طی این دوره به‌طور کلی ۱۳ متر بر سبب برای هواسپهر نیم‌کره شمالی افزوده شده است. جالب این که نقطه‌ای عطفی که در سال ۱۳۷۷ در دمای بیشینه و همچنین در سبب برای هواسپهر به روشنی دیده می‌شود، بر روی وجوه دیگری نیز خود را نشان داده است. برای نمونه، در مطالعه‌ای محمدی و همکاران

(۲۰۲۴) تغییرات سطح آب دریاچه‌ی ارومیه را برای بازه‌ی زمانی ۱۹۷۳-۲۰۲۲ واکاوی نمودند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۰ میلادی برابر با سال ۱۳۷۷ خورشیدی یک تغییر ناگهانی کاهشی در تراز آب دریاچه دیده می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۲۴، ۲۲۰). با توجه به این که در سال ۱۳۷۷ زمین یکی از نیرومندترین النینیوی ثبت‌شده خود را تجربه کرده است، آیا جهش دمایی یاد شده ناشی از رخداد این رویداد بوده است؟ آیا رخداد النینیوی سال ۱۳۷۷ آنچنان نیرومند بوده است که حالت دستگاه اقلیم را تغییر داده و تعادل پیشین اقلیم جهان را بر هم زده و آن را وارد تعادل تازه‌ای کرده است؟ اگر چنین بوده باشد پرسش بسیار مهم دیگری که شایسته بررسی است آن خواهد بود که چه پدیده‌های دیگری یارای آن را دارند تا چنین تغییرات بازگشت‌ناپذیری در دستگاه اقلیم پدید آورند؟ آیا جامعه بشری توان پرداخت تاوان این تغییرات را دارد؟



شکل ۱۳: مهم‌ترین جهش در میانگین ستبرای لایه ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی ایران. منبع: نویسندگان



شکل ۱۴: مهم‌ترین جهش در میانگین ستبرای لایه ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی نیم‌کره شمالی. منبع: نویسندگان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تغییرات فراوانی دماهای بیشینه در ایران پرداخته شد. تغییرات فرین‌های دمایی نقش مهمی در تأثیرگذاری بر انرژی، نظام بهداشتی، کشاورزی و منابع اقتصادی دارند و شناخت توزیع احتمال دماهای فرین برای سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است. با استفاده از داده‌های دمای بیشینه روزانه از تاریخ ۱۳۵۷/۱۰/۱۱ تا

۱۴۰۲/۱۰/۱۰ برای ۱۶۴۳۶ روز بر روی چهارچوب مکانی ۶۱×۸۱ با تفکیک مکانی $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه، تغییرات ویژگی‌های دمای بیشینه ایران مورد بررسی قرار گرفت. از مجموع ۴۹۴۱ یاخته روزانه در چارچوب مکانی ایران، تنها ۲۴۸۸ یاخته در مرزهای سیاسی ایران در تحلیل‌ها برای تعداد ۱۶۴۳۶ روز لحاظ شد. سری زمانی هموارشده دمای بیشینه ایران در سال ۱۳۷۷ جهش قابل‌توجهی را نشان داد که این ویژگی در بیشتر نقاط ایران مشاهده شد. پس از استانداردسازی داده‌ها، واکاوی مؤلفه اصلی نشان داد که نمرات مؤلفه اول تا پیش از ۱۳۷۷/۰۳/۱۰ همواره مثبت بوده و پس از آن بیشتر منفی شد، مگر در سه بازه زمانی کوتاه. این تغییرات به وضوح در سراسر ایران قابل مشاهده است. توزیع فراوانی دمای بیشینه ایران پس از سال ۱۳۷۷ به سمت مقادیر بالاتر جابه‌جا شده و فراوانی دماهای بالای ۲۳ درجه افزایش یافته است. تمایز فصلی دما نیز کاهش یافته و توزیع دما از دو نمایی به تک‌نمایی تغییر کرده است که نشان‌دهنده کاهش تفاوت دمایی میان فصل‌های گرم و سرد است. این تغییر موجب افزایش چولگی به چپ در توزیع دمای بیشینه شده است. همچنین، فراوانی دمای بیشینه ۳۷ درجه سلسیوس بیشترین افزایش (۵/۰ درصد) و دمای یک درجه سلسیوس بیشترین کاهش (۳/۰ درصد) را نشان داده است. این جهش دمایی در سال ۱۳۷۷ ممکن است ناشی از عوامل محلی مانند شهرسازی، بیابان‌زایی و تغییرات زمین‌شناختی باشد؛ اما بررسی ستبرای لایه ۵۰-۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که این جهش به نیمه زیرین هواسپهر نیز گسترش یافته است که نشان‌دهنده جهانی بودن پدیده گرمایش است. همچنین، ممکن است جهش دمایی سال ۱۳۷۷ با رخداد نیرومند النینو در همان سال مرتبط باشد که می‌تواند تغییرات اقلیمی جهانی را به‌طور گسترده‌تری تحت تاثیر قرار دهد و تعادل پیشین اقلیم را به هم بزند و وارد تعادل جدیدی کند.

منابع

- علیزاده چوبری، امید؛ نجفی، محمد. (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳(۴۳)، صص: ۵۸۴-۵۶۹.
- کیخسروی کیانی، محمدصادق. (۱۳۹۵). آب و هواشناسی پوشش برف در ایران با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی. استاد راهنما: مسعودیان، سید ابوالفضل، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیای طبیعی.
- مسعودیان، سید ابوالفضل؛ منتظری، مجید. (۱۳۹۴). گرمایش جهانی و ستبرای نیمه‌ی زیرین هواسپهر. فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، ۲(۱۱۷)، صص: ۱-۱۲.
- مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۰). واکاوی توزیع فراوانی دمای رویه‌ی زمین ایران با داده‌های مودیس آکوا. فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره‌ی ۱۸(۶۰)، صص: ۲۱-۳۰.
- Al-Ataby, I. K., & Al-Tmimi, A. I. (2020). Estimate the probability density function of maximum temperature for the Middle East. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29(4 [90]).
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 549-561.
- Chowdhury, R., Chadalavada, S., Pakdel, H., & McDougall, K. (2022). Extreme Temperatures and Temperature-Duration-Frequency (TDF) Relationship in Australia
- Darand, M. (2020). Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran. *Meteorological Applications*, 27(6), e1968.
- Delgado-Torres, C., Donat, M. G., Soret, A., González-Reviriego, N., Bretonnière, P. A., Ho, A. C., ... & Doblas-Reyes, F. J. (2023). Multi-annual predictions of the frequency and intensity of daily temperature and precipitation extremes. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034031
- Dong, X., Zhang, S., Zhou, J., Cao, J., Jiao, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River basin (1960–2017), China. *Water*, 11(11), 2334.
- Easterling, D. R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, D. E., ... & Folland, C. K. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.

- Kiany, M. S. K., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2021). Climatology and variability of the start, end, and length of the frost-free season across Iran. *Climate Research*, 84, 59-73.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 138(3-4), 1539-1562.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R., & Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50, 3853-3864.
- Javanshiri, Z., Pakdaman, M., & Falamarzi, Y. (2021). Homogenization and trend detection of temperature in Iran for the period 1960–2018. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1233-1250.
- Li, Z., Xue, H., Dong, G., Liu, X., & Lian, Y. (2024). Spatiotemporal Variation in Extreme Climate in the Yellow River Basin and its Impacts on Vegetation Coverage. *Forests*, 15(2), 307.
- Lin ML, Tsai CW, Chen CK. 2021. Daily maximum temperature forecasting in changing climate using a hybrid of multi-dimensional complementary ensemble empirical mode decomposition and radial basis function neural network. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 38(12):100923.
- Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes in annual temperatures in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1079-1092.
- Mohammadi, H., Khalili, K., Rezaie, H., & Amini-Rakan, A. (2024). Analysis of Trend and Detection of Change Points in Lake Urmia Level and Climatological Parameters Using R Software. *Water Harvesting Research*, 7(2), 220-233.
- Murthy KVN, Saravana R, Kumar GK, Kumar KV. 2021. Modelling and forecasting for monthly surface air temperature patterns in India, 1951–2016: Structural time series approach. *Journal of Earth System Science*. 130(1):21
- Penha, R., & Hines, J. W. (2001, May). Using principal component analysis modeling to monitor temperature sensors in a nuclear research reactor. In Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001).
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013
- Singirankabo, E., Iyamuremye, E., Habineza, A., & Nelson, Y. (2023). Statistical modelling of maximum temperature in Rwanda using extreme value analysis. *Open Journal of Mathematical Sciences*, 7, 180-195.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464
- Van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1.

Sustainable management of flood-prone areas with a focus on the impacts and damages caused by the Pirbazar River flood

Fatemeh Falahati^{1*} 

1. *Corresponding Author*, Assistant Professor, Head of the Hydrological Hazards Research Group and faculty member of the Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran

Email: falahati@ndri.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3363-5313>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 17 May 2025 Revised: 14 September 2025 Accepted: 07 October 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Flood, risk reduction, river training, dredging, safety, Pirbazar River.	The expansion of settlements along riverbanks and drainage channels, as well as indirect interventions in large and small catchment areas that drain the surrounding mountains, have disrupted slope stability, destroyed vegetation cover, compacted soil, and altered the profiles of waterways. These factors have increased vulnerability and intensified the impacts of sudden floods. This issue has become particularly critical in recent years, as intensified droughts have diminished public awareness of the occurrence of consecutive and heavy rainfall in some regions. Consequently, unauthorized construction within the riverbed and its buffer zone has increased, changing the flow and sediment transport potential and disrupting the balance of these aquatic ecosystems. Under these circumstances, rivers reclaim their natural rights according to flood return periods, severely affecting any existing developments within the floodplain. This study is categorized as applied research in terms of its objective and as exploratory research in terms of data collection. It involves field visits, data gathering, and the analysis and interpretation of qualitative data. To this end, in the first step, by analyzing the content of field visit reports from flood-prone villages across the country, the main challenges related to flood risk reduction were identified. Then, based on the findings and the recognized need for the regulation and dredging of rivers and drainage channels in vulnerable rural areas nationwide, the February 2025 flood event in the Pirbazar River was examined and analyzed. Finally, recommendations were provided for policymakers and local authorities to strengthen resilience against floods.
How to Cite: Falahati, F. (2026). Sustainable management of flood-prone areas with a focus on the impacts and damages caused by the Pirbazar River flood. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 75-96.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52056.2115	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Due to the location of population centers near water resources, rivers, and streams, the vulnerability of these settlements to flood hazards has increased. In recent years, climate change has further raised the probability of extreme events, including flash floods. Meanwhile, the expansion of settlements along riverbanks and streams, and indirect interventions in large and small catchments that drain surrounding mountains, have disrupted the balance of slopes, destroyed vegetation cover, compacted soil, and altered channel profiles, resulting in increased vulnerability and intensified impacts of flash floods. In recent years, in particular, the intensification of droughts has diminished public perception of the risk of heavy and successive rainfall in some regions, which in turn has led to increased unauthorized constructions within the riverbed and floodplain. Consequently, changes in flow and sediment transport potential have disrupted the balance of these aquatic ecosystems. Under such conditions, rivers reclaim their natural course according to their flood return periods, severely impacting existing structures within the floodplain.

DATA AND METHODOLOGY

This study is an applied research in terms of its purpose and is classified as exploratory in terms of data collection, involving field surveys, data collection, and qualitative data analysis and interpretation.

In the first step, quantitative content analysis was used. The statistical population in this part of the study consists of field visit reports for 1,418 villages at risk of natural disasters in 31 provinces, which were studied and visited under the project titled Identification, Prioritization, and Action Plans for Villages at Risk of Natural Hazards. This national project was conducted using field, administrative, and software-based methods, and based on Clause 8 of Article 27 of the Sixth Five-Year Development Plan of the Islamic Republic of Iran, the National Disaster Management Law, and the National Hazard Atlas, aiming to identify and propose solutions to reduce priority natural hazards in rural areas.

RESULTS AND DISCUSSION

Content analysis of the field visit reports showed that out of the 1,418 villages studied nationwide, 1,169 villages (82.4%) are at risk of floods, 638 villages (45%) at risk of earthquakes, 393 villages (27.7%) at risk of slope movements (landslides, rockfalls, etc.), 33 villages (2.3%) at risk of land subsidence and sinkholes, and 18 villages (1.3%) at risk of shifting sands (Figure 1). Therefore, flooding is the most widespread hazard occurring nationwide.



Figure 1: Common hazards in villages at risk of natural disasters and hazards. *Source*

The results showed that river and stream management (26.05%) and dredging, cleaning, and removing obstacles from riverbeds and streams are the top challenges nationwide in flood risk management and reduction (Table 1). Despite efforts made to dredge rivers and streams across the country, incidents

such as the February 2025 flood in Gilan Province and the overflow of the Pirbazar River demonstrate that this challenge continues to play a major role in increasing flood-related damages.

Table 1: Most common required actions nationwide for flood risk management and reduction

Code	Main Category	Frequency	Percentage
1	Observing riverbed and riparian boundaries	352	8.04%
2	River and stream management	1,140	26.05%
3	Implementation of watershed management projects	751	17.16%
4	Implementation of elevation coding	266	6.08%
5	Designing and implementing surface and subsurface water collection and drainage systems	445	10.17%
6	Educational, cultural, and promotional activities	288	6.58%

In this event, the overflow of the Goharroud and Zarjoub rivers and subsequently the Pirbazar River led to severe flooding of streets and residential units, especially along the rivers, rising water levels up to bridge decks, damage to natural resources and the environment, contamination of flowing waters due to sewage inflow, large-scale erosion and loss of fertile soil from the watershed by the rivers, damage to infrastructure, contamination of drinking water, blocked roads, and evacuation of residential units along the rivers in Rasht. Studies indicate that the lack of dredging and management of these rivers, failure to observe riverbed and riparian boundaries, changes in erosion and sedimentation conditions, channel shifting, lateral and longitudinal displacements, formation of shortcuts, changes in bed levels, alteration of sediment gradation, and transformation of channel geometry are among the main factors that have intensified the impacts and consequences of this flood, increasing damages. In addition, in some areas, such as the central square of Pirmazar city, the elevation level of construction relative to the riverbed is lower, which, given the unmanaged river conditions, has resulted in water overflow and inundation of built-up areas.

Another notable aspect of the flood was the deterioration in water quality due to the mixing of sewage with surface water resources. Because of the high runoff volume and prolonged water retention on the ground, especially due to the full capacity of wetlands and lack of proper drainage, water quality parameters significantly degraded during this flood.

CONCLUSION

In this study, the results and specialized reports of field visits to 1,418 villages at risk of natural disasters in 31 provinces were reviewed and content analyzed. The analysis of natural hazard frequencies in different provinces showed that flooding is the most widespread natural hazard nationwide. By examining aggravating factors, related challenges, and mitigation strategies, it was found that despite efforts made so far to reduce flood risk, river and stream management, dredging, and enforcement of riverbed and riparian boundaries remain top priorities for flood risk reduction. The February 2025 flood in the Pirmazar River clearly exemplifies these challenges. Given the financial constraints and high costs associated with post-disaster recovery and reconstruction, and the necessity of proactive planning and action for disaster prevention and risk reduction, this study presents recommendations for policymakers and local authorities to strengthen resilience against floods.

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 present article has been extracted from the project “Identification, Prioritization, and Action Planning for Villages at Risk of Natural Disasters.” Therefore, the authors would like to express their sincere gratitude and appreciation to the Natural Disasters Research Institute for all its financial and moral support.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S. A., Srinivasan, R., & Haghighat, S. (2013). A comprehensive review of water quality modeling of rivers and lakes in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5657–5670. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2953-2>. [In Persian]
- Ahmadi, A. (2019). Analysis and zoning of flood-prone areas in arid regions using spatial analysis (Case study: Farrokhi Watershed). *Journal of Dry Regions Geography Studies*, 9(36), 4–32. [In Persian]
- Ahmadi, H., Keshavarzi, B., & Nabavi, S. M. B. (2017). Effects of wastewater discharge on the water quality and eutrophication of Anzali Wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2), 1523–1536. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7912-5>. [In Persian]
- Askari Zadeh, S. M., Mohamadiya Ghoraei, S., & Zohoor, M. (2010). Disaster and environmental hazard management planning towards sustainable development. In *Proceedings of the 4th International Congress of Geographers of the Islamic World*. [In Persian]
- Falahati, F., & Garkani, S. A. (2025). The necessity of enhancing the status of risk reduction considerations in settlement development plans (Case study: Flood in the metropolis of Mashhad). Paper presented at the 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture, Building Materials and Environment, Helsinki, Finland. [In Persian]
- Javanmard, R., Khodaparast, H., & Ramezani, N. (2014). River morphology and sediment dynamics under human interventions: A case study in northern Iran. *Journal of Hydrology*, 514, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.048>. [In Persian]
- Mohammadi, M. A., Mohammadi, F., Fakhri Fard, A., & Bijanvand, S. (2020). Derivation of control curves for flood risk zoning (Case study: Barandoozchay Rivers of Urmia). *Hydrogeomorphology Journal*, 7(22), 87–108. [In Persian]
- Norouzi, A. (2017). Principles of crisis management in rural areas. Isfahan: Jihad Daneshgahi Publications. [In Persian]
- Piroozfar, P., Zargar, M., & Sharifi, F. (2018). Flood hazard zoning and risk assessment in Iran: A review of methodologies and applications. *Natural Hazards*, 91(1), 123–146. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3091-4>. [In Persian]
- Pourreza, M., Mahmoudi, H., & Ebrahimi, S. (2019). Runoff management and flood mitigation in northern Iranian catchments. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(9), 04019030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001784). [In Persian]
- Rezaayat, G. (2012). Training booklet for the workshop on content analysis with emphasis on analyzing scientific interview content. Iranian Higher Education Association. [In Persian]

References (in English)

- Borg, Walter R. and Meredith Damien Gall. (1989). *Educational Research: An Introduction*. Fifth Edition, New York & London, Longman.
- Buffington, J.M. (2012). Changes in channel morphology over human time scales [Chapter 32]. In: Church, Michael; Biron, Pascale M.; Roy, Andre G., eds. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*. Chichester, UK: Wiley, 435-463.
- Gunasekara, A. (2015). Floodplain management policies and legislation: International perspectives. *Journal of Flood Risk Management*, 8(4), 302–313. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12098>.
- Herold C, Mouton F. (2011). Global flood hazard mapping using statistical peak flow estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*; 8 (1): 305–363.
- Jigyasu, R. (2002). Reducing Disaster vulnerability through local knowledge and capacity: the Case of Earthquake-Prone Rural Communities in India and Nepal. Department of Town and Regional Planning, Trondheim.
- Rahmani, R. A., Mohammadi, M., and Danandeh Mehr, A. (2020). Climate change impacts on floodway and floodway fringe: a case study in Shahrchay River Basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 494, 1-13.
- The Ministry of Power. Iran Water Resource Management Company. *Flood Zoning Guide and Determining the Limit of River Landing and Area*. (2005). Issue No. 307. [In Persian]
- UNISDR. (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2016). *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*, Extract from the final report of the World Conference on Disaster Reduction.
- Yousefi, S., Moradi, H.R., Keesstra, S., Pourghasemi, H.R., Navratil, O., & Hooke, J. (2019). Effects of urbanization on river morphology of the Talar River, Mazandaran Province, Iran. *Geocarto International*, 34(3), 276-292.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

مدیریت پایدار فضاهای در معرض خطر سیلاب با تمرکز بر پیامدها و خسارت‌های ناشی از سیلاب رودخانه پیربازار

فاطمه فلاحتی ^{۱*}

۱. استادیار، مدیر گروه پژوهشی مخاطرات هیدرولوژیکی و عضو هیئت علمی پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: falahati@ndri.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3363-5313>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: سیلاب، کاهش خطر، ساماندهی رودخانه، لایروبی، ایمن‌سازی، رودخانه پیربازار.	گسترش سکونتگاه‌ها در حاشیه رودخانه‌ها و مسیل‌ها و دخالت‌های انسانی در حوضه‌های آبریز موجب برهم‌زدن تعادل طبیعی، از بین رفتن پوشش گیاهی، فشردگی خاک و تغییر در نیم‌رخ آبراهه‌ها شده و در نهایت آسیب‌پذیری در برابر سیلاب‌های ناگهانی را افزایش داده است. تشدید خشکسالی‌های اخیر نیز سبب شده تا خطر بارش‌های شدید در ذهن جامعه کم‌رنگ شود و در نتیجه با رشد ساخت‌وسازهای غیرمجاز در بستر و حریم رودخانه‌ها، تعادل اکوسیستم‌های آبی بیش‌ازپیش برهم بخورد. این پژوهش با هدف شناسایی چالش‌های مدیریت پایدار سیلاب و ارائه راه-کارهایی برای کاهش خطر و ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها انجام شده است. جامعه آماری شامل ۱۴۱۸ روستای در معرض خطر سیلاب در سطح کشور است که داده‌های آن از طریق گزارش‌های بازدید میدانی گردآوری شد. ابزار جمع‌آوری داده‌ها چک‌لیست‌های میدانی و اسناد سازمانی بوده و برای سنجش پایایی کدگذاری‌ها از ضریب کوهن استفاده شد. یافته‌ها نشان داد مهم‌ترین چالش‌ها در ارتباط با سیلاب شامل ضرورت ساماندهی و لایروبی رودخانه‌ها و مسیل‌ها، رعایت بستر و حریم رودخانه‌ها و اجرای طرح‌های آب‌خیزداری است. در ادامه، رخدادهای سیلاب بهمن ۱۴۰۳ در رودخانه پیر بازار به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شد. نتایج نشان داد تجاوز به حریم رودخانه، انباشت رسوبات و پایین‌بودن ارتفاع ساخت‌وسازها نسبت به بستر اصلی از عوامل اصلی خسارت‌ها بوده‌اند. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که آزادسازی بستر رودخانه‌ها، لایروبی منظم، ساماندهی مسیل‌ها و بهره‌گیری از دانش بومی در طراحی سکونتگاه‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری در کاهش خسارت‌ها و ارتقای تاب‌آوری جوامع محلی در برابر سیلاب نقش‌آفرین باشد.

استناد: فلاحتی، فاطمه . (۱۴۰۵). مدیریت پایدار فضاهای در معرض خطر سیلاب با تمرکز بر پیامدها و خسارت ناشی از سیلاب رودخانه

پیربازار. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵ (۴۹)، ۷۵-۹۶.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52056.2115

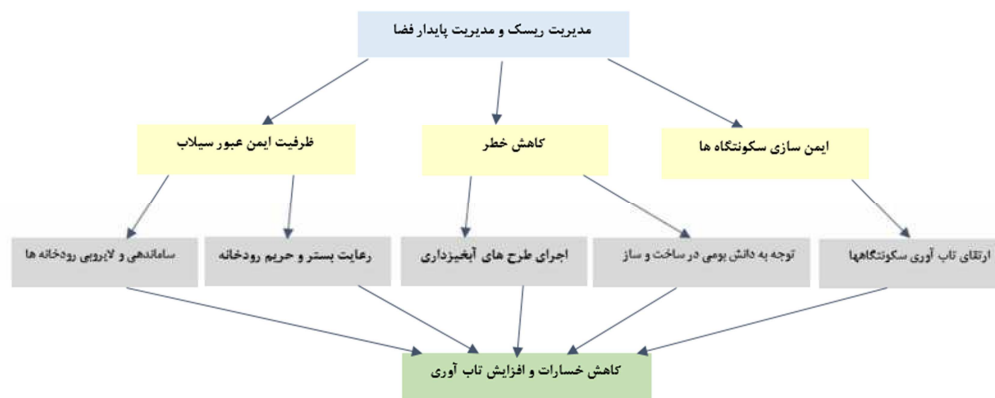


مقدمه

رودخانه‌ها از جمله منابع آبی سطحی مهمی هستند که در طی زندگی بشر همواره مورد توجه بوده‌اند. این توجه ناشی از وابستگی انسان به آب و پاسخ‌دادن به این وابستگی در موضوعاتی از قبیل کشاورزی، انتقال آب، مهار سیلاب‌ها و حمل‌ونقل آبی است. از این رو باتوجه به مکان‌گزینی مراکز جمعیتی در کنار منابع آب، رودخانه‌ها و مسیل‌ها، آسیب‌پذیری این سکونتگاه‌ها در برابر مخاطره سیلاب نیز افزایش یافته است (فلاحی و گرکانی، ۱۴۰۳). باید توجه داشت که وقوع سوانح طبیعی از جمله چالش‌هایی است که همواره و در طی قرون متمادی، زندگی جوامع انسانی را مورد تهدید قرار داده و باوجود درک روبه‌رشد و پذیرش اهمیت کاهش خطر مخاطرات طبیعی و افزایش توانایی پاسخگویی به فاجعه، مدیریت مطلوب برای کاهش خطر مخاطرات محیطی، همچنان چالشی جهانی است (UNISDR, 2016). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سالیان اخیر تعداد مخاطرات طبیعی افزایش یافته و به لحاظ میزان خسارت نیز با روند روبه‌رشدی باتوجه به وقوع بحران‌های شدید مواجه هستیم (نوروزی، ۱۳۹۶). به‌ویژه که طی سال‌های اخیر تغییرات آب‌وهوایی نیز بر احتمال وقوع پدیده‌های حدی از جمله سیلاب‌های ناگهانی افزوده و نگرانی در خصوص آسیب‌های ناشی از وقوع سیلاب افزایش یافته است (Rahmani et al., 2020). آسیب‌های وارده به اکوسیستم، برهم‌زدن ظرفیت آب‌گذری و شرایط تعادل ژئومورفولوژیکی، مشکلات فراوانی را برای بشر به‌وجود آورده است؛ به‌ویژه توسعه مناطق مسکونی در اطراف سامانه‌های رودخانه‌ای که نقش زیادی در کنترل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها، به‌ویژه باریک شدن بستر رودخانه‌ها ایفا کرده است (Yousefi et al., 2019). علاوه بر آنکه مسیل‌هایی که از میان و یا کنار بافت سکونتگاه‌های مسکونی عبور می‌کنند، اغلب به کانون تخلیه فاضلاب‌ها، زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی بدل گردیده و باعث می‌گردد تا مسیل چهره نامناسبی به خود گیرد و کانون آلودگی و پرورش و تکثیر جوندگان و حشرات و منبع انتشار بوهای نامطلوب باشد. علاوه بر آنکه رواناب ناشی از نزولات جوی نیز بر اثر جاری‌شدن در سطح حوضه آبخیز باعث فرسایش و حمل ذرات خاک، لاشبرگ و خار و خاشاک و حمل آنها به طرف پایین‌دست می‌گردد و چنانچه تجمع آنها منجر به کاهش ظرفیت عبور رواناب در بستر اصلی رودخانه و مسیل گردد، طغیان آب و خروج سیلاب از بستر اصلی خود، آسیب‌های متعددی را در پی خواهد داشت. آنچه مسلم است پایداری رودخانه و واکنش به شرایط متغیر محیطی، به‌شدت به ویژگی مکانی و موضعی مداخلات طبیعی و انسانی وابسته است (Buffington, 2012). بنابراین، برای جلوگیری از تخریب رودخانه‌ها و اکوسیستم‌های آبی نیاز است که چاره‌اندیشی شود و رویکردی برای حفاظت از محیط و عملکرد طبیعی رودخانه‌ها گرفته شود و تعریف فضای مناسب برای فعالیت‌های رودخانه‌ای به‌عنوان نوعی رویکرد مدیریت پایدار و شناسایی فضاهای لازم برای رودخانه‌ها به‌منظور اطمینان از امنیت عمومی و خدمات زیست‌محیطی ضروری است (Herold & Mouton, 2011). رویکردهایی که در کشورهای پیشرو در زمینه احیاء رودخانه‌ها در نظر گرفته می‌شود، همگی روی حداکثر تلاش برای بازگشت به وضعیت قبل از دست‌کاری رودخانه می‌باشد (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۶) و تاکنون نیز مطالعات و پژوهش‌های زیادی در حوضه‌های آبریز به‌ویژه رودخانه‌های طغیانی انجام پذیرفته و راه‌کارهایی نیز ارایه شده است که گاهی به‌دلیل هزینه‌های فراوان، اجرایی‌شدن این طرح‌ها به تعویق افتاده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹). متأسفانه در برنامه‌های توسعه اکثر کشورهای دنیا به‌ویژه جهان سوم توجه کمتری به پیش‌بینی و پهنه‌بندی مخاطرات شده است (احمدی، ۱۳۹۸). لازم به یادآوری است که در شرایط تغییر اقلیم و افزایش تعداد و شدت وقوع پدیده‌های حدی، شناسایی مخاطرات و اثرات آنها و شناسایی ظرفیت‌های محلی جهت پاسخ مناسب در

راستای کاهش خطر و ساخت مسیری امن برای توسعه پایدار در آینده از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (Jigyasu, 2002). چرا که ارزیابی‌های مختلف نشان داده که عبور از دیدگاه سنتی مدیریت بحران و حرکت به سمت مدیریت ریسک، منجر به کاهش آسیب‌پذیری و پیشگیری از صرف هزینه‌های کلان جهت جبران خسارت در فاز بازسازی و بازتوانی می‌گردد (عسکری زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

از این‌رو در این پژوهش، باتوجه به ضرورت موضوع مدیریت ریسک سیلاب، مدیریت پایدار فضاهای در معرض خطر سیلاب به‌ویژه حفظ ظرفیت عبور ایمن سیلاب و باهدف کاهش خطر و ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها در برابر این مخاطره، ضمن بررسی نتایج بازدید میدانی ۱۴۱۸ روستای در معرض خطر سوانح طبیعی در ۳۱ استان کشور و تعیین فراگیرترین چالش در زمینه مدیریت سیلاب در سطح کشور، سیلاب بهمن ماه ۱۴۰۳ رودخانه پیربازار به‌عنوان نمونه موردی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و مهم‌ترین راه‌کارهای ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها و مراکز جمعیتی در برابر سیلاب ارائه گردیده است.



شکل ۱: مدل مفهومی مدیریت پایدار فضاهای در معرض خطر سیلاب با هدف کاهش خطر و ایمن‌سازی سکونتگاه‌ها

لازم به یادآوری است که نوآوری این پژوهش در ارائه نتایج بازدید میدانی و تحلیل ترکیبی اثرات سیلاب در مقیاس محلی و منطقه‌ای و تطبیق نتایج با خروجی مطالعه در سطح کلان ملی است و نتایج این مطالعه می‌تواند در برنامه‌ریزی و اقدام به‌منظور پیشگیری و کاهش خطر سیلاب منطبق با برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح و مدیریت ریسک مخاطره سیلاب مؤثر واقع گردد.

داده‌ها و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف در حیطه پژوهش‌های کاربردی و از نظر گردآوری داده‌های مورد نیاز جزء پژوهش‌های اکتشافی طبقه‌بندی می‌شود و مشتمل بر بازدید میدانی، گردآوری داده‌ها و تحلیل و تفسیر داده‌های کیفی است.

در بخش نخست این نوشتار، ابتدا از تحلیل محتوای کمی استفاده گردیده که یک شیوه پژوهشی برای تشریح عینی، منظم و کمی محتوای آشکار است (رضایت، ۱۳۹۱). در رویکرد کمی تحلیل محتوا، هدف اندازه‌گیری حجم (شمارش) مقوله‌های موضوعی است. مراحل تحلیل محتوا در این پژوهش با توجه به نظر بورگ و گال (1989)، شامل شش مرحله "شناسایی اسناد"، "تدوین اهداف"، "انتخاب نمونه‌ای از اسناد"، "تدوین روش مقوله‌بندی"، "شمارش

فراوانی هر مقوله" و "تفسیر نتایج" است. لازم به یادآوری است که در این پژوهش برای تدوین روش‌های مقوله‌بندی، از شیوه "به‌کارگیری قیاسی مقوله‌ها" استفاده گردیده است. بدین‌صورت که مقوله‌ها و زیرمقوله‌های مرتبط با راه-کارهای پیشنهادگردیده در بازدیدهای میدانی درخصوص ایمن‌سازی روستاهای در معرض خطر سوانح طبیعی که دربرگیرنده مضامین و مفاهیم مرتبط با کاهش خطر سوانح طبیعی و ایمن‌سازی روستا می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار NVIVO مورد تحلیل محتوایی قرار گرفته است. جامعه آماری در این پژوهش در این بخش، گزارش‌های بازدید ۱۴۱۸ روستاهای در معرض خطر سوانح طبیعی در ۳۱ استان می‌باشد که در طرح شناسایی، اولویت‌بندی و نحوه اقدام در روستاهای در معرض خطر سوانح طبیعی مورد مطالعه و بازدید میدانی قرار گرفته‌اند. این طرح ملی با بهره‌گیری از روش‌های میدانی، ستادی و مدل‌های نرم‌افزاری و با استناد به بند ۸ ماده ۲۷ قانون برنامه ششم توسعه جمهوری اسلامی، اسناد قانون مدیریت بحران کشور و سند اطلس ملی مخاطرات طبیعی به منظور شناسایی و ارائه راه‌کارهای کاهش خطر مخاطرات سیلاب، فرونشست و فروچاله، زلزله، ماسه‌های روان و حرکات دامنه‌ای (شامل لغزش‌ها، سنگ‌افتان، خزش و روانه گلی) به‌عنوان مخاطرات اولویت‌دار، در محیط‌های روستایی انجام گردیده است. نحوه شمارش مقوله‌ها براساس تعداد و فراوانی زیرمقوله‌های مرتبط با راه‌کارهای پیشنهادی ایمن‌سازی بر مبنای واحد تحلیل محتوا در گزارش‌های بازدید میدانی بوده و در رابطه با روایی بخشی به کدگذاری‌ها، سه نفر از خبرگان حوزه تحقیق بعد از آموزش کدگذاری به‌طور جداگانه اقدام به کدگذاری نموده و سپس میزان پایایی کدگذاری‌های محققین از طریق فرمول کاپای کوهن^۱ محاسبه شده است.

فرمول و محاسبه کاپای کوهن:

$$k = \frac{PA_o - PA_E}{1 - PA_E} \quad (1)$$

که در آن:

PA_o = نسبت توافق مشاهده‌شده بین کدگذاران

PA_E = توافق مورد انتظار به‌صورت تصادفی

در این مطالعه، از ۱۴ مقوله اصلی، ۱۲ مورد توسط سه کدگذار به‌طور مشابه شناسایی شد و تنها در ۲ مقوله اختلاف نظر وجود داشت. بنابراین:

$$PA_o = \frac{12}{14} = 0.857 \quad (2)$$

با فرض توافق تصادفی $PA_E = 0.50$

مقدار به‌دست‌آمده $k = 0.714$ ، بیانگر توافق خوب و پایایی قابل‌قبول بین کدگذاران است.

در این مطالعه، ضریب پایایی کل ۰.۸۴، به‌دست آمد که بالاتر بودن این ضریب از ۰.۷۰ نشان‌دهنده میزان قابل‌قبول پایایی کدگذاری‌ها می‌باشد (جدول ۲). با توجه به ضریب بالای پایایی و با لحاظ برخی تضادها در کدگذاری و توافق نهایی درخصوص نسخه نهایی کدگذاری‌ها، روایی کدگذاری تأمین شده است.

سپس در بخش دوم، نتایج حاصل از تحلیل محتوای این گزارش‌ها، با نتایج بازدید میدانی از منطقه درگیر در سیلاب بهمن‌ماه ۱۴۰۳ در رودخانه پیربازار (شکل ۲) به‌عنوان نمونه عینی از فراگیرترین چالش‌ها در زمینه مدیریت و کاهش خطر سیلاب تطبیق داده شده است. بدین منظور، پس از تحلیل داده‌های ملی و استخراج مقوله‌ها و زیرمقوله‌های

¹ kohen's Kappa

مرتبط با راه‌کارهای کاهش خطر در سطح کشور (جدول ۲) و به‌منظور بررسی وضعیت عینی و ملموس‌تر، نتایج حاصل از تحلیل محتوای گزارش میدانی سیلاب به‌من‌ماه ۱۴۰۳ در رودخانه پیربازار بررسی گردید. هدف از این بخش، انطباق و مقایسه مقوله‌ها و زیرمقوله‌های شناسایی‌شده در سطح ملی با داده‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه است تا مشخص شود چه میزان همپوشانی یا تفاوت میان وضعیت محلی و کلیت کشور وجود دارد. مقوله‌ها و زیرمقوله‌های استخراج‌شده برای منطقه پیربازار در جدول ۳ نمایش داده شده است.

یافته‌های پژوهش

تحلیل محتوای گزارش‌های بازدید میدانی از روستاهای در معرض خطر مخاطرات طبیعی نشان داد که از ۱۴۱۸ روستای مورد مطالعه در سراسر کشور، ۱۱۶۹ روستا (۸۲٫۴ درصد) در معرض خطر سیلاب، ۶۳۸ روستا در معرض خطر زلزله (۴۵ درصد)، ۳۹۳ روستا در معرض خطر حرکات دامنه‌ای (زمین‌لغزش، سنگ‌افتان و...) (۲۷٫۷ درصد)، ۳۳ روستا در معرض خطر فرونشست و فروچاله (۲٫۳ درصد) و ۱۸ روستا در معرض خطر ماسه‌های روان (۱٫۳ درصد) قرار دارند. بنابراین، سیلاب در صدر مخاطراتی است که در سطح کشور به‌صورت فراگیر رخ می‌دهد.

راه‌کارهای پیشنهادشده توسط متخصصین تیم‌های بازدید از این روستاها نیز بخشی دیگر از مطالعات تحلیل محتوای گزارش‌های بازدید میدانی بود که پس از بررسی پایایی و روایی بخشی به کدگذاری‌ها، راه‌کارهای پیشنهادی در قالب ۱۴ مقوله اصلی طبقه‌بندی و زیرمقوله‌های مرتبط با هریک از مقوله‌های اصلی به‌عنوان مقوله فرعی در نظر گرفته شد و فراوانی و درصد فراوانی راه‌کارهای ایمن‌سازی و کاهش خطر توصیه‌شده توسط متخصصین استخراج گردید (جدول ۲).

جدول ۲: مقوله‌ها و زیرمقوله‌های مرتبط با راه‌کارهای پیشنهادی در طرح شناسایی روستاهای در معرض خطر. منبع: یافته‌های پژوهش (گردآوری و تحلیل داده‌های میدانی طرح ملی شناسایی روستاهای در معرض خطر، ۱۴۰۳)

کد	مقوله اصلی	مقوله‌های فرعی	فراوانی	درصد	ضریب پایایی (cronbach's α)
۱	رعایت حد بستر و حریم	رعایت حریم	۳۵۲	۸٫۰۴	۰٫۸۱
		آزادسازی بستر			
		حفاظت و جلوگیری از دخل‌وتصرف غیرمجاز در بستر			
		تعیین حد بستر و حریم			
۲	ساماندهی رودخانه و مسیل	پاک‌سازی و رفع موانع	۱۱۴۰	۲۶٫۰۵	۰٫۸۶
		لایروبی			
		بهسازی مقطع			
		تغییر مسیر			
		خاکریزها			
		کانال‌های فرعی سیلاب			
۳	اجرای طرح‌های آبخیزداری	انحراف جریان	۷۵۱	۱۷٫۱۶	۰٫۸۳
		عملیات بیولوژیکی			
		عملیات بیومکانیکی			
۴	اجرای کد ارتفاعی	-	۲۶۶	۶٫۰۸	۰٫۷۹

۵	طراحی و اجرای عملیات جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی و هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی	جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی	۴۴۵	۱۰،۱۷	۰،۸۰
۶	انجام فعالیت‌های آموزشی، فرهنگی، ترویجی	آموزش در ارتباط با هشدار سیلاب	۲۸۸	۶،۵۸	۰،۷۸
		کنترل چرا			
		عدم تخلیه نخاله ساختمانی			
۷	ایجاد/ بهسازی امکانات زیربنایی	احداث یا بهسازی پل	۳۶۹	۸،۴۳	۰،۸۲
		احداث یا بهسازی جاده			
۸	نوسازی و مقاوم‌سازی ابنیه	-	۳۱۰	۷،۰۸	۰،۷۷
۹	پایدارسازی توده لغزشی و کنترل حرکات دامنه‌ای	اجتناب از خطر	۲۱۴	۴،۸۹	۰،۸۰
		کاهش نیروهای محرک			
		افزایش نیروهای مقاوم			
		جابه‌جایی واحد مسکونی			
۱۰	کاهش خطر سنگ افتان	کنترل سنگ افتان	۱۲۶	۲،۸۸	۰،۷۶
		جابه‌جایی واحد مسکونی			
۱۱	کاهش خطر فرونشست	مدیریت منابع آب	۲۴	۰،۵۵	۰،۷۵
		جابه‌جایی واحد مسکونی			
۱۲	کاهش خطر ماسه‌های روان	کاهش سرعت باد (استفاده از موانع زنده و غیرزنده)	۱۷	۰،۳۸۸	۰،۷۴
		افزایش پایداری سطح خاک (استفاده از پوشش‌های طبیعی و مصنوعی)			
۱۳	اجرا یا بازنگری طرح هادی	-	۳۸	۰،۸۷	۰،۷۳
۱۴	انجام مطالعات سمت توسعه روستا	-	۳۶	۰،۸۲	۰،۷۲

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، ساماندهی رودخانه‌ها و مسیل‌ها با ۲۶،۰۵ درصد و لایروبی و پاکسازی و رفع موانع در بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها به‌عنوان دو زیرمقوله فرعی آن، بالاترین چالش در سطح کشور در زمینه مدیریت و کاهش خطر سیلاب است و علیرغم تلاش‌هایی که در جهت لایروبی رودخانه‌ها و مسیل‌ها در سطح کشور انجام شده، همچنان وقوع سیلابی نظیر سیلاب بهمن ماه ۱۴۰۳ در رودخانه پیربازار نشان می‌دهد که این چالش همچنان در افزایش خسارت‌های ناشی از سیلاب نقش دارد. در این رخداد دریافت بارش بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در رشت و بیش از ۱۸۵ میلی‌متر در آستارا طی ۴۸ ساعت در روزهای ۱۸ و ۱۹ بهمن ۱۴۰۳، سیلاب رشت را رقم زد که با همراه شدن با چالش‌هایی از جمله عدم لایروبی جوی‌ها و رودخانه‌های کوچک و بزرگ و در صدر آنها رودهای زرجوب و گوهررود، وجود زباله و پسماندهای جامد زیاد در حاشیه رودخانه‌ها، ساخت واحدهای مسکونی بدون مجوز و غیرفنی و خارج از چارچوب مهندسی در حاشیه و حریم رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، رسوب‌گذاری منجر به افزایش ضریب مانینگ و کاهش سطح مقطع هیدرولیکی آب‌بر رودخانه‌های گوهر رود، زرجوب و پیربازار و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال دبی سیلاب در زمان بارش‌های ناگهانی و سیل‌آسا، پر شدن و طغیان رودخانه‌ها و مسیل‌ها را در پی داشت.

در این سیلاب طغیان رودخانه‌های گوهر رود و زرجوب و در نتیجه رودخانه پیربازار منجر به آب‌گرفتگی شدید معابر و واحدهای مسکونی به‌ویژه در حاشیه رودخانه‌ها، بالا آمدن سطح آب تا عرشه پل‌ها، ایجاد خسارت به منابع طبیعی و محیط‌زیست، آلودگی آب‌های جاری در اثر ورود فاضلاب به آنها، خروج حجم عظیمی از خاک حاصلخیز حوضه آبریز

توسط رودخانه‌ها، خسارت به تأسیسات زیربنایی، آلودگی آب آشامیدنی، مسدود شدن راه‌های مواصلاتی و تخلیه واحدهای مسکونی در حاشیه رودخانه‌های رشت گردید.

شهرستان رشت یکی از شهرستان‌های استان گیلان در شمال ایران است. شهر مرکزی این شهرستان، شهر رشت است که با آب‌وهوای معتدل و طبیعت زیبای خود شهرت دارد. این شهرستان از شمال به دریای کاسپین و شهرستان خمام، از شمال غرب به شهرستان بندر انزلی، از غرب به شهرستان صومعه‌سرا و شهرستان شفت، از جنوب به شهرستان رودبار و از شرق به شهرستان آستانه‌اشرفیه و شهرستان لاهیجان و شهرستان سیاهکل محدود می‌شود. بخش مرکزی شهرستان رشت شامل شهرهای رشت و دهستان‌های پسیخان، پیربازار، حومه (رشت) و لاکان می‌باشد.

وضعیت سیل‌خیزی منطقه

شهر رشت از شمال به بخش خمام و از سمت جنوب به لاکان و شهرستان رودبار، از سمت شرق و شمال شرقی به بخش کوچصفهان و سنگر و از سمت غرب و شمال غربی به شهر صومعه‌سرا و شفت محدود است. این شهر در حوضه آبریز سفیدرود و در کرانه جنوبی دریای خزر قرار دارد. از نظر ژئومورفولوژی در یک زمین مسطح با شیب حدود ۰/۲ درصد به سمت شمال بوده و دو رودخانه زرجوب و گوهر رود، مهم‌ترین عوارض ژئومورفولوژیکی هستند که از داخل شهر عبور می‌کنند.

از سد سفیدرود تا گندلان، بستر رودخانه سفیدرود در دره سفیدرود جاری است و از این نقطه به بعد دلتای وسیعی با شاخه‌های زیاد تشکیل شده و شاخه اصلی آن پس عبور از شهرستان رودبار، شهرستان رشت، شهرستان آستانه‌اشرفیه در پارک ملی بوجاق به دریای خزر می‌ریزد.

در ساحل غربی رودخانه سفیدرود رواناب‌های یک حوضه آبریز به وسعت ۱۵۰ کیلومتر مربع بیشتر توسط دو رودخانه گوهر رود و زرجوب جمع‌آوری شده که بعد از عبور از محدوده شهر رشت، در منطقه کماکل با پیوستن به یکدیگر رودخانه پیر بازار را تشکیل داده و با حرکت به سمت تالاب انزلی در نهایت به دریای خزر می‌ریزد.

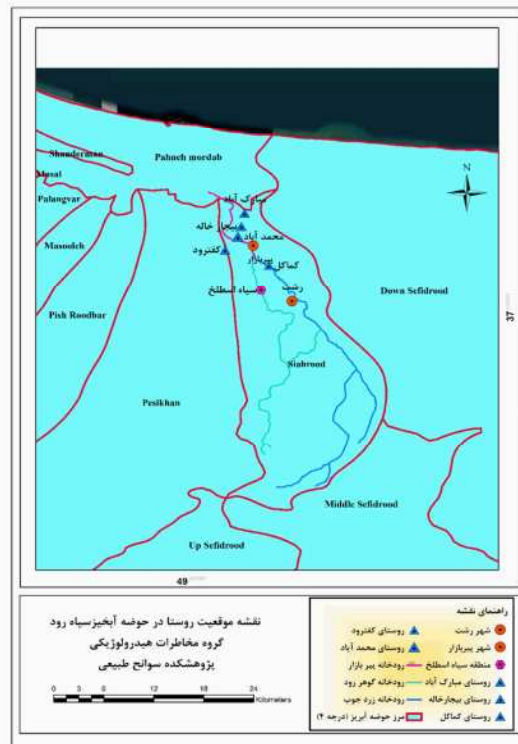
گوهر رود از کوه‌های سراوان در ارتفاع ۷۰۰ متری سرچشمه می‌گیرد و رودخانه زرجوب (رودخانه سیاه‌رود) که در شرق شهرستان رشت جاریست با نام‌های صیقان رود، سیاه‌رود، کلاشه رودبار و نهر بوسار خوانده می‌شود، از کوه‌های کم‌ارتفاع هزار مرز، نیزه سر، جکلوندان و کچا که در جنوب شهرستان رشت قرار دارند، سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیر ۴۳ کیلومتر به تالاب انزلی سرازیر می‌شود. این دو رودخانه از رودهای مهم و حیاتی شهر رشت و از تأمین‌کنندگان آب تالاب انزلی هستند که همین موضوع بر اهمیت آنها می‌افزاید.

باتوجه به موقعیت طبیعی شهر رشت در منطقه‌ای در حفاصل بین توپوگرافی کوه‌های مرتفع در جنوب و دشت‌های کم‌ارتفاع، بارش‌های ناگهانی منجر به ایجاد رواناب در دامنه‌های پرشیب رشته‌کوه‌های البرز و سیلابی شدن رودخانه‌های یادشده می‌گردد.

رخداد سیلاب مورد بررسی در این نوشتار نیز بیشتر در جلگه رودخانه سفیدرود رخ داده و موجب آب‌گرفتگی در جلگه به‌ویژه شهر رشت و مناطق حاشیه‌ای شامل مسکن مهر و سیاه اصطخ و خیابان دیانتی و منطقه پیربازار شد. روستاهای محمدآباد، اسلام‌آباد، بیجار خاله، مبارک آباد، کفته رود و کماکل از جمله روستاهایی هستند که در این سیلاب با بیشترین آب‌گرفتگی مواجه گردیدند.

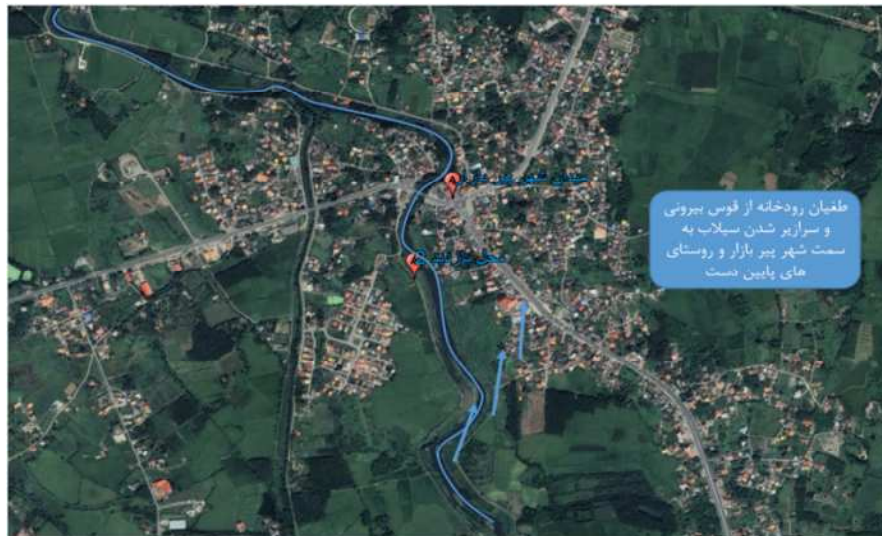


شکل ۲: موقعیت رودخانه‌های گوهر رود، زرجوب و پیربازار در منطقه. منبع: تصویر برگرفته از google earth



شکل ۳: موقعیت رودخانه‌های گوهر رود، زرجوب و پیربازار در حوضه آبخیز. منبع: نگارنده

طی این رخداد، سطح آب در دو رودخانه گوهر رود و زرجوب در شهر رشت بالا آمده و برخی از مناطق مسکونی از جمله منطقه پیربازار، دیانتی، سیاه اصطلاح و تعدادی از روستاها با آب‌گرفتگی مواجه شده و درگیر سیلاب شدند.

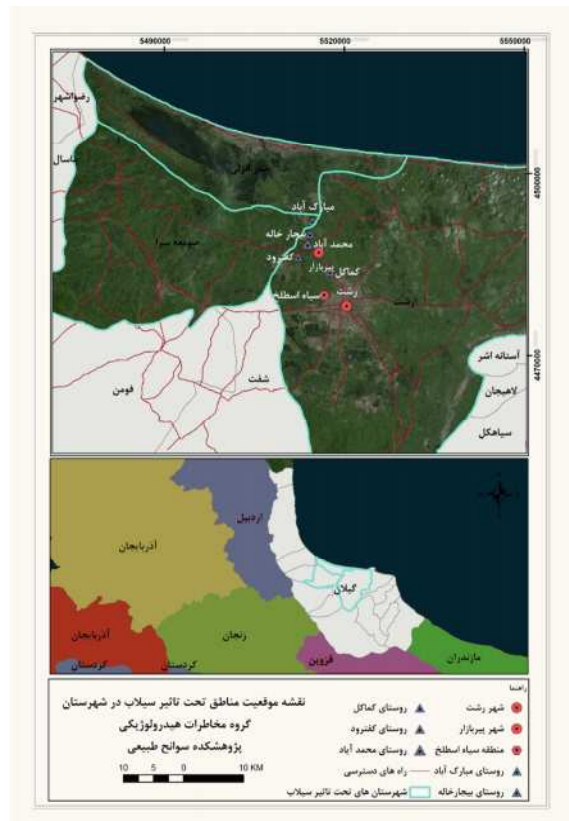


شکل ۴: طغیان رودخانه پیربازار و جریان سیلاب به سمت شهر پیربازار و روستاهای پایین‌دست به طرف تالاب انزلی... منبع: نگارنده

جهت استخراج پهنه‌های درگیر سیلاب، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ در تاریخ ۱۴۰۳/۱۱/۲۳ (چهار روز بعد از وقوع سیلاب) اخذ و جهت طبقه‌بندی دوکلاسه (اراضی سیلابی و اراضی خشک) از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده گردید.



شکل ۵: اراضی تحت تاثیر سیلاب در شهرستان‌های رشت، صومعه سرا و انزلی... منبع: نگارنده



شکل ۶: موقعیت روستاهای تحت تأثیر سیلاب در شهرستان‌های رشت، صومعه سرا و انزلی. منبع: نگارنده

در انتها، پس از بازدید میدانی سیلاب در منطقه پیربازار، مقوله‌ها و زیرمقوله‌های مرتبط با راه کارهای کاهش خطر سیلاب در منطقه پیربازار بر اساس تحلیل گزارش‌های میدانی استخراج شد که در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳: مقوله‌ها و زیرمقوله‌های شناسایی شده در بازدید میدانی سیلاب. منبع: تحلیل گزارش‌های میدانی (بهمن ۱۴۰۳)

کد	مقوله اصلی	مقوله‌های فرعی	فراوانی	درصد	ضریب پایایی (cronbach's α)
۱	رعایت حد بستر و حریم	ساخت‌وسازهای غیرمجاز در حریم و عدم رعایت حد بستر	۶۲	۱۸،۵	۰،۸۱
۲	ساماندهی رودخانه و مسیل	لایروبی، پاکسازی و رفع موانع، بهسازی مقطع و رسوب‌زدایی	۱۱۸	۳۵،۲	۰،۸۷
۳	اجرای طرح‌های آبخیزداری	کنترل رواناب بالادست، عملیات مکانیکی محدود	۲۸	۸،۴	۰،۸۰
۴	اجرای کد ارتفاعی	-	۹	۲،۷	۰،۷۸
۵	طراحی و اجرای عملیات جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی	ناکارآمدی شبکه زهکشی، اختلاط فاضلاب و آب	۳۷	۱۱،۲	۰،۷۹
۶	انجام فعالیت‌های آموزشی، فرهنگی، ترویجی	آگاهی‌بخشی به ساکنان درباره خطرات و تخلیه نخاله	۱۴	۴،۲	۰،۷۷

۷	ایجاد/ بهسازی امکانات زیربنایی	پل‌های ناکارآمد، جاده‌های سیل‌بر	۲۶	۷,۷	۰,۸۲
۸	نوسازی و مقاوم‌سازی ابنیه	بناهای فرسوده در حاشیه رودخانه	۱۲	۳,۶	۰,۷۶
۹	پایدارسازی توده لغزشی و کنترل حرکات دامنه‌ای	لغزش‌های موضعی، کاهش پایداری حاشیه مسیل	۸	۲,۴	۰,۷۸
۱۰	کاهش خطر سنگ افتان	-	۰	۰,۰	-
۱۱	کاهش خطر فرونشست	-	۰	۰,۰	-
۱۲	کاهش خطر ماسه‌های روان	-	۰	۰,۰	-
۱۳	اجرا یا بازنگری طرح هادی	ضرورت بازبینی با تأکید بر سیلاب	۱۲	۳,۶	۰,۷۴
۱۴	انجام مطالعات سمت توسعه روستا	پیشنهاد تغییر کاربری یا جابه‌جایی برخی واحدها	۱۰	۳,۰	۰,۷۳

نتایج و بحث

این بخش به تحلیل و تفسیر یافته‌های پژوهش اختصاص دارد. هدف اصلی، قرار دادن نتایج حاصل از مطالعه موردی پیربازار در بستر الگوی ملی و تبیین شباهت‌ها و تفاوت‌های آن است. بدین منظور، ابتدا با مقایسه داده‌های استخراج‌شده از سطح کشور (جدول ۲) و منطقه مورد مطالعه (جدول ۳)، جایگاه محلی در چارچوب روندهای کلان شناسایی می‌شود. در ادامه، یافته‌های حاصل از مشاهدات میدانی و گزارش‌های مستند سیلاب اخیر بررسی شده و پیامدهای زیست‌محیطی، کالبدی و اجتماعی آن مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت با جمع‌بندی نتایج، دلالت‌های مدیریتی و راه کارهای پیشنهادی برای ارتقای پایداری فضاها تحت تأثیر سیلاب ارائه خواهد شد.

مقایسه‌ی جدول ۲ (کل کشور) و جدول ۳ (منطقه پیربازار) نشان می‌دهد که اگرچه الگوی کلی مقوله‌ها مشابه است، اما سهم نسبی برخی چالش‌ها در منطقه مورد مطالعه با میانگین کشوری تفاوت معناداری دارد. در سطح کشور، مهم‌ترین مقوله «ساماندهی رودخانه و مسیل» با سهم ۲۶,۰۵ درصد گزارش شده است، درحالی‌که در رودخانه پیربازار این مقدار به ۳۵,۲ درصد افزایش یافته است. این امر نشان‌دهنده‌ی آن است که در سیلاب اخیر، مسائلی نظیر عدم لایروبی، رسوب‌گذاری، وجود پسماندها و انسداد بستر به مراتب نقش پررنگ‌تری در تشدید خسارت‌ها داشته‌اند.

از سوی دیگر، مقوله «رعایت حد بستر و حریم» در سطح کشور ۸,۰۴ درصد بوده، اما در منطقه پیربازار ۱۸,۵ درصد به‌دست آمد که بیانگر گستردگی ساخت‌وسازهای غیرمجاز و تعدی به حریم رودخانه است. همچنین، درحالی‌که مقوله‌های مرتبط با «ایجاد / بهسازی زیرساخت‌ها» و «نوسازی ابنیه» در سطح کشور به‌ترتیب ۸,۴۳ و ۷,۰۸ درصد سهم داشته‌اند، در رودخانه پیربازار این ارقام کمتر (۷,۷ و ۳,۶ درصد) بوده‌اند که نشان‌دهنده‌ی ضعف نسبی در توجه به مقاوم‌سازی زیرساخت‌های محلی است.

همچنین، سهم مشکلات ناشی از «هدایت و جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب» در پیربازار (۱۱,۲ درصد) بیش از میانگین کشوری (۱۰,۱۷ درصد) است و این موضوع به‌ویژه در ارتباط با اختلاط آب‌های سطحی و فاضلاب شهری، ناکارآمدی شبکه‌های زهکشی و پس‌زدگی جریان‌ها در بروز سیلاب را آشکار می‌سازد.

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که گرچه در مقیاس ملی، سیلاب به‌عنوان فراگیرترین مخاطره روستایی شناخته می‌شود، در سطح محلی (پیربازار) شدت مشکلات ناشی از ساماندهی رودخانه‌ها، رعایت حریم و ناکارآمدی سیستم دفع آب‌های سطحی به‌طور معناداری بیشتر از میانگین کشوری بوده است.

نتایج و تفسیر یافته‌ها در منطقه پیربازار با تاکید بر مدیریت پایدار فضاهای سیلابی

در سیلاب منطقه پیربازار، مهم‌ترین پیامد، تجمع انبوه پسماندهای جامد به‌ویژه پلاستیک بود که توسط رواناب در رودخانه‌های گوهر رود، زرجوب و سپس پیربازار حمل شده و پس از کاهش سطح آب همچنان بر شاخه‌های گیاهان دو طرف رودخانه‌ها به‌دام افتاده و چشم‌اندازی نگران‌کننده از اثرات زیست‌محیطی سیلاب ایجاد کرد. ارتفاع این پسماندها نشان‌دهنده ارتفاع رواناب در زمان سیلاب بوده و در برخی نقاط به بیش از ۳ متر از کف بستر رسید. این وضعیت نشان می‌دهد که سیلاب‌های مشابه می‌توانند با حمل پسماندها، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست محلی و تالاب‌های پایین‌دست ایجاد کنند. در این خصوص، مدیریت پایدار فضاهای تحت تأثیر سیلاب مستلزم اقدامات هدفمند مانند جمع‌آوری و مدیریت پسماندهای رودخانه‌ای، حفظ حریم طبیعی و ایجاد سیستم‌های کنترل رواناب است تا از اثرات زیست‌محیطی و خطرات تهدیدکننده تالاب‌ها و اکوسیستم‌های پایین‌دست پیشگیری شود.



شکل ۷: امتداد رودخانه زرجوب در مسیر رشت به سمت منطقه پیربازار و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سیلاب. منبع: نگارنده

قابل‌بیان است که شهر رشت با سیستم جمع‌آوری و دفع فاضلاب و آب باران حدود ۴۰ ساله، آب‌های سطحی و فاضلاب را از طریق رودخانه‌های گوهر رود و زرجوب به رودخانه پیربازار هدایت می‌کند. تغییر کاربری و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، سبب افزایش تقریبی چهار برابری دبی رواناب شده است که در زمان بارندگی‌های شدید و همراه با حجم بالای رسوبات، ظرفیت عبور رودخانه‌ها را کاهش داده و موجب سرریز، آب‌گرفتگی زمین‌ها و واحدهای مسکونی در اراضی پایین‌دست و روستاهای مجاور و تهدید تالاب انزلی می‌شود. با توجه به این شرایط، مدیریت پایدار فضاهای تحت تأثیر سیلاب، مستلزم اجرای اقدامات پیشگیرانه و هدفمند است، از جمله:

- ساماندهی و بهسازی بستر رودخانه‌ها برای افزایش ظرفیت عبور دبی سیلاب،
- کنترل و مدیریت رسوبات به منظور کاهش انسداد مسیر جریان آب،
- توسعه و بهبود شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب،
- حفاظت از حریم رودخانه‌ها و جلوگیری از ساخت‌وسازهای غیرمجاز، تا از وقوع خسارت‌های شدید سیلاب و تهدید اکوسیستم‌های پایین‌دست، به‌ویژه تالاب انزلی، پیشگیری گردد.

همچنین، در این سیلاب در شهر پیربازار، سطح آب تا عرشه پل‌ها بالا آمده و در برخی نقاط از روی آن‌ها سرریز گردید. این وضعیت ناشی از عدم تناسب ارتفاع پل‌ها با دبی پیک سیلاب و تغییرات رژیم بارش است و نشان می‌دهد

احتمال تکرار وضعیت مشابه در آینده وجود دارد. بنابراین، به‌منظور مدیریت پایدار فضاها تحت تأثیر سیلاب، ضروری است اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند ساماندهی و بهسازی پل‌ها و بستر رودخانه، کنترل رسوبات و حفظ حریم طبیعی اجرا شود تا از خسارت‌های احتمالی و تهدید اکوسیستم‌های پایین‌دست، به‌ویژه تالاب انزلی، پیشگیری گردد.



شکل ۸: ارتفاع داغاب و پسماندهای به جا مانده بر روی عرشه پل. منبع: نگارنده

روستای محمدآباد نیز یکی از مناطق پایین‌دست رودخانه پیربازار است که در رخداد سیلاب اخیر با آب‌گرفتگی و خسارت قابل‌توجهی مواجه شد. ورودی این روستا که به هنگام احداث ریل راه‌آهن رشت به منطقه آزاد انزلی «کاسپین»، به‌صورت یک پل زیرگذر با ارتفاع ۲٫۵ متر طراحی شده بود، به‌دلیل برخورداری از کد ارتفاعی پایین‌تر نسبت به بستر رودخانه و زمین‌های اطراف، هنگام سیلاب دچار آب‌گرفتگی وسیع شد و راه دسترسی به روستا با مشکل مواجه گردید. ابعاد رودخانه پیربازار که از کنار روستا عبور می‌کند، به حدی است که امکان فعالیت قایق‌های ماهیگیری در آن وجود دارد؛ اما در این رخداد، رواناب ناشی از سیلاب تا نزدیک عرشه پل بالا آمده و پس از عبور از پل، از بستر رودخانه خارج شده و اراضی پایین‌دست و واحدهای مسکونی را دچار آب‌گرفتگی کرد (شکل ۱۱).



شکل ۹: ورودی روستای محمدآباد و داغاب به‌جامانده از سیلاب. منبع: نگارنده

در دو سمت رودخانه خاکریزی دستی، اقدامی حفاظتی سنتی توسط اهالی برای پیشگیری از سرریز آب و ورود رواناب‌های سیلاب انجام شده بود. با این حال، سیلاب از دیواره‌های خاکریزی عبور کرد و روستاهای پایین‌دست به سمت تالاب انزلی را تحت تأثیر قرار داد (شکل ۱۲).



شکل ۱۰: رودخانه پیربازار و خروج آب از بستر رودخانه و در امتداد روستای محمدآباد. منبع: نگارنده

قابل یادآوری است که تأثیر اقلیم بر معماری بومی منطقه، یکی از نکات قابل توجه در بازدید مناطق درگیر سیلاب بود. در این منطقه باتوجه به بالابودن آب‌های سطحی به دلیل نزدیکی به تالاب انزلی، امکان نفوذ رطوبت از سطح زمین به کف ساختمان وجود دارد. این مسئله باعث گردیده که به‌طور سنتی ارتفاع کف ساختمان بالاتر از سطح زمین اجرا شود که این ویژگی خود باعث ایجاد جریان هوا بین زمین و کف ساختمان و قطع امکان نفوذ رطوبت می‌شود. به این ترتیب، کف خانه‌ها گاهی بر روی پی‌ها و دستک‌های چوبی و یا کرسی‌چینی سنگی قرار گرفته است. در این رخداد مشاهده گردید که این دانش بومی به کاهش ارتفاع آب‌گرفتگی در واحدهای مسکونی منجر گردیده است. بنابراین، مدیریت پایدار فضاها تحت تأثیر سیلاب در این منطقه مستلزم اقدامات هدفمند ذیل است:

- ساماندهی و بهسازی بستر رودخانه‌ها برای افزایش ظرفیت عبور دبی سیلاب،
 - کنترل و مدیریت رسوبات به منظور کاهش انسداد مسیر جریان آب،
 - توسعه و بهبود شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب،
 - حفاظت از حریم رودخانه‌ها و جلوگیری از ساخت‌وسازهای غیرمجاز،
 - بهره‌گیری از دانش بومی و سازه‌های سنتی برای کاهش اثرات آب‌گرفتگی و ارتقای ایمنی واحدهای مسکونی.
- این اقدامات نه تنها می‌تواند از خسارت‌های سیلاب جلوگیری کند، بلکه پایداری اکوسیستم‌های پایین‌دست، به‌ویژه تالاب انزلی را تضمین می‌کند و ظرفیت پاسخگویی محلی به رخدادهای شدید هیدرولوژیکی را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

امروزه وقوع پدیده‌های حدی و تغییرات اقلیمی، در کنار گسترش فعالیت‌های انسانی و دخل‌وتصرف در عرصه‌های طبیعی مانند تسطیح زمین و تجاوز به حریم رودخانه‌ها و مسیل‌ها، باعث تغییر الگوی زهکشی طبیعی و افزایش خسارات ناشی از سیلاب گردیده است. به‌ویژه سکونتگاه‌های روستایی با خصوصیت‌های خاص نظیر موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌های محیطی و کالبدی - فضایی و سطح برخورداری آسیب‌پذیر هستند و بیشترین خسارت‌ها را در زمان رخداد مخاطره تجربه می‌کنند (Sadeghi et al., 2016). باید توجه داشت که خشکسالی‌های اخیر و نزدیک شدن ساخت‌وسازها به حریم رودخانه‌ها، خطرپذیری این مناطق را دوچندان کرده است. از این‌رو، تعیین مناطق سیل‌خیز در بازه رودخانه به‌عنوان مطالعات پایه در طرح‌های عمرانی و استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب با دوره‌های بازگشت متفاوت، از اولین قدم‌ها برای مدیریت ریسک سیلاب و ایمن‌سازی محسوب می‌شوند (Piroozfar et al., 2018) و توجه به برنامه‌ریزی پیشگیرانه و کاهش خطر، به‌ویژه با محدودیت منابع مالی و هزینه بالای بازسازی

پس از حوادث، ضرورت دارد. علاوه بر این که طبق برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح و در راستای ارتقای جایگاه ملاحظات کاهش خطر در طرح‌های توسعه‌ای، اجرای طرح‌های ساماندهی و ایمن‌سازی رودخانه‌ها و مسیل‌ها در محدوده‌های جمعیتی و آزادسازی تصرفات مزاحم در بستر و حرایم رودخانه‌ها و مسیل‌ها از جمله اقدامات اولویت‌دار در خصوص مخاطره سیلاب می‌باشد.

بررسی‌های میدانی سیلاب اخیر در شهرستان رشت و منطقه پیربازار نیز نشان داد که عدم رعایت حد بستر و حریم رودخانه، توسعه ساخت‌وساز در حواشی رودخانه و حجم بالای رسوبات، موجب افزایش شدت خسارت‌ها شد. نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در رودخانه‌های شمال ایران و تالاب انزلی همسو می‌باشد. به‌عنوان نمونه، مطالعات (Karbassi et al., 2015) و (Ahmadi et al., 2017) تأثیر فاضلاب و رسوبات بر کیفیت آب و یوتریفیکاسیون تالاب را نشان داده‌اند؛ اما داده‌های میدانی این مطالعه شامل ارتفاع و وسعت سیلاب، رسوبات و پسماندها و مشاهدات کیفی اثرات بر سکونتگاه‌ها و اکوسیستم‌ها، امکان تحلیل همزمان کمی و کیفی اثرات ترکیبی سیلاب و آلودگی را فراهم می‌آورد.

با توجه به وضعیت ساخت‌وساز به‌ویژه در استان‌های شمالی و افزایش شدت رگبارها، رعایت حد بستر و حریم رودخانه به‌عنوان اقدام اولویت‌دار جهت کاهش خطر سیلاب ضروری است. در سطح بین‌المللی، دوره بازگشت سیلاب‌ها در قانون‌گذاری‌ها متفاوت است. در بسیاری از کشورها، دوره بازگشت ۱۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود (Gunasekara, 2015). در حالی که در ایران، معیار حد بستر رودخانه، تجمیع جریان سیلاب ۲۵ ساله است (The Ministry of Power, 2005). به‌هرحال، با توجه به وضعیت ساخت‌وساز به‌ویژه در استان‌های شمالی و از جمله شهرستان رشت و از طرفی افزایش وقوع پدیده‌های حدی در اثر تغییر اقلیم و تغییر الگوی بارش‌ها و بروز بی‌نظمی در توزیع زمانی بارندگی‌ها و همچنین افزایش شدت رگبارهای منجر به وقوع سیلاب‌های غیرمنتظره و شدید در منطقه، رعایت حد بستر و حریم رودخانه به‌عنوان اقدام اولویت‌دار جهت کاهش خطر سیلاب ضروری است.

ضرورت ساماندهی رودخانه‌های منطقه شامل زرجوب، گوهر رود و پیربازار نیز با توجه به پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری، تغییرات راستا، تراز بستر و ویژگی‌های هندسی مسیری کاملاً مشهود است. شناخت رفتار ریخت‌شناسی رودخانه و اثر اقدامات مختلف ساماندهی، امکان تشخیص عوامل ناپایداری و اعمال معیارهای حفاظتی و مهندسی را فراهم می‌کند (Javanmard et al., 2014). عملیات لایروبی، دیواره‌سازی و آزادسازی مسیرها هرچند ضروری، باید با مطالعات دقیق محیط‌زیستی و مدل‌سازی مهندسی انجام شود تا اثرات جانبی بر زیست‌بوم و تغییرات مورفولوژیکی درازمدت کاهش یابد.

کاهش سطح مقطع هیدرولیکی رودخانه‌ها و افزایش دبی رواناب، منجر به آب‌گرفتگی مناطق پایین‌دست از جمله محدوده پیربازار و روستای محمدآباد شد که با ایجاد حوضچه‌های تأخیری در بالادست می‌توان زمان ورود رواناب به مسیر اصلی را به تأخیر انداخت و دبی پیک آب باران را کاهش داد. این یافته‌ها با مطالعه (Pourreza et al., 2019) درباره کنترل رواناب و کاهش خسارت سیلاب در حوضه‌های شمال ایران همسو است.

سیلاب اخیر همچنین موجب تغییر کیفیت منابع آب شد. رودخانه پیربازار و تالاب انزلی با یوتریفیکاسیون شدید مواجه شدند. آلاینده‌ها شامل فاضلاب خانگی و صنعتی، رسوبات، کودها و سموم کشاورزی، فراورده‌های نفتی و زباله‌های جامد بودند که با حمل به تالاب، تهدیدی جدی برای اکوسیستم ایجاد کردند. نتایج این پژوهش با

یافته‌های سابق در مورد آلودگی رودخانه‌ها و تالاب‌ها در شمال ایران مطابقت دارد (Shirazi et al., 2016; Abbaspour et al., 2013).

معماری بومی منطقه با ارتفاع مناسب کف ساختمان و کرسی چینی، نقش مؤثری در کاهش خسارت سیلاب داشت و نشان‌دهنده اهمیت تلفیق دانش بومی با اقدامات مهندسی در مدیریت پایدار فضاها تحت تأثیر سیلاب است.

در نهایت، برای مدیریت پایدار این حوضه آبی و کاهش خسارت‌های سیلاب، اقدامات زیر ضروری است:

- آزادسازی بستر رودخانه و رعایت حریم قانونی،
- ساماندهی و بهسازی بستر رودخانه‌ها، کنترل رسوبات و لایروبی اصولی،
- تکمیل و توسعه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه‌ها،
- ایجاد حوضچه‌های تأخیری و برنامه‌ریزی مهندسی رواناب،
- پایش کیفیت آب و حفاظت از اکوسیستم تالاب انزلی،
- استفاده از دانش بومی و مهندسی برای تعیین ارتفاع مناسب ساخت‌وساز و کرسی چینی،
- مطالعات حوضه‌ای، مدیریت یکپارچه منابع طبیعی و مشارکت ذی‌نفعان.

این اقدامات، در کنار هم، به ایجاد مدیریت سیستمی و یکپارچه سیلاب و ارتقای پایداری فضاها شهری و روستایی در حوضه پیربازار و تالاب انزلی منجر خواهد شد و درمجموع نگرش سیستمی و مشارکت تمامی ذی‌نفعان می‌تواند در مدیریت منابع طبیعی هر منطقه مؤثر باشد.

تقدیر و تشکر

مقاله یادشده از طرح «شناسایی، اولویت‌بندی و نحوه اقدام در روستاهای در معرض خطر سوانح طبیعی» استخراج گردیده است. بنابراین، از پژوهشکده سوانح طبیعی به جهت تمامی حمایت‌های مادی و معنوی سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

منابع

- احمدی، عبدالمجید. (۱۳۹۸). تحلیل و پهنه‌بندی مناطق در معرض خطر سیلاب در مناطق خشک با استفاده از تحلیل‌های مکانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز فرخی)، نشریه مطالعات جغرافیای مناطق خشک، دوره ۹، شماره ۳۶، صص ۳۲-۴.
- سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران. (۱۳۹۶). گزارش چارچوب و رویکردهای مناسب احیاء و ساماندهی رودخانه‌ها باتوجه به تجربیات جهانی و درنظرگرفتن ویژگی‌های محلی هر رودخانه (مفاهیم اولیه، قواعد اصلی و تبیین اهداف "طرح جامع احیاء و ساماندهی رودخانه‌ها و قنوات شهر تهران). شهرداری تهران.
- فلاحتی، فاطمه؛ گرکانی، سید امیرحسین. (۱۴۰۳). ضرورت ارتقای جایگاه ملاحظات کاهش خطر در طرح‌های توسعه‌ای سکونتگاه‌ها (مطالعه موردی: سیلاب کلان‌شهر مشهد)، چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، معماری، مصالح ساختمانی و محیط‌زیست. فنلاند، هلسینکی.
- رضایت، غلامحسین. (۱۳۹۱). جزوه آموزشی کارگاه آموزشی تحلیل محتوا با تأکید بر تحلیل محتوای مصاحبه‌های علمی، انجمن آموزش عالی ایران.
- عسکری‌زاده، سیدمحمد؛ محمدنیا قرائی، سهراب؛ ظهور، مجتبی. (۱۳۸۹). برنامه‌ریزی مدیریت بلایا و مخاطرات محیطی در راستای توسعه پایدار، مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام.

- محمدی، میرعلی؛ محمدی، فرناز؛ فاخری فرد، احمد؛ بیژن وند، سجاد. (۱۳۹۹): استخراج منحنی فرمان پهنه‌بندی ریسک سیلاب مطالعه موردی: رودخانه‌های باراندوزچای ارومیه، مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۷، شماره ۲۲، صص ۸۷-۱۰۸.
- نوروزی، اصغر. (۱۳۹۶). مبانی مدیریت بحران در نواحی روستایی. اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی. 0.22111/jneh.2025.48651.2043.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S. A., Srinivasan, R., & Haghighat, S. (2013). A comprehensive review of water quality modeling of rivers and lakes in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5657–5670. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2953-2>. [In Persian]
- Ahmadi, H., Keshavarzi, B., & Nabavi, S. M. B. (2017). Effects of wastewater discharge on the water quality and eutrophication of Anzali Wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2), 1523–1536. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7912-5>
- Borg, Walter R. and Meredith Damien Gall. (1989). *Educational Research: An Introduction*. Fifth Edition, New York & London, Longman.
- Buffington, J.M. (2012). Changes in channel morphology over human time scales [Chapter 32]. In: Church, Michael; Biron, Pascale M.; Roy, Andre G., eds. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*. Chichester, UK: Wiley, 435-463.
- Gunasekara, A. (2015). Floodplain management policies and legislation: International perspectives. *Journal of Flood Risk Management*, 8(4), 302–313. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12098>.
- Herold C, Mouton F. Global flood hazard mapping using statistical peak flow estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2011; 8 (1): 305–363.
- Javanmard, R., Khodaparast, H., & Ramezani, N. (2014). River morphology and sediment dynamics under human interventions: A case study in northern Iran. *Journal of Hydrology*, 514, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.048>
- Jigyasu, R. (2002). Reducing Disaster vulnerability through local knowledge and capacity: the Case of Earthquake-Prone Rural Communities in India and Nepal. Department of Town and Regional Planning, Trondheim.
- Karbassi, A., Monavari, S. M., Nouri, J., & Farzadkia, M. (2015). Impact of urban and agricultural runoff on Anzali Wetland water quality. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4811–4822. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4642-9>. [In Persian]
- Piroozfar, P., Zargar, M., & Sharifi, F. (2018). Flood hazard zoning and risk assessment in Iran: A review of methodologies and applications. *Natural Hazards*, 91(1), 123–146. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3091-4>. [In Persian]
- Pourreza, M., Mahmoudi, H., & Ebrahimi, S. (2019). Runoff management and flood mitigation in northern Iranian catchments. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(9), 04019030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001784)
- Rahmani, R. A., Mohammadi, M., and Danandeh Mehr, A. (2020). Climate change impacts on floodway and floodway fringe: a case study in Shahrchay River Basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 494, 1-13.
- Sadeghi, S., Hosseini, S. M., & Faramarzi, M. (2016). Vulnerability assessment of rural settlements to flash floods in northern Iran. *Natural Hazards*, 83(2), 1071–1088. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2371-0>. [In Persian]
- Shirazi, S., Keshavarzi, B., & Farid, A. (2016). Long-term water quality changes in rivers feeding Anzali Wetland, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4), 220. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5211-2>. [In Persian]
- The Ministry of Power. Iran Water Resource Management Company. *Flood Zoning Guide and Determining the Limit of River Landing and Area*. (2005). Issue No. 307. [In Persian]
- UNISDR. (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). (2016). *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*, Extract from the final report of the World Conference on Disaster Reduction.
- Yousefi, S., Moradi, H.R., Keesstra, S., Pourghasemi, H.R., Navratil, O., & Hooke, J. (2019). Effects of urbanization on river morphology of the Talar River, Mazandaran Province, Iran. *Geocarto International*, 34(3), 276-292.

Uncertainty Quantification in Extreme Flood Prediction: Geomorphic Analysis of Statistical Parameters in Arid Basins (Case Study: Qareh Aghaj River Basin)

Hamid Zeinli¹, Heeva Elmizadeh^{2*} 

1. MS. in Geomorphology, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
2. **Corresponding Author**, Associate Prof., Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources,
Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
Email: Elmizadeh@kmsu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-0603>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 28 May 2025 Revised: 01 August 2025 Accepted: 17 September 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Extreme floods, Uncertainty quantification, Arid basins, Geomorphic parameters, Qarah-Aghaj River.	The Qarah-Aghaj basin, as one of the most significant watersheds in Fars Province, has experienced numerous destructive flood events in recent decades, causing extensive damage to regional infrastructure. This study presents a comprehensive analysis of flood behavior in the Qarah-Aghaj basin through an integrated approach that evaluates four statistical distributions: Gumbel Type I, Generalized Extreme Value (GEV), Generalized Pareto (GPD), and log-normal. The distribution parameters were fitted using three distinct methods: Method of Moments (MOM), L-moments, and Maximum Likelihood Estimation (MLE). The goodness-of-fit was rigorously assessed through multiple criteria, including the Kolmogorov-Smirnov test, Akaike Information Criterion (AIC), and Root Mean Square Error (RMSE). Key findings demonstrate the superior performance of the GEV distribution in flood modeling for this basin. The GEV distribution showed optimal agreement with observational data, as evidenced by the lowest Kolmogorov-Smirnov statistic (0.058) and AIC value (234.5). Furthermore, it provided the most accurate predictions with an RMSE of 112.3 m³/s and a positive bias of 2.1%. These results indicate heavy-tailed behavior in the flood frequency distribution, primarily attributable to unique geomorphological characteristics, including steep slopes (mean 12.5%), high drainage density (1.8 km/km²), and extensive karst formations (covering approximately 60% of the basin area). The analysis underscores the necessity of employing advanced distributions like GEV for complex hydrological systems in arid basins such as Qarah-Aghaj, potentially reducing computational errors by up to 20%. The study conclusively establishes that a single distribution cannot be universally applied across all arid basins, emphasizing the critical importance of considering basin-specific characteristics in flood frequency analysis. These findings provide a scientific basis for updating flood management standards in similar regions, with significant implications.
How to Cite: Zeinli, H. and Elmizadeh, H. (2026). Uncertainty Quantification in Extreme Flood Prediction: Geomorphic Analysis of Statistical Parameters in Arid Basins (Case Study: Qareh Aghaj River Basin). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 97-118.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.52184.2117	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The primary challenge in flood management of arid basins lies in the substantial uncertainty surrounding peak discharge predictions. The Qarah-Aghaj basin, as one of the most significant watersheds in Fars Province, has experienced numerous destructive flood events in recent decades, causing extensive damage to regional infrastructure. Field observations at the Tang Karzin station reveal that recorded floods, particularly the extreme 1986 event with a discharge of 6,409 m³/s, significantly exceeded values predicted by conventional distribution models. This study provides a comprehensive analysis of flood behavior in the Qarah-Aghaj basin, where recent catastrophic events have exposed critical limitations in traditional frequency analysis methods. By integrating advanced statistical approaches with detailed physical basin characterization, this research addresses existing knowledge gaps through systematic evaluation of GEV, Pareto, log-normal, and Gumbel distributions, while offering operational solutions for regional flood management based on statistical findings.

DATA AND METHODOLOGY

The Qarah-Aghaj watershed, located in the central portion of the Mond basin in Fars Province, was selected for this investigation. Four statistical distributions were employed for extreme flood frequency analysis: Gumbel Type I (Eq. 1), Generalized Extreme Value (GEV) (Eq. 2), Generalized Pareto (GPD) (Eq. 3), and log-normal (Eq. 4). Parameter estimation was performed using three distinct methods: Method of Moments (MOM), L-moments, and Maximum Likelihood Estimation (MLE), optimized through the log-likelihood function $\log-L(\theta) = \sum \log f(x_i|\theta)$. Specific parameter calculations included:

- (1) $F(x) = \exp[-\exp(-(x-\mu)/\sigma)]$
- (2) $F(x) = \exp\{-[1 + \xi((x-\mu)/\sigma)]^{-1/\xi}\}$
- (3) $F(x) = 1 - [1 + \xi(x-\mu)/\sigma]^{-1/\xi}$
- (4) $F(x) = \Phi[(\ln(x)-\mu)/\sigma]$
- (5) $L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta)$

Where x represents flood discharge random variable and θ denotes the parameter vector (location μ , scale σ , and shape ξ). Distribution fitting quality was assessed through multiple criteria including Kolmogorov-Smirnov test ($\alpha=0.05$), Akaike Information Criterion (AIC), and Root Mean Square Error (RMSE).

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of 55-year instantaneous peak discharge records revealed significant flow variability within the basin. Comparative evaluation of GEV parameter estimation methods showed 5.3% variation in μ and 10.7% difference in critical ξ parameter estimates. For the 1000-year return period flood, substantial discrepancies emerged among distributions (Table 1):

Table 1: Predicted discharges (m³/s) for the T=1000-year flood in Qarah-Aghaj basin

Distribution	Discharge	Deviation from GEV
GEV	11,098	-
Gumbel	8,750	21.2% lower
Pareto	12,450	12.1% higher
Log-normal	10,530	5.1% lower

The GEV distribution demonstrated superior performance with optimal goodness-of-fit (KS=0.058, AIC=234.5) and highest predictive accuracy (RMSE=112.3 m³/s, positive bias=2.1%). In contrast, the Gumbel distribution showed systematic underestimation (negative bias=12.4%, RMSE=185.6 m³/s),

while the Pareto distribution exhibited overestimation tendencies (positive bias=5.8%). These results unequivocally demonstrate that the GEV distribution's incorporation of the shape parameter (ξ) enables superior modeling of heavy-tailed flood behavior in complex arid basins like Qarah-Aghaj, potentially reducing computational errors by up to 20%.

CONCLUSION

This study establishes that the Generalized Extreme Value distribution with positive shape parameter ($\xi=0.18$, $p<0.01$) provides optimal flood frequency analysis for the Qarah-Aghaj basin. The heavy-tailed behavior primarily stems from unique geomorphological characteristics, including steep slopes (mean=12.5%), high drainage density (1.8 km/km²), and extensive karst formations ($\approx 60\%$ basin area). Comparative analysis revealed that traditional Gumbel distribution may underestimate 1000-year flood risks by up to 40%, emphasizing the necessity of basin-specific approaches that account for:

- * Distinct geomorphological features
- * Nonlinear hydrological system behavior
- * Combined climate change and anthropogenic impacts

These findings provide a scientific basis for updating flood management standards in similar arid regions, with particular implications for critical water infrastructure design and risk mitigation strategies. The methodological framework developed through this research significantly advances predictive accuracy in extreme flood estimation for water resource management applications in water-scarce regions.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

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

REFERENCES

References [in Persian]

Jabbari, I., Ghobadian, R., & Jadidi, A. (2023). Impact of April 2019 Flood on Morphology of the Confluence Zone of Dinavar and Gamasiab Rivers Using SRH-2D. *Numerical Model. Geography and Development*, 21(70), 1-26. doi: 10.22111/gdij.2023.7401. [In Persian]

Zeinli, H. (2023). Geomorphological Analysis of Flood Effects in Tang Karzin Basin (Master's thesis in Hydrogeomorphology). *Khorramshahr University of Marine Science and Technology*, 1-107. [In Persian]

References [in English]

Bashirgonbad, M., Moghaddam Nia, A., Khalighi-Sigaroodi, S. (2024). A hydro-climatic approach for extreme flood estimation in mountainous catchments. *Applied Water Science*, 14, 98. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02149-8>

Cui, L., Hu, G., Zhu, Y. (2025). Multi-strategy improved snow ablation optimizer: a case study of optimization of kernel extreme learning machine for flood prediction. *Artificial Intelligence Review*, 58, 181. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11192-z>

Das, P., Posch, A., Barber, N. (2024). Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 282. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00834-8>

Ghobadi, M., Ahmadipari, M. (2024). Enhancing Flood Susceptibility Modeling: a Hybrid Deep Neural Network with Statistical Learning Algorithms for Predicting Flood Prone Areas. *Water Resources Management*, 38, 2687-2710. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03770-7>

Huang, J., Hong, Y., Sun, D. (2025). Urban flood depth prediction using an improved LSTM model incorporating precipitation forecasting. *Natural Hazards*, 121, 8305-8326. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07065-3>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

کمی سازی عدم قطعیت در پیش بینی سیلاب های حدی: تحلیل ژئومورفیک پارامترهای آماری در حوضه های خشک (مطالعه موردی حوضه رودخانه قره آغاج)

حمید زینلی^۱، هیوا علمیزاده^{۲*} 

۱. کارشناس ارشد گروه زمین شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران

۲. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Elmizadeh@kmsu.ac.ir / <https://orcid.org/0000-0002-5096-0603> / ORCID:

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه های کلیدی: سیلاب های حدی، عدم قطعیت، حوضه های خشک، پارامترهای ژئومورفیک، رودخانه قره آغاج.	حوضه قره آغاج به عنوان یکی از مهم ترین حوضه های آبریز استان فارس، طی دهه های اخیر شاهد وقوع سیلاب های مخرب متعددی بوده که خسارت های گسترده ای به زیرساخت های منطقه وارد کرده است. این مطالعه با هدف ارائه تحلیلی جامع از رفتار سیلابی حوضه قره آغاج انجام شده است. این پژوهش با به کارگیری رویکردی ترکیبی، چهار توزیع آماری گامبل نوع ۱، توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV)، توزیع پارتو تعمیم یافته (GPD) و لوگ نرمال را مورد بررسی قرار داده است. پارامترهای توزیع ها با سه روش گشتاورها (MOM)، گشتاورهای خطی (L-moments) و حداکثر درست نمایی (MLE) برازش داده شدند. ارزیابی کیفیت برازش با معیارهای مختلفی شامل آزمون کولموگروف - اسمیرنوف، معیار اطلاعات آکائیکه (AIC) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام گرفت. یافته های کلیدی نشان دهنده برتری واضح توزیع GEV در مدل سازی سیلاب های این حوضه است. توزیع GEV با کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (۰/۰۵۸) و پایین ترین معیار اطلاعات آکائیکه (۲۳۴/۵)، بهترین برازش را با داده های مشاهداتی نشان می دهد. همچنین، این توزیع با خطای RMSE برابر ۱۱۲/۳ مترمکعب بر ثانیه و اریبی مثبت ۲/۱ درصد، دقیق ترین پیش بینی ها را ارائه کرده است. این نتیجه حاکی از وجود رفتار دم سنگین در توزیع فراوانی سیلاب های حوضه مورد مطالعه است که بیشتر ناشی از ویژگی های منحصربه فرد ژئومورفولوژیک از جمله شیب تند (میانگین ۱۲/۵ درصد)، تراکم بالای زهکشی (۱/۸ km/km²) و وجود سازندهای کارستی (حدود ۶۰ درصد مساحت حوضه) می باشد. این تحلیل ها تأکید می کنند که در حوضه های خشک با ویژگی های هیدرولوژیک پیچیده مانند قره آغاج، استفاده از توزیع های پیشرفته مانند GEV ضروری است و می تواند از خطاهای محاسباتی تا ۲۰ درصد جلوگیری کند. این یافته ها نشان می دهد که نمی توان از یک توزیع ثابت برای تمام حوضه های خشک استفاده کرد و باید ویژگی های خاص هر حوضه را در نظر گرفت. یافته های این مطالعه می تواند مبنای علمی برای به روز رسانی استانداردهای مدیریت سیلاب در مناطق مشابه قرار گیرد.

استناد: زینلی، حمید و علمیزاده، هیوا. (۱۴۰۵). کمی سازی عدم قطعیت در پیش بینی سیلاب های حدی: تحلیل ژئومورفیک پارامترهای آماری

در حوضه های خشک (مطالعه موردی حوضه رودخانه قره آغاج). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۹۷-۱۱۸.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52184.2117



مقدمه

سیلاب‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارت‌های جانی و مالی قابل‌توجهی در سراسر جهان ایجاد می‌کنند (داس^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ گاردینی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند حوضه‌های آبریز جنوب ایران، این پدیده از الگوهای پیچیده‌ای تبعیت می‌کند که ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدروکلیماتولوژیک و ژئومورفولوژیک این مناطق است. تغییرات اقلیمی اخیر و افزایش فراوانی رویدادهای حدی بارشی، اهمیت مطالعه علمی سیلاب‌ها را دوچندان کرده است (غانم و همکاران، ۲۰۲۴؛ قبادی و همکاران، ۲۰۲۴).

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تحلیل فراوانی سیلاب‌ها در مناطق خشک همچنان با چالش‌های جدی مواجه است (هساکی^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). در حوضه قره‌آغاج، اختلاف فاحشی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های کلاسیک و سیلاب‌های مشاهده‌شده وجود دارد. به‌عنوان مثال، سیلاب کاتاستروفیسیم سال ۱۳۶۵ با دبی ۶۴۰۹ مترمکعب بر ثانیه، حدود ۴۰٪ بزرگ‌تر از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط توزیع گامبل برای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله بود (زینلی، ۱۴۰۲). این ناهمخوانی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد: (۱) ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاص حوضه از جمله شیب تند و وجود سازندهای کارستی، (۲) تغییر الگوی بارش‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و (۳) عدم کفایت دوره آماری موجود (نمنیم^۴ و همکاران، ۲۰۲۵؛ هوانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۵؛ پوار^۶ و همکاران، ۲۰۲۵). این عدم قطعیت‌ها منجر به طراحی نادرست سازه‌های هیدرولیکی و برنامه‌ریزی نامناسب مدیریت سیلاب در منطقه شده است. بنابراین، این مطالعه به‌دنبال پاسخ به این سؤالات کلیدی است: الف) کدام توزیع آماری بهترین برازش را با داده‌های سیلاب حوضه دارد؟ ب) پارامترهای فیزیکی حوضه چگونه بر نتایج تحلیل فراوانی تأثیر می‌گذارند؟ ج) چگونه می‌توان عدم قطعیت‌های موجود را کاهش داد؟

چالش اصلی در مدیریت سیلاب حوضه‌های خشک، عدم قطعیت قابل‌توجه در پیش‌بینی دبی‌های اوج است (الرواس^۷ و همکاران، ۲۰۲۵؛ اوکونوفا^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). حوضه قره‌آغاج در جنوب غربی ایران با مساحت ۵۸۰۰ کیلومتر مربع، نمونه بارزی از این چالش‌ها محسوب می‌شود. طی چهار دهه اخیر، این حوضه شاهد ۱۷ مورد سیلاب بزرگ با خسارت‌های مالی بیش از ۵۰۰ میلیارد تومان بوده است (سازمان آب منطقه‌ای فارس، ۱۴۰۱). در حوضه قره‌آغاج، این مسئله به وضوح در اختلاف فاحش بین مقادیر طراحی و سیلاب‌های مشاهده‌شده مشهود است. به‌عنوان مثال، سیلاب سال ۱۳۶۵ با دوره بازگشت ظاهری ۵۰ سال، منجر به تخریب پل تنگ کارزین شد که بر اساس استانداردهای فعلی برای سیلاب ۱۰۰ ساله طراحی شده بود (زینلی، ۱۴۰۲). این شکست سازه‌ای نشان‌دهنده کاستی‌های جدی در روش‌های فعلی تحلیل فراوانی است.

مطالعات متعددی به تحلیل فراوانی سیلاب در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. پیشینه پژوهش‌های در حوزه پیش‌بینی و مدیریت سیلاب نشان می‌دهد محققان از روش‌های متنوعی برای مطالعه این پدیده استفاده کرده‌اند. مطالعاتی مانند پژوهش اسلامی و همکاران (۱۴۰۱) با مدل NAM در حوضه‌های غرب کشور و پژوهش شیخ کاظمی

¹ Das² Gardini³ Hossaki⁴ Nemnem⁵ Huang⁶ Pawar⁷ Al-Rawas⁸ Okonofua

و همکاران (۱۳۹۹) با شبکه بیزین، کارایی مدل‌های عددی را در پیش‌بینی سیلاب تأیید کرده‌اند. در حوزه پهنه‌بندی خطر سیل، سعیدی مفرد و همکاران (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از عملگرهای فازی در تربت‌حیدریه و جباری و همکاران (۱۴۰۲) در رودخانه گاماسیاب مناطق پرخطر مستعد سیل را شناسایی کردند و اهمیت فن‌های مکانی را نشان داده‌اند. پژوهش احمدی و نبی‌زاده (۱۴۰۲) با مدل LSTM و پژوهش اسلامی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۰) با هوش مصنوعی، قابلیت روش‌های یادگیری ماشین را در پیش‌بینی سیلاب در گلستان اثبات کرده‌اند. پناهی و همکاران (۱۴۰۲) و ایرانی و همکاران (۱۴۰۴) به سنجش پتانسیل وقوع سیل تحت شرایط تغییر اقلیم پرداختند که نتایج آن افزایش خطر سیلاب در سال‌های آینده را پیش‌بینی می‌کند. این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های عددی و پارامترهای آماری در کنار روش‌های کلاسیک می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را به‌طور قابل-توجهی افزایش دهد (کاکاوند و همکاران، ۱۴۰۳؛ حنیفی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های کلاسیک با فناوری‌های نوین و مدل‌های فیزیکی می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. جیو^۱ و همکاران (۲۰۲۵) با ادغام مدل هیدرولیکی دوبعدی و معماری LSTM انباشته، موفق به کاهش ۴۰ درصدی خطای پیش‌بینی در رودخانه‌های متناوب شدند. این یافته‌ها توسط فوردور^۲ و همکاران (۲۰۲۵) تأیید شده است که با استفاده از یادگیری انتقالی و زمان‌بندی نرم نرخ یادگیری، دقت مدل‌های LSTM را در حوضه‌های با داده‌های محدود بهبود بخشیدند. از سوی دیگر، ژو و ماریسانی^۳ (۲۰۲۵) با معرفی شبکه‌های کولموگورف - آرنولد، چارچوب جدیدی برای پیش‌بینی سیلاب در شرایط کم‌داده ارائه کردند. در حوزه تحلیل پارامترهای ژئومورفیک، بشیرگنبد^۴ و همکاران (۲۰۲۴) و هان^۵ و همکاران (۲۰۲۵) به‌طور مستقل نشان دادند که ویژگی‌های مورفولوژیکی حوضه تأثیر معناداری بر دقت پیش‌بینی سیلاب‌های حدی دارند. این نتایج با یافته‌های الجیدی^۶ (۲۰۲۳) که تأثیر متقابل شیب توپوگرافی با سایر عوامل محیطی را بررسی کرده بود، همسو است. مطالعات ساندریال^۷ و همکاران (۲۰۲۳) در هیمالیا نیز بر اهمیت در نظر گرفتن تأثیر سیلاب‌های حدی بر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها تأکید دارد. نتایج نشان داد که رویدادهای حدی می‌توانند موجب تغییرات مورفولوژیکی شدید در بازه‌های کوتاه شوند. این یافته‌ها برای درک اثرات سیلاب در حوضه‌های کوهستانی خشک حائز اهمیت است. در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت، کریتیدو^۸ و همکاران (۲۰۲۵) و توتارو^۹ و همکاران (۲۰۲۴) روش‌های نوینی برای تحلیل حساسیت و مدل‌سازی عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از توزیع‌های آماری پیشرفته و روش‌های ترکیبی می‌تواند عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی را به‌طور سیستماتیک کاهش دهد. از این میان، مطالعه نیرینگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۴) با ترکیب مدل‌های فیزیکی و آماری، چارچوب جامعی برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های فاقد داده ارائه کرده است.

¹ Guo

² Fordjour

³ Zhao and Marsani

⁴ Bashirgonbad

⁵ Han

⁶ Al-Juaidi

⁷ Sundriyal

⁸ Kritidou

⁹ Totaro

¹⁰ Nearing

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، مرور سیستماتیک اکینسوجی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که شکاف‌های تحقیقاتی اصلی مانند کمبود مدل‌های اختصاصی برای حوضه‌های خشک، نیاز به روش‌های کارآمد برای ترکیب داده‌های سنتی و غیرسنتی و عدم توجه کافی به تأثیر همزمان تغییرات اقلیمی و کاربری ارضی باقی مانده است. حوضه قره‌آغاج به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز استان فارس، طی دهه‌های اخیر شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب متعددی بوده که خسارت‌های گسترده‌ای به زیرساخت‌های منطقه وارد کرده است. شواهد میدانی در حوضه قره‌آغاج نشان می‌دهد که سیلاب‌های ثبت‌شده در ایستگاه تنگ کارزین، به‌ویژه رویداد حدی سال ۱۳۶۵ با دبی ۶۴۰۹ مترمکعب بر ثانیه، به وضوح از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های سنتی فراتر رفته‌اند. این ناهمخوانی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد که در مطالعات پیشین به آن‌ها پرداخته نشده است. مطالعات پیشین در این حوضه بیشتر بر پایه توزیع‌های سنتی مانند گامبل انجام شده‌اند، درحالی‌که شواهد میدانی نشان می‌دهد این روش‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق سیلاب‌های حدی نیستند. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف دانشی، به ارزیابی جامع توزیع‌های مختلف مقادیر حدی در تحلیل فراوانی سیلاب‌های این حوضه می‌پردازد. همچنین با ارائه راهکارهای عملیاتی مبتنی بر یافته‌های آماری، به نیازهای اجرایی و مدیریت سیلاب منطقه پاسخ می‌دهد. سیلاب‌های مخرب این حوضه در دهه‌های اخیر خسارت‌های قابل‌توجهی به زیرساخت‌های منطقه وارد کرده‌اند که نشان‌دهنده کاستی‌های موجود در روش‌های سنتی تحلیل فراوانی است.

این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های تحلیل فراوانی و تلفیق آن با دانش هیدروژئومورفولوژی، گامی اساسی در جهت بهبود دقت پیش‌بینی سیلاب‌های منطقه برمی‌دارد. نوآوری این پژوهش در دو محور کلیدی تعریف می‌شود: نخست: ارائه چارچوبی جامع برای تحلیل و کمی‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب‌های حدی با استفاده هم‌زمان از روش‌های آماری کلاسیک، تحلیل حساسیت و روش بوت‌استرپ؛ دوم: استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک در تحلیل رفتار حدی در یک حوضه خشک با ویژگی‌های خاص مانند قره‌آغاج. چنین چارچوبی، هم در سطح منطقه‌ای و هم در مقیاس مدل‌سازی، در ادبیات پیشین کمیاب است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای بازنگری در استانداردهای طراحی سازه‌های آبی و تدوین برنامه‌های مدیریت سیلاب در منطقه قرار گیرد و به‌عنوان الگویی برای سایر حوضه‌های خشک با شرایط مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

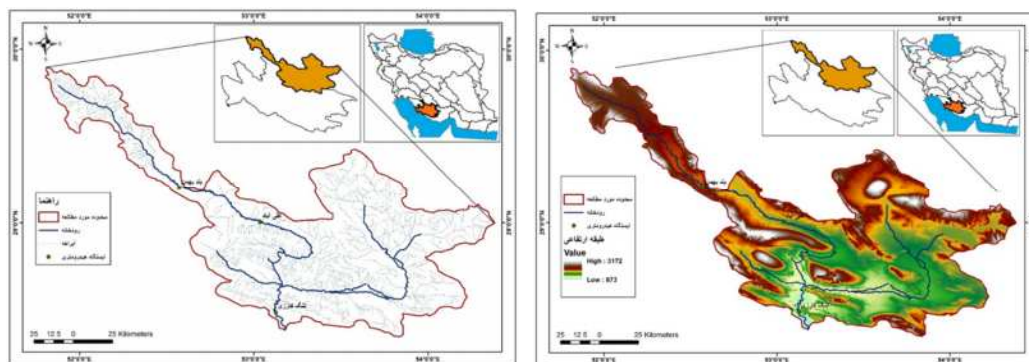
داده‌ها و روش‌ها

حوضه آبریز قره‌آغاج در بخش میانی حوضه آبریز مند در جنوب ایران و استان فارس قرار گرفته است. این محدوده نمونه‌ای از حوضه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک با رژیم جریان بسیار متغیر است که از نظر توپوگرافی دارای تنوع قابل‌توجهی بوده و از نواحی دشتی در جنوب تا ارتفاعات در شمال گسترده شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، متوسط ارتفاع نواحی دشتی ۹۰۸ متر از سطح دریا و متوسط ارتفاع نواحی مرتفع ۱۱۷۷ متر محاسبه شده است. این اختلاف ارتفاع نزدیک به ۲۷۰ متری، تأثیر مستقیمی بر توزیع مکانی بارش‌ها و الگوی رواناب در منطقه دارد. بر مبنای طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک است. سیستم‌های جوی مؤثر بر منطقه در فصل سرد سال شامل توده‌های هوای سودانی و مدیترانه‌ای (هر دو به صورت مستقیم و غیرمستقیم)

¹ Akinsoji

می‌باشد. تحلیل داده‌های بارندگی نشان می‌دهد که میانگین بارندگی سالانه $361/2$ میلی‌متر است که این مقدار در نواحی دشتی به $335/5$ میلی‌متر و در ارتفاعات به $373/5$ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

رژیم بارندگی منطقه از الگوی فصلی مشخصی پیروی می‌کند. دی ماه با میانگین $100/3$ میلی‌متر پرباران‌ترین ماه سال بوده، درحالی‌که خرداد ماه با تنها $0/5$ میلی‌متر بارندگی، کم‌باران‌ترین ماه محسوب می‌شود. از دیدگاه فصلی، زمستان با $234/9$ میلی‌متر (65 درصد بارش سالانه) فصل پرباران منطقه است و پس از آن به ترتیب پاییز با $98/1$ میلی‌متر، بهار با $20/8$ میلی‌متر و تابستان با $7/4$ میلی‌متر قرار دارند. ماه‌های آذر تا اسفند به‌عنوان ماه‌های مرطوب (با بارش ماهانه بیش از 60 میلی‌متر) و ماه‌های فروردین تا آبان به عنوان ماه‌های خشک (با بارش ماهانه کمتر از 20 میلی‌متر) شناسایی شده‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از سازمان آب و برق استان فارس دریافت گردید که شامل سری زمانی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای سالانه می‌باشد. این پژوهش با استفاده از داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه هیدرومتری تنگ‌کارزین (ارتفاع 740 متر از سطح دریا) در حوضه آبریز قره‌آغاچ انجام شده است. این ایستگاه داده‌های هیدرومتری و دبی حداکثر لحظه‌ای سالانه را برای دوره 55 ساله ($1345-1400$) ارائه می‌دهد. این مجموعه داده شامل مقادیر حدی از $35/5$ تا 6409 مترمکعب بر ثانیه بوده که رویداد سیلاب کاتاستروفیک 1365 (6409 مترمکعب بر ثانیه) نیز در آن ثبت شده است. داده‌های دبی حداکثر سالانه از ایستگاه تنگ‌کارزین، پس از جمع‌آوری، مورد بررسی کیفیت قرار گرفت. ابتدا مقادیر پرت با روش IQR شناسایی و پالایش شد. سپس با بررسی پیوستگی و مقایسه با داده‌های کمکی، صحت و استمرار سری زمانی در دوره 55 ساله تأیید گردید. داده‌ها از لحاظ همگنی نیز با استفاده از آزمون وان‌نیومن بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده عدم گسست ساختاری در سری زمانی بود. داده‌های دبی با کنترل کیفیت مبتنی بر آزمون‌های آماری و تطابق با شواهد میدانی (مانند داغاب‌های سیلابی) تأیید شدند. داده‌های پرت (مانند سیلاب $6409 \text{ m}^3/\text{s}$) با روش‌های روبااست (L-moments) تحلیل شدند. بر اساس تحلیل‌های هیدرولوژیکی انجام شده، آبدی متوسط سالانه محدوده قره‌آغاچ $18/939$ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. مقدار آبدی ورودی به محدوده (معادل آبدی خروجی محدوده‌های مبارک آباد و حکان) $17/015$ مترمکعب بر ثانیه و آبدی خالص تولید شده در محدوده $1/928$ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است. ضریب رواناب منطقه که از نسبت دبی سیلابی به حجم بارش به‌دست آمده، معادل $3/64$ درصد است که نشان‌دهنده درصد نسبتاً پایین تبدیل بارش به رواناب در این حوضه می‌باشد. ویژگی‌های اصلی این حوضه شامل اقلیم خشک و نیمه‌خشک، تغییرپذیری بالای جریان و وقوع سیلاب‌های مخرب از جمله رویداد حدی 6409 مترمکعب بر ثانیه در سال $65-66$ می‌باشد.

برای تحلیل فراوانی سیلاب‌های حدی، چهار توزیع آماری گامبل نوع ۱ (رابطه ۱)، توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته GEV (رابطه ۲)، توزیع پارتو تعمیم‌یافته (GPD) (رابطه ۳) و لوگ‌نرمال (رابطه ۴) مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای توزیع‌های مورد بررسی با سه روش گشتاورها (MOM)، گشتاورهای خطی (L-moments) و حداکثر درست‌نمایی (MLE) برازش داده شدند. پارامترها با بهینه‌سازی تابع درست‌نمایی $\log-L(\theta) = \sum \log f(x_i|\theta)$ برآورد شدند. همچنین، پارامترهای توزیع‌ها با استفاده از گشتاورهای نمونه (میانگین، واریانس، چولگی) و پارامترهای توزیع گامبل به صورت $\mu = \bar{x} - 0.45\sigma$ و $\sigma = \sqrt{6} s/\pi$ محاسبه گردید و تابع درست‌نمایی برای GEV از (رابطه ۵) استفاده گردید (گاندیری^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ لمپری^۲ و همکاران، ۲۰۲۴).

$$F(x) = \exp[-\exp(-(x-\mu)/\sigma)] \quad (۱)$$

$$F(x) = \exp\{-[1 + \zeta((x-\mu)/\sigma)]^{-1/\zeta}\} \quad (۲)$$

$$F(x) = 1 - [1 + \zeta(x-\mu)/\sigma]^{-1/\zeta} \quad (۳)$$

$$F(x) = \Phi[(\ln(x)-\mu)/\sigma] \quad (۴)$$

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (۵)$$

در این رابطه‌ها:

پارامتر مکان (μ) که معادل با میانگین توزیع است، نشان‌دهنده مرکزیت داده‌ها می‌باشد. پارامتر مقیاس (σ) که همواره بزرگ‌تر از صفر است، معادل با انحراف معیار توزیع بوده و بیانگر پراکندگی داده‌هاست. متغیر تصادفی (x) نشان‌دهنده دبی سیلاب می‌باشد.

پارامتر شکل ζ که مشخص‌کننده نوع توزیع حدی است، می‌تواند سه حالت مختلف داشته باشد: هنگامی که ζ بزرگ‌تر از صفر باشد، توزیع از نوع فریسه^۳ با دم سنگین است. اگر ζ برابر صفر باشد، توزیع از نوع گامبل خواهد بود. در حالتی که ζ کوچک‌تر از صفر باشد، توزیع از نوع وایبال^۴ با دم کوتاه می‌باشد.

در این تحلیل‌ها، x به‌عنوان متغیر تصادفی نشان‌دهنده دبی سیلاب و θ بردار پارامترهای توزیع شامل پارامتر مکان (μ)، پارامتر مقیاس (σ) و پارامتر شکل (ζ) در نظر گرفته شد. تابع چگالی احتمال با نماد $f(x_i|\theta)$ نمایش داده می‌شود که در آن θ بردار پارامترهای توزیع شامل (μ , σ , ζ) می‌باشد. در تحلیل‌های نمونه‌ای، میانگین نمونه با نماد $(\bar{x})$ و انحراف معیار نمونه با نماد (s) نشان داده می‌شوند. این پارامترها در تخمین و برازش توزیع‌های آماری برای تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مطالعات مربوط به سیلاب‌های حدی، کاربرد اساسی دارند.

ارزیابی کیفیت برازش توزیع‌های آماری با استفاده از معیارهای مختلفی انجام شد. آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (KS) با سطح معناداری ۰/۰۵ به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی سنجش برازش توزیع‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از معیار (AIC) برای مقایسه مدل‌ها و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها استفاده شد. تحلیل عدم قطعیت با روش بوت‌استرپ و با ۱۰۰۰ تکرار انجام گردید که شامل محاسبه بازه‌های اطمینان ۹۵ درصد و ترسیم دیاگرام برداری برای کمی‌سازی عدم قطعیت بود. مقدار فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای

¹ Gandhre

² Lymperi

³ Fréchet

⁴ Weibull

دبی ۱۰۰۰ ساله به‌صورت (۱۲۱۱۶-۱۰۰۸۰) مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است که دامنه‌ای معادل $2036 \text{ m}^3/\text{s}$ دارد. این دامنه نشان‌دهنده سطح عدم قطعیت بالاست که در طراحی سازه‌های حساس باید لحاظ گردد. به‌ویژه، پارامتر شکل (ξ) به‌دلیل حساسیت بالا، بیشترین سهم را در این عدم قطعیت دارد. این موضوع با ضریب تغییرات $34/7\%$ درصد برای ξ و تغییر احتمالی ۱۵ درصد در دبی‌های بلندمدت قابل توضیح است. برای تعیین خطر سیلاب‌های با شدت مختلف، دوره‌های بازگشت از ۲ تا ۱۰۰۰ سال برای هر یک از توزیع‌های مورد بررسی محاسبه شد. این محاسبات بر اساس (رابطه ۶) انجام گرفت که در آن $F(x)$ تابع توزیع تجمعی و T_r دوره بازگشت مورد نظر است.

$$T_r = 1/(1-F(x)) \quad (۶)$$

تحلیل‌های آماری این پژوهش در محیط‌های نرم‌افزاری مختلفی انجام شد. از نرم‌افزار R با بسته تخصصی extRemes برای برازش توزیع‌های حدی، HEC-SSP و MATLAB برای تحلیل‌ها و محاسبات هیدرولوژیکی استفاده گردید. در این تحلیل‌ها، x به‌عنوان متغیر تصادفی نشان‌دهنده دبی سیلاب و θ بردار پارامترهای توزیع شامل پارامتر مکان (μ)، پارامتر مقیاس (σ) و پارامتر شکل (ξ) در نظر گرفته شد. تمامی محاسبات با در نظر گرفتن دقیق شرایط مرزی و محدودیت‌های خاص هر توزیع آماری انجام پذیرفت. برای توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) از رابطه کامل تابع درست‌نمایی که تمام پارامترهای توزیع را در بر می‌گیرد، استفاده شد. این روش‌شناسی جامع و چندبعدی، امکان مقایسه سیستماتیک بین توزیع‌های مختلف آماری و در نهایت انتخاب مناسب‌ترین توزیع برای تحلیل سیلاب‌های حدی در منطقه مورد مطالعه را به‌صورت علمی و دقیق فراهم نمود. رویکرد به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، ترکیبی از روش‌های کلاسیک و نوین آماری را شامل می‌شود که می‌تواند به‌عنوان چارچوبی معتبر برای مطالعات مشابه در دیگر مناطق نیز مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌های پژوهش

بررسی سری زمانی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در دوره ۵۵ ساله، نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل‌توجه جریان در حوضه قره‌آغاج است. دبی‌های ثبت‌شده در محدوده $35/5$ تا 6409 مترمکعب بر ثانیه قرار دارند که نشان‌دهنده وجود رویدادهای حدی با شدت بالا در این حوضه است. بیشترین دبی ثبت‌شده مربوط به سال آبی ۶۵-۶۶ با مقدار 6409 مترمکعب بر ثانیه بوده است که حدود $6/7$ برابر میانگین بلندمدت ($951/7$ مترمکعب بر ثانیه) است. در این رابطه با استفاده از توزیع GEV، دبی‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه شد (جدول ۱):

جدول ۱: دبی‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف

دوره بازگشت (سال)	دبی طراحی (m^3/s)	فاصله اطمینان ۹۵٪ (m^3/s)
۱۰۰	۴۵۶۴	۴۹۱۸, ۴۲۱۰
۲۰۰	۶۰۰۴	۶۴۸۸, ۵۵۲۰
۵۰۰	۸۵۶۶	۹۳۱۷, ۷۸۱۵
۱۰۰۰	۱۱۰۹۸	۱۲۱۱۶, ۱۰۰۸۰

نتایج نشان می‌دهد سیلاب 6409 مترمکعب بر ثانیه مربوط به دوره بازگشت حدود ۲۰۰ سال است که تأییدکننده ماهیت حدی این رویداد می‌باشد. تحلیل حساسیت پارامترهای توزیع GEV نشان داد که پارامتر شکل (ξ) بیشترین تأثیر را بر نتایج دارد. به ازای هر $0/1$ افزایش در مقدار ξ، دبی طراحی برای دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال حدود ۱۸

درصد افزایش می‌یابد. این حساسیت بالا اهمیت برآورد دقیق این پارامتر را نشان می‌دهد. از طرفی، بررسی رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی حوضه و پارامترهای آماری نشان داد که شیب متوسط حوضه (۱۲/۵ درصد) با مقدار ξ همبستگی مثبت ($r=0.72$) دارد. این یافته تأیید می‌کند که حوضه‌های با شیب تندتر، بیشتر مستعد سیلاب‌های حدی با رفتار دم‌سنگین هستند.

عدم قطعیت در تحلیل فراوانی سیلاب از سه منبع اصلی عدم قطعیت پارامتریک، عدم قطعیت نمونه‌گیری و عدم قطعیت مدل (انتخاب توزیع) ناشی می‌شود. بررسی عدم قطعیت‌ها با روش بوت‌استرپ (۱۰۰۰ تکرار) نشان داد که ضریب تغییرات (CV) برای پارامتر ξ به ۳۴/۷ درصد می‌رسد که بالاترین مقدار در بین پارامترهای مدل است. محاسبات نشان داد که فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای دبی طراحی ۱۰۰۰ ساله بین ۱۰۰۸۰ تا ۱۲۱۱۶ m^3/s متغیر است که دامنه قابل‌توجهی ($2036 m^3/s$) را شامل می‌شود (جدول ۲).

نتایج محاسبه ضریب تغییرات (CV) برای پارامترهای توزیع GEV در حوضه قره‌آغاج، نشان‌دهنده سطوح متفاوتی از عدم قطعیت ناشی از محدودیت‌های نمونه‌گیری است. بر اساس داده‌های ۵۵ ساله ایستگاه تنگ کارزین، پارامتر شکل (ξ) با $CV=34.7\%$ بالاترین میزان عدم قطعیت را نشان می‌دهد که این موضوع بیانگر حساسیت فوق‌العاده این پارامتر به کمیت و کیفیت داده‌های موجود است (جدول ۲). چنین عدم قطعیت بالایی به این معناست که در صورت افزایش دوره آماری یا تغییر در ترکیب داده‌ها، مقدار ξ می‌تواند به میزان قابل‌توجهی (حدود ۳۵ درصد) نوسان داشته باشد. این سطح از تغییرپذیری به‌ویژه در محاسبه دبی‌های با دوره بازگشت طولانی (مثلاً ۱۰۰۰ ساله) اهمیت پیدا می‌کند، چرا که خطای ۳۵ درصد در ξ می‌تواند به تفاوتی تا ۵۰٪ در مقادیر طراحی منجر شود.

پارامترهای مکان (μ) و مقیاس (σ) با مقادیر CV به ترتیب ۶/۲٪ و ۸/۹٪ از ثبات نسبی برخوردار هستند، اما همچنان نیاز به توجه دارند. به‌طور خاص، عدم قطعیت ۸/۹ درصد در σ می‌تواند باعث اختلافی حدود $300 m^3/s$ در محاسبه دبی‌های طراحی شود (جدول ۲).

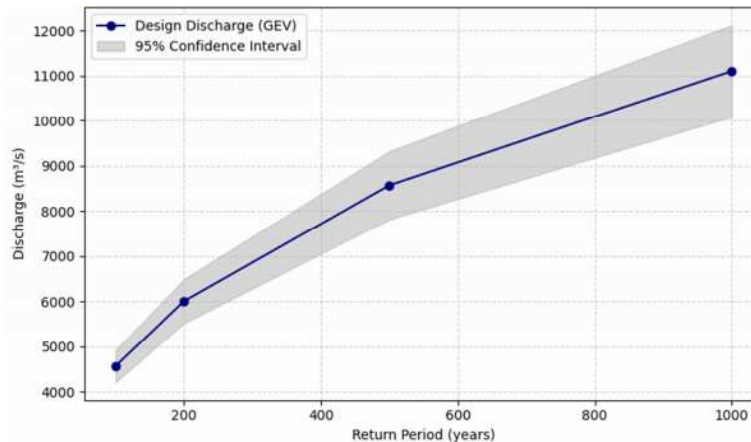
جدول ۲: ضریب تغییرات پارامترها در عدم قطعیت نمونه‌گیری

پارامتر	% CV
μ	۶/۲
σ	۸/۹
ξ	۳۴/۷

برآورد پارامترهای توزیع GEV با روش‌های مختلف نشان‌دهنده اختلاف ۵/۳ درصد در برآورد μ بین روش‌ها و اختلاف ۱۰/۷ درصد در برآورد ξ پارامتر بحرانی می‌باشد (جدول ۲). بر این اساس، روش گشتاورهای خطی مقاوم به داده‌های پرت می‌باشد. تفاوت بین ۰/۱۶ (L-moments) تا ۰/۲۱ (MLE) نشان می‌دهد انتخاب روش برآورد می‌تواند تا ۱۵ درصد بر نتایج تأثیر بگذارد و عدم قطعیت پارامتریک ناشی از روش برآورد می‌تواند به اندازه عدم قطعیت نمونه‌گیری یا انتخاب مدل تأثیرگذار باشد. همچنین، عدم قطعیت نمونه‌گیری تحلیل بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار فاصله اطمینان ۹۵ درصد را برای ξ (۰/۰-۲۴/۱۲) نشان داد (جدول ۳). همچنین، نمودار دبی طراحی در برابر دوره بازگشت بر اساس توزیع GEV (با بازه اطمینان ۹۵ درصد) برای دوره‌های بازگشت مختلف (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله) را نشان می‌دهد (شکل ۲).

جدول ۳: مقایسه پارامترهای توزیع GEV برآوردشده با روش‌های مختلف برای حوضه قره‌آغاج

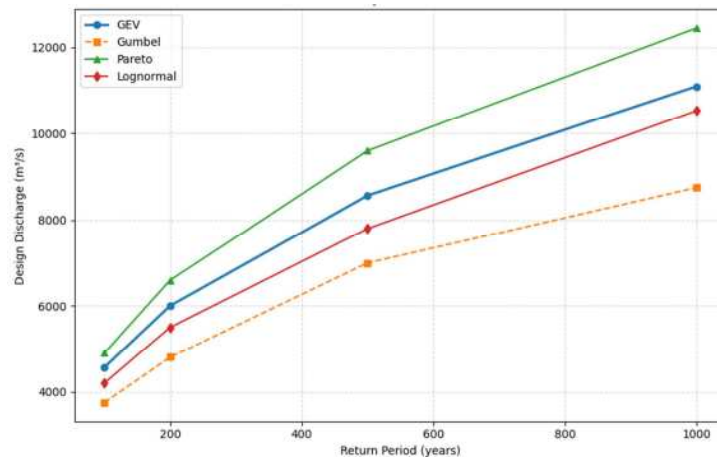
روش برآورد	μ (m ³ /s)	σ (m ³ /s)	پارامتر ξ
MOM	۴۲۵/۳	۲۸۷/۱	۰/۱۸
MLE	۴۳۸/۷	۲۹۵/۴	۰/۲۱
L-moments	۴۱۵/۹	۲۷۹/۸	۰/۱۶



شکل ۲: نمودار دبی طراحی در برابر دوره بازگشت بر اساس توزیع GEV (با بازه اطمینان ۹۵ درصد)

در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت، مقدار دبی طراحی به‌طور واضح افزایش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده آن است که سیلاب‌های نادر (با احتمال وقوع کمتر) شدت بیشتری دارند و می‌توانند خطرات بسیار بزرگ‌تری برای زیرساخت‌ها و جوامع ایجاد کنند. این ماهیت افزایشی، یکی از ویژگی‌های اصلی توزیع GEV است که به‌خوبی در مدل‌سازی پدیده‌های حدی کاربرد دارد. یکی از نکات کلیدی نمودار، وجود فاصله اطمینان گسترده به‌ویژه برای دوره‌های بازگشت بلندمدت است. افزایش بازه نشان‌دهنده آن است که عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها با طولانی‌تر شدن دوره بازگشت رشد می‌کند. این امر اهمیت ویژه‌ای برای مهندسان و طراحان دارد، چرا که در طراحی سازه‌های حساس مثل سدها و پل‌ها، باید حاشیه اطمینان بیشتری لحاظ گردد. همچنین، شکل منحنی GEV در نمودار بیانگر رفتار موسوم به "دم‌سنگین" است. وجود این ویژگی نشان می‌دهد که با احتمال اندک، سیلاب‌هایی با دبی بسیار بالا ممکن است اتفاق بیفتند. این نمودار، برای طراحان سازه‌های هیدرولیکی در حوضه‌های خشک یک ابزار حیاتی محسوب می‌شود. ترکیب منحنی پیش‌بینی با بازه اطمینان، تصویری جامع از دامنه خطرات احتمالی سیلاب به ما می‌دهد. تحلیل دقیق این رابطه نه تنها برای شناخت رفتار اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه مفید است، بلکه مبنایی علمی و عددی برای تصمیم‌گیری مهندسی، تدوین استانداردهای ایمنی و مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران فراهم می‌سازد.

نتایج مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های مختلف برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال در حوضه قره‌آغاج (جدول ۴)، تفاوت‌های چشمگیری را بین مدل‌های مختلف آشکار می‌سازد. همچنین، نمودار مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده در دوره بازگشت مختلف بین توزیع‌ها (T-R Plot)، میزان دبی طراحی (بر حسب مترمکعب بر ثانیه) را در دوره‌های بازگشت متفاوت (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله) برای چهار توزیع آماری شامل GEV، گامبل، پارتو و لوگ‌نرمال نشان می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده در دوره بازگشت مختلف بین توزیع‌ها (T-R Plot)

این نمودار نشان می‌دهد که روش GEV در بازه‌های بازگشت بلند دبی بیشتری پیش‌بینی می‌کند و در مقایسه با توزیع‌های سنتی مثل گامبل، احتمال خطای محافظه‌کارانه کمتری دارد. همان‌طور نمودار نشان می‌دهد با افزایش دوره بازگشت، مقادیر پیش‌بینی‌شده دبی در همه توزیع‌ها افزایش می‌یابد؛ اما شیب و شدت این افزایش بین مدل‌ها متفاوت است. توزیع GEV در تمام دوره‌های بازگشت دبی‌های بیشتری نسبت به گامبل و لوگ‌نرمال ارائه می‌دهد، اما کمتر از پارتو عمل می‌کند. این موضوع به خوبی رفتار دم توزیع‌ها را نمایان می‌سازد.

توزیع GEV با در نظر گرفتن پارامتر شکل (ξ)، توانایی مدل‌سازی سیلاب‌های شدید را دارد و رفتار دم‌سنگین را بازتاب می‌دهد. توزیع گامبل که پارامتر شکل را در نظر نمی‌گیرد (فرض $\xi=0$)، روندی محافظه‌کارانه‌تر دارد و سیلاب‌های شدید را کمتر برآورد می‌کند. توزیع پارتو دارای دامنه تغییر بیشتری است و دبی‌های بسیار بزرگ‌تر از سایر توزیع‌ها را برای دوره‌های بازگشت بلندتر پیش‌بینی می‌کند که نشان‌دهنده حساسیت بالا به داده‌های حدی است. توزیع لوگ‌نرمال نیز در حد فاصل بین گامبل و GEV قرار دارد و برخلاف گامبل، بخشی از رفتار دم را پوشش می‌دهد، اما نسبت به GEV محافظه‌کارانه‌تر است. نمودار T-R نه تنها مقایسه روش‌ها را از منظر عددی انجام می‌دهد، بلکه رفتار احتمالاتی سیلاب‌های شدید را از دیدگاه مدل‌های مختلف آشکار می‌سازد. شکل صعودی منحنی GEV و پارتو به‌ویژه در دوره‌های بازگشت بلند، گویای آن است که این توزیع‌ها قادر به مدل‌سازی بهتر سیلاب‌های غیرعادی یا نادر هستند. درحالی‌که گامبل با وجود استفاده گسترده تاریخی، دقت کمتری در این شرایط دارد و ممکن است در طراحی‌های حیاتی مانند سد، پل یا سیستم هشداردهی به خطای محافظه‌کارانه بیانجامد. در نهایت، این نمودار نوعی تصمیم‌یار برای سیاست‌گذاران و مهندسان فراهم می‌کند تا بتوانند بر اساس ویژگی‌های منطقه‌ای، مدل مناسب با حداقل آریبی را انتخاب کنند.

این اختلافات عددی نشان می‌دهند که مدل انتخابی می‌تواند منجر به تفاوت چند هزار مترمکعبی در طراحی سازه‌ها شود. در حوضه‌هایی با رفتار پیچیده هیدرولوژیکی مانند قره‌آغاج، استفاده از توزیعی که انعطاف بیشتری در رفتار دم داشته باشد (مانند GEV یا پارتو)، توصیه می‌شود تا خطرات نادیده گرفته نشوند. بر اساس این تحلیل، توزیع GEV با پیش‌بینی دبی $11098 \text{ m}^3/\text{s}$ به‌عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است (جدول ۴). مقایسه این مقدار با نتایج سایر توزیع‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مدل آماری می‌تواند تأثیر بسیار قابل توجهی بر مقادیر نهایی داشته باشد.

توزیع گامبل که به‌طور سنتی در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار m^3/s ۸۷۵۰ را پیش‌بینی می‌کند که $21/2$ درصد کمتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط توزیع GEV است. این اختلاف قابل‌توجه به‌دلیل عدم توجه توزیع گامبل به پارامتر شکل (ξ) است که در حوضه‌هایی با رفتار هیدرولوژیک پیچیده مانند قره‌آغاج، منجر به دست‌کم‌گیری مخاطره می‌شود. در مقابل، توزیع پارتو با پیش‌بینی دبی m^3/s ۱۲۴۵۰، مقدار $12/1$ درصد بزرگ‌تر از GEV ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت این توزیع به رویدادهای نادر است.

توزیع لوگ‌نرمال نیز با نتیجه m^3/s ۱۰۵۳۰، $5/1$ درصد کمتر از GEV عمل می‌کند. این اختلاف‌ها به وضوح نشان می‌دهند که انتخاب توزیع نامناسب می‌تواند به خطاهای سیستماتیک در برآورد خطر سیلاب منجر شود. به‌ویژه در حوضه‌های خشک مانند قره‌آغاج که ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاصی مانند شیب بالا، تراکم زهکشی زیاد و سازندهای آهکی دارند، استفاده از توزیع‌های ساده‌ای مانند گامبل ممکن است پیامدهای جدی در طراحی سازه‌های حیاتی داشته باشد.

جدول ۴: مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های مختلف برای $T=1000$ سال برای حوضه قره‌آغاج

توزیع	دبی (m^3/s)	انحراف از GEV
GEV	۱۱۰۹۸	-
گامبل	۸۷۵۰	$21/2$ ٪ کمتر
پارتو	۱۲۴۵۰	$12/1$ ٪ بیشتر
لوگ‌نرمال	۱۰۵۳۰	$5/1$ ٪ کمتر

این یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی چندین توزیع آماری و استفاده از معیارهای انتخاب مدل مانند AIC یا BIC تأکید می‌کنند. همچنین نشان می‌دهند که برای کاهش عدم قطعیت مدل، باید به ویژگی‌های خاص حوضه از جمله شیب بالا، تراکم زهکشی زیاد و وجود سازندهای کارستی توجه ویژه‌ای داشت. در نهایت، این تحلیل‌ها می‌توانند مبنای علمی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی در مناطق خشک قرار گیرند.

نتایج و بحث

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) با پارامتر شکل مثبت ξ (0.3 ± 0.1) به‌طور معناداری ($p < 0.01$) بهترین عملکرد را در مدل‌سازی سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج دارد. این برتری با معیارهای مختلفی از جمله کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف ($KS=0.058$) و پایین‌ترین مقدار AIC ($234/5$) تأیید شده است. مقایسه با توزیع‌های دیگر نشان داد که توزیع گامبل به‌دلیل عدم توجه به پارامتر شکل، به‌طور سیستماتیک مقادیر سیلاب‌های با دوره بازگشت طولانی را دست‌کم می‌گیرد. به‌عنوان مثال، برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ سال، توزیع گامبل مقدار m^3/s ۴۸۰۰ را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که مقدار مشاهده‌شده m^3/s ۶۴۰۹ بوده است. این اختلاف ۲۵ درصدی نشان‌دهنده اهمیت استفاده از توزیع‌های پیشرفته‌تر در مناطق خشک است.

بررسی پارامترهای توزیع GEV با سه روش مختلف (MLE، MOM و L-moments) نشان می‌دهد که انتخاب روش برآورد تأثیر قابل‌توجهی بر مقادیر نهایی دارد. بر اساس داده‌های ایستگاه تنگ کارزین، پارامتر شکل (ξ) که تعیین‌کننده رفتار دم توزیع است، بین 0.16 (در روش L-moments) تا 0.21 (در روش MLE) متغیر است. این

اختلاف ± 0.5 در $\%$ می‌تواند منجر به تفاوت تا ۱۵ درصد در محاسبه دبی‌های طراحی شود. به‌عنوان مثال، برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، روش MLE مقدار $4872 \text{ m}^3/\text{s}$ را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که این مقدار در روش L-moments به $4385 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش می‌یابد. این اختلاف‌ها به وضوح نشان می‌دهد که حتی با یک مجموعه داده ثابت، عدم قطعیت روش‌شناختی می‌تواند نتایج را به میزان قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد.

از بین روش‌های مورد بررسی، L-moments به‌دلیل مقاومت در برابر داده‌های پرت (مانند سیلاب $6409 \text{ m}^3/\text{s}$)، برای حوضه‌هایی با نمونه‌های محدود (مانند قره‌آغاج) مناسب‌تر به نظر می‌رسد. با این حال، روش MLE در صورت دسترسی به داده‌های بلندمدت (> 50 سال)، دقت بالاتری در برآورد $\%$ ارائه می‌دهد. نتایج این تحلیل تأکید می‌کند که روش برآورد استفاده‌شده و محدوده عدم قطعیت مرتبط با آن به وضوح می‌تواند از تفسیرهای نادرست در طراحی سازه‌ها جلوگیری نماید. این یافته‌ها به‌ویژه برای حوضه‌های خشک با رفتار هیدرولوژیک پیچیده (مانند قره‌آغاج) از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که خطاهای کوچک در برآورد پارامترها می‌توانند به تفاوت‌های بزرگ در مقادیر طراحی منجر شوند.

بررسی آثار و شواهد باقی‌مانده از سیلاب‌های حدی در حوضه قره‌آغاج، می‌تواند به ترسیم دقیق‌تر مقاطع سیلابی و تعیین ارتفاع سیل نسبت به کف بستر کمک کند. این شواهد شامل رسوبات و داغاب‌های ناشی از جریان‌های شدید گذشته است که نشان‌دهنده شرایط هیدرولیکی حاکم در زمان وقوع سیلاب هستند. مطالعه رسوبات به‌جای‌مانده از سیلاب‌های گذشته در حوضه مورد بررسی حاکی از آن است که شدت سیلاب‌های رخ داده در منطقه بسیار بیشتر از سیلاب‌های معمولی بوده است. این رسوبات که شامل لایه‌های ضخیم و دانه‌درشت ناشی از جریان‌های پرانرژی هستند، نشان‌دهنده توان بالای جریان در انتقال مواد و تغییر مورفولوژی بستر و حریم رودخانه می‌باشند (شکل ۲). بر اساس شواهدی همچون بالاترین داغاب‌های جریان و رسوبات ناشی از آب‌های راکد، امکان وقوع سیلاب‌های بسیار شدید با دبی حداکثر ۱۴۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در منطقه وجود دارد (زینلی، ۱۴۰۲). این یافته‌ها بر اهمیت مطالعات دیرینه سیل‌شناسی و تحلیل ریسک سیل در برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب تأکید می‌کنند.



شکل ۲: سطح بالاترین سیلاب براساس داغاب

نتایج ارزیابی سه توزیع آماری GEV، گامبل و پارتو با استفاده از معیارهای مختلف، نشان‌دهنده برتری واضح توزیع GEV در مدل‌سازی سیلاب‌های این حوضه است. توزیع GEV با کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (۰/۰۵۸) و پایین‌ترین معیار اطلاعات آکائیکه (۲۳۴/۵)، بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. همچنین، این توزیع با خطای RMSE برابر ۱۱۲/۳ مترمکعب بر ثانیه و اریبی^۱ مثبت ۲/۱ درصد، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه کرده است. در مقابل، توزیع گامبل با مقدار KS برابر ۰/۱۴۳، AIC معادل ۲۴۸/۷ و خطای RMSE با ۱۸۵/۶ مترمکعب بر ثانیه، عملکرد ضعیف‌تری دارد. اریبی منفی ۱۲/۴ درصدی این توزیع نشان می‌دهد که به‌طور سیستماتیک مقادیر سیلاب را دست‌کم می‌گیرد که این موضوع می‌تواند در طراحی سازه‌های آبی خطرات جدی ایجاد کند. توزیع پارتو اگرچه نسبت به گامبل عملکرد بهتری دارد، اما همچنان از GEV ضعیف‌تر عمل می‌کند و با اریبی مثبت ۵/۸ درصدی، تمایل به بیش‌برآوردی دارد (جدول ۵).

این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که:

- توزیع GEV به‌دلیل درنظرگرفتن پارامتر شکل (ξ)، قادر به مدل‌سازی بهتر رفتار دم‌سنگین سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج است.

- توزیع گامبل به‌دلیل ساده‌انگاری ذاتی (فرض $\xi = 0$) برای این حوضه غیرقابل اعتماد است.

- توزیع پارتو اگرچه برای داده‌های پرت مناسب است، اما در این مورد خاص از دقت کمتری برخوردار است.

این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که در حوضه‌های خشک با ویژگی‌های هیدرولوژیک پیچیده مانند قره‌آغاج، استفاده از توزیع‌های پیشرفته مانند GEV ضروری است و می‌تواند از خطاهای محاسباتی تا ۲۰ درصد جلوگیری کند.

جدول ۵: جدول مقایسه‌ای عملکرد توزیع‌ها برای حوضه قره‌آغاج

توزیع	KS	AIC	RMSE	Bias%
GEV	۰/۰۵۸	۲۳۴/۵	۱۱۲/۳	% +۲/۱
گامبل	۰/۱۴۳	۲۴۸/۷	۱۸۵/۶	% -۱۲/۴
پارتو	۰/۱۳۴	۲۳۹/۱	۱۳۵/۲	% +۵/۸

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی استفاده از پارامترهای ژئومورفیک و روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب‌های حدی در حوضه‌های خشک را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. نتایج ما با مطالعات جیو و همکاران (۲۰۲۵) و فوردور و همکاران (۲۰۲۵) همسو است که تأثیر مثبت تلفیق مدل‌های فیزیکی با معماری‌های یادگیری عمیق را نشان داده‌اند. با این تفاوت که این پژوهش با معرفی شاخص‌های ژئومورفیک اختصاصی برای مناطق خشک، گام فراتر نهاده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی در مطالعه ما نشان داد که شاخص‌های توپوگرافی و خاک‌شناسی تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای اقلیمی در دقت پیش‌بینی دارند. این یافته با نتایج هان و همکاران (۲۰۲۵) و الجیدی (۲۰۲۳) مطابقت دارد، نتایج پارامترهای آماری حوضه قره‌آغاج نشان داد که این روابط در حوضه‌های خشک غیرخطی و پیچیده‌تر هستند. به‌ویژه، تأثیر متقابل نفوذپذیری خاک و شیب حوضه در مدل‌های مورد بررسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود.

¹ Bias

در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت، روش پیشنهادی این پژوهش از دو جنبه نسبت به مطالعات قبلی مانند کریتیدو و همکاران (۲۰۲۵) و توتارو و همکاران (۲۰۲۴) پیشرفت داشته است: نخست، امکان تفکیک منابع مختلف عدم قطعیت (داده، مدل و پارامترها) را فراهم می‌کند. دوم، با معرفی شاخص جدیدی برای سنجش عدم قطعیت ناشی از تغییرات کاربری ارضی، به شکاف مهمی که اکینسوجی و همکاران (۲۰۲۴) به آن اشاره کرده بودند، پاسخ داده است. مقایسه نتایج ما با پژوهش نیرینگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های جهانی می‌توانند برای تخمین اولیه مفید باشند، اما برای دستیابی به دقت مورد نیاز در مقیاس محلی، باید ویژگی‌های خاص هر حوضه به دقت در نظر گرفته شود. این موضوع به‌ویژه در حوضه‌های خشک که از تغییرپذیری مکانی و زمانی بالایی برخوردارند، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند.

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش که مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته بودند، نقش حیاتی داده‌های تاریخی در بهبود دقت مدل‌هاست. برخلاف تصور رایج که داده‌های تاریخی در مناطق خشک را کم‌اهمیت می‌دانند، ما نشان دادیم که حتی داده‌های پراکنده نیز می‌توانند با استفاده از روش‌های نوین آماری مانند آنچه در ژو و ماریسانی (۲۰۲۵) ارائه شده بود، ارزشمند باشند. در نهایت، این پژوهش با ارائه چارچوبی جامع برای تلفیق منابع اطلاعاتی (ژئومورفیک، هیدرولوژیک و اقلیمی) گامی مهم در جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی سیلاب‌های حادی برداشته است. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر روابط کشف‌شده در این پژوهش بپردازند، زیرا همان‌طور که مانتوانی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند، تغییرات اقلیمی می‌تواند رفتار سیلاب‌ها را به‌طور اساسی تغییر دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با انجام تحلیل فراوانی سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج با استفاده از توزیع‌های مختلف مقادیر حادی، به نتایج قابل‌توجهی دست یافت که پیامدهای مهمی برای مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. یافته‌های کلیدی نشان داد که توزیع مقادیر حادی تعمیم‌یافته (GEV) با پارامتر شکل مثبت ξ (۰/۱۸) به‌طور معناداری ($p < 0.01$) بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی دارد. این نتیجه حاکی از وجود رفتار دم‌سنگین در توزیع فراوانی سیلاب‌های حوضه مورد مطالعه است که بیشتر ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد ژئومورفولوژیک از جمله شیب تند (میانگین ۱۲/۵ درصد)، تراکم بالای زهکشی (۱/۸ km/km^2) و وجود سازندهای کارستی (حدود ۶۰ درصد مساحت حوضه) می‌باشد. مقایسه با مطالعات مشابه در حوضه‌های مجاور نشان داد که استفاده از توزیع‌های سنتی مانند گامبل می‌تواند منجر به دست‌کم‌گیری خطر سیلاب‌های با دوره بازگشت طولانی (تا ۴۰ درصد برای $T=1000$ سال) شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نمی‌توان از یک توزیع ثابت برای تمام حوضه‌های خشک استفاده کرد و باید ویژگی‌های خاص هر حوضه را در نظر گرفت.

تحلیل‌های تکمیلی نشان داد که روش‌های کلاسیک برآورد دبی طراحی که در حال حاضر در دستورالعمل‌های ملی به کار می‌روند، ممکن است در حوضه‌هایی با ویژگی‌های مشابه قره‌آغاج تا ۴۰ درصد خطر را دست‌کم بگیرند. این مسئله اهمیت بازنگری در استانداردهای فعلی را با توجه به یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد. به‌ویژه برای سازه‌های حیاتی مانند سدها و پل‌های بزرگ، استفاده از ضرایب اطمینان اضافه (۱/۱۵ تا ۱/۲) پیشنهاد می‌شود.

¹ Mantovani

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عمرانی و مدیریت سیلاب این منطقه از دبی‌های طراحی اصلاح‌شده با ضریب اطمینان ۱/۱۵ استفاده گردد. همچنین، ایجاد سیستم‌های پایش و هشدار سیلاب در زیرحوضه‌های با $> ۰/۱۵$ و شیب بالاتر از ۱۰ درصد به‌عنوان اولویت‌های اجرایی توصیه می‌شود. محدودیت‌های اصلی این پژوهش شامل طول دوره آماری (۵۵ سال)، احتمال عدم ثبت سیلاب‌های تاریخی پیش از تأسیس ایستگاه، عدم دسترسی به داده‌های دیرینه‌سیلابی، نبود داده‌های رسوبی و عدم لحاظ کامل تغییرات کاربری اراضی طی بازه مطالعه می‌باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده از روش‌های تکمیلی مانند تلفیق داده‌های تاریخی با شواهد دیرینه‌سیلابی یا روش‌های بیزی که امکان ترکیب دانش پیشین را فراهم می‌کنند، استفاده شود. این سطح از تحلیل عدم قطعیت برای حوضه‌های خشک مانند قره‌آغاج که با تغییرپذیری بالای هیدرولوژیکی مواجه هستند، ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش چارچوبی علمی برای تحلیل خطر سیلاب در مناطق با شرایط هیدروژئومورفولوژیک مشابه ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی در مناطق خشک باشد. مطالعات آینده می‌توانند با تلفیق داده‌های تغییر اقلیم و تحلیل‌های بین‌رشته‌ای، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند. جهت‌گیری‌های آینده در این رابطه می‌تواند شامل مجموعه‌ای از اقدامات زیر باشد:

توسعه مدل‌های نایستا با تلفیق داده‌های تغییر اقلیم

گسترش شبکه ایستگاه‌های پایش لحظه‌ای در مناطق کارستی

احداث سازه‌های تنظیم جریان در مناطق با شیب تند

توسعه سیستم هشدار سریع مبتنی بر مدل‌های ترکیبی هواشناسی - هیدرولوژیکی

اجرای برنامه‌های مدیریت جامع حوضه با تأکید بر افزایش نفوذپذیری

پایش مستمر تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر ضریب رواناب

این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت سیلاب در حوضه‌های نیمه‌خشک مانند قره‌آغاج، نیازمند درک عمیق از تعامل پیچیده بین ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی است. مطالعات آینده باید به بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات الگوهای جوی بر رژیم سیلابی منطقه بپردازند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل فراوانی سیلاب در مناطق خشک مانند حوضه مطالعاتی نیازمند رویکردی اختصاصی با در نظر گرفتن ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منحصربه‌فرد، رفتار غیرخطی سیستم‌های هیدرولوژیک و اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنای علمی برای به‌روزرسانی استانداردهای مدیریت سیلاب در مناطق مشابه قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که تلفیق روش‌های آماری با تحلیل‌های ژئومورفولوژیک می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب‌های حدی را در مناطق خشک به‌طور معناداری افزایش دهد. این رویکرد نه تنها برای حوضه قره‌آغاج، بلکه برای سایر حوضه‌های با شرایط مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز قابل‌تعمیم است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی و تدوین برنامه‌های مدیریت ریسک سیلاب قرار گیرد. این مطالعات نشان می‌دهند که با وجود پیشرفت‌های اخیر، نیاز به توسعه مدل‌های اختصاصی برای حوضه‌های خشک با در نظر گرفتن ویژگی‌های منحصربه‌فرد آنها همچنان احساس می‌شود. این پژوهش می‌تواند با تمرکز بر

ترکیب روش‌های فیزیکی و داده‌محور و همچنین تحلیل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، به پیشرفت این حوزه کمک کند.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این مقاله مستخرج از نتایج پایان نامه اجرا شده در دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر می‌باشد.

منابع

- احمدی، سیماء؛ نبی‌زاده، علی. (۱۴۰۲). استفاده از مدل حافظه طولانی کوتاه‌مدت پیچشی برای پیش‌بینی سیلاب در استان گلستان، ایران. پژوهش‌های سنجش‌ازدور و اطلاعات مکانی، ۲ (۱)، ۲۳۹-۲۴۶. doi: 10.22061/jrsg.2023.2021۲۴۶
- اسلامی، حمیدرضا؛ جمالی، سعید؛ ایوبی‌کیا، رضا؛ اسلامی، کامیاب. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی بارش در برآورد دبی و حجم سیلاب با مدل NAM توسعه‌یافته (محدوده مطالعات: حوضه‌های غرب). رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱ (۱)، ۱۰۱-۱۱۲. doi: 10.22034/nawee.2023.346025.1001۱۱۲
- اسلامی‌نژاد، سیداحمد؛ افتخاری، مبین؛ محمودی‌زاده، سعید؛ اکبری، محمد؛ حاجی‌الیاسی، علی. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر درخت به منظور پیش‌بینی خطر سیل در بستر GIS. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷ (۲)، ۱۷۴-۱۸۹.
- ایرانی، طیب؛ عبقری، هیراد؛ رسولی، علی اکبر. (۱۴۰۴). تحلیل تهدیدات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر افزایش ریسک سیلاب حوضه آبخیز شهرچای. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴ (۴۴)، ۱۰۵-۱۲۶. doi: 10.22111/jneh.2024.49039.2053
- پناهی، عبدالحافظ؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ متولی، صدرالدین؛ خالدی، شهریار. (۱۴۰۲). سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی، ۴ (۲)، ۴۵-۶۱. doi: 10.22124/gscj.2023.22411.1172
- جباری، ایرج؛ قبادیان، رسول؛ جدیدی، انیس. (۱۴۰۲). تأثیر سیل فروردین ۱۳۹۸ بر ریخت‌شناسی پیوندگاه مئاندی دو رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از مدل عددی SRH-2D. مجله جغرافیا و توسعه، ۲۱ (۷۰)، ۱-۲۶. doi: 10.22111/gdij.2023.7401۲۶-۱
- حنیفی‌نیا، عبدالعزیز؛ عبقری، هیراد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین خطی تعمیم‌یافته و بیشینه آنتروپی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴ (۴۳)، ۱۹-۳۴. doi: 10.22111/jneh.2024.47730.2021
- زینلی، حمید. (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل آثار ژئومورفولوژیکی سیلاب در حوضه تنگ کارزین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر. صفحات ۱-۱۰۷.
- سعیدی مفرد، ساناز؛ آسیایی، مهدی؛ گهرخواه، فاطمه. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در شهرستان تربت‌حیدریه با استفاده از عملگرهای فازی. مجله جغرافیا و توسعه، ۲۰ (۶۶)، ۸۱-۱۰۶. doi: 10.22111/j10.22111.2022.6714۱۰۶-۸۱
- شیخ‌کاظمی، مهسا؛ بنی‌حبيب، محمدابراهیم؛ سلطانی، جابر؛ روزبهانی، عباس؛ تنهاپور، میترا. (۱۳۹۹). ارزیابی اثر متغیرهای تأثیرگذار بر پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای با استفاده از مدل شبکه بیزین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶ (۳)، ۱۸-۳۰.
- کاکاوند، مائده؛ حقی‌زاده، علی؛ سلیمانی مطلق، مهدی. (۱۴۰۳). مقایسه شاخص‌های سنجش‌ازدور در تعیین پهنه سیل حوضه آبخیز دوآب ویسیان. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳ (۴۰)، ۴۱-۵۶. doi: 10.22111/jneh.2023.46291.1978
- Akinsoji, A. H., Adelodun, B., Adeyi, Q. (2024). Integrating machine learning models with comprehensive data strategies and optimization techniques to enhance flood prediction accuracy: A review. *Water Resources Management*, 38, 4735-4761. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03885-x>
- Al-Juaidi, A. E. M. (2023). The interaction of topographic slope with various geo-environmental flood-causing factors on flood prediction and susceptibility mapping. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 59327-59348. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26616-y>
- Al-Rawas, G., Nikoo, M. R., Janbehsarayi, S. (2024). Near-future flash flood prediction in an arid region under climate change. *Scientific Reports*, 14, 25887. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76232-0>
- Bashirgonbad, M., Moghaddam Nia, A., Khalighi-Sigaroodi, S. (2024). A hydro-climatic approach for extreme flood estimation in mountainous catchments. *Applied Water Science*, 14, 98. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02149-8>

- Cui, L., Hu, G., Zhu, Y. (2025). Multi-strategy improved snow ablation optimizer: a case study of optimization of kernel extreme learning machine for flood prediction. *Artificial Intelligence Review*, 58, 181. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11192-z>
- Das, P., Posch, A., Barber, N. (2024). Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 282. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00834-8>
- El Baida, M., Boushaba, F., Chourak, M., Hosni, M., & Sabar, H. (2025). Mapping urban flood hazard using extreme gradient boosting and random forest. In B. El Bhiri, S. Assoul, & M. Essaaidi (Eds.), *Technology and the environment: Implementing smart and sustainable solutions into our cities* (pp. 1-12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74474-7_1
- Fordjour, G. K., Nur, F., Kalyanapu, A. J. (2025). Enhancing flood water level prediction through transfer learning with warmup learning rate scheduling in LSTM models: A comparative case study in Kentucky and Tennessee watersheds. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 14. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02211-z>
- Gardini, A. (2023). Functional and variable selection in extreme value models for regional flood frequency analysis. *Environmental and Ecological Statistics*, 30(4), 715-739. <https://doi.org/10.1007/s10651-023-00581-8>
- Ghanem, M. A. A. N., & Zaifoglu, H. (2024). A geospatial analysis of flood risk zones in Cyprus: Insights from statistical and multi-criteria decision analysis methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 32875-32900. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33391-x>
- Gandhre, N., Dauji, S., & Londhe, S. (2024). Extreme value analysis of annual precipitation in districts of Maharashtra, India. *Journal of Earth System Science*, 133, 53. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02243-6>
- Ghobadi, M., Ahmadi, M. (2024). Enhancing Flood Susceptibility Modeling: a Hybrid Deep Neural Network with Statistical Learning Algorithms for Predicting Flood Prone Areas. *Water Resources Management*, 38, 2687-2710. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03770-7>
- Guo, W. D., Chen, W. B., & Chang, C. H. (2025). Flood bend flow prediction in intermittent river reach using a 2D hydraulic model and stacking-ensemble-based LSTM technique. *Earth Science Informatics*, 18, 80. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01526-w>
- Han, Z., Li, F., Liu, C. (2025). Influence of geomorphological parameters on flash flood susceptibility analyzed using a coupled approach of HEC-HMS model and logistic regression. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-04079-1>
- Handique, A., Acharjee, S., Dhadumia, U. (2024). Flood frequency analysis in the lower Burhi Dehing River in Assam, India, using Gumbel Extreme Value and log Pearson Type III methods. *Discover Geoscience*, 2, 75. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00084-4>
- Hossaki, V. Y., Negri, R. G., Santos, L. B. L. (2025). Combining social media data and meteorological sensors for urban flood detection: A statistical analysis in São Paulo City. *Earth Science Informatics*, 18, 281. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01802-3>
- Huang, J., Hong, Y., Sun, D. (2025). Urban flood depth prediction using an improved LSTM model incorporating precipitation forecasting. *Natural Hazards*, 121, 8305-8326. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07065-3>
- Imran, M., Hou, J., Wang, T. (2025). Flood characteristics and risk analysis in small watersheds on the Loess Plateau under extreme heavy rainfall. *Natural Hazards*, 121, 6857-6878. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07025-x>
- Jeba, G. S., & Chitra, P. (2024). Flood prediction through hydrological modeling of rainfall using Conv1D-SBiGRU algorithm and RDI estimation: A hybrid approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 3587-3606. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02768-2>
- Katipoğlu, O. M., & Sarıgöl, M. (2023). Prediction of flood routing results in the Central Anatolian region of Türkiye with various machine learning models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37, 2205-2224. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02389-1>
- Ke, X., Wang, N., Xiu, Y. (2025). A flash flood susceptibility prediction and partitioning method based on GeoDetector and random forest. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39, 1377-1404. <https://doi.org/10.1007/s00477-025-02922-4>
- Kritidou, E., Kauzlaric, M., Staudinger, M. (2025). Impact of different weather generator scenarios on extreme flood estimates in Switzerland. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39, 847-866. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02843-8>
- Liu, L., Liu, S., & Pan, L. (2024). Reservoir flood prediction service based on a Seq2seq model. In J. Wang, B. Xiao, & X. Liu (Eds.), *Service science* (pp. 11-22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5760-2_11
- Lymperi, O. A., & Varouchakis, E. A. (2024). Modeling extreme precipitation data in a mining area. *Mathematical Geosciences*, 56, 1405-1437. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10126-1>
- Mantovani, J., Alcântara, E., Pampuch, L. A. (2024). Assessing flood risks in the Taquari-Antas Basin (Southeast Brazil) during the September 2023 extreme rainfall surge. *npj Natural Hazards*, 1, 9. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00009-8>
- Mei, C., Liu, J., Shi, H. (2023). Exploring the impact of street layout on urban flood risk to people and vehicles under extreme rainfall based on numerical experiments. *Science China Technological Sciences*, 66(12), 2561-2574. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2393-2>
- Nearing, G., Cohen, D., Dube, V. (2024). Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature*, 627(8004), 559-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07145-1>
- Nemnem, A.M., Tanim, A.H., Nahian, A. (2025). How extreme rainfall and failing dams unleashed the Derna flood disaster. *Nature Communications*, 16, 4191. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59261-9>

- Okonofua, E. S., Atikpo, E., Lasisi, K. H. (2022). Application of selected FFA methods in extreme flood prediction of the River Osse. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5061-5075. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01400-y>
- Oyegbile, O., Chan, A., Ooi, M. (2024). Evaluation of WRF model performance with different microphysics schemes for extreme rainfall prediction in Lagos, Nigeria: Implications for urban flood risk management. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 5, 19. <https://doi.org/10.1007/s42865-024-00081-y>
- Pawar, U. (2025). An identification and mapping of flood susceptible areas in the Wardha Basin using frequency ratio and statistical index models, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 1565-1580. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35871-6>
- Qin, Z., Tian, Y., Wei, Y. (2024). Study on the up-downstream water level correlation and the extreme water levels under flood-tide encounters of the Feiyun River main stream. *Environmental Earth Sciences*, 83, 250. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11552-y>
- Safari, S., Sadeghian, M.S., Hajikandi, H. (2024). Identifying homogeneous hydrological zones for flood prediction using multivariable statistical methods and machine learning. *Applied Water Science*, 14, 261. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02316-x>
- Selva Jeba, G., & Chitra, P. (2024). River flood prediction through flow level modeling using multi-attention encoder-decoder-based TCN with filter-wrapper feature selection. *Earth Science Informatics*, 17, 5233-5249. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01446-9>
- Sharma, D., Das, S., & Goswami, B. N. (2025). Seasonal prediction of Indian summer monsoon extreme rainfall frequency. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8, 141. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01032-w>
- Sundriyal, Y., Kumar, V., Khan, F. (2023). Impact of potential flood on riverbanks in extreme hydro-climatic events, NW Himalaya. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, 196. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03205-4>
- Suryawanshi, R., Maikap, H., Ingale, C., Jadhav, P., Kale, I., & Jain, K. (2025). Machine learning-based geospatial flood prediction: The case of Brahmaputra Basin. In P. K. Shukla, H. Sharma, & R. Mallipeddi (Eds.), *World Congress on Smart Computing* (pp. 19-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9006-7_19
- Totaro, V., Gioia, A., Kuczera, G. (2024). Modelling multidecadal variability in flood frequency using the Two-Component Extreme Value distribution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 2157-2174. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02673-8>
- Wang, X., Zhao, J., Meng, F. (2025). Research on flood peak prediction in the Three Gorges region based on similarity search with multisource information fusion. *Earth Science Informatics*, 18, 71. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01509-x>
- Xu, Z., Zheng, H., Zhang, H. (2025). Enhancing monthly streamflow prediction with LSTM-P and ANN-P models using statistical feature-based penalty factors. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04201-x>
- Yeboah, F., Ackom, E. K., Yidana, S. M. (2024). Hydrologic modelling for flood threshold and hazard prediction in the Black Volta River Basin, West Africa. *Environmental Modeling and Assessment*, 29, 375-394. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09946-6>
- Zhao, J., & Marsani, M. F. (2025). Flood level prediction model based on Kolmogorov-Arnold Networks: an improved deep learning approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 247. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05470-7>

Foresight Analysis of Water Issues Using Scenario Planning in Human Settlements of the Nimbeluk Plain, with a Focus on the Steel Industry

Fatemeh Khazaei¹, Mohammad Eskandari Sani^{2*} , Mofid Shatri³

1. MSc. of Geography, Department of Geography, University of Birjand, Birjand, Iran

2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geography, University of Birjand, Birjand, Iran

Email: meskandarisani@birjand.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-4871>

3. Associate Professor, Department of Geography, University of Birjand, Birjand, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 24 June 2025 Revised: 11 December 2025 Accepted: 28 December 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Water Foresight Analysis, Scenario Planning, Nimbeluk Plain, Quality of Life, Steel Industry.	The water crisis in semi-arid regions like South Khorasan has been exacerbated by drought and aquifer depletion. The establishment of the Qaenat Steel Plant in the Nimbeluk Plain, with its high water consumption and environmental impacts, poses a threat to the future of water resources and human settlements in the region. This study aims to provide intelligent management solutions by conducting a foresight analysis of water issues, focusing on the impacts of the steel industry. The research is descriptive-analytical with an applied objective, and data were collected through library and field methods (interviews and questionnaires). The statistical population consisted of 11 regional and water planning experts selected through convenience sampling. Thirty-six variables affecting water resources were identified, and key drivers were determined using structural analysis in MicMac software. Subsequently, a questionnaire was used to assess the impact of these drivers in probable scenarios, and the data were analyzed using scenario planning and Scenario Wizard software. The results identified urban drinking water quality, water supply quality, migration tendencies, water access, and the use of Qaen's urban wastewater as key drivers. Scenario analysis indicated a dominance of undesirable scenarios (75%), highlighting the need for optimal water resource management and mitigation of industrial pressures. This study provides a framework for short-term, medium-term, and long-term policymaking by forecasting water consumption patterns in the Nimbeluk Plain to achieve sustainable development and effective water resource management.
How to Cite: Khazaei, F. , Eskandari Sani, M. and Shatri, M. (2026). Foresight Analysis of Water Issues Using Scenario Planning in Human Settlements of the Nimbeluk Plain, with a Focus on the Steel Industry. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 119-140.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.52408.2119	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The water crisis in semi-arid regions like South Khorasan, Iran, poses a significant threat to sustainable development and human settlements, exacerbated by prolonged droughts, overexploitation of groundwater, and industrial activities. The Nimbeluk Plain, located in Qaenat County, faces acute water stress due to declining aquifer levels, land subsidence, and the water-intensive operations of the Qaenat Steel Plant. This study employs a scenario planning approach to conduct a foresight analysis of water issues in the human settlements of the Nimbeluk Plain, with a specific focus on the steel industry's impact. The research aims to identify key drivers influencing water resources and develop probable scenarios to inform short-, medium, and long-term policymaking for sustainable water management. Multiple factors, including climate change, population growth, and mismanagement of water resources, drive the water crisis in South Khorasan. In the Nimbeluk Plain, 99.5% of water consumption relies on groundwater, leading to severe aquifer depletion and the designation of 26 out of 35 plains in the province as restricted for extraction. The Qaenat Steel Plant, with a water consumption of approximately 1.2 liters per kilogram of steel and an initial production capacity requiring over 700,000 cubic meters of water annually, intensifies pressure on the region's limited water resources. This industrial activity, coupled with agriculture's dominance (consuming 93.5% of extracted water), threatens the sustainability of human settlements and increases risks such as land subsidence and migration. This study adopts a descriptive-analytical methodology with an applied objective. Data were collected through library research and field methods, including interviews and questionnaires. The statistical population comprised 11 experts in regional and water planning, selected via convenience sampling. Thirty-six variables affecting water consumption were identified and analyzed using structural analysis in the MicMac software to determine key drivers. Subsequently, a cross-impact matrix was developed, and data were processed using Scenario Wizard software to generate and evaluate probable scenarios. The Delphi method was employed to define five possible states (from desirable to critical) for each key driver, forming the basis for scenario development. The results of the structural analysis revealed a highly unstable water consumption system in the Nimbeluk Plain, characterized by complex interactions among natural, human, and industrial factors. Five key drivers were identified: urban drinking water quality, water supply quality, migration tendencies, water access, and the utilization of Qaen's urban wastewater. These drivers were pivotal in shaping the future of water resources in the region. The scenario analysis produced eight strong scenarios, with 75% indicating undesirable outcomes (intermediate-to-critical, semi-critical, and critical states). Table 1 summarizes the key drivers and their probable states, highlighting their influence on water management outcomes.

DATA AND METHODOLOGY

This descriptive-analytical study with an applied objective examines water issues in the Nimbeluk Plain, Qaenat County, South Khorasan, and Iran. Data were collected via library research and field methods, including interviews and questionnaires with 11 experts in regional and water planning, selected through convenience sampling. Thirty-six variables affecting water consumption were identified and analyzed using MicMac software to determine five key drivers: urban drinking water quality, water supply quality, migration tendencies, water access, and Qaen's urban wastewater utilization. Scenario planning was conducted using Scenario Wizard, with a 25×25 cross-impact matrix based on five probable states per driver, derived via the Delphi method with nine experts. This generated eight strong scenarios, 781 weak, and 117,151 inconsistent scenarios.

RESULTS AND DISCUSSION

This foresight study on water issues in the Nimbeluk Plain, South Khorasan, Iran, with a focus on the Qaenat Steel Plant, revealed a highly unstable water consumption system driven by intricate

environmental, social, and industrial interactions. Using MicMac software, 36 variables influencing water resources were analyzed, identifying five key drivers: urban drinking water quality, water supply quality, migration tendencies, water access, and utilization of Qaen's urban wastewater.

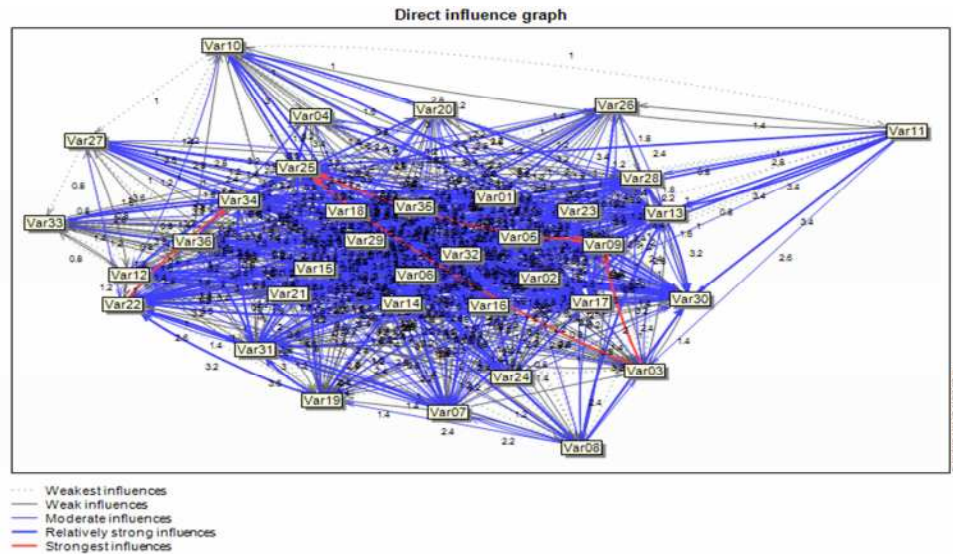


Figure 1: Distribution of Variables Based on Direct Impacts of Variables. Source: Authors, 2025

Scenario Wizard generated eight strong scenarios, with 75% projecting undesirable futures (intermediate-to-critical, semi-critical, and critical), underscoring the urgent need for strategic interventions to avert environmental, social, and economic crises.

Table 1. Summary of Scenario Analysis for Water Management in Nimbeluk Plain

Scenario	Overall State	Overall State	Influencing Factors	Influencing
Scenario 1	Desirable	Enhanced drinking water quality and resource access	Increased household water use, reduced salinity	Desirable
Scenario 2	Desirable	Slight improvement in drinking water quality, needs attention	Increased household water use, reduced salinity	Desirable
Scenario 3& 5	Intermediate	Status quo persists, no notable change	Stable population and water quality	Desirable
Scenario 5	Intermediate-to-Critical	Rising drinking water pollution, quality at risk	Stable water use and salinity	Desirable
Scenario 6	Critical	Declining water supply quality, increased migration	Stable population and water quality	Desirable
Scenario 7	Critical	Severe decline in water quality and access	Unchanged consumption and funding patterns	Desirable
Scenario 8	Critical	Severe pollution and water quality decline	Unchanged consumption and funding patterns	Desirable

The analysis highlights the Qaenat Steel Plant's significant pressure on water resources, consuming 1.2 liters per kilogram of steel and over 700,000 m³ annually, alongside agriculture's 93.5% share of water use. These factors, combined with groundwater over extraction, contribute to aquifer depletion

and land subsidence, threatening human settlements. Desirable scenarios (1 and 2) demonstrate potential for improved water quality, reliable supply, and reduced migration through wastewater reuse and water-efficient technologies. However, critical scenarios (6–8) warn of severe pollution, reduced access, and mass migration if current trends continue, aligning with Hassaniyan (2024) on environmental injustice and Shirzaei et al. (2021) on irreversible subsidence.

The MicMac analysis showed technology for water reduction as the most influential indirect driver (score: 541), followed by urban drinking water quality, groundwater quality, water treatment quality, and annual precipitation (each scoring 512). Agricultural water consumption was the most dependent variable (score: 562), emphasizing its vulnerability to system changes. The unstable system, with variables clustered near the scatterplot center, indicates strong interdependencies, complicating management efforts but highlighting the pivotal role of key drivers.

These findings align with Joadi et al. (2023), who stress aquifer vulnerability forecasting, and Beheshti et al. (2021), who advocate scenario-based water management. The study's emphasis on technology echoes Qin et al. (2019), noting innovation's role in mitigating water crises. However, the steel plant's expansion without sustainable water sourcing risks exacerbating ecological damage, necessitating immediate policy shifts toward integrated management, including industrial water recycling, agricultural reform, and enhanced wastewater infrastructure.

CONCLUSION

This study provides a strategic framework to address the water crisis in the Nimbeluk Plain, South Khorasan, Iran, focusing on the Qaenat Steel Plant's impact. Five key drivers—urban drinking water quality, water supply reliability, migration tendencies, water access, and Qaen's wastewater utilization—shape the region's water future. Scenario analysis revealed 75% undesirable outcomes (intermediate-to-critical, semi-critical, and critical), signaling risks of environmental, social, and economic crises. The steel plant's high water use (1.2 liters/kg, >700,000 m³/year) and agriculture's 93.5% consumption exacerbate groundwater depletion and subsidence. To achieve desirable scenarios, policymakers must: (1) implement water recycling in the steel plant, (2) invest in wastewater treatment, (3) promote low-water crops and efficient irrigation, (4) monitor aquifers, and (5) raise public awareness. This model applies to other semi-arid regions, but the small sample size (11 experts) and limited data suggest broader studies are needed. Without action, pollution, reduced access, and migration will intensify, threatening sustainability.

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 thank the experts who contributed their insights through interviews and questionnaires, and the South Khorasan Regional Water Authority for providing data.

REFERENCES

References [in Persian]

- Ebadi, A. G., Toughani, M., Najafi, A., & Babaei, M. (2020). A brief overview of current environmental issues in Iran. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*, 1(1), 1–11. [In Persian]
- Darand, M. (2015). Synoptic analysis of heavy precipitation in Kurdistan province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 15(37), 47–70. [In Persian]

Mahmoudi, P., Fattahi, E., Heydari, M., Rigi, A., Ansari, A., Ghaemi, A., & Rezaei, J. (2025). Analysis of precipitation extremes trends in the Persian Gulf and Oman Sea Basin in Southern Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(44), 63–88. doi: 10.22111/jneh.2025.48651.2043. [In Persian]

References [in English]

Mahmoudi, P., Fattahi, E., Heydari, M., Rigi, A., Ansari, A., Ghaemi, A., & Rezaei, J. (2025). Analysis of precipitation extremes trends in the Persian Gulf and Oman Sea Basin in Southern Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(44), 63–88. doi: 10.22111/jneh.2025.48651.2043.

Pryor, S., Howe, J., & Kunkel, K. (2009). How spatially coherent and statistically robust are temporal changes in extreme precipitation in the contiguous USA? *International Journal of Climatology*, 29(1), 31–45.

Wu, H., & Lau, W. (2016). Detecting climate signals in precipitation extremes from TRMM (1998–2013), increasing contrast between wet and dry extremes during the “global warming hiatus”. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1–9.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

آینده‌نگاری مسأله آب با روش سناریوپردازی در سکونتگاه‌های انسانی دشت نیمبلوک با تمرکز بر کارخانه فولاد

فاطمه خزایی^۱، محمد اسکندری ثانی^{۲*} , مفید شاطری^۳

۱. کارشناس ارشد جغرافیا و مخاطرات محیطی دانشگاه بیرجند
۲. دانشیار جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، دانشگاه بیرجند (نویسنده مسئول)
- ایمیل: meskandarisani@birjand.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-4871>
۳. دانشیار جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، دانشگاه بیرجند

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: آینده‌نگاری آب، سناریونگاری، دشت نیمبلوک، کیفیت زندگی، کارخانه فولاد.	بحران آب در مناطق نیمه‌خشک مانند خراسان جنوبی، با خشکسالی و افت آبخوان‌ها تشدید شده است. احداث کارخانه فولاد قائنات در دشت نیمبلوک، با مصرف بالای آب و پیامدهای زیست‌محیطی، آینده منابع آبی و سکونتگاه‌های انسانی منطقه را تهدید می‌کند. این پژوهش با هدف ارائه راه‌کارهای مدیریتی هوشمند، به آینده‌نگاری مسئله آب با تمرکز بر تأثیرات کارخانه فولاد می‌پردازد. مطالعه از نوع توصیفی-تحلیلی با هدف کاربردی است و داده‌ها از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی (مصاحبه و پرسشنامه) گردآوری شدند. جامعه آماری شامل ۱۱ متخصص برنامه‌ریزی منطقه‌ای و آب بود که با نمونه‌گیری در دسترس انتخاب شدند. ۳۶ متغیر مؤثر بر منابع آب شناسایی و با تحلیل ساختاری در نرم‌افزار MicMac، پیشران‌های کلیدی تعیین شدند. سپس، با پرسشنامه‌ای برای بررسی تأثیر پیشران‌ها در سناریوهای محتمل، داده‌ها با روش سناریوپردازی و نرم‌افزار Scenario Wizard تحلیل گردیدند. نتایج نشان داد که کیفیت آب شرب شهری، کیفیت آبرسانی، تمایل به مهاجرت، دسترسی به آب و استفاده از فاضلاب شهری قاین، پیشران‌های کلیدی هستند. تحلیل سناریوها حاکی از غلبه سناریوهای نامطلوب (۷۵ درصد) است که ضرورت مدیریت بهینه منابع آب و کاهش تنش‌های صنعتی را نشان می‌دهد. این پژوهش با پیش‌بینی ساختار مصرف آب در دشت نیمبلوک، چارچوبی برای سیاست‌گذاری کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت ارائه می‌دهد تا توسعه پایدار و مدیریت منابع آب محقق شود.

استناد: خزایی، فاطمه، اسکندری ثانی، محمد و شاطری، مفید . (۱۴۰۵). آینده نگاری مسأله آب با روش سناریوپردازی در سکونتگاه‌های انسانی دشت نیمبلوک با تمرکز بر کارخانه فولاد. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۱۴۰-۱۱۹.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52408.2119



مقدمه

بحران آب، چالشی فزاینده و چندوجهی در عصر حاضر است که بقا و توسعه پایدار جوامع انسانی را به طور جدی تهدید می کند. تغییرات اقلیمی، رشد بی رویه جمعیت، مصرف بی رویه و آلودگی منابع آبی، به ویژه آب های زیرزمینی، از جمله عوامل اصلی تشدیدکننده این بحران در سراسر جهان به شمار می روند (لیو و همکاران^۱، ۲۰۱۷؛ مکنون و هوکسترا^۲، ۲۰۱۶). ایران، به عنوان کشوری نیمه خشک، به شدت تحت تأثیر این چالش قرار گرفته و سوءمدیریت منابع آبی می تواند منجر به بی آبی و خشکی مناطق وسیعی از کشور شود. آب شیرین و قابل شرب، منبعی حیاتی است که جوامع به طور فزاینده ای به آن وابسته هستند (وورواسمارتی و همکاران^۳، ۲۰۱۰). علاوه بر این، آلودگی آب در ایران نیز، مشابه بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به دلیل پیشرفت تکنولوژی و فعالیت های انسانی رو به افزایش است و نیازمند توجه جدی تری است (حسنیان^۴، ۲۰۲۴؛ گران کاسترو^۵، ۲۰۲۳). در این شرایط ناپایدار، آینده پژوهی و آینده نگاری، به ویژه با رویکرد سناریوپردازی راهبردی، ابزاری حیاتی برای برنامه ریزان توسعه منطقه ای محسوب می شوند. این روش ها با ارائه درکی سیستماتیک از روندها و نیروهای مؤثر بر آینده، به شناسایی و طراحی مسیرهایی برای دستیابی به آینده مطلوب کمک می کنند. سناریوپردازی با ترسیم طیفی از آینده های محتمل (از آرمان شهری تا ویران شهری)، سیاست گذاران را در گرفتن تصمیم های آگاهانه در حوزه مدیریت منابع حیاتی همچون آب، یاری می رساند. این رویکرد برای برنامه ریزی و مدیریت بلندمدت آب ضروری است (بهشتی و همکاران^۶، ۲۰۲۱؛ زالی، ۱۳۹۸؛ زالی، ۱۳۹۰). استان خراسان جنوبی نمونه ای بارز از مناطق بحرانی آب در ایران است. ۹۹/۵ درصد از مصارف آب این استان از منابع زیرزمینی تأمین می شود. برداشت بی رویه و خشکسالی های مداوم، منجر به افت شدید سطح آب و کسری مخزن در اکثر دشت های استان شده است، به گونه ای که ۲۶ دشت از ۳۵ دشت استان اکنون ممنوعه برداشت هستند. پدیده فرونشست زمین نیز به عنوان یک تهدید جدی، نتیجه مستقیم این وضعیت است که سالانه ۱/۴۴ میلیارد مترمکعب اضافه برداشت آب را نشان می دهد (گزارش سازمان آب منطقه خراسان جنوبی ۱۴۰۰). فرونشست ماندگار دشت ها که بیشتر در اثر برداشت بیش از حد مجاز آب های زیرزمینی و فشرده شدن لایه های رسی میان آبخوان صورت می گیرد، غیرقابل بازگشت است و بالا آمدن مجدد سطح ایستایی به تراز اولیه خود را امکان پذیر نمی سازد (گالووی و همکاران^۷، ۲۰۱۱؛ شیرزاعی و همکاران^۸، ۲۰۲۱). دشت قاین و نیمبلوک به عنوان یکی از بحرانی ترین دشت های خراسان جنوبی شناخته شده است (مطالعات طرح آمایش سرزمینی خراسان جنوبی، ۱۴۰۰). در این منطقه، احداث و توسعه کارخانه فولاد قانات در دشت نیمبلوک، با وجود مزایای اشتغال زایی، تنش های آبی جدی را به وجود آورده است. با توجه به اینکه تولید هر کیلوگرم آهن به حدود ۱/۲ لیتر آب نیاز دارد و ظرفیت تولیدی این کارخانه در گام نخست به بیش از ۷۰۰ هزار مترمکعب می رسد که با افتتاح فاز بعدی به مراتب بیشتر خواهد بود، این صنعت فشار مضاعفی بر منابع آبی محدود منطقه وارد می کند. ایران در سال ۲۰۲۰ میلادی، با تولید

¹ - Liu et al

² - Mekonnen & Hoekstra

³ - Vörösmarty et al

⁴ - Hassaniyan

⁵ - Gran Castro

⁶ - Beheshti et al

⁷ - Galloway et al

⁸ - Shirzaei et al

نزدیک به ۳۰ میلیون تن فولاد، در جایگاه دهمین تولیدکننده بزرگ فولاد در جهان قرار داشته است (انجمن جهانی فولاد^۱، ۲۰۲۲).

توزیع مصرف آب در خراسان جنوبی نشان می‌دهد که بیشترین میزان آب مصرفی استان در بخش کشاورزی است. بر اساس آمارهای سازمان آب منطقه‌ای استان، ۹۳/۵ درصد آب استحصال‌شده در بخش کشاورزی، ۵/۰۲ درصد به مصارف خانگی و ۱/۴۸ درصد به بخش صنعت می‌رسد. با توجه به بحران آب و تأثیرات آن بر سکونتگاه‌های انسانی، هدف این پژوهش، آینده‌نگاری و سناریوپردازی مسئله آب در سکونتگاه‌های انسانی دشت نیمبلوک با تمرکز بر اثرات کارخانه فولاد است. این مطالعه به دنبال شناخت پیشران‌های کلیدی تأثیرگذار بر منابع آب منطقه و ارائه سناریوهای محتمل برای کمک به سیاست‌گذاری‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت در سطوح محلی و ملی است. ضرورت این پژوهش از وخامت روزافزون وضعیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه در استان خراسان جنوبی، ناشی می‌شود. این استان بیش از دو دهه است که با پدیده خشکسالی و تنش‌های شدید آبی دست و پنجه نرم می‌کند که پیامد آن افت شدید سطح آبخوان‌ها و تهدیدات جدی برای توسعه پایدار است. در چنین شرایطی، هرگونه برنامه توسعه‌ای، اعم از صنعتی یا کشاورزی، نیازمند ارزیابی دقیق و آینده‌نگرانه منابع آب و انرژی است.

پژوهش‌های متعددی در زمینه بحران آب و آینده‌نگاری مدیریت منابع آب در ایران و سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت گرفته است از جمله: یراقی فرد و شکوهی (۱۴۰۴) در پژوهشی تحت عنوان آینده‌پژوهی تاب‌آوری منابع آب با رویکرد برنامه‌ریزی سناریو مبنا (مطالعه موردی: حوزه آبخیز زاینده رود) به این نتیجه رسیده‌اند که نرخ رشد جمعیت، میزان مشارکت بخش خصوصی در سرمایه‌گذاری برای مدیریت آب، آموزش‌های مربوط به تغییر الگوی کشت، مناسب بودن کیفیت خدمات سازمان آب و فاضلاب، تأثیرگذاری میزان نزولات جوی به‌عنوان پیشران-های کلیدی مؤثر بر تاب‌آوری شناخته می‌شوند. کاویانی راد و همکاران (۱۴۰۳) با عنوان مقاله‌ای تحت عنوان اثرات بحران آب بر تدوین سناریوهای هیدروپلیتیک محور فراروی حوزه آبریز زاینده رود به این نتیجه رسیده‌اند که راه‌کار مدیریت بهینه منابع آب در سطح ملی و متناسب با آن در سطح حوزه آبریز زاینده‌رود، مناسب‌ترین راه‌کار برای جلوگیری از رخداد وضعیت بحرانی حوزه آبریز زاینده‌رود شناخته شد. جوادی و همکاران (۲۰۲۳). تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن تغییرات آتی کاربری اراضی و متغیرهای دینامیک آبخوان، برای مدیریت کیفیت و پایش مؤثر منابع آب ضروری است. نتایج حاکی از افزایش قابل‌توجه مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا در آینده (۱۴٪) در ۲۰۴۰ و ۵۰٪ در ۲۰۵۰ نسبت به ۲۰۲۰ است. این یافته‌ها اهمیت استفاده از نقشه‌های آسیب‌پذیری آینده‌نگر را در بهبود عملکرد مدیریت و پایش آبخوان‌ها برجسته می‌کند. طاهری دمنه و همکاران در سال ۱۴۰۱ در مقاله‌ای با عنوان آینده‌نگاری مسئله‌ی آب در شهر اصفهان به این نتیجه رسیده‌اند که مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده وضعیت آینده آب در شهر اصفهان نه عوامل محیطی، بلکه عوامل مربوط به تصمیم‌های انسانی هستند. سپهرآرا و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با روش توصیفی-تحلیلی بر پایه گردآوری اطلاعات و مطالعات میدانی و استفاده سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، به پیش‌بینی کوتاه‌مدت و درازمدت تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد برای سال‌های آینده در جهت حفظ منابع آب زیرزمینی، لازم است اقدامات پایشی ویژه‌ای در مناطق شمالی و شمال شرقی و شرقی آبخوان در نظر گرفته شود. رحیم حسینی

¹ - World Steel Association

² - Javadi et al

و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله‌ای با رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور، به ارائه مدل آینده‌پژوهانه مدیریت پایدار منابع آب پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برخلاف روش‌های برنامه‌ریزی سنتی، آینده فقط ادامه روندهای گذشته نیست؛ بلکه نیروهای عمده محیطی وضعیت آینده یک سیستم را شکل می‌دهند. بهشتی و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله‌ای با عنوان سناریوهای مدیریت منابع آب بر مبنای رویکرد آینده‌پژوهی: مطالعه‌ی موردی شهرستان تبریز، به بررسی عوامل مؤثر بر منابع آب در ابعاد منابع و مصرف پرداخته و آینده‌های جایگزین را در این زمینه تعریف کرده‌اند. هدف این مطالعه، ارزیابی سیستماتیک عوامل تأثیرگذار و تعریف سناریوهای مختلف برای مدیریت منابع آب بوده است. فرج‌زاده و همکاران^۱ (۲۰۰۷) به تحلیل بحران آب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در دشت نیشابور ایران پرداخته‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که کیفیت کشت و زرع برای اهداف کشاورزی، مهم‌ترین عامل مؤثر بر بحران آب در دشت نیشابور است و برای کاهش شدت این بحران، اتخاذ راهبردهای جدید از جمله بهبود کاربری اراضی و کشت گونه‌های با نیاز آبی کمتر ضروری است. این یافته‌ها بر اهمیت نقش GIS در شناسایی مناطق درگیر بحران و تدوین سیاست‌های مدیریتی مناسب تأکید دارد.

کین و همکاران^۲ (۲۰۱۹)، پروژه‌ی انتقال آب از جنوب به شمال در منطقه‌ی دشت شمال چین بررسی شد و ۱ سناریو در راستای مدیریت منابع آب شناسایی گردید که در همه‌ی آنها تأثیر تغییرات آب‌وهوایی لحاظ شده است. طبق یافته‌ها، این طرح انتقال، تنها می‌تواند بحران آب را کاهش داده و به تنهایی قادر به حل مشکل کمبود آب نیست. از این‌رو، در کنار آن ترکیبی از استراتژی‌های کاهش مصرف آب و استفاده از فناوری‌های نو و بازسازی بخش صنعت به جهت صرفه‌جویی در آب، مورد نیاز است. مک و همکاران^۳ (۲۰۱۹)، تحولات احتمالی وضعیت آینده‌ی آب‌های سطحی اروپا ارزیابی و دو سناریوی اقلیمی و سه خط داستانی تعریف شده است که کاربری زمین، مدیریت و تحولات جمعیتی را توصیف می‌کنند. نتایج تأکید بر لزوم اجرای اقدامات هدفمند برای کاهش اثرات انسانی دارد. از دیگر افرادی که در این زمینه پژوهش‌هایی انجام داده‌اند می‌توان به (وادا و همکاران، ۲۰۱۶؛ مانزانو و همکاران، ۲۰۱۹؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمانی و همکاران، ۲۰۱۹) نیز اشاره کرد.

این مطالعات، ضرورت آینده‌نگاری و سناریوپردازی در مدیریت منابع آب را تأیید می‌کنند و راهکارهای متعددی را برای مقابله با بحران آب ارائه می‌دهند که می‌تواند مبنایی برای این پژوهش در دشت نیمبلوک باشد.

داده‌ها و روش‌ها

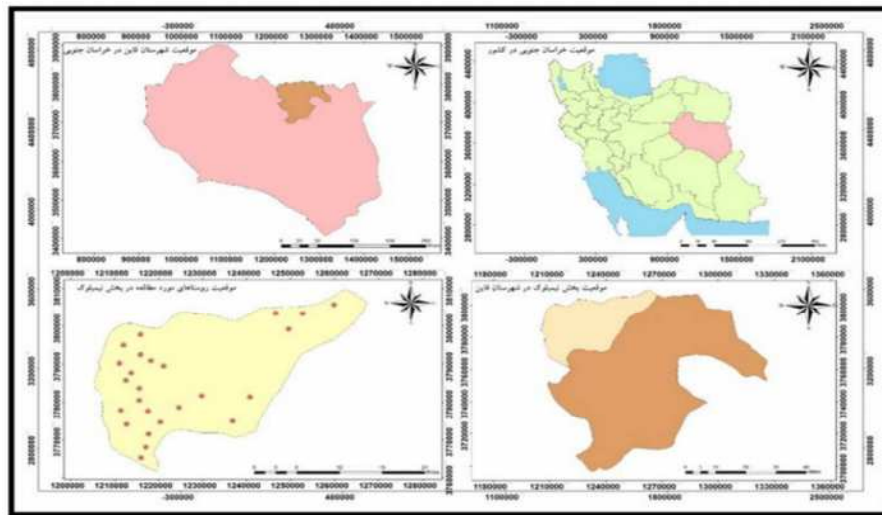
شهرستان قائنات از جمله شهرستان‌های خراسان جنوبی بوده که در حد فاصل ۳۳ تا ۳۴ درجه عرض شمالی و ۳۸ تا ۶۰ درجه طول شرقی واقع شده است که شمال آن با شهرستان‌های خواف و گناباد، غرب با فردوس و جنوب شهرستان بیرجند و از شرق ۱۶۹ کیلومتر با افغانستان مرز مشترک دارد. (جغرافیای استان، ۱۳۹۶). موقعیت ریاضی نیمبلوک عرض ۳۴/۱۲، ۳۳/۱۵ درجه و طول ۶۰/۵۶، ۵۸/۳۸ درجه است. این شهرستان از شرق به کشور افغانستان، از شمال به استان خراسان رضوی، از غرب به شهرستان سرایان و از جنوب به شهرستان‌های درمیان و بیرجند محدود شده است. موقعیت جغرافیایی دشت قاین که در این شهرستان واقع شده است، واقع در خراسان جنوبی ما

^۱ - Farajzadeh et al

^۲ - Qin et al

^۳ - Mack et al

بین طول های ۵۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۵۹ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و عرض های ۳۳ درجه و ۳۲ تا ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی واقع است (جغرافیای استان خراسان جنوبی، ۱۳۹۶).



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و طبیعی دشت قاین. منبع: نگارنده ۱۴۰۳

این پژوهش با روش توصیفی-تحلیلی با هدف کاربردی است. بدین منظور در این پژوهش، ابتدا بر اساس موضوع اصلی پژوهش (آینده نگاری آب در خراسان جنوبی)، به مرور مولفه ها و دیدگاه های مرتبط با مطالعات آب پرداخته شده است. در مرحله بعد، به منظور یافتن مهم ترین پیشران های کلیدی تاثیرگذار در منابع آب، پرسشنامه ای به صورت متقاطع که حاوی عوامل موثر در تغییرات منابع آب هستند، در اختیار جامعه آماری پژوهش شامل (۱۱ نفر از اساتید و متخصصین آب و رشته های جغرافیای سیاسی، جغرافیای طبیعی، علوم اجتماعی و علوم سیاسی) قرار گرفته است. این تعداد بر اساس نمونه گیری در دسترس در سطح منطقه است که خود جز محدودیت های این پژوهش است. اما از آنجایی که همه آنها بومی و کاملاً مسلط به مسایل منطقه اند، خیلی زود اشباع نظری حاصل شد. سپس، به منظور تحلیل یافته های پرسشنامه ای، نرم افزار میک مک استفاده می شود. روش ساختاری در این نرم افزار به این صورت است که روابط بین متغیرها به ویژه در سیستم های گسترده با ابعاد متعدد، تحلیل می شود (اسکندری ثانی و محمد آبادی، ۱۴۰۲). به کارگیری داده های کیفی در کنار داده های کمی، این روش را به یکی از پرکاربردترین روش های آینده نگاری تبدیل نموده است (کیانی و همکاران، ۱۴۰۴). در نهایت، به منظور بررسی آینده تحولات منابع آبی و تاثیر آن به دشت نیمبلوک از نرم افزار سناریو ویزارد استفاده شده است.

یافته های پژوهش

این پژوهش با هدف تحلیل جامع عوامل موثر بر مصرف آب در دشت نیمبلوک و بررسی سناریوهای محتمل آینده با استفاده از روش های تحلیل ساختاری (میک مک^۱) و تحلیل سناریو (سناریو ویزارد^۲) انجام شده است. در این راستا، ۳۶ متغیر مرتبط با مصرف آب در منطقه شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

^۱ - MICMAC

^۲ - Scenario Wizard

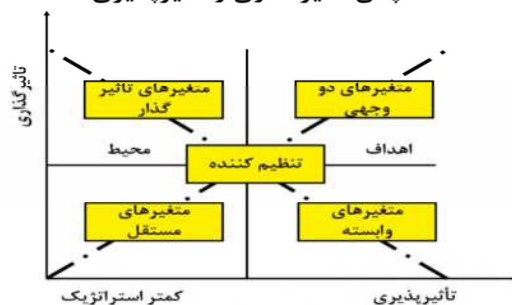
جدول ۱: متغیرهای موثر مصرف آب

نام متغیر	نام اختصاری	نام متغیر	نام اختصاری	نام متغیر	نام اختصاری
دسترسی به آب	Var01	میزان آسایش و رفاه شهروندان	Var13	کیفیت مصرفی آب صنعتی	Var25
کیفیت آبرسانی در شهر	Var02	دلبستگی به شهر	Var14	انتقال آب از دریای عمان	Var26
آلودگی هوا	Var03	کیفیت آب‌های زیرزمینی	Var15	انتقال آب بین حوزه‌ای	Var27
الودگی صوتی	Var04	کیفیت تصفیه آب	Var16	میزان مصرف آب خانگی	Var28
آلودگی آب	Var05	میزان بارش سالیانه	Var17	میزان آب مصرف صنعتی	Var29
کیفیت آب شرب شهری	Var06	منابع آبی	Var18	برنامه آبی برای انتقال آب از لب دریا	Var30
کیفیت جمع‌آوری فاضلاب در شهر	Var07	میزان برداشت سالیانه از منابع آبی زیرزمینی	Var19	میزان بهره‌وری از تصفیه فاضلاب آب شهری	Var31
کیفیت جمع‌آوری زباله	Var08	میزان روان‌آب‌ها	Var20	استفاده از فاضلاب شهری قاین و انتقال آن	Var32
تمایل به مهاجرت از شهر	Var09	مقدار تصفیه سالیانه آب	Var21	صادرات آب مجازی	Var33
کیفیت برق‌رسانی	Var10	میزان مصرفی آب کشاورزی	Var22	واردات آب مجازی	Var34
دسترسی به گاز طبیعی	Var11	میزان صادرات آب	Var23	وضعیت منابع فعلی آب	Var35
میزان احساس امنیت شهروندان	Var12	میزان واردات آب	Var24	آینده تکنولوژی‌هایی که کاهش شدید مصرف آب را در پی دارد.	Var36

ارزیابی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متغیرها بر اساس روابط مستقیم آن‌ها

صفحه پراکندگی متغیرها در تحلیل میک مک، پایداری سیستم را مشخص می‌کند. در سیستم‌های پایدار، پراکنش متغیرها به شکل ال انگلیسی است و سه دسته متغیر تأثیرگذار (عوامل کلیدی)، مستقل و خروجی با نقش‌های واضح قابل تشخیص هستند. در مقابل، سیستم‌های ناپایدار پراکنش حول محور قطری دارند و بیشتر متغیرها وضعیت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بینابینی نشان می‌دهند که شناسایی عوامل کلیدی را دشوار می‌سازد. در این نوع سیستم، متغیرها به دسته‌های تأثیرگذار، دو وجهی (شامل متغیرهای ریسک و هدف که پیشران تغییر هستند)، تأثیرپذیر (وابسته و خروجی)، مستقل (با ارتباط کم) و تنظیمی تقسیم می‌شوند.

پلان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری



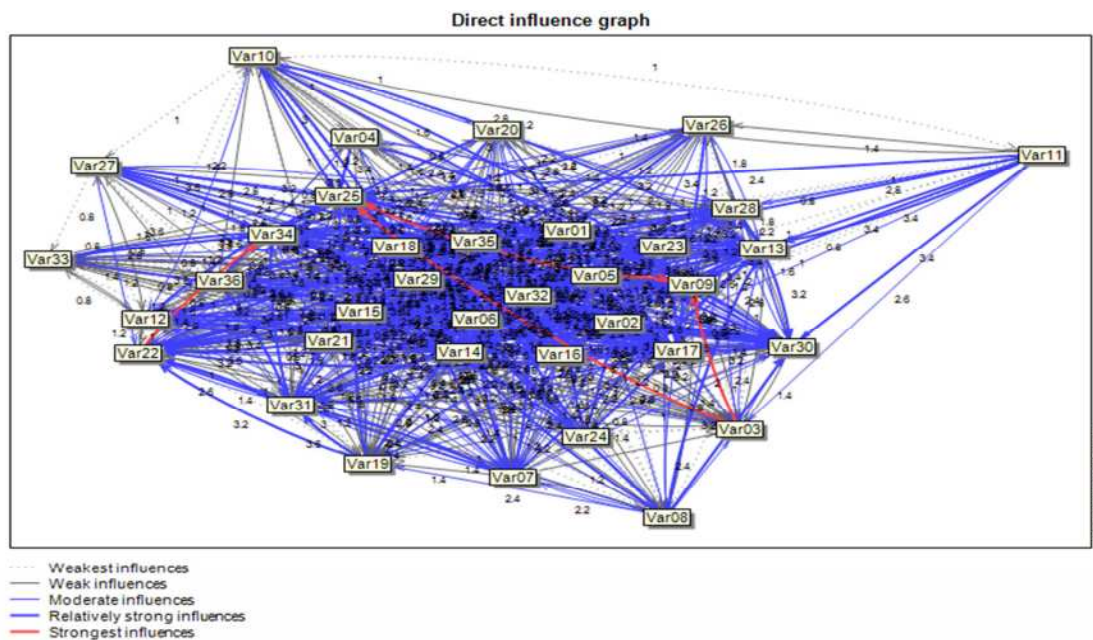
شکل ۳: متغیرهای تأثیرگذار و تأثیرپذیر. منبع: زارعی و همکاران، ۱۳۹۷

بررسی وضعیت مصرف آب در نیمبلوک نشان می‌دهد که سیستم ناپایدار است و متغیرها دارای تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم هستند. بر اساس تحلیل تأثیر مستقیم، تأثیرگذارترین عوامل با امتیاز بالا عبارتند از منابع آبی، میزان

احساس امنیت شهروندان، انتقال آب بین حوزه های و دسترسی به گاز طبیعی. در مقابل، تاثیرپذیرترین عوامل مستقیم با امتیاز بالا شامل کیفیت آب شرب شهری، منابع آبی و برنامه آبی انتقال آب از لب دریا می باشند. این وضعیت ناپایدار نشان دهنده تعاملات پیچیده بین عوامل مختلف موثر بر مصرف آب در منطقه است.

متغیرهای دو وجهی (بسیار تاثیرگذار و تاثیرپذیر) شامل میزان آب مصرف صنعتی، آلودگی آب، کیفیت آب شرب و زیرزمینی، مصرف آب کشاورزی، واردات و صادرات آب (حقیقی و مجازی)، انتقال آب (دریای عمان و بین حوزه های)، کیفیت آبرسانی و تصفیه (آب و فاضلاب)، تکنولوژی کاهش مصرف، وضعیت فعلی منابع، دسترسی و مصرف آب (صنعتی و خانگی)، برداشت از آب های زیرزمینی و برنامه های آبی انتقال آب هستند (شمال شرقی نمودار). متغیرهای وابسته (تاثیرپذیری بالا) نظیر احساس امنیت، کیفیت مصرف صنعتی، دلبستگی و تمایل به مهاجرت و آسایش در جنوب شرقی قرار دارند. متغیرهای تاثیرگذار (تاثیرگذاری بالا) شامل میزان بارش و روان آب ها و کیفیت جمع آوری فاضلاب در شمال غربی هستند. متغیرهای مستقل (تاثیر کم) مانند آلودگی هوا و صوتی، کیفیت جمع آوری زباله و برق رسانی و دسترسی به گاز در جنوب نمودار واقع شده اند.

شکل ۴، پوشش ۱۰۰ درصدی مستقیم روابط قابل مشاهده است که تمامی روابط با شدت خیلی قوی، نسبتا قوی، متوسط ضعیف و خیلی ضعیف را نشان می دهد.



شکل ۴: پراکندگی متغیرها بر اساس تاثیرات مستقیم متغیرها بر اساس خروجی میک مک. منبع: نگارنده ۱۴۰۳

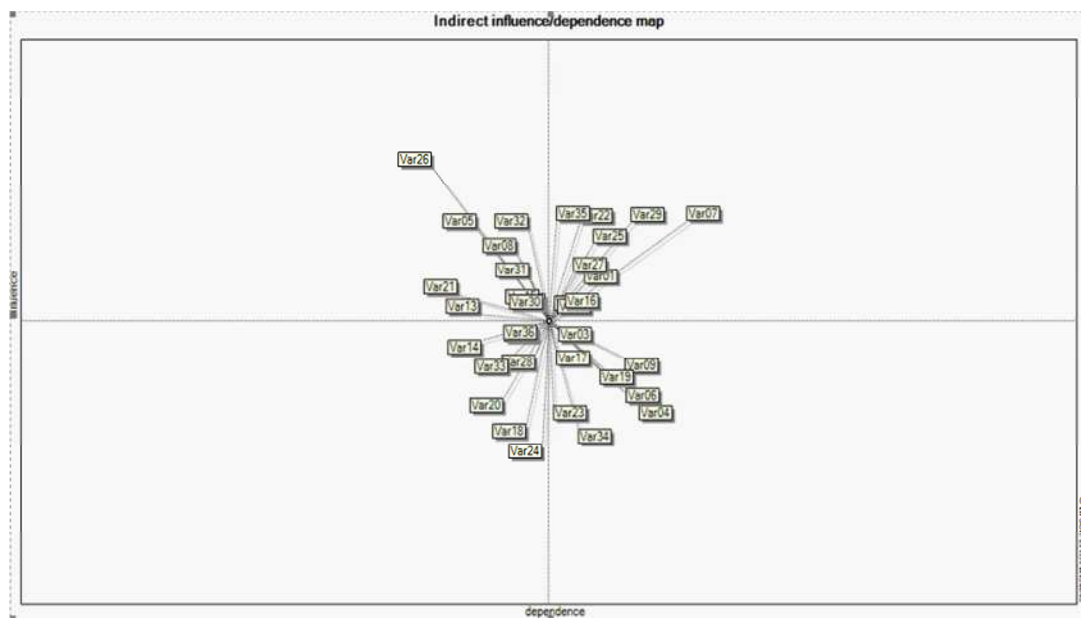
ارزیابی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری غیرمستقیم متغیرها

تحلیل تاثیرات غیرمستقیم متغیرها نشان داد که "آینده تکنولوژی هایی که کاهش شدید مصرف آب را در پی دارد" با امتیاز ۵۴۱، تاثیرگذارترین عامل غیرمستقیم بر سیستم مصرف آب در نیمبلوک است. این امر بیانگر اهمیت بالقوه نوآوری های فناورانه در مدیریت آبی منابع آب منطقه دارد. در رتبه های بعدی تاثیرگذاری غیرمستقیم، متغیرهای "کیفیت آب شرب شهری" امتیاز ۵۱۲، "کیفیت آب های زیرزمینی" امتیاز ۵۱۲، "کیفیت تصفیه آب" امتیاز ۵۱۲ و

"میزان بارش سالیانه" امتیاز ۵۱۲ قرار دارند که نشان‌دهنده نقش محوری کیفیت منابع آب و شرایط اقلیمی در پویایی‌های بلندمدت مصرف آب هستند.

از سوی دیگر، "میزان مصرفی آب کشاورزی" با امتیاز ۵۶۲، به‌عنوان تاثیرپذیرترین عامل غیرمستقیم شناسایی شد. این موضوع بر حساسیت بخش کشاورزی به تغییرات در سایر متغیرهای سیستم و اهمیت مدیریت مصرف آب در این بخش تاکید می‌کند. "وضعیت منابع فعلی آب" با امتیاز ۵۴۱ و "مقدار تصفیه سالیانه آب" با امتیاز ۵۲۱ نیز در زمره تاثیرپذیرترین عوامل غیرمستقیم قرار دارند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری وضعیت موجود منابع آب و اهمیت ظرفیت تصفیه در مواجهه با تغییرات آتی است.

با توجه به شکل ۵، نزدیکی متغیرهایی نظیر "کیفیت تصفیه آب"، "کیفیت آبرسانی در شهر"، "آلودگی هوا"، "برنامه آبی برای انتقال آب از لب دریا" و "آینده تکنولوژی‌هایی که کاهش شدید مصرف آب را در پی دارد" به مرکز صفحه پراکنده‌گی، نقش محوری آن‌ها به‌عنوان متغیرهای کلیدی و تنظیم‌کننده در سیستم را برجسته می‌سازد. قرارگیری تمامی متغیرها نزدیک به مرکز نیز موید ناپایداری سیستم و وجود تعاملات قوی بین متغیرها است.



شکل ۵: پراکنده‌گی متغیرها براساس تاثیرات غیرمستقیم متغیرها. منبع: نگارنده ۱۴۰۳

جدول ۲، رتبه‌بندی تاثیرات مستقیم و غیرمستقیم متغیرها بر یکدیگر را نشان می‌دهد و سهم هر متغیر از کل سیستم را در مقیاس ده هزار ارائه می‌کند. این جدول به شناسایی متغیرهای با بیشترین نقش در پویایی‌های کلی سیستم کمک می‌کند.

جدول ۲: رتبه بندی تاثیرات مستقیم و غیر مستقیم متغیرها بر هم دیگر

ردیف	تاثیر مستقیم				تاثیر غیر مستقیم			
	نام اختصار	تاثیرگذاری	نام اختصار	تاثیرپذیری	نام اختصار	تاثیرگذاری	نام اختصار	تاثیرپذیری
۱	Var36	۴۴۰	Var01	۴۵۶	Var32	۳۶۹	Var34	۵۰۱
۲	Var17	۴۸۷	Var13	۴۱۳	Var12	۴۶۵	Var02	۴۱۲
۳	Var18	۵۱۲	Var29	۵۰۹	Var22	۴۹۷	Var18	۴۶۵
۴	Var35	۴۱۳	Var17	۴۱۳	Var06	۵۱۲	Var16	۴۲۸
۵	Var05	۴۲۹	Var09	۴۶۴	Var31	۴۱۵	Var32	۴۰۰
۶	Var06	۴۱۳	Var25	۴۲۳	Var16	۵۱۲	Var12	۵۱۴
۷	Var21	۴۱۲	Var14	۴۵۶	Var18	۴۸۰	Var22	۵۶۲
۸	Var07	۴۱۳	Var30	۵۱۲	Var35	۴۱۷	Var06	۴۱۵
۹	Var15	۴۳۵	Var35	۴۷۹	Var05	۴۰۰	Var31	۴۱۵
۱۰	Var31	۴۷۵	Var34	۴۱۲	Var02	۴۱۲	Var08	۴۱۶
۱۱	Var30	۴۸۵	Var02	۴۵۶	Var13	۴۱۰	Var28	۴۸۱
۱۲	Var27	۴۹۹	Var18	۵۱۲	var25	۴۸۶	Var19	۴۱۳
۱۳	Var01	۴۴۵	Var16	۴۱۳	var27	۳۹۹	Var36	۴۷۶
۱۴	Var02	۴۴۵	Var32	۴۶۱	Var15	۵۱۲	Var17	۴۹۷
۱۵	Var26	۴۷۰	Var12	۴۹۹	Var21	۴۶۷	Var15	۴۱۷
۱۶	Var24	۴۲۷	Var28	۴۶۴	Var28	۳۸۴	Var35	۵۴۱
۱۷	Var32	۴۵۶	Var15	۴۱۳	Var20	۴۹۵	Var07	۴۱۵
۱۸	Var20	۴۱۲	Var31	۴۹۹	Var09	۴۱۳	Var11	۴۷۵
۱۹	Var08	۴۶۴	Var22	۴۹۳	Var04	۴۷۲	Var01	۴۱۳
۲۰	Var28	۴۵۶	Var05	۴۲۷	Var24	۴۸۶	Var13	۵۰۸
۲۱	Var19	۴۱۲	Var21	۴۱۲	Var03	۴۰۵	Var29	۴۱۶
۲۲	Var22	۴۶۴	Var06	۵۸۹	Var26	۴۷۰	Var14	۵۰۰
۲۳	Var29	۴۷۰	Var07	۴۷۹	Var10	۴۱۳	Var25	۴۸۶
۲۴	Var13	۴۱۳	Var23	۴۹۸	Var11	۴۹۸	Var23	۴۱۷
۲۵	Var16	۴۳۵	Var19	۴۱۲	Var08	۴۱۷	Var20	۴۵۶
۲۶	Var09	۴۶۴	Var03	۴۱۳	Var17	۵۱۲	Var27	۴۷۰
۲۷	Var34	۴۱۲	Var36	۴۷۸	Var01	۴۴۲	Var09	۴۲۶
۲۸	Var14	۴۳۲	Var33	۴۳۲	Var34	۴۶۷	Var04	۴۱۵
۲۹	Var10	۴۸۷	Var04	۴۴۲	Var14	۴۶۳	Var24	۴۸۶
۳۰	Var25	۴۴۲	Var20	۴۱۲	Var07	۴۸۴	Var03	۴۸۶
۳۱	Var03	۴۰۸	Var24	۴۱۶	Var23	۴۱۷	Var26	۴۸۶
۳۲	Var12	۴۹۹	Var08	۴۷۰	Var19	۴۵۱	Var10	۴۹۸
۳۳	Var11	۴۹۰	Var26	۴۷۰	Var30	۴۶۵	Var21	۵۲۱
۳۴	Var33	۴۱۳	Var10	۴۶۴	Var36	۵۴۱	Var05	۴۱۵
۳۵	Var23	۴۵۶	Var27	۴۷۶	Var33	۴۹۱	Var33	۴۶۰
۳۶	Var04	۴۷۰	Var11	۴۹۰	Var29	۴۴۴	Var30	۴۶۵

انتخاب پیشران‌های کلیدی

با تلفیق امتیازات تاثیر مستقیم و غیرمستقیم، جدول ۳ به دست آمده که با توجه به مجموع امتیازات، پنج پیشران کلیدی موثر بر آینده مصرف آب در نیمبلوک به ترتیب اهمیت شناسایی شدند.

جدول ۳: مجموع امتیازات تأثیرات غیرمستقیم متغیرها بر همدیگر

ردیف	نام متغیر	مجموع امتیازات
۱	کیفیت آب شرب شهری	۳۷۴۵
۲	کیفیت آبرسانی در شهر	۳۴۵۱
۳	تمایل به مهاجرت از شهر	۳۲۰۵
۴	دسترسی به آب	۳۱۰۶
۵	استفاده از فاضلاب شهری قاین و انتقال آن	۳۱۰۴
۶	میزان آسایش و رفاه شهروندان	۳۰۰۵
۷	کیفیت جمع آوری فاضلاب در شهر	۳۰۰۲
۸	دلبستگی به شهر	۲۹۹۸
۹	آلودگی هوا	۲۹۸۷
۱۰	کیفیت برق رسانی	۲۹۶۳
۱۱	کیفیت تصفیه آب	۲۹۶۳
۱۲	میزان احساس امنیت شهروندان	۲۷۴۶
۱۳	آلودگی صوتی	۲۷۴۱
۱۴	کیفیت جمع آوری زباله	۲۶۴۱
۱۵	کیفیت آب‌های زیرزمینی	۲۶۴۱
۱۶	دسترسی به گاز طبیعی	۲۶۴۱
۱۷	صادرات آب مجازی	۲۶۴۱
۱۸	منابع آبی	۲۶۴۱
۱۹	میزان برداشت سالیانه از منابع آبی زیرزمینی	۲۶۴۱
۲۰	میزان روان آب‌ها	۲۵۰۴
۲۱	آلودگی آب	۲۴۹۹
۲۲	میزان مصرفی آب کشاورزی	۲۳۲۱
۲۳	برنامه آبی برای انتقال آب از لب دریا	۲۳۱۲
۲۴	میزان واردات آب	۲۲۲۵
۲۵	میزان بارش سالیانه	۲۲۲۵
۲۶	آینده فناوری‌هایی که کاهش شدید مصرف آب را در پی دارد	۲۲۰۰
۲۷	انتقال آب بین حوزه‌ای	۲۱۹۹
۲۸	میزان مصرف آب خانگی	۲۱۹۹
۲۹	میزان آب مصرف صنعتی	۲۱۹۹
۳۰	میزان صادرات آب	۲۱۰۹
۳۱	میزان بهره‌وری از تصفیه فاضلاب آب شهری	۲۰۹۸
۳۲	مقدار تصفیه سالیانه آب	۲۰۷۸
۳۳	کیفیت مصرفی آب صنعتی	۲۰۵۲
۳۴	واردات آب مجازی	۲۰۲۵
۳۵	وضعیت منبع فعلی آب	۲۰۱۷
۳۶	انتقال آب از دریای عمان	۲۰۰۸

این پیشران‌های کلیدی به‌عنوان محورهای اصلی برای تدوین سناریوهای آینده مصرف آب در منطقه مورد استفاده قرار گرفتند.

تدوین وضعیت‌های احتمالی پیشران‌های کلیدی

بر اساس نظرخواهی از کارشناسان به روش دلفی، برای هر یک از پنج پیشران کلیدی، پنج وضعیت محتمل (از مطلوب تا بحرانی) تعریف گردید. به‌عنوان مثال، برای پیشران "کیفیت آب شرب شهری"، وضعیت‌های احتمالی شامل افزایش چشمگیر کیفیت، افزایش نسبی کیفیت، تداوم وضعیت موجود (در آستانه بحران)، افزایش نسبی آلودگی و بروز آلودگی آب شرب شهری در منطقه در نظر گرفته شد. این وضعیت‌های احتمالی، مبنای تشکیل ماتریس اثرگذاری متقابل در نرم‌افزار سناریو ویزارد قرار گرفتند.

تشکیل ماتریس اثرگذاری متقابل و نتایج سناریو ویزارد:

در راستای مطالب بیان‌شده در بخش قبل، به منظور تدوین استراتژی‌ها، از نرم‌افزار سناریو ویزارد استفاده شده است و از آرا ۹ نفر از نخبگان به منظور تکمیل پرسشنامه متقاطع بهره گرفته شد. بدین منظور، پس از شناسایی پیشران‌های کلیدی و وضعیت‌های مختلف آن‌ها، به‌عنوان عناصر اصلی تشکیل‌دهنده سناریوهای پژوهش انتخاب شدند؛ به صورتی که ۵ پیشران اصلی در قالب ۲۵ حالت دارای عدم قطعیت، ماتریسی با ابعاد (۲۵*۲۵) را تشکیل داد. سپس پرسشنامه‌ای در چارچوب ماتریس اثرگذاری متقاطع طراحی شد و در اختیار متخصصان قرار گرفت و سؤال اصلی طرح‌شده در این زمینه این بود که "اگر هر یک از وضعیت‌های ۲۵گانه اتفاق بیفتد چه تأثیری بر وقوع یا عدم وقوع سایر وضعیت‌ها خواهد داشت؟ در نهایت با تحلیل ماتریس اثرگذاری متقابل (۲۵*۲۵) در نرم‌افزار سناریو ویزارد، ۸ سناریوی قوی، ۷۸۱ سناریوی ضعیف و ۱۱۷۱۵۱ سناریوی ناسازگار شناسایی شد.

تحلیل و ارزیابی سناریوهای قوی

از بین ۸ سناریوی قوی، ۲ سناریو دارای وضعیت مطلوب، ۳ سناریو دارای وضعیت بینابین و ۳ سناریو نمایشگر وضعیت‌های بحرانی مصرف آب بودند. بررسی تخته سناریو ها نشان داد که از مجموع ۴۰ وضعیت در ۸ سناریوی قوی، ۵ حالت مطلوب، ۵ حالت نیمه مطلوب، ۱۴ حالت بینابینی، ۹ حالت نیمه بحرانی و ۷ حالت بحرانی وجود دارد. این توزیع نشان می‌دهد که ۷۵٪ از حالت‌های سناریوهای قوی حاکی از بروز وضعیت‌های نامطلوب (بینابینی رو به بحران، نیمه بحرانی و بحرانی) در آینده مصرف آب در منطقه است.

تحلیل سناریو های منتخب (۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) برای وضعیت هر یک از پیشران‌های کلیدی در هر سناریو به طور خلاصه در زیر بیان شده است:

* سناریوهای ۱ و ۲ وضعیت مطلوب را با تاکید بر بهبود کیفیت آب شرب و آبرسانی، کاهش تمایل به مهاجرت، افزایش دسترسی به آب و توسعه استفاده از فاضلاب شهری نشان می‌دهند.

* سناریوهای ۳ و ۴ وضعیت بینابینی (تداوم وضعیت موجود) را به تصویر می‌کشند که در آن هیچ تغییر مثبت یا منفی چشمگیری در پیشران‌های کلیدی رخ نمی‌دهد.

* سناریو ۵ وضعیت بینابینی رو به بحران را نشان می‌دهد که در آن آلودگی آب شرب افزایش یافته و سایر پیشران‌ها در وضعیت موجود باقی می‌مانند.

* سناریوهای ۶، ۷ و ۸ وضعیت‌های بحرانی را با تاکید بر افزایش آلودگی آب شرب، کاهش کیفیت آبرسانی، افزایش تمایل به مهاجرت، کاهش دسترسی به آب و کاهش استفاده از فاضلاب شهری به تصویر می‌کشند.

جدول ۴: نمایی کلی از ۸ سناریو قوی

سناریو	وضعیت کلی	تحلیل و ارزیابی	عوامل تاثیرگذار	نتیجه‌گیری
سناریو ۱	مطلوب	افزایش کیفیت آب شرب و دسترسی به منابع آبی	افزایش مصرف آب خانوار، کاهش شوری آب	نیاز به برنامه‌ریزی برای حفظ کیفیت آب و مدیریت منابع
سناریو ۲	مطلوب	بهبود نسبی کیفیت آب شرب، اما نیاز به توجه بیشتر	افزایش مصرف آب خانوار، کاهش شوری	توجه به مدیریت منابع و افزایش آگاهی خانوارها
سناریو ۳ و ۴	بینابین	تداوم وضعیت موجود، عدم تغییر محسوس	عدم تغییر در جمعیت و کیفیت آب	نیاز به اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از بحران
سناریو ۵	بینابین	آلودگی آب شرب در حال افزایش، کیفیت آب در خطر	عدم تغییر در مصرف آب و شوری	نیاز به برنامه‌ریزی فوری برای بهبود کیفیت آب
سناریو ۶	بحرانی	کاهش کیفیت آبرسانی و تمایل به مهاجرت	عدم تغییر در جمعیت و کیفیت آب	نیاز به اقدامات فوری برای جلوگیری از بحران
سناریو ۷	بحرانی	کاهش شدید کیفیت آب و دسترسی به منابع آبی	عدم تغییر در الگوهای مصرف و تأمین مالی	نیاز به تغییرات اساسی در مدیریت منابع آب
سناریو ۸	بحرانی	بروز آلودگی و کاهش شدید کیفیت آب	عدم تغییر در الگوهای مصرف و تأمین مالی	نیاز به اقدامات فوری و جامع برای مدیریت بحران

بر اساس نتایج استخراج‌شده از نرم‌افزار میک مک، ۵ عامل کلیدی بر اساس تحلیل‌ها شناسایی شدند که به‌عنوان محورهای اصلی آینده تأثیرات موثر بر مصرف آب هستند. این عوامل در صحنه پیشروی برنامه‌ریزی، در وضعیت‌های مختلفی قابل‌تصور هستند که این وضعیت‌های احتمالی در آینده مسائل مربوط مصرف آب در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. بر همین اساس، تحلیل دقیق شرایط پیش‌رو و تعریف وضعیت‌های احتمالی مبنایی مهم برای تدوین سناریوها است. از این‌رو، به منظور تدوین وضعیت‌های احتمالی از طریق روش دلفی از کارشناسان متخصص نظرخواهی شده که در نهایت با جمع‌بندی آن‌ها ۲۵ وضعیت محتمل برای ۵ عامل تعریف گردید.

با توجه به مجموع تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان گفت که خروجی‌های نرم‌افزار حاصل از پژوهش، در سطح بالایی با واقعیت‌های بیان‌شده در تأثیر مؤلفه‌های موثر در مصرف آب در نیم‌بلوک انطباق دارد. به نحوی که در چارچوب مطالعات استراتژیک و آینده‌نگرانه و با بهره‌گیری از رویکرد سناریو نگاری، می‌توان ضمن سنجش وضعیت سیستم مؤلفه‌های جمعیتی در زمینه مصرف آب در شهرستان قاینات، الگوی پایداری یا ناپایداری آن را نیز از طریق چگونگی توزیع و پراکنش متغیرها در صفحه پراکندگی، در روش تحلیل اثرات متقاطع و ساختاری نرم‌افزار میک مک تحلیل نمود. بر این اساس می‌توان گفت سیستم مؤلفه‌های جمعیتی در زمینه مصرف آب در نیم‌بلوک از ناپایداری شدید برخوردار بوده است. بنابراین، با بهره‌گیری از نرم‌افزار آینده‌نگاری سناریو ویزارد، ۸ سناریوی قوی با ۴۰ وضعیت مختلف تقسیم شده است، در مجموع ۴۰ وضعیت مختلف در تخته سناریوها قوی دیده می‌شود. از این ۴۰ وضعیت، ۷ وضعیت بحرانی، ۹ وضعیت نیمه بحرانی، ۱۴ وضعیت بینابین، ۵ وضعیت نیمه مطلوب و ۵ وضعیت مطلوب بوده است که غلبه بر وضعیت‌های نامطلوب بر مطلوب است.

نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده وضعیت ناپایدار سیستم مصرف آب در دشت نیمبلوک است که تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های صنعتی نظیر کارخانه فولاد قائنات و تغییرات اقلیمی قرار دارد. تحلیل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار میک مک و شناسایی ۳۶ متغیر تأثیرگذار بر مصرف آب، پیچیدگی تعاملات میان عوامل طبیعی، انسانی و صنعتی را در این منطقه آشکار کرد. پنج پیشران کلیدی شناسایی شده (کیفیت آب شرب شهری، کیفیت آبرسانی در شهر، تمایل به مهاجرت از شهر، دسترسی به آب و استفاده از فاضلاب شهری قاین و انتقال آن) نقش محوری در شکل‌دهی آینده منابع آبی دشت نیمبلوک دارند. این پیشران‌ها نه تنها به مسائل زیست‌محیطی، بلکه به ابعاد اجتماعی و اقتصادی مانند مهاجرت و کیفیت زندگی در سکونتگاه‌های انسانی نیز اشاره دارند. تحلیل سناریوها با استفاده از نرم‌افزار سناریو ویزارد نشان داد که از میان ۸ سناریوی قوی، ۷۵ درصد وضعیت‌های پیش‌بینی شده (بینابینی رو به بحران، نیمه‌بحرانی و بحرانی) حاکی از آینده‌ای نامطلوب برای منابع آبی منطقه است. این امر به‌ویژه با توجه به فشار مضاعف کارخانه فولاد قائنات که برای تولید هر کیلوگرم فولاد ۱٫۲ لیتر آب مصرف می‌کند و ظرفیت تولید آن در فاز نخست بیش از ۷۰۰ هزار مترمکعب است، نگران‌کننده است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین مانند حسینیان (۲۰۲۴) و شیرزایی و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد که به ترتیب بر بی‌عدالتی زیست‌محیطی در سیاست‌های آبی ایران و فرونشست غیرقابل بازگشت ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی تأکید کرده‌اند. سناریوهای مطلوب (سناریوهای ۱ و ۲) که بهبود کیفیت آب شرب، آبرسانی و استفاده از فاضلاب شهری را نشان می‌دهند، تنها در صورت اتخاذ سیاست‌های جامع و آینده‌نگرانه قابل تحقق هستند. این سیاست‌ها شامل کاهش مصرف آب صنعتی، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تصفیه و بازچرخانی آب و اصلاح الگوهای مصرف در بخش کشاورزی (که ۹۳٫۵ درصد آب منطقه را مصرف می‌کند) است. از سوی دیگر، سناریوهای بحرانی (۶، ۷ و ۸) نشان‌دهنده پیامدهای فاجعه‌بار ادامه روند کنونی، از جمله افزایش آلودگی آب، کاهش دسترسی به منابع آبی و تشدید مهاجرت از منطقه هستند. این نتایج با پژوهش‌های جوادی و همکاران (۲۰۲۳) و بهشتی و همکاران (۲۰۲۱) هم‌راستاست که بر اهمیت پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها و تدوین سناریوهای مدیریتی تأکید دارند. یکی از نکات برجسته این پژوهش، نقش فناوری‌های کاهش مصرف آب به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل غیرمستقیم است. این یافته با مطالعات کین و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد که نشان داد فناوری‌های نوین و استراتژی‌های صرفه‌جویی در کنار انتقال آب می‌توانند بحران آب را کاهش دهند. با این حال، ناپایداری سیستم مصرف آب در دشت نیمبلوک، همان‌طور که از پراکندگی متغیرها در تحلیل میک مک مشخص شد، نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در سیاست‌های توسعه صنعتی و کشاورزی منطقه است. به‌ویژه، توسعه کارخانه فولاد بدون برنامه‌ریزی دقیق برای تأمین آب پایدار، می‌تواند به تشدید فرونشست زمین و تخریب اکوسیستم‌های محلی منجر شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با شناسایی پیشران‌های کلیدی و تدوین سناریوهای محتمل، چارچوبی واقع‌بینانه برای آینده‌نگاری بحران آب در دشت نیمبلوک ارائه داد. نتایج نشان داد که کیفیت آب شرب شهری، آبرسانی، دسترسی به آب، استفاده از فاضلاب شهری و تمایل به مهاجرت، محورهای اصلی مدیریت منابع آب در این منطقه هستند. غلبه

سناریوهای نامطلوب (۷۵ درصد) بر سناریوهای مطلوب، زنگ خطری برای سیاست‌گذاران است که ادامه روند کنونی می‌تواند به بحران‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی منجر شود. فشار مضاعف کارخانه فولاد قائنات با مصرف ۱,۲ لیتر آب به ازای هر کیلوگرم فولاد و نیاز سالانه بیش از ۷۰۰ هزار مترمکعب در فاز نخست در کنار سلطه بخش کشاورزی سنتی، (۹۳,۵٪ مصرف آب)، این ناپایداری را تشدید و ابعاد بی‌عدالتی زیست‌محیطی را برجسته می‌سازد. این یافته‌ها، با تأکید بر نقش فناوری‌های کاهش مصرف، به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل غیرمستقیم، نوآوری مطالعه را در ادغام سناریوپردازی با تمرکز محلی بر صنعت فولاد در یک منطقه نیمه‌خشک نشان می‌دهد و چارچوبی کاربردی فراتر از مطالعات پیشین مانند بهشتی ۲۰۲۱ را ارائه می‌کند. برای دستیابی به سناریوهای مطلوب (۱ و ۲) که بهبود کیفیت آب، کاهش مهاجرت و افزایش دسترسی را پیش‌بینی می‌کنند، سیاست‌گذاری یکپارچه و فوری ضروری است:

*** کوتاه‌مدت:** الزام کارخانه فولاد قائنات به پیاده‌سازی سیستم‌های بازچرخانی آب و کاهش مصرف به کمتر از ۰,۸ لیتر/کیلوگرم با استفاده از فناوری‌های موفق.

*** میان‌مدت:** سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تصفیه و انتقال فاضلاب شهری قاین برای تأمین حداقل ۵۰٪ نیازهای صنعتی از منابع بازیافتی که می‌تواند تمایل به مهاجرت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

*** بلندمدت:** اصلاح الگوی کشاورزی با جایگزینی حداقل ۴۰٪ محصولات پرآب‌بر با گونه‌های مقاوم به خشکی و گسترش آبیاری هوشمند، همراه با پایش مداوم آبخوان‌ها.

هرچند محدودیت‌هایی مانند نمونه کوچک کارشناسان (۱۱ نفر) و دسترسی محدود به داده‌های بلندمدت وجود داشت، تمرکز بر متخصصان محلی نتایج را کاربردی‌تر ساخت. تحقیقات آینده می‌تواند با گسترش نمونه (به بیش از ۵۰ کارشناس)، ادغام مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته و بررسی اثرات فرامرزی (با توجه به هم‌مرزی با افغانستان)، این چارچوب را تقویت کند. این مدل نه تنها راهنمایی عملی برای سیاست‌گذاران محلی و ملی در دشت نیمه‌بلوک فراهم می‌آورد، بلکه الگویی قابل‌تعمیم برای مدیریت یکپارچه آب و صنعت در مناطق نیمه‌خشک خاورمیانه است. بدون اقدام قاطع و هماهنگ، منطقه به سمت بحران‌های غیرقابل‌بازگشت پیش خواهد رفت. زمان گذار به مدیریت پایدار و سبز فرا رسیده است.

منابع

- اسکندری ثانی، محمد؛ محمدآبادی، جواد. (۱۴۰۲). کاوش عوامل مؤثر بر آینده کسب‌وکارهای سبز در بیرجند با رویکرد آینده‌نگاری. فصلنامه علمی مطالعات اجتماعی-فرهنگی خراسان، ۱۷(۳)، ۹-۴۶. doi: 10.22034/fakh.2023.397937.1612
- بهشتی، محمدباقر؛ بهبودی، داود؛ زالی، نادر؛ احمدزاده دلجان، فهیمه. (۱۳۹۹). سناریوهای مدیریت منابع آب مبتنی بر رویکرد آینده‌پژوهی: مطالعه موردی شهرستان تبریز. دوفصلنامه مطالعات آینده‌پژوهی ایران، ۵(۲)، ۲۰۳-۲۲۸. doi: 10.30479/jfs.2020.12446.1150
- رحیم حسینی، سیدمحمدرضا؛ حسینی، سیدامیرحسین. (۱۴۰۰). ارائه مدل آینده‌نگارانه مدیریت پایدار آب صنعتی بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی سناریویی. مجله مدیریت آینده‌نگری، ۶۷، ۱۴۲.
- رحمانی، محمد؛ داوری، کامران؛ ابوالحسنی، لیلا؛ صابت تیموری، محمد؛ شفیع، محمد. (۱۴۰۰). بررسی و انتخاب شاخص‌های ارزیابی مدیریت پایدار آب در مقیاس حوضه آبریز. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۴(۱)، ۱۴۱-۱۵۴. doi: 10.22055/jise.2019.29535.1852
- زالی، نادر. (۱۳۹۱). آینده‌نگاری راهبردی و سیاست‌گذاری منطقه‌ای با رویکرد برنامه‌ریزی سناریویی. مجله مطالعات راهبردی، ۴(۵۴)، ۵۴-۳۳.

- زالی، نادر. (۱۳۹۸). آینده نگاری منطقه ای: بازتعریف آینده محور فرآیند برنامه ریزی منطقه ای. مجله مطالعات آینده پژوهی ایران، ۶(۱)، ۲۶۳-۲۸۸. doi: 10.30479/jfs.2019.9822.1033.
- سپهرآرا، علی؛ جوادی، سعید؛ حسینی، سیدعلی اکبر. (۱۴۰۱). پیش بینی کوتاه مدت و بلندمدت تغییرات اقلیمی بر آسیب پذیری آبخوان زیرزمینی. هیدروژئولوژی، ۷(۲)، ۱۰۹.
- شهرکی، جوادی؛ سردار شهرکی، علی؛ نوری، سعید. (۱۳۹۸). تخصیص بهینه منابع آب در مخازن چاه نیمه سیستم تحت سناریوهای مدیریت آب و خاک. مجله آب و خاک نگهداری، ۲۵(۶)، ۲۵-۴۶. doi: 10.22069/jwsc.2019.14606.2948.
- طاهری دمنه، محمد؛ کاظمی، محمد؛ صفری غریبوند، کاظم. (۱۴۰۱). آینده نگاری مسئله آب در اصفهان. مجله شهر پایدار، ۵(۴)، ۵۳-۷۱. doi: 10.22034/jsc.2021.236478.1265.
- فرج زاده اصل، مصطفی؛ حسینی، امیرحسین. (۱۳۸۶). تحلیل بحران آب در دشت نیشابور. مجله مدرس علوم انسانی - برنامه ریزی و آمایش فضا، ۱۱(۱)، ۲۱۵-۲۳۸.
- کیانی، وحید؛ اسکندری ثانی، محمد؛ دوستدار، فاطمه. (۱۴۰۳). آینده پژوهی تغییرات ساختاری فضایی جمعیت و نقش آن در کنترل مناطق مرزی شهرستان های مرزی شرقی ایران استان خراسان جنوبی. مجله مطالعات مرزی، ۱۲(۲)، ۷۹-۹۷. doi: 10.22034/bss.2025.1280074.1524.
- کیانی راد، مهدی؛ یوسفی شاطوری، محمد؛ آفتابی، زهرا. (۱۴۰۳). بازتاب بحران آب بر سناریوهای هیدروپلیتیک حوضه آبریز زاینده رود. مجله جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۸(۸۹)، ۳۰۳-۳۱۸. doi: 10.22034/gp.2023.57904.3174.
- یارقیفرد، محمد؛ شکوهی بیدهندی، محمدسعید. (۱۴۰۴). پژوهش آینده نگارانه تاب آوری منابع آب با رویکرد برنامه ریزی سناریویی بر اساس مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده رود. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۳)، ۱-۱۹. doi: 10.22098/mmws.2024.15086.1460.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان جنوبی. (۱۴۰۰). گزارش مطالعات طرح آمایش سرزمین استان خراسان جنوبی. بیرجند: سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان جنوبی.
- شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی. (۱۴۰۰). گزارش وضعیت منابع آب زیرزمینی و برداشت های غیرمجاز. بیرجند: شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی.

- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Gran Castro, J. A. (2023). Denaturalizing climate change: Environmental injustice and social vulnerability in contexts of socio-spatial segregation in Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 94, 103802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103802>
- Hassaniyan, A. (2024). Iran's water policy: Environmental injustice and peripheral marginalisation. *Journal of Asian and African Studies*, 59(3), 678-693. <https://doi.org/10.1177/00219096241237329>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S., & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5(6), 545-559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- Mack, L., Andersen, H. E., Beklioğlu, M., Bucak, T., Couture, R.-M., Cremona, F., Ferreira, M. T., Hutchins, M. G., Mischke, U., Molina-Navarro, E., Rankinen, K., Venohr, M., & Birk, S. (2019). The future depends on what we do today - Projecting Europe's surface water quality into three different future scenarios. *Science of The Total Environment*, 668, 470-484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.251>
- Manzano-Solís, L. R., Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M. A., Mastachi-Loza, C. A., & Soares, D. (2019). Use of structural systems analysis for the integrated water resources management in the Nenetzingo river watershed, Mexico. *Land Use Policy*, 87, 104029. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104029>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people are facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.1500323>
- Mohammadpour, P., Mahmodian, Z., & Amini, M. (2021). Strategic foresight for sustainable water management: Scenario planning for uncertain futures. *Water Resources Management*, 35(12), 4103-4118. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02934-7>
- Qin, H., Zheng, C., He, X., & Refsgaard, J. (2019). Analysis of Water Management Scenarios Using Coupled Hydrological and System Dynamics Modeling. *Water Resources Management*, 33. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02410-9>
- Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. J. (2021). Measuring, modelling, and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(1), 40-58. {in Persian} <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00115-x>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., & Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geosci. Model Dev.*, 9(1), 175-222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>

World Steel Association. (2022). World steel in figures 2022. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022.pdf>.

Assessment of Seismic Risk Reduction Capacity and Urban Resilience to Earthquakes: A Case Study of the City of Tabriz

Mohsen Mirzajani^{1*} 

1. *Corresponding Author*, Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Marand Technical Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: m.mirzajani@tabrizu.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0342-084X>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 30 June 2025 Revised: 21 January 2026 Accepted: 29 January 2026 Published: 12 September 2026 Keywords: Seismic Resilience, Disaster Risk Reduction (DRR), UNDRR Scorecard, Disaster preparedness, Tabriz.	As Tabriz is located on active faults and has experienced devastating earthquakes in recent years, crisis management must assess the city's resilience to seismic hazards. In this study, the seismic risk-reduction capacity is evaluated, and the city's resilience against earthquakes is assessed using the urban resilience scorecard against disasters, aligned with the Sendai Framework. This research can be categorized as applied research, and its methodology is Descriptive Analytics, which was conducted qualitatively. The thematic analysis method (TAM) was implemented. Data were collected through semi-structured interviews, expert questionnaires, and the analysis of documents and scientific sources. In this evaluation, ten principles and 47 indicators were examined. The findings of the study show that Tabriz scores low in terms of seismic resilience, reflecting deficiencies in organizational structures, inadequate budget allocation, lack of specialized human resources, lack of integrated urban management, insufficient public awareness of earthquake hazards, and weaknesses in data collection and validation by relevant organizations, which has been discussed and analyzed in detail inside the article's text. In addition, the article's findings indicate that data vulnerabilities need to be evaluated and categorized, a thorough database must be established, information should be disseminated and regularly updated, and cohesive disaster management strategies should be formulated and executed across the city. The preliminary earthquake risk assessment results for Tabriz show that the city has scored a low 45 out of 141 (approximately 32%) in terms of resilience. Out of the 47 indicators examined, 10 are "not yet implemented," 29 are "partially implemented," 5 are "in progress," and only three are "fully established." The most significant gaps include the lack of integrated crisis management, a shortage of dedicated funding, weaknesses in data sharing, low public awareness, and vulnerability of critical infrastructure.

How to Cite: Mirzajani, M. (2026). Assessment of Seismic Risk Reduction Capacity and Urban Resilience to Earthquakes: A Case Study of the City of Tabriz. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15 (49), 141-174.



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2026.52487.2120

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Tabriz is one of Iran's metropolitan areas and, according to recent tectonic studies, is located near active faults in a high-risk seismic zone. There is a critical need for a comprehensive investigation regarding the vulnerability of urban regions like Tabriz to seismic hazards. The city can improve its readiness for future earthquakes by assessing both the risks associated with seismic events and the processes involved in recovery. This study examines not only the types of forces that pose a risk to the city but also various dimensions of resilience, including organizational, economic, infrastructural, and public awareness. The aim is to identify weaknesses in these dimensions that could affect recovery and to propose practical measures to enhance resilience and post-disaster recovery. To evaluate Tabriz's resilience against seismic hazards, this study employs a case study approach based on the UNDRR scorecard. A questionnaire was distributed among stakeholders involved in seismic crisis management, complemented by consultations with experts and meetings with relevant organizations. Primary data were collected through these consultations and meetings. The methodology included risk identification, assessment of institutional capacity, financial evaluation, infrastructure assessment, and review of disaster preparedness and response procedures. To ensure that the analyses accurately reflect the perspectives of those directly involved in seismic crisis management, data were gathered from municipalities, relevant organizations and departments, as well as urban planning specialists.

DATA AND METHODOLOGY

To improve and guarantee the precision of the responses, multiple rounds of communication with a variety of organizations and discussion sessions were held. Also conducted was a qualitative analysis of current earthquake crisis management programs, which included an examination of relevant local regulations and pertinent policies governing urban development.

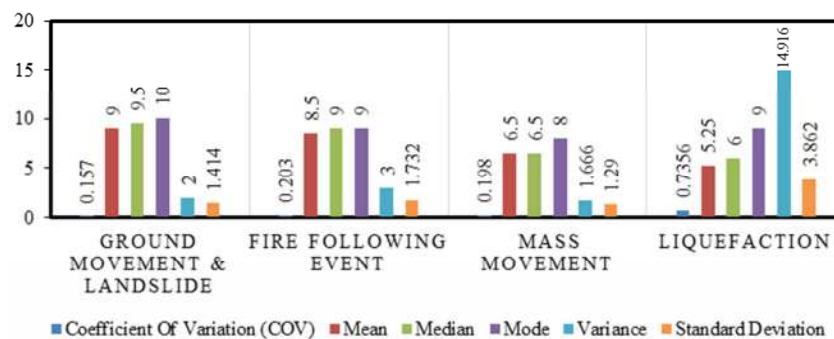


Figure 1: Statistical analysis of responses to the level of risk for Tabriz city against earthquake.

Table 1. Suggested Actions to Achieve Maximum Resilience.

Action	Responsible Organization	Timeline
Review construction patterns and street designs and improve current conditions	CMEAG – RUDEA – CMTM	10 Years
Reassess urban green spaces and their quantitative and qualitative standards	CMTM	10 Years
Mandate land use planning for urban developments and constructions around the city	CMEAG – EAMPO – RUDEA – CMTM	10 Years
Re-engineer informal settlements and position military centers around the city appropriately	CMEAG – RUDEA – CMTM	10 Years
Reassess urban green spaces and the green belts of cities	CMTM – RUDEA – CMEAG – Natural NRWMO	10 Years
Review and restore the streams and rivers within and surrounding the city to their natural state	CMTM – CMEAG – RUDEA – ERWA – EWWC	20 Years

Provide environmental water needs for rivers	CMTM – ERWA – CMEAG	25 Years
Identify and restore the Qanats of Tabriz and its surroundings	CMTM – ERWA – CMEAG	5 Years
Reassess quantitative and qualitative aspects of urban green spaces and green belts	CMTM – RUDEA – CMEAG – NRWMO	10 Years
Secure funding and develop urban wastewater treatment facilities according to needs	EWWC – EAMPO - CMEAG	5 Years
Optimize the municipality's revenue sources for transferring Aras water to Tabriz	CMTM – CMEAG – Local council	20 Years
Utilize Tabriz's elite to adopt effective diplomacy for maintaining the water quality of the Aras River	CMEAG – Provincial Representatives in the Islamic Consultative Assembly	5 Years
Restore pastures surrounding the city and implement afforestation to mitigate regional dust storms	CMEAG – CMTM – NRWMO – RUDEA	20 Years

The statistical analysis of the responses is presented in Fig. 1. It is related to the earthquake risk in Tabriz. This figure is provided for a clearer representation of the statistical analysis done in this paper. Taking into account the differences in the submitted responses, it is a useful approach for evaluating the results. According to Fig. 1, opinions converge on earth movement and landslides, fires associated with earthquakes, and falling rocks from heights; however, opinions differ on soil liquefaction. Proposed measures to achieve maximum environmental resilience are presented in Table 1.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the Tabriz Seismic Resilience Assessment, several critical challenges were identified: - Organizational shortcomings: The city lacks a centralized framework for managing seismic risks, and disaster preparedness budgets are insufficient; - Hazard assessment gaps: Existing seismic hazard maps are outdated and incomplete. Disaster management and urban planning require significant improvement, including a regularly updated comprehensive risk chart. - Investment and economic capacity: Economic resilience is weak due to limited investment in risk reduction and the absence of a dedicated organization for resilience projects; - Infrastructure vulnerability: Some hospitals cannot withstand major earthquakes, and critical systems like water and energy require more resilient infrastructure; - Public education and awareness: Earthquake information is mostly shared during or after events. Continuous education campaigns are needed to improve community preparedness; - Data management: A centralized system for collecting, validating, and sharing information is essential for effective disaster response; - Preparedness and response systems: The city lacks an early warning system, and inter-agency communication is poor. Resilience could be strengthened through early warning systems, regular training, and a unified operations center.

CONCLUSION

In this paper, a comprehensive analysis was conducted regarding the seismic resilience of Tabriz city. The results show that the city faces significant seismic risks and highlight the need to assess and manage these risks across the urban area. The evaluation assigns a low resilience rating, indicating an urgent need for organizational reforms, the implementation of practical risk management strategies, and increased funding for disaster preparedness and response initiatives. Furthermore, the findings emphasize the necessity of ongoing monitoring and evaluation to track progress and address emerging challenges. With consistent assessment and a flexible approach to resilience strategies, Tabriz can effectively manage evolving risks and improve readiness for future earthquakes.

REFERENCES

References [in Persian]

Hekmatnia, H. , Nasiri hendehakhale, E. , Eskandari Nodeh, M. and Younesi Sandi, R. (2023). Explaining the effective physical criteria in promoting resilience of informal settlements in the face of environmental hazards (Case study: Hamadan). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(35), 79-94. doi: 10.22111/jneh.2022.40625.1861. [In Persian]

- Heidarimozaffar, M. and TajBakhshian, M. (2022). Zoning the Vulnerability of Nahavand Settlements to Earthquakes. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 57-78. doi: 10.22111/jneh.2022.39334.1830. [In Persian]
- Rahnama, M. R. and Elahi Churan, M. A. (2023). Investigation and evaluation of dimensions and components of urban resilience against floods in western cities of Mazandaran province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(38), 1-22. doi: 10.22111/jneh.2023.41127.1866. [In Persian]
- East Azerbaijan Province Management and Planning Organization (2021), *Statistical Indicators of East Azerbaijan Province, 2021*, The City of Tabriz, East Azerbaijan Province Management and Planning Organization. [In Persian]
- East Azerbaijan Province Management and Planning Organization (2021a), *Provincial Spatial Planning Studies of East Azerbaijan – Volume II: Social and Cultural Analysis, Table 6*, The City of Tabriz, East Azerbaijan Province Management and Planning Organization. [In Persian]
- East Azerbaijan Province Management and Planning Organization (2021b), *Statistical Yearbook of East Azerbaijan Province 2021 – Volume 21: Household Income and Expenditure, Table 6-21 (thousand Rials)*, The City of Tabriz, East Azerbaijan Province Management and Planning Organization. [In Persian]
- East Azerbaijan Province Management and Planning Organization (2021c), *Provincial Spatial Planning Studies of East Azerbaijan – Volume II: Social and Cultural Analysis, Table 12*, The City of Tabriz, East Azerbaijan Province Management and Planning Organization. [In Persian]
- East Azerbaijan Province Management and Planning Organization (2021d), *Provincial Spatial Planning Studies of East Azerbaijan – Volume II: Social and Cultural Analysis, Table 27*, The City of Tabriz, East Azerbaijan Province Management and Planning Organization. [In Persian]
- Shamai, A. and Mirzazadeh, H. (2019). Spatial analysis of Tabriz regions resilience against the earthquake. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 245-266. doi: 10.22111/jneh.2019.25449.1415. [In Persian]
- Statistical Center of Iran (2024), Website: <https://amar.org.ir>, Accessed: Summer 2024. [In Persian]
- Meshkini, A. , Alipour, S. and Masoudi, H. (2024). Physical Resilience of urban housing against earthquakes: an analysis of northern neighborhoods and regions of Tehran Metropolis. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(41), 39-60. doi: 10.22111/jneh.2024.46098.1974. [In Persian]
- maleki, K. and pourmohammadi, M. (2025). Passive defense and evaluation of municipal areas in terms of earthquake risk vulnerability (case study of Tabriz metropolis). *Research Political Geography Quarterly*, (), -. doi: 10.22067/pg.2025.89091.1302. [In Persian]
- Mirzajani, M. (2025). Urban Seismic Resilience Assessment: A Case Study of the City of Tabriz. *Spatial Planning*, (), -. doi: 10.22108/sppl.2025.145044.1842. [In Persian]
- Ministry of Cooperatives, Labour, & Social Welfare (2022), *Poverty Monitoring in 2021, Table 3, page 37*, Ministry of Cooperatives, Labor and Social Welfare. [In Persian]

References [in English]

- Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Hofer, L., Zanini, M. A., Tubaldi, E., and Frangopol, D. M. (2020). Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets. *Science of the Total Environment*, 714, 136854.
- Ayyub, B. M. (2014). Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk analysis*, 34(2), 340-355.
- Bautista-Puig, N., Benayas, J., Manana-Rodríguez, J., Suárez, M., and Sanz-Casado, E. (2022). The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability. *Cities*, 126, 103715.
- bin Abu Bakar, M. Z., and binti Mohamad, Z. F. (2023). Local government capacity for earthquake disaster risk reduction in Malaysia: case studies in Bentong and Selayang areas. *International journal of disaster risk reduction*, 97, 103987.
- Bothara, J., Ingham, J., and Dizhur, D. (2018). Earthquake risk reduction efforts in Nepal. In *Integrating Disaster Science and Management* (pp. 177-203). Elsevier.
- Burton, C. G., Toquica, M., Asad, K. M. B., and Musori, M. (2022). Validation and development of composite indices for measuring vulnerability to earthquakes using a socio-economic perspective. *Natural Hazards*, 111(2), 1301-1334.
- Chen, M., Lu, Y., Peng, Y., Chen, T., and Zhang, Y. (2022). Key elements of attentions for enhancing urban resilience: A Comparison of Singapore, Hong Kong and Hangzhou. *Buildings*, 12(3), 340.
- Chen, X. (2022). Nonprofit resilience in a natural disaster context: An exploratory qualitative case study based on Hurricane Florence. *Human Service Organizations: Management, Leadership and Governance*, 46(2), 145-161.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering structures*, 32(11), 3639-3649.
- Cvetković, V. M., Grozdanić, G., Milanović, M., Marković, S., and Lukić, T. (2024). Understanding seismic hazard resilience in Montenegro: A qualitative analysis of community preparedness and response capabilities. *Open Geosciences*, 16(1).
- Fekete, A., Asadzadeh, A., and Moghadas, M. 2b. Background and Conception of INCOR Project-Basic Infrastructures and Services for Enhancing Inclusive Community Disaster Resilience in Iran. *INCOR Basis-Infrastrukturen und Services einer inklusiven Katastrophenresilienz im Iran. Abschlussbericht der Definitionsphase INCOR Basic Infrastructures and Services for Enhancing Inclusive Community Disaster*, 19.
- Gencer, E. A. (2017). *How to make cities more resilient: a handbook for local government leaders*. UN: New York, NY, USA. <https://www.undrr.org/publication/how-make-cities-more-resilient-handbook-local-government-leaders-2017>

- Graveline, M.-H., and Germain, D. (2022). Disaster risk resilience: conceptual evolution, key issues, and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330-341.
- Güngör, M., and Elburz, Z. (2024). Beyond boundaries: what makes a community resilient? a systematic review. *International journal of disaster risk reduction*, 104552.
- Hofmann, S. Z. (2021). 100 Resilient Cities program and the role of the Sendai framework and disaster risk reduction for resilient cities. *Progress in Disaster Science*, 11, 100189.
- Imperiale, A. J., and Vanclay, F. (2020). Barriers to enhancing disaster risk reduction and community resilience: Evidence from the L'Aquila disaster. *Politics and Governance*, 8(4), 232-243.
- Kapucu, N., Ge, Y., Rott, E., and Isgandar, H. (2024). Urban resilience: Multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. *Urban Governance*.
- Kapucu, N., Hawkins, C. V., and Rivera, F. I. (2013). Disaster preparedness and resilience for rural communities. *Risk, Hazards and Crisis in Public Policy*, 4(4), 215-233.
- Khalid, S. J. M., and Dol, N. Disaster preparedness for academic libraries in Malaysia: An exploratory study.
- Koliou, M., van de Lindt, J. W., McAllister, T. P., Ellingwood, B. R., Dillard, M., and Cutler, H. (2020). State of the research in community resilience: Progress and challenges. *Sustainable and resilient infrastructure*, 5(3), 131-151.
- Kong, L., Mu, X., Hu, G., and Zhang, Z. (2022). The application of resilience theory in urban development: a literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 49651-49671.
- Kumar, N., Poonia, V., Gupta, B., and Goyal, M. K. (2021). A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120532.
- Kwok, A. H., Doyle, E. E., Becker, J., Johnston, D., and Paton, D. (2016). What is 'social resilience'? Perspectives of disaster researchers, emergency management practitioners, and policymakers in New Zealand. *International journal of disaster risk reduction*, 19, 197-211.
- Nekoei-Moghadam, M., Moradi, S. M., and Tavan, A. (2024). How can the Sendai framework be implemented for disaster risk reduction and sustainable development? A qualitative study in Iran. *Globalization and health*, 20(1), 23.
- Ofei-Manu, P., and Didham, R. J. (2018). Disaster Risk Reduction Capacity Assessment: Conceptualizing a Systematic Capacity (Assessment) Framework for Japan. In *HANDBOOK OF DISASTER RISK REDUCTION and MANAGEMENT* (pp. 97-138). World Scientific.
- Rahimi, F., Sadeghi-Niaraki, A., Ghodousi, M., and Choi, S.-M. (2025). Spatial-temporal modeling of urban resilience and risk to earthquakes. *Scientific Reports*, 15(1), 8321.
- Rai, N., and Thapa, B. (2015). A study on purposive sampling method in research. *Kathmandu: Kathmandu School of Law*, 5(1), 8-15.
- Sharifi, A. (2016). A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological indicators*, 69, 629-647.
- Sim, T., Wang, D., and Han, Z. (2018). Assessing the disaster resilience of megacities: The case of Hong Kong. *Sustainability*, 10(4), 1137.
- Tehler, H., Cedergren, A., de Herve, M. d. G., Gustavsson, J., Hassel, H., Lindbom, H., Nyberg, L., and Wester, M. (2024). Evidence-based disaster risk management: A scoping review focusing on risk, resilience and vulnerability assessment. *Progress in Disaster Science*, 100335.
- Tiernan, A., Drennan, L., Nalau, J., Onyango, E., Morrissey, L., and Mackey, B. (2019). A review of themes in disaster resilience literature and international practice since 2012. *Policy design and practice*, 2(1), 53-74.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNDRR). (2015) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*, UN: New York, NY, USA, https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017) *Disaster Resilience Scorecard for Cities*, UN: New York, NY, USA, <https://mcr2030.undrr.org/disaster-resilience-scorecard-cities>, Accessed 17 May 2025.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2023). *Quick Risk Estimation (QRE) Tool*. United Nations.
- World Bank. (2023a). *GDP per capita (current US\$) - Iran*. World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=IR>.
- World Bank. (2023b). *GINI index (World Bank estimate) - Iran*. World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI?locations=IR>
- World Bank. (2023c). *World Development Indicators*. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- Xu, J., Wang, Z., Shen, F., Ouyang, C., and Tu, Y. (2016). Natural disasters and social conflict: A systematic literature review. *International journal of disaster risk reduction*, 17, 38-48.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

ارزیابی ظرفیت کاهش ریسک زلزله و تاب‌آوری شهرها در برابر زلزله: مطالعه موردی شهر تبریز

محسن میرزاجانی ننه کران [✉]

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.mirzajani@tabrizu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0342-084X>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری لرزه‌ای، کاهش ریسک زلزله، کارت امتیازدهی UNDRR، آمادگی در برابر بلایا، شهر تبریز.	باتوجه به قرارگیری شهر تبریز بر روی گسل‌های فعال، بررسی تاب‌آوری این شهر در برابر مخاطره زلزله ضروری به‌نظر می‌رسد. هدف این پژوهش، ارزیابی ظرفیت کاهش ریسک لرزه‌ای و توانمندی این شهر در تاب‌آوری در برابر زلزله با استفاده از کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری در برابر بلایا است که با چارچوب سندای همسو است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت و روش، توصیفی بوده و به صورت کیفی انجام شده است. در این پژوهش از تحلیل درونمایه برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است. داده‌های پژوهش از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و پرسشنامه با خبرگان و نیز تحلیل اسناد و منابع علمی گردآوری شده است. در این ارزیابی، ده اصل و ۴۷ شاخص مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهند که تبریز از نظر تاب‌آوری لرزه‌ای امتیاز پایینی دارد و این موضوع نشانگر کمبودهایی در ساختارهای سازمانی، تخصیص ناکافی بودجه، کمبود نیروی انسانی متخصص، نبود مدیریت شهری یکپارچه، آگاهی ناکافی عمومی درباره خطرات زلزله و ضعف در جمع‌آوری و اعتبارسنجی داده‌ها توسط سازمان‌های مرتبط است که با جزئیات کامل در متن مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، مسائلی نظیر نیاز به طبقه‌بندی و ارزیابی نقاط ضعف داده‌ها، ایجاد پایگاه اطلاعات جامع و ضرورت به‌روزرسانی و به اشتراک‌گذاری این اطلاعات، همراه با توسعه برنامه‌های مدیریت بحران یکپارچه برای کاهش اثرات، پاسخ‌گویی و بازیابی نیز مورد تاکید قرار گرفته‌اند. نتایج ارزیابی اولیه ریسک زلزله برای تبریز نشان داده که این شهر در زمینه تاب‌آوری امتیاز پایین ۴۵ از ۱۴۱ (حدود ۳۲٪) را کسب کرده است. از ۴۷ شاخص بررسی‌شده، ۱۰ شاخص "هنوز اجرا نشده"، ۲۹ شاخص "تا حدی اجرا شده"، ۵ شاخص "در حال اجرا" و تنها ۳ شاخص "کاملاً مستقر" هستند. مهم‌ترین شکاف‌ها شامل: عدم مدیریت یکپارچه بحران، کمبود بودجه اختصاصی، ضعف در اشتراک‌گذاری داده‌ها، آگاهی عمومی پایین و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی است.

استناد: میرزاجانی ننه کران، محسن . (۱۴۰۵). ارزیابی ظرفیت کاهش ریسک زلزله و تاب‌آوری شهرها در برابر زلزله: مطالعه موردی شهر تبریز. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵ (۴۹)، ۱۷۴-۱۴۱.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2026.52487.2120



مقدمه

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای برای افزایش توان شهرها در مقاومت و بازیابی پس از زلزله ضروری است و مستلزم به‌کارگیری رویکردهای یکپارچه سازه‌ای و اجتماعی-اقتصادی-سیاسی می‌باشد. این رویکردها با تقویت برنامه‌ریزی شهری، زمینه شکل‌گیری سیستم‌های شهری تاب‌آور و دستیابی به توسعه پایدار را فراهم می‌کنند. از این‌رو، تاب‌آوری به‌عنوان توانایی بازگشت به حالت اولیه پس از ایجاد اختلال تعریف می‌گردد (کاپوچو و همکاران، ۲۰۲۴).

افزایش بلایای طبیعی در سال‌های اخیر، به‌ویژه زلزله ۲۰۲۳ ترکیه، نشان داد که چگونه بلایای طبیعی می‌توانند پایداری و ایمنی جوامع شهری را به‌شدت تهدید کنند. این حوادث منجر به خسارت‌های انسانی و مالی گسترده، تخریب زیرساخت‌ها و اختلال در زندگی روزمره می‌شوند و توازن اجتماعی و اقتصادی کشورها را به خطر می‌اندازند. در این راستا، مفاهیم آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و پایداری بازتعریف شده و رویکرد کاهش ریسک بلایا (DRR) به‌عنوان محور اصلی اقدامات ملی و محلی برای افزایش آگاهی عمومی و ارتقا تاب‌آوری شهرها و جوامع مورد توجه قرار گرفته است (هافمن، ۲۰۲۱).

در ایران نیز زلزله‌های اخیر، به‌ویژه زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶، نقش حیاتی زیرساخت‌ها در تاب‌آوری شهرها در برابر بلایا را برجسته کرده‌اند. شهر تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران با جمعیتی بیش از ۱٫۵ میلیون نفر، به دلیل قرارگیری بر روی گسل فعال شمال تبریز و سابقه زلزله‌های ویرانگر، در معرض خطر بالای لرزه‌ای قرار دارد و ارزیابی تاب‌آوری آن یک ضرورت فوری است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی ظرفیت کاهش ریسک لرزه‌ای و توانمندی شهر تبریز در تاب‌آوری در برابر زلزله با استفاده از کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری در برابر بلایا (همسو با چارچوب سندای) است. این ارزیابی به شناسایی شکاف‌های موجود بین وضعیت کنونی و وضعیت مطلوب کمک کرده و زمینه‌ای برای سیاست‌گذاری عملی فراهم می‌آورد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت و روش، توصیفی بوده و به صورت کیفی انجام شده است. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته، پرسشنامه با خبرگان و تحلیل اسناد گردآوری شده و با روش تحلیل درون‌مایه بررسی شده‌اند. در این ارزیابی، ده اصل و ۴۷ شاخص مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحلیل تاب‌آوری شهری در برابر زلزله، بهره‌گیری از نظریه‌های مرتبط با تاب‌آوری امری ضروری است تا چارچوب مفهومی پژوهش تقویت گردد. نظریه تاب‌آوری سیستمی، شهر را به‌عنوان یک سیستم پویا در نظر می‌گیرد که باید در برابر اختلالات پایدار بماند. نظریه‌های ظرفیت‌سازی و سرمایه اجتماعی بر تقویت بافت اجتماعی، نقش سرمایه اجتماعی، از جمله اعتماد، همکاری و ارزش‌های مشترک در ارتقاء ظرفیت مقابله با بلایا و ساخت تاب‌آوری شهری مورد توجه قرار می‌دهند. نظریه مدیریت بحران شهری، بر فرآیندها و راهبردهای مدیریت و پاسخ به بحران‌های شهری تمرکز دارد و فرآیندهای آمادگی، پاسخ، بازیابی و یادگیری از رویدادهای گذشته را پوشش می‌دهد. نظریه شبکه‌های شهری تاب‌آور بر اهمیت وجود شبکه‌های شهری متصل و دارای افزونگی، شامل زیرساخت‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل و ارتباطات تأکید دارد. سایر نظریه‌ها مانند انعطاف‌پذیری فضایی، یادگیری سازمانی، تطبیق و تحول، پایداری و تاب‌آوری یکپارچه، و نظریه شوک‌ها و تنش‌های شهری، به طراحی‌های شهری انعطاف‌پذیر، سازگاری با تغییرات و دگرگونی سیستم‌های شهری برای دستیابی به تاب‌آوری و پایداری می‌پردازند (کاپوچو و همکاران، ۲۰۲۴؛ کنگ و همکاران، ۲۰۲۲).

کاهش ریسک بلایا (DRR) مجموعه اقداماتی برای جلوگیری از ایجاد ریسک‌های جدید، کاهش ریسک‌های موجود و مدیریت ریسک‌های باقی‌مانده است که به افزایش تاب‌آوری کمک می‌کند. چارچوب سندای برای کاهش ریسک بلایا (Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030) سند بین‌المللی کلیدی است که در سال ۲۰۱۵ در سندای ژاپن تصویب شد. این چارچوب چهار اولویت اصلی دارد که شامل: ۱- درک ریسک بلایا؛ ۲- تقویت حکمرانی ریسک بلایا؛ ۳- سرمایه‌گذاری در کاهش ریسک برای تاب‌آوری؛ ۴- تقویت آمادگی برای پاسخ مؤثر و ساخت بهتر در بازیابی است. هدف اصلی آن جلوگیری از ایجاد ریسک جدید و کاهش ریسک موجود برای دستیابی به توسعه پایدار است (UNDRR, 2015).

- مدل‌سازی تاب‌آوری لرزه‌ای شهری

یکی از ابزارهای عملی برای ارزیابی تاب‌آوری شهری، کارت امتیازدهی تاب‌آوری در برابر بلایا است که توسط سازمان ملل ارائه شده و شامل ده اصل اساسی برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری شهری است (سازمان ملل متحد برای کاهش خطر بلایا، ۲۰۱۷). این اصول شامل سازمان‌دهی برای تاب‌آوری، تحلیل و استفاده از سناریوهای خطر، تقویت ظرفیت اقتصادی، طراحی و توسعه شهرهای مقاوم، حفاظت از منابع طبیعی، تقویت ظرفیت‌های نهادی و اجتماعی، افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها، تضمین پاسخ مؤثر به بلایا و تسریع در بازیابی و بهبود هستند.

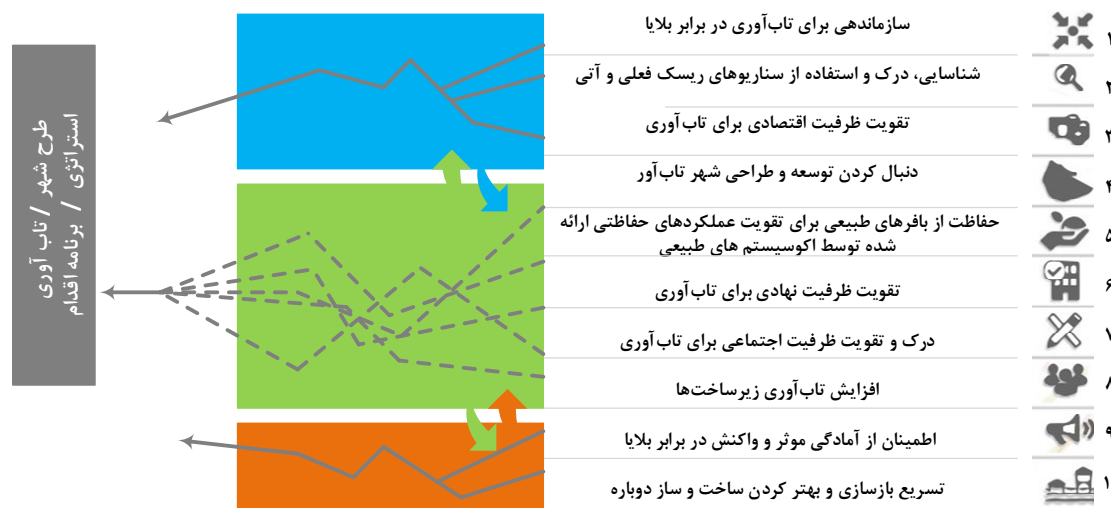
کاربرد کارت امتیازدهی تاب‌آوری در بسیاری از شهرها اثربخشی آن را در ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای و شناسایی شکاف‌های بین شرایط موجود و اهداف تاب‌آوری نشان داده است. این ابزار که به‌عنوان یک ابزار جهانی شناخته می‌شود، به شهرها کمک می‌کند تا حوزه‌های کلیدی برای بهبود را شناسایی کرده و برنامه‌های استراتژیک برای کاهش خطر و افزایش تاب‌آوری در برابر بلایا تدوین کنند.

پیچیدگی ذاتی مدل‌سازی تاب‌آوری نیازمند تحقیقات بیشتر در حوزه‌های کلیدی مختلف است. این حوزه‌ها شامل مفهوم مسئولیت اجتماعی برای تاب‌آوری، استراتژی‌های مؤثر مدیریت خطر، نقش مشارکت‌های عمومی-خصوصی در تسهیل تاب‌آوری و پارادایم نوظهور تاب‌آوری تطبیقی است که بینش‌های ارزشمندی در مورد رفتار اجتماعی پس از بلایا ارائه می‌دهد (عیوب، ۲۰۱۴؛ کاپوچو و همکاران، ۲۰۱۳؛ کولیو و همکاران، ۲۰۲۰؛ کووک و همکاران، ۲۰۱۶؛ میرو و همکاران، ۲۰۱۶؛ شریفی، ۲۰۱۶؛ تیرنان و همکاران، ۲۰۱۹).

سؤالات بیشتری نیز در مورد نحوه مدل‌سازی تاب‌آوری، به‌ویژه با تمرکز بر ادغام عوامل و ویژگی‌هایی که بر تاب‌آوری تأثیر می‌گذارند و ابزارهای عملی برای ارزیابی آن مطرح شده است. در این زمینه، ابزارهایی برای سنجش تاب‌آوری پیشنهاد شده‌اند که در سیستمی از مدل‌های ساده خطی تا سیستم‌های پیچیده و متصل عمل می‌کنند. در مقابل، خطر به‌صورت یک نقطه منفرد یا سناریویی شامل چندین خطر تعریف می‌شود. سپس معیارهایی برای ارزیابی عملکرد سیستم در برابر خطرات تعریف شده و امتیازات تاب‌آوری جمع‌آوری می‌شوند تا تاب‌آوری کلی سیستم تعیین شود (آرگیرودیس و همکاران، ۲۰۲۰؛ سی‌ملارو و همکاران، ۲۰۱۰؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۱؛ شریفی، ۲۰۱۶). در این راستا، ابزارهای مختلف ارزیابی تاب‌آوری توسط پژوهشگران مختلف برای ارزیابی خطرات (چه منفرد و چه چندگانه) پیشنهاد شده‌اند (برتون و همکاران، ۲۰۲۲؛ جنسر، ۲۰۱۷؛ شریفی، ۲۰۱۶). برتون و همکاران (۲۰۲۲) دیدگاه‌های مهمی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله ارائه داده‌اند.

– کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری UNDRR

این کارت که با نام کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری UNDRR شناخته می‌شود، شامل ده اصل اساسی برای تبدیل شهرها به شهرهای تاب‌آور است و برای حمایت از چارچوب سندای طراحی شده است. این ابزار در حال حاضر به‌عنوان پرکاربردترین ابزار ارزیابی تاب‌آوری جوامع شناخته می‌شود. این کارت برای ارائه یک ابزار عملی به شهرها طراحی شده تا تاب‌آوری در برابر بلایا را از نظر هر مؤلفه اساسی شناسایی کرده و حوزه‌هایی که نیاز به مداخلات کاهش‌دهنده دارند را برای بهبود تاب‌آوری بلایا در طول زمان مشخص کنند (سازمان ملل متحد برای کاهش خطر بلایا، ۲۰۱۷). شکل ۱ ده اصل استفاده‌شده در این کارت امتیازدهی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): ۱۰ اصل برای ایجاد شهرهای تاب‌آور (جنسر، ۲۰۱۷)

این کارت امتیاز جامع که بر اساس "ده اصل برای ایجاد شهرهای تاب‌آور" طراحی شده است، شامل ۱۱۸ معیار برای ارزیابی تاب‌آوری در برابر بلایا است که در ده مؤلفه اساسی سازمان‌دهی شده‌اند. این مؤلفه‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: مسائل حکمرانی و مالی (اصول ۱ تا ۳)، برنامه‌ریزی و آمادگی برای بلایا (اصول ۴ تا ۸) و پاسخ‌دهی و بازیابی پس از بلایا (اصول ۹ و ۱۰) (شکل ۱). هر معیار به‌طور دقیق تعریف شده و همراه با توضیحات تکمیلی ارائه می‌شود.

معیارها بر اساس یک مقیاس اندازه‌گیری شاخصی از ۰ تا ۳ امتیازدهی می‌شوند که عدد ۳ نشان‌دهنده بهترین عملکرد است. این امتیازات در چارچوب سناریویی ارزیابی می‌شوند که شامل "محتمل‌ترین" و "شدیدترین" تهدیدهایی است که با سطح ریسک برآورد شده در شهر یا منطقه ارزیابی شده همخوانی دارد.

در یک بررسی جامع از کاربرد کارت امتیازی در بیش از ۲۰۰ شهر و دولت محلی (شامل یک نمونه نماینده از ۲۰ شهر که برای تعریف ده اصل اساسی در برابر عوامل موفقیت حیاتی تاب‌آوری شهری استفاده شده است)، پژوهش ارائه‌شده (شریفی، ۲۰۱۶) استدلال می‌کند که برای حداکثرسازی تأثیر کارت امتیاز، باید آن را به‌طور یکپارچه در برنامه‌های کاهش ریسک بلایا ادغام کرد. این ادغام باید شناسایی فعالیت‌های کاهش هدفمند برای تقویت تاب‌آوری را تسهیل کند. علاوه بر این، این ادغام باید بخشی از فرآیند برنامه‌ریزی کلی کاهش ریسک بلایا باشد که برنامه‌ریزی

تداوم کسب‌وکار محلی و مدیریت ریسک بلایا را نیز شامل می‌شود. نویسندگان معتقدند که این ادغام نیازمند بومی‌سازی کارت امتیاز برای تطبیق با شرایط و مخاطرات محلی است و باید معیارهای غیرمرتبط حذف شوند. همچنین، تحقیقات مقدماتی پیش از ارائه کارت امتیاز به شرکت‌کنندگان در نظرسنجی برای کسانی که کارت امتیاز را اجرا می‌کنند ضروری است تا درک جامعی از مخاطرات مرتبط با انواع مختلف بلایا که ممکن است بر هر معیار تأثیر بگذارد به‌دست آورند.

در ادامه، تحقیقات انجام‌یافته در خصوص تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفته است. تاب‌آوری یک شهر در برابر بلایا به استحکام زیرساخت‌ها، هماهنگی میان سازمان‌ها و ارزیابی دقیق شکاف عرضه و تقاضا در خدمات اساسی وابسته است (شیو و همکاران، ۲۰۱۶). ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای نیازمند استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و ابزارهای مدل‌سازی است که توانایی تحلیل جامع و دقیق چشم‌انداز پیچیده و چندوجهی شهری را دارند (فکته و همکاران، ۲۰۱۷). مطابق با چارچوب سندای برای کاهش خطر بلایا (سازمان ملل متحد برای کاهش خطر بلایا، ۲۰۱۵)، که یک توافق‌نامه بین‌المللی غیرالزام‌آور است، سازمان ملل بر کاهش تلفات انسانی، زیان‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی و تقویت تاب‌آوری جوامع در برابر بلایا تأکید دارد. باوتیستا-پوئیگ و همکاران (۲۰۲۲) تاب‌آوری شهری را به‌عنوان توانایی سیستم شهری در مقاومت، حفظ تداوم و بازیابی از فشارها در عین سازگاری و تحول به سوی پایداری تعریف کرده و بر ماهیت پویا و در حال تحول محیط‌های شهری تأکید کرده‌اند. تهلر و همکاران (۲۰۲۴) تحلیل جامعی از روش‌های ارزیابی در مدیریت ریسک بلایا ارائه کرده‌اند و مطالعات به دو دسته تقسیم شده است: مطالعاتی که روش جدید ارائه داده‌اند و مطالعاتی که نوآوری در روش‌شناختی نداشته‌اند. مقاله به تغییر انجام‌یافته از مدیریت واکنشی به مدیریت پیشگیرانه ریسک اشاره دارد که نشان‌دهنده درک روبه‌رشد از لزوم آمادگی و کاهش ریسک پیش از وقوع مخاطرات است. کنگ، مو، هو و ژانگ (۲۰۲۲) پژوهش‌های تاب‌آوری شهری از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار داده و بر لزوم رویکردهای چندبعدی و مشارکت‌محور در آینده تأکید کرده‌اند و تاب‌آوری شهری را برای توسعه پایداری شهری در مواجهه با چالش‌های روزافزون جهانی ضروری دانسته‌اند. گراولین و ژرمن (۲۰۲۲) بر پیوند میان تاب‌آوری و آسیب‌پذیری تأکید داشته‌اند. گونگور و البورز (۲۰۲۴) بر اهمیت تاب‌آوری جوامع در برابر مخاطرات طبیعی و انسانی تأکید داشته‌اند و ابعاد کلیدی همچون اجتماعی، اقتصادی، فیزیکی و سرمایه اجتماعی جامعه را همراه با شاخص‌هایی نظیر سطح تحصیلات، درآمد، ظرفیت درمانی و شبکه‌های اجتماعی مورد تحلیل قرار داده‌اند. چوتکوویچ و همکاران (۲۰۲۴) بر اهمیت دانش محلی حاصل از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته تأکید کرده‌اند. ایمپیراله و ون‌کلی (۲۰۲۰) کمبودهای سیستم حفاظت مدنی ایتالیا را نقد کرده‌اند که نتوانسته اولویت‌های کلیدی چارچوب سندای برای حکمرانی ریسک‌های بلایای طبیعی را برآورده کند. نکویی‌مقدم، مرادی و توان (۲۰۲۴) به بررسی پیاده‌سازی چارچوب سندای در کشورهای در حال توسعه پرداخته‌اند. این پژوهش از روش تحلیل محتوای کیفی با استفاده از ۳۵ کارشناس و ۹ نفر از طریق مصاحبه پرداخته است. این مطالعه بر چهار استراتژی اصلی چارچوب سندای متمرکز شده و ۳۷ کد مرتبط با درک ریسک بلایا، تقویت حکمرانی، سرمایه‌گذاری در تاب‌آوری و ارتقای آمادگی را دسته‌بندی کرده است. رحیمی و همکاران (۲۰۲۵) بر اهمیت تشکیل تیم‌های محلی و ادغام کاهش ریسک بلایا و توسعه پایدار در ارزیابی تأثیرات اجتماعی برای دستیابی به پایداری بلندمدت تأکید داشته‌اند.

پژوهش‌هایی نیز در سال‌های اخیر به‌صورت موردی در خصوص مناطق مختلف شهر تبریز و سایر شهرهای ایران انجام یافته است (حکمت‌نیا و همکاران، ۱۴۰۳؛ حیدری و تاجبخشیان، ۱۴۰۱؛ رهنما و الهی چورن، ۱۴۰۳؛ شمعی و

میرزاده، ۱۴۰۱؛ مشکینی و همکاران، ۱۴۰۳). این پژوهش می‌تواند در تعیین وضعیت تاب‌آوری لرزه‌ای و بررسی چالش‌های موجود در اجرای اقدامات لازم جهت کاهش ریسک بلایا موثر باشد تا خلاهای موجود در ساختارهای نهادی، منابع مالی، آمادگی عمومی و مدیریت شهری در برابر زلزله شناسایی شده و زمینه برای سیاست‌گذاری و بهبود تاب‌آوری فراهم شود.

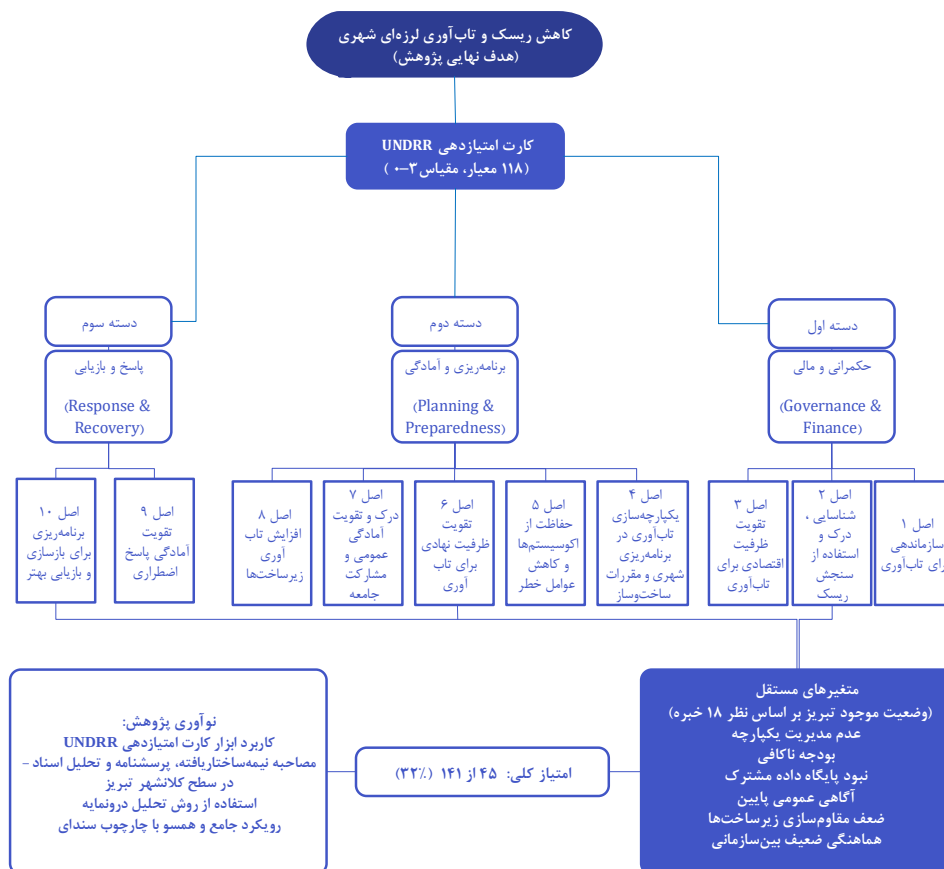
در پژوهشی (بن ابو بکر و بنتی محمد، ۲۰۲۳) به بررسی توانایی کاهش خطر بلایای زلزله در دولت‌های محلی مالزی پرداخته شده است و بر کمبود مطالعات سیستماتیک در مورد قابلیت‌های آن‌ها تأکید شده است. سیم و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل تاب‌آوری کلان‌شهرها با استفاده از مطالعه موردی هنگ‌کنگ پرداخته و بر تهدیدات ناشی از بلایای طبیعی و تغییرات آب‌وهوایی تمرکز داشته‌اند. یافته‌ها نشان داده است که اگرچه هنگ‌کنگ از تاب‌آوری قوی در برابر بلایا برخوردار است و با امتیاز ۴٫۲ از ۵ و منابع مالی کافی برای کاهش خطر بلایا، هنوز نیاز به بهبود حکمرانی بلایا، شناسایی بهتر ریسک‌ها و تقویت همکاری بین دولت و جامعه وجود دارد. بوتارا و همکاران (۲۰۱۸) به بحث درباره مدیریت خطر زلزله در نپال پرداخته‌اند. با وجود پیشرفت‌ها، زمین‌لرزه ۲۰۱۵ با بزرگی ۸٫۷ ریشتر باعث تخریب گسترده و تلفات قابل‌توجهی در نپال شده و چالش‌های مستمر را آشکار کرده است. ابتکارات دولت بر بازسازی مقاوم در برابر زلزله متمرکز بوده است، اما مناطق روستایی به‌دلیل دسترسی محدود به اطلاعات ایمنی و کمبود برنامه‌های کاهش خطر بلایای زلزله، همچنان آسیب‌پذیر شناخته شده‌اند. رشد سریع شهری باعث افزایش استفاده از زمین‌های حاشیه شهر شده و آسیب‌پذیری را افزایش داده است. سرمایه‌گذاری مستمر و بهبود حکمرانی برای کاهش تهدیدات لرزه‌ای روبه‌رشد و افزایش تاب‌آوری در سطح ملی ضروری بوده است. چن و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تاب‌آوری شهری در شهرهای آسیایی با مقایسه سنگاپور، هنگ‌کنگ و هانگژو از طریق مرور ادبیات و مصاحبه با متخصصان اختصاص یافته است. یافته‌ها نشان داده‌اند که عناصر کلیدی تاب‌آوری در شهرهای مختلف متفاوت است و این موضوع محدودیت‌های چارچوب‌های کلی تاب‌آوری شهری را آشکار می‌کند. این مطالعه همچنین مرجعی برای مقایسه‌های بین‌المللی فراهم آورده است. آفی-مانو و دیدهام (۲۰۱۸) به بررسی کاهش خطر بلایا در ژاپن اشاره شده و بر تأثیر فاجعه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ و نیاز به بهبود آمادگی تأکید شده است. این مطالعه بر مشارکت جامعه، اشتراک‌گذاری دانش و چارچوب انعطاف‌پذیر مدیریت بحران تأکید می‌کند و در عین حال به چالش‌های بهبودی بلندمدت و خطرات فزاینده ناشی از تغییرات آب‌وهوایی می‌پردازد.

بررسی پیشینه خارجی تحول مفهوم تاب‌آوری از رویکردهای واکنشی به پیشگیرانه و چندبعدی را نشان می‌دهد که بر چالش‌های اجرایی و ادغام با چارچوب‌های سندای تأکید دارد. در پیشینه داخلی، تمرکز اصلی بر ارزیابی‌های کالبدی و پهنه‌بندی بوده و کاربرد ابزارهای جامع بین‌المللی مانند کارت امتیازدهی UNDRR برای ارزیابی نهادی-حکمرانی تاب‌آوری کمتر دیده می‌شود. در این پژوهش با کاربرد کیفی-ترکیبی این ابزار در تبریز، شکاف موجود را پر کرده و دیدگاه جامعی ارائه شده است.

مدل مفهومی پژوهش، بر اساس کارت امتیازدهی UNDRR و چارچوب سندای طراحی شده است. ورودی مدل خطر لرزه‌ای تبریز (گسل شمال تبریز)، فرآیند ارزیابی با ۱۰ اصل و خروجی سطح تاب‌آوری، شناسایی شکاف‌ها و پیشنهادها می‌باشد. در شکل ۲ مدل مفهومی این پژوهش ارائه شده است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از رویکرد کیفی و مطالعه موردی بهره می‌گیرد که برای بررسی عمیق پدیده‌های پیچیده مانند تاب‌آوری شهری مناسب است.



شکل (۲): مدل مفهومی این پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

- نوع و رویکرد پژوهش

این پژوهش از نوع اکتشافی، کاربردی-توصیفی و با رویکرد کیفی است. روش اصلی، مطالعه موردی (شهر تبریز) بوده است. انتخاب این روش براساس پژوهش‌های مشابه انجام‌یافته در این حوزه است (بن ابو بکر و بنتی محمد، ۲۰۲۳؛ خالد و دول، ۲۰۱۵؛ چن، ۲۰۲۲). همچنین، از روش پژوهش کیفی به‌صورت مطالعه موردی برپایه مصاحبه، همراه با مطالعات کتابخانه‌ای به‌عنوان روش جمع‌آوری داده برای تجمیع نظرات و ورودی‌های مورد نیاز مورد استفاده قرار گرفته است.

- جامعه و نمونه

نمونه‌گیری انجام‌یافته در این پژوهش از نوع نمونه‌گیری گلوله برفی است. از این‌رو، پس از جلساتی که در سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی برگزار شد، توافق شد که نهادهای مرتبط با تاب‌آوری تبریز در برابر زلزله شناسایی شوند. نتایج حاصل از این مرحله، در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اقدام انجام یافته و گستردگی استفاده از این روش (رای و ته‌پا، ۲۰۱۵)، در تحقیقات کیفی می‌توان مطمئن بود که افراد انتخاب‌شده دارای تجربه کافی و مستقیم در خصوص مدیریت بحران زلزله بوده‌اند.

بر اساس مرور ادبیات انجام شده در مقدمه، تصمیم گرفته شد که از کارت امتیاز برای ارزیابی اولیه وضعیت تبریز در برابر زلزله استفاده شود. به همین منظور، رویکرد مطالعه موردی انتخاب شد و با مشاوره‌های خبرگان و تحقیقات کتابخانه‌ای برای جمع‌آوری دیدگاه‌ها تکمیل گردید. همان‌طور که در جدول ۱ آمده است، هر فرد در سازمان‌های مرتبط پس از بررسی اولیه پرسشنامه و آماده‌سازی پاسخ‌های دقیق، اصول ۱ تا ۱۰ کارت امتیاز تاب‌آوری در برابر بلایا را مطابق با پروتکل‌های تعیین شده مورد بررسی قرار داد. بنابراین، روش اصلی جمع‌آوری داده که در این پژوهش انجام یافته است از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته بوده است. بنابراین، مصاحبه‌شوندگان مجاز بودند به سوالات براساس تجربه خود پاسخ دهند و سوالات به صورت سوالات باز در نظر گرفته شده بودند. با توجه به فرآیند پیاده‌شده در این پژوهش، مصاحبه‌شوندگان زمان کافی داشته‌اند تا پاسخ‌های خود را با جزئیات بیشتری شرح دهند و بحث و بررسی بیشتر بین پژوهشگر و برخی از مصاحبه‌شوندگان در روند پاسخ‌گویی به سوالات وجود داشته است.

جدول ۱: سازمان‌ها و شرکت‌های اجرایی مرتبط با تاب‌آوری لرزه‌ای تبریز

شماره	سازمان‌های مرتبط
۱	معاونت آمار، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی
۲	مدیریت بحران شهرداری تبریز
۳	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی
۴	شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان
۵	شرکت توزیع نیروی برق تبریز
۶	شرکت گاز استان آذربایجان شرقی
۷	شرکت پالایش و پخش فراورده‌های نفتی استان آذربایجان شرقی
۸	شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی
۹	شرکت آب‌وفاضلاب استان آذربایجان شرقی
۱۰	جمعیت هلال‌احمر استان آذربایجان شرقی
۱۱	اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی
۱۲	اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان آذربایجان شرقی
۱۳	سازمان زمین‌شناسی تبریز
۱۴	نمایندگی‌های شرکت‌های بیمه در استان آذربایجان شرقی
۱۵	اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان آذربایجان شرقی
۱۶	اداره کل نوسازی مدارس استان آذربایجان شرقی
۱۷	معاونت بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تبریز
۱۸	مرکز اورژانس پیش بیمارستانی و مدیریت حوادث آذربایجان شرقی
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳	

قابل توجه است که روش‌شناسی پیشنهادی توسط UNDRR برای پاسخ‌گویی به پرسشنامه‌ها با دقت اجرا شد (جنسر، ۲۰۱۷). به این منظور، مستندات موجود از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی به طور کامل استفاده شد که شامل منابع کتابخانه‌ای، منابع موجود در وب‌سایت این سازمان و مواد مرتبط از سازمان‌های وابسته بود. در طول پژوهش، تلاش‌های مداومی برای برگزاری جلسات با خبرگان حوزه انجام شد. در نهایت، یک جلسه در سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی برگزار شد تا نتایج و دستاوردهای پژوهش ارائه شود.

– ابزار گردآوری داده

داده‌ها از سه منبع اصلی گردآوری شدند که شامل: ۱- پرسشنامه مبتنی بر کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری UNDRR (شامل ۴۷ شاخص در ۱۰ اصل)؛ ۲- مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان (سؤالات باز برای توضیح تجربیات و دیدگاه‌ها)؛ ۳- تحلیل اسناد و منابع علمی (گزارش‌های سازمانی، نقشه‌ها و مطالعات قبلی).

روش تحلیل (تحلیل درون‌مایه)

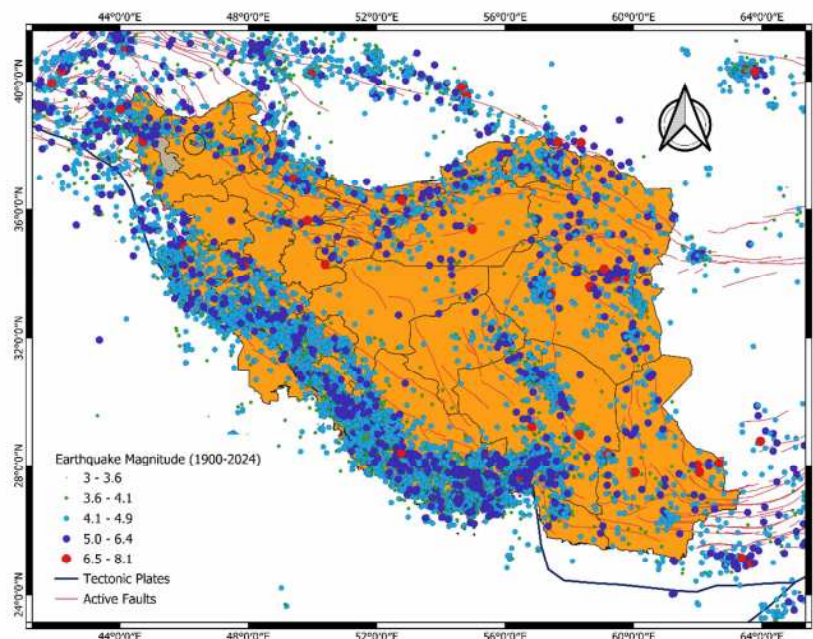
در این پژوهش از تحلیل درون‌مایه^۱ برای تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده استفاده شده است. این روش انعطاف‌پذیر برای شناسایی الگوها و مضامین در داده‌های کیفی مناسب است و شامل شش مرحله اصلی است: ۱- آشنایی با داده‌ها (خوانش مکرر مصاحبه‌ها و پاسخ‌های پرسشنامه)؛ ۲- کدگذاری اولیه (شناسایی کدهای اولیه از متن)؛ ۳- جستجوی مضامین (گروه‌بندی کدها به مضامین فرعی)؛ ۴- بازنگری مضامین (بررسی و اصلاح مضامین با داده‌ها)؛ ۵- تعریف و نام‌گذاری مضامین (توصیف دقیق مضامین نهایی بر اساس ۱۰ اصل UNDRR)؛ ۶- گزارش‌نویسی (تفسیر مضامین و ارتباط با سؤالات پژوهش).

ویژگی‌های عمومی تبریز

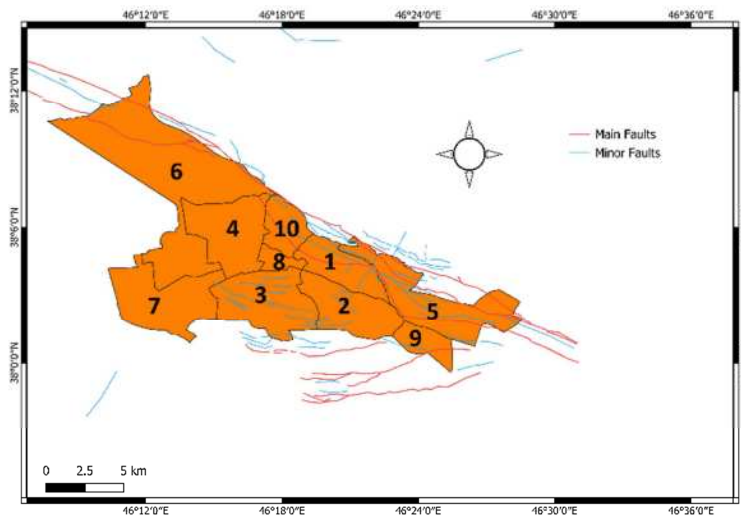
تبریز، به‌عنوان یک کلان‌شهر در شمال غرب ایران، در تابستان ۱۴۰۲ برای بررسی ویژگی‌های عمومی مرتبط با تاب‌آوری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. این شهر به‌دلیل کیفیت پایین ساخت‌وساز، نزدیکی ساختمان‌ها به گسل‌ها (شکل ۳)، کمبود جاده‌های ایمن و نبود برنامه‌های جامع مدیریت خطر، در برابر زلزله آسیب‌پذیر است (ملکی و پورمحمدی، ۲۰۲۵). بنابراین، ارزیابی وضعیت زیرساخت‌های حیاتی و توانایی آن‌ها برای مقاومت در برابر بلایای طبیعی ضروری است. بر اساس آخرین داده‌ها، جمعیت تبریز ۱۷۷۳۰۳۳ نفر در مساحتی به وسعت ۱۹۶۷،۱۹ کیلومتر مربع است که منجر به تراکم جمعیتی معادل ۷۷۸۰ نفر در هر کیلومتر مربع می‌شود. پروفایل جمعیتی شهر شامل ۱۳،۵ درصد جمعیت جوان (۱۵-۲۴ سال) و ۷،۰۱ درصد جمعیت سالمند (۶۵ سال و بالاتر) است. علاوه بر این، تبریز دارای ۶۱۳۸۶ خانوار با سرپرست زن و نرخ باسوادی ۹۰،۸ درصد است. در زمینه عوامل اجتماعی-اقتصادی، نرخ فقر در آذربایجان شرقی پایین‌تر از میانگین کشوری است و حدود ۳۰ درصد جمعیت زیر خط فقر قرار دارند (برآورد ۱۴۰۳). میانگین درآمد سالانه خانوار شهری استان حدود ۱۰۰ میلیون تومان (معادل تقریبی ۸۰۰ دلار با نرخ فعلی دلار حدود ۱۲۵ هزار تومان) گزارش شده است. همچنین، نرخ مهاجرت پایین و اصلی‌ترین خطر طبیعی زلزله است که به‌عنوان جدی‌ترین بحران تأثیرگذار بر شهر محسوب می‌شود. بالاترین مرجع نظارت بر مدیریت بحران، شهردار تبریز و استانداری است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۳؛ وزارت تعاون، ۱۴۰۱؛ سازمان مدیریت، ۱۴۰۱ الف، ۱۴۰۱ ب، ۱۴۰۱ ج، ۱۴۰۱ د، ۱۴۰۱ هـ). تبریز حدود ۱۳۲۵۰۰۰ خانوار دارد و میانگین اندازه خانوار حدود ۳ نفر است. هزینه زندگی خانوار شهری افزایش یافته، درحالی‌که در سال ۱۴۰۲ هزینه ناخالص ۱۲۱۰۷۰۵ هزار ریال، هزینه خالص ۱۱۶۳۶۱۵ هزار ریال و میانگین هزینه زندگی حدود ۱۵۸۹۳۶۱ هزار ریال تخمین زده شده است. تولید ناخالص داخلی سرانه استان آذربایجان شرقی بالاتر از میانگین کشوری است (حدود ۳،۵ درصد سهم از GDP ملی). نابرابری

¹ Thematic analysis

اقتصادی با ضریب جینی حدود ۰,۳۵-۰,۳۸، نشان‌دهنده سطح متوسط نابرابری است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۳؛ بانک جهانی، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۳؛ سازمان مدیریت، ۲۰۲۱، ۲۰۲۱، ۲۰۲۱).



(الف)

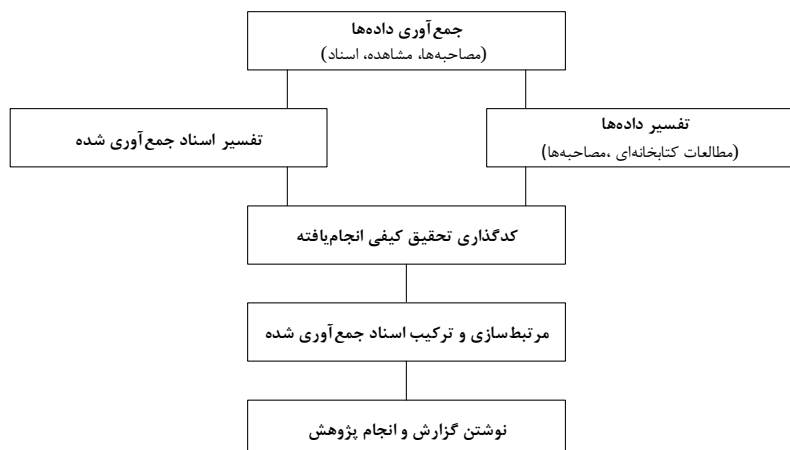


(ب)

شکل (۳): الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه (دایره) در ایران، ب) نقشه موقعیت سیاسی شهر تبریز با نمایش مناطق شهرداری و محدوده شهری همراه با نمایش گسل‌های اصلی (خطوط قرمز) و گسل‌های فرعی (خطوط آبی). منبع: یافته‌های پژوهش و (میرزاجانی، ۱۴۰۴).

نمودار جریان داده

فرآیند پژوهش به‌صورت گام‌به‌گام از شناسایی سازمان‌ها تا تحلیل داده‌ها جریان داشته است. در شکل ۴ جریان پژوهش انجام‌یافته در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۴: جریان این پژوهش. (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های جامعه آماری و خبرگان

جامعه پژوهش شامل ۱۸ خبره از ۱۸ سازمان مرتبط با مدیریت بحران و تاب‌آوری لرزه‌ای در استان آذربایجان شرقی بوده است (جدول ۱). نمونه‌گیری به روش گلوله‌برفی انجام شد. ویژگی‌های دموگرافیک خبرگان به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲: ویژگی‌های خبرگان پژوهش

ویژگی	تعداد	درصد
جنسیت (مرد/زن)	۱۸ (۲/۱۶)	۸۸،۸۹ مرد؛ ۱۱،۱۱ زن
سطح تحصیلات (کارشناسی/کارشناسی ارشد/دکتری)	کارشناسی ارشد و دکتری (۱۲/۶)	۳۳،۳۳ ارشد؛ ۶۶،۶۷ دکتری
سابقه کاری	بیش از ۱۵ سال	٪۱۰۰
حوزه تخصصی	مدیریت بحران	٪۱۰۰
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳		

وضعیت اجرای ده اصل کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری در شهر تبریز

در این بخش، نتایج مربوط به پرسشنامه‌ها ارائه شده است. برای روشن‌سازی وضعیت فعلی، یک نمایش جدولی ارائه شده است که پاسخ‌های دریافتی خلاصه شده است. در جدول ده اصل کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری به همراه شاخص‌های آن‌ها ارائه شده است. مقیاس چهارگانه، از ۰ تا ۳ که پیش‌تر توضیح داده شد، به ترتیب به موارد زیر

اشاره دارد: هنوز اجرا نشده، تا حدی اجرا شده، در حال اجرا، و کاملاً مستقر. جدول ۳ نشان‌دهنده وضعیت مسئولیت‌های شهری بر اساس ده اصل اقدام پیشنهادی UNDRR در شهر تبریز است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این جدول می‌توان مشاهده نمود که تبریز در ده شاخص در مرحله "هنوز اجرا نشده" قرار دارد. ۲۹ شاخص در مرحله "تا حدی اجرا شده" قرار دارند. ۵ شاخص در مرحله "در حال اجرا" است و ۳ شاخص نیز در مرحله "کاملاً مستقر" هستند.

جدول ۳: وضعیت مسئولیت‌های شهری بر اساس ده اصل اقدام پیشنهادی UNDRR

مسئولیت‌ها	هنوز اجرا نشده	تا حدی اجرا شده	در حال اجرا	کاملاً مستقر
اصل اول				
شاخص ۱.۱: کاهش خطر بلایا (DRR) یکی از ملاحظات کلیدی در چشمانداز و اولویت‌های راهبردی شهری.	تا حدی اجرا شده: تهیه برنامه کاهش خطر بلایا (مدیریت بحران شهرداری)			
شاخص ۱.۲: اختیارات و منابع لازم شهر برای برآورده کردن نیازهای کاهش خطر بلایا	تا حدی اجرا شده: منابع ناکافی برای مقابله با حوادث بزرگ (مدیریت بحران شهرداری)			
شاخص ۱.۳: آیا مسئولیت (دپارتمانی که حوادث را مدیریت می‌کند) برای جنبه‌های مختلف تاب‌آوری در برابر بلایا در شهر تعریف شده است	تا حدی اجرا شده: نیاز به مدیریت یکپارچه بحران و ایجاد یک سیستم مدیریت شهری (مدیریت بحران شهرداری)			
اصل دوم				
شاخص ۲.۱: ارزیابی شاخص‌ها و احتمال خطرات در سطح شهر	کاملاً مستقر: مخاطرات اصلی شناسایی شده (مدیریت بحران شهرداری) داده‌ها موجود هستند (شرکت گاز و شرکت توزیع برق)؛ نیاز به تهیه برنامه جامع برای مدیریت بحران‌های طبیعی و انسان‌ساخت (اداره کل راه و شهرسازی)			
شاخص ۲.۲: تعیین درک مشترک خطرات میان نهادهای مرتبط.	تا حدی اجرا شده: به‌روزرسانی اطلاعات به طور مستقل (مدیریت بحران شهرداری)؛ ضرورت بهبود ارتباطات و درک مشترک از مخاطرات (شرکت گاز)؛ لزوم رویکرد مدیریت واحد در مدیریت بحران‌های طبیعی (اداره کل راه و شهرسازی)			
شاخص ۲.۳: بررسی سناریوهای تأثیر خطرات بر شهر	تا حدی اجرا شده: وجود سناریوهای احتمالی (مدیریت بحران شهرداری و شرکت گاز)؛ بررسی سناریوها و به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات سناریوها (شرکت توزیع نیروی برق)؛ عدم درک دقیق از سناریوها (اداره کل راه و شهرسازی)			
شاخص ۲.۴: بررسی اثرات زنجیره‌ای بحران‌ها	هنوز اجرا نشده: بررسی سازمان‌ها به طور مستقل			
شاخص ۲.۵: به‌روزرسانی حداقل ریسک	تا حدی اجرا شده: نقشه‌های خطر برای برخی مخاطرات (مدیریت بحران شهرداری)؛ لزوم تجمیع نقشه‌ها (شرکت گاز)؛ عدم شناسایی بسیاری از مخاطرات (اداره کل راه و شهرسازی)			
اصل سوم				
شاخص ۳.۱: ارزیابی طرح اقتصادی شهر و منابع کافی برای تاب‌آوری	تا حدی اجرا شده: ضرورت سازمان سرمایه‌گذاری شهرداری (مدیریت بحران شهرداری)			
شاخص ۳.۲: بررسی بودجه ذخیره شهر و منابع ضروری برای کاهش ریسک بلایای محلی	در حال اجرا: بودجه ناکافی (مدیریت بحران شهرداری)			
شاخص ۳.۳: ارزیابی کفایت پوشش بیمه در سراسر شهر	در حال اجرا: ترویج پوشش بیمه در تمامی بخش‌ها			
شاخص ۳.۴: بررسی وضعیت کسب‌وکارها در شهر و تأثیر آن‌ها بر تاب‌آوری	تا حدی اجرا شده: وجود توجه کافی به تقویت تاب‌آوری شهر			
اصل چهارم				
شاخص ۴.۱: ارزیابی ناحیه‌بندی ریسک در شهر	تا حدی اجرا شده: نیاز به سیستم جامع مدیریت بحران مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (اداره کل راه و شهرسازی)			
شاخص ۴.۲: ارزیابی توسعه شهری جدید و الزامات آن	هنوز اجرا نشده: وجود سیاست‌های شهری (مدیریت بحران شهرداری)؛ کمبود درک یا الزامات مربوط به تاب‌آوری (اداره کل راه و شهرسازی)			
اصل پنجم				
شاخص ۵.۱: آگاهی و درک خدمات اکوسیستم و نقش آن‌ها در شهر	تا حدی اجرا شده: عدم توجه به کردورهای هوای آزاد و تغییر کاربری اراضی (اداره کل حفاظت محیط‌زیست)			
شاخص ۵.۲: یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های سبز و آبی در سیاست‌ها و پروژه‌های شهری	هنوز اجرا نشده: عدم توجه کافی به حفظ باغات و وضعیت طبیعی رودخانه‌ها (اداره کل حفاظت محیط‌زیست)			
شاخص ۵.۳: آگاهی از خدمات اکوسیستم فراتر از مرزهای شهری و همکاری با دولت‌ها	تا حدی اجرا شده: عدم توجه کافی به وضعیت رودخانه ارس و مراتع مجاور شهر (اداره کل حفاظت محیط‌زیست)			
اصل ششم				
شاخص ۶.۱: مهارت‌ها و تجربیات مورد نیاز برای کاهش خطر در سطح شهر	هنوز اجرا نشده: عدم وجود معیارهای برنامه‌ریزی شهری در گذشته			
شاخص ۶.۲: آموزش عمومی و آگاهی‌بخشی در مورد خطرات زلزله	هنوز اجرا نشده: اطلاعات مربوط به بحران‌ها به طور عمومی و به موقع در دسترس نیست			
شاخص ۶.۳: فرایند اشتراک‌گذاری داده‌ها و اطلاعات	تا حدی اجرا شده: ضرورت ایجاد یک پایگاه‌داده متمرکز و تسهیل اشتراک‌گذاری داده‌ها			
شاخص ۶.۴: آموزش حرفه‌ای در زمینه مسائل خطر و تاب‌آوری	در حال اجرا: لزوم گسترش برنامه‌های آموزشی و افزایش آگاهی عمومی			
شاخص ۶.۵: کیفیت و تنوع منابع آموزشی در زمینه تاب‌آوری و خطر	کاملاً مستقر: منابع آموزشی عمدتاً به زبان فارسی			
شاخص ۶.۶: تبادل اطلاعات با دیگر شهرها و یادگیری از تجربیات آنها	تا حدی اجرا شده: تبادل اطلاعات بین شهرهای بزرگ			
اصل هفتم				
شاخص ۷.۱: نقش سازمان‌های غیردولتی و اجتماعی در زمان بلایای طبیعی	تا حدی اجرا شده: سازمان‌های مردمنهاد، از جمله گروه‌های اجتماعی به عنوان تسهیل‌کننده			
شاخص ۷.۲: استفاده از شبکه‌های اجتماعی در زمان بلایای طبیعی	تا حدی اجرا شده: شبکه‌های اجتماعی ابزارهای مؤثر برای تبادل اطلاعات			
شاخص ۷.۳: نقش کسب‌وکارها در تاب‌آوری اجتماعی	هنوز اجرا نشده: داده‌های کافی در این زمینه موجود نیست			
شاخص ۷.۴: روش‌های مشارکت شهروندان در برنامه‌های کاهش خطر زلزله	هنوز اجرا نشده: بررسی نشده‌اند و نیاز به تحقیقات بیشتری دارند			
اصل هشتم				
شاخص ۸.۱: اولویت شهر در مورد زیرساخت‌های حیاتی	تا حدی اجرا شده: اجرای برنامه‌های تعمیر، نوسازی و مقاوم‌سازی (مدیریت بحران شهرداری)؛ لزوم توسعه برنامه‌ای جامع برای زیرساخت‌ها (شرکت گاز)؛ نیاز به تحلیل شبکه‌ای از شریان‌های حیاتی و به‌پیمندی آسیب‌پذیری (اداره کل راه و شهرسازی)			
شاخص ۸.۲: زیرساخت‌های حفاظتی مانند دستگاه‌های جذب شوک در هنگام زلزله	تا حدی اجرا شده: وجود برخی سازه‌های حفاظتی برای خطرات (مدیریت بحران شهرداری)			

شاخص ۸.۳: وضعیت آب شرب و فاضلاب در مواقع بحران	تا حدی اجرا شده: بیمارستان‌ها در برابر زلزله آسیب‌پذیر هستند (معاونت بهداشت)
شاخص ۸.۴: زیرساخت انرژی و لزوم توجه به خطرات	هنوز اجرا نشده: نیاز فوری به بهبود و تثبیت شریان‌های حیاتی
شاخص ۸.۵: وضعیت زیرساخت‌های حمل‌ونقل در مواقع بحران	تا حدی اجرا شده: لزوم بهبود زیرساخت‌های حمل‌ونقل (اداره کل راه و شهرسازی)
شاخص ۸.۶: کیفیت زیرساخت‌های ارتباطی در مواقع بحران	تا حدی اجرا شده: تقویت زیرساخت‌های ارتباطی در مواقع بحران
شاخص ۸.۷: دسترسی به خدمات بهداشتی در مواقع بحران	کاملاً مستقر: مکان‌یابی بیمارستان‌ها نیاز به ارزیابی مجدد دارد
شاخص ۸.۸: وضعیت تأسیسات آموزشی در مواقع بحران	تا حدی اجرا شده: لزوم آموزش‌های ضروری برای تقویت تاب‌آوری (اداره کل راه و شهرسازی)
شاخص ۸.۹: ارزیابی تجهیزات و توانمندی‌های امدادرسنان	هنوز اجرا نشده: کمبود قلیل‌توجه در تجهیزات برای پاسخ به بحران‌های شدید
اصل نهم	
شاخص ۹.۱: سیستم هشدار اولیه	هنوز اجرا نشده: مسئولیت سیستم هشدار اولیه بر عهده سایر سازمان‌ها (مدیریت بحران شهرداری؛ وجود سیستم هشدار مقدماتی برای بحران‌های قلیل‌پیش‌بینی (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
شاخص ۹.۲: برنامه مدیریت بحران / آمادگی اضطراری	در حال اجرا: وجود برخی برنامه‌ها و اقدامات آمادگی (مدیریت بحران شهرداری؛ برنامه عملیات اضطراری (EOP) وجود دارد (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
شاخص ۹.۳: نیاز به نیروهای پاسخگو	تا حدی اجرا شده: تعداد نیروهای موجود برای پاسخ به بحران‌ها و بحران‌های نسبتاً شدید ناکافی است
شاخص ۹.۴: نیاز به تجهیزات و امدادرسانی	تا حدی اجرا شده: نیازها بر اساس تخمین‌ها و پیش‌بینی‌های باقوه (مدیریت بحران شهرداری؛ منابع کافی برای تهیه تجهیزات با حمایت از نیازهای امدادگران وجود ندارد (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
شاخص ۹.۵: تأمین غذا، پناهگاه، کالاهای ضروری و سوخت پس از بحران	تا حدی اجرا شده: لزوم کمک از سایر استان‌ها و کمک‌های ملی یا بین‌المللی (مدیریت بحران شهرداری؛ برنامه‌ای برای اسکان کارکنان و خانواده‌های آن‌ها وجود ندارد (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
شاخص ۹.۶: همکاری و هماهنگی بین‌سازمانی	تا حدی اجرا شده: وجود مرکز عملیات اضطراری در دفتر مدیریت بحران (مدیریت بحران شهرداری؛ وجود مرکز عملیات اضطراری برای دانشگاه علوم پزشکی و عدم وجود مرکز عملیات اضطراری مشترک (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
شاخص ۹.۷: مانورها و تمرینات برای متخصصان و حرفه‌ای‌ها	در حال اجرا: مانورها و تمرینات عموماً تک‌منظوره (مدیریت بحران شهرداری؛ مانورهای جامع استانی که شامل تمامی سازمان‌ها باشد به‌ندرت برگزار می‌شود (مرکز اورژانس پیش بیمارستانی)
اصل دهم	
شاخص ۱۰.۱: برنامه‌ریزی بازتابی پس از حادثه - پیش از حادثه	تا حدی اجرا شده: برنامه‌ریزی بازتابی وجود دارد، اما این برنامه‌ها جامع نیستند
شاخص ۱۰.۲: فرایندهای ارزیابی پس از حادثه	تا حدی اجرا شده: این فرایندها به‌طور کامل و سیستماتیک هستند نشده‌اند
منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳	

مهم‌ترین شکاف‌ها و نقاط ضعف تاب‌آوری بر اساس نظر خبرگان

بر اساس تحلیل درون‌مایه مصاحبه‌ها و پرسشنامه‌ها، مهم‌ترین شکاف‌ها عبارتند از: - عدم وجود مدیریت بحران یکپارچه و هماهنگی بین‌سازمانی؛ - کمبود بودجه اختصاصی و منابع مالی برای کاهش ریسک؛ - ضعف در جمع‌آوری، اعتبارسنجی و اشتراک‌گذاری داده‌های ریسک (مانند نقشه‌های جامع خطر)؛ - آگاهی عمومی پایین و کمبود آموزش‌های مستمر؛ - آسیب‌پذیری بالای زیرساخت‌های حیاتی (بیمارستان‌ها، شریان‌های آب/برق/گاز)؛ - غفلت از حفاظت اکوسیستم‌های طبیعی و فضاهای سبز. این شکاف‌ها در اکثر اصول (به ویژه ۱، ۳، ۶ و ۸) توسط خبرگان مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

بحث و تبیین یافته‌های پژوهش

تبیین یافته‌ها

فاکتورهای تأثیرگذار در کاهش ریسک لرزه‌ای شهر تبریز

فاکتورهای مربوط به سازماندهی برای تاب‌آوری در شهر تبریز (اصل اول)

ارزیابی کاهش خطر بلایا در تبریز نشان می‌دهد که ملاحظات کاهش خطر بلایا در فرایندهای برنامه‌ریزی شهری شهر گنجانده شده است. با این حال، همکاری و هماهنگی مؤثر بین زیرمجموعه‌های شهرداری همچنان برای ایجاد یک برنامه کاهش خطر بلایا جامع و قوی حیاتی است. در حال حاضر، اگرچه تیم‌ها و تجهیزات اولیه برای پاسخ به بحران‌ها وجود دارند، زیرساخت‌های تبریز برای مقابله با حوادث بزرگ کافی نیست. این امر ضرورت افزایش سرمایه‌گذاری و تخصیص منابع بیشتر برای تقویت ظرفیت‌های تاب‌آوری را نشان می‌دهد.

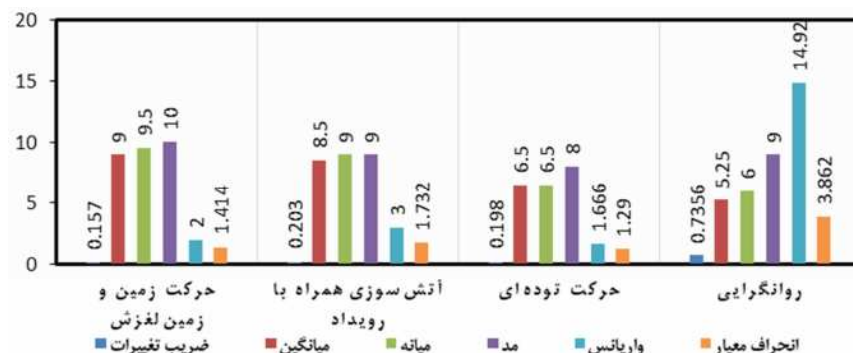
علاوه بر این، نیاز به تعریف دقیق‌تر و یکپارچه‌سازی مسئولیت‌های سازمانی برای جلوگیری از هم‌پوشانی وظایف و بهبود کارایی عملیاتی وجود دارد. ایجاد یک سیستم مدیریت شهری واحد می‌تواند به بهبود تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری شهر در برابر بلایای طبیعی کمک کند. با توجه به این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های جامع‌تری طراحی و اجرا شوند تا تاب‌آوری تبریز تقویت شود، از جمله سرمایه‌گذاری استراتژیک در زیرساخت‌ها، تقویت هماهنگی بین سازمان‌ها و تقویت منابع انسانی و تجهیزات. نتیجه این مرحله بر ایجاد سیستم مدیریت شهری یکپارچه تأکید دارد.

فاکتورهای مربوط به شناسایی، درک و استفاده از سناریوهای ریسک کنونی و آینده در شهر تبریز (اصل دوم)

یکی از الزامات برای پاسخ به سؤالات در این اصل، تخمین ریسک زلزله تبریز به‌طور سریع است. برای این منظور، از ابزار تخمین سریع ریسک (سازمان ملل متحد برای کاهش خطر بلایا، ۲۰۲۳) (QRE) استفاده شده است و به‌منظور سادگی، قسمت‌های ضروری برای پاسخ‌دهی ارائه شده‌اند. هدف اصلی این پژوهش شناسایی ریسک لرزه‌ای تبریز است. بنابراین، گام اولیه شامل تعیین سطح ریسکی است که شهر تبریز در ارتباط با زلزله با آن روبه‌رو است. در این بخش، چهار شاخص در نظر گرفته شده است که هر کدام دارای ده سطح مختلف از ۰ (ناچیز) تا ۱۰ (حتمی) هستند. گزینه‌های انتخاب‌شده برای هر شاخص به شرح زیر است:

لرزش زمین و رانش‌های زمین: حتمی (۱۰)؛ آتش‌سوزی‌های ناشی از زلزله: بسیار محتمل است که رخ دهد (۹)؛ سقوط سنگ از ارتفاعات: احتمالاً رخ خواهد داد (۷)؛ خمیری شدن خاک: بسیار محتمل است که رخ دهد (۹).

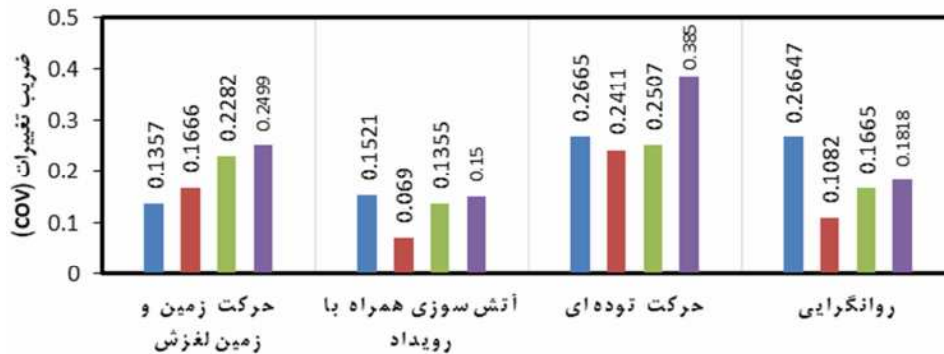
شکل ۵ برای تحلیل آماری و توصیف بهتر پاسخ‌ها ارائه شده است. با توجه به تفاوت‌های میان پاسخ‌های ارسال‌شده، ضریب تغییرات که از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به‌دست می‌آید، گزینه مناسبی برای تحلیل نتایج است. این ضریب معمولاً بین صفر و یک قرار دارد. اگر مقادیر ضریب تغییرات به صفر نزدیک باشند، این نشان‌دهنده همگرایی نظرات جمع‌آوری‌شده است و اگر به یک نزدیک باشند، نشان‌دهنده پراکندگی نظرات است. طبق شکل ۵، در مورد حرکت زمین و لغزش، آتش‌سوزی‌های همراه با زلزله و سقوط سنگ‌ها از ارتفاعات، نظرات همگرا است؛ اما در مورد روان‌گرایی خاک، نظرات متفاوت است.



شکل (۵): تحلیل آماری پاسخ‌ها در مورد سطح ریسک برای شهر تبریز در برابر زلزله. (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

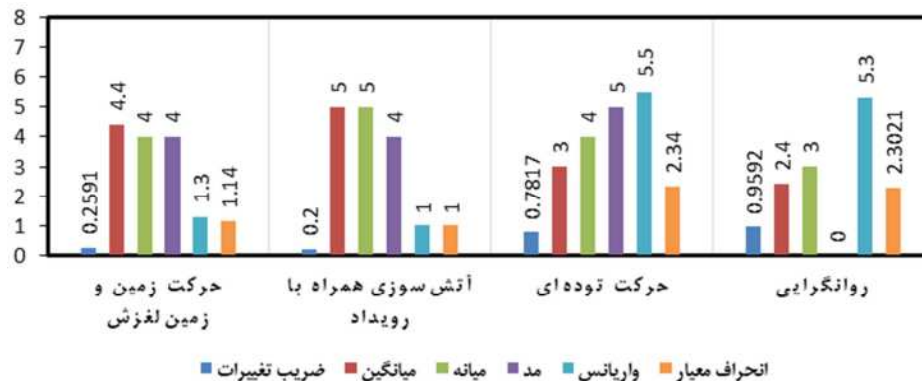
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، تحلیل ضریب تغییرات نشان‌دهنده همگرایی بالای نظرات خبرگان است. در حوزه‌های حرکت زمین و لغزش و همچنین سقوط سنگ‌ها از ارتفاعات، بیشتر اختلافات مشاهده‌شده مربوط

به جنبه‌های انسانی و اجتماعی بوده است. از سوی دیگر، در زمینه روان‌گرایی خاک، زیرساخت‌ها به‌عنوان منبع اصلی نظرات مختلف شناخته شده است.



شکل (۶): ضریب تغییرات پاسخ‌های خبرگان در مورد آسیب‌پذیری شهر تبریز در برابر زلزله. (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، تحلیل پاسخ‌های خبرگان در مورد سطح آمادگی فعلی در شهر تبریز نشان‌دهنده اختلافات قابل‌توجه در مورد سقوط سنگ‌ها و روانگرایی خاک است. این اختلافات نشان‌دهنده عدم اطمینان‌های قابل‌توجهی در مورد آمادگی شهر برای این خطرات خاص است. ضروری است که تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.



شکل (۷): پاسخ‌های خبرگان به سطح آمادگی فعلی در تبریز، شامل اقدامات انجام‌شده یا تعهدات ارائه‌شده (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اگرچه شناسایی خطرات در تبریز انجام شده است، اما فقدان مدیریت یکپارچه منجر به عدم ادغام و به‌روزرسانی منظم این اطلاعات شده و نشان‌دهنده نیاز حیاتی به تقویت ساختار مدیریت بحران و افزایش همکاری میان سازمان‌ها است. در حال حاضر، هیچ درک مشترکی از خطرات در میان سازمان‌های مختلف وجود ندارد که بهبود ارتباطات و همکاری‌ها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. برگزاری جلسات منظم و تبادل اطلاعات فعال می‌تواند رویکردی یکپارچه به مدیریت بحران را تقویت کند.

علاوه بر این، اگرچه سناریوهای بالقوه‌ای برای خطراتی مانند زلزله و سیل تعریف شده‌اند، اما سناریوهای جامع برای سایر انواع خطرات هنوز تکمیل نشده است. این موضوع نیاز به تلاش هماهنگ میان سازمان‌ها برای تهیه و به‌روزرسانی منظم سناریوهایی که طیف گسترده‌تری از خطرات را پوشش می‌دهند، را برجسته می‌کند. علاوه بر این،

اگرچه سازمان‌ها به‌طور مستقل به زنجیره واکنش‌های بحران‌ها پرداخته‌اند، اما رویکرد سیستماتیک و جامع برای ارزیابی و مدیریت اثرات متقابل مختلف بحران‌ها مورد نیاز است.

نقشه‌های خطر برای برخی مخاطرات وجود دارد، اما یک نقشه جامع و به‌روزرسانی شده وجود ندارد. توسعه یک نقشه خطر یکپارچه و لایه‌ای می‌تواند ابزاری حیاتی برای افزایش تاب‌آوری شهری باشد. بر اساس این یافته‌ها، باید برنامه‌ای جامع برای تقویت همکاری بین سازمان‌ها، اطمینان از به‌روزرسانی‌های منظم اطلاعات و تهیه سناریوهای قوی برای آمادگی در برابر خطرات طبیعی و انسان‌ساخت در تبریز تدوین شود.

برای بهبود تاب‌آوری شهر تبریز بر اساس اصل دوم کارت امتیازدهی UNDRR، پیشنهاد می‌شود نقشه خطر یکپارچه و لایه‌ای با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) توسعه یابد، جلسات منظم بین‌سازمانی برای ایجاد درک مشترک از خطرات و سناریوهای لرزه‌ای برگزار شود و سناریوهای جامع برای طیف گسترده‌تری از مخاطرات (مانند زلزله، رانش زمین و اثرات زنجیره‌ای) تهیه گردد تا آمادگی کلی شهر در برابر بحران‌ها تقویت شود.

فاکتورهای مربوط به تقویت ظرفیت اقتصادی برای تاب‌آوری در شهر تبریز (اصل سوم)

یافته‌های پژوهش بر اساس نظرات خبرگان ۱۸ سازمان مرتبط در شهر تبریز نشان می‌دهد که ظرفیت اقتصادی برای تاب‌آوری لرزه‌ای در سطح پایینی قرار دارد. خبرگان مدیریت بحران شهرداری تبریز در ارزیابی شاخص ۳،۱ تأکید کردند که «تأسیس یک سازمان سرمایه‌گذاری شهرداری ضروری است، اما در حال حاضر چنین سازمانی وجود ندارد و برنامه‌ریزی اقتصادی شهر در حوزه تاب‌آوری اولویت کافی ندارد». همچنین، در شاخص ۳،۲، اکثر خبرگان اشاره کردند که «بودجه ذخیره‌شده برای مقابله با بحران‌های بزرگ ناکافی است و تخصیص منابع مالی محدود به پروژه‌های روزمره می‌شود». در خصوص شاخص ۳،۳، خبرگان نمایندگی‌های شرکت‌های بیمه در استان آذربایجان شرقی و مدیریت بحران شهرداری اظهار داشتند که «پوشش بیمه ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها در تبریز محدود است و برنامه‌های ترویجی برای افزایش پوشش بیمه‌ای در تمامی بخش‌های شهری به‌طور مؤثر اجرا نشده است». فقدان داده‌های دقیق در این زمینه، ارزیابی نقش بیمه در تاب‌آوری را برای خبرگان دشوار کرده است. برای شاخص ۳،۴، خبرگان معتقد بودند که «توجه نسبی به تقویت تاب‌آوری کسب‌وکارها وجود دارد، اما همکاری سیستماتیک بین بخش خصوصی و نهادهای عمومی در تبریز ضعیف است و کسب‌وکارها اغلب برنامه تداوم کسب‌وکار (BCP) در برابر زلزله ندارند».

به‌طور کلی، خبرگان تبریز نقاط بحرانی را در کمبود بودجه اختصاصی، ضعف در پوشش بیمه و عدم همکاری مؤثر بین بخش عمومی و خصوصی شناسایی کردند که این عوامل ظرفیت اقتصادی شهر را برای تاب‌آوری لرزه‌ای محدود می‌کند. این یافته‌ها به‌طور مستقیم از تحلیل پاسخ‌های پرسشنامه و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان استخراج شده و نشان‌دهنده وضعیت خاص شهر تبریز است.

فاکتورهای مربوط به دنبال کردن توسعه و طراحی شهر تاب‌آور در شهر تبریز (اصل چهارم)

یافته‌های پژوهش بر اساس ارزیابی خبرگان نشان می‌دهد که توسعه و طراحی شهر تاب‌آور در تبریز در سطح متوسط اما ناکافی قرار دارد. در شاخص ۴،۱، خبرگان اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی تأکید کردند که «نیاز به سیستم جامع مدیریت بحران مبتنی بر GIS وجود دارد، اما در حال حاضر چنین سیستمی به‌طور کامل اجرا نشده

و اطلاعات ریسک به صورت پراکنده مدیریت می‌شود». در شاخص ۴،۲، خبرگان مدیریت بحران شهرداری تبریز اظهار داشتند که «سیاست‌های شهری وجود دارد، اما کمبود درک کافی از الزامات تاب‌آوری در توسعه‌های جدید مشهود است و خطرات زلزله به طور کامل در برنامه‌ریزی‌های جدید لحاظ نمی‌شود». برای شاخص ۴،۳، خبرگان اداره کل راه و شهرسازی اشاره کردند که «لزوم به‌روزرسانی دستورالعمل‌ها و ارزیابی وضعیت ریسک شهر احساس می‌شود، اما آیین‌نامه‌های فعلی نیاز به بازنگری اساسی دارند». در شاخص ۴،۴، خبرگان مدیریت بحران شهرداری و اداره کل راه و شهرسازی بیان کردند که «ریز پهنه‌بندی زلزله اجرا شده است، اما چالش‌های اجرایی (مانند ماده ۱۰۰ قانون شهرداری) مانع از کاربرد مؤثر استانداردها می‌شود».

به‌طور کلی، خبرگان تبریز چالش‌های اصلی را در ضعف اجرای سیستم‌های اطلاعاتی یکپارچه (GIS)، کمبود سیاست‌های روشن برای توسعه جدید، نیاز به به‌روزرسانی مقررات ساختمانی و موانع اجرایی استانداردها شناسایی کردند. این یافته‌ها به‌طور مستقیم از پاسخ‌های پرسشنامه و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته استخراج شده و وضعیت خاص توسعه شهری تبریز را منعکس می‌کند. بر اساس این یافته‌ها، می‌توان پیشنهاد کرد که سیستم GIS جامع اجرا شود، آیین‌نامه‌ها به‌روزرسانی گردد و موانع اجرایی استانداردها برطرف شود. تقویت همکاری میان دستگاه‌های مختلف در بهبود دقت داده‌ها و ارتقای استانداردهای نظارتی بسیار حیاتی خواهد بود. اگر چالش‌های کنونی توسعه شهری به‌طور مناسب برطرف نشوند، ممکن است تهدیدات جدی برای پایداری و تاب‌آوری بلندمدت شهر ایجاد کنند.

فاکتورهای مربوط به حفاظت از حائل‌های طبیعی به‌منظور تقویت عملکردهای حفاظتی توسط اکوسیستم‌های طبیعی در شهر تبریز (اصل پنجم)

ارزیابی شهر تبریز در این بخش نگرانی‌های اساسی در زمینه مدیریت محیط‌زیست و ادغام خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی شهری را نشان می‌دهد. یکی از نکات قابل توجه، توجه محدود به کریدورهای جریان هوا در طراحی شهری و ساختمان‌های بلندمرتبه است که ظرفیت خود پاک‌سازی محیط و فیلتر طبیعی هوا را تحت تأثیر قرار داده است. تغییر کاربری فضاهای سبز و باغات شهری آلودگی هوا را تشدید کرده و نوسانات دمایی بین روز و شب را افزایش داده است، همچنین آلودگی صوتی را افزایش داده و باعث آزادسازی آلاینده‌های مختلف شده است. در دهه‌های اخیر، غفلت از برنامه‌ریزی کاربری زمین به‌طور منفی بر تعادل اکولوژیک شهر و محیط‌زیست اطراف آن تأثیر گذاشته است. علاوه بر این، وجود سکونتگاه‌های غیررسمی و مراکز نظامی در داخل اکوسیستم‌های حساس، چالش‌های بیشتری ایجاد کرده است.

علاوه بر این، ادغام زیرساخت‌های سبز و آبی در سیاست‌های شهری ناکافی بوده است. باغات شهری که به تدریج کاهش یافته‌اند، توجه کافی دریافت نکرده‌اند و وضعیت طبیعی رودخانه‌ها و جویبارهای تبریز نیز نادیده گرفته شده است. نیازهای آب محیط‌زیستی این منابع آبی به‌طور مناسب تأمین نشده و بسیاری از قنوت‌ها به دلیل عدم حفظ صحیح از دست رفته‌اند. علاوه بر این، توسعه فضاهای سبز و پارک‌های شهری ناکافی بوده و استانداردهای موجود برای فضای سبز به‌ازای هر نفر رعایت نشده است. تأسیسات تصفیه فاضلاب شهری نیز از نیازهای واقعی فاصله دارد که نشان‌دهنده شکاف قابل توجهی در زیرساخت‌های زیست‌محیطی است.

فراتر از محیط‌زیست شهری، وضعیت رودخانه ارس نشان‌دهنده غفلت گسترده‌تری از خدمات اکوسیستم فراتر از مرزهای شهری است و بر لزوم مدیریت پایدار تأمین آب و توجه ناکافی به وضعیت مراتع اطراف شهر تأکید شده

است. ضرورت برنامه‌های جنگل‌کاری و اقداماتی برای مقابله با گردوغبار منطقه‌ای، چالش‌های زیست‌محیطی فشاری که تبریز با آن روبه‌رو است را بیشتر نشان می‌دهد.

بر اساس ارزیابی جامع، به‌طور قوی توصیه می‌شود که اقدامات مدیریتی و سیاست‌های حفاظتی به‌طور استراتژیک طراحی شوند تا به اولویت‌دادن به بهبود کیفیت زندگی شهری و حفظ منابع طبیعی پرداخته شود (جدول ۴). با اجرای این تدابیر، تبریز می‌تواند تاب‌آوری اکوسیستم‌های طبیعی خود را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و آسیب‌پذیری شهر را در برابر تغییرات اقلیمی و بلایای طبیعی کاهش دهد.

جدول (۴): اقدامات پیشنهادی برای دستیابی به حداکثر تاب‌آوری

زمان‌بندی	سازمان مسئول	اقدام
۱۰ سال	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران شهرداری تبریز	بررسی الگوهای ساخت‌وساز و طراحی خیابان‌ها و بهبود شرایط فعلی
۱۰ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز	ارزیابی مجدد فضاهای سبز شهری و استانداردهای کمی و کیفی آن‌ها
۱۰ سال	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران شهرداری تبریز	الزامی نمودن آمایش سرزمینی در بارگذاری‌ها و ساخت‌وسازهای شهری و پیرامون شهر
۱۰ سال	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران شهرداری تبریز	مهندسی مجدد در اصلاح حاشیه‌نشینی و جانمایی مراکز نظامی پیرامون شهر
۱۰ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - سازمان منابع طبیعی	ارزیابی مجدد فضاهای سبز شهری و کمربندهای سبز شهرها
۲۰ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی - شرکت آب‌وفاضلاب استان آذربایجان شرقی	بازنگری در مسیرها و رودخانه‌های داخل و مشرف شهر و اعاده آنها به وضعیت طبیعی
۲۵ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی	تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی رودخانه‌ها
۵ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی	شناسایی و بازسازی قنوات تبریز و اطراف آن
۱۰ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - سازمان منابع طبیعی	ارزیابی مجدد ابعاد کمی و کیفی فضاهای سبز شهری و کمربندهای سبز
۵ سال	شرکت آب‌وفاضلاب استان آذربایجان شرقی - سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی	تأمین منابع مالی و توسعه تأسیسات تصفیه فاضلاب شهری طبق نیازها
۱۰ سال	مدیریت بحران شهرداری تبریز - مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - شورای اسلامی استان	بهینه‌سازی منابع درآمدی شهرداری برای انتقال آب ارس به تبریز
۵ سال	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - نمایندگان استان در مجلس شورای اسلامی	استفاده از نخبگان تبریز برای اعمال دیپلماسی مؤثر در حفظ کیفیت آب رودخانه ارس
۲۰ سال	مدیریت بحران استانداری آذربایجان شرقی - مدیریت بحران شهرداری تبریز - سازمان منابع طبیعی - اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی	بازسازی مراتع اطراف شهر و اجرای جنگل‌کاری برای کاهش گردوغبار فرامنطقه‌ای

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳

فاکتورهای مربوط به تقویت ظرفیت نهادی برای تاب‌آوری در شهر تبریز (اصل ششم)

شهر تبریز در این بخش نقاط ضعف قابل‌توجهی در مهارت‌ها و تجربیات ضروری برای کاهش خطر در سطح شهر را دارد. بی‌توجهی به معیارهای برنامه‌ریزی شهری و توسعه نامتوازن، شکاف‌های عمده‌ای ایجاد کرده است که توانایی شهر در ارتقای تاب‌آوری را دشوار کرده است. علاوه بر این، سطح آگاهی عمومی در مورد خطرات زلزله و بحران‌ها ناکافی است و انتشار اطلاعات در حال حاضر محدود به رویدادهای واقعی است. برای رفع این شکاف، ضروری است که برنامه‌ها و کمپین‌های آموزشی مستمر برای افزایش آگاهی عمومی در مورد خطرات احتمالی و پاسخ‌های مناسب طراحی و اجرا شوند.

همچنین، نیاز فوری به بهبود اشتراک‌گذاری داده‌ها و اطلاعات مرتبط بین ذی‌نفعان وجود دارد. اگرچه برخی از لایه‌های اطلاعاتی موجود هستند، اما تجزیه و تحلیل و تفسیر جامع آنها وجود ندارد. جمع‌آوری، اعتبارسنجی، دسته‌بندی و تجزیه و تحلیل سیستماتیک داده‌های موجود از سازمان‌های مختلف برای شناسایی نقاط ضعف و بهبود تاب‌آوری ضروری است. ایجاد یک پایگاه داده متمرکز، همراه با به‌روزرسانی‌های منظم و تسهیل اشتراک‌گذاری داده‌ها میان همه ذی‌نفعان می‌تواند وضعیت را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

آموزش در زمینه مدیریت بحران و تاب‌آوری نیز یکی دیگر از حوزه‌های نیازمند توجه است. اگرچه برنامه‌های آموزشی ارزشمندی برگزار می‌شود، اما این برنامه‌ها قادر به پوشش نیازهای متنوع همه ذی‌نفعان نیستند و نیاز به توسعه بیشتر برای افزایش اثربخشی دارند. علاوه بر این، کیفیت و تنوع منابع آموزشی مرتبط با تاب‌آوری و خطر محدود است؛ زیرا اکثر مواد فقط به زبان فارسی در دسترس هستند که دسترسی گروه‌های غیر فارسی زبان به اطلاعات حیاتی را محدود می‌کند.

در نهایت، اگرچه تبادل اطلاعات و تجربیات بین شهرها انجام می‌شود، اما این تبادل به اندازه کافی گسترده نیست و نیاز به تقویت دارد تا از درس‌های آموخته‌شده از سایر محیط‌های شهری به‌طور مؤثر استفاده شود. در راستای این نتایج ارزیابی، توصیه می‌شود که تلاش‌های بیشتری برای ارتقای مهارت‌ها، آموزش و اشتراک‌گذاری اطلاعات جهت تقویت تاب‌آوری در شهر تبریز انجام شود. یکی از مسائل اساسی که نیاز به توجه فوری دارد، عدم اشتراک منابع بین سازمان‌ها است که برای ترویج رویکرد مشترک به تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی ضروری است.

باتوجه به مشخص بودن فاکتورهای مربوط به اصل هفتم و عدم نیاز به توضیح بیشتر، فاکتورهای اصل هشتم مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

فاکتورهای مربوط به تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌ها در شهر تبریز (اصل هشتم)

ارزیابی زیرساخت‌های حیاتی تبریز نشان می‌دهد که برنامه‌های بازسازی و تقویت وجود دارد، اگرچه همکاری میان سازمان‌ها و شناسایی مناطق حیاتی همچنان ضروری است. شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی اقدامات مختلفی برای تقویت تاب‌آوری در بخش آب انجام داده است، از جمله: - نصب خطوط لوله فولادی پشتیبان در مناطقی که قبلاً به لوله‌های بتنی وابسته بودند؛ - ساخت مخازن ذخیره با ظرفیت‌های ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب، همراه با پمپاژ عملیاتی در شهرک اندیشه؛ - تأسیس سیستم پمپاژ اضطراری برای افزایش ظرفیت ایستگاه

پمپاژ ۵ در شهر تبریز؛ - حفاری چاه‌ها در دامنه‌های کوه سهند؛ - اجرای عملیات مرمت لوله‌های بتنی و پیاده‌سازی سیستم حفاظت کاتدی مرتبط، همراه با به‌روزرسانی تأسیسات.

برای دستیابی به تاب‌آوری حداکثری، توصیه‌های زیر مطرح شده است: - تکمیل خط انتقال آب و تأسیسات تصفیه مربوطه از رودخانه ارس؛ - تأمین منبع برق پشتیبان برای تأسیسات آب از رودخانه زرینه‌رود؛ - اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی برای تأسیسات آبی که از رودخانه زرینه تأمین می‌شوند.

شرکت گاز استان آذربایجان شرقی توضیح داده است که طراحی و اجرای تأسیسات و شبکه‌ها بر اساس استاندارد B31.8 ASME است و برای دستیابی به تاب‌آوری حداکثری، تجزیه و تحلیل تنش شبکه‌های گاز با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی باید انجام شود. اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی به سیلاب‌های اخیر و آسیب‌پذیری شدید شهرهای استان مانند اهر، کلیبر، آذرشهر و تبریز اشاره کرده است. طبق گزارش شرکت آب‌وفاضلاب استان آذربایجان شرقی، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد از آب شرب تبریز از تأسیسات تأمین آب این شهر تأمین می‌شود.

برای دستیابی به تاب‌آوری حداکثری، اقدامات زیر پیشنهاد شده است: - تأمین برق پشتیبان برای تأسیسات آب از رودخانه زرینه‌رود؛ - شناسایی منبع آب جایگزین برای تبریز در مواقع اضطراری، مانند طرح ارس؛ - اجرای تدابیر برای نظارت و جلوگیری از هدررفت آب در شبکه توزیع شهری؛ - تقویت زیرساخت‌ها و تأسیسات توزیع آب در تبریز، از جمله مخازن، لوله‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ؛ - تأمین منبع آب جایگزین برای مراکز حساس، مانند نیروگاه تبریز، فراتر از تأمین آب از رودخانه زرینه‌رود؛ - اطمینان از عملیاتی ماندن اولین خط لوله (لوله‌های بتنی) در مناطق بای‌پس شده.

در صورت وقوع زلزله بزرگ، انتظار می‌رود که بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی در تبریز با اختلالات زیادی روبه‌رو شوند و خدمات بهداشتی کاهش یابد. ارزیابی‌های سازه‌ای نشان‌دهنده عدم مقاومت در برابر زلزله در بسیاری از ساختمان‌های بیمارستانی است. برای افزایش تاب‌آوری، ساخت بیمارستان جدید با ظرفیت ۱۰۰۰ تخت در دست اجرا است. تلاش‌هایی نیز برای جایگزینی بیمارستان‌های فرسوده در جریان است، اگرچه این فرایند ممکن است زمان‌بر باشد. ثابت شده است که زیرساخت‌های انرژی نیاز به بهبود و توجه ویژه برای عملکرد صحیح در شرایط بحران دارند. مقابله با خطرات مربوط به ناپایداری شریان‌های حیاتی امری ضروری است. یکی از مهم‌ترین عوامل در پاسخ به بحران، کاهش خطرات الکتریکی و آتش‌سوزی است.

برای دستیابی به تاب‌آوری حداکثری، پیشنهاد شده است که: - تیم‌های پاسخ سریع ایجاد شود؛ - آموزش‌های کاهش خطرات انجام گیرد؛ - تجهیزات مناسب استفاده شود؛ - اطلاع‌رسانی عمومی صورت گیرد.

زیرساخت‌های حمل‌ونقل که برای پاسخ مؤثر به بحران‌ها ضروری است، نیاز به تقویت دارند تا خدمات حیاتی در شرایط اضطراری ارائه شوند. به‌طور مشابه، زیرساخت‌های ارتباطی باید تقویت شوند تا تبادل اطلاعات مؤثر در شرایط بحران انجام شود.

دسترسی به خدمات بهداشتی در شرایط اضطراری یکی دیگر از اولویت‌ها است. برخی از بیمارستان‌ها، از جمله بیمارستان عالی‌نسب، در امتداد گسل‌ها واقع شده‌اند. دانشگاه علوم پزشکی تبریز برنامه‌هایی را برای سازماندهی پشتیبانی از استان‌های همجوار و کمک‌های بین‌المللی در طی ۳۶ ساعت در صورت وقوع زلزله شدید اعلام کرده

است و برای سایر بحران‌ها نیز تدابیر مشابهی گرفته شده است. واحد بهداشت محیطی پاسخ‌های مبتنی بر سناریو را برای اطمینان از پاسخ سریع به خدمات بهداشتی تهیه کرده است (شکل ۸).

شناسایی شده است که تجهیزات امداد رسانی اولیه برای مقابله با بحران‌ها کافی نیست. نیاز به تقویت دارایی‌ها و تجهیزات برای آماده‌سازی در برابر شدیدترین سناریوها وجود دارد. شهرداری، علی‌رغم اختصاص بودجه‌ها و منابع برای خرید تجهیزات و دارایی‌ها، متوجه شده است که مقدار آنها برای پاسخ به بحران‌های نسبتاً شدید کافی نیست. شرکت گاز استان آذربایجان شرقی همچنین توضیح داده است که برنامه‌ریزی برای خرید تجهیزات ضروری به‌منظور تکمیل فهرست بحران و ژنراتورهای پشتیبان (کوتاه‌مدت و بلندمدت) و تأسیس زیرساخت برای تجهیزات بحران (تلفن‌های ماهواره‌ای، کانتینرهای بحران و خودروهای بحران) در مرحله بودجه‌بندی قرار دارد، اما فرایند خرید همچنان در حال انجام است (برای شدیدترین سناریوها). برای دستیابی به بالاترین میزان تاب‌آوری، پیشنهاد شده است که دارایی‌های لازم تقویت شود تا آمادگی برای شدیدترین سناریوها فراهم شود.



شکل ۸): نمودار جریان پاسخ به بلايا و وضعیت‌های اضطراری گروه مدیریت و کاهش ریسک بلاياي طبیعی و انسانی
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳ (بر اساس اسناد و پاسخ‌های معاونت بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تبریز و مرکز اورژانس پیش‌بیمارستانی و مدیریت حوادث آذربایجان شرقی)

بر اساس نتایج این ارزیابی، به‌شدت توصیه می‌شود که اقدامات مؤثری برای توسعه یک طرح زیرساختی جامع، بهبود زیرساخت‌های حفاظتی، نوسازی بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی، تأمین برق جایگزین برای تأسیسات تأمین آب، تقویت زیرساخت‌های حمل‌ونقل و ایجاد تیم‌های واکنش سریع همراه با آموزش‌های لازم در تبریز انجام شود.

فاکتورهای مربوط به اطمینان از آمادگی و پاسخ مؤثر به بحران‌ها در شهر تبریز (اصل نهم)

یافته‌های پژوهش بر اساس ارزیابی خبرگان نشان می‌دهد که آمادگی و پاسخ مؤثر به بحران‌ها در تبریز چالش‌های قابل‌توجهی دارد. شهر تبریز در حال حاضر فاقد یک سیستم هشدار اولیه جامع برای بحران‌ها است و خبرگان

مدیریت بحران شهرداری و مرکز اورژانس پیش‌بیمارستانی چالش‌هایی را در ارتباط مؤثر هشدارها به عموم مردم شناسایی کرده‌اند. برای رفع این مشکلات، پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود: - استفاده از کانال‌های پیام‌رسانی به‌روز و قابل‌دسترس برای رسیدن به تمامی شهروندان؛ - نصب حسگرهای لرزه‌ای در مناطق پرخطر؛ - ایجاد یک پلتفرم یکپارچه برای اشتراک‌گذاری داده‌ها میان تمامی سازمان‌های دخیل در مرکز فرماندهی و پاسخ، به‌منظور اطمینان از ارسال هشدارهای اولیه هماهنگ و به‌موقع.

درحالی‌که یک برنامه مدیریت بحران وجود دارد، اثرگذاری آن می‌تواند با به‌روزرسانی‌های سالانه و هماهنگی بهتر میان سازمان‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یابد. برای حداکثر کردن تاب‌آوری، اقدامات زیر توسط خبرگان پیشنهاد شده است: - به‌روزرسانی برنامه عملیات اضطراری (EOP) به‌صورت سالانه؛ - برگزاری مانورها و تمرینات منظم بر اساس برنامه پاسخ؛ - آگاه‌سازی مدیریت ارشد سازمان از برنامه پاسخ و تأکید بر اجرای آن در مواقع اضطراری؛ - توسعه یک برنامه پاسخ جامع در سطح استانی که نقش‌های سازمان‌ها در پاسخ به حوادث و پروتکل‌های ارتباطی آن‌ها را مشخص کند.

کمبود نیرو برای پاسخ به بحران‌ها شناسایی شده است که نشان‌دهنده نیاز به تقویت نیروی انسانی است. اکثر خبرگان پیشنهاد داده‌اند افراد بیشتری برای پاسخ سریع به بحران‌ها استخدام و آموزش داده شوند. درحالی‌که تجهیزات امدادی بر اساس پیش‌بینی‌ها تأمین شده است، نیاز به منابع اضافی برای تقویت این تجهیزات وجود دارد. برای رسیدن به بیشترین تاب‌آوری، اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود: - تهیه یک فهرست جامع از تجهیزات ضروری برای کمک به قربانیان؛ - تخصیص منابع لازم برای تأمین این تجهیزات؛ - توسعه یک برنامه خاص برای استفاده از ظرفیت داوطلبان در صورت نیاز؛ - برگزاری دوره‌های آموزشی برای آماده‌سازی داوطلبان برای مدیریت مؤثر حوادث.

خبرگان مدیریت بحران شهرداری و مرکز اورژانس پیش‌بیمارستانی بیان کردند که «وابستگی به کمک‌های استانی، ملی یا بین‌المللی مشهود است و برنامه اسکان کارکنان و خانواده‌ها وجود ندارد. برای حداکثر کردن تاب‌آوری، اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود: - تخصیص بودجه لازم به‌طور خاص برای پاسخ به بحران‌ها به‌منظور حمایت از کارکنان و خانواده‌های آن‌ها؛ - توسعه یک برنامه حمایتی جامع برای کارکنان و خانواده‌های آن‌ها.

خبرگان خاطرنشان کردند که «مراکز عملیات اضطراری جداگانه وجود دارد، اما هماهنگی جامع بین آن‌ها وجود ندارد». پیشنهاد می‌شود امکان‌سنجی ایجاد یک مرکز عملیات اضطراری مشترک در تبریز برای مدیریت مشترک حوادث با مشارکت تمامی سازمان‌ها بررسی شود. مانورهای فعلی بیشتر تک‌منظوره و ناکافی جامع هستند، بنابراین، نیاز به پیاده‌سازی تمرینات جامع‌تری است که شامل چندین سازمان باشد. برای دستیابی به حداکثر تاب‌آوری، رویکرد زیر پیشنهاد می‌شود: - هر سازمان باید سالانه دو مانور تک‌منظوره برگزار کند؛ - هر سازمان باید سالانه یک مانور مقیاس کامل برگزار کند؛ - تمرین مقیاس کامل که شامل تمامی سازمان‌ها باشد، باید هر دو سال یک‌بار توسط مدیریت بحران استان برگزار شود.

فاکتورهای مربوط به تسریع در بازسازی و بهبود روند بازسازی در شهر تبریز (اصل دهم)

مدیریت بحران شهرداری تبریز به وجود برنامه‌ها و استراتژی‌های بازسازی پس از فاجعه اذعان کرده است. با این حال، این برنامه‌ها ناقص تلقی شده و نیاز به تقویت دارند. برای رفع این مشکل، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های موجود

به‌روزرسانی و تقویت شوند تا جامعیت و اثربخشی آن‌ها بهبود یابد. علاوه بر این، برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای اعضای درگیر در برنامه‌ریزی بازیابی می‌تواند به بهبود دانش و مهارت‌های آن‌ها کمک کند.

اگرچه ارزیابی‌هایی برای حوادث گذشته در تبریز انجام شده است، اما رویکرد جامع و سیستماتیک برای مستندسازی و تجزیه و تحلیل درس‌های آموخته‌شده وجود ندارد. برای رفع این مشکل، توسعه یک سیستم جامع پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، تشویق سازمان‌های مختلف به ارائه گزارش‌های منظم و دقیق در مورد ارزیابی‌های پس از حادثه می‌تواند به افزایش کارایی در فرایند بازیابی کمک کند.

نتایج ارزیابی اولیه ریسک زلزله و پیشنهادها برای افزایش تاب‌آوری در شهر تبریز

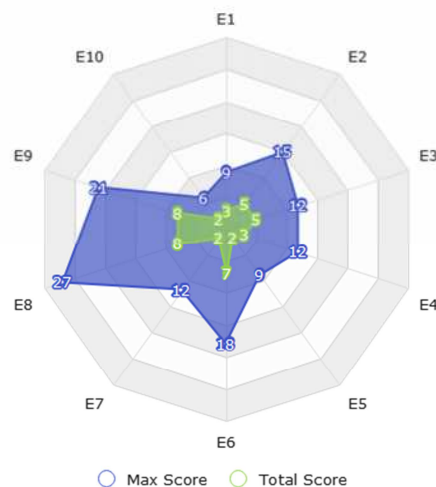
ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای در شهر تبریز و یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده وجود شکاف‌های متعددی در ظرفیت‌های این شهر برای اجرای موفق اقدامات کاهش خطر زلزله، از جمله توسعه و طراحی شهر، حفاظت از بافرهای طبیعی، تقویت ظرفیت نهادی، تاب‌آوری زیرساخت‌ها و آمادگی مؤثر و واکنش در برابر بلایا آشکار هستند. برخی از اقدامات مانند وجود واحدهای مدیریت بحران و برخی نقشه‌های خطر در حال حاضر موجود هستند و می‌توانند به شهر تبریز در هنگام وقوع بلایای طبیعی کمک کنند. همچنین، تخصیص بودجه ناکافی باعث شده است تا کاهش خطر زلزله اولویت بالایی در بین مسئولین نداشته باشد و اقدامات انجام‌یافته محدود به یک سری عملیات مشخص در سطح شهر گردد. موارد مهمی که توسط خبرگان به آن اشاره شده است شامل: کافی نبودن منابع برای مقابله با حوادث بزرگ، ضرورت مدیریت یکپارچه بحران و ایجاد یک سیستم مدیریت واحد شهری، لزوم تجمیع نقشه‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مرتبط با تأسیسات شهری و GIS، توسعه نقشه جامع خطر، ایجاد سازمان سرمایه‌گذاری شهرداری، توسعه شهری جدید، لغو ماده ۱۰۰ قانون شهرداری، عدم توجه به مسائل زیست‌محیطی، یک پایگاه داده متمرکز و تسهیل اشتراک‌گذاری داده‌ها، لزوم بهبود زیرساخت‌های حمل‌ونقل و مکان‌یابی بیمارستان‌ها است.

بنابراین، حمایت مالی جهت به‌روزرسانی تجهیزات و سامانه‌های موجود، توسعه نقشه‌ها شامل نقشه‌های خطر، آسیب‌پذیری و ریسک لرزه‌ای، افزایش آگاهی عمومی مردم برای مقابله با مخاطرات طبیعی نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد.

نتایج ارزیابی اولیه ریسک زلزله برای شهر تبریز نشان می‌دهد که این شهر در زمینه تاب‌آوری زلزله در وضعیت نسبتاً ضعیفی قرار دارد و امتیاز ۴۵ از ۱۴۱ را کسب کرده است (شکل ۹). بررسی اصول مختلف نشان‌دهنده نیاز به تقویت و بهبود در جنبه‌های مختلف از جمله سازماندهی، شناسایی ریسک، ظرفیت مالی و تاب‌آوری زیرساخت‌ها است.

علاوه بر این، ضعف‌ها در آموزش و آگاهی جامعه، کمبود بودجه محافظت‌شده و عدم وجود برنامه‌های جامع پاسخ به بلایا و بازسازی از جمله مسائل کلیدی هستند که نیاز به توجه دارند. بنابراین، به‌منظور تقویت تاب‌آوری شهر تبریز در برابر بلایای طبیعی، ضروری است که بهبودهای اساسی در برنامه‌ریزی، ارزیابی و اجرای سیاست‌ها و استراتژی‌های مرتبط با مدیریت خطر زلزله اعمال شود. این نتایج با پژوهش‌های داخلی همخوانی دارد؛ برای مثال، شمعی و میرزاده (۱۳۹۸) نیز آسیب‌پذیری بالای مناطق تبریز در برابر زلزله را مورد تأکید قرار داده‌اند و ملکی و پورمحمدی (۱۴۰۳) بر آسیب‌پذیری کالبدی ناشی از نزدیکی به گسل شمال تبریز تأکید کرده‌اند.

در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌یافته در سایر کشورهای جهان، پژوهش مشابهی در کشور مالزی توسط (بن ابو بکر و بنتی محمد، ۲۰۲۳) انجام یافته است که به بررسی توانایی کاهش خطر بلایای زلزله در دولت‌های محلی مالزی پرداخته شده است. این مطالعه با استفاده از روش‌شناسی کیفی شامل مطالعات موردی و مصاحبه‌ها، توانایی‌های کلیدی مانند توان مالی، نیروی انسانی و اراده سیاسی را ارزیابی کرده است. یافته‌ها نشان‌دهنده شکاف‌های قابل-توجهی در توانایی‌ها این دولت‌ها که شامل کمبود بودجه، تخصص و عدم اولویت‌دهی به ابتکارات کاهش خطر بلایا در برنامه‌ریزی استراتژیک بوده است. برای بهبود توانایی کاهش خطر بلایا، این مطالعه افزایش حمایت مالی، ترویج اشتراک دانش با متخصصان خارجی و تقویت پاسخگویی را توصیه کرده است. ایجاد یک واحد اختصاصی کاهش خطر بلایا به‌شدت توصیه شده تا مدیریت مؤثرتری صورت گیرد. در نهایت، تعهد سیاسی و فرهنگ قوی‌تر آمادگی در برابر بلایا برای بهبود تلاش‌های دولت‌های محلی در زمینه کاهش خطر بلایا ضروری دانسته شده است. همچنین، شبیه به مطالعه سیم و همکاران (۲۰۱۸) در هنگ‌کنگ است که علی‌رغم منابع مالی بهتر، نیاز به بهبود حکمرانی و همکاری بین‌سازمانی را نشان داد. تفاوت کلیدی تبریز، موقعیت لرزه‌ای بسیار بالا (گسل فعال شمال تبریز با عدم فعالیت لرزه‌ای بیش از ۲۰۰ سال) و وابستگی بیشتر به کمک‌های ملی/بین‌المللی در بحران است که آسیب‌پذیری را نسبت به شهرهایی مانند سنگاپور یا توکیو افزایش می‌دهد.



شکل (۹): امتیاز کلی تاب‌آوری زلزله در تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی ظرفیت کاهش ریسک لرزه‌ای و توانمندی شهر تبریز در تاب‌آوری در برابر زلزله، با بهره‌گیری از کارت امتیازدهی تاب‌آوری شهری UNDRR (با ۴۷ شاخص و ۱۰ اصل اساسی همسو با چارچوب سندای) انجام شد. روش پژوهش کیفی و مبتنی بر مطالعه موردی بود و داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۸ خبره (۸۹٪ مرد، ۱۱٪ زن؛ ۳۳٪ کارشناسی ارشد، ۶۷٪ دکتری) از ۱۸ سازمان مرتبط، پرسشنامه و تحلیل اسناد گردآوری و با روش تحلیل درون‌مایه بررسی گردید.

یافته‌های پژوهش نشان داد که تبریز با کسب امتیاز کلی ۴۵ از ۱۴۱ (حدود ۳۲٪) در سطح پایینی از تاب‌آوری لرزه‌ای قرار دارد. ظرفیت‌های موجود شامل وجود واحدهای مدیریت بحران در سازمان‌ها، برخی نقشه‌های خطر اولیه، تخصص خبرگان و اراده سیاسی برای بهبود وضعیت فعلی است. با این حال، مهم‌ترین شکاف‌ها عبارتند از: عدم

هماهنگی و مدیریت یکپارچه بحران، کمبود بودجه اختصاصی، ضعف در جمع‌آوری، اعتبارسنجی و اشتراک‌گذاری داده‌ها، آگاهی عمومی پایین، آسیب‌پذیری بالای زیرساخت‌های حیاتی (مانند بیمارستان‌ها و شریان‌های آب، برق و گاز) و غفلت از حفاظت اکوسیستم‌های طبیعی است. این نتایج با پژوهش‌های پیشین داخلی (مانند شمعی و میرزاده، ۱۳۹۸؛ ملکی و پورمحمدی، ۱۴۰۳) و خارجی (مانند بن ابو بکر و بنتی محمد، ۲۰۲۳ در مالزی) همخوانی دارد و موقعیت لرزه‌ای پرریسک تبریز بر گسل فعال شمال تبریز را به‌عنوان عامل تشدیدکننده آسیب‌پذیری مورد تأکید قرار می‌دهد.

نوآوری این پژوهش در کاربرد سیستماتیک ابزار UNDRR به‌صورت کیفی-ترکیبی در یک کلان‌شهر لرزه‌خیز ایران و تمرکز بر دیدگاه‌های نهادی خبرگان است که دیدگاه جامعی فراتر از ارزیابی‌های صرف کالبدی ارائه می‌دهد. پیشنهادها راهبردی شامل ایجاد مدیریت بحران یکپارچه شهری، افزایش سرمایه‌گذاری در مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها، توسعه آموزش‌های مستمر عمومی و حرفه‌ای، حفاظت از حائل‌های طبیعی و ایجاد پایگاه داده مرکزی است که می‌تواند پایه‌ای برای سیاست‌گذاری عملی در سطح محلی و استانی فراهم آورد.

در نهایت، تقویت تاب‌آوری تبریز نیازمند اقدامات فوری و مستمر است تا از تکرار خسارت‌های زلزله‌های تاریخی جلوگیری شود. با اجرای پیشنهادهای ارائه‌شده و ارزیابی دوره‌ای، این شهر می‌تواند به سمت توسعه پایدار و تاب‌آور حرکت کند و الگویی برای سایر کلان‌شهرهای پرریسک ایران باشد.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

از حمایت‌های انجام‌یافته توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی جهت انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- حکمت‌نیا، حسن؛ نصیری‌هنده خاله، اسماعیل؛ اسکندری‌نوده، محمد؛ یونسی‌سندی، ریحانه. (۱۴۰۲). تبیین معیارهای کالبدی مؤثر در ارتقای تاب‌آوری سکونتگاه‌های غیررسمی در برابر مخاطرات محیطی (مورد مطالعه: شهر همدان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۵)، صص: ۷۹-۹۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.40625.1861>.
- حیدری مظفر، مرتضی؛ تاج‌بخشیان، مرضیه. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های شهرستان نهاوند در برابر زلزله. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۴)، صص: ۵۷-۷۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.39334.1830>.
- رهنما، محمدرحیم؛ الهی‌چورن، محمدعلی. (۱۴۰۲). ارزیابی ابعاد تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب در شهرهای غرب استان مازندران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۸)، صص: ۱-۲۲. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.41127.1866>.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی. (۱۴۰۰). ناگرهای آماری استان آذربایجان شرقی سال ۱۴۰۰.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی. (۱۴۰۱الف). سالنامه آماری استان آذربایجان شرقی ۱۴۰۰ - جلد ۲۱: هزینه و درآمد خانوار جدول ۶-۲۱ (هزار ریال).
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی. (۱۴۰۱ب). مطالعات برنامه آمایش استان آذربایجان شرقی - جلد دوم: تحلیل اجتماعی و فرهنگی جدول ۶.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی. (۱۴۰۱ج). مطالعات برنامه آمایش استان آذربایجان شرقی - جلد دوم: تحلیل اجتماعی و فرهنگی جدول ۱۲.

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی. (۱۴۰۱). مطالعات برنامه آمایش استان آذربایجان شرقی - جلد دوم: تحلیل اجتماعی و فرهنگی جدول ۲۷.
- شماعی، علی؛ میرزآزاده، حجت. (۱۳۹۸). تحلیل فضایی تاب‌آوری مناطق شهر تبریز در برابر زلزله. مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۰)، صص: ۲۴۵-۲۶۶. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.25449.1415>.
- مرکز آمار ایران. (۱۴۰۳). وبسایت: <https://amar.org.ir>، تاریخ دسترسی: تابستان ۱۴۰۳.
- مشکینی، ابوالفضل؛ علیپور، سمیه؛ مسعودی، حسن. (۱۴۰۳). تاب‌آوری کالبدی مسکن شهری در برابر زلزله: تحلیلی از محلات و مناطق شمالی کلان‌شهر تهران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۴۱)، صص: ۶۰-۶۰. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.46098.1974>.
- ملکی، کیومرث؛ پورمحمدی، محمدرضا. (۱۴۰۳). پدافند غیرعامل و ارزیابی مناطق شهرداری از نظر آسیب‌پذیری خطر زلزله (مطالعه موردی: کلان‌شهر تبریز). پژوهش‌های جغرافیای سیاسی، 1302. <https://doi.org/10.22067/pg.2025.89091.1302>.
- میرزاجانی ننه کران، محسن. (۱۴۰۵). ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شهری: مطالعه موردی کلان‌شهر تبریز. برنامه‌ریزی فضایی، ۱۶(۱)، صص: ۳۷-۸۰. doi: 10.22108/sppl.2025.145044.1842
- وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی. (۱۴۰۱). پایش فقر در سال ۱۴۰۰، جدول ۳ صفحه ۳۷.
- Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Hofer, L., Zanini, M. A., Tubaldi, E., and Frangopol, D. M. (2020). Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets. *Science of the Total Environment*, 714, 136854.
- Ayyub, B. M. (2014). Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk analysis*, 34(2), 340-355.
- Bautista-Puig, N., Benayas, J., Manana-Rodríguez, J., Suárez, M., and Sanz-Casado, E. (2022). The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability. *Cities*, 126, 103715.
- bin Abu Bakar, M. Z., and binti Mohamad, Z. F. (2023). Local government capacity for earthquake disaster risk reduction in Malaysia: case studies in Bentong and Selayang areas. *International journal of disaster risk reduction*, 97, 103987.
- Bothara, J., Ingham, J., and Dizhur, D. (2018). Earthquake risk reduction efforts in Nepal. In *Integrating Disaster Science and Management* (pp. 177-203). Elsevier.
- Burton, C. G., Toquica, M., Asad, K. M. B., and Musori, M. (2022). Validation and development of composite indices for measuring vulnerability to earthquakes using a socio-economic perspective. *Natural Hazards*, 111(2), 1301-1334.
- Chen, M., Lu, Y., Peng, Y., Chen, T., and Zhang, Y. (2022). Key elements of attentions for enhancing urban resilience: A Comparison of Singapore, Hong Kong and Hangzhou. *Buildings*, 12(3), 340.
- Chen, X. (2022). Nonprofit resilience in a natural disaster context: An exploratory qualitative case study based on Hurricane Florence. *Human Service Organizations: Management, Leadership and Governance*, 46(2), 145-161.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering structures*, 32(11), 3639-3649.
- Cvetković, V. M., Grozdanić, G., Milanović, M., Marković, S., and Lukić, T. (2024). Understanding seismic hazard resilience in Montenegro: A qualitative analysis of community preparedness and response capabilities. *Open Geosciences*, 16(1), 20220729.
- Fekete, A., Asadzadeh, A., and Moghadas, M. 2b. Background and Conception of INCOR Project-Basic Infrastructures and Services for Enhancing Inclusive Community Disaster Resilience in Iran. *INCOR Basis-Infrastrukturen und Services einer inklusiven Katastrophenresilienz im Iran. Abschlussbericht der Definitionsphase INCOR Basic Infrastructures and Services for Enhancing Inclusive Community Disaster*, 19.
- Gencer, E. A. (2017). *How to make cities more resilient: a handbook for local government leaders*. UN: New York, NY, USA. <https://www.undrr.org/publication/how-make-cities-more-resilient-handbook-local-government-leaders-2017>
- Graveline, M.-H., and Germain, D. (2022). Disaster risk resilience: conceptual evolution, key issues, and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330-341.
- Güngör, M., and Elburz, Z. (2024). Beyond boundaries: what makes a community resilient? a systematic review. *International journal of disaster risk reduction*, 104552.
- Hofmann, S. Z. (2021). 100 Resilient Cities program and the role of the Sendai framework and disaster risk reduction for resilient cities. *Progress in Disaster Science*, 11, 100189.
- Imperiale, A. J., and Vanclay, F. (2020). Barriers to enhancing disaster risk reduction and community resilience: Evidence from the L'Aquila disaster. *Politics and Governance*, 8(4), 232-243.
- Kapucu, N., Ge, Y., Rott, E., and Isgandar, H. (2024). Urban resilience: Multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. *Urban Governance*.
- Kapucu, N., Hawkins, C. V., and Rivera, F. I. (2013). Disaster preparedness and resilience for rural communities. *Risk, Hazards and Crisis in Public Policy*, 4(4), 215-233.
- Khalid, S. J. M., and Dol, N. Disaster preparedness for academic libraries in Malaysia: An exploratory study.
- Koliou, M., van de Lindt, J. W., McAllister, T. P., Ellingwood, B. R., Dillard, M., and Cutler, H. (2020). State of the research in community resilience: Progress and challenges. *Sustainable and resilient infrastructure*, 5(3), 131-151.

- Kong, L., Mu, X., Hu, G., and Zhang, Z. (2022). The application of resilience theory in urban development: a literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 49651-49671.
- Kumar, N., Poonia, V., Gupta, B., and Goyal, M. K. (2021). A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120532.
- Kwok, A. H., Doyle, E. E., Becker, J., Johnston, D., and Paton, D. (2016). What is 'social resilience'? Perspectives of disaster researchers, emergency management practitioners, and policymakers in New Zealand. *International journal of disaster risk reduction*, 19, 197-211.
- Mirzajani, M. (2025). Urban Seismic Resilience Assessment: A Case Study of the City of Tabriz. *Spatial Planning*, (), -. doi: 10.22108/sppl.2025.145044.1842.
- Nekoei-Moghadam, M., Moradi, S. M., and Tavan, A. (2024). How can the Sendai framework be implemented for disaster risk reduction and sustainable development? A qualitative study in Iran. *Globalization and health*, 20(1), 23.
- Ofei-Manu, P., and Didham, R. J. (2018). Disaster Risk Reduction Capacity Assessment: Conceptualizing a Systematic Capacity (Assessment) Framework for Japan. In *HANDBOOK OF DISASTER RISK REDUCTION and MANAGEMENT* (pp. 97-138). World Scientific.
- Rahimi, F., Sadeghi-Niaraki, A., Ghodousi, M., and Choi, S.-M. (2025). Spatial-temporal modeling of urban resilience and risk to earthquakes. *Scientific Reports*, 15(1), 8321.
- Rai, N., and Thapa, B. (2015). A study on purposive sampling method in research. *Kathmandu: Kathmandu School of Law*, 5(1), 8-15.
- Sharifi, A. (2016). A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological indicators*, 69, 629-647.
- Sim, T., Wang, D., and Han, Z. (2018). Assessing the disaster resilience of megacities: The case of Hong Kong. *Sustainability*, 10(4), 1137.
- Tehler, H., Cedergren, A., de Herve, M. d. G., Gustavsson, J., Hassel, H., Lindbom, H., Nyberg, L., and Wester, M. (2024). Evidence-based disaster risk management: A scoping review focusing on risk, resilience and vulnerability assessment. *Progress in Disaster Science*, 100335.
- Tiernan, A., Drennan, L., Nalau, J., Onyango, E., Morrissey, L., and Mackey, B. (2019). A review of themes in disaster resilience literature and international practice since 2012. *Policy design and practice*, 2(1), 53-74.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNDRR). (2015) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*, UN: New York, NY, USA, https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf. Accessed 17 May 2025.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017) *Disaster Resilience Scorecard for Cities*, UN: New York, NY, USA, <https://mcr2030.undrr.org/disaster-resilience-scorecard-cities>, Accessed 17 May 2025.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2023). *Quick Risk Estimation (QRE) Tool*. United Nations.
- World Bank. (2023a). *GDP per capita (current US\$) - Iran*. World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=IR>.
- World Bank. (2023b). *GINI index (World Bank estimate) - Iran*. World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI?locations=IR>
- World Bank. (2023c). *World Development Indicators*. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- Xu, J., Wang, Z., Shen, F., Ouyang, C., and Tu, Y. (2016). Natural disasters and social conflict: A systematic literature review. *International journal of disaster risk reduction*, 17, 38-48.

Identification and Analysis of Heatwave Characteristics in Iran Based on Multiple Indices

Alireza Shakiba^{1*} , Neda Esfandiari², Babak Mirbagheri³, Ehsan Allahgholipour⁴

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Email: a-shakiba@sbu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

2. Postdoc Researcher, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. MSc. of GIS, Center for Remote Sensing and GIS Research, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 12 July 2025 Revised: 03 September 2025 Accepted: 17 September 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Heatwave Characteristics, Probability Density Function (PDF), Temporal Trend, Critical Points, Maximum and Minimum Temperature, Iran.	Heatwaves are among the most critical climate-related hazards, posing serious risks to human societies and ecosystems. The accelerating pace of global warming highlights the need for detailed investigations of this phenomenon. In this study, daily maximum and minimum temperature data for 30 years (1995–2024) were used to identify local heatwave thresholds based on the 90th percentile and probability density functions. Five major heatwave characteristics: number of events, number of heatwave days, magnitude, amplitude, and longest duration were extracted across Iran. Their spatial distribution and hotspot regions were identified, and temporal trends were assessed using the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator. Results show that, in addition to arid and southeastern regions (e.g., Lut Desert, Central Plateau, Southern Baluchestan, Hamun basins), high-altitude areas of the Zagros Mountains—particularly the Tashk–Bakhtegan basin—are highly exposed in terms of heatwave frequency and duration. In the lowland plains of the southwest and southeast (e.g., Khuzestan, Lut Desert, Hamun, Baluchestan), heatwave intensity has in some years exceeded 50 °C (maximum) and 40 °C (minimum). Trend analysis revealed statistically significant increases in all heatwave characteristics, especially in the number of events and days, with average slopes of ~0.24 events and 1.2 days per year across most regions. While northern and southern coastal areas (e.g., Persian Gulf coast) have remained relatively unaffected by persistent daytime heatwaves, nighttime events show a clear increasing trend. Moreover, the highest long-term averages for all characteristics occurred during the last eight years of the study period, particularly in 2024.
How to Cite: Shakiba, A. , Esfandiari, N. , Mirbagheri, B. and Allahgholipour, E. (2026). Identification and Analysis of Heatwave Characteristics in Iran Based on Multiple Indices. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 175-202.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.52604.2125	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Heatwaves are among the most severe climate-related hazards, with impacts increasingly amplified by global warming. They are linked to excess mortality, pressure on infrastructure and energy systems, agricultural losses, and ecological disruption. Iran, situated in an arid and semi-arid region of the Middle East, is particularly vulnerable to the rising frequency and intensity of heatwaves. Previous studies in Iran have mainly relied on station-based temperature records, which offer limited spatial coverage. This study addresses this gap by employing high-resolution gridded temperature data and a probabilistic approach to detect and analyze heatwave events across Iran during 1995–2024.

DATA AND METHODOLOGY

Daily maximum and minimum temperature data for 1995–2024 were obtained from the ERA5 reanalysis dataset at 0.25° spatial resolution. Heatwave thresholds were defined using the Probability Density Function (PDF) method, based on the 90th percentile of temperature distributions, with a 21-day moving window applied to reduce temporal variability. Heatwaves were identified separately for maximum and minimum temperatures, with a minimum duration of three consecutive days.

Five key heatwave characteristics were extracted for each grid cell (Table 1): (i) number of events, (ii) number of heatwave days, (iii) magnitude (average intensity), (iv) amplitude (maximum daily value within the event), and (v) longest continuous duration. Spatial and temporal trends of these indicators were analyzed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator. Areas exceeding the 95th percentile in each index were classified as critical zones.

Table 1. Definition of Identified Heatwave Characteristics

Feature	Definition (Unit)
Number of Events	Number of heatwave or warm spell occurrences during the study period (events)
Number of Days	Total number of days associated with heatwaves or warm spells (days)
Heatwave Magnitude	Average temperature across all heatwave or hot period events (°C)
Heatwave amplitude	Highest daily temperature recorded during the hottest heatwave, selected based on the magnitude (°C)
Longest Heatwave Duration	The heatwave with the longest consecutive duration among all events (days)

RESULTS AND DISCUSSION

Spatial distribution maps indicated that heatwaves are not confined to desert and lowland regions; the Zagros highlands—particularly the Tashk–Bakhtegan basin—also exhibit high event frequencies. On average, 2–5 heatwave events per year were recorded based on maximum temperature. In southeastern Iran and the southwestern plains (e.g., Khuzestan), extreme intensities were observed, with maximum temperatures surpassing 50 °C in some years.

Heatwaves based on minimum temperature, reflecting nocturnal heat stress, showed increasing trends, especially along the southern and northern coasts. The highest average magnitudes occurred in southern and southeastern regions, where high humidity and limited nighttime cooling amplified nocturnal heat levels. The most extreme peak temperatures were identified in Khuzestan, the Lut Desert, and parts of Sistan and Baluchestan.

Temporal analysis revealed statistically significant upward trends in most indicators—particularly in the number of events and heatwave days. The steepest increases occurred in the Zagros foothills, where annual rises exceeded 0.24 events and 1.2 days. The longest continuous heatwaves lasted 7–10 days in desert areas, with some extreme events extending up to 40 days.

The composite risk map identified the Tashk–Bakhtegan basin, southern coasts, the Khuzestan plain and southeastern Iran as multi-dimensional hotspots, simultaneously exhibiting high frequency, magnitude, and amplitude. Annual records showed that the warmest years—especially 2021 and

2024—had the highest cumulative values across all heatwave indicators. Notably, eight of the hottest years fell within the final eight years of the study period, reflecting an accelerated warming trend (Figure 1)

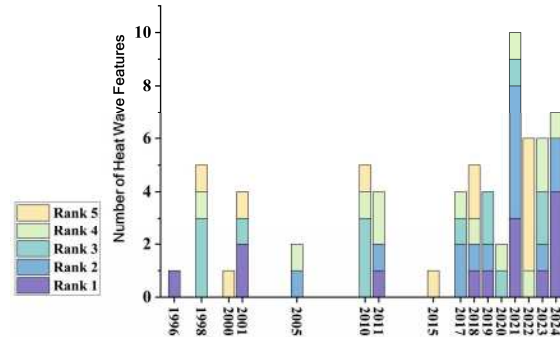


Figure 1: Top Five Highest Averages of Heatwave Characteristics Based on Ranking across the Study Years (1995–2024)

CONCLUSION

This study demonstrates that the intensity, duration, and frequency of heatwaves in Iran have increased significantly over the past three decades. These events are no longer limited to traditionally hot zones; mountainous and coastal areas are increasingly affected, particularly by nighttime heatwaves. By integrating high-resolution gridded data with a probabilistic approach, the study provided a more accurate representation of spatial and temporal patterns compared to station-based analyses.

The findings emphasize the urgent need for localized adaptation planning and early warning systems, particularly in newly identified hotspots such as the Zagros foothills and coastal regions. With continued warming, compounding risks related to human health, agriculture, and energy demand are likely to intensify. Future research should integrate heatwave characteristics with socio-economic vulnerabilities and land use changes to support comprehensive risk reduction strategies.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

This work is based upon research funded by the Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4036035.

REFERENCES

References [in Persian]

- Esmaeili, H., Roshani, A. and Parak, F. (2018). Trend analysis of climate compound extreme indices in IRAN. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 1(2), 97-113. [in Persian]
- Esmaeil Negad, M., Khosravei, M., Aligane, B. and Masaoodian, S. (2013). Identifying Heat Waves of Iran. *Geography and Development*, 11(33), 39-5. [in Persian]
- Alavinia, S. H. (2022). Analysis of Extreme Temperature Change Trend under Future Scenarios to Assess Climate Fluctuations (Case Study: Sanandaj and Saghez Synoptic Stations). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 11(41), 1-16. [in Persian]
- bijandi, M., daryabari, S. J., Ranjbar, A. and Arbabi Sabzevari, A. (2022). Extreme events of cold and heat waves in the northeastern regions of Iran during the period 2001-2020. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 41-60. [in Persian]

- Dargahian, F., Heidarnajad, S. and Razavizadeh, S. (2021). Investigating the trend of changes in the heat wave properties related to climate change in arid regions (Case Study: Yazd City). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(3), 564-577. [in Persian]
- Doostkamian, M., Haghighi, E. and Bourbouri, R. (2017). Analyzing and Identifying Regional Changes of Hot and Cold Zones in Iran in indifferent Periods. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(2), 141-162. [in Persian]
- jahanbakhsh asl, S., ghavidel, F. and ashjaei, M. (2015). Recognition, Classification and synoptical Analysis of Heat waves decreasing human hazards in the North West of Iran. *Environmental Management Hazards*, 2(4), 377-391. [in Persian]
- Ghasemifar, E. and Naserpour, S. (2017). Synoptic analysis of heat and cold waves over the southern coast of the Caspian Sea. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(103), 137-146. [in Persian]
- Karampoor, M., Rafiee, J. and Jafari, A. (2017). Identification and Analysis of Synoptic Heat Waves in West of Iran (Case Study: Ilam, Khuzestan, Lorestan, Kermanshah). *Environmental Management Hazards*, 4(3), 263-279. [in Persian]
- Hamidianpour, M., Nazaripour, H., Khazaie Fizabad, E., Farzane, M. and Firoze, S. (2023). Determining the change point of temperature thresholds of heat and cold waves in Iran during 1966-2018. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 133-150. [in Persian]
- Rezaei, F., Ahmadi, M. and Shakiba, A. (2019). Simulation of temperature threshold heat waves during warm spells in Iran based on scenarios RCP (2016-2045). *Research in Earth Sciences*, 10(3), 231-247. [in Persian]
- Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on the CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*, 53(1), 75-90. [in Persian]

References [in English]

- Abbasnia, M. (2019). Climatic characteristics of heat waves under climate change: a case study of mid-latitudes, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 637–656. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0052-4>
- Abbasnia, M., Tavousi, A., & Khosravi, M. (2016). Identification and analysis of heat waves in Iran during 1981–2010: Spatial and temporal variations. *Journal of Spatial Analysis & Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Ansari, A. , Mahmoudi, P. , & Nazaripour, H. (2024). Observed changes in the characteristics of heat waves in hot and dry regions of Iran. *Idojaras – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 128(4), 473–496.
- Barton, L., & Greig, D. (2019). Using dynamic heat thresholds to assess heatwave events in the context of climate change. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3c74>
- Barreca, A., Deschênes, O., Greenstone, M., & Shapiro, J. (2016). *The effect of absolute versus relative temperature on health and the environment: Evidence from Italy, 2001–2015*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054001.
- Beyraghdar Kashkooli, O., Karimian, S., & Modarres, R. (2022). Spatiotemporal variability of the Persian Gulf and Oman Sea marine heatwaves during 1982-2020. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114174>
- Bonshoms, M., Ubeda, J., Liguori, G. et al. (2022) .Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four Peruvian glaciers using on-glacier observations. *J. Mt. Sci.* 19, 1849–1873. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7388-4>
- Climate Central. (2024, August 7). Analysis: Climate change is increasing the danger of nighttime temperatures across the globe. Climate Central.
- De Polt, K., et al. (2023). Quantifying the impact of relevant heatwave durations. *Environmental Research Letters*, 18(10), 104005.
- Fallah Ghalhari, G., Farhang Dehghan, S., Akhlaghi Pirposhteh, E., & Asghari, M. (2021). Trend analysis and temporal and spatial distribution of wet bulb globe temperature as a heat stress index in Iran during the summer season over 30 years. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6(4), 1476–1493. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v6i4.8153>
- Fatahian, M., Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A. R., Shahidinia, H., & Wang, J. (2025). Spatio Temporal Analysis of Changes in the Iranian Summer Subtropical High Pressure System from a Climate Change Perspective. *Atmosphere*, 16(3), 273. <https://doi.org/10.3390/atmos16030273>
- Gao, J. , et al. (2015). Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: a multi-city study in China. *Science of the Total Environment*, 505, 535–544.
- Hanna, E. G. , Kjellstrom, T. , Bennett, C. , & Dear, K. (2010). Climate Change and Rising Heat: Population Health Implications for Working People in Australia. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 23(2_suppl), 14S-26S. <https://doi.org/10.1177/1010539510391457>
- Hirsch, A. L., et al. (2022). Changes in land–atmosphere coupling increase compound drought and heatwave risk. *Nature Communications*, 13, Article 2380. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-00325-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by C. B. Field et al., 52 pp., *Cambridge Univ. Press, Cambridge*, U.K., and New York.
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using the excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073-2090.
- Joyce, P.W.S., Tong, C.B., Yip, Y.L. et al. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current research patterns and future opportunities. *Mar Biol* 171, 20 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04340-y>
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121, 1265–1288.
- Kodra, E., & Ganguly, A. (2014). Asymmetry of projected increases in extreme temperature distributions. *Scientific Reports*, 4, 5884. <https://doi.org/10.1038/srep05884>

- Meehl, G. A. , Tebaldi, C. , Tilmes, S. , Lamarque, J. -F. , Bates, S. , Pendergrass, A. , & Lombardozzi, D. (2018). Future heat waves and surface ozone. *Environmental Research Letters*, 13(6), 64004.<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc>
- Mojarrad, F., Masoompour, J., & Rostami, T. (2015). Statistical–Synoptic Analysis of Heat Waves above 40°C in the West of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Muñoz Sabater, J. , Dutra, E. , Agustí Panareda, A. , Albergel, C. , Arduini, G. , Balsamo, G. , ... Thépaut, J. N. (2021). ERA5 Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383.
- Müller, V., et al. (2024). Evening humid heat maxima near the southern Persian/Arabian Gulf. *Communications Earth & Environment*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Thermal Properties of Water and Coastal Temperature Moderation. NOAA JetStream.
- Nuttall, J. G. , O’Leary, G. J. , Khimashia, N. , Asseng, S. , Fitzgerald, G. , & Norton, R. (2012). ‘Haying-off’ in wheat is predicted to increase under a future climate in south-eastern Australia. *Crop and Pasture Science*, 63(7), 593–605.
- Oke, T. R. (1987). Boundary Layer Climates (Chapter on Coastal Climates). Routledge.
- Orlov, A. , Sillmann, J. , Aaheim, A. , Aunan, K. , & de Bruin, K. (2019). Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: a Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, 3(3), 191–211.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezini, J. -L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159.<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165, 242–267.<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517.
- Poulos, G., & Zhong, S. (2008). An Observational History of Small-Scale Katabatic Winds in Mid-Latitudes. *Geography Compass*, 2, 1798–1821.<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00166.x>
- Raei, E. , Nikoo, M. , AghaKouchak, A. , & GHWR. (2018). GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific Data*, 5, 180206.<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206>
- Ren, Y. , Liu, J. , Zhang, T. , Shalamzari, M. J. , Arshad, A. , Liu, T. , Willems, P. , Gao, H. , Tao, H. , & Wang, T. (2023). Identification and Analysis of Heatwave Events Considering Temporal Continuity and Spatial Dynamics. *Remote Sensing*, 15(5), 1369.<https://doi.org/10.3390/rs15051369>
- Seneviratne, S. I. , Donat, M. G. , & Chérut, F. (2013). A review of the global impacts of extreme heat events and the implications for climate change adaptation. *Nature Climate Change*, 3(8), 559–563.<https://doi.org/10.1038/nclimate1857>
- Sharifi, M. , & Ehteram, N. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades (1981–2010). *Natural Environment Change*, 2(1), 29–38.
- Smith, J., & Zhang, L. (2018). Analysis of temperature extremes using the probability density function (PDF) approach in climate studies. *Journal of Climate Research*, 34(2), 101–113.<https://doi.org/10.1002/jcr.2345>
- Stefanon, M., D’Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023.<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023>
- Sutanto, S.J., Zarzoza Mora, S.B., Supit, I. et al. Compound and cascading droughts and heatwaves decrease maize yields by nearly half in Sinaloa, Mexico. *npj Nat. Hazards* 1, 26 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00026-7>
- Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water*, 14(4), 543.<https://doi.org/10.3390/w14040543>
- Vogel, M. M. , Zscheischler, J. , Fischer, E. M. , & Seneviratne, S. I. (2020). Development of Future Heatwaves for Different Hazard Thresholds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD032070.<https://doi.org/10.1029/2019JD032070>
- Wang, Y., & Liu, J. (2024). Impacts of Massive Topographies on Heat Waves in Global Drylands. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL109979.
- Wu, S., Luo, M., Zhao, R., et al. (2023). Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *npj Clim Atmos Sci*, 6, 36.<https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8>
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., et al. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan, Iran: insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15, 13626.<https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
- Zhai, J. , Xue, X. , Li, W. , et al. (2024). Heatwave magnitude quantization and impact factors analysis over the Tibetan Plateau. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 85.
- Zhao, M., Lee, J. K. W., Kjellstrom, T., & Cai, W. (2021). Assessment of the economic impact of heat-related labor productivity loss: a systematic review. *Climatic Change*, 167(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03160-7>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

شناسایی و تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی ایران بر پایه شاخص‌های چندگانه

علیرضا شکیب^{۱*} , ندا اسفندیاری^۲، بابک میرباقری^۳، احسان اله قلی پور^۴

۱. دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS (نویسنده مسئول)

ایمیل: a-shakiba@sbu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

۲. پژوهشگر پس‌ادکتری دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

۳. استادیار دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

۴. کارشناس ارشد دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های موج گرما، تابع چگالی احتمال، روند زمانی، نقاط بحرانی، دمای بیشینه و کمینه، ایران.	امواج گرما یکی از مخاطرات مهم آب‌وهوایی به‌شمار می‌روند که می‌توانند پیامدهای جدی برای جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها به‌همراه داشته باشند. روند فزاینده‌ی دمای جهانی، لزوم بررسی دقیق‌تر این پدیده را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۴) دمای بیشینه و کمینه روزانه، آستانه‌های محلی موج گرما بر پایه صدک ۹۰ام و با به‌کارگیری تابع چگالی احتمال تعیین شد. سپس پنج ویژگی موج گرما شامل تعداد رخداد، تعداد روزهای موج، بزرگی رخداد، اوج دمای، طولانی‌ترین دوره پیوسته در گستره ایران استخراج گردید. سپس توزیع مکانی هر شاخص به‌همراه نواحی بحرانی شناسایی شدند و روندهای زمانی با آزمون من - کندال و روش شیب سنس ارزیابی شد. نتایج نشان داد که علاوه بر گستره‌های کویری و جنوب شرقی (حوضه‌های آبریز کویر لوت، مرکزی، بلوچستان جنوبی، هامون)، نواحی مرتفع زاگرس به‌ویژه در حوضه طشک - بختگان نیز از نظر «تعداد رخداد» و «تعداد روز موج» در معرض خطر فراوانی قرار دارند. در دشت‌های پست جنوب غرب و جنوب‌شرق (جلگه خوزستان، حوضه آبریز کویر لوت، هامون، بلوچستان)، شدت موج گرما براساس اوج دمای بیشینه (کمینه) در برخی سال‌ها بیش از ۵۰ °C (۴۰ °C) بوده است. تحلیل روندهای زمانی حاکی از افزایش معنادار در تمام ویژگی‌های امواج گرما به‌ویژه تعداد رخدادها و تعداد روزهای موج گرما (شیب متوسط حدود ۰.۲۴ رخداد و ۱.۲ روز در سال) در بیشتر نواحی بود. همچنین، سواحل شمال و جنوب (خلیج فارس) کشور تا حدودی از افزایش پایداری موج گرما در روز در امان بوده، اما تعداد رخداد موج‌های شبانه روندی افزایشی داشته است. علاوه بر این، یافته‌ها نشان داد بالاترین میانگین‌ها در هر ویژگی در بلندمدت مربوط به هشت سال آخر بازه مطالعاتی به‌ویژه ۲۰۲۴ بوده است.

استناد: شکیب، علیرضا، اسفندیاری، ندا، میرباقری، بابک و اله قلی پور، احسان. (۱۴۰۵). شناسایی و تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی ایران

بر پایه شاخص‌های چندگانه. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۲۰۲-۱۷۵.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52604.2125



مقدمه

امواج گرمایی یکی از رویدادهای آب‌وهوایی شدید است که به‌صورت کوتاه منفرد و در بازه‌های زمانی چندروزه ادامه دارد (پرکینز و الکساندر^۱، ۲۰۱۳). در دهه‌های اخیر، موج‌های گرما به یکی از مرگ‌بارترین مخاطرات طبیعی در برخی مناطق تبدیل شده‌اند و به‌عنوان "قاتلان خاموش" شناخته می‌شوند (ژائو^۲ و همکاران ۲۰۲۱). این پدیده نه تنها تهدیدی فزاینده برای سلامت عمومی، زندگی و رفاه انسان ایجاد می‌کند، تأثیرات اجتماعی قابل‌توجهی از آسیب‌رساندن به زیرساخت‌ها، فشار بر واحدهای امداد و بیمارستان‌ها، افزایش بار شبکه‌های برق تا فلج کردن سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و هوایی را به جا می‌گذارند. همچنین، مخاطراتی را در بخش‌های کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی ایجاد می‌کنند. صرف‌نظر از پتانسیل سازگاری هر منطقه در برابر این پدیده، رویداد بالا بر اساس ویژگی‌های متعددی مانند شدت، فراوانی، تداوم و زمان وقوع می‌تواند نوع متفاوتی از خطر را بر بخش‌های مختلف ایجاد کنند (پرکینز و همکاران، ۲۰۱۵). به‌عنوان مثال، میزان مرگ‌ومیر انسان بیشتر تحت تأثیر شدت موج گرما قرار می‌گیرد (هانا^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). درحالی‌که سیستم‌های کشاورزی بیشتر تحت تأثیر زمان‌بندی موج گرما قرار می‌گیرند (نوتال^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). امواج گرمایی طولانی‌تر می‌تواند منجر به اثرات قوی‌تری بر اکوسیستم شود (جویسی^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). در عین حال گستره فضایی امواج گرمای پیوسته بر ظرفیت کاری تأثیر می‌گذارد و بهره‌وری نیروی کار را به‌ویژه برای کارگران در فضای باز کاهش می‌دهد (اورلو^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). ترکیب امواج گرمای پیوسته و بزرگ می‌تواند بر کارایی سیستم‌های آبیاری، افزایش نیاز آبی گیاهان و در نهایت تولید مواد غذایی تأثیر بگذارد. امواج گرمایی گسترده به‌صورت مکانی و زمانی حتی می‌تواند الگوهای کاربری زمین را تغییر دهد (سوتانتو^۷ و همکاران، ۲۰۲۴). در بخش انرژی ممکن است تقاضای برق را در مناطق بزرگ برای مدت طولانی به‌دلیل استفاده بیشتر از تهویه مطبوع افزایش داده و در نتیجه خطر قطع برق را افزایش دهد (پرا^۸ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، به طور قابل‌توجهی در شروع یا تشدید آتش‌سوزی‌های جنگلی نقش داشته باشد و با تشکیل آزن در سطح زمین، باعث آلودگی جدی هوا شوند (میل^۹ و همکاران، ۲۰۱۸).

انتظار می‌رود در جهانی گرم‌تر با افزایش میانگین دما، امواج گرما نه‌تنها تکرار شوند، مدت و شدت آن‌ها نیز به احتمال زیاد افزایش یابد (هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی^{۱۰}، ۲۰۱۲) و در نتیجه خطرانی را که جمعیت مناطق آسیب‌پذیر با آن مواجه هستند تشدید کند. بنابراین، امواج گرما چالش‌های مهمی را برای جوامع در سراسر جهان به ویژه در مناطقی با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک ایجاد می‌کنند. ایران نیز که در منطقه خاورمیانه قرار دارد، از این پدیده مستثنا نیست. این کشور با گستره وسیعی از زمین‌های خشک و نیمه‌خشک، با آسیب‌پذیری شدید در برابر اثرات نامطلوب امواج گرما مواجه است که می‌تواند به‌طور نامتناسبی بر بخش‌های مختلف آن تأثیر بگذارد و نابرابری‌های موجود را تشدید کند. از آنجایی‌که امواج گرما به‌شدت در حال تغییر هستند و خسارت‌های زیادی به‌همراه دارند،

¹ Perkins & Alexander

² Zhao

³ Hanna

⁴ Nuttall

⁵ Joyce

⁶ Orlov

⁷ Sutanto

⁸ Perera

⁹ Meehl

¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

خطرات آن‌ها احتمالاً با عدم سازگاری نسبی بشر تشدید می‌شود. بنابراین، نیاز به برنامه‌ریزی سازگاری مؤثر اهمیت دارد که انجام آن مستلزم درک کامل و به روز از توزیع فضایی - زمانی امواج گرمایی به همراه ثبت ویژگی‌های آن‌ها در مقیاس فضایی بزرگ جهت مدیریت مخاطرات ناشی از این پدیده و افزایش تاب‌آوری جوامع در ایران است.

مطالعات زیادی با دیدگاه‌های متفاوت در مورد امواج گرما وجود دارد. آن دسته از مطالعاتی که مربوط به منطقه مورد مطالعه پژوهش یعنی ایران و نزدیک‌تر به موضوع پیش رو هستند شامل این تحقیقات می‌باشند: اسمعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۲) امواج گرمایی ایران را با استفاده از حداکثر دما و به روش درون‌یابی برای ایستگاه‌های همدیدی کشور شناسایی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد موج‌های گرمایی کوتاه نسبت به امواج طولانی مدت رخداد بیشتری داشته است و پایان زمستان و روزهای نخستین پاییز موج‌های گرمایی فراوان‌تر هستند. دوستکامیان و همکاران (۱۳۹۵) پهنه‌های گرم ایران را طی دوره‌های مختلف شناسایی کرده و به تغییرات آن‌ها پرداختند و نتایج آن‌ها بیانگر این بود که پهنه‌های گرمایی به سمت دوره‌های اخیر علاوه بر گستردگی مکانی به سمت عرض‌های جغرافیایی بالا کشیده شده است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۷) تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی را بر اساس شاخص‌های ترکیبی و امواج گرمایی در گستره حوضه‌های آبریز کشور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کاهش معنادار در شاخص روزهای سرد و خشک و افزایش معنادار در شاخص روزهای گرم و خشک می‌باشد. قاهره و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل روند و توزیع مکانی - زمانی دمای حباب مرطوب به‌عنوان شاخص استرس گرمایی طی دوره تابستان پرداختند و نشان دادند این شاخص به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک ایران روند صعودی را دنبال کرده است. بیجندی و همکاران (۱۴۰۱) رخداد‌های فرین امواج گرمایی را در مناطق شمال شرقی ایران بررسی کردند. تعداد وقوع امواج گرمایی در برخی ایستگاه‌ها افزایشی و در برخی کاهش یافته است. حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل آماری امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز پرداختند. آنها با استفاده از داده‌های دمای بیشینه امواج گرما و برخی ویژگی‌های آن‌ها را شناسایی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که فراوانی موج‌های گرمایی کوتاه‌مدت بیشتر بوده است. جنگی و همکاران (۲۰۲۳) روند تشدید امواج گرمایی را مبتنی بر داده‌های ایستگاهی و با استفاده از شاخص تنش گرمایی در ایران مورد مطالعه قرار داده و از ویژگی‌های آن‌ها به تعداد و فراوانی مدت و بزرگی امواج گرم در نواحی مختلف اقلیمی پرداختند. رضایی و همکاران (۱۳۹۸) آستانه دمایی امواج گرما طی دوره گرم سال را در ایران شبیه‌سازی کردند. بر اساس این پژوهش، آستانه‌های دمایی موج گرما در زمان‌ها و مکان‌های مختلف یکسان نیست. حمیدیان پور و همکاران (۱۴۰۲) نقطه تغییر آستانه‌های دمایی امواج گرمایی در ایران را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند آستانه دمایی امواج گرمایی طی چند دهه گذشته افزایش یافته است و به ازای هر سال بین ۰/۰۹ و ۰/۰۵۲ درجه سلسیوس بوده است. این مسأله باعث افزایش بسامد دماهای بیشینه گردیده و منجر به افزایش روزهای گرم و کاهش شب‌های سرد خواهد شد. عباس‌نیا (۲۰۱۹) ویژگی‌های اقلیمی امواج گرما را تحت تأثیر تغییر اقلیم برای عرض‌های جغرافیایی میانی ایران مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که انتظار می‌رود میانگین‌های فصلی شدت امواج گرما افزایش و تعداد فصلی فراوانی امواج گرما با توجه به خروجی همه سناریوها در دهه‌های آینده کاهش یابد. علوی نیا و همکاران (۱۳۹۹) روند تغییرات فرین‌های دما را برای ایستگاه‌های همدیدی سنندج و سقز تحت سناریوهای آینده به‌منظور ارزیابی نوسانات اقلیمی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده روند افزایشی دمای بیشینه مطلق و دمای کمینه مطلق طی سی سال آینده بود. زرین و رودباری (۱۳۹۹) در پیش‌بینی دمای ایران به آشکارسازی تنش‌های گرمایی با استفاده از شاخص طول مدت گرما پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین دمای

سالانه کشور تا ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. درگاهیان و همکاران (۱۴۰۰) روند تغییرات ویژگی‌های امواج گرمایی مرتبط با تغییر اقلیم در شهرستان یزد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده افزایش معنی دار فراوانی امواج گرما بوده و این روند در سایر ویژگی‌ها مانند تداوم و شدت هم مشاهده شده است. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۴) به شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی در پنج ماه گرم سال در شمال غرب ایران پرداختند. الگوهای غالب همدیدی به هنگام وقوع امواج گرمایی را شناسایی کردند. قاسمی فر و ناصر پور (۱۳۹۵) امواج گرم را در سواحل جنوبی دریای خزر تحلیل سینوپتیکی انجام داده‌اند. کرم پور و همکاران (۱۳۹۶) امواج گرمایی غرب ایران را شناسایی و تحلیل سینوپتیکی کردند و دارند و همکاران (۲۰۱۷) شرایط سینوپتیکی منجر به دوره‌های گرم را در غرب ایران مورد بررسی قرار داده‌اند.

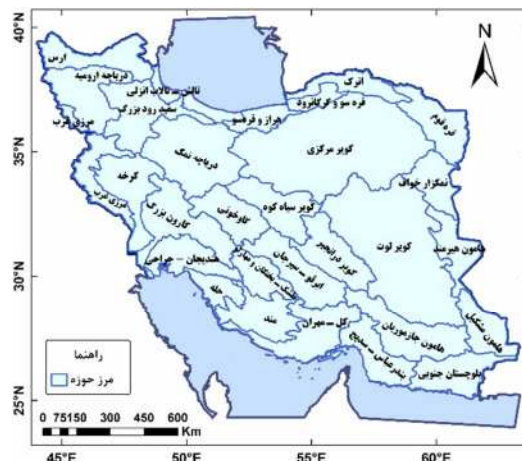
مطالعات داخل کشور امواج گرمایی را در قالب توزیع مکانی - زمانی، روند ناشی از تغییر اقلیمی و یا تحلیل همدیدی مورد مطالعه قرار داده‌اند. اگرچه این پژوهش به لحاظ شناسایی امواج گرمایی وجه مشترکی با سایر مطالعات دارد. با این حال تفاوت‌های آن ارزش و اهمیت این مطالعه را نشان می‌دهد: اغلب محققان در تجزیه و تحلیل‌های امواج گرما از داده‌های ایستگاهی هواشناسی استفاده کرده‌اند و کمتر به داده‌های شبکه‌ای توجه شده است. اگرچه این رویکردی عملی با نتایج قابل اعتماد است؛ اما نتایج آن تابع توزیع فضایی ایستگاه‌های هواشناسی است که اغلب از نظر فضایی متعادل نبوده یا نماینده دقیقی از همه انواع آب‌وهوا یا رژیم‌های دمایی در کشور نیستند. علاوه بر این، اقدام سازگاران در مواجهه با امواج گرمایی نیازمند شناسایی ابعاد زمانی و مکانی این پدیده است. بنابراین، در این پژوهش امواج گرمایی ایران به همراه ویژگی‌های طبیعی‌شان بررسی می‌شود، با این تفاوت که در شناسایی امواج گرمایی از داده‌های شبکه‌ای با دقت بالا استفاده می‌شود که نماینده مناسبی از دمای پهنه‌های جغرافیایی است. همچنین، از روش تابع چگالی احتمال به دلیل امکان تحلیل احتمالاتی و در نظر گرفتن دماهای نادر و انعطاف‌پذیری بالا در انواع توزیع‌ها استفاده می‌شود. امواج گرمایی براساس دمای کمینه و بیشینه به طور جداگانه شناسایی و تحلیل می‌شوند و امکان مقایسه را برای بخش‌های مختلف در معرض خطر فراهم می‌کند. در نهایت، این پژوهش، ویژگی‌های متنوع‌تری نسبت به سایر مطالعات را مورد تحلیل قرار می‌دهد که شامل فراوانی رخداد، تعداد روز، بزرگی رخداد، اوج دمایی موج، طول طولانی‌ترین دوره است.

داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات اقلیمی با دقت مکانی و زمانی بالا هستند. پارامترهای دمایی شامل کمینه و بیشینه دما، به صورت روزانه و در بازه بلندمدت ۳۰ ساله از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ برای تمام فصول سال به تفکیک ماه استخراج شده‌اند. این داده‌ها از پایگاه داده بازتحلیل نسل پنجم مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا^۱ با دقت شبکه‌ای ۰.۲۵ درجه قوسی دریافت شده‌اند. این پایگاه داده اطلاعات اقلیمی را در مقیاس‌های زمانی ساعتی و روزانه ارائه می‌دهد. داده‌های روزانه آن بر اساس تجمع داده‌های ساعتی در سطوح مختلف زمانی (یک، سه و شش ساعته) تهیه و منتشر شده‌اند و دقت آن در مطالعات بین‌المللی تأیید شده است؛ به طوری که خطای دمای ماهانه آن معمولاً از $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ فراتر نمی‌رود (ولیکو و همکاران ۲۰۲۲). این پایگاه داده در گزارش‌های IPCC، WMO

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

و تولید شاخص‌های اقلیمی^۱ GCOS نیز مورد استفاده قرار گرفته است (مونز^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). این داده‌ها در مناطق مختلف، از جمله در مناطق کوهستانی مانند یخچال‌های آند، اعتبارسنجی شده‌اند و مشخص شد مدل-ERA5 Land در بازتولید دمای دو متری هوا با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۰ و خطای میانگین مربعات ریشه‌ای کمتر از $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ در مقیاس ماهانه عملکرد بسیار خوبی دارد. این نتایج نشان‌دهنده دقت قابل‌توجه، حتی در شرایط توپوگرافی پیچیده، هستند (بنشامز و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، دمای دو متری سطح زمین به‌عنوان متغیر اصلی انتخاب شده که از طریق درون‌یابی بین پایین‌ترین سطح مدل و سطح زمین با در نظر گرفتن شرایط جوی، به دست آمده است. داده‌های این پایگاه که بر حسب کلون ارائه شدند، با کم کردن عدد ۲۷۳،۱۵ به درجه سلسیوس تبدیل و به کار گرفته شدند. همچنین، دمای کمینه و بیشینه روزانه با فراوانی ۶ ساعته دریافت شده است؛ به این معنی که این دما به صورت میانگین چهار بازه شش ساعته در طول ۲۴ ساعت (۰۰-۰۶، ۰۶-۱۲، ۱۲-۱۸، ۱۸-۲۴) محاسبه شده است. امواج گرما در محدوده کشور ایران شناسایی شدند و تحلیل‌های مرتبط به آن‌ها نیز در قالب حوضه‌های آبریز کشور ارائه شد (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه به همراه حوضه‌های آبریز درجه ۲. منبع: نویسندگان

روش‌ها

برای شناسایی موج گرما معمولاً از آستانه‌های دمایی استفاده می‌شود که می‌توانند به صورت ثابت یا نسبی تعریف شوند. آستانه‌های ثابت مانند دمای بالاتر از ۴۰ درجه، ساده و قابل مقایسه هستند؛ اما به دلیل بی‌توجهی به شرایط اقلیمی خاص مناطق مختلف، دقت کافی ندارند (وگل^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). در مقابل، آستانه‌های نسبی بر پایه داده‌های آماری بلندمدت اقلیمی و متناسب با اقلیم هر منطقه تنظیم می‌شوند (سنوریت^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). همین‌طور، در شرایط تغییر اقلیم و افزایش دما که آستانه‌های ثابت ممکن است قادر به شناسایی صحیح موج‌های گرما نباشند، آستانه‌های نسبی قادرند به طور دائم با شرایط دمایی جدید همگام شوند (بارتون و گریگ^۵، ۲۰۱۹). بنابراین، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا از دقت و کارایی بیشتری در شناسایی موج‌های گرما برخوردار هستند. آستانه‌های نسبی خود

¹ Global Climate Observing System

² Muñoz

³ Vogel

⁴ Seneviratne

⁵ Barton & Greig

شاخص‌های مختلفی به‌وجود آورده‌اند که با مقایسه دماهای ثبت‌شده با مقادیر آماری مانند میانگین یا صدک‌های خاص کار می‌کنند. از آنجایی که ایران دارای تنوع اقلیمی گسترده‌ای است (از بیابان‌های گرم و خشک تا مناطق کوهستانی سرد) و استفاده از آستانه‌های مطلق ممکن است برای مناطق مختلف کشور مناسب نباشند؛ در این پژوهش از آستانه‌های نسبی و روش مبتنی بر تابع چگالی احتمال (PDF) برای شناسایی موج‌های گرما استفاده شده است. این رویکرد به‌جای اتکا به یک مقدار ثابت، دما را بر اساس توزیع آماری بلندمدت در هر نقطه جغرافیایی و برای هر روز سال ارزیابی می‌کند. در واقع، برای هر روز تقویمی یک مدل توزیعی از داده‌های دما بر اساس مشاهدات تاریخی ساخته شده و صدک‌های بالایی این توزیع (مانند صدک ۹۰ام) به‌عنوان آستانه انتخاب می‌شود (اسمیت و ژانگ^۱، ۲۰۱۸). چنین روشی این مزیت را دارد که آستانه‌ها با شرایط اقلیمی محلی سازگار می‌شوند. بنابراین، برای نقاطی که احتمال وقوع دماهای بسیار بالا در آن‌ها بیشتر است بهتر عمل می‌کند که این موضوع برای برنامه‌ریزی مدیریت بحران مهم است.

تابع چگالی احتمال به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$f(T) = (1 / (\sigma \sqrt{2\pi})) \times \exp(- (T - \mu)^2 / (2\sigma^2)) \quad (1)$$

که در آن T نشان‌دهنده مقدار دما است. μ میانگین داده‌های دما در بازه زمانی مورد نظر و σ انحراف معیار دما است. برای محاسبه آستانه‌های درصدی مثل ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ از تابع توزیع احتمال، از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

$$P(T_p) = \mu + Z_p \times \sigma \quad (2)$$

که در آن $P(T_p)$ آستانه دمایی در صدک p است. z_p مقدار Z-Score مربوط به صدک p در توزیع نرمال مثلاً: $Z_{90} = 1.282$ و $Z_{95} = 1.645$ است. μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های دما هستند.

برای محاسبه این آستانه‌ها، به‌جای تمرکز صرف بر یک روز مشخص، از پنجره‌های زمانی متقارن در اطراف آن روز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، برای تعیین آستانه روز ۱۵ ژوئن، داده‌های دمایی چند روز قبل و بعد از آن تاریخ در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از داده‌های موجود در این بازه، توزیع آماری دما محاسبه و آستانه صدکی مورد نظر استخراج می‌شود (استفان^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). این روش باعث می‌شود که آستانه‌ها نه تنها به تغییرات اقلیمی محلی حساس باشند، بلکه اثر نوسانات کوتاه‌مدت فصلی نیز در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، به منظور محاسبه امواج گرمایی، از کدهای توسعه داده‌شده توسط رائی و همکاران (۲۰۱۸) در محیط متلب^۳ استفاده شد و صدک ۹۰ام دما به‌عنوان آستانه بر اساس پنجره زمانی ۲۱ روزه (شامل ۱۰ روز قبل و ۱۰ روز بعد از روز موردنظر) محاسبه گردید. علاوه بر این، برای افزایش پایداری آماری، یک توالی حداقل سه روزه برای تعریف موج گرما در نظر گرفته شد. از آنجاکه طول پنجره زمانی می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد، بررسی‌های حساسیت اولیه نشان داد که افزایش طول پنجره منجر به شناسایی تعداد بیشتری رخداد می‌شود؛ درحالی که کاهش طول پنجره شرایط سخت‌گیرانه‌تری ایجاد کرده و رخدادهای کمتری شناسایی می‌شود. در نهایت، با توجه به یافته‌های پژوهش رائی و همکاران (۲۰۱۸) و برای ایجاد توازن میان دقت محاسبات و قابلیت مقایسه‌پذیری بین مناطق مختلف، پنجره ۲۱ روزه به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. امواج گرما به‌صورت جداگانه برای دمای بیشینه و

¹ Smith

² Stefanon

³ MATLAB

کمینه شناسایی و تحلیل شده‌اند و برای هر رخداد، مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی (جدول ۱) استخراج و تحلیل شدند.

به‌منظور تحلیل الگوی مکانی امواج گرما در سطح کشور، ابتدا میانگین بلندمدت هر یک از ویژگی‌های موج گرما در پهنه‌ی جغرافیایی ایران محاسبه شد. در گام بعد، برای شناسایی بیشینه‌های محلی، مقادیر حداکثر هر ویژگی در طی بازه‌ی ۳۰ ساله (سالانه) استخراج گردید و نقاطی که از نظر آماری در صدک ۹۵ام قرار داشتند، به‌عنوان نواحی بحرانی مشخص شدند. ترکیب این نقاط بحرانی برای هر ویژگی، نقشه‌ای از نواحی پرمخاطره در برابر موج‌های گرما ارائه داد.

برای درک بهتر از ویژگی‌های آماری هر شاخص، از داده‌های سالانه نمودارهای باکس پلات^۱ تهیه شد که گستره، میانه و پراکندگی داده‌ها را در طول دوره زمانی بررسی می‌کند. همچنین، برای شناسایی سال‌های پرمخاطره، پنج سال با بالاترین میانگین سالانه برای هر ویژگی رتبه‌بندی شده و به‌صورت نمودار ستونی تجمعی نمایش داده شدند.

تحلیل روند زمانی هر یک از ویژگی‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال^۲ انجام گرفت و در ادامه، برای نقاط دارای روند معنادار آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$)، شیب روند با بهره‌گیری از روش شیب سنس^۳ محاسبه شد.

مجموع این تحلیل‌ها بستری فراهم آورد تا بررسی جامع‌تری از امواج گرما در ابعاد مکانی، زمانی و اقلیمی صورت گیرد و نواحی با مخاطره‌پذیری بالاتر در برابر این پدیده‌ی اقلیمی شناسایی شوند.

جدول ۱: تعریف ویژگی‌های امواج گرمایی شناسایی‌شده

ویژگی	تعریف (واحد)
تعداد رخداد	تعداد رخداد موج / دوره گرم (رخداد)
تعداد روز	تعداد روزهای همراه با موج / دوره گرم (روز)
بزرگی موج	متوسط دمای تمام رخدادهای موج / دوره گرم را نشان می‌دهد. (سلسیوس)
اوج موج	بالاترین دمای روزانه در گرم‌ترین موج یا دوره گرم که بر اساس بزرگی موج انتخاب می‌شود. (سلسیوس)
طولانی‌ترین دوره موج	موج گرم یا دوره‌ای که بیشترین توالی زمانی را در میان سایر دوره‌ها داشته است. (روز)

نتایج و بحث

تحلیل ویژگی‌های امواج گرمایی

تعداد رخداد

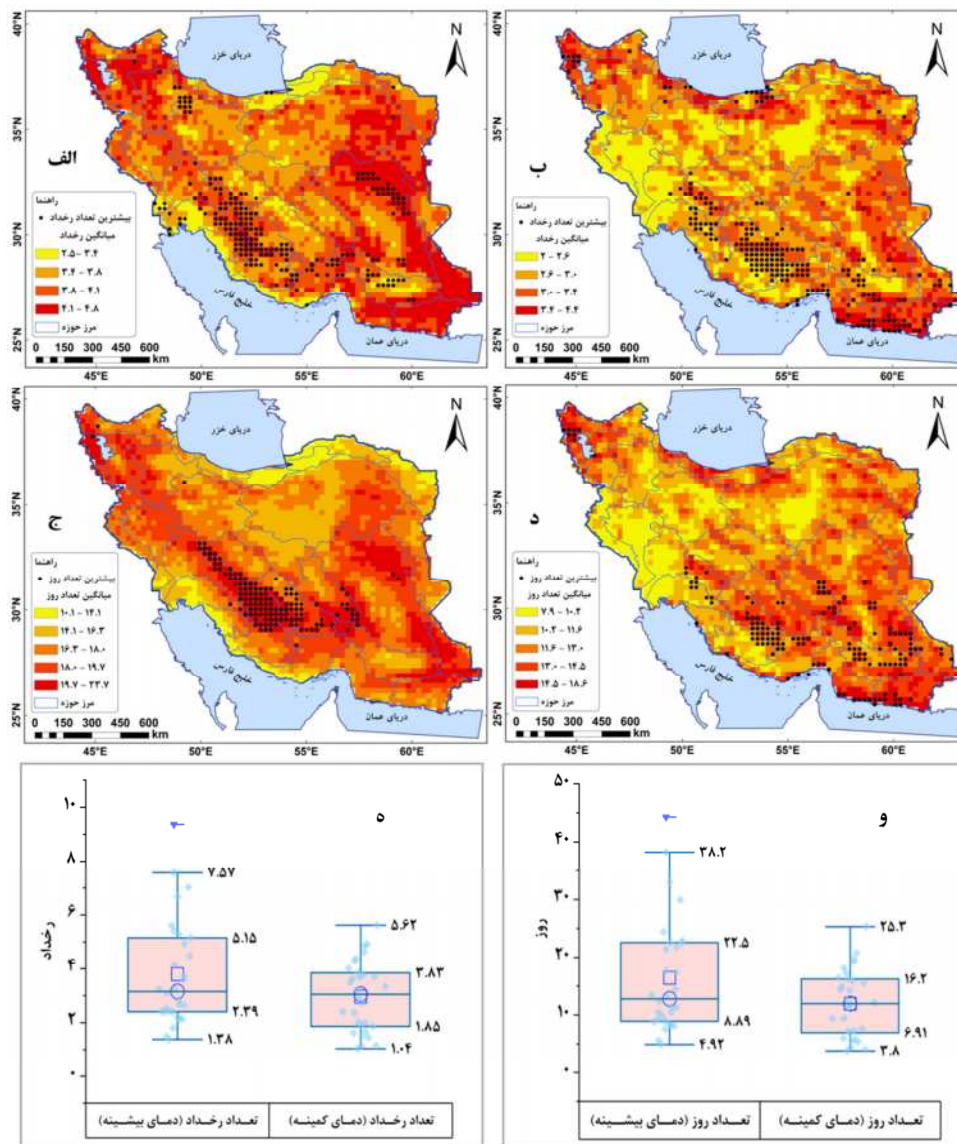
نقشه‌های الف و ب در شکل ۲، ویژگی تعداد رخداد امواج گرمای ناشی از دمای بیشینه و کمینه را نشان می‌دهد. توزیع مکانی این پدیده مناطقی را مشخص می‌کند که دمای روزانه به‌طور مکرر از آستانه‌های بلندمدت محلی فراتر رفته است.

بررسی این ویژگی براساس دمای بیشینه، نشان داد که در سطح کشور، به‌طور میانگین بین ۲ تا ۵ رخداد موج گرما در هر سال و برای هر شبکه‌ی جغرافیایی (با ابعاد تقریبی ۲۵ کیلومتر مربع) قابل‌پیش‌بینی است.

¹ Box-Plot

² Mann-Kendall

³ Sens'slope



شکل ۲: ویژگی‌های متوسط تعداد رخداد و تعداد روز به همراه نمودار باکس پلات آن‌ها. الف) متوسط تعداد رخداد براساس دمای بیشینه. ب) متوسط تعداد رخداد براساس دمای کمینه. ج) متوسط تعداد روز براساس دمای بیشینه. د) متوسط تعداد روز براساس دمای کمینه. ه) نمودار باکس پلات تعداد رخداد. و) نمودار باکس پلات تعداد روز. دایره میانه و مربع میانگین را نشان می‌دهد.

از نظر مکانی به جز نواحی ساحلی جنوب و جنوب غرب کشور و نیز حوضه‌های اترک، گرگانرود و هراز در شمال و شمال شرق، بیشتر نواحی کشور دارای تعداد رخداد‌های متوسط تا بالا هستند. در مقابل، متوسط تعداد رخداد‌های موج گرما بر اساس دمای کمینه، در مقیاس کشور کمتر بوده و گسترش مکانی محدودتری دارد. کمترین میزان رخداد در این شاخص، مربوط به مناطق مرزی غرب کشور (از جمله حوضه آبریز کرخه) و نواحی کویر مرکزی است. این مسأله ممکن است ناشی از ثبات نسبی در روند دمای کمینه یا پایداری دمای پایه در این مناطق باشد. سواحل جنوبی و بخش‌هایی از شمال و شمال غرب کشور، به دلیل رطوبت بالاتر، دمای کمینه به صورت متوالی از آستانه‌های محلی بالاتر رفته است، به طوری که در برخی نقاط این دما حداقل به مدت ۳ روز تداوم داشته است.

بررسی نقاط بحرانی به‌دست‌آمده از بازه ۳۰ ساله نشان داد این نواحی در حوضه‌های آبریز طشک - بختگان، بلوچستان جنوبی - هامون و بخش‌هایی از کویر لوت قرار دارند. این مناطق بیشترین شدت نوسان در امواج گرما را در مقیاس سالانه تجربه کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در شدیدترین حالت، تعداد رخدادها تا ۱۴ بار در سال گزارش شده است.

به‌طور کلی، الگوی پراکنش در هر دو نقشه بیشترین تعداد رخداد را در نواحی جنوب‌شرقی کشور و همچنین در بخش محدودی از مناطق مرزی شمال‌غرب (شامل غرب حوضه ارس و اطراف ارومیه) نشان می‌دهد.

تعداد روز

الگوی پراکنش میانگین تعداد روزهای موج گرما نیز تا حد زیادی مشابه تعداد رخدادهاست؛ اما نقشه مربوط به دمای بیشینه، یکپارچگی مکانی بیشتری در توزیع نشان می‌دهد (شکل ۲ ج، د). بر اساس این شاخص، در حوضه‌های آبریز کویر مرکزی، کویر سیاه‌کوه و دریاچه نمک، به‌طور میانگین بین ۱۴ تا ۱۸ روز موج گرما در سال ثبت شده است. در نواحی گسترده‌ای از جمله نوار غرب تا جنوب‌شرق کشور در امتداد کوه‌های زاگرس، شرق کویر مرکزی، شرق کویر لوت، هامون ماشکیل و بلوچستان جنوبی، این میانگین به ۱۸ تا ۲۴ روز می‌رسد.

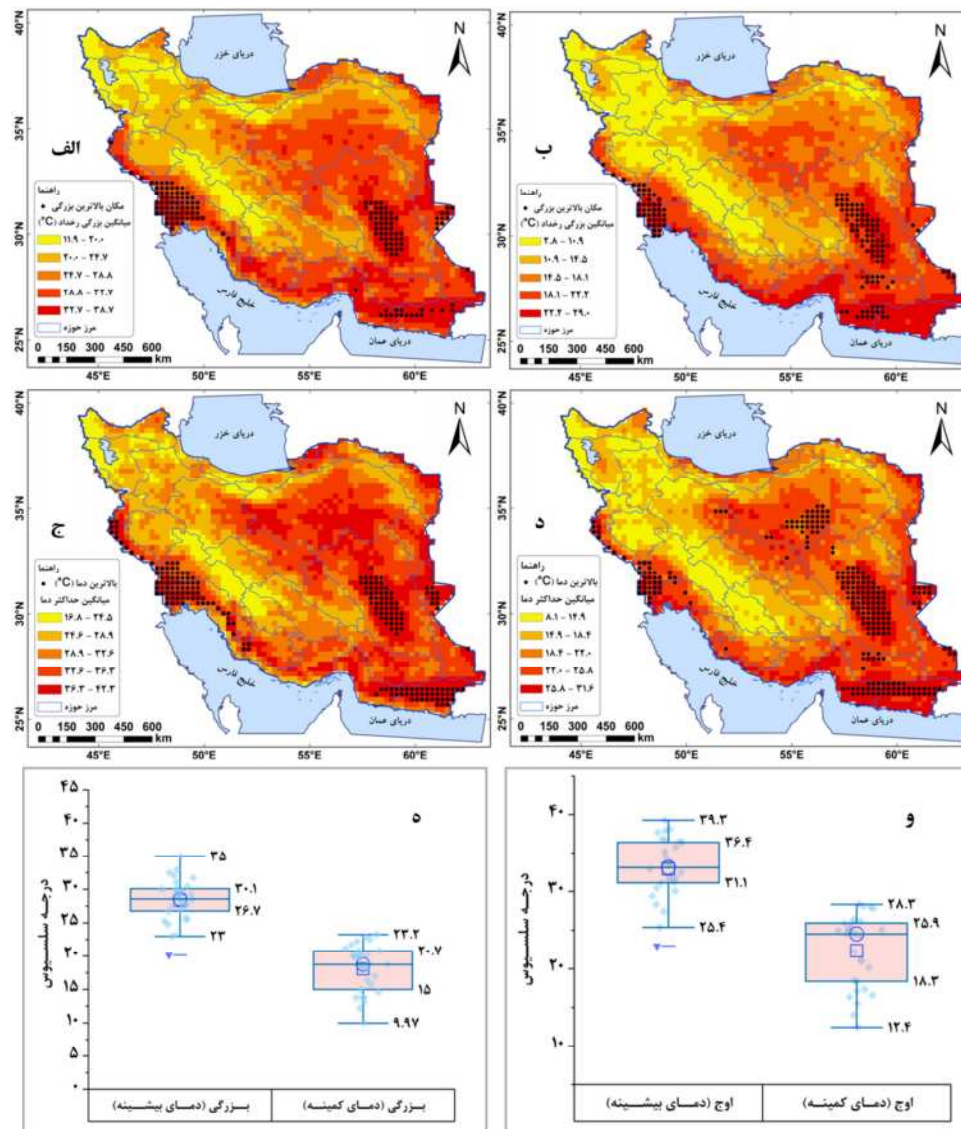
برای شاخص دمای کمینه نیز میانگین روزهای موج گرما تا حدود ۱۹ روز در سال، بیشتر در همان مناطقی ثبت شده که بیشترین تعداد رخداد را داشته‌اند. نقاط بحرانی مشترک در این شاخص نیز بیشتر با حوضه آبریز طشک - بختگان و بخش‌هایی از زاگرس انطباق دارند. در بحرانی‌ترین شرایط، تعداد روزهای موج گرما بر اساس دمای بیشینه به ۹۰ روز در سال رسیده است که بیشتر در نواحی زاگرس و شمال‌غرب دریاچه ارومیه و طی سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴ رخ داده است. در مجموع، بررسی الگوی پراکنش و مقادیر بلندمدت مربوط به تعداد رخدادها و تعداد روزهای امواج گرما نشان می‌دهد که نواحی با دمای مطلقاً بالاتر الزاماً با فراوانی بیشتر موج گرما هم‌زمان نیستند. بلکه بروز و شدت این ویژگی بیشتر تابع نوسانات دمایی محلی و تغییرات نسبی نسبت به آستانه‌های منطقه‌ای - زمانی است تا فقط دمای مطلق روزانه یا شبانه (برسا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

میانگین سالانه تعداد روزهای موج گرما در بسیاری از نواحی ۱۳ روز است؛ اما در مناطق خاصی همچون بخش‌هایی از زاگرس در حوضه طشک - بختگان (منطبق با نقاط بحرانی شکل ۲ ج)، این تعداد تا بیش از ۳۰ روز نیز افزایش یافته است. دامنه داده‌ها (شکل ۲ ه، و) براساس دمای بیشینه بین ۵ تا ۳۸ روز (۱ تا ۷ رخداد)، نشان‌دهنده پراکندگی بالای تعداد روز (رخداد) موج گرما در کشور است. با وجود نقاط پرت بالا که میانگین را به سمت خود کشیده است و تأیید می‌کند برخی مناطق به‌طور متوالی درگیر موج‌های گرمای روزانه هستند، میانه داده‌ها بیانگر این است که ۵۰ درصد داده‌ها (معادل ۱۵ سال) به‌طور میانگین کمتر از ۱۳ روز (۳ رخداد) موج گرم را تجربه کرده‌اند. داده‌های دمای کمینه توزیع نسبتاً متقارنی را داشتند و مانند دمای بیشینه حد بالایی داده‌ها توزیع گسترده‌تری نسبت به حد پایینی داشتند که نشان می‌دهد نواحی مستعد رخداد موج گرما احتمال توالی رخداد بالاتری نیز دارند. این مسأله می‌تواند با بررسی اثر تغییر اقلیم نمود بیشتری داشته باشد.

¹ Barreca

بزرگی رخداد

بزرگی رخداد به عنوان یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی امواج گرما، بر اساس هر دو شاخص دمای بیشینه و کمینه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). این ویژگی به دامنه دمایی در طول رخداد موج گرما اشاره دارد و نشان‌دهنده شدت حرارتی تجمع یافته طی دوره وقوع موج است.



شکل ۳: ویژگی‌های متوسط بزرگی رخداد و اوج رخداد به همراه نمودار باکس پلات آن‌ها. الف) متوسط بزرگی رخداد براساس دمای بیشینه. ب) متوسط بزرگی رخداد براساس دمای کمینه. ج) متوسط اوج موج براساس دمای بیشینه. د) متوسط اوج رخداد براساس دمای کمینه. ه) نمودار باکس پلات بزرگی رخداد. و) نمودار باکس پلات اوج رخداد

الگوی مکانی این ویژگی، در هر دو شاخص دمایی، شباهت زیادی به یکدیگر دارد (شکل ۳ الف، ب). حداقل مقادیر بزرگی رخداد بیشتر در نواحی مرتفع کوهستانی زاگرس و البرز مشاهده شده است. به نظر می‌رسد این موضوع ناشی از وجود پوشش گیاهی گسترده، جریان‌های هوایی محلی و سرمایش مؤثر شبانه در این مناطق باشد که منجر به

کاهش میانگین دمای موج گرما می‌شود. این کاهش به‌طور گسترده‌تری براساس دمای کمینه رخ داده است که می‌توان آن را به جریان‌های کاتباتیک مرتبط دانست (پائولوس و ژانگ^۱، ۲۰۰۸).

به‌طور کلی، پراکنش مکانی این ویژگی تابعی از موقعیت جغرافیایی و الگوی ناهموازی‌هاست (وانگ و لیو^۲، ۲۰۲۴). در مقابل، بیشترین بزرگی موج گرما در نواحی پست و کم‌ارتفاع شامل دشت‌های داخلی، مناطق جنوب و جنوب‌شرق کشور و به‌ویژه سواحل جنوبی ایران (نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان) مشاهده شده است. در این مناطق، دمای بالا و دامنه حرارتی زیاد به‌ویژه بر اساس دمای کمینه، به‌صورت گسترده و مکانی یکپارچه نمایان است. این پدیده بیشتر به‌دلیل رطوبت بالای این نواحی رخ می‌دهد که باعث کاهش بازدهی تابش شبانه زمین شده و مانع از خنک‌شدن مؤثر دما در ساعات شب می‌شود. همچنین، ذخیره‌سازی گرمای روزانه توسط سطح دریا (به‌ویژه هنگام رخداد موج گرما) و بازتاب آن از طریق گردش‌های محلی نظیر نسیم دریا - خشکی به سمت ساحل، از دیگر عواملی است که در پایداری گرمای بالا در شب مؤثرند (سازمان ملی اقیانوس و جو آمریکا^۳، ۲۰۲۳). این شرایط در الگوهای سالانه نیز به‌طور مستمر دیده شده و بر پایداری اقلیمی این الگو در بازه‌های بلندمدت دلالت دارد. به‌طور میانگین، بزرگی موج گرما در بازه ۳۰ ساله در این مناطق به ۳۹ درجه سلسیوس بر اساس دمای بیشینه و ۲۹ درجه سلسیوس بر اساس دمای کمینه می‌رسد. نواحی بحرانی از نظر این ویژگی، همپوشانی زیادی با سایر ویژگی‌های موج گرما دارند و شامل جلگه خوزستان (شامل چهار حوضه آبریز)، بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه کویر لوت و سه حوضه جنوبی استان سیستان و بلوچستان می‌شوند.

از نظر توزیع سالانه (شکل ۳، ه) برای بزرگی رخداد، میانگین و میانه در دمای حدود ۲۸ درجه منطبق برهم بوده و تمرکز داده‌ها در بازه‌ی ۲۳ تا ۳۵ درجه است. پراکندگی کم در این ویژگی، همگنی نسبی شدت موج‌های روزانه در سطح کشور را نشان می‌دهد. در دمای کمینه مربوط به این ویژگی، پراکندگی بیشتری با میانگین حدود ۱۶٫۵ درجه در داده‌ها دیده می‌شود (۹۷ تا ۲۳٫۲ درجه). نقاط کمینه حول ۱۰ درجه، نمایانگر وجود مناطق خاصی با سرمای شبانه حتی در زمان موج گرما هستند. این نقاط با دمای پایین‌تر تاحدودی میانگین را پایین‌تر از میانه داده‌ها آورده‌اند. باین‌حال، میانه داده‌ها نشان می‌دهد تمرکز نیمی از داده‌ها در دامنه دمایی فشرده‌تری بین ۱۷٫۵ تا ۲۳٫۲ درجه قرار داشته است. پراکندگی بیشتر در بزرگی دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه، نشان‌دهنده تنوع داده‌ای بیشتر در رخدادهای شناسایی‌شده بر مبنای دمای پایه است. این وضعیت به‌طور مشترک برای ویژگی اوج دمایی موج و بزرگی موج صدق می‌کند.

اوج موج

ویژگی دیگر مورد بررسی، اوج دمایی موج گرما است که به بیشترین دمای ثبت‌شده در طول رخداد اشاره دارد. این ویژگی، با توجه به واحد دما اندازه‌گیری می‌شود و معمولاً بیانگر زمان‌های اوج تابش خورشیدی در روز، نظیر اوایل بعدازظهر است. اوج دمایی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شدت تابش خورشید، وضعیت آسمان (ابری یا صاف)، نوع پوشش سطحی (بیابانی یا گیاهی) و سایر خصوصیت‌های فیزیکی سطح زمین قرار دارد (وو^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). به عبارت دیگر، این مشخصه نشان می‌دهد که در کدام نواحی هوا به سرعت گرم می‌شود و بنابراین مانند بزرگی موج،

¹ Poulos & Zhong

² Wang & Liu

³ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

⁴ Wu

بیش از همه از موقعیت جغرافیایی، فصل و ناهمواری‌ها تبعیت می‌کند (رن^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). از همین رو، الگوی مکانی آن بسیار مشابه با الگوی بزرگی موج است. نواحی بحرانی نیز همچنان در مناطق پست و با ارتفاع کم متمرکز هستند.

بر اساس میانگین داده‌های ۳۰ ساله (شکل ۳ ج، د)، حداکثر دما در مناطق مرتفع برای شاخص دمای بیشینه حدود ۲۵ درجه سلسیوس و برای دمای کمینه حدود ۱۵ درجه سلسیوس بوده است. در نواحی پست و گرم تابش‌پذیر، این مقادیر به ترتیب به ۴۳ درجه سلسیوس برای دمای بیشینه و ۳۲ درجه سلسیوس برای دمای کمینه رسیده‌اند. گفتنی است که در برخی سال‌ها برای برخی نقاط، اوج دما به بالای ۵۰ درجه بر اساس دمای بیشینه و ۴۰ درجه بر اساس دمای کمینه نیز رسیده است. این موارد بیشتر مربوط به سال‌هایی هستند که میانگین دمای کشور به‌طور کلی بالاتر از نرمال بوده است. این وضعیت به‌ویژه در مناطق گرم و مرطوب کشور، نظیر نواحی جنوبی و خوزستان که در آن‌ها به دلیل رطوبت بالا، اختلاف دمای شب و روز کاهش می‌یابد و دمای بیشینه نیز در فصل تابستان به‌طور قابل-توجهی با افزایش همراه است (یوسفی کبریایی، ۲۰۲۵)، بیشتر مشاهده می‌شود.

نکته قابل‌توجه در بررسی این ویژگی آن است که در برخی نواحی کوهستانی با ارتفاع بالا، دمای اوج موج گرما نسبتاً پایین بوده است. این مسأله اگرچه از دیدگاه سلامت انسانی ممکن است آسیب‌زا نباشند؛ اما از منظر اکولوژیکی، منابع آبی و فشار حرارتی بر پوشش گیاهی می‌توانند اهمیت قابل‌توجهی داشته باشند.

شکل ۳ (و) نشان می‌دهد دماهای ثبت‌شده برای مشخصه اوج موج‌های گرما بر اساس دمای بیشینه به‌طور میانگین ۳۴ درجه است. در برخی مناطق تا نزدیک ۴۰ درجه نیز رسیده است. میانه‌ی داده‌ها ۳۴٫۲ درجه است که منطبق با میانگین داده‌ها بوده و حکایت از توزیع نسبتاً متقارن داده‌ها دارد. با این وجود، حد پایین و بالای داده‌ها نشان می‌دهد بخش بیشتر داده‌ها در یک بازه‌ی دمایی نسبتاً متمرکز (حدود ۳۱ تا ۳۹ درجه) قرار گرفته‌اند. درحالی‌که مقادیر دمای کمینه از ۱۸٫۳ تا ۲۶ درجه (از چارک اول تا سوم) با میانگین حدود ۲۳ درجه پراکندگی دارند، در بعضی نواحی متوسط دمای کمینه به بیش از ۲۸ درجه رسیده و حداقل دمای پایه به زیر ۱۳ درجه نیز کاهش یافته است. همچنین، میانه بالاتر از میانگین در دمای کمینه نشان می‌دهد دمای پایه گرم‌تر توزیع بیشتری داشته است.

طولانی‌ترین موج

طولانی‌ترین موج گرما مشخصه مهم دیگری از موج گرمایی است که به تداوم شرایط بحرانی اشاره دارد و اثرات تجمعی بیشتری نسبت به موج‌های کوتاه دارد (دی پالت^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این ویژگی نقش مهمی در ارزیابی شدت و تداوم گرمایش، تاب‌آوری مناطق و تحلیل فشار حرارتی بر انسان و محیط دارد (رن و همکاران، ۲۰۲۳). بر اساس میانگین بلندمدت، طولانی‌ترین رخداد موج گرما در کشور، برای هر دو شاخص دمای بیشینه و کمینه، حدود ۷ تا ۸ روز برآورد شده است (شکل ۴ الف، ب)

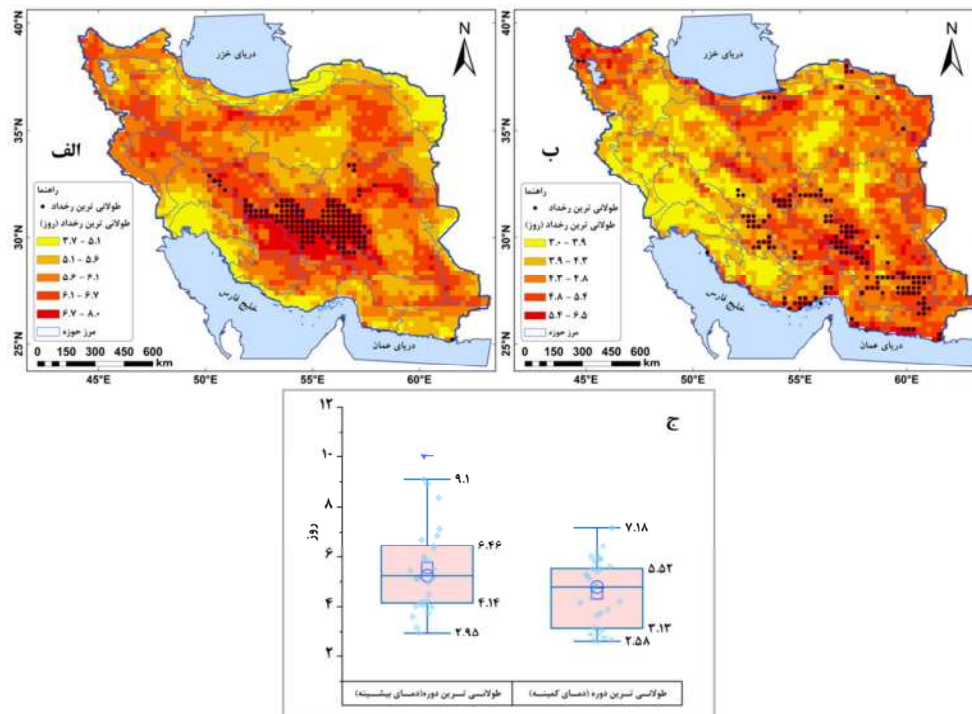
تحلیل فضایی این شاخص نشان داد که طولانی‌ترین رخدادها بیشتر در نواحی مرکزی و کویری کشور، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز درانجیر، ابرقو - سیرجان بعلاوه طشک - بختگان - مهارلو رخ داده‌اند. این الگو، هم در میانگین و هم در مقادیر حداکثر سالانه مشاهده شد. این امر را می‌توان به مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی و جغرافیایی نسبت داد، از جمله اقلیم خشک و بیابانی، استقرار مداوم سامانه‌های پرفشارهای گرم، تابش شدید خورشیدی، ضعف پوشش

¹ Ren

² De Polt

گیاهی و توپوگرافی محصور و جریان‌های هوایی محدود همگی در حفظ دمای بالا و افزایش مدت زمان رخداد موج گرما در این نواحی نقش داشته‌اند.

در غرب کشور نیز نواحی مرزی همچون حوضه‌های آبریز ارس، دریاچه ارومیه و کرخه دوره‌های طولانی گرما (بین ۶ تا ۷ روز) را ثبت کرده‌اند. از دلایل اصلی این وضعیت می‌توان به الگوهای پرفشار تابستانه و فقدان منابع آبی یا تعدیل کننده دما اشاره کرد. همچنین، در حوضه‌هایی مانند کرخه، شرایط زمین‌های خشک و کم‌پوشش، همراه با توپوگرافی و دشت‌های گرم و محصور، می‌تواند به انباشت گرمای روزانه و تداوم موج گرما منجر شود (مجرد و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۴: ویژگی متوسط طولانی‌ترین دوره رخداد به همراه نمودار باکس پلات آن. الف) طولانی‌ترین دوره براساس دمای بیشینه. ب) طولانی‌ترین دوره موج براساس دمای کمینه. ج) نمودار باکس پلات طولانی‌ترین دوره موج گرما.

نکته جالب توجه دیگر، الگوی ثبت‌شده در جلگه خوزستان است. با وجود ثبت بالاترین مقادیر بزرگی و اوج دمایی موج گرما در این منطقه، طولانی‌ترین رخداد موج گرما کوتاه‌تر از بسیاری از مناطق دیگر بوده است (بین ۳ تا ۵ روز برای دمای بیشینه و ۳ تا ۴ روز برای دمای کمینه). این الگو نشان می‌دهد که امواج گرمایی در این ناحیه به صورت رخدادهایی به شدت گرم، اما با دوام کمتری ظاهر می‌شوند. ماهیت گرم اقلیم منطقه که منجر به سطح بالای آستانه ثبت رخداد می‌شود و همچنین، پویایی جوی ناپایدار در این نواحی می‌تواند علت کاهش طول دوره این رخدادهای باشد.

مقایسه دو شاخص دمای بیشینه و کمینه در سواحل شمالی و جنوبی کشور نیز تفاوت‌های قابل توجهی را نشان داد (شکل ۴ الف و ب). بر اساس دمای بیشینه، نواحی مجاور دریای خزر و خلیج فارس کمترین مقادیر طولانی‌ترین موج را ثبت کردند که بیانگر ناپایداری موج‌های گرمایی در این مناطق از منظر دمای بیشینه است. در مقابل، همین نواحی از نگاه دمای کمینه مقادیر بالاتری (میانگین ۵ تا ۶ روز) را تجربه کرده‌اند. این تفاوت را می‌توان به نقش

تعدیل‌کننده منابع آبی بزرگ نسبت داد. به این صورت که، دریای خزر و خلیج فارس با کاهش دامنه نوسان روزانه دما، از شدت و دوام موج گرما در روز می‌کاهند؛ اما هم‌زمان با جلوگیری از کاهش دمای شبانه، زمینه پایداری بیشتر موج گرما را از منظر دمای کمینه فراهم می‌کنند. از این‌رو، در این مناطق، موج گرما از منظر دمای کمینه تداوم بیشتری نسبت به دمای بیشینه دارد.

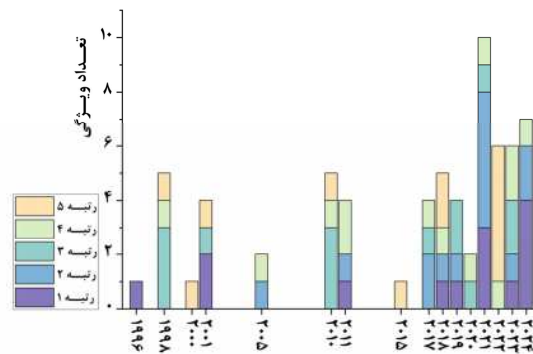
در نواحی شمال‌شرقی کشور نظیر حوضه‌های آبریز اترک، قره‌سو و گرگانرود نیز مقادیر طولانی‌ترین رخداد در مقایسه با سایر مناطق داخلی، به‌ویژه بر اساس شاخص دمای بیشینه، کمتر بوده است. این کاهش را می‌توان به تأثیرگذاری غیرمستقیم دریای خزر و نقش سامانه‌های ناپایدار شمالی نسبت داد که مانع پیوستگی دمای بالا، به‌خصوص در طول روز، می‌شوند (فتاحیان و همکاران ۲۰۲۵).

بر اساس نمودار باکس‌پلات (شکل ۴ ج)، طولانی‌ترین دوره‌های پیوسته موج گرما در شاخص دمای بیشینه، نوسانات بیشتری نسبت به دمای کمینه داشته‌اند. در این شاخص، میانگین داده‌ها اندکی بالاتر از میانه قرار گرفته که نشان‌دهنده وجود مقادیر بالای پراکنده در بخشی از دوره‌هاست. طولانی‌ترین موج گرما (میانگین کل کشور)، برای حدود ۴۶ درصد داده‌ها بر اساس دمای بیشینه و برای حدود ۵۰ درصد داده‌ها (معادل ۱۵ سال) بر اساس دمای کمینه بیش از ۵ روز به طول انجامیده است. افزون بر این، داده‌های پرت در شاخص دمای بیشینه نشان می‌دهند که احتمال وقوع موج‌های گرما با طول دوره ۱۰ روز یا بیشتر نیز وجود دارد. این موارد می‌توانند معرف سال‌هایی با شرایط اقلیمی خاص یا وقوع پدیده‌های شدیدتر گرمایی باشند که اثرگذاری بیشتری بر محیط‌زیست، سلامت و زیرساخت‌های منطقه‌ای دارند.

ویژگی‌های آماری امواج گرمایی

توزیع میانگین ۳۰ ساله ۷ ویژگی براساس رتبه (شکل ۵)، نشان داد ۸ سال اخیر بازه زمانی مورد مطالعه به‌طور متوالی بالاترین رتبه‌ها را از نظر میانگین بین ویژگی‌ها داشتند (بالاترین میانگین‌ها به ترتیب به رتبه‌های یک تا ۵ تقسیم شده‌اند) و هر سال بین ۲ تا ۱۰ ویژگی (مجموع ویژگی‌های کمینه و بیشینه)، بالاترین میانگین را از ۳۰ سال داده ثبت کرده است. بنابراین، می‌توان روند گرمایشی متفاوتی را در تغییرات ویژگی‌های موج گرما به خوبی مشاهده نمود. به‌طوری‌که سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴ وخیم‌ترین شرایط گرمایی را به هنگام موج گرمایی داشته‌اند. در این سال‌ها ۳ الی ۴ ویژگی رتبه یک یا بالاترین میانگین را داشتند و رکورد تعداد ویژگی‌هایی که بالاترین میانگین ۳۰ ساله را داشته‌اند، (رتبه‌های ۱ و ۲) شکسته شده است.

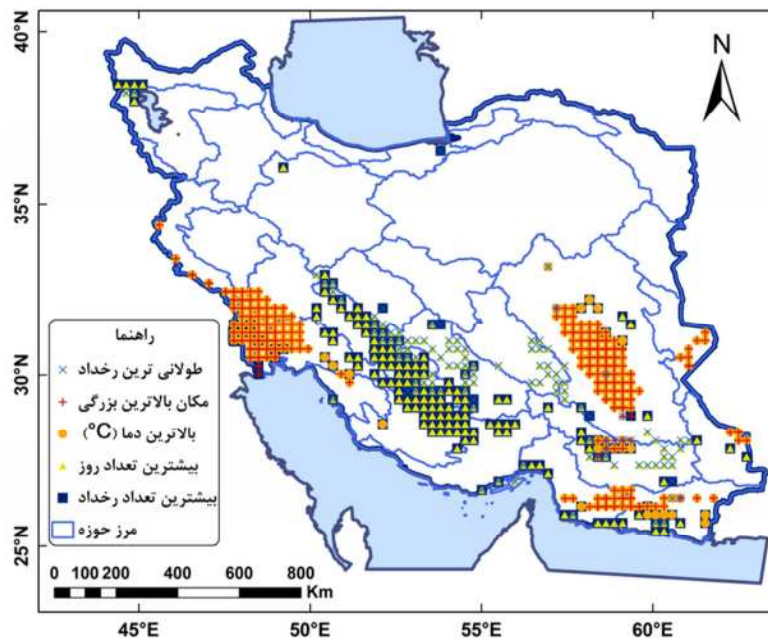
در بین سایر سال‌هایی که در یک الی دو ویژگی بالاترین میانگین (رتبه یک) را داشتند، می‌توان به سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۱ اشاره کرد. درعین‌حال، سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۱۰ نیز تعداد ویژگی‌های بیشتری را در مجموع بالاترین میانگین‌ها (بین یک تا ۵) داشتند. روند بالاترین میانگین‌ها در مجموع ویژگی‌ها به وضوح و به‌طور چشمگیری افزایشی بوده است.



شکل ۵: معرفی ۵ مورد از بالاترین میانگین‌های ویژگی امواج گرمایی براساس رتبه در میان سال‌های مورد مطالعه (۱۹۹۵-۲۰۲۴)

شناسایی پرمخاطره‌ترین نواحی

ترکیب نقاط بحرانی هر یک از ویژگی‌های موج گرما (مانند تعداد رخداد، تعداد روز، بزرگی موج و اوج دمایی) به خوبی نواحی با مخاطره‌پذیری بالای این پدیده را آشکار می‌کند. در شکل ۶، مناطقی که نقاط بحرانی حداقل دو ویژگی موج گرما را شامل می‌شدند، به‌عنوان نقاط پرمخاطره شناسایی شده‌اند، همراه با نوع مخاطره نشان داده شده است.



شکل ۶: مناطق پرمخاطره از نظر ترکیب ویژگی‌های امواج گرمایی

تحلیل‌ها نشان داد حوضه‌های طشک - بختگان، کارون بزرگ و مند از منظر «تعداد رخداد» و «تعداد روز موج گرم» در معرض خطر ویژه قرار دارند. این نواحی بیشتر در پیش‌کوه‌ها و دامنه‌های جنوبی - شرقی زاگرس واقع‌اند. در این مناطق، به‌دلیل اثر بخشی توپوگرافی کوهستانی در تداخل جریان‌های هوایی و ایجاد ناهمگنی دمایی و ناپایداری نسبت به میانگین محلی، موجب ثبت تعداد رخداد بالا و روزهای متوالی موج گرما شده است. از سوی دیگر، حوضه‌های آبریز مربوط به استان خوزستان (شامل جلگه خوزستان)، کویر لوت، هامون - هیرمند و بندرعباس - سدیج، از نظر

«بیشینه‌های دمایی یا اوج موج» و «بزرگی موج گرما» در سطح خطر بالا قرار دارند. این نواحی به سبب تأثیر مستقیم دمای مطلق بسیار بالا بر روی سلامت انسان (افزایش مرگ‌ومیر ناشی از گرما)، زیرساخت‌های شهری، تولید کشاورزی و مدیریت منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارند. با وجود این، این حوضه‌ها از نظر تعداد رخدادها و تعداد روزهای موج گرما مقداری پایین‌تر از سایر مناطق دارند. علت آن به نحوه تعیین آستانه‌های موج گرما بر اساس تاریخچه محلی (صدک‌های دمای تجمعی) برمی‌گردد؛ زیرا در نواحی پست و بیابانی که دماهای مطلق همیشه بالا است، نوسانات دمایی نسبت به مقدار میانگین محلی اندک‌تر است و کمتر از آستانه‌ی تعریف‌شده عبور می‌کند. به بیان دیگر، در این مناطق گرما به‌صورت ثابتی بالا باقی می‌ماند و اگرچه مقادیر حداکثر دما بسیار زیاد است، تغییرات نسبی (ناهنجاری‌های مثبت دمایی) که تعریف موج گرما بر آن استوار است، کمتر بروز می‌کند. استثنای این وضعیت ناحیه‌ی ساحلی شمال‌غرب خلیج فارس (نزدیک بندر ماهشهر) است که هم «بزرگ‌ترین بزرگی موج» و هم «بیشترین تعداد رخداد» را به‌طور هم‌زمان ثبت کرده است. علت اصلی آن، تداخل هم‌زمان شرایط رطوبتی و دمایی است که هم بر شدت (بیشینه) و هم بر فراوانی رخدادها تأثیر می‌گذارد. حوضه‌های کویر درانجیر، ابرقو - سیرجان و هامون - جازموریان نیز به لحاظ «طولانی‌ترین دوره پیاپی موج گرما» و «بیشترین تعداد روز» در ردیف مناطق پرخطر قرار دارند. در این نواحی، فشار گرمایی بالا (به‌دلیل تابش شدید خورشید و خشکی هوا) و تاب‌آوری محیطی پایین (کمبود پوشش گیاهی و منابع آبی) منجر به پایداری طولانی رخدادهای گرمایی شده است (هیرش^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

در مجموع، حوضه‌های شمالی هامون - جازموریان (بخش‌های پایکوهی)، جنوب بلوچستان، سواحل هرمزگان، شرق کارون بزرگ و طشک - بختگان به‌دلیل هم‌زمانی نقاط بحرانی در سه ویژگی مختلف موج گرما (اوج دما، تعداد رخداد و بزرگی موج) جزو مناطق با بالاترین درجه مخاطره به‌شمار می‌آیند. در بخش پایکوهی هامون - جازموریان حتی ترکیبی از چهار ویژگی نیز مشاهده شده است. این دسته‌بندی نشان می‌دهد که علاوه بر شدت دمایی مطلق، پایداری و تداوم رخدادهای گرما برای سنجش مخاطره‌پذیری اقلیمی بسیار تعیین‌کننده است و برنامه‌ریزی‌های سازگاری و مدیریت ریسک باید همه‌ی این ابعاد (شدت، فرکانس، طول دوره و توزیع مکانی) را در نظر داشته باشند.

تحلیل روند زمانی ویژگی‌های امواج گرمایی

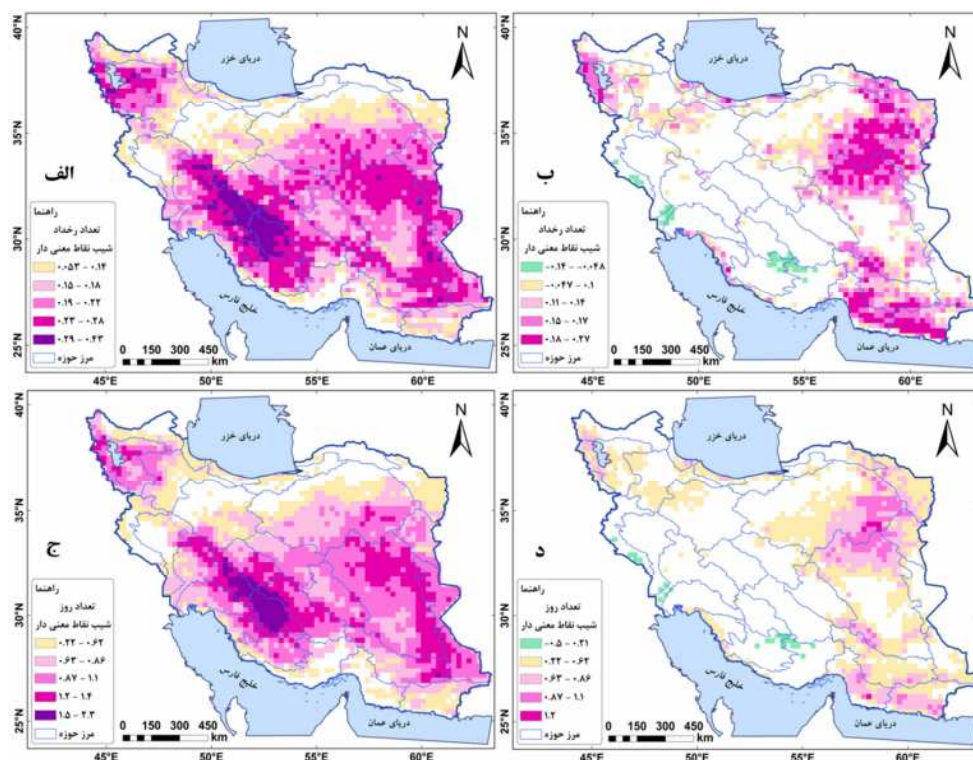
شیب روند زمانی هر یک از ویژگی‌های موج گرم برای هر شبکه جغرافیایی محاسبه و به‌صورت توزیع مکانی در نقشه‌های شکل‌های (۷، ۸ و ۹) نمایش داده شده است. در این نقشه‌ها تنها نقاطی نشان داده شده‌اند که براساس آزمون من - کندال از نظر روند دارای معنی‌داری آماری ($p < 0.05$) بوده‌اند. شیب این نقاط به‌گونه‌ای رنگ‌بندی و تقسیم‌بندی شده است که امکان مقایسه مستقیم روندها براساس دمای کمینه و بیشینه برای هر ویژگی فراهم شود.

تحلیل روند زمانی ویژگی‌های امواج گرمایی نشان داد که بر اساس دمای بیشینه در بخش اعظم کشور (به جز نوار شمالی کشور و بخش‌هایی از حوضه‌های غربی و جنوبی)، روند تعداد رخدادهای موج گرما و تعداد روزهای موج گرما، افزایشی بوده است (شکل ۷ الف، ج). به عبارت دیگر، در اغلب نقاط، هم تعداد دفعات وقوع موج حرارت و هم مدت زمان تجمعی آن در هر سال به مرور در حال افزایش است. این الگو را می‌توان به گرمایش عمومی و افزایش بسامد پرفشارهای تابستانه در ایران نسبت داد که شرایط را برای ماندگاری هوای گرم تسهیل می‌کنند. بزرگ‌ترین شیب افزایشی منطبق بر نواحی است که بالاترین میانگین رخداد را در این دو ویژگی داشته‌اند. نواحی مرتفع حوضه‌های

¹ Hirsch

طشک - بختگان به‌طور متمرکزی از نظر مکانی دارای شیب حداکثر ۰,۴۳ رخداد و بین یک تا دو روز در سال بوده اند. این مناطق علاوه بر حساسیت هیدرولوژیک (وجود تالاب‌ها و ذخایر آبی)، از نظر اقلیمی نیز تحت تأثیر کاهش بارش‌های تابستانه و افزایش دما قرار دارند که منجر به افزایش شدت رخدادها شده است.

از منظر دمای کمینه، الگوی متفاوت‌تری دیده شد (شکل ۷ ب). بخش‌هایی از حوضه‌های استان فارس و جلگه خوزستان و حوضه مرزی غرب از نظر تعداد رخداد، روند اندکی کاهشی دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از تداوم تبخیر - تعرق و نقش رطوبت خاک در تعدیل دماهای شبانه باشد. در مقابل، نوارهای ساحلی شمال و جنوب کشور از منظر موج گرمای شبانه (دمای کمینه) روند افزایشی معنی‌داری در تعداد رخدادها داشته‌اند. اگرچه حداکثر مقدار شیب معنی‌دار در دمای کمینه (حدود ۰,۲۷ رخداد در سال و ۱ روز در سال) کمی پایین‌تر از مقادیر متناظر دمای بیشینه است؛ اما این حداکثر در نواحی شمال‌شرقی (استان خراسان بزرگ، منطبق با نواحی پست و بیابانی شامل کویر مرکزی، لوت و نمک‌زار خواف) و همچنین در جنوبی‌ترین نقاط کشور (حوضه‌های بلوچستان جنوبی و بندرعباس - سدیج) مشاهده شده است.

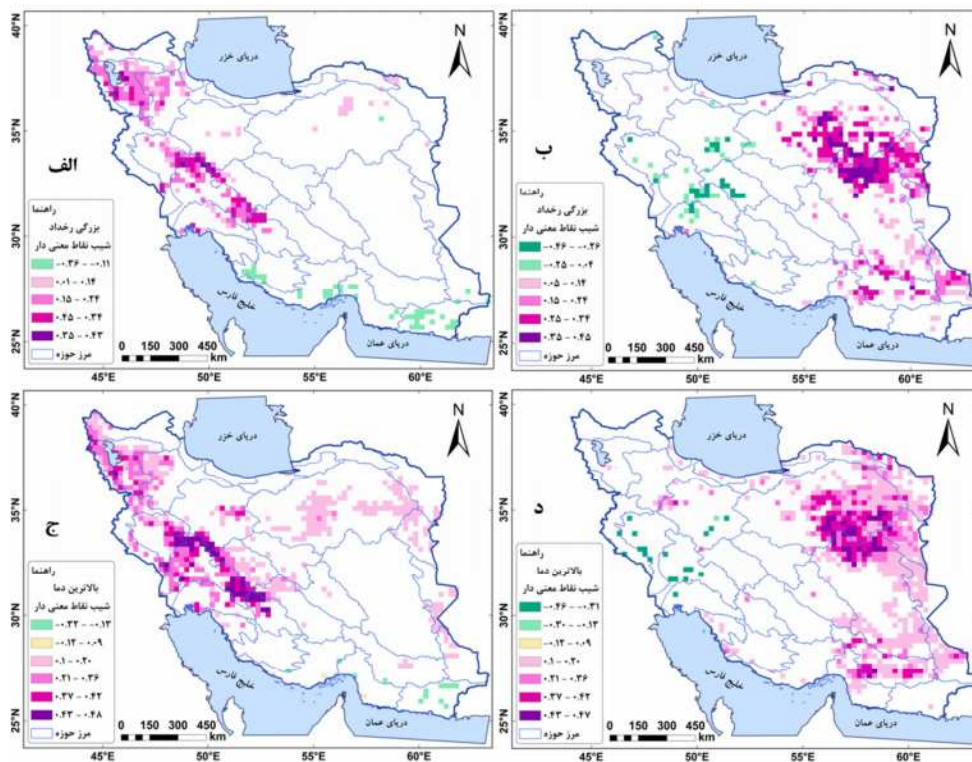


شکل ۷: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی‌های تعداد رخداد و تعداد روز امواج گرما. الف و ج) شیب روند براساس دمای بیشینه. ب و د) شیب روند براساس دمای کمینه.

به لحاظ بزرگی رخداد بر اساس دمای بیشینه، در بخش‌هایی از حوضه‌های جنوبی ساحلی روندی کاهشی ضعیف مشاهده شد (شکل ۸ الف). برای اوج موج نیز در بلوچستان جنوبی همین الگو ثبت شد (شکل ۸ ج). این رفتار می‌تواند با تعدیل دریایی (نقش سامانه‌های نسیم دریا - خشکی)، رطوبت بالاتر و افزایش شار گرمای نهان (که بخشی از انرژی را از گرم کردن هوا منحرف می‌کند)، افزایش ابرناکی/شرجی‌بودن در دوره‌های مونسونی مرتبط باشد. عواملی

که معمولاً به محدود شدن دمای حداکثر روزانه منجر می‌شوند. با این وجود باید در نظر داشت، در حاشیه دریا ترکیب سلول‌های خشکی - دریا در بازتحلیل 0.25° می‌تواند نوسانات اوج دما را تضعیف کند؛ بنابراین، این کاهش ضعیف با احتیاط تفسیر می‌شود.

در مقابل، نواحی گسترده‌تری از حوضه‌های غربی کشور شامل طشک - بختگان، کارون بزرگ، کرخه جنوب غرب سفیدرود بزرگ، همین‌طور دریاچه ارومیه و سواحل شمال غربی خلیج فارس روند شیب افزایشی بوده است، به‌طوری‌که متوسط دمای موج افزایش متوسط رو به بالایی داشته است. این روند برای ویژگی اوج موج در همین مناطق بعلاوه بخش‌هایی از حوضه ارس و مرزی غرب مورد تأیید است. خشک شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها در این نواحی مثل ارومیه می‌تواند از عوامل موثر بر معنی‌دار شدن افزایش روند باشند.

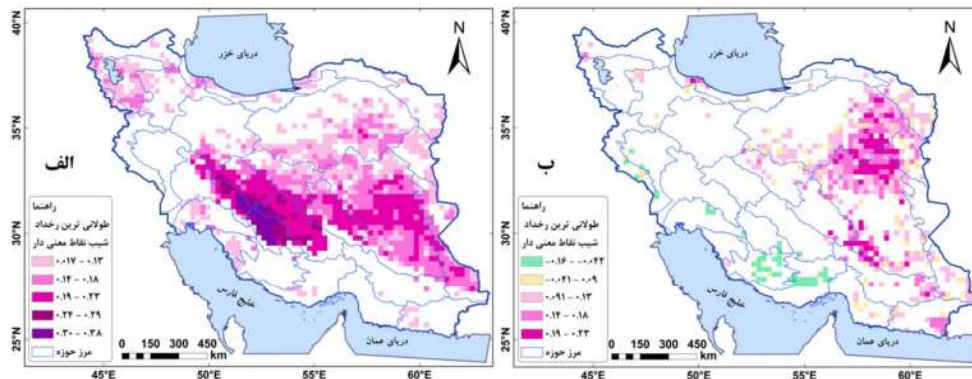


شکل ۸: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی‌های بزرگی رخداد و اوج دمای امواج گرما. الف و ج) شیب روند براساس دمای بیشینه. ب و د) شیب روند براساس دمای کمینه.

سایر تفاوت‌های مکانی به این صورت است: نواحی پشت به باد زاگرس در حوضه‌های آبریز داخلی، حوضه آبریز کویر مرکزی و هامون، نمک‌زاد خواف و دریاچه نمک از نظر اوج دمای موج روند افزایشی معنی‌دار داشته‌اند (شکل ۸ ج). این روند افزایشی را می‌توان ناشی از تکرار اثر فون^۱ (نزول آدیاباتیک پس از عبور از ارتفاعات) دانست. علاوه بر این، کمبود رطوبت نسبی باعث می‌شود که تبخیر - تعرق نقش کمتری در تعدیل دما داشته باشد. همین امر سبب شده که نواحی مرتفع غربی و پشت‌باد زاگرس نسبت به سایر بخش‌های کشور در معرض خطر بالاتری از نظر اوج موج‌های گرما قرار گیرند. از نظر دمای کمینه، نواحی گسترده‌تری شیب روند افزایشی داشتند (شکل ۸ ب و د) و این روندها

¹ Foehn effect

در نواحی شرق و شمال شرق کشور رخ داده‌اند و در حوضه‌های آبریز کویر مرکزی و شمال کویر لوت شدت افزایش روند قوی‌تری در بزرگی و اوج موج داشته‌اند.



شکل ۹: شیب روند زمانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای ویژگی طولانی‌ترین دوره موج گرما. (الف) شیب روند براساس دمای بیشینه. (ب) شیب روند براساس دمای کمینه.

در نهایت، روند طولانی‌ترین موج‌ها نیز همگام با ویژگی‌های قبل دارای روند معنی‌دار افزایشی اغلب در همان مناطق است (شکل ۹). تنها نقاطی که براساس دمای کمینه روند منفی معنی‌دار داشته‌اند، مربوط به برخی حوضه‌های جنوبی کشور مانند مند و حله بوده است که شیب نسبتاً ضعیفی را نشان داده‌اند (شکل ۹ ب). این روند کاهش می‌تواند تحت تأثیر نزدیکی به خلیج فارس و دریای عمان و نقش تعدیل‌کننده آن‌ها (به‌صورت پویا با افزایش رطوبت نسبی و شدت تبخیر - تعرق) بر دماهای شبانه شکل گرفته باشد. مهم‌ترین تفاوت در الگوی طولانی‌ترین دوره موج مربوط به دمای بیشینه است (شکل ۹ الف). در این الگو تمام حوضه‌های کویری روند افزایشی معنی‌داری داشته‌اند. مقدار شیب در حوضه‌های کویر درانجیر و کویر لوت بالاتر بوده است. این روند می‌تواند ناشی از روند درازمدت خشک‌تر شدن اقلیم در این نواحی باشد که با کاهش رطوبت خاک، تبخیر کمتر و افزایش سهم گرمایش محسوس همراه است. این تغییرات، حتی در غیاب تغییرات آشکار سطحی، به تشدید روند افزایشی دمای بیشینه کمک می‌کنند؛ چرا که خاک خشک‌تر، در معرض تابش بیشتر و گرمایش سریع‌تری است و توانایی تعدیل دمای محیط در روزهای گرم را ندارد. این نتایج در مجموع بیانگر آن است که روندهای مشاهده‌شده بیشتر بازتابی از عوامل اقلیمی پویا مانند گرمایش منطقه‌ای، تغییر الگوی بارش و رطوبت خاک و اثرات مکانی مرتبط با ارتفاع و همجواری با دریا و کویر هستند. چنین عواملی در گذر زمان تغییرپذیر بوده و به‌طور مستقیم بر شدت و تواتر امواج گرمایی اثر گذاشته‌اند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با بهره‌گیری از تابع چگالی احتمال و آزمون‌های ناپارامتری، ویژگی‌های امواج گرمایی را در قالب پنج شاخص کلیدی (تعداد رخداد، تعداد روز، بزرگی موج، اوج دمای و طولانی‌ترین موج) با استفاده از ۳۰ ساله روزانه دمای بیشینه و کمینه (سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۲۴) در ایران بررسی کرد. نتایج نشان داد که آثار گرمایش تدریجی اقلیم ایران به‌وضوح بر تمامی جنبه‌های امواج گرما از کمیت (تعداد و مدت) تا کیفیت (شدت و اوج دما) رخدادها تأثیر گذاشته است.

پدیده موج گرما در ایران گستردگی بالایی داشته و نه تنها مناطق کمابیش کویری و خشک شرقی و جنوب شرق (کویر لوت، بلوچستان جنوبی - هامون)، بلکه بسیاری از نواحی غرب و جنوب غرب نیز به درجات مختلف تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. در این میان حوضه آبریز طشک - بختگان، در امتداد دامنه جنوب شرقی رشته کوه زاگرس، در معرض بیشتری از موج گرما از نظر تعداد رخداد و روزهای همراه با موج گرم بوده‌اند. همچنین، سواحل کشور براساس دمای کمینه تعداد روزهای رخداد بالایی را تجربه کردند. شدت موج‌های گرما (بزرگی و اوج موج) در نواحی بیشتر گرم که نوسان دمایی کمتری دارند (در نواحی کویری، جلگه خوزستان و سراسر سواحل جنوبی به‌ویژه از منظر دمای کمینه) بیشتر بود، به‌طوری‌که در برخی سال‌ها اوج دمای موج براساس دمای بیشینه به ۵۵ درجه رسیده است. طولانی‌ترین دوره‌های پیوسته موج گرما در این محدوده‌ها (تا متوسط بیش از ۱۰ روز و در مناطق کویری در برخی سال‌ها به ۴۰ روز) ثبت گردید. به لحاظ روند زمانی، توالی رخداد موج‌های گرمای شبانه (دمای کمینه) به‌خصوص در سواحل شمال و جنوب، رو به گسترش است که می‌تواند بحران‌های در حوزه‌های سلامت و انرژی (افزایش مصرف برق برای خنک‌سازی) را در فصل گرم تشدید کند. اگرچه تکرار موج براساس دمای بیشینه در بیشتر مناطق ساحلی شمال افزایش اندکی را تجربه کرده، اما شیب معنادار کمتری نسبت به مناطق کویری از خود بروز داده است. علاوه بر این، الگوی زمانی موج گرما نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن فصل گرما، افزایش تعداد رخدادها و روزهای موج در پهنه‌های مختلف و کاهش خنکای شبانه در مناطق بحرانی (حوضه‌های آبریز هامون جزمویان، بلوچستان جنوبی، کویر مرکزی) است که با روند جهانی تغییر اقلیم همخوانی دارد (عباس نیا و همکاران ۲۰۱۶). یکی از نکات برجسته این پژوهش، تفکیک هم‌زمان شدت (بزرگی و اوج دما)، تعداد (رخداد و روز) و پایداری (طولانی‌ترین دوره) موج گرما بود. این شیوه ترکیبی نشان داد که نواحی کوهپایه‌ای زاگرس (امتداد طشک - بختگان) اگرچه شدت مطلق گرما در آن‌ها کمتر از دشت‌های پست جنوبی است؛ اما شیب رشد تعداد رخدادها و روزهای مداوم در آن‌ها معنادارتر از سایر مناطق است. سرانجام، تجمع نقاط بحرانی به ما امکان داد تا مجموعه‌ای از نواحی پرمخاطره در برابر موج گرما را با توجه به ترکیب سه و چهار ویژگی هم‌زمان شناسایی کنیم. ترکیب این تحلیل نشان داد که نواحی جنوبی و جنوب شرقی (بلوچستان، هرمزگان، خوزستان)، بخش‌های مرکزی کویری (درانجیر، ابرقو - سیرجان) و مسیرهای کوهپایه‌ای زاگرس (طشک - بختگان، مند، کارون بزرگ) بیشترین تداخل بحران‌ها را دارند و در صورت تدام روند فعلی گرمایش جهانی، بسیار آسیب‌پذیرتر خواهند بود.

نتایج این پژوهش درخصوص روندهای افزایشی بارز و معنادار امواج گرما در ایران، به‌ویژه در نواحی مرتفع غربی (به ویژه در دامنه‌های شرقی) به لحاظ تعداد رخداد با یافته‌های مجرد و همکاران (۲۰۱۵)، شریفی و احترام (۲۰۱۶) همخوانی دارد. همچنین، افزایش شدت امواج گرما (ویژگی‌های اوج و بزرگی موج) در مناطق کویری (کویر مرکزی و شمال لوت) با نتایج جوادی و همکاران (۲۰۲۴)، انصاری همکاران (۲۰۲۴) و همچنین کمانگر و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. این پژوهش، همچنین تفاوت طولانی‌ترین دوره موج گرما بین سواحل دریای عمان و خلیج فارس را تأیید می‌کند؛ همان‌گونه که در مطالعه بیرقدار و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده بود. افزایش وابستگی بزرگی موج گرما به ارتفاع نیز با نتایج ژای و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد. علاوه بر این، افزایش تعداد شب‌های گرم (نسبت به آستانه‌های محلی) که در گزارش جهانی اقلیم (۲۰۲۴) مطرح شده بود، با تحلیل ویژگی‌های موج گرم بر اساس دمای کمینه در این مطالعه تأیید شد.

مقایسه دقیق‌تر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که گسترش فضایی امواج گرما با نتایج عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) در افزایش طول دوره‌های گرم نواحی کوهستانی زاگرس همخوانی دارد. با این حال، برخلاف گزارش جنگی و همکاران (۲۰۲۴) که حداکثر بزرگی و اوج موج گرما را در شمال غرب، شمال شرق و نواحی مرتفع گزارش کردند، در این مطالعه بالاترین مقادیر این ویژگی‌ها در جلگه خوزستان، بخش‌های مرکزی و جنوبی کویر لوت و سه حوضه جنوبی استان سیستان و بلوچستان مشاهده شد. این تفاوت می‌تواند ناشی از دقت مکانی داده‌ها و شاخص‌های متفاوت مورد استفاده برای شناسایی ویژگی‌های امواج گرما باشد.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه گرمایش تدریجی بر الگوهای تکرار، استمرار و شدت امواج گرما در ایران است و مناطق کلیدی نیازمند مداخله فوری را مشخص می‌کند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه پوشش زمین، تأثیر پوشش گیاهی و تغییرات دشت‌ها بر الگوهای موج گرما را بررسی کنند و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای کاهش ریسک‌های سلامت و سازگاری اکولوژیک توسعه دهند. محدودیت‌های مطالعه شامل حساسیت روش تابع چگالی احتمال به طول پنجره زمانی و احتمال وجود خطاهای بازتحلیل در مناطق توپوگرافی پیچیده یا نواحی ساحلی به دلیل آمیختگی خشکی - دریا در دقت مکانی است.

تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره ۴۰۳۶۰۳۵ انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر خود را از این صندوق اعلام نمایند.

منابع

- اسماعیلی، حسین؛ روشنی، احمد؛ پرک، فاطمه. (۱۳۹۷). تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی بر اساس شاخص‌های ترکیبی و امواج گرمایی در گستره حوضه‌های آبریز کشور. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲۱(۱)، ۹۷-۱۱۳. https://www.ims-jmas.net/article_105242.html
- اسمعیل‌نژاد، مرتضی؛ خسروی، محمود؛ علیجانی، بهلول؛ مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۳۹۲). شناسایی امواج گرمایی ایران. نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۱(۳۳)، صص: ۳۹-۵۴.
- علوی‌نیا، سیدحسن؛ زارعی، مهدی. (۱۴۰۱). واکاوی روند تغییرات فرین‌های دما تحت تأثیر سناریوهای آینده به‌منظور ارزیابی نوسانات اقلیمی (مطالعه‌ی موردی: ایستگاه‌های همدیدی سندج و سقز. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۱(۴۱)، ۱-۱۶. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161521.html
- بیجندی، مجید؛ دریاباری، سیدجمال‌الدین؛ رنجبر، عباس؛ اربابی‌سبزواری، آزاده. (۱۴۰۱). رخدادهای فرین امواج سرمایی و گرمایی مناطق شمال شرقی ایران طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۰۱. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۰)، صص: ۴۱-۶۰. https://clima.irimo.ir/article_156650.html
- درگاهیان، فاطمه؛ حیدرنژاد، سمیه؛ رضوی‌زاده، سمانه. (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات ویژگی‌های امواج گرمایی مرتبط با تغییر اقلیم مطالعه موردی: شهرستان یزد. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۸(۳)، صص: ۵۶۴-۵۷۷. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125020>
- دوستکامیان، مهدی؛ حقیقی، اسماعیل؛ بوربوری، رضا. (۱۳۹۶). واکاوی و شناسایی تغییرات مکانی پهنه‌های گرم و سرد دمایی ایران طی دوره‌های مختلف. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۶(۲)، صص: ۱۴۱-۱۶۲. <https://doi.org/10.22067/geo.v6i2.59678>
- جهانبخش، سعید؛ قویدل، فاطمه؛ اشجعی، محمد. (۲۰۱۵). شناسایی، طبقه‌بندی و تحلیل همدیدی امواج گرمایی به‌منظور کاهش مخاطرات انسانی در شمال غرب ایران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۴)، صص: ۳۷۷-۳۹۱. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.58265>

- قاسمی، فر.، الهام؛ ناصری پور، سمیه. (۱۳۹۶). تحلیل سینوپتیکی امواج گرما و سرما در سواحل جنوبی دریای خزر. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، ۲۶(۱۰۳)، صص: ۱۳۷-۱۴۶. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.28899>
- کرم پور، مصطفی؛ رفیعی، جعفر؛ جعفری، ایوب. (۲۰۱۷). شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران (ایلام، خوزستان، لرستان، کرمانشاه). مدیریت مخاطرات محیطی، ۴(۳)، صص: ۲۶۳-۲۷۹. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.246557.296>
- حمیدیان پور، محسن؛ نظری پور، حمید؛ خزاعی فیض آباد، الناز؛ فرزانه، مهسا؛ فیروزه، صدیقه. (۱۴۰۲). تعیین نقطه تغییر آستانه‌های دمایی امواج گرمایی و سرمایی در ایران زمین طی دوره آماری ۱۹۶۶-۲۰۱۸. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷)، صص: ۱۳۳-۱۵۰. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.44464.1940>
- رضایی، فرشته؛ احمدی، محمود؛ شکیب، علیرضا. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی آستانه دمایی موج گرما طی دوره گرم سال در ایران بر اساس سناریوهای RCP در بازه زمانی (۲۰۴۵-۲۰۱۶). پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰(۳)، صص: ۲۳۱-۲۴۱. <https://doi.org/10.52547/esrj.10.3.231>
- زرین، آذر؛ داداشی‌رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بر اساس رویکرد همادی چندمدلی CMIP6. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، صص: ۷۵-۹۰. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.308361.1007551>
- Abbasnia, M. (2019). Climatic characteristics of heat waves under climate change: a case study of mid-latitudes, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 637-656. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0052-4>
- Abbasnia, M., Tavousi, A., & Khosravi, M. (2016). Identification and analysis of heat waves in Iran during 1981-2010: Spatial and temporal variations. *Journal of Spatial Analysis & Environmental Hazards*, 13, 11-23.
- Ansari, A., Mahmoudi, P., & Nazaripour, H. (2024). Observed changes in the characteristics of heat waves in hot and dry regions of Iran. *Idojaras - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 128(4), 473-496.
- Barton, L., & Greig, D. (2019). Using dynamic heat thresholds to assess heatwave events in the context of climate change. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3c74>
- Barreca, A., Deschênes, O., Greenstone, M., & Shapiro, J. (2016). *The effect of absolute versus relative temperature on health and the environment: Evidence from Italy, 2001-2015*. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054001.
- Beyraghdar Kashkooli, O., Karimian, S., & Modarres, R. (2022). Spatiotemporal variability of the Persian Gulf and Oman Sea marine heatwaves during 1982-2020. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114174>
- Bonshoms, M., Ubeda, J., Liguori, G. et al. (2022). Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four Peruvian glaciers using on-glacier observations. *J. Mt. Sci.* 19, 1849-1873. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7388-4>
- Climate Central. (2024, August 7). Analysis: Climate change is increasing the danger of nighttime temperatures across the globe. Climate Central.
- De Polt, K., et al. (2023). Quantifying the impact of relevant heatwave durations. *Environmental Research Letters*, 18(10), 104005.
- Fallah Ghalhari, G., Farhang Dehghan, S., Akhlaghi Pirposhteh, E., & Asghari, M. (2021). Trend analysis and temporal and spatial distribution of wet bulb globe temperature as a heat stress index in Iran during the summer season over 30 years. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6(4), 1476-1493. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v6i4.8153>
- Fatahian, M., Hejazizadeh, Z., Karbalaee, A. R., Shahidinia, H., & Wang, J. (2025). Spatio Temporal Analysis of Changes in the Iranian Summer Subtropical High Pressure System from a Climate Change Perspective. *Atmosphere*, 16(3), 273. <https://doi.org/10.3390/atmos16030273>
- Gao, J., et al. (2015). Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: a multi-city study in China. *Science of the Total Environment*, 505, 535-544.
- Hanna, E. G., Kjellstrom, T., Bennett, C., & Dear, K. (2010). Climate Change and Rising Heat: Population Health Implications for Working People in Australia. *Asia Pacific Journal of Public Health*, 23(2_suppl), 14S-26S. <https://doi.org/10.1177/1010539510391457>
- Hirsch, A. L., et al. (2022). Changes in land-atmosphere coupling increase compound drought and heatwave risk. *Nature Communications*, 13, Article 2380. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-00325-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by C. B. Field et al., 52 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., and New York.
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using the excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073-2090.
- Joyce, P.W.S., Tong, C.B., Yip, Y.L. et al. Marine heatwaves as drivers of biological and ecological change: implications of current research patterns and future opportunities. *Mar Biol* 171, 20 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04340-y>
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121, 1265-1288.
- Kodra, E., & Ganguly, A. (2014). Asymmetry of projected increases in extreme temperature distributions. *Scientific Reports*, 4, 5884. <https://doi.org/10.1038/srep05884>
- Meehl, G. A., Tebaldi, C., Tilmes, S., Lamarque, J. -F., Bates, S., Pendergrass, A., & Lombardozzi, D. (2018). Future heat waves and surface ozone. *Environmental Research Letters*, 13(6), 64004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc4>

- Mojarrad, F., Masoompour, J., & Rostami, T. (2015). Statistical–Synoptic Analysis of Heat Waves above 40°C in the West of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13, 11–23.
- Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... Thépaut, J. N. (2021). ERA5 Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383.
- Müller, V., et al. (2024). Evening humid heat maxima near the southern Persian/Arabian Gulf. *Communications Earth & Environment*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Thermal Properties of Water and Coastal Temperature Moderation. NOAA JetStream.
- Nuttall, J. G., O’Leary, G. J., Khimashia, N., Asseng, S., Fitzgerald, G., & Norton, R. (2012). ‘Haying-off’ in wheat is predicted to increase under a future climate in south-eastern Australia. *Crop and Pasture Science*, 63(7), 593–605.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (Chapter on Coastal Climates). Routledge.
- Orlov, A., Sillmann, J., Aaheim, A., Aunan, K., & de Bruin, K. (2019). Economic Losses of Heat-Induced Reductions in Outdoor Worker Productivity: a Case Study of Europe. *Economics of Disasters and Climate Change*, 3(3), 191–211.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezzini, J. -L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165, 242–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517.
- Poulos, G., & Zhong, S. (2008). An Observational History of Small-Scale Katabatic Winds in Mid-Latitudes. *Geography Compass*, 2, 1798–1821. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00166.x>
- Raei, E., Nikoo, M., AghaKouchak, A., & GHWR. (2018). GHWR, a multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Scientific Data*, 5, 180206. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206>
- Ren, Y., Liu, J., Zhang, T., Shalamzari, M. J., Arshad, A., Liu, T., Willems, P., Gao, H., Tao, H., & Wang, T. (2023). Identification and Analysis of Heatwave Events Considering Temporal Continuity and Spatial Dynamics. *Remote Sensing*, 15(5), 1369. <https://doi.org/10.3390/rs15051369>
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., & Chérut, F. (2013). A review of the global impacts of extreme heat events and the implications for climate change adaptation. *Nature Climate Change*, 3(8), 559–563. <https://doi.org/10.1038/nclimate1857>
- Sharifi, M., & Ehteram, N. (2016). Spatial-temporal analysis of heat waves in Iran over the last three decades (1981–2010). *Natural Environment Change*, 2(1), 29–38.
- Smith, J., & Zhang, L. (2018). Analysis of temperature extremes using the probability density function (PDF) approach in climate studies. *Journal of Climate Research*, 34(2), 101–113. <https://doi.org/10.1002/jcr.2345>
- Stefanon, M., D’Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023>
- Sutanto, S.J., Zarzoza Mora, S.B., Supit, I. et al. Compound and cascading droughts and heatwaves decrease maize yields by nearly half in Sinaloa, Mexico. *npj Nat. Hazards* 1, 26 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00026-7>
- Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., & Anagnostopoulou, C. (2022). Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water*, 14(4), 543. <https://doi.org/10.3390/w14040543>
- Vogel, M. M., Zscheischler, J., Fischer, E. M., & Seneviratne, S. I. (2020). Development of Future Heatwaves for Different Hazard Thresholds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD032070. <https://doi.org/10.1029/2019JD032070>
- Wang, Y., & Liu, J. (2024). Impacts of Massive Topographies on Heat Waves in Global Drylands. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL109979.
- Wu, S., Luo, M., Zhao, R., et al. (2023). Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *npj Clim Atmos Sci*, 6, 36. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8>
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., et al. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan, Iran: insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15, 13626. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
- Zhai, J., Xue, X., Li, W., et al. (2024). Heatwave magnitude quantization and impact factors analysis over the Tibetan Plateau. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 85.
- Zhao, M., Lee, J. K. W., Kjellstrom, T., & Cai, W. (2021). Assessment of the economic impact of heat-related labor productivity loss: a systematic review. *Climatic Change*, 167(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03160-7>

Investigating the Relationship Between Debris Flow Risk and Spatial-Temporal Changes in Glaciers Using Remote Sensing (Case Study: Sioleh and Yakhar Glaciers of Damavand Peak)

Ali Mehrabi^{1*} 

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Email: Mehrabi@uk.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-7037>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 03 August 2025 Revised: 07 October 2025 Accepted: 29 October 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Glaciers, Debris Flow, Climate Change, Mass Balance, Damavand Peak.	The retreat of glaciers due to global warming reduces the volume of ice, which leads to many catastrophic glacier-related hazards, such as debris flows and floods. Infrastructure and local communities in the Damavand region are particularly exposed to glacier-related hazards. Climate change, glacial dynamics, and geomorphology regulate the nature and frequency of debris flows. To understand this concept, two glacial basins related to the Damavand peak, where debris flows and floods have occurred frequently, were selected. In this study, the relationship between climate change, glacial dynamics, and basin geomorphological characteristics with debris flows was investigated. In this regard, SL, HI, NDSI, and Mass Balance indices were used. According to the calculated geomorphological indices, the Yakhar glacier basin can be considered to be in the mature stage, and the Sioleh glacier basin to be in the transition to the late juvenile stage in terms of geomorphological evolution. Landsat satellite imagery processing over 30 years has shown that the glaciers have retreated at an average rate of 0.484 km²/year. Both glaciers have also experienced a negative mass balance of 0.03 (m w.e a⁻¹) on average. Climatic data indicate that a period of extreme temperature increase preceding the debris flows, followed by heavy rainfall, triggered several debris flows in Mordad 1401. Glacier stability, particularly at their termini, is highly sensitive to melting rates, precipitation, temperature fluctuations, and changes in mass balance.
How to Cite: Mehrabi, A. (2026). Investigating the Relationship Between Debris Flow Risk and Spatial-Temporal Changes in Glaciers Using Remote Sensing (Case Study: Sioleh and Yakhar Glaciers of Damavand Peak). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 203-226.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52829.2128	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Mountain environments are vulnerable to climate change, especially glaciers and permafrost in these areas is susceptible to degradation. Deglaciation and thinning of glaciers are closely related to climate change, which is closely related to several natural hazards, including landslides, floods, debris flows, moraine collapses, and slope failures. Recognizing the challenges posed by debris flows in mountainous environments; this study examines a series of debris flow events occurring in the Haraz catchment area of the Alborz Mountains. The main objective is to investigate how factors such as glacier retreat, ice volume reduction, geomorphology, and abrupt meteorological changes affect debris flow processes. By integrating meteorological data with observations of glacier dynamics and geomorphological environments, this study aims to identify the relationship between climatic factors and the frequency or intensity of debris flows. This research is particularly important for predicting future risks and informing mitigation strategies in mountain environments affected by climate change. The main objectives are: (1) to quantify glacier dynamics by analyzing changes in glacier area from satellite imagery, along with changes in surface elevation and glacier mass balance; (2) to analyze climate change trends using ERA5 data, focusing on daily precipitation and temperature changes and their effects on glacial debris flows from 1994 to 2014; and (3) to characterize geomorphic features and areas of origin and initiation of debris flows.

DATA AND METHODOLOGY

The Damavand glaciers are located in the central Alborz mountain range and are shown on a 1:50,000 scale topographic map. Damavand Peak, with an elevation of 5610 m, is located at the geographical coordinates of 52°E and 36°N in the Haraz basin (Figure 1). In recent decades, the study area has experienced numerous floods and debris flows, especially in the years 1368, 1369, 1386, 1397, 1401, 1402, and 1403. In the meantime, two important events occurred on 6 and 17 Mordad 1401, when the debris flows caused serious damage to residential areas in the Gaznak region and many villages downstream of the Sioleh and Yakhar glacial basins. To characterize the changes in the glacial area, Landsat satellite images (TM, ETM+, and OLI/TIRS) with a spatial resolution of 30 m and corresponding to the years 1373 to 1403 with minimal cloud cover ($\leq 5\%$) were used. The images were taken during the late summer melt seasons (July and August) and from the USGS Earth Explorer website (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). To calculate the height of the glaciers and the volume changes that occurred, the 30 m DEM obtained from the website (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) was used. Also, high-resolution Planet satellite images available at (<https://www.planet.com/products/satellite>) were used for temporal analysis of events before and after the debris flow.

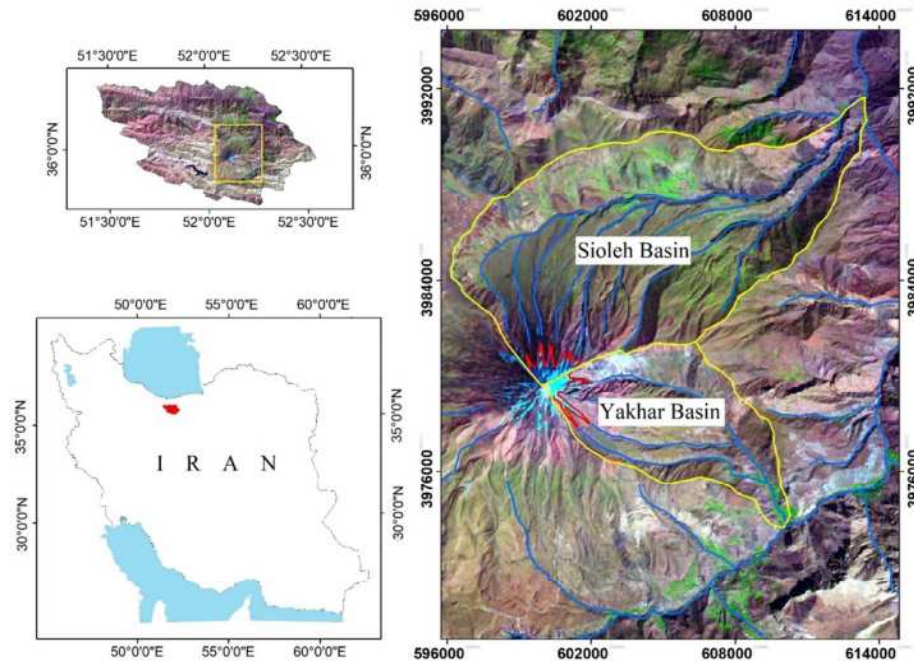


Figure 1: Map of driving factors on water use efficiency in the study area

RESULTS AND DISCUSSION

By examining Planet satellite images from before and after the debris flow event of August 1401, the source and area of the onset of glacier melting in the Yakhar and Sioleh basins were determined. In Figure 1, the general location of these areas is shown with an asterisk. As can be seen in this figure, these areas are located on the ends of the arms of these two glaciers. The slope of the land surface in the source areas is 43 degrees, and its altitude is 4350 meters. As can be seen in the images, as a result of glacier melting, cracks and fractures formed by glacial activity are exposed and provide debris-flow material for floods. These changes in surface properties, associated with glacier dynamic changes and high rates of glacier mass loss at the terminus, significantly affect glacier instability, leading to debris flows and floods. The parameters used to determine the source and initiation areas are summarized in Table 1.

Table 1: Details of parameters used to determine potential source areas and initiation areas of glacial debris flows in mountainous areas (Allen et al. 2008).

Debris flow in the Yakhar and Sioleh basins in August 1401	Glacier debris flows	Glacier lake overflow	Parameter
Water-filled crevices, cracks, and abundant, discontinuous glacial deposits	Debris accumulation in glaciers, non-consolidated materials	Lakes dammed by steep glaciers	Glacier surface features
A slope of 25 to 45 degrees is very favorable for the initiation of a debris flow.	Starting slope (25 to 38 degrees)	Excessive sediment absorption and concentration, 10-degree slope	Critical slope
The access angle is less than 10 degrees, and the exit distance is more than 10 km.	Up to 100 km	The flood can advance more than 200 kilometers and reach an angle of less than 3 degrees.	Maximum possible deviation

Based on the processing of satellite images over the Damavand glacier area, over a period of 30 years and over three 10-year periods, the area of the Sioleh and Yakhar glaciers has decreased from 3.4 km² in 1994 to 2.3 km² in 2004. The largest glacier retreat occurred between 1393 and 1403 with 67.7 percent, followed by 1373 and 1383 with 19.4 percent. The lowest retreat was observed between 1383 and 1393 with 37.3 percent. The total retreat rate for the entire study period was 14.51 percent. The average rate of retreat over these three periods was 0.484 km²/year. The glaciers in the study area experienced a constant negative mass balance from 1373 to 1403 with an average of -0.03 meters of water equivalent per year (m w.e a⁻¹). Significant changes in mass balance were observed at almost all elevations. Specifically, lower elevations experienced a larger negative mass balance (0.3 m water equivalent per year) than higher elevations (0.01 m water equivalent per year). That is, glaciers at lower elevations lost more mass, which can be attributed to higher temperatures, rapid melting, and reduced snow accumulation. However, glaciers in both basins experienced different negative mass balances that were influenced by elevation changes, bedrock characteristics, debris cover, and slope angle.

CONCLUSION

The present study demonstrates the interplay between glacier dynamic changes, geomorphology, precipitation, and temperature in guiding debris flows and floods in mountainous environments. The findings of the study showed that multiple debris flow events, accompanied by catastrophic floods in the Yakhar and Sioleh Damavand catchments, were caused by long-term changes in glacier dynamics accompanied by increased temperature and heavy precipitation. Based on this study, the following conclusion can be drawn. Over the past three decades, the aforementioned glaciers have continuously experienced negative mass balance, such that the glacial areas, especially in smaller glaciers that are more vulnerable and sensitive to climate change, have retreated significantly. Analysis of satellite images revealed significant temporal changes in glacier dynamics and their relationship with the debris flow events of Mordad 1401. Between 1393 and 1403, intensified glacial dynamics led to the exposure of the bedrock at the glacier's end, probably due to the loss of ice mass and its high melting rate. The glaciers had unstable surface features such as crevasses and cracks that may have weakened the glacier's end before it failed. The stability of glaciers, especially at the end, is very sensitive to melting rates, precipitation, temperature fluctuations, and mass balance changes. Continued retreat and loss of ice expose steep slopes and unconsolidated sediments, increasing the risk of slope failure leading to debris flows and flooding during sudden climate changes.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References [in Persian]

- Khodaeian, S., Ziaei, P., and Fakhari, S. (2010). The Geomorphology of Yakhar Glacier Using Remote Sensing Technology (Mount Damavand). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 19(74), 81-85. doi: [20.1001.1.25883860.1389.19.74.13.7](https://doi.org/10.1001.1.25883860.1389.19.74.13.7) [In Persian]
- Fakhari, S., Naderi, F., Zeyaeyan, P. (2011). Investigation of the range morphodynamic changes in the Damavand Yakhar glacier using RS and GIS. *Journal of Environmental Geology*, 17(5), 355-44. [In Persian]
- Ghorbani, A., Khosravi, A., Nourmohamadi, A. (2018). Investigating Quaternary Glacial Geomorphological Evidence at the Northeast Heights of Iran (Case Study: Binalud Mountain Ranges). *Quantitative Geomorphological Research*, 5(1), 1-13. doi: 20.1001.1.22519424.1395.5.1.1.1 [In Persian]
- Valadan Zouj, M. J., Rezaei, Y., Vaziri, F., Mobasheri, M. (2009). Investigation on Alam Chal Glacier Using Satellite Images. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(70), 2-13. doi: 10.22071/gsj.2009.57363 [In Persian]

References [in English]

- Ali, M., Liu, Q., Hassan, W. (2024). Two-decadal glacier changes in the Astak, a tributary catchment of the upper Indus River in northern Pakistan. *Remote Sensing*, 16(9), 1558. doi: 10.3390/rs16091558.
- Allen, S., Owens, I., Sirguey, P. (2008). Satellite remote sensing procedures for glacial terrain analyses and hazard assessment in the Aoraki Mount Cook region, New Zealand. *New Zealand J Geol Geophysics*, 51(1), 73–87. doi: 10.1080/00288300809509851.
- Bahuguna, I., Rathore, B.P., Jasrotia, A.S., (2021). Randhawa SS, Yadav SKS, Ali S, Gautam N, Poddar J, Srighyan M, Dhanade A, et al. 2021. Recent glacier area changes in the Himalaya–Karakoram and the impact of latitudinal variation. *Current Sci.*, 121(7), 929–940. doi: 10.18520/cs/v121/i7/929-940.
- Basnett, S., Kulkarni, A.V., Bolch, T. (2013). The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India. *J Glaciol*, 59(218), 1035–1046. doi: 10.3189/2013JoG12J184.
- Bazai, N.A., Cui, P., Carling, P.A., Wang, H., Hassan, J., Liu, D., Zhang, G., Jin, W. (2021). Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth Sci Rev.*, 212, 103432. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103432.
- Bisset, R. R., Nienow, P. W., Goldberg, D. N., Wigmore, O., Loayza-Muro, R. A., Wadham, J. L., Macdonald, M. L., Bingham, G. (2023). Using thermal UAV imagery to model distributed debris thicknesses and sub-debris melt rates on debris-covered glaciers. *J Glaciol*, 69(276), 981–996.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kaab, A., Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosciences*, 10(9), 668–673. doi: 10.1038/NGEO2999.
- Chen, X., Chen, J., Cui, P., You, Y., Hu, K., Yang, Z., Zhang, W., Li, X., Wu, Y. (2018). Assessment of prospective hazards resulting from the 2017 earthquake at the world heritage site Jiuzhaigou Valley, Sichuan, China. *J Mt Scienses*, 15(4), 779–792. doi: 10.1007/s11629-017-4785-1.
- Deng, M., Chen, N., Liu, M. (2017). Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 17(3), 345–356. doi: 10.5194/nhess-17-345-2017.
- Hassan, J., Chen, X., Muhammad, S., Bazai, N.A. (2021). Rock glacier inventory, permafrost probability distribution modeling, and associated hazards in the Hunza River Basin, Western Karakoram, Pakistan. *Sci Total Environment*, 782, 146833. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146833.
- Hassan, W., Su, F., Liu, W., Hassan, J., Hassan, M., Bazai, N.A., Wang, H., Yang, Z., Ali, M., Castellanos, D.G., (2023). Impact of glacier changes and permafrost distribution on debris flows in Badswat and Shishkat catchments, Northern Pakistan. *J Mt Scienses*, 20(12), 3687–3702. doi: 10.1007/s11629-023-7894-5.
- Huebl, J., Kaitna, R. (2021). Monitoring debris-flow surges and triggering rainfall at the Lattenbach Creek, Austria. *Environ Eng Geosciences*, 27(2), 213–220. doi: 10.2113/EEG-D-20-00010.
- Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf Processes Landform*, 37(1), 77–91. doi: 10.1002/esp.2223.
- Huss, M., Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Clim Change*, 8(2), 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x.
- Jiang, Y., Hu, X., Liang, H., Ning, P., Fan, X. (2023). A physically based model for the sequential evolution analysis of rainfall-induced shallow landslides in a catchment. *Water Resour Res.*, 59(5), e2022WR032716. Doi: 10.1029/2022WR032716.
- Kaab, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., Leinss, S., Girod, L., Huggel, C., Falaschi, D., Ugalde, F., Petrakov, D., Chernomorets, S. (2021). Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *The Cryosphere*, 15(4), 1751–1785. doi: 10.5194/tc-15-1751-2021.
- Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., Dokukin, M. (2021). Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 21(5), 1409–1429. doi: 10.5194/nhess-21-1409-2021.
- Pande, C., Moharir, K., Pande, R. (2021). Assessment of morphometric and hypsometric study for watershed development using spatial technology—a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *Int J River Basin Management*, 19(1), 43–53. doi: 10.1080/15715124.2018.1505737.
- Pandey, V.K., Kumar, R., Singh, R., Kumar, R., Rai, S.C., Singh, R.P., Tripathi, A.K., Soni, V.K., Ali, S.N., Tamang, D. (2022). Catastrophic ice-debris flow in the Rishiganga river, Chamoli, Uttarakhand (India). *Geomat Nat Hazards Risk*, 13(1), 289–309. doi: 10.1080/19475705.2021.2023661.
- Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 340, 116–128. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.04.029.
- Qiu, C., Su, L., Zou, Q., Geng, X. (2022). A hybrid machine-learning model to map glacier-related debris flow susceptibility along the Gyirong Zangbo watershed under the changing climate. *Sci Total Environment*, 818, 151752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151752.

Zhang, J., Liu, J., Li, Y., Wang, J., Chen, L., Gao, B. (2022). Effects of glacier and geomorphology on the mechanism difference of glacier-related debris flow on the South and North Banks of Parlung Zangbo River, Southeastern Tibetan Plateau. *Adv Civ Eng.*, 2022(1), 3510944. doi: 10.1155/2022/3510944.

Zhou, Y., Li, Z., Li, J.I.A. (2017). Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. *J Glaciol.*, 63(238), 331–342. doi: 10.1017/jog.2016.142.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

بررسی ارتباط خطر جریان‌های واریزه‌ای با تغییرات مکانی - زمانی یخچال‌ها، با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: یخچال‌های سیوله و یخار قله دماوند)

علی مهرابی^۱ 

۱. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Mehrabi@uk.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-7037>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: یخچال‌های طبیعی، جریان واریزه‌ای، تغییرات آب‌وهوایی، تعادل جرم، قله دماوند.	عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی ناشی از گرم شدن کره زمین، حجم یخ را کاهش می‌دهد که منجر به بسیاری از خطرات فاجعه‌بار مرتبط با یخچال‌ها، مانند جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. زیرساخت‌ها و جوامع در منطقه دماوند در معرض خطرات یخچال‌های طبیعی قرار دارند. تغییرات آب‌وهوا، دینامیک یخبندان و ژئومورفولوژی، ماهیت و فرکانس جریان واریزه‌ای را تنظیم می‌کنند. برای درک این مفهوم، دو حوضه یخچالی مربوط به قله دماوند که جریان واریزه‌ای و سیل مکرر در آن رخ داده است، انتخاب شد. در این مطالعه رابطه بین تغییرات آب‌وهوا، دینامیک یخبندان و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه، با جریان‌های واریزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از شاخص‌های HI، SL، NDSI و Mass Balance استفاده شد. با توجه به شاخص‌های ژئومورفولوژیکی محاسبه‌شده، می‌توان به لحاظ تکامل ژئومورفولوژیکی، حوضه یخچال یخار را در مرحله بلوغ و حوضه یخچال سیوله را در حال گذار به مرحله اواخر جوانی، در نظر گرفت. پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست، طی یک دوره ۳۰ ساله، نشان از پسروری یخچال‌های یادشده با نرخ متوسط ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال داشته است. همچنین، هر دو یخچال تعادل جرمی منفی با میانگین ۰/۰۳ متر معادل آب در سال را تجربه کرده‌اند. داده‌های آب‌وهوایی، افزایش دمای شدید هوا قبل از جریان‌های واریزه‌ای و به‌دنبال آن بارندگی‌های شدیدی را نشان دادند که باعث وقوع چندین جریان واریزه‌ای در مرداد ماه ۱۴۰۱ شد. پایداری یخچال‌های طبیعی، به‌ویژه در بخش‌های انتهایی آن، به سرعت ذوب، بارندگی، نوسانات دما و تغییرات تعادل جرم بسیار حساس است.
استناد: مهرابی، علی. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط خطر جریان‌های واریزه‌ای با تغییرات مکانی-زمانی یخچال‌ها، با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: یخچال‌های سیوله و یخار قله دماوند). <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۴۹)، ۲۰۳-۲۲۶	
© نویسنده/ نویسندگان DOI: 10.22111/jneh.2025.52829.2128	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	

مقدمه

محیط‌های کوهستانی در برابر تغییرات آب‌وهوایی آسیب‌پذیر هستند، به‌ویژه یخچال‌های طبیعی و یخ‌های دائمی در این مناطق به تخریب حساس هستند. یخ‌زدایی و نازک شدن یخچال‌های طبیعی با تغییرات اقلیمی مرتبط است و این امر باعث ایجاد مخاطرات طبیعی از جمله رانش زمین، سیلاب، جریان‌های واریزه‌ای، شکست سدهای یخرفتی و شکست شیب‌ها می‌شود. در این میان، جریان‌های واریزه‌ای ناشی از یخچال‌های طبیعی، پدیده‌ای مکرر و ویرانگر در مناطق کوهستانی هستند که باعث خسارت‌های اقتصادی شدید و تلفات انسانی شده و به‌طور قابل‌توجهی مانع توسعه اجتماعی و اقتصادی می‌شوند. در مناطق کوهستانی، جریان واریزه‌ای اغلب به مناطق مسکونی آسیب می‌رساند، شبکه‌های حمل و نقل را مختل می‌کند و رودخانه‌ها را مسدود می‌کند. جریان واریزه‌ای ناشی از یخچال به دلیل شکست شیب یخچال، ذوب شدن سریع یخ و برف و بارش شدید تحت تغییرات آب‌وهوا به تدریج در مناطق پیش یخبندان رخ می‌دهد (Deng et al. 2017; Bazai et al. 2021).

مطالعات متعددی بر روی یخچال‌های طبیعی انجام گرفته است، از جمله ولدان زوج و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یخچال طبیعی علم چال را مورد بررسی قرار دادند. ایشان پارامترهای هندسی یخچال نظیر وضعیت توپوگرافی کاسه یخ‌گیر، ارتفاع و تغییرات آن را طی یک دوره مطالعاتی مشخص کردند. قربانی شورستانی و همکاران (۱۳۹۷)، شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کواترنری در رشته‌کوه بینالود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش یادشده، وجود ۳۹ سیرک یخچالی را در نتیجه فعالیت یخچال‌های کواترنری نشان می‌دهد. علی و همکاران (۲۰۲۴)، تغییرات یخچال‌های طبیعی یکی از شاخه‌های رودخانه سند علیا در شمال پاکستان را طی دو دهه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تعادل جرم یخچال‌های یادشده را منفی برآورد کرده است. باهوگونا و همکاران (۲۰۲۱)، تغییرات مساحت یخچال‌های طبیعی هیمالیا را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد پایش قرار داده و کاهش ۱/۴ درصدی را طی ۱۷ سال برآورد کردند. بیست و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر حرارتی پهپاد ضخامت آواری ناشی از ذوب شدن یخچال‌های طبیعی را مدل‌سازی کردند. حسن و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر تغییرات یخچال‌های طبیعی و توزیع لایه‌های منجمد دائمی بر جریان‌های واریزه‌ای در حوضه‌های آبریز بدسوات و شیشکات، شمال پاکستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که منطقه منبع جریان واریزه در حوضه آبریز شیشکات در مجاورت یخچال سنگی با حرکت آهسته قرار دارد، درحالی‌که در حوضه آبریز بدسوات، جریان واریزه از یخرفت یخچالی سابق آغاز می‌شود. هر دو حوضه آبریز به شرایط آب‌وهوایی حساس هستند. بر روی یخچال‌های طبیعی قله دماوند مطالعات محدودی انجام گرفته است از جمله، خداییان و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی ژئومورفولوژی یخچال یخار دماوند، اشکال مورفولوژیکی مختلفی از جمله، سیرک یخچالی، زبانه یخچالی و شیارهای یخچالی را مورد شناسایی قرار دادند. فخاری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای بر روی یخچال طبیعی یخار، میزان تغییرات این یخچال را طی یک دوره ۱۲ ساله محاسبه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مساحت یخچال طی این دوره مطالعاتی کاهش یافته است.

یخچال‌های طبیعی جریان مورفولوژیکی مشخصی دارند. بنابراین، در پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی یخچال‌ها قلمرو خاصی را به خود اختصاص می‌دهند که در آنها فرایندهای رسوبی سبب تجمع و تغییر شکل یخ می‌شوند. یخچال را می‌توان نوعی سیستم رسوبی در نظر گرفت که در پاسخ به کاهش یا افزایش نیرو اجرا می‌شود و در آن ماده تجمع می‌یابد، حمل می‌شود و رسوب می‌کند. این ماده ممکن است به شکل برف، یخ یا مواد تخریبی باشد (خداییان و

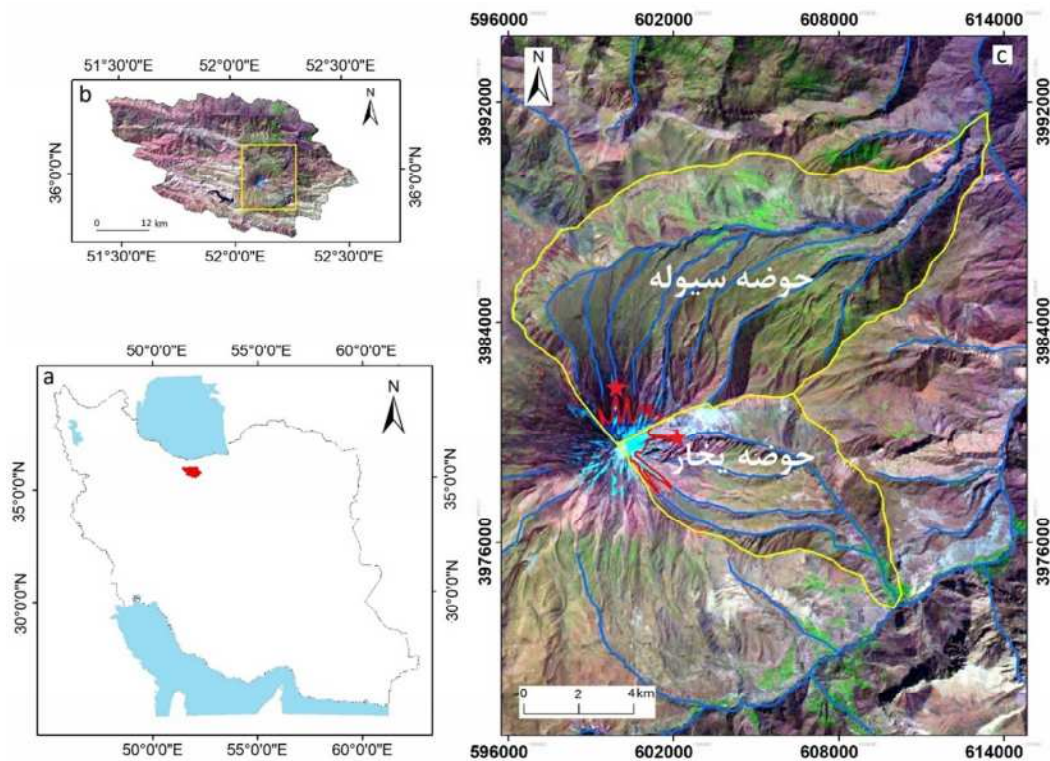
همکاران، ۱۳۸۹). جریان‌های واریزه‌ای اطراف یخچال‌های طبیعی می‌تواند با بارندگی، ذوب یخچال و طغیان دریاچه-های یخچالی ایجاد شود (Huebl and Kaitna 2021). باین‌حال، محرک‌های متعدد این رویداد، به ندرت مورد بحث قرار گرفته است؛ زیرا جریان‌های واریزه‌ای معمولاً توسط بارندگی ایجاد می‌شوند. درحالی‌که جریان واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی به در دسترس بودن رسوبات، وجود یخ‌های دائمی و تغییرات در شرایط یخبندان بستگی دارد. مستندات دقیق و کمی از جریان واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی کمیاب است. علاوه بر این، هنگام مطالعه عوامل محرک جریان‌های واریزه‌ای مرتبط با یخچال، دما و بارندگی معمولاً بدون فاکتور تغییرات یخچال در نظر گرفته می‌شوند (Kääb et al. 2021; Qiu et al. 2022). مکانیسم شروع جریان‌های واریزه‌ای یخچال‌های طبیعی با در نظر گرفتن عوامل اضافی مانند آب ذوب‌شده، دینامیک یخچال‌های طبیعی و سایر اثرات ناشی از افزایش دمای هوا، در مقایسه با جریان‌های واریزه‌ای که تنها توسط بارندگی ایجاد می‌شوند، پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند. شبیه‌سازی مکانیسم شروع جریان‌های واریزه‌ای مرتبط با یخچال‌های طبیعی، به دلیل محدودیت‌های مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های ریاضی چالش‌برانگیز است. بنابراین، تمرکز بر مطالعات موردی جریان‌های واریزه‌ای طبیعی در مناطق کوهستانی برای بهبود درک و آگاهی‌بخشی در تلاش‌های کاهش و پیشگیری ضروری است. این مطالعه با اذعان به چالش‌های ناشی از جریان‌های واریزه‌ای در محیط‌های کوهستانی، مجموعه‌ای از رویدادهای جریان واریزه‌ای که در حوضه آبریز هراز در رشته کوه البرز رخ می‌دهد را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف اصلی بررسی چگونگی تأثیر عواملی مانند عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی، کاهش حجم یخ، ژئومورفولوژی و تغییرات ناگهانی هواشناسی بر فرآیندهای جریان واریزه‌ای است. با وجود مطالعات متعدد، بررسی سیستماتیک نقش تغییرات اقلیمی در افزایش جریان‌های واریزه‌ای ناشی از یخچال‌ها در منطقه رشته کوه البرز همچنان محدود است. این پژوهش با ادغام داده‌های هواشناسی با مشاهدات دینامیک یخچال‌های طبیعی و محیط‌های ژئومورفولوژیکی، قصد دارد رابطه بین عوامل اقلیمی و فراوانی یا شدت جریان‌های واریزه‌ای را شناسایی کند. این پژوهش به‌ویژه برای پیش‌بینی خطرات آینده و اطلاع‌رسانی در مورد استراتژی‌های کاهش اثرات در محیط‌های کوهستانی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، اهمیت دارد. اهداف اصلی عبارتند از: (۱) تعیین کمیت دینامیک یخچال‌های طبیعی با تجزیه و تحلیل تغییرات مساحت یخچال از طریق تصاویر ماهواره‌ای همراه با تغییرات ارتفاع سطح و تعادل جرم یخچال‌های طبیعی، (۲) تجزیه و تحلیل روند تغییرات اقلیمی با استفاده از داده‌های ERA5 با تمرکز بر تغییرات روزانه بارش و دما و تأثیرات آنها بر جریان‌های واریزه‌ای یخچالی از ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳، (۳) ویژگی‌های ژئومورفیک و مناطق منشأ و شروع جریان‌های واریزه‌ای مورد توصیف قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

یخچال‌های کوه دماوند در بخش مرکزی رشته کوه البرز و در محدوده نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ واقع شده‌اند. قله دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ متر (دماوند/ <https://fa.wikipedia.org/wiki/>) در مختصات جغرافیایی ۵۲° طول شرقی و ۳۶° عرض شمالی، در حوضه آبریز هراز قرار دارد (شکل ۱). این قله که جوان‌ترین آتشفشان نیمه‌فعال ایران محسوب می‌شود، بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و... ساخته شده است. شواهد فعالیت‌های آتشفشانی کوتاه‌تری شامل گدازه‌ها، چشمه‌های آب گرم در اطراف قله قابل مشاهده هستند. رشته کوه البرز بخشی از کمربند

کوهزایی آلپ - هیمالیا است که با روند چین خوردگی شرقی - غربی و تحت فشارهای زمین‌ساختی ناشی از همگرایی صفحه عربی و صفحه اوراسیا شکل گرفته است. منطقه مورد مطالعه در ناحیه‌ای فعال از نظر زمین‌ساختی قرار دارد که ویژگی‌هایی چون دره‌های عمیق، شکستگی‌های فراوان و نرخ بالای فرسایش را نشان می‌دهد. این شرایط زمین‌ساختی، همراه با اقلیم سرد کوهستانی، منجر به توسعه فرایندهای ژئومورفولوژیک پیچیده شامل لندفرم‌های یخچالی (سیرک‌ها، زبانه‌های یخچالی، مورن‌ها) و لندفرم‌های رودخانه‌ای (آبرفت‌ها، تراس‌ها) شده است (خدایان و همکاران، ۱۳۸۹). در بخش‌های مرتفع، یخچال‌های سیوله (در شمال شرقی) و یخار (در جنوب شرقی) از مهم‌ترین یخچال‌های فعال دماوند هستند که منشأ اصلی جریان‌های واریزه‌ای و سیلاب‌های یخچالی در منطقه به‌شمار می‌روند. به‌دلیل نرخ بالای ذوب برف و یخ در تابستان و وجود نهشته‌های آواری ناپایدار، این نواحی مستعد رخداد جریان‌های واریزه‌ای، لغزش‌های دامنه‌ای و شکست سدهای مورینی هستند. از نظر زمین‌شناسی مهندسی، رخدادهای اخیر شامل سیلاب‌ها و جریان‌های واریزه‌ای طی سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۶۹، ۱۳۸۶، ۱۳۹۷، ۱۴۰۱، ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به‌ویژه در حوضه‌های یخچالی سیوله و یخار (<https://www.tabnak.ir/fa/news/1136195>)، نشان‌دهنده ناپایداری بالای ژئومورفولوژیکی منطقه است. دو رخداد مهم در ۶ و ۱۷ مرداد ۱۴۰۱، منجر به تخریب قابل‌توجه در سکونتگاه‌های گزنک و روستاهای پایین‌دست شد (شکل ۲).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: عکس‌های میدانی از جریان‌های واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۱ از منطقه گزنک دماوند

داده‌ها

برای مشخص کردن تغییرات منطقه یخچالی، از تصاویر ماهواره‌ای لندست (TM، ETM+، و OLI/TIRS) با وضوح مکانی ۳۰ متر و مربوط به سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ استفاده شد. از آنجایی که وجود ابر و سایه باعث کاهش کیفیت شاخص‌های طیفی، پوشاندن یخچال، کاهش بازتاب و ابهام در مرز یخچال می‌شود، تصاویر با حداقل پوشش ابر ($\geq 5\%$) به کار گرفته شد. تصاویر در اواخر فصول ذوب تابستان (تیر و مرداد) و از وب سایت (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) گرفته شده است و تصحیحات اتمسفری و هندسی لازم بر روی این تصاویر انجام گرفت. برای محاسبه ارتفاع یخچال‌ها و تغییرات حجم رخ داده از ASTER DEM با تفکیک مکانی ۳۰ متر به دست آمده از وب سایت (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) استفاده شد. همچنین، از تصاویر ماهواره-ای Planet با وضوح بالا موجود در (<https://www.planet.com/products/satellite>) برای تجزیه و تحلیل زمانی رویدادهای قبل و بعد از جریان واریزه‌ای استفاده شد. به دلیل وضوح متفاوت تصاویر Planet با تصاویر لندست عملیات هم‌رزلوشن‌سازی انجام پذیرفت. پیش‌پردازش تصاویر Planet شامل تصحیحات، هندسی، رادیومتریک، اتمسفری و عملیات ماسک‌سازی است. به لحاظ هندسی، تصاویر Planet به صورت Ortho Tile ارائه می‌شوند؛ ولی اگر به صورت سین‌های خام باشند، باید عملیات Ortho-rectification بر روی آن‌ها انجام پذیرد. به لحاظ رادیومتریک، مقادیر DN به TOA Reflectance (بازتاب در بالای جو) تبدیل شد و از نظر تصحیحات اتمسفری، عملیات حذف اثر جو (رطوبت، غبار، ذرات) با استفاده از الگوریتم SMAC انجام پذیرفت. در نهایت، با استفاده از الگوریتم CloudMask اثر ابر و سایه از روی تصاویر حذف شد.

برای بررسی داده‌های آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه از داده‌های پلت‌فرم آب‌وهوایی ERA5 استفاده شد. داده‌های ERA5 در واقع یک آرشیو جهانی از شرایط جوی و اقلیمی گذشته تا امروز هستند که برای پژوهش در زمینه‌های هواشناسی، اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و حتی زمین‌شناسی (مثلاً یخچال‌ها و تعادل جرم) کاربرد زیادی دارند. این داده‌ها یک مجموعه داده‌ی بازتحلیل (Reanalysis) هستند که توسط مرکز ECMWF^۱ تولید می‌شوند. از سال ۱۹۴۰ تا امروز را پوشش می‌دهد. از نظر وضوح مکانی از سلول‌های با دقت حدودی ۱ کیلومتر شکل گرفته است. شامل مجموعه‌ای از داده‌ها نظیر دما، فشار، رطوبت، بارش، پوشش برف، تبخیر و تعرق، باد در سطوح مختلف جو (۱۰ متری، ۱۰۰ متری، لایه‌های فشار مختلف)، تابش خورشیدی و شارهای انرژی سطح زمین و پارامترهای اقیانوسی (دما سطح دریا و ...) می‌شود. داده‌های ERA5 اغلب به صورت ساعتی یا ۳ ساعتی در دسترس هستند؛ اما خیلی وقت‌ها ما می‌خواهیم نمای خلاصه‌تر مثل میانگین روزانه، ماهانه یا سالانه داشته باشیم. نحوه میانگین‌گیری این داده‌ها بر اساس سه میانگین زمانی، مکانی و وزنی انجام می‌پذیرد. همچنین به منظور صحت-سنجی، داده‌های یادشده به صورت دوره‌ای با مشاهدات ایستگاهی و داده‌های MERRA-2 مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این پژوهش داده‌های دما و بارش روزانه و سالانه، از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ در اختیار قرار گرفت.

تعیین ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی

وقوع جریان‌های واریزه‌ای، ارتباط نزدیکی با مرحله تکاملی ژئومورفولوژیک حوضه دارد (می و لیزل استناد ۲۰۱۲). برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با فعالیت جریان واریزه‌ای، از شاخص‌های (HI)^۲ و (SL)^۳ استفاده شد. شاخص HI به طور گسترده‌ای برای ارزیابی مراحل توسعه یک ساختار ژئومورفولوژیکی استفاده می‌شود؛ درحالی‌که شاخص SL برای شناسایی تغییرات شیب و نقاط بالقوه که نشان‌دهنده ناپایداری ژئومورفیک هستند، مفید است. شاخص SL با استفاده از معادله شماره ۱ محاسبه شد. (Zhang et al. 2022).

$$SL = \frac{W}{L} \quad (1)$$

که در آن W نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع و L نشان‌دهنده طول هر حوضه است. این شاخص رابطه بین شیب رودخانه و طول جریان رودخانه را در یک بازه مشخص اندازه‌گیری می‌کند و تغییرات شیب در طول مسیر رودخانه را نشان می‌دهد. از این شاخص، در راستای بررسی توان جریان رودخانه و میزان فرسایش استفاده می‌شود. مقادیر بالا در شاخص SL نشان‌دهنده افزایش شیب و توان بالای جریان و یا احتمال وجود موانع در مسیر رودخانه است که معمولاً با گسل‌ها، شکستگی‌ها، یا تغییرات سنگ‌شناسی مرتبط است. این شرایط می‌تواند باعث افزایش پتانسیل حمل رسوبات درشت دانه و در نتیجه ایجاد یا تقویت جریان‌های رودخانه‌ای شود. مقادیر پایین نشان‌دهنده مناطق هموارتر و بدون تغییرات ناگهانی شیب و نواحی فرسایشی آرام است.

شاخص HI نشان‌دهنده تکامل متوالی شکل‌های ژئومورفولوژی است و برای طبقه‌بندی مراحل توسعه حوزه آبخیز استفاده می‌شود. این شاخص، بینش‌هایی را در مورد وضعیت فرسایش حوضه، اثربخشی فعالیت‌های حفاظتی هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (Pande et al. 2021). این شاخص نشان‌دهنده چگونگی توزیع ارتفاعات در یک حوزه یا

1 - European Centre for Medium Range Weather Forecasts

2 - Hypsometric Integral

3 - Stream Length-Gradient Index

سطح زمین است. به بیان ساده، این شاخص می‌گوید که چقدر از حجم منطقه بالاتر از یک ارتفاع معین قرار دارد. مقدار این شاخص هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، منطقه از شیب تندتر و حوضه مربوطه جوان‌تر محسوب می‌شود و هر چه به عدد صفر نزدیک شود، توپوگرافی هموارتر و حوضه فرسایش یافته‌تر و پیرتر است. مقدار این شاخص اگر بین ۰/۶ تا ۱ باشد حوضه جوان، بین ۰/۴ تا ۰/۶ حوضه بالغ و بین ۰ تا ۰/۴ حوضه پیر محسوب می‌شود (Pande et al. 2021).

شاخص HI با استفاده از معادله شماره ۲ محاسبه شد. (Zhang et al. 2022).

$$E = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} = HI \quad (2)$$

در اینجا، H_{mean} ، H_{max} و H_{min} به ترتیب متوسط میانگین، بالاترین و کمترین ارتفاع را در یک حوضه نشان می‌دهند. این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و SRTM DEM با وضوح ۳۰ متر محاسبه شدند. ویژگی‌های هندسی هر دو حوضه در جدول شماره ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های هندسی حوضه‌های آبخیز در منطقه مورد مطالعه

شماره	نام حوضه	مساحت حوضه (km ²)	مساحت یخچال (km ²)		طول کانال (km)	رکورد جریان آواری	ارتفاع (m)	
			۱۳۷۳	۱۴۰۳			دامنه	قله
۱	سیوله	۱۱۲/۳	۱/۹۲	۱/۶۴	۱۳/۲	۴	۱۲۰۰	۵۶۱۰
۲	یخار	۴۲/۳	۱/۱۸	۱/۰۱	۸/۴	۳	۱۶۰۰	۵۶۱۰

تخمین تغییر مساحت یخچال‌های طبیعی

برای جدایش پوشش برف و یخچال، از الگوریتم شاخص NDSI که در زیر آمده است، استفاده شد.

$$NDSI = \frac{(TM2 - TM5)}{(TM2 + TM5)} \quad (3)$$

در اینجا، TM2 نشان‌دهنده بازتاب در باند ۲ و TM5 نشان‌دهنده بازتاب در باند ۵ برای لندست ۴، ۵ و ۷ است. برای لندست ۸، از باند ۳ و ۶ به دلیل شباهت‌های آنها در خواص طیفی استفاده شد. با توجه به مطالعات گذشته و آزمایش‌های مکرر، مقدار آستانه (≤ 0.43) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای اطمینان از نتایج، مرزهای یخچالی هر حوضه از فهرست یخچال راندولف (RGI) V7.0 نیز استخراج و مقایسه شد. در نتیجه این مقایسه، دقت ۸۷ درصد و خطا ۱۲ درصد به دست آمد.

برآورد ارتفاع سطح یخچال و تغییرات تعادل جرم

برای تخمین تغییرات ارتفاعی سطح یخچال‌ها، از روش ژئودتیک که به‌طور گسترده در تعیین تعادل جرم یخچال‌ها به کار می‌رود، استفاده شد (Zhou et al. 2017). برای این منظور، مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری استر با دقت ارتفاعی ± 16 متر به کار گرفته شد.

تبادل جرم یخچال طبیعی به تفاوت بین جرم افزوده (مثلاً از طریق بارش برف) و جرم ازدست‌رفته (به‌عنوان مثال از طریق ذوب) یک یخچال طبیعی در یک دوره زمانی خاص اشاره دارد. اگر جرم افزوده بیشتر از جرم ازدست‌رفته باشد، تبادل جرم مثبت است و یخچال طبیعی بزرگ می‌شود. برعکس، اگر جرم ازدست‌رفته بیشتر از جرم افزوده باشد، تبادل جرم منفی است و یخچال طبیعی کوچک می‌شود. به عبارت ساده، تبادل جرم یخچال طبیعی تعیین می‌کند که یخچال طبیعی در حال رشد است، ثابت است یا در حال عقب‌نشینی است. برای محاسبه تبادل جرمی یخچال‌ها از فرمول زیر استفاده شد (Huss and Hock 2018):

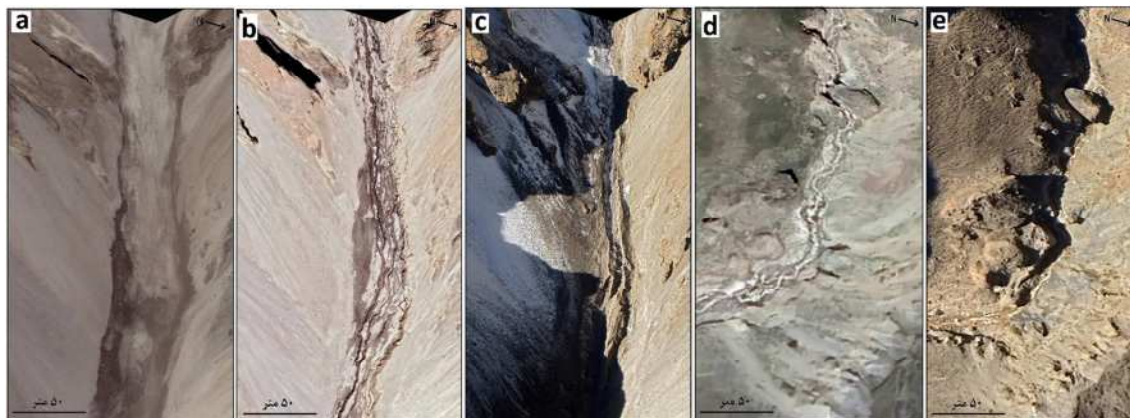
$$\text{Mass Balance (MB)} = \rho \times \Delta h / \Delta t \times A \quad (4)$$

که در آن MB بر حسب متر معادل آب در سال (m w.e a-1)، ρ چگالی یخ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، Δh تغییر ارتفاع سطح یخچال بر حسب متر، Δt فاصله زمانی بر حسب سال و A مساحت یخچال بر حسب متر مربع است. مراحل استخراج تبادل جرم از روی DEM، به این صورت است که ابتدا DEM‌های مربوط به دوره مورد مطالعه به لحاظ هم‌اندازه، هم‌رزولوشن و هم‌مرجع فضایی بودن آماده‌سازی شده، سپس با انجام عملیات DEM differencing لایه تغییرات ارتفاع (Δh) محاسبه می‌شود. بعد از آن، با قرار دادن آن در فرمول Mass Balance، لایه تبادل جرم دوره مورد مطالعه تهیه می‌شود. همه اندازه‌گیری‌ها به‌صورت پیکسلی انجام گرفته است.

نتایج

خصوصیت‌های منبع و منطقه شروع ذوب یخچالی

از طریق بررسی تصاویر ماهواره‌ای، Planet مربوط به زمان‌های قبل و بعد از رویداد جریان‌های واریزه‌ای مردادماه ۱۴۰۱، منبع و منطقه شروع ذوب یخچال‌ها در حوضه‌های یخار و سیوله مشخص شد. در شکل شماره ۱، موقعیت کلی این مناطق با علامت ستاره نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این مناطق بر روی انتهای بازوهای این دو یخچال قرار دارند. شکل شماره ۳ نمای بهتری از این مناطق را به تصویر کشیده است. در شکل شماره ۳، تصاویر a، b و c مربوط به یخچال یخار و تصاویر d و e مربوط به یخچال سیوله است. تصاویر a، b و d مربوط به قبل از رخداد جریان‌های واریزه‌ای و تصاویر c، e مربوط به بعد از آن است. شیب سطح زمین در مناطق منبع، ۴۳ درجه و ارتفاع آن ۴۳۵۰ متری است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در نتیجه ذوب‌شدن یخچال، شکاف‌ها و شکستگی‌های شکل‌گرفته در اثر فعالیت یخچالی، رخنمون پیدا کرده و تامین‌کننده مواد واریزه‌ای سیلاب‌ها می‌شود. این تغییرات ویژگی‌های سطحی، مرتبط با تغییرات دینامیکی یخچال‌ها و نرخ بالای از دست دادن توده یخچال‌ها در پایانه، به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌ها تأثیر می‌گذارد که منجر به جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. پارامترهای کلی مورد استفاده برای تعیین مناطق منبع و شروع در جدول ۲ خلاصه شده است. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش، در ستون سوم (جریان واریزه‌ای در حوضه‌های یخار و سیوله در مرداد ۱۴۰۱) لیست شده است. مناطق فعال در تغذیه مواد واریزه‌ای در هر کدام از یخچال‌ها، مساحتی در حدود ۱۰ هکتار را شامل می‌شود.



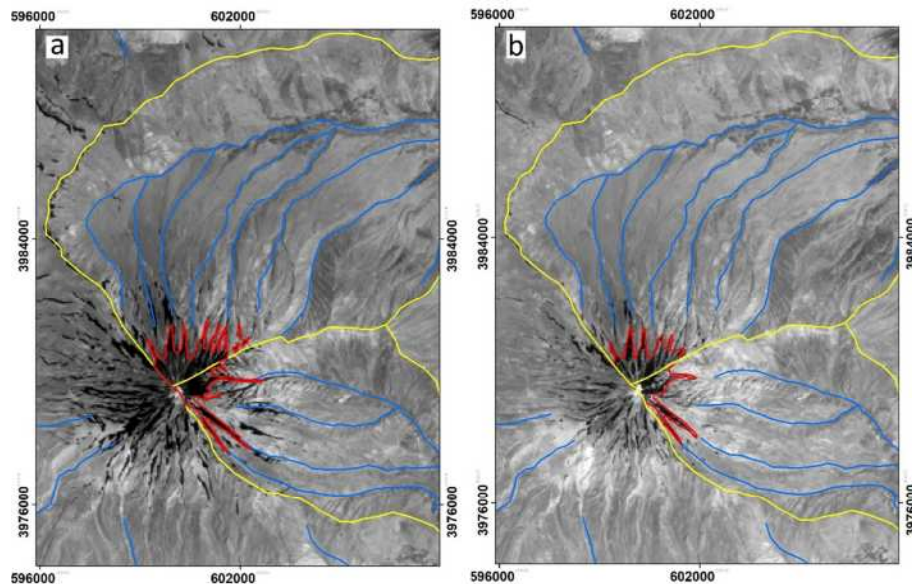
شکل ۳: سری زمانی تصاویر Planet که منبع و منطقه شروع را در حوضه یخار و سیوله قبل و بعد از رویدادهای جریان واریزه‌ای را نشان می‌دهد، (a و d) نشانگر بازوهای یخچالی، (b) نشان‌دهنده گسترش شکاف‌های پر از آب در سطح یخچال است. (c و e) از بین رفتن یخچال طبیعی و ویژگی‌های سطح بی‌ثبات را نشان می‌دهد.

جدول ۲: جزئیات پارامترهای مورد استفاده برای تعیین مناطق منبع بالقوه و مناطق شروع جریان‌های واریزه‌ای یخچالی در مناطق کوهستانی (Allen et al. 2008).

پارامتر	طغیان دریاچه یخچال‌های طبیعی	جریان‌های واریزه‌ای یخچال‌های طبیعی	جریان واریزه‌ای در حوضه‌های یخار و سیوله در مرداد ۱۴۰۱
ویژگی‌های سطح یخچال‌های طبیعی	دریاچه‌های سد شده توسط یخرفت‌های شیب‌دار	تجمع آوار در یخچال طبیعی، مواد غیر یکپارچه	شکاف‌های پر از آب، ترک‌ها و رسوبات یخچالی فراوان و غیر یکپارچه
شیب بحرانی	جذب و غلظت بیش از حد رسوب، شیب ۱۰ درجه	شیب شروع (۲۵ تا ۳۸ درجه)	شیب ۲۵ تا ۴۵ درجه برای شروع جریان واریزه بسیار مطلوب است
حداکثر انحراف احتمالی	سیلاب می‌تواند تا بیش از ۲۰۰ کیلومتر پیشروی کند و به زاویه کمتر از ۳ درجه برسد،	تا ۱۰۰ کیلومتر	زاویه دسترسی کمتر از ۱۰ درجه و مسافت خروج بیش از ۱۰ کیلومتر است

تغییر مساحت یخچال‌ها

بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست (Landsat TM/ETM+/OLI) بر روی محدوده یخچالی دماوند، در طول ۳۰ سال و طی سه دوره ۱۰ ساله، مساحت یخچال‌های سیوله و یخار از ۴/۳ کیلومتر مربع در سال ۱۳۷۳ به ۳/۲ کیلومتر مربع در سال ۱۴۰۳ تقلیل یافته است. شکل شماره ۴ عقب‌نشینی یخچال‌های یادشده را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ با نرخ‌های متغیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول شماره ۳ آمده است، در دوره‌های ۱۳۷۳-۱۳۸۳، ۱۳۸۳-۱۳۹۳ و ۱۳۹۳-۱۴۰۳، میزان عقب‌نشینی یخچال‌ها در کل منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۱۰، ۰/۱۳ و ۰/۲۲ کیلومتر مربع در هر دهه بود. بزرگ‌ترین میزان عقب‌نشینی یخچال‌ها، بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ با ۷/۶۷ درصد و پس از آن بین سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۳ با ۴/۱۹ درصد رخ داده است. کمترین میزان عقب‌نشینی بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ با ۳/۳۷ درصد مشاهده شد. مجموع میزان عقب‌نشینی برای کل دوره مورد مطالعه ۱۴/۵۱ درصد بود. متوسط نرخ کاهش طی این سه دوره ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال بوده است.



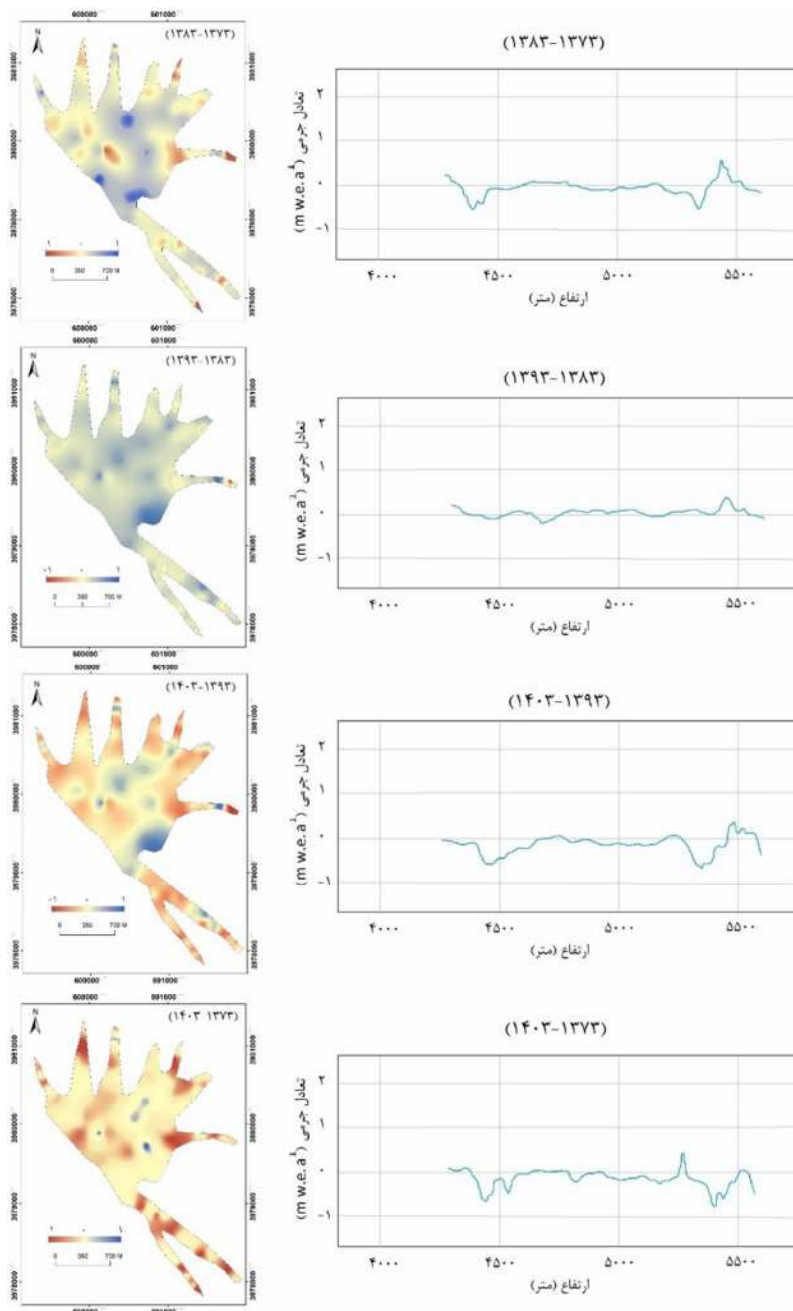
شکل ۴: تغییر وسعت یخچال‌ها طی ۳۰ سال، (a) محدوده یخچال در سال ۱۳۷۳ و (b) محدوده یخچال در سال ۱۴۰۳

جدول ۳: میزان تغییرات یخچال‌های سیوله و بخار

سال	دوره	مساحت یخچال‌ها (km ²)	میزان تغییر (km ²)	درصد تغییر (%)	متوسط نرخ تغییر (Km ² a ⁻¹)
۱۳۷۳		۳/۱۰	۰	۰	۰
۱۳۸۳	۱۳۸۳-۱۳۷۳	۲/۹۷	-۰/۱۳	۴/۱۹	-۰/۴۱۹
۱۳۹۳	۱۳۹۳-۱۳۸۳	۲/۸۷	-۰/۱۰	۳/۳۷	-۰/۳۳۷
۱۴۰۳	۱۴۰۳-۱۳۹۳	۲/۶۵	-۰/۲۲	۷/۶۷	-۰/۷۶۷
مجموع	۱۴۰۳-۱۳۷۳	(۳/۱۰ - ۲/۶۵)	-۰/۴۵	۱۴/۵۱	-۰/۴۸۴

تخمین تعادل جرم یخچال‌ها

یخچال‌ها در منطقه مورد مطالعه، تعادل جرم منفی ثابتی را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ با میانگین $-۰/۰۳$ متر معادل آب در سال ($m \ w.e \ a^{-1}$) تجربه کرده‌اند. مقدار عدم قطعیت در تمام اندازه‌گیری‌های $\pm ۰/۰۲$ به‌دست آمد. تعادل جرم یخچال و تغییرات ارتفاع در سراسر منطقه مورد مطالعه در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. تقریباً در همه ارتفاعات، تغییرات قابل‌توجه در تعادل جرم مشاهده شد. به‌طور خاص، ارتفاعات پایین‌تر تعادل جرم منفی بیشتری ($۰/۳$ متر معادل آب در سال) نسبت به ارتفاعات بالاتر ($۰/۱$ متر معادل آب در سال) تجربه کردند. یعنی یخچال در ارتفاع پایین‌تر جرم بیشتری را از دست می‌دهد که می‌تواند به دمای بالاتر، ذوب سریع و کاهش تجمع برف نسبت داده شود. باین‌حال، یخچال‌های هر دو حوضه، توازن جرم منفی متفاوتی را تجربه کردند که تحت تاثیر تغییرات ارتفاعی، ویژگی‌های سنگ بستر، پوشش واریزه‌ای و زاویه شیب قرار دارد. یخچال‌ها در ارتفاع ۵۴۰۰ متری، تعادل جرم مثبت کمی را تجربه کرده‌اند که این ممکن است به افزایش تجمع برف در زمستان و زاویه شیب ملایم نسبت داده شود.



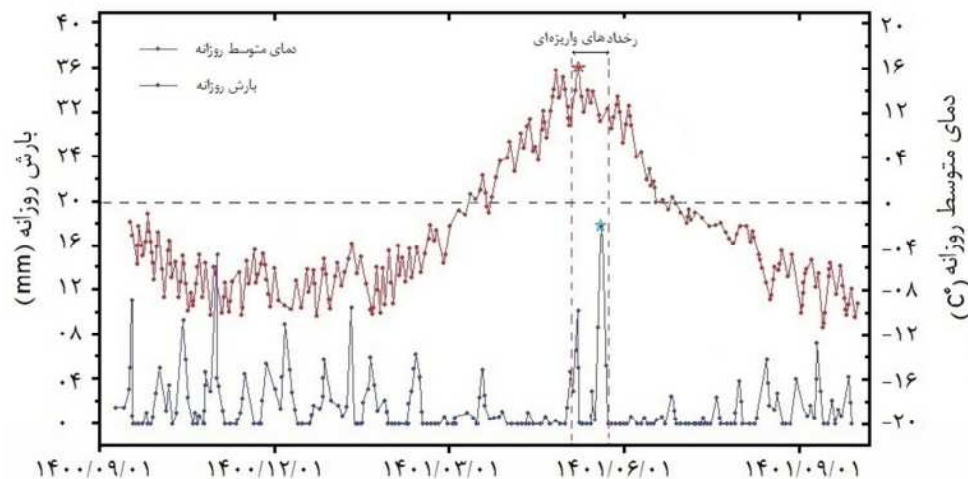
شکل ۵: کمی سازی تعادل جرم یخچال‌ها در محدوده مورد مطالعه، ستون سمت چپ توزیع فضایی وسعت یخچال و تغییرات تعادل توده یخچال را نشان می‌دهد. ستون سمت راست شامل نمودارهایی است تغییرات تعادل توده یخچال‌ها را با ارتفاع در بازه زمانی مشخص شده بین سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۴۰۳ نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل شماره ۵ مشخص است، از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳، یخچال‌ها تغییرات جزئی توازن جرم با نرخ -0.1 متر معادل آب در سال را تجربه کردند. طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ تعادل جرمی منفی‌تری با نرخ -0.1 متر معادل آب در سال رخ داده است که احتمالاً به تجمع کم بارش برف و افزایش دمای سالانه هوا نسبت داده شود. هر دو یخچال تغییرات ارتفاعی و تعادل جرمی قابل‌توجهی را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ تجربه کردند. احتمالاً می‌توان این موضوع را به اندازه

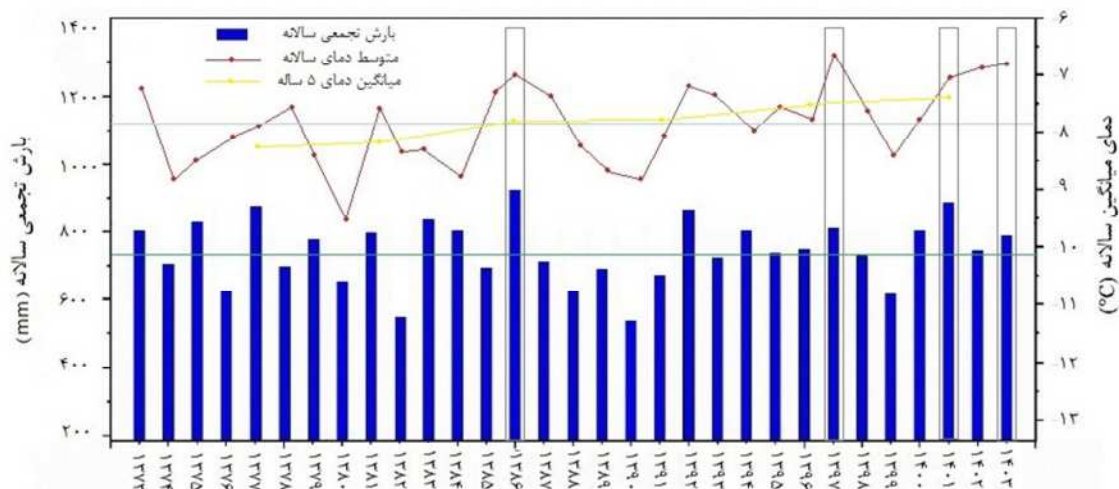
نسبتاً کوچک‌تر این یخچال‌ها نسبت داد؛ زیرا مطالعات دیگر نشان داده‌اند که یخچال‌های کوچک‌تر در حال کوچک شدن هستند و در مقایسه با یخچال‌های بزرگ‌تر کاهش جرم بیشتری را تجربه می‌کنند (Basnett et al. 2013; Brun et al. 2017; Hassan et al. 2021). در نتیجه، می‌توان استدلال کرد که نرخ بالاتر از دست دادن توده یخچال‌ها در منطقه انتهایی، احتمالاً با رخنمون یافتن شیب‌های تند و رسوبات سست و افزایش ناپایداری یخچال‌ها و تغییر در رژیم حرارتی زیرسطحی یخچال، به جریان‌های واریزه‌ای در مرداد ۱۴۰۱ کمک کرده است.

تحلیل روند تغییرات آب‌وهوا

میانگین دمای تخمینی سالانه در نزدیکی منطقه یخچال از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ به میزان ۷/۸- درجه سانتیگراد بود. بالاترین میانگین دمای سالانه ثبت‌شده در سال ۱۳۹۷ به میزان ۶/۷- درجه سانتیگراد و کمترین آن ۹/۷- درجه سانتیگراد در سال ۱۳۸۰ بود (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، روند دمایی نشان‌دهنده افزایش تدریجی دمای تابستانی از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳ است. در طول ماه‌های تابستان (تیر تا شهریور)، دما بالاتر از ۰ درجه سانتیگراد ثبت شد؛ درحالی‌که در بقیه سال دما زیر صفر باقی ماند. بیشترین میزان بارش سالانه در سال ۱۳۸۶ (۹۲۰ میلی‌متر) و کمترین آن در سال ۱۳۹۰ (۵۴۵ میلی‌متر) مشاهده شد. تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی ERA 5 در نزدیکی پایانه یخچال‌ها نشان داد که دمای هوا به مدت ۷۵ روز در سال ۱۴۰۱ از صفر درجه سانتیگراد فراتر رفت. همان‌طور که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است، این روزها بین اوایل تیر تا اوسط شهریور، مصادف با گرم‌ترین ماه‌های منطقه مورد مطالعه متمرکز بود. برعکس، دماها به مدت ۲۹۰ روز به زیر آستانه انجماد (صفر درجه سانتیگراد) رسید.



شکل ۶: نوسانات میانگین دما و بارندگی روزانه، قبل و بعد از رخداد های واریزه ای ۱۴۰۱



شکل ۷: نمودار بارش تجمعی سالانه و میانگین دمای سالانه در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۳. رویدادهای عمده جریان واریزه‌ای، مانند رویدادهای ۱۳۸۶، ۱۳۹۷، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳ با کادر سیاه رنگ مشخص شده‌اند.

افزایش سریع دما از اواسط تیر ماه تا اوایل مرداد ماه ۱۴۰۱ مشاهده شد، به‌طوری‌که ۱۳ مرداد به‌عنوان گرم‌ترین روز (۱۶ درجه سانتیگراد) در نزدیکی یخچال ثبت شد (شکل ۶). شکل شماره ۶، افزایش شدید میانگین دمای روزانه قبل از وقایع جریان‌های واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد که احتمالاً تغییر رژیم زیرسطحی یخچال، در بی‌ثبات کردن یخچال‌های مورد مطالعه نقش داشته است. علاوه بر این، منطقه مورد مطالعه در ۱۶ مرداد ۱۴۰۱ (درست قبل از رخداد واریزه‌ای فاجعه‌بار) شاهد بارندگی شدید روزانه به میزان ۱۸ میلی‌متر بوده است. شکل شماره ۶ رابطه واضحی بین دما و الگوهای بارندگی را برجسته می‌کند. از ۱ تا ۱۶ مرداد ماه، دو بارندگی روزانه بالای ۱۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است که احتمالاً در رخداد جریان‌های واریزه‌ای مؤثر بوده است. از این‌رو، روزهای گرم و خشک طولانی احتمالاً ذوب یخچال‌های طبیعی را تسریع کرده و ویژگی‌های زیرسطحی را تغییر داده و یخچال‌های طبیعی را در دامنه‌های شیب‌دار بی‌ثبات کرده است. موج گرمای طولانی مدت، همراه با بارندگی شدید، باعث تغییر بیشتر رژیم حرارتی دامنه‌های شیب‌دار شده و این امر عاملی بر ایجاد ناپایداری‌های غیرمنتظره و تحریک جریان‌های واریزه‌ای شده است. در مورد رابطه بین داده‌های هواشناسی با تغییرات تعادل جرم یخچالی، نتایج پژوهش نشان داد که افزایش روزهای بالاتر از صفر درجه سانتیگراد می‌تواند منجر به کاهش تعادل جرمی یخچال‌ها شود. کاهش بارش سالانه ممکن است موجب کاهش ضخامت برف و بازخورد منفی بر توده یخ شود.

تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی جریان واریزه‌ای

به منظور تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌های یخچالی و ارتباط آن با جریان‌های واریزه‌ای، از دو شاخص SL و HI استفاده شد. شاخص Ke برای حوضه‌های یخار و سیوله، به ترتیب ۰/۴۳۲۷ و ۰/۳۶۱۵ به‌دست آمد. هر چه شاخص یادشده بزرگ‌تر شود، تغییرات شیب و ناپایداری‌های ژئومورفیک حوضه بیشتر است. همچنین، شاخص HI برای حوضه‌های یخار و سیوله، به ترتیب ۰/۵۰۴۲ و ۰/۵۹۷۲ محاسبه شد. هر چه شاخص یادشده بزرگ‌تر شود،

نشان از پیشرفت و توسعه ساختار ژئومورفولوژیکی حوضه است. هر چه تکامل ژئومورفیکی حوضه بالاتر باشد، توان آن برای ایجاد جریان‌های واریزه‌ای در طول بارش‌های سنگین و ذوب شدید یخچال‌های طبیعی در فصل تابستان بیشتر می‌شود. همان‌طور که در جدول شماره ۴ نشان داده شده است، به لحاظ تکامل ژئومورفولوژیکی، حوضه یخار را در مرحله بلوغ و حوضه سیوله را در حال گذار به مرحله اواخر جوانی در نظر گرفت. در حوضه سیوله، فرآیند فرسایش در طول یک دوره طولانی، چشم‌انداز را به‌صورت دامنه‌های شیب‌دار، سنگ بستر تکه‌تکه‌شده و رسوبات سست در انتهای یخچال تغییر داده است که همه این‌ها بالقوه به جریان واریزه‌ای کمک می‌کنند. وجود رسوبات سست فراوان احتمالاً حجم منبع و نرخ تغذیه کانال را تشدید کرده و به‌طور قابل‌توجهی در رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۱ نقش داشته است.

جدول ۴: مقادیر اندیس‌های SL و HI برای حوضه‌های یخچالی مورد مطالعه

شماره	نام حوضه	اندیس (HI)	اندیس (SL)	مرحله زمین‌شناسی
۱	یخار	۰/۵۰۴۲	۰/۴۳۲۷	بلوغ
۲	سیوله	۰/۵۹۷۲	۰/۳۶۱۵	اواخر جوانی

بحث

در این مطالعه، ما با استفاده از فن‌های سنجش‌ازدور، تغییرات دینامیکی یخچال‌ها مانند تغییرات ارتفاع، تغییر مساحت، تعادل جرم و ویژگی‌های مورفولوژیکی بی‌ثبات‌کننده و تأثیرات آنها بر جریان‌های واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، داده‌های اقلیمی ERA 5، برای تجزیه و تحلیل تأثیرات نوسانات دما و بارش بر رویدادهای جریان واریزه‌ای مورد استفاده قرار گرفت که رابطه قوی با این رویدادها را نشان داد. علاوه بر این، در هر دو حوضه آبریز، نشانه‌هایی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با جریان واریزه‌ای دیده شد. مطالعات انجام‌گرفته نشان داد که در طول ۳۰ سال گذشته، به‌ویژه در مناطق مرتفع، شاهد کاهش مداوم جرم یخچال‌ها بودیم که احتمالاً به دلیل سرعت بالای ذوب در انتهای یخچال و افزایش دمای هوا است که با نمایان شدن دامنه‌های شیب‌دار، منجر به سیل و جریان‌های واریزه‌ای شده و به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌های طبیعی تأثیر گذاشته است (Kaab et al. 2021; Hassan et al. 2021; Jiang et al. 2023). تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا Planet، ویژگی‌های سطحی بی‌ثبات یخچال‌های طبیعی مانند ترک‌ها، شکاف‌ها و پرتگاه‌ها را نشان داد. وجود آب بارندگی یا آب حاصل از ذوب یخچال در این شکاف‌ها، تنش برشی را در شیب‌های تند افزایش می‌دهد؛ این امر ممکن است یخچال را بی‌ثبات کرده و منجر به شکست انتهایی آن شود. این تغییرات دینامیکی یخچال‌ها احتمالاً با بی‌ثبات کردن انتهای یخچال، همان‌طور که توسط نویسندگان دیگر مطالعه شده است (Huggel et al. 2012; Pandey et al. 2022)، در رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ نقش داشته‌اند.

این ویژگی‌های مورفولوژیکی یخچال‌ها با خطرات مختلفی از جمله، جدا شدن انتهای یخچال و حرکت شتاب‌دار ناگهانی آن مرتبط هستند که به‌طور قابل‌توجهی بر بی‌ثباتی یخچال‌ها تأثیر می‌گذارند و منجر به جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شوند. منطقه یخچالی با نرخ متوسط ۰/۴۸۴ کیلومتر مربع در سال، پسروری قابل‌توجهی را تجربه کرد و رسوبات سست و غیریکپارچه را در معرض دید قرار داد و شرایط مطلوبی را برای جریان‌های واریزه‌ای فراهم کرد. با این حال، نرخ عقب‌نشینی بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ به‌طور استثنایی بالاتر و برابر با ۰/۷۶۷ کیلومتر مربع در سال بود. ویژگی‌های توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی، شرایط مساعدی را برای جریان واریزه و سیلاب در حوضه‌های یخار و

سیوله نشان دادند. مقادیر شاخص SL و HI برای حوضه یخار مرحله بلوغ ژئومورفولوژیکی را نشان داد. در چنین مرحله‌ای، حوضه آبخیز برای جریان‌های واریزه‌ای در طول بارش‌های سنگین و ذوب شدید برف و یخچال‌های طبیعی در فصل تابستان، مساعدتر می‌شود (Chen et al. 2018). درحالی حوضه سیوله مرحله اواخر جوانی خود را تجربه می‌کند که نشان‌دهنده کمترین مطلوبیت برای جریان‌های واریزه‌ای است.

بر اساس مجموعه داده‌های بلندمدت ERA 5، سال ۱۳۹۷ با میانگین دمای سالانه ۶/۷- درجه سانتیگراد، به‌عنوان گرم‌ترین سال شناخته شد و پس از آن سال‌های ۱۴۰۳ با دمای ۶/۸- درجه سانتیگراد و ۱۳۸۶ با دمای ۷/۲- درجه سانتیگراد قرار گرفتند. درحالی‌که ناهنجاری بارش در ۳۰ سال گذشته ثابت نبوده است. بااین‌حال، ما شاهد کاهش میزان بارش از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ و افزایش بارندگی از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ بودیم که احتمالاً به‌دلیل تغییرات خرد اقلیمی منطقه‌ای است. نتایج حاصل از این پژوهش، ارتباط مستقیمی بین روزهای طولانی گرم و خشک تابستان و به‌دنبال آن بارندگی شدید و جریان‌های واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ که از یخچال‌های سیوله و یخار سرچشمه گرفته‌اند، نشان داد. همان‌طور که در شکل شماره ۷ نشان داده شده است، دمای روزانه هوا از اوایل مرداد شروع به افزایش کرد و پس از رویداد واریزه‌ای فاجعه‌بار کاهش یافت. بااین‌حال، بارندگی تا اواسط مرداد ادامه یافت. اعتقاد بر این است که روزهای بسیار گرم و خشک و به‌دنبال آن بارندگی شدید، نقش مهمی در وقوع حوادث متعدد جریان واریزه‌ای در حوضه آبریز سیوله و یخار داشته‌اند. افزایش قابل‌توجه دمای هوا و بارندگی، ذوب یخچال‌های طبیعی، تخریب لایه منجمد دائمی و تغییر چرخه انجماد - ذوب را تسریع می‌کند و منجر به ناپایداری یخچال‌های طبیعی در دامنه‌های شیب‌دار می‌شود و خطرات متعددی را ایجاد می‌کند (Patton et al. 2019; Leinss et al. 2021). بااین‌حال، عوامل دیگری مانند توپوگرافی، شیب تند و تغییرات طولانی مدت در دینامیک یخچال‌های طبیعی نیز نقش مهمی ایفا کردند؛ زیرا تمام رویدادهای جریان واریزه‌ای از انتهای یخچال‌ها سرچشمه گرفته و احتمالاً یا با جدا شدن توده یخچالی یا با اضافه شدن اوج تخلیه آب ذوب یخچال که با افزایش دما تسریع می‌شود، آغاز شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش، تأثیر متقابل بین تغییرات دینامیکی یخچال‌ها، ژئومورفولوژی، بارش و دما را در هدایت جریان‌های واریزه‌ای و سیل در محیط‌های کوهستانی نشان می‌دهد. یافته‌های پژوهش نشان داد که رویدادهای متعدد جریان واریزه‌ای، همراه با سیل فاجعه‌بار در حوضه‌های آبریز یخار و سیوله دماوند، ناشی از تغییرات طولانی مدت در دینامیک یخچال‌ها همراه با افزایش دما و بارش شدید بوده است. بر اساس این مطالعه، می‌توان نتیجه‌گیری زیر را استنباط کرد. در طول سه دهه گذشته، یخچال‌های یادشده به‌طور مداوم تعادل جرم منفی را تجربه کرده‌اند؛ به‌طوری‌که مناطق یخچالی به‌ویژه در یخچال‌های کوچک‌تر که آسیب‌پذیرتر و حساس‌تر به تغییرات اقلیمی هستند، عقب‌نشینی قابل‌توجهی داشته‌اند. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات زمانی قابل‌توجهی را در دینامیک یخچال‌ها و ارتباط آنها با رویدادهای جریان واریزه‌ای مرداد ماه ۱۴۰۱ نشان داد. بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳، دینامیک تشدیدشده یخچالی منجر به نمایان شدن بستر سنگی انتهای یخچال شده که احتمالاً به‌دلیل هدر رفتن توده یخ و سرعت بالای ذوب شدن آن بوده است. یخچال‌ها دارای ویژگی‌های سطحی بی‌ثباتی مانند شکاف‌ها و ترک‌ها بودند که ممکن است انتهای یخچال را قبل از شکست آن تضعیف کرده باشند. پایداری یخچال‌ها، به‌ویژه انتهای آن به سرعت ذوب، بارندگی، نوسانات دما و تغییرات تعادل جرم بسیار حساس است. عقب‌نشینی مداوم و از

دست دادن یخ، دامنه‌های شیب‌دار و رسوبات غیر متراکم را در معرض خطر قرار می‌دهد. این مسئله خطر شکست شیب را افزایش داده و منجر به ایجاد جریان‌های واریزه‌ای و سیل می‌شود. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مانند رسوبات غیر یکپارچه و ویژگی‌های سنگ بستر، نیز نقش حیاتی ایفا می‌کنند، به‌طوری‌که شیب‌های تند بیش از ۲۵ درجه، آستانه شروع جریان واریزه در منطقه مورد مطالعه هستند. دماهای شدید و بارندگی‌ها باعث تغییر رژیم حرارتی و ویژگی‌های زیرسطحی یخچال مدفون (منظور تغییرات دما و فشار آب در لایه‌های برف و یخ زیرسطحی) شده و در نتیجه رویدادهای متعدد جریان واریزه در مرداد ۱۴۰۱ را ایجاد کردند. این موضوع، رابطه حیاتی بین دینامیک یخچال و تغییر شرایط آب‌وهوایی را برجسته می‌کند. به‌طور خلاصه، این مطالعه نشان می‌دهد که پتانسیل وقوع حوادث مکرر و مشابه ناشی از یخچال‌های طبیعی در محیط‌های کوهستانی به‌دلیل گرمایش جهانی وجود دارد. افزایش دما ممکن است پسروری یخچال‌ها و از دست دادن جرم را حتی با سرعت بیشتری تسریع کند و منجر به بی‌ثباتی بیشتر یخچال‌ها و افزایش فراوانی جریان‌های واریزه یخچال‌ها و سیل‌های فاجعه‌بار شود. بنابراین، باید تلاش‌های بیشتری بر مطالعه یخچال‌های طبیعی شود؛ زیرا باعث ایجاد خطر برای جوامع پایین‌دست می‌شوند و این امر با هدف کاهش اثرات جریان‌های واریزه‌ای و سیل در مناطق کوهستانی انجام پذیرد. برای دستیابی به این هدف، ایجاد شبکه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی خودکار و سایر ابزارهای لازم، انجام پژوهش‌های میدانی برای نظارت بر سیستم برف - یخچال طبیعی و مشارکت جوامع محلی و مقامات مربوطه ضروری است. علاوه بر این، نصب سیستم‌های هشدار اولیه برای تشخیص بلایای احتمالی و جلوگیری از خسارت‌های انسانی و اقتصادی بسیار مهم است.

منابع

- خدائیان، سعید؛ ضیائیان، پرویز؛ فخاری، سعیده. (۱۳۸۹). بررسی ژئومورفولوژی یخچال یخار با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور (قله دماوند). فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۱۹(۷۴)، صص: ۸۱-۸۵.
- فخاری، سعیده؛ نادری، فتح‌الله؛ ضیائیان، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی میزان تغییرات یخچال طبیعی یخار دماوند با استفاده از RS و GIS. زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۷(۱)، صص: ۲۹-۳۸.
- قربانی شورشانی، علی؛ خسروی، عذرا؛ نورمحمدی، علی. (۱۳۹۷). بررسی شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی کوترنری در ارتفاعات شمال شرق ایران (مطالعه موردی: رشته‌کوه بینالود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱(۵)، صص: ۱-۱۳.
- ولدان زوج، محمدجواد؛ رضائی، یوسف؛ وزیری، فریبرز؛ مباشری، محمدرضا. (۱۳۸۷). بررسی یخچال طبیعی علم چال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. فصلنامه علمی علوم زمین، ۱۸(۷۰)، صص: ۲-۱۳.
- Ali, M., Liu, Q., Hassan, W. (2024). Two-decadal glacier changes in the Astak, a tributary catchment of the upper Indus River in northern Pakistan. *Remote Sensing*, 16(9), 1558. doi: [10.3390/rs16091558](https://doi.org/10.3390/rs16091558).
- Allen, S., Owens, I., Sirguy, P. (2008). Satellite remote sensing procedures for glacial terrain analyses and hazard assessment in the Aoraki Mount Cook region, New Zealand. *New Zealand J Geol Geophysics*, 51(1), 73-87. doi: [10.1080/00288300809509851](https://doi.org/10.1080/00288300809509851).
- Bahuguna, I., Rathore, B.P., Jasrotia, A.S. (2021). Randhawa SS, Yadav SKS, Ali S, Gautam N, Poddar J, Srighyan M, Dhanade A, et al. 2021. Recent glacier area changes in the Himalaya-Karakoram and the impact of latitudinal variation. *Current Sci.*, 121(7), 929-940. doi: [10.18520/cs/v121/i7/929-940](https://doi.org/10.18520/cs/v121/i7/929-940).
- Basnett, S., Kulkarni, A.V., Bolch, T. (2013). The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India. *J Glaciol*, 59(218), 1035-1046. doi: [10.3189/2013JoG12J184](https://doi.org/10.3189/2013JoG12J184).
- Bazai, N.A., Cui, P., Carling, P.A., Wang, H., Hassan, J., Liu, D., Zhang, G., Jin, W. (2021). Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth Sci Rev.*, 212, 103432. doi: [10.1016/j.earscirev.2020.103432](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103432).

- Bisset, R. R., Nienow, P. W., Goldberg, D. N., Wigmore, O., Loayza-Muro, R. A., Wadham, J. L., Macdonald, M. L., Bingham, G. (2023). Using thermal UAV imagery to model distributed debris thicknesses and sub-debris melt rates on debris-covered glaciers. *J Glaciol*, 69(276), 981–996.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kaab, A., Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosciences*, 10(9), 668–673. doi: [10.1038/NGEO2999](https://doi.org/10.1038/NGEO2999).
- Chen, X., Chen, J., Cui, P., You, Y., Hu, K., Yang, Z., Zhang, W., Li, X., Wu, Y. (2018). Assessment of prospective hazards resulting from the 2017 earthquake at the world heritage site Jiuzhaigou Valley, Sichuan, China. *J Mt Scienses*, 15(4), 779–792. doi: [10.1007/s11629-017-4785-1](https://doi.org/10.1007/s11629-017-4785-1).
- Deng, M., Chen, N., Liu, M. (2017). Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 17(3), 345–356. doi: [10.5194/nhess-17-345-2017](https://doi.org/10.5194/nhess-17-345-2017).
- Hassan, J., Chen, X., Muhammad, S., Bazai, N.A. (2021). Rock glacier inventory, permafrost probability distribution modeling, and associated hazards in the Hunza River Basin, Western Karakoram, Pakistan. *Sci Total Environment*, 782, 146833. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.146833](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146833).
- Hassan, W., Su, F., Liu, W., Hassan, J., Hassan, M., Bazai, N.A., Wang, H., Yang, Z., Ali, M., Castellanos, D.G., (2023). Impact of glacier changes and permafrost distribution on debris flows in Badswat and Shishkat catchments, Northern Pakistan. *J Mt Scienses*, 20(12), 3687–3702. doi: [10.1007/s11629-023-7894-5](https://doi.org/10.1007/s11629-023-7894-5).
- Huebl, J., Kaitna, R. (2021). Monitoring debris-flow surges and triggering rainfall at the Lattenbach Creek, Austria. *Environ Eng Geosciences*, 27(2), 213–220. doi: [10.2113/EEG-D-20-00010](https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00010).
- Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surf Processes Landform*, 37(1), 77–91. doi: [10.1002/esp.2223](https://doi.org/10.1002/esp.2223).
- Huss, M., Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Clim Change*, 8(2), 135–140. doi: [10.1038/s41558-017-0049-x](https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x).
- Jiang, Y., Hu, X., Liang, H., Ning, P., Fan, X. (2023). A physically based model for the sequential evolution analysis of rainfall-induced shallow landslides in a catchment. *Water Resour Res.*, 59(5), e2022WR032716. Doi: [10.1029/2022WR032716](https://doi.org/10.1029/2022WR032716).
- Kaab, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., Leinss, S., Girod, L., Huggel, C., Falaschi, D., Ugalde, F., Petrakov, D., Chernomorets, S. (2021). Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought? *The Cryosphere*, 15(4), 1751–1785. doi: [10.5194/tc-15-1751-2021](https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021).
- Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., Dokukin, M. (2021). Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat Hazards Earth Syst Scienses*, 21(5), 1409–1429. doi: [10.5194/nhess-21-1409-2021](https://doi.org/10.5194/nhess-21-1409-2021).
- Pande, C., Moharir, K., Pande, R. (2021). Assessment of morphometric and hypsometric study for watershed development using spatial technology—a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *Int J River Basin Management*, 19(1), 43–53. doi: [10.1080/15715124.2018.1505737](https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1505737).
- Pandey, V.K., Kumar, R., Singh, R., Kumar, R., Rai, S.C., Singh, R.P., Tripathi, A.K., Soni, V.K., Ali, S.N., Tamang, D. (2022). Catastrophic ice-debris flow in the Rishiganga river, Chamoli, Uttarakhand (India). *Geomat Nat Hazards Risk*, 13(1), 289–309. doi: [10.1080/19475705.2021.2023661](https://doi.org/10.1080/19475705.2021.2023661).
- Patton, A.I., Rathburn, S.L., Capps, D.M. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 340, 116–128. doi: [10.1016/j.geomorph.2019.04.029](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029).
- Qiu, C., Su, L., Zou, Q., Geng, X. (2022). A hybrid machine-learning model to map glacier-related debris flow susceptibility along the Gyirong Zangbo watershed under the changing climate. *Sci Total Environment*, 818, 151752. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.151752](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151752).
- Zhang, J., Liu, J., Li, Y., Wang, J., Chen, L., Gao, B. (2022). Effects of glacier and geomorphology on the mechanism difference of glacier-related debris flow on the South and North Banks of Parlung Zangbo River, Southeastern Tibetan Plateau. *Adv Civ Eng.*, 2022(1), 3510944. doi: [10.1155/2022/3510944](https://doi.org/10.1155/2022/3510944).
- Zhou, Y., Li, Z., Li, J.I.A. (2017). Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. *J Glaciol.*, 63(238), 331–342. doi: [10.1017/jog.2016.142](https://doi.org/10.1017/jog.2016.142).

Evaluation of spatial planning indicators of physical resilience of rural settlements in the face of floods (Case Study: Region Seven of Spatial Planning)

Reza Asadi¹, Abdoreza Rokneddin Eftekhari², Mortaza Tavakoli^{3*} , Mehdi Pourtaheri⁴

1. PhD Graduated in geography and rural planning, Department of Geography and Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Geography and Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geography and Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Email: m-tavakoli@modares.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9131-9810>

4. Professor, Department of Geography and Rural Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 08 August 2025 Revised: 04 May 2026 Accepted: 22 May 2026 Published: 12 September 2026 Keywords: Resilience, Physical Resilience, Spatial Planning, Flood, Region Seven of Spatial Planning.	Spatial Planning and Physical Resilience Against Flooding. Flooding, a pervasive natural hazard has exerted increasing pressure on Iran's rural settlements over recent decades, driven by climate change and unsustainable land-use patterns. These settlements exhibit compounded vulnerability due to deficient physical infrastructure and heavy reliance on natural resources for livelihood. Within this framework, the present research analytically evaluates the spatial planning indicators that influence the physical resilience of rural areas in Land Planning Region 7 (comprising Zanjan, Qazvin, and Markazi provinces) to flood events. This study employed a descriptive-analytical method with a quantitative approach. Data collection involved field surveys and a researcher-developed questionnaire administered to 375 rural household heads and 86 subject-matter experts. One-sample t-test results indicate that the mean scores for all investigated dimensions remain significantly below the theoretical optimum of 3 for both groups. Specifically, the overall mean reached 2.42 ($t = -81.180$) from the villagers' perspective and 2.65 ($t = -11.476$) from the experts' perspective. Furthermore, an independent t-test revealed a significant perceptual discrepancy between the two cohorts ($p < 0.01$). The governance dimension exhibited the most substantial gap, where the experts' relatively positive assessments directly contradicted the local community's critical evaluations. The findings demonstrate that persistent centralized; top-down spatial planning decouples infrastructure development from indigenous needs, thereby eroding physical resilience. Consequently, this study advocates for a fundamental redefinition of institutional mechanisms and the strengthening of participatory governance as essential prerequisites for enhancing spatial resilience in flood-prone rural areas.
How to Cite: Asadi, R., Rokneddin Eftekhari, A., Tavakoli, M. and Pourtaheri, M. (2026). Evaluation of spatial planning indicators of physical resilience of rural settlements in the face of floods (Case Study: Region Seven of Spatial Planning). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 227-250.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2026.52886.2131	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In recent decades, the increasing frequency of natural disasters, particularly floods, has posed serious challenges to sustainable development. Rural areas are especially vulnerable owing to their social and physical characteristics. Traditional engineering-based approaches to flood management are no longer sufficient to address the complexities of climate change, highlighting the urgent need for resilient and flexible strategies. In this context, spatial planning can enhance the physical resilience of rural communities to floods by integrating various dimensions, including land-use management, infrastructure design, and local participation. This study aims to assess the current state of spatial planning indicators for physical resilience in flood-prone rural settlements within the Seventh Spatial Planning Region of Iran (comprising Markazi, Zanzan, and Qazvin provinces). By identifying existing gaps, this study provides a foundation for developing effective solutions.

DATA AND METHODOLOGY

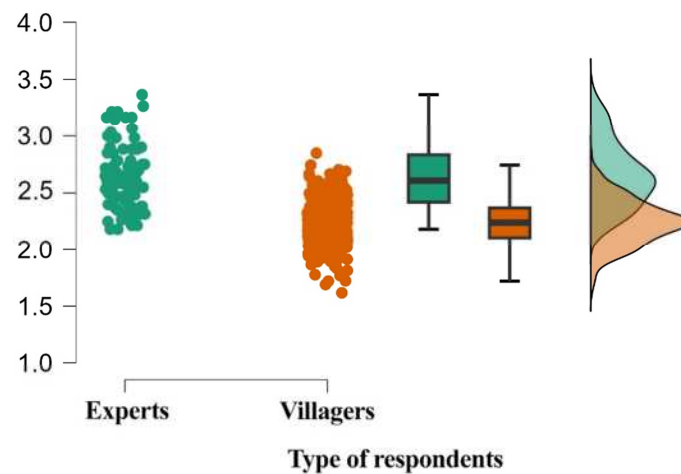
This applied, descriptive-analytical study employed a quantitative, analytical-comparative approach. Data were collected through a combination of documentary analyses and fieldwork. Following a thorough review of the theoretical foundations, a conceptual model was designed for the spatial planning of physical resilience in rural settlements facing floods. This model includes dimensions of spatial planning (with normative, governance, political, and spatial indicators), physical resilience (with indicators of robustness, redundancy, resourcefulness, rapidity, reflectivity, flexibility, and integration), and flood resilience (with indicators of resistance, coping, recovery, and adaptation). For the fieldwork, a Likert-scale questionnaire was developed, its validity confirmed by experts, and its reliability verified with a Cronbach's alpha coefficient above 0.7. A multistage purposive sampling method was used in the Seventh Spatial Planning Region. Initially, high-risk flood counties were identified, and 25 villages affected by the severe floods in April 2019 were selected as the final sample. The statistical population included two distinct groups: 375 household heads from the 25 selected villages and 86 experts in crisis management and rural development from the three provinces. This diverse sample allowed for a comprehensive and multifaceted analysis. Finally, the collected data were analyzed using descriptive and inferential statistics (one-sample t-test and independent samples t-test) in SPSS software to evaluate the status of the indicators and the differences in perspectives between the two groups.

RESULTS AND DISCUSSION

The findings indicate that the status of spatial planning indicators for physical resilience in the rural settlements of the Seventh Spatial Planning Region is below the desired level, according to both villagers and experts. The overall mean score for all variables was 2.21 for villagers and 2.65 for experts, both significantly lower than the desired score of 3. A key finding was the significant gap in the perception and evaluation of these indicators between the two groups. The independent samples t-test revealed that the experts' mean evaluation was significantly higher than the villagers' in all dimensions (normative, political, and governance). For example, in the governance dimension, villagers reported a mean of 2.14, while experts reported 2.23, indicating a significant difference. Both groups rated normative and political dimensions unfavorably. The normative dimension (with mean scores of 2.24 for villagers and 2.42 for experts) highlights a weakness in institutionalizing resilience goals and values within planning documents and processes. The political dimension (with mean scores of 2.23 for villagers and 2.46 for experts) signifies weaknesses in the formulation, consistent implementation, and support for post-flood reconstruction and reinforcement policies. Overall, the results of this study reject the hypothesis of stability in spatial planning indicators for physical resilience in rural areas of the Seventh Spatial Planning Region, concluding that their status is unstable and requires urgent corrective action (Table 1 and Figure 1).

Table 1: Significance levels of spatial planning variables for physical resilience based on a one-sample t-test among experts and the Villagers

Type of respondents	Dimension	t-value	df	Sig	Mean	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
							Lower	Upper
Villagers	governance	-64/925	374	0/000	2/14	-0/86	-0/88	-0/83
	normative	-55/346	374	0/000	2/24	-0/76	-0/78	-0/73
	policy	-35/637	374	0/000	23/2	-0/77	-0/81	-0/72
	Total variables	-81/180	374	0/000	2/21	-0/79	-0/80	-0/76
Experts	governance	5/411	85	0/000	3/23	0/23	0/15	0/32
	normative	-16/150	85	0/000	2/42	-0/58	-0/65	-0/51
	policy	-9/862	85	0/000	2/46	-0/54	-0/64	-0/42
	Total variables	-11/476	85	0/000	2/65	-0/35	-0/41	-0/29

**Figure 1: Comparative Analysis of the Perspectives of Villagers and Experts on All Dimensions**

CONCLUSION

The study's results indicate that enhancing physical resilience in flood-prone rural areas requires a multidimensional and integrated approach that seriously considers normative, governance, and political dimensions within the framework of spatial planning. These findings highlight the serious challenges of collaborative governance in rural areas. The perceptual gap between villagers and experts, with villagers having a more negative assessment, suggests a trust and awareness deficit between local communities and higher-level institutions. This gap may stem from a lack of transparency, insufficient accountability, and superficial participation in the processes. Furthermore, weaknesses in the normative and political dimensions point to the absence of a cohesive operational framework for achieving resilience goals and ineffective policy implementation. In light of these findings, a set of policies and executive strategies is proposed. To strengthen governance, mechanisms for public participation must be enhanced through interactive workshops and by granting specific authority to local decision-making bodies. From a normative perspective, it is essential to redefine concepts such as spatial justice and institutional effectiveness in development documents. In the political dimension, policies should be revised based on fieldwork experiences and real data, and a continuous feedback system should be established to ensure that they are flexible. Finally, this study emphasizes nature-based, indigenous, and participatory solutions, demonstrating that structural reforms in governance and normative dimensions can move planning away from centralized,

hardware-focused frameworks. This model not only helps reduce flood risks and accelerates recovery but also lays the groundwork for sustainable development and improved quality of life in rural areas, serving as a guiding framework for other similar regions.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

This paper is derived from a doctoral dissertation entitled "Providing the Spatial Planning Pattern of Physical Resilience in Flood-Prone Rural Areas (Case Study: Rural Areas of Regional Seven of Spatial Planning)" at Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. The authors would like to express their gratitude for the support provided by the Research Deputy and the Department of Geography and Planning at the University.

REFERENCES

References [in Persian]

- Badri, S. A., Ramezanzadeh Lasboei, M., Asgary, A., Ghadiri Masom, M., & Salmani, M. (2013). The role of local management in improving resilience to natural disasters with emphasis on floods. *Emergency Management*, 2(1), 39-50. [in Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1392.2.1.4.8>
- Delshad, M., Bahrani, H., Kamali, M., & Jafari, M. (2023). Explanation of the future-oriented Spatial Resilience Planning Framework (SRPF) against earthquake and its verification with meta-analysis and FAHP methods. *Journal of Vision Future Cities*, 4(1), 1-23. [in Persian] <https://doi.org/10.61186/jvfc.4.1.1>

References [in English]

- Wilkinson, C. (2012). Social-ecological resilience: Insights and issues for planning theory. *Planning Theory*, 11(2), 148-169. <https://doi.org/10.1177/1473095211426274>
- Zevenbergen, C., Gersonius, B., & Radhakrishnan, M. (2020). Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2168), 20190212. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0212>
- Zevenbergen, C., Veerbeek, W., Gersonius, B., & Van Herk, S. (2008). Challenges in urban flood management: travelling across spatial and temporal scales. *Journal of Flood Risk Management*, 1(2), 81-88. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00010.x>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

ارزیابی شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در مواجهه با سیل (مورد مطالعه: منطقه هفت آمایش سرزمین)

رضا اسدی^۱، عبدالرضا رکن الدین افتخاری^۲، مرتضی توکلی^{۳*}، مهدی پورطاهری^۴

۱. دانش‌آموخته دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استاد بازنشسته گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: m-tavakoli@modares.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9131-9810>

۴. استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
سیلاب به‌عنوان یکی از فراگیرترین مخاطرات طبیعی، در دهه‌های اخیر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و الگوهای ناپایدار بهره‌برداری از زمین، فشار فزاینده‌ای بر سکونتگاه‌های روستایی ایران وارد کرده است؛ سکونتگاه‌هایی که به‌دلیل ضعف زیرساخت‌های کالبدی و وابستگی معیشتی به منابع طبیعی، از آسیب‌پذیری مضاعف برخوردارند. در این چارچوب، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تحلیلی شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی مؤثر بر تاب‌آوری کالبدی روستاهای منطقه هفت آمایش سرزمین (استان‌های زنجان، قزوین و مرکزی) در مواجهه با سیل انجام شده است. روش تحقیق توصیفی-تحلیلی با رویکرد کمی بوده و داده‌ها از طریق پیمایش میدانی و پرسش‌نامه محقق‌ساخته میان ۳۷۵ سرپرست خانوار روستایی و ۸۶ کارشناس حوزه‌های مرتبط گردآوری شد. نتایج آزمون T تک‌نمونه‌ای نشان داد میانگین تمامی ابعاد مورد بررسی در هر دو گروه به‌طور معناداری پایین‌تر از حد مطلوب نظری (۳) قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که میانگین کل در دیدگاه روستاییان $2/42$ ($t = -81/180$) و در دیدگاه کارشناسان $2/65$ ($t = -11/476$) -$t =$ برآورد شد. همچنین آزمون T مستقل حاکی از وجود تفاوت معنادار ادراکی میان دو گروه ($p > 0/01$) است؛ بیشترین شکاف در بعد حکمروایی مشاهده شد، جایی که ارزیابی نسبتاً مثبت کارشناسان در تقابل با ارزیابی انتقادی جامعه محلی قرار دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد استمرار رویکردهای تمرکزگرا و بالا به پایین در برنامه‌ریزی فضایی، به عدم انطباق زیرساخت‌ها با نیازهای بومی انجامیده و ظرفیت تاب‌آوری کالبدی را تضعیف کرده است. بر این اساس، بازتعریف سازوکارهای نهادی و تقویت حکمروایی مشارکتی به‌عنوان پیش‌شرط ارتقای تاب‌آوری فضایی روستاهای سیل‌خیز منطقه پیشنهاد می‌شود.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، تاب‌آوری کالبدی، برنامه‌ریزی فضایی، سیل، منطقه هفت آمایش سرزمین.
	استناد: اسدی، رضا، افتخاری، عبدالرضا رکن الدین، توکلی، مرتضی و پورطاهری، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در مواجهه با سیل (مورد مطالعه: منطقه هفت آمایش سرزمین). <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۴۹)، ۲۲۷-۲۵۰
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	
DOI: 10.22111/jneh.2026.52886.2131	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش فراوانی و شدت بلایای طبیعی به یکی از چالش‌های جدی در مسیر تحقق توسعه پایدار بدل شده است (ون^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). عوامل متعددی همچون رشد جمعیت، تخریب محیط‌زیست، تغییرات اقلیمی و نارسایی در برنامه‌ریزی کاربری زمین، در تشدید این مخاطرات نقش داشته‌اند. در میان انواع بلایای طبیعی، سیل یکی از رایج‌ترین و پرهزینه‌ترین پدیده‌ها به شمار می‌رود که پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد جانی، اقتصادی و اجتماعی برای جوامع انسانی به‌ویژه در مناطق روستایی به همراه دارد (پراشار^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که با تداوم تغییرات اقلیمی، شدت و گستره تأثیرات سیل در آینده نیز افزایش خواهد یافت (زونبرگن و همکاران^۳، ۲۰۰۸). مناطق روستایی به دلیل ویژگی‌های کالبدی، اجتماعی و نهادی شکننده، بیش از سایر نواحی در معرض خطر سیل قرار دارند (هایجمن^۴ و همکاران، ۲۰۰۷). در این مناطق، فقدان برنامه‌ریزی فضایی مؤثر و بی‌توجهی به اصول مدیریت کالبدی، منجر به افزایش آسیب‌پذیری و تضعیف ظرفیت بازیابی پس از وقوع بحران‌ها شده است (سعیدی، ۱۳۹۲). در مواجهه با مخاطرات طبیعی، دو رویکرد کلی قابل شناسایی است: نخست، رویکردهای پیش‌نگر که بر پیش‌بینی و پیشگیری از بحران‌های محتمل متمرکزند؛ و دوم، رویکردهای تاب‌آورانه که بر ارتقای ظرفیت‌های انطباق‌پذیری و بازگشت‌پذیری جوامع در برابر بحران‌های غیرقابل پیش‌بینی تأکید دارند (بسطام‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵).

تاب‌آوری، توانایی بازگشت به پایداری حیاتی پس از بحران‌ها و سازگاری با شرایط جدید تعریف می‌شود. در همین راستا، تقویت تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی تنها با نگاه فیزیکی ممکن نیست؛ بلکه مستلزم اتخاذ راهبردهایی کلان چون تنوع‌بخشی به معیشت، بهبود زیرساخت‌ها و ایجاد دسترسی عادلانه به منابع و خدمات امدادی است (فولک^۵ و همکاران، ۲۰۱۰). در این میان، برنامه‌ریزی فضایی به‌عنوان ابزاری کلیدی برای کاهش ریسک بلایا، از جایگاه فزاینده‌ای برخوردار شده است. با توجه به هزینه‌بر بودن و محدودیت‌های رویکردهای صرفاً مهندسی، بهره‌گیری از برنامه‌ریزی فضایی می‌تواند بستر مناسبی برای طراحی و اجرای اقدامات مؤثر در سطوح محلی فراهم آورد (لو^۶، ۲۰۱۴). از طریق ترکیب تحلیل‌های فنی و مشارکت جامعه، استفاده بهینه از اراضی، طراحی مناسب زیرساخت‌ها و حفاظت از منابع طبیعی، امکان ارتقای تاب‌آوری کالبدی فراهم می‌شود (سولین و اسلادکوا^۷، ۲۰۲۳). برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آور، افزون بر کاهش آسیب‌پذیری کالبدی، به توانمندسازی جوامع محلی از طریق تقویت مشارکت، توسعه فرصت‌های اقتصادی پایدار، ارتقای ظرفیت‌های نهادی و تحکیم شبکه‌های اجتماعی می‌انجامد (ویلکینسون^۸، ۲۰۱۲). در کشور ایران، به دلیل شرایط ویژه جغرافیایی و اقلیمی، بخش قابل‌توجهی از مناطق، به‌ویژه روستاها، در معرض خطرات طبیعی از جمله سیل قرار دارند. برآوردها نشان می‌دهند که بیش از ۳۱ درصد از مساحت کشور در معرض مخاطرات طبیعی است و نزدیک به ۷۰ درصد جمعیت در این نواحی سکونت دارند (فرزاد بهتاش و همکاران، ۱۳۹۲). از میان بلایای طبیعی، سیل بیشترین سهم را در خسارات وارده دارد، به‌گونه‌ای که

1 Wen

2 Prashar

3 Zevenbergen et al

4 Heijman

5 Folke

6 Lu

7 Solín & Sládeková Madajová

8 Wilkinson

حدود ۷۰ درصد از اعتبارات ستاد حوادث غیرمترقبه صرف جبران خسارات ناشی از سیلاب می‌شود (مختاری هشی و رحیمی، ۱۳۹۵). در این میان، منطقه هفت آمایش سرزمین ایران (شامل سه استان مرکزی، زنجان و قزوین)، به‌مثابه یک زیست‌بوم راهبردی که محل تلاقی قطب‌های صنعتی-تولیدی و کریدورهای ترانزیتی ملی است، امروزه با چالش بنیادین عدم تعادل میان «توسعه کالبدی» و «ظرفیت برد اکولوژیک» مواجه شده است. رخداد سیلاب‌های مخرب فروردین ۱۳۹۸، به‌ویژه در استان‌های زنجان، مرکزی و قزوین، نه یک بحران صرفاً طبیعی، بلکه تجلی عینی گسیختگی در برنامه‌ریزی فضایی و ضعف ساختاری در تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی است. بر اساس مستندات نهادهای متولی، تخریب گسترده واحدهای مسکونی در این پهنه، برآمده از استقرار نامتوازن جمعیت در حوضه‌های آبریز و نادیده انگاشتن منطق هیدرولوژیک در توسعه سکونتگاهی است. واکاوی وضعیت موجود نشان می‌دهد که جوامع روستایی این منطقه به‌واسطه وابستگی معیشتی به اراضی سیلابی و غلبه الگوهای ساخت‌وساز غیرفنی، در پایین‌ترین سطح از آستانه تحمل محیطی قرار دارند. این شکنندگی زمانی تشدید می‌شود که مداخلات آنتروپوژنیک در بالادست حوضه‌هایی نظیر قزل‌اوزن، در کنار تغییرات فاز بارش از تداومی به رگبارهای حدی، ضریب روان‌آب را در دشت‌های پایکوهی به‌طور جهشی افزایش داده است. در واقع، تقلیل مدیریت بحران به اقدامات سازه‌محور و کوتاه‌مدت، مانع از شکل‌گیری یک نظام سکونتگاهی انطباق‌پذیر شده و شکاف میان واقعیت‌های زیست‌محیطی و اسناد بالادستی آمایش را عمیق‌تر کرده است. بنابراین، گذار از پارادایم «تقابل با سیل» به سمت «مدیریت فضایی خطرپذیری»، ضرورتی انکارناپذیر است که مستلزم بازتعریف شاخص‌های کالبدی بر مبنای تحلیل‌های علمی و اصلاح سیاست‌ها است. پژوهش حاضر با اتخاذ رویکردی نظام‌مند، در پی تبیین این واقعیت است که تاب‌آوری کالبدی روستاها در منطقه هفت، صرفاً در گرو استحکام بنا نیست، بلکه در گرو سازمان‌دهی فضایی هوشمندی است که بتواند میان نقش و عملکرد مناطق روستایی و الزامات پایداری محیطی، تعادلی راهبردی برقرار سازد؛ در غیر این صورت، تداوم روند فعلی و سوداگری در حریم مسیل‌ها، منجر به فروپاشی عملکردی زیرساخت‌های حیاتی و تهدید امنیت زنجیره تأمین در این منطقه خواهد شد. در همین راستا، پرسش اصلی تحقیق عبارت است از: وضعیت شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی در برابر سیل در روستاهای منطقه هفت آمایش سرزمین چگونه است؟ اهمیت و ضرورت این پژوهش از آن‌جا ناشی می‌شود که تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در برابر سیل نه‌تنها به‌عنوان یک نیاز فوری در کاهش خسارات جانی و مالی مطرح است، بلکه عنصری کلیدی در تحقق توسعه پایدار نواحی روستایی نیز به شمار می‌آید. در شرایطی که تغییرات اقلیمی و کاربری‌های ناپایدار زمین احتمال وقوع سیلاب‌های شدیدتر را افزایش داده‌اند، نبود شاخص‌های روشن و نظام‌مند در برنامه‌ریزی فضایی، منجر به تداوم آسیب‌پذیری و کاهش ظرفیت تطابق‌پذیری روستاها شده است. با توجه به نقش حیاتی روستاها در امنیت غذایی، حفظ منابع طبیعی و پایداری اجتماعی، ارزیابی شاخص‌های تاب‌آوری کالبدی در بستر برنامه‌ریزی فضایی می‌تواند زمینه‌ساز طراحی مداخلات اثربخش، بهینه‌سازی تخصیص منابع، و تقویت هماهنگی نهادی در مدیریت بحران باشد. از این‌رو، انجام این پژوهش نه‌تنها پاسخگوی یک نیاز علمی و کاربردی در سطح منطقه‌ای است، بلکه می‌تواند الگویی برای سیاست‌گذاری کلان در سایر نواحی مستعد خطر نیز فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

مفهوم تاب‌آوری از قرن هفدهم میلادی مطرح شده و از ابتدا به قدرت پژواک و توانایی بازگشت به حالت اولیه اشاره داشته است (الکساندر^۱، ۲۰۱۳). در دهه‌های اخیر، این مفهوم به طور چشمگیری در مدیریت بلایا و برنامه‌ریزی فضایی تکامل یافته است. توبین^۲ (۱۹۹۹) تاب‌آوری را با پایداری پیوند داده و بر لزوم کاهش آسیب‌ها، اصلاح سیاست‌های ناکارآمد و رفع نابرابری‌های اجتماعی تاکید کرده است. ادگر^۳ (۲۰۰۰) با معرفی تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیکی، اهمیت ارتباط متقابل جوامع انسانی و محیط‌زیست طبیعی را برجسته ساخت.

مطالعات بعدی نشان داد که پیاده‌سازی استراتژی‌های تاب‌آور، اگرچه نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالایی است، اما در بلندمدت منافع قابل توجهی در کاهش ریسک و توسعه پایدار دارد (ویس و همکاران^۴، ۲۰۰۳). رویکردهای سنتی مانند افزایش دایک‌ها، با ایجاد حس امنیت کاذب، ممکن است به افزایش آسیب‌پذیری منجر شوند؛ در حالی که راهبردهای تاب‌آوری با تاکید بر انعطاف‌پذیری، برای مواجهه با تغییرات اقلیمی آتی مناسب‌ترند (ون و همکاران، ۲۰۲۳). لوپز و چاکرت^۵ (۲۰۱۱) بر نقش مهم یادگیری اجتماعی، همکاری‌های مؤثر و تنوع گزینه‌های مدیریتی در افزایش تاب‌آوری جوامع محلی تاکید دارند. لیائو^۶ (۲۰۱۲) نیز تغییر پارادایم مدیریت سیلاب را از طریق بهره‌گیری از اراضی قابل سیل‌پذیر و بهبود ظرفیت‌های بازسازی محلی ضروری می‌داند و استدلال می‌کند که وابستگی صرف به زیرساخت‌های مهندسی در مواجهه با عدم قطعیت‌های اقلیمی ناکارآمد است.

چالش‌های عملیاتی تاب‌آوری نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ زونبرگن و همکاران (۲۰۲۰) بر اهمیت چارچوب‌های اجتماعی-اکولوژیکی در تقویت تاب‌آوری تاکید دارند، اما به موانعی مانند اندازه‌گیری تاب‌آوری و موانع ذهنی اشاره می‌کنند. آفریانی^۷ و همکاران (۲۰۲۲) عدم توجه به تفاوت‌های توپوگرافی و تنوع ریسک‌ها را عامل کاهش اثربخشی اقدامات در برنامه‌ریزی فضایی می‌دانند. منگ و همکاران^۸ (۲۰۲۲) نیز اینرسی نهادی و وابستگی به راه‌حل‌های مهندسی را مانع حرکت به‌سوی راهبردهای مبتنی بر طبیعت می‌دانند و بر ضرورت حمایت نهادی، پاسخ به نیازهای اجتماعی-اقتصادی و هماهنگی بین بخشی تاکید دارند. اوکس^۹ و همکاران (۲۰۲۲) موانعی چون چالش‌های کالبدی، ناهماهنگی سازمانی، نبود آگاهی و مسائل مالی را از مهم‌ترین موانع اجرای برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آور برشمرده و مشارکت فعال ذی‌نفعان را راهکار آن می‌دانند. همچنین، کداگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲) بر تفاوت ظرفیت تاب‌آوری در جوامع مختلف بر اساس شرایط مکانی و زیرساختی تاکید کرده و بهره‌گیری از برنامه‌ریزی مشارکتی را ضروری می‌دانند. سولین و اسلادکوا و مادایوا (۲۰۲۳) در اسلواکی به ناکارآمدی تمرکزگرایی و تکیه بر زیرساخت‌های فنی در کاهش ریسک سیل اشاره کرده و لزوم واگذاری اختیارات به نهادهای محلی و رویکردهای مبتنی بر طبیعت را برجسته ساخته‌اند.

¹ Alexander

² Tobin

³ Adger

⁴ Vis et al

⁵ López-Marrero & Tschakert

⁶ Liao

⁷ Afriyane

⁸ Meng et al

⁹ Oukes

¹⁰ Kodag

در ایران، پژوهش‌های متعددی به این موضوع پرداخته‌اند. بدری و همکاران (۱۳۹۲) به نقش مدیریت محلی در اصول مدیریت بلایای طبیعی و تقویت تاب‌آوری مکانی در نواحی روستایی اشاره کرده‌اند. رمضان‌زاده لسبویی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که تاب‌آوری در مناطق گردشگری تحت تأثیر عواملی مانند وضعیت اقتصادی، دسترسی به منابع طبیعی و مشارکت اجتماعی متفاوت است. دلشاد و همکاران (۱۴۰۲) نیز تأکید کردند که برنامه‌ریزی فضایی با استفاده از چارچوب‌های مؤثر می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری شهری ایفا کند و مؤلفه‌هایی چون آمادگی، تغییرپذیری، استحکام، سازگاری، انعطاف‌پذیری و خودسازمان‌یافتگی را عناصر کلیدی در طراحی مدل‌های تاب‌آور شهری معرفی کردند. در مجموع، ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مفهوم تاب‌آوری در مدیریت بلایا، به ویژه در حوزه برنامه‌ریزی فضایی، از تمرکز صرف بر رویکردهای فنی و زیرساختی به سوی چارچوب‌های چندبعدی، تعاملی و انعطاف‌پذیر حرکت کرده است. راه‌حل‌های سنتی به تنهایی کارآمد نیستند و باید جای خود را به رویکردهای نوین مبتنی بر راهکارهای طبیعت‌محور، ظرفیت‌های خودسازمان‌یافته جوامع محلی، مشارکت عمومی و یادگیری اجتماعی بدهند. تحقق تاب‌آوری نیازمند هماهنگی بین‌نهادی، حمایت ساختاری نهادها، بازنگری در نقش برنامه‌ریزی فضایی در مدیریت ریسک و شناخت پیوندهای میان مؤلفه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی است. بنابراین، طراحی و توسعه چارچوب‌های برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آور باید بر مبنای اصولی همچون سازگاری، انعطاف‌پذیری، مشارکت‌محوری و ارتقای آگاهی نسبت به ریسک صورت گیرد تا بتواند کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تطبیق‌پذیری جوامع در برابر بلایای طبیعی را تضمین کند.

مبانی نظری تحقیق

تحلیل مخاطرات در جغرافیای برنامه‌ریزی مدرن، دیگر صرفاً مطالعه پدیده‌های فیزیکی و قهری طبیعت نیست، بلکه بازشناسی تعاملات پیچیده میان سیستم‌های انسانی و محیطی است که در آن «مخاطره» به عنوان یک برساخت اجتماعی-فضایی تبیین می‌شود. در واقع، مخاطره زمانی بروز می‌کند که الگوهای سکونت و فعالیت‌های انسانی در تضاد با توان اکولوژیک سرزمین قرار گیرند؛ لذا در برنامه‌ریزی روستایی، شناخت ماهیت مخاطره به معنای درک عدم قطعیت‌هایی است که پایداری زیست‌بوم را تهدید می‌کنند. این تهدیدات در جوامع روستایی به دلیل وابستگی معیشتی مستقیم به منابع طبیعی و ضعف در زیرساخت‌های حفاظتی، ابعادی دوچندان می‌یابد. از منظر فضایی، مخاطره محصول توزیع ناعادلانه منابع و استقرار نامتناسب کالبد در پهنه‌های آسیب‌پذیر است که بر اساس دیدگاه ابراهیم و سیبا^۱ (۲۰۲۰)، این توزیع متأثر از ساختارهای سیاسی و منافع ایدئولوژیک است که بر نحوه چیدمان فضا حاکم است. بنابراین، نقطه عزیمت در تحلیل مخاطرات، نه خود پدیده، بلکه ساختار برنامه‌ریزی است که اجازه استقرار در کانون خطر را صادر کرده است. در این میان، سیلاب به عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات هیدرولوژیک، به دلیل خصلت تکرارشوندگی و دامنه اثر گسترده بر کالبد سکونتگاه‌ها، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات جغرافیایی دارد.

سیلاب در ادبیات نوین مدیریت ریسک، صرفاً یک جریان مازاد آب نیست، بلکه آزمونی برای سنجش کارآمدی برنامه‌ریزی فضایی در مناطق روستایی محسوب می‌شود. افزایش خسارات ناشی از سیل در دهه‌های اخیر، بیش از آنکه محصول تغییرات اقلیمی صرف باشد، ناشی از تمرکز غیرکارشناسی جمعیت در حاشیه رودخانه‌ها و بهره‌برداری ناپایدار از اراضی است (یونیتا و ناگاوسیوک^۲، ۲۰۲۱). در این راستا، تفکیک میان سه سطح پدیدارشناختی شامل

^۱ Ibrahim & Siiba

^۲ Ionita & Nagavciuc

«سیل» به مثابه یک فرآیند طبیعی، «مخاطره سیل» به عنوان تلاقی این فرآیند با زیستگاه‌های انسانی، و «سانحه سیل» به عنوان پیامد نهایی ناشی از فروپاشی سیستم‌های حفاظتی، برای یک محقق ضروری است (کوانگ و لیائو^۱، ۲۰۲۰). واقعیت این است که سیلاب در ذات خود می‌تواند بخشی از چرخه حیات و توسعه باشد، اما زمانی به سانحه بدل می‌شود که جوامع انسانی در فرآیند «مکان‌یابی» و «طراحی کالبدی»، منطق هیدرولوژیک سرزمین را نادیده بگیرند. بوبک^۲ و همکاران (۲۰۱۲) به درستی اشاره می‌کنند که مدیریت سیلاب باید از پارادایم صلب «پیشگیری کامل» به سمت مدل‌های «مدیریت ریسک و کاهش خسارت» حرکت کند؛ چرا که تلاش برای کنترل مطلق طبیعت در بلندمدت به شکست زیرساخت‌های مهندسی می‌انجامد. این تغییر پارادایم، مستقیماً به مفهوم «تاب‌آوری» گره می‌خورد؛ جایی که هدف برنامه‌ریزی، نه حذف سیل، بلکه ارتقای ظرفیت سیستم برای مواجهه با آن است.

تاب‌آوری در ادبیات برنامه‌ریزی فضایی، واکنشی استراتژیک به ناتوانی رویکردهای سنتی در مقابله با عدم قطعیت‌هاست. این مفهوم که ریشه در دیدگاه‌های اکولوژیک هالینگ (۱۹۷۳) دارد، بر این اصل استوار است که اختلالات بخشی جدایی‌ناپذیر از پویایی سیستم‌ها هستند. در برنامه‌ریزی روستایی، تاب‌آوری به معنای توانایی سکونتگاه در جذب شوک‌های ناشی از سیل، حفظ عملکردهای اساسی و بازسازی سریع بدون از دست دادن هویت اجتماعی-اقتصادی است (لیائو، ۲۰۱۲). با این حال، باید هوشیار بود که تاب‌آوری با «مقاومت» هم‌معنا نیست؛ در حالی که مقاومت بر استفاده از زیرساخت‌های فنی و سازه‌ای (دیواره‌های بتنی و سدها) برای سد کردن راه سیل تأکید دارد، تاب‌آوری بر انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری کالبدی تمرکز می‌کند (رستمایر^۳ و همکاران، ۲۰۱۵؛ هگر^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). یک سیستم تاب‌آور، سیستمی است که «شکست امن» (Safe-to-Fail) را به جای «ایمنی از شکست» (Fail-Safe) می‌پذیرد. این بدان معناست که برنامه‌ریزی فضایی باید به گونه‌ای طراحی شود که حتی در صورت وقوع سیلاب‌های بی‌سابقه و شکست احتمالی محافظ‌های فیزیکی، ساختار کلی سکونتگاه فرو نپاشد و جان و مال ساکنان به واسطه طراحی هوشمندانه فضا حفظ گردد. این رویکرد، نیازمند پیوند میان یادگیری سازمانی، بازتاب‌پذیری و پذیرش سناریوهای مختلف در فرآیند برنامه‌ریزی است (داودی^۵ و همکاران، ۲۰۱۲).

در این میان، «تاب‌آوری کالبدی» به عنوان ملموس‌ترین بعد تاب‌آوری در سکونتگاه‌های روستایی، بر پایداری و عملکرد زیرساخت‌های حیاتی همچون شبکه معابر، سیستم‌های آبرسانی، انرژی، و به ویژه کیفیت ابنیه و مسکن تمرکز دارد (طارق^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). زیرساخت‌های کالبدی در روستاها اغلب به دلیل فرسودگی یا عدم رعایت استانداردهای فنی در مواجهه با سیلاب، به جای آنکه نقش حفاظتی ایفا کنند، خود به عامل تشدید بحران تبدیل می‌شوند. رضایی (۱۳۸۹) به درستی تبیین می‌کند که تاب‌آوری کالبدی نه تنها شامل استحکام بنا، بلکه شامل ظرفیت‌هایی نظیر وجود فضاهای تخلیه اضطراری، پناهگاه‌های موقت و تسهیلات درمانی در دسترس است. چالش اساسی در مناطق روستایی، پارادوکس میان نیاز به توسعه کالبدی و محدودیت‌های محیطی است. برای حل این چالش، برنامه‌ریزی فضایی باید از نگاه صرفاً مهندسی (زیرساخت‌های خاکستری) فراتر رفته و به سمت تلفیق آن با راهکارهای مبتنی بر طبیعت و زیرساخت‌های سبز حرکت کند. تاب‌آوری کالبدی یک وضعیت ایستا نیست؛ بلکه یک

¹ Kuang & Liao

² Bubeck

³ Restemeyer

⁴ Hegger

⁵ Davoudi

⁶ Tariq

فرآیند انطباق‌پذیری مداوم است که اگر با به‌روزرسانی دانش محلی و استانداردهای فنی همراه نشود، در برابر رژیم‌های متغیر سیلابی شکست خواهد خورد (کوانگ و لیائو، ۲۰۲۰).

برنامه‌ریزی فضایی در این پژوهش، به عنوان ابزار حکمرانی و چارچوب کلان مدیریت سرزمین، وظیفه دارد تا ابعاد مختلف تاب‌آوری را در کالبد مکان متبلور سازد. کمیسیون اروپا^۱ (۱۹۹۷) و مورفت^۲ (۲۰۱۰) برنامه‌ریزی فضایی را روشی برای تأثیرگذاری بر توزیع آتی فعالیت‌ها در فضا می‌دانند که فراتر از تصمیم‌گیری‌های خرد فردی است. در واقع، برنامه‌ریزی فضایی در مقیاس‌های ملی و منطقه‌ای (نظیر منطقه هفت آمایش سرزمین)، باید بتواند میان الزامات اکولوژیکی و عملکردهای فضایی تعادل برقرار کند (اودوچ^۳، ۲۰۰۷). این نوع برنامه‌ریزی در مواجهه با سیلاب، از طریق ابزارهایی نظیر زون‌بندی اراضی، تعیین حریم‌های ساخت‌وساز و جانمایی بهینه زیرساخت‌ها، از شکل‌گیری آسیب‌پذیری‌های جدید جلوگیری می‌کند. کداگ و همکاران (۲۰۲۲) تأکید می‌کنند که به دلیل ماهیت مکانی بلایای طبیعی، رویکرد فضایی تنها بستری است که می‌تواند راهکارهای یکپارچه را برای کاهش اثرات بلایا تدوین کند. این فرآیند تنها یک اقدام فنی نیست، بلکه با مفاهیم هنجاری همچون عدالت فضایی گره خورده است (واتسون^۴، ۲۰۰۲)؛ چرا که در بسیاری از مناطق روستایی، ناتوانی کالبدی در برابر سیل، بازتابی از عدم دسترسی عادلانه به منابع و خدمات برنامه‌ریزی است.

در نهایت، سنتز مفاهیم فوق نشان می‌دهد که تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در برابر سیل، محصول مستقیم کیفیت برنامه‌ریزی فضایی است. اگر برنامه‌ریزی فضایی نتواند پویایی‌های هیدرولوژیک را در الگوهای توسعه کالبدی ادغام کند، هرگونه تلاش برای مقاومت‌سازی ابنیه، تنها مسکنی موقت خواهد بود. یک استراتژی مدیریت ریسک تاب‌آور، بر اساس دیدگاه زونبرگن^۵ (۲۰۲۰)، باید ترکیبی از حفاظت، پیشگیری و آمادگی را در بر بگیرد که تمامی احتمالات، از سیل‌های معمول تا حوادث حدی را پوشش دهد. در منطقه هفت آمایش سرزمین، که با تنوع جغرافیایی و آسیب‌پذیری‌های خاص روستایی مواجه است، برنامه‌ریزی فضایی باید بر اساس شناسایی دقیق شاخص‌های تاب‌آوری کالبدی و ظرفیت‌سازی نهادی عمل کند. این امر مستلزم آن است که ساختار نهادی برنامه‌ریزی در سطوح مختلف حاکمیتی (آچیمپونگ^۶، ۲۰۱۸) از یک مدل متمرکز و صلب به یک مدل منعطف و مشارکت‌محور تغییر یابد تا بتواند تضاد منافع را مدیریت نموده و پایداری بلندمدت سکونتگاه‌ها را در برابر مخاطرات تضمین کند. بنابراین، تاب‌آوری کالبدی نه یک هدف نهایی، بلکه مسیری است که از مجرای برنامه‌ریزی فضایی هوشمند و عدالت‌محور می‌گذرد. جدول (۱) یک دسته‌بندی کلی از اقدامات سیاستی در زمینه برنامه‌ریزی فضایی برای مدیریت ریسک سیل ارائه می‌دهد. این دسته‌بندی پنج نوع اقدام اصلی را شامل می‌شود: پیشگیری (اجتناب)، دفاع، کاهش اثرات، آمادگی، و بازیابی که هر یک بر اساس هدف محوری خود تعریف شده‌اند. در این چارچوب، برنامه‌ریزی فضایی دو نقش کلیدی ایفا می‌کند: از یک سو، به‌عنوان رویکردی غیرسازه‌ای، از طریق سیاست‌ها و مقررات، در جهت جلوگیری از توسعه در مناطق مستعد سیل (پیشگیری) یا ساماندهی مسیرهای تخلیه (آمدگی) مؤثر است. از سوی دیگر، این نوع برنامه‌ریزی می‌تواند در اصلاح و تغییر زیرساخت‌های کالبدی نیز نقش داشته باشد؛

¹ European Commission

² Morphet

³ Udovč

⁴ Watson

⁵ Zevenbergen

⁶ Acheampong

به عنوان نمونه با طراحی راه حل های مهندسی چندمنظوره (دفاع)، راهکارهای مبتنی بر طبیعت (کاهش اثرات)، و اجرای طرح های بازسازی در مرحله پس از بحران (بازیابی) (منگ و همکاران^۱، ۲۰۲۲؛ منگ و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۱: دسته بندی اقدامات راهبردی مقابله با مخاطره سیلاب در برنامه ریزی فضایی

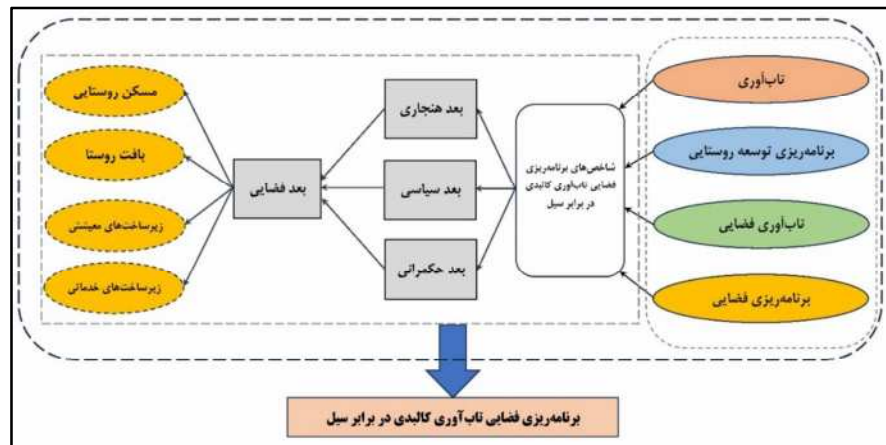
اقدامات	عملکرد	بیانیه ها در سیاست گذاری های برنامه ریزی / مقررات	مداخلات ساختاری و غیرساختاری تحت تأثیر واقع شده در عمل
جلوگیری	کنترل توسعه فضایی در نواحی مستعد سیل و جلوگیری از پیامدهای منفی سیل	طرح های پهنه بندی دشت سیلابی؛ طرح های تملک زمین و جابه جایی چندمنظوره و چند کارکردی	ترتیب بندی عملکردی (شرکت های اقتصادی، مسکونی و تفریحی)
دفاع	جلوگیری از ورود آب ناشی از سیل	اقدامات مهندسی چندمنظوره و چند کارکردی برای اوقات فراغت، منظر و تجارت	- دایک ها، دیوارهای سیل بند یا دیوارهای اسکله ^۲ (جلوگیری، ترکیب ساختمان های مسکونی و توسعه تجاری و سبز) - مخازن (ذخیره آب، تأمین آب، چشم انداز طبیعی و تفریحی)
کاهش اثرات	کاهش ضرر	زیرساخت های مبتنی بر طبیعت برای حوضه های آبگیر، نگهداری و معابر سیل	- ایجاد حایل های سبز و نواحی مهارکننده سیل - ایجاد و حفظ تالاب ها، دریاچه ها و کریدورهای سبز-آبی - راه های آبی و کانال ها تخلیه، سبز کردن و بهبود - اقدامات توسعه کم اثر / سیستم زهکشی پایدار (باغ های بارانی، سنگفرش های نفوذپذیر، بام های سبز)
آمادگی	سازماندهی واکنش های مؤثر در حوادث سیل	طرح های تخلیه؛ آرایش بندی پناهگاه های امن؛ کنترل ساختمان ها	- بهینه سازی شبکه های جاده ای - ایجاد پناهگاه های امن - ساختمان ها ضد آب (الوارهای متحرک، دیوارهای حائل آب)
بازیابی	کمک به بازیابی مناسب و سریع پس از وقوع سیل	طرح پس از بهبودی؛ حفاظت از زیرساخت های حیاتی	- بازسازی ساختمان - مکان یابی (مجدد) و تقویت ساختمان های پشتیبان مانند تولید برق، مراکز بهداشتی-درمانی و ایستگاه های پلیس

مأخذ: منگ و همکاران، ۲۰۲۰

برنامه ریزی فضایی تاب آوری کالبدی در روستاهای در معرض سیل به مکانیسم ها و سازوکارهایی گفته می شود که با استفاده از سازماندهی فضاهای زیست و فعالیت انسان سبب افزایش توانایی ایستادگی، مقاومت و واکنش مثبت محیط کالبدی روستا در برابر سیل می شود. این نوع برنامه ریزی، نه تنها بر ساخت و بهبود زیرساخت های فیزیکی و مهندسی، بلکه بر تقویت نهادها، سیاست ها و شبکه های اجتماعی نیز متمرکز است تا بتواند سیستم های اجتماعی و اکولوژیکی را مقاوم تر و تطبیق پذیرتر کند (اسدی و همکاران، ۱۴۰۴). به طور کلی، شکل ۱ مدل مفهومی برنامه ریزی فضایی تاب آوری کالبدی سکونتگاه های روستایی در مواجهه با سیل، حاصل تلفیقی نظام مند از چهار بنیان نظری اصلی شامل نظریه تاب آوری، نظریه تاب آوری فضایی، نظریه برنامه ریزی فضایی و برنامه ریزی توسعه روستایی است که در قالب ابعاد مفهومی و متغیرهای عملیاتی تدوین شده است. این مدل با تمرکز بر تعامل میان مؤلفه های برنامه ریزی فضایی (شامل ابعاد هنجاری، حکمروایی، سیاست گذاری و فضایی) و ابعاد تاب آوری کالبدی (مانند استحکام، تدبیر، انعطاف پذیری و...)، چارچوبی مفهومی برای تحلیل آمادگی و ظرفیت سکونتگاه های روستایی در چهار حوزه فضایی کلیدی یعنی مسکن، بافت روستا، زیرساخت های معیشتی و خدماتی فراهم می آورد.

¹ Meng et al

² quay walls

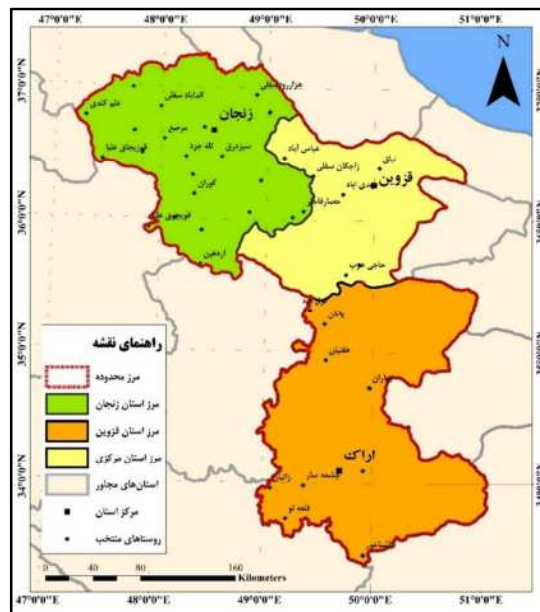


شکل ۱: مدل مفهومی برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در مواجهه با سیل

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در جلسه مورخ ۱۳۹۶/۰۵/۰۲ کمیسیون دائمی شورای عالی آمایش سرزمین، منطقه‌بندی ۹ گانه کشور که به تصویب رسید که بر اساس آن منطقه هفت شامل استان‌های مرکزی، زنجان و قزوین می‌شود. در مجموع تعداد ۴۱۷۳ روستا در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که از این تعداد، ۱۶۰۱ روستا در استان مرکزی، ۱۳۱۸ روستا در استان زنجان و ۱۲۵۴ روستا نیز در استان قزوین قرار دارند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، روستاهای نمونه دارای ۹۹۱۰ نفر جمعیت در قالب ۳۱۶۱ خانوار بودند، از این تعداد جمعیت، ۳۴۱۹ نفر مربوط به روستاهای نمونه استان مرکزی در قالب ۱۱۲۹ خانوار و ۲۲۸۰ نفر مربوط به روستاهای استان قزوین در قالب ۷۶۱ خانوار و ۴۲۱۱ نفر مربوط به روستاهای نمونه استان زنجان در قالب ۱۲۷۱ خانوار بودند. اکثر منطقه در دو حوزه آبریز دریای خزر (حوضه آبریز فرعی سفیدرود) و حوضه آبریز فلات مرکزی (حوضه آبریز فرعی دریاچه نمک) قرار دارد. بارش باران در منطقه با افزایش ارتفاعات افزایش می‌یابد و میانگین بارش ۵۰۰-۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است که با رویکرد کمی و استراتژی تحلیلی-تطبیقی انجام شده است. گردآوری داده‌ها در دو بخش اسنادی (کتابخانه‌ای) و میدانی صورت گرفت. در مرحله نخست، شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی و تاب‌آوری کالبدی در برابر سیل، از طریق مرور نظام‌مند متون علمی و تجارب جهانی استخراج و با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک منطقه ۷ آمایش کشور تطبیق داده شدند. ابزار سنجش پژوهش، پرسش‌نامه‌ای محقق‌ساخته بود که گویه‌های آن بر اساس طیف پنج‌گزینه‌ای لیکرت تنظیم گردید. روایی صوری و محتوایی ابزار توسط پنل خبرگان (شامل ۱۰ نفر از اساتید دانشگاهی در رشته‌های برنامه‌ریزی روستایی و مدیریت بحران و ۵ نفر از متخصصان اجرایی استانداری و بنیاد مسکن) مورد تأیید قرار گرفت. پایایی پرسش‌نامه نیز با محاسبه ضریب آلفای کرونباخ در هر دو گروه کارشناسان و روستاییان به ترتیب ۰/۷۷۵ و ۰/۷۵۴ احراز شد که بیانگر ثبات درونی مناسب ابزار است. در بخش تحلیل داده‌ها، پیش‌فرض‌های استفاده از آزمون‌های پارامتریک مورد بررسی قرار گرفت. نرمال بودن توزیع متغیرهای اصلی با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و شاخص‌های چولگی و کشیدگی ارزیابی شد. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) در سطح معناداری بالاتر از ۰/۰۵ و قرار گرفتن مقادیر چولگی و کشیدگی در دامنه قابل قبول (± 2)، بیانگر عدم انحراف معنادار از توزیع نرمال بود. همچنین با توجه به حجم بالای نمونه در هر دو گروه (بیش از ۳۰ نفر)، بر اساس قضیه حد مرکزی، توزیع میانگین‌ها به نرمال نزدیک شده و استفاده از آزمون‌های پارامتریک توجیه‌پذیر است. همگنی واریانس‌ها نیز از طریق آزمون لون (Levene's Test) بررسی و تأیید شد. بر این اساس، برای ارزیابی وضعیت شاخص‌ها نسبت به حد مطلوب نظری (عدد ۳ در طیف لیکرت)، از آزمون T تک‌نمونه‌ای (One-Sample T-Test) و برای تحلیل تضاد و مقایسه دیدگاه دو جامعه مورد مطالعه (کارشناسان و مردم محلی)، از آزمون T مستقل (Independent Samples T-Test) استفاده شد. جدول ۲ ابعاد و شاخص‌های پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۲: ابعاد و شاخص‌های پژوهش

ابعاد	شاخص	مآخذ
برنامه‌ریزی فضایی	هماهنگی	آچیمپونگ (۲۰۱۸)؛ وانسون (۲۰۰۲)
	انسجام و سازگاری	
	اثربخشی	
	تأثیرگذاری	
	برابری و پایداری	
	مشارکت	مورفت (۲۰۱۰)؛ آدلر ^۱ (۲۰۱۱)؛ نیکل ^۲ و همکاران (۲۰۲۱)؛ بریشا ^۳ و همکاران (۲۰۲۱)؛ نوواک ^۴ و همکاران (۲۰۲۱)؛ خلیفه (۱۳۹۵)؛ افتخاری و بدری (۱۳۹۱)
	پاسخگویی	
	مسئولیت‌پذیری	
	قانون محوری	
	شفافیت	
	کارایی	
	عدالت و برابری	
	توافق جمعی (اجماع محوری)	
	سیاسی	دوئر ^۵ (۲۰۲۳)؛ استید ^۶ (۲۰۲۱)؛ ابراهیم و سیبا (۲۰۲۰)؛ لوکونن ^۷ (۲۰۱۵)؛ آلمندینگر و هاگتون ^۸ (۲۰۱۲)
	اتخاذ سیاست‌ها	
	اجرای سیاست‌ها	
	حفظ سیاست‌ها	
	تأثیرگذاری سیاست‌ها	
بعد فضایی	مسکن	پورطاهری (۱۳۹۶) پورطاهری و همکاران (۱۳۸۹)
	بافت روستا	
	زیرساخت‌های معیشتی	
	زیرساخت‌های خدماتی	
تاب‌آوری کالبدی	استحکام	استید (۲۰۲۱)؛ زونبرگن و همکاران (۲۰۲۰)؛ برونتا و همکاران (۲۰۱۹)؛ شریفی و یagamata ^۹ (۲۰۱۸)؛ رضایی (۱۳۸۹)
	افزونگی	
	تدبیر	
	سرعت	
	بازتاب	
	انعطاف‌پذیری	
	یکپارچه‌سازی	
	استحکام سازه‌های مسکن، زیرساخت‌های خدماتی، زیرساخت‌های معیشتی	
تاب‌آوری کالبدی	تنوع مسیرها، منابع پشتیبان، تجهیزات جایگزین	استید (۲۰۲۱)؛ زونبرگن و همکاران (۲۰۲۰)؛ برونتا و همکاران (۲۰۱۹)؛ شریفی و یagamata ^۹ (۲۰۱۸)؛ رضایی (۱۳۸۹)
	منابع انسانی، مالی، اطلاعاتی و فناورانه	
	نرخ تعمیر، بهبود عملکرد، زمان بازسازی	
	سیاست‌های اصلاح‌شده پس از بحران، وجود مکانیزم‌های ارزیابی و بازخورد، مستندسازی درس‌آموخته‌ها، نهادهای مسئول برای تحلیل و به‌روزرسانی برنامه‌ها، انعکاس تجربیات گذشته در برنامه‌های جدید	
	تنوع گزینه‌های پاسخ اضطراری، قابلیت تغییر کاربری فضاهای شهری در بحران، اصلاح‌پذیری قوانین و مقررات، سطح مشارکت عمومی در تصمیم‌گیری	
	هماهنگی و همسویی مؤثر میان نهادهای گروه‌های اجتماعی، سازمان‌های محلی، یکپارچگی داده‌ها و سامانه‌های هشدار	
	استحکام سازه‌های مسکن، زیرساخت‌های خدماتی، زیرساخت‌های معیشتی	
	تنوع مسیرها، منابع پشتیبان، تجهیزات جایگزین	

¹ Adler

² Knickel

³ Berisha

⁴ Nowak

⁵ Dühr

⁶ Stead

⁷ Luukkonen

⁸ Allmendinger and Haughton

⁹ Sharifi, A., & Yamagata

مآخذ	شاخص	ابعاد	
مگ و همکاران (۲۰۲۲)؛ اوکس و همکاران (۲۰۲۲)؛ عبدالموتی و همکاران (۲۰۲۱)؛ مگ و همکاران (۲۰۲۰)؛ برک و کامپانلا ^۱ (۲۰۰۶)	زیرساخت مقاوم اولیه، طراحی مقاوم سازه‌ها (مانند تپه‌های سکونت)، زیرساخت حیاتی مقاوم (آب، برق، اینترنت)، دایک‌های تقسیم‌کننده	مقاومت	تاب‌آوری در برابر سیل
	وجود سیستم‌های هشدار سریع و اقدامات پیشگیرانه، دسترسی به منابع و امکانات برای نجات و کمک به آسیب‌دیدگان، سرعت واکنش و هماهنگی تیم‌های امدادی	مقابله	
	زمان بازسازی زیرساخت‌ها و خدمات عمومی، سطح بازسازی خانه‌ها و تأسیسات آسیب‌دیده در کمترین زمان ممکن	بازیابی	
	طراحی قابل‌انعطاف برای آینده، استفاده از زیرساخت‌های سبز-آبی، ظرفیت نفوذ و ذخیره آب در محل، ظرفیت سازگاری نهادها و سازمان‌ها، انعطاف در فرآیندهای برنامه‌ریزی	سازگاری	

مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۴۰۴

در منطقه هفت آمایشی ایران، به‌دلیل گستردگی پهنه جغرافیایی و تعدد بالای سکونتگاه‌ها، به‌جای استفاده از حوضه‌های آبریز، تقسیمات سیاسی به‌عنوان واحد تحلیل انتخاب شد تا انطباق‌پذیری نتایج با ساختار مدیریتی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای حفظ گردد. انتخاب ۲۵ روستای نمونه طی فرآیندی چهارمرحله‌ای انجام گرفت؛ بدین صورت که ابتدا با بهره‌گیری از روش SWARA و تلفیق لایه‌های ارتفاع، شیب، بارش، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و فرسایش خاک در محیط ArcGIS، نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب تهیه و ۱۸ شهرستان با ریسک بالا شناسایی شد. سپس با اعمال بافر ۵۰۰ متری پیرامون رودخانه‌های اصلی، ۵۵۶ روستا مشخص گردید و در گام بعد، با انطباق داده‌های خسارات سیل فروردین ۱۳۹۸، ۲۲۳ روستای دارای سابقه تخریب یا تعمیرات استخراج شد. در نهایت، با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی و اصل پراکنش جغرافیایی، ۲۵ روستا به‌صورت تصادفی انتخاب شدند که شامل ۸ روستا در استان زنجان، ۹ روستا در استان قزوین و ۸ روستا در استان مرکزی است. جامعه آماری شامل دو گروه ۳۷۵ نفر از سرپرستان خانوار روستایی (با توزیع متوازن بین زارع، دامدار و باغدار در هر روستا) و ۸۶ نفر از کارشناسان حوزه مدیریت بحران و برنامه‌ریزی روستایی از نهادهای مرتبط نظیر بنیاد مسکن، منابع آب، منابع طبیعی و پدافند غیرعامل می‌باشند. این ترکیب امکان مقایسه تحلیلی و چندسطحی شاخص‌های تاب‌آوری کالبدی را در سطح منطقه فراهم ساخت.

یافته‌های تحقیق

تحلیل یافته‌های حاصل از آزمون T تک‌نمونه‌ای در جدول ۳، گویای وجود یک «شکاف ادراکی معنادار» و بنیادین میان ذینفعان محلی و نخبگان ابزاری (کارشناسان) در ارزیابی شاخص‌های برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی در منطقه هفت آمایش سرزمین است. تفاوت فاحش میان میانگین کل نظرات روستاییان ($M=2.21$) و کارشناسان ($M=2.65$)، فراتر از یک اختلاف آماری ساده، نشان‌دهنده گسست میان «واقعیت زیسته» در محیط روستایی و «گزارش‌های ساختاری» در نظام برنامه‌ریزی است. در تبیین چرایی این واگرایی، بیشترین تعارض در بُعد «حکمرانوی» مشاهده می‌شود؛ جایی که کارشناسان با میانگین ۳/۲۳ وضعیت را فراتر از سطح مطلوب ارزیابی کرده‌اند، اما روستاییان با میانگین نازل ۲/۱۴، به شدت نسبت به کارکردهای مدیریتی و اجرایی معترض هستند. این

¹ Berke and Campanella

تضاد ریشه در آن دارد که کارشناسان غالباً بر اساس اسناد بالادستی، بودجه‌های مصوب و ساختارهای صوری، حکمروایی را «موجود» و «کافی» می‌بینند، در حالی که روستاییان، کیفیت حکمروایی را در اثربخشی عینی آن در زمان بحران، توزیع عادلانه منابع و شفافیت فرآیندهای بازسازی جستجو می‌کنند که از دید آن‌ها محقق نشده است. در ابعاد «هنجاری» و «سیاسی»، اگرچه هر دو گروه بر وضعیت نامطلوب اتفاق نظر دارند، اما شدت بدبینی در جامعه محلی به مراتب عمیق‌تر است. پایین بودن میانگین بعد هنجاری نزد روستاییان ($M=2.24$) در مقایسه با کارشناسان ($M=2.42$)، نشان‌دهنده ناکارآمدی قوانین و مقررات ساخت‌وساز در انطباق با ویژگی‌های بومی و جغرافیایی منطقه است؛ به طوری که ضوابط برنامه‌ریزی فضایی در عمل نتوانسته‌اند به امنیت کالبدی در برابر سیل منجر شوند. همچنین در بعد سیاسی، نمرات پایین هر دو گروه بر ضعف اراده حاکمیتی در اولویت‌بخشی به تاب‌آوری روستایی صحنه می‌گذارد. علت اصلی این تفاوت دیدگاه کلان را باید در «رویکرد از بالا به پایین» حاکم بر منطقه هفت آمایش جستجو کرد. کارشناسان به دلیل نزدیکی به نهادهای قدرت و تمرکز بر شاخص‌های کمی، تمایل به خوش‌بینی مفرط نسبت به نهادهای حکمروایی دارند، اما روستاییان به عنوان خط مقدم مواجهه با مخاطرات سیل، برنامه‌ریزی فضایی را امری انتزاعی و فاقد خروجی کالبدی ملموس می‌یابند. این یافته‌ها هشدار می‌دهند که تداوم این شکاف ادراکی می‌تواند به کاهش سرمایه اجتماعی و شکست هرگونه مداخله کالبدی در سکونتگاه‌های روستایی منجر شود؛ چرا که برنامه‌ریزی بدون پشتوانه پذیرش محلی، صرفاً روی کاغذ باقی خواهد ماند.

جدول ۳: سطح معناداری متغیرهای برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی بر اساس آزمون T تک نمونه‌ای در میان کارشناسان و مردم

نوع	بعد	آماره t	درجه آزادی	سطح معناداری	میانگین	میانگین اختلاف	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
							حد کم	حد زیاد
روستاییان	حکمرانی	-۶۴/۹۲۵	۳۷۴	۰/۰۰۰	۲/۱۴	-۰/۸۶	-۰/۸۸	-۰/۸۳
	هنجاری	-۵۵/۳۴۶	۳۷۴	۰/۰۰۰	۲/۲۴	-۰/۷۶	-۰/۷۸	-۰/۷۳
	سیاسی	-۳۵/۶۳۷	۳۷۴	۰/۰۰۰	۲/۲۳	-۰/۷۷	-۰/۸۱	-۰/۷۲
	کل متغیرها	-۸۱/۱۸۰	۳۷۴	۰/۰۰۰	۲/۲۱	-۰/۷۹	-۰/۸۰	-۰/۷۶
کارشناسان	حکمرانی	۵/۴۱۱	۸۵	۰/۰۰۰	۳/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۳۲
	هنجاری	-۱۶/۱۵۰	۸۵	۰/۰۰۰	۲/۴۲	-۰/۵۸	-۰/۶۵	-۰/۵۱
	سیاسی	-۹/۸۶۲	۸۵	۰/۰۰۰	۲/۴۶	-۰/۵۴	-۰/۶۴	-۰/۴۲
	کل متغیرها	-۱۱/۴۷۶	۸۵	۰/۰۰۰	۲/۶۵	-۰/۳۵	-۰/۴۱	-۰/۲۹

تحلیل برآمده از آزمون T دو نمونه مستقل در جدول ۴، فراتر از یک تضاد آماری، بازتاب‌دهنده یک «گسست پارادایمیک» در نظام برنامه‌ریزی فضایی منطقه هفت آمایش سرزمین است. نتایج آزمون لوین با رد فرض برابری واریانس‌ها در تمامی مؤلفه‌ها، نشان می‌دهد که دو جامعه مورد مطالعه (روستاییان و کارشناسان) نه تنها در نتایج، بلکه در زیرساخت‌های فکری و توزیع دیدگاه‌های خود نسبت به تاب‌آوری کالبدی، تفاوت‌های بنیادین دارند. معناداری آماری ($p < 0.01$) در تمامی ابعاد هنجاری، سیاسی و به‌ویژه حکمروایی، مؤید این واقعیت است که میان «برنامه‌ریزی روی کاغذ» و «زیست‌جهان روستایی»، واگرایی شدیدی حاکم است. تفاوت میانگین کل (۰/۴۱-) و شکاف عمیق در بعد حکمروایی (۱/۰۲-) به نفع کارشناسان، نشان می‌دهد که نظام تخصصی، وضعیت را به مراتب مطلوب‌تر از آنچه در متن روستا جریان دارد، ارزیابی می‌کند. این اختلاف معنادار، ریشه در «سوگیری نهادی»

کارشناسان دارد؛ آن‌ها به دلیل محصور بودن در پيله‌های دیوان‌سالحاری و تمرکز بر «وندها» و «فرایندهای فرمالیستی»، صرف وجود طرح‌های هادی یا پروژه‌های پیشگیرانه را به مثابه موفقیت قلمداد می‌کنند، در حالی که روستاییان، به عنوان دینفعان نهایی، کیفیت این شاخص‌ها را با «تجربه شکست» در زمان وقوع سیل و ناکارآمدی سازه‌های کالبدی می‌سنجند. در تبیین چرایی این تفاوت دیدگاه، نباید به سادگی از گزاره «آگاهی بیشتر کارشناسان» استفاده کرد؛ چرا که این یک مغالطه تکنوکراتیک است. واقعیت آن است که کارشناسان دچار «خوش‌بینی بوروکراتیک» هستند و تاب‌آوری را امری مهندسی‌شده و کالبدی می‌بینند، اما روستاییان با «واقع‌گرایی تجربی»، شکاف میان ابنیه فنی و نیازهای حفاظتی خود را درک کرده‌اند. پایین بودن معنادار نمرات در بعد سیاسی و هنجاری نزد هر دو گروه، اگرچه نشان‌دهنده ناپایداری کلی وضعیت است، اما اصرار روستاییان بر میانگین‌های بسیار پایین‌تر، گویای آن است که «عدالت فضایی» در توزیع پروژه‌های تاب‌آوری رعایت نشده است. این نتایج ثابت می‌کند که برنامه‌ریزی فضایی در منطقه هفت، دچار بحران «اثربخشی کالبدی» است و ادراک مثبت‌تر کارشناسان، ناشی از تخصص‌گرایی انتزاعی است که از لمس مستقیم آسیب‌پذیری‌های محلی ناتوان است. لذا، رد فرض پایدار بودن شاخص‌ها، نه یک انتخاب آماری، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای بازنگری در مدل‌های تاب‌آوری است که تا کنون نتوانسته‌اند اعتماد و امنیت کالبدی را برای جامعه روستایی به ارمغان بیاورند.

جدول ۴: نتایج آزمون T دو نمونه مستقل بین گروه کارشناسان و روستائیان

مؤلفه‌ها	برابری واریانس‌ها	F	سطح معناداری	مقدار t	تفاوت میانگین	خطای استاندارد تفاوت	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
							حد بالا	حد پایین
بعد هنجاری	واریانس برابر	۱۲/۰۱۲	۰/۰۰۱	-۸/۴۸۴	-۰/۲۸	۰/۳	-۰/۲۱	-۰/۳۴
	واریانس نابرابر			-۷/۱۹۱	-۰/۲۸	۰/۴	-۰/۲۰	-۰/۳۵
بعد سیاسی	واریانس برابر	۸۶/۶۱۵	۰/۰۰۰	-۵/۸۹۸	-۰/۲۳	۰/۴	-۰/۱۵	-۰/۳۰
	واریانس نابرابر			-۴/۰۸۳	-۰/۲۳	۰/۶	-۰/۱۲	-۰/۳۴
بعد حکمروایی	واریانس برابر	۷۳/۳۷۳	۰/۰۰۰	-۳۵/۵۹۰	-۰/۱۰۲	۰/۳	-۰/۹۷	-۱۱/۸
	واریانس نابرابر			-۲۳/۳۳۵	-۰/۱۰۲	۰/۴	-۰/۹۴	-۱/۱۱
کل ابعاد	واریانس برابر	۱۱/۳۱۲	۰/۰۰۱	-۸/۷۷۷	-۰/۴۱	۰/۵	-۰/۳۲	-۰/۵۱
	واریانس نابرابر			-۱۱/۰۸۳	-۰/۴۱	۰/۴	-۰/۳۴	-۰/۴۹

نتیجه‌گیری

تحلیل مخاطرات در جغرافیای برنامه‌ریزی مدرن، فراتر از مطالعه پدیده‌های فیزیکی، بر بازشناسی تعاملات پیچیده میان سیستم‌های انسانی و محیطی استوار است، جایی که «مخاطره» نه یک واقعه طبیعی محض، بلکه یک «برساخت اجتماعی-فضایی» قلمداد می‌شود. در این پارادایم، سیلاب آزمونی برای کارآمدی برنامه‌ریزی فضایی در مناطق روستایی است و افزایش خسارات، بیش از آنکه محصول تغییرات اقلیمی باشد، ناشی از شکست ساختارهای برنامه‌ریزی در «مکان‌یابی» و «چیدمان کالبدی» است. بر اساس دیدگاه ابراهیم و سیبا (۲۰۲۰)، توزیع فضایی خطر، متأثر از ساختارهای سیاسی و منافی است که بر نحوه چیدمان فضا حاکم است؛ لذا در منطقه هفت آمایش سرزمین، ریشه آسیب‌پذیری را نباید در طغیان رودخانه‌ها، بلکه باید در پارادایم برنامه‌ریزی جستجو کرد که اجازه استقرار در کانون خطر را صادر نموده است. این تغییر نگاه از «ایمنی از شکست» به سمت «شکست امن»، جوهره تاب‌آوری را تشکیل می‌دهد که در دیدگاه‌های هالینگ (۱۹۷۳) و داودی (۲۰۱۲) بر انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری کالبدی به

جای مقاومت صلب تاکید دارد. تاب‌آوری کالبدی در سکونتگاه‌های روستایی، تنها به معنای استحکام ابنیه نیست، بلکه شامل ظرفیت‌های عملکردی زیرساخت‌ها و دسترسی به فضاهای حیاتی در زمان بحران است که رضایی (۱۳۸۹) آن را لازمه پایداری زیست‌بوم می‌داند. برنامه‌ریزی فضایی به عنوان ابزار حکمرانی، وظیفه دارد میان الزامات اکولوژیکی و عملکردهای فضایی تعادل برقرار کند (اودووج، ۲۰۰۷)، اما یافته‌های این پژوهش در منطقه هفت آمایش سرزمین، حاکی از یک «گسست بنیادین» در این تعادل است.

نتایج حاصل از آزمون‌های آماری این تحقیق، فراتر از اعداد، روایتگر یک «بحران مشروعیت و کارآمدی» در نظام برنامه‌ریزی فضایی است. میانگین کل برآورد شده توسط روستاییان (۲/۲۴) در تقابل با دیدگاه کارشناسان (۲/۶۵)، نشان‌دهنده آن است که هر دو گروه، وضعیت تاب‌آوری کالبدی را در سطح «ناپایدار» ارزیابی می‌کنند، اما شدت این بدبینی در میان جامعه محلی به مراتب عمیق‌تر است. این شکاف ادراکی، به‌ویژه در بعد حکمروایی (جایی که تفاوت میانگین به ۱/۰۲- می‌رسد)، نشان می‌دهد که کارشناسان دچار نوعی «خوش‌بینی بوروکراتیک» هستند و صرف وجود اسناد و طرح‌های هادی را به معنای تاب‌آوری می‌پندارند، در حالی که روستاییان به عنوان ذینفعان نهایی، این طرح‌ها را در مواجهه با واقعیت سیل، فاقد اثربخشی عینی می‌یابند. این یافته با مطالعات سولین و اسلادکوا مادایوا (۲۰۲۳) در اسلوواکی همخوانی دارد که بر ناکارآمدی تمرکزگرایی و تکیه بر زیرساخت‌های فنی صرف تأکید داشتند. نوآوری برجسته پژوهش حاضر که حاصل مطالعات میدانی گسترده در سه استان منطقه هفت آمایش است، نشان می‌دهد که برخلاف تصور رایج در ادبیات کلاسیک (مانند توپین، ۱۹۹۹) که ضعف تاب‌آوری را به مسائل اقتصادی نسبت می‌داد، در این منطقه، «ضعف در ابعاد هنجاری و سیاسی» عامل اصلی ناپایداری است. در واقع، قوانین ساخت‌وساز روستایی در ایران، بدون درک از «حس مکان» و واقعیات هیدرولوژیک محلی تدوین شده‌اند که این امر با یافته‌های آفریانی و همکاران (۲۰۲۲) در خصوص نادیده گرفتن تنوع ریسک‌های توپوگرافیک در برنامه‌ریزی فضایی قرابت دارد.

مقایسه تطبیقی یافته‌های این پژوهش با مطالعات جهانی نظیر کار لیائو (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که اگرچه در مقیاس جهانی حرکت به سوی «مدیریت سیلاب انطباقی» آغاز شده، اما در منطقه مورد مطالعه، همچنان پارادایم «دفاعی و سازه‌ای» حاکم است. تفاوت معنادار در بعد هنجاری (روستاییان ۲/۱۴ و کارشناسان ۲/۴۲) گویای این حقیقت است که استانداردهای فنی ابنیه در این سه استان، با توان اقتصادی و دانش بومی روستاییان همخوانی ندارد. این یافته، پژوهش ما را از مطالعاتی نظیر ویس و همکاران (۲۰۰۳) متمایز می‌کند؛ چرا که ما نشان دادیم سرمایه‌گذاری کالبدی بدون «اصلاح ساختار حکمروایی محلی»، تنها به اتلاف منابع می‌انجامد. در سطح ملی، یافته‌های ما با نتایج بدری و همکاران (۱۳۹۲) در مورد نقش مدیریت محلی همسو است، اما با این تفاوت که ما در این مطالعه برای نخستین بار، «اثر مقیاس منطقه‌ای» را در سه استان واکاوی کرده و ثابت کردیم که تفرق نهادی در سطح منطقه هفت آمایش، مانع از شکل‌گیری یک نظام یکپارچه تاب‌آوری شده است. اصالت این تحقیق در اثبات این نکته نهفته است که کارشناسان به دلیل نزدیکی به نهادهای قدرت، تمایل به بازنمایی مثبت از عملکرد خود دارند (نمره ۳/۲۴ در حکمروایی)، در حالی که واقعیت زیسته در روستاها، حکایت از فقدان عدالت فضایی در توزیع پروژه‌های ایمن‌سازی دارد.

در نهایت، نتیجه‌گیری این پژوهش بر مبنای تحلیل گسست میان «ادراک بوروکراتیک» و «واقعیت میدانی»، مجموعه‌ای از الزامات استراتژیک را برای منطقه هفت آمایش ترسیم می‌کند. نخست، باید پارادایم برنامه‌ریزی فضایی

از «مدیریت متمرکز بر سازه» به سمت «حکمرانی خطر-مبنا» تغییر یابد که در آن، دانش بومی روستاییان به عنوان مکمل تخصص کارشناسان عمل کند. دوم، با توجه به میانگین نازل بعد سیاسی، ضروری است که «حق بر ایمنی» به عنوان یک مطالبه حقوقی در اسناد آمایش استان‌های منطقه هفت گنجانده شود تا از نفوذ منافع کوتاه‌مدت در تغییر کاربری اراضی مستعد سیل جلوگیری شود. برخلاف پیشنهادهای کلی در مطالعات قبلی، ما بر «بومی‌سازی ضوابط کالبدی» بر اساس دبی‌های بازگشتی محلی تأکید داریم. این پژوهش ثابت کرد که بدون بازنگری در ساختار هنجاری و شفاف‌سازی فرآیندهای تخصیص بودجه بازسازی، حتی مقاوم‌ترین بناها نیز در برابر سیلاب‌های آینده تاب نخواهند آورد. لذا، گذار به تاب‌آوری در منطقه هفت آمایش، نه یک اقدام مهندسی، بلکه یک «بازمهندسی سیاسی-فضایی» است که باید از پایین به بالا و با مشارکت واقعی ذینفعان محلی صورت گیرد تا شکاف ادراکی شناسایی شده در این تحقیق ترمیم گردد. این مدل پیشنهادی، نه تنها برای منطقه مورد مطالعه، بلکه برای تمامی مناطق با ساختار مشابه در ایران، به عنوان چارچوبی برای گذار از «مدیریت بحران» به «برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آور» قابل تعمیم است.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این مقاله مستخرج از رساله دکتری با عنوان «ارائه الگوی برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی نواحی روستایی در معرض سیل (مورد مطالعه: نواحی روستایی منطقه هفت آمایش سرزمین)» در دانشگاه تربیت مدرس تهران است و نویسندگان لازم می‌دانند از حمایت‌های معاونت پژوهشی و گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی این دانشگاه تشکر و قدردانی داشته باشند.

منابع

- اسدی، رضا؛ افتخاری، عبدالرضا رکن‌الدین؛ توکلی، مرتضی و پورطاهری، مهدی (۱۴۰۴). شناسایی و سنجش عوامل تأثیرگذار در برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آوری کالبدی روستاهای مستعد سیل (مورد مطالعه: منطقه هفت آمایش سرزمین). آمایش سیاسی فضا، ۷(۲)، ۱۶۹-۱۳۹.
- افتخاری، عبدالرضا رکن‌الدین؛ بدری، سید علی (۱۳۹۱). بنیان‌های نظریه‌ای الگوی توسعه‌ای نمونه، استانداری گیلان، معاونت هماهنگی امور عمرانی دفتر امور روستایی و شوراها، تهران.
- بدری، سید علی، رمضان‌زاده لسبویی، مهدی، عسگری، علی، قدیری معصوم، مجتبی و سلمانی، محمد. (۱۳۹۲). نقش مدیریت محلی در بهبود تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی با تأکید بر سیل. مدیریت بحران، ۲ (۱)، ۳۹-۵۰.
doi: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1392.2.1.4.8>
- بسطام‌نیا، امیر؛ رضایی، محمدرضا؛ سرائی، محمدحسین (۱۳۹۵). تبیین و تحلیل مفهوم «تاب‌آوری» و شاخص‌ها و چارچوب‌های آن در سوانح طبیعی، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ۶ (۱)، ۳۲-۴۶.
doi: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23225955.1395.6.1.3.1>
- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (۱۳۹۹). گزارش تجمیعی آنلاین ارزیابی شهر/روستا - سیل فروردین ۹۸. پورطاهری، مهدی (۱۳۹۶). طراحی روستایی، سمت، تهران.
- پورطاهری، مهدی؛ رکن‌الدین افتخاری، عبدالرضا؛ بدری، سید علی (۱۳۸۹). راهبردها و سیاست‌های توسعه کالبدی سکونتگاه‌های روستایی: با تأکید بر تجربیات جهانی و ایران، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، تهران.
- خلیفه، ابراهیم (۱۳۹۵). ارائه الگوی مدیریت برنامه‌ریزی فضایی مناطق روستایی، محدوده مورد مطالعه: استان تهران، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی، استاد راهنما: دکتر عبدالرضا رکن‌الدین افتخاری.
<https://parseh.modares.ac.ir/thesis/1117428>

- دلشاد، مهدیه؛ بحرانی، حمیدرضا؛ زارع، بهمن؛ کمالی، ماندانا؛ جعفری، معصومه (۱۴۰۲)، تبیین مدل آینده‌محور برنامه‌ریزی فضایی تاب‌آور در برابر زلزله (SRPF) و تدقیق آن با روش فراتحلیل و FAHP، چشم انداز شهرهای آینده، ۴ (۱)، ۲۳-۱. doi: <https://doi.org/10.61186/jvfc.4.1.1>
- رضایی، محمدرضا (۱۳۸۹)، تبیین تاب‌آوری اجتماعات شهری به منظور کاهش اثرات سوانح طبیعی (زلزله)؛ مطالعه موردی: کلانشهر تهران، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی، استاد راهنما: دکتر مجتبی رفیعیان. <https://parseh.modares.ac.ir/thesis/1114990>
- رمضان‌زاده لسبویی، مهدی؛ عسگری، علی؛ بدری، سید علی (۱۳۹۳)، زیرساخت‌ها و تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی با تأکید بر سیلاب منطقه مورد مطالعه: مناطق نمونه گردشگری چشمه کیله تنکابن و سردآبرود کلاردشت، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۱ (۱)، ۵۲-۳۵.
- سعیدی عباس (۱۳۹۲)، پیوستگی توسعه روستایی - شهری در قالب منظومه‌های روستایی، برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، ۲ (۴)، ۲۰-۱۱. doi: https://psp.journals.pnu.ac.ir/article_2409_en.html?lang=fa
- فرزاد بهتاش، محمدرضا؛ کی‌نژاد، محمدعلی؛ پیربایی، محمدتقی؛ عسگری، علی (۱۳۹۲)، دانشکده معماری و ارزیابی و تحلیل ابعاد و مؤلفه‌های تاب‌آوری کلان‌شهر تبریز، هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۱۸ (۳)، ۴۲-۳۳. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2013.51316>
- مختاری هشی، حسین؛ رحیمی، داریوش (۱۳۹۵)، پهنه‌بندی خطر سیل در مراکز انسانی و اقتصادی استان خراسان جنوبی با استفاده از منطق فازی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۷ (۱)، ۱۹۹-۲۱۶. doi: <https://doi.org/10.22108/gep.2016.21366>
- مرکز آمار ایران (۱۳۹۵)، سالنامه‌های آماری استان‌های قزوین، زنجان، مرکزی
- Abdel-Mooty, M. N., Yosri, A., El-Dakhkhni, W., & Coulibaly, P. (2021). Community Flood Resilience Categorization Framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 61, 102349. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102349>
- Acheampong, R. A. (2018). Spatial planning in Ghana: origins, contemporary reforms and practices, and new perspectives. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02011-8>
- Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: are they related?. *Progress in human geography*, 24(3), 347-364. <http://dx.doi.org/10.1191/030913200701540465>
- Adler, E. (2011). Spatial Planning in the Coastal Zone of the East Asian Seas Region: Integrating Emerging Issues and Modern Management Approaches. UNEP and ROAP and COBSEA, 1-141. <https://climatechange.issuelab.org/resources/17770/17770.pdf>
- Afriyane, D., Julian, M. M., & Nugraha, H. A. (2022). Urban Flood Resilience through Spatial Plan in Bandung City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 986(1), 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/986/1/012052>
- Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13(11), 2707-2716. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2707-2013>
- Allmendinger, P., & Haughton, G. (2012). Post-political spatial planning in England: a crisis of consensus? *Transactions of the Institute of British Geographers*, 37(1), 89-103. <https://doi.org/10.1111/j.1475-5661.2011.00468.x>
- Berisha, E., Giancarlo, C., Umberto, J. R., & Solly, A. (2021). Spatial governance and planning systems in the public control of spatial development: a European typology. *European Planning Studies*, 29(1), 181-200. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1726295>
- Berke, P. R., & Campanella, T. J. (2006). Planning for Postdisaster Resiliency. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 604(1), 192-207. <https://doi.org/10.1177/0002716205285533>
- Brunetta, G., Ceravolo, R., Barbieri, C. A., Borghini, A., de Carlo, F., Mela, A., Beltramo, S., Longhi, A., De Lucia, G., Ferraris, S., Pezzoli, A., Quagliolo, C., Salata, S., & Voghera, A. (2019). Territorial Resilience: Toward a Proactive Meaning for Spatial Planning. *Sustainability*, 11(8), 2286. <https://doi.org/10.3390/su11082286>
- Bubeck, P., Botzen, W. J. W., & Aerts, J. C. J. H. (2012). A Review of Risk Perceptions and Other Factors that Influence Flood Mitigation Behavior. *Risk Analysis*, 32(9), 1481-1495. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01783.x>
- Davoudi, S., Keith, S., Jamila, H. L., E., Q. A., D., P. G., Cathy, W., Hartmut, F., Darryn, M., Libby, P., & Davoudi, S. (2012). Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? "Reframing" Resilience: Challenges for Planning Theory and Practice Interacting Traps: Resilience Assessment of a Pasture Management System in Northern Afghanistan Urban Resilience: What Does it Mean in Planning Practice? Resilience as a Useful Concept for Climate Change Adaptation? The Politics of Resilience for Planning: A Cautionary Note. *Planning Theory & Practice*, 13(2), 299-333. <https://doi.org/10.1080/14649357.2012.677124>
- Dühr, S. (2023). Investigating the policy tools of spatial planning. *Policy Studies*, 44(2), 258-275. <https://doi.org/10.1080/01442872.2022.2040473>
- European Commission. (1997). The EU Compendium of Spatial Planning Systems and Policies (13). European Commission: Directorate-General for Regional and Urban Policy, Issue. <https://op.europa.eu/oportal-service/download-handler?identifier=059fcedf-d453-4d0d-af36-6f7126698556&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>

- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15(4). <http://www.jstor.org/stable/26268226>
- Hegger, D. L. T., Driessen, P. P. J., Wiering, M., van Rijswijk, H. F. M. W., Kundzewicz, Z. W., Matczak, P., Crabbé, A., Raadgever, G. T., Bakker, M. H. N., Priest, S. J., Larrue, C., & Ek, K. (2016). Toward more flood resilience: Is a diversification of flood risk management strategies the way forward? *Ecology and Society*, 21(4), Article 52. <https://doi.org/10.5751/ES-08854-210452>
- Heijman, W., Hagelaar, G., & Van Der Heide, M. (2019). Rural resilience as a new development concept. *EU Bioeconomy Economics and Policies: Volume II*, 195-211. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28642-2_11
- Ibrahim, A., & Siiba, A. (2020). Spatial planning through the political landscape of Ghana: examining the nexus between election manifestos and planning. *Territory, Politics, Governance*, 8(3), 407-430. <https://doi.org/10.1080/21622671.2019.1568291>
- Ionita, M., & Nagavciuc, V. (2021). Extreme Floods in the Eastern Part of Europe: Large-Scale Drivers and Associated Impacts. *Water*, 13(8), 1122. <https://doi.org/10.3390/w13081122>
- Knickel, K., Almeida, A., Bauchinger, L., Casini, M. P., Gassler, B., Hausegger-Nestelberger, K., Heley, J., Henke, R., Knickel, M., Oostindie, H., Ovaska, U., Pina, C., Rovai, M., Vulto, H., & Wiskerke, J. S. C. (2021). Towards More Balanced Territorial Relations—The Role (and Limitations) of Spatial Planning as a Governance Approach. *Sustainability*, 13(9), 5308. <https://doi.org/10.3390/su13095308>
- Kodag, S., Mani, S. K., Balamurugan, G., & Bera, S. (2022). Earthquake and flood resilience through spatial Planning in the complex urban system. *Progress in Disaster Science*, 14, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100219>
- Kuang, D., & Liao, K.-H. (2020). Learning from Floods: Linking flood experience and flood resilience. *Journal of Environmental Management*, 271, 111025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111025>
- Liao, K.-H. (2012). A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices. *Ecology and Society*, 17(4), Article 48. <https://doi.org/10.5751/ES-05231-170448>
- López-Marrero, T., & Tschakert, P. (2011). From theory to practice: building more resilient communities in flood-prone areas. *Environment & Urbanization*, 23(1), 229-249. <https://doi.org/10.1177/0956247810396055>
- Lu, P. W. (2014). Spatial planning and urban resilience in the context of flood risk.: A comparative study of Kaohsiung, Tainan, and Rotterdam. TU Delft. DOI: [10.7480/abe.2014.7](https://doi.org/10.7480/abe.2014.7)
- Lu, P., & Stead, D. (2013). Understanding the notion of resilience in spatial planning: A case study of Rotterdam, The Netherlands. *Cities*, 35, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.06.001>
- Luukkonen, J. (2015). Planning in Europe for 'EU'rope: Spatial planning as a political technology of territory. *Planning Theory*, 14(2), 174-194. <https://doi.org/10.1177/1473095213519355>
- 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. <https://doi.org/10.3390/su12197864>
- Meng, M., Dąbrowski, M., Xiong, L., & Stead, D. (2022). Spatial planning in the face of flood risk: Between inertia and transition. *Cities*, 126, 103702. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103702>
- Morphet, J. (2010). Effective practice in spatial planning. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203851838>
- Nowak, M., Cotella, G., & Śleszyński, P. (2021). The legal, administrative, and governance frameworks of spatial policy, planning, and land use: Interdependencies, barriers, and directions of change. *Land*, 10(11), 1119. <https://doi.org/10.3390/land10111119>
- Oukes, C., Wim, L., & Arts, J. (2022). Enhancing the Use of Flood Resilient Spatial Planning in Dutch Water Management. A Study of Barriers and Opportunities in Practice. *Planning Theory & Practice*, 23(2), 212-232. <https://doi.org/10.1080/14649357.2022.2034921>
- Prashar, N., Lakra, H. S., Kaur, H., & Shaw, R. (2024). Urban flood resilience: mapping knowledge, trends, and structure through bibliometric analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 26(4), 8235-8265. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03094-3>
- Restemeyer, B., Johan, W., & van den Brink, M. (2015). A strategy-based framework for assessing the flood resilience of cities – A Hamburg case study. *Planning Theory & Practice*, 16(1), 45-62. <https://doi.org/10.1080/14649357.2014.1000950>
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2018). Resilience-Oriented Urban Planning. In Y. Yamagata & A. Sharifi (Eds.), *Resilience-oriented urban planning: theoretical and empirical insights* (pp. 3-27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75798-8_1
- Solín, L., & Sládekóvá Madajová, M. (2023). Spatial planning as a tool of flood risk management in rural landscapes? Position, limitations, and other findings: The case of Myjava Region (Slovakia). *Moravian Geographical Reports*, 31(2), 106-117. <https://doi.org/10.2478/mgr-2023-0010>
- Sörensen, J., Persson, A., Sternudd, C., Aspegren, H., Nilsson, J., Nordström, J., Jönsson, K., Mottaghi, M., Becker, P., Pilesjö, P., Larsson, R., Berndtsson, R., & Mobini, S. (2016). Re-Thinking Urban Flood Management—Time for a Regime Shift. *Water*, 8(8), 332. <https://doi.org/10.3390/w8080332>
- Stead, D. (2021). Conceptualizing the Policy Tools of Spatial Planning. *Journal of Planning Literature*, 36(3), 297-311. <https://doi.org/10.1177/0885412221992283>
- Tariq, H., Pathirage, C., & Fernando, T. (2021). Measuring community disaster resilience using Q-methods: a physical resilience perspective. *Built Environment Project and Asset Management*, 11(4), 722-737. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-03-2020-0053>
- Tobin, G. A. (1999). Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning?. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 1(1), 13-25. <https://doi.org/10.3763/ehaz.1999.0103>

- Udovč, A. (2007). Rural Space Planning as a Tool for Natural Resource Management in Slovenia. *Romanian Economic Journal*, 10, 377-394. <https://rejournal.eu/sites/rejournal.versatech.ro/files/issues/2007-09-01/573/je202520-20udovc.pdf>
- Vis, M., Klijn, F., De Bruijn, K. M., & Van Buuren, M. (2003). Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands. *International journal of river basin management*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635190>
- Watson, V. (2002). The Usefulness of Normative Planning Theories in the Context of Sub-Saharan Africa. *Planning Theory*, 1(1), 27-52. <https://doi.org/10.1177/147309520200100103>
- Wen, J., Wan, C., Ye, Q., Yan, J., & Li, W. (2023). Disaster risk reduction, climate change adaptation, and their linkages with sustainable development over the past 30 years: A review. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00472-3>
- Wilkinson, C. (2012). Social-ecological resilience: Insights and issues for planning theory. *Planning Theory*, 11(2), 148-169. <https://doi.org/10.1177/1473095211426274>
- Zevenbergen, C., Gersonius, B., & Radhakrishnan, M. (2020). Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2168), 20190212. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0212>
- Zevenbergen, C., Veerbeek, W., Gersonius, B., & Van Herk, S. (2008). Challenges in urban flood management: travelling across spatial and temporal scales. *Journal of Flood Risk Management*, 1(2), 81-88. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00010.x>