

Determining the forest fire susceptibility map in the Astara city using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Frequency Ratio Model (FR)

Abazar Esmali Ouri^{1*}, Mohammad Golshan² and Roghayeh Jahdi³

1* - Corresponding Author, Prof., Department of Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. Email: esmaliouri@uma.ac.ir

2- PhD. Graduated, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

3- Associate Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resource, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.

Received: 05.02.2024

Accepted: 14.10.2024

Abstract

Background and objectives: In recent decades, intentional and unintentional forest fires have posed a serious threat to natural resources. These fires not only lead to direct human and financial losses but also contribute to the destruction of ecosystems, soil degradation, and loss of biodiversity. Additionally, they disrupt the balance of watersheds by reducing vegetation cover, increasing the risk of soil erosion, altering hydrological cycles, and ultimately affecting water quality and availability. Understanding fire-prone areas and their contributing factors is essential for effective fire management, risk reduction, and the development of preventive strategies. Fire risk mapping serves as a valuable tool for identifying critical areas and implementing targeted mitigation measures.

Methodology: Fire risk mapping is an effective tool for identifying critical areas and mitigating fire hazards. This study evaluates the efficiency of the Geographic Information System (GIS), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Frequency Ratio (FR) methods in mapping fire-prone areas in Astara, a city in western Gilan province covering 42,000 hectares. Astara is part of the Hyrcanian forests and has a humid climate with an average annual rainfall of 650 mm and a mean temperature of 13.1°C. In this study, the AHP method assigned weights to fire risk criteria based on expert surveys, while the FR method used the distribution of 70% of observed fire incidents. The obtained weights were applied to the study criteria to generate weighted maps. These maps were then integrated to produce a fire susceptibility map, categorizing fire risk into five classes, from very low to very high. To validate the results, 30% of recorded fire incidents and the ROC curve were used. The validation data were not included in the modeling phase.

Results: In the AHP method, the consistency index (CI) was below 0.1, indicating reliable parameter selection. Model validation showed that the AHP method had an area under the curve (AUC) of 0.826, while the FR method achieved an AUC of 0.894. These results suggest that the FR model is more accurate for mapping fire-prone areas in Astara. The lower accuracy of the AHP model is likely due to potential errors in the pairwise comparison of criteria.

Among the evaluated factors, proximity to villages (weight: 0.436) and roads (weight: 0.314) were the most influential in fire occurrence. In contrast, population density had the least impact (weight: 0.062).

Conclusion: In Astara, fires are concentrated in the northern and southeastern regions, particularly in watersheds No. 1, 4, and 7. The fire susceptibility map indicates that 1.82% of the study area is highly fire-prone, while 22.9% has moderate sensitivity. With proper management, fires in these areas can be controlled effectively. High-risk basins have a dense village distribution

with short distances to roads, making them more susceptible to fires. Therefore, promoting public participation and equipping villagers with fire extinguishers can help prevent rapid fire spread.

Keywords: Destruction, Fire, Hyrcanian forest, Gilan Province.

تهیه نقشه حساسیت به آتش‌سوزی در شهرستان آستارا با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مدل فراوانی نسبی (FR)

اباذر اسمعلی‌عوری^{۱*}، محمد گلشن^۲ و رقیه جهدی^۳

*- نویسنده مسئول، استاد، گروه آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران، پست‌الکترونیک: esmaliouri@uma.ac.ir

۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۳- دانشیار، گروه جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: یکی از خطراتی که در دهه‌های اخیر منابع طبیعی را به‌طور جدی تهدید می‌کند، وقوع آتش‌سوزی‌های عمدی و غیرعمدی در مناطق جنگلی است. این آتش‌سوزی‌ها علاوه بر خسارت‌های مستقیم جانی و مالی، با کاهش تراکم پوشش گیاهی به‌صورت غیرمستقیم منجر به تخریب منابع طبیعی و پیامدهای منفی در سطح حوزه‌های آبخیز می‌شود. مواد و روش‌ها: تهیه نقشه حساسیت به آتش‌سوزی می‌تواند در تعیین نقاط بحرانی و مقابله با این خطر طبیعی بسیار کارآمد باشد. برای این منظور در این پژوهش از کارایی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فراوانی نسبی (FR) در جنگل‌های هیرکانی شهرستان آستارا با مساحت ۴۲ هزار هکتار در غرب استان گیلان استفاده شد. این شهرستان با میانگین بلندمدت ۶۵۰ میلی‌متر بارندگی و ۱۳/۱ درجه سانتی‌گراد حرارت، اقلیمی مرطوب دارد. در روش AHP و FR با اعمال وزن‌های به‌دست آمده به‌ترتیب با استفاده از پرسش‌نامه و ۷۰ درصد نقاط آتش‌سوزی مشاهداتی روی معیارهای مطالعاتی، نقشه وزنی محاسبه شد. با ترکیب این نقشه‌ها با یکدیگر، نقشه حساسیت به آتش‌سوزی در هر دو روش تهیه و در پنج کلاس با حساسیت بسیار کم تا بسیار بالا طبقه‌بندی گردید. به‌منظور تعیین صحت نتایج از نقشه ۳۰ درصد نقاط آتش‌سوزی و منحنی ROC استفاده شد. نتایج و یافته‌ها: در روش AHP ارزش ضریب ناسازگاری (CI) کمتر از ۰/۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده متناسب بودن پارامترهای انتخابی است. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد، روش AHP دارای سطح زیر منحنی برابر با ۰/۸۲۶ و روش FR دارای سطح زیر منحنی برابر با ۰/۸۹۴ است. براساس مقادیر AUC، مدل FR نسبت به مدل AHP در تهیه نقشه مناطق مستعد آتش‌سوزی دقت بیشتری دارد، بنابراین، استفاده از مدل FR برای این شهرستان توصیه می‌شود. با توجه به نتایج، از میان معیارهای مطالعاتی، معیار فاصله از روستا و جاده ارتباطی به‌ترتیب با امتیاز ۰/۴۳۶ و ۰/۳۱۴ مهمترین معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی منطقه هستند. معیار جمعیت با امتیاز ۰/۰۶۲ کمترین تأثیر را بر وقوع آتش‌سوزی در منطقه مطالعاتی دارد. نتیجه‌گیری: در این شهرستان تمرکز آتش‌سوزی‌ها بیشتر در نواحی شمالی و جنوب‌شرقی شامل حوزه‌های آبخیز شماره ۱، ۴ و ۷ است، نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده نشان می‌دهد، ۱/۸۲ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای حساسیت بسیار بالا و ۲۲/۹ درصد دارای حساسیت بالا به آتش‌سوزی است که با مدیریت صحیح می‌توان به‌سرعت این آتش‌سوزی‌ها را خاموش کرد؛ در حوزه‌های حساس به آتش‌سوزی، تمرکز روستاها بالا و فاصله بین روستاها از جاده‌های ارتباطی کمتر است، بنابراین، در مناطق بحرانی راهکارهای جلب مشارکت مردمی، همیاران طبیعت و تجهیز و آموزش روستاییان برای اطفای حریق می‌تواند در کاهش وقوع حریق در شهرستان آستارا مؤثر باشد. واژه‌های کلیدی: تخریب، حریق، جنگل هیرکانی، استان گیلان.

مقدمه

جنگل‌ها اصلی‌ترین منابع طبیعی کره خاکی محسوب می‌شوند و نقش بسیار مهمی را در برقراری و حفظ تعادل اکولوژیکی دارند (Mohammadi *et al.*, 2011). سلامتی جنگل در هر منطقه‌ای به‌عنوان شاخصی از شرایط اکولوژیکی متداول در آن منطقه است (Andison, 2024). جنگل‌ها و مراتع اساساً در معرض مخاطرات مختلفی هستند که منجر به تخریب این منابع می‌شوند. هر گونه تغییرات منفی و قابل اندازه‌گیری در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی یا توان زیستی منابع طبیعی که باعث نابودی یا کم شدن کمی و کیفی خدمات منابع طبیعی از جمله کارکردهای فیزیکی و بیولوژیکی آن شود، به‌اصطلاح تخریب یا آسیب منابع طبیعی نامیده می‌شود (Almedia, 1994). آتش‌سوزی علاوه بر خسارت‌های مستقیم جانی و مالی، با کاهش تراکم پوشش گیاهی به‌صورت غیرمستقیم منجر به افزایش تولید رواناب و رسوب و شروع گرایش منفی در سطح حوزه‌های آبخیز می‌شود. در دهه اخیر پس از تخریب حاصل از فعالیت‌های شهری و کشاورزی، آتش‌سوزی شایع‌ترین علت تخریب اکولوژی طبیعی محسوب می‌گردد (Yin *et al.*, 2004). آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع بر تغییرات کاربری اراضی، تولید محصولات طبیعی، انتشار گاز و سلامتی جوامع انسانی مؤثر است (Mohammadi *et al.*, 2011). در صورتی که آسیب وارده از آتش‌سوزی بالا باشد، می‌تواند منجر به تغییر در اکولوژی سیمای سرزمین نیز شود (Yin *et al.*, 2004; Sivrikaya *et al.*, 2024). آتش‌سوزی با از بین بردن گیاهان به‌ویژه گیاهان حساس به آتش‌سوزی، تغییر الگوی توالی و تغییر منابع گیاهی بر اکوسیستم طبیعی تأثیر می‌گذارد.

با وجود پیشرفت تکنولوژی‌های نوین در زمینه مقابله با آتش‌سوزی و اطفای حریق، مساحت عرصه‌های آتش‌سوزی در سطح جهان رو به افزایش است. کنترل طبیعی آتش‌سوزی امکان‌پذیر نیست، اما با تهیه نقشه‌های نواحی دارای خطر آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی برای این نواحی، می‌توان خطرات

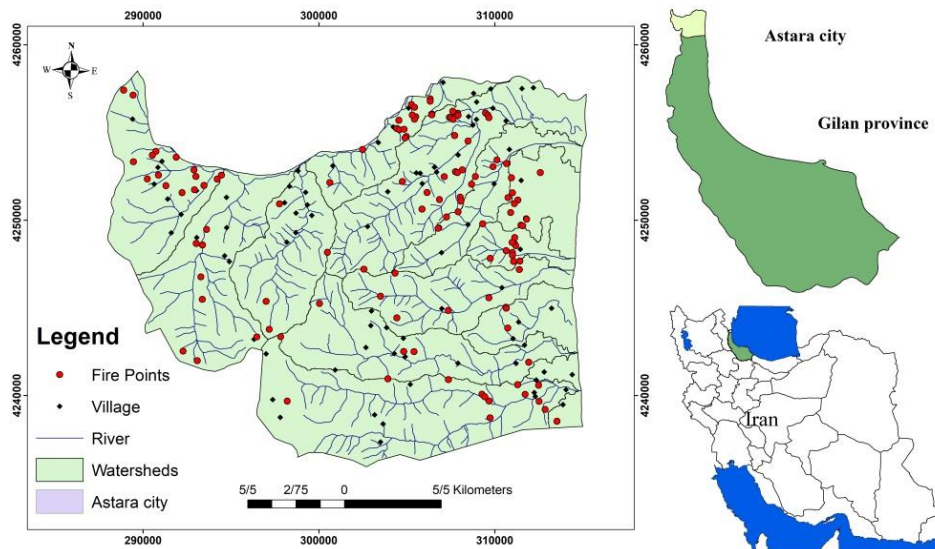
آن را تا حدودی کاهش داد (Sivrikaya *et al.*, 2024). طی ۲۰۰ سال اخیر ۶ میلیون کیلومترمربع از زمین‌های جنگلی در سطح کره زمین به‌دلیل آتش‌سوزی از بین رفته‌اند (Nobre *et al.*, 2016). ایران در بین کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا از نظر وقوع آتش‌سوزی در رتبه چهارم قرار دارد (Adab *et al.*, 2011). در طول سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ حدود ۱۱۰۴۴ هکتار (۴۸۳۰ هکتار در سال ۱۳۸۲؛ ۲۵۶۷ هکتار در سال ۱۳۸۳؛ ۲۲۲۲ هکتار در سال ۱۳۸۴ و ۱۴۲۲ هکتار در سال ۱۳۸۵) از جنگل‌های کشور دچار آتش‌سوزی شده است (Mohammadi *et al.*, 2011). در استان گیلان از سال ۱۳۹۱-۱۳۸۹ تعداد ۲۷۳ مورد آتش‌سوزی در سطح جنگل اتفاق افتاده که منجر به آتش‌سوزی ۶۷۵ هکتار از عرصه‌های جنگلی شده است (Amin Amlashi *et al.*, 2016).

در داخل کشور Moayedi و Khasmakhi (۲۰۲۳) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش FR به بررسی آتش‌سوزی در شمال تهران پرداختند، در این پژوهش از فاکتورهای اقلیمی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خطرات انسانی به‌عنوان عوامل مؤثر در آتش‌سوزی استفاده شد، نتایج نشان داد، عوامل انسانی دارای نقش بیشتری در وقوع آتش‌سوزی هستند. Zolghadry و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش امتیازدهی در GIS به تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی در جنگل سراوان گیلان پرداختند، نتایج آنها نشان داد، عرصه‌های جنوب‌غربی حوزه آبخیز، نقاط پرخطر (نقاط داغ) هستند. در این رابطه، می‌توان به مطالعات Feizizadeh و همکاران (۲۰۲۳) در جنگل‌های گچساران، Amiri و همکاران (۲۰۱۸) در جنگل‌های سردشت ارومیه و Bagherabadi و همکاران (۲۰۲۲) در جنگل‌های زاگرس کرمانشاه اشاره کرد. همچنین، از مطالعات خارج از کشور می‌توان به مطالعه Sari (۲۰۲۴) در جنوبی‌غربی ترکیه اشاره کرد، در این پژوهش برای تعیین نقاط حساسیت به آتش‌سوزی از روش‌های AHP، SAW و VIKOR در مناطق جنگلی از میر ترکیه استفاده شد. نتایج نشان داد، روش AHP با

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در شهرستان آستارا با مساحت ۴۲ هزار هکتار واقع در غرب استان گیلان با مختصات طول شرقی ۴۸ درجه و ۳۶ دقیقه و ۵۲ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۱۲ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه و ۱۲ ثانیه انجام شده است. منطقه مطالعاتی به ۱۴ حوزه آبخیز با مساحت‌های بین ۱۲۵۵ تا ۵۵۷۸ هکتار تقسیم‌بندی شده است. میانگین بارندگی و درجه حرارت این شهرستان در دوره آماری ۲۱ ساله (۱۴۰۱-۱۳۸۱) به ترتیب ۶۵۰ میلی‌متر و $13/1^{\circ}C$ است. حداکثر تعداد روزهای یخبندان ۲۹ روز است که در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند اتفاق می‌افتد. پوشش غالب این منطقه جنگلی است و گونه‌های درختان ممرز (*Carpinus betulus*) و توسکا (*Alnus subcordata*) از فراوان‌ترین گونه‌ها در پایین‌دست و گونه راش (*Fagus orientalis*) فراوان‌ترین گونه در بالادست حوزه‌های آبخیز هستند.

سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹۳ دارای بیشترین صحت است، همچنین می‌توان به مطالعات Andison (۲۰۲۴) در شمال کانادا و Ren و همکاران (۲۰۲۲) در مناطق شمال‌غربی آمریکا اشاره کرد. شهرستان آستارا با دارا بودن بخش چشمگیری از جنگل‌های هیرکانی شمال کشور، هر ساله شاهد بروز آتش‌سوزی‌های متعددی است که خسارت‌های زیادی را بر عرصه‌های جنگلی وارد می‌کند. تهیه نقشه حساسیت به آتش‌سوزی و تعیین نقاط بحرانی نسبت به آتش‌سوزی می‌تواند در مقابله با آتش‌سوزی و پیشگیری از آن بسیار کارآمد باشد. این پژوهش اولین مطالعه در رابطه با آتش‌سوزی مناطق جنگلی شهرستان آستارا است، در این پژوهش از کلیه آتش‌سوزی‌های رخ داده در شش سال اخیر (۱۳۹۵-۱۴۰۱) در سطح این شهرستان استفاده شده است، این موضوع، اعتماد به نتایج پژوهش پیش‌رو را در مقایسه با مطالعات مشابه در سایر مناطق افزایش می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

Figure 1. Location of the study area

وقوع حریق در یک منطقه به عوامل مختلفی بستگی دارد،

انتخاب فراسنج‌های مؤثر در وقوع آتش‌سوزی

عوامل اقتصادی و اجتماعی: با افزایش جمعیت و وابستگی به منابع طبیعی، میزان تصرف و بهره‌برداری از منابع طبیعی به‌ویژه عرصه‌های جنگلی افزایش یافته است. برای عامل اقتصادی و اجتماعی، پارامترهای جمعیت ساکن در روستاها، فاصله از روستا، فاصله از جاده و فاصله از زمین کشاورزی به‌عنوان عوامل مؤثر انتخاب شدند. جمعیت روستاها طبق آخرین سرشماری انجام‌شده (۱۳۹۵)، از بخش‌داری‌های شهرستان آستارا جمع‌آوری و نقشه مربوطه تهیه شد. پارامترهای فاصله از جاده و مناطق مسکونی در ایجاد آتش‌سوزی به‌صورت عمدی و ناخواسته مؤثر است. بدین‌منظور با ایجاد محدوده برای راه‌های ارتباطی و مجاورت روستاها، تأثیرگذاری این عوامل در آتش‌سوزی‌های منطقه بررسی شدند. معیار فاصله از زمین‌های کشاورزی تأثیر مثبتی بر وقوع آتش‌سوزی‌ها دارد و زمین‌های نزدیک به اراضی کشاورزی احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتری دارند. در منطقه مطالعاتی ۱۰۶ کیلومترمربع زمین کشاورزی وجود دارد که شامل ۲۴ درصد از عرصه می‌شود، این زمین‌ها بیشتر در مناطق پایین‌دست و متصل به عرصه جنگلی توسعه یافته‌اند. فاصله این معیار در منطقه مطالعاتی بین صفر تا ۵۴۹۵ متر است.

عوامل اقلیمی: مشخصات اقلیمی نیز از مهمترین عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی هستند (Jellouli & Bernoussi, 2022; Moayedi & Khasmakhi, 2023). میزان بارش، درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت باد به‌عنوان عوامل مؤثر در آتش‌سوزی منطقه انتخاب شدند. عوامل اقلیمی علاوه‌بر تأثیر مستقیم در وقوع آتش‌سوزی به‌صورت غیرمستقیم با تأثیرگذاری بر پوشش گیاهی منطقه در وقوع آتش‌سوزی مؤثر است. اطلاعات اقلیمی از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری و نقشه بارش، درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت باد منطقه تهیه شد.

عوامل پوشش گیاهی: پوشش گیاهی به‌عنوان اصلی‌ترین ماده سوختی از اهمیت بالایی در هر آتش‌سوزی برخوردار است (Kim et al., 2019). در کاربری جنگل، با بالا بودن میزان مواد سوختی در دسترس، شدت آتش‌سوزی بیشتر

میزان تأثیرگذاری این عوامل در مناطق مختلف، متفاوت است. در منطقه مطالعاتی عوامل توپوگرافی، اقتصادی-اجتماعی، اقلیم و پوشش گیاهی به‌عنوان معیارهای اصلی مؤثر در آتش‌سوزی انتخاب شدند. این عوامل با حضور در آتش‌سوزی‌های به‌وقوع پیوسته در منطقه و ارزیابی پرسش‌نامه‌های توزیع‌شده بین کارشناسان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان و همیاران طبیعت منطقه تهیه شدند.

عوامل توپوگرافیک: مشخصات توپوگرافیکی از مهمترین عوامل در وقوع و گسترش آتش‌سوزی‌های منطقه است (Li et al., 2022). از میان عوامل توپوگرافیکی، پارامترهای شیب، جهت شیب، ارتفاع و رطوبت توپوگرافیکی (TWI) به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی انتخاب شدند. پارامتر شیب منطقه در میزان و جهت گسترش آتش‌سوزی مؤثر است، همچنین در شیب‌های تند میزان خسارت و تخریب وارده بر عرصه‌های سوخته‌شده بیشتر است (Vadrevu et al., 2009; Chandra, 2005). جهات جغرافیایی با تأثیر در تابش دریافتی دامنه‌ها و خشکی منطقه در میزان خسارت آتش‌سوزی مؤثر هستند (Ren et al., 2022). ارتفاع منطقه نیز با تأثیر بر عواملی مانند نوع پوشش گیاهی، میکروکلیم و رطوبت منطقه در آتش‌سوزی منطقه مؤثر است. شاخص رطوبت توپوگرافی با توجه به تأثیرگذار بودن در ایجاد و گسترش آتش‌سوزی از شاخص‌های مؤثر بر آتش‌سوزی در حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود (Kim et al., 2019; Moayedi & Khasmakhi, 2023). شاخص رطوبت توپوگرافی با توجه به رابطه زیر تعریف می‌شود. برای تهیه این نقشه‌ها از نرم‌افزار (SAGA GIS 2) استفاده شد. نقشه‌های حاصل با توجه به خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه به ۵ کلاس تقسیم‌بندی شد.

$$TWI = Ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن AS سطح ویژه حوزه آبخیز و β شیب زمین (برحسب درجه) است.

معروف‌ترین روش تصمیم‌گیری چند شاخصه است که توسط آل ساعتی در دهه ۱۹۷۰ ابداع شد (Savari et al., 2023). این روش در بین روش‌های MCDM به دلیل درک ساده آن شایع‌تر است و کاربرد فراوانی دارد (Calabrese et al., 2019) و ظرفیت حل مسائل پیچیده را در زمینه‌های مختلف کمی و کیفی دارد (Kermani Rajabi & Mahdavi, 2024).

در این روش وزن و اهمیت نسبی معیار اصلی توپوگرافیک با معیارهای فرعی شیب، جهت و ارتفاع و معیار اصلی اقلیم با معیارهای فرعی بارندگی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد و معیار اصلی پوشش گیاهی با معیار فرعی کاربری اراضی و NDVI و معیار اصلی خطر انسانی با معیارهای فرعی جمعیت، فاصله از روستا، فاصله از جاده و فاصله از زمین کشاورزی با مقایسه زوجی تعیین و ماتریس مقایسات زوجی برای شاخص‌ها تنظیم شد. در این حالت، هر ارزش بر جمع مقادیر ستون مربوطه تقسیم و میانگین سطرها تعیین شد و به این صورت وزن‌های موردنظر تصمیم‌گیرنده تهیه شدند.

نسبت سازگاری

هدف از محاسبه نرخ ناسازگاری، تعیین صحت وزن‌های محاسبه‌شده برای معیارها و زیرمعیارهاست. بدین منظور وزن نرمال میانگین هر معیار در ارزش‌های نسبت‌داده‌شده در سطرهای ماتریس مقایسه زوجی معیارها ضرب می‌شود. براین اساس، مجموع بردارهای پایبندی بر تعداد معیارهای n تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از رابطه زیر شاخص سازگاری (CI) ماتریس برای اطمینان از انسجام قضاوت‌ها در مقایسه زوجی، محاسبه می‌شود.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس A است. مقدار لاندا با استفاده از میانگین ارزش‌های بردار پایبندی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

است که منجر به تخریب خاک نیز می‌شود (Sivrikaya et al., 2024). در این پژوهش پارامترهای نوع کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به عنوان عوامل مؤثر انتخاب شدند. پارامتر کاربری اراضی از دفتر فنی و مهندسی سازمان جنگل‌ها و مراتع تهیه و برای تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استفاده شد. نقشه شاخص پوشش گیاهی تهیه‌شده برای منطقه، از طریق رابطه (۲) محاسبه شد، برای این منظور در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 از دستور الگوریتم NDVI و از تصاویر باندهای ۴ و ۵ ماهواره لندست ۸ استفاده شد.

$$NDVI = \frac{OLI^{+5} - OLI^{+4}}{OLI^{+5} + OLI^{+4}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن OLI^{+5} و OLI^{+4} به ترتیب مربوط به باندهای ۴ و ۵ تصویر ماهواره لندست ۸ هستند.

بررسی وقوع آتش‌سوزی‌های گذشته برای برآورد آتش‌سوزی‌های آینده در منطقه مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل رخداد گذشته آتش‌سوزی‌ها ضروریست (Sari, 2024). شهرستان آستارا با تراکم بالایی پوشش جنگلی، سالانه شاهد آتش‌سوزی‌های سنگین است، مثلاً در سال ۱۳۹۵ تعداد ۱۳ مورد آتش‌سوزی گزارش شده که در اثر آن مساحتی بیش از ۲۷ هکتار از اراضی جنگلی تخریب شده، البته علت اصلی این آتش‌سوزی‌ها گزارش نشده است. برای تعیین حساسیت به آتش‌سوزی مناطق با توجه به سوانح رخ داده در منطقه، مختصات ۱۳۰ نقطه آتش‌سوزی از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۱ (در سال‌های قبل از ۱۳۹۵ مختصات آتش‌سوزی در اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان آستارا برداشت نشده است) در منطقه مطالعاتی تعیین شدند که ۷۰ درصد نقاط مشاهداتی در مرحله مدل‌سازی (۹۱ واقعه) و ۳۰ درصد نقاط (۳۹ واقعه) برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شدند (Mosavi et al., 2022).

تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytical Hierarchy Process)

بزرگ‌تر باشد، بیانگر اهمیت یا نقش بیشتر آن کلاس در فاکتور مربوطه در وقوع آتش‌سوزی است. نسبت فراوانی برای یک طبقه یا کلاس مشخص از یک فاکتور معین (مثلاً شیب)، از رابطه زیر قابل محاسبه است (Shafiei *et al.*, 2015).

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad \text{رابطه ۵}$$

FR همان نسبت فراوانی وقوع آتش‌سوزی است که بیانگر میزان تأثیر هر کلاس از هر پارامتر است. A تعداد آتش‌سوزی در کلاس مورد نظر، B تعداد کل آتش‌سوزی‌های موجود در منطقه، C تعداد پیکسل‌های کلاس مورد نظر و D تعداد کل پیکسل‌های مربوط به فاکتور مربوطه (مثلاً شیب) است.

شاخص پتانسیل وقوع آتش‌سوزی برای یک سلول، برابر مجموع نسبت فراوانی آن سلول در تمام فاکتورهاست. اگر تعداد M فاکتور مؤثر وجود داشته باشد، شاخص حساسیت وقوع آتش‌سوزی (FPI) به شرح زیر به دست می‌آید (Golshan *et al.*, 2018).

$$FPI_{FR} = \sum_{i=1}^M FR_i \quad (i=1,2,\dots,M) \quad \text{رابطه ۶}$$

(False Positive) و خطای نوع دوم یا مثبت حقیقی (True negative) برای هر ارزش احتمالاتی است (Omid *et al.*, 2020). سطح زیرمنحنی (AUC) برای هر مدل نشان‌دهنده دقت و عملکرد مدل در تخمین درست وقوع یا عدم وقوع مخاطره در آینده است (Golshan *et al.*, 2018).

نتایج

در این پژوهش برای مدل‌سازی حساسیت به آتش‌سوزی از ۴ معیار اصلی و ۱۰ معیار ثانویه استفاده شد. نقشه به‌دست‌آمده برای معیارهای موردبررسی در شکل ۲ آورده شده‌است.

$$CR = \frac{CI}{IR} < 0.1 \quad \text{رابطه ۴}$$

حاصل رابطه بالا باید کمتر یا مساوی ۰/۱ باشد، در صورتی که بالاتر از این مقدار باشد، نشان‌دهنده غیرقابل‌قبول بودن نتایج به‌دست‌آمده است (Li *et al.*, 2022).

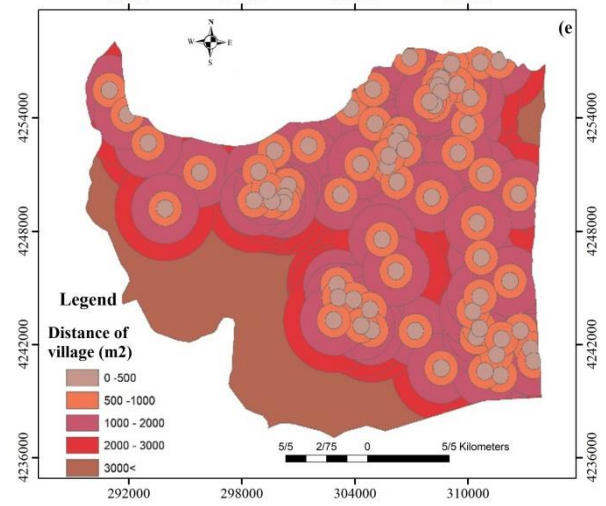
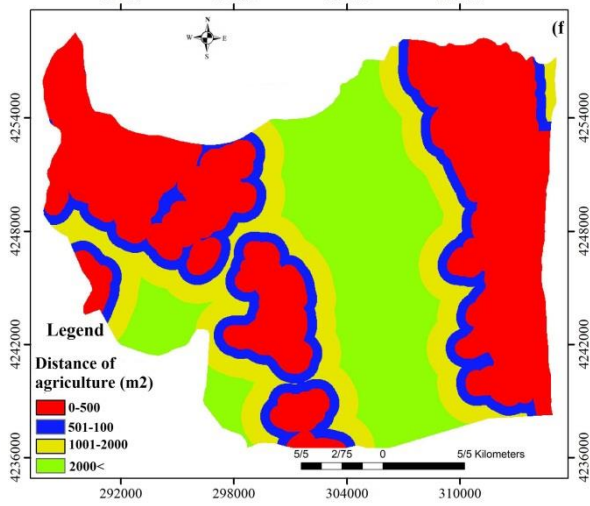
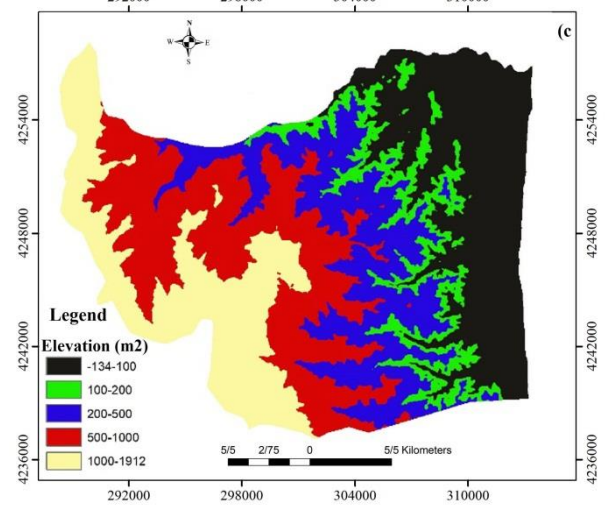
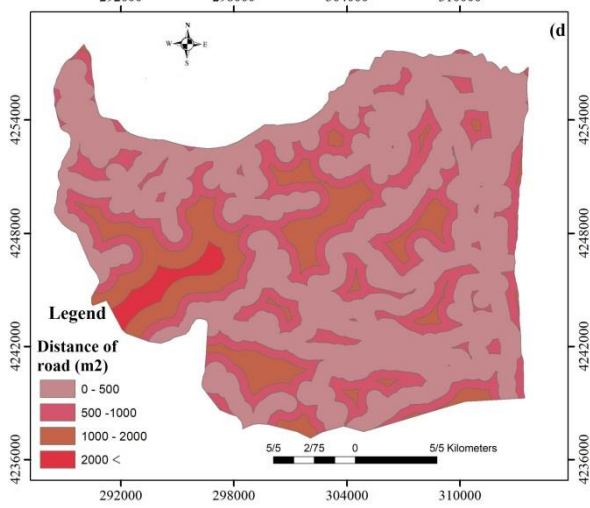
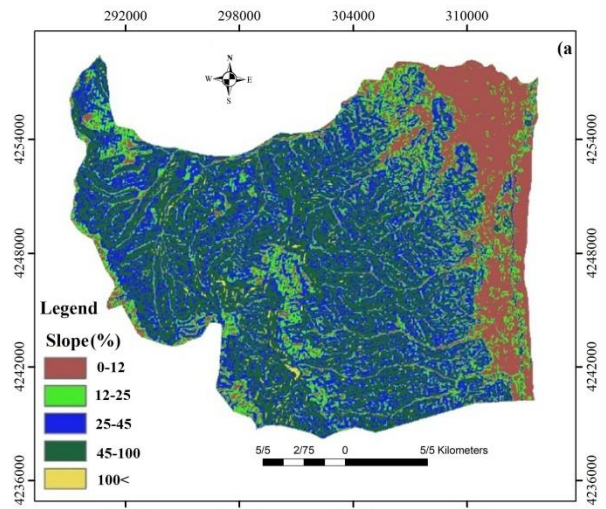
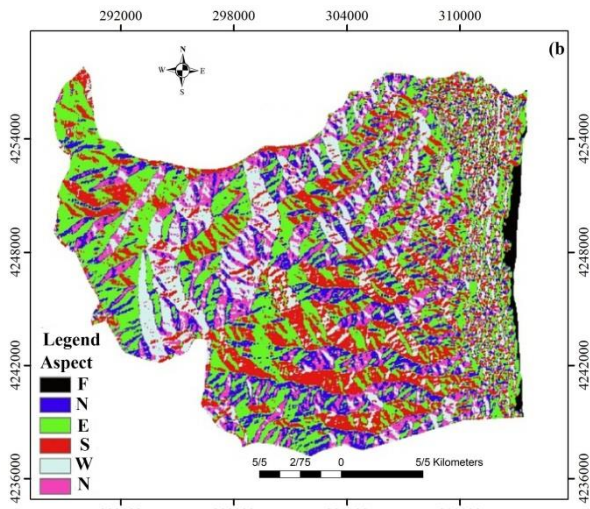
روش نسبت فراوانی (Frequency Ratio)

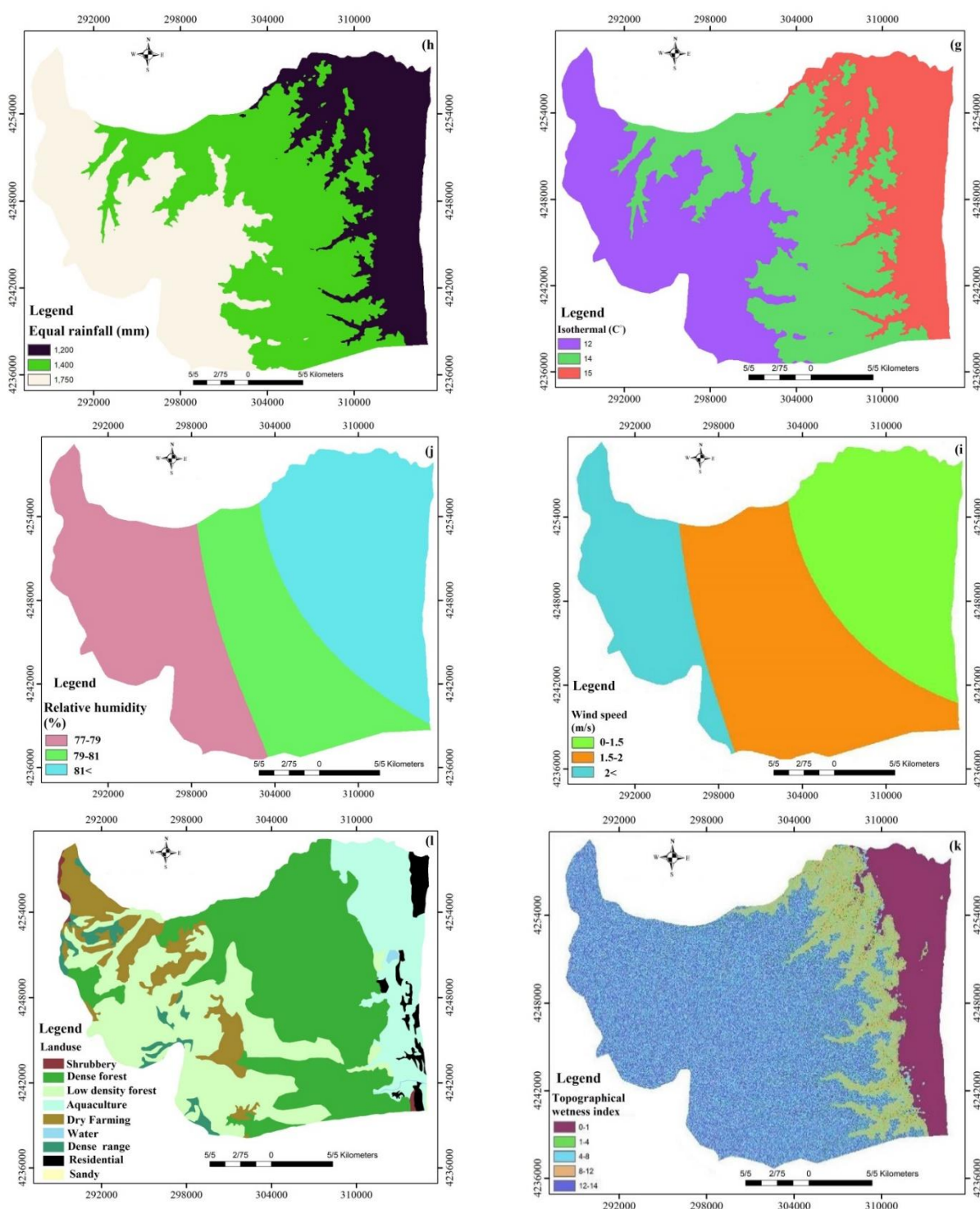
نسبت فراوانی، احتمال ظهور یک ویژگی یا پدیده‌ای خاص را نشان می‌دهد، یا به عبارت دیگر این روش سطح همبستگی بین موقعیت‌های ثبت‌شده را مشخص می‌نماید (Tshering *et al.*, 2020; Golshan *et al.*, 2018). در این پژوهش معیارهای شیب، جهت، ارتفاع، بارندگی، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، کاربری اراضی، NDVI، جمعیت، فاصله از روستا، فاصله از جاده و فاصله از زمین کشاورزی با احتمال ظهور واقعه آتش‌سوزی بررسی شد. هرچقدر مقدار این نسبت در یک طبقه یا کلاس یک فاکتور مشخص

در نهایت نرخ‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس با استفاده از این روش در GIS برای لایه‌های مربوطه اعمال و با استفاده از روش محاسبات رستری (Raster Calculator) نقشه پیش‌بینی آتش‌سوزی حوزه‌های آبخیز آستارا تهیه شد.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

نتایج حاصل از روش‌های به‌کاررفته، با استفاده از شاخص ROC (Receiver Operating Characteristic) و ۳۰ درصد وقایع آتش‌سوزی بررسی شدند. منحنی ROC یک نمایش تصویری از موازنه خطای نوع اول یا مثبت غیرحقیقی





شکل ۲- نقشه عوامل مؤثر مورد مطالعه در وقوع آتش‌سوزی: الف) شیب، ب) جهت، پ) ارتفاع، ت) فاصله از جاده، ث) فاصله از روستا، ج) فاصله از مناطق کشاورزی، چ) خطوط هم‌باران، ح) خطوط هم‌دما، خ) سرعت باد، د) رطوبت نسبی، ذ) شاخص رطوبت توپوگرافیک، ر) کاربری اراضی

Figure 2. Map of the effective factors studied in the occurrence of fire a) Slope, b) Direction, c) Height, d) Distance from the road, e) Distance from the village, f) Distance from agriculture g) Population, h) Isohyet, i) Isothermal, j) Wind speed, k) Humidity, l) Topographic humidity index, m) Land use

شاخص خطر انسانی که از ترکیب نقشه‌های فاصله از جاده، فاصله از روستا، فاصله از زمین کشاورزی و جمعیت ساکن به دست آمد، T شاخص توپوگرافی از تلفیق نقشه‌های درصد شیب، جهت دامنه، ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافیک تهیه شد، C شاخص اقلیمی که از تلفیق نقشه‌های بارندگی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد به دست آمد و VD شاخص تراکم پوشش گیاهی که از ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی و شاخص NDVI تهیه شد. همچنین، با استفاده از داده‌های مشاهداتی آتش‌سوزی و روش فراوانی نسبی، پتانسیل هر کلاس برای معیارهای مختلف محاسبه شد که نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- وزن عوامل مختلف مؤثر در وقوع آتش‌سوزی در منطقه مطالعاتی با استفاده از روش AHP و FR

Table 1. The weight of different factors affecting the occurrence of fire in the study area

Variable	Sub-variable	Classes	Weight (AHP)	Weight (FR)	Variable	Sub-variable	Classes	Weight (AHP)	Weight (FR)	
Human Risk (0.591)	Population (0.062)	30	0.085	0.74	Topography (0.119)	Slope (0.082)	0-12	0.016	0.00	
		120	0.226	1.02			12-25	0.053	1.02	
		210	0.363	0.71			25-45	0.427	0.78	
		620	0.314	1.61			45-100	0.294	1.19	
		1055	0.012	0.4			100<	0.21	3.42	
	Village Distance (0.436)	0-500	0.376	0.32		Aspect (0.55)	Flat	0.005	0.86	
		501-1000	0.264	0.27			North	0.051	1.07	
		1001-2000	0.228	1.01			East	0.324	0.89	
		2001-3000	0.121	1.73			South	0.546	1.16	
		3000<	0.011	1.6			West	0.074	1.09	
Road Distance (0.314)	0-500	0.427	1.17	Elevation (0.368)	0>	0.075	1.57			
	501-1000	0.208	0.86		0-100	0.093	2.15			
	1001-2000	0.184	0.53		101-200	0.358	0.51			
	2000<	0.181	0.46		201-500	0.393	0.75			
Agricultural land Distance (0.188)	0-500	0.526	1.24	501-1000	0.081	0.54				
	Landuse (0.875)	Irrigation Dry	Shrubs	0.201	0.8	TWI (0.105)	0-1	0.351	0.00	
			Density	0.346	0.34		1-4	0.24	0.16	
Middle			0.295	0.33	4-8		0.169	0.90		
Land cover (0.228)	Water Range	Residential	8-12	0.131	3.85	Temperature (0.308)	12-14	0.109	1.00	
			1001-2000	0.001	0.00		1001-	0.551	1.57	
			2000<	0.008	0.56		Rainfall (0.242)	1201-	0.324	0.94
	Sandy land	NDVI (0.143)	Low	1401-	0.125	0.65	Humidity (0.112)	12	0.211	0.65
				Water	0.00	0.73		14	0.323	0.94
				Range	0.145	6.06		15	0.466	1.57
				Residential	0.00	0.00		77-79	0.451	0.36
Sandy land	Middle	High	80-81	0.298	0.16	Wind (0.233)	81<	0.251	0.1	
			Sandy land	0.004	0.62		0-1.5	0.126	0.13	
			NDVI	0.2>	5.23		1.5-2	0.302	0.15	
Low	Middle	High	2<	0.572	0.23					
			Middle	0.2-0.5	1.28					
			High	0.5-0.75	0.8					

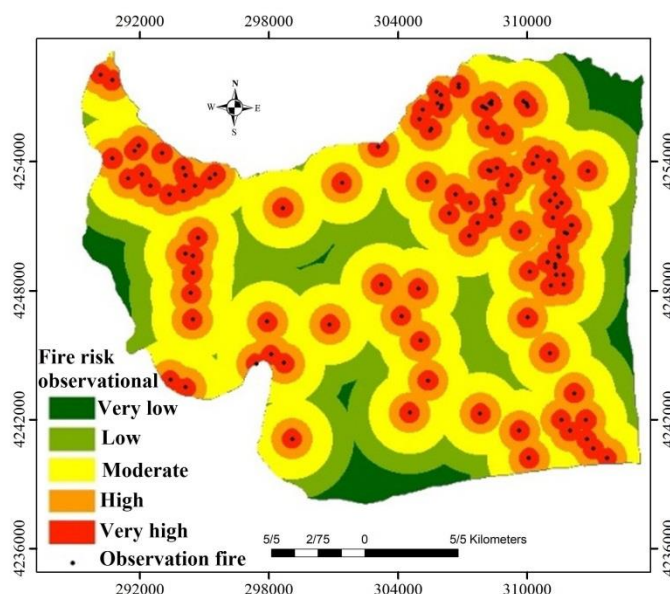
در روش AHP نرخ ناسازگاری و وزن پارامترهای مختلف مورد استفاده در منطقه مطالعاتی در ۳ طبقه اولیه، ثانویه و زیرکلاس‌ها برابر با ۰/۰۵ به دست آمد که با توجه به کمتر بودن از مقدار ۰/۱ نشان‌دهنده سازگاری پارامترهای مورد استفاده است. رابطه حساسیت به خطر آتش‌سوزی (رابطه ۷) با استفاده از ترکیب معیارهای مختلف براساس وزن‌های به‌دست آمده تهیه شد (جدول ۱).

$$FDI = HR * 0.591 + T * 0.119 + VD * 0.098 + C * 0.053$$

در این رابطه FDI شاخص خطر آتش‌سوزی است، HR

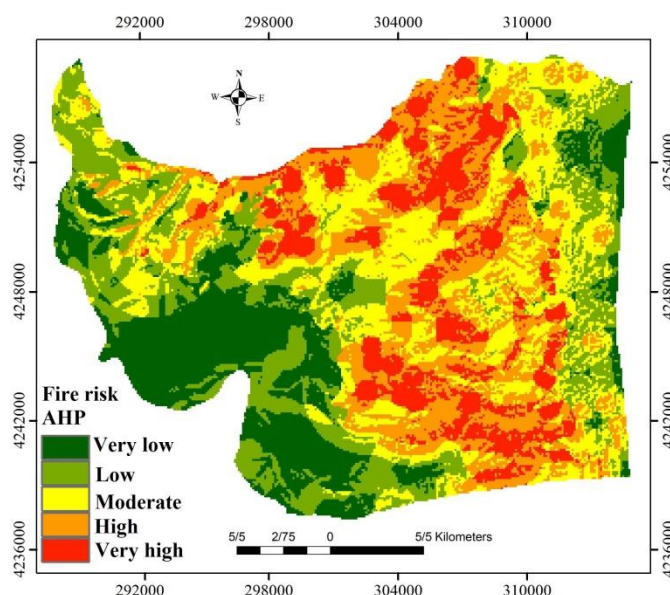
آتش‌سوزی و منحنی ROC استفاده شد (شکل ۴). وقایع استفاده شده برای صحت‌سنجی مدل در مرحله مدل‌سازی به کار گرفته نشده بودند. نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها نشان داد، روش AHP دارای سطح زیرمنحنی برابر با $0/۸۲۶$ و روش FR دارای سطح زیرمنحنی برابر با $0/۸۹۴$ است.

در هر دو روش با اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده روی معیارهای مطالعاتی، نقشه وزن‌دار تهیه شد که با تلفیق این نقشه‌ها با یکدیگر نقشه حساسیت به آتش‌سوزی تهیه و به پنج طبقه با حساسیت بسیار کم تا بسیار زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۳). به‌منظور تعیین صحت نتایج، از ۳۰ درصد وقایع



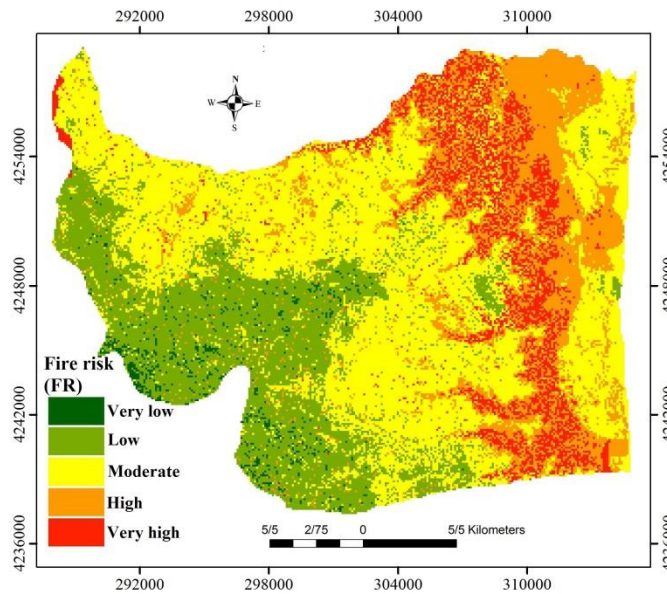
شکل ۳- نقشه مشاهداتی خطر آتش‌سوزی

Figure 3. Observational fire risk map



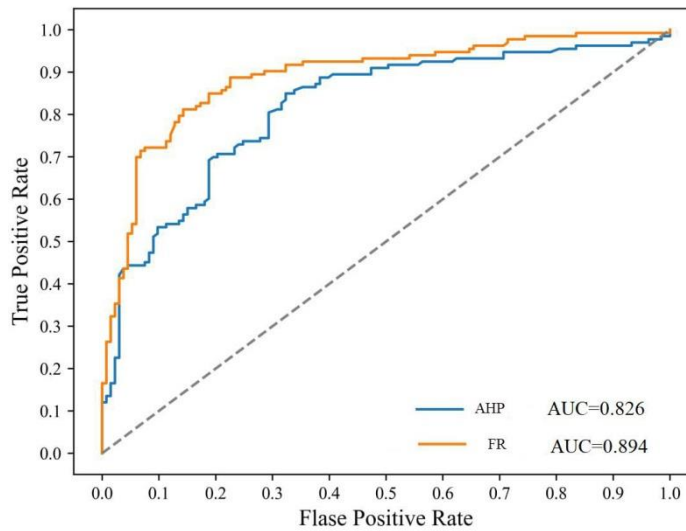
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با روش AHP

Figure 4. Fire risk zoning map with AHP method



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با روش FR

Figure 5. Fire risk zoning map with FR method



شکل ۶- اعتبارسنجی نتایج با منحنی ROC

Figure 6. Validation results using of ROC curve

منحنی در هر دو روش بیشتر از ۰/۸ است، نتایج در هر دو مدل نشان‌دهنده عملکرد خوب است (Sari, 2024; Omidi *et al.*, 2020). براساس مقادیر AUC مدل FR نسبت به مدل AHP دارای دقت بیشتری در تهیه نقشه مناطق مستعد آتش‌سوزی است، بنابراین استفاده از مدل FR توصیه می‌شود. ضعف مدل AHP به دلیل خطاهای احتمالی در

بحث

در این مطالعه دو مدل بسیار کارآمد و قوی برای پیش‌بینی عرصه‌های حساس به آتش‌سوزی در سطح حوزه‌های آبخیز شهرستان آستارا بررسی و مقایسه شدند. مقدار AUC در مدل FR برابر با ۰/۸۹۶ و در مدل AHP برابر با ۰/۸۲۶ به دست آمد که با توجه به اینکه سطح زیر

Mohammadi و همکاران (۲۰۱۱) در استان کرمانشاه مطابقت دارد. در بین عوامل اقلیمی، زیرمعیار دما با وزن ۰/۳۰۸ نسبت به زیرمعیارهای بارندگی و سرعت باد به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۴۲ و ۰/۲۳۳ دارای تأثیرگذاری بیشتری در آتش‌سوزی‌های منطقه است که با مطالعات Moayedی و Khasmakhi (۲۰۲۳) و Jellouli و Bernoussi (۲۰۲۲) مطابقت دارد. بعد از معیار اصلی خطر انسانی با وزن ۰/۵۹۱، معیار اصلی پوشش گیاهی با وزن ۰/۲۲۸ دارای بیشترین تأثیر در وقوع آتش‌سوزی‌های منطقه است. در بین طبقات، زیرمعیار کاربری اراضی و کاربری جنگل مترکم دارای بیشترین وزن در وقوع آتش‌سوزی منطقه است، که در مطالعات Ren و همکاران (۲۰۲۲) و Sari (۲۰۲۴) به این موضوع اشاره شده است. در جنگل‌های منطقه مطالعاتی به دلیل طرح تنفس جنگل، درختان مسن و افتاده از سطح جنگل جمع‌آوری و برداشت نمی‌شوند (Abdollahi *et al.*, 2022)، که این موضوع می‌تواند از عوامل مؤثر در افزایش وسعت و شدت آتش‌سوزی‌های منطقه به‌ویژه در سال‌های اخیر باشد.

نقشه خطر حساسیت به آتش‌سوزی تهیه‌شده نشان می‌دهد، ۱/۸۲ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی دارای حساسیت بسیار بالا و ۲۲/۹ درصد حساسیت بالا نسبت به آتش‌سوزی دارند که این مناطق غالباً در حوزه‌های آبخیز شماره ۱، ۴ و ۷ در بخش شمالی و جنوب‌شرقی شهرستان آستارا واقع شده‌اند. طی بررسی نقشه حساسیت خطر آتش‌سوزی با منحنی ROC، سطح زیر منحنی در هر دو روش بالاتر از ۰/۸ است که نشان‌دهنده دقت و صحت قابل‌قبول نقشه تهیه‌شده است که با مطالعات Sari (۲۰۲۴)، Moayedی و Khasmakhi (۲۰۲۳)، Li و همکاران (۲۰۲۲) و Omidی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

آتش‌سوزی در مناطق جنگلی باعث نابودی جنگل‌ها، تهدید محیط‌زیست، از بین رفتن ثروت جوامع محلی و

مقایسه زوجی معیارهای مطالعاتی است (Tshering *et al.*, 2020).

از زیرمعیارهای توپوگرافی، زیرمعیار جهت شیب با ارزش ۰/۵۵ دارای بیشترین تأثیر در آتش‌سوزی بوده است که با نتایج Najafi و همکاران (۲۰۱۵) در پارک باغ یزد مطابقت دارد و در بین زیرمعیارهای جهت شیب، جهت جنوبی با ارزش ۰/۵۴۶ دارای بیشترین تأثیر است. این جهت به دلیل دریافت نور بیشتر با زاویه تند دارای رطوبت کمتر و خشک‌تر و برای آتش‌سوزی مستعدتر است (Feizizadeh *et al.*, 2023; Jianning *et al.*, 2021). شیب ۴۵-۲۵ درصد با ارزش ۰/۴۲۷ دارای بیشترین تأثیر است که می‌تواند به دلیل داشتن پوشش گیاهی مناسب برای آتش‌سوزی باشد (Najafi *et al.*, 2015; Bagherabadi *et al.*, 2022). در بین طبقات ارتفاعی، طبقه ۵۰۰-۱۰۰۰ با وزن ۰/۳۹۳ دارای بیشترین تأثیر است که با مطالعات Tavakoli (۲۰۱۱) در استان چهارمحال و بختیاری و Eskandari (۲۰۱۵) در استان مازندران مطابقت دارد. در بین عوامل خطر انسانی زیرمعیار فاصله از روستا با وزن ۰/۴۳۶ نسبت به زیرمعیار فاصله از جاده با وزن ۰/۳۱۴ دارای تأثیر بیشتری است که با نتایج Zarekar و همکاران (۲۰۱۳) در استان گیلان و Li و همکاران (۲۰۲۲) در استان فوجی چین مطابقت دارد. از دلایل این موضوع می‌توان به آتش‌سوزی‌های عمدی برای افزایش حاصلخیزی خاک و تصرف اراضی جنگلی در مناطق حاشیه روستا اشاره کرد. در مطالعات Najafi و همکاران (۲۰۱۵) در استان یزد، عامل فاصله از جاده نسبت به فاصله از روستا دارای وزن بیشتری است که عوامل تراکم پایین پوشش گیاهی در نواحی اطراف روستا و خاموش کردن سریع آتش توسط اهالی روستایی را دلیل این موضوع ذکر کرده‌اند، که با نتایج این پژوهش به دلیل بالا بودن پوشش گیاهی در نواحی اطراف روستا و عدم امکان خاموش کردن سریع آتش به دلیل بالا بودن تراکم درختان جنگلی و مواد سوختنی مطابقت ندارد. در این پژوهش، تأثیر عامل جمعیت ساکن در روستاها نیز به‌عنوان زیرمعیار عوامل انسانی بررسی شد که این عامل با وزن ۰/۰۶۲ دارای کمترین تأثیر است که با نتایج

آتش‌سوزی در منطقه مطالعاتی است. در این شهرستان تمرکز آتش‌سوزی‌ها بیشتر در بخش شمالی و جنوب‌شرقی است که با مدیریت مناسب، امکان اطفای سریع این آتش‌سوزی‌ها وجود دارد، در حوزه‌های آبخیز شماره ۱، ۴ و ۷ که حساسیت بالایی نسبت به آتش‌سوزی دارند، تعداد روستاها بیشتر و فاصله روستاها از جاده‌های ارتباطی کمتر است، بنابراین، در روستاهای واقع در این مناطق با جلب مشارکت مردمی و تجهیز دهیاری‌ها به ادوات اطفای حریق می‌توان از گسترش سریع آتش‌سوزی‌ها جلوگیری کرد.

سپاسگزاری

مقاله پیش‌رو مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۱۴۰۱/د/۹/۲۵۶۵۹ از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های مادی و معنوی به‌عمل‌آمده توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی قدردانی و تشکر نمایند.

بسیاری از مشکلات دیگر می‌شود. شهرستان آستارا با ۴۲ هزار هکتار پوشش جنگلی متراکم و نیمه‌متراکم بخش قابل‌توجهی از جنگل‌های هیرکانی واقع در استان گیلان را به خود اختصاص داده است که هر ساله در معرض آتش‌سوزی‌های شدید است. در این پژوهش با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، GIS و اطلاعات مکانی ۱۳۰ حادثه آتش‌سوزی از سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۵، به بررسی این مسئله و تعیین مناطق بحرانی از لحاظ آتش‌سوزی پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، استفاده از روش‌های مطالعاتی در مشخص نمودن مناطق حساس به آتش‌سوزی می‌تواند بسیار کارآمد باشد. طبق نتایج به‌دست‌آمده ۲۵ درصد از سطح منطقه معادل با ۱۰۵۰۰ هکتار در طبقه پرخطر، از لحاظ حساسیت به آتش‌سوزی واقع شده است. در مناطق بالادست حوزه‌های آبخیز به‌دلیل شرایط اقلیمی، فاصله زیاد با اماکن مسکونی و سایر عوامل مؤثر تعداد آتش‌سوزی‌ها بسیار کم است. در سال‌های اخیر در مناطق بالادست نیز چندین مورد آتش‌سوزی مشاهده شده که نشان‌دهنده گسترش پهنه

References

- Abdollahi, M., Hosseini, S.A. and Najafi, A., 2022. Predicting the decline of forest road pavement during the logging ban period in the north mountain forests of Iran. *Natural Environmental*, 75(3): 502-514 (In Persian).
- Adab, H., Kanniah, D. and Solaimani, K., 2011. GIS based Probability Assessment of fire risk in grassland and forested landscapes of Golestan province, Iran. *International Conference on Environmental and Computer Science, IPCBEE vol.19: 170-175*, IACSIT Press, Singapore.
- Almedia, R., 1994. Forest fire risk areas and definition of the prevention priority planning actions using GIS. *Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographic Information Systems, EGIS 94*. Utrecht: EGIS Foundation, 2: 1700-1706.
- Amin Amlashi, M., Jafari, M., Ghodskhah, M., Salehi, M. and Alidoost, M., 2016. A preliminary study of fire-resistant trees in the forests of Guilan province (Case study: Noqlebar Forest, Watershed number 18 Reshterood). *Forest and Poplar Research*, 24(3): 463-473. (In Persian).
- Amiri, T., Banj Shafiei, A., Erfanian, M., Hosseinzadeh, O. and Beygiheidarlou, H., 2018. Locating suitable areas for forest fire fighting stations in Sardasht, NW Iran. *Iranian Journal of Forest*, 10(3): 319-335.
- Andison, D.W., 2024. A new Meso-Scale coarse-filter indicator for the Canadian boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 553: 121624.
- Bagherabadi, R., Shikhkanloo Milan, F. and Zarei Mohammadabad, M., 2022. Evaluation of fire risk in the Zagros forests (Case study: Dalahu County). *Ecosystem Management*, 1(3): 60-72.
- Calabrese, A., Costa, R., Levaldi, N. and Menichini, T., 2019. Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the

- selection of relevant sustainability issues. *Technological Forecasting and Social Change*, 139: 155-168.
- Chandra, S., 2005. Application of remote sensing and GIS technology in forest fire risk modeling and Management of forest fires: A case study in the Garhwal Himalayan Region: 1239-1254. In: van Oosterom, P., Zlatanova, S. and Fendel, E.M., (Eds.). *Geo-information for Disaster Management*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27468-5_86
- Eskandari, S., 2015. Evaluation of forest fire risk potential using Dong model, case study: District three of Neka-Zalemroud forests. *Geographical Planning of Space quarterly Journal*, 15(5): 189-203.
- Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Mohammadnejad, V., Khallaghi, H., Sharifi, A. and Karkarg, B.G., 2023. An integrated approach of artificial intelligence and geoinformation techniques applied to forest fire risk modeling in Gachsaran, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(6): 1369-1391.
- Golshan, M., Esmali Ouri, A. and Khosravi, K., 2018. Flood susceptibility assessments using frequency ratio model in Talar watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(15): 1-16 (In Persian).
- Jellouli, O. and Bernoussi, A.S., 2022. The impact of dynamic wind flow behavior on forest fire spread using cellular automata: Application to the watershed BOUKHALEF. *Ecological Modeling*, 468: 109938.
- Jianning, R., Erin, J.H., John T.A., Crystal A.K., Christina, L.T., Maureen C.K., Mingliang L. and Jennifer C.A., 2021. Projecting future fire regimes in a semiarid watershed of the inland northwestern United States, vegetation productivity and fuel dynamics. *Earths Future*: 1-23.
- Kermani Rajabi, A. and Mahdavi, A., 2024. Prioritizing the influencing factors of customer satisfaction in electronic service systems using fuzzy Delphi hierarchical analysis criteria. *Accounting and Management Perspective*, 7(89): 118-129.
- Kim, S.J., Lim, C.H., Kim, G.S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O. and Lee, W.K., 2019. Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing*, 11(1): 86.
- Li, J., Zhu, C. and Li, Q., 2022. Application of AHP in WUI fire risk assessment. *ITM Web of Conferences*, 47(03039): 1-6.
- Moayedi, H. and Khasmakhi, M.A.S.A., 2023. Wildfire susceptibility mapping using two empowered machine learning algorithms. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(1): 49-72.
- Mohammadi, F., Shabaniyan, N., Pourhashemi, H. and Fatehi, P., 2011. Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. *Forest and Poplar Research*, 4(18): 569-586.
- Mosavi, A., Golshan, M., Janizadeh, S., Choubin, B., Melesse, A.M. and Dineva, A.A., 2022. Ensemble models of GLM, FDA, MARS, and RF for flood and erosion susceptibility mapping: a priority assessment of sub-basins. *Geocarto International*, 37(9): 2541-2560.
- Najafi, A., Irannezhad, M., Sotodeh, A., Mokhtari, M.H. and Keiani, B., 2015. Modeling and preparation of forest fire risk map using measurement from Duro geographic information system. *Applied Ecology*, 4(14): 13-25 (In Persian).
- Nobre, C.A., Sampaio, G., Borma, L.S., Castilla-Rubio, J.C., Silva, J.S. and Cardoso, M., 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39): 10759-10768.
- Omidi, M., Mafi Gholami, D., Mahmoodi, B. and Jafari, A., 2020. Spatial modeling the probability of wildfire occurrence using frequency ratio and weight-of-evidence models. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 17(2): 125-144 (In Persian).
- Ren, J., Hanan, E., Abatzoglou, J. and Kolden, C., 2022. Projecting future fire regimes in a semiarid watershed of the Inland Northwestern United States: Interactions among Climate Change, Vegetation Productivity, and Fuel Dynamics. *Earth Future*, 1-23. <https://doi.org/10.1029/2021EF002518>
- Sari, F., 2024. Assessment of the effects of different variable weights on wildfire susceptibility. *European Journal of Forest Research*, 1-20.
- Savari, M., Limoei, M. and Eskandari, Z., 2023. Solutions to boost production in rural areas of

- Khuzestan province: application of hierarchical analysis. *Geography and human relations*, 6(3): 165-177.
- Shafiei, A., Beygi Heidarlu, H. and 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).
- Sivrikaya, F., Günlü, A., Küçük, Ö. and Ürker, O., 2024. Forest fire risk mapping with Landsat 8 OLI images: Evaluation of the potential use of vegetation indices. *Ecological Informatics*, 102461.
- Tavakoli, R., 2011. Determining the most important factors affecting the spread of fire and the zoning of fire risk in the forests and pastures of Chaharmahal and Bakhtiari province. Master's thesis, Range, Shahrekord University, 115p (In Persian).
- Tshering, K., Thinley, P., Shafapour Tehrani, M., Thinley, U. and Shabani, F., 2020. A comparison of the qualitative analytic hierarchy process and the quantitative frequency ratio techniques in predicting forest fire-prone areas in Bhutan using GIS. *Forecasting*, 2(2): 36-58.
- Vadrevu, K.P., Eaturu, A. and Badarinath, A.V.S., 2009. Fire risk evaluation using multi-criteria Analysis-a case study. *Journal of Environmental Monitoring Assessment*, 166: 223-239.
- Yin, H.W., Kong, F.H. and Li, X.Z., 2004. RS and GIS-based forest fire risk zone mapping in da hingan mountains. *Chinese Geographical Science*, 14 (3): 251-257. <https://doi.org/10.1007/s11769-003-0055-y>
- Zarekar, A., Kazemi Zamani, B., Ghorbani, S., Ashegh Moalla, M. and Jafari, H.R., 2013. Mapping spatial distribution of forest fire using MCDM and GIS (case study: three forest zones in Guilan province. *Forest and Poplar Research*, 21(2): 218-230 (In Persian).
- Zolghadry, Sh., GhodsKhah Daryaei, M., Nasirahmadi, K. and Ghajar, E., 2021. Comparison of the performance of Fuzzy C-Means and K-Medoids in modeling forest fire occurrence (Case study: Saravan forests, Gilan). *Ecology of Iranian Forest*, 9(17): 163-174 (In Persian).