Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Ecology of Iranian Forests, Vol. 12, Issue 2, 2024 p: 88-103

OPEN ACCESS

Research Paper

Assessment of Forest Fire Risk in Mazandaran Province Using Fuzzy AHP Model

Saadi Biglari- Gholdare[1], Peyman Tahmasabi[2], Mohammad Rahmani[3], Amin Karimifam[4], and Pegah Golmohammadi ghane[5]

1- M.Sc, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, (Corresponding author: a.alijanpour@urmia.ac.ir)
2- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
3- Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Mazandaran University, Babolsar, Iran
4- M.Sc., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
5- M.Sc. Student, Department of Science and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 28 December, 2023 Accepted: 6 March, 2024

Extended Abstract

Background: Human activities, climate variability, and environmental stress have strongly affected forest ecosystems worldwide. Forest fires are among the major factors of global ecosystem destruction. Fires in the forest, whether of human or natural origin, have been raised as a serious crisis in recent years. Hence, fire risk assessment plays an important role in forest fire management because knowing where the highest risk is essential to minimize threats to resources, lives, and property. Integration of spatial information from different sources using statistical analysis in the GIS environment is a suitable tool for managing and spreading forest fires, which is one of the main natural hazards in northern Iran. Therefore, it is necessary to prepare a fire risk assessment map for the planning and protection of forests.

Methods: The current practical research concerning its nature is a combination of documentary, descriptive, and quantitative model-based methods regarding the research method. In this study, fuzzy and hierarchical (AHP) logic models were combined to investigate the risk of forest fire in Mazandaran province in five classes, very high, high, medium, low, and very low, respectively, using four main criteria and nine sub-criteria, namely topography (height, slope, direction, and rivers), climatic factors (peak temperature and precipitation), human factors (residential areas and the network of communication roads), and biological factors (vegetation). To obtain the net vegetation cover, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was applied to the Sentinel-2 satellite image set in a 5-year period (2017-2022) in the GEE web system. The height, slope, and slope direction maps of the study area were prepared from the digital elevation model (DEM) of 12.5 m from the ALOS AVNIR-2 dataset. The distance from rivers, residential areas, and the road network was calculated using the Euclidean distance tool in ArcMAP software. The geographic location of meteorological synoptic stations was obtained from the Meteorological Organization, and its information was used as meteorological input data. In the ArcMap environment, a map of average annual precipitation and maximum temperature was prepared from synoptic stations through interpolation for the period from 2007 to 2021. Based on this modeling method, experts' opinions were used for the relative importance and priority of criteria and sub-criteria in the risk of forest fire in the study area to obtain the fuzzy weight of criteria and sub-criteria. Based on the weighting coefficients applied in the present plan, the final weights of the criteria and sub-criteria affecting forest fire from the highest to the lowest weights belong to the topographical, biological, climatic, and human criteria. Among the sub-criteria, the highest and lowest weights belong to vegetation and slope, respectively. The consistency rate (CR) for the matrices of the affecting factors is equal to 6.25%, which is less than 10%, actually indicating that the weight of the criteria is proportionate and reliable. The highest weights were obtained for the vegetation cover and the slope direction, and the lowest weights belonged to the distance from the river and the slope. Finally, the fire risk assessment map was prepared by combining the fuzzy maps of the sub-criteria in GIS.

Results: Overall, medium to very high fire risk potential was found in 72% of the studied area. From a total area of about 2373189 hectares, very low (8.4%), low (18.3%), medium (23.66%), high (25.62), and very high (24%) vulnerability rates were identified in Mazandaran province. Higher fire potential was detected in the East and Southeast parts than in other parts of the study area. The aforementioned fuzzy layers clearly show that the height, slope, and amount of precipitation are low and the density of residential areas and the network of communication roads are high in these parts, with high temperatures. In fact, these factors have increased the risk of fire in these areas. In the present study, the highest fire potential was observed at low

Copyright ©2024 Biglari-Gholdare et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

altitudes, which could have resulted from the concentration of human activities at low altitudes. Moreover, most fires occurred on low slopes in the studied area. The distance layer from waterways also plays a dual role in the occurrence of fire. The results of the model show an inverse correlation between the distance from roads and fire potential. Based on the results of the fuzzy AHP model, the probability of fire increased with the decrease in precipitation and the increase in annual temperature. A decrease in the amount of precipitation causes a decrease in soil moisture and vegetation, elevating the possibility of fire. On the other hand, the increase in temperature causes the drying of vegetation and reduces humidity, thereby increasing the possibility of fire.

Conclusion: It can be concluded that preparing a fire risk assessment map can help managers and planners in identifying areas with high potential and in crisis management in vulnerable areas. The obtained fire risk assessment map can be used as a decision-making support system to predict future fires in the study area.

Keywords: Fire, Fuzzy logic, Hierarchical analysis, Mazandaran province, Risk assessment

How to Cite This Article: 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. *Ecol Iran For,* 12(2), 88-103. DOI: 10.61186/ifej.12.2.88

مقاله پژوهشی

ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران با استفاده از مدل AHP فازی

سعدی بیگلری قلدره[۱]، پیمان طهماسبی[۲]، محمد رحمانی[۳]، امین کریمی فام[۴] و پگاه گل‌محمدی قانع[۵]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(نویسنده مسوول: saadibiglari1370@gmail.com)
۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم ومهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان، همدان، ایران
۳- استادیار، گروه علوم محیط زیست، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۵- کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶
صفحه: ۸۸ تا ۱۰۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: فعالیت‌های انسانی، تنوع آب و هوا و تنش‌های محیطی به‌شدت بر اکوسیستم‌های جنگلی در سطح جهان تأثیر گذاشته است. آتش‌سوزی جنگل‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب اکوسیستم جهانی است. آتش‌سوزی در جنگل چه منشأ انسانی و چه منشأ طبیعی داشته باشد به‌عنوان بحران جدی در سال‌های اخیر مطرح شده است. از این‌رو، ارزیابی خطر آتش‌سوزی نقش مهمی در مدیریت آتش‌سوزی در جنگل‌های ایفا می‌کند؛ زیرا دانستن مکان با بالاترین خطر برای به حداقل رساندن تهدیدات برای منابع، جان و اموال ضروری است. ادغام اطلاعات مکانی از منابع مختلف با استفاده از تحلیل‌های آماری در محیط GIS ابزاری مناسبی جهت مدیریت و گسترش آتش‌سوزی جنگل‌ها است، که یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در شمال ایران به‌شمار می‌رود. بنابراین، تهیه نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی جهت برنامه‌ریزی و حفاظت از جنگل‌ها ضروری است.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر از بعد ماهیت، کاربردی و از منظر شیوه تحقیق ترکیبی از روش‌های اسنادی، توصیفی و مبتنی بر مدل‌های کمی است. در مطالعه حاضر با ترکیب مدل‌های منطق فازی (Fuzzy) و سلسله مراتبی (AHP)، خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران در ۵ کلاس؛ به‌ترتیب خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به‌کمک ۴ معیار اصلی و ۹ زیر معیار؛ توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت و رودخانه‌ها)، عوامل اقلیمی (بیشنه دما، بارش)، عوامل انسانی (مناطق مسکونی، شبکه راه‌های ارتباطی) و بیولوژیکی (پوشش گیاهی) مورد بررسی قرار گرفت. شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) بر روی مجموعه تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در بازه زمانی ۵ ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲) در سامانه تحت وب GEE اعمال شد، به این طریق پوشش گیاهی خالص به‌دست آمد. نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت شیب منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۱۲/۵ متر از مجموعه داده سنجنده ALOS AVNIR-2 تهیه گردید. همچنین در نرم‌افزار ArcMAP با استفاده از ابزار Euclidean distance فاصله از رودخانه‌ها، مناطق مسکونی و شبکه راه‌ها محاسبه گردید. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی از سازمان هواشناسی دریافت و اطلاعات آن به‌عنوان داده‌های ورودی هواشناسی مورد استفاده قرار گرفته است. در محیط ArcMap از ایستگاه‌های سینوپتیک نقشه میانگین بارش سالانه و بیشینه دما از طریق درون‌یابی برای بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ تهیه گردید. براساس این روش مدل‌سازی، از نظرات کارشناسان جهت اهمیت و اولویت نسبی معیارها و زیرمعیارها در خطر آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه مورد مطالعه استفاده شد. سپس وزن فازی معیارها و زیرمعیارها به‌دست آمد. براساس ضرایب وزن‌های اعمال شده در طرح حاضر، وزن نهایی معیارها و زیر معیارها مؤثر در آتش‌سوزی جنگل از بیش‌ترین وزن به کمترین به‌ترتیب مربوط به معیارهای توپوگرافی، بیولوژیکی، اقلیمی و انسانی است و در بین زیر معیارها بیش‌ترین وزن و کم‌ترین وزن به‌ترتیب مربوط به پوشش گیاهی و شیب است. نرخ سازگاری (CR) برای ماتریس‌های عوامل مؤثر برابر با ۶/۲۵٪ حاصل شده که مقدار آن کم‌تر از ۱۰٪ بوده، در واقع نشان‌دهنده آن است که وزن زیر معیارها متناسب و قابل اعتماد می‌باشد. بیش‌ترین وزن‌ها مربوط به پوشش گیاهی و جهت شیب بوده و کم‌ترین وزن‌ها مربوط به فاصله از رودخانه و شیب است. در نهایت، نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی با تلفیق نقشه‌های فازی زیرمعیارها در GIS تهیه گردید.

یافته‌ها: به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که ۷۲ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل خطر آتش‌سوزی متوسط تا خیلی زیاد است. از مجموع مساحت حدود ۲۳۷۳۱۸۹ هکتاری استان مازندران؛ ۸/۴ درصد از منطقه در آسیب‌پذیری خیلی کم؛ ۱۸/۳ درصد در آسیب‌پذیری کم؛ ۲۳/۶۶ درصد در آسیب‌پذیری متوسط؛ ۲۵/۶۲ در آسیب‌پذیری زیاد و بالغ بر ۲۴ درصد در محدوده آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار دارد. بخش‌های شرق و جنوب‌شرقی نسبت به سایر بخش‌های منطقه مطالعاتی از پتانسیل آتش‌سوزی بالاتری برخوردار هستند. با مراجعه به لایه‌های فازی مذکور مشخص است در این بخش‌ها ارتفاع، شیب و میزان بارش کم و علاوه بر آن تراکم مناطق مسکونی و شبکه راه‌های ارتباطی بالا بوده و هم‌چنین میزان دما نیز بالا است. در واقع این چند عامل احتمال خطر آتش‌سوزی را در این بخش‌ها بالا برده است. بیش‌ترین پتانسیل آتش‌سوزی در پژوهش حاضر در ارتفاعات پایین مشاهده شده که می‌تواند به‌دلیل تمرکز بیشتر فعالیت‌های انسانی در ارتفاعات پایین باشد. همچنین بیش‌تر آتش‌سوزی‌ها در شیب‌های کم در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. لایه فاصله از آبراهه‌ها نیز در بروز آتش‌سوزی نقش دوگانه‌ای دارد. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که بین فاصله از جاده‌ها و پتانسیل آتش‌سوزی همبستگی معکوس وجود دارد. براساس نتایج مدل AHP فازی، احتمال آتش‌سوزی با کاهش بارش و افزایش دمای سالانه افزایش یافت. کاهش میزان بارش باعث کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی شده، در نتیجه احتمال آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش دما باعث خشک شدن پوشش گیاهی و کاهش رطوبت گردیده، بنابراین احتمال آتش‌سوزی بالا می‌رود.

نتیجه‌گیری: بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تهیه نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان در شناسایی مناطق با پتانسیل بالا و همچنین مدیریت بحران در مناطق آسیب‌پذیر کمک کند. نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی به‌دست آمده می‌تواند به‌عنوان یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌ساز برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در منطقه مورد مطالعه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی، ارزیابی خطر، استان مازندران، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی

مقدمه

جنگل‌ها یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی هستند و بیانگر تعادل اکولوژیکی و پایداری تمدن بشری می‌باشند (Mafi-Gholami *et al.*, 2020; Nuthammachot & Stratoulias, 2021; Tuyen *et al.*, 2021). براساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی (FAO)، مساحت

جنگل‌های جهانی ۴/۰۶ میلیارد هکتار (۳۰/۰۶ درصد) از سطح زمین را تشکیل می‌دهد (McGuire, 2015). علاوه بر کشاورزی، توسعه شهرنشینی، دامداری، بیابان‌زایی، اکتشافات معادن و آلودگی‌های زیست‌محیطی، آتش‌سوزی نیز یکی از عوامل تخریب جنگل و جنگل‌زدایی می‌باشد (Jaafari *et al.*, 2019).

آتش‌سوزی امری اجتناب‌ناپذیر است و این مسئله در توالی پوشش گیاهی و دگرگونی منظر نقش به‌سزایی دارد (Wang *et al*,. 2017). به‌طور کلی، آتش‌سوزی به‌دلیل اثرات منفی که بر محیط‌زیست و جامعه دارد، در بسیاری از کشورهای جهان به‌عنوان یک خطر جدی در نظر گرفته می‌شود (Fox *et al*,. 2016). در سال‌های اخیر آتش‌سوزی‌های شدید جنگل‌ها در برخی از کشورها مانند ایالات متحده، سوئد، چین، اندونزی و پرتغال به‌دلیل اثرات رویدادهای اقلیمی ناشی از تغییرات اقلیمی از جمله دوره‌های طولانی خشک‌سالی همراه با خشکی و افزایش دمای هوا رخ داده است (Thach *et al*,. 2018). با توجه به روند تغییرات اقلیمی در دهه‌های گذشته، تعداد و وسعت آتش‌سوزی‌ها در حال افزایش است (Brown *et al*,. 2017). علاوه بر این فعالیت‌های انسانی، به‌عنوان مثال احتراق زباله، سوزاندن کلش و سیگارهای دور ریخته شده نقش کلیدی در اشتعال، احتراق و گسترش آتش‌سوزی جنگل‌ها ایفا می‌کند (Tanvir & Mujtaba, 2006؛ Tariq *et al.*, 2022). برای شناسایی پتانسیل خطرات آتش‌سوزی جنگل از عوامل مختلفی استفاده شده است که از جمله آنها می‌توان به شیب (Eugenio *et al.*, 2016)، فاصله از جاده‌ها (Bazyar *et al.*, 2020)، جهت شیب (Bui *et al.*, 2017)، ارتفاع (Zhang *et al.*, 2019)، بارش (Rasooli *et al.*, 2018)، دما (Pourghasemi, 2016)، فاصله از آبراهه‌ها (Hong *et al.*, 2018)، پوشش گیاهی (Amalina *et al.*, 2016)، فاصله از مناطق مسکونی (Sachdeva *et al.*, 2018) اشاره کرد. با توجه به این‌که آتش‌سوزی جنگل‌ها توسط عوامل زیادی ایجاد می‌شود، لازم است تا حد امکان عوامل مختلف تأثیرگذار جهت تولید نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی با دقت بالا در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شود.

نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل به‌عنوان یک ابزار مؤثر و مهم برای پیش‌بینی آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شود که برای مدیریت و حفاظت از مناطق جنگلی ضروری است (Eugenio *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2012). نقشه‌های ارزیابی خطر می‌توانند اطلاعات مفیدی را در اختیار برنامه‌ریزان و مدیران قرار دهند تا مناطق جنگلی با پتانسیل خطر آتش‌سوزی را بهتر رصد کنند. مدل اتخاذ شده علاوه‌بر در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر به اندازه کافی، یکی از مهم‌ترین مدل‌ها در ترسیم خطر آتش‌سوزی می‌باشد. به‌طور کلی، مدل‌های به‌کار رفته در پهنه‌بندی خطرات آتش‌سوزی را می‌توان به (۱) مدل‌های آماری و داده مبنا، (۲) مدل‌های یادگیری ماشین، (۳) مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و (۴) مدل‌های یکپارچه تقسیم کرد (Naderpour *et al.*, 2019). علاوه بر این، مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی خطرات آتش‌سوزی جنگل‌ها توسعه داده شده است که از میان آن‌ها می‌توان به روش‌های آماری ساده از جمله رگرسیون پواسون[1] (Wotton *et al.*, 2003)، رگرسیون لجستیک باینری[2] (Pourghasemi, 2016) و رگرسیون خطی[3] (Oliveira *et al.*, 2012) اشاره کرد. در این راستا، مدل‌های پیچیده‌تر، برای پیش‌بینی خطرات آتش‌سوزی جنگل، شامل توزیع پارتو[4] (de Zea Bermudez *et al.*, 2009)، توابع مطلوبیت[5] (Verde & Zêzere, 2010) و رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی عددی (Thach *et al.*, 2018) و هم‌چنین مدل‌های پیچیده ریاضی مانند ELMFIRE می‌باشند (Lautenberger, 2013). علاوه بر این، برخی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین ازجمله؛ ماشین بردار پشتیبانی[6] (Hong *et al.*, 2018)، جنگل تصادفی[7] (Pourtaghi *et al.*, 2016) و الگوریتم شبکه عصبی[8] (Bui *et al.*, 2017) در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی خطرات آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌کار گرفته شده است. با توجه به اینکه عوامل مختلفی در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها تاثیرگذار هستند، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی براساس کلیه عوامل تأثیرگذار راهکار مناسبی برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی است. براساس اینکه بیشتر عوامل تاثیرگذار بعد مکانی دارند، GIS نقش مؤثری در مدل‌سازی مکانی وقوع آتش‌سوزی ایفا می‌کند. روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌دلیل سهولت تحلیل، دقت بالا و منطق چند ارزشی تکنیک مناسبی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل است. بر همین اساس، در این پژوهش از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران بهره گرفته شد.

طی سال‌های اخیر استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌انضمام در نظر گرفتن مؤثرترین شاخص‌ها با اختصاص وزن مناسب به آن‌ها اهمیت به‌سزایی داشته و کمک شایانی به پهنه‌بندی آتش‌سوزی عرصه‌های طبیعی نموده است. در این راستا مطالعات متعددی در حوضه ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است.

محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2010)، اقدام به تهیه نقشه نواحی دارای خطر آتش‌سوزی جنگل بر پایه عوامل پوشش گیاهی، فیزیوگرافی، اقلیمی، انسانی و فاصله از جاده‌ها و رودخانه‌ها در بخشی از حوضه پاوه رود در غرب ایران نمودند. ابتدا با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی را وزن‌دهی کردند و نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با استفاده از لایه‌های وزنی و ضریب وزنی مربوط به هریک از عوامل در پنج طبقه تهیه نمودند. براساس نتایج ۹۰ درصد از مناطق آتش‌سوزی شده در پهنه خطر زیاد قرار دارند.

اسکندری (Eskandari, 2012)، به‌منظور مدل‌سازی خطر وقوع حریق و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در بخشی از جنگل‌های شمال ایران از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و همبستگی استفاده کرد. شاخص‌های مورد استفاده شامل چهار معیار اصلی توپوگرافی، زیست شناختی، اقلیمی و انسانی و هفده زیر معیار بود. براساس نتایج مناطق

1- Poisson Regression 2- Binary Logistic Regressio 3- Linear Regression 4-Pareto distribution
5- Utility Function 7- Support Vector Machine 8- Random forest 9- Neural Network

پرخطر آتش‌سوزی در نقشه‌های پتانسیل ریسک تهیه شده، تطابق زیادی با مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته دارد.

مهدوی و همکاران (Mahdavi *et al.*, 2012)، مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های شهرستان ایلام را با استفاده از روش AHP با به‌کارگیری GIS نقشه‌برداری کردند. متغیرهای مورد استفاده شامل کاربری اراضی، جاده‌ها، رودخانه‌ها، مشخصات اقلیمی، فیزیوگرافی و انسان ساخت بودند نتایج نشان داد که ۵۰ درصد آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطق با خطر بسیار زیاد و ۴۰ درصد آن‌ها در مناطق با خطر زیاد قرارگرفته‌اند که اعتبار بالای مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.

اسکندری (Eskandari, 2014)، ارزیابی پتانسیل خطر آتش‌سوزی جنگل را با استفاده از مدل Dong در جنگل‌های بخش سه نکا_ظالمرود انجام داد. نقشه‌های شیب، جهت شیب و ارتفاع از سطح دریا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی سنجنده ASTER و نقشه‌های نوع و تراکم پوشش گیاهی، عوامل انسان ساخت (جاده‌ها، مناطق مسکونی) و زمین‌های کشاورزی منطقه را از شرکت سهامی نکاچوب تهیه کرد. با توجه به نتایج، ۵۱ درصد از آتش‌سوزی‌های واقعی در مناطق پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند.

طبیبیان (Tabibian, 2022)، با روش تحلیلی–مکانی و با بهره‌گیری از روش سلسله‌مراتبی فازی در محیط GIS اقدام به پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی شهر اسالم در استان گیلان کرد و از زیر معیارهای؛ شیب، جهت، ارتفاع از سطح دریا، پوشش گیاهی، مناطق مسکونی و شبکه راه‌ها استفاده نمود. جهت رتبه‌بندی و وزن‌دهی معیارهای مؤثر از نظرات کارشناسان استفاده شد و سپس با روش AHP فازی معیارها وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد که ۴۸ درصد از منطقه مطالعاتی در محدوده آتش‌سوزی با خطر خیلی‌زیاد قرار دارد.

گردژوا (Gerdzheva, 2014)، آنالیزی مقایسه‌ای از مدل‌های مختلف ارزیابی خطر آتش‌سوزی در منطقه اسمولیان بلغارستان را ارائه داد. هدف از این مطالعه تعیین یک مدل ارزیابی خطر صحیح برای منطقه مورد مطالعه بود. بر همین اساس سه مدل پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی انتخاب شد. نتایج هرکدام از مدل‌ها با تاریخچه آتش‌سوزی‌های گذشته مقایسه شد. بدین‌منظور مدل‌های کاسرس (۲۰۱۱) اوزلکان (۲۰۰۹) و اداب (۲۰۱۱) که هریک دربردارنده شاخص‌های مختلف آتش‌سوزی بودند استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل اداب، اوزلکان و کاسرس به‌ترتیب بیش‌ترین دقت را در پیش‌بینی مناطق خطر آتش‌سوزی داشته‌اند.

لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2018)، به بررسی آتش‌سوزی جنگل‌ها در استان جیلین واقع در شمال شرقی چین پرداختند. در این تحقیق میزان بروز و پراکندگی ۶۵۱۹ آتش‌سوزی در استان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توزیع مکانی و زمانی مساحت جنگل سوخته و فرکانس آتش‌سوزی براساس ماه سال و منطقه به‌طور معنی‌داری متفاوت است. به‌طور کلی، آتش‌سوزی جنگل‌های جیلین در ماه‌هایی رخ می‌دهد که کاه و کاهبن سوزانده می‌شد و فعالیت‌های انسانی در طول جشنواره‌های سنتی چینی شدید بود. شهر بایشان، شهر جیلین و یانبیان به‌دلیل فرکانس بالای آتش به‌عنوان مناطق مستعد آتش تعریف شدند، یانبیان بیش‌ترین فراوانی را داشت. بنابراین، یانبیان باید به‌عنوان منطقه‌ی کلیدی توسط آژانس مدیریت آتش‌سوزی در استان جیلین برای پیش‌گیری بهتر از آتش‌سوزی تحت‌نظر قرار گیرد.

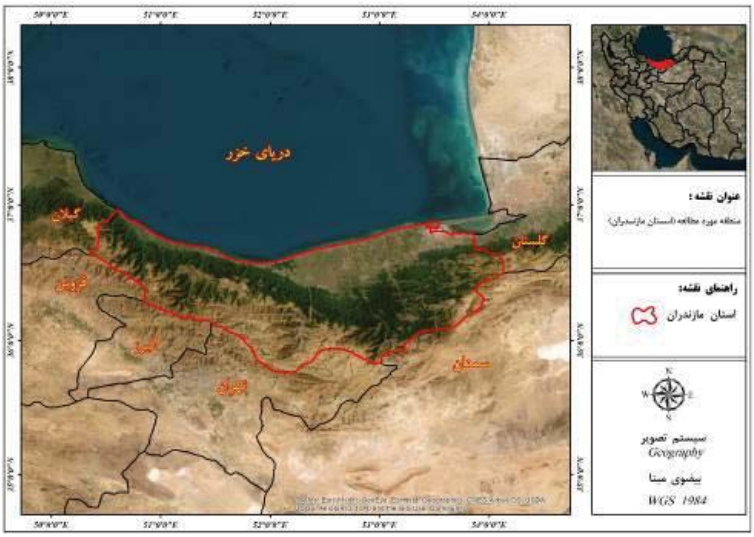
ابدو و همکاران (Abdo *et al.*, 2022)، به مقایسه عملکرد تکنیک‌های نسبت فرکانس (FR) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جهت ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل در منطقه الدریکیچ، واقع در منطقه غربی سوریه با استفاده از ۱۳ زیر معیار؛ شیب، جهت، انحنا، ارتفاع، شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده (NDVI)، شاخص رطوبت تفاوت نرمال شده (NDMI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، بارش، دما، سرعت باد، فاصله از مناطق مسکونی، رودخانه‌ها و جاده‌ها پرداختند. آن‌ها فهرستی از ۳۲ موقعیت آتش‌سوزی جنگلی در تابستان ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ تهیه کردند و از ۷۰ درصد این موقعیت‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد آن برای اعتبارسنجی مدل استفاده کردند. دقت نقشه‌های حاصل از فرآیند مدل‌سازی با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی و منحنی (ROC) با ناحیه زیر منحنی (AUC) بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل FR با AUC =۰/۸۶۴ در مقایسه با مدل AHP با AUC = ۰/۸۳۸ قادر به ارزیابی خطر آتش‌سوزی با دقت بالاتر بوده است.

ایران با میانگین سالانه ۱۳۰ آتش‌سوزی و متوسط منطقه سوخته سالانه ۵۴۰۰ هکتار، یکی از کشورهای غرب آسیا است که با خطر آتش‌سوزی جنگلی بالا مواجه است (Adab *et al.*, 2013). بنابراین، ارزیابی خطر آتش‌سوزی نقش مهمی در مدیریت آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران ایفا می‌کند؛ زیرا دانستن مکان با بالاترین خطر برای به حداقل رساندن تهدیدات برای منابع، جان و اموال ضروری است. برای شناسایی دقیق‌تر پتانسیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها، مقایسه عملکرد روش‌ها و تکنیک‌های مختلف و هم‌چنین در نظر گرفتن عوامل مؤثر به‌طور جامع برای یک مطالعه خاص، حیاتی است. بنابراین این مطالعه با هدف شناسایی پتانسیل خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها با استفاده از ترکیب مدل‌های منطق فازی و سلسله مراتبی AHP و با در نظر گرفتن معیارهای توپوگرافی، اقلیمی، انسانی و بیولوژیکی در استان مازندران انجام شده است. نتایج این مطالعه برای برنامه‌ریزی و حفاظت از جنگل‌های ایران ارزشمند می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران بین ´۳۵°۵۰ تا ´۱۳°۵۴ طول شرقی تا ´۳۵ °۷۶ و ´۹۶°۳۶ عرض شمالی در امتداد دریای خزر قرار دارد که از غرب به استان اردبیل، از شرق به استان گلستان و از جنوب به استان‌های سمنان، تهران، البرز و قزوین و از غرب به استان گیلان محدود شده است. آب‌وهوای مازندران با توجه به وجود دریای خزر و رشته‌کوه‌های البرز به دو نوع معتدل مرطوب و کوهستانی تقسیم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Area of study

روش تحقیق

پژوهش حاضر از بعد ماهیت، کاربردی و از منظر شیوه تحقیق ترکیبی از روش‌های اسنادی، توصیفی و مبتنی بر مدل‌های کمی است. در اینجا از ترکیب دو مدل ریاضی بسیار مهم و پرکاربرد یعنی منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP به‌منظور ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران استفاده شده است.

تحلیل سلسله مراتبی فازی

در مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی از ترکیب فرآیند تحلیل سلسله مراتبی همراه با مجموعه‌های فازی برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود. لازمه استفاده از این مدل، بهره‌گیری از نظر کارشناسان برای بیان ارجحیت معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل نسبت به یکدیگر است (Vadrevu & Lasko, 2015).

برای استفاده از این مدل، بعد از دستیابی به وزن همه معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل، تمام نقشه‌های رقومی معیارهای مؤثر نیز باید براساس توابع عضویت فازی به‌صورت فازی ایجاد گردند. از این‌رو انجام تجزیه و تحلیل‌های مربوطه نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی بیشتر خواهد بود. اما اعتبار و دقت قابل قبول آن در مطالعات قبلی اثبات شده است که از مزیت‌های استفاده آن به‌شمار می‌رود (Tabibian, 2022).

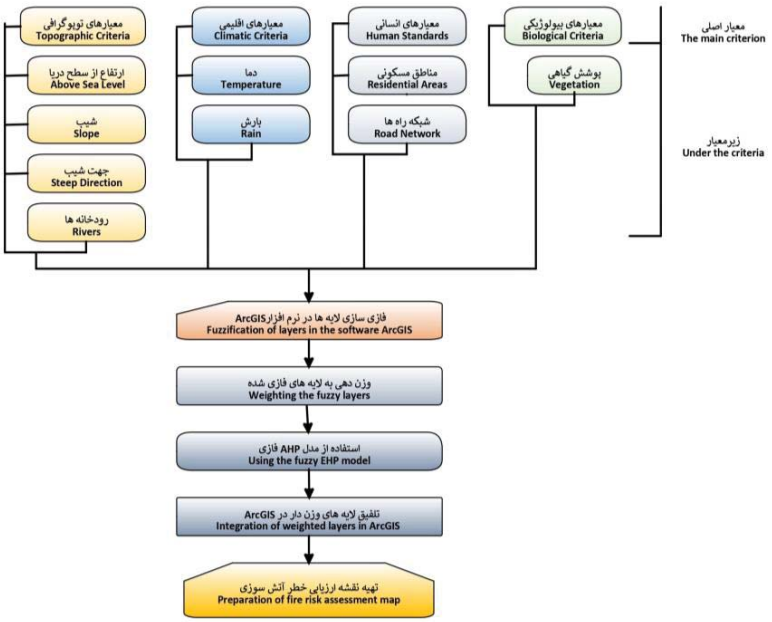
در AHP ترجیح بین جایگزین‌ها به‌وسیله ساختارهای مقایسه زوجی تعیین می‌شوند. به‌طورکلی فرایند AHP دارای چهار مرحله است (Saaty, 1980). این مراحل عبارتند از:

۱. وزن دادن به سنجه‌ها؛
۲. وزن دادن به جایگزین‌ها؛
۳. به‌دست آوردن وزن‌های مرکب؛
۴. آزمایش سازگاری.

برای ارزیابی سازگاری داوری‌های تحلیل‌گر، باید «نسبت سازگاری» محاسبه شود. درصورتی‌که عدد نسبت سازگاری از ۰/۱ کمتر باشد می‌توان حاصل کار را خوب و وزن‌ها را قابل اعتماد دانست (Saaty, 1980).

داده‌های استفاده شده

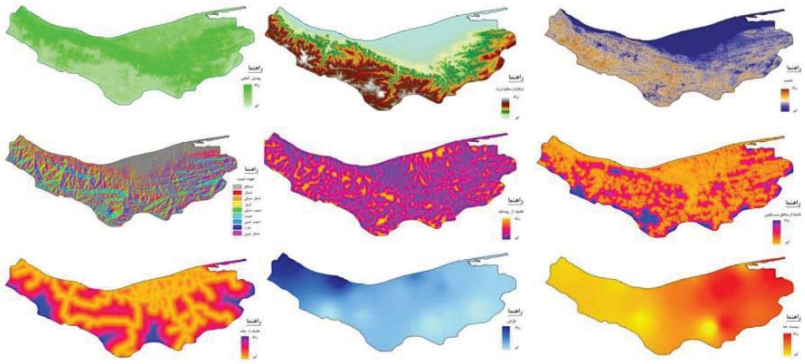
در این پژوهش جهت پهنه‌بندی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران داده‌های مورد نیاز به‌شیوه‌ی کتابخانه‌ای و از منابع قابل استناد استخراج گردیده است. موادی که در این پژوهش به‌کار گرفته شد، مشتمل بر ۴ معیار اصلی و ۹ زیر معیار؛ شامل توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت و رودخانه‌ها)، اقلیمی (بیشینه دما، میانگین بارش)، انسانی (مناطق مسکونی، شبکه راه‌های ارتباطی) و بیولوژیکی (پوشش گیاهی) می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲- روند نمای مراحل انجام پژوهش
Figure 2. The process of research steps

جهت استخراج و پایش پوشش گیاهی منطقه مطالعاتی، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی بر روی مجموعه تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در بازه زمانی ۵ ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲) در سامانه تحت وب GEE اعمال شد، به این طریق پوشش گیاهی خالص به‌دست آمد. نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت شیب منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) 5/12 متر با پوشش جهانی توسط سازمان ناسا از مجموعه داده سنجنده ALOS AVNIR-2 تهیه و همچنین در نرم‌افزار ArcMAP با استفاده از ابزار Euclidean distance فاصله از رودخانه‌ها، مناطق مسکونی و شبکه راه‌ها محاسبه گردید. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی از سازمان هواشناسی دریافت و اطلاعات آن به‌عنوان داده‌های ورودی هواشناسی مورد استفاده قرار گرفته است. در محیط ArcMap از ایستگاه‌های سینوپتیک نقشه میانگین بارش سالانه و بیشینه دما از طریق درون‌یابی برای بازه‌زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ تهیه گردید (شکل ۳).

پس از استخراج (محاسبه) ضرایب معیارها، تمامی لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزارArcMAP رقومی شده و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن هر معیار و رده‌های آن معیار تعیین گردید. در نهایت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دار در محیط نرم‌افزار ArcMap و با استفاده از روشRaster Calculator صورت پذیرفت. در ادامه به بررسی هریک از معیارهای مذکور در منطقه و نقش آن در آتش‌سوزی جنگل پرداخته شد.



شکل ۳- نقشه زیرمعیارهای آتش‌سوزی جنگل‌های مازندران: از چپ به راست و بالا به پایین به‌ترتیب، پوشش گیاهی؛ ارتفاع از سطح دریا؛ شیب؛ جهت شیب؛ فاصله از شبکه آبراهه‌ها؛ فاصله از مناطق مسکونی؛ فاصله از شبکه راه‌ها؛ بارش سالانه؛ بیشینه دما.
Figure 3. Map of Mazandaran forest fire sub-criteria: from left to right and top to bottom respectively, vegetation; Above sea level; slope; steep direction; distance from waterways network; distance from residential areas; distance from the road network; annual rainfall; maximum temperature.

پوشش گیاهی

پوشش گیاهی عامل اصلی در آتش‌سوزی طبیعی است. به‌گونه‌ای که احتمال گسترش آتش در مناطقی با تراکم پوشش بالا نسبت به مناطقی با پوشش ضعیف و تنک، بیشتر است. وجود پوشش گیاهی در یک منطقه، به‌عنوان وجود سوخت برای گسترش آتش در نظر گرفته می‌شود (Emami & Shahriari, 2018). تراکم پوشش گیاهی با آتش‌سوزی رابطه مستقیم دارد. در واقع هرچه تراکم پوشش گیاهی بالاتر باشد میزان آسیب‌پذیری بالاتر است (Salloum & Abdo, 2016). در شکل (۴-a) مناطق جنگلی چون تراکم بالاتری دارند به رنگ قرمز درآمده و در نهایت از آسیب‌پذیری بالاتری برخوردار هستند. میزان پوشش گیاهی استان مازندران از مجموعه تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در بازه زمانی پنج ساله از سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ به‌کمک سامانه تحت وب GEE به‌دست آمد.

NDVI= (NIR- RED) / (NIR+ RED)
NDVI = (B8- B4) / (B8+ B4)

شاخص NDVI دارای مقادیر نرمال در دامنه ۱- و ۱+ بوده؛ از این‌رو بررسی و نمایش مقادیر را به‌راحتی امکان‌پذیر می‌سازد. مقادیر مختلف NDVI نمایانگر پوشش‌های مختلف می‌باشد. به‌عنوان مثال مقادیر NDVI بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ نمایانگر مناطق گیاهی تنک، مقادیر بین ۰/۱ تا ۰/۵ مناطق گیاهی معمولی و از ۰/۵ به بالا مناطق گیاهی متراکم و غنی می‌باشد. آب، برف و یخ دارای مقادیر NDVI منفی بوده، خاک‌ها دارای مقادیر کمتر از ۰/۰۵ و ابرها نیز معمولاً دارای مقادیر نزدیک صفر هستند (Li *et al.*, 2021) (شکل ۴-a).

فاصله از مناطق مسکونی

فاصله مناطق مسکونی از جنگل‌ها تاثیرگذارترین معیار انسانی است که شدت فشار انسان بر اکوسیستم‌های جنگلی را منعکس می‌کند (Jaafari *et al.*, 2018). در این راستا، تردد نفرات می‌تواند در فصول خشک سال منطقه در اثر پخت و پز، سیگار، بر پا نمودن آتش و غیره باعث آتش‌سوزی تصادفی یا غیرتصادفی جنگل‌ها شوند (Geng *et al.*, 2020). بنابراین هرچه فاصله جنگل‌ها از مناطق مسکونی بیشتر باشد احتمال آتش‌سوزی کمتر است در واقع آسیب‌پذیری جنگل‌ها با فاصله از مناطق مسکونی رابطه عکس دارد (شکل ۴-b).

فاصله از شبکه راه‌ها

شبکه راه‌ها یکی از مهم‌ترین پایه‌های زیرساختی در چارچوب مدیریت جنگل است (Veena *et al.*, 2017). علاوه بر این، شبکه راه‌ها زمینه تماس مستقیم بین فعالیت‌های فشرده انسانی و سیستم جنگلی را ایجاد می‌کند و احتمال آتش‌سوزی جنگل را افزایش می‌دهد. ساخت شبکه جاده‌ای، حفاری، حذف پوشش گیاهی و جابجایی مسافران و بازدیدکنندگان از جمله محرک‌های آتش‌سوزی در طول شبکه راه‌های جنگلی است (Jaafari *et al.*, 2021). در نتیجه احتمال آتش‌سوزی جنگل با کاهش فاصله از راه‌های ارتباطی افزایش می‌یابد در واقع آسیب‌پذیری جنگل‌ها با فاصله از راه‌های ارتباطی رابطه عکس دارد (شکل ۴-c).

بیشینه دما

افزایش دما یک عامل اقلیمی تاثیرگذار به‌لحاظ افزایش احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل است (Satir *et al.*, 2016). دمای هوای منطقه یکی از عوامل مهم شروع آتش‌سوزی می‌باشد. بین تعداد آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در یک منطقه و دمای آن منطقه یک ارتباط معناداری وجود دارد (Tiwari *et al.*, 2021). دما به‌شدت بر رطوبت موجود در همه‌ی محیط‌ها تاثیرگذار است. به‌خصوص در مناطقی که پوشش‌های گیاهی و درختی به‌وفور یافت می‌شوند. در این پژوهش جهت تهیه نقشه بیشینه دما از آمار ۱۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سازمان هواشناسی با طول دوره آماری ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۲) استفاده شده است. در این مرحله نیز از درون‌یابی IDW برای نقشه بارش استان مازندران استفاده گردید (شکل ۴-d).

بارش

یکی از پارامترهای اقلیمی بارش است و نقش به‌سزایی در تغییرپذیری رطوبت خاک دارد (Kayet *et al.*, 2020). بارندگی در فصول رویش باعث افزایش رطوبت محیط و گیاه یا به‌عبارت دیگر سبب زنده نگه داشتن و افزایش کلروفیل گیاه می‌شود. در این شرایط هنگام آتش‌سوزی زمان بیشتری نیاز است تا رطوبت گیاه تبخیر شده و در نهایت افزایش بارندگی سبب کاهش پتانسیل آتش‌سوزی می‌شود (Abedi Gheshlaghi, 2019). در واقع احتمال آتش‌سوزی جنگل با کاهش میزان بارش افزایش می‌یابد (Sahana & Ganaie, 2017).

به‌منظور تهیه نقشه بارش، میانگین بارش روزانه و سالانه از آمار ۱۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سازمان هواشناسی به‌علت پراکنش مناسب با طول دوره آماری مناسب ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۲) استفاده گردیده است. در این پژوهش برای بررسی تغییرات مکانی بارش، از روش‌های درون‌یابی قطعی، روش وزنی معکوس فاصله و تابع شعاع محور و همچنین از روش‌های زمین‌آمار روش کریجینگ و کوکریجینگ معمولی و ساده با مدل‌های کروی، دایره‌ای، نمایی و گوسی استفاده شده که به کرات مورد توجه محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است. به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب روش مناسب از روش ارزیابی متقابل استفاده شده است. به این ترتیب که با کاربرد نرم‌افزار ArcMap و استفاده از روش ارزیابی متقابل، مدل‌های درون‌یابی با هم مقایسه گردیده و مدل درون‌یابی IDW که دارای کم‌ترین خطای برآوردی بود به‌منزله مدل مناسب برای تهیه نقشه تغییرات مکانی بارش استفاده شده است. در نهایت پس از تهیه نقشه تغییرات مکانی بارش، نقشه فازی بارش استان مازندران (شکل ۴-e) تهیه گردید؛ به‌طوری‌که آسیب‌پذیری با مقدار بارش رابطه عکس داشته و هرچه مقدار بارش بیشتر باشد میزان رطوبت خاک و سایر عوامل مربوطه بالا بوده و خطر آتش‌سوزی طبیعی کاهش می‌یابد.

ارتفاع از سطح دریا

ارتفاع از سطح دریا بر ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیمی و هیدرولوژیکی تاثیر می‌گذارد (Tiwari *et al.*, 2021). در ارتفاعات پایین نسبت به ارتفاعات بالا معمولاً درجه حرارت بالاتر و رطوبت نسبی کمتر است. در ارتفاع بالا اثر بارش رطوبت نسبی را افزایش می‌دهد که باعث محدود کردن توانایی شروع آتش یا انتشار آن می‌شود. از آنجاکه در ارتفاعات بالا رطوبت بیشتر و درجه حرارت کمتر است، بنابراین احتمال وقوع آتش‌سوزی با افزایش ارتفاع رابطه عکس دارد (Falkowski *et al.*, 2005). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، نقشه فازی ارتفاع استان مازندران تهیه گردید. بر این اساس، با افزایش ارتفاع میزان آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد و بالعکس (شکل ۴-f).

شیب

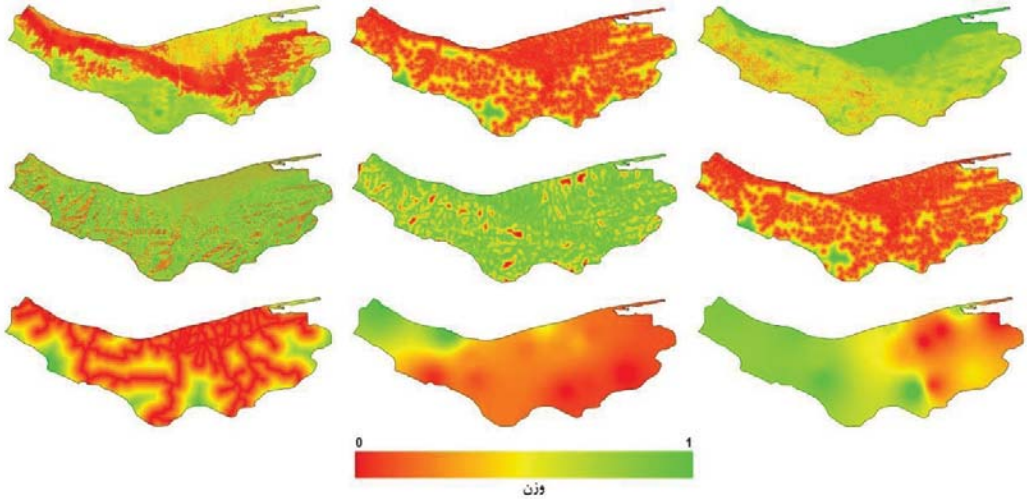
شیب سطح زمین، ارتباط مستقیمی با سرعت گسترش آتش‌سوزی دارد (Nuthammachot & Stratoulias, 2021). شیب زیاد سبب افزایش سرعت گسترش آتش‌سوزی می‌شود ولی باید به این نکته نیز توجه شود که شیب تند پس از شروع آتش‌سوزی تاثیر مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر، شیب زیاد پتانسیل آتش‌سوزی را افزایش نمی‌دهد؛ بلکه اگر آتش‌سوزی در یک منطقه ایجاد شود، جهت گسترش آن به‌سمت شیب‌های زیاد خواهد بود. بنابراین شیب با احتمال آتش‌سوزی رابطه مستقیم دارد در واقع هرچه شیب افزایش یابد احتمال آتش‌سوزی بالاتر است (شکل ۴-g).

جهت شیب

جهت شیب جهت نمایانگر میزان دریافت تابش خورشید و گرما در یک محدوده است. میزان تابش دریافتی در همه جهات دامنه‌ها با هم برابر نیست و برخی از دامنه‌ها تابش بیشتری دریافت کنند. به‌طور کلی جهات جنوب و شرق بالاترین میزان دریافت تابش خورشیدی را دارند و در نتیجه شرایط محیطی برای وقوع حریق در این دو جهت به‌علت دریافت بیش‌تر تابش خورشید مهیاتر است. پس از آن جهات غرب، شمال و مناطق دشتی بدون جهت به‌ترتیب تابش کم‌تری دریافت می‌کنند که باعث کاهش خطر آتش‌سوزی در این جهات می‌شود (Geng *et al.*, 2020). در نتیجه بیش‌ترین آسیب‌پذیری مربوط به شیب‌های جنوبی و کم‌ترین آسیب‌پذیری در شیب‌های شمالی اتفاق می‌افتد (شکل ۴-h).

فاصله از آبراهه‌ها

رودخانه‌ها تأمین کننده رطوبت خاک و گیاه هستند بنابراین با این افزایش رطوبت احتمال آتش‌سوزی کاهش می‌یابد (Jaafari *et al.*, 2017). در نتیجه احتمال آتش‌سوزی با فاصله از رودخانه افزایش می‌یابد. در واقع فاصله از رودخانه با آتش‌سوزی رابطه عکس دارد (شکل ۴-i).



شکل ۴- نقشه‌های فازی استان مازندران: از چپ به راست و بالا به پایین به‌ترتیب، پوشش گیاهی؛ ارتفاع از سطح دریا؛ شیب؛ جهت شیب؛ فاصله از شبکه آبراهه‌ها؛ فاصله از مناطق مسکونی؛ فاصله از شبکه راه‌ها؛ بارش سالانه ؛ بیشینه دما.

Figure 4. Fuzzy maps of Mazandaran province: from left to right and top to bottom respectively, vegetation; Above sea level; slope; steep direction; distance from waterways network; distance from residential areas; distance from the road network; annual rainfall; maximum temperature.

ساختار سلسله مراتبی

ارزیابی خطر آتش‌سوزی طبیعی از جمله اقدام‌های مؤثر پهنه‌بندی و کاستن از شدت خسارت ناشی از آتش‌سوزی طبیعی به‌شمار می‌رود. از این‌رو ارزیابی خطر آتش‌سوزی طبیعی با عوامل تأثیرگذار ذکر شده، نیازمند اجرای ساختار نظام‌مند چند معیاره تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. مدل تحلیل سلسله مراتبی برای اولین بار به‌وسیله توماس ساتی در دهه‌ی ۱۹۸۰ ابداع شد (Saaty, 1980). اساس روش تصمیم‌گیری بر مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شده است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شامل سه عنصر هدف، تعدادی معیار و گزینه است. برای رسیدن به هدف به تعدادی معیار مؤثر امتیاز داده می‌شود و وزن نسبی و وزن نهایی معیارها مشخص می‌گردد (Saaty, 1980). مراحل اصلی تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی خطر آتش‌سوزی طبیعی استان مازندران شامل

ساختن سلسله مراتب، تعیین ضریب اهمیت معیارها، تهیه‌ی ماتریس مقایسه‌ی زوجی، تعیین وزن معیارها و رده‌های معیارها و محاسبه‌ی نرخ سازگاری می‌باشد. تبدیل موضوع مورد بررسی به یک ساختار سلسله مراتبی، مهم‌ترین قسمت تحلیل سلسله مراتبی محسوب می‌شود؛ زیرا در این قسمت با تجزیه مسائل مشکل و پیچیده، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مسائل پیچیده را از طریق تجزیه آن به عناصر جزئی که به‌صورت سلسله مراتبی به‌هم مرتبط بوده و ارتباط هدف اصلی مسئله با پایین‌ترین سطح سلسله مراتبی مشخص را به‌شکل ساده‌تر ارائه می‌نماید (Saaty, 1980).

ماتریس مقایسه زوجی

بعد از تجزیه مسئله به سلسله مراتب، عناصر سطوح مختلف به‌صورت دوتایی با هم مقایسه شده و سپس براساس میزان اهمیت، دو معیار ارزش‌گذاری گردیده است. واژه‌ی غربال کردن که به‌وسیله ساتی (۱۹۸۰) ارائه شد، جهت ارزیابی میزان اهمیت دو معیار استفاده می‌شود (Saaty, 1980).

سرانجام نظرات نخبگان و متخصصان به‌همراه مطالعه میدانی گسترده و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه از جمله قوانینی می‌باشد که در تعیین وزن نسبی هر معیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مرحله با استفاده از روش مقایسه‌ی زوجی برای انجام مقایسه، ماتریسی به ابعاد ۹×۹ ایجاد شده و معیارهای مختلف دوبه‌دو با هم مقایسه و مقادیر مربوط بر اساس غربال ساتی اختصاص یافته است. این مقایسه‌های زوجی یک ماتریس مقایسه زوجی را فراهم نموده تا اثرگذاری هریک از معیارها را در ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل ارزیابی کند.

سازگاری قضاوت‌ها

با توجه به ضرایب در نظر گرفته شده در ماتریس ضرایب معیارهای مؤثر بر آتش‌سوزی، می‌بایست سازگاری ضرایب مورد سنجش قرار گیرد. از این‌رو در راستای محاسبه نرخ ناسازگاری، ابتدا می‌بایست ماتریس مقایسه زوجی (A) در بردار وزن (W) ضرب گردیده تا تخمین مناسبی از $\lambda_{max}W$ به‌دست آید. با تقسیم مقدار $\lambda_{max}W$ بر W مربوطه مقدار λ_{max} محاسبه شده و سپس مقدار شاخص ناسازگاری (CI) نیز از طریق رابطه زیر محاسبه گردیده است (Saaty, 1980).

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

بردار سازگاری (λ_{max}) برابر با بزرگترین مقدار ویژه ماتریس؛

n: تعداد پارامتر استفاده شده که برابر با ۹؛

نسبت سازگاری (CR) نیز از طریق رابطه زیر قابل دسترسی است:

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

شاخص تصادفی (RI) از جدول (۱) استخراج می‌شود و با توجه به تعداد ۹ پارامتر برابر با ۱/۴۵؛ شاخص ناسازگاری (CI) از ۹ تکرار ماتریس نرمال شده به‌دست آمد برابر با ۰/۰۸۹۹؛ اگر نسبت سازگاری کوچک‌تر یا مساوی۱۰٪ باشد، سازگاری سیستم قابل قبول است و در صورتی که بیش از ۱۰٪ حاصل گردد، بهتر است تصمیم گیرنده در قضاوت‌های ماتریس ضرایب تجدیدنظر نماید (Saaty, 1980). به‌طورکلی نرخ ناسازگاری معیاری است جهت تشخیص معنی‌داری ماتریس‌های مقایسه زوجی که مقدار آن باید کمتر از ۱۰٪ باشد. پس از تأیید معنی‌داری ماتریس‌های عوامل مؤثر در ارزیابی خطر آتش‌سوزی طبیعی، وزن نهایی معیارها جهت تهیه نقشه ارزیابی منطقه به لایه‌های متناظر اعمال شد. جهت اعمال صحیح وزن‌های به‌دست‌آمده در محیط ArcMap از روش Raster Calculator بهره گرفته شده و در نهایت نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران در ۵ کلاس ارزیابی خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه گردیده است.

جدول ۱- مقادیر RI ماتریس‌های تصادفی

Table 2. RI values of random matrices

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

نتایج و بحث

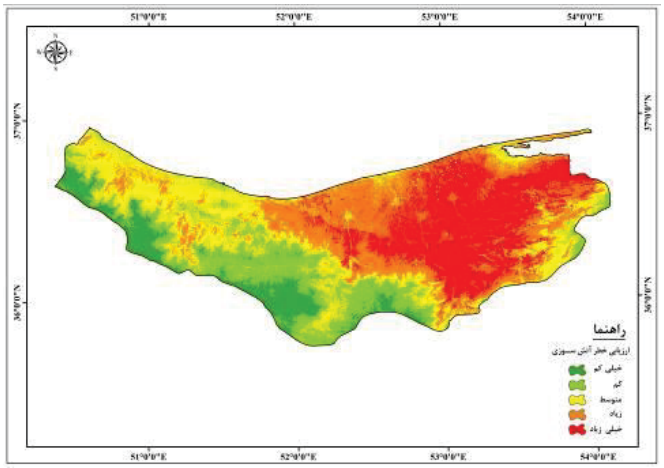
ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل براساس مدل AHP فازی

براساس ضرایب وزن‌های اعمال شده در طرح حاضر، وزن نهایی معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در آتش‌سوزی جنگل متناسب با جدول (۲) مشخص و لحاظ گردید. از بیش‌ترین وزن به کمترین به‌ترتیب مربوط به معیارهای توپوگرافی، بیولوژیکی، اقلیمی و انسانی است و در بین زیر معیارها بیش‌ترین وزن و کم‌ترین وزن به‌ترتیب مربوط به پوشش گیاهی و شیب است.

جدول ۲- وزن معیارها و زیر معیارهای دخیل در ارزیابی خطر آتش‌سوزی
Table 2. The weight of criteria and sub-criteria involved in fire risk assessment

معیار اصلی The main criterion	زیر معیار under the criteria	وزن Weight	
بیولوژیکی Biologically	پوشش گیاهی Vegetation	0.28	0.28
انسانی human	فاصله از مناطق مسکونی Distance from residential areas	0.1	0.2
	فاصله از شبکه راه‌ها Distance from the road network	0.1	
اقلیمی climatic	دما Temperature	0.1	0.18
	بارش Rain	0.08	
توپوگرافی topography	ارتفاع Height	0.1	0.34
	شیب Slope	0.03	
	جهت شیب steep direction	0.13	
	فاصله از رودخانه‌ها Distance from rivers	0.08	
n	9		
RI : n	1.45		
CI	0.0899		
CR%	6.25		

نرخ سازگاری (CR) برای ماتریس‌های عوامل مؤثر در ارزیابی آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران برابر با ۶/۲۵٪ حاصل شده که مقدار آن کم‌تر از ۱۰٪ بوده در واقع نشان دهنده آن است که وزن زیرمعیارها متناسب و قابل اعتماد می‌باشد. بیش‌ترین وزن‌ها مربوط به پوشش گیاهی و جهت شیب بوده و کم‌ترین وزن‌ها مربوط به فاصله از رودخانه و شیب زمین است (جدول ۳). در نهایت نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های استان مازندران در ۵ کلاس ارزیابی خطر؛ خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی گردیدند (شکل ۵).



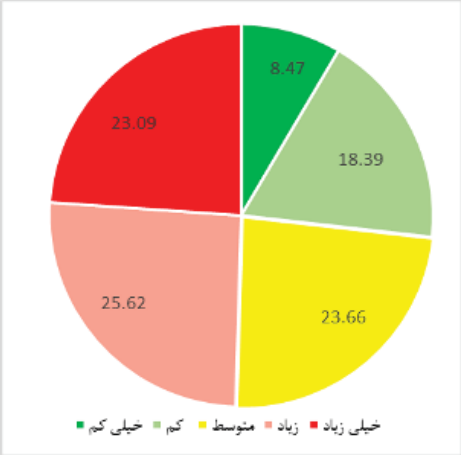
شکل ۵- نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی استان مازندران
Figure 5. Fire risk assessment map of Mazandaran province

نتایج حاصل از مدل AHP فازی در ارزیابی خطر آتش‌سوزی نشان داد که از مجموع مساحت حدود ۲۳۷۳۱۸۹ هکتاری استان مازندران، ۲۰۱۱۱۷/۶ هکتار (۸/۴۷ درصد) در کلاس ارزیابی خطر خیلی کم، ۴۳۴۹۸۷/۱ هکتار (۱۸/۳۲) در کلاس ارزیابی خطر کم، ۵۶۱۵۵۲ هکتار (۲۳/۶۶ درصد) در کلاس ارزیابی خطر متوسط، ۶۰۸۲۰۸/۷ هکتار (۲۵/۲۶ درصد) در کلاس ارزیابی خطر زیاد و ۵۶۷۳۲۳/۲ هکتار (۲۳/۹۰ درصد) در کلاس ارزیابی خطر خیلی زیاد قرار دارد (جدول ۳) و (شکل ۶).

جدول ۳- مساحت و درصد مساحت کلاس‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی استان مازندران
Table 3. Area and percentage area of fire risk assessment classes in Mazandaran province

شماره number	کلاس‌ها Classes	مساحت کلاس (هکتار) class area (hectares)	مساحت کلاس (درصد) Class area (percentage)
1	خیلی کم very little	201117.6	8.47
2	کم little	434987.1	18.32
3	متوسط medium	561552	23.66
4	زیاد Much	608208.7	25.62
5	خیلی زیاد very much	567323.2	23.90

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، بخش‌های شرق و جنوب‌شرقی نسبت به سایر بخش‌های منطقه مطالعاتی از پتانسیل آتش‌سوزی بالاتری برخوردار هستند. با مراجعه به لایه‌های فازی مذکور مشخص است در این بخش‌ها ارتفاع، شیب و میزان بارش کم و علاوه بر آن تراکم مناطق مسکونی و شبکه راه‌های ارتباطی بالا بوده و هم‌چنین میزان دما نیز بالا است. در واقع این چند عامل احتمال خطر آتش‌سوزی را در این بخش‌ها بالا برده است.



شکل ۶- درصد مساحت کلاس‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی
Figure 6. Area percentage of fire risk assessment classes

آتش‌سوزی یکی از عوامل اصلی اختلالات طبیعی در اکوسیستم‌های جنگلی است که بر منابع جنگلی، تغییرات آب و هوایی و توالی‌های اکولوژیکی تأثیر بسزایی دارد (Jin *et al.*, 2021) و همچنین شناسایی عوامل تخریب و تهدید جنگل‌ها حیاتی است (Marozas *et al.*, 2007). در این تحقیق از دو مدل AHP فازی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی استفاده شده است. انتخاب معیارهای مؤثر در ایجاد آتش‌سوزی یک مسئله حیاتی در مدل‌سازی ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها می‌باشد. در این تحقیق با مطالعه‌ای جامع ۴ معیار اصلی و ۹ زیر معیار شامل توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت و رودخانه‌ها)، اقلیمی (بیشینه دما، بارش)، انسانی (مناطق مسکونی، شبکه راه‌های ارتباطی) و بیولوژیکی (پوشش گیاهی) جهت ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل انتخاب شد.

بیش‌ترین پتانسیل آتش‌سوزی در پژوهش حاضر در ارتفاعات پایین مشاهده شده که می‌تواند به‌دلیل تمرکز بیشتر فعالیت‌های انسانی در ارتفاعات پایین باشد. این با نتایج مطالعه دونگ و همکاران (Dong *et al.*, 2005) و محمد و همکاران (Mohammed *et al.*, 2022) مطابقت دارد. در مقابل، ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2019) و هونگ و همکاران (Hong *et al.*, 2018) بیان کردند که خطرات آتش‌سوزی با افزایش ارتفاع همبستگی مثبت دارد، که این یافته با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی ندارد.

بیش‌تر آتش‌سوزی‌ها در شیب‌های کم در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. دلیل این امر می‌تواند فعالیت بیش‌تر انسان در شیب‌های کم باشد. جهت شیب به‌طور قابل‌توجهی بر شرایط محلی تأثیر می‌گذارد، از جمله؛ قرار گرفتن در معرض مستقیم نور خورشید، جهت باد غالب، میزان بارندگی و ساختار مورفولوژیکی، که به‌نوبه خود با وقوع آتش‌سوزی در ارتباط است (Chen *et al.*, 2015). بر این اساس جهت شیب یکی دیگر از عوامل مؤثر در بروز آتش‌سوزی بود که بیشترین وقوع آتش‌سوزی در جهت‌های شرق و جنوب‌شرقی مشاهده گردیده است. در واقع، در این جهت‌ها میزان دریافتی نور خورشید بالاتر از سایر جهت‌ها است در نتیجه پوشش گیاهی خشک بیشتر در معرض آتش‌سوزی قرار دارد. مطابق با پژوهش حاضر، آشتیانی و همکاران (Ashtiani *et al.*, 2013) و محمد و همکاران (Mohammed *et al.*, 2022) گزارش کردند که بیشترین حوادث آتش‌سوزی در جهات جنوبی رخ داده است.

با توجه به بالا بودن فعالیت‌های انسانی در نزدیکی مناطق مسکونی، احتمال آتش‌سوزی در این مکان‌ها بالاست (Giglio, 2010). علاوه بر این، احتمال آتش‌سوزی با افزایش فاصله از مناطق مسکونی کاهش می‌یابد. اگرچه انسان عامل اصلی آتش‌سوزی است، اما نقشی دوگانه در وقوع و گسترش آتش دارد (Rasooli *et al.*, 2018).

لایه فاصله از آبراهه‌ها نیز در بروز آتش‌سوزی نقش دوگانه‌ای دارد. فعالیت انسان در مجاورت شبکه‌های آبراهه‌ها بیش‌تر بوده و در بروز آتش‌سوزی نقش اساسی دارد. از طرفی آبراهه‌ها در احتمال وقوع آتش‌سوزی نقش کاهنده دارند به‌گونه‌ای که در مجاورت رودخانه‌ها رطوبت بیش‌تری وجود دارد که این رطوبت در احتمال وقوع آتش‌سوزی نقش بازدارنده دارد (Mohammed *et al.*, 2022). براساس نتایج پژوهش حاضر، با کاهش فاصله از آبراهه‌ها احتمال وقوع آتش‌سوزی کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که بین فاصله از جاده‌ها و پتانسیل آتش‌سوزی همبستگی معکوس وجود دارد. به‌عبارت دیگر، هرچه فاصله از جاده‌ها کم‌تر باشد، احتمال آتش‌سوزی بیش‌تر خواهد بود. این به‌دلیل فعالیت بیش‌تر انسان در مجاورت جاده‌ها است. نتایج این بخش با مطالعه محمد و همکاران (Mohammed *et al.*, 2022) در جنگل‌های مریوان غرب ایران مطابقت دارد. بررسی نقشه پوشش گیاهی نشان داد که آتش‌سوزی بیش‌تر در پوشش‌های انبوه جنگلی کم رخ می‌دهد. که با نتایج مطالعه بازیار و همکاران (Bazyar *et al.*, 2020) مطابقت دارد.

هونگ و همکاران (Hong *et al.*, 2018) پتانسیل خطر آتش‌سوزی را با استفاده از روش‌های داده‌کاوی بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که پارامترهای اقلیمی در مقیاس محلی اهمیت کمتری دارند؛ اما در مقیاس منطقه‌ای دارای اهمیت بیش‌تری هستند. در این میان، ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی در مقیاس محلی اهمیت بیشتری دارند.

از میان عوامل اقلیمی موثر بر حوادث آتش‌سوزی می‌توان به دما و بارش اشاره کرد. براساس نتایج مدل AHP فازی، احتمال آتش‌سوزی با کاهش بارش و افزایش دمای سالانه افزایش یافت. کاهش میزان بارش باعث کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی شده، در نتیجه احتمال آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش دما باعث خشک شدن پوشش گیاهی و کاهش رطوبت گردیده، بنابراین احتمال آتش‌سوزی بالا می‌رود. این یافته‌ها با نتایج مطالعه موهاویج و همکاران (Mhawej *et al.*, 2016) و محمد و همکاران (Mohammed *et al.*, 2022) مطابقت ندارد. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2019) در تحقیقی بیان کردند که خطر آتش‌سوزی با درجه حرارت در مراتع چین همبستگی مثبت دارد، که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که ۷۲ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل خطر آتش‌سوزی متوسط تا خیلی زیاد است. بنابراین، برای پیش‌گیری و رفع خطرات احتمالی حوادث آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه باید اقداماتی اتخاذ شود. چنین اقداماتی شامل افزایش نظارت بر مناطق با ارزیابی خطر آتش‌سوزی زیاد و خیلی زیاد، ایجاد موانع آتش‌سوزی و تخصیص بودجه بیش‌تر به بخش‌های مدیریت بحران جنگل‌ها است. از دیگر راهکارها می‌توان به تجهیز روستاییان، سهام‌داران و استفاده‌کنندگان از مناطق طبیعی به تجهیزات اطفاء حریق اشاره نمود. بیشتر آتش‌سوزی‌ها توسط انسان‌ها رخ داده است که حتی می‌تواند ناشی از رها کردن بطری‌های آب یا بطری‌های شیشه‌ای در جنگل‌ها باشد. عامل دیگر مؤثر در وقوع آتش‌سوزی، روش نادرست خاموش و روشن کردن آتش بود. بنابراین یکی از راه‌های پیشگیری از آتش‌سوزی جنگل‌ها، فرهنگ‌سازی از نظر اهمیت و نحوه بهره‌برداری از این منابع ملی است. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که تهیه نقشه ارزیابی خطر آتش‌سوزی مکان دقیق و معقول می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان در شناسایی مناطق با پتانسیل بالا و همچنین مدیریت بحران در مناطق آسیب‌پذیر کمک کند.

References

Abedi Gheshlaghi, H. (2019). Using GIS to develop a model for forest fire risk mapping. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *47*(7), 1173-1185.

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*(8), 4668.

Adab, H., Kanniah, K. D., & Solaimani, K. (2013). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural hazards*, *65*, 1723-1743.

Amalina, P., Prasetyo, L. B., & Rushayati, S. B. (2016). Forest Fire Vulnerability Mapping in Way Kambas National Park. *Procedia Environmental Sciences*, *33*, 239-252.

Ashtiani, E. F., Daryaei, M. G., Samani, K. M., & Amlashi, M. A. (2013). Review of fire sensitive areas with emphasis on drought impact with the joint use of PDSI, AHP and GIS (case study: Forest Saravan, Guilan province). *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, *10*(2).

Baqer Rasooli, S., & Bonyad, A. E. (2019). Evaluating the efficiency of the Dong model in determining fire vulnerability in Iran's Zagros forests. *Journal of Forestry Research*, *30*(4), 1447-1458.

Bazyar, M., Oladi Ghadikolaii, J., Pourghasemi, H. R., & Serajyan Maralan, M. R. (2020). Zoning and Investigation of Factors Affecting Forest Fire Using Evidential Belief Function Algorithm and

Support Vector Machine in Boyer Ahmad City. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, *17*(2), 197-222.

Brown, K. J., Hebda, N. J., Conder, N., Golinski, K. G., Hawkes, B., Schoups, G., & Hebda, R. J. (2017). Changing climate, vegetation, and fire disturbance in a sub-boreal pine-dominated forest, British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, *47*(5), 615-627.

Bui, D. T., Bui, Q. T., Nguyen, Q. P., Pradhan, B., Nampak, H., & Trinh, P. T. (2017). A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and forest meteorology*, *233*, 32-44.

Chen, F., Du, Y., Niu, S., & Zhao, J. (2015). Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. *Forests*, *6*(5), 1422-1438.

de Zea Bermudez, P., Mendes, J., Pereira, J. M. C., Turkman, K. F., & Vasconcelos, M. J. P. (2009). Spatial and temporal extremes of wildfire sizes in Portugal (1984–2004). *International Journal of Wildland Fire*, *18*(8), 983-991.

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.

Emami, H., & Shahriari, H. (2018). Quantification of environmental and human factors in the occurrence of forest fire with RS and GIS methods; Arsbaran protected areas. *Sepehr Scientific-Research Quarterly of Geographical Information, 28(112), 35-53.*

Eskandari, S. (2014). Assessing the forest fire risk potential using the Dong model, case study: the forests of three Neka-Zhalemroud sectors. *Journal of Geographical Survey of Space, 5(15), 195-210* (In Persian).

Eskandari, S. (2012). Providing a forest fire potential model and its spread using RS and GIS. PhD Thesis. Forestry Department. Department of natural resources. Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (In Persian).

Eugenio, F. C., dos Santos, A. R., Fiedler, N. C., Ribeiro, G. A., da Silva, A. G., dos Santos, Á. B., ... & Schettino, V. R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of environmental management*, *173*, 65-71.

Falkowski, M. J., Gessler, P. E., Morgan, P., Hudak, A. T., & Smith, A. M. (2005). Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling. *Forest ecology and management*, *217*(2-3), 129-146.

Fox, D. M., Laaroussi, Y., Malkinson, L. D., Maselli, F., Andrieu, J., Bottai, L., & Wittenberg, L. (2016). POSTFIRE: A model to map forest fire burn scar and estimate runoff and soil erosion risks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *4*, 83-91.

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.

Gerdzheva, A. A. (2014). A comparative analysis of different wildfire risk assessment models (a case study for Smolyan district, Bulgaria). *European Journal of Geography*, *5*(3), 22-36.

Giglio, L. (2010). MODIS collection 5 active fire product user's guide version 2.4. *Science Systems and Applications, Inc*.

Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A. X., & Xu, C. (2018). Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu County, China. *Science of the total environment*, *630*, 1044-1056.

Jaafari, A., Gholami, D. M., & Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological informatics*, *39*, 32-44.

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.

Jaafari, A., Mafi-Gholami, D., Thai Pham, B., & Tien Bui, D. (2019). Wildfire probability mapping: Bivariate vs. multivariate statistics. *Remote Sensing*, *11*(6), 618.

Jaafari, A., Pazhouhan, I., & Bettinger, P. (2021). Machine learning modeling of forest road construction costs. *Forests*, *12*(9), 1169.

Jin, X. Y., Jin, H. J., Iwahana, G., Marchenko, S. S., Luo, D. L., Li, X. Y., & Liang, S. H. (2021). Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: A review. *Advances in Climate Change Research*, *12*(1), 29-47.

Kayet, N., Chakrabarty, A., Pathak, K., 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.

Lautenberger, C. (2013). Wildland fire modeling with an Eulerian level set method and automated calibration. *Fire Safety Journal*, *62*, 289-298.

Li, J., Zhao, Y., Zhang, A., Song, B., & Hill, R. L. (2021). Effect of grazing exclusion on nitrous oxide emissions during freeze-thaw cycles in a typical steppe of Inner Mongolia. *Agriculture, ecosystems & environment*, *307*, 107217.

Liu, Q., Shan, Y., Shu, L., Sun, P., & Du, S. (2018). Spatial and temporal distribution of forest fire frequency and forest area burnt in Jilin Province, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, *29*(5), 1233-1239.

Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Zenner, E. K., Kamari, A. N., & Bui, D. T. (2020). Spatial modeling of exposure of mangrove ecosystems to multiple environmental hazards. *Science of the total environment*, *740*, 140167.

Mahdavi, A. (2012). Forests and rangelands? wildfire risk zoning using GIS and AHP techniques. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *10*(1), 43-52.

Marozas, V., Racinskas, J., & Bartkevicius, E. (2007). Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemiboreal Pinus sylvestris forests. *Forest Ecology and Management*, *250*(1-2), 47-55.

McGuire, S. (2015). FAO, IFAD, and WFP. The state of food insecurity in the world 2015: meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome: FAO, 2015. *Advances in Nutrition*, *6*(5), 623-624.

Mhawej, M., Faour, G., Abdallah, C., & Adjizian-Gerard, J. (2016). Towards an establishment of a wildfire risk system in a Mediterranean country. *Ecological informatics*, *32*, 167-184.

Mohammadi, F., Shabanian, N., Porhashmi, H., Fatehi, P. (2010). Preparing a forest fire risk map using GIS and AHP in a part of Paveh forests. *Iran Forest and Spruce Research, 18(4), 586-569* (In Persian).

Mohammed, O. A., Vafaei, S., Kurdalivand, M. M., Rasooli, S., Yao, C., & Hu, T. (2022). A Comparative Study of Forest Fire Mapping Using GIS-Based Data Mining Approaches in Western Iran. *Sustainability*, *14*(20), 13625.

Naderpour, M., Rizeei, H. M., Khakzad, N., & Pradhan, B. (2019). Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies. *Reliability Engineering & System Safety*, *191*, 106558.

Nuthammachot, N., & Stratoulias, D. (2021). A GIS-and AHP-based approach to map fire risk: a case study of Kuan Kreng peat swamp forest, Thailand. *Geocarto International*, *36*(2), 212-225.

Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., & Pereira, J. M. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management*, *275*, 117-129.

Pourghasemi, H. R. (2016). GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: a comparison between evidential belief function and binary logistic regression models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *31*(1), 80-98.

Pourtaghi, Z. S., Pourghasemi, H. R., Aretano, R., & Semeraro, T. (2016). Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological indicators*, *64*, 72-84.

Rasooli, S. B., Bonyad, A. E., & Pir Bavaghar, M. (2018). Forest fire vulnerability map using remote sensing data, GIS and AHP analysis (Case study: Zarivar Lake surrounding area). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *16*(4), 369-377.

Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation.

Sachdeva, S., Bhatia, T., & Verma, A. K. (2018). GIS-based evolutionary optimized Gradient Boosted Decision Trees for forest fire susceptibility mapping. *Natural Hazards*, *92*, 1399-1418.

Sahana, M., & Ganaie, T. A. (2017). GIS-based landscape vulnerability assessment to forest fire susceptibility of Rudraprayag district, Uttarakhand, India. *Environmental earth sciences*, *76*, 1-18.

Salloum, J., & Abdo, H. (2016). Statistical modeling of conservation the vegetation of the land in Alqadmous area from rainfall erosion. *Tishreen Univ J Res Sci Stud-Arts Human Ser*, *38*(3), 667-683.

Satir, O., Berberoglu, S., & Donmez, C. (2016). Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *7*(5), 1645-1658.

Tabibian, S. (2022). Physical zoning of forest fire risk using fuzzy AHP and GIS methods (Case study: Asalem). *Physical Social Planning*, *9*(2), 61-72.

Tanvir, M. S., & Mujtaba, I. M. (2006). Neural network based correlations for estimating temperature elevation for seawater in MSF desalination process. *Desalination*, *195*(1-3), 251-272.

Tariq, A., Shu, H., Siddiqui, S., Munir, I., Sharifi, A., Li, Q., & Lu, L. (2022). Spatio-temporal analysis of forest fire events in the Margalla Hills, Islamabad, Pakistan using socio-economic and environmental variable data with machine learning methods. *Journal of Forestry Research*, *33*(1), 183-194.

Thach, N. N., Ngo, D. B. T., Xuan-Canh, P., Hong-Thi, N., Thi, B. H., Nhat-Duc, H., & Dieu, T. B. (2018). Spatial pattern assessment of tropical forest fire danger at Thuan Chau area (Vietnam) using GIS-based advanced machine learning algorithms: A comparative study. *Ecological informatics*, *46*, 74-85.

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.

Tuyen, T. T., Jaafari, A., Yen, H. P. H., Nguyen-Thoi, T., Van Phong, T., Nguyen, H. D., ... & Pham, B. T. (2021). Mapping forest fire susceptibility using spatially explicit ensemble models based on the locally weighted learning algorithm. *Ecological Informatics*, *63*, 101292.

Vadrevu, K., & Lasko, K. (2015). Fire regimes and potential bioenergy loss from agricultural lands in the Indo-Gangetic Plains. *Journal of Environmental Management*, *148*, 10-20.

Veena, H. S., Ajin, R. S., Loghin, A. M., Sipai, R., Adarsh, P., Viswam, A., ... & 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).

Verde, J. C., & Zêzere, J. L. (2010). Assessment and validation of wildfire susceptibility and hazard in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(3), 485-497*.

Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M. A., Anderson, K., Moore, B., & Flannigan, M. D. (2017). cffdrs: an R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecological Processes*, *6*(1), 1-11.

Wotton, B. M., Martell, D. L., & Logan, K. A. (2003). Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Climatic change*, *60*(3), 275-295.

Zhang, G., Wang, M., & Liu, K. (2019). Forest fire susceptibility modeling using a convolutional neural network for Yunnan province of China. *International Journal of Disaster Risk Science*, *10*, 386-403.