Physical Geography Research Quarterly

Online ISSN: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

Spatiotemporal Analysis of Wildfire Distribution in Iran Using Satellite Data: Identifying High-Risk Regions and Critical Periods

Abolghasem Goorabi [1]

1. (Corresponding Author) *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: goroabi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
30 March 2024
Received in revised form:
29 May 2024
Accepted:
9 July 2024
Available online:
23 August 2024

Keywords:
Wildfire,
Spatiotemporal Pattern,
MODIS Satellite,
Iran,
Analysis Of Burned Area,
Fire Management Strategies.

ABSTRACT

Wildfires represent a critical environmental challenge in Iran, posing severe threats to natural resources and ecosystems. This study aims to analyze the spatiotemporal patterns of wildfires across Iran from 2003 to 2023, leveraging satellite data to identify high-risk provinces and critical periods. The findings contribute to recommendations for optimal fire station placement. The methodology integrates time-series satellite data, spatiotemporal analyses using Google Earth Engine and GIS, and multivariate regression modeling with kernel density estimation to identify influential environmental factors and areas with frequent fires. Results reveal that out of a total burned area of 95,600 square kilometers, the largest burned area was recorded in 2010 (7,722 km²) and the smallest in 2022 (3,031 km²). A negative correlation of -0.24 between monthly precipitation and burned area suggests that increased rainfall is associated with reduced wildfire incidence. The provinces of Khuzestan, Fars, and Ilam recorded the highest burned areas, with Khuzestan alone experiencing over 25,000 km² of burned terrain. Summer, particularly in the years 2010 and 2007, marked peak fire occurrence and extent. By accurately identifying spatiotemporal patterns, this study provides critical insights for targeted placement of fire stations and effective wildfire management in high-risk regions.

Cite this article: Goorabi, A. (2024). Spatiotemporal Analysis of Wildfire Distribution in Iran Using Satellite Data: Identifying High-Risk Regions and Critical Periods. *Physical Geography Research Quarterly, 56* (2), 91-110.
http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.374089.1007838

© The Author(s)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Wildfires are a major threat to environmental, economic and social stability in many parts of the world. Over time, the frequency and intensity of wildfires are increasing due to climate change, human activities and other natural factors. Iran is a country with diverse ecosystems and climatic conditions. The frequency of wildfires in Iran has also increased in recent decades. Understanding the spatio-temporal patterns of fires is important for developing effective techniques and strategies with minimal negative impacts. In this paper, the spatial distribution of wildfires in Iran between 2003 and 2023 has been studied using MODIS satellite data in high-risk periods and regions where environmental protection can be envisaged by optimising resource allocation.

In the light of the above discussion, the general objectives of the present research would henceforth be:

1. The spatio-temporal analysis of forest fires in Iran for the last twenty years.
2. To identify provinces with high risk of forest fires where management and resources could be focused.
3. To identify high-risk seasons and periods when forest fires are most likely to occur.
4. Provide actionable programme recommendations: Develop and organise preventive measures to reduce the impact of forest fires.

Methodology

This study has developed a method that combines satellite data analysis, geographic information system techniques and statistical methods to analyse the patterns of wildfires in Iran. The main dataset used in this study is from MODIS/006/MCD64A1, a globally recognised dataset for high-resolution global burned area information. The period considered in this paper is from 2003 to 2023; therefore, it includes all fire events recorded in this period as documented by the MODIS data.

Data Collection

Of these, the MODIS Burned Area Product MCD64A1 was selected because it has a very high spatial resolution of 500 metres and is frequently updated, making it suitable for monitoring wildfires over a long period of time. The subsequent extraction of burned areas per Iranian province was made possible by the cloud-based Google Earth Engine platform, which streamlines the way users can process and analyse large geospatial datasets.

Data Analysis and Processing

A combination of Google Earth Engine was used to analyse the extent, frequency and severity of wildfires in different provinces of Iran. Seasonal and annual totals were used to aggregate the data to identify patterns of occurrence. A spatio-temporal map showing the spatial occurrence of wildfires was created, from which hotspots were derived. Overlaying the burned area data with environmental and climatic variables using GIS techniques, such as vegetation type, elevation, slope, aspect, geographical units, mean temperature and rainfall, provided an indication of the conditions most associated with each land type.

Results and Discussion

Spatial Distribution of the Fires

There were strong spatial contrasts in the frequency of wildfires between Iranian provinces. Khuzestan, Fars and Ilam were identified as the most fire-prone regions, as their large burnt areas occurred consistently throughout the two decades studied, due to arid climatic conditions, better vegetation cover and a high frequency of wildfire incidents.

The low threat in Yazd, Qom and Semnan provinces can be explained by the large area of arid environment and sparse vegetation.

Distribution across time and seasonality

The temporal analysis highlighted the strong seasonality of forest fires, dominated by the summer months with high temperatures and low humidity. Spring events may be related to the accumulation of dry vegetation and the rise in temperature from March to May. Among the seasonal patterns, the lowest level of activity occurred in winter, from December to February, due to generally cooler and wetter conditions that neutralised the fire hazard.

Places and Time-Rime of High Risk

It is this integration of spatial and temporal analysis that has made it possible to outline high-risk areas and critical periods for fires in Iran. Regionally, the most vulnerable parts of the country included the south-western and western provinces of Khuzestan, Fars and Ilam respectively, essentially defining the areas where wildland fire management needs to be prioritised.

Within these regions, late spring and summer have been identified as the period when conditions are most conducive to fire outbreaks.

Factors of Wildfire Risk

The result of this study indicated that climatic and environmental factors are dominant in describing fire hazard patterns in Iran. High temperatures with low humidity and abundant vegetation are the causes of the main factors of fire hazards. This factor is influenced by human activities, especially land clearing and agricultural fields, and unintentional fires.

All these natural factors interact with others of anthropogenic origin and therefore require a

holistic approach to dealing with wildland fires, both in terms of prevention and response.

Consequences for Wildfire Management

The method also makes it possible to identify high-risk areas and critical periods, which is very important for policy makers and land managers. If resources were directed to these specific areas and times, it is likely that better wildfire prevention and control could be achieved. The establishment of firefighting units, early warning systems and community involvement in high-risk provinces can avert most of these influences on wildfires.

The integration of traditional fire management with modern remote sensing and GIS technologies could help to increase the effectiveness of such an attempt to manage wildfires.

Recommendations

Based on the findings of this research study, the following recommendations are made to improve the management of wildfires in Iran:

1. Focus on high-risk provinces: Concentrate efforts and resources on the high-risk southwestern and western provinces. Increase the number of fire stations, firefighting equipment and regular training of personnel to improve preparedness and response capabilities.
2. Seasonal fire monitoring and early warning: Apply seasonal monitoring, supported by satellite data analysis, to detect early signs of fire activity. For early detection of fire risks, establish an early warning system to alert authorities and people in advance to take necessary precautions in time.
3. Public awareness and participation: Educate the public about forest fires through community awareness to prevent the recurrence of fires. Educational campaigns such as safe agricultural practices, responsible land use and prompt reporting of fire incidents will be emphasised. Local communities, if involved in fire management plans, would feel more responsible and cooperative in protecting natural resources.
4. Policy and legislation: Develop and implement policies and legislation on wildfire prevention, land management and fire management. Activities that increase the risk of wildfires, such as land clearing and uncontrolled burning, should be controlled. Increased penalties for unlawful acts that cause fires could act as a deterrent to certain behaviours, with better compliance with prescribed fire safety regulations.
5. Research and development: There is a need to further develop the models used to predict wildland fires, including an understanding of the new dynamics of fire behaviour brought about by climate change. International organisations, government agencies and research institutions increase the likelihood of innovative solutions to wildland fires.

Conclusion

The wildfire distribution analysis developed here for Iran indicates the high-risk regions and their critical management periods. As fire risks are spatially and temporally distributed, the results will be very important for targeted wildfire management strategies. The result will be an overall capability for Iran to prioritise high-risk areas, develop early warning systems and engage local communities in ways that will ensure maximum fire prevention and control capability for Iran, while better protecting its natural resources and significantly reducing the socio-economic impacts of such destructive events.

It is this integration of advanced satellite remote sensing and GIS technologies that would be fundamental in achieving the stated goals and objectives of moving towards fire management practices that create harmony, resilience and sustainability.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی
شاپا الکترونیکی: 2423-7760
Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

تحلیل مکانی – زمانی توزیع آتش‌سوزی‌ها در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای: شناسایی مناطق پرخطر و دوره‌های بحرانی

ابوالقاسم گورابی [1]

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: goorabi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۱/۱۱
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۴/۱۹
تاریخ چاپ:
۱۴۰۳/۰۶/۰۲

واژگان کلیدی:
آتش‌سوزی،
تحلیل مکانی–زمانی،
داده‌های ماهواره‌ای مادیس،
مدیریت منابع طبیعی، ایران.

چکیده

آتش‌سوزی‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی ایران به شمار می‌روند. این پژوهش با هدف شناسایی استان‌های پرخطر و دوره‌های بحرانی وقوع آتش‌سوزی‌ها به تحلیل الگوهای مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها طی دوره ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲ در ایران، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای پرداخته است. هدف نهایی این تحقیق، بهبود مدیریت آتش‌سوزی‌ها با ارائه مکان استقرار بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در استان‌های پرخطر است. پژوهش از سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای و پلتفرم Google Earth Engine و GIS، و مدل‌سازی رگرسیونی چند متغیره و برآورد چگالی کرنل (KDE) جهت شناسایی عوامل محیطی مؤثر و مناطق پرتکرار و دوره‌های بحرانی وقوع آتش‌سوزی استفاده کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در طول دوره ۲۰ساله، مجموعاً ۹۵۵۶۰۰ کیلومترمربع از اراضی ایران دچار آتش‌سوزی شده‌اند. بیشترین مساحت سوخته شده در سال ۱۳۸۹ به میزان ۷۷۲۲ کیلومترمربع و کمترین آن در سال ۱۴۰۱ به میزان ۳۰۳۱ کیلومترمربع ثبت‌شده است. همبستگی بین بارش ماهانه و مساحت سوخته شده معادل ۰/۲۴- محاسبه شد که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین افزایش بارندگی و کاهش آتش‌سوزی‌ها است. استان‌های خوزستان(۲۵۰۰۰ کیلومترمربع)، فارس و ایلام با بیشترین مساحت سوخته شده را طی این دوره تجربه کرده‌اند و محل بهینه برای استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی هستند. همچنین، فصل تابستان، به‌ویژه در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۸۶، بیشترین تعداد و مساحت آتش‌سوزی‌ها را داشته است. این پژوهش با شناسایی الگوهای مکانی و زمانی، محل بهینه استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی در مناطق استان‌های مذکور را پیشنهاد می‌دهد.

استناد: شامحمدی، زینب؛ یاراحمدی، داریوش؛ عساکره، حسین و میرهاشمی، حمید. (۱۴۰۳). تحلیل گروه‌های زمانی حاکم بر تغییرات زمانی–مکانی بارش سالانه ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، *۵۶* (۲)، ۱۱۰-۹۱.
http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.375059.1007826

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

مقدمه

آتش‌سوزی‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهان هستند که طی دهه‌های اخیر با افزایش تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و سایر عوامل طبیعی، به‌شدت و فراوانی بیشتری رخ می‌دهند (Abatzoglou & Williams, 2016:11770; Bakke et al., 2023: 2). ایران به دلیل تنوع بالای اکوسیستم‌ها و شرایط اقلیمی متغیر، شاهد افزایش قابل‌توجهی در وقوع آتش‌سوزی‌ها بوده است. این آتش‌سوزی‌ها علاوه بر تخریب منابع طبیعی، تنوع زیستی و پایداری اقلیمی، تأثیرات گسترده‌ای بر جوامع انسانی و اقتصاد محلی دارند. تحلیل مکانی–زمانی توزیع آتش‌سوزی‌ها و شناسایی مناطق پرخطر در ایران از طریق داده‌های ماهواره‌ای، نقشی کلیدی در مدیریت بهتر منابع طبیعی و کاهش اثرات مخرب این حوادث دارد(Nami et al., 2018:373).

آتش‌سوزی‌ها علاوه بر تخریب وسیع جنگل‌ها، مراتع و مزارع، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی، منابع طبیعی، و پایداری اقلیمی ایجاد می‌کنند (بهرامی پیچاقچی و غلامی سفیدکوهی، ۱۴۰۳: ۱۲۸). این پدیده، با انتشار گازهای گلخانه‌ای، نه‌تنها به تشدید تغییرات اقلیمی منجر می‌شوند (بهرامی و غلامی، ۱۴۰۳: ۳ ؛ Yue et al., 2023:1616 ؛ Gallo et al., 2023:3103 ؛ Bowman et al., 2009: 481)، بلکه به دلیل کاهش پوشش گیاهی، افزایش فرسایش خاک و تغییر در چرخه‌ها و الگوهای آب‌وهوایی (مانند دما، بارش و باد) (Bakke et al., 2023: 5) می‌توانند به تخریب اکوسیستم‌ها و پوشش گیاهی منجر شوند که این امر روی جذب کربن، میزان تبخیر و بارش، و حتی الگوهای جریان هوا تأثیرگذار است. در نتیجه، این تغییرات می‌توانند باعث ایجاد بی‌ثباتی در اقلیم یک منطقه در مقیاس‌های مختلف شوند و روند طبیعی و متعادل آن را به هم بزنند. پایداری اقلیمی به معنای جلوگیری از این تغییرات و حفظ تعادل طبیعی اقلیم است. ایران، با داشتن جنگل‌ها و مراتع قابل‌توجه، به‌ویژه در مناطق شمالی همچون مازندران و گلستان، و همچنین سایر نواحی کوهستانی در معرض خطر بالای آتش‌سوزی قرار دارد (بهرامی و غلامی، ۱۴۰۳: ۵؛ Dong et al., 2023:9532). عواملی نظیر افزایش دما، کاهش بارش، توسعه شهری و فعالیت‌های انسانی (Sadeghi, Ahmadi Nadoushan, & Ahmadi Sani, 2024, p. 100496) به افزایش تعداد و شدت این آتش‌سوزی‌ها کمک می‌کنند (شجاعی زاده و داداشی رودباری، ۱۴۰۲: ۴۲؛ Dong et al., 2023: 9532). از طرف دیگر عوامل ژئومورفولوژیک می‌تواند بر آتش‌سوزی‌ها نقش قابل‌توجهی داشته باشند (Carmo et al.,2011: 169).

تحقیقات نشان داده‌اند که عوامل اقلیمی مانند دما، بارش و رطوبت نسبی نقش بسزایی در وقوع و شدت آتش‌سوزی‌های جنگلی دارند. در استان مازندران، بیشتر آتش‌سوزی‌ها در ماه‌های گرم و در مناطق کم ارتفاع رخ می‌دهند، که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی بر وقوع این حوادث است (بهرامی پیچاقچی و غلامی سفیدکوهی، ۱۴۰۳: ۱۲۸؛ احمدی اردکانی، ۱۳۹۴: ۱۷۲). در استان گلستان بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱، بیش از ۱۸۰۰۰ حادثه آتش‌سوزی ثبت‌شده است که بیشتر آن‌ها در ماه‌های گرم، به‌ویژه تیر(ژوئن)، رخ‌داده‌اند (بهرامی پیچاقچی و غلامی سفیدکوهی، ۱۴۰۳: ۱۲۸). این الگوهای مکانی و زمانی وقوع آتش‌سوزی‌ها اهمیت تحلیل دقیق‌تر و شناسایی عوامل مؤثر را بیش‌ازپیش نشان می‌دهند.

باوجود پیشرفت‌های انجام‌شده در پژوهش‌های آتش‌سوزی، هنوز تحلیل جامع و ملی از توزیع زمانی و مکانی آتش‌سوزی‌ها در ایران وجود ندارد. پژوهش‌های قبلی (بهرامی پیچاقچی و غلامی سفیدکوهی، ۱۴۰۳: ۱۲۸؛ بهرامی و غلامی، ۱۴۰۳: ۵؛ شجاعی زاده و داداشی رودباری، ۱۴۰۲: ۴۲) بیشتر به تأثیرات اقلیمی بر وقوع آتش‌سوزی‌ها در مناطق خاص پرداخته‌اند، اما تحلیل کلی از توزیع آتش‌سوزی‌ها در سطح کشور ارائه نشده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های بلندمدت ماهواره‌ای مادیس و با بهره‌گیری از تکنیک‌های تحلیل سری زمانی داده‌ها، به پر کردن این خلأ پژوهشی می‌پردازد و تصویری جامع از توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها در سراسر ایران و راهکارهای پیشگیرانه در بهبود مدیریت زیست‌محیطی ارائه

می‌دهد.

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل الگوهای مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ (۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲) در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جهت شناسایی مناطق (استان‌های) پرخطر و دوره‌های بحرانی وقوع آتش‌سوزی‌ها جهت بهبود مدیریت محیطی، و مستندسازی تخصیص بهینه منابع و پیشنهاد ایستگاه‌ها و تأسیسات اطفای حریق در مکان‌های پرخطر می‌باشد. بر این اساس این پژوهش می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مدیریتی و پیشگیرانه مؤثر برای حفاظت از محیط‌زیست و کاهش خسارات زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها کمک کرده و راهکارهای مدیریتی کارآمدی برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی کشور ارائه دهد. پرسش‌های کلیدی این تحقیق شامل شناسایی الگوهای مکانی و زمانی وقوع آتش‌سوزی‌ها در ایران، نقش داده‌های ماهواره‌ای در شناسایی مناطق و زمان‌های پرخطر، و تعیین تأثیر عوامل محیطی (واحدهای ژئومورفولوژیک، ارتفاع، شیب، جهات) بر وقوع آتش‌سوزی‌ها هستند.

محدوده موردمطالعه

ایران با تنوع گسترده جغرافیایی و اقلیمی، مستعد آتش‌سوزی‌های وسیع در انواع پوشش‌های طبیعی از جمله جنگل‌ها، مراتع و عرصه‌های طبیعی است. مناطق شمالی مانند استان‌های مازندران و گلستان به دلیل جنگل‌های پهن‌برگ هیرکانی، تراکم بالای پوشش گیاهی، و شرایط اقلیمی مرطوب، از جمله مناطقی هستند که به‌شدت در معرض آتش‌سوزی قرار دارند (بهرامی پیچاقچی و غلامی سفیدکوهی، ۱۴۰۳، ۱۲۸). با توجه به پوشش قابل‌توجه مراتع و جنگل‌های بلوط در زاگرس و به دلیل شرایط نیمه‌خشک، و همچنین تأثیر و پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم چرای بی‌رویه (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۶: ۳؛ Jaafari et al., 2017:32)، قطع غیرمجاز درختان (جورغلامی، ۱۳۹۲، ۱۱۶) و توسعه دیم‌زارها (Ruíz-García et al., 2022, p. 383) بر پوشش زمین، این مناطق و سایر مراتع کوهستانی ایران با خطر بالای آتش‌سوزی مواجه‌اند.

علاوه بر این، مناطق کوهستانی در غرب و جنوب غربی ایران، از جمله استان‌های لرستان، ایلام و خوزستان، به دلیل ترکیبی از شرایط اقلیمی (مانند دمای بالا و رطوبت پایین) (Naszarkowski et al., 2024:172746) و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی (مانند زمین‌های هموار ازیک‌طرف و از طرف دیگر شیب‌های تند و ارتفاعات متنوع)، مستعد آتش‌سوزی هستند. دامنه پرشیب و مرتفع بادگیر و جغرافیای کوهستانی می‌توانند سرعت و شدت انتشار آتش‌سوزی را افزایش دهند.

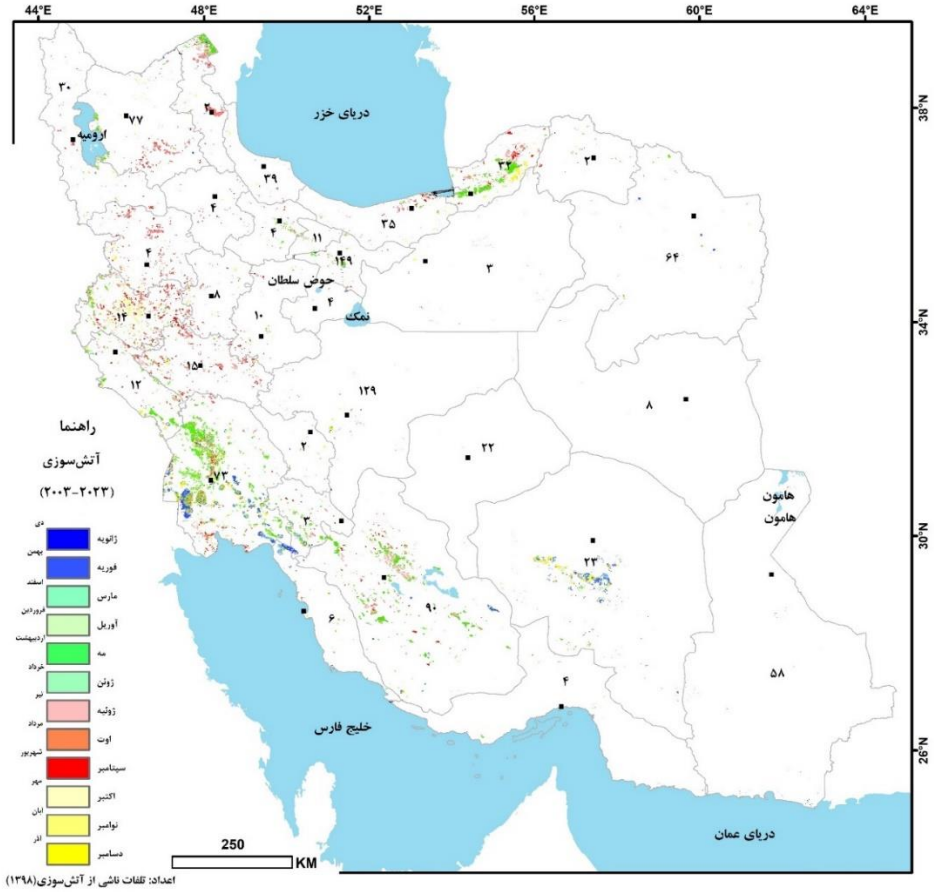
این مطالعه کل منطقه جغرافیایی ایران را با تمرکز بر مناطقی که از لحاظ تاریخی تحت تأثیر آتش‌سوزی‌ها قرارگرفته‌اند، پوشش می‌دهد. این تحقیق با در نظر گرفتن تمامی این مناطق، به‌منظور ارائه تحلیل‌های جامع و دقیق از توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران انجام می‌شود. هدف از این تحلیل، کمک به شناسایی مناطق پرخطر برای استقرار پایگاه‌های امداد آتش‌نشانی و تخصیص بهینه منابع در سطح ملی است. این مطالعه همچنین به درک بهتر از تأثیرات ترکیبی عوامل طبیعی و انسانی در بروز آتش‌سوزی‌ها کمک می‌کند و می‌تواند راهکارهای مؤثری برای مدیریت و پیشگیری از آتش‌سوزی در سرتاسر کشور ارائه دهد. شکل نقشه تهیه‌شده بر اساس داده‌های ماهواره‌ای «MODIS» (محصول MCD64A1

---

۱ . داده‌های «MODIS/006/MCD64A1» بخشی از مجموعه داده‌های MODIS Burned Area هستند که توسط ماهواره‌های Terra و Aqua ناسا تهیه می‌شوند. این داده‌ها به‌طور ماهانه و در مقیاس جهانی، مناطق سوخته شده را شناسایی و ثبت می‌کنند. الگوریتم MCD64A1 از ترکیب تصاویر بازتاب سطحی MODIS (باندهای ۵ و ۷ که در محدوده مادون‌قرمز کوتاه قرار دارند) و مشاهدات آتش فعال استفاده می‌کند. این الگوریتم با استفاده از شاخص پوشش گیاهی حساس به سوختگی (VI) و تصحیح‌های زمانی، به شناسایی و تعیین تاریخ سوختن هر پیکسل پرداخته و اطلاعات دقیق‌تری از نواحی تحت تأثیر آتش‌سوزی‌ها ارائه می‌دهد. علاوه بر این، کیفیت داده‌ها از طریق یک سیستم بررسی کیفیت تضمین می‌شود که به شناسایی شرایط خاصی نظیر سلول‌های آب، داده‌های ناقص، و دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت پرداخته و آن‌ها را علامت‌گذاری می‌کند.

نسخه ۶٫۱) و توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها را در سراسر ایران طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ (۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲) را نشان می‌دهد. این نقشه بر اساس روزهای سال (کدهای ۱ تا ۳۶۶) به ۱۲ کلاس تقسیم‌شده است که هر کلاس به یک ماه از سال اشاره دارد. الگوریتم‌های به‌کاررفته برای تولید این داده‌ها شامل ترکیب بازتاب سطحی MODIS و مشاهدات آتش فعال در محدوده ۱ کیلومتری هستند. شاخص پوشش گیاهی حساس به سوختگی (VI)[1]به همراه تصحیحات زمانی، در تشخیص دقیق‌تر زمان و مکان وقوع آتش‌سوزی‌ها استفاده‌شده‌اند.

در نقشه (شکل)، رنگ‌های سبز به آتش‌سوزی‌های بهاری، رنگ‌های صورتی، نارنجی و قرمز به آتش‌سوزی‌های تابستانی، رنگ‌های زرد به آتش‌سوزی‌های پاییزی، و رنگ‌های آبی به آتش‌سوزی‌های زمستانی اشاره دارند. این توزیع رنگی کمک می‌کند تا الگوهای مکانی – فصلی آتش‌سوزی‌ها به‌وضوح شناسایی شوند. به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم مانند جنگل‌های بلوط در زاگرس و مراتع جنوب و غرب ایران، این الگوها می‌توانند به شناسایی مناطق پرخطر و دوره‌های زمانی بحرانی که بیشترین احتمال وقوع آتش‌سوزی را دارند، کمک کنند (شکل).



شکل ۱. توزیع مکانی–زمانی آتش‌سوزی‌های ایران بر اساس ماه‌های وقوع طی ۱۳۸۲ – ۱۴۰۲ (۲۰۰۳–۲۰۲۳)

1. Burn Sensitive Vegetation Index (VI)

روش پژوهش

این پژوهش برای تحلیل الگوهای مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران از ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای، اقلیمی و توپوگرافی استفاده می‌کند تا دیدی جامع و دقیق دست یابد. به‌عنوان نخستین منبع اصلی، از چند مجموعه دیتاست‌های موجود برای شناسایی پهنه‌های آتش‌سوزی و مناطق دقیق مناطق سوخته شده مه در

جدول و جدول و شکل ذکرشده‌اند.

الف) داده‌های ماهواره‌ای:

از داده‌های سنسورهای MODIS و VIIRS ناسا برای آشکارسازی وقوع آتش‌سوزی‌ها و استخراج اطلاعات دقیق از ناهنجاری‌های حرارتی و نقاط داغ آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران در طی یک دوره ۲۰ساله ۱۳۸۲-۱۴۰۲ (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) استفاده‌شده‌اند. ترکیب این دو (MODIS با دقت مکانی ۱ کیلومتر و VIIRS با دقت ۳۷۵ متر) امکان شناسایی آتش‌سوزی‌های بزرگ و کوچک در سراسر کشور را ممکن می‌سازند. از سایر دیتاست‌ها برای اعتبارسنجی برخی آتش‌سوزی‌ها به دلیل شرایط زمانی و مکانی استفاده‌شده‌اند (

جدول).

جدول ۱. تصاویر و دیتاست‌های مورداستفاده جهت تجزیه‌وتحلیل آتش‌سوزی‌ها (مرتب‌شده بر اساس وضوح مکانی و زمانی)

نام دیتاست	منبع	نوع داده	وضوح مکانی	پوشش زمانی	ویژگی‌های کلیدی
Sentinel-2	ESA	تصاویر چند طیفی	۲۰-۱۰ متر	۲۰۱۵ - تا کنون	تصاویر با وضوح‌بالا برای طبقه‌بندی پوشش زمین، تهیه نقشه مناطق سوخته، پایش پوشش گیاهی پس از آتش‌سوزی.
Landsat	USGS، ناسا	تصاویر چند طیفی	۳۰ متر	۱۹۷۲ - تا کنون	داده‌های تاریخی بلندمدت برای تحلیل تأثیرات آتش‌سوزی، تغییرات پوشش زمین، و پایش پوشش گیاهی
VIIRS	ناسا، NOAA	تصاویر ماهواره‌ای	۳۷۵ متر	۲۰۱۲ - تا کنون	وضوح مکانی بالاتر نسبت به MODIS، مناسب برای شناسایی رویدادهای آتش‌سوزی‌های کوچک‌تر
MODIS	ناسا	تصاویر ماهواره‌ای	۱ کیلومتر	۲۰۰۰ - تا کنون	داده‌های جهانی شناسایی آتش با به‌روزرسانی روزانه، مناسب برای شناسایی مکان‌های آتش فعال و تهیه نقشه مناطق سوخته شده.

ب) داده‌های محیطی:

این پژوهش، برای درک بهتر شرایط اقلیمی مؤثر بر آتش‌سوزی، از داده‌های اقلیمی مربوط به بارش و دما نیز بهره برده است. این داده‌ها که در جدول به‌تفصیل آمده‌اند، شامل مجموعه داده‌های معتبر CHIRPS و ERA5 هستند برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های اقلیمی هستند. این اطلاعات اقلیمی نقش مهمی در شناسایی دوره‌های زمانی بحرانی ایفا می‌کنند که ممکن است با افزایش خطر آتش‌سوزی همراه باشند. جدول ویژگی‌های دیتاست‌های مورداستفاده برای مطالعه آتش‌سوزی‌ها را نشان می‌دهد، این دیتاست‌ها بر اساس وضوح مکانی و زمانی مرتب‌شده‌اند.

جدول ۲. مجموعه داده‌های مورداستفاده جهت تجزیه‌وتحلیل بارش

نام دیتاست	توضیحات	محدوده زمانی	رزولوشن مکانی	رزولوشن زمانی	واحد

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)	CHIRPS یک مجموعه داده جهانی بارش است که داده‌های ایستگاه‌های زمینی را با مشاهدات ماهواره‌ای ترکیب می‌کند.	۱۹۸۱ – حال حاضر	~ ۰,۰۵ درجه (حدود ۵,۵ کیلومتر)	روزانه، ماهانه	میلی‌متر
ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)	ERA5 داده‌های مجدد تحلیل‌شده جهانی است که توسط ECMWF تولیدشده است و شامل داده‌های بارش نیز است.	۱۹۷۹ – حال حاضر	~ ۳۱کیلومتر	ساعتی، روزانه، ماهانه	میلی‌متر

برای اطمینان از دقت و هماهنگی داده‌ها، تمامی داده‌های مکانی، شامل تصاویر ماهواره‌ای و لایه‌های محیطی، به سیستم مختصات WGS84 برای یکسان‌سازی و هماهنگی مکانی ژئورفرنس شده‌اند. این مرحله برای تحلیل و مصورسازی دقیق ضروری است. در مرحله بعد، با توجه به اینکه ابرها و تداخل‌های جوی می‌توانند دقت داده‌های آتش‌سوزی را کاهش دهند با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی ابر، مانند مجموعه داده ارزیابی کیفیت (QA SDS) ارائه‌شده توسط MODIS، ابر و نویز از داده‌ها حذف‌شده‌اند (ماسک گذاری ابر). داده‌های VIIRS نیز تحت همین ماسک گذاری قرار خواهند گرفت تا دقت در شناسایی آتش بهبود یابد. در مرحله پایانی، آتش‌سوزی‌ها با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی آتش MODIS و VIIRS استخراج‌شده‌اند. این الگوریتم‌ها بر اساس ناهنجاری‌های حرارتی عمل می‌کنند و امکان شناسایی آتش‌سوزی‌های فعال را فراهم می‌کنند.

با توجه به گستره مکانی (تمام ایران) و زمانی (۲۰ سال و ۳۶۵ روز سال) و حجم عظیم داده‌های موردنیاز، برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی از پلتفرم محاسباتی Google Earth Engine استفاده‌شده است. این پلتفرم به دلیل دسترسی گسترده به داده‌ها دورسنجی و قدرت پردازشی بالای خود، امکان تحلیل‌های وسیع مکانی– زمانی را برای ما فراهم آورده است. برای نمایش بصری و تهیه نقشه نقاط (پهنه‌های) آتش‌سوزی و دیگر تحلیل‌های مکانی، از نرم‌افزارهای ArcGIS بهره برده‌ایم این نرم‌افزار نه‌تنها ابزارهای ضروری برای نمایش نتایج به‌صورت نقشه‌های دقیق، بلکه امکان تجزیه‌وتحلیل‌های آماری بین نقشه‌ها و متغیرها را فراهم آورده است.

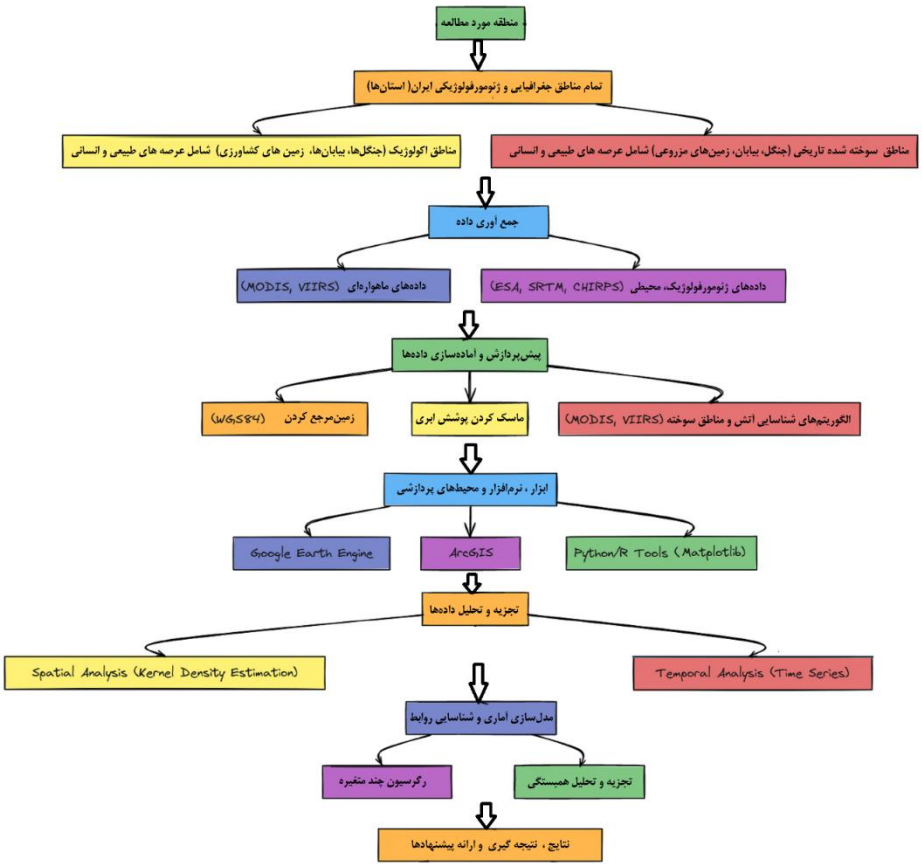
این پژوهش، از زبان برنامه‌نویسی پایتون و جاوا اسکریپت برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی (جاوا اسکریپت برای تعامل مستقیم با GEE و پایتون برای پردازش نهایی داده‌ها، تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی خارج از محیط GEE) استفاده کرده است. در این پژوهش ما با استفاده از کتابخانه‌های مختلف (پانداس، ژئو پانداس، سی بورن، پلات لیب، سایکیت لرن)، پایتون امکان پردازش داده‌های بزرگ، انجام تحلیل‌ها، تجزیه‌وتحلیل مکانی – زمانی داده‌ها و تولید جداول، نمودارهای لازم از روندهای زمانی و تحلیل همبستگی‌ها در طی سال‌های مختلف، اجرای رگرسیون چند متغیره و شناسایی روابط بین متغیرهای محیطی و وقوع آتش‌سوزی بهره برده‌ایم.

برای شناسایی مناطق مستعد و پرتکرار آتش‌سوزی از برآورد چگالی کرنل (KDE[1]) که به‌صورت غیرپارامتریک، توزیع احتمالی رخدادهای آتش‌سوزی طی ۱۳۸۲–۱۴۰۲(۲۰۰۳–۲۰۲۳) را برآورد و نقشه‌های سطحی از تراکم آتش‌سوزی را تولید می‌کند، استفاده‌شده است. تحلیل سری‌های زمانی برای شناسایی الگوهای زمانی وقوع آتش‌سوزی‌ها و تهیه نقشه‌های مرتبط استفاده‌شده است. رویدادهای آتش‌سوزی در بازه‌های زمانی ماهانه و سالانه تجمیع شده تا روندهای فصلی و دوره‌های بحرانی (نقشه‌ها و نمودارهای مکانی و زمانی) برای مدیریت آتش شناسایی شوند. همچنین، می‌توان ارتباط بین وقوع آتش‌سوزی و سایر عوامل را تحلیل کرد. این تحلیل‌ها نقشه‌های مناطقی با خطر آتش‌سوزی بالا درگذشته را تولید خواهند کرد. از مدل رگرسیون چندمتغیره برای سنجش رابطه بین وقوع آتش‌سوزی و متغیرهای محیطی و تحلیل همبستگی

1. Kernel Density Estimation - KDE

برای بررسی رابطه خطی یا غیرخطی بین وقوع آتش‌سوزی و عوامل محیطی به کار گرفته‌شده‌اند(Hantson et al., 2016:3359).

برای شناسایی فراوانی مکانی (استان‌ها) و الگوهای مکانی آتش‌سوزی‌ها، از داده‌های ماهواره‌ای مادیس که اطلاعات دقیقی از تاریخ (روز) و مساحت مناطق سوخته را ارائه می‌دهند، استفاده‌شده است. ابتدا داده‌های مربوط به آتش‌سوزی‌ها در استان‌های مختلف ایران برای بازه زمانی ۲۰ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۳) استخراج و سپس بر اساس تعداد روز و مساحت آتش‌سوزی‌ها در هر استان در طول دوره موردبررسی، تجزیه‌وتحلیل‌ها ارائه شدند. این داده‌ها شامل «مساحت×روزهایی» است که در هرسال در هر استان آتش‌سوزی رخداده است. برای این کار پس از انجام محاسبات لازم بر روی تصاویر، از تکنیک‌های GIS و محاسبات فراوانی استفاده شد تا بتوان فراوانی رخدادهای آتش‌سوزی (روز × مساحت) را به تفکیک هر استان به دست آورد.



شکل ۲. فلوچارت پژوهش؛ فرآیند جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های مکانی-زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران

یافته‌ها

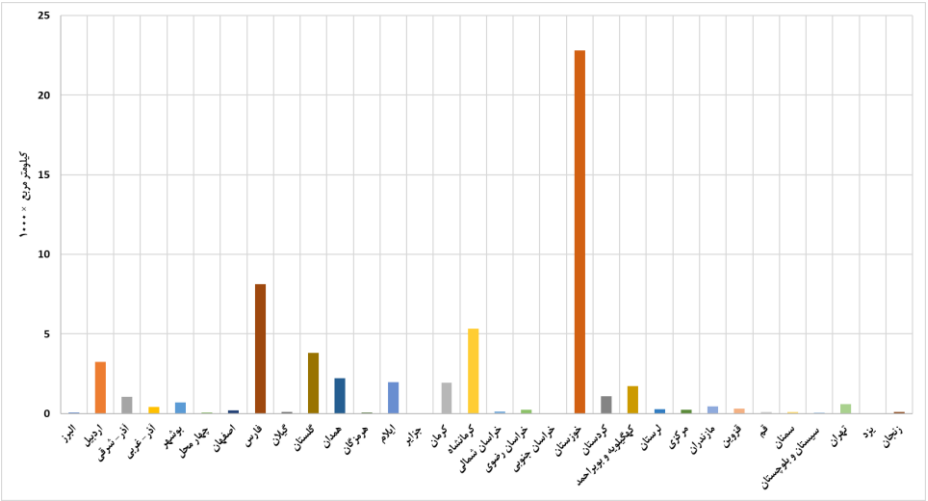
اندازه‌گیری‌های این پژوهش نشان داد که مجموع مناطق سوخته شده در ایران طی دوره ۲۰ساله ۹۵۶۰۰ کیلومترمربع بوده است (به‌طور متوسط هرسال ۴۵۰۰~ کیلومترمربع). بیشترین آن در سال ۲۰۱۰(۷۷۲۲ کیلومترمربع) و کمترین آن در سال ۲۰۲۲ (۳۰۳۱ کیلومترمربع) رخداده است. با افزایش بارندگی میزان آتش‌سوزی‌ها کاهش‌یافته است (همبستگی بین بارندگی ماهانه و منطقه سوخته برابر ۰,۲۴-).

تحلیل مکانی - زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران

با توجه به دلایل مؤثر بر آتش‌سوزی‌ها در ایران و به دلیل تنوع اقلیمی و جغرافیایی، آتش‌سوزی‌ها الگوهای مکانی و زمانی متفاوتی دارند که بررسی دقیق آن‌ها برای شناخت و مدیریت این آن‌ها ضروری است. با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های تحلیلی (شکل)، این بخش به شناسایی توزیع مکانی و زمانی، فراوانی، و تغییرات زمانی و مکانی آتش‌سوزی‌ها در ایران می‌پردازد تا مناطق و دوره‌های بحرانی مشخص و راهبردهای مدیریتی لازم را تدوین نماید.

توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها

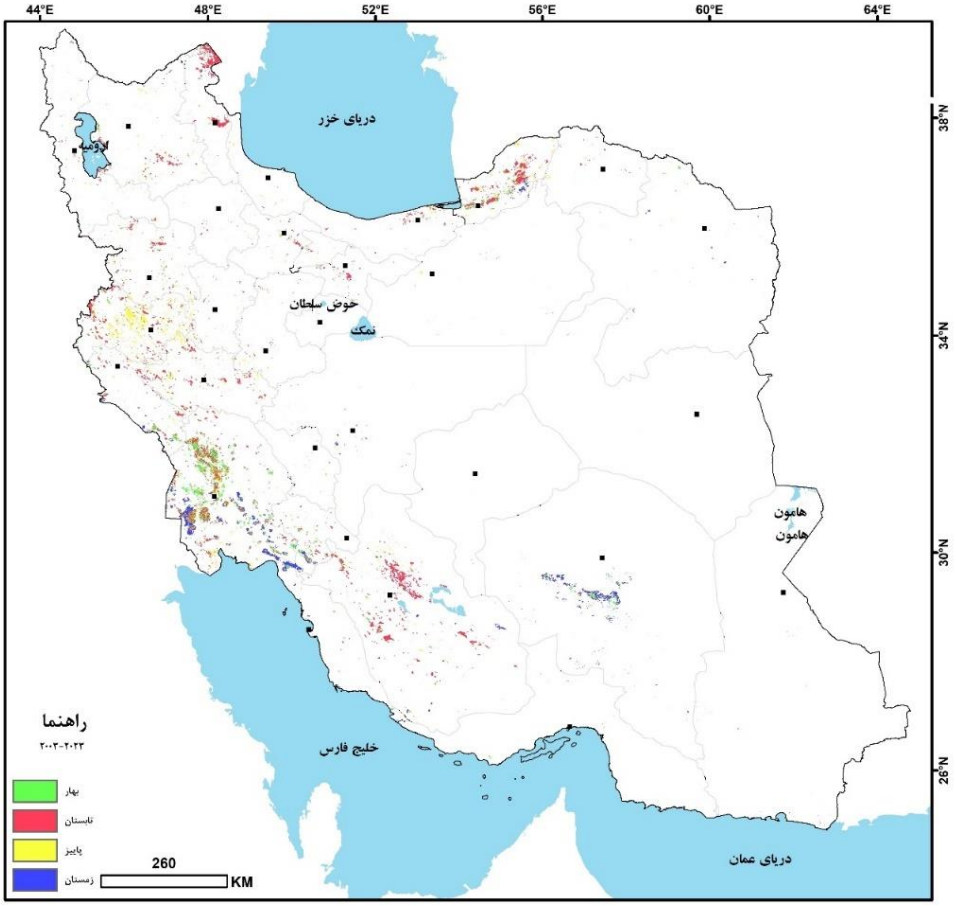
شکل توزیع مکانی کل مناطق سوخته در استان‌های مختلف ایران را طی دوره ۱۳۸۲-۱۴۰۲(۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) نمایش می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده نام استان‌هاست که به ترتیب حروف الفبا مرتب‌شده‌اند. محور عمودی مساحت آتش‌سوزی‌ها را بر حسب کیلومترمربع نشان می‌دهد. استان خوزستان بیشترین مساحت آتش‌سوزی‌ها، با مساحتی بیش از ۲۵۰۰۰ کیلومترمربع، را در بین تمام استان‌ها دارد. این نکته نشان می‌دهد که خوزستان ازنظر وقوع آتش‌سوزی‌ها یکی از پرخطرترین مناطق ایران است. استان فارس نیز با مساحتی در حدود ۷۵۰۰ کیلومترمربع، یکی از استان‌های با بیشترین وقوع آتش‌سوزی‌ها می‌باشد. استان‌های گلستان، اردبیل، و کهگیلویه و بویراحمد نیز، با مساحتی در حدود ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلومترمربع از آتش‌سوزی‌ها را به خود اختصاص داده و در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مقابل، برخی از استان‌ها مانند البرز و قم کمترین میزان مناطق سوخته را دارند که نشان‌دهنده کمترین وقوع آتش‌سوزی‌ها در این مناطق هستند.



شکل ۳. توزیع سطوح آتش‌سوزی‌ها در استان‌های ایران ۱۳۸۲-۱۴۰۲ (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

شکل نقشه توزیع مکانی-زمانی (ماهانه) آتش‌سوزی‌ها را برای دوره زمانی ۱۳۸۲-۱۴۰۲(۲۰۰۳ تا ۰۲۳) نشان می‌دهد. فراوانی رنگ‌های قرمز و نارنجی در نقشه بیانگر ارتباط تنگاتنگ آتش‌سوزی‌ها با ماه‌های تابستانی (ژوئن، ژوئیه، اوت) و شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک است.

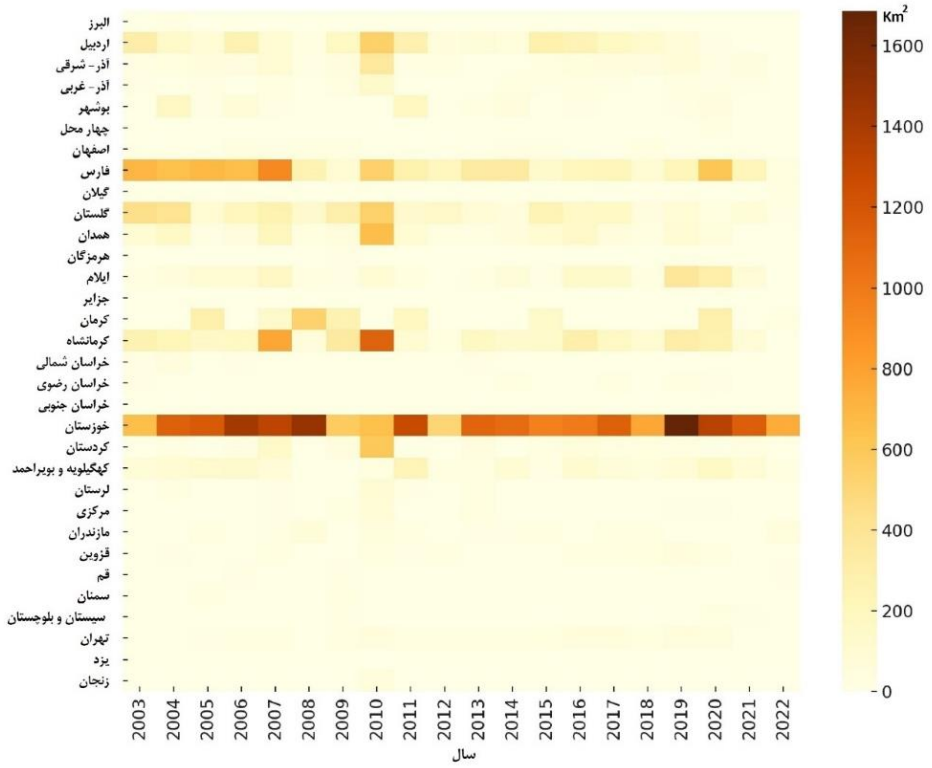
شکل نقشه پراکندگی مکانی – زمانی (فصلی) آتش‌سوزی‌ها را نشان می‌دهد. رنگ‌های سبز، قرمز، و زرد به ترتیب نشان‌دهنده آتش‌سوزی‌ها در فصل بهار، تابستان و پاییز می‌باشند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نواحی مختلفی از ایران، به‌ویژه مناطق غربی و جنوبی، به‌طور مکرر در معرض آتش‌سوزی قرارگرفته‌اند. نتایج این نقشه‌ها نشان‌دهنده تمرکز آتش‌سوزی‌ها، در ماه‌های گرم و فصل تابستان با بیشترین تعداد آتش‌سوزی‌ها است.



شکل ٤. توزیع مکانی و فصلی آتش‌سوزی‌ها ۲۰۰۳-۲۰۲۳ (۱۳۸۲-۱۴۰۲)

با توجه به نقشه‌های توزیع مکانی (شکل شکل)، مشخص است که مناطق جنوبی و غربی ایران به‌ویژه استان‌های خوزستان، فارس و کرمانشاه بیشترین تأثیرپذیری را از آتش‌سوزی‌ها دارند. این امر می‌تواند به دلیل پوشش گیاهی متراکم‌تر و شرایط آب‌وهوایی گرم‌تر در این مناطق باشد.

شکل نقشه حرارتی توزیع زمانی و مکانی آتش‌سوزی‌ها را در استان‌های ایران طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. نوار رنگی کناری شدت آتش‌سوزی‌ها را از ۰ تا ۱۶۰۰ کیلومترمربع نمایش می‌دهد. رنگ‌های روشن (زرد) نشان‌دهنده مساحت کمتر سوخته و رنگ‌های تیره‌تر (قهوه‌ای) بیانگر مساحت‌های بیشتری از مناطق سوخته است. بر اساس این نقشه، استان خوزستان بیشترین مساحت سوخته را در برخی سال‌ها (۲۰۱۹ با مساحتی بالغبر ۱۶۸۷,۱۴ کیلومترمربع) داشته است، که بارنگ‌های قهوه‌ای تیره‌تر نشان داده می‌شود. این امر نشان‌دهنده آتش‌سوزی‌های گسترده در این استان طی سال‌های خاص است. پس از خوزستان، استان فارس، بیشترین مساحت مناطق سوخته را به‌ویژه در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ داشته است. در مقابل، استان‌هایی مانند البرز و قم، تقریباً هیچ آتش‌سوزی قابل‌توجهی را تجربه نکرده‌اند و بارنگ‌های بسیار روشن مشخص‌شده‌اند.

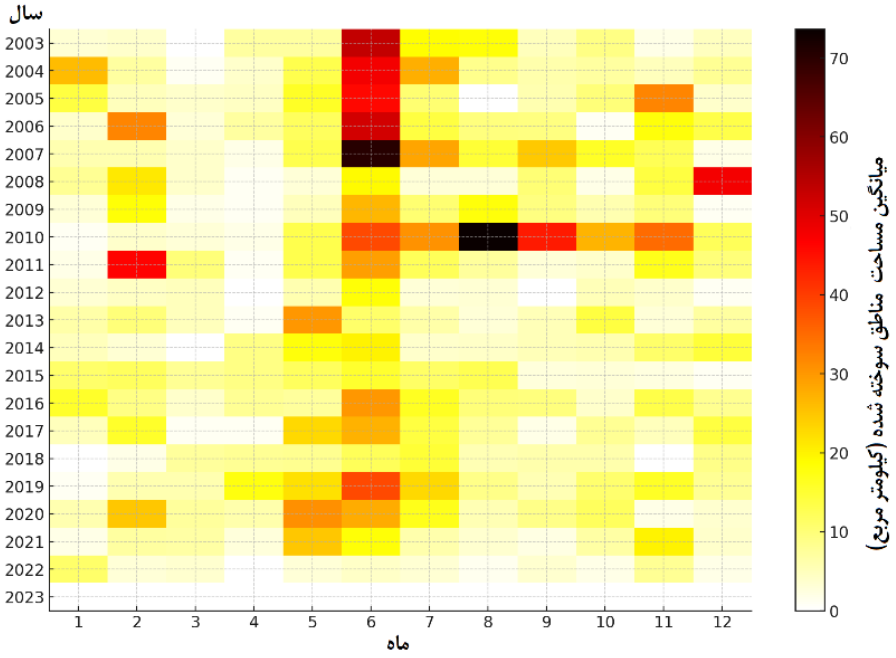


شکل ۵. تغییر زمانی–مکانی سطوح آتش‌سوزی‌ها در استان‌های ایران ۲۰۰۳–۲۰۲۳ (۱۳۸۲–۱۴۰۲)

با بررسی نقشه‌ها و نمودارهای زمانی، می‌توان مشاهده کرد که استان‌های خوزستان، فارس و کرمانشاه بیشترین مساحت آتش‌سوزهای را طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ دارند. به‌ویژه، خوزستان در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ و فارس در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ با افزایش شدید مساحت آتش‌سوزی‌ها مواجه شده‌اند که این سال‌ها را می‌توان به‌عنوان نقاط بحرانی شناسایی کرد.

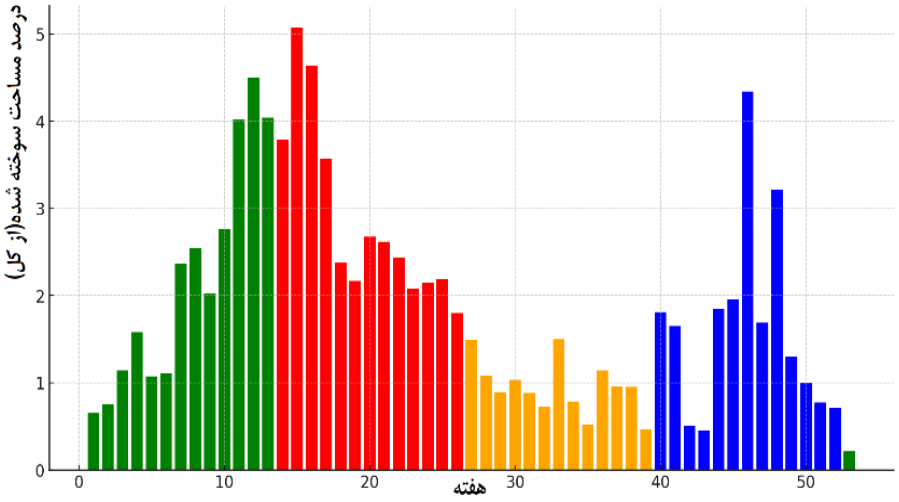
روند سالانه تغییرات در استان‌ها نشان می‌دهد که برخی سال‌ها مانند ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ دارای افزایش‌های چشمگیری در مساحت آتش‌سوزها بوده‌اند. این افزایش‌ها ممکن است به دلیل شرایط اقلیمی خاص، خشک‌سالی، یا عوامل انسانی باشد که نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد.

شکل نمودار حرارتی میانگین مساحت مناطق سوخته شده را بر اساس ماه‌های سال و طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به تصویر می‌کشد. این نمودار به‌وضوح نشان می‌دهد که بیشترین آتش‌سوزی‌ها در ماه‌های گرم‌تر سال، به‌ویژه ماه‌های خرداد، تیر و مرداد رخداده است، به‌خصوص در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ که اوج آتش‌سوزی‌ها در این ماه‌ها قابل‌مشاهده است. همچنین، مساحت‌های سوخته در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ نسبت به سایر سال‌ها به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بوده است. نمودار رابطه مستقیم بین فصل‌های گرم‌تر و وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ‌تر است و اهمیت برنامه‌ریزی پیشگیرانه در ماه‌های خاص سال را برجسته می‌کند.



شکل ٦. توزیع ماهانه-سالانه مساحت سوخته شده در ایران (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

شکل نمودار توزیع درصد مساحت کل سوخته شده را به تفکیک هفته‌های سال شمسی از ابتدای فروردین تا انتهای سال نشان می‌دهد. بیشترین آتش‌سوزی‌ها در هفته‌های میانی سال، به‌ویژه در هفته‌های ۱۵ تا ۲۵، رخداده است. این توزیع به‌خوبی همبستگی زمانی وقوع آتش‌سوزی‌ها با ماه‌های گرم‌تر سال را نشان می‌دهد. مقایسه با نمودار ماهانه نشان می‌دهد که تمرکز آتش‌سوزی‌ها در ماه‌های تابستانی و اوایل پاییز در هر دو نمودار یکسان است.



شکل ۷. فراوانی زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

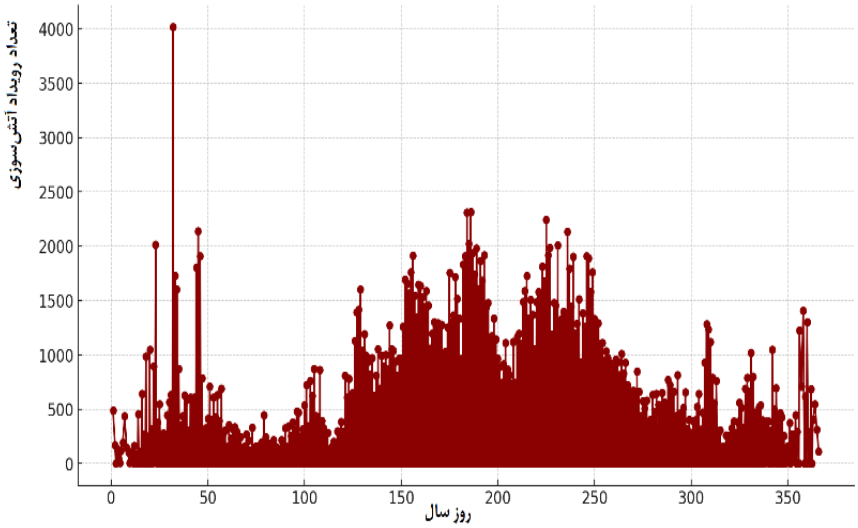
شکل نمودار حرارتی توزیع زمانی مساحت مناطق سوخته شده در ایران را در فصل‌های مختلف طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به تصویر می‌کشد. این نمودار نشان می‌دهد که فصل تابستان به‌طور مداوم دارای بیشترین میزان آتش‌سوزی‌ها بوده است، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۷ که مساحت‌های سوخته شده به ترتیب به ۴۷٫۶۹٪ و ۳۷٫۹۱٪ رسیده است. در

مقابل، فصل زمستان کمترین میزان آتش‌سوزی‌ها را در طول این دوره داشته و به‌طورکلی میزان آتش‌سوزی در این فصل به‌مراتب پایین‌تر از سایر فصول بوده است.

شکل ۸. توزیع فصلی مساحت مناطق سوخته شده در ایران (۲۰۰۳–۲۰۲۳)

فراوانی زمانی و مکانی آتش‌سوزی‌ها

نمودار شکل ، هیستوگرام زمانی آتش‌سوزی‌ها، نشان می‌دهد که الگوی وقوع آتش‌سوزی‌ها در ایران در طی سال به‌طور نابرابری توزیع‌شده است، به‌طوری‌که بیشترین تعداد آتش‌سوزی‌ها در بازه‌های زمانی خاصی از سال (روز ۱۲۵–۲۵۰ سال؛ تیر تا آبان ماه)، به‌وضوح قابل‌مشاهده است. اوج تعداد آتش‌سوزی‌ها در این بازه زمانی به بیش از ۲۲۵۰ حادثه می‌رسد که نشان‌دهنده وجود دوره‌های زمانی بحرانی است.



شکل ۹. هیستوگرام زمانی وقوع آتش‌سوزی‌ها در ایران در طی سال‌های ۲۰۰۳–۲۰۲۳ (۱۳۸۲– ۱۴۰۲)

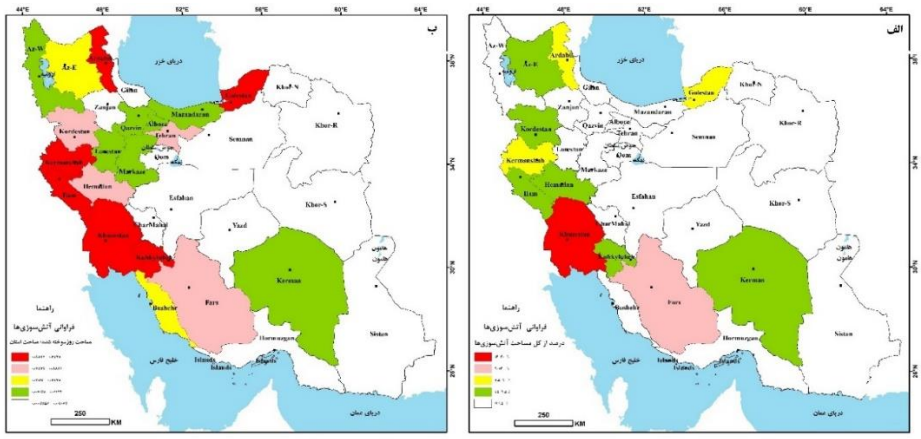
شکل (الف و ب) نشان‌دهنده توزیع فراوانی آتش‌سوزی‌ها در استان‌های مختلف ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ است. در این نقشه، فراوانی آتش‌سوزی‌ها بر اساس مساحت روز سوخته شده به مساحت کل استان (مساحت کل آتش‌سوزی‌ها) محاسبه‌شده و استان‌ها بارنگ‌های مختلف بر اساس سطح فراوانی آتش‌سوزی‌ها دسته‌بندی‌شده‌اند. بر اساس تحلیل فراوانی آتش‌سوزی‌ها در استان‌ها می‌توان به نتایج زیردست یافت:

۱. نقشه الف (راست): این نقشه درصد مساحت آتش‌سوزی در هر استان را نسبت به‌کل مساحت آتش‌سوزی‌های رخداده شده در ایران در طول دوره زمانی ۲۰۰۳–۲۰۲۳ نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، این نقشه به ما نشان می‌دهد که هر استان چه سهمی از کل آتش‌سوزی‌های کشور داشته است.

۲. نقشه ب (چپ): این نقشه مساحت روزهای سوخته شده را نسبت به مساحت کل هر استان نشان می‌دهد. به این معنا که چه میزان از مساحت هر استان در طول این دوره زمانی به دلیل آتش‌سوزی‌ها تحت تأثیر قرارگرفته است.

بر اساس شکل الف استان‌های خوزستان، ایلام و کرمانشاه بالاترین درصد از کل مساحت آتش‌سوزی‌ها در ایران را به خود اختصاص داده‌اند. این نشان‌دهنده آن است که این استان‌ها به‌صورت کلی بیشترین میزان آتش‌سوزی را نسبت به دیگر استان‌ها تجربه کرده‌اند. شکل ب نیز نشان می‌دهد که استان‌های جنوبی و غربی مانند خوزستان و ایلام دارای بیشترین مساحت روزهای سوخته شده نسبت به مساحت کل استان هستند. این به این معناست که در این مناطق، نه‌تنها تعداد آتش‌سوزی‌ها زیاد است، بلکه این آتش‌سوزی‌ها به مساحت بیشتری از استان‌ها آسیب رسانده‌اند.

در شکل الف، استان خوزستان با بیشترین درصد مساحت آتش‌سوزی در کشور، به‌عنوان یک نقطه بحرانی شناسایی می‌شود. این استان دارای پوشش گیاهی قابل اشتعال به‌ویژه به دلیل وجود جنگل‌های بلوط و مناطق کشاورزی وسیع و آب‌وهوای گرم است که آن را به‌شدت مستعد آتش‌سوزی و در معرض خطرات بالای آتش‌سوزی قرار می‌دهد. شکل ب به ما کمک می‌کند که تأثیر نسبی آتش‌سوزی‌ها بر هر استان را درک کنیم. به‌عنوان‌مثال، اگرچه استان کرمان مساحت کمتری نسبت به استان‌هایی مانند خوزستان از آتش‌سوزی‌ها را تجربه کرده، اما به دلیل وسعت بزرگ‌تر آن، درصد کمتری از کل مساحت خود را تحت تأثیر قرار داده است. استان فارس به دلیل دارا بودن مراتع و زمین‌های کشاورزی، با وجود نداشتن تراکم بالای جنگل، همچنان در معرض آتش‌سوزی قرار دارند.



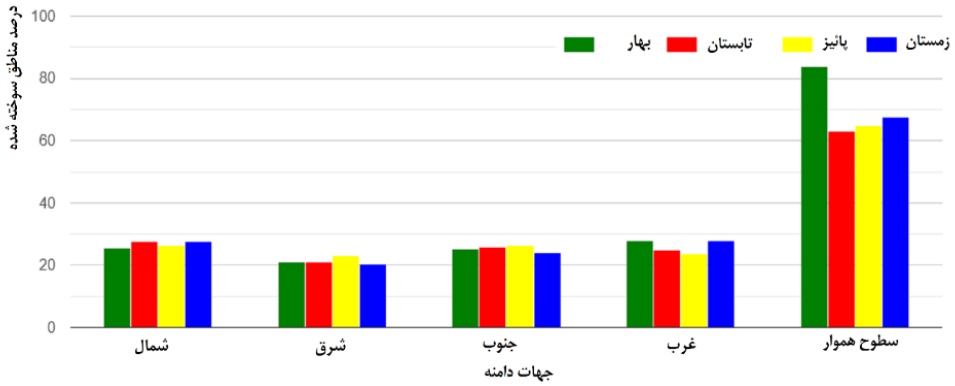
شکل ۱۰. فراوانی آتش‌سوزی‌ها در استان‌ها (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

رابطه آتش‌سوزی‌ها با عوامل محیطی

بر اساس تجزیه‌وتحلیل‌های مکانی – زمانی انجام‌شده در این مطالعه، ارتباط قابل‌توجهی بین توزیع آتش‌سوزی‌ها و عوامل محیطی و ژئومورفولوژیک در ایران شناسایی‌شده است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و طبقه‌بندی مناطق بر اساس جهات توپوگرافی، واحدهای ژئومورفولوژیک، شیب و ارتفاع نشان می‌دهد که توزیع آتش‌سوزی‌ها نه‌تنها به عوامل اقلیمی وابسته است، بلکه ویژگی‌های توپوگرافیک نیز تأثیر چشمگیری بر فراوانی و شدت آتش‌سوزی‌ها دارند. در ادامه، به بررسی نتایج کلیدی این مطالعه در رابطه با این عوامل پرداخته می‌شود.

توزیع آتش‌سوزی‌ها و جهت دامنه

نتایج نشان می‌دهد که مناطق هموار (Flat) با شیب کمتر از ۲٪ بیشترین درصد آتش‌سوزی‌ها را در تمام فصول تجربه کرده‌اند. در فصل بهار، بیش از ۸۳٫۷٪ از مساحت‌های سوخته شده در مناطق هموار رخداده است که این درصد در تابستان و زمستان به ترتیب به ۶۳٫۰۶٪ و ۶۷٫۵۶٪ کاهش‌یافته است. این روند می‌تواند ناشی از شرایط خشک‌تر و کم‌تر بودن پوشش گیاهی در فصل تابستان و همچنین تفاوت‌های اقلیمی در فصول مختلف باشد (شکل).

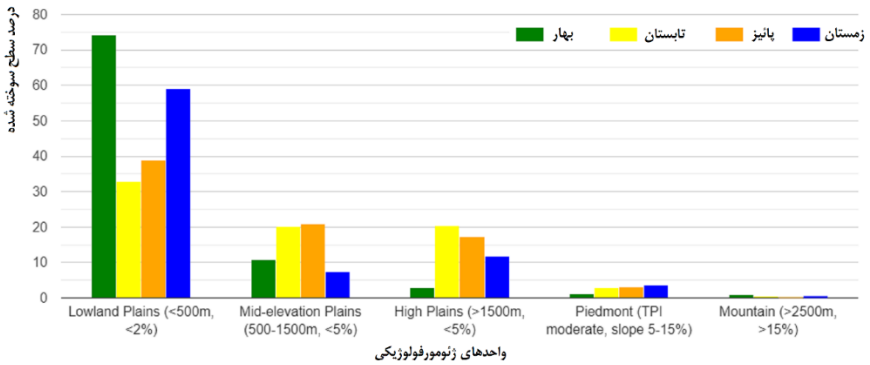


شکل ۱۱. توزیع آتش‌سوزی‌ها در جهات دامنه در ایران (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

در مقابل، دامنه‌های دارای جهت شمالی و غربی، به‌خصوص در زمستان نیز درصد بالایی از آتش‌سوزی‌ها را تجربه کرده‌اند. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت جهت دامنه در توزیع آتش‌سوزی‌ها است.

ارتباط واحدهای ژئومورفولوژیک و توزیع آتش‌سوزی‌ها

طبقه‌بندی مناطق بر اساس واحدهای ژئومورفولوژیک و ارزیابی روابط آن با آتش‌سوزی‌ها نشان می‌دهد که دشت‌های کم ارتفاع (ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر، شیب کمتر از ۲٪) به‌طور ویژه در فصل بهار با بیش از ۷۴٪ از مساحت‌های سوخته شده، بیشترین آسیب را دیده‌اند. این درصد در زمستان به ۵۹٪ رسیده است. مناطق دشت با ارتفاع متوسط (۵۰۰–۱۵۰۰ متر) در تابستان و پاییز درصد بیشتری از آتش‌سوزی‌ها را تجربه کرده‌اند که این ممکن است به دلیل تغییرات اقلیمی و توزیع پوشش گیاهی در این مناطق باشد (شکل).

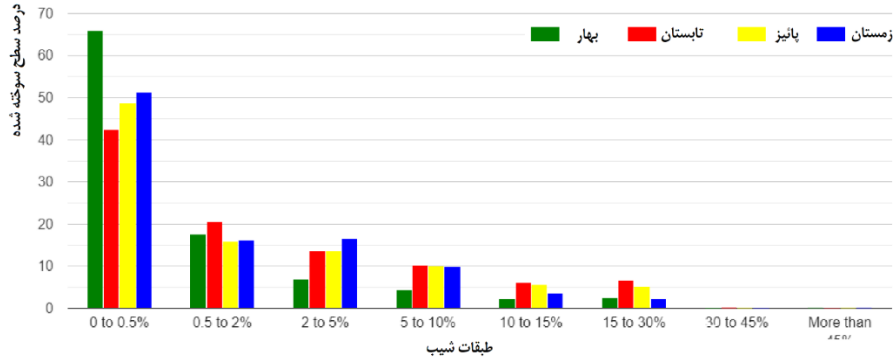


شکل ۱۲. رابطه آتش‌سوزی‌ها و واحدهای ژئومورفولوژیک در ایران (۲۰۰۳–۲۰۲۳)

در مقابل، مناطق کوهستانی با ارتفاع بالای ۲۵۰۰ متر، کمترین درصد آتش‌سوزی‌ها را داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که واحدهای ژئومورفولوژیک مرتفع‌تر با شیب بیشتر کمتر در معرض آتش‌سوزی هستند.

رابطه شیب زمین و آتش‌سوزی‌ها

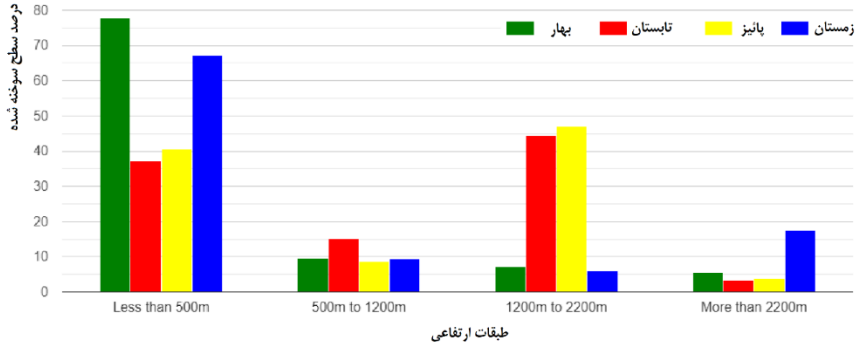
شیب زمین نیز تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع آتش‌سوزی‌ها دارد. مناطقی با شیب بین ۰ تا ۰٫۵٪ در تمام فصول بیشترین درصد مساحت‌های سوخته شده را به خود اختصاص داده‌اند. در بهار، بیش از ۶۵٪ از مساحت‌های سوخته شده در این طبقه شیب قرار دارند. اما با افزایش شیب به بیش از ۱۰٪ ، درصد مساحت‌های سوخته شده به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد، که این امر ممکن است به دلیل محدودیت‌های پوشش گیاهی و همچنین شرایط محیطی در این مناطق باشد (شکل).



شکل ۱۳. رابطه شیب زمین و آتش‌سوزی‌ها در ایران (۲۰۰۳–۲۰۲۳)

ارتفاع و فراوانی آتش‌سوزی‌ها

توزیع آتش‌سوزی‌ها بر اساس طبقات ارتفاعی نیز نشان می‌دهد که مناطق با ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر در فصل بهار بیشترین آسیب را تجربه کرده‌اند. بیش از ۷۷٫۸۹٪ از مساحت‌های سوخته شده در این فصل به مناطق با ارتفاع کم اختصاص دارد. این در حالی است که در فصل تابستان، مناطق با ارتفاع ۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰ متر با ۴۴٫۵۵٪ از مساحت‌های سوخته شده، بیشترین آتش‌سوزی‌ها را تجربه کرده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده تغییرات فصلی قابل‌توجه در توزیع آتش‌سوزی‌ها بر اساس ارتفاع است.



شکل ۱٤. توزیع آتش‌سوزی‌ها در طبقات ارتفاعی ایران (۲۰۰۳-۲۰۲۳)

ویژگی‌های توپوگرافی، از جمله شیب، ارتفاع، جهت دامنه و واحدهای ژئومورفولوژیک، تأثیر زیادی بر توزیع و شدت آتش‌سوزی‌ها دارند. مناطق هموار و دشت‌های کم ارتفاع به‌ویژه در فصل بهار و زمستان بیشترین درصد آتش‌سوزی‌ها را تجربه می‌کنند. از سوی دیگر، مناطق کوهستانی و مناطق با شیب زیاد کمتر در معرض آتش‌سوزی قرار دارند. این یافته‌ها می‌تواند به مدیریت بهتر منابع طبیعی و جلوگیری از آتش‌سوزی‌های گسترده کمک کند.

بحث

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با بسیاری از تحقیقات قبلی که در حوزه تحلیل مکانی – زمانی آتش‌سوزی‌ها انجام‌شده‌اند، همخوانی دارد (Eskandari et al., 2020: 106720; Shahzad et al., 2024:15). بررسی توزیع مکانی آتش‌سوزی‌ها در مناطق پرخطر مانند استان‌های خوزستان و فارس نشان می‌دهد که این مناطق به دلیل بهار زودرس، پوشش گیاهی متراکم قابل اشتعال، شیب و ارتفاع کم و زمین هموار، و اقلیم خشک و گرم، مستعد وقوع آتش‌سوزی‌های وسیع هستند. نتایج این پژوهش همچنین تأیید می‌کند که تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دما و کاهش بارش، می‌تواند به‌طور مستقیم منجر به افزایش شدت و تعداد آتش‌سوزی‌ها در مناطق مختلف ایران شود. این روند نشان‌دهنده افزایش خطر در مناطق غیرمنتظره‌ای است که پیش‌ازاین کمتر موردتوجه قرارگرفته‌اند. این یافته‌ها با نتایج مطالعاتی (Dong et al.,2023:9532) در چین مشابه است که نشان‌دهنده تأثیرات دما و اقلیم بر توزیع آتش‌سوزی‌ها است. این نکته حائز اهمیت است که در ایران، به‌ویژه به دلیل تنوع اقلیمی و جغرافیایی، توزیع آتش‌سوزی‌ها پیچیدگی بیشتری دارد و ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی ممکن است به‌طور هم‌زمان نقش داشته باشند. همچنین، پژوهش با مطالعات پرنیان و همکاران (۱۴۰۰: ۱۰۲) بر روی استان گلستان، به الگوهای زمانی مشابهی اشاره‌کرده است (پهلوانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰)، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال که بیشترین تعداد آتش‌سوزی‌ها رخ می‌دهد. بااین‌حال، برخی تفاوت‌ها نیز وجود دارد. برخلاف برخی از مطالعات که تأکید بیشتری بر نقش عوامل انسانی مانند تغییر کاربری زمین و توسعه شهری در وقوع آتش‌سوزی‌ها دارند

(Mehmood et al., 2024:100521)، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عوامل طبیعی نیز مانند دما و پوشش گیاهی نقش بسیار مهمی در توزیع آتش‌سوزی‌ها دارند. این یافته ممکن است به دلیل تفاوت‌های اقلیمی و جغرافیایی بین ایران و سایر مناطق باشند که بر شدت و فراوانی آتش‌سوزی‌ها تأثیر می‌گذارند. بااین‌وجود رویکرد یک‌جانبه نبوده، و با روند توسعه انسانی کنونی، از جمله گسترش مناطق کشاورزی و تغییر کاربری زمین نیز نقش مهمی در افزایش خطر آتش‌سوزی‌ها در مناطق جدید خواهند داشت. این عوامل در ترکیب با تغییرات اقلیمی می‌توانند شدت و فراوانی آتش‌سوزی‌ها را افزایش دهند.

یکی از نتایج این پژوهش، وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ در مناطقی بود که به دلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و کمبود پوشش گیاهی کمتر در معرض خطر آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شدند. به‌ویژه در برخی از مناطق مرکزی و شرقی ایران که به‌طورمعمول در تحلیل‌های قبلی به‌عنوان مناطق کم‌خطر شناسایی‌شده بودند، افزایش چشمگیری در تعداد آتش‌سوزی‌ها مشاهده شد. احتمالاً این افزایش ناشی از تغییرات اقلیمی و کاهش بارش در سال‌های اخیر و همچنین تغییرات در الگوی استفاده از زمین بوده است. توسعه کشاورزی و افزایش فعالیت‌های انسانی در این مناطق ممکن است به افزایش تعداد آتش‌سوزی‌ها کمک کرده باشد.

نتایج این پژوهش بر اهمیت مدیریت آتش‌سوزی‌ها به‌عنوان یک چالش چندبعدی تأکید دارد. ازنظر زیست‌محیطی، آتش‌سوزی‌ها باعث تخریب گسترده جنگل‌ها و مراتع شده و باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند که به تغییرات اقلیمی دامن می‌زنند. تخریب منابع طبیعی و از بین رفتن پوشش گیاهی منجر به افزایش فرسایش خاک و کاهش توانایی مناطق برای جذب کربن می‌شود. ازنظر اقتصادی، آتش‌سوزی‌ها خسارات زیادی به زیرساخت‌ها، زمین‌های کشاورزی و منابع آبی وارد می‌کنند. همچنین، تأثیرات اجتماعی ناشی از آتش‌سوزی‌ها شامل تخلیه مناطق، افزایش بیماری‌های تنفسی و کاهش امنیت غذایی است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دمای بالا و رطوبت پایین به‌عنوان دو عامل اصلی در وقوع آتش‌سوزی‌ها نقش دارند. همچنین، مناطق با پوشش گیاهی متراکم‌تر و شیب‌های کمتر، به دلیل امکان تجمع سوخت گیاهی بیشتر، بیشتر در معرض آتش‌سوزی قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که دما و پوشش گیاهی دو عامل کلیدی در تعیین شدت و فراوانی آتش‌سوزی‌ها در ایران هستند. همچنین، با توجه به تأثیرات تغییرات اقلیمی بر الگوهای دمایی و بارش در سال‌های اخیر، انتظار می‌رود که این عوامل در آینده نیز نقش مهمی در افزایش خطر آتش‌سوزی‌ها ایفا کنند. با توجه به این مکانیسم‌ها، نیاز به برنامه‌های مدیریت خطر و استراتژی‌های سازگار با شرایط اقلیمی آینده بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

این پژوهش با تحلیل جامع الگوهای مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران، به شناسایی مناطق پرخطر و دوره‌های بحرانی کمک کرده است. این نتایج می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران محیط‌زیست در تدوین برنامه‌های مدیریتی مؤثر برای کاهش خطرات ناشی از آتش‌سوزی‌ها و بهبود حفاظت از منابع طبیعی کشور کمک کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف تحلیل توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها در ایران و شناسایی مناطق پرخطر و دوره‌های بحرانی مدیریت آتش‌سوزی، نشان داد که استان‌های جنوب غربی و غربی، از جمله خوزستان، ایلام و فارس، بیشترین خطر وقوع آتش‌سوزی‌ها را دارند. این مناطق به دلیل ویژگی‌های اقلیمی خشک، دمای بالا و پوشش گیاهی متراکم بیشتر مستعد آتش‌سوزی‌های وسیع هستند. به‌علاوه، نتایج نشان داد که بیشترین آتش‌سوزی‌ها در ماه‌های تابستان رخ‌داده‌اند که بیانگر

اهمیت مدیریت متمرکز بر این دوره‌های بحرانی است. این یافته‌ها به ارتقای درک از توزیع مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها و عوامل محیطی و اقلیمی مؤثر بر وقوع آن‌ها کمک کرده و راهکاری برای مدیریت بهتر و کاهش خسارات آتش‌سوزی ارائه می‌دهد.

این پژوهش با تأکید بر نیاز به مدیریت استراتژیک و توزیع بهینه منابع در مناطق پرخطر، توصیه‌هایی برای سیاست‌گذاران ارائه می‌دهد. تخصیص منابع بیشتر به استان‌های شناسایی‌شده به‌عنوان پرخطر، از جمله تقویت زیرساخت‌های مقابله با آتش‌سوزی و ایجاد سیستم‌های هشدار زودهنگام در دوره‌های بحرانی، از جمله اقدامات ضروری است. علاوه بر این، برنامه‌های آموزشی برای جوامع محلی جهت افزایش آگاهی در مورد خطر آتش‌سوزی و نحوه مقابله با آن، می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطرات ایفا کند. استفاده از تحلیل‌های فضایی – زمانی و داده‌های ماهواره‌ای برای پایش و مدیریت بهینه آتش‌سوزی‌ها ضروری است.

یا توجه به گستره وسیع موردبررسی، از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به‌دقت مکانی و زمانی داده‌های ماهواره‌ای اشاره کرد. داده‌های مادیس با وضوح مکانی و زمانی متوسط ممکن است جزئیات کوچک‌تر و محلی آتش‌سوزی‌ها را از دست بدهد. همچنین، پژوهش به داده‌های ۲۰ساله محدودشده است و ممکن است الگوهای بلندمدت تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر آتش‌سوزی‌ها را به‌طور کامل پوشش ندهد. برای رفع محدودیت دقت مکانی، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، استان‌هایی که با خطر بالای آتش‌سوزی شناسایی‌شده‌اند، انتخاب و از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالاتر مانند داده‌های سنتینل-۲ استفاده شود.

پژوهش‌های آینده می‌توانند به بررسی تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی بر الگوهای آتش‌سوزی در ایران بپردازند و همچنین مقایسه‌ای بین ایران و سایر کشورهایی که دارای شرایط مشابه اقلیمی هستند، انجام دهند. همچنین، تحقیقات در مورد نقش فعالیت‌های انسانی مانند توسعه زمین و تغییر کاربری زمین در وقوع آتش‌سوزی‌ها می‌تواند به درک بهتری از تعامل بین عوامل طبیعی و انسانی در بروز این پدیده کمک کند. توسعه مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز از دیگر مسیرهای پیشنهادی است.

یافته‌های این پژوهش کاربردهای عملی متعددی برای مدیران محیط‌زیست، سیاست‌گذاران و جوامع محلی دارد. اجرای برنامه‌های پیشگیرانه از آتش‌سوزی، بهبود مدیریت اراضی، و ارتقای آگاهی عمومی از طریق آموزش‌های محلی می‌تواند به کاهش خطر آتش‌سوزی‌ها کمک کند. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند پهپادها برای پایش مناطق پرخطر و ارائه هشدارهای زودهنگام به جوامع محلی می‌تواند به بهبود کارایی مدیریت بحران کمک کند. این راهکارها، اگر به‌درستی اجرا شوند، می‌توانند به کاهش خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از آتش‌سوزی‌ها و حفاظت از منابع طبیعی ایران کمک کنند.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

نویسنده تمامی مراحل و بخش‌های انجام پژوهش را عهده‌دار بوده است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری رسانده بوده‌اند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را عهده‌دار بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

پهلوانی، پرهام؛ راعی، امین و بیگدلی، بهناز. (۱۳۹۸). تعیین فاکتورهای مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از ترکیب مدل رگرسیون اسپلاین تطبیقی چندمتغیره و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: جنگل گلستان). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶(۴)، ۱-۱۸.

بهرامی پیچاقچی، حدیقه؛ نوروز ولاشدی، رضا و غلامی سفیدکوهی، محمدعلی. (۱۴۰۳). بررسی روند آتش‌سوزی‌ها و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳ (۴۹)، ۱۲۸.

شجاعی زاده، کبری؛ احمدی، محمود و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۲). تغییرات زمانی-مکانی آتش‌سوزی نواحی رویشی ایران مبتنی بر داده‌های MODIS. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲ (۳۶)، ۴۱-۶۰

احمدی اردکانی، مرتضی؛ رجبی، محمد و سرکارگر اردکانی، علی. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی مناطق دارای پتانسیل آتش‌سوزی در جنگل‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۶ (۵۷)، ۱۷۲.

جورغلامی، مقداد؛ ریزوندی، وحید و مجنونیان، باریس. (۱۳۹۲). ارزیابی اثرات محیط‌زیستی بهره‌برداری حاصل از قطع درختان بر روی توده باقی‌مانده (مطالعه موردی: جنگل خیرود). *پژوهش‌های محیط‌زیست*، ۴(۷)، ۱۱۵-۱۲۴.

نصرتی رامش، منیژه؛ بیات، حسین و اسلامی، سیده فاطمه. (۱۳۹۶). تأثیر چرای دام بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (مطالعه موردی: حوضه گنبد ملایر). *در پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران*.

پرنیان، مینا، اسعدی اسکویی، ابراهیم و رهنما، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی روش‌های پایش و پیش‌بینی آتش‌سوزی نواحی رویشی ایران و جهان. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۲ (۴۷)، ۱۰۱-۱۲۰.

References

Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(42), 11770-11775. https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113

Ahmadi Ardakani, M., Rajabi, M., & Sarkargar Ardakani, A. (2015). Zoning areas with fire potential in forests using multi-criteria decision-making methods. *Geography and Environmental Planning*, *26*(57), 172. [In Persian]

Bahrami Pichaghchi, H., Norouz Valashdi, R., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2024). Analysis of wildfire trends and their relationship with climatic variables. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *13*(49), 128. [In Persian]

Bakke, S. J., Wanders, N., van der Wiel, K., & Tallaksen, L. (2023). A data-driven model for Fennoscandian wildfire danger. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. https://doi.org/10.5194/nhess-23-65-2023

Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., & D'Antonio, C. M. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, *324*(5926), 481-484. https://doi.org/10.1126/science.1163886

Carmo, M., Moreira, F., Casimiro, P., & Vaz, P. (2011). Land use and topography influences on wildfire occurrence in northern Portugal. *Landscape and Urban Planning*, *100*(1–2), 169-176. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.017

Dong, B., Li, H., Xu, J., Han, C., & Zhao, S. (2023). Spatiotemporal analysis of forest fires in China from 2012 to 2021 based on Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) active fires. *Sustainability*, *15*(12), 9532. https://doi.org/10.3390/su15129532

Eskandari, S., Miesel, J. R., & Pourghasemi, H. R. (2020). The temporal and spatial relationships between climatic parameters and fire occurrence in northeastern Iran. *Ecological Indicators*,

118, 106720. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106720

Gallo, C., Eden, J., Dieppois, B., Drobyshev, I., Fulé, P., San-Miguel-Ayanz, J., & Blackett, M. (2023). Evaluation of CMIP6 model performances in simulating fire weather spatiotemporal variability on global and regional scales. *Geoscientific Model Development, 16*, 3103-3120. https://doi.org/10.5194/gmd-16-3103-2023

Hantson, S., Arneth, A., Harrison, S. P., Kelley, D. I., Lasslop, G., Li, F., et al. (2016). The status and challenge of global fire modeling. *Biogeosciences, 13*(11), 3359-3375. https://doi.org/10.5194/bg-13-3359-2016

Jaafari, A., Mafi Gholami, D., & Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics, 39*, 32-44. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.003

Jourgholami, M., Rezouvandi, V., & Majnuniyan, B. (2014). Impact of information and communication technology on environment. *Environmental Researches, 4*(7), 115-124. [In Persian]

Kanwal, R., Rafaqat, W., Iqbal, M., & Song, W. (2023). *Data-driven approaches for wildfire mapping and prediction assessment using a convolutional neural network* (CNN). Remote Sensing.

Kaleem, Mehmood., Anees, Sh. A., Luo, M., Akram, M., Zubair, M., Khan, K. A., & Khan, W. R. (2024). "Assessing Chilgoza Pine (Pinus Gerardiana) Forest Fire Severity: Remote Sensing Analysis, Correlations, and Predictive Modeling for Enhanced Management Strategies." *Trees, Forests and People, 16* (June),100521. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100521.

Nami, M., Jaafari, A., Fallah, M., & Nabiuni, S. (2018). Prediction of wildfire probability in the Hyrcanian ecoregion using evidential belief function model and GIS. *International Journal of Environmental Science and Technology, 15*(2), 373-384. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1371-6

Naszarkowski, N. A. L., Cornulier, T., Woodin, S. J., Ross, L. C., Hester, A. J., & Pakeman, R. J. (2024). Factors affecting severity of wildfires in Scottish heathlands and blanket bogs. *Science of The Total Environment, 931*, 172746. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172746

Nosrati Ramesh, M., Bayat, H., & Eslami, S. F. (2017). The impact of grazing on some physical and chemical properties of soil (Case study: Gonbad Malayer Basin). In *15th Iranian Soil Science Congress*. [In Persian]

Pahlavani, P., Raee, A., & Beigdelii, B. (2019). Determining effective factors on forest fire using the compound of multivariate adaptive regression spline and genetic algorithm, a case study: Golestan, Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards, 6*(4), 1-18. [In Persian]

Parnian, M., Asadi Oskouei, E., & Rahnama, M. (2021). Review of monitoring and predicting forest fire in vegetation areas of Iran and the world. *Journal of Climatology Researches, 12*(47), 101-120. [In Persian]

Ruíz-García, V. H., Borja de la Rosa, M. A., Gómez-Díaz, J. D., Asensio-Grima, C., Matías-Ramos, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Forest fires, land use changes, and their impact on hydrological balance in temperate forests of Central Mexico. *Water, 14*(3), 383. https://doi.org/10.3390/w14030383

Sadeghi, A., Ahmadi Nadoushan, M., & Ahmadi Sani, N. (2024). Segment-level modeling of wildfire susceptibility in Iranian semi-arid oak forests: Unveiling the pivotal impact of human activities. *Trees, Forests and People, 15*, 100496. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100496

Shahzad, F., Mehmood, K., Hussain, K., Haidar, I., Anees, Sh. A., Muhammad, S., Ali, J., Adnan, M., Wang, Zh., & Zhongke, F. (2024). "Comparing Machine Learning Algorithms to Predict Vegetation Fire Detections in Pakistan." *Fire Ecology, 20* (1), 57. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00289-5.

Shahzad, K., Xu, Y., Luo, X., & Ali, K. (2024). Predicting wildfire incidents through satellite monitoring. Fire Management Strategies.

Shojaeizadeh, K., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Spatiotemporal changes of forest fire in vegetation areas of Iran based on MODIS sensor. *Journal of Natural Environmental Hazards, 12*(36), 1-15. [In Persian]

Yue, W., Ren, C., Liang, Y., Lin, X., Yin, A., & Liang, J. (2023). Wildfire risk assessment considering seasonal differences: A case study of Nanning, China. *Forests*. https://doi.org/10.3390/f14081616