



ارزیابی و پهنه‌بندی مکانی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع با کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS در زاگرس میانی

سهراب مرادی^{۱*} و ناصر احمدی ثانی^۲

^۱استادیار گروه توسعه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
^۲دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷)

چکیده

مقدمه: افزایش فراوانی و شدت آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع موضوعی بسیار نگران‌کننده است. آتش‌سوزی جنگل و مرتع فاجعه طبیعی یا انسانی رایجی است که اثر زیادی بر ساختار پوشش گیاهی، ذخیره کربن بوم‌سازگان، فون و فلور، چشم‌انداز جنگل و هجوم گونه‌های گیاهی بیگانه دارد. ارزیابی دقیق خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع و پهنه‌بندی آن می‌تواند اهمیت کاربردی زیادی در پیشگیری از آتش‌سوزی و کاهش خسارات آن در زمینه مدیریت مؤثر محیط زیست داشته باشد. هدف این پژوهش، ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع و پهنه‌بندی آن با تلفیق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و روش نسبت فراوانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در بخشی از ناحیه ریشی زاگرس میانی واقع در منطقه اورامانات (استان کرمانشاه)، به دلیل آتش‌سوزی‌های متعدد سالیان اخیر و به منظور شناسایی و اولویت‌بندی دقیق عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی انجام گرفت. معیارهای تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی جنگل و مرتع براساس نظر کارشناسان و مرور منابع شناسایی شد. در مجموع چهار معیار و دوازده زیرمعیار شامل معیار زیرساختی (فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی)، معیار بوم‌شناختی (متوسط بارندگی سالیانه، متوسط دمای ماهیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم پوشش مرتعی)، معیار اقتصادی-اجتماعی (کاربری/پوشش زمین، تراکم جمعیت) و معیار فیزیوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب و فاصله از رودخانه‌ها) با کاربرد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و مقایسه زوجی توسط ۱۳ نفر از کارشناسان و محققان (خبرگان) مرتبط با آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع، ارزیابی و وزن‌دهی شد. اهمیت نسبی طبقات مختلف زیرمعیارها نیز با استفاده از روش نسبت فراوانی محاسبه شد. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با روش ترکیب خطی وزنی نقشه‌های رقومی زیرمعیارها در محیط GIS در پنج رده خطر (خیلی کم تا خیلی زیاد) به دست آمد. راستی‌آزمایی نتایج از طریق همپوشانی با آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه پژوهش در فاصله سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵ انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که معیار اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۴۷۳ و زیرمعیار کاربری اراضی با وزن ۰/۲۵۲ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند و مهم‌ترین معیار و زیرمعیار مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی بوم‌سازگان‌های جنگلی شناخته شدند. نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی نشان داد که حدود ۵۲ درصد منطقه پژوهش در طبقه خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. همچنین براساس نتایج حاصل از روی هم‌گذاری نقشه مناطق آتش‌سوزی واقعی و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی، ۹۴/۴۱ درصد سطح مناطق آتش‌سوزی واقعی در مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد آتش‌سوزی واقع شده است که می‌تواند بیانگر ارزیابی دقیق و صحت زیاد نقشه پهنه‌بندی نهایی باشد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، این پژوهش اهمیت تهیه نقشه مناطق سوخته‌شده و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی را برجسته کرد و چارچوب جدیدی برای شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مختلف مؤثر بر آتش‌سوزی در مناطق جنگلی حساس به آتش‌سوزی اورامانات (استان کرمانشاه) ارائه داد که می‌تواند در زمینه اقدامات پیشگیری و کنترلی اولویت‌بندی‌شده برای جلوگیری از تخریب جنگل و مرتع در آینده مؤثر واقع شود.

واژه‌های کلیدی: خطر آتش‌سوزی جنگل، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی، منطقه اورامانات، نسبت فراوانی.

مقدمه

خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع را با استفاده از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ (MCDA) مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی مدل‌سازی کرده‌اند (Sari, 2021; Ju et al., 2023). ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی روشی مؤثر برای تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی است (Abedi Gheshlaghi et al., 2020; Sivrikaya & Kucuk, 2022). در منابع و پژوهش‌های مختلف، برخی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۳ (AHP) (Mohammadi et al., 2010; Akay & Sahin, 2019; Coban & Erdin, 2020; Sivrikaya & Kucuk, 2022)، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۴ (Abedi Gheshlaghi et al., 2020)، فرایند تحلیل شبکه^۵ (Goleiji et al., 2018; Abedi Gheshlaghi et al., 2020)، شبکه عصبی مصنوعی^۶ (ANN) (Satir et al., 2020)، و نسبت فراوانی^۷ (Pourtaghi et al., 2015; Beygi Heidarlou et al., 2014; Kayet et al., 2020; Abdo et al., 2022) به منظور تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی پیشنهاد شده است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های استفاده در رویکردهای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی^۸ (GIS-MCDA) است (Shahabi et al., 2014) و روش نسبت فراوانی نیز از مدل‌های آماری است که در مدل‌سازی مخاطرات محیطی مانند آتش‌سوزی در جنگل کاربرد گسترده‌ای دارد (Jaafari et al., 2019; Tuyen et al., 2021; Abdo, 2022).

پژوهش‌های مختلفی درباره ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی انجام گرفته است که از

جنگل‌ها از مهم‌ترین منابع طبیعی کره خاکی به شمار می‌روند که کارکرد مهمی در تعادل بوم‌شناختی و حفظ بوم‌سازگان‌ها دارند (Suryabhagavan et al., 2017; Akbarzadeh et al., 2016). این منبع با ارزش، امروزه در اثر عوامل متعدد انسانی و طبیعی تخریب شده است (Shafiei et al., 2015). یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب، آتش‌سوزی است که با کاهش تنوع و فراوانی گونه‌ها و رهاسازی عناصر ضروری از مواد آلی زنده و مرده بوم‌سازگان‌ها به جو و رواناب‌ها می‌تواند بر بوم‌سازگان جنگل تأثیر زیادی داشته باشد (Barlow et al., 2016; de Andrade et al., 2020; Beiranvand et al., 2023). آتش‌سوزی همچنین اثر زیادی بر ساختار پوشش گیاهی (Fernandez-Guisuraga et al., 2019; Jimeno-Llorente et al., 2023)، ذخیره کربن بوم‌سازگان (Cheng et al., 2023)، فون و فلور و چشم‌انداز جنگل (Eskandari & Eskandari, 2021) و هجوم گونه‌های گیاهی بیگانه (van Wilgen, 2010) دارد و اغلب محرکی مهم در تولید رواناب و فرسایش خاک در جنگل است (Alidoust et al., 2024).

یکی از اقدامات اصلی در مقابله با آتش، تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی برای نواحی با خطر زیاد است تا بتوان در حد امکان خطرهای آن را کاهش داد (Jaiswal et al., 2002; Dong et al., 2021; Zhao et al., 2005). اندازه‌گیری‌های سنتی به منظور ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل برای راستی‌آزمایی میدانی مفیدند، اما زمان‌بر، پرهزینه و غیردقیق‌اند (Colak & Sunar, 2020). در این زمینه، سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS)، تجزیه و تحلیل‌های سریع، ارزان و بسیار دقیقی به منظور پایش خطر و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی ارائه می‌کند (Bentekhi et al., 2020; Sari, 2021; Sivrikaya & Kucuk, 2022). در سال‌های اخیر، تصمیم‌گیران،

2. Multi-criteria decision analysis
3. Analytic hierarchy process
4. Fuzzy Analytic hierarchy process
5. Analytic network process
6. Artificial neural network
7. Frequency ratio
8. GIS-based multi-criteria decision analysis

1. Geographic information system

ارتفاع، شاخص نرمال‌شده تفاوت رطوبت (NDMI)، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، بارندگی، دما، سرعت باد، فاصله از مناطق مسکونی، جاده‌ها و رودخانه‌ها به‌عنوان عامل‌های مؤثر بر وقوع و انتشار آتش‌سوزی استفاده شد. دقت نقشه‌های حاصل از فرایند مدل‌سازی با استفاده از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی و منحنی‌های ویژگی عامل دریافت‌کننده (ROC) با سطح زیرمنحنی (AUC) بررسی شد. نتایج نشان داد که روش نسبت فراوانی با $AUC = 0/864$ بیشترین مقدار را در مقایسه با روش تحلیل سلسله‌مراتبی با $AUC = 0/838$ به دست آورد.

ناحیه رویشی زاگرس از شمال غرب تا جنوب غرب ایران پراکنده است و با پوشش ۳/۴ درصد از مساحت ایران (۵/۵ میلیون هکتار) و ۶۹ درصد فلور آن، از مهم‌ترین منابع زیستی و ذخایر ژنتیکی به شمار می‌آید (Sagheb Talebi et al., 2013; Eskandari et al., 2020). در سالیان اخیر، وقوع و گسترش آتش‌سوزی‌ها در بوم‌سازگان‌های طبیعی ایران به‌ویژه در جنگل‌های زاگرس (Mohammadi et al., 2010; Sharif et al., 2023) سبب تخریب مناطق وسیعی از ناحیه رویشی زاگرس شده است؛ به‌طوری که آتش‌سوزی از مهم‌ترین منابع خطر با پیامدهای کوتاه‌مدت و درازمدت بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی در منطقه زاگرس ایران است (Ebrahimi et al., 2017). از این‌رو تجزیه و تحلیل مکانی آتش‌سوزی ناحیه رویشی زاگرس و شناسایی مناطق با امکان خطر زیاد وقوع آتش‌سوزی، ضرورتی انکارناپذیر برای بهبود روش‌های پیشگیری و پیش‌بینی آتش‌سوزی در این ناحیه است. در پژوهش حاضر، از ترکیب فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش نسبت فراوانی با بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی دقیق عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی در بخشی از ناحیه رویشی زاگرس میانی واقع در منطقه اورامانات

جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Mohammadi et al. (2010) در بخشی از جنگل‌های پاره به تهیه نقشه نواحی دارای خطر آتش‌سوزی جنگل برپایه عامل‌های پوشش گیاهی، فیزیوگرافی، اقلیمی، انسانی و فاصله از جاده‌ها و رودخانه‌ها پرداختند. در این پژوهش، عامل‌های مؤثر در بروز و انتشار آتش‌سوزی به‌صورت زوجی مقایسه و وزن هر یک از عوامل محاسبه شد. نتایج نشان داد که ۹۰ درصد مناطق آتش‌گرفته در پهنه‌های با خطر زیاد قرار گرفته‌اند. Beygi Heidarlou et al. (2014) به تهیه نقشه نواحی با خطر زیاد آتش‌سوزی جنگل بر پایه عامل‌های ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت، متوسط بارندگی سالانه، متوسط حداکثر دمای ماهانه، کاربری و پوشش اراضی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از زمین‌های کشاورزی و تراکم جمعیت در جنگل‌های سردشت با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی پرداختند. نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده در این پژوهش به پنج طبقه خطر آتش‌سوزی جنگل، از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که ۹۸/۴۴ درصد از مناطق آتش‌گرفته در طبقه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد قرار داشتند. Kayet et al. (2020) روش‌های چندمعیاره فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی را به‌منظور پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در جنگل حفاظت‌شده ببر ملغات^۱ (MTR) در هند برپایه عامل‌های توپوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی و انسانی مقایسه کردند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با این روش‌ها و طبقه‌بندی نقشه‌های حاصل به پنج طبقه خطر از خیلی کم تا خیلی زیاد، روندهای مشابهی نسبت به یکدیگر نشان دادند. (Abdo et al., 2022) به تهیه نقشه حساسیت آتش‌سوزی جنگل با روش‌های فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه غربی سوریه پرداختند. در این پژوهش از عامل‌های شیب، جهت،

است. میانگین ارتفاع منطقه ۱۳۶۱ متر (بیشینه ۳۳۴۵ متر و کمینه ۳۹۰ متر) از سطح آب‌های آزاد است. منطقه اورامانات دارای اقلیم نیمه‌مرطوب معتدل است و منشأ بیشتر بارندگی‌های آن کوهستانی است. میانگین ریزش‌های جوی سالیانه در منطقه اورامانات ۴۵۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه آن ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است (شکل ۱).

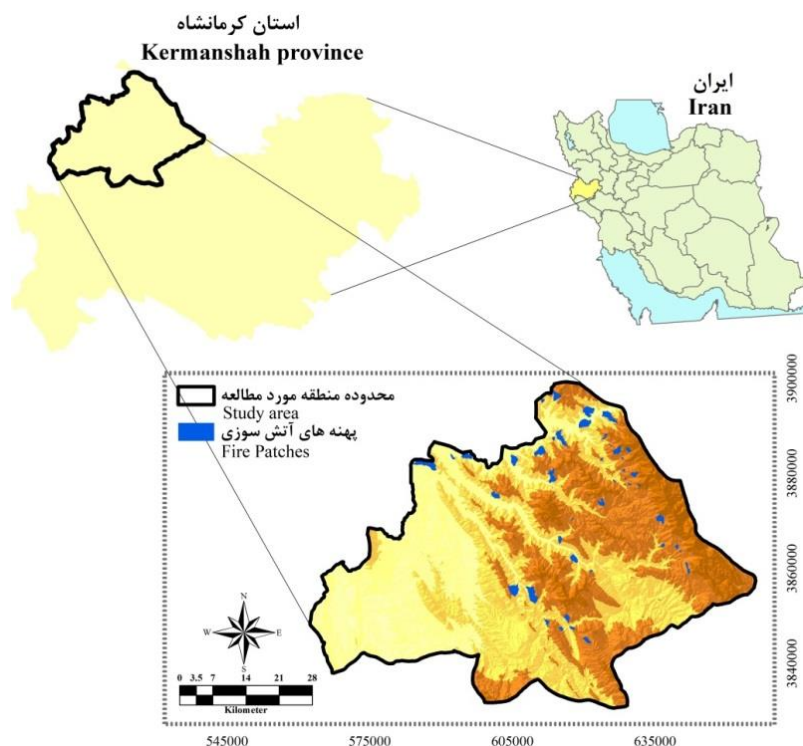
پوشش گیاهی منطقه اورامانات درختی و درختچه‌ای همراه با پوشش علفی است و مناطق مرتعی نیز قسمت زیادی از منطقه را پوشانده است. رویشگاه جنگلی آن دارای سه طبقه جنگلی انبوه، نیمه‌انبوه و تنک متشکل از گونه‌های درختی بلوط (*Quercus spp.*)، بنه (*Pistacia atlantica* Desf.)، بادام (*Amygdalus orientalis* Mill.)، کیکم (*Acer monspessulanum* L.) و گونه‌های دیگر است (Moradi et al., 2017).

(استان کرمانشاه) استفاده شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان برای پیش‌بینی و هشدار مخاطرات محیطی ناشی از آتش‌سوزی استفاده کرد تا افزون‌بر کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی، شیوه اجرای برنامه‌های توسعه در نواحی حساس به آتش‌سوزی مشخص شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش، بخشی از ناحیه ریشی زاگرس در منطقه اورامانات، ناحیه‌ای کوهستانی در شمال غربی استان کرمانشاه است که حدود ۱۷/۴ درصد مساحت کل استان را شامل می‌شود (Tavosi et al., 2014). این منطقه، بین طول‌های جغرافیایی ۳۵°۴۵' و ۳۴°۴۶' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵°۳۴' و ۳۵°۱۲' شمالی واقع شده است. مساحت منطقه ۳۵۳۰ کیلومتر مربع و محیط آن ۳۱۵ کیلومتر



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش و پهنه‌های آتش‌سوزی در فاصله سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵
Figure 1. The location of the study area and wildfire patches between 2016-2024

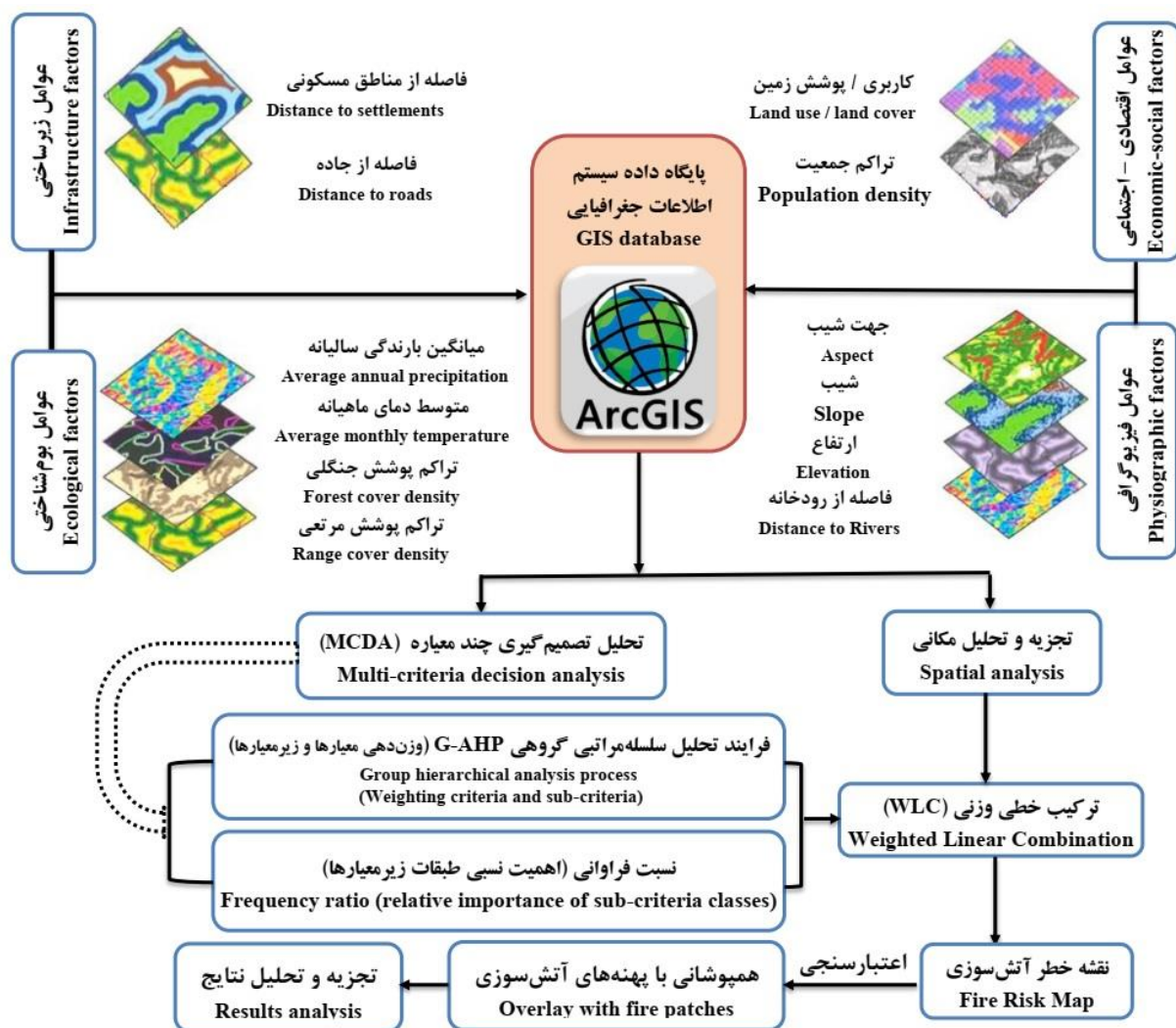
شیوه اجرای پژوهش

در این پژوهش، نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با تلفیق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و روش نسبت فراوانی با بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است. مدل اجرای پژوهش در شکل ۲ آورده شده است.

عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی (انتخاب معیارها)

در مدل‌های ارزیابی خطر آتش‌سوزی، در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در منطقه، ضروری است. در پژوهش حاضر برای تهیه نقشه خطر

آتش‌سوزی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی (G-AHP) و روش نسبت فراوانی (FR)، بنابر نظر کارشناسان و مرور منابع، از ۴ معیار اصلی (زیرساختی، بوم‌شناختی، اقتصادی-اجتماعی و فیزیوگرافی) و ۱۲ زیرمعیار (فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، تراکم پوشش ماهیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم جمعیت، ارتفاع، کاربری/پوشش زمین، تراکم جمعیت، ارتفاع، شیب، جهت شیب و فاصله از رودخانه‌ها) استفاده شد (جدول ۱).



شکل ۲- روندنمای فرایند پژوهش
Figure 2. Research process flowchart

جدول ۱- معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی در منطقه پژوهش

Table 1. Criteria and sub-criteria effective in the occurrence of fire in the study area

منابع References	زیرمعیار Sub-criteria	معیار Criteria
Beygi Heidarlou et al., (2014); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Sivrikaya and Kucuk, (2022)	فاصله از جاده Distance to roads	زیرساختی Infrastructural
Beygi Heidarlou et al., (2014); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Abdo et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022)	فاصله از مناطق مسکونی Distance to settlements	
Beygi Heidarlou et al., (2014); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022); Abdo et al., (2022)	متوسط بارندگی سالیانه Average annual precipitation	بوم‌شناختی Ecological
Beygi Heidarlou et al., (2014); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022); Abdo et al., (2022)	متوسط دمای ماهیانه Average monthly temperature	
Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022)	تراکم پوشش جنگلی Forest cover density	
Vadrevu et al. (2010); Eskandari, (2017); Dashti et al., (2022)	تراکم پوشش مرتعی Range cover density	
Beygi Heidarlou et al., (2014); Ghorbanzadeh et al., (2019); Abedi Gheshlaghi et al., (2020); Sari, (2021)	کاربری / پوشش زمین Land use / land cover	اقتصادی - اجتماعی Socio-economic
Vadrevu et al. (2010); Beygi Heidarlou et al., (2014); Sari, (2021); Zhao et al., (2021); Sivrikaya and Kucuk, (2022)	تراکم جمعیت Population density	
Jaiswal et al. (2002); Vadrevu et al. (2010); Beygi Heidarlou et al., (2014); Suryabhadgavan et al. (2016); Pourghasemi (2016); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022); Abdo et al., (2022)	شیب Slope	فیزیوگرافی Physiographic
Jaiswal et al. (2002); Vadrevu et al. (2010); Beygi Heidarlou et al., (2014); Suryabhadgavan et al. (2016); Pourghasemi (2016); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022); Abdo et al., (2022)	جهت شیب Aspect	
Jaiswal et al. (2002); Vadrevu et al. (2010); Beygi Heidarlou et al., (2014); Suryabhadgavan et al. (2016); Pourghasemi (2016); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Dashti et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022); Abdo et al., (2022)	ارتفاع Elevation	
Beygi Heidarlou et al., (2014); Pourghasemi (2016); Ghorbanzadeh et al., (2019); Kayet et al., (2020); Sari, (2021); Abdo et al., (2022); Sivrikaya and Kucuk, (2022)	فاصله از رودخانه‌ها Distance to Rivers	

عوامل زیرساختی

آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با فعالیت‌های انسان مرتبط است. نزدیکی جنگل‌ها به سکونتگاه‌های شهری و روستایی، شبکه راه‌ها و مناطق کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل زیرساختی، پتانسیل آتش‌سوزی را افزایش می‌دهند (Satir et al., 2016; Van Hoang et al., 2020; Sari, 2021; Sivrikaya & Kucuk, 2022). در پژوهش حاضر دو عامل فاصله از جاده و فاصله از مناطق مسکونی مهم‌ترین عوامل زیرساختی مؤثر بر خطر آتش‌سوزی انتخاب شدند. عامل فاصله از زمین‌های کشاورزی می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی باشد،

اما با توجه به کوهستانی بودن منطقه پژوهش و نبود زمین‌های زراعی زیاد، در این پژوهش بررسی نشد. برای تهیه نقشه طبقات فاصله از جاده‌ها، ابتدا جاده‌های منطقه مشخص شدند و در محیط GIS به فرمت وکتوری درآمدند و سپس در ۵ طبقه ۱۰۰۰-۰، ۱۰۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰۰-۳۰۰۰، ۳۰۰۰-۴۰۰۰ و بیشتر از ۴۰۰۰ متر، بافرهایی در اطراف جاده‌ها اعمال شد (شکل ۵). برای تهیه نقشه طبقات فاصله از مناطق مسکونی نیز ابتدا نقاط مناطق مسکونی منطقه پژوهش با فرمت وکتوری وارد محیط GIS شدند و سپس بافرهایی در ۵ طبقه ۵۰۰-۰، ۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰ و بیشتر از ۲۰۰۰ متر اطراف مناطق مسکونی اعمال شد (شکل ۶).

عوامل بوم‌شناختی

اقلیم پویاترین عامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی و تعیین درجه خطر آتش‌سوزی است. خطر و رفتار آتش‌سوزی جنگل با متغیرهای اقلیمی مانند بارش و دما مرتبط است (Akbulak et al., 2018; Gungoroglu, 2017). دمای بیشتر سبب کاهش رطوبت مواد سوختنی و آسیب‌پذیری زیاد در برابر آتش می‌شود (Sivrikaya & Kucuk, 2022). مقدار بارندگی نیز بر رطوبت مواد سوختنی و رطوبت نسبی هوا اثر مستقیم دارد. بارندگی می‌تواند خطر وقوع آتش را کاهش دهد یا موجب مهار آتش شود. بارش آب باران روی پوشش گیاهی و سطح خاک موجب افزایش ظرفیت رطوبتی مواد سوختنی می‌شود. در پژوهش حاضر، دو عامل متوسط بارندگی سالیانه و متوسط دمای ماهیانه، مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی مؤثر بر خطر آتش‌سوزی انتخاب شدند. در تهیه نقشه میانگین بارش سالانه و دمای ماهیانه منطقه، از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف منطقه پژوهش و داده‌های ماهواره‌ای TRMM استفاده شد. نقشه متوسط بارندگی سالیانه در چهار طبقه ۴۳۳-۳۲۷، ۴۳۳-۵۳۴، ۵۳۴-۶۴۷ و ۶۴۷-۸۰۱ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۷). نقشه متوسط دمای ماهیانه نیز در چهار طبقه ۳۳-۳۴، ۳۴-۳۶، ۳۶-۳۸ و ۳۸-۴۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شد (شکل ۸).

پوشش گیاهی نیز از عوامل تأثیرگذار در آتش‌سوزی است. تراکم پوشش گیاهی بیانگر مقدار و در دسترس بودن مواد سوختنی در آتش‌سوزی است (Vadrevu et al., 2010). ترکیب پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار بر شدت آتش‌سوزی است (Girardin et al., 2006) و نوع جنگل‌های سوزنی‌برگ یا پهن‌برگ، توان آتش‌سوزی متفاوتی دارند (Sari, 2021). در پژوهش حاضر به دلیل همگن بودن منطقه پژوهش از نظر ترکیب پوشش گیاهی (جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده همراه با پوشش علفی کف جنگل)، فقط تراکم پوشش جنگلی و مرتعی به‌عنوان

عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی انتخاب شدند. برای تهیه نقشه تراکم جنگل و مرتع از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6 (سنجنده‌های LissIII و LissIV) مربوط به سال ۲۰۱۴ استفاده شد. نقشه تراکم جنگل در چهار طبقه اراضی غیرجنگلی (کمتر از ۵ درصد)، جنگل تنک (۲۵-۵ درصد)، جنگل نیمه‌انبوه (۵۰-۲۵ درصد) و جنگل انبوه (۷۵-۵۰ درصد) تهیه شد (شکل ۹). نقشه طبقات تراکم پوشش مرتعی نیز در چهار طبقه اراضی غیرمرتعی، مرتع کم‌تراکم، مرتع نیمه‌متراکم و مرتع متراکم تهیه شد (شکل ۱۰).

عوامل اقتصادی - اجتماعی

با توجه به رشد جمعیت در دهه‌های اخیر، تهاجم به عرصه‌های جنگلی به‌منظور امرار معاش، تأمین سوخت و کشاورزی، افزایش یافته است و ساکنان روستاهای اطراف و یا داخل محدوده‌های جنگلی وابسته به جنگل هستند. تراکم جمعیت، عاملی مهم و مؤثر بر خطر آتش‌سوزی جنگل است. جنگل‌های نزدیک به مناطق پرجمعیت بیشتر در برابر آتش‌سوزی آسیب‌پذیرند (Akbulak et al., 2018; Gungoroglu, 2017). کاربری و پوشش اراضی نیز عاملی بسیار پویاست که می‌تواند به‌راحتی تغییرات گسترده‌ای در خطر آتش‌سوزی جنگل ایجاد کند. نوع استفاده از زمین و تغییر آن فرایندی است که در سال‌های اخیر بسیار مشاهده شده است. یکی از ابزارهای تغییر کاربری و تخریب، آتش‌سوزی است (Mundia & Aniya, 2005). از آنجا که این عامل در اثر فعالیت‌های انسانی همواره در حال تغییر است، به‌عنوان عامل دخالت‌های بشری مطرح است. بنابراین در پژوهش حاضر دو عامل کاربری/پوشش زمین و تراکم جمعیت به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی برای بررسی عوامل اقتصادی - اجتماعی بررسی شدند. برای شناسایی کاربری و پوشش اراضی از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6 (سنجنده‌های LissIII و LissIV) سال ۲۰۱۴ استفاده شد (شکل ۱۱). برای تهیه نقشه تراکم جمعیت، پس از تهیه نقشه سامان‌های (دهستان‌های)

۰، ۲۰۰-۴۰۰، ۴۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۸۰۰ و بیشتر از ۸۰۰ متر تهیه شد (شکل ۱۶).

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ال ساعتی (Thomas L. Saaty) در سال ۱۹۸۰ توسعه یافته است (Kumar & Gark, 2017; Sivrikaya & Kucuk, 2022) و کاربردهای زیادی در حوزه‌های مختلف مانند تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی دارد (Beygi, Heidarlou et al., 2014; Bentekhici et al., 2020; Sari, 2021; Sivrikaya & Kucuk, 2022; Dashti et al., 2022). اولین گام در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی تهیه ساختار سلسله‌مراتبی است (Ghodsipour, 2010).

در این پژوهش، پس از شناسایی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در منطقه پژوهش، با بهره‌گیری از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و تصمیم‌گیری گروهی، معیارها و زیرمعیارهای تأثیرگذار در قالب پرسشنامه، مقایسه زوجی شدند و وزن آنها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice11 (EC₁₁) برآورد شد. بدین صورت که سطح بعدی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با تهیه نقشه‌های رقومی مربوط به هر یک از عامل‌ها و طبقه‌بندی آن براساس شرایط موجود در منطقه پژوهش به طبقات مختلف تشکیل شد (شکل ۳). مقایسه‌های زوجی معیارها (عامل‌های چهارگانه) و زیرمعیارها (عامل‌های دوازده‌گانه) با استفاده از پرسشنامه توسط ۱۳ نفر از کارشناسان و محققان (خبرگان) مرتبط با آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در قالب روش G-AHP انجام گرفت. ماتریس مقایسه‌های زوجی هر کدام از خبرگان به صورت جداگانه وارد نرم‌افزار EC₁₁ شده و پاسخ خبرگان با روش میانگین هندسی ادغام شد و در نهایت وزن هر عامل مؤثر در آتش‌سوزی به دست آمد. میانگین هندسی، بهترین روش برای تلفیق قضاوت‌ها در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی است (Aczel & Saaty, 1983).

در طی فرایند ورود داده‌های پرسشنامه‌ها به نرم‌افزار EC₁₁، نسبت سازگاری^۱ (CI) که نشان‌دهنده

منطقه پژوهش براساس تقسیم‌بندی وزارت کشور و افزودن شمار جمعیت هر سامان به جدول توصیفی نقشه‌ها در محیط GIS، نقشه تراکم جمعیت منطقه در پنج طبقه با روش بهینه‌سازی جنکس^۱، معروف به طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی جنکس^۲ (Anticono et al., 2023) تهیه شد (شکل ۱۲).

عوامل فیزیوگرافی

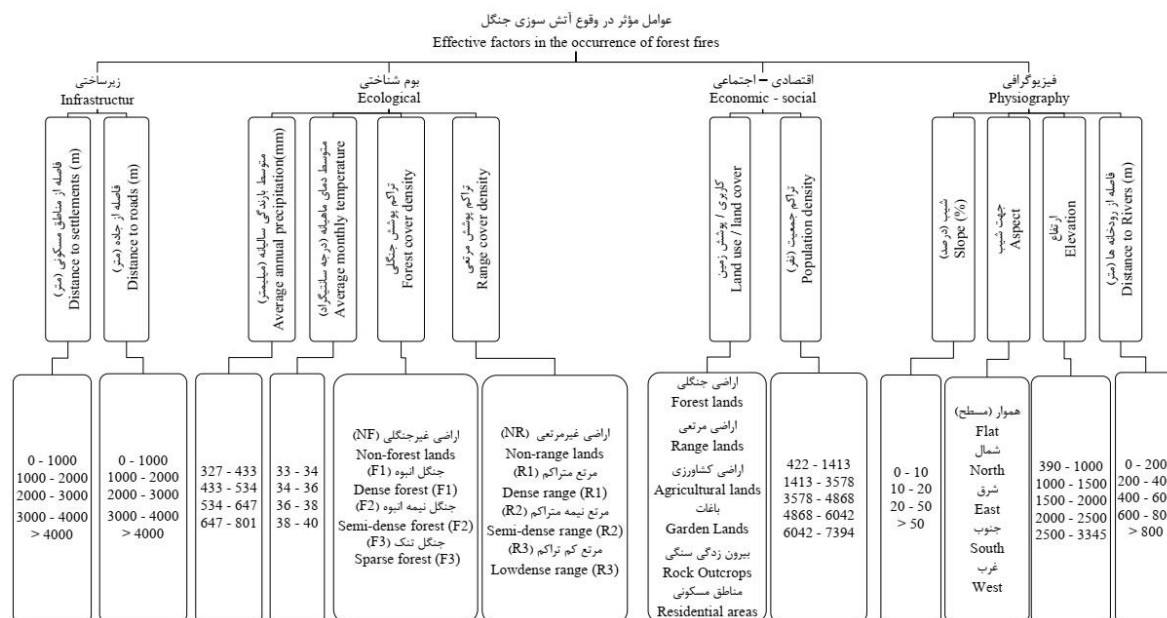
عوامل فیزیوگرافی، آثار مستقیم و غیرمستقیم بر آتش‌سوزی دارند. فیزیوگرافی می‌تواند آتش‌سوزی را از طریق وجود پستی و بلندی‌های متعدد افزایش دهد یا با ایجاد موانعی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، خاک لخت و بیرون‌زدگی‌های سنگی از گسترش آتش‌سوزی جلوگیری کند. در پژوهش حاضر، عوامل فیزیوگرافی شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا و فاصله از رودخانه‌ها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار در شدت و گسترش آتش‌سوزی در نظر گرفته شدند.

نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در محیط GIS تهیه شدند. نقشه شیب مطابق با طبقه‌بندی نیمرخ زاگرس به چهار طبقه شیب ۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-۵۰ درصد، ۵۰-۱۰۰ درصد و بیشتر از ۱۰۰ درصد طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳). نقشه طبقات جهت براساس چهار جهت اصلی شمال، شرق، جنوب، غرب و مناطق مسطح یا بدون شیب تهیه شد (شکل ۱۴). نقشه طبقات ارتفاعی منطقه پژوهش نیز مطابق با طبقه‌بندی نیمرخ زاگرس در پنج طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۳۹۰، ۱۵۰۰-۱۰۰۰، ۲۰۰۰-۱۵۰۰، ۲۵۰۰-۳۳۴۵ و ۳۳۴۵-۲۵۰۰ متر تهیه شد (شکل ۱۵). برای تهیه نقشه رودخانه‌های منطقه پژوهش، در ابتدا نقشه‌های جهت جریان و جریان تجمعی از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج شدند و پس از رده‌بندی آبراهه‌ها به روش استرالر^۳، نقشه شبکه آبراهه‌ها و به تبع آن لایه فاصله از رودخانه‌ها در پنج طبقه ۲۰۰-

1. Jenks
2. Jenks natural breaks classification method
3. Strahler

باشد، باید برای اصلاح یا تغییر مقایسه‌های زوجی توسط خبرگان اقدام شود تا CI به برابر یا کمتر از ۰/۱ کاهش یابد (Chen et al., 2010; Sivrikaya and Kucuk, 2022).

سازگاری مقایسه‌های زوجی معیارهاست کنترل شد. اگر مقدار CI برابر یا کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری مقایسه‌ها قابل قبول است (Mehregan, 2009; Sivrikaya & Kucuk, 2022) و اگر بزرگ‌تر از ۰/۱



شکل ۳- ساختار سلسله‌مراتبی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در منطقه پژوهش در روش AHP
Figure 3. Hierarchical structure of factors affecting fire in the study area in AHP method

اگر نسبت فراوانی کمتر از ۱ باشد، حساسیت آن طبقه به آتش‌سوزی کمتر و اگر بیشتر از ۱ باشد، حساسیت آن طبقه به آتش‌سوزی بیشتر است (Beygi Heidarlou et al., 2014).

رابطه ۱ $FR = A/B$
FR نسبت فراوانی، A درصد مساحت مناطق سوخته‌شده در هر طبقه از زیرمعیارها و B درصد کل مساحت آن طبقه از آن زیرمعیار است.

پس از محاسبه وزن هریک از ۱۲ عامل مؤثر در خطر آتش‌سوزی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و محاسبه اهمیت نسبی طبقات هر کدام از عوامل با استفاده از روش نسبت فراوانی، نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با روش ترکیب خطی وزنی^۲ (WLC) در محیط GIS (رابطه ۲) به دست آمد.

روش نسبت فراوانی^۱

نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان وقوع یک رویداد و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را مشخص می‌کند (de Santana et al., 2021). فرضیه روش نسبت فراوانی بر این اساس است که مخاطرات آینده در مکان‌هایی با شرایط مشابه با مخاطرات پیشین رخ خواهند داد (Jaafari & Mafi Gholami, 2017). ضریب نسبت فراوانی در پژوهش حاضر برای هر طبقه از زیرمعیارهای دوازده‌گانه عبارت از نسبت درصد مساحت مناطق سوخته‌شده در هر طبقه از زیرمعیارها به درصد کل مساحت آن طبقه از آن زیرمعیار است (رابطه ۱). از این‌رو محاسبه و تعیین اهمیت نسبی طبقات عوامل مختلف از طریق روش نسبت فراوانی بر مبنای تطبیق نقشه مناطق سوخته‌شده با نقشه طبقات معیارهای مؤثر در آتش‌سوزی صورت گرفت.

2. Weighted Linear Combination (WLC)

1. Consistency Ratio

رابطه ۲ $FRI = W_1.F_1 + W_2.F_2 + W_3.F_3 + W_4.F_4 + W_5.F_5 + W_6.F_6 + W_7.F_7 + W_8.F_8 + W_9.F_9 + W_{10}.F_{10} + W_{11}.F_{11} + W_{12}.F_{12}$

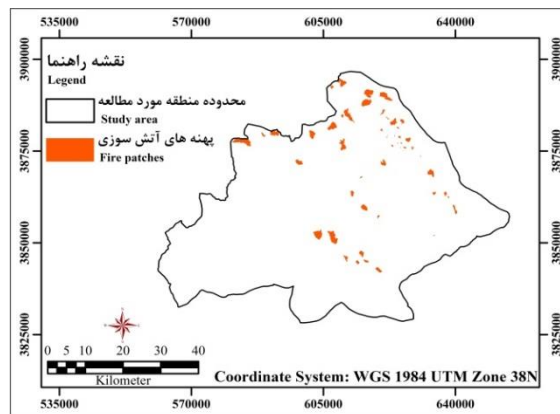
مقادیر مشابه به مناسبترین وجه ممکن در یک گروه قرار می‌گیرند و تفاوت بین طبقه‌ها حداکثر می‌شود و اگر یک یا چند عارضه در دسته‌ای خاص قرار نگیرند، هیچ مقداری به آن اختصاص داده نمی‌شود (Sanjary, 2007; Anticono et al., 2023).

نتایج

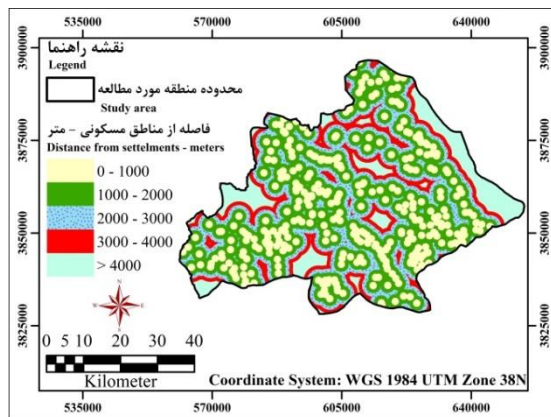
نقشه مناطق سوخته‌شده در منطقه اورامانات در فاصله سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵ و نقشه‌های فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، متوسط بارندگی، سالیانه، متوسط دمای ماهیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم پوشش مرتعی، کاربری/پوشش زمین، تراکم جمعیت، شیب، جهت شیب، ارتفاع و فاصله از رودخانه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۱۶ نشان داده شده است.

که در آن FRI شاخص خطر آتش‌سوزی، F_1 تا F_{12} به ترتیب معیارهای فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، متوسط بارندگی سالیانه، متوسط دمای ماهیانه، تراکم پوشش جنگلی، تراکم پوشش مرتعی، کاربری/پوشش زمین، تراکم جمعیت، شیب، جهت شیب، ارتفاع و فاصله از رودخانه‌ها و W_1 تا W_{12} وزن هر یک از زیرمعیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی است.

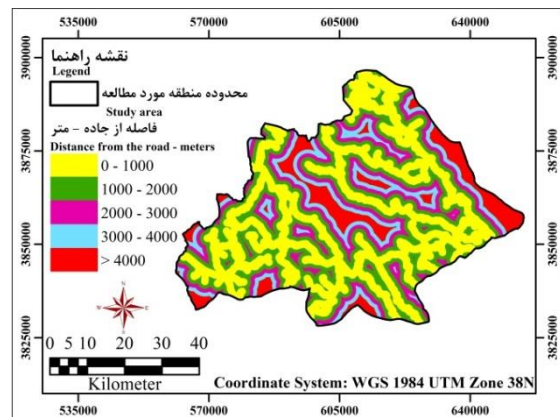
در نهایت نقشه حاصل با روش بهینه‌سازی پیشنهادی جنکس (Jenks, 1967; Anticono et al., 2023) در پنج طبقه خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. در این روش طبقه‌بندی، شکستگی طبیعی بین طبقات طوری محاسبه می‌شود که مجموع واریانس‌ها در هر کلاس حداقل باشد و



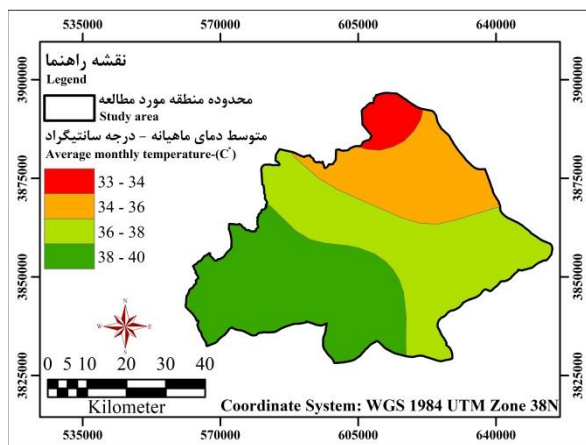
شکل ۴- نقشه مناطق سوخته‌شده در فاصله سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۵ در منطقه اورامانات
Figure 4. The map of the burned areas between 2016-2024 in Oramanat region



شکل ۶- نقشه طبقات فاصله از مناطق مسکونی
Figure 6. Map of classes of distance from the settlements

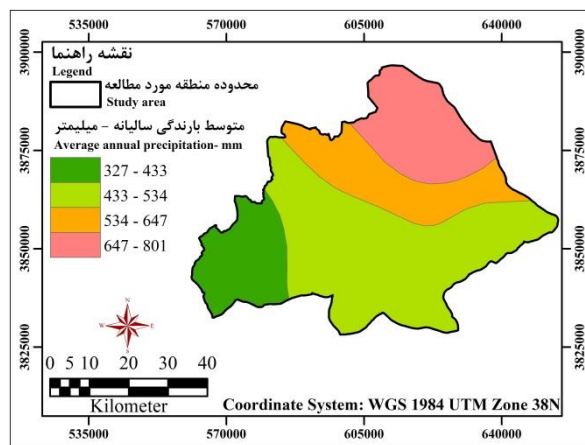


شکل ۵- نقشه طبقات فاصله از جاده
Figure 5. Map of classes of distance from the road



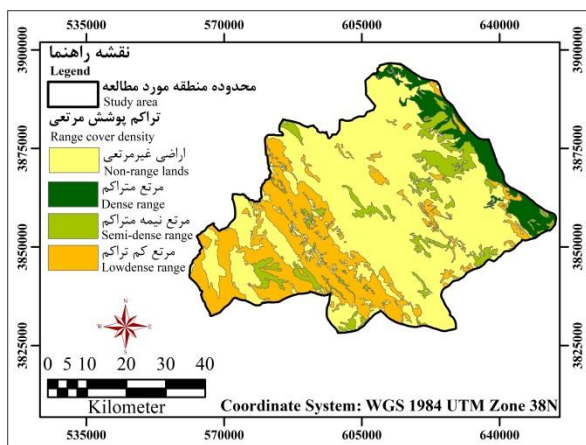
شکل ۸- نقشه طبقات متوسط دمای ماهیانه

Figure 8. Map of classes of average monthly temperature



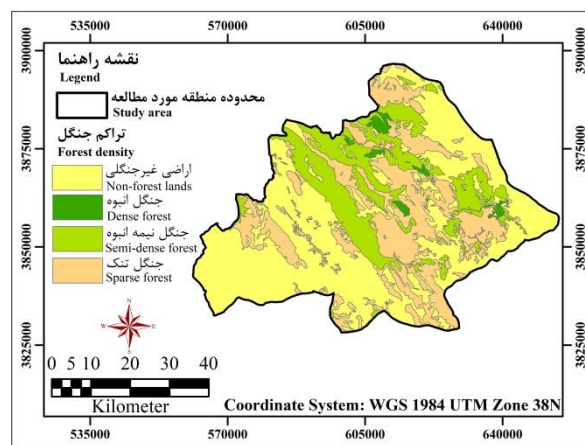
شکل ۷- نقشه طبقات متوسط بارندگی سالیانه

Figure 7. Map of classes of average annual precipitation



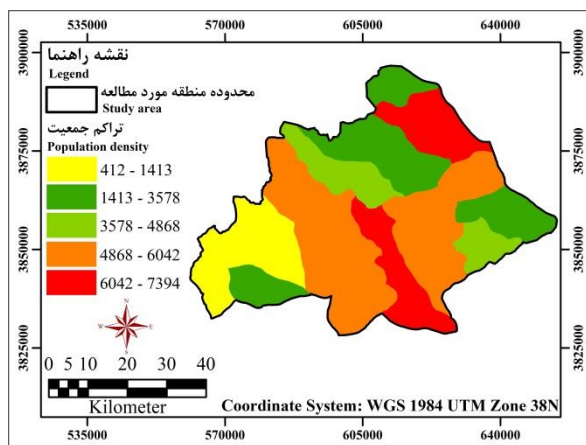
شکل ۱۰- نقشه طبقات تراکم پوشش مرتعی

Figure 10. Map of classes of range cover density



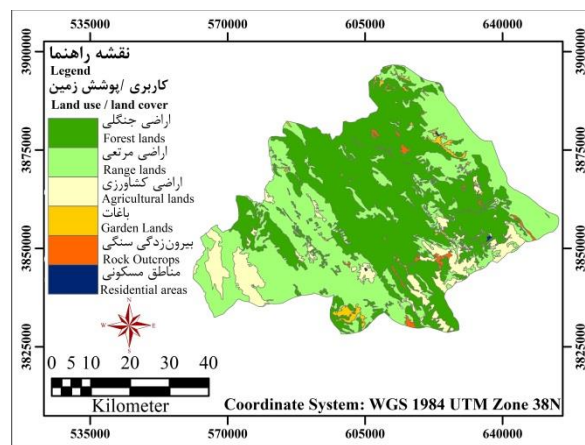
شکل ۹- نقشه طبقات تراکم پوشش جنگلی

Figure 9. Map of classes of forest cover density



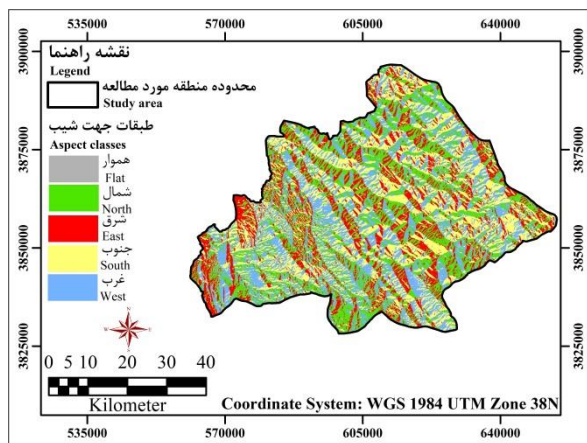
شکل ۱۲- نقشه طبقات تراکم جمعیت

Figure 12. Map of classes of population density

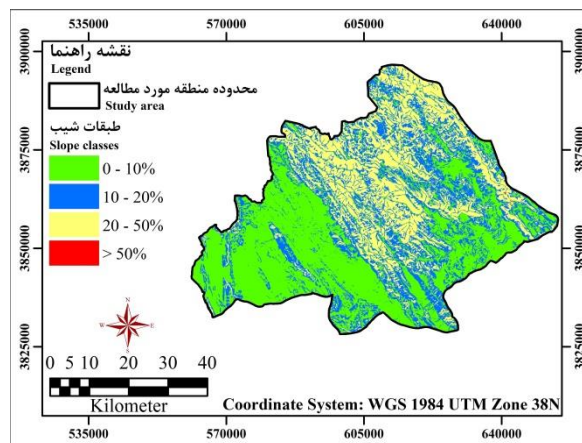


شکل ۱۱- نقشه طبقات کاربری / پوشش زمین

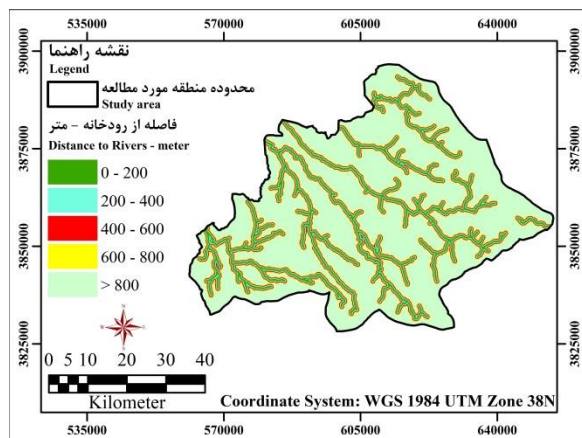
Figure 11. Map of classes of land use / land cover



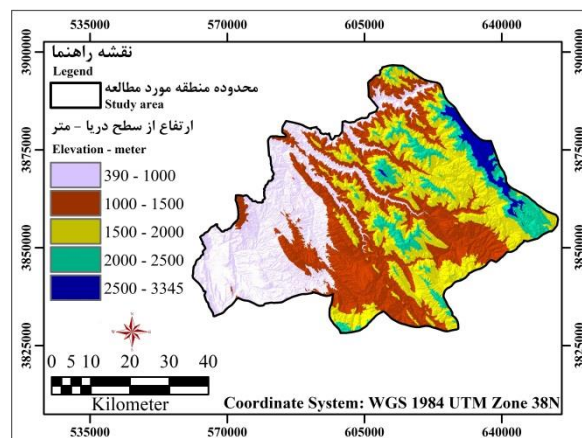
شکل ۱۴- نقشه طبقات جهت شیب
Figure 14. Map of aspect classes



شکل ۱۳- نقشه طبقات شیب
Figure 13. Map of slope classes



شکل ۱۶- نقشه طبقات فاصله از رودخانهها
Figure 16. Map of classes of distance from rivers



شکل ۱۵- نقشه طبقات ارتفاع از سطح دریا
Figure 15. Map of elevation classes

(۰/۰۵)، جهت (۰/۰۴۱)، تراکم جنگل (۰/۰۳۸)، فاصله از رودخانه (۰/۰۲)، ارتفاع (۰/۰۱۹) و شیب (۰/۰۱۸) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۲). مقدار ناسازگاری سیستم، ۰/۰۱ به دست آمد که نشان‌دهنده صحت و درستی مقایسه‌های زوجی است.

اهمیت نسبی طبقات هر کدام از عوامل دوازده‌گانه مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در منطقه پژوهش با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR) محاسبه شد که در جدول ۳ ارائه شده است.

بر اساس نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی، معیار اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۴۷۳ بیشترین اهمیت را در بین معیارهای مختلف به خود اختصاص داده است و معیارهای بوم‌شناختی (۰/۲۴۱)، زیرساختی (۰/۲۰۹) و فیزیوگرافی (۰/۰۷۷) در رده‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۲). در بین زیرمعیارها، کاربری اراضی با وزن ۰/۲۵۲ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده است و پس از آن تراکم جمعیت (۰/۲۰۹)، متوسط دمای ماهیانه (۰/۱۲۸)، فاصله از مناطق مسکونی (۰/۱۱۱)، فاصله از جاده (۰/۰۶۲)، متوسط بارندگی سالیانه (۰/۰۵۱)، تراکم مرتع

جدول ۲- وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی حاصل از G-AHP

وزن Weight	زیرمعیار Sub-criteria	وزن Weight	معیار Criteria
0.062	فاصله از جاده Distance to roads	0.209	زیرساختی Infrastructural
0.111	فاصله از مناطق مسکونی Distance to settlements		
0.051	متوسط بارندگی سالانه Average annual precipitation	0.241	بوم‌شناختی Ecological
0.128	متوسط دمای ماهیانه Average monthly temperature		
0.038	تراکم پوشش جنگلی Forest cover density		
0.050	تراکم پوشش مرتعی Range cover density		
0.252	کاربری / پوشش زمین Land use / land cover	0.473	اقتصادی - اجتماعی Socio-economic
0.209	تراکم جمعیت Population density		
0.018	شیب Slope	0.077	فیزیوگرافی Physiographic
0.041	جهت شیب Aspect		
0.019	ارتفاع Elevation		
0.020	فاصله از رودخانه‌ها Distance to rivers		

جدول ۳- اهمیت نسبی طبقات هر یک از عامل‌های مؤثر بر خطر آتش‌سوزی حاصل از روش نسبت فراوانی

Table 3. Criteria and sub-criteria relative importance in the occurrence of fire in the study area using Frequency Ratio (FR)

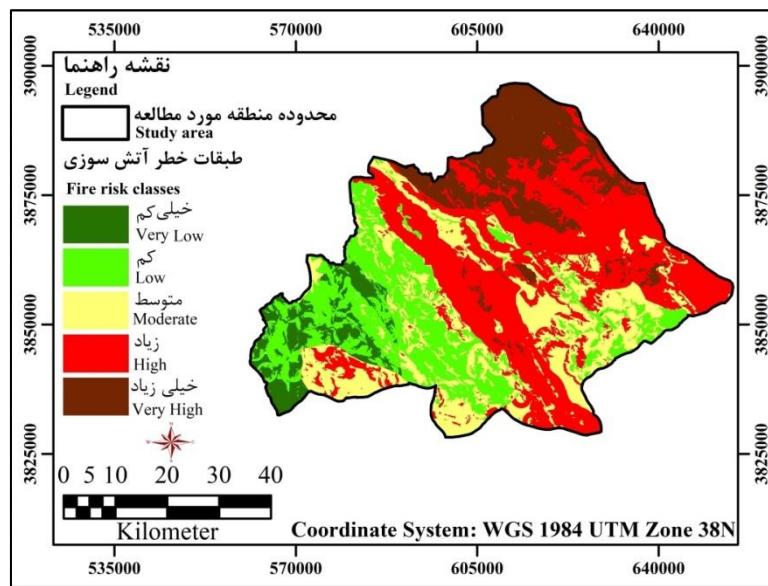
فاصله از رودخانه‌ها Distance to rivers	جهت شیب Aspect	شیب Slope	ارتفاع Elevation	تراکم جمعیت Population density	کاربری اراضی Land use / land cover	تراکم پوشش مرتعی Range cover density	تراکم پوشش جنگلی Forest cover density	متوسط دمای ماهیانه Average monthly temperature	متوسط بارندگی سالانه Average annual precipitation	فاصله از مناطق مسکونی Distance to settlements	فاصله از جاده Distance to roads	طبقه Class
0.35	0.72	0.20	0.44	0.00	1.59	1.31	0.44	5.37	0.00	0.83	0.95	1
0.82	0.79	0.96	1.34	1.64	0.54	1.81	5.30	1.70	0.58	1.40	1.42	2
1.16	0.66	2.38	1.39	0.45	0.01	0.99	2.49	0.59	1.25	1.01	1.40	3
1.42	1.24	0.14	0.67	0.77	0.47	0.03	0.77	0.49	2.67	0.73	0.49	4
1.04	1.23		0.00	1.78	0.00					0.38	0.01	5
					0.00							6

روش ترکیب خطی وزنی (رابطه ۳) برای تلفیق G-AHP و FR و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی منطقه پژوهش در محیط GIS اقدام شد (شکل ۱۷).

پس از محاسبه اوزان نهایی از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و اهمیت نسبی طبقات مربوط به هر عامل از طریق روش نسبت فراوانی، با استفاده از

$$FRI = 0.062F_1 + 0.111F_2 + 0.051F_3 + 0.128F_4 + 0.038F_5 + 0.050F_6 + 0.252F_7 + 0.209F_8 + 0.019F_9 + 0.018F_{10} + 0.041F_{11} + 0.020F_{12}$$

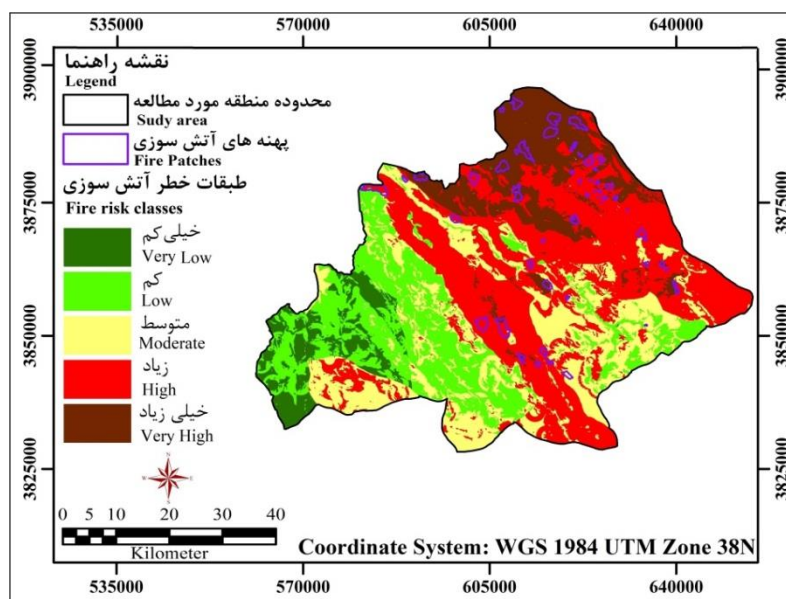
رابطه ۳



شکل ۱۷- نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در منطقه اورامانات
Figure 17. Fire risk zoning map in Oramanat region

(۴) و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی (شکل ۱۷) روی هم‌گذاری شدند (شکل ۱۸). براساس نتایج، ۹۴/۴۱ درصد از مناطق آتش‌سوزی واقعی در طبقات با خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفتند که می‌تواند بیانگر صحت نقشه پهنه‌بندی نهایی باشد (جدول ۴).

با توجه به نقشه نهایی حاصل، حدود ۲۶/۳۹ درصد منطقه پژوهش در طبقات خطر خیلی کم و کم، ۲۱/۶۱ درصد در طبقه خطر متوسط و ۵۲ درصد در طبقه خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است (جدول ۴). برای اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی، نقشه پراکنش آتش‌سوزی (شکل



شکل ۱۸- روی هم‌گذاری نقشه پهنه‌های آتش‌سوزی و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در منطقه اورامانات
Figure 18. Overlaying of wildfire patches map and fire risk zoning map in Oramanat region

جدول ۴- مساحت طبقات مختلف نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی و نقشه تلفیقی
Table 4. The area of different classes of fire risk zoning map and combined map

نقشه تلفیقی Combined map		نقشه خطر آتش‌سوزی Fire risk map		طبقه خطر Risk class
مساحت (درصد) Area (percent)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	مساحت (درصد) Area (percent)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	
0.00	0	5.73	20005	خیلی کم Very Low
0.70	46	20.66	72084	کم Low
4.89	318	21.61	75395	متوسط Moderate
44.08	2866	38.18	1332214	زیاد High
94.41 =				
50.33	3272	13.82	48201	خیلی زیاد Very High

بحث

جنگل و مرتع (۷۷/۶۳ درصد مناطق جنگلی و ۲۱/۵۵ درصد مناطق مرتعی) دارند. در تطابق با این پژوهش، در پژوهش (Jaafari et al., 2018) نیز کاربری اراضی مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده وقوع آتش‌سوزی تشخیص داده شد. تراکم جمعیت در پژوهش حاضر از مهم‌ترین زیرمعیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با وزن ۰/۲۰۹ شناخته شد. در پژوهش‌های قبلی اشاره شده است که آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع تا حد زیادی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است (Ricotta et al., 2018) و در مناطقی با تراکم زیاد جمعیت، فعالیت‌های مختلف انسان‌ها ممکن است سبب آتش‌سوزی شود (Tien Bui et al., 2016; Zhao et al., 2021). با روی هم‌گذاری نقشه مناطق سوخته‌شده با نقشه تراکم جمعیت منطقه پژوهش مشخص شد که ۵۷/۳۸ درصد از مناطق سوخته‌شده در طبقه‌های پرتراکم جمعیتی قرار دارند و این موضوع ارتباط تراکم زیاد جمعیت با وقوع زیاد آتش‌سوزی را تأیید می‌کند. در پژوهش‌های (Mohammadi et al., 2010) و (Beygi Heidarlou et al., 2014) نیز بیشترین آتش‌سوزی در مناطقی رخ داده است که تراکم جمعیت زیادی داشتند.

معیار بوم‌شناختی بعد از معیار اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۲۴۱ در رده دوم معیارهای مؤثر بر وقوع

نتایج پژوهش حاضر، حد اهمیت هر یک از عوامل تأثیرگذار و طبقات آنها بر وقوع آتش‌سوزی در منطقه اورامانات در غرب استان کرمانشاه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه وزن بیشتر در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی نشان‌دهنده اهمیت بیشتر معیارها و زیرمعیارها و بیشتر بودن نسبت فراوانی نشان‌دهنده اهمیت بیشتر طبقه یا طبقات است (Jaafari & Mafi Gholami, 2017)، می‌توان گفت که معیار اقتصادی-اجتماعی با وزن ۰/۴۷۳، مهم‌ترین معیار مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در منطقه پژوهش است. در پژوهش (Gungoroglu, 2017) در ترکیه با هدف تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در محیط GIS نیز معیار اقتصادی-اجتماعی مهم‌ترین معیار شناخته شد. در این پژوهش، زیرمعیارهای کاربری اراضی و تراکم جمعیت در ذیل معیار اقتصادی-اجتماعی به ترتیب با وزن ۰/۲۵۲ و ۰/۲۰۹ بیشترین اهمیت را در بین زیرمعیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی داشتند. کاربری اراضی در پژوهش حاضر مهم‌ترین زیرمعیار مؤثر در وقوع آتش‌سوزی شناخته شد. با روی هم‌گذاری نقشه مناطق سوخته‌شده با نقشه کاربری اراضی مشخص شد که ۹۹/۱۸ درصد مناطق سوخته‌شده، کاربری

داد. نتایج نشان داد که زیرمعیارهای فاصله از جاده با وزن ۰/۰۶۲ و فاصله از مناطق مسکونی با وزن ۰/۱۱۱ دارای درجه اهمیت متفاوت در وقوع آتش‌سوزی هستند. جاده‌ها با ایجاد دسترسی به مواد سوختنی، می‌توانند سبب ایجاد آتش‌سوزی شوند. همچنین شبکه راه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تأسیسات زیرساختی مدیریت جنگل (Veena et al., 2017) زمینه دسترسی مستقیم فعالیت‌های گسترده انسان‌ها در بوم‌سازگان جنگل را فراهم می‌کند و از این‌رو احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل افزایش می‌یابد. با روی هم‌گذاری پهنه‌ها و نقاط آتش‌سوزی روی نقشه طبقات فاصله از جاده مشخص شد که ۷۳/۹۹ درصد از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در طبقات نزدیک به جاده (۳۷/۹۲ درصد در طبقه ۱۰۰۰-۰ متر و ۳۶/۰۷ درصد در طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر) و ۴۹/۰۲ درصد از تعداد آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه پژوهش، در طبقه ۱۰۰۰-۰ متر رخ داده است. در پژوهش‌های مختلف (Jaiswal et al., 2002; Dong et al., 2005; Beygi Heidarlou et al., 2014; Polat et al., 2020) نیز بیشترین آتش‌سوزی در نزدیک‌ترین فاصله از جاده اتفاق افتاده است. فاصله از مناطق مسکونی نیز یکی از تأثیرگذارترین عوامل زیرساختی است که شدت فشار انسان بر بوم‌سازگان‌های جنگلی را منعکس می‌کند (Jaafari et al., 2018). در این زمینه، ساکنان مناطق جنگلی و مرتعی در فصول خشک بر اثر عوامل مختلف سبب آتش‌سوزی‌های تصادفی یا غیرتصادفی می‌شوند (Geng et al., 2020). با روی هم‌گذاری پهنه‌ها و نقاط آتش‌سوزی روی نقشه طبقات فاصله از مناطق مسکونی مشخص شد که ۶۸/۲۲ درصد از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در طبقات نزدیک به مناطق مسکونی (۲۰/۸۱ درصد در طبقه ۱۰۰۰-۰ متر و ۴۷/۴۱ درصد در طبقه ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متر) و ۷۲/۵۵ درصد از تعداد آتش‌سوزی‌ها در منطقه پژوهش، در دو طبقه اول نزدیک به مناطق مسکونی رخ داده است. نقش انسان در سال‌های اخیر با توجه به فراگیر شدن

آتش‌سوزی قرار گرفت. مهم‌ترین زیرمعیار بومشناختی مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی، میانگین دمای ماهیانه با وزن ۰/۱۲۸ است که با نتایج (Eskandari 2017) و (Sivrikaya Kucuk 2022) همسو است. واضح است که در مناطقی با درجه حرارت بیشتر و بارندگی کمتر، احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتر است؛ اما ملاحظه اثر ترکیبی عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی در قالب معیار بومشناختی در راستای احتمال وقوع خطر آتش‌سوزی مناسب‌تر است. اقلیم یکی از عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی است، زیرا بر کیفیت و کمیت مواد سوختنی تأثیرگذار است (de Santana et al., 2021). زیرمعیارهای میانگین دمای ماهیانه و متوسط بارندگی سالیانه افزون بر اثر مستقیم در وقوع آتش‌سوزی، به‌طور غیرمستقیم با اثرگذاری بر تیپ و تراکم پوشش گیاهی نیز آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Vadrevu et al., 2010). با توجه به اینکه کاربری اراضی جنگلی و مرتعی با تراکم‌های متفاوت، سطح بزرگی (۸۹/۰۵ درصد) از منطقه پژوهش را پوشانده است (شکل ۱۱)، مطابق نقشه پراکنش آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه، بیشتر آتش‌سوزی‌ها (۶۹/۶۵ درصد) در اراضی جنگلی تنک و نیمه‌انبوه اتفاق افتاده است که با نتایج (Mohammadi et al. 2010) و (Beygi Heidarlou et al. 2014) مطابقت دارد. افزون‌بر این، نیمه شمالی منطقه پژوهش که بیشتر آتش‌سوزی‌ها در آنجا اتفاق افتاده است، میانگین بارش سالیانه بالغ بر ۵۰۰ میلی‌متر است که با نتایج (Darvishi et al. 2013) و (Polat et al. 2020) تطابق دارد و این موضوع نیز بر افزایش تراکم پوشش علفی افزوده است. تنک بودن تاج پوشش و رسیدن نور کافی به اشکوب زیرین و سطح خاک در اراضی جنگلی تنک و نیمه‌انبوه منطقه پژوهش، سبب شکل‌گیری پوشش علفی متراکم در اشکوب زیرین و فراهم شدن مواد سوختنی کافی برای ایجاد آتش‌سوزی سطحی می‌شود.

معیار زیرساختی از معیارهای مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی است که وزن ۰/۲۰۹ را به خود اختصاص

از رودخانه‌ها نیز عامل فیزیوگرافی مهمی در تهیه نقشه آتش‌سوزی جنگل است. نتایج این پژوهش نشان داد که ۷۶/۴۷ درصد از تعداد آتش‌سوزی‌ها با اختصاص ۷۱/۶۷ درصد از مساحت کل پهنه‌های آتش‌سوزی در فاصله دور از رودخانه‌ها (بیش از ۸۰۰ متر) رخ داده است. نتایج حاصل از این بخش پژوهش با یافته‌های (Mohammadi et al., 2010) و (Beygi Jaafari et al., 2018) و (Heidarlou et al., 2014) مطابقت دارد. اما در برخی پژوهش‌ها (Mirdeylami et al., 2014; Pourtaghi et al., 2016) نیز بیشترین آتش‌سوزی در نزدیکی رودخانه‌ها اتفاق افتاده است که با نتایج پژوهش حاضر مغایرت دارد که البته این موضوع را به تجمع گردشگران نسبت دادند. براساس مشاهدات میدانی، اطراف بخش زیادی از رودخانه‌های منطقه پژوهش به کاربری باغ تبدیل شده است که حفاظت مالکان آنها از این مناطق، سبب می‌شود که آتش‌سوزی در فواصل دورتر از رودخانه رخ دهد. در ضمن در دیگر مناطق اطراف رودخانه‌ها که امکان باغداری وجود ندارد، توپوگرافی متغیر و شدید و عبور رودخانه‌ها از دره‌های با شیب زیاد امکان تجمع گردشگران و مردم محلی را بسیار کاهش داده است. ارتفاع از سطح دریا عامل مؤثر دیگر در وقوع آتش‌سوزی است که در این پژوهش وزن ۰/۱۹ را به خود اختصاص داده است. نتایج نشان داد که بیشترین آتش‌سوزی در دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متری (۴۴/۰۱ درصد در دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰-۱۰۰۰ متری و ۳۷/۲۰ درصد در دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متری) رخ داده است. در پژوهش (Mohammadi et al., 2010) دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متری و در پژوهش (Jaafari & Mafi Gholami, 2017) دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر بیشترین خطر آتش‌سوزی را به خود اختصاص داده بودند. شیب به‌عنوان عامل مؤثر دیگر در وقوع آتش‌سوزی، وزن ۰/۱۸ را به خود اختصاص داده است. در پژوهش‌های مختلف، تأثیر شیب بر وقوع آتش‌سوزی نشان داده شده است که بیانگر حساسیت

حفاظت از منابع محیط زیستی و توسعه انجمن‌های مردمی حفاظت از محیط زیست در منطقه به‌ویژه برای اطفای سریع آتش‌سوزی در نزدیکی مناطق مسکونی شایان توجه است. از این‌رو در نزدیکی مناطق مسکونی ممکن است تعداد آتش‌سوزی‌های رخ داده بیشتر باشد، اما پهنه‌های با مساحت کمتری را می‌سوزاند. در پژوهش‌های (Jaiswal et al., 2002) و (Mohammadi et al., 2010) و (Dong et al., 2005) و (Polat et al., 2020) و (Kayet et al., 2020) نزدیک‌ترین فاصله به نواحی مسکونی دارای بیشترین خطر آتش‌سوزی بوده است که همسو با نتایج پژوهش حاضر است.

معیار فیزیوگرافی با وزن ۰/۰۷۷ کمترین وزن را در بین معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی به خود اختصاص داد. در پژوهش (Eskandari, 2017) نیز معیار فیزیوگرافی دارای کمترین وزن بود. نتایج همچنین نشان داد که زیرمعیارهای جهت با وزن ۰/۰۴۱، فاصله از رودخانه‌ها با وزن ۰/۰۲۰، ارتفاع با وزن ۰/۰۱۹ و شیب با وزن ۰/۰۱۸ دارای درجه اهمیت متفاوت در وقوع آتش‌سوزی هستند. با روی هم‌گذاری پهنه‌های آتش‌سوزی روی نقشه طبقات جهت مشخص شد که ۶۵/۷۲ درصد از مساحت پهنه‌های آتش‌سوزی در جهت‌های جنوبی و غربی (۳۳/۳۱ درصد جهت جنوبی و ۳۲/۴۰ درصد جهت غربی) رخ داده است. در پژوهش‌های مختلف (Mohammadi et al., 2010; Beygi Heidarlou et al., 2014; Dashti et al., 2022) نیز نشان داده شده است که بیشترین آتش‌سوزی در جهت‌های جنوبی و غربی اتفاق افتاده است. نواحی واقع در جهت‌های جنوبی و غربی، تشعشعات خورشیدی بیشتری دریافت می‌کنند و در نتیجه افزایش دما در این نواحی بیشتر است که سبب کاهش رطوبت نسبی به‌ویژه در فصل گرم و بعدازظهرها می‌شود (Dashti et al., 2022). بدیهی است که وقوع دمای زیاد و کاهش رطوبت مواد سوختنی، خطر آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد. فاصله

حدود ۵۲ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. در این پژوهش به دلیل در نظر گرفتن دامنه وسیعی از عوامل مختلف مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی و تعیین اهمیت هر یک از طبقات عوامل مختلف با روش نسبت فراوانی، می‌توان بیان داشت که نتایج از دقت زیادی برخوردار است. صحت‌سنجی نتایج نیز با روی هم‌گذاری نقشه مناطق آتش‌سوزی واقعی و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی انجام گرفت و مشخص شد که حدود ۹۵ درصد آتش‌سوزی‌های به وقوع پیوسته در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد آتش‌سوزی واقع شده‌اند. به‌طور کلی این پژوهش کارایی زیاد تلفیق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و روش نسبت فراوانی در تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. همچنین چارچوب پیشنهادی این پژوهش، روشی قابل اعتماد برای شناسایی عوامل و کسب و ذخیره اطلاعات در پایگاه‌های اطلاعاتی و توسعه راهبردها برای مدیریت آتش‌سوزی جنگل ارائه می‌دهد. نقشه پهنه‌بندی نهایی هم در اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح برای اطفای حریق و همچنین برنامه‌ریزی مطلوب برای استفاده از امکانات و به‌کارگیری کارکنان و تمرکز تجهیزات لازم برای مقابله با آتش‌سوزی‌های احتمالی در فصل آتش‌سوزی در مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. به‌طور کلی، چنین پژوهش‌ها و تلاش‌هایی در ابداع روش‌های هدفمند پیشگیری و کنترل آتش‌سوزی در جنگل‌ها کمک می‌کند و می‌تواند مدیریت پایدار جنگل را بهبود بخشد. از جنبه پژوهشی، با توجه به پویایی بوم‌سازگان‌های جنگل و مرتع و تأثیر زیاد عوامل انسانی بر کاربری‌های مختلف در منطقه پژوهش، پیشنهاد می‌شود که تهیه نقشه پهنه‌بندی آتش‌سوزی با در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تری از عامل‌های مؤثر، به‌ویژه عامل‌های مرتبط با تأثیرات انسانی، در فواصل زمانی منظم به‌منظور به‌روزرسانی نتایج و پایش و مدیریت مناسب‌تر مدنظر قرار گیرد. همچنین ارزیابی روش‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی عوامل

بیشتر مناطق با شیب زیاد به وقوع آتش‌سوزی است (Mohammadi et al., 2010; Pourtaghi et al., 2015). نتایج این پژوهش نشان داد که ۶۳/۰۸ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌ها در دامنه شیب ۵۰-۲۰ درصد قرار دارد و تنها ۸/۵۷ درصد از مساحت آتش‌سوزی‌ها در دامنه شیب ۱۰-۰ درصد قرار گرفته است. در پژوهش‌های (Pourtaghi, Mohammadi et al. (2010) و (et al. (2015) و (Abdo et al. (2022) دامنه شیب‌های بیشتر از ۲۰ درصد حساسیت زیادی به وقوع آتش‌سوزی نشان داده است، اما در پژوهش‌های (Beygi Jaafari & Mafi و Heidarlou et al. (2014) و (Gholami (2017) به دلیل شرایط متفاوت منطقه پژوهش، عکس این حالت نشان داده شده است.

با روی هم‌گذاری نقشه مناطق آتش‌سوزی واقعی و نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی مشخص شد که ۹۴/۴۱ درصد آتش‌سوزی‌ها در مناطقی با خطر زیاد آتش‌سوزی واقع شده‌اند (۴۴/۰۸ درصد در مناطق با خطر زیاد و ۵۰/۳۳ درصد در مناطق با خطر خیلی زیاد) که با نتایج (Mohammadi et al. (2010) (۶۰ درصد در مناطق پرخطر و ۳۰ درصد در مناطق خطرناک)، (Zarekar et al. (2013) (۶۶ درصد در مناطق دارای خطر آتش‌سوزی زیاد و خیلی زیاد)، (Beygi Heidarlou et al. (2014) (۹۸/۴۴ درصد در طبقه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد) و (Mirdeylami et al. (2014) (۴۶/۱ درصد در طبقه پرخطر و ۴۶/۰۵ درصد در طبقه خطرناک) از نظر درصد همخوانی مناطق آتش‌سوزی واقعی با مناطق دچار خطر آتش‌سوزی مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش در جنگل‌های منطقه اورامانات در غرب استان کرمانشاه، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با تلفیق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی گروهی و روش نسبت فراوانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گرفت. نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در منطقه اورامانات نشان داد که

«تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در زاگرس میانی» انجام گرفت. از معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور که هزینه‌های این پژوهش را بر عهده گرفتند، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از کارشناسان محترم ادارات محیط زیست و منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان‌های اورامانات (پاوه، جوانرود، روانسر و ثلاث باباجانی) به‌ویژه آقایان جهانگیر امیری، علی صدیقی‌پور، اقبال جعفری، سالار رستمی و کوسار رضانی که در تهیه آمار و اطلاعات لازم با نگرانندگان مقاله همکاری کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

موثر بر آتش‌سوزی و پهنه‌بندی مکانی خطر آتش‌سوزی، ارزیابی الگوی زمانی- مکانی کانون‌های بالقوه آتش‌سوزی، مدل‌سازی و پیش‌بینی خطرهای ناشی از آتش‌سوزی و ارزیابی اثرهای آن پیشنهاد می‌شود. از نظر اجرایی، ارتقای سامانه‌های یکپارچه پایش، پیش‌آگاهی و هشدار سریع آتش‌سوزی و همچنین مکان‌یابی مناطق مناسب استقرار ایستگاه‌های مقابله با آتش‌سوزی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

این پژوهش از محل اعتبارات معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور و در قالب قرارداد پژوهانه با عنوان

References

- Abdo, H. (2022). Assessment of landslide susceptibility zonation using frequency ratio and statistical index: A case study of Al-Fawar basin, Tartous, Syria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2599–2618. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03322-1>.
- Abdo, H.G., Almohamad, H., Al-Dughairi, A.A., & Al-Mutiry, M. (2022). GIS-Based Frequency Ratio and Analytic Hierarchy Process for Forest Fire Susceptibility Mapping in the Western Region of Syria. *Sustainability*, 14, 4668. <https://doi.org/10.3390/su14084668>.
- Abedi Gheshlaghi, H.A., Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2020). GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(3), 481–499. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>
- Aczel, J., & Saaty, T. (1983). Procedure for synthesizing ratio judgments. *Journal of mathematical psychology*, 27(1), 93-102. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(83\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0022-2496(83)90028-7).
- Akay, A.E., & Sahin, H. (2019). Forest fire risk mapping by using GIS techniques and AHP method: a case study in Bodrum (Turkey). *European Journal of Forest Engineering*, 5(1), 25–35. <https://doi.org/10.33904/ejfe.579075>
- Akbarzadeh, A., Ghorbani-Dashtaki, S., Naderi-Khorasgani, M., Mohammadi, J., & Taghizadeh Mehrjardi, R. (2017). Effect of fire on water repellency, amount and factors of soil erosion in forests of southwest coast of the Caspian Sea. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 145-157. (In Persian)
- Akbulak, C., Tatlı, H., Aygun, G., & Saglam, B. (2018). Forest fire risk analysis via integration of GIS, RS and AHP: the case of Canakkale, Turkey. *Journal of Human Sciences*, 15(4), 2127–2143. <https://j-humansciences.com/ojs/index.php/IJHS/article/view/5491>.
- Alidoust, M., Naghdi, R., Nikooy, M., & Peyrowan, H. (2024). Effect of slope and different intensities of rainfall using rain simulator on runoff and soil loss one year after forest fire (Shenroud Forest, Guilan). *Iranian Journal of Forest*, 16(2), 257-271. doi: 10.22034/ijf.2024.414296.1943. (In Persian)
- Anticona, A., Zuniga, C., Santos, A., Lorenzon, A., & Filho, P. (2023). Gis and fuzzy logic approach for forest fire risk modeling in the Cajamarca region, Peru. *Decision Science Letters*, 12(2), 353-368.
- Barlow, J., Lennox, G.D., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A.C., Mac Nally, R., Thomson, J.R., Ferraz, S.F., Louzada, J., Oliveira, V.H., Parry, L., Solar, R.R., Vieira, I.C., Aragão, L.E., Begotti, R.A., Braga, R.F., Cardoso, T.M., de Oliveira, R.C. Jr., Souza, C.M. Jr., Moura, N.G., Nunes, S.S., Siqueira, J.V., Pardini, R., Silveira, J.M., Vaz-de-Mello, F.Z., Veiga, R.C., Venturieri, A., & Gardner,

- T.A. (2016). Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 535, 144–147. <https://doi.org/10.1038/nature18326>.
- Beiranvand, S., Attarod, P., Bayramzadeh, V., Pourtahmasi, K., Nadi, M., & G. Pypker, T. (2023). Prediction of future drought in the Keygooran Juniper forest reserve of Iran using standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(2), 113-125. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.361731.2097>. (In Persian)
- Bentekhici, N., Bellal, S., & Zegrar, A. (2020). Contribution of remote sensing and GIS to mapping the fire risk of Mediterranean forest case of the forest massif of Tlemcen (North-West Algeria). *Nat Hazards*, 104, 811–831. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04191-6>.
- Beygi Heidarlou, H., Banj Shafiei, A., & Erfanian, M. (2014). Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (Case study: Sardasht Forests, NW Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4), 559-573. (In Persian)
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multicriteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>.
- Cheng, Y., Luo, P., Yang, H., Li, H., Luo, Ch., Jia, H., & Huang, Y. (2023). Fire effects on soil carbon cycling pools in forest ecosystems: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 895, 165001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165001>.
- Coban, H.O., & Erdin, C. (2020). Forest fire risk assessment using GIS and AHP integration in Bucak forest enterprise, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), 1567–1583. https://www.aloki.hu/pdf/1801_15671583.pdf
- Colak, E., & Sunar, F. (2020). Evaluation of forest fire risk in the Mediterranean Turkish forests: A case study of Menderes region, Izmir. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, 101479. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101479>.
- Darvishi, L., Ghodskhah, M., & Gholami, V. (2013). A regional model for forest fire hazard zonation in forests of Dorud city (Case Study: Babahar region), *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 11(1), 10-20. (In Persian)
- Dashti, S., Amini, J., Ahmadi Sani, N., & Javanmard, A. (2022). Zoning areas prone to fire occurrences in the forest ecosystems of North Zagros (Case study: Sardasht forests in West Azarbaijan). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), 105–126. (In Persian)
- de Andrade, D.F.C., Ruschel, A.R., Schwartz, G., de Carvalho, J.O.P., Humphries, S., & Gama, J.R.V. (2020). Forest resilience to fire in eastern Amazon depends on the intensity of pre-fire disturbance. *Forest ecology and management*, 472, 118258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118258>.
- de Santana, R., Delgado, R.C., & Schiavetti, A. (2021). Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. *Journal of Environmental Management*, 296, 113343, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113343>.
- Dong, X.U., Li-min, D.A.I., Guo-fan, S., Lei, T., & Hui, W. (2005). Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of forestry research*, 16(3), 169-174. <https://doi.org/10.1007/BF02856809>.
- Ebrahimi, H., Rasuly, A., & Mokhtari, D. (2017). Development of a Web GIS System Based on the MaxEnt Approach for Wildfire Management: A Case Study of East Azerbaijan. *Ecopersia*, 5(3), 1859-1873. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222700.2017.5.3.3.5>.
- Eskandari, S. (2017). A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 190. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2976-2>.

- Eskandari, S., & Eskandari, S. (2021). Fire of Iranian forests, consequences, opposition methods and solutions. *Human & Environment, 1*(19), 175-187. (In Persian)
- Eskandari, S., Pourghasemi, H.R., & Tiefenbacher, J.P. (2020). Relations of land cover, topography, and climate to fire occurrence in natural regions of Iran: Applying new data mining techniques for modeling and mapping fire danger, *Forest Ecology and Management, 473*, 118338. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118338>.
- Fernandez-Guisuraga, J.M., Suarez-Seoane, S., & Calvo, L. (2019). Modeling Pinus pinaster forest structure after a large wildfire using remote sensing data at high spatial resolution. *Forest Ecology and Management, 446*, 257–271. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.028>.
- Geng, M., Ma, K., Sun, Y., Wo, X., & Wang, K. (2020). Changes of land use/cover and landscape in Zhalong wetland as “red-crowned cranes country”, Heilongjiang province, China. *Global Nest Journal, 22*(4), 477–483. <https://doi.org/10.30955/gnj.003372>.
- Ghodsipour, S.H. (2010). *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Amirkabir University Press, Tehran. (In Persian)
- Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Gholamnia, K., & Aryal, J. (2019). Forest Fire Susceptibility and Risk Mapping Using Social/Infrastructural Vulnerability and Environmental Variables. *Fire, 2*(3), 50. <https://doi.org/10.3390/fire2030050>.
- Girardin, M.P., Tardif, J.C., Flannigan, M.D., & Bergeron, Y. (2006). Forest Fire-Conducive Drought Variability in the Southern Canadian Boreal Forest and Associated Climatology Inferred from Tree Rings. *Canadian Water Resources Journal, 31*(4), 275-296. <https://doi.org/10.4296/cwrj3104275>
- Goleiji, E., Hosseini, S.M., Khorasani, N., & Monavari, S.M. (2018). Forest fire risk assessment using WLC and ANP (Case study: 33 and 34 watersheds north of Iran). *Journal of Natural Environmental Hazards, 7*(15), 107-124. (In Persian)
- Gungoroglu, C. (2017). Determination of forest fire risk with fuzzy analytic hierarchy process and its mapping with the application of GIS: the case of Turkey/Cakırlar. *Human and Ecological Risk Assessment, 23*(2), 388–406. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1255136>.
- Jaafari, A., & Mafi Gholami, D. (2017). Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon’s entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 25*(2), 232-243. (In Persian).
- Jaafari, A., Razavi Termeh, S.V. & Bui, D.T. (2019). Genetic and firefly metaheuristic algorithms for an optimized neuro-fuzzy prediction modeling of wildfire probability. *Journal of Environmental Management, 243*, 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.117>.
- Jaafari, A., Zenner, E.K., & Pham, B.T. (2018). Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers. *Ecological Informatics, 43*, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.12.006>.
- Jaiswal, R.K., Mukherjee, S., Raju, K.D., & Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4*(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5).
- Jenks, G.F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography, 7*, 186-190.
- Jimeno-Llorente, L., Marcos, E., & Fernandez-Guisuraga, J.M. (2023). The Effects of Fire Severity on Vegetation Structural Complexity Assessed Using SAR Data Are Modulated by Plant Community Types in Mediterranean Fire-Prone Ecosystems. *Fire, 6*(12), 450. <https://doi.org/10.3390/fire6120450>.
- Ju, W., Xing, Zh., Wu, J. & Kang, Q. (2023). Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 98*, 104082. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104082>

- Kayet, N., Chakrabarty, A., Pathak, Kh., Sahoo, S., Dutta, T., & Hatai, B.K. (2020). Comparative analysis of multi-criteria probabilistic FR and AHP models for forest fire risk (FFR) mapping in Melghat Tiger Reserve (MTR) forest. *Journal of Forestry Research*, 31, 565–579. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0826-z>.
- Kumar, D., & Gark, C.P. (2017). Evaluating sustainable supply chain indicators using fuzzy AHP case of Indian automotive industry. *Benchmarking: An International Journal*, 24(6), 1742–1766. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2015-0111>.
- Mehregan, M.R. (2009). *Advanced operational research*. Nashre Daneshgahi Publication, Tehran. (In Persian)
- Mirdeylami, T., Shataee, Sh., & Kavousi, M.R. (2014). Forest fire risk zone mapping in the Golestan national park using weighted linear combination (WLC) method. *Iranian Journal of Forest*, 5(4), 377-390. (In Persian).
- Mohammadi, F., Shabanian, N., Pourhashemi, H., & Fatehi, P. (2010). Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(4), 586-569. (In Persian)
- Moradi, S., Limaie, S.M., Lohmander, P., & Khanmohammadi, M. (2017). Quantitative and financial evaluation of non-timber forest products (case study: Zemkan basin forests, West of Iran). *Journal of Forestry Research*, 28, 371-379. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0313-3>.
- Mundia, C.N., & Anyia, M. (2005). Analysis of land use/cover changes and urban expansion of Nairobi city using remote sensing and GIS. *International Journal of Remote sensing*, 26(13), 2831-2849. <https://doi.org/10.1080/01431160500117865>.
- Polat, S., Ghasemi Aghbash, F., & Mahdavi, A. (2020). Forest fire hazard zone mapping in Ilam county forests. *Forest Research and Development*, 6(1), 135-152. (In Persian)
- 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. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1052750>.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R., & Rossi, M. (2015). Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1515-1533. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3502-4>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.030>.
- Ricotta, C., Bajocco, S., Guglietta, D., & Conedera, M. (2018). Assessing the influence of roads on fire ignition: Does land cover matter?. *Fire*, 1, 24. <https://doi.org/10.3390/fire1020024>.
- Sagheb-Talebi, Kh., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2013). *Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future*, Springer.
- Salehi, N., Dashti, S., Atarroshan, S., Nazarpour, A., & Jaafarzadeh N. (2023). Forest Risk Fire Zoning using an Integrated Method of Artificial Neural Network and Spatial Information System (Murray Study: Shimbar Protected Area). *Environmental Erosion Research Journal*, 13(2), 235-253. (In Persian)
- Sanjary, S. (2007). *Application Guide to ArcGIS 9.2*. Abed Press, Tehran. (In Persian).
- Sari, F. (2021). Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644>.

- 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. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541>.
- Shafiei, A., Beygi Heidarlu, H., & Erfanian, M. (2015). Evaluating the Fuzzy Weighted Linear Combination Method in Forest Fire Risk Mapping (Case study: Sardasht Forests, West Azerbaijan Province, IRAN). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 22(3), 29-52. (In Persian)
- Shahabi, H., Khezri, S., Bin Ahmad, B., & Hashim, M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *Catena*, 115, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014>.
- Sharif, M., A., Kakroodi, A., Heidari, S., & Kiani, A. (2023). Monitoring fifty-year changes in riparian forests of Gotvand County, Iran, using remote sensing images. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(3), 203-224. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.362063.2098>. (In Persian)
- Sivrikaya, F., & Kucuk, O. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, 68, 101537. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537>.
- Suryabhadgavan, K.V., Alemu, M., & Balakrishnan, M. (2016). GIS-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: a case study in Harenna forest, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 57(1), 33-43. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20163001178>.
- Tavosi, T., Khosravi, M. & Rahimi, D. (2014). The Site Selection of Ecotourism in Suitable Areas. Case Study: Awramanat Region. *Geographical Planning of Space*, 4(13), 19-41. (In Persian)
- Tien Bui, D., Le, K.T.T., Nguyen, V.C., Le, H.D., & Revhaug, I. (2016). Tropical forest fire susceptibility mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, using GIS-based kernel logistic regression. *Remote Sensing*, 8(4), 347. <https://doi.org/10.3390/rs8040347>.
- Tuyen, T.T., Jaafari, A., Yen, H.P.H., Nguyen-Thoi, T., Van Phong, T., Nguyen, H.D., Van Le, H., Phuong, T.T.M., Nguyen, S.H., & Prakash, I. (2021). Mapping forest fire susceptibility using spatially explicit ensemble models based on the locally weighted learning algorithm. *Ecological Informatics*, 63, 101292. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101292>.
- Vadrevu, K.P., Eaturu, A., & Badarinath, K.V. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis-a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 223-239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>.
- Van Hoang, T., Chou, T.Y., Fang, Y.M., Nguyen, N.T., Nguyen, Q.H., Canh, P.X., Toan D.N.B., Nguyen, X.L., & Meadows M.E. (2020). Mapping Forest Fire Risk and Development of Early Warning System for NW Vietnam Using AHP and MCA/GIS Methods. *Applied Sciences*, 10(12), 4348. <https://doi.org/10.3390/app10124348>
- van Wilgen, B. (2010). The evolution of fire and invasive alien plant management practices in fynbos. *South African Journal of Science*, 105(9/10). <https://sajs.co.za/article/view/10243>.
- Veena, H.S., Ajin, R.S., Loghin, A.M., Sipai, R., Adarsh, P., Viswam, A., Vinod, P.G., Jacob, M.K., & Jayaprakash, M. (2017). Wildfire risk zonation in a tropical forest division in Kerala, India: A study using geospatial techniques. *International Journal of Conservation Science*, 8(3), 475-484.
- Zarekar, A., Kazemi Zamani, B., Ghorbani, S., Ashegh Moalla, M., & Jafari, H.R. (2013). Mapping Spatial Distribution of Forest Fire using MCDM and GIS (Case Study: Three Forest Zones in Guilan Province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(2), 218-230. (In Persian).
- Zhao, P., Zhang, F., Lin, H., & Xu, S. (2021). GIS-Based Forest Fire Risk Model: A Case Study in Laoshan National Forest Park. Nanjing. *Remote Sensing*, 13(18), 3704. <https://doi.org/10.3390/rs13183704>.



Wildfire Risk Assessment and Spatial Zoning in Forests and Rangelands using GIS-Based Multi-criteria Decision-Making Techniques in Central Zagros

S. Moradi^{1*} and N. Ahmadi Sani²

¹Assistant Prof., Dept. of Agricultural & Natural Resources Development, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, I.R. Iran.

²Associate Prof., Dept. of Agriculture, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, I.R. Iran

(Received: 29 June 2024; Accepted: 28 September 2024)

Abstract

Introduction: The increasing frequency and intensity of fire in forests and rangelands is a very worrying issue. Forest and rangeland fire is a common natural or human disaster that has a great impact on the vegetation structure, ecosystem carbon storage, fauna and flora, forest landscape, and invasion of introduced plant species. Accurate assessment of forests and rangelands fire risk and its zoning can be of great practical importance in preventing fire and reducing its damages in line with efficient environmental management. The purpose of this research is to evaluate the risk of forests and rangelands fire and its zoning by integration of Group Analysis Hierarchical Process (G-AHP) and Frequency Ratio (FR) method within Geographic Information System.

Material and Methods: This research was carried out in a part of the middle Zagros located in Oramanat region (Kermanshah province), due to numerous fires in recent years and in order to accurately identify and prioritize factors affecting fire and prepare a fire risk map. The criteria influencing the occurrence of forest and rangeland fires were identified based on the opinion of experts and literature review. In total, 4 criteria and 12 sub-criteria including infrastructure (Distance to roads, Distance to settlements), ecological (Average annual precipitation, Average monthly temperature, Forest cover density, Range cover density), socio-economic (Land use/land cover, Population density) and physiographic (Slope, Aspect, Elevation, Distance to Rivers) criteria were evaluated and weighted using G-AHP and pairwise comparison by 13 researchers (experts) related to forest and rangeland fires. The relative importance of different classes of sub-criteria maps was also calculated using the FR method. Finally, the fire risk zoning map was obtained using Weighted Linear Combination (WLC) method in the GIS environment in five risk classes (Very Low to Very High). The validation of the results was performed by overlaying the zoning map with the fires that happened in the study area in 2016-2024.

Results: The results showed that the socio-economic criteria with a weight of 0.473 and the sub-criteria of land use/land cover with a weight of 0.252 were assigned the highest importance and were recognized as the most important criteria and sub-criteria effective on the occurrence of fire in forest ecosystems. The fire risk zoning map showed that about 52 percent of the study area is in the High and Very High risk class. Additionally, based on the results, by overlaying the real fire map and the fire risk zoning map, 94.41 percent of the fire patches area are located in areas with high fire risk, which can indicate the accurate assessment and high accuracy of the zoning map.

Conclusion: In general, this study highlighted the mapping importance of burned areas and fire risk zoning and provided a new framework for identifying and prioritizing different factors affecting fire in the fire-sensitive forest areas of Oramanat (Kermanshah province) that can be effective in line with prioritized prevention and control operation to prevent forest and renageland degradation in the future.

Keywords: Forest fire risk, Frequency ratio, Group-analysis hierarchical process, Oramanat region.