

Probability-based modeling for a quantitative wildfire risk analysis in the protected areas of Guilan Province

Roghayeh Jahdi^{1*}, Mehrnoosh Masihpoor²

¹ Associate Professors, Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Former Ph.D. Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Wildfires reveal evidence of forest soil, water, and vegetation disturbances resulting from various interacting natural and human factors that create patterns that vary spatially and temporally. Fire risk assessment allows for identifying these factors and estimating their extent of influence, thereby determining locations at high fire risk. Fire risk assessment typically involves the ignition probability (IP) and burn probability (BP) modeling of natural and human-made resources, as well as identifying resource responses to fires of varying severity. In recent decades, wildfires have caused significant damage to the Hyrcanian forests in northern Iran, even in protected areas. Therefore, this study focuses on the spatial distribution of fire size, fire frequency, IP, and BP as essential components of the fire risk framework. First, a historical fire database (including ignition points, burned areas, etc.) was prepared using available resources and field surveys. Second, a modeling approach using a limited number of auxiliary variables representing the fire environment (fuel, topography, and weather) and the historical fires (1992-2022) was implemented to calculate IP and BP. The spatial distribution of these parameters helps improve decision-making in fire prevention and control strategies.

Materials and Methods

Guilan Province is located in northern Iran and has an area of 14,044 km² with an average elevation of 741 m above sea level. This province has 20 natural protected areas, which cover a total of 256,488 ha. ArcGIS 10.8 was used to create a historical fire database in the study area by digitizing fires between 1992 and 2022 from maps or by importing information directly from previous GIS datasets. Point process models (PPMs) were used to analyze the spatial distribution of fire frequency. PPMs are a regression approach to model point data (i.e., geographic coordinates) for the number of times a 100-m pixel burned between 1992 and 2022. An existing raster map of the study area was converted to points by calculating the center of each pixel, and each point was assigned a frequency. Furthermore, IP was calculated as the average ignition probability occurring over a year in a raster pixel. To utilize fire ignition density for planning preventive activities, the output values were classified into five classes reflecting ignition occurrences (from very low to very high). Finally, the fire risk using BP was assessed by considering topography, fuel loads, and weather using FlamMap. To calculate BP, 1000 random ignition points were created based on the distribution of historical ignition points in the study area. The maximum fire simulation time was set to 6 h (the average fire duration in the area).

Results and Discussion

There are 186 recorded fires (total burned area of 2232 ha) with an average annual number of 6 fires (average burned area of 12 ha) in protected areas. Fires smaller than 10 ha accounted for 62.4% and 30.8% of the fire occurrences and the burned area, respectively. Fires ranging from 10-50 ha accounted for 32.8% and 46.2% of the fire occurrence and the burned area, respectively. Fires between 50-100 ha accounted for 2.7% and 14.5% of the fire occurrence and the burned area, respectively. Finally, fires exceeding 100 ha accounted for less than 0.5% of the fire occurrence but alone accounted for 8.4% of the burned area. The distribution of fire frequency ranged from zero to six. The largest protected areas (40%) experienced no fires. Thirteen percent of these areas had one

to two fire frequencies. Furthermore, 48% of this area had more than two fire frequencies. About 35% of the study area had very low to low IP values, 36% had moderate IP, and 18% and 11% had high and very high IP, respectively. Eighty eight percent of the study area had low to moderate BP values, and 12% had high to very high predicted values. Two fire regimes can be distinguished in the area, one with relatively high fire frequency and BP (mainly at higher elevations) and the other with low fire frequency and BP (at lower elevations). Areas with high fire frequency and BP are very limited in extent and occur in patches in the southern area. In contrast, the low fire frequency and BP regime is the most widespread regime in the area (except for the southern part).

Conclusion

According to the simulated patterns of fire frequency, IP, and BP in the study area, a clear distinction between the actual historical fire perimeters and the predicted burn pattern emerges, indicating that there are areas of moderate to high IP where fires have not occurred in the past three decades. This is particularly evident in the southern and central parts of the area, where fires have either not occurred or have been very limited in extent. Therefore, a reasonable assessment could be that the likelihood of fire spread and vegetation communities undergoing extensive and long-term changes following a fire is high in the near future. Although this study focuses on protected forest areas, this approach can be applied to fire risk modeling at broader scales. This allows for broader applications in natural resource management and planning at regional and national levels. It also provides a comprehensive tool for assessing and managing forest vegetation, soil, and water vulnerability.

Keywords: Flammability, Fire behavior model, Protected areas, Biodiversity, Simulation.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research was supported by the University of Mohaghegh Ardabili (research grant number 1403/D/9/20461), which is hereby acknowledged.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All data and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Roghayeh Jahdi: Conceptualization, research framework design, writing and revision; **Mehrnoosh Masihpoor:** Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

Citation: Jahdi, R., & Masihpoor, M. (2025). Probability-based modeling for a quantitative wildfire risk analysis in the protected areas of Guilan Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 265-282.
doi:10.22098/mmws.2025.16219.1518

Received: 19 November 2024, Received in revised form: 7 January 2025, Accepted: 13 January 2025, Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 265-282

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مدل سازی مبتنی بر احتمال برای تحلیل کمی ریسک آتش سوزی در مناطق حفاظت شده استان گیلان

رقیه جهدی^{۱*}، مهرنوش مسیح پور^۲

^۱ دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ دانش آموخته دکتری، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده

آتش سوزی یکی از آفتگی های اصلی بوم سازگان های جنگلی است که آثار تخریبی زیادی روی پوشش گیاهی، خاک و آب داشته است. در تحقیق حاضر با استفاده از داده تاریخی آتش سوزی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) در ۲۰ منطقه حفاظت شده (۲۵۶۴۸۸ هکتار) در استان گیلان، طبقه بندی های اندازه و تکرار آتش سوزی با استفاده از مدل های فرآیند نقطه ای (PPMs)، مدل سازی های احتمال احتراق و احتمال سوختن مبتنی بر شبیه ساز FlamMap انجام شد. نتایج توزیع کلاس های اندازه آتش سوزی نشان داد که آتش سوزی های کم تر از ۱۰ هکتار به ترتیب ۶۲/۴ و ۳۰/۸ درصد از تعداد آتش سوزی ها و مساحت سوخته شده را به خود اختصاص داده اند. آتش سوزی های بین ۱۰ تا ۵۰ هکتار به ترتیب ۳۲/۸ و ۴۶/۲ درصد از تعداد آتش سوزی ها و مساحت سوخته شده را شامل شده اند. آتش سوزی های ۵۰-۱۰۰ هکتار به ترتیب ۲/۷ و ۱۴/۵ درصد از تعداد آتش سوزی ها و مساحت سوخته شده را پوشش داده اند. در نهایت، یک آتش سوزی بیش از ۱۰۰ هکتار کم تر از ۰/۵ درصد از تعداد آتش سوزی ها را شامل شده است، اما به تنهایی ۸/۴ درصد از مساحت سوخته شده را به خود اختصاص داده است. توزیع تکرار آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه از صفر تا شش متغیر است. ۴۰ درصد از مناطق حفاظت شده هیچ آتش سوزی را تجربه نکرده است. ۱۳ درصد از این مناطق ۱-۲ تکرار آتش سوزی داشته اند. همچنین، ۴۸ درصد از این مناطق بیش از دو تکرار آتش سوزی داشته اند. از نظر احتمال احتراق، ۳۵ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر خیلی کم و کم، ۳۶ درصد دارای مقادیر متوسط، ۱۸ و ۱۱ درصد به ترتیب دارای مقادیر زیاد و خیلی زیاد بودند. از نظر احتمال سوختن، ۸۸ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای ارزش های کم تا متوسط و ۱۲ درصد دارای مقادیر زیاد و بسیار زیاد بودند. به طور کلی، بیشترین رخداد آتش سوزی در جنوب و مرکز منطقه مورد مطالعه که پوشیده از جنگل های پهن برگ متراکم با انباشت زیاد بار ماده سوختنی آماده اشتعال در فصل آتش سوزی (از اواخر خرداد تا اسفند) است، مشاهده شد که نیازمند امکان سنجی برای توسعه گزینه های مدیریت آتش سوزی است. تحقیق حاضر بر ضرورت کاربرد نتایج مدل سازی ریسک آتش سوزی در پیش گیری و مدیریت آتش سوزی با هدف حفظ خدمات بوم شناختی حاصل از پوشش گیاهی، آب و خاک در استان گیلان و سایر مناطق با شرایط مشابه، تأکید می کند.

واژه های کلیدی: اشتعال پذیری، مدل رفتار آتش، مناطق حفاظت شده، تنوع زیستی، شبیه سازی.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

استناد: جهدی، رقیه، و مسیح پور، مهرنوش (۱۴۰۴). مدل سازی مبتنی بر احتمال برای تحلیل کمی ریسک آتش سوزی در مناطق حفاظت شده استان

گیلان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۲۶۵-۲۸۲.

doi:10.22098/mmws.2025.16219.1518

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۲۶۵ تا ۲۸۲

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

آتش سوزی یکی از مهم ترین آشفته گیاهی طبیعی در بوم سازگان های دارای پوشش های گیاهی مختلف است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر فرآیندهای ساختاری و عملکردی آنها با درجات مختلف تأثیر می گذارد (Morovati and Karami, 2024). آتش سوزی با از بین بردن پوشش گیاهی، مقادیر زیادی دی اکسید کربن ذخیره شده در آنها را آزاد می کند و از این رو، تا حد زیادی مسئول افزایش شدت تغییر اقلیم است (Singh, 2022). آتش سوزی ها به عنوان یکی از عوامل اصلی جنگل زدایی و تخریب زمین (Mishra et al., 2023)، باعث تغییر در الگوی پوشش گیاهی، ویژگی های خاک و فرآیندهای هیدرولوژیکی می شوند و در نتیجه شرایط حوزه آبخیز و کیفیت آب را تغییر می دهند و تهدیدی برای منابع تأمین آب به شمار می روند. افزایش سطح اسیدیته، گردش کم مواد مغذی و فعالیت زیستی در خاک، افزایش آبگریزی، کاهش ظرفیت نفوذ آب و در نتیجه افزایش رواناب، سیل و رانش زمین از پیامدهای اصلی آتش سوزی جنگل ها و مراتع گزارش شده اند (Roman et al., 2024; Fadaei et al., 2022). آتش سوزی زیان های اقتصادی قابل توجهی نیز به همراه دارد. به عنوان مثال، هزینه اقتصادی آتش سوزی جنگل های اندونزی در سال ۲۰۱۵ بیش از ۱۶ میلیارد دلار برآورد شد (Edwards et al., 2020). بنابراین، درک عمیق تر از این موضوع به ویژه پویایی گسترش آتش سوزی برای مدیریت بوم سازگان های جنگلی بسیار مهم است.

مناطق حفاظت شده از دیرباز سنگ بنای حفاظت از طبیعت بوده و برای تلاش های حفاظتی در سطح جهانی ضروری به نظر می رسند (Dinerstein et al., 2019). مناطق حفاظت شده تقریباً ۱۷ درصد از خشکی ها و ۹ درصد از مناطق دریایی کره زمین را پوشش می دهند (UNEP-WCMC., and IUCN, 2020). با وجود این، همان طور که جدیدترین گزارش سیاره زنده نشان می دهد، فشارها بر تنوع زیستی و بوم سازگان ها به طور چشمگیری با آثار منفی و شگفت آور بزرگ بر گونه ها و سیماهای سرزمین در سراسر جهان تشدید شده است (WWF, 2022). با گسترش بحران های بوم شناختی در جهان، درخواست ها نیز برای گسترش حفاظت مناطق خشکی و دریایی در برابر فشارهای انسانی در حال افزایش است (Fisher et al., 2023). از سال ۲۰۰۰، پوشش کلی در مناطق حفاظت شده شاهد رشد ۵۰ درصدی در خشکی و بیش از ۱۰ برابری افزایش در دریا بوده است (Adams et al., 2023). چالش ها و تهدیدهای مختلفی این مناطق حفاظت شده را تحت تأثیر خود قرار می دهند که در گزارش Fisher et al. (2023) بر اساس یک نظرسنجی بین المللی انجام شده از مدیران این مناطق، چالش ها و تهدیدهای

اصلی شناسایی شده است. بزرگ ترین چالش های مدیریت مناطق حفاظت شده شامل منابع محدود، تجاوز، تعارض میان ذینفعان و نوسانات سیاسی بود. چندین چالش دیگر مانند نوسانات اقتصادی و فساد ذکر شده است. بزرگترین تهدیدها برای خود مناطق حفاظت شده نیز شامل آتش سوزی ها، تعارض های انسان و حیات وحش و خشکسالی بود. تهدیدات دیگری مانند شکار غیرقانونی حیات وحش، قطع درختان و جنگل زدایی و تجاوز کشاورزی نیز از عوامل تهدید ذکر شده است. آتش سوزی ها، یکی از تهدیدات اصلی اشاره شده به عنوان آشفته گیاهی برای بوم سازگان های جنگلی، می تواند خسارات اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی عظیمی را به همراه داشته باشند. گسترش و رفتار آتش سوزی فرآیندی پویا است که عمدتاً به سه نوع عامل آب و هوا، توپوگرافی و ماده سوختنی همراه با متغیرهای احتراق مربوط می شود (Guo et al., 2017). آب و هوا تأثیر پویایی بر رفتار آتش سوزی دارد و شامل سه مؤلفه است: سرعت باد، جهت باد و مقدار رطوبت. توپوگرافی بر اساس شیب و جهت توصیف می شود که در آن شیب زاویه سطح زمین و جهت مسیری است که سطح رو به آن است. ماده سوختنی به ترکیبی از متغیرها اشاره دارد که پوشش گیاهی آتش سوزی را توصیف می کند. به دلیل آب و هوای پویا، توپوگرافی غیریکنواخت و بار ماده سوختنی^۱ متفاوت، گسترش آتش سوزی فرآیندی بسیار ناهمگن است که سرعت انتشار و شدت آن به صورت غیریکنواخت در مکان و زمان تغییر می کند (Islam, 2023).

آتش سوزی ها تحت تأثیر تعداد زیاد مولفه های طبیعی و انسانی در تعامل هستند که الگوهای متفاوت از نظر مکانی و زمانی ایجاد می کنند (McLauchlan et al., 2020). ارزیابی ریسک آتش سوزی امکان شناسایی این مولفه ها و تخمین حوزه نفوذ آن و در نتیجه تعیین مکان های در معرض ریسک زیاد آتش سوزی را فراهم می کند. نتایج این ارزیابی می تواند به عنوان یکی از ورودی های فرآیند تصمیم گیری برای مقایسه گزینه های مدیریت آتش سوزی از جمله کاهش ریسک آن و اطمینان از اینکه ریسک باقیمانده^۲ پایین ترین حد کاهش ریسک که به طور معقول عملی است^۳ استفاده شود (Cleef et al., 2024). ارزیابی ریسک آتش سوزی معمولاً شامل مدل سازی احتمال احتراق^۴ و احتمال سوختن^۴ در منابع طبیعی و انسانی و نیز شناسایی پاسخ منابع به آتش سوزی های با شدت های متفاوت است (Sakellariou et al., 2022). احتمال احتراق (IP) احتمال رخداد احتراق (شروع اشتعال)

¹ Fuel load

² As Low as Reasonably Practicable (ALARP)

³ Ignition probability

⁴ Burn probability

موجود و پایش میدانی تهیه شد. در مرحله دوم، از یک روش مدل‌سازی با تکیه بر مدل گسترش آتش‌سوزی سطحی (Rothermel, 1972) و تعداد محدودی از متغیرهای کمکی معرف محیط‌زیست آتش‌سوزی (ماده سوختنی، توپوگرافی و آب و هوا) و سابقه تاریخی آتش‌سوزی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) در منطقه مورد مطالعه برای محاسبه احتمال احتراق (IP) و احتمال سوختن (BP) استفاده شد. نتایج توزیع مکانی این شاخص‌ها در این مطالعه به بهبود تصمیم‌سازی توسط سازمان‌های متولی حفاظت از محیط‌زیست و منابع طبیعی (آب، خاک و پوشش گیاهی) و تنوع زیستی جانوری و گیاهی در راهبردهای پیشگیری و مهار آتش‌سوزی جنگل از طریق ۱. افزایش آگاهی بیشتر در بین مردم؛ ۲. بهبود روش‌های تشخیص آتش‌سوزی؛ ۳. تمرکز منابع و تجهیزات اطفاء آتش‌سوزی در مناطق با بیش‌ترین ریسک؛ ۴. بهبود همکاری با بخش‌های مختلف مدیریت بحران و خدمات اضطراری و ۵. ایجاد ممنوعیت احتراق آتش‌سوزی در فصل بحرانی آتش‌سوزی، کمک می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان گیلان در شمال ایران با مختصات ۲۷' ۳۸°-۳۶' ۳۶° عرض شمالی و ۵۰°۲۶' -۴۸°۳۴' طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این استان هر ساله تحت تأثیر آتش‌سوزی‌های جنگلی قرار می‌گیرد. مساحت منطقه ۱۴۰۴۴ کیلومتر مربع با ارتفاع متوسط ۷۴۱ متر از سطح دریا (محدوده: ۷۴- تا ۳۶۸۰ متر از سطح دریا) است (شکل ۲). ناهمواری سطح در شمال استان و در خط ساحلی دریای کاسپین کم و در بقیه استان بیشتر است. میزان بارندگی سالیانه به‌طور متوسط ۱۱۰۰ میلی‌متر است که تقریباً در طول سال پراکنش دارد. میانگین دمای سالیانه نیز ۱۶ درجه سانتی‌گراد است (Janbozorgi et al., 2021).

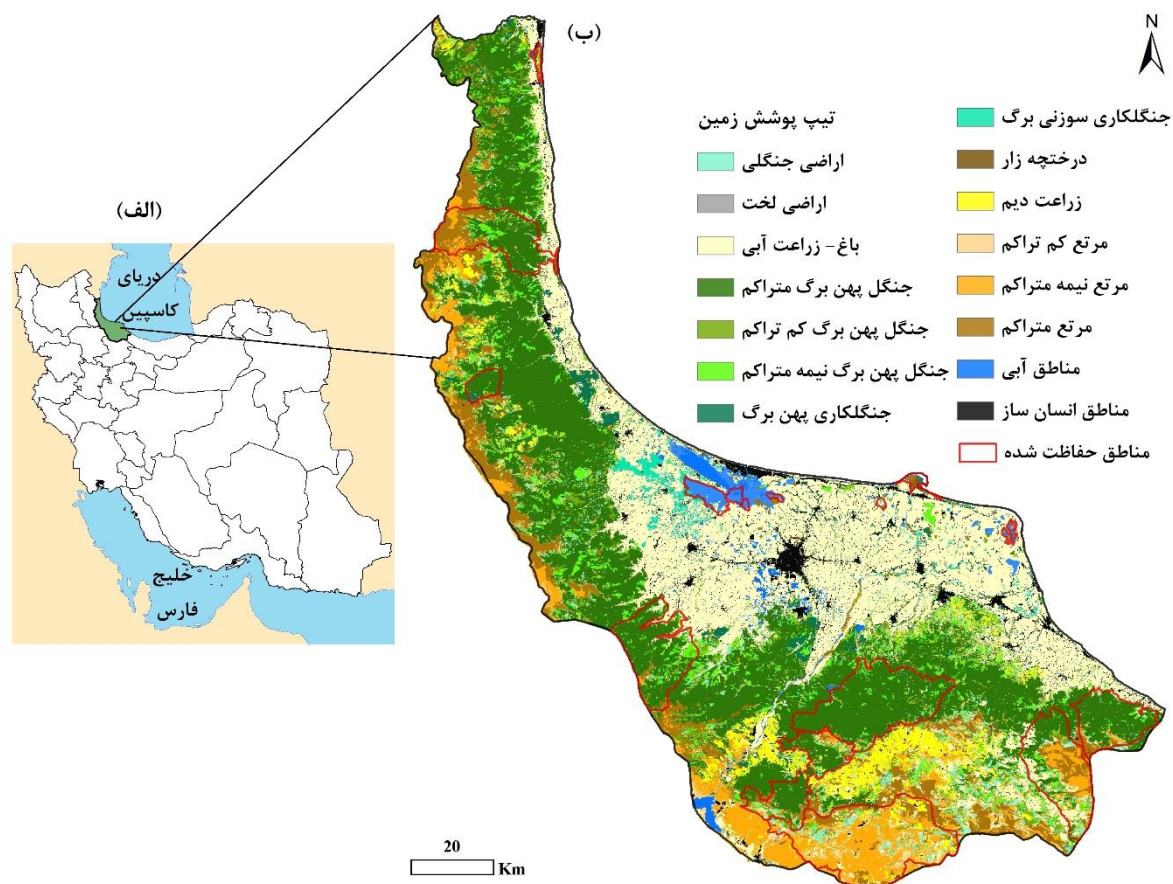
تقریباً ۴۵/۴ درصد از این منطقه توسط مناطق جنگلی با تراکم‌های مختلف تاج پوشش (متراکم، نیمه‌متراکم و کم‌متراکم) پوشیده شده است (شکل ۱). جنگل‌های پهن‌برگ کم‌تراکم، تراکم متوسط و تراکم به‌ترتیب ۴/۴، ۳/۳ و ۳۰/۶ درصد از جنگل‌های استان را تحت پوشش خود دارند. همچنین، اراضی جنگلی، جنگلکاری پهن‌برگ و جنگلکاری سوزنی‌برگ به‌ترتیب ۳/۶، ۱/۵ و ۱ درصد از این مناطق جنگلی را در بر می‌گیرند.

استان گیلان دارای ۲۰ منطقه حفاظت شده طبیعی است که توسط اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان گیلان اداره می‌شود (شکل ۱). این مناطق در مجموع ۲۵۶۴۸۸ هکتار (۱۸/۳ درصد) از مساحت گیلان را در بر می‌گیرد که شامل پنج منطقه حفاظت

در بازه زمانی مشخص، معمولاً یک روز یا یک سال، به‌صورت کسری (۱-۰) یا درصد (۰-۱۰۰) بیان می‌شود. احتمال سوختن (BP) احتمال اینکه آتش‌سوزی یک نقطه یا منطقه معین را در یک دوره زمانی مشخص بسوزاند، است که برای کاربردهای برنامه‌ریزی مدیریت آتش‌سوزی، اغلب به‌صورت سالیانه گزارش می‌شود (Finney, 2006). مدل‌سازی آتش‌سوزی به همراه تحلیل مکانی رفتار احتمالی آن‌ها با سیستم‌های شبیه‌سازی مختلف از جمله BehavePlus، FARSITE، FlamMap و FSPro انجام می‌شود. چنین رویکردهایی معمولاً مقادیر احتمال سوختن (BP) را به‌عنوان تابعی از شرایط محیط‌زیستی و موقعیت‌های آتش‌سوزی‌های گذشته مدل‌سازی می‌کند (Radford et al., 2024). بر این اساس، احتمال سوختن (BP) یک منطقه معین، پتانسیل احتراق یا گسترش آتش‌سوزی را نشان نمی‌دهد، بلکه نشان‌دهنده درجه‌ای است که شرایط محیط‌زیستی با مناطق سوخته‌شده شناخته شده، مطابقت دارد (Mulverhill et al., 2024). اهمیت خروجی‌های مدل‌سازی آتش‌سوزی جنگل مانند احتمال احتراق (IP) و احتمال سوختن (BP) توسط مطالعات متعددی که از این خروجی‌ها برای پیشبرد ماهیت راهبردی و عملیاتی مدیریت منطقی آتش‌سوزی جنگل‌ها استفاده می‌کنند، برجسته شده است. برخی از موارد استفاده از احتمال سوختن (BP) عبارتند از: ارزیابی اثربخشی تیمارهای ماده سوختنی برای کاهش ریسک آتش‌سوزی (Thompson et al., 2022)، بررسی آثار طرح‌های احتراق بر رفتار آتش‌سوزی (Villarreal et al., 2022) و ارزیابی اثربخشی مدیریت آتش‌سوزی به‌ویژه گزینه‌های اطفاء آتش‌سوزی (Tian et al., 2020).

در دهه‌های اخیر، جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران به دلیل فشار مداوم ناشی از تغییر کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه و انواع آشفستگی‌های زیستی در معرض ریسک کاهش پایداری، تاب‌آوری و تنوع قرار گرفته است (Vakili et al., 2021). در بین آشفستگی‌های زیستی، آتش‌سوزی‌های جنگلی خسارت‌های قابل‌توجهی به این جنگل‌ها وارد کرده است (Jahdi et al., 2023). هم‌چنین، آتش‌سوزی‌ها برای مناطق حفاظت‌شده در این جنگل‌ها حائز اهمیت است. انتظار می‌رود تغییرات اقلیمی به همراه سایر عوامل انسانی تکرار و شدت آتش‌سوزی‌های جنگلی را تغییر داده و تسریع کند و تاب‌آوری مناطق حفاظت‌شده را در برابر تغییر رژیم‌های آتش‌سوزی، کاهش دهد. این مطالعه بر توزیع‌های مکانی اندازه آتش، تکرار آتش، احتمال احتراق (IP) و احتمال سوختن (BP) به‌عنوان مؤلفه‌های اساسی از چارچوب ریسک آتش‌سوزی متمرکز است. در مرحله اول، یک پایگاه داده تاریخی آتش‌سوزی (شامل نقاط احتراق، مساحت سوخته‌شده، تکرار آتش‌سوزی و ...) در مناطق حفاظت‌شده با استفاده از منابع

شده، شش منطقه شکار ممنوع، پنج پناهگاه حیات وحش، یک پارک ملی و سه اثر طبیعی ملی است.



شکل ۱- (الف) موقعیت استان گیلان در شمال ایران و (ب) تیپ‌های پوشش زمین مختلف و مناطق حفاظت شده در استان
Figure 1- (a) Location of Guilan Province in northern Iran and (b) various land cover types and protected areas in the province

هم‌پوشانی چندضلعی‌ها از سال‌های مختلف شد و در عین حال یکپارچگی فضایی و مشخصات همه چندضلعی‌های اصلی را حفظ کرد. این مجموعه داده نمونه‌ای از یک مدل داده ترکیبی مکان-زمان است که در آن چندضلعی‌های هر سال با یکدیگر اشتراک داشته تا یک شبکه چندضلعی را تشکیل دهند. در ادامه، نقشه‌های آتش‌سوزی برای تمام سال‌ها به داده‌های رستری تبدیل شدند و با استفاده از جبر نقشه برای تهیه نقشه‌های تکرار (فراوانی) آتش‌سوزی ترکیب شدند.

علاوه بر داده تاریخی آتش‌سوزی، نقشه‌های پوشش گیاهی (تراکم تاج پوشش و مدل‌های ماده‌سوختنی سطحی) با کار میدانی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI/TIRS با LITP پیش‌پردازش‌ها (واسنجی رادیومتریک و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH، الگوریتم FMASK، تولید ترکیب‌ها و بهبود کنتراست تصاویر) و نیز پردازش‌ها (الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مدل نگارگر انبوهی تاج‌پوشش جنگل (FCD)) تهیه شد. توضیحات کامل در مورد

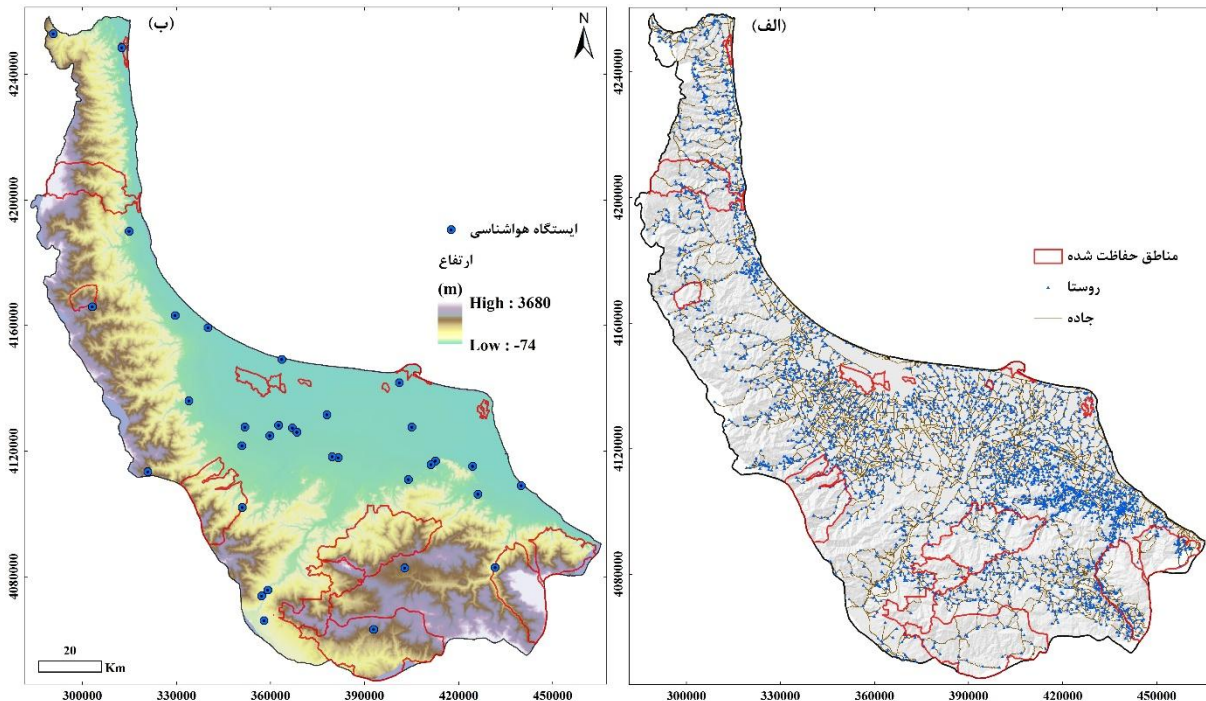
۲-۲- داده تاریخی آتش‌سوزی

از ArcGIS 10.8 برای ایجاد بانک داده تاریخی آتش‌سوزی در استان گیلان (استخراج شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان گیلان) استفاده شد. این داده‌ها با رقوم‌سازی آتش‌سوزی‌ها بین سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۲۲ از روی نقشه‌ها یا با وارد کردن اطلاعات مستقیماً از مجموعه داده‌های GIS قبلی ساخته شد. در این بانک داده، مشخصات هر چندضلعی آتش‌سوزی عبارتند از سال سوختن، نوع آتش‌سوزی (سطحی، تنه‌ای و تاجی)، فصل سوختن، عوامل آتش‌سوزی (طبیعی و انسانی (عمدی یا سهوی))، محیط و مساحت سوخته‌شده.

یک فایل برداری جداگانه برای هر سال آتش‌سوزی ایجاد شد. این فایل‌های برداری جداگانه یک مدل نمایش لحظه‌ای هستند زیرا توزیع فضایی آتش‌ها را در یک نقطه معین در زمان نشان می‌دهند. فایل‌های برداری برای هر سال آتش‌سوزی در یک مجموعه داده تاریخی آتش‌سوزی ادغام شدند، که منجر به

آب و هوایی (سرعت باد، جهت باد و مقدار رطوبت) در طول دوره مورد مطالعه نیز از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در استان استخراج شد (شکل ۲).

مراحل تهیه نقشه مدل‌های ماده سوختنی در مطالعه Jahdi (2023a) ارائه شده است. در این مطالعه، نقشه‌های ورودی مدل‌سازی (توپوگرافی، مدل ماده سوختنی و تاج پوشش) با وضوح مکانی ۱۰۰ متر تهیه شد. همچنین، میانگین متغیرهای



شکل ۲- (الف) موقعیت مناطق حفاظت شده، روستاها و جاده‌های موجود در استان گیلان و (ب) نقشه مدل رقومی ارتفاع (متر) استان به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

Figure 2- (a) Location of the protected areas, villages, and roads in Gilan Province and (b) the digital elevation model (m) map of the province along with the location of the meteorological stations

علامت‌گذاری شده شناخته می‌شوند. نقشه رستری موجود از منطقه مورد مطالعه با محاسبه مرکز هر سلول به نقاط تبدیل شد و به هر نقطه بر اساس تعداد دفعاتی که از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ سوخته شده بود، تکرار اختصاص یافت.

۲-۴- مدل‌سازی احتمال احتراق (IP)

ریسک آتش‌سوزی در مطالعات مختلف دارای تعریف‌های متفاوتی است. در گذشته، بسیاری از نویسندگان ریسک را به عنوان احتمال رخداد آتش‌سوزی توصیف کردند (Hardy, 2005; Catry et al., 2009). در نتیجه، بسیاری از ارزیابی‌های ریسک آتش‌سوزی در واقع بیان‌گر ارزیابی احتمال احتراق (IP) هستند. رویکردهای رایج برای چنین ارزیابی‌های شامل روش‌های داده‌محور مانند رگرسیون لجستیک (Zhang et al., 2022)، یادگیری ماشین (Shahzad et al., 2024) و رویکرد مدل‌سازی وزن شواهد^۱ (Salavati et al., 2022) است. با وجود این،

۲-۳- تکرار آتش‌سوزی

تکرار آتش‌سوزی را می‌توان به عنوان تعداد دفعاتی که آتش‌سوزی در یک منطقه و در دوره زمانی مشخص رخ می‌دهد، تعریف کرد. همچنین، تکرار آتش‌سوزی بیانی ریاضی از رخداد یا نرخ آتش‌سوزی است، مانند میانگین فاصله زمانی بین آتش‌سوزی‌های متوالی یا تعداد آتش‌سوزی‌ها در یک دوره زمانی خاص. این یک اصطلاح عمومی است که به رخداد یا نرخ آتش‌سوزی به صورت عمومی اشاره دارد (Firewords, 2018). در ادامه، به منظور تحلیل توزیع مکانی تکرار آتش‌سوزی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) از مدل‌های فرآیند نقطه‌ای (PPMs) استفاده شد. مدل‌های فرآیند نقطه‌ای (PPMs) نوعی از رویکرد رگرسیونی برای مدل‌سازی داده‌های نقطه‌ای (یعنی مختصات جغرافیایی) برای یک رویداد هستند. در این مطالعه منظور از رویداد این است که یک سلول ۱۰۰ متری بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ چند دفعه می‌سوزد (Klinger et al., 2021). هنگامی که به نقاط ویژگی اختصاص داده می‌شود، به عنوان

¹ Weights of Evidence

۵-۲- مدل سازی احتمال سوختن (BP)

به عنوان یک شاخص ریسک آتش سوزی، احتمال سوختن (BP)؛ یعنی احتمال رخداد آتش سوزی در آینده) انتخاب شد که به طور گسترده در ارزیابی ریسک آتش سوزی در برنامه های مدیریت جنگل استفاده شده است (Benali et al., 2021). احتمال سوختن (BP) احتمال سوختن سالیانه هر مکانی در اثر آتش سوزی است. مدل احتمال سوختن (BP) شامل شبیه سازی چندین آتش سوزی منفرد در سراسر یک سیمای سرزمین برای به دست آوردن تخمین هایی از احتمال آتش سوزی در هر مکان معین بر اساس منبع احتراق، زمین محلی، مواد سوختنی و آب و هوا است (Villarreal et al., 2022). در این مطالعه، ریسک آتش سوزی با استفاده از احتمال سوختن (BP) با در نظر گرفتن توپوگرافی، بارهای ماده سوختنی و آب و هوا با استفاده از ابزار شبیه سازی FlamMap ارزیابی شد. سیستم نقشه برداری و تحلیل آتش سوزی FlamMap (Finney, 2006) ویژگی های رفتار آتش سوزی را محاسبه می کند (به عنوان مثال سرعت گسترش، طول شعله، شدت خط آتش) و احتمال سوختن (BP) برای آتش سوزی سطحی و تاجی برای هر سلول در داخل سیمای سرزمین، بر اساس توپوگرافی، رطوبت، آب و هوا، ساختار جنگل و شرایط ماده سوختنی، که هر یک را به عنوان یک لایه رستری و یک لایه برداری با موقعیت های احتراق تعریف شده توسط کاربر ارائه می دهد.

داده ماده سوختنی در قالب یک مدل استاندارد ماده سوختنی رفتار آتش سوزی (Scott and Burgan, 2005) تهیه شد. در این مدل استاندارد، بار ماده سوختنی مقدار کل مواد قابل اشتعال در یک فضای تعریف شده است که بر حسب یک واحد حرارتی یا وزن معادل آن در چوب اندازه گیری می شود. در این مطالعه، بارهای ماده سوختنی در عرصه برای پنج مولفه بار مواد سوختنی اندازه گیری شد. اینها شامل ۱) -۱ ساعت (قطر کم تر از ۰/۶۴ سانتی متر) شامل گیاهان پوسیده کف جنگل^۱ و لاشبرگ؛ ۲) ۱۰-۱ ساعت (قطر ۰/۶۴ تا ۲/۵۴ سانتی متر) شامل بقایای چوبی کوچک؛ ۳) ۱۰۰-۱ ساعت (قطر ۲/۵۴ تا ۷/۶۲ سانتی متر) شامل بقایای چوبی درشت؛ ۴) علفی زنده؛ و ۵) درختچه ای زنده است. نتایج این اندازه گیری ها در مطالعه قبلی منتشر شده است (Jahdi et al., 2023). شیب، ارتفاع و جهت از یک مدل رقومی زمین (DTM) و با اندازه تفکیک ۱۰۰ متر استخراج شد. متغیر اصلی آب و هوای مورد نیاز شبیه سازی ها جهت و سرعت باد است، که برای آن از اطلاعات ایستگاه های هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

محدودیت هایی در تفسیر احتمالات به دست آمده با این روش های فوق الذکر وجود دارد. اولاً، افزایش احتمال احتراق (IP) متناسب با افزایش واقعی رخداد احتراق ها نیست. به طور دقیق تر، دو برابر شدن احتمال احتراق (IP) ممکن است به عنوان دو برابر شدن تعداد رخداد های آتش سوزی تفسیر نشود. دوم، اینکه احتمالات بعد زمانی ندارند، یا احتمال برای کدام دوره معتبر است؟ اگر احتمال احتراق (IP) در یک سلول رستری برابر با ۰/۸ باشد، این مقدار چگونه باید تفسیر شود؟ واضح است که نمی توان آن را به گونه ای تفسیر نمود که احتمال احتراق (IP) برای چنین سلولی در یک سال معین ۸۰ درصد باشد (Depicker et al., 2020).

در این تحقیق، احتمال احتراق (IP) بر اساس رابطه (۱) به عنوان میانگین احتمال رخداد احتراق در طول یکسال در یک سلول رستری تعریف شده است (Dawid et al., 2005):

$$P(I|C_i) = \frac{P(I)P(C_i|I)}{P(C_i)} \quad (1)$$

جایی که I یک رویداد احتراق را نشان می دهد و C_i حاوی مشخصاتی است که محیط زیست سلول i را مشخص می کند. $P(C_i)$ در رابطه (۱) احتمال این است که یک سلول به طور تصادفی انتخاب شده متعلق به کلاس C_i باشد و بر اساس رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$P(C_i) = \frac{\text{مساحت } C_i}{\text{مساحت کل}} \quad (2)$$

همچنین، $P(C_i|I)$ در رابطه (۱) احتمال این است که با توجه به اینکه احتراق در سلول i رخ داده است، این سلول به کلاس C_i تعلق دارد و بر اساس رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$P(C_i|I) = \frac{\text{تعداد احتراق ها در } C_i}{\text{تعداد کل احتراق ها}} \quad (3)$$

در نهایت، احتمال رخداد احتراق در یک سلول تصادفی در بازه زمانی یک سال به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P(I) = \frac{\text{میانگین سالیانه تعداد احتراق ها}}{\text{تعداد کل سلول ها}} \quad (4)$$

نقشه احتمال احتراق (IP) نشان دهنده تراکم احتراق آتش سوزی بر اساس الگوهای تاریخی احتراق است. داده تاریخی آتش سوزی برای دوره ۲۰۲۲-۱۹۹۲ برای احتراق با یک مکان مشخص (طول و عرض جغرافیایی) استفاده شد. برای کمک به استفاده از تراکم احتراق آتش سوزی برای برنامه ریزی فعالیت های پیشگیرانه، مقادیر خروجی به پنج کلاس طبقه بندی شد که نرخ های احتراق را منعکس می کند (از خیلی کم تا خیلی زیاد).

¹ Duff

هکتار در استان گیلان ثبت شده است. از این تعداد ۱۸۶ آتش‌سوزی ثبت شده در مناطق حفاظت شده استان پراکنش دارد که متوسط تعداد آتش‌سوزی‌های سالیانه برابر با شش است. در کل، ۲۲۳۲ هکتار از پوشش گیاهی مناطق حفاظت شده استان توسط آتش‌سوزی‌ها از بین رفته است و متوسط مساحت سوخته‌شده ۱۲ هکتار برآورد شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است در دهه سوم مورد مطالعه، آتش‌سوزی‌های جنگل در حال گسترش هستند و حداقل دو برابر بیش از دو دهه قبل‌تر، پوشش جنگلی را نابود کرده‌اند. در اغلب گزارش‌های منتشر شده در سطوح جهانی و منطقه‌ای این افزایش در تعداد آتش‌سوزی‌ها گزارش شده است. به‌عنوان مثال، در گزارش McCarthy et al. (2024) بر اساس آخرین داده‌های جهانی (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳) وسعت عرصه‌های جنگلی سوخته‌شده حدود ۵/۴ درصد در سال افزایش یافته است که منجر به از بین رفتن حدود ۶ میلیون هکتار پوشش درختی جهان در سال شده است. با از بین رفتن پوشش گیاهی، اختلال فوری در خاک سطحی و جوامع میکروبی رخ داده و مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن و سایر مواد آزاد می‌شود که این آتش‌سوزی‌ها را موضوع مهمی برای مطالعه تغییرات جهانی و آثار محیط‌زیستی تبدیل می‌کند.

برای محاسبه احتمال سوختن (BP)، ۱۰۰۰ نقطه احتراق تصادفی بر مبنای پراکنش نقاط احتراق تاریخی در منطقه مورد مطالعه، ایجاد شد. حداکثر زمان شبیه‌سازی آتش‌سوزی نیز شش ساعت (مدت متوسط آتش‌سوزی در منطقه) تنظیم شد. بر اساس این مدل احتمال سوختن (BP) به صورت زیر محاسبه شد:

$$BP = \frac{F}{n} \quad (5)$$

که در آن، F تعداد دفعاتی است که یک سلول می‌سوزد و n تعداد آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی شده است.

شبیه‌ساز آتش‌سوزی FlamMap تعداد دفعاتی را در نظر گرفت که آتش‌های شبیه‌سازی شده هر سلول را سوزانند. پس از شبیه‌سازی تمام آتش‌سوزی‌ها، برخی از سلول‌ها توسط هیچ آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده‌ای نسوختند و در نتیجه مقدار احتمال سوختن (BP) صفر شد. برخی از سلول‌ها به دلیل نوع ماده سوختنی مرتبط (آب، جاده‌ها، مناطق ساخته‌شده، مناطق کشاورزی و غیره) غیر قابل سوختن بودند. با وجود این، کم‌ترین مقدار احتمال سوختن (BP) یافت شده در سلول‌های «قابل سوختن» به سلول‌هایی اختصاص داده شد که آتش‌های شبیه‌سازی شده به آن‌ها نمی‌رسید. نقشه احتمال با وضوح مکانی ۱۰۰ متر استخراج شد. این مقیاس از داده‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که با صحت مجموعه داده‌های ماده سوختنی سطحی اولیه مورد استفاده در ارزیابی سازگار باشد. در حالی که این مقیاس احتمالاً برای تحلیل یک رویشگاه خاص کافی نیست، برای برنامه‌ریزی پیشگیری یا کاهش حفاظت منطقه‌ای، شهرستانی یا محلی مناسب است.

صحت مدل احتمال سوختن (BP) با معیار سطح زیر منحنی ROC^1 (AUC^2) ارزیابی شد. AUC برای نشان دادن درجه‌ای که مدل احتمال سوختن (BP) قادر به مشخص کردن سلول‌هایی هستند که در دوره تاریخی (۲۰۲۲-۱۹۹۲) سوخته‌شده‌اند، استفاده شد. AUC اندازه توانایی یک مدل برای تمایز بین کلاس‌های باینری است، که در آن AUC برابر با ۰/۵ (تصادفی)، ۰/۷-۰/۵ (ضعیف) و ۰/۹-۰/۷ (متوسط) و ۰/۹ یا بیش‌تر (عالی) در نظر گرفته می‌شوند (Cao et al., 2017).

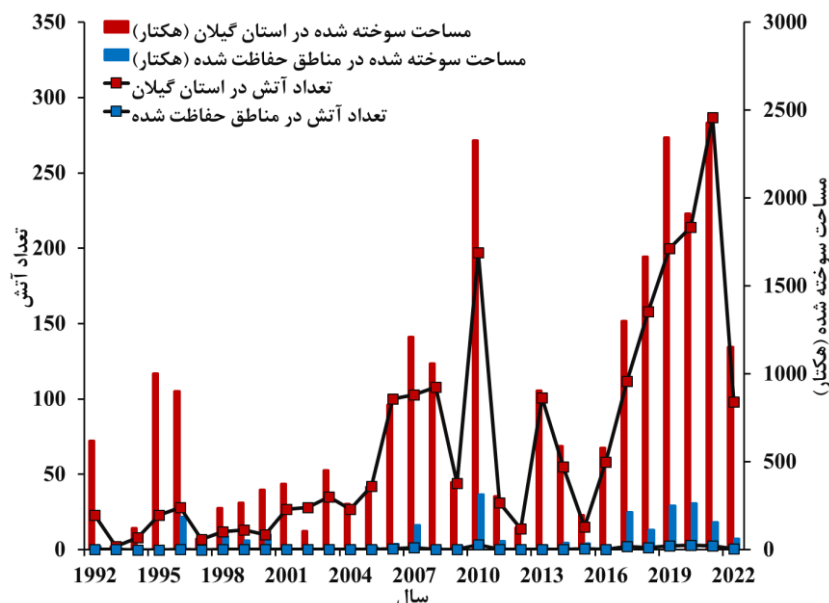
۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی فعالیت آتش‌سوزی

شکل ۳ توزیع سالیانه آتش‌سوزی‌ها (۲۰۲۲-۱۹۹۲) در استان گیلان و در مناطق حفاظت شده را نشان می‌دهد. در دوره مورد مطالعه، در مجموع ۲۲۴۹ آتش‌سوزی با مساحت ۲۵۵۶۴/۳

¹ Receiver operating characteristic

² Area Under the Curve



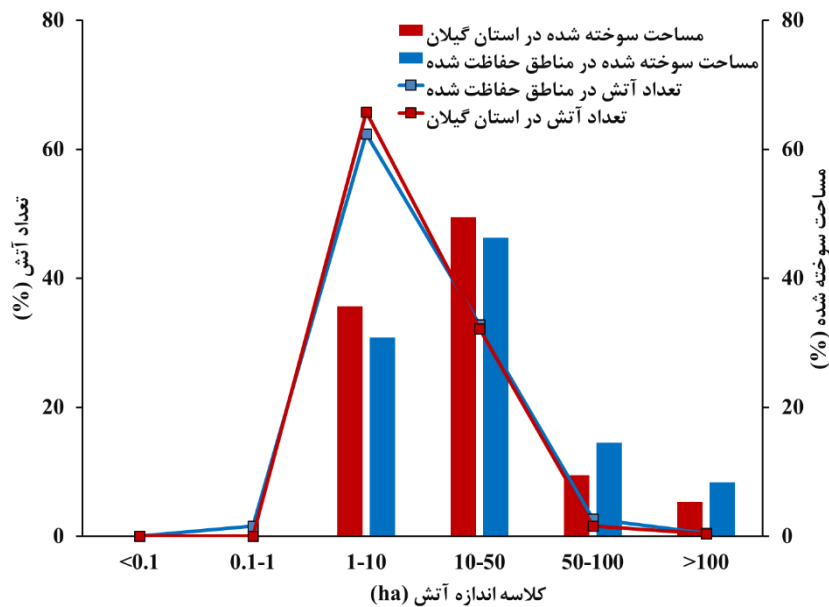
شکل ۳- توزیع آتش سوزی های تاریخی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) در استان گیلان و مناطق حفاظت شده
Figure 3- Distribution of the historical wildfires (1992-2022) in Guilan Province and the protected areas

۳-۲- اندازه آتش سوزی

توزیع اندازه آتش سوزی های رخ داده در سطح کل استان و در مناطق حفاظت شده در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس این شکل، تعداد آتش سوزی ها و مساحت سوخته شده در میان کلاس های مختلف اندازه آتش سوزی بسیار متفاوت است. این شرایط در کل استان و نیز در مناطق حفاظت شده قابل مشاهده است. به طوری که در مناطق حفاظت شده، ۶۲/۴ درصد از تعداد آتش سوزی ها بین یک تا ۱۰ هکتار رخ داده است که این آتش سوزی ها ۳۰/۸ درصد از مساحت سوخته شده را به خود اختصاص داده اند. همچنین، ۳۲/۸ درصد از آتش سوزی ها نیز بین ۱۰ تا ۵۰ هکتار رخ داده است که ۴۶/۲ درصد از مساحت سوخته شده را به خود اختصاص دادند. ۲/۷ درصد از تعداد آتش سوزی ها نیز بین ۵۰ تا ۱۰۰ هکتار رخ داده است که ۱۴/۵ درصد از مساحت سوخته شده را به خود اختصاص داده اند. با وجود این، یک آتش سوزی بیش از ۱۰۰ هکتار در سال ۱۹۹۶ رخ داده است که کم تر از یک درصد از تعداد کل آتش سوزی ها بین سال های ۱۹۹۲ و ۲۰۲۲ را شامل می شود، اما به تنهایی ۸/۴ درصد از مساحت سوخته شده را به خود اختصاص داده است. بر اساس این نتایج، رژیم آتش سوزی تاریخی در منطقه مورد مطالعه همراه با آتش سوزی های نسبتاً نادر اما بزرگ و شدید، جنگل های کهن و غنی از نظر تعداد و تنوع گونه ای و زیست توده جنگلی را تحت تأثیر قرار می دهد. این آتش سوزی های بزرگ و شدید می تواند سرعت رواناب و فرسایش خاک را چندین برابر افزایش دهد که با حذف

پوشش گیاهی، دفع آب خاک و خاکستر باقی مانده از آتش مرتبط است (Lucas-Borja et al., 2023).

با توجه به افزایش فعالیت آتش سوزی در دهه اخیر شکل ۳ و نیز احتمال گرم تر و خشک تر شدن فصل های آتش سوزی آبی در منطقه مورد مطالعه (Jahdi et al., 2023)، توزیع اندازه آتش سوزی به طور بالقوه در بسیاری از مناطق جنگلی می تواند تغییر کند. پیش بینی می شود که توزیع های اندازه آتش سوزی به سمت آتش سوزی های بزرگ تر و افزایش لکه های سوخته شده در آینده تغییر یابد. در لکه های آتش سوزی بزرگ تر، فاصله از منابع بذر سوخته نشده پس از آتش سوزی بیشتر می شود و در نتیجه شانس زادآوری در ناحیه سوخته شده کم تر می شود. در مقابل، آتش سوزی های کوچک تر (و البته با تعداد بیشتر) در منطقه منجر به لکه های سوخته شده محدودتر خواهد شد. در لکه های آتش سوزی کوچک تر، فاصله از منابع بذر سوخته نشده پس از آتش سوزی کم تر و در نتیجه شانس زادآوری در سراسر سیمای سرزمین بیشتر است. مطالعات متعدد نشان داد که فاصله تا منبع بذر (به عنوان مثال، فاصله تا نزدیک ترین درخت زنده یا گروهی از درختان) عاملی است که به وضوح بر فراوانی زادآوری جنگل پس از آتش سوزی تأثیر می گذارد (Ziegler et al., 2017; Korb et al., 2019). پیش بینی الگوهای مکانی اندازه سوختن مورد انتظار با فعالیت آتش سوزی در آینده برای درک اکولوژیکی و اطلاع رسانی مدیریت و سیاست جنگل بسیار مهم است (Buonanaduci et al., 2024). از آنجا که الگوهای مکانی اندازه سوختن تحت تأثیر ترکیب پیچیده ای از محرک ها هستند، پیش بینی آن ها برای هر سیمای سرزمین معینی، دشوار است.



شکل ۴- توزیع تعداد آتش‌سوزی و مساحت سوخته‌شده (۱۹۹۲-۲۰۲۲) در کلاس‌های مختلف اندازه آتش‌سوزی در استان گیلان و مناطق حفاظت شده
Figure 4- Distribution of fire occurrences and burned area (1992-2022) in different fire size classes in Guilan Province and the protected areas

علف‌های کوتاه و کم‌تر خوش‌خوراک در منطقه مورد مطالعه شده است. این واکنش‌ها می‌تواند به توسعه سیاست‌های مناسب مدیریت آتش‌سوزی مناسب برای حفظ گونه‌های موجود با نیازهای زیستگاهی مختلف کمک کند.

جدول ۱- توزیع مناطق حفاظت شده در تکرارهای مختلف

آتش‌سوزی (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

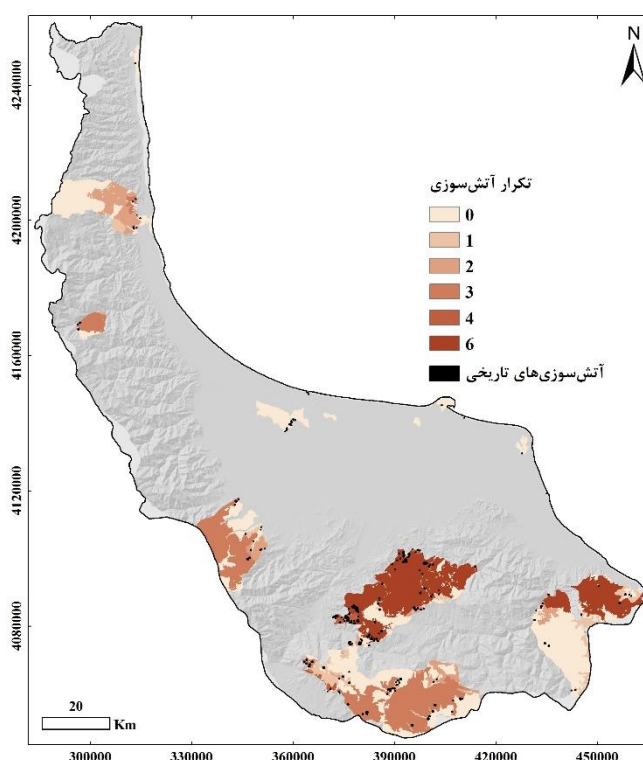
Table 1- Distribution of the protected areas in different fire frequencies (1992-2022)

تکرار آتش	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
0	102232	40
1	11918	5
2	20274	8
3	58101	23
4	2865	1
5	0	0
6	61097	24
کل	256488	100

با توجه به تعداد کم رخداد‌های آتش‌سوزی ثبت شده (۱۸۶ آتش‌سوزی) در مناطق جنگلی حفاظت شده در استان، انتظار بر این بود که تکرار آتش‌سوزی‌ها نسبتاً محدود باشد. در حالت منطقی همبستگی مثبت بین تکرار آتش‌سوزی و احتمال احتراق (IP) محتمل است ولی این مسئله ممکن است همیشه در یک منطقه به دلیل وجود ناهمگنی زیاد در توپوگرافی، به‌ویژه تیپ ماده سوختنی، اتفاق نیفتد (Brooks et al., 2018). بنابراین، در این مطالعه مدل‌های جداگانه‌ای برای احتمال احتراق (IP) و تکرار آتش‌سوزی به کار گرفته شد.

۳-۳- تکرار آتش‌سوزی

شکل ۵ توزیع مکانی آتش‌سوزی‌های تاریخی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) رخ داده در کل استان و نیز مناطق حفاظت شده را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل و نیز جدول ۱ توزیع رخداد آتش‌سوزی در منطقه (تکرار آتش) از صفر تا ۶ متغیر بود. در دوره مورد مطالعه، بیش‌ترین سطح از مناطق حفاظت شده (۴۰ درصد) هیچ آتش‌سوزی را تجربه نکردند. ۱۳ درصد از مناطق حفاظت شده ۱-۲ تکرار آتش‌سوزی داشته‌اند. همچنین، ۴۸ درصد از مناطق حفاظت شده بیش از دو تکرار آتش‌سوزی داشته‌اند. افزایش تکرار آتش‌سوزی در این منطقه می‌تواند بر پویایی گیاه-خاک-آب در آینده تأثیر داشته باشد. در تحقیق Siddiqui Pashaki et al. (2014) در بررسی اثر آتش‌سوزی در جنگل‌های استان گیلان، تکرار آتش‌سوزی منجر به افزایش اسیدیته، پتاسیم، فسفر و شن خاک و در مقابل کاهش ازت، دی‌اکسیدکربن، کربن آلی، درصد رطوبت اشباع و وزن مخصوص ظاهری آن شده است. همچنین، در تحقیق González-Pelayo et al. (2024) افزایش تکرار آتش‌سوزی باعث افزایش محتوای مواد آلی خاک شد، اما میزان آب در دسترس را کاهش داد. لازم به ذکر است که تکرار آتش‌سوزی بر ساختار و ترکیب پوشش گیاهی جنگل تأثیر می‌گذارد. در تحقیق Nieman et al. (2022) به تأثیرات بیش‌تر تکرار آتش‌سوزی روی پوشش علفی نسبت به پوشش درختی اشاره شده است. علاوه بر این، تکرار بیش‌تر آتش‌سوزی باعث کاهش میانگین ارتفاع درخت، کاهش پوشش چوبی و غالبیت بیش‌تر



شکل ۵- نقشه پراکنش آتش سوزی های تاریخی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) استفاده شده برای شبیه سازی آتش سوزی و تکرار آتش سوزی در مناطق حفاظت شده
Figure 5- Historical fire distribution map (1992-2022) used for fire simulation and fire frequency in the protected areas

افزایش حضور انسان در این مناطق احتمال آتش سوزی های تصادفی یا به دلایل سهوی را افزایش می دهد. در کل، مناطق روستایی کم جمعیت اغلب دارای پوشش گیاهی به هم پیوسته تر هستند و شرایطی را ایجاد می کنند که فعالیت های انسانی، حتی اگر کم تر، تأثیر بیشتری بر ریسک آتش سوزی داشته باشد. در مطالعه D'Este et al. (2020) نیز همبستگی منفی بین احتراق آتش سوزی و فاصله از زیرساخت ها (یعنی جاده و نقاط مسکونی) مشاهده شد. در اغلب مطالعات پیشین بر نقش حیاتی توزیع سکونت گاه ها و فعالیت انسانی در توزیع مکانی احتراق های آتش سوزی تأکید شده است و می تواند در مدیریت ریسک آتش سوزی و در اجرای راهبردهای پیشگیرانه بسیار مفید باشد (Dorph et al., 2022; Zambon et al., 2019).

۳-۵- احتمال سوختن (BP)

نقشه احتمال سوختن (BP) تولید شده پس از ۱۰۰۰ تکرار مستقل آتش سوزی منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است که ارائه گر حساسیت به آتش سوزی هر سلول ۱۰۰ متری تحت شرایط احتراق و آب و هوای تاریخی استفاده شده است. نتایج ارزیابی صحت مدل احتمال سوختن (BP) مبتنی بر FlamMap در توصیف نواحی سوخته شده و سوخته نشده با

۳-۴- احتمال احتراق (IP)

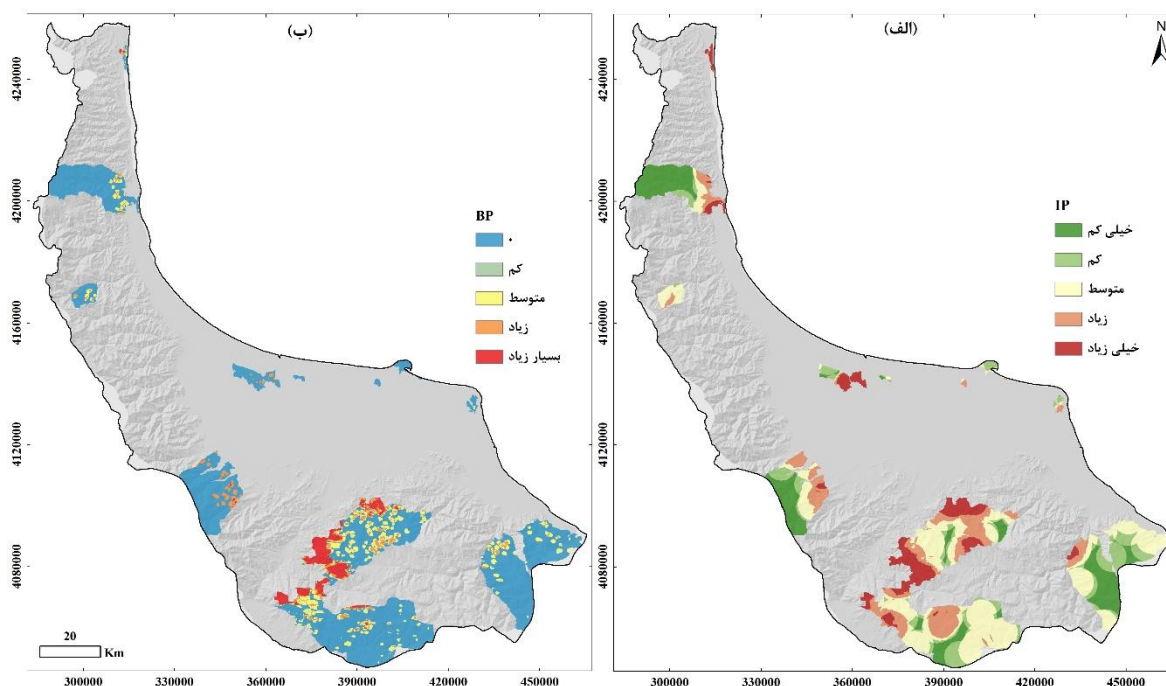
یکی از اهداف این مطالعه ایجاد نقشه احتمال احتراق (IP) برای منطقه مورد مطالعه است. الگوی مکانی تاریخی احتمال احتراق (IP) به طور قابل توجهی در سراسر منطقه مورد مطالعه متفاوت است (شکل ۶). تقریباً یک سوم از منطقه مورد مطالعه (۳۵ درصد) دارای احتمال احتراق (IP) پیش بینی شده خیلی کم و کم بودند. ۳۶ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای احتمال احتراق (IP) متوسط بودند. ۱۸ و ۱۱ درصد از منطقه مورد مطالعه نیز به ترتیب دارای احتمال احتراق (IP) زیاد و خیلی زیاد بودند. بیشترین احتمال احتراق (IP) در قسمت جنوب و مرکز منطقه مورد مطالعه قرار دارد. احتمال احتراق (IP) با فاصله تا مناطق روستایی و تراکم جاده (شکل ۲- الف) در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است. با توجه به اینکه اغلب آتش سوزی ها در منطقه مورد مطالعه منشأ انسانی دارد (Jahdi, 2023b)، نزدیکی به جاده ها در مناطق روستایی اغلب با افزایش احتراق های ناشی از انسان به دلایل زیر مرتبط است: (۱) جاده ها فعالیت های انسانی بیشتری را جذب می کنند که منجر به احتمال بیشتر آتش سوزی تصادفی ناشی از ته سیگارهای دور ریخته شده، جرقه های ناشی از وسایل نقلیه و غیره می شود؛ (۲) جاده ها دسترسی بیشتری به مناطق دور افتاده برای فعالیت های تفریحی مانند کمپینگ یا شکار را فراهم می کنند که این

تنظیم می‌کند. بر اساس نتایج بدست آمده از این مولفه‌ها، دو رژیم یا فعالیت آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص است که شامل یک تکرار آتش‌سوزی و احتمال سوختن نسبتاً زیاد (عمدتاً در ارتفاعات بالاتر) و دو تکرار آتش‌سوزی و احتمال سوختن کم (در ارتفاعات پائین‌تر) است. در منطقه مورد مطالعه، تکرار آتش‌سوزی و احتمال سوختن زیاد از نظر گستردگی بسیار محدود است و در قسمت جنوبی منطقه به صورت لکه‌ای رخ می‌دهد. در مقابل، رژیم تکرار آتش‌سوزی و احتمال سوختن کم، گسترده‌ترین رژیم در منطقه (به‌غیر از بخش جنوبی) است. بر این اساس، فعالیت آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه نتیجه گردادیان‌های مخالف است، با ارتفاعات پایین‌تر (بار ماده‌سوختنی کم‌تر ناشی از تکه‌تکه شدن بیش‌تر سیمای سرزمین تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی) و ارتفاعات بالاتر (احتراق کم‌تر ناشی از فعالیت‌های انسانی محدودتر). این نتیجه با یافته‌های Tagestad et al. (2016) و Klinger et al. (2021) مبنی بر تغییرات فعالیت آتش‌سوزی متناسب با گردادیان‌های ارتفاعی در یک راستا است.

در نهایت، با توجه به الگوهای شبیه‌سازی شده تکرار آتش، احتمال احتراق (IP) و احتمال سوختن (BP) در منطقه مورد مطالعه، می‌توان به ارزیابی متفاوتی دست یافت. یک تمایز آشکار بین محیط آتش‌سوزی‌های تاریخی واقعی و الگوی احتراق پیش‌بینی شده این است که مناطقی با احتمال احتراق (IP) متوسط تا زیاد وجود دارد که در آن‌ها آتش‌سوزی‌های جنگلی در ۳۰ سال گذشته رخ نداده است. این امر به‌ویژه در بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه، که آتش‌سوزی‌های جنگلی یا رخ نداده‌اند یا وسعت بسیار محدودی داشته‌اند، مشهود است. بنابراین، یک ارزیابی قابل توجهیه در آینده نزدیک می‌تواند این باشد که احتمال گسترش آتش‌سوزی و جوامع پوشش گیاهی که پس از آتش‌سوزی دچار تحولات گسترده و بلندمدت شوند، زیاد است.

مقدار AUC برابر با ۰/۷۱۹ همراه بود که عملکرد خوبی را در یک دوره ۳۰ ساله در منطقه مورد مطالعه نشان داد. احتمال سوختن (BP) در توده‌های مختلف جنگل در منطقه مورد مطالعه متفاوت بود و در جنوب منطقه بیش‌ترین بود. تقریباً ۸۸ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای احتمال سوختن (BP) پیش‌بینی شده کم تا متوسط بودند. بنابراین، ۱۲ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای احتمال سوختن (BP) پیش‌بینی شده زیاد و بسیار زیاد بودند که بیش‌تر در بخش‌های کوهستانی نزدیک به جنوب استان پراکنش داشتند. در این مناطق، احتمال بادهای محلی گرم (گرمیج) با جهت‌های جنوب-غربی و جنوبی نیز نسبتاً زیاد است (Jahdi, 2023a; Azizi and Yousofi, 2009). علاوه بر این، توده‌های جنگلی در این مناطق که بیش‌تر مستعد آتش‌سوزی هستند، جنگل‌های پهن‌برگ متراکم با انباشت زیاد بار ماده‌سوختنی (Jahdi et al., 2023; Amin, 2015) در فصل آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه (از اواخر خرداد تا اسفند) بودند. مشابه با این نتیجه، در مطالعه Lesmeister et al. (2019) بار زیاد ماده‌سوختنی در توده‌های جنگلی به‌ویژه در شرایط خشکی و آب و هوای آتش‌سوزی شدید، باعث افزایش احتمال سوختن آن‌ها نسبت به سایر توده‌های جنگلی با ماده‌سوختنی کم‌تر شده است. همچنین، در ارتباط با مناطق حفاظت شده جنگلی، دیدگاه گسترده‌ای در میان مدیران جنگل وجود دارد که این مناطق با مقادیر بیش‌تر زیست‌توده و بار ماده‌سوختنی به‌دلیل محدودیت‌های تاریخی در قطع درختان، با سطوح آتش‌سوزی بالاتر مطابقت دارد. اگرچه در مطالعه Bradley et al. (2016) جنگل‌های با سطوح حفاظتی بالاتر، سطوح آتش‌سوزی کم‌تری دارند، حتی اگر به‌طور کلی دارای بالاترین سطح زیست‌توده و بار ماده‌سوختنی باشند. این موارد نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر در آینده در مورد رابطه بین سطوح حفاظت از جنگل و سطوح آتش‌سوزی در مدیریت و سیاست آتش‌سوزی را نشان می‌دهد.

تکرار آتش‌سوزی و احتمال سوختن، واکنش چرخه و ذخیره کربن خاک به آتش‌سوزی را در اعمال خاک و بوم‌سازگان‌ها



شکل ۶- (الف) نقشه احتمال احتراق (IP) و (ب) نقشه احتمال سوختن (BP) شبیه سازی شده در مناطق حفاظت شده
Figure 6- (a) Map of ignition probability (IP) and (b) map of burn probability (BP) simulated in the protected areas

۴- نتیجه گیری

از آن جایی که آتش سوزی با از بین بردن پوشش گیاهی و اثرگذاری آن بر منابع آب و خاک، موجب نابودی طیف وسیعی از خدمات بوم‌شناختی می‌شود، امروزه به‌عنوان یکی از چالش‌های جهانی و ملی به‌دلیل تشدید دخالت‌های انسانی و نیز تغییر اقلیم (به‌ویژه افزایش دماهای حدی و خشکسالی) مطرح شده است. در تحقیق حاضر نیز نشان داده شد که مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی می‌تواند پشتیبان ارزشمندی برای برنامه‌ریزی و مدیریت مناطق حفاظت شده به‌منظور حفظ یا بهبود ارائه خدمات بوم‌سازگان جنگل باشد. استفاده از متغیرهای محیط‌زیستی (ماده‌سوختنی، توپوگرافی و اقلیم) همراه با مستندات آتش‌سوزی‌های گذشته می‌تواند به مدیران کمک کند تا توزیع مکانی ریسک آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه را بهتر شناسایی کنند. با شناسایی مناطق با ریسک آتش‌سوزی زیاد، تمرکز فعالیت‌های کاهش ریسک مانند اجرای تیمارهای کاهش ماده‌سوختنی (یعنی تنک کردن جنگل) و یا حذف ماده‌سوختنی (یعنی آتش‌سوزی تجویزی) به‌همراه سایر فعالیت‌های آگاهی‌رسانی برای جلوگیری از رخداد آتش‌سوزی و نیز افزایش تجهیزات اطفاء آتش‌سوزی برای کاهش گسترش آتش‌سوزی در این مناطق از اولویت بالاتری نسبت به سایر مناطق برخوردار است.

در حالی که این مطالعه بر مناطق حفاظت شده متمرکز است، این رویکرد می‌تواند برای تهیه نقشه ریسک آتش‌سوزی در مقیاس‌های بزرگتر اعمال شود. اگرچه لازم به ذکر است که

به‌دلیل پیچیدگی ناشی از همزمانی و فعل و انفعالات بین عوامل بیوفیزیکی و انسانی در آتش‌سوزی‌ها، نیاز به رویکردهای کل‌نگر در مدیریت آتش‌سوزی است که از تعیین ریسک آتش‌سوزی واحد به یک ارزیابی ریسک آتش‌سوزی یکپارچه حرکت می‌کند. علاوه بر این، طراحی یک سیستم اطلاعات آتش‌سوزی از طریق یک مدل ارزیابی ریسک مکانی یکپارچه به‌ویژه در مناطق حساس به آتش‌سوزی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۳/د/۹/۲۰۴۶۱ استخراج شده است، که بدین‌وسیله تقدیر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

رقیه جهدی: مفهوم‌سازی، تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله و بازبینی؛ مهرونوش مسیح‌پور: ویرایش و بازبینی مقاله.

منابع

- جهدی، رقیه (۱۴۰۲). آتش‌سوزی‌ها در توده‌های جنگل‌کاری تنک‌شده و تنک‌نشده در شمال ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۸۷-۱۰۱. doi:10.22067/geoh.2022.74988.1164
- جهدی، رقیه (۱۴۰۱). ارزیابی درک خطر و اقدامات موثر برای کاهش آسیب آتش در منطقه جنگلی سیاهکل در استان گیلان. *پژوهش‌های محیط‌زیست*، ۱۳(۲۶)، ۱۸۷-۱۷۳. doi:10.22034/EIAP.2023.169985
- صدیقی پاشاکی، محدثه، قدس خواه دریایی، مهرداد، حیدری، مهدی عادل، محمد نقی، و صادق کوهستانی، جواد (۱۳۹۳). اثر آتش‌سوزی روی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جنگل‌های استان گیلان (مطالعه موردی: منطقه سراوان). *پژوهش‌های آب‌خیزداری*، ۲۷(۳)، ۹۶-۱۰۶. doi:10.22092/wmej.2014.106897
- عزیزی، قاسم، و یوسفی، یداله (۱۳۸۸). گرمباد (باد فون) و آتش‌سوزی جنگل در استان‌های مازندران و گیلان (نمونه: آتش‌سوزی تاریخ ۳۰-۲۵ آذر ۱۳۸۴). *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۴(۱)، ۲۸-۳. https://www.sid.ir/paper/30011/fa
- California's Ecosystems, 2nd Edn, eds J.W. Van Wagendonk, N.G. Sugihara, S.L. Stephens, A.E. Thode, K.E. Shaffer, and J. Fites-Kaufman (Berkeley, CA: University of California Press).
- Buonanuci, M.S., Donato, D.C., Halofsky, J.S., Kennedy, M.C., & Harvey, B.J. (2024). Few large or many small fires: using spatial scaling of severe fire to quantify effects of fire-size distribution shifts. *Ecosphere*, 15(6), e4875. doi:10.1002/ecs2.4875
- Cao, Y., Wang, M., & Liu, K. (2017). Wildfire susceptibility assessment in southern China: A Comparison of Multiple Methods. *Disaster Risk Science*, 8, 164-181. doi:10.1007/s13753-017-0129-6
- Catry, F.X., Rego, F.C., Bação, F.L., & Moreira, F. (2009). Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *Wildland Fire*, 18, 921-931. doi:10.1071/WF07123
- Cleef, L., Yang, M., Bouchaut, B., & Reniers, G. (2024). Fire risk assessment tools for the built environment - An explorative study through a developers' survey. *Fire Safety*, 146, 104169. doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104169
- D'Este, M., Ganga, A., Elia, M., Lovreglio, R., Giannico, V., Spano, G., Colangelo, G., Laforteza, R., & Sanesi, G. (2020). Modeling fire ignition probability and frequency using Hurdle models: a cross-regional study in Southern Europe. *Ecological Processes*, 9, 54. doi:10.1186/s13717-020-00263-4
- Dawid, P., Earman, J., Howson, C., Miller, D., & Sober, E. (2005). *Bayes's theorem*, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Adams, V.M., Chauvenet, A.L.M., Stoudmann, N., Gurney, G.G., Brockington, D., & Kuempel, C.D. (2023). Multiple-use protected areas are critical to equitable and effective conservation. *One Earth*, 6 (9), 1173-1189. doi: 10.1016/j.oneear.2023.08.011
- Amin Amlashi, M., Ghodskhah, M., Bonyad, A.I., Pourbabaie, H., Jafari, M., & Gholami, V. (2015). Evaluation of fuel load following fire in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) plantations using line sampling and of FLM method (Case study: Takhsam plantations in Guilan Province). *Forest and Poplar Research*, 23(3), 562-572. doi:10.22092/ijfpr.2015.105660 [In Persian]
- Azizi, G.H., & Yousofi, Y. (2009). Foehn and forest fire in Mazandaran and Gilan provinces a case study: the forest fire from December 16 - 21, 2005. *Geographical Research*, 24(1), 3-28. https://sid.ir/paper/30011/en [In Persian]
- Benali, A., Sá, A.C.L., Pinho, J., Fernandes, P.M., & Pereira, J.M.C. (2021). Understanding the impact of different landscape-level fuel management strategies on wildfire hazard in central Portugal. *Forests*, 12, 1-24. doi:10.3390/f12050522, 2021.
- Bradley, C.M., Hanson, C.T., & DellaSala, D.A. (2016). Does increased forest protection correspond to higher fire severity in frequent-fire forests of the western United States? *Ecosphere*, 7(10), e01492. doi:10.1002/ecs2.1492
- Brooks, M.L., Minnich, R., & Matchett, J.R. (2018). "Southeastern deserts bioregion," in *Fire in*

- doi:10.5871/bacad/9780197263419.001.0001
- Depicker, A., De Baets, B., & Baetens, J.M. (2020). Wildfire ignition probability in Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 363–376. doi:10.5194/nhess-20-363-2020
- Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A.R., Fernando, S., Lovejoy, T.E., Mayorga, J., Olson, D., Asner, G.P., Baillie, J.E.M., Burgess, N.D., Burkart, K., Noss, R.F., Zhang, Y.P., Baccini, A., Birch, T., Hahn, N., Joppa, L.N., & Wikramanayake, E. (2019). A global deal for nature: guiding principles, milestones, and targets. *Science Advances*, 5, eaaw2869. doi:10.1126/sciadv. aaw2869
- Dorph, A., Marshall, E., Parkins, K.A., & Penman, T.D. (2022). Modelling ignition probability for human- and lightning-caused wildfires in Victoria, Australia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3487–3499. doi:10.5194/nhess-22-3487-2022
- Edwards, R.B., Naylor, R.L., Higgins, M.W., & Falcon, W.P. (2020). Causes of Indonesia's forest fires. *World Development*, 127, 104717. doi: 10.1016/j.worlddev.2019.104717
- Fadaei, Z., Kavian, A., Solaimani, K., Sarabsoreh, L. Z., Kalehouei, M., Zuazo, V.H.D., & Rodrigo-Comino, J. (2022). The Response of soil physicochemical properties in the Hyrcanian Forests of Iran to forest fire events. *Fire*, 5(6), 195. doi:10.3390/fire5060195
- Finney, M.A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities, in: fuels management-how to measure success: Conference Proceedings, edited by: Andrews, P. L., Butler, B. W., and comps, RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Portland, OR, 213–220. <https://research.fs.usda.gov/treearch/25948>
- Firewords. (2018). Glossary of fire science terminology. <http://www.firewords.net/>. Accessed 16 Nov 2024.
- Fisher, J., Allen, S., Woome, A., & Crawford, A. (2023). Protected areas under pressure: An online survey of protected area managers regarding social and environmental conservation target attainment and stakeholder conflicts. *World Development Sustainability*, 3, 100084. doi: 10.1016/j.wds.2023.100084
- González-Pelayo, O., Prats, S.A., van den Elsen, E., Malvar, M.C., Ritsema, C., Bautista, S., & Keizer, J.J. (2024). The effects of wildfire frequency on post-fire soil surface water dynamics. *Forest Research*, 143, 493–508. doi:10.1007/s10342-023-01635-z
- Guo, F., Su, Z., Wang, G., Sun, L., Tigabu, M., Yang, X., & Hu, H. (2017). Understanding fire drivers and relative impacts in different Chinese forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, 605-606, 411-425. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.219
- Hardy, C. (2005). Wildland fire hazard and risk: problems, definitions, and context. *Forest Ecology and Management*, 211, 73-82. doi: 10.1016/j.foreco.2005.01.029
- Islam, S.M.T. (2023). UAS Path Planning for Dynamical Wildfire Monitoring with Uneven Importance. Ph.D. Dissertation, Georgia State University. 105 pp. doi:10.57709/35860180
- Jahdi, R. (2023a). Wildfires in thinned versus unthinned plantation-type stands in Northern Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 87-101. doi:10.22067/geoeh.2022.74988.1164 [In Persian]
- Jahdi, R. (2023b). Assessment of risk perception and effective fire mitigation measures in Siahkal forest area in Guilan Province. *Environmental Researches*, 13(26), 173-187. doi:10.22034/EIAP.2023.169985 [In Persian]
- Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F., & Del Giudice, L. (2023). Assessing the effectiveness of silvicultural treatments on fire behavior in the Hyrcanian Temperate Forests of Northern Iran. *Environmental Management*, 72, 682–697. doi:10.1007/s00267-023-01785-1
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modeling*, 1 (2), 1-13. doi:10.22098/mmws.2021.1215 [In Persian]
- Klinger, R., Underwood, E.C., McKinley, R., & Brooks, M.L. (2021). Contrasting geographic patterns of ignition probability and burn severity in the Mojave Desert. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 593167. doi:10.3389/fevo.2021.593167
- Korb, J.E., Fornwalt, P.J., & Stevens-Rumann, C.S. (2019). What drives ponderosa pine regeneration following wildfire in the western United States? *Forest Ecology and Management*, 454, 117663. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117663
- Lesmeister, D.B., Sovern, S.G., Davis, R.J., Bell, D. M., Gregory, M.J., & Vogeler, J.C. (2019). Mixed-severity wildfire and habitat of an old-forest obligate. *Ecosphere*, 10 (4), e02696. doi:10.1002/ecs2.2696.
- Lucas-Borja, M.E., Plaza-Alvarez, P.A., Xu, X., Carra, B.G., & Zema, D.A. (2023). Exploring the factors influencing the hydrological response of soil after low and high-severity fires with post-fire mulching in Mediterranean forests. *Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 169-182. doi: 10.1016/j.iswcr.2022.08.002
- McCarthy, J., Tyukavina, S., Weisse, M., & Harris, N. (2024). New data confirms: forest fires are getting worse. World Resource Institute. Accessed November 17, 2024.

- McLauchlan, K.K., Higuera, P.E., Miesel, J., Rogers, B.M., Schweitzer, J., Shuman, J.K., Tepley, A.J., Varner, J.M., Veblen, T.T., Adalsteinsson, S.A., Balch, J.K., Baker, P., Batllori, E., Bigio, E., Brando, P., Cattau, M., Chipman, M.L., Coen, J., Crandall, R., Daniels, L., et al. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Ecology*, 108(5), 2047-2069. doi:10.1111/1365-2745.13403
- Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B.R. (2023). Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal. *Fire Ecology*, 19(3), 1-15. doi:10.1186/s42408-022-00162-3
- Morovati, M., & Karami, P. (2024). Modeling the seasonal wildfire cycle and its possible effects on the distribution of focal species in Kermanshah Province, western Iran. *PLoS one*, 19(10), e0312552. doi: 10.1371/journal.pone.0312552
- Mulverhill, C., Coops, N.C., Wulder, M.A., White, J.C., Hermosilla, T., & Bater, C.W. (2024). Multidecadal mapping of status and trends in annual burn probability over Canada's forested ecosystems. *ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing*, 209, 279-295. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2024.02.006
- Nieman, W.A., Van Wilgen, B.W., Radloff, F. G., Tambling, C.J., & Leslie, A.J. (2022). The effects of fire frequency on vegetation structure and mammal assemblages in a savannah-woodland system. *African Journal of Ecology*, 60(3), 407-422. doi:10.1111/aje.12971
- Radford, D.A.G., Maier, H.R., van Delden, H., Zecchin, A.C., & Jeanneau, A. (2024). Predicting burn probability: Dimensionality reduction strategies enable accurate and computationally efficient metamodeling. *Journal of Environmental Management*, 371, 123086. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123086
- Roman, M., Zubietta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Paucar, Y., Alvarez, S., Loayza, J., & Ayala, F. (2024). Seasonal effects of wildfires on the physical and chemical properties of soil in Andean grassland ecosystems in Cusco, Peru: Pending Challenges. *Fire*, 7(7), 259. doi:10.3390/fire7070259
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels; research paper INT-115; USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA.
- Sakellariou, S., Sfougaris, A., Christopoulou, O., & Tampekis, S. (2022). Integrated wildfire risk assessment of natural and anthropogenic ecosystems based on simulation modeling and remotely sensed data fusion. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 103129. doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103129
- Salavati, G., Saniei, E., Ghaderpour, E., & Hassan, Q.K. (2022). Wildfire risk forecasting using weights of evidence and statistical index models. *Sustainability*, 14, 3881. doi:10.3390/su14073881
- Scott, R.E., & Burgan, J.H. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr153.pdf
- Shahzad, F., Mehmood, K., Hussain, K., Haidar I, Anees SA, Muhammad S, Ali J, Adnan M, Wang Z, & Feng Z. (2024). Comparing machine learning algorithms to predict vegetation fire detections in Pakistan. *Fire Ecology*, 20(57) 1-20. doi:10.1186/s42408-024-00289-5
- Siddiqui Pashaki, M., QudsKhah Daryayi, M., Heydari, M., Adel, M.N., & Sadegh Kohestani, J. (2014). Effect of fire on some physical and chemical properties of soil in Guilan province forests (case study: Saravan). *Watershed Management Research*, 27(3), 96-106. doi:10.22092/wmej.2014.106897 [In Persian]
- Singh, S. (2022). Forest fire emissions: a contribution to global climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 925480. doi:10.3389/ffgc.2022.925480
- Tagestad, J., Brooks, M. L., Cullinan, V., Downs, J., & McKinley, R. (2016). Precipitation regime classification for the Mojave Desert: implications for fire occurrence. *Journal of Arid Environments*, 124, 388-397. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.09.002
- Thompson, M.P., Vogler, K.C., Scott, J.H., & Miller, C. (2022). Comparing risk-based fuel treatment prioritization with alternative strategies for enhancing protection and resource management objectives. *Fire Ecology*, 18, 26. doi:10.1186/s42408-022-00149-0
- Tian, X., Cui, W., & Shu, L. (2020). Evaluating fire management effectiveness with a burn probability model in Daxing'anling, China. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(7), 670-679. doi:10.1139/cjfr-2019-0413
- UNEP-WCMC., & IUCN. (2020). Protected planet report 2020. <https://livereport.protectedplanet.net/>.
- Vakili, M., Shakeri, Z., Motahari, S., Farahani, M., Robbins, Z.J., & Scheller, R.M. (2021). Resistance and resilience of Hyrcanian mixed forests under natural and anthropogenic disturbances. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 640451. doi:10.3389/ffgc.2021.640451
- Villarreal, M.L., Norman, L.M., Yao, E.H., & Conrad, C.R. (2022). Wildfire probability

- models calibrated using past human and lightning ignition patterns can inform mitigation of post-fire hydrologic hazards. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 568–590.
doi:10.1080/19475705.2022.2039787
- WWF. (2022). Living planet report 2022 - building a nature-positive society. Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. & Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Switzerland.
- Zambon, I., Cerdà, A., Cudlin, P., Serra, P., Pili, S., & Salvati, L. (2019). Road network and the spatial distribution of wildfires in the Valencian community (1993–2015). *Agriculture*, 9(5), 100.
doi:10.3390/agriculture9050100
- Zhang, Z., Yang, S., Wang, G., Wang, W., Xia, H., Sun, S., & Guo, F. (2022). Evaluation of geographically weighted logistic model and mixed effect model in forest fire prediction in northeast China. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1040408.
doi:10.3389/ffgc.2022.1040408
- Ziegler, J.P., Hoffman, C.M., Fornwalt, P.J., Sieg, C.H., Battaglia, M.A., Chambers, M.E., & Iniguez, J.M. (2017). Tree regeneration spatial patterns in Ponderosa Pine forests following stand-replacing fire: influence of topography and neighbors. *Forests*, 8(10), 391.
doi:10.3390/f8100391