



Performance Evaluation of the KBDI Drought Index in Estimating Drought and Mapping Wildfire Potential (Case Study: East Azerbaijan Province)

Mohammad Hossein Jahangir,^{1*}  Faraz Alijani² 

1. Associate Professor, Faculty of New Energies and Sustainable Resources Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Iran, Corresponding author; Email: mh.jahangir@ut.ac.ir

2. MSc Student in Nature Engineering, Faculty of New Energies and Sustainable Resources Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 30 December, 2024
Received in revised form 04
February, 2025
Accepted 08 March, 2025
Available online 21 March,
2025

Keywords:
Natural Resource
Management,
Climate Change,
KBDI,
Environmental Assessment,
Ecosystem

ABSTRACT

Objective: Forests are among the most valuable renewable natural resources, playing a critical role in maintaining ecological balance and sustaining ecosystems. However, droughts and wildfires inflict significant damage on these resources each year.

Method: Daily temperature and precipitation data were collected from six meteorological stations and analyzed using the Keetch-Byram Drought Index (KBDI). Subsequently, spatial interpolation methods were applied to generate wildfire risk zoning maps.

Results: The findings indicated that the Jolfa station recorded the highest drought severity and wildfire potential in 1998, with a KBDI value of 329.83, whereas the Ahar station, in the same year, registered the lowest drought severity with a KBDI of 59.75. Additionally, an eight-year continuous drought period was observed at the Jolfa station.

Conclusions: The analysis demonstrated that higher drought intensity is associated with a greater likelihood of wildfire occurrence, emphasizing the need for the development of preventive strategies and targeted natural resource management in high-risk areas. The outcomes of this study can contribute to enhancing conservation policies and reducing the impacts of natural wildfires.

Cite this article: Jahangir, M.H., Alijani, F. (2025). Performance Evaluation of the KBDI Drought Index in Estimating Drought and Mapping Wildfire Potential (Case Study: East Azerbaijan Province). *ECOHYDROLOGY*, 12 (1), 657-674. [https://doi.org/IJE-202404-1811 \(R2\)](https://doi.org/IJE-202404-1811 (R2))



Publisher: University of Tehran Press. DOI: [https://doi.org/IJE-202404-1811 \(R2\)](https://doi.org/IJE-202404-1811 (R2))

Introduction

Wildfires have long been one of the most significant factors altering tropical and subtropical ecosystems, with climate playing a crucial role in the occurrence and spread of fires in forests and grasslands. Forest and grassland fires pose serious risks, particularly to human populations living near these areas, and lead to environmental degradation, loss of valuable plant and animal species, and air pollution. Wildfires are a natural disaster that modern societies, especially those in arid and water-scarce regions with limited vegetation, frequently face. Protecting forests and grasslands in these areas is of utmost importance. Iran is among the countries where thousands of hectares of forests and grasslands are lost annually due to wildfires. Drought is a key factor contributing to the occurrence of wildfires. To assess drought trends in the country, climatic data are used to identify fire-prone areas and develop mitigation strategies.

Various methods have been employed to evaluate wildfire risk, including the empirical Francisella coefficient, the Morgan index, the Keetch-Byram Drought Index (KBDI), hierarchical analysis, the Nesterov index, and remote sensing technologies. Among these, the KBDI is a widely used method for assessing wildfire risk. This index estimates the moisture deficit in the upper soil layer (up to 8 inches or 20.3 cm) and indicates the flammability of organic materials above the soil. The required parameters for the KBDI include daily maximum temperature, daily precipitation, and average annual precipitation. The index ranges from 0 (no moisture deficit, low fire risk) to 800 (severe drought, high fire risk). The KBDI offers several advantages, such as not requiring field data and relying on easily measurable parameters (temperature and precipitation), making it a practical tool for wildfire risk assessment.

The KBDI is calculated daily, which reduces errors in its application. Studies in the southeastern regions of South Carolina have shown that climatic variables, including human activities, wind speed, and the duration of dry periods, must be considered when using the KBDI to identify fire-prone areas. The index exhibits a strong positive correlation with high temperatures and is not influenced by the absence of rainfall in a region. It is widely used for drought monitoring in national weather forecasts and wildfire prevention, particularly in areas with non-irrigated crops.

Research in meteorology and forestry has demonstrated a strong link between wildfires and climatic conditions since the 1920s. Studies in northern and eastern China using the KBDI, Nesterov index, and the MacArthur Forest Fire Danger Index (FFDI) have shown that wildfires have increased over the past 50 years due to rising temperatures and declining humidity and rainfall. Similarly, in northern England, wildfire frequency has increased over the past 27 years, with wet winters not necessarily reducing the risk of spring fires.

The KBDI uses temperature, evapotranspiration, and rainfall to identify fire-prone areas. A 20-year study in Hawaii revealed a direct correlation between KBDI values and the frequency of wildfires, indicating that higher KBDI values correspond to increased fire incidents. In the Alps, studies using the Nesterov index, FWI, and Baumgartner index have shown that rising temperatures and changing precipitation patterns significantly contribute to increased wildfire risk.

In Iran, the SLEUTH model has been used to predict fire-prone areas and fire spread patterns in the Hyrcanian forests, highlighting the importance of integrating climatic conditions with wildfire prediction systems to reduce daily fire-related damages. Recent studies using CMIP5 data and statistical downscaling methods have predicted future drought conditions in the Barito Basin of Kalimantan, Indonesia, using the KBDI. The results indicate that by 2050, approximately 50% of the basin will face moderate drought risk, with 2% at high risk, underscoring the strong correlation between drought and wildfire occurrence.

The present study aims to evaluate the performance of the KBDI in estimating drought and identifying fire-prone areas in East Azerbaijan Province, Iran. Using 30 years of climatic data from six stations, the study maps and analyzes dry and fire-prone areas in the region. The primary innovation of this research lies in its use of long-term climatic data and detailed regional-scale soil moisture analysis, offering valuable insights for natural resource management and wildfire risk reduction. Additionally, the study compares the KBDI with other wildfire prediction methods, proposing a new tool for identifying fire-prone areas in arid and semi-arid regions.

Method

Study Area

The study was conducted in East Azerbaijan Province, located in the northwest of the Iranian Plateau, with an area of 45,490 square kilometers (Figure 1). Geographically, the province lies between 45°7' to 48°20' east longitude and 36°45' to 39°26' north latitude. It is the tenth largest province in Iran in terms of area. Topographically, East Azerbaijan is a mountainous region, with approximately 40% of its area covered by mountains, 28.2% by hills, and 31.8% by flatlands (plains and intermontane valleys). The climate of East Azerbaijan is generally cold and dry, but due to its diverse topography, it experiences a variety of microclimates. The province is influenced by cold northern and Siberian winds, as well as humid winds from the Black Sea, the Mediterranean, and the Atlantic Ocean. The region is classified as semi-arid, with an average annual precipitation ranging from 250 to 300 mm.

Data Collection

The study was conducted at six meteorological stations in East Azerbaijan Province: Tabriz, Sarab, Jolfa, Ahar, Mianeh, and Maragheh. The required data, including daily maximum temperature, daily precipitation, and average annual precipitation, were obtained from the Regional Meteorological Administration for the period 1987–2017.

Calculation of the Keetch-Byram Drought Index (KBDI)

The KBDI was calculated to assess drought conditions and wildfire potential. The index estimates the moisture deficit in the upper soil layer (up to 8 inches or 20.3 cm) and ranges from 0 (no moisture deficit, low fire risk) to 800 (severe drought, high fire risk). The calculation of the KBDI requires the following parameters: daily maximum temperature, daily precipitation, and average annual precipitation. The starting point for KBDI calculation is critical. The upper soil layer must be saturated at the beginning of the calculation. If the calculation starts from zero, it is necessary to determine the date when the soil was last saturated, which may require backtracking through historical precipitation data. In mountainous regions with significant snowfall, the calculation should begin after the snow has melted and the soil is saturated. The KBDI was calculated using the formulas in the main text. The KBDI was calculated daily for a 30-year period (1987–2017) using both manual calculations and specialized software. The results from both methods were consistent. Annual graphs were plotted, and wildfire risk maps were generated using ArcGIS software.

Spatial Analysis

To create spatial distribution maps of the studied variables, the Inverse Distance Weighting (IDW) method was used in ArcGIS. This method was chosen for its simplicity and accuracy, especially when data points are scattered. In IDW, the value of an unknown point is estimated using a linear combination of measured values, weighted inversely by their distance from the point. This approach assigns greater influence to nearby points, enhancing the accuracy of the generated maps.

Ethical Considerations

This study used publicly available meteorological data and did not involve human or animal subjects. Therefore, no institutional review board approval or informed consent was required.

Results

Evaluation of Wildfire Risk Using the Keetch-Byram Drought Index (KBDI)

In this study, the wildfire risk in forests and rangelands of East Azerbaijan Province was assessed using the Keetch-Byram Drought Index (KBDI). The results are presented through 30-year average graphs and maps.

Comparison of KBDI Values Across Stations

The analysis of annual KBDI values from 1987 to 2017 revealed significant variations among the six meteorological stations.

Ahar Station: The lowest drought intensity and wildfire potential were observed at Ahar Station. In 2010, the maximum drought intensity and wildfire potential reached 136.41, while the minimum value was 1.25 in 1987 (Figure 2).

Jolfa Station: Jolfa exhibited the highest drought intensity and wildfire potential among all stations. The maximum value of 329.83 was recorded in 1998, while the minimum value was 0.083 in 1987. The longest drought period at Jolfa lasted 8 years (1996–2003) (Figure 3).

Maragheh Station: In 2010, Maragheh experienced its highest drought intensity and wildfire potential (244.91), while the lowest value (66.08) occurred in 1998. The longest drought period at this station lasted 5 years (1998–2002) (Figure 4).

Mianeh Station: The highest drought intensity at Mianeh was 321.66 in 2009, while the lowest value was 68.08 in 1987. The longest drought period lasted 6 years (1997–2002) (Figure 5).

Sarab Station: Sarab recorded its highest drought intensity (166.5) in 1990, while the lowest value was 2.66 in 1987. The longest drought period lasted 3 years (1998–2000) (Figure 6).

Tabriz Station: Tabriz experienced its highest drought intensity (266.75) in 1990, while the lowest value was 77.66 in 2009. The longest drought period lasted 3 years (1989–1991) (Figure 7).

Intensity and Duration of Drought

Table 2 summarizes the intensity, duration, and frequency of drought periods across the stations. The most severe and prolonged drought occurred at Jolfa in 1998, while Ahar experienced the least severe and shortest drought periods.

Spatial Zoning of Drought Intensity and Duration

Using ArcGIS, spatial zoning maps were created to illustrate the intensity and duration of drought over the 30-year study period.

Drought Intensity in 1998: Figure 8 shows the spatial distribution of drought intensity in 1998. Jolfa exhibited the highest drought intensity and wildfire potential, followed by Mianeh. Maragheh and Tabriz also showed high drought intensity, while Sarab and Ahar had moderate and low intensities, respectively.

Drought Duration in 1998: Figure 9 illustrates the spatial distribution of drought duration in 1998. Jolfa and Mianeh had the longest drought periods, while Tabriz and Ahar experienced shorter durations.

Conclusions

The study evaluated wildfire risk in East Azerbaijan Province using the Keetch-Byram Drought Index (KBDI). The results indicate significant spatial and temporal variations in drought intensity and wildfire potential across the six meteorological stations.

Jolfa and Mianeh: These stations exhibited the highest drought intensity and wildfire potential due to low annual precipitation and high temperatures. The prolonged drought periods in these regions further increase the risk of wildfires.

Maragheh and Tabriz: These stations also showed high drought intensity and wildfire potential, though to a lesser extent compared to Jolfa and Mianeh.

Sarab and Ahar: These stations had moderate and low drought intensity, respectively, attributed to higher annual precipitation and lower temperatures.

The findings highlight the critical role of climatic factors, such as temperature and precipitation, in influencing drought intensity and wildfire potential. The KBDI proved to be an effective tool for assessing drought conditions and identifying fire-prone areas, particularly in semi-arid and arid regions like East Azerbaijan Province.

Theoretical and Practical Implications

The study underscores the importance of integrating KBDI-based assessments into wildfire management strategies. By identifying high-risk areas, policymakers and resource managers can

implement targeted measures to mitigate wildfire risks, such as improving early warning systems, enhancing firefighting capabilities, and promoting sustainable land management practices.

Limitations and Future Research

While the KBDI provides valuable insights, its accuracy can be further improved by incorporating additional climatic and environmental variables. Future studies should explore the integration of KBDI with other drought indices (e.g., SPI, RDI) and advanced modeling techniques to enhance predictive accuracy. Additionally, investigating the impact of climate change on drought patterns and wildfire risks in the region is recommended.

Broader Significance

The findings of this study contribute to the broader understanding of drought and wildfire dynamics in semi-arid regions. They also provide a framework for similar assessments in other regions facing comparable climatic challenges. By leveraging tools like the KBDI, stakeholders can better prepare for and respond to the growing threat of wildfires in a changing climate.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical Considerations

This study used publicly available data and did not involve human or animal subjects. Therefore, no ethical approval was required.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

بررسی عملکرد شاخص خشکی کچ-بایرام در برآورد خشکسالی و پهنه‌بندی پتانسیل آتش‌سوزی (منطقه مورد مطالعه: استان آذربایجان شرقی)

محمدحسین جهانگیر^۱ ID، فراز علیجانی^۲ ID

۱. دانشیار دانشکده مهندسی انرژی‌های نو و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، ایران، نویسنده مسئول. رایانامه:

mh.jahangir@ut.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد مهندسی طبیعت، دانشکده مهندسی انرژی‌های نو و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱ کلیدواژه‌ها: مدیریت منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی، KBDI، ارزیابی زیست‌محیطی، اکوسیستم.	موضوع: جنگل‌ها از ارزشمندترین منابع تجدیدپذیر طبیعی به شمار می‌روند که نقش حیاتی در تعادل زیستی و بقای اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند. باین حال، وقوع خشکسالی و آتش‌سوزی، آسیب‌های گسترده‌ای را سالانه به این منابع وارد می‌سازد. هدف: هدف این پژوهش، تحلیل قابلیت شاخص خشکی کچ-بایرام (KBDI) در ارزیابی شدت خشکسالی و پهنه‌بندی پتانسیل آتش‌سوزی در استان آذربایجان شرقی است. روش تحقیق: داده‌های روزانه دما و بارش از شش ایستگاه هواشناسی گردآوری شده و با استفاده از شاخص KBDI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس با بهره‌گیری از روش‌های درون‌یابی، نقشه‌های مکانی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی تولید گردید. یافته‌ها: یافته‌ها نشان دادند که ایستگاه جلفا در سال ۱۹۹۸ با ثبت مقدار KBDI معادل ۳۲۹/۸۳، شدیدترین شرایط خشکی و بالاترین پتانسیل آتش‌سوزی را تجربه کرده، درحالی‌که در همان سال، ایستگاه اهر با مقدار ۵۹/۷۵، پایین‌ترین سطح خشکی را به ثبت رسانده است. علاوه بر این، دوره‌های هشت‌ساله از خشکی ممتد در ایستگاه جلفا مشاهده شد. نتیجه‌گیری: تحلیل یافته‌ها نمایانگر آن است که شدت بیشتر خشکسالی با احتمال بالاتر بروز آتش‌سوزی همراه بوده و مناطق با ریسک بالا نیازمند تدوین راهبردهای پیشگیرانه و مدیریت هدفمند منابع طبیعی هستند. نتایج این مطالعه می‌تواند در ارتقای سیاست‌های حفاظتی و کاهش پیامدهای آتش‌سوزی‌های طبیعی مؤثر واقع شود.

استناد: جهانگیر، محمدحسین؛ علیجانی، فراز. بررسی عملکرد شاخص خشکی کچ-بایرام در برآورد خشکسالی و پهنه‌بندی پتانسیل آتش‌سوزی (منطقه مورد مطالعه: استان

آذربایجان شرقی). *اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۱)، ۶۷۴-۶۵۷.

[https://doi.org/TJE-202404-1811 \(R2\)](https://doi.org/TJE-202404-1811 (R2))

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © محمدحسین جهانگیر، فراز علیجانی.



مقدمه

از گذشته‌های دور تاکنون آتش‌سوزی یکی از عوامل مهم در تغییر اکوسیستم‌های استوایی و حاره است و آب‌وهوا در وقوع و گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع تأثیر زیادی گذاشته است. آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع خطرات جدی به دنبال دارد؛ به‌ویژه برای انسان‌هایی که در مجاورت جنگل‌ها زندگی می‌کنند و همچنین باعث از بین رفتن محیط‌زیست و گونه‌های ارزشمند گیاهی و جانوری و آلودگی هوا شده است (دالینگ، ۲۰۰۵). یکی از بلاهای طبیعی که جوامع امروزی به‌ویژه کشورهای که در مناطق خشک و کم‌آب جهان قرار دارند و پوشش گیاهی آن‌ها محدود است سروکار دارند، آتش‌سوزی است. حفاظت از جنگل‌ها و مراتع این مناطق بسیارمهم و ضروری است (فرهاد و رجبی، ۱۳۸۲). ایران جزء کشورهای است که سالیانه هزاران هکتار از جنگل‌ها و مراتع آن در اثر آتش‌سوزی از بین رفته است (مخدوم و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از مناطق جنگلی مهم در ایران جنگل گلستان است که در شرق استان گلستان واقع شده و جزء مناطق توریستی ایران است که جاده‌های ارتباطی زیادی از بین آن عبور می‌کند. آمارها نشان می‌دهد بیشتر آتش‌سوزی‌های جنگل گلستان در کنار جاده رخ داده است و منشأ انسانی دارد. در بررسی‌هایی که در طول سال‌های اخیر در استان گلستان صورت گرفته، نشان می‌دهد که ۱۲۵۴ فقره حریق در سطحی بالغ بر ۱۰۳۰۱ هکتار اتفاق افتاده است (پهلوانی و همکاران، ۲۰۱۵). خشکسالی یکی از عواملی است که در وقوع آتش‌سوزی نقش بسزایی دارد. به‌منظور بررسی روند خشکسالی در کشور از داده‌های اقلیمی استفاده می‌شود تا مناطق مستعد آتش‌سوزی شناسایی شوند و اقداماتی برای مقابله با آن فراهم شود (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹). تاکنون روش‌های متعددی به بررسی خطر آتش‌سوزی پرداخته‌اند. برای مثال ضریب تجربی فرانسیلا، شاخص مورگان، شاخص خشکی کچ بایرام، روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی، شاخص نستروف و همین‌طور استفاده از فناوری سنجش از دور ازجمله آن‌هاست (پورشکوری و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از روش‌های بررسی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی شاخص خشکی کچ- بایرام است. این شاخص قابلیت آتش‌سوزی مواد آلی بالای خاک را نشان می‌دهد. رطوبت لایه بالایی خاک بر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع تأثیر مهمی دارد. پارامترهای مورد نیاز شاخص کچ- بایرام عبارتند از: دمای حداکثر روزانه، بارش روزانه، متوسط بارش سالانه. این شاخص کمبود رطوبت خاک را در عمق ۸ اینچی (معادل ۲۰/۳ سانتی‌متری) از سطح خاک برآورد می‌کند. در شاخص کچ- بایرام دامنه خشکی خاک بین صفر تا ۸۰۰ است که صفر نشان‌دهنده کمبود رطوبت خاک با احتمال آتش‌سوزی کم و ۸۰۰ بیشترین کمبود رطوبت خاک با احتمال آتش‌سوزی شدید است (الکساندر، ۱۹۹۰). با توجه به بررسی‌ها و ارزیابی‌هایی که تاکنون برای خطر آتش‌سوزی صورت گرفته و در آن از روش‌های متعددی استفاده شده، می‌توان به مزایای شاخص KBDI اشاره کرد. این شاخص به داده‌های میدانی نیاز ندارد و اندازه‌گیری پارامترهای آن (دما و بارش) بسیار ساده است و با محاسبات ساده‌ای می‌توان شاخص را محاسبه کرد و به نتیجه رسید (عباسی، سلطانی و جعفری، ۱۳۹۱).

پیشینه پژوهش

یکی از ویژگی‌های شاخص KBDI محاسبه روزانه آن است که در نتیجه آن خطاها را کاهش می‌دهد. براساس مطالعات در نواحی جنوب شرقی ایالت کارولینای جنوبی به‌منظور تعیین مناطق مستعد آتش‌سوزی براساس شاخص KBDI لازم است متغیرهای اقلیمی ازجمله فعالیت‌های انسانی، سرعت باد و طول دوره خشکی برای زمان‌هایی که شاخص درجه بالایی از خشکی را نشان می‌دهد در نظر گرفته شود (فرایسه و همکاران، ۲۰۱۳). این شاخص همبستگی مثبتی با دمای بالا نشان می‌دهد و تحت‌تأثیر کمبود بارش و نبود بارندگی در یک منطقه قرار نمی‌گیرد. مقیاس آن از صفر (بدون کمبود رطوبت) تا ۸۰۰ (خشکسالی شدید) متغیر است. KBDI به‌طور گسترده برای پایش خشکسالی در پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی ملی و پیشگیری از آتش‌سوزی، به‌ویژه در مناطق دارای محصولات زراعی آبیاری‌نشده استفاده می‌شود (روی‌زی و همکاران، ۲۰۲۳). براساس مطالعات متخصصان علوم هواشناسی و جنگل‌داری، از سال ۱۹۲۰ پی بردند که ارتباط تنگاتنگی بین آتش‌سوزی جنگل‌ها و شرایط اقلیمی وجود دارد (دوادی، ۲۰۰۹). طبق

تحقیقات و بررسی‌های انجام‌شده در شمال و شرق چین با روش‌های شاخص خشکی کچ-بایرام (KETCH BYRAM) و DRUOGHT INDEX شاخص‌های نستروف (NesteroV) و خطر آتش‌سوزی جنگل مک‌آرتور (FFDI) طی ۵۰ سال اخیر به‌علت افزایش دما و کاهش رطوبت و بارندگی، آتش‌سوزی جنگل‌ها افزایش یافته است (رویون و پانماو، ۲۰۱۰). براساس تجربیات به‌دست‌آمده از آتش‌سوزی‌های گذشته با پیش‌بینی و استفاده از مدل probit آتش‌سوزی در شمال انگلستان طی ۲۷ سال گذشته افزایش داشته است و همچنین با وجود زمستان‌های مرطوب احتمال آتش‌سوزی‌های بهاره کاهشی را نشان نمی‌داد. شرایط آب‌وهوایی به‌شدت بر رژیم‌های آتش و همچنین به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر جرقه‌زنی آتش‌سوزی و انتشار آن تأثیر می‌گذارد (آلبرتسون^۲ و همکاران، ۲۰۱۰). برای تعیین مناطقی که خطر آتش‌سوزی دارند، شاخص کچ-بایرام از عامل‌های دما، تبخیر و تعرق و بارندگی استفاده می‌کند. در بررسی‌هایی که در جزایر هاوایی در یک بازه ۲۰ ساله صورت گرفته، نشان می‌دهد که بین شاخص خشکی کچ-بایرام و آتش‌سوزی‌های صورت‌گرفته رابطه مستقیم وجود دارد. به بیان دیگر هرچه مقادیر شاخص خشکی کچ-بایرام افزایش یابد، تعداد آتش‌سوزی‌های صورت‌گرفته بیشتر می‌شود (دالینگ و همکاران، ۲۰۰۵). در بررسی خطر آتش‌سوزی جنگل در کوه‌های آلپ با شاخص‌های نستروف، FWI و بامگارتز مشاهده می‌شود که افزایش دما و تغییر الگوی بارش تأثیر چشمگیری بر افزایش آتش‌سوزی داشته است (واستل^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). طبق تحقیقات انجام‌شده در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران برای پیش‌بینی مناطق مستعد آتش‌سوزی و الگوی توسعه آتش از روش هوشمند SLEUTH استفاده شده است که در آتش‌سوزی در مکان‌های جدید جلوگیری می‌کند. با توجه به همبستگی آتش‌سوزی با شرایط آب‌وهوایی هر منطقه و روش شاخص آتش‌سوزی و ارتباط آن با مناطق دیگر و همچنین با استفاده بهتر از سیستم‌های اطلاع مدیریت آتش‌سوزی می‌توان خسارت‌های ناشی از آتش‌سوزی روزانه را کاهش داد (پاتریک^۴ و همکاران، ۲۰۱۵). نادیا فرحناز و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های CMIP5 و روش کاهش مقیاس آماری، خشکسالی آینده حوضه باریتو در کالیفرنیا اندونزی را با استفاده از شاخص خشکسالی کچ-بایرام (KBDI) پیش‌بینی کردند؛ نتایج نشان داد که در سال ۲۰۵۰، حدود ۵۰ درصد از حوضه در معرض خطر متوسط و ۲ درصد در معرض خطر بالای خشکسالی قرار خواهند گرفت. همبستگی قوی بین خشکسالی و وقوع آتش‌سوزی نیز مشاهده شد. این مطالعه بر اهمیت تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی برای پیشگیری از خطرات آبی تأکید می‌کند (فرحناز و همکاران، ۱۳۹۸). عباسی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی پتانسیل شاخص رطوبت خاک به‌عنوان شاخص خشکی کچ بایرام در مناطق اصفهان به‌منظور مکان‌یابی مناطق مستعد آتش‌سوزی بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که شاخص کچ-بایرام برای تحلیل و مکان‌یابی مناطق مستعد آتش‌سوزی در مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مناسب نیست. خان‌محمدی و همکاران، شاخص خشکی کچ-بایرام و شاخص خطر آتش‌سوزی جنگل مک‌آرتور را به‌منظور کاهش مخاطرات و همچنین تعیین مناطق دارای قابلیت آتش‌سوزی در ۲ استان گلستان و خراسان شمالی برای سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ارتباط معناداری بین شاخص آتش‌سوزی مک‌آرتور و شاخص خشکی کچ-بایرام وجود ندارد. همچنین براساس نتایج آن‌ها شاخص کچ-بایرام در مناطق کم‌باران که در محدوده اقلیمی نیمه‌خشک قرار دارند، کاربرد دقیقی ندارد (خان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). یانگ قیانگ^۵ و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای پتانسیل آتش‌سوزی جهانی را با استفاده از شاخص خشکسالی KBDI مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش زیادی در پتانسیل آتش‌سوزی وجود دارد که ناشی از گرم شدن ایالت متحده، آمریکای جنوبی و استرالیا و همچنین گرم و خشک شدن دیگر مناطق است. تجزیه و تحلیل حساسیت‌ها نشان داد که پتانسیل آتش‌سوزی در آینده به عوامل زیادی مانند مدل آب‌وهوا و سناریوی انتشار که برای پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی استفاده می‌شود، بستگی دارد. با افزایش پتانسیل آتش‌سوزی منابع و تلاش‌های مدیریتی بیشتری برای پیشگیری از سوانح و بهبود در آینده نیاز است (تافیک، ۲۰۱۵). گونگوروگلو^۷ (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای در ترکیه سال ۲۰۱۷ به بررسی تعیین خطر آتش‌سوزی جنگل با روند سلسله‌مراتبی تحلیل فازی (FAHP) و

1Ruoyun & Panmao

2Albertson

3Wastl

4Patrick

5Yang Qiang

6Taufik

7Güngöroğlu

نقشه‌برداری با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. آن‌ها ساختارهای اقتصادی، توپوگرافی و اقلیمی را به‌عنوان معیارهایی برای تعیین خطر آتش‌سوزی قرار دادند و بعد از تعیین نقشه خطر آتش‌سوزی و تجزیه و تحلیل آن دریافتند ساختار اقتصادی با ۳۵ درصد خطر بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارد. کمترین خطر در بخش‌های سدر، کاج سیاه و جنگل‌های عرعر مشهود است (چوی و همکاران، ۲۰۲۴). چارچوبی برای ایجاد مجموعه داده‌های آتش‌سوزی جنگلی با استفاده از Google Earth Engine ارائه کردند. این چارچوب، دسترسی به داده‌های مربوط به عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی (مانند شاخص خشکی کچ-بایرام (KBDI)، رطوبت خاک، دما، سرعت باد، دمای سطح زمین (LST)، شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، پوشش زمین و بارش) را در شبه جزیره مالزی تسهیل می‌کند. آن‌ها از مدل‌های مختلف برای تحلیل اولیه داده‌ها استفاده کردند، هرچند به محدودیت‌های این روش‌ها در تحلیل داده‌ها اشاره کردند اما یافته‌ها نشان دادند که KBDI، LST، کسری آب اقلیمی و بارش بر وقوع آتش‌سوزی‌ها تأثیرگذارند (چو و همکاران، ۲۰۲۴). سالیوان^۲ (۲۰۱۲) در استرالیا به بررسی عواملی که در رفتار آتش‌سوزی‌ها در سه نوع پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد پرداخته است. پوشش‌های گیاهی شامل جنگل‌های باز، جنگل‌های اوکالپت و درختچه‌های کوچک است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد اگرچه مرفولوژی اکوسیستم‌ها متفاوت است، اثر توپوگرافی و آب‌وهوا بر رفتار آتش برای همه آتش‌سوزی‌های گیاهی مشابه است. گوناون^۳ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان «تحلیل مکانی-زمانی شاخص خشکسالی و پراکندگی نقاط داغ در شهرستان اوگان کومرینگ ایلیر با استفاده از روش شاخص خشکسالی کچ-بایرام (KBDI)» به بررسی خشکسالی در این منطقه پرداختند. به‌دلیل محدودیت داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، از داده‌های Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) و روش KBDI برای محاسبه شاخص خشکسالی استفاده شد. نتایج با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تجسم و نقشه‌های پراکندگی شاخص خشکسالی، نقاط داغ و پوشش زمین تهیه شدند. تحلیل‌ها نشان داد که در شهرستان اوگان کومرینگ ایلیر، خشکسالی شدید اغلب در ماه سپتامبر و در مناطقی با پوشش گیاهی درختچه‌ای و جنگل‌های خشک رخ می‌دهد. پس از تصحیح داده‌ها، همبستگی قوی بین پراکندگی شاخص خشکسالی، نقاط داغ و پوشش زمین مشاهده شد (توفیک، ۲۰۲۳). وارول^۴ (۲۰۱۶) به بررسی و تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل در منطقه آنتالیا ترکیه با استفاده از شاخص خشکسالی KBDI پرداختند. آن‌ها ارتباط آتش‌سوزی‌های بزرگ (>۳۰ هکتار) از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳ را با استفاده از شاخص KBDI برای هر سال بررسی کردند و دریافتند مقادیر مربوط به دوره قبل از سال ۲۰۰۰ با بعد از سال ۲۰۰۰ متفاوت است و میزان KBDI افزایش می‌یابد و با آزمایش همبستگی پیرسون دریافتند که مناطق سوخته براساس مناطق بزرگ و کوچک طبقه‌بندی می‌شوند. گاوریل زانتوپولوس و همکاران (۲۰۰۶) ارتباط شاخص خشکسالی KBDI با تنش گیاه را مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان داد که خشکسالی تأثیر زیادی در اشتعال‌پذیری گیاه دارد و تنش آب گیاه و محاسبات KBDI می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت آتش‌سوزی داشته باشد (زانتوپولوس^۵ و همکاران، ۲۰۰۶). شاخص خشکی کچ-بایرام از جمله شاخص‌های مشهور و معتبر در زمینه تحلیل خطر آتش‌سوزی جنگل‌هاست. هدف از مطالعه حاضر، بررسی عملکرد شاخص کچ-بایرام در برآورد خشکسالی و تعیین مناطق مستعد آتش‌سوزی است که با استفاده از رسم نمودار و پهنه‌بندی مناطق خشک و مستعد آتش‌سوزی در استان آذربایجان شرقی در دوره ۳۰ ساله در ۶ ایستگاه مورد مطالعه و تحلیل و بررسی قرار داده شده است. نوآوری اصلی این تحقیق استفاده از داده‌های اقلیمی ۳۰ ساله و تجزیه و تحلیل دقیق خشکی خاک در مقیاس منطقه‌ای در استان مذکور است که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان این استان در مدیریت بهتر منابع طبیعی و کاهش خطرات آتش‌سوزی کمک کند. همچنین، این مطالعه به بررسی تفاوت‌های میان نتایج شاخص KBDI با سایر روش‌های پیش‌بینی آتش‌سوزی می‌پردازد و از این طریق ابزار جدیدی برای شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌کند.

1Chew

2Sullivan

3Gunawan

4Varol

5Xanthopoulos

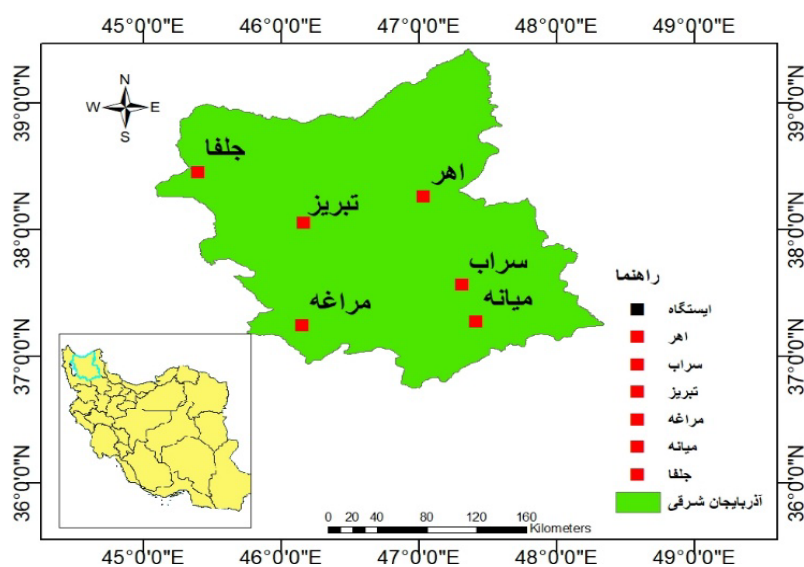
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

با توجه به شکل ۱، استان آذربایجان شرقی با وسعت ۴۵۴۹۰ کیلومتر مربع در گوشه شمال غربی فلات ایران قرار دارد. این استان از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۴۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. از لحاظ وسعت در بین استان‌های کشور در رتبه دهم قرار دارد. در حالت کلی استان آذربایجان شرقی یک منطقه کوهستانی محسوب می‌شود که حدود ۴۰ درصد از سطح آن را کوهستان و ۲/۲۸ درصد را تپه‌ماهورها و ۸/۳۱ درصد را زمین‌های هموار (دشت‌ها و جلگه‌های میان کوهی) فرا گرفته است.

آب‌وهوای آذربایجان شرقی به‌طور کلی سرد و خشک است، اما به‌علت تنوع توپوگرافی از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار است. این استان همواره تحت تأثیر بادهای سرد شمالی و سیبری و بادهای مرطوب دریای سیاه و مدیترانه و همچنین اقیانوس اطلس قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، استان آذربایجان شرقی یک منطقه سردسیر و کوهستانی است و از لحاظ تقسیم‌بندی‌های اقلیمی جزء مناطق نیمه‌خشک به حساب می‌آید. میانگین بارندگی سالیانه در این استان ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات کلی ایستگاه‌ها

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین دمای سالانه (C)
جلفا	۴۵:۴۰	۳۸:۴۵	۲۱۲/۷	۱۴/۹
میانه	۴۷:۴۲	۳۷:۲۷	۲۷۸	۱۴
مراغه	۴۶:۱۶	۳۷:۲۴	۲۹۸/۱	۱۳/۳
تبریز	۴۶:۱۷	۳۸:۰۵	۲۸۴/۸	۱۲/۱
سراب	۴۷:۳۲	۳۷:۵۶	۲۸۸/۵	۱۱/۱
اهر	۴۷:۰۴	۳۸:۲۶	۲۴۱/۹	۸/۷

روش پژوهش

این مطالعه، در استان آذربایجان شرقی و در ایستگاه‌های هواشناسی تبریز، سراب، جلفا، اهر، میانه و مراغه است. داده‌های مورد نیاز حداکثر دمای روزانه، بارش روزانه و متوسط بارش سالانه از اداره کل هواشناسی تهیه شده است. در محاسبه این شاخص نقطه

شروع برداشت فاکتور خشکی اهمیت بسیاری دارد. برای شروع محاسبه شاخص KBDI سطح بالایی خاک باید در حالت اشباع باشد. اگر برداشت از نقطه صفر شروع شود، ممکن است بارندگی هفته‌ها یا ماه‌ها قبل اتفاق افتاده باشد، در چنین حالتی باید به زمان عقب برگشت که سطح بالایی خاک در حالت اشباع قرار دارد و سپس شروع برداشت فاکتور را به‌صورت روزانه آغاز کرد و به تاریخ شروع محاسبه شاخص رسید. در نواحی کوهستانی که بارش برف زیادی دارند، نقطه شروع برداشت را باید از زمانی آغاز کرد که برف‌ها ذوب شده باشند و خاک در حالت اشباع باشد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱).

محاسبه KBDI به شرح ادامه است (خانمحمدی و همکاران، ۱۳۹۳):

$$I(T) = I(T-1) - R_n + E \quad \text{رابطه ۱}$$

که $I(T)$ شاخص خشکی کچ-بایرام در روز t ام و R_n بارش خالص است که در آن فرض شده $5/1$ میلی‌متر اولیه بارش جذب زمین و پوشش گیاهی می‌شود و بقیه بارش در شاخص تأثیرگذار خواهد بود.

$$R_n = R - 5,1$$

اگر روز قبل بارش داشته باشد، مقدار کمیت این‌گونه خواهد بود:

$$R_n = R$$

$I(T-1)$ شاخص خشکی روز قبل است و E میزان تبخیر و تعرق از سطح خاک را نشان می‌دهد و در ایستگاه‌های تحقیقاتی کشاورزی اندازه‌گیری می‌شود (خانمحمدی و همکاران، ۱۳۹۳). از آنجا که میزان تبخیر و تعرق از سطح خاک همه‌جا در دسترس نیست می‌توان از رابطه (۲) (کچ و بایرام، ۱۹۶۸) به دست آورد.

$$\Delta E = \frac{[203 - (I_t - 1)] \times [0.968 \exp(0.8756T) - 8.30]}{(1 + 10.88 \exp(-0.001736R))} \times 0.001 \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲)، تبخیر و تعرق، T بیشینه دما، R میانگین بارش سالانه و $I(T-1)$ شاخص خشکی روز قبل است (کچ و بایرام، ۱۹۶۸). بعد از اینکه نقطه شروع تعیین شد، محاسبه شاخص خشکسالی ساده است و دو مورد زیر با محاسبه شاخص اتفاق می‌افتد:

۱. کم شدن شاخص خشکی با افزایش بارش خالص؛

۲. افزایش شاخص خشکی با افزایش فاکتور خشکی محاسبه‌شده.

برای به دست آوردن بارش خالص مقدار بارش را از مقدار $5/1$ کسر کرده و مابقی آن بارش خالص در نظر گرفته می‌شود. اگر بارش بیشتر از بارش خالص باشد، رطوبت خاک افزایش می‌یابد و میزان شاخص خشکی کاهش می‌یابد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱). شاخص خشکسالی کچ-بایرام در این مطالعه به دو صورت با استفاده از نرم‌افزار محاسبه KBDI و دیگری با استفاده از داده‌های دما و بارش به‌صورت روزانه و با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۷) و قرار دادن این اطلاعات در رابطه (۱) محاسبه شد که در هر دو محاسبه نتایج یکسانی به دست آمد. نمودارهای سالانه نیز رسم شد و برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی احتمال خطر آتش‌سوزی جنگل، از نرم‌افزار ARCGIS استفاده شد.

برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی متغیرهای مورد مطالعه، از روش وزن‌دار معکوس فاصله (IDW) در محیط این نرم‌افزار استفاده شد. این روش به دلیل سادگی و دقت مناسب در شرایطی که داده‌ها به‌صورت پراکنده در دسترس اند، انتخاب شده است. در این روش، مقدار هر نقطه ناشناخته با استفاده از ترکیب خطی مقادیر نقاط اندازه‌گیری‌شده و وزن‌دهی معکوس براساس فاصله از آن نقطه محاسبه می‌شود. وزن‌دهی معکوس فاصله، تأثیر بیشتری به نقاط نزدیک‌تر اختصاص می‌دهد؛ در نتیجه دقت نقشه‌های تولیدی برای مناطق مورد مطالعه افزایش می‌یابد. سپس با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از این شاخص، میزان خشکی و خطر آتش‌سوزی مورد بررسی قرار گرفت.

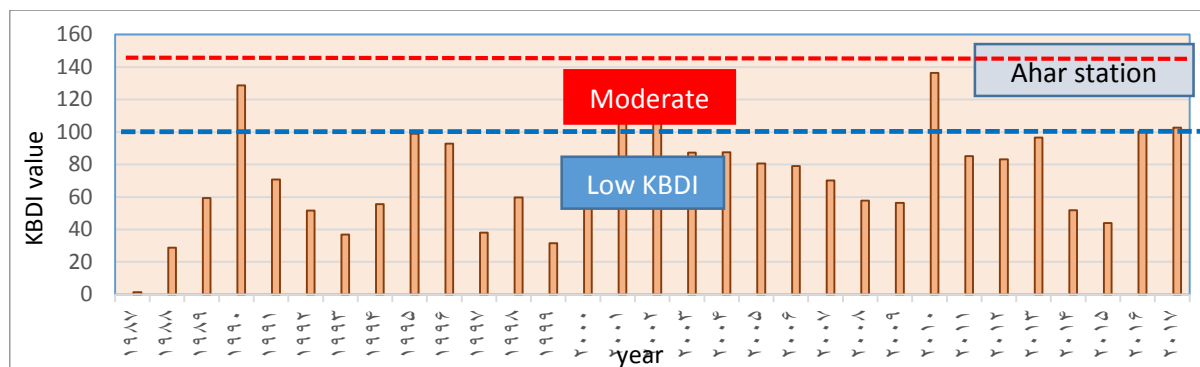
تحلیل نتایج

در این مطالعه، خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در استان آذربایجان شرقی با استفاده از شاخص خشکی کچ-بایرام مورد ارزیابی قرار گرفت و نمودارها و نقشه‌های میانگین ۳۰ ساله ارائه گردید.

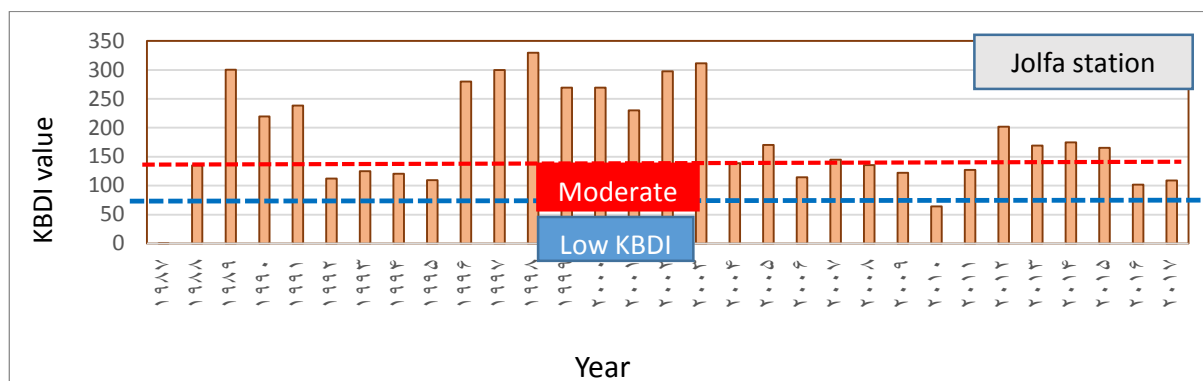
(الف) مقایسه مقادیر شاخص در ایستگاه‌ها

با توجه به شکل ۲ و مقایسه نمودارهای مربوط به ایستگاه‌های مختلف که تغییرات سالانه شاخص خشکی را در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ نشان داده، کمترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی مربوط به ایستگاه اهر است. در ایستگاه اهر در سال ۲۰۱۰ بیشترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی برابر است با ۱۳۶/۴۱ و در سال ۱۹۸۷ کمترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی برابر با ۱/۲۵ است.

در شکل ۳ نیز همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ایستگاه جلفا در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها دارای بیشترین میزان خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی است و بیشترین مقدار آن در سال ۱۹۹۸ برابر با ۳۲۹/۸۳ و کمترین مقدار آن در سال ۱۹۸۷ برابر با ۰/۰۸۳ است. طولانی‌ترین دوره خشکی در این ایستگاه در سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۳ به مدت ۸ سال طول کشیده است.

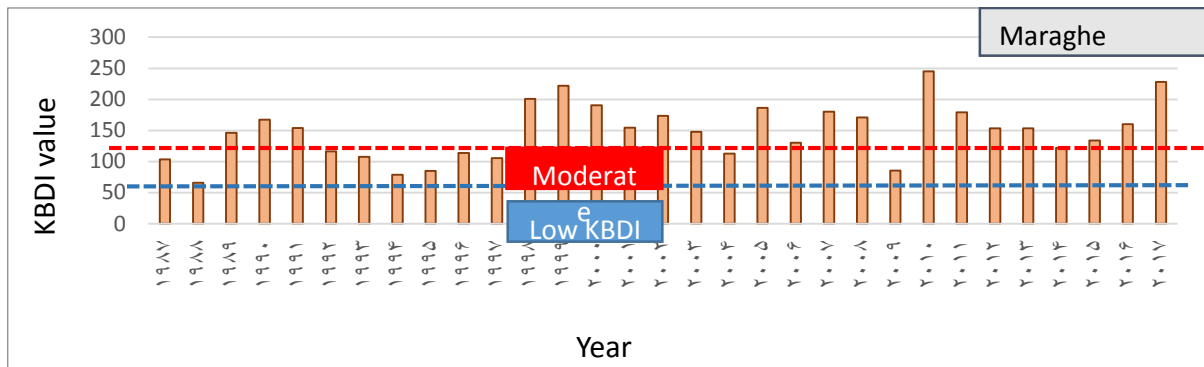


شکل ۲. نمودار شاخص خشکی KBDI ایستگاه اهر

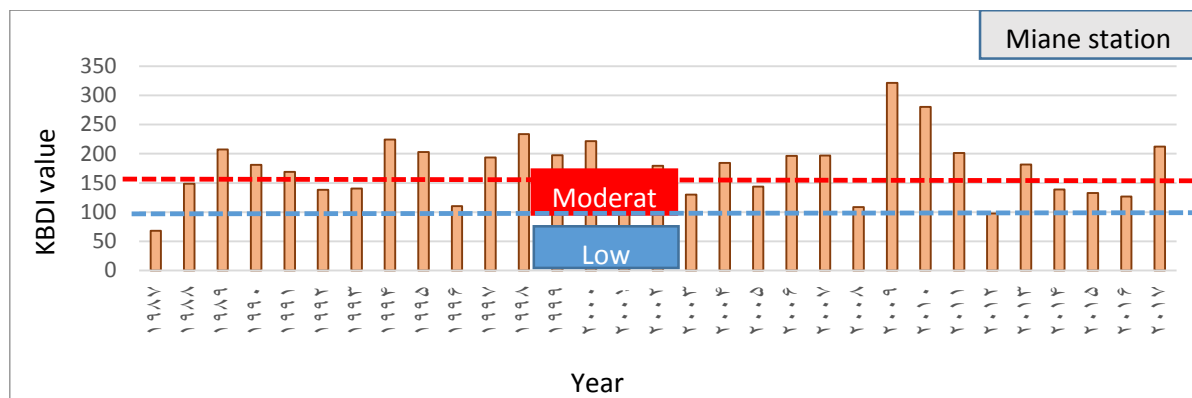


شکل ۳. نمودار مقادیر شاخص خشکی KBDI در ایستگاه جلفا (۱۹۸۷-۲۰۱۷)

شکل ۴ که ایستگاه مراغه را در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد، دارای بیشترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بوده و مقدار آن برابر با ۲۴۴/۹۱ است. کمترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی در ایستگاه مراغه در سال ۱۹۹۸ رخ داده است و مقدار آن برابر با ۶۶/۰۸ شده است. طولانی‌ترین دوره خشکی در این ایستگاه در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۲ به مدت ۵ سال طول کشیده است. با توجه به شکل ۵، ایستگاه میانه بیشترین مقدار خشکی در سال ۲۰۰۹ برابر با ۳۲۱/۶۶ بوده است و کمترین مقدار خشکی در این ایستگاه، در سال ۱۹۸۷ برابر با ۶۸/۰۸ بوده است؛ طولانی‌ترین دوره خشکی در این ایستگاه در سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۲ به مدت ۶ سال طول کشیده است.



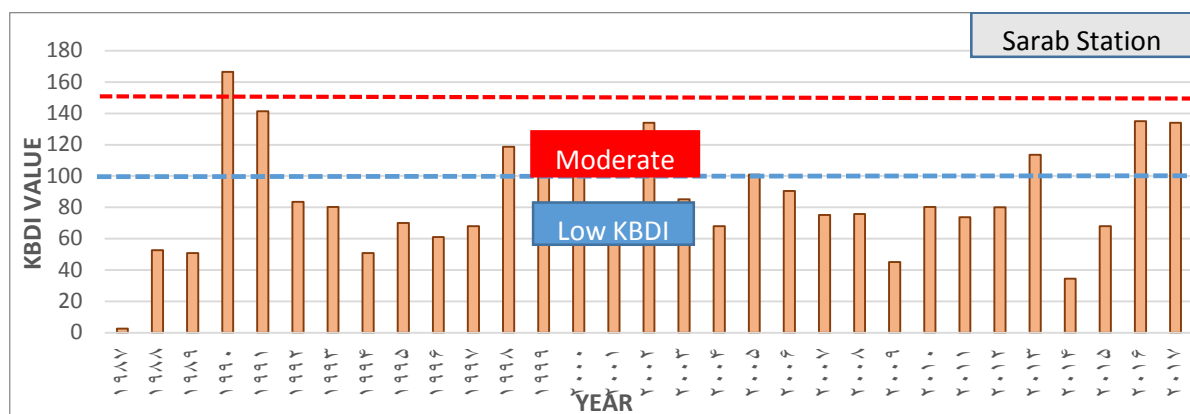
شکل ۴. نمودار مقادیر شاخص خشکسالی KBDI در ایستگاه مراغه (۱۹۸۷-۲۰۱۷)



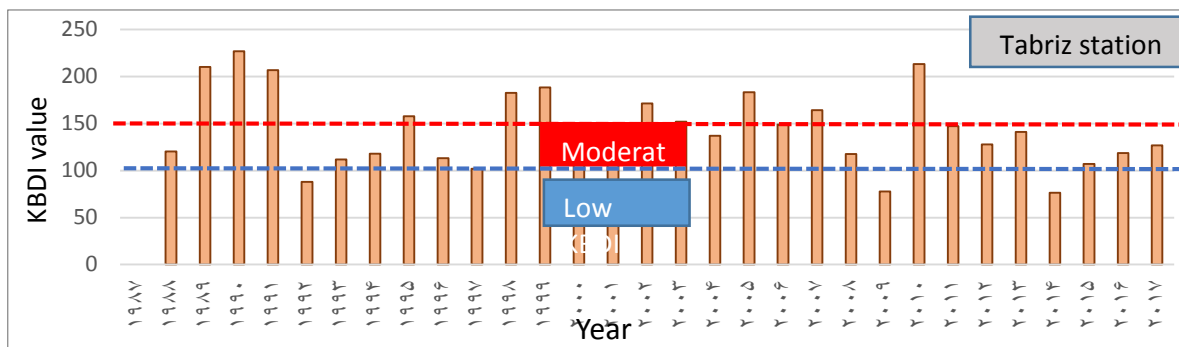
شکل ۵. نمودار شاخص خشکسالی KBDI ایستگاه میانه

شکل ۶ که ایستگاه سراب را نشان می‌دهد، در سال ۱۹۹۰ دارای بیشترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بوده و مقدار آن برابر با ۱۶۶/۵ و کمترین مقدار خشکی در ایستگاه سراب در سال ۱۹۸۷ برابر با ۲/۶۶ بوده است. طولانی‌ترین دوره خشکی در این ایستگاه در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۰ به مدت ۳ سال طول کشیده است.

با توجه به شکل ۷ ایستگاه تبریز در سال ۱۹۹۰ در بیشترین مقدار خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بوده و مقدار آن برابر با ۲۶۶/۷۵ و کمترین مقدار خشکی در سال ۲۰۰۹ برابر با ۷۷/۶۶ بوده است. طولانی‌ترین دوره خشکی در ایستگاه تبریز در سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۹۱ بوده که به مدت ۳ سال طول کشید.



شکل ۶. نمودار مقادیر شاخص خشکسالی KBDI در ایستگاه سراب (۱۹۸۷-۲۰۱۷)



شکل ۷. نمودار شاخص خشکسالی KBDI ایستگاه تبریز

ب) مقادیر شدت و تداوم خشکسالی

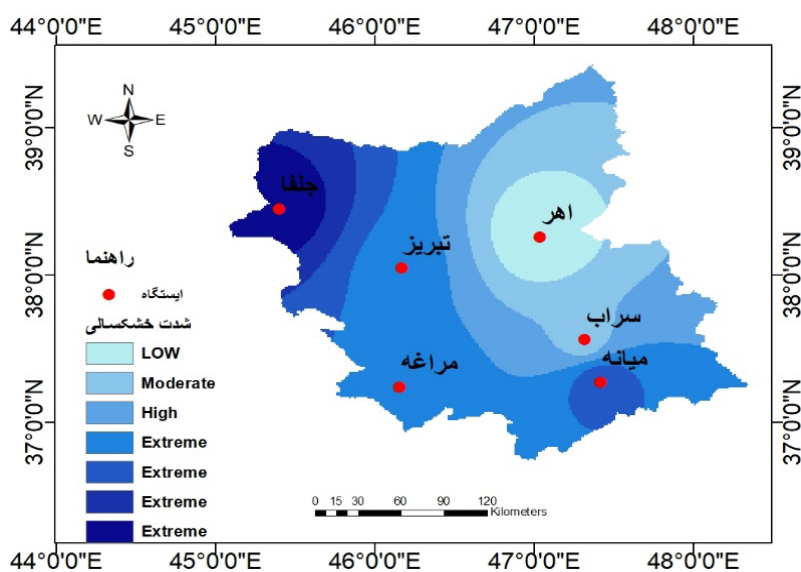
جدول ۲ شدیدترین، طولانی‌ترین و تعداد دوره‌هایی را که خشکسالی اتفاق افتاده، نشان داده است. مقایسه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که شدیدترین و طولانی‌ترین دوره خشکسالی در سال ۱۹۹۸ در ایستگاه جلفا رخ داده و کمترین شدت خشکسالی نیز مربوط به ایستگاه اهر است که کوتاه‌ترین دوره خشکسالی را دارد.

جدول ۲. نتایج حاصل از نمودارهای هریک از ایستگاه‌ها

نام ایستگاه	شدید ترین خشکسالی KBDI		طولانی ترین دوره خشکسالی		تعداد دوره خشکسالی		
	سال	سال	سال	سال	شدید	متوسط	کم
اهر	۲۰۱۰	۱۳۱/۴۱	۲۰۰۱-۲۰۰۲، ۲۰۱۶-۲۰۱۷	۲	۱	۶	۲۳
مراغه	۲۰۱۰	۲۴۴/۹۱	۱۹۹۸-۲۰۰۲	۵	۱۲	۱۴	۴
میانه	۲۰۰۹	۳۲۱/۶۶	۱۹۹۷-۲۰۰۲	۶	۱۹	۹	۲
جلفا	۱۹۹۸	۳۲۹/۸۳	۱۹۹۶-۲۰۰۳	۸	۱۶	۱۲	۲
سراب	۱۹۹۰	۱۶۶/۵	۱۹۹۸-۲۰۰۰	۳	۱	۷	۲۲
تبریز	۱۹۹۰	۲۲۶/۷۵	۱۹۸۹-۱۹۹۱	۳	۱۱	۱۶	۳

ج. پهنه‌بندی شدت و تداوم خشکسالی

با توجه به نتایج حاصل از نمودارها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی اقلیمی شاخص خشکی کچ-بایرام برای شدت خشکسالی و تداوم خشکسالی در دوره آماری ۳۰ ساله در ۶ ایستگاه انجام شده است.



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی شدت خشکسالی سال ۱۹۹۸

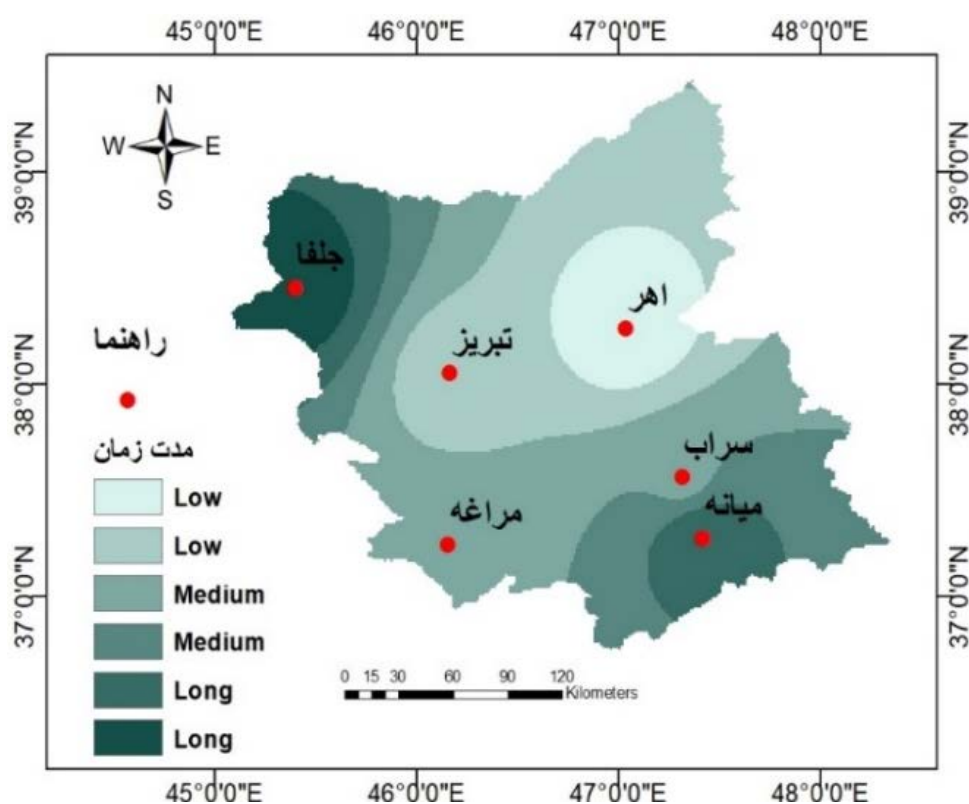
شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی کچ-بایرام را در سال ۱۹۹۸ در ایستگاه‌های اهر، سراب، تبریز، مراغه، میانه و جلفا نشان می‌دهد. با توجه به راهنمای نقشه و رنگ‌های مشخص شده جلفا شدیدترین خشکسالی و پتانسیل آتش‌سوزی بالایی را در سال ۱۹۹۸ داشته است. با توجه به جدول ۱ جلفا از لحاظ اقلیم خشک و سرد است و میانگین بارش سالانه ۲۱۲/۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد است. بعد از جلفا، میانه در رتبه دوم از لحاظ خشکسالی و بالا بودن پتانسیل آتش‌سوزی در سال ۱۹۹۸ است و از لحاظ اقلیم منطقه‌ای نیز نیمه‌خشک و سرد است. میانگین بارش سالانه ۲۷۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد است.

مراغه و تبریز از لحاظ اقلیمی نیمه‌خشک و سرد هستند. میانگین بارش و دمای سالانه در مراغه و تبریز به‌ترتیب برابر با ۲۹۸/۱ و ۲۸۴/۸ میلی‌متر و ۱۳/۳ و ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی انجام‌شده، مراغه و تبریز در سال ۱۹۹۸ شدت خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بالایی داشتند.

سراب نیز اقلیمی نیمه‌خشک و سرد دارد. میانگین بارش سالانه آن برابر با ۲۴۱/۹ میلی‌متر است و دمای برابر با ۸/۷ درجه سانتی‌گراد دارد. با توجه به پهنه‌بندی انجام‌شده شدت خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی آن در سال ۱۹۹۸ متوسط بوده است.

در پهنه‌بندی انجام‌شده و با توجه به جدول ۱، اهر در سال ۱۹۹۸ دارای کمترین شدت خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی است. دلیل این امر می‌تواند بارندگی بیشتر و دمای کمتر باشد. میانگین بارش سالانه آن برابر با ۲۸۸/۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه برابر با ۱۱/۱ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۹ نقشه پهنه‌بندی تداوم خشکسالی در سال ۱۹۹۸ را نشان داده است. با توجه به شکل، تداوم خشکسالی در جلفا و سپس میانه مشاهده شده و مدت بیشتری ادامه داشته است. در مراغه و سراب طول دوره خشکسالی متوسط بوده و در تبریز و اهر طول دوره خشکسالی پایین بوده و مدت کمتری ادامه داشته است.



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی تداوم خشکسالی در سال ۱۹۹۸

بحث

شاخص KBDI (Keetch-Byram Drought Index) به عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی خشکسالی‌های کشاورزی و جنگلی، نقش مهمی در پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی‌های جنگلی و تحلیل وضعیت خشکی خاک دارد. در این تحقیق، ارتباط مستقیم بین این شاخص و تغییرات دمایی و بارشی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما و کاهش بارش در ماه‌های تابستان باعث افزایش مقدار شاخص KBDI شده و به شدت خشکسالی اشاره دارد. این شاخص در مناطق نیمه‌خشک و خشک که نوسانات دما و بارش قابل توجهی دارند، می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیقی از وضعیت خشکسالی فراهم آورد.

مقایسه با پژوهش‌های پیشین در مناطق مشابه، مانند اصفهان و مشهد، نشان می‌دهد که KBDI در این مناطق نیز تحت تأثیر تغییرات دما و بارش‌ها قرار دارد و به عنوان یک ابزار مؤثر در ارزیابی خشکسالی‌ها به کار گرفته می‌شود. پیامد علمی استفاده از این شاخص شامل بهبود پیش‌بینی خشکسالی‌های کشاورزی، کاهش خطرات آتش‌سوزی‌های جنگلی و بهینه‌سازی مصرف منابع آبی است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دما، KBDI به عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت بحران‌های مربوط به خشکسالی و آتش‌سوزی‌ها شناخته می‌شود.

در مقایسه با شاخص‌های دیگر مانند SPI و RDI، KBDI در ارزیابی خشکسالی‌های سطح خاک و پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های جنگلی دقت بالاتری دارد. مطالعات مشابه در سایر کشورها نشان داده‌اند که KBDI قادر است پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از وضعیت خشکسالی نسبت به شاخص‌های دیگر ارائه دهد؛ در نتیجه، ترکیب این شاخص با دیگر ابزارهای پیش‌بینی می‌تواند دقت نتایج را افزایش دهد.

برای پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف مانند KBDI، SPI و RDI در مقیاس‌های زمانی مختلف و با استفاده از داده‌های اقلیمی دقیق‌تر توسعه یابند. همچنین، بررسی تأثیر این شاخص‌ها در مناطق مختلف با ویژگی‌های اقلیمی متفاوت و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی دقیق‌تر زمان وقوع خشکسالی‌ها، می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آبی و کشاورزی کمک کند.

نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام‌شده در استان آذربایجان شرقی در ایستگاه جلفا، به علت میانگین بارش کم و دمای زیاد، شدت خشکی و طول دوره خشکی نسبت به بقیه ایستگاه‌ها زیاد بوده و پتانسیل آتش‌سوزی بالاست و ایستگاه میانه نیز بعد از جلفا با توجه به دمای بالا و میانگین بارش سالیانه کم، شدت خشکی، طول دوره خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بالایی دارد. در ایستگاه‌های مراغه و تبریز نیز خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی بالاست ولی میزان خشکی آن‌ها نسبت به ایستگاه‌های جلفا و میانه از شدت کمتری برخوردار است. ایستگاه سراب با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و سرد و میانگین دمای سالیانه کم، شدت خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی و همچنین طول دوره خشکی متوسطی دارد.

ایستگاه اهر با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و سرد و میانگین بارندگی بالا و همچنین میانگین دمای سالیانه کم نسبت به کل ایستگاه‌های مورد مطالعه، شدت خشکی و پتانسیل آتش‌سوزی کمتری دارد و طول دوره خشکی آن نیز کم است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مناطق جلفا، میانه، مراغه و تبریز نسبت به دو ایستگاه دیگر (اهر و سراب) از خشکی بیشتری برخوردارند و احتمال خطر آتش‌سوزی در این ایستگاه‌ها بیشتر از دو ایستگاه دیگر است.

عوامل زیادی در ایجاد آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع تأثیرگذارند؛ از جمله آن‌ها شدت خشکی و شرایط آب‌وهوایی مناطق می‌باشد که باعث گسترش آتش‌سوزی در هنگام وقوع حادثه می‌شود.

با توجه به اینکه کشور ایران از نظر بارندگی جزء مناطق آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک است و احتمال آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع آن وجود دارد، با به کار گرفتن شاخص کچ-بایرام می‌توان مناطق مختلف را که احتمال آتش‌سوزی در آن‌ها زیاد است، بررسی و مشخص نمود و با برنامه‌ریزی و مدیریت درست، از خسارات احتمالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری کرد.

References

- Abbasi Neda, S. S. (2013). Fire potential zoning of forests and pastures using Kech-Bayram aridity index (case study: Isfahan province) (In persian).
- Albertson, K. J. (2010). Climate Change and the future occurrence of moorland wild fires in the peak District of the UK Climate Research.
- Alexander, M. (1990). Computer calculation of the Keetch-Byram Drought Index-programmers beware. *Fire Management Notes*, 23-35.
- Ali., S.-G. (2006). Investigating the role of drought on forest fires in the country using satellite images. *conference (In persian)*.
- Chew, Y., Ooi, S., Pang, Y., & Lim, Z. (2024). Framework to Generate Inventory Dataset for Disaster Behavior Analysis using Google Earth Engine: A Case Study in Peninsular Malaysia for Historical Forest Fire Behavior Analysis. *Forests*, 923.
- Dolling, K. C. (2005). A climatological study of the Keetch/Byram drought index and fire activity in the Hawaiian Islands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 17-27.
- Dowdy, A. M. (2009). Australian fire weather as represented by the McArthur forest fire danger index and the Canadian forest fire weather index. *Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, Australia, Tech. Rep.*
- Fraisse, C. W. (2013). Drought Decision-Support Tools: Introducing the Keetch Byram Drought Index—KBDI1.
- Gunawan, T., et al. (2023). Spatial-temporal analysis of drought index and hotspot distribution in Ogan Komering Ilir Regency using Keetch-Byram Drought Index (KBDI). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 10245–10258.
- Güngöroğlu, C. (2017). Determination of forest fire risk with fuzzy analytic hierarchy process and its mapping with the application of GIS. The case of Turkey/Çakırlar. *An International Journal of Human and Ecological Risk Assessment*, 388-406.
- Hossein Ali Farhad, & R. (2004). Forest fire simulation using spatial information systems (In persian). *conference*.
- Keetch, J. a. (1968). A drought index for forest fire control. Res. Pap. SE-38. Asheville, NC. *US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station*, 35-38.
- Khan Mohammadi, M. R. (2015). Analysis of the fire risk of Hyrcanian forests in northeast Iran using Ketch-Bayram and Mac-Arthur indices. (In persian).
- Makhdoom, M., et al. (2009). *Forest and rangeland fires in Iran and the affecting factors* (In Persian).
- Mohammadi Farida, S. N. (2011). Preparation of a forest fire risk map using GIS and AHP in a part of Paveh forests. (In persian).
- Nadia Farahnaza, A. A. (2020). Statistical Downscaling for the Projection of the Keetch Byram Drought Index in the Barito Basin. *Journal of Advanced Science Engineering and Information Technology*.
- Pahlevani, M., et al. (2015). *Spatial-temporal analysis of fire occurrence in Golestan forests* (In Persian).
- Patrick, H. F. (n.d.). Relationships between fire danger and the daily number and daily growth of active incidents burning in the northern Rocky Mountains, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 24.
- Porshkouri Elaheh, F. D. (2014). Evaluation of the global fire detection algorithm in the detection of active fire in the fields of natural resources using MODIS sensor images (case study: Golestan National Park). *Wood and Forest Science and Technology Research (In Persian)*, 81-97.

- Rui-xi, H. U.-f.-g.-w.-f. (2023). Application of Deep Learning Technology in Monitoring, Forecasting and Risk Assessment of Agricultural Drought. *Chinese Journal of Agromet*.
- Ruoyun, N. &. (2010). Study on Forest Fire Danger over Northern China during Recent 50 Years. *AGU Fall Meeting Abstract*.
- Taufik Ari Gunawan¹, I. C. (2023). ANALISIS SPASIAL TEMPORAL INDEKS KEKERINGAN DAN SEBARAN HOTSPOT PADA KABUPATEN OGAN KOMERING ILIR DENGAN METODE KEETCH BYRAM DROUGHT INDEX (KBDI).
- Taufik, M. S. ((2015).). Modification of a fire drought index for tropical wetland ecosystems by including water table depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1-10.
- Varol, T. E. (2016). Analysis of the forest fires in the Antalya region of Turkey using the Keetch–Byram drought index. *Journal of forestry research*, 811-9.
- Wastl, C. S. (2012). Recent climate change: long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1-13.
- Xanthopoulos, G. M. (2006). Is the Keetch-Byram drought index (KBDI) directly related to plant water stress. *Forest Ecology and Management*, p. S27.
- Yang Qiang, et al. (2009). Global wildfire potential using the Keetch–Byram Drought Index under climate change scenarios. *Climatic Change*, 93(1–2), 169–183.