

(OPEN ACCESS)

**Forest fire risk assessment using a spatial approach and
GIS-based frequency ratio (FR) method
in the Boozin and Marakhil protected area**

Sohrab Moradi^{*1}, Majid Pato², Naser Ahmadi Sani³, Jalal Henareh⁴

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Agricultural and Natural Resources Development, Payame Noor University, Tehran, I.R. Iran. E-mail: moradi_4@pnu.ac.ir
2. Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Urmia, Iran. E-mail: m.pato@areeo.ac.ir
3. Associate Prof., Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah. C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran. E-mail: na.ahmadisani@iau.ac.ir
4. Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Urmia, Iran. E-mail: j.henareh@areeo.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Fire is an important disturbance agent in forest ecosystems, with significant impacts on vegetation structure, soil fertility, carbon storage, and non-native plant invasions. Accurate forest fire risk assessment and spatial zoning are essential for effective fire prevention, damage mitigation, and sustainable environmental management. Integrating Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) with Geographic Information Systems (GIS) offers a robust framework for developing Fire Risk Maps (FRMs). Among statistical models, the Frequency Ratio (FR) method, a widely used MCDA approach, has proven effective for modeling environmental hazards, including forest fires. This study aims to generate and classify a forest fire risk map using the FR method within a GIS environment.
Article history: Received: 06.05.2025 Revised: 07.28.2025 Accepted: 08.09.2025	
Keywords: Boozin and Marakhil protected area, Forest fire risk, Frequency ratio (FR), Geographic information system (GIS)	
	Materials and Methods: The study focused on the Boozin and Marakhil Protected Area in Iran's Central Zagros region (Kermanshah province), selected due to its recurrent fire incidents in recent years. Twelve fire-influencing factors were identified through expert consultation and literature review: distance to roads, settlements, and waterways; average annual precipitation and temperature; forest and rangeland cover density; land use/land cover; population density; and topographic features (slope, aspect, elevation). The FR method quantified the relative importance of each factor class by correlating historical burned areas (2016–2024) with factor maps. A fire risk zoning map was produced by overlaying digitized factor layers in ArcGIS and classified into five risk categories (Very Low to Very High) using Jenks' natural breaks optimization. Model validation involved cross-referencing the zoning map with actual fire occurrences (2016-2024).
	Results: The final fire risk map revealed that 78.97% of the protected area fell into high-risk (46.81%) and very high-risk (32.16%) zones. Validation

confirmed high model accuracy, with 95.05% of recorded fires occurring in these high-risk areas (25.39% high-risk, 69.66% very high-risk). The very high-risk class exhibited the highest relative importance ($FR = 2.17$), demonstrating its predictive reliability.

Conclusion: The fire risk zoning map provides a strategic tool for prioritizing firefighting resources, personnel deployment, and equipment allocation during fire seasons. By identifying high-risk zones, this study supports proactive measures to reduce forest degradation. The methodology demonstrates the value of integrating FR-based MCDA with GIS for fire risk management, applicable to protected areas globally.

Cite this article: Moradi, Sohrab, Pato, Majid, Ahmadi Sani, Naser, Henareh, Jalal. 2025. Forest fire risk assessment using a spatial approach and GIS-based frequency ratio (FR) method in the Boozin and Marakhil protected area. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (2), 1-24.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23752.2118

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل با رویکرد مکانی و روش نسبت فراوانی مبتنی بر GIS در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل

سهراب مرادی^{۱*}، مجید پاتو^۲، ناصر احمدی ثانی^۳، جلال هناره^۴

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه توسعه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران. رایانامه: moradi_4@pnu.ac.ir
۲. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: m.pato@areeo.ac.ir
۳. دانشیار دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران. رایانامه: na.ahmadisani@iau.ac.ir
۴. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: j.henareh@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: آتش‌سوزی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب بوم‌سازگان‌های جنگلی است که می‌تواند آثار زیادی بر ساختار پوشش گیاهی، حاصلخیزی جنگل، تخریب خاک، ذخیره کربن و هجوم گونه‌های گیاهی بیگانه داشته باشد. ارزیابی دقیق خطر آتش‌سوزی‌ها و پهنه‌بندی آن می‌تواند اهمیت کاربردی زیادی در پیشگیری از آتش‌سوزی و کاهش خسارات آن در راستای مدیریت مؤثر محیط‌زیست داشته باشد. ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی روشی مؤثر برای تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی است. روش نسبت فراوانی یکی از پرکاربردترین مدل‌های آماری و روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در مدل‌سازی مخاطرات محیطی از جمله آتش‌سوزی در جنگل کاربرد گسترده‌ای دارد. هدف این پژوهش، تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل و پهنه‌بندی آن با استفاده از روش نسبت فراوانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸	مواد و روش‌ها: منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل واقع در زاگرس میانی - استان کرمانشاه به دلیل آتش‌سوزی‌های متعدد سالیان اخیر به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. عوامل تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی جنگل بر اساس نظر کارشناسان و مرور منابع شناسایی شدند. در مجموع ۱۲ عامل شامل فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، متوسط بارندگی سالیانه، متوسط دمای سالیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم پوشش مرتعی، کاربری/پوشش اراضی، تراکم جمعیت، ارتفاع، شیب، جهت جغرافیایی و فاصله از رودخانه‌ها شناسایی شدند. محاسبه و تعیین اهمیت نسبی طبقات مختلف عوامل تأثیرگذار از طریق روش نسبت فراوانی بر مبنای
واژه‌های کلیدی: خطر آتش‌سوزی جنگل، سیستم اطلاعات جغرافیایی، منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل، نسبت فراوانی	

تطبیق نقشه سطوح سوخته شده با نقشه طبقات عوامل مؤثر در آتش سوزی صورت گرفت. در نهایت نقشه پهنه بندی خطر آتش سوزی با روی هم گذاری نقشه های رقومی عوامل تأثیرگذار در محیط نرم افزار ArcGIS به دست آمد و با روش بهینه سازی Jenks در پنج رده خطر (خیلی کم تا خیلی زیاد) طبقه بندی شد. راستی آزمایی نتایج از طریق هم پوشانی با آتش سوزی های اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه در فاصله سال های ۱۴۰۲-۱۳۹۵ انجام شد.

یافته ها: نقشه نهایی پهنه بندی خطر آتش سوزی در منطقه حفاظت شده بوزین و مرخیل نشان داد که ۷۸/۹۷ درصد منطقه مورد مطالعه در طبقه خطر زیاد (۶۶/۸۱ درصد) و خیلی زیاد (۳۲/۱۶ درصد) قرار گرفته است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از روی هم گذاری نقشه مناطق آتش سوزی ثبت شده و نقشه پهنه بندی خطر آتش سوزی، ۹۵/۰۵ درصد آتش سوزی های ثبت شده در طبقات با خطر زیاد (۲۵/۳۹ درصد) و خیلی زیاد (۶۹/۶۶ درصد) واقع شده اند که می تواند بیانگر ارزیابی دقیق و صحت بالای نقشه پهنه بندی نهایی باشد. با بررسی مساحت نقشه پهنه بندی خطر آتش سوزی و نقشه مناطق آتش سوزی در طبقات مختلف خطر و محاسبه اهمیت نسبی هر یک از طبقات در منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که طبقه خطر خیلی زیاد با اهمیت نسبی ۲/۱۷ دارای بیشترین اهمیت می باشد.

نتیجه گیری: نقشه پهنه بندی نهایی، در اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح برای اطفای آتش سوزی و همچنین برنامه ریزی مطلوب برای استفاده از امکانات و به کارگیری کارکنان و تمرکز تجهیزات لازم برای مقابله با آتش سوزی های احتمالی در فصل آتش سوزی در مناطق با خطر زیاد آتش سوزی می تواند بسیار مؤثر واقع شود. این مطالعه اهمیت تهیه نقشه مناطق آتش سوزی و پهنه بندی خطر آتش سوزی را برجسته نمود که می تواند در راستای اقدامات پیشگیری و کنترلی اولویت بندی شده برای جلوگیری از تخریب جنگل در آینده مؤثر واقع شود.

استناد: مرادی، سهراب، پاتو، مجید، احمدی ثانی، ناصر، هناره، جلال (۱۴۰۴). ارزیابی خطر آتش سوزی جنگل با رویکرد مکانی و روش نسبت فراوانی مبتنی بر GIS در منطقه حفاظت شده بوزین و مرخیل. نشریه پژوهش های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۲)، ۱-۲۴.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23752.2118



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آتش‌سوزی پدیده‌ای جهانی است و از جدی‌ترین و مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی و از تهدیدهای بزرگ منابع طبیعی در جهان به شمار می‌رود (۱). آتش‌سوزی با کاهش تنوع و فراوانی گونه‌ها می‌تواند بر بوم‌سازگان جنگل تأثیر زیادی داشته باشد (۲)، همچنین اثر زیادی بر ساختار پوشش گیاهی (۳)، کاهش ارزش کیفی گونه‌ها و استقرار گونه‌های نامرغوب و غیرتجاری (۴)، تخریب خاک (۵)، ذخیره کربن بوم‌سازگان (۶) و هجوم گونه‌های گیاهی بیگانه (۷) دارد.

یکی از اقدامات اصلی در مقابله با آتش، تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی برای نواحی با خطر زیاد که احتمال شروع و انتشار آتش‌سوزی در آنها بیشتر است، می‌باشد تا بتوان درحدامکان خطرات آن را کاهش داد (۸، ۹). در این راستا، سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS)، تجزیه و تحلیل‌های سریع، ارزان و بسیار دقیق به‌منظور پایش خطر و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی ارائه می‌کند (۱۰، ۱۱، ۱۲). در سال‌های اخیر، خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ (MCDA) مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی مدل‌سازی شده است (۱۱). ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی روشی مؤثر برای تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی است (۱۲، ۱۳). روش نسبت فراوانی^۳ (FR) یکی از پرکاربردترین مدل‌های آماری و روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در مدل‌سازی مخاطرات محیطی از جمله آتش‌سوزی در جنگل کاربرد گسترده‌ای دارد (۱۴، ۱۵).

پژوهش‌های مختلفی درباره پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با استفاده از روش نسبت فراوانی انجام

شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. بیگی‌حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) به تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش نسبت فراوانی در جنگل‌های سردشت، شمال‌غربی ایران پرداختند. در این مطالعه، تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل بر پایه عوامل مختلف تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی و تعیین وزن یا اهمیت نسبی هر یک عامل‌های مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. روش نسبت فراوانی نیز برای محاسبه وزن طبقات هر یک از عامل‌های مذکور استفاده شد. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی به پنج طبقه خطر آتش‌سوزی جنگل طبقه‌بندی شد (۱۶). جعفری و مافی‌غلامی (۲۰۱۷) به پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش ترکیبی نسبت فراوانی- آنتروپی شانون در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نرخ موفقیت و پیش‌بینی برای مدل نسبت فراوانی و مدل ترکیبی (نسبت فراوانی- آنتروپی شانون) به‌ترتیب ۷۹/۰۲ و ۷۵/۷۲ درصد و ۸۵/۱۶ و ۸۲/۹۱ درصد محاسبه شد. بر اساس نتایج، بیش‌تر از یک‌سوم مساحت استان چهارمحال و بختیاری در طبقات خطر زیاد تا خیلی زیاد آتش‌سوزی قرار می‌گیرند که در این میان، عوامل کاربری اراضی، نوع خاک و فاصله از جاده دارای بیش‌ترین اهمیت هستند (۱۷). کایت و همکاران (۲۰۲۰) به مقایسه روش‌های چندمعیاره فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی به‌منظور پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در جنگل حفاظت‌شده ببر ملغات^۴ (MTR) در هند بر پایه عوامل توپوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی و انسانی پرداختند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با این روش‌ها و طبقه‌بندی نقشه‌های حاصل به پنج طبقه خطر از

1- Geographic information system
2- Multi-criteria decision analysis
3- Frequency ratio

4- Melghat tiger reserve (MTR)

خیلی کم تا خیلی زیاد، روندهای مشابهی نسبت به یکدیگر نشان دادند (۱۸). سانتانا و همکاران (۲۰۲۱) از مدل نسبت فراوانی برای شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی در کریدور مرکزی جنگل آتلانتیک در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ استفاده کردند. منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. مقدار منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده از ۰/۷۲ تا ۰/۹۶، با میانگین ۰/۸۱ در طی دوره مطالعاتی مقادیر مناسبی را نشان داد. نتایج نشان داد که روش نسبت فراوانی، مدل خوبی برای تهیه نقشه از مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگلی در کریدور مرکزی جنگل آتلانتیک بود (۱۹). عبدو و همکاران (۲۰۲۲) به تهیه نقشه حساسیت آتش‌سوزی جنگل با روش‌های فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه غربی سوریه پرداختند. در این پژوهش از عوامل شیب، جهت، ارتفاع، شاخص نرمال شده تفاوت رطوبت، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارندگی، دما، سرعت باد، فاصله از مناطق مسکونی، جاده‌ها و رودخانه‌ها به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع و انتشار آتش‌سوزی استفاده شد. دقت نقشه‌های حاصل از فرآیند مدل‌سازی با استفاده از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی و منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده با سطح زیر منحنی بررسی شد. نتایج نشان داد که روش نسبت فراوانی با $AUC = 0/864$ بالاترین مقدار را در مقایسه با روش تحلیل سلسله‌مراتبی با $AUC = 0/838$ به دست آورد (۱۵).

جنگل‌های زاگرس از شمال غرب تا جنوب غرب کشور ایران، پراکنده شده‌اند (۲۰) و با پوشش ۳/۴ درصد از مساحت ایران (۵/۵ میلیون هکتار) و ۶۹ درصد فلور آن، یکی از مهم‌ترین منابع زیستی و ذخایر ژنتیکی به شمار می‌آیند (۲۰، ۲۱). منطقه

حفاظت‌شده بوزین و مرخیل از نوع بلوط زارهای پیوسته زاگرس محسوب می‌شود و با مساحتی بالغ بر ۲۳۷۲۴ هکتار در ۳۳ کیلومتری جنوب غربی پاره و ۲۰ کیلومتری غرب باینگان در استان کرمانشاه قرار دارد که در سال ۱۳۷۴ به‌عنوان منطقه شکار و تیراندازی ممنوع و در سال ۱۳۷۸ به منطقه حفاظت‌شده ارتقاء یافته است (۲۲). اراضی دارای منابع ژنتیکی ارزشمند که به‌منظور بازسازی و نگهداری رویشگاه‌های گیاهی و زیستگاه‌های جانوری حفاظت می‌شوند، به‌عنوان مناطق حفاظت‌شده شناخته می‌شوند (۲۳). مناطق حفاظت‌شده، هسته اصلی تلاش‌های جهانی برای حفاظت و جلوگیری از تخریب منابع طبیعی به شمار می‌روند (۲۴)، از سوی دیگر با توجه به این‌که بخش زیادی از ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک دربرگرفته (۲۵)، مدیریت بهینه این جنگل‌ها و حفظ منابع گیاهی و مناطق حفاظت‌شده به دلیل نقش حیاتی و مهم آن بسیار ضروری و دارای اهمیت زیادی است.

در سالیان اخیر، علاوه بر عوامل مختلف مانند چرای دام در جنگل‌ها، توسعه اراضی کشاورزی، قطع درختان برای اهداف مختلف، تغییر اقلیم و خشک‌سالی (۲۶، ۲۷)، وقوع آتش‌سوزی‌های متعدد (۲۸، ۲۹) به‌صورت گسترده‌ای باعث تخریب مناطق وسیعی از جنگل‌های زاگرس شده است؛ به‌طوری‌که آتش‌سوزی از مهم‌ترین عوامل خطر با پیامدهای کوتاه‌مدت و عواقب درازمدت بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی در ناحیه رویشی زاگرس ایران است (۳۰). وقوع آتش‌سوزی نیز در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل با داشتن پوشش گیاهی متراکم بارها در سال‌های اخیر اتفاق افتاده است. بنابراین تجزیه و تحلیل مکانی آتش‌سوزی در این منطقه حفاظت‌شده و شناسایی مناطق با امکان خطر بالای وقوع آتش‌سوزی، ضرورتی انکارناپذیر برای بهبود روش‌های پیشگیری و پیش‌بینی آتش‌سوزی است.

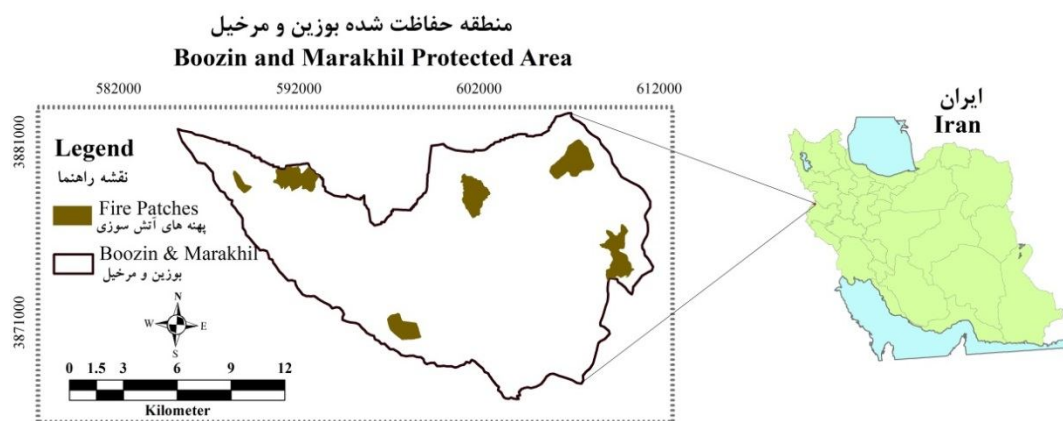
متر و کمینه آن ۴۶۸ متر) از سطح آب‌های آزاد می‌باشد. منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل دارای اقلیم نیمه مرطوب معتدل است و منشأ عمده بارندگی‌های آن کوهستانی است (شکل ۱). این منطقه از نظر گیاهی بسیار غنی و از نظر جانوری زیستگاه شوکا (*Capreolus capreolus*) و پلنگ ایرانی (*Panther pardus saxicolor*) است. علاوه بر آن زیستگاه گونه‌های شاخصی مانند کل و بز (*Capra aegagrus*)، خرس قهوه‌ای (*Ursus arctos*)، پرندگان شکاری مثل عقاب طلایی (*Aquila chrysaetos*) و هما (*Gypaetus barbatus*) می‌باشد. هم‌چنین، دو گونه سمندر آتشین و کردستانی از ۷ گونه سمندر ایرانی در آن زیست می‌کنند.

پوشش گیاهی منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل به‌صورت جنگلی است و پوشش مرتعی نیز قسمت کمی از منطقه را پوشانده است. رویشگاه جنگلی آن دارای سه طبقه جنگلی انبوه، نیمه انبوه و تنک متشکل از گونه‌های درختی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.)، مازودار (*Quercus infectoria* G. Olivier)، بنه (*Pistacia atlantica* Desf.)، کلخونک (*Pistacia*)، بادام (*Amygdalus orientalis* Mill.)، کیکم (*Acer monspessulanum* L.)، داغداغان (*Celtis caucasica* Willd.) و سایر گونه‌ها می‌باشد.

به‌بیان‌دیگر، شناسایی عوامل مؤثر در بروز آتش‌سوزی و پهنه‌بندی خطر وقوع آن یکی از ابزارهای مهم برای ارائه راهکارهای مؤثر در پیشگیری و مهار آتش‌سوزی است (۳۱). در پژوهش حاضر، از روش نسبت فراوانی با بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌منظور تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل واقع در استان کرمانشاه برای اولین بار استفاده شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای پیش‌بینی و هشدار مخاطرات محیطی ناشی از آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گیرد. این امر علاوه بر کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی، به تعیین مناطق حساس به آتش‌سوزی برای برنامه‌های توسعه کمک خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش: سطح مورد مطالعه، بخشی از مناطق جنگلی زاگرس در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل، ناحیه‌ای کوهستانی در بخش باینگان - شمال غربی استان کرمانشاه است. این منطقه، بین طول‌های جغرافیایی $45^{\circ} 56' 09''$ و $46^{\circ} 05' 59''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 59' 21''$ و $35^{\circ} 05' 48''$ شمالی واقع شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه، ۲۱۹۹۳ هکتار و محیط آن برابر با ۸۴ کیلومتر می‌باشد. میانگین ارتفاع منطقه ۱۲۵۹ متر (بیشینه ارتفاع ۲۵۴۷



شکل ۱- موقعیت منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل و سطوح سوخته‌شده در فاصله سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵.

Figure 1. The location of the Boozin and Marakhil protected area and burned areas between 2016-2024.

عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی: در مدل‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی، در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی، امری ضروری است. در مطالعه حاضر برای تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی، با توجه به نظر کارشناسان و مرور منابع، ۱۲ عامل در قالب ۴ معیار شامل عامل فاصله از جاده و فاصله از مناطق مسکونی به عنوان معیار زیرساختی، متوسط بارندگی سالیانه، متوسط دمای سالیانه، تراکم پوشش جنگلی و تراکم پوشش مرتعی به عنوان معیار اکولوژیکی، کاربری/پوشش اراضی و تراکم جمعیت به عنوان معیار اقتصادی-اجتماعی و ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت جغرافیایی و فاصله از رودخانه‌ها به عنوان معیار فیزیوگرافی استفاده شد.

برای تهیه نقشه طبقات فاصله از جاده‌ها، ابتدا جاده‌های منطقه مشخص و در محیط GIS به فرمت وکتوری درآمدند، سپس در ۵ طبقه ۱۰۰۰-۰، ۲۰۰۰-۱۰۰۰، ۳۰۰۰-۲۰۰۰، ۴۰۰۰-۳۰۰۰ و بیش‌تر از ۴۰۰۰ متر، بافرهایی اطراف جاده‌ها اعمال شد (شکل ۲-الف). برای تهیه نقشه طبقات فاصله از مناطق مسکونی نیز، ابتدا نقاط مناطق مسکونی منطقه مورد مطالعه با فرمت برداری وارد محیط GIS شد و سپس بافرهایی در ۵ طبقه ۱۰۰۰-۰، ۲۰۰۰-۱۰۰۰، ۳۰۰۰-۲۰۰۰، ۴۰۰۰-۳۰۰۰ و بیش‌تر از ۴۰۰۰ متر اطراف مناطق مسکونی اعمال شد (شکل ۲-ب).

در تهیه نقشه میانگین بارش و دمای سالیانه، از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف منطقه مورد مطالعه تهیه‌شده از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های ماهواره‌ای TRMM مربوط به سال ۱۴۰۰ استفاده شد. نقشه متوسط بارندگی سالیانه در دو طبقه ۶۴۷-۵۳۴ و ۸۰۱-۶۴۷ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۳-ج). نقشه متوسط دمای سالیانه نیز در چهار طبقه ۱۷/۶-۱۸/۱۷، ۱۸/۱۷-۱۹/۳۸، ۱۹/۳۸-۱۸/۷۸ و ۱۹/۳۸-۱۹/۹۹ درجه سانتی‌گراد تهیه شد (شکل ۳-د).

در مطالعه حاضر به دلیل همگن بودن منطقه مورد مطالعه از نظر ترکیب پوشش گیاهی (جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده همراه با پوشش علفی کف جنگل)، صرفاً تراکم پوشش جنگلی و مرتعی به عنوان عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی انتخاب شدند. برای تهیه نقشه تراکم جنگل و مرتع از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6 (سنجنده‌های LissIII و LissIV) مربوط به سال ۲۰۱۴ استفاده شد. نقشه تراکم جنگل در چهار طبقه فاقد پوشش جنگلی (کم‌تر از ۰.۵٪)، جنگل تنک (۰.۵-۲۵٪)، جنگل نیمه انبوه (۲۵-۵۰٪) و جنگل انبوه (۵۰-۷۵٪) تهیه شد (شکل ۳-ه). نقشه طبقات تراکم پوشش مرتعی نیز در سه طبقه فاقد پوشش مرتعی، مرتع کم‌تراکم و مرتع نیمه‌تراکم تهیه شد (شکل ۳-و).

برای تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6 سنجنده‌های LissIII و LissIV سال ۲۰۱۴ استفاده شد (شکل ۴-ز). اصطلاح‌های کاربری اراضی^۱ و پوشش زمین^۲ اغلب به‌طور یکسان برای توصیف رابطه پیچیده‌ای که بین مردم و محیط اطراف آن‌ها وجود دارد، استفاده می‌شود (۳۲، ۳۳). کاربری اراضی به نحوه استفاده از زمین اشاره دارد، درحالی‌که پوشش زمین بر ویژگی‌های واقعی مناظر زمین دلالت دارد (۳۴، ۳۵). معمولاً برای اجتناب از اشتباه در به‌کارگیری این دو اصطلاح از اصطلاح ترکیبی کاربری/پوشش اراضی^۳ استفاده می‌کنند (۳۴). در این پژوهش نیز مانند بسیاری از پژوهش‌ها (۱۱، ۱۳، ۱۶، ۳۶) از لایه تلفیقی و اصطلاح کاربری/پوشش اراضی استفاده شده است.

برای تهیه نقشه تراکم جمعیت، پس از تهیه نقشه سامان‌های (دهستان‌های) منطقه مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی وزارت کشور و اضافه کردن تعداد جمعیت هر سامان به جدول توصیفی نقشه‌ها در

1- Land use

2- Land cover

3- Land use/Land cover (LULC)

با شرایط مشابه با مخاطرات پیشین رخ خواهند داد (۱۷). ضریب نسبت فراوانی در مطالعه حاضر برای هر طبقه از عوامل ۱۲ گانه عبارت از نسبت درصد مساحت سطوح سوخته‌شده که در هر طبقه قرار دارند، به درصد کل مساحت آن طبقه در منطقه مورد مطالعه (رابطه ۱). بنابراین محاسبه و تعیین اهمیت نسبی طبقات عوامل مختلف از طریق روش نسبت فراوانی بر مبنای تطبیق نقشه سطوح سوخته‌شده با نقشه طبقات عوامل مؤثر در آتش‌سوزی صورت گرفت. اگر نسبت فراوانی کم‌تر از یک باشد، حساسیت آن طبقه به آتش‌سوزی کم‌تر و اگر بیش‌تر از یک باشد، بیانگر حساسیت زیاد آن طبقه به آتش‌سوزی است (۱۶).

$$FR = A/B \quad (1)$$

در این رابطه، FR نسبت فراوانی، A درصد مساحت سطوح سوخته‌شده در هر طبقه از عامل‌ها و B درصد کل مساحت آن طبقه از آن عامل می‌باشد. پس از محاسبه اهمیت نسبی طبقات هر کدام از ۱۲ عامل مؤثر در خطر آتش‌سوزی با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR)، نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با استفاده از رابطه ۲ در محیط نرم‌افزار GIS به دست آمد.

$$FRI = \sum_{i=1}^{12} L_{FR} \quad (2)$$

که در آن، FRI شاخص خطر آتش‌سوزی و مجموع ۱۲ عامل مؤثر در خطر آتش‌سوزی، L_{FR} لایه‌های عوامل مختلف که اهمیت نسبی هر یک از طبقات آن‌ها با استفاده از روش نسبت فراوانی محاسبه شده‌اند.

در نهایت، نقشه حاصل با روش بهینه‌سازی Jenks (۳۷، ۳۸) در پنج طبقه خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. در این روش طبقه‌بندی، شکستگی طبیعی بین طبقات طوری محاسبه می‌شود که مجموع واریانس‌ها در هر کلاس

محیط GIS، نقشه تراکم جمعیت منطقه در دو طبقه با روش بهینه‌سازی Jenks که با نام روش طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی Jenks^۱ نیز معروف است (۳۷) تهیه شد (شکل ۴-ح).

نقشه‌های شیب، جهت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) سازمان نقشه‌برداری کشور با اندازه تفکیک ۱۰ متر در محیط GIS تهیه شدند. نقشه شیب مطابق با طبقه‌بندی نیمرخ زاگرس به چهار طبقه شیب ۰-۱۰٪، ۱۰-۲۰٪، ۲۰-۵۰٪ و بیش‌تر از ۵۰ درصد طبقه‌بندی شد (شکل ۵-ط). نقشه طبقات جهت بر اساس چهار جهت اصلی شمال، شرق، جنوب، غرب و مناطق مسطح یا بدون شیب تهیه شد (شکل ۵-ی). نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه نیز مطابق با طبقه‌بندی نیمرخ زاگرس در چهار طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۶۸۰، ۱۵۰۰-۱۰۰۰، ۲۰۰۰-۱۵۰۰ و ۲۵۴۷-۲۰۰۰ متر تهیه شد (شکل ۵-ک). برای تهیه نقشه رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه، در ابتدا نقشه‌های جهت جریان و جریان تجمعی از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج شدند و پس از رده‌بندی آبراهه‌ها به روش استرالر^۲، نقشه شبکه آبراهه‌ها و به تبع آن لایه فاصله از رودخانه‌ها در پنج طبقه ۰-۲۰۰، ۲۰۰-۴۰۰، ۴۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۸۰۰ و بیش‌تر از ۸۰۰ متر تهیه گردید (شکل ۵-ل).

روش نسبت فراوانی (FR): در این مطالعه، نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل با روش نسبت فراوانی و بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است. نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان وقوع یک رویداد و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌نماید (۱۹). فرضیه روش نسبت فراوانی بر این اساس است که مخاطرات آینده در مکان‌هایی

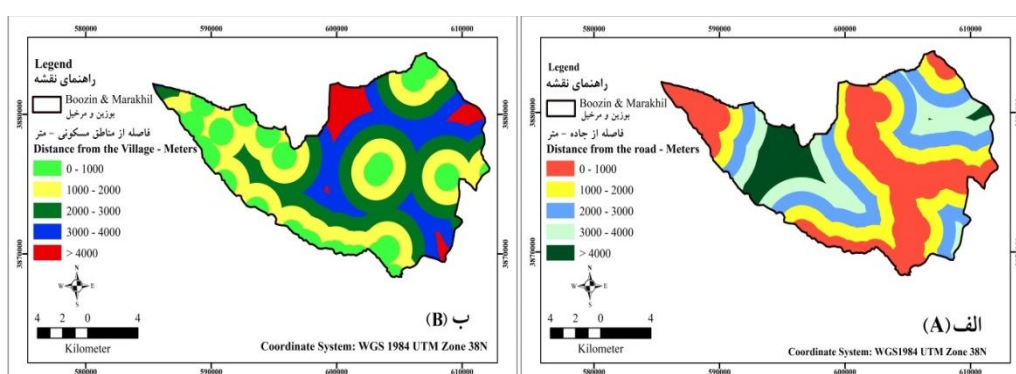
1- Jenks natural breaks classification method
2- Strahler

بارندگی سالیانه، متوسط دمای سالیانه، تراکم پوشش جنگلی و تراکم پوشش مرتعی به‌عنوان معیار اکولوژیکی در شکل ۳، کاربری/ پوشش اراضی و تراکم جمعیت به‌عنوان معیار اقتصادی- اجتماعی در شکل ۴ و نقشه‌های شیب، جهت جغرافیایی، ارتفاع و فاصله از رودخانه‌ها به‌عنوان معیار فیزیوگرافی در شکل ۵ نشان داده شده است.

حداقل باشد و مقادیر مشابه به مناسب‌ترین وجه ممکن در یک گروه قرار می‌گیرند و تفاوت بین طبقه‌ها حداکثر می‌شود و اگر یک یا چند عارضه در دسته‌ای خاص قرار نگیرند، هیچ مقداری به آن اختصاص داده نمی‌شود (۳۷).

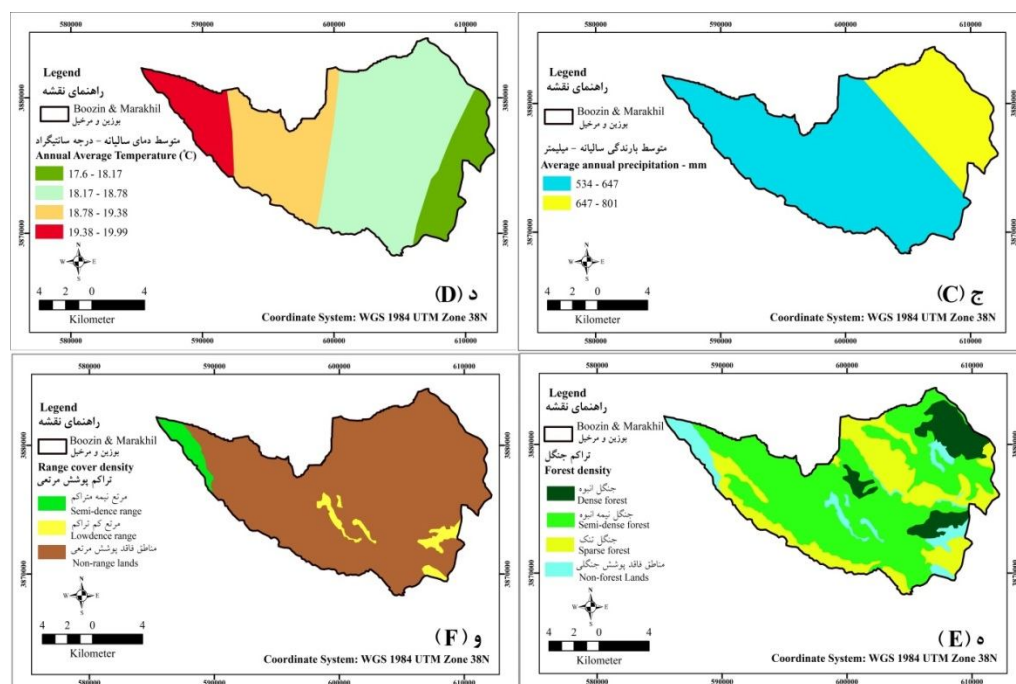
نتایج

نقشه‌های فاصله از جاده و فاصله از مناطق مسکونی به‌عنوان معیار زیرساختی در شکل ۲، متوسط



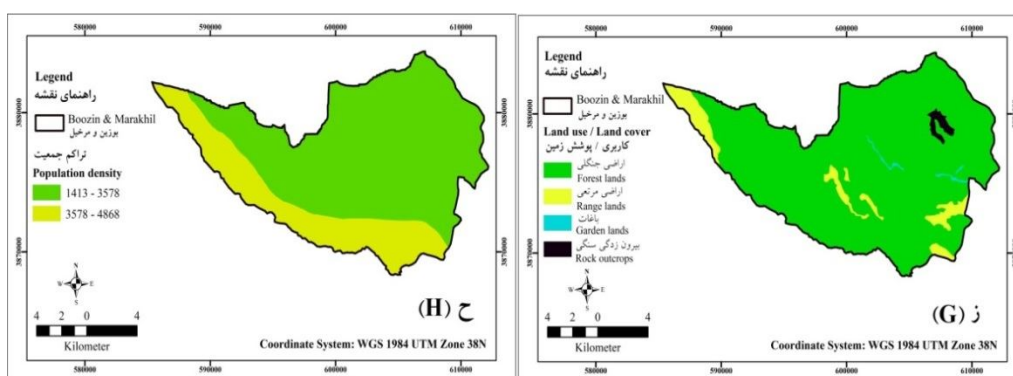
شکل ۲- نقشه طبقات فاصله از جاده (الف) و فاصله از مناطق مسکونی (ب).

Figure 2. Map of classes of distance from the road (A) and distance from the settlements (B).

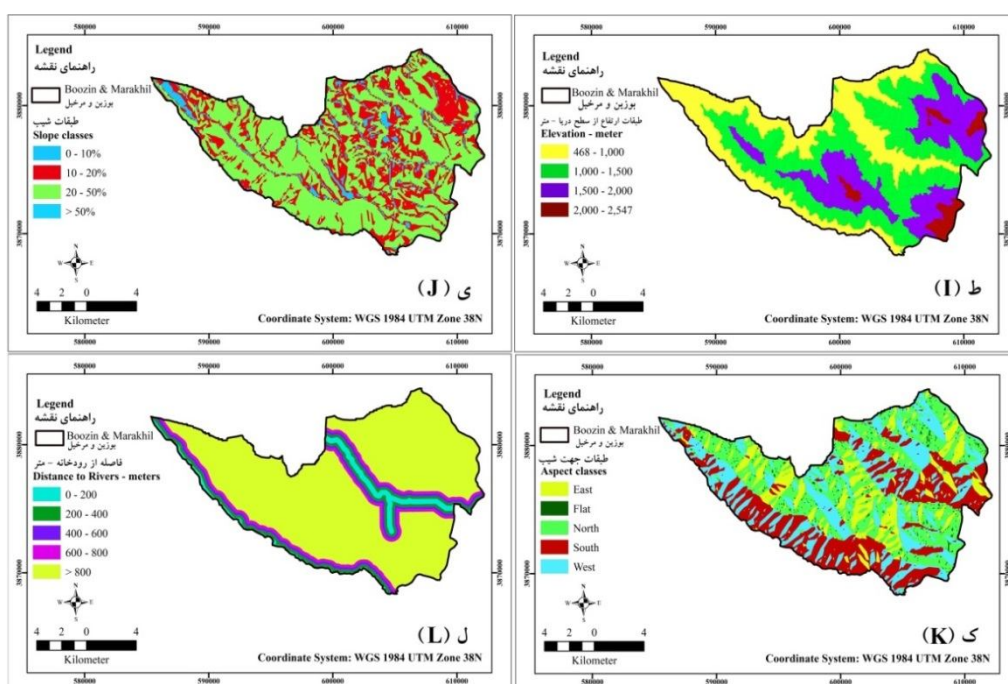


شکل ۳- نقشه طبقات متوسط بارندگی سالیانه (ج)، متوسط دمای سالیانه (د)، تراکم پوشش جنگلی (ه) و تراکم پوشش مرتعی (ز).

Figure 3. Map of classes of average annual precipitation (C), average annual temperature (D), forest cover density (E), and range cover density (F).



شکل ۴- نقشه طبقات کاربری / پوشش اراضی (ز) و تراکم جمعیت (ح).
Figure 4. Map of classes of land use / land cover (G) and population density (H).



شکل ۵- نقشه طبقات ارتفاع از سطح دریا (ط)، شیب (ی)، جهت جغرافیایی (ک) و فاصله از رودخانه‌ها (ل).
Figure 5. Map of elevation classes (I), slope (J), aspect (K), and distance from rivers (L).

حساسیت را به وقوع آتش‌سوزی نشان داد و بالاترین مساحت پهنه آتش‌سوزی به وسعت ۵۲۹/۳۷ هکتار را به خود اختصاص داد. در مورد عامل فاصله از مناطق مسکونی، طبقه ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متر با اختصاص ۴۹/۲۵ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌های منطقه و اهمیت نسبی ۱/۶۷ حساس‌ترین طبقه به آتش‌سوزی بود. در مورد عامل طبقات متوسط بارندگی سالیانه، ۵۴/۷۲ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌های منطقه در طبقه ۶۴۷-۸۰۱ میلی‌متر اتفاق افتاده است و طبقه ۵۳۴-۶۴۷

جدول ۱ اهمیت نسبی طبقات هرکدام از عوامل ۱۲ گانه مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه را که با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR) برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی به‌دست‌آمده است را نشان می‌دهد. براساس نتایج، ۴۰/۵۲ و ۳۲/۳۸ درصد آتش‌سوزی‌های منطقه بوزین و مرخیل به ترتیب در طبقات فاصله از جاده ۱۰۰۰-۲۰۰۰ و ۰-۱۰۰۰ متر اتفاق افتاده است. طبقه ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متر با اهمیت نسبی ۱/۷۱ بیش‌ترین

بیش‌ترین حساسیت را به وقوع آتش‌سوزی داشت. برای عامل ارتفاع از سطح دریا، طبقه ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر با اختصاص ۴۵/۰۹ درصد از آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه و اهمیت نسبی ۱/۰۶ حساس‌ترین طبقه ارتفاع از سطح دریا به آتش‌سوزی است. در مورد طبقات شیب، باین که ۶۵/۶۰ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌های منطقه در طبقه شیب ۲۰-۵۰ درصد اتفاق افتاده است؛ ولی طبقه شیب بیش‌تر از ۵۰ درصد با اهمیت نسبی ۱/۴۴ بیش‌ترین حساسیت به وقوع آتش‌سوزی را نشان داد. بیش‌ترین مساحت آتش‌سوزی‌ها در جهت‌های غربی و جنوبی به ترتیب با ۳۹/۷۲ و ۳۱/۰۴ درصد رخ داده است و با اختصاص اهمیت نسبی ۱/۵۱ و ۱/۲۰ به خود، حساس‌ترین جهت‌ها به آتش‌سوزی بودند. در مورد عامل فاصله از رودخانه‌ها، ۸۶/۲۷ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌ها در طبقه بیش‌تر از ۸۰۰ متر اتفاق افتاده است و با اختصاص اهمیت نسبی ۱/۰۹ به خود حساس‌ترین طبقه به آتش‌سوزی بود.

با اهمیت نسبی ۱/۶۹ بیش‌ترین حساسیت به وقوع آتش‌سوزی در بین طبقات متوسط بارندگی سالیانه را دارد. برای عامل متوسط دمای سالیانه، طبقه ۱۷/۶-۱۸/۱۷ درجه سانتی‌گراد درحالی‌که تنها حدود ۱۲/۳۷ درصد منطقه مورد پژوهش را شامل می‌شود، با در برگرفتن ۲۱/۶۰ درصد از آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه و اهمیت نسبی ۱/۷۵ حساس‌ترین طبقه متوسط دمای سالیانه به آتش‌سوزی است. اهمیت نسبی تراکم پوشش جنگلی برای طبقات جنگل انبوه و جنگل تنک به ترتیب ۲/۱۷ و ۱/۲۷ بود که طبقات حساس به آتش‌سوزی بودند. همچنین، طبقه اراضی غیرمرتعی با اختصاص اهمیت نسبی ۱/۰۵ به خود حساس‌ترین طبقه به آتش‌سوزی بود. در مورد عامل کاربری/پوشش اراضی، طبقه اراضی جنگلی با اختصاص ۹۷/۷۱ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌های منطقه و اهمیت نسبی ۱/۰۵ حساس‌ترین طبقه به آتش‌سوزی بود. در مورد عامل تراکم جمعیت، ۸۲/۴۸ درصد آتش‌سوزی‌های منطقه در طبقه ۱۴۱۳-۳۵۷۸ نفر اتفاق افتاده است و با اختصاص اهمیت نسبی ۰/۶۲ به خود،

جدول ۱- اهمیت نسبی طبقات هر یک از عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی با استفاده روش نسبت فراوانی.

Table 1. The relative importance of each class of factors affecting fire risk using the frequency ratio method.

اهمیت نسبی	مساحت طبقه (%)	مساحت آتش‌سوزی (%)	طبقه	عامل
Relative importance	Class area (%)	Area of fire patches (%)	Class	Factor
1.01	32.05	32.38	0 - 1000	فاصله از جاده (متر) Distance to roads
1.71	23.63	40.52	1000 - 2000	
1.13	20.63	23.36	2000 - 3000	
0.25	14.93	3.73	3000 - 4000	
0	8.76	0	> 4000	
1.04	19.68	20.44	0 - 1000	فاصله از مناطق مسکونی (متر) Distance to settlements (m)
1.67	29.44	49.25	1000 - 2000	
0.52	27.4	14.12	2000 - 3000	
0.64	17.6	11.25	3000 - 4000	
0.84	5.88	4.95	> 4000	
1.69	26.81	45.28	534 - 647	متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) Average annual precipitation (mm)
0.75	73.19	54.72	647 - 801	
1.75	21.60	12.37	17.6 - 18.17	متوسط دمای سالیانه (درجه سانتی‌گراد) Average annual temperature (°C)
0.86	45.46	53.04	18.17 - 18.78	
0.86	20.77	24.08	18.78 - 19.38	
1.16	12.17	10.51	19.38 - 19.99	

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

اهمیت نسبی Relative importance	مساحت طبقه (%) Class area (%)	مساحت آتش‌سوزی (%) Area of fire patches (%)	طبقه Class	عامل Factor
0.28	8.11	2.29	اراضی غیرجنگلی (NF) Non-forest Lands (NF)	تراکم پوشش جنگلی Forest cover density
2.17	10.45	22.68	جنگل انبوه (F ₁) Dense forest (F ₁)	
0.77	56.68	43.59	جنگل نیمه‌انبوه (F ₂) Semi-dense forest (F ₂)	
1.27	24.76	31.44	جنگل تنک (F ₃) Lowdense forest (F ₃)	
1.05	93.44	97.71	اراضی غیرمرتعی (NC) Non-range Lands	تراکم پوشش مرتعی Range cover density
0.74	3.10	2.29	مرتع نیمه‌تراکم (R ₂) Semi-dense range (R ₂)	
0.00	3.46	0.00	مرتع کم‌تراکم (R ₃) Lowdense range (R ₃)	
1.05	93.19	97.71	اراضی جنگلی Forest Lands	کاربری/پوشش اراضی Land use / Land cover
0.34	6.65	2.29	اراضی مرتعی Range Lands	
0.00	0.11	0.00	باغات Garden Lands	
0.00	0.05	0.00	بیرون‌زدگی سنگی Rock Outcrops	
0.62	74.1	82.48	1413 - 3578	تراکم جمعیت Population density
0.38	25.9	17.52	3578 - 4868	
0.99	29.88	29.45	468 - 1000	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)
1.06	42.36	45.09	1000 - 1500	
1.00	23.75	23.82	1500 - 2000	
0.41	3.98	1.64	2000 - 2500	
0.00	0.03	0.00	2500 - 2547	
0.48	6.72	3.21	0 - 10	شیب (درصد) Elevation (%)
0.93	33.63	31.15	10 - 20	
1.10	59.62	65.60	20 - 50	
1.44	0.02	0.04	> 50	
0.80	1.68	1.35	مسطح Flat	جهت جغرافیایی Aspect
0.69	30.66	21.11	شمال North	
0.44	15.54	6.80	شرق East	
1.20	25.85	31.04	جنوب South	
1.51	26.28	39.72	غرب West	
0.23	4.47	1.03	0 - 200	فاصله از رودخانه‌ها (متر) Distance to Rivers
0.55	5.52	3.05	200 - 400	
0.82	5.44	4.43	400 - 600	
0.98	5.33	5.22	600 - 800	
1.09	79.24	86.27	> 800	

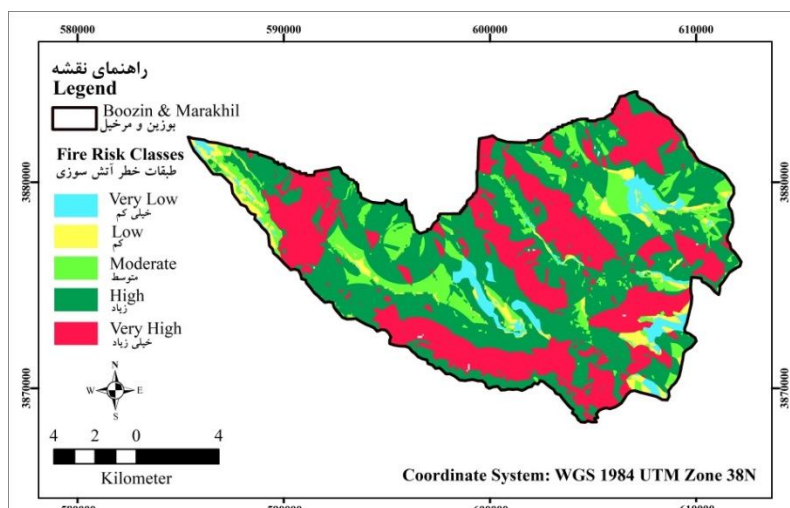
تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در محیط نرم‌افزار GIS اقدام شد (شکل ۶).

پس از محاسبه اهمیت نسبی طبقات هرکدام از ۱۲ عامل مؤثر در خطر آتش‌سوزی با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR)، با استفاده از رابطه ۳ نسبت به

$$FRI = L_{DR} + L_{DS} + L_{AAP} + L_{AMT} + L_{FCD} + L_{RCD} + L_{LULC} + L_{PD} + L_S + L_A + L_E + L_{DW} \quad (3)$$

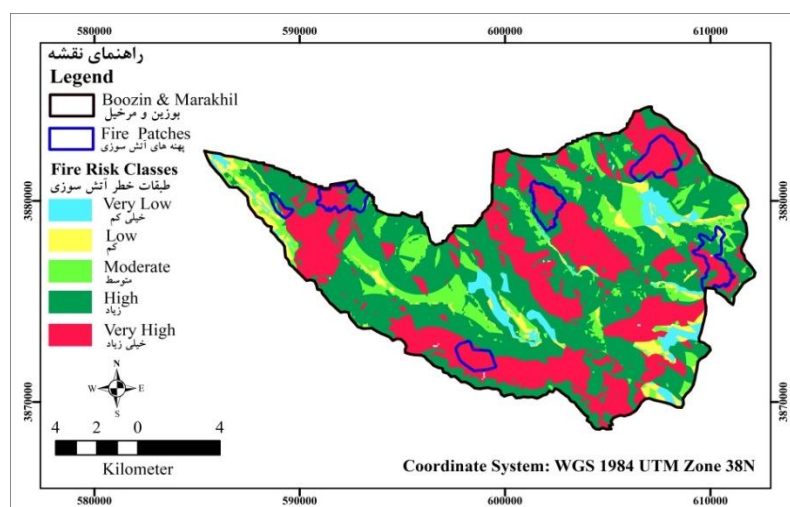
پوشش مرتعی، کاربری/پوشش اراضی، تراکم جمعیت، ارتفاع، شیب، جهت جغرافیایی و فاصله از رودخانه‌ها) تأثیرگذار در آتش‌سوزی جنگل است که اهمیت نسبی هریک از طبقات آن‌ها با استفاده از روش نسبت فراوانی محاسبه شده‌اند.

که در آن، FRI شاخص خطر آتش‌سوزی و مجموع ۱۲ عامل مؤثر در خطر آتش‌سوزی است و $L_{DR} \dots L_{DW}$ لایه عوامل مختلف (فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، متوسط بارندگی سالیانه، متوسط دمای سالیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با روش نسبت فراوانی در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل.

Figure 6. Fire risk zoning map using the frequency ratio method in the Boozin and Marakhil protected area.



شکل ۷- روی هم گذاری نقشه سطوح سوخته شده سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵ و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه.

Figure 7. Overlaying of the burned areas map between 2016-2024 and the fire risk zoning map in the study area.

ثبت‌شده در طبقات با خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفتند که می‌تواند بیانگر صحت نقشه پهنه‌بندی نهایی باشد (جدول ۲). با بررسی مساحت نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی و نقشه مناطق آتش‌سوزی در طبقات خطر (خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد) و محاسبه اهمیت نسبی هر یک از طبقات در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل، مشخص شد که طبقه خطر خیلی زیاد با اهمیت نسبی ۲/۱۷ دارای بیش‌ترین اهمیت می‌باشد.

با توجه به نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی، فقط ۸/۸۷ درصد منطقه مورد مطالعه در طبقات خطر خیلی‌کم و کم قرار دارد و ۱۲/۱۶ درصد در طبقه خطر متوسط و ۷۸/۹۷ درصد در طبقه خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفته است (جدول ۲). برای اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی، نقشه پراکنش آتش‌سوزی (شکل ۱) و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی (شکل ۶) روی هم‌گذاری شدند (شکل ۷). براساس نتایج، ۹۵/۰۵ درصد از مناطق آتش‌سوزی

جدول ۲- مساحت طبقات مختلف نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی و نقشه مناطق آتش‌سوزی ثبت‌شده.

Table 2. The area of different classes of fire risk zoning map and fire zones map.

اهمیت نسبی Relative importance	نقشه مناطق آتش‌سوزی ثبت‌شده Map of recorded fire zones		نقشه خطر آتش‌سوزی Fire risk map		طبقه خطر Risk class
	مساحت (%) Area (percent)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	مساحت (%) Area (percent)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	
0.03	0.10	1.27	3.73	823.53	خیلی‌کم Very Low
0.14	0.70	9.14	5.14	1133.7	کم Low
0.34	4.15	54.34	12.16	2682.68	متوسط Moderate
0.54	25.39	332.59	46.81	10326.93	زیاد High
2.17	69.66	912.35	32.16	7093.82	خیلی‌زیاد Very high

در عامل فاصله از مناطق مسکونی، طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر با اهمیت نسبی ۱/۶۷، در عامل متوسط بارندگی سالیانه، طبقه ۶۴۷-۵۳۴ با اهمیت نسبی ۱/۶۹، در عامل متوسط دمای سالیانه، طبقه ۱۸/۱۷-۱۷/۶ با اهمیت نسبی ۱/۷۵، در عامل تراکم پوشش جنگلی، طبقه جنگل انبوه با اهمیت نسبی ۲/۱۷، در عامل تراکم پوشش مرتعی، طبقه مرتع نیمه‌متراکم با اهمیت نسبی ۰/۷۴، در عامل کاربری/پوشش اراضی، طبقه اراضی جنگلی با اهمیت نسبی ۱/۰۵، در عامل تراکم

بحث

نتایج حاصل از مطالعه حاضر، میزان اهمیت هر یک از طبقات عوامل تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل در غرب استان کرمانشاه را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در روش نسبت فراوانی، اهمیت نسبی بالاتر هر طبقه نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر آن طبقه به آتش‌سوزی است (۱۷)، می‌توان بیان کرد که در عامل فاصله از جاده، طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر با اهمیت نسبی ۱/۷۱،

جمعیت، طبقه ۳۵۷۸-۱۴۱۳ با اهمیت نسبی ۰/۶۲، در عامل ارتفاع از سطح دریا، طبقه ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متر با اهمیت نسبی ۱/۰۶، در عامل شیب، طبقه شیب بیش‌تر از ۵۰ درصد با اهمیت نسبی ۱/۴۴، در عامل جهت جغرافیایی طبقات غربی و جنوبی با اهمیت نسبی به‌ترتیب ۱/۵۱ و ۱/۲۰ و عامل فاصله از رودخانه‌ها، طبقه بیش‌تر از ۸۰۰ متر با اهمیت نسبی ۱/۰۹ حساس‌ترین طبقه‌های عوامل مختلف به آتش‌سوزی بودند.

عوامل فاصله از جاده و فاصله از مناطق مسکونی دارای درجه اهمیت بالایی در وقوع آتش‌سوزی هستند. با روی‌هم‌گذاری پهنه‌های آتش‌سوزی روی نقشه طبقات فاصله از جاده مشخص شد که ۷۲/۹٪ از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در طبقات نزدیک به جاده (۳۲/۳۸٪ در طبقه ۱۰۰۰-۰ متر و ۴۰/۵۲٪ در طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر) و در فاصله کم‌تر از ۲۰۰۰ متر از جاده‌ها رخ داده است. در مطالعات مختلف (۱۶، ۳۹، ۴۰، ۴۱) نیز بیش‌ترین آتش‌سوزی در نزدیک‌ترین فاصله از جاده اتفاق افتاده است. هم‌چنین، در پژوهش عالی‌محمودی‌سراب و همکاران (۲۰۱۸) عامل فاصله از جاده، یکی از عواملی است که بیش‌ترین نقش را در وقوع آتش‌سوزی ایفا کرده است (۴۲). جاده‌ها با ایجاد دسترسی بیش‌تر عوامل انسانی، احتمال رخداد آتش‌سوزی را افزایش می‌دهند. هم‌چنین، شبکه راه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تأسیسات زیرساختی مدیریت جنگل (۴۳) زمینه دسترسی مستقیم فعالیت‌های گسترده انسان‌ها در بوم‌سازگان جنگل را فراهم می‌نماید و بنابراین احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل افزایش می‌یابد. ساخت شبکه جاده‌ای، حفاری، حذف پوشش گیاهی و جابجایی مسافران و گردشگران از جمله محرک‌های آتش‌سوزی در طول شبکه راه‌های جنگلی است (۴۴). در نتیجه احتمال آتش‌سوزی جنگل با کاهش فاصله از

جاده‌ها افزایش می‌یابد. فاصله مناطق مسکونی از جنگل‌ها و مراتع یکی از تأثیرگذارترین عامل انسان‌ساخت است که شدت فشار انسان بر بوم‌سازگان‌های جنگلی را منعکس می‌کند (۴۵). در این راستا، ساکنان مناطق جنگلی و مرتعی در فصول خشک بر اثر عوامل مختلف باعث آتش‌سوزی‌های تصادفی یا غیرتصادفی می‌شوند (۴۶). با روی هم‌گذاری پهنه‌های آتش‌سوزی روی نقشه طبقات فاصله از مناطق مسکونی مشخص شد که ۶۹/۶۹٪ از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در طبقات نزدیک به مناطق مسکونی (۲۰/۴۴٪ در طبقه ۱۰۰۰-۰ متر و ۴۹/۲۵٪ در طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر) رخ داده است؛ بنابراین هرچه فاصله جنگل‌ها از مناطق مسکونی بیش‌تر باشد احتمال آتش‌سوزی کم‌تر است. نقش انسان در سال‌های اخیر با توجه به فراگیر شدن حفاظت از منابع محیط‌زیستی و توسعه انجمن‌های مردمی حفاظت از محیط‌زیست در منطقه به‌ویژه برای اطفاء سریع آتش‌سوزی در نزدیکی مناطق مسکونی قابل‌توجه است. بنابراین در نزدیکی مناطق مسکونی ممکن است تعداد آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده بیش‌تر باشد؛ اما پهنه‌های با مساحت کم‌تری را می‌سوزاند. نتایج حاصل از این بخش پژوهش با مطالعات جایسوال و همکاران (۲۰۰۲)، دانگ و همکاران (۲۰۰۵)، محمدی و همکاران (۲۰۱۰)، پولات و همکاران (۲۰۲۰) و کایت و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد (۱۸، ۲۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱).

متوسط دمای سالیانه یکی دیگر از عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی است که در پژوهش‌های اسکندری (۲۰۱۷) و سیوری‌کایا و کوچوک (۲۰۲۲) به‌عنوان یک عامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی معرفی شده است (۱۲، ۴۷). افزایش دما یک عامل اقلیمی تأثیرگذار به لحاظ افزایش احتمال وقوع آتش‌سوزی جنگل در جنگل است و ارتباط معناداری بین تعداد آتش‌سوزی‌های

اتفاق افتاده در یک منطقه و دمای آن منطقه وجود دارد (۴۸). واضح است در مناطقی که درجه حرارت بیش‌تر و میزان بارندگی کم‌تر باشد، احتمال وقوع آتش‌سوزی بالاتر است؛ اما ملاحظه اثر ترکیبی عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی در راستای احتمال وقوع خطر آتش‌سوزی مناسب‌تر است. اقلیم یکی از عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی است زیرا بر کیفیت و کمیت مواد سوختنی تأثیرگذار است (۱۹). عوامل متوسط دمای سالیانه و متوسط بارندگی سالیانه علاوه بر نقشی که به‌صورت مستقیم در وقوع آتش‌سوزی دارند؛ به‌طور غیرمستقیم با اثرگذاری بر تیپ و تراکم پوشش گیاهی نیز آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۴۹). با توجه به این‌که کاربری اراضی جنگلی با تراکم‌های متفاوت، سطح قابل‌توجهی (۹۳/۱۹٪) از منطقه مورد مطالعه را پوشانده است (شکل ۳-ه)، مطابق نقشه پراکنش آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در منطقه، بیش‌تر آتش‌سوزی‌ها (۷۵/۰۳٪) در اراضی جنگلی تنک و نیمه‌انبوه اتفاق افتاده است که با نتایج محمدی و همکاران (۲۰۱۰) و بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد (۲۸، ۱۶). علاوه بر این، نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه که عمده آتش‌سوزی‌ها در آن‌جا اتفاق افتاده است؛ میانگین بارش سالیانه بالغ بر ۵۰۰ میلی‌متر را دارد که با نتایج درویشی و همکاران (۲۰۱۳) و پولات و همکاران (۲۰۲۰) تطابق دارد (۴۱، ۵۰) و این موضوع نیز بر افزایش تراکم پوشش گیاهی افزوده است. تنک بودن تاج پوشش و رسیدن نور کافی به آشکوب زیرین و سطح خاک در اراضی جنگلی تنک و نیمه‌انبوه منطقه مورد مطالعه، باعث شکل‌گیری پوشش علفی متراکم در آشکوب زیرین و فراهم شدن مواد سوختنی کافی برای ایجاد آتش‌سوزی سطحی می‌شود.

عامل کاربری/پوشش اراضی که در مطالعات مختلف توسط بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴)،

عابدی قشلاقی (۲۰۲۰) و ساری (۲۰۲۱) به‌عنوان یک عامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی شناخته شده بود (۱۱، ۱۳، ۱۶)؛ در مطالعه حاضر نیز به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی شناخته شد. با روی‌هم‌گذاری نقشه سطوح سوخته‌شده با نقشه کاربری اراضی مشخص شد که ۹۷/۷۱٪ مناطق آتش‌سوزی شده، اراضی جنگلی هستند. در پژوهش جعفری و همکاران (۲۰۱۸) کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده وقوع آتش‌سوزی تشخیص داده شد (۴۵).

تراکم جمعیت توسط مطالعات مختلف (۸، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۴۹) به‌عنوان یک عامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی معرفی شده است و در این پژوهش نیز به‌عنوان عامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی شناخته شد. آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع تا حد زیادی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است و در مناطق با تراکم بالای جمعیت، فعالیت‌های مختلف انسان‌ها ممکن است باعث آتش‌سوزی شود (۸). با روی‌هم‌گذاری نقشه سطوح سوخته‌شده با نقشه تراکم جمعیت منطقه مورد مطالعه، برخلاف انتظار مشخص شد که ۸۲/۴۸٪ از سطوح سوخته‌شده در طبقه‌ای قرار گرفته است که تراکم جمعیت پایین‌تری دارند که این موضوع با مطالعات محمدی و همکاران (۲۰۱۰) و بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت ندارد (۲۸، ۱۶). لازم به ذکر است که ۷۴/۱٪ از مساحت منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل، تراکم جمعیت بالایی ندارد و به دلیل این‌که جزء مناطق حفاظت‌شده محسوب می‌شود توسعه روستایی و ایجاد راه‌های دسترسی با محدودیت‌های ویژه‌ای مواجه است.

عامل دیگری که در وقوع آتش‌سوزی مؤثر است، ارتفاع از سطح دریا است. ارتفاع از سطح دریا بر ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و پوشش گیاهی یک منطقه تأثیر می‌گذارد (۵۱، ۵۲).

البته تأثیر عامل ارتفاع بر وقوع آتش‌سوزی به‌طور معمول به مجموعه‌ای از عوامل دیگر مرتبط می‌شود که یا در زمره عوامل انسانی قرار می‌گیرند (مانند توسعه مناطق مسکونی، تراکم جمعیت و شدت تغییرات کاربری اراضی) و یا مرتبط با عوامل اقلیمی (بارندگی، درجه حرارت، رطوبت و تبخیر و تعرق) هستند (۱۷). به‌طور معمول، ارتفاعات پائین تا میانی یک منطقه به دلیل دمای بالاتر، رطوبت نسبی پایین و سهولت دسترسی انسان خطرناک‌ترین مناطق از نظر آتش‌سوزی هستند (۱۰، ۱۷). در ارتفاعات بالاتر، رطوبت نسبی بیشتر هوا و رطوبت بیشتر مواد سوختنی، توانایی ایجاد و گسترش آتش‌سوزی را محدود می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بیش‌ترین مناطق آتش‌سوزی (۷۴/۵۴٪) در دامنه ارتفاعی پائین‌تر از ۱۵۰۰ متر از سطح دریا (۴۵/۰۹٪) در دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متری و ۲۹/۴۵٪ در دامنه ارتفاعی کم‌تر از ۱۰۰۰ متری رخ داده است. در مطالعه محمدی و همکاران (۲۰۱۰) نیز دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متری (۲۸) و در مطالعه جعفری و مافی‌غلامی (۲۰۱۷)، دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر (۱۷) بیش‌ترین خطر آتش‌سوزی را به خود اختصاص داده بودند.

شیب عامل دیگری است که در وقوع آتش‌سوزی مؤثر است. شیب نقش مهمی در آتش‌سوزی جنگل دارد و بر شروع، رفتار و سرعت آتش‌سوزی تأثیر می‌گذارد (۱۰، ۱۱، ۱۹). از آنجاکه حرارت به‌صورت طبیعی به سمت بالا حرکت می‌کند، انتقال حرارت با افزایش شیب در جهت مثبت بیش‌تر می‌شود و با افزایش شیب در جهت منفی کم‌تر می‌شود. ضریب خطر آتش‌سوزی همراه با شیب افزایش می‌یابد؛ زیرا سرعت انتشار آتش‌سوزی و تبدیل آتش‌سوزی سطحی به آتش‌سوزی تاجی در جنگل با افزایش شیب، افزایش می‌یابد (۱۲). باید توجه داشت که

شیب زیاد پتانسیل آتش‌سوزی را افزایش نمی‌دهد؛ بلکه اگر آتش‌سوزی در یک منطقه ایجاد شود، جهت گسترش آن به سمت شیب‌های زیاد با سرعت بیش‌تری خواهد بود. در مطالعات مختلف، تأثیر شیب بر وقوع آتش‌سوزی نشان داده شده است که بیانگر حساسیت بیش‌تر مناطق با شیب زیاد به وقوع آتش‌سوزی است (۲۸، ۵۳). نتایج این مطالعه نشان داد که ۶۵/۶۰٪ از مساحت آتش‌سوزی‌های ثبت‌شده در دامنه شیب ۵۰-۲۰٪ قرار دارد و تنها ۳/۲۱٪ از مساحت آتش‌سوزی‌ها در دامنه شیب ۱۰-۰٪ قرار گرفته است. لازم به ذکر است دامنه شیب ۵۰-۲۰٪ اهمیت نسبی (۱/۱۰) را به خود اختصاص داده است. در مطالعات محمدی و همکاران (۲۰۱۰)، پورتنی و همکاران (۲۰۱۵) و عبدو و همکاران (۲۰۲۲) دامنه شیب‌های بالای ۲۰٪ حساسیت بالایی به وقوع آتش‌سوزی نشان دادند (۱۵، ۲۸، ۵۳) اما در مطالعات بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) و جعفری و مافی‌غلامی (۲۰۱۷) به دلیل شرایط متفاوت منطقه مطالعاتی، عکس این حالت نشان داده شده است (۱۶، ۱۷).

عامل جهت جغرافیایی به دلیل دما و رطوبت، بر خطر آتش‌سوزی جنگل تأثیر می‌گذارد. جهت‌های جنوبی (در نیمکره شمالی) در معرض تابش خورشیدی بالایی هستند. به‌علاوه، در نیمکره شمالی، جهات جنوبی و جنوب غربی در معرض وزش باد غالب می‌باشند. ترکیب این دو مورد موجب دمای بالاتر، رطوبت نسبی پایین‌تر و مقدار بیش‌تر مواد سوختنی در جهات جنوبی و جنوب غربی است؛ بنابراین جهت‌های جنوبی و جنوب غربی در برابر آتش‌سوزی آسیب‌پذیرتر هستند (۱۰، ۱۱، ۱۲). با روی هم‌گذاری پهنه‌های آتش‌سوزی روی نقشه طبقات جهت مشخص شد که ۷۰/۷۶٪ از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در جهات جنوبی و غربی

همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۱۶، ۲۸، ۴۵)؛ اما در مطالعات زیادی (۵۵، ۵۶) نیز بیش‌ترین آتش‌سوزی در نزدیکی رودخانه‌ها اتفاق افتاده است که عمداً این موضوع را به تجمع گردشگران نسبت دادند. با روی هم‌گذاری نقشه مناطق آتش‌سوزی ثبت‌شده و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی مشخص شد که ۹۵/۰۵٪ (۲۵/۳۹٪) در مناطق با خطر زیاد و ۶۹/۶۶٪ در مناطق با خطر خیلی‌زیاد آتش‌سوزی‌های ثبت‌شده در مناطق با خطر بالای آتش‌سوزی واقع شده‌اند که با نتایج محمدی و همکاران (۲۰۱۰)، زرعی و همکاران (۲۰۱۴)، بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) و پولات و همکاران (۲۰۲۰) از نظر درصد همخوانی مناطق آتش‌سوزی ثبت‌شده با مناطق دارای خطر آتش‌سوزی مطابقت دارد (۱۶، ۲۸، ۴۱، ۵۱، ۵۵).

نتیجه‌گیری

تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی یک روش مؤثر برای مدیریت آتش‌سوزی در مناطق جنگلی است. وقوع آتش‌سوزی در یک منطقه تحت‌تأثیر عوامل مختلف اقتصادی- اجتماعی، بوم‌شناختی، فیزیوگرافی و انسان‌ساخت است. در این پژوهش در جنگل‌های منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل در غرب استان کرمانشاه، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با روش نسبت فراوانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با روش نسبت فراوانی امکان شناسایی مناطقی از منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل که خطر بالای آتش‌سوزی را دارند، فراهم ساخت. نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در منطقه حفاظت‌شده بوزین و مرخیل نشان داد که ۷۸/۹۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در طبقه خطر زیاد و خیلی‌زیاد (۴۶/۸۱٪) در طبقه خطر زیاد و ۳۲/۱۶٪ در

(۳۹/۷۲٪ جهت غربی و ۳۱/۰۴٪ جهت جنوبی) رخ داده است. در مطالعات مختلف (۱۶، ۲۸، ۵۴) نیز نشان داده شده است که بیش‌ترین آتش‌سوزی در جهات جنوبی و غربی اتفاق افتاده است. نواحی واقع در جهات جنوبی و غربی، تشعشعات خورشیدی بیش‌تری دریافت می‌کنند و در نتیجه افزایش دما در این نواحی بیش‌تر است؛ که منجر به کاهش رطوبت نسبی، به‌ویژه در فصل گرم و بعدازظهرها می‌شود (۵۴). بدیهی است وقوع دمای بالا و کاهش رطوبت مواد سوختنی، خطر آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد.

فاصله از رودخانه‌ها یک عامل فیزیوگرافی مهم در تهیه نقشه آتش‌سوزی جنگل است. آبراهه‌ها و رودخانه‌ها می‌توانند به‌عنوان آتش‌بُر باعث کاهش خسارت آتش‌سوزی شوند (۱۵، ۴۵). از طرفی در رودخانه‌هایی که امکان طبیعت‌گردی و ماهیگیری و فعالیت‌های تفریحی برای ساکنان منطقه وجود دارد، خطر آتش‌سوزی در اثر فعالیت‌های انسانی نزدیک رودخانه افزایش می‌یابد (۱۲). مناطق اطراف رودخانه‌ها و شبکه آبراهه‌ها هم‌چنین به دلیل وجود رطوبت خاک، خطر اشتعال کم‌تری دارند (۱۱). نتایج این مطالعه نشان داد که ۸۶/۲۷٪ از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در فاصله دور از رودخانه‌ها (بیش از ۸۰۰ متر) اتفاق افتاده است. بر اساس مشاهدات میدانی، اطراف بخش زیادی از رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه به کاربری باغ تبدیل شده‌اند؛ که حفاظت مالکان آن‌ها از این مناطق، باعث می‌شود که آتش‌سوزی در فواصل دورتر از رودخانه رخ دهد. ضمناً در سایر مناطق اطراف رودخانه‌ها که امکان باغداری وجود ندارد؛ توپوگرافی متغیر و شدید و عبور رودخانه‌ها از دره‌های با شیب زیاد امکان تجمع گردشگران و مردم محلی را از بین برده است. نتایج حاصل از این بخش پژوهش با مطالعات محمدی و همکاران (۲۰۱۰)، بیگی حیدرلو و همکاران (۲۰۱۴) و جعفری و

مناطق آتش‌سوزی ثبت‌شده و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی مشخص شد که ۹۵ درصد آتش‌سوزی‌های به وقوع پیوسته در مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی واقع شده‌اند. نقشه پهنه‌بندی نهایی، در اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح برای اطفای آتش‌سوزی و همچنین برنامه‌ریزی مطلوب برای استفاده از امکانات و به‌کارگیری کارکنان و تمرکز تجهیزات لازم برای مقابله با آتش‌سوزی‌های احتمالی در فصل آتش‌سوزی در مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی توسط سازمان‌های منابع طبیعی و آبخیزداری و حفاظت محیط‌زیست می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود.

طبقه خطر خیلی زیاد) قرار دارد. در این مطالعه به دلیل در نظر گرفتن دامنه وسیعی از عوامل مختلف مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی و تعیین اهمیت هر یک از طبقات عوامل مختلف با روش نسبت فراوانی، می‌توان بیان داشت که نتایج انطباق بالایی با شرایط واقعی دارند. با این وجود انتخاب عوامل تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی، می‌تواند به صورت بهینه‌تر انتخاب شوند و برای افزایش دقت علمی مدل، از شاخص‌های هم‌تراز زمانی استفاده شود و به جای میانگین بارندگی سالیانه از میانگین بارش در ماه‌های خشک (خرداد تا شهریور) استفاده شود یا میانگین بارندگی فصلی (فصل گرم) محاسبه گردد. با روی هم‌گذاری نقشه

منابع

1. Ahmadi, D., Hosseini, V., & Mohammadi Samani, K. (2023). Comparison effect of prescribed heat on some chemical properties of soil under Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) in laboratory conditions. *Iranian Journal of Forest*. 14(4), 457-471. **Doi: 10.22034/ijf.2022.330327.1852.** [In Persian]
2. Barlow, J., Lennox, G., Ferreira, J. et al. (2016). Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*. 535, 144-147. **<https://doi.org/10.1038/nature18326>.**
3. Moradi, B., Ravanbakhsh, H., Meshki, A., & Shabani, N. (2016). The effect of fire on vegetation structure in Zagros forests (Case Study: Sarvabad, Kurdistan province). *Iranian Journal of Forest*. 8(3), 381-392. [In Persian]
4. Podur, J., Martell, D. L., & Knight, K. (2002). Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 32, 195-205. **<https://doi.org/10.1139/x01-18>.**
5. Bo, M., Mercalli, L., Pognant, F., Berro, D. C., & Clerico, M. (2020). Urban air pollution, climate change, and wildfires: The case study of an extended forest fire episode in northern Italy favoured by drought and warm weather conditions, *Energy Reports*. 6(1), 781-786.
6. Law, B. E., Sun, O. J., Campbell, J., van Tuyl, S., & Thornton, P. E. (2003). Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology*. 9(4), 510-524. **<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00624.x>.**
7. Fornwalt, P. J., Kaufmann, M. R., Huckaby, L. S., Stoker, J. M., & Stohlgren, T. J. (2003). Nonnative plant invasions in managed and protected ponderosa pine/Douglas-fir forests of the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*. 177(1-3), 515-527.
8. Zhao, P., Zhang, F., Lin, H., & Xu, S. (2021). GIS-based forest fire risk model: A case study in Laoshan National Forest Park. Nanjing. *Remote Sensing*. 13(18), 3704. **<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.07.001>.**
9. Eshaghi, M. A., & Shataee Joybari, S. (2016). Preparation map of forest fire risk using SVM, RF & MLP algorithms (case study: Golestan National Park, Northeastern Iran). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*.

- 23(4), 1333-154. **Doi: 10.22069/jwfst.2016.9297.1496.** [In Persian]
10. Bentekhici, N., Bellal, S., & Zegrar, A. (2020). Contribution of remote sensing and GIS to mapping the fire risk of the Mediterranean forest case of the forest massif of Tlemcen (North-West Algeria). *Nat Hazards*. 104, 811-831. **https://doi.org/10.1007/s11069-020-04191-6.**
11. Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*. 480, 118644. **https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644.**
12. Sivrikaya, F., & Kucuk, O. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in the Mediterranean region. *Ecological Informatics*. 68, 101537. **https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537.**
13. Abedi Gheshlaghi, H. A., Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2020). GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management*. 63(3), 481-499. **https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726.**
14. Tuyen, T. T., Jaafari, A., Yen, H. P. H., Nguyen-Thoi, T., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Van Le, H., Phuong, T. T. M., Nguyen, S. H., & Prakash, I. (2021). Mapping forest fire susceptibility using spatially explicit ensemble models based on the locally weighted learning algorithm. *Ecological Informatics*. 63, 101292. **https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.07.001.**
15. Abdo, H. G., Almohamad, H., Al-Dughairi, A. A., & Al-Mutiry, M. (2022). GIS-based frequency ratio and analytic hierarchy process for forest fire susceptibility mapping in the Western Region of Syria. *Sustainability*. 14, 4668. **https://doi.org/10.3390/su14084668.**
16. Beygi Heidarlou, H., Banj Shafiei, A., & Erfanian, M. (2014). Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (Case study: Sardasht Forests, NW Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22(4), 559-573. [In Persian]
17. Jaafari, A., & Mafi Gholami, D. (2017). Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 25(2), 232-243. **Doi: 10.22092/ijfpr.2017.111758.** [In Persian]
18. Kayet, N., Chakrabarty, A., Pathak, Kh., Sahoo, S., Dutta, T., & Hatai, B. K. (2020). Comparative analysis of multi-criteria probabilistic FR and AHP models for forest fire risk (FFR) mapping in Melghat Tiger Reserve (MTR) forest. *Journal of Forestry Research*. 31, 565-579. **https://doi.org/10.1007/s11676-018-0826-z.**
19. De Santana, R., Delgado, R. C., & Schiavetti, A. (2021). Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. *Journal of Environmental Management*. 296(113343), 1-10. **https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113343.**
20. Eskandari, S., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2020). Relations of land cover, topography, and climate to fire occurrence in natural regions of Iran: Applying new data mining techniques for modeling and mapping fire danger. *Forest Ecology and Management*. 473, 118338. **https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118338.**
21. Sagheb-Talebi, Kh., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2013). *Forests of Iran: A treasure from the past, a hope for the future*. Springer.
22. Goshtasb, H., Ataei, F., Jahani, A., Sofi, M., & Ahmadi, N. (2016). The influence of vegetation characteristics on roe deer habitat selection in Bozin and Markheil Protected Area. *Journal of Natural Environment*, 69(3), 803-820. **Doi: 10.22059/jne.2016.61881.**

23. Momeni, M., & Imeni Gheshlagh, S. (2019). The role of protected areas in the development of ecotourism (Case Study of Miankaleh Wildlife Refuge Using SWOT Model). *Geography and Human Relationships*. 2(1), 369-387. [In Persian]
24. McCarthy, C., Banfill, J., & Hoshino, B. (2021). National parks, protected areas, and biodiversity conservation in North Korea: opportunities for international collaboration. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. 14, 290298. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.05.006>.
25. Asadi, F., Etemad, V., Moradi, Gh., & Sepahvand, A. (2018). Effect of different irrigation and shade treatments on seedling production of *Celtis caucasica* Willd. *Iranian Journal of Forest*. 10(1), 67-77. [In Persian]
26. Khalili, F., Sadeghi, M., & Malekian, M. (2018). Habitat suitability modelling of Persian squirrel (*Sciurus anomalus*) in Zagros forests, western Iran. *Journal of Wildlife and Biodiversity*. 2(2), 56-64.
27. Sadeghi, M., Malekian, M., & Khodakarami, L. (2017). Forest losses and gains in Kurdistan province, western Iran: where do we stand? *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 20, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.07.001>.
28. Mohammadi, F., Shabani, N., Pourhashemi, H., & Fatehi, P. (2010). Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of the Paveh forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 18(4), 586-569. [In Persian]
29. Eskandari, S., & Sarab, S. A. M. (2022). Mapping land cover and forest density in Zagros forests of Khuzestan province in Iran: A study based on Sentinel-2, Google Earth, and field data. *Ecological Informatics*. 70, 101727.
30. Ebrahimi, H., Rasuly, A., & Mokhtari, D. (2017). Development of a web GIS system based on the MaxEnt approach for wildfire management: A case study of East Azerbaijan. *Ecopersia*. 5(3), 1859-1873. <http://dori.net/dor/20.1001.1.23222700.2017.5.3.3.5>.
31. Shafiei, A., Beygi Heidarlu, H., & Erfanian, M. (2015). Evaluating the fuzzy weighted linear combination method in forest fire risk mapping (Case study: Sardasht forests, West Azerbaijan province, IRAN). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*. 22(3), 29-52. [In Persian]
32. Rasool, R., Fayaz, A., ul Shafiq, M., Singh, H., & Ahmed, P. (2021). Land use land cover change in the Kashmir Himalaya: Linking remote sensing with an indicator-based DPSIR approach. *Ecological Indicators*. 125, 107447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107447>.
33. Pham, Q. B., Ali, S. A., Parvin, F., Van On, V., Sidek, L. M., Durin, B., ... & Minh, N. N. (2024). Multi-spectral remote sensing and GIS-based analysis for decadal land use land cover changes and future prediction using random forest trees and artificial neural networks. *Advances in space research*. 74(1), 17-47. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.027>.
34. Mahmoodi, M. A., Momeni, S., & Davari, M. (2019). Application of support vector machines for land use and land cover classification from Landsat ETM imagery. *Water and Soil*. 32(6), 1179-1190. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.72967>. [In Persian]
35. Pande, C. B., Diwate, P., Orimoloye, I. R., Sidek, L. M., Pratap Mishra, A., Moharir, K. N., Pal, S. C., Alshehri, F., & Tolche, A. D. (2024). Impact of land use/land cover changes on evapotranspiration and model accuracy using Google Earth Engine and classification and regression tree modeling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 15(1), 2290350. <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2290350>.
36. Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Gholamnia, K., & Aryal, J. (2019). Forest fire susceptibility and risk mapping using social/infrastructural vulnerability and environmental variables. *Fire*. 2(3), 50. <https://doi.org/10.3390/fire2030050>.

37. Anticona, A., Zuniga, C., Santos, A., Lorenzon, A., & Filho, P. (2023). GIS and fuzzy logic approach for forest fire risk modeling in the Cajamarca region, Peru. *Decision Science Letters*. 12(2), 353-368.
38. Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography*. 7, 186-190.
39. Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Raju, K. D., & Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 4(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5).
40. Dong, X. U., Li-min, D. A. I., Guo-fan, S., Lei, T., & Hui, W. (2005). Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research*. 16(3), 169-174. <https://doi.org/10.1007/BF02856809>.
41. Polat, S., Ghasemi Aghbash, F., & Mahdavi, A. (2020). Forest fire hazard zone mapping in Ilam County forests. *Forest Research and Development*. 6(1), 135-152. **Doi: 10.30466/jfrd.2020.120830**. [In Persian]
42. Alimahmoodisarab, S., Fegghi, J., & Khaje, S. (2018). Determination of the effective criteria of forest fire occurrence by using GIS and ANN (Case study: Golestan province). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*. 25(2), 110-136. **Doi: 10.22069/jwfst.2018.5611.1339**. [In Persian]
43. Veena, H. S., Ajin, R. S., Loghin, A. M., Sipai, R., Adarsh, P., Viswam, A., Vinod, P. G., Jacob, M. K., & Jayaprakash, M. (2017). Wildfire risk zonation in a tropical forest division in Kerala, India: A study using geospatial techniques. *International Journal of Conservation Science*. 8(3), 475-484.
44. Jaafari, A., Pazhouhan, I., & Bettinger, P. (2021). Machine learning modeling of forest road construction costs. *Forests*. 12(9), 1169. <https://doi.org/10.3390/f12091169>.
45. Jaafari, A., Zenner, E. K., & Pham, B. T. (2018). Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree-based classifiers. *Ecological Informatics*. 43, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.12.006>.
46. Geng, M., Ma, K., Sun, Y., Wo, X., & Wang, K. (2020). Changes of land use/cover and landscape in Zhalong wetland as "red-crowned cranes country", Heilongjiang province, China. *Global Nest Journal*. 22(4), 477-483. <https://doi.org/10.30955/gnj.003372>.
47. Eskandari, S. (2017). A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 10, 190. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2976-2>.
48. Biglari-Gholdare, S., Tahmasabi, P., Rahmani, M., Karimifam, A., & Golmohammadi Ghane, P. (2024). Assessment of forest fire risk in Mazandaran province using the Fuzzy AHP model. *Ecology of Iranian Forest*. 12(2), 88-103. <https://doi.org/10.61186/ifej.12.2.88>. [In Persian]
49. Vadrevu, K. P., Eaturu, A., & Badarinath, K. V. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. 166(1-4), 223-239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>.
50. Darvishi, L., Ghodskhah, M., & Gholami, V. (2013). A regional model for forest fire hazard zonation in forests of Dorud city (Case Study: Babahar region), *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*. 11(1), 10-20. <https://doi.org/10.22092/IJFRPR.2013.106396>. [In Persian]
51. Zarekar, A., Kazemi Zamani, B., Ghorbani, S., Ashegh Moalla, M., & Jafari, H. R. (2013). Mapping spatial distribution of forest fire using MCDM and GIS (Case study: Three forest zones in Guilan province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*.

- 21(2), 218-230. <https://doi.org/10.22092/IJFPR.2013.3854>. [In Persian]
52. Tiwari, A., Shoab, M., & Dixit, A. (2021). GIS-based forest fire susceptibility modeling in Pauri Garhwal, India: a comparative assessment of frequency ratio, analytic hierarchy process, and fuzzy modeling techniques. *Natural hazards*. 105, 1189-1230. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04351-8>.
53. Pourtaghi, Z. S., Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2015). Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 73(4), 1515-1533. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3502-4>.
54. Dashti, S., Amini, J., Ahmadi Sani, N., & Javanmard, A. (2022). Zoning areas prone to fire occurrences in the forest ecosystems of North Zagros (Case study: Sardasht forests in West Azarbaijan). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 10(30), 105-126. <https://doi.org/10.22111/JNEH.2021.34965.1683>. [In Persian]
55. Mirdeylami, T., Shataee, Sh., & Kavousi, M. R. (2014). Forest fire risk zone mapping in the Golestan National Park using the weighted linear combination (WLC) method. *Iranian Journal of Forest*. 5(4), 377-390. [In Persian]
56. Pourtaghi, Z. S., Pourghasemi, H. R., Aretano, R., & Semeraro, T. (2016). Investigation of general indicators influencing forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological Indicators*. 64, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.030>.