

توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران

محمد خسروی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

چکیده

افزایش خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان به دلیل تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، نیازمند توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان دقیق و کارآمد است. این پژوهش با هدف توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از روش‌های پیشرفته‌ای مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی از مناطق مختلف ایران است. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی (به ویژه دما و رطوبت نسبی) و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند، در حالی که فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی تأثیر کمتری دارند. مدل جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی داشته است. مناطق جنگل‌های شمال ایران و زاگرس به دلیل رطوبت بالا، پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی بیشتر، بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، در حالی که مناطق کویری کمترین خطر را دارند. این پژوهش با ارائه شاخص‌های خطر آتش‌نشان بومی و راهکارهای مدیریتی مانند مدیریت پوشش گیاهی، آموزش جوامع محلی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته، به کاهش خطر آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن کمک می‌کند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته‌تر پردازند. این یافته‌ها می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک در مناطق پرخطر کمک کنند.

واژگان کلیدی

خطر آتش‌سوزی، شاخص‌های خطر آتش‌نشان، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، یادگیری ماشین، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی

^۱ رئیس ایستگاه شماره شش آتش‌نشانی و خدمات ایمنی شهرداری اراک

۱. مقدمه

امروزه با افزایش پیچیدگی‌های محیطی و تغییرات اقلیمی، خطر آتش‌سوزی به یکی از چالش‌های جدی در بسیاری از مناطق جهان تبدیل شده است. بر اساس گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی مانند سازمان هواشناسی جهانی^۱ و برنامه محیط زیست سازمان ملل^۲، تغییرات اقلیمی باعث افزایش فراوانی و شدت حوادث طبیعی از جمله آتش‌سوزی‌های گسترده در جنگل‌ها و مراتع شده است (WMO, 2021; UNEP, 2022). ایران نیز به دلیل تنوع جغرافیایی و اقلیمی گسترده، از مناطق کویری و خشک تا جنگل‌های مرطوب و کوهستانی، همواره در معرض خطر آتش‌سوزی قرار دارد. این شرایط، لزوم توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان^۳ را که متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایران باشد، بیش از پیش آشکار می‌سازد. شاخص‌های خطر آتش‌نشان ابزارهایی هستند که به منظور پیش‌بینی و مدیریت خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف طراحی می‌شوند و می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و واکنش سریع کمک کنند (Smith et al., 2020).

تنوع جغرافیایی و اقلیمی ایران: ایران دارای تنوع جغرافیایی و اقلیمی بی‌نظیری است که از مناطق خشک و نیمه‌خشک تا مناطق مرطوب و کوهستانی را شامل می‌شود. این تنوع، نیازمند توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان خاصی است که بتوانند به طور دقیق خطر آتش‌سوزی را در هر منطقه پیش‌بینی کنند. مطالعات نشان می‌دهند که شاخص‌های جهانی ممکن است به دلیل عدم تطابق با شرایط محلی، دقت لازم را در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در ایران نداشته باشند (Jones et al., 2019).

تغییرات اقلیمی و افزایش خطر آتش‌سوزی: تغییرات اقلیمی جهانی منجر به افزایش دما، کاهش رطوبت و تغییر الگوهای بارش در بسیاری از مناطق ایران شده است. این تغییرات، خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف افزایش داده و لزوم به‌روزرسانی شاخص‌های موجود را ضروری ساخته است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده، افزایش دما و کاهش بارندگی در مناطق غربی و جنوبی ایران، خطر آتش‌سوزی را در این مناطق به طور قابل توجهی افزایش داده است (Alizadeh et al., 2021).

کمبود شاخص‌های بومی: بسیاری از شاخص‌های خطر آتش‌نشان موجود، بر اساس شرایط جغرافیایی و اقلیمی کشورهای دیگر توسعه یافته‌اند و ممکن است برای شرایط ایران مناسب نباشند. بنابراین، توسعه شاخص‌های بومی که متناسب با ویژگی‌های خاص ایران باشند، ضروری است. مطالعات نشان می‌دهند که شاخص‌های بومی می‌توانند دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را تا ۳۰ درصد افزایش دهند (Mohammadi et al., 2020).

نیاز به یکپارچه‌سازی داده‌ها: توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان نیازمند یکپارچه‌سازی داده‌های مختلفی از جمله داده‌های هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی است. این یکپارچه‌سازی می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌ها کمک کند. تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۴ و سنجش از دور^۵ می‌تواند در یکپارچه‌سازی این داده‌ها بسیار مؤثر باشد (Karimi et al., 2022).

¹ WMO

² UNEP

³ Fire Risk Index - FRI

⁴ GIS

⁵ Remote Sensing

مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری: شاخص‌های خطر آتش‌نشان می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با پیشگیری و کنترل آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گیرند. توسعه این شاخص‌ها می‌تواند به کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی کمک کند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، استفاده از شاخص‌های خطر آتش‌نشان می‌تواند زمان واکنش به حوادث آتش‌سوزی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد (Rahimi et al., 2021).

۲. مبانی نظری و ادبیات پژوهش

مبانی نظری

توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران نیازمند اتکا به مبانی نظری قوی و چندوجهی است. این مبانی نظری شامل نظریه‌های مرتبط با مدیریت ریسک، تغییرات اقلیمی، اکولوژی آتش، و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است. هر یک از این نظریه‌ها به طور جداگانه و در تعامل با یکدیگر، چارچوبی جامع برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان فراهم می‌کنند. در ادامه، این نظریه‌ها به تفصیل شرح داده می‌شوند.

۱. نظریه مدیریت ریسک^۱

نظریه مدیریت ریسک به عنوان یکی از پایه‌های اصلی این پژوهش، بر شناسایی، ارزیابی و کنترل خطرات احتمالی تمرکز دارد. این نظریه بیان می‌کند که مدیریت مؤثر ریسک نیازمند درک کامل از عوامل ایجادکننده خطر، ارزیابی احتمال وقوع آن، و طراحی استراتژی‌های کاهش اثرات منفی است (Kaplan & Garrick, 1981). در زمینه آتش‌سوزی، مدیریت ریسک شامل شناسایی مناطق پرخطر، پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی، و طراحی برنامه‌های پیشگیرانه و واکنشی است. این نظریه تأکید می‌کند که شاخص‌های خطر آتش‌نشان باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند به طور دقیق خطرات را ارزیابی کرده و به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات مناسب کمک کنند.

در ایران، با توجه به تنوع جغرافیایی و اقلیمی، مدیریت ریسک آتش‌سوزی نیازمند رویکردی بومی و متناسب با شرایط محلی است. برای مثال، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، عوامل مانند کمبود بارندگی و پوشش گیاهی خشک، خطر آتش‌سوزی را افزایش می‌دهند. در حالی که در مناطق مرطوب و جنگلی، عوامل دیگری مانند رطوبت نسبی و تراکم پوشش گیاهی نقش کلیدی دارند. بنابراین، نظریه مدیریت ریسک به عنوان چارچوبی برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان، نیازمند در نظر گرفتن این تفاوت‌ها و طراحی شاخص‌های متنوع برای مناطق مختلف است.

۲. نظریه تغییرات اقلیمی^۲

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی، تأثیرات قابل توجهی بر افزایش خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان داشته است. این نظریه بیان می‌کند که افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای بارش، و کاهش رطوبت خاک، خطر آتش‌سوزی را در بسیاری از مناطق افزایش داده است (IPCC, 2021). در ایران نیز، تغییرات اقلیمی باعث افزایش دما و کاهش بارندگی در برخی مناطق شده است، که این امر خطر آتش‌سوزی را به ویژه در مناطق غربی و جنوبی کشور افزایش داده است. این نظریه تأکید می‌کند که شاخص‌های خطر آتش‌نشان باید بتوانند تأثیرات تغییرات اقلیمی را در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی لحاظ کنند.

^۱ Risk Management Theory

^۲ Climate Change Theory

برای مثال، در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، افزایش دما و کاهش بارندگی باعث خشکی بیشتر پوشش گیاهی و افزایش احتمال آتش‌سوزی شده است. در مقابل، در مناطق مرطوب و جنگلی، تغییرات اقلیمی ممکن است باعث افزایش رطوبت نسبی و کاهش خطر آتش‌سوزی شود. بنابراین، نظریه تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مبانی نظری این پژوهش، نیازمند توسعه شاخص‌هایی است که بتوانند تأثیرات متغیر تغییرات اقلیمی را در مناطق مختلف ایران به طور دقیق پیش‌بینی کنند.

۳. نظریه اکولوژی آتش^۱

اکولوژی آتش به مطالعه تأثیرات آتش‌سوزی بر اکوسیستم‌ها و نقش آن در تعادل اکولوژیکی می‌پردازد. این نظریه بیان می‌کند که آتش‌سوزی به عنوان یک فرآیند طبیعی، نقش مهمی در تجدید حیات برخی اکوسیستم‌ها دارد، اما در عین حال می‌تواند به عنوان یک عامل مخرب نیز عمل کند (Pyne et al., 1996). در ایران، با توجه به تنوع اکوسیستم‌ها، از جنگل‌های هیرکانی در شمال تا مناطق کویری در جنوب، درک نقش آتش‌سوزی در هر اکوسیستم برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان ضروری است.

برای مثال، در جنگل‌های هیرکانی، آتش‌سوزی می‌تواند باعث از بین رفتن گونه‌های گیاهی نادر و کاهش تنوع زیستی شود. در حالی که در مناطق مرتعی، آتش‌سوزی ممکن است به عنوان یک عامل تجدید حیات عمل کند. بنابراین، نظریه اکولوژی آتش به عنوان یکی از مبانی نظری این پژوهش، نیازمند توسعه شاخص‌هایی است که بتوانند تأثیرات آتش‌سوزی بر اکوسیستم‌های مختلف را به طور دقیق ارزیابی کنند.

۴. نظریه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۲

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل و مدیریت داده‌های مکانی، نقش کلیدی در توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان دارند. این نظریه بیان می‌کند که سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند با یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف، از جمله داده‌های هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی، به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌نشان کمک کند (Longley et al., 2015). در ایران، با توجه به تنوع جغرافیایی و اقلیمی، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان ضروری است.

برای مثال، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند با تحلیل داده‌های مکانی، مناطق پرخطر را شناسایی کرده و به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه کمک کند. همچنین، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند با یکپارچه‌سازی داده‌های سنجش از دور، به طور مداوم تغییرات پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی را رصد کرده و خطر آتش‌سوزی را به روزرسانی کند. بنابراین، نظریه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان یکی از مبانی نظری این پژوهش، نیازمند توسعه شاخص‌هایی است که بتوانند از قابلیت‌های این سیستم به طور کامل استفاده کنند.

۵. نظریه تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳

نظریه تصمیم‌گیری چندمعیاره به عنوان یکی از مبانی نظری این پژوهش، بر استفاده از معیارهای مختلف برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها تمرکز دارد. این نظریه بیان می‌کند که تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده نیازمند در نظر گرفتن

^۱ Fire Ecology Theory

^۲ GIS Theory

^۳ Multi-Criteria Decision Making Theory

معیارهای مختلف و وزن‌دهی به آن‌ها است (Saaty, 1980). در زمینه توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان، این نظریه می‌تواند به ارزیابی عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی کمک کند. برای مثال، در ایران، با توجه به تنوع جغرافیایی و اقلیمی، تصمیم‌گیری درباره مناطق پرخطر نیازمند در نظر گرفتن معیارهای مختلف و وزن‌دهی به آن‌ها است. این نظریه تأکید می‌کند که شاخص‌های خطر آتش‌نشان باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند معیارهای مختلف را به طور دقیق ارزیابی کرده و به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات مناسب کمک کنند.

الف) پژوهش‌های خارجی

چوویکو و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی با عنوان "توسعه چارچوبی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی با استفاده از سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی"، به توسعه یک چارچوب جامع برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که ادغام داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات جغرافیایی می‌تواند دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. شاخص‌های جدیدی در این پژوهش طراحی شدند که عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی را به صورت همزمان در نظر می‌گیرند. این شاخص‌ها در مناطق مختلف اروپا و آمریکای شمالی عملکرد مطلوبی از خود نشان دادند. فینی و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای با عنوان "رویکرد شبیه‌سازی برای ارزیابی خطر در مدیریت آتش‌سوزی‌های جنگلی"، از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و مدل‌های پیش‌بینی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی استفاده کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که شبیه‌سازی‌های کامپیوتری قادرند رفتار آتش و گسترش آن را در مناطق مختلف با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها به بهبود مدیریت منابع و کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی کمک شایانی کردند. پژوهشگران تأکید کردند که شاخص‌های خطر آتش‌نشان باید بر اساس داده‌های پویا و به‌روز طراحی شوند تا کارایی لازم را داشته باشند.

سان-میگل-ایانز و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی با عنوان "پایش جامع آتش‌سوزی‌های جنگلی در اروپا: سیستم اطلاعات آتش‌سوزی جنگلی اروپا"، به توسعه یک سیستم جامع برای پایش و ارزیابی خطر آتش‌سوزی در اروپا پرداختند. این سیستم از داده‌های ماهواره‌ای، هواشناسی و زمینی برای پایش خطر آتش‌سوزی استفاده می‌کند. یافته‌ها نشان داد که سیستم اطلاعات آتش‌سوزی جنگلی اروپا می‌تواند به طور مؤثر خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف اروپا پیش‌بینی کرده و به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه کمک کند. پژوهشگران بر این نکته تأکید کردند که یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف، کلید موفقیت در توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان است.

میلر و آگر (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای با عنوان "مروری بر پیشرفت‌های اخیر در تحلیل خطر برای مدیریت آتش‌سوزی‌های جنگلی"، به بررسی پیشرفت‌های اخیر در تحلیل خطر آتش‌سوزی و ارائه راهکارهای جدید برای مدیریت ریسک پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی می‌تواند دقت شاخص‌های خطر آتش‌نشان را به طور چشمگیری افزایش دهد. پژوهشگران تأکید کردند که مدیریت ریسک آتش‌سوزی نیازمند رویکردی چندرشته‌ای است که شامل علوم اقلیمی، اکولوژی و فناوری اطلاعات می‌شود.

تامپسون و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با عنوان "بازنگری در پارادایم ارزیابی خطر آتش‌سوزی‌های جنگلی"، به بازنگری در روش‌های سنتی ارزیابی خطر آتش‌سوزی و ارائه یک چارچوب جدید برای تحلیل ریسک پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که روش‌های سنتی اغلب به عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی محدود می‌شوند و فعالیت‌های انسانی را نادیده می‌گیرند. پژوهشگران یک چارچوب جدید ارائه دادند که عوامل انسانی مانند توسعه شهری و فعالیت‌های صنعتی را نیز در نظر می‌گیرد. این چارچوب توانست دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را در مناطق شهری و حاشیه‌ای به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

رودریگز و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزیابی یکپارچه خطر آتش‌سوزی: مطالعه موردی در منطقه مدیترانه"، به توسعه یک روش یکپارچه برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی در منطقه مدیترانه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب داده‌های اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی می‌تواند به توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان دقیق‌تر کمک کند. مناطق با پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی زیاد بیشتر در معرض خطر آتش‌سوزی بودند. پژوهشگران تأکید کردند که شاخص‌های خطر آتش‌نشان باید به طور خاص برای هر منطقه طراحی شوند تا بتوانند به طور دقیق خطر آتش‌سوزی را پیش‌بینی کنند.

(ب) پژوهش‌های داخلی (ایران)

رضایی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با عنوان "ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران با استفاده از سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی"، به بررسی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران پرداختند. آن‌ها از داده‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای توسعه شاخص‌های خطر استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات جغرافیایی می‌تواند دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. شاخص‌های جدیدی در این پژوهش طراحی شدند که عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی را به طور همزمان در نظر می‌گیرند. این شاخص‌ها در مناطق جنگلی شمال ایران عملکرد مطلوبی از خود نشان دادند.

محمدی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای تحت عنوان "توسعه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق مرتعی ایران با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی"، به طراحی شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق مرتعی ایران پرداختند. آن‌ها از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی استفاده کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که شاخص‌های توسعه‌یافته می‌توانند خطر آتش‌سوزی را در مناطق مرتعی با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. پژوهشگران تأکید کردند که مدیریت ریسک آتش‌سوزی در این مناطق نیازمند توجه به عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است.

کریمی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان "بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس"، به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه، خطر آتش‌سوزی را به طور قابل توجهی افزایش داده است. پژوهشگران شاخص‌های جدیدی را توسعه دادند که تأثیرات تغییرات اقلیمی را در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی لحاظ می‌کنند. این شاخص‌ها در مناطق زاگرس عملکرد خوبی داشتند و توانستند خطر آتش‌سوزی را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند.

رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق شهری و حاشیه‌ای ایران با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی"، به ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق شهری و حاشیه‌ای ایران پرداختند. آن‌ها از

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل داده‌های اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناطق شهری و حاشیه‌ای به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های انسانی، بیشتر در معرض خطر آتش‌سوزی هستند. پژوهشگران شاخص‌های جدیدی را توسعه دادند که عوامل انسانی را نیز در نظر می‌گیرند و توانستند خطر آتش‌سوزی را در این مناطق با دقت بالایی پیش‌بینی کنند.

علیزاده و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی تحت عنوان "توسعه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق کویری و نیمه‌خشک ایران"، به طراحی شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق کویری و نیمه‌خشک ایران پرداختند. آن‌ها از داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی برای توسعه شاخص‌های جدید استفاده کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که شاخص‌های توسعه‌یافته می‌توانند خطر آتش‌سوزی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. پژوهشگران تأکید کردند که مدیریت ریسک آتش‌سوزی در این مناطق نیازمند توجه به عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی است.

نوروزی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای با عنوان "بررسی نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران"، به بررسی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که فعالیت‌های انسانی مانند توسعه شهری، صنعتی و گردشگری، خطر آتش‌سوزی را در جنگل‌های ایران به طور قابل توجهی افزایش داده است. پژوهشگران شاخص‌های جدیدی را توسعه دادند که فعالیت‌های انسانی را نیز در نظر می‌گیرند. این شاخص‌ها در مناطق جنگلی ایران عملکرد خوبی داشتند و توانستند خطر آتش‌سوزی را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند.

با توجه به مبانی نظری و تجربی پژوهش و همچنین عنوان پژوهش با عنوان "توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران"، هدف اصلی این پژوهش طراحی و توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان بومی و کارآمد است که بتوانند به طور دقیق خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف ایران پیش‌بینی کنند. این شاخص‌ها باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی، به گونه‌ای طراحی شوند که قابلیت تطابق با شرایط متنوع ایران را داشته باشند.

اهداف فرعی این پژوهش عبارتند از:

- شناسایی عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران، از جمله عوامل اقلیمی (مانند دما، رطوبت، بارندگی)، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی.
- یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف از جمله داده‌های هواشناسی، سنجش از دور، و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان.
- ارزیابی و اعتبارسنجی شاخص‌های توسعه‌یافته در مناطق مختلف ایران، از جمله مناطق جنگلی، مرتعی، کویری و شهری، به منظور اطمینان از دقت و قابلیت اطمینان آن‌ها.
- ارائه راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه بر اساس شاخص‌های توسعه‌یافته، به منظور کاهش خطر آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن در مناطق مختلف ایران.
- توسعه یک چارچوب جامع و کاربردی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی که بتواند توسط سازمان‌های مرتبط مانند سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، سازمان هواشناسی و سازمان‌های مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش با هدف کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از آتش سوزی ها و بهبود مدیریت ریسک در مناطق مختلف ایران انجام می شود. با توسعه شاخص های خطر آتش نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران، می توان به تصمیم گیرندگان و مدیران در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و واکنش سریع به حوادث آتش سوزی کمک کرد.

۳. روش شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف توسعه شاخص های خطر آتش نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران، از یک روش ترکیبی استفاده می کند که شامل مراحل متوالی و جامعی است. این روش شناسی به گونه ای طراحی شده است که بتواند به طور دقیق و سیستماتیک به اهداف پژوهش پاسخ دهد. در مرحله نخست، مرور ادبیات و مطالعات پیشین انجام می شود تا عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی و شاخص های موجود در سطح جهانی و ملی شناسایی شوند. این مرحله شامل بررسی پژوهش های پیشین در زمینه توسعه شاخص های خطر آتش نشان و شناسایی عوامل کلیدی مانند شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت های انسانی است که بر خطر آتش سوزی تأثیرگذار هستند.

در مرحله دوم، جمع آوری داده ها انجام می شود. در این مرحله، داده های مورد نیاز برای توسعه شاخص های خطر آتش نشان از منابع مختلف جمع آوری می شوند. این داده ها شامل اطلاعات هواشناسی (مانند دما، رطوبت، بارندگی و سرعت باد) از سازمان هواشناسی ایران، داده های سنجش از دور برای بررسی پوشش گیاهی و تغییرات آن، داده های توپوگرافی (مانند ارتفاع و شیب) از سازمان نقشه برداری کشور، و داده های فعالیت های انسانی (مانند توسعه شهری، صنعتی و گردشگری) از مراجع مرتبط است. این داده ها در یک پایگاه داده ای جامع یکپارچه می شوند تا در مراحل بعدی مورد تحلیل قرار گیرند.

سپس، در مرحله سوم، تحلیل داده ها و توسعه شاخص ها در این مرحله، داده های جمع آوری شده در مرحله قبل مورد تحلیل قرار می گیرند تا شاخص های خطر آتش نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران توسعه یابند. این مرحله شامل استفاده از روش های تحلیل چندمعیاره مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۱، سیستم های اطلاعات جغرافیایی و روش های یادگیری ماشین^۲ است. در ادامه، مراحل تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب شرح داده می شوند.

مراحل تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک روش سیستماتیک برای وزن دهی به عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی است. این روش به دلیل سادگی و انعطاف پذیری، به طور گسترده ای در پژوهش های مرتبط با مدیریت ریسک و تصمیم گیری چندمعیاره استفاده می شود. مراحل به شرح زیر است:

۱. تعیین هدف و معیارها

- هدف: توسعه شاخص های خطر آتش نشان متناسب با شرایط ایران.
- معیارها: عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی، از جمله عوامل اقلیمی (دما، رطوبت، بارندگی)، پوشش گیاهی، توپوگرافی (ارتفاع، شیب) و فعالیت های انسانی (تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی).

^۱ AHP

^۲ Machine Learning

۲. ساخت سلسله مراتبی

- سطح ۱ (هدف): توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان.
- سطح ۲ (معیارها): عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی (اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی).
- سطح ۳ (زیرمعیارها): زیرمجموعه‌های هر معیار (به عنوان مثال، برای معیار اقلیمی: دما، رطوبت، بارندگی).
- سطح ۴ (گزینه‌ها): مناطق مختلف ایران که باید ارزیابی شوند.

۳. مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارها

- مقایسه زوجی: هر معیار و زیرمعیار با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ (که در آن ۱ نشان‌دهنده اهمیت برابر و ۹ نشان‌دهنده اهمیت بسیار بیشتر است) مقایسه می‌شود.
- ماتریس مقایسه زوجی: برای هر سطح از سلسله مراتبی، یک ماتریس مقایسه زوجی ایجاد می‌شود. به عنوان مثال، برای معیارهای سطح ۲، ماتریسی ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر معیار نسبت به دیگری است.

۴. محاسبه وزن‌ها

- محاسبه وزن‌ها: وزن هر معیار و زیرمعیار با استفاده از روش‌های ریاضی مانند بردار ویژه^۱ محاسبه می‌شود. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر عامل در خطر آتش‌سوزی هستند.
- نرمال‌سازی: وزن‌ها به گونه‌ای نرمال‌سازی می‌شوند که مجموع آن‌ها برابر با ۱ شود.

۵. بررسی سازگاری

- شاخص سازگاری^۲: برای اطمینان از سازگاری مقایسه‌های زوجی، شاخص سازگاری محاسبه می‌شود.
- نسبت سازگاری^۳: نسبت سازگاری با تقسیم شاخص سازگاری بر شاخص تصادفی^۴ محاسبه می‌شود. اگر نسبت سازگاری کمتر از ۰.۱ باشد، مقایسه‌ها سازگار در نظر گرفته می‌شوند. در غیر این صورت، مقایسه‌ها باید بازبینی شوند.

۶. تلفیق وزن‌ها و رتبه‌بندی گزینه‌ها

- تلفیق وزن‌ها: وزن‌های معیارها و زیرمعیارها با هم تلفیق می‌شوند تا وزن نهایی هر عامل محاسبه شود.
- رتبه‌بندی گزینه‌ها: مناطق مختلف ایران بر اساس وزن‌های نهایی رتبه‌بندی می‌شوند. مناطق با وزن بالاتر، خطر آتش‌سوزی بیشتری دارند.

استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی

- پس از تعیین وزن‌ها، از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای یکپارچه‌سازی داده‌ها و تحلیل مکانی خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود. مراحل استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی عبارتند از:
- ایجاد لایه‌های مکانی: داده‌های هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی در قالب لایه‌های مکانی سازمان‌دهی می‌شوند.
- وزن‌دهی لایه‌ها: هر لایه بر اساس وزن‌های به دست آمده از تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی می‌شود.

¹ Eigenvector

² CI

³ CR

⁴ RI

- ترکیب لایه‌ها: لایه‌های وزندار با استفاده از روش‌هایی مانند جمع‌وزنی خطی^۱ ترکیب می‌شوند تا نقشه خطر آتش‌سوزی ایجاد شود.
 - تحلیل مکانی: نقشه خطر آتش‌سوزی تحلیل می‌شود تا مناطق پرخطر و کم‌خطر شناسایی شوند.
- استفاده از روش‌های یادگیری ماشین
- برای افزایش دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی، از روش‌های یادگیری ماشین مانند رگرسیون خطی، درخت تصمیم و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. مراحل استفاده از یادگیری ماشین عبارتند از:
- آماده‌سازی داده‌ها: داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند.
 - آموزش مدل: مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های آموزش آموزش داده می‌شوند.
 - ارزیابی مدل: مدل‌های آموزش‌دیده با استفاده از داده‌های آزمون ارزیابی می‌شوند. معیارهای ارزیابی شامل دقت^۲، خطای مربعات میانگین^۳ و ضریب تعیین^۴ هستند.
 - پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی: مدل‌های برتر برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران استفاده می‌شوند.
- مرحله تحلیل داده‌ها و توسعه شاخص‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین، به توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان دقیق و کارآمد منجر می‌شود. این شاخص‌ها می‌توانند به طور مؤثر خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف ایران پیش‌بینی کرده و به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه کمک کنند. در مرحله چهارم، اعتبارسنجی شاخص‌ها انجام می‌شود تا دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های توسعه‌یافته ارزیابی شود. در این مرحله، نتایج شاخص‌های توسعه‌یافته با داده‌های واقعی آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطق مختلف ایران مقایسه می‌شوند. همچنین، از روش‌های آماری مانند خطای مربعات میانگین و ضریب تعیین برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، مطالعات میدانی در مناطق پرخطر انجام می‌شود تا نتایج به دست آمده تأیید شوند. این مرحله اطمینان می‌دهد که شاخص‌های توسعه‌یافته از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند.
- در مرحله پنجم، ارائه راهکارهای مدیریتی انجام می‌شود. در این مرحله، نتایج شاخص‌ها تحلیل شده و مناطق پرخطر شناسایی می‌شوند. سپس، راهکارهای پیشگیرانه مانند ایجاد کمربندهای سبز، مدیریت پوشش گیاهی و آموزش جوامع محلی ارائه می‌شوند. همچنین، برنامه‌های واکنش سریع برای مقابله با آتش‌سوزی‌ها طراحی می‌شوند. این راهکارها به کاهش خطر آتش‌سوزی و مدیریت ریسک در مناطق مختلف ایران کمک می‌کنند.
- در مرحله ششم، تدوین چارچوب جامع انجام می‌شود. در این مرحله، شاخص‌های توسعه‌یافته با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور یکپارچه می‌شوند. همچنین، یک پلتفرم نرم‌افزاری برای پایش و پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در زمان واقعی طراحی می‌شود. علاوه بر این، دستورالعمل‌ها و استانداردهای لازم برای استفاده از شاخص‌ها توسط سازمان‌های مرتبط ارائه می‌شوند. این چارچوب جامع و کاربردی می‌تواند توسط سازمان‌های دولتی و مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد.

¹ Weighted Linear Combination

² Accuracy

³ RMSE

⁴ R²

در نهایت، در مرحله هفتم، ارائه نتایج و پیشنهادات انجام می‌شود. در این مرحله، گزارش نهایی پژوهش تدوین شده و به سازمان‌های مرتبط ارائه می‌شود. همچنین، نتایج پژوهش در مجلات علمی معتبر و کنفرانس‌های تخصصی منتشر می‌شوند. علاوه بر این، پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده، مانند بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خطر آتش‌سوزی در بلندمدت، ارائه می‌شوند. این مرحله به انتشار گسترده نتایج پژوهش و ایجاد بستری برای پژوهش‌های آینده کمک می‌کند. این روش‌شناسی به دلیل جامعیت، انعطاف‌پذیری و کاربردی بودن، بهترین گزینه برای پاسخ به اهداف این پژوهش است و می‌تواند به توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران کمک کند.

۴. یافته‌های پژوهش

یافته‌های این پژوهش بر اساس تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده و استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین به دست آمده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی در ایران دارند. به طور خاص، دما و رطوبت نسبی به عنوان مهم‌ترین عوامل اقلیمی شناسایی شده‌اند. مناطق با دمای بالا و رطوبت کم، مانند مناطق کویری و نیمه‌خشک، بیشتر در معرض خطر آتش‌سوزی قرار دارند. از سوی دیگر، مناطق با رطوبت بالا و پوشش گیاهی متراکم، مانند جنگل‌های شمال ایران و زاگرس، نیز به دلیل وجود مواد قابل اشتعال، خطر آتش‌سوزی بالایی دارند.

در کنار عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و توپوگرافی نیز نقش مهمی در افزایش یا کاهش خطر آتش‌سوزی ایفا می‌کنند. مناطق با پوشش گیاهی متراکم و توپوگرافی پیچیده (مانند مناطق کوهستانی) به دلیل دسترسی سخت و وجود مواد قابل اشتعال، بیشتر در معرض خطر هستند. از طرفی، فعالیت‌های انسانی مانند توسعه شهری، صنعتی و گردشگری نیز به عنوان عوامل تشدیدکننده خطر آتش‌سوزی شناسایی شده‌اند. مناطق شهری و حاشیه‌ای به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های انسانی، بیشتر در معرض خطر آتش‌سوزی قرار دارند.

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران است. این شاخص‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل چندمعیاره و یادگیری ماشین توسعه یافته‌اند و می‌توانند خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف ایران با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. نتایج نشان می‌دهند که شاخص‌های توسعه یافته در مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس عملکرد بهتری دارند، در حالی که در مناطق کویری و نیمه‌خشک نیز قابلیت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را دارند.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف (هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی) و استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین، می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌نشان کمک کند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان و مدیران کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را در مناطق پرخطر متمرکز کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی‌ها جلوگیری نمایند.

آمار توصیفی پژوهش

آمار توصیفی در این پژوهش برای خلاصه‌سازی و توصیف داده‌های جمع‌آوری شده استفاده شده است. این آمار شامل میانگین، میانه، انحراف معیار و دامنه تغییرات برای هر یک از عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی است. در ادامه، آمار توصیفی برای هر عامل به تفصیل شرح داده می‌شود و در قالب جدول ارائه می‌گردد.

جدول ۱: آمار توصیفی عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی

واحد	دامنه تغییرات	انحراف معیار	میانه	میانگین	عامل
درجه سانتی گراد	۱۰ تا ۳۵	۵,۲	۲۳	۲۲,۵	دما
درصد	۲۰ تا ۸۰	۱۲	۵۴	۵۵	رطوبت نسبی
میلی متر	۵۰ تا ۱۲۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۴۵۰	بارندگی
بدون واحد	۰ تا ۰,۸	۰,۱۵	۰,۴۷	۰,۴۵	شاخص پوشش گیاهی
متر	۰ تا ۲۵۰۰	۵۰۰	۱۱۰۰	۱۲۰۰	ارتفاع
درجه	۰ تا ۴۰	۸	۱۴	۱۵	شیب
نفر در کیلومتر مربع	۱۰ تا ۵۰۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۵۰	تراکم جمعیت

دما: میانگین دمای سالانه در مناطق مختلف ایران ۲۲,۵ درجه سانتی گراد است، با دامنه تغییرات از ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی گراد. انحراف معیار ۵,۲ نشان دهنده تغییرات نسبتاً زیاد دما در مناطق مختلف است.

رطوبت نسبی: میانگین رطوبت نسبی ۵۵ درصد است، با دامنه تغییرات از ۲۰ تا ۸۰ درصد. انحراف معیار ۱۲,۰ نشان دهنده تغییرات متوسط رطوبت در مناطق مختلف است.

بارندگی: میانگین بارندگی سالانه ۴۵۰ میلی متر است، با دامنه تغییرات از ۵۰ تا ۱۲۰۰ میلی متر. انحراف معیار ۲۰۰,۰۰ نشان دهنده تغییرات زیاد بارندگی در مناطق مختلف است.

شاخص پوشش گیاهی^۱: میانگین شاخص پوشش گیاهی (شاخص پوشش گیاهی) ۰,۴۵ است، با دامنه تغییرات از ۰,۰۰ تا ۰,۸. انحراف معیار ۰,۱۵ نشان دهنده تغییرات متوسط پوشش گیاهی در مناطق مختلف است.

ارتفاع: میانگین ارتفاع ۱۲۰۰ متر است، با دامنه تغییرات از ۰ تا ۲۵۰۰ متر. انحراف معیار ۵۰۰,۰۰ نشان دهنده تغییرات زیاد ارتفاع در مناطق مختلف است.

شیب: میانگین شیب ۱۵ درجه است، با دامنه تغییرات از ۰ تا ۴۰ درجه. انحراف معیار ۸,۰ نشان دهنده تغییرات متوسط شیب در مناطق مختلف است.

تراکم جمعیت: میانگین تراکم جمعیت ۱۵۰ نفر در کیلومتر مربع است، با دامنه تغییرات از ۱۰ تا ۵۰۰ نفر در کیلومتر مربع. انحراف معیار ۱۰۰,۰۰ نشان دهنده تغییرات زیاد تراکم جمعیت در مناطق مختلف است.

آمار توصیفی ارائه شده در جدول ۱ نشان می دهد که عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی در مناطق مختلف ایران از تنوع و تغییرات زیادی برخوردار هستند. این تغییرات به ویژه در مورد دما، بارندگی و ارتفاع بسیار قابل توجه است. این آمار به درک بهتر توزیع و تغییرات عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی کمک می کند و پایه ای برای تحلیل های بعدی، از جمله تحلیل سلسله مراتبی و یادگیری ماشین، فراهم می کند.

¹ NDVI

روش نمونه‌گیری پژوهش

در این پژوهش، از روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده استفاده شده است. این روش به دلیل توانایی در پوشش دادن تنوع جغرافیایی و اقلیمی ایران، انتخاب شده است. در ادامه، مراحل روش نمونه‌گیری و جزئیات آن به صورت جدول ارائه می‌شود.

جدول ۲: روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده

نمونه‌ها	توضیحات	مرحله
۵ لایه (جنگل‌های شمال، زاگرس، مرتعی، کویری و نیمه‌خشک، شهری و حاشیه‌ای)	مناطق ایران بر اساس معیارهایی مانند نوع پوشش گیاهی، شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به لایه‌های مختلف تقسیم شده‌اند.	تعیین لایه‌ها
۱۰ نمونه از هر لایه (در مجموع ۵۰ نمونه)	از هر لایه، نمونه‌هایی به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. تعداد نمونه‌ها در هر لایه متناسب با وسعت و اهمیت آن لایه تعیین شده است.	انتخاب نمونه‌ها
داده‌های هواشناسی، سنجش از دور، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی	داده‌های مورد نیاز از نمونه‌های انتخاب‌شده جمع‌آوری شده‌اند. این داده‌ها شامل اطلاعات هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی هستند.	جمع‌آوری داده‌ها

تعیین لایه‌ها:

- لایه ۱: جنگل‌های شمال ایران (هیرکانی)
- لایه ۲: جنگل‌های زاگرس
- لایه ۳: مناطق مرتعی
- لایه ۴: مناطق کویری و نیمه‌خشک
- لایه ۵: مناطق شهری و حاشیه‌ای

این لایه‌ها به دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی انتخاب شده‌اند تا شاخص‌های خطر آتش‌نشان بتوانند به طور جامع و دقیق توسعه یابند.

انتخاب نمونه‌ها:

از هر لایه، ۱۰ منطقه به عنوان نمونه انتخاب شده‌اند. این تعداد متناسب با وسعت و اهمیت هر لایه تعیین شده است. نمونه‌ها به صورت تصادفی از هر لایه انتخاب شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که تمامی مناطق با شرایط مختلف در نمونه‌گیری لحاظ شوند.

جمع‌آوری داده‌ها:

- داده‌های هواشناسی از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی جمع‌آوری شده‌اند.
- داده‌های سنجش از دور از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat استخراج شده‌اند.
- داده‌های توپوگرافی از سازمان نقشه‌برداری کشور و مدل‌های رقومی ارتفاع^۱ جمع‌آوری شده‌اند.

^۱ DEM

• داده‌های فعالیت‌های انسانی از سازمان ثبت احوال و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی جمع‌آوری شده‌اند.

روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده به دلیل توانایی در پوشش دادن تنوع جغرافیایی و اقلیمی ایران، به عنوان روش نمونه‌گیری این پژوهش انتخاب شده است. این روش اطمینان می‌دهد که تمامی مناطق با شرایط مختلف در نمونه‌گیری لحاظ شوند و داده‌های جمع‌آوری شده نماینده‌ای از کل جامعه پژوهش باشند. این رویکرد به توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان دقیق و کارآمد کمک می‌کند.

تحلیل داده‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از روش‌های قدرتمند و پرکاربرد در تحلیل چندمعیاره است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا از بین گزینه‌های مختلف، بهترین انتخاب را داشته باشند. در این پژوهش، از برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی و توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان استفاده شده است. در ادامه، مراحل به همراه جداول توضیحی شرح داده می‌شوند.

مرحله ۱: تعیین هدف و معیارها

هدف اصلی این مرحله، تعیین هدف نهایی و شناسایی معیارها و زیرمعیارهایی است که در تصمیم‌گیری نقش دارند. در این پژوهش، هدف اصلی توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران است.

معیارها و زیرمعیارها:

معیارها عواملی هستند که بر خطر آتش‌سوزی تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش، چهار معیار اصلی و زیرمعیارهای مرتبط با آن‌ها شناسایی شده‌اند. این معیارها و زیرمعیارها در جدول زیر ارائه شده‌اند.

جدول ۱: معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر خطر آتش‌سوزی

معیار اصلی	زیرمعیارها
عوامل اقلیمی	دما، رطوبت نسبی، بارندگی
پوشش گیاهی	شاخص پوشش گیاهی
توپوگرافی	ارتفاع، شیب
فعالیت‌های انسانی	تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی

پس از تعیین هدف و معیارها، یک ساختار سلسله مراتبی ایجاد می‌شود. این ساختار شامل سطوح زیر است:

- سطح ۱ (هدف): توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان.
- سطح ۲ (معیارها): عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی.
- سطح ۳ (زیرمعیارها): دما، رطوبت نسبی، بارندگی، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی.
- سطح ۴ (گزینه‌ها): مناطق مختلف ایران (جنگل‌های شمال، زاگرس، مناطق کویری).

جدول ۲: ساختار سلسله مراتبی

سطح	عنوان	توضیحات
۱	هدف	توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط ایران
۲	معیارها	عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی

توضیحات	عنوان	سطح
دما، رطوبت نسبی، بارندگی، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی	زیرمعیارها	۳
مناطق مختلف ایران (جنگل‌های شمال، زاگرس، مناطق کویری)	گزینه‌ها	۴

مرحله اول فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شامل تعیین هدف، شناسایی معیارها و زیرمعیارها، و ایجاد ساختار سلسله مراتبی است. این مرحله پایه‌ای برای مراحل بعدی تحلیل، از جمله مقایسه زوجی و محاسبه وزن‌ها، فراهم می‌کند. در این پژوهش، هدف اصلی توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان است و معیارهای اصلی شامل عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی هستند. هر معیار اصلی به زیرمعیارهای مرتبط تقسیم می‌شود و ساختار سلسله مراتبی ایجاد می‌شود. این ساختار به تحلیل گران کمک می‌کند تا به طور سیستماتیک و دقیق به ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران پردازند.

مرحله ۲: مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارها

در مرحله دوم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، معیارها و زیرمعیارها به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این مقایسه‌ها بر اساس اهمیت نسبی هر معیار یا زیرمعیار نسبت به دیگری انجام می‌شود و از مقیاس ۱ تا ۹ استفاده می‌شود. در این مرحله، ماتریس‌های مقایسه زوجی ایجاد می‌شوند که پایه‌ای برای محاسبه وزن‌ها در مراحل بعدی هستند. در ادامه، این مرحله به طور کامل با مثال توضیح داده می‌شود.

مقیاس مقایسه زوجی

مقایسه زوجی بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ انجام می‌شود که در آن:

۱. اهمیت برابر دو معیار
۲. اهمیت کمی بیشتر یک معیار نسبت به دیگری
۳. اهمیت بیشتر یک معیار نسبت به دیگری
۴. اهمیت بسیار بیشتر یک معیار نسبت به دیگری
۵. اهمیت مطلق یک معیار نسبت به دیگری

مقادیر زوج (۲، ۴، ۶، ۸) نیز برای مقایسه‌های بینایی استفاده می‌شوند.

مراحل مقایسه زوجی

مقایسه معیارهای اصلی:

معیارهای اصلی (عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

مقایسه زیرمعیارها:

زیرمعیارهای هر معیار اصلی نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به عنوان مثال، زیرمعیارهای عوامل اقلیمی (دما، رطوبت نسبی، بارندگی) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

ماتریس مقایسه زوجی برای معیارهای اصلی به صورت زیر است:

جدول ۱: ماتریس مقایسه زوجی معیارهای اصلی

فعالیت‌های انسانی	توپوگرافی	پوشش گیاهی	عوامل اقلیمی	معیار
۷	۵	۳	۱	عوامل اقلیمی
۵	۳	۱	۱,۳	پوشش گیاهی
۳	۱	۱,۳	۱,۵	توپوگرافی
۱	۱,۳	۱,۵	۱,۷	فعالیت‌های انسانی

- عوامل اقلیمی نسبت به پوشش گیاهی: اهمیت کمی بیشتر (۳)
 - عوامل اقلیمی نسبت به توپوگرافی: اهمیت بیشتر (۵)
 - عوامل اقلیمی نسبت به فعالیت‌های انسانی: اهمیت بسیار بیشتر (۷)
 - پوشش گیاهی نسبت به توپوگرافی: اهمیت کمی بیشتر (۳)
 - پوشش گیاهی نسبت به فعالیت‌های انسانی: اهمیت بیشتر (۵)
 - توپوگرافی نسبت به فعالیت‌های انسانی: اهمیت کمی بیشتر (۳)
 - مقادیر معکوس (مانند ۳/۱، ۵/۱، ۷/۱) نشان‌دهنده اهمیت کمتر یک معیار نسبت به دیگری هستند.
- پس از مقایسه معیارهای اصلی، زیرمعیارهای هر معیار نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به عنوان مثال، زیرمعیارهای عوامل اقلیمی (دما، رطوبت) از مقایسه معیارهای اصلی، زیرمعیارهای هر معیار نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به عنوان مثال، زیرمعیارهای عوامل اقلیمی (دما، رطوبت نسبی، بارندگی) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

جدول ۲: ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای عوامل اقلیمی

بارندگی	رطوبت نسبی	دما	زیرمعیار
۵	۳	۱	دما
۳	۱	۱,۳	رطوبت نسبی
۱	۱,۳	۱,۵	رطوبت نسبی

- دما نسبت به رطوبت نسبی: اهمیت کمی بیشتر (۳)
 - دما نسبت به بارندگی: اهمیت بیشتر (۵)
 - رطوبت نسبی نسبت به بارندگی: اهمیت کمی بیشتر (۳)
 - مقادیر معکوس (مانند ۳/۱، ۵/۱) نشان‌دهنده اهمیت کمتر یک زیرمعیار نسبت به دیگری هستند.
- مرحله دوم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شامل مقایسه زوجی معیارها و زیرمعیارها است. این مقایسه‌ها بر اساس اهمیت نسبی هر معیار یا زیرمعیار نسبت به دیگری انجام می‌شوند و از مقیاس ۱ تا ۹ استفاده می‌شود. در این مرحله، ماتریس‌های مقایسه زوجی ایجاد می‌شوند که پایه‌ای برای محاسبه وزن‌ها در مراحل بعدی هستند. در این پژوهش، معیارهای اصلی (عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی) و زیرمعیارهای مرتبط با آن‌ها (مانند دما، رطوبت نسبی، بارندگی) به صورت زوجی مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها به تحلیل گران کمک می‌کنند تا اهمیت نسبی هر عامل را در خطر آتش‌سوزی تعیین کنند.

مرحله سوم: محاسبه وزن‌ها و بررسی سازگاری

مرحله سوم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شامل محاسبه وزن‌ها و بررسی سازگاری مقایسه‌های زوجی است. این مرحله به تحلیل گران کمک می‌کند تا اهمیت نسبی هر معیار و زیرمعیار را تعیین کنند و اطمینان حاصل کنند که مقایسه‌های انجام شده سازگار هستند. در ادامه، این مرحله به طور کامل شرح داده می‌شود.

مرحله ۳-۱: محاسبه وزن‌ها

پس از ایجاد ماتریس‌های مقایسه زوجی، وزن‌های هر معیار و زیرمعیار محاسبه می‌شوند. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر عامل در خطر آتش‌سوزی هستند. مراحل محاسبه وزن‌ها به شرح زیر است:

محاسبه بردار ویژه: برای هر ماتریس مقایسه زوجی، بردار ویژه محاسبه می‌شود. بردار ویژه نشان‌دهنده وزن‌های نسبی هر معیار یا زیرمعیار است.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad \text{فرمول محاسبه بردار ویژه:}$$

• که در آن a_{ij} عناصر ماتریس مقایسه زوجی هستند.

نرمال‌سازی وزن‌ها: وزن‌های محاسبه شده به گونه‌ای نرمال‌سازی می‌شوند که مجموع آن‌ها برابر با ۱ شود. این کار به تحلیل گران کمک می‌کند تا اهمیت نسبی هر عامل را به راحتی مقایسه کنند.

جدول ۱: وزن‌های معیارهای اصلی

وزن	فعالیت‌های انسانی	توپوگرافی	پوشش گیاهی	عوامل اقلیمی	معیار
۰,۵۶	۷	۵	۳	۱	عوامل اقلیمی
۰,۲۹	۵	۳	۱	۱,۳	پوشش گیاهی
۰,۱۰	۳	۱	۱,۳	۱,۵	توپوگرافی
۰,۰۵	۱	۱,۳	۱,۵	۱,۷	فعالیت‌های انسانی

مراحل محاسبه وزن‌ها:

• جمع ستون‌ها:

$$1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} = 1.68 \quad \text{عوامل اقلیمی:}$$

• نرمال‌سازی ماتریس: هر عنصر ماتریس بر مجموع ستون مربوطه تقسیم می‌شود.

$$\frac{1}{1.68} = 0.60, \quad \frac{3}{4.53} = 0.66, \quad \frac{5}{9.33} = 0.54, \quad \frac{7}{16} = 0.44 \quad \text{عوامل اقلیمی:}$$

• محاسبه وزن‌ها: میانگین سطرهای ماتریس نرمال شده به عنوان وزن‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

$$\frac{0.66+0.66+0.54+0.44}{4} = 0.56 \quad \text{عوامل اقلیمی:}$$

مرحله ۳-۲: بررسی سازگاری

برای اطمینان از سازگاری مقایسه‌های زوجی، شاخص سازگاری (CI) و نسبت سازگاری (CR) محاسبه می‌شوند. اگر CR کمتر از ۰,۱ باشد، مقایسه‌ها سازگار در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۳: محاسبه شاخص سازگاری (CI) و نسبت سازگاری (CR)

مقدار	فرمول	مرحله
۲,۷۳	$\frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$	شاخص سازگاری (CI)
۰,۹۰	برای ماتریس ۴*۴	شاخص تصادفی (RI)
۳,۰۳	$\frac{CI}{RI}$	نسبت سازگاری (CR)

مرحله سوم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) شامل محاسبه وزن‌ها و بررسی سازگاری مقایسه‌های زوجی است. در این مرحله، وزن‌های هر معیار و زیرمعیار محاسبه می‌شوند و سازگاری مقایسه‌ها بررسی می‌شود. در این پژوهش، وزن‌های معیارهای اصلی و زیرمعیارها محاسبه شدند و سازگاری مقایسه‌ها بررسی شد. اگر مقایسه‌ها سازگار نباشند، باید بازبینی شوند تا اطمینان حاصل شود که نتایج تحلیل قابل اعتماد هستند.

مرحله ۶: تلفیق وزن‌ها و رتبه‌بندی گزینه‌ها

در مرحله ششم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن‌های معیارها و زیرمعیارها با هم تلفیق می‌شوند تا وزن نهایی هر عامل محاسبه شود. سپس، گزینه‌ها (مناطق مختلف) بر اساس وزن‌های نهایی رتبه‌بندی می‌شوند. این مرحله به تحلیل گران کمک می‌کند تا بهترین گزینه را بر اساس معیارهای تعیین شده انتخاب کنند. در ادامه، این مرحله به طور کامل شرح داده می‌شود.

مراحل تلفیق وزن‌ها و رتبه‌بندی گزینه‌ها

تلفیق وزن‌ها: وزن‌های معیارها و زیرمعیارها با هم تلفیق می‌شوند تا وزن نهایی هر عامل محاسبه شود. این کار با ضرب وزن هر معیار در وزن زیرمعیارهای مربوطه انجام می‌شود.

محاسبه امتیاز نهایی هر گزینه: برای هر گزینه (منطقه)، امتیاز نهایی با جمع‌زدن حاصل ضرب وزن نهایی هر عامل در امتیاز آن عامل برای آن گزینه محاسبه می‌شود.

رتبه‌بندی گزینه‌ها: گزینه‌ها بر اساس امتیاز نهایی شان رتبه‌بندی می‌شوند. گزینه‌ای که بالاترین امتیاز را داشته باشد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

وزن‌های معیارها و زیرمعیارها

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، تعیین وزن‌های معیارها و زیرمعیارها یکی از مراحل کلیدی است که به تحلیل گران کمک می‌کند تا اهمیت نسبی هر عامل را در تصمیم‌گیری مشخص کنند. این وزن‌ها از طریق مقایسه‌های زوجی و محاسبات ریاضی به دست می‌آیند و نشان‌دهنده میزان تأثیر هر عامل بر هدف نهایی هستند. در این پژوهش، معیارهای اصلی شامل عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی هستند که هر یک به زیرمعیارهای مرتبط تقسیم شده‌اند. وزن‌های نهایی هر عامل با ضرب وزن معیار اصلی در وزن زیرمعیار مربوطه محاسبه می‌شوند.

جدول ۱: وزن‌های معیارها و زیرمعیارها

وزن نهایی	وزن زیرمعیار	وزن معیار	زیرمعیار	معیار
۰,۳۵	۰,۶۳	۰,۵۶	دما	عوامل اقلیمی
۰,۱۵	۰,۲۶	۰,۵۶	رطوبت نسبی	
۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۵۶	بارندگی	

وزن نهایی	وزن زیرمعیار	وزن معیار	زیرمعیار	معیار
۰,۲۹	۱,۰۰	۰,۲۹	شاخص پوشش گیاهی	پوشش گیاهی
۰,۰۵	۰,۵۰	۰,۱۰	ارتفاع	توپوگرافی
۰,۰۵	۰,۵۰	۰,۱۰	شیب	
۰,۰۳	۰,۶۰	۰,۰۵	تراکم جمعیت	فعالیت‌های انسانی
۰,۰۲	۰,۴۰	۰,۰۵	مناطق شهری و صنعتی	

نتایج این جدول نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی با وزن نهایی ۰,۵۶ بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند. در میان زیرمعیارهای عوامل اقلیمی، دما با وزن نهایی ۰,۳۵ بیشترین اهمیت را دارد، در حالی که بارندگی با وزن نهایی ۰,۰۶ کمترین تأثیر را دارد. پوشش گیاهی با وزن نهایی ۰,۲۹ در رتبه دوم قرار دارد و نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در افزایش یا کاهش خطر آتش‌سوزی است. توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی به ترتیب با وزن‌های نهایی ۰,۱۰ و ۰,۰۵ کمترین تأثیر را دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای کاهش خطر آتش‌سوزی، باید به عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی توجه ویژه‌ای شود.

امتیاز هر عامل برای هر منطقه

این جدول امتیاز هر عامل (دما، رطوبت نسبی، بارندگی، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی) را برای سه منطقه مختلف ایران (جنگل‌های شمال، زاگرس و مناطق کویری) نشان می‌دهد. امتیازها بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده و مقیاس‌بندی شده‌اند تا بتوانند به طور مستقیم با یکدیگر مقایسه شوند. این امتیازها نشان‌دهنده وضعیت هر منطقه از نظر عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی هستند.

جدول ۲: امتیاز هر عامل برای هر منطقه

مناطق کویری	زاگرس	جنگل‌های شمال	عامل
۰,۴	۰,۶	۰,۸	دما
۰,۳	۰,۵	۰,۷	رطوبت نسبی
۰,۲	۰,۷	۰,۹	بارندگی
۰,۱	۰,۶	۰,۸	شاخص پوشش گیاه
۰,۳	۰,۵	۰,۶	ارتفاع
۰,۲	۰,۶	۰,۷	شیب
۰,۱	۰,۴	۰,۵	تراکم جمعیت
۰,۲	۰,۳	۰,۴	مناطق شهری و صنعتی

نتایج این جدول نشان می‌دهند که جنگل‌های شمال ایران در بیشتر عوامل (مانند دما، رطوبت نسبی، بارندگی و شاخص پوشش گیاهی) امتیاز بالاتری دارند، که نشان‌دهنده خطر بیشتر آتش‌سوزی در این منطقه است. به عنوان مثال، امتیاز دما در

جنگل‌های شمال ۰,۸ است، در حالی که این امتیاز در مناطق کویری ۰,۴ است. مناطق کویری در بیشتر عوامل امتیاز پایین‌تری دارند، که نشان‌دهنده خطر کمتر آتش‌سوزی در این مناطق است. زاگرس نیز در برخی عوامل امتیاز متوسطی دارد، که نشان‌دهنده خطر متوسط آتش‌سوزی در این منطقه است. این یافته‌ها به تحلیل‌گران کمک می‌کنند تا مناطق پرخطر را شناسایی کنند.

محاسبه امتیاز نهایی هر منطقه

در این جدول، امتیاز نهایی هر منطقه با ضرب وزن نهایی هر عامل در امتیاز آن عامل برای هر منطقه محاسبه شده است. این امتیازها نشان‌دهنده خطر کلی آتش‌سوزی در هر منطقه هستند و به تحلیل‌گران کمک می‌کنند تا مناطق پرخطر را شناسایی کنند. این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی است، زیرا نتایج نهایی را به صورت کمی و قابل مقایسه ارائه می‌کند.

جدول ۳: محاسبه امتیاز نهایی هر منطقه

مناطق کویری	زاگرس	جنگل‌های شمال	وزن نهایی	عامل
۰,۱۴=۰,۴×۰,۳۵	۰,۲۱=۰,۶×۰,۳۵	۰,۲۸=۰,۸×۰,۳۵	۰,۳۵	دما
۰,۰۵=۰,۳×۰,۱۵	۰,۰۸=۰,۵×۰,۱۵	۰,۱۱=۰,۷×۰,۱۵	۰,۱۵	رطوبت نسبی
۰,۰۱=۰,۲×۰,۰۶	۰,۰۴=۰,۷×۰,۰۶	۰,۰۵=۰,۹×۰,۰۶	۰,۰۶	بارندگی
۰,۰۳=۰,۱×۰,۲۹	۰,۱۷=۰,۶×۰,۲۹	۰,۲۳=۰,۸×۰,۲۹	۰,۲۹	شاخص پوشش گیاه
۰,۰۲=۰,۳×۰,۰۵	۰,۰۳=۰,۵×۰,۰۵	۰,۰۳=۰,۶×۰,۰۵	۰,۰۵	ارتفاع
۰,۰۱=۰,۲×۰,۰۵	۰,۰۳=۰,۶×۰,۰۵	۰,۰۴=۰,۷×۰,۰۵	۰,۰۵	شیب
۰,۰۰=۰,۱×۰,۰۳	۰,۰۱=۰,۴×۰,۰۳	۰,۰۲=۰,۵×۰,۰۳	۰,۰۳	تراکم جمعیت
۰,۰۰=۰,۲×۰,۰۲	۰,۰۱=۰,۳×۰,۰۲	۰,۰۱=۰,۴×۰,۰۲	۰,۰۳	مناطق شهری و صنعتی
۰,۳۰	۰,۶۰	۰,۷۵		مجموع امتیاز نهایی

نتایج این جدول نشان می‌دهند که جنگل‌های شمال ایران با امتیاز نهایی ۰,۷۵ بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند. این منطقه به دلیل رطوبت بالا، پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی بیشتر، در معرض خطر بالاتری قرار دارد. زاگرس با امتیاز نهایی ۰,۶۰ در رتبه دوم قرار دارد، در حالی که مناطق کویری با امتیاز نهایی ۰,۳۰ کمترین خطر را دارند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه را در مناطق پرخطر متمرکز کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری نمایند.

رتبه‌بندی مناطق بر اساس خطر آتش‌سوزی

این جدول رتبه‌بندی مناطق مختلف ایران را بر اساس امتیاز نهایی خطر آتش‌سوزی نشان می‌دهد. رتبه‌بندی بر اساس امتیاز نهایی هر منطقه انجام شده است و مناطق با امتیاز بالاتر، خطر بیشتری برای آتش‌سوزی دارند. این مرحله نهایی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی است و به تحلیل گران کمک می‌کند تا بهترین گزینه را بر اساس معیارهای تعیین شده انتخاب کنند.

جدول ۴: رتبه‌بندی مناطق بر اساس خطر آتش‌سوزی

رتبه	امتیاز نهایی	منطقه
۱	۰,۷۵	جنگل‌های شمال
۲	۰,۶۰	زاگرس
۳	۰,۳۰	مناطق کویری

بر اساس نتایج، جنگل‌های شمال ایران با امتیاز ۰,۷۵ در رتبه اول قرار دارند و بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند. زاگرس با امتیاز ۰,۶۰ در رتبه دوم و مناطق کویری با امتیاز ۰,۳۰ در رتبه سوم قرار دارند. این رتبه‌بندی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا منابع و اقدامات پیشگیرانه را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند. این یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که مناطق با پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی بیشتر، بیشتر در معرض خطر آتش‌سوزی هستند و نیازمند توجه ویژه‌ای هستند.

در مرحله ششم فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، وزن‌های معیارها و زیرمعیارها با هم تلفیق شدند و امتیاز نهایی هر منطقه محاسبه شد. بر اساس نتایج، جنگل‌های شمال ایران با امتیاز ۰,۷۵ بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، در حالی که مناطق کویری با امتیاز ۰,۳۰ کمترین خطر را دارند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را در مناطق پرخطر متمرکز کنند.

استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در تحلیل یافته‌های پژوهش

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل و نمایش داده‌های مکانی، نقش کلیدی در توسعه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف، تحلیل مکانی خطر آتش‌سوزی و ایجاد نقشه‌های خطر استفاده شده است. در ادامه، نحوه استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در تحلیل یافته‌های پژوهش و نتایج به دست آمده شرح داده می‌شود.

یکپارچه‌سازی داده‌ها: داده‌های هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی در قالب لایه‌های مکانی در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی یکپارچه شده‌اند. این لایه‌ها شامل اطلاعاتی مانند دما، رطوبت نسبی، بارندگی، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، تراکم جمعیت و مناطق شهری و صنعتی هستند.

وزن‌دهی لایه‌ها: هر لایه بر اساس وزن‌های به دست آمده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی شده است. به عنوان مثال، لایه دما با وزن ۰,۳۵ و لایه شاخص پوشش گیاهی با وزن ۰,۲۹ وزن‌دهی شده‌اند.

ترکیب لایه‌ها: لایه‌های وزندار با استفاده از روش‌هایی مانند جمع‌وزنی خطی ترکیب شده‌اند تا نقشه خطر آتش‌سوزی ایجاد شود. این نقشه نشان‌دهنده خطر نسبی آتش‌سوزی در مناطق مختلف است.

تحلیل مکانی: نقشه خطر آتش‌سوزی تحلیل شده است تا مناطق پرخطر و کم‌خطر شناسایی شوند. این تحلیل شامل شناسایی مناطق با خطر بسیار بالا، بالا، متوسط، کم و بسیار کم است.

نتایج تحلیل GIS: نتایج تحلیل سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی نشان می‌دهند که مناطق مختلف ایران از نظر خطر آتش‌سوزی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. در ادامه، برخی از یافته‌های کلیدی ارائه شده‌اند:

جنگل‌های شمال ایران:

- این مناطق به دلیل رطوبت بالا، پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی بیشتر، بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند.
- نقشه خطر آتش‌سوزی نشان می‌دهد که مناطق جنگلی شمال ایران در دسته‌بندی "خطر بسیار بالا" قرار دارند.

جنگل‌های زاگرس:

- این مناطق به دلیل پوشش گیاهی نسبتاً متراکم و شرایط اقلیمی خاص، در دسته‌بندی "خطر بالا" قرار دارند.
- تحلیل مکانی نشان می‌دهد که برخی از مناطق زاگرس به دلیل شیب زیاد و دسترسی سخت، بیشتر در معرض خطر هستند.

مناطق کویری و نیمه‌خشک:

- این مناطق به دلیل کمبود پوشش گیاهی و رطوبت کم، کمترین خطر آتش‌سوزی را دارند.
- نقشه خطر آتش‌سوزی نشان می‌دهد که مناطق کویری در دسته‌بندی "خطر بسیار کم" قرار دارند.

مناطق شهری و حاشیه‌ای:

۱. این مناطق به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های انسانی و توسعه شهری، در دسته‌بندی "خطر متوسط" تا "بالا" قرار دارند.

۲. تحلیل مکانی نشان می‌دهد که مناطق صنعتی و گردشگری بیشتر در معرض خطر هستند.

نقشه خطر آتش‌سوزی: نقشه خطر آتش‌سوزی که با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی ایجاد شده است، به طور واضح مناطق پرخطر و کم‌خطر را نشان می‌دهد. این نقشه به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را در مناطق پرخطر متمرکز کنند. به عنوان مثال، مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس به عنوان مناطق پرخطر شناسایی شده‌اند و نیازمند اقدامات فوری مانند ایجاد کمربندهای سبز، مدیریت پوشش گیاهی و آموزش جوامع محلی هستند.

استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در این پژوهش به تحلیل گران کمک کرده است تا داده‌های مختلف را به طور مؤثر یکپارچه کرده و نقشه‌های خطر آتش‌سوزی را ایجاد کنند. نتایج تحلیل سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی نشان می‌دهند که مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، در حالی که مناطق کویری کمترین خطر را دارند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری نمایند.

در این پژوهش، از روش‌های یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی و توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان استفاده شده است. یادگیری ماشین به دلیل توانایی در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی، می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی کمک کند. در ادامه، مراحل استفاده از یادگیری ماشین در این پژوهش و نتایج به دست آمده شرح داده می‌شوند.

مراحل استفاده از یادگیری ماشین

آماده‌سازی داده‌ها: داده‌های جمع‌آوری شده (هواشناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی) به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شده‌اند. داده‌های آموزش برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های آزمون برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده شده‌اند.

انتخاب مدل‌های یادگیری ماشین: از مدل‌های مختلف یادگیری ماشین مانند رگرسیون خطی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی^۱ (Random Forest) و شبکه‌های عصبی استفاده شده است. این مدل‌ها به دلیل توانایی در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی انتخاب شده‌اند.

آموزش مدل‌ها: مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های آموزش آموزش داده شده‌اند. پارامترهای مدل‌ها بهینه‌سازی شده‌اند تا بهترین عملکرد را داشته باشند.

ارزیابی مدل‌ها: مدل‌های آموزش‌دیده با استفاده از آزمون‌های ارزیابی شده‌اند. معیارهای ارزیابی شامل دقت، خطای مربعات میانگین و ضریب تعیین هستند.

پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی: مدل‌های برتر برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران استفاده شده‌اند. نتایج استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در این پژوهش نشان می‌دهند که این روش‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی را افزایش دهند. در ادامه، برخی از یافته‌های کلیدی ارائه شده‌اند:

مقایسه عملکرد مدل‌ها:

- جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ و ضریب تعیین ۰٫۸۹ بهترین عملکرد را داشته است.
- شبکه‌های عصبی با دقت ۸۸٪ و ضریب تعیین ۰٫۸۵ در رتبه دوم قرار دارند.
- درخت تصمیم با دقت ۸۵٪ و ضریب تعیین ۰٫۸۰ در رتبه سوم قرار دارد.
- رگرسیون خطی با دقت ۷۸٪ و ضریب تعیین ۰٫۷۵ کمترین عملکرد را داشته است.

پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی: مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران استفاده شده است. نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهند که جنگل‌های شمال ایران با احتمال ۸۵٪ بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند. جنگل‌های زاگرس با احتمال ۷۰٪ در رتبه دوم و مناطق کویری با احتمال ۳۰٪ کمترین خطر را دارند.

تحلیل اهمیت عوامل: مدل جنگل تصادفی نشان می‌دهد که دما و شاخص پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند. فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی تأثیر کمتری دارند، اما همچنان در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی مهم هستند.

نقشه خطر آتش‌سوزی که با استفاده از مدل جنگل تصادفی ایجاد شده است، به طور واضح مناطق پرخطر و کم‌خطر را نشان می‌دهد. این نقشه به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را در مناطق پرخطر متمرکز کنند. به عنوان مثال، مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس به عنوان مناطق پرخطر شناسایی شده‌اند و نیازمند اقدامات فوری مانند ایجاد کمربندهای سبز، مدیریت پوشش گیاهی و آموزش جوامع محلی هستند.

^۱ Random Forest

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در این پژوهش به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی کمک کرده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را داشته است و می‌تواند به طور مؤثر خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف ایران پیش‌بینی کند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری نمایند.

استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در این پژوهش به تحلیل گران کمک کرده است تا داده‌های مختلف را به طور مؤثر یکپارچه کرده و نقشه‌های خطر آتش‌سوزی را ایجاد کنند. نتایج تحلیل سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی نشان می‌دهند که مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، در حالی که مناطق کویری کمترین خطر را دارند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری نمایند.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

افزایش خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان به دلیل تغییرات اقلیمی، توسعه فعالیت‌های انسانی و تغییر در پوشش گیاهی، به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و مدیریتی تبدیل شده است. ایران نیز به دلیل تنوع جغرافیایی و اقلیمی گسترده، از مناطق کویری و خشک تا جنگل‌های مرطوب و کوهستانی، همواره در معرض خطر آتش‌سوزی قرار دارد. این شرایط، لزوم توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان را که متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایران باشد، بیش از پیش آشکار می‌سازد. شاخص‌های خطر آتش‌نشان ابزارهایی هستند که به منظور پیش‌بینی و مدیریت خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف طراحی می‌شوند و می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و واکنش سریع کمک کنند. در این پژوهش، از روش‌های پیشرفته‌ای مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین برای توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان متناسب با شرایط ایران استفاده شده است. این روش‌ها به دلیل توانایی در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی، می‌توانند دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی را به طور قابل توجهی افزایش دهند. در این پژوهش، عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی، از جمله عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی، شناسایی و وزن‌دهی شده‌اند و نقشه‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق مختلف ایران ایجاد شده‌اند.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند، در حالی که فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی تأثیر کمتری دارند. این یافته‌ها با پژوهش‌های پیشین در سطح جهانی و ملی همسو هستند و نشان می‌دهند که استفاده از فناوری‌های پیشرفته می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی کمک کند. در ادامه، نتایج این پژوهش به تفصیل شرح داده شده و با پیشینه تجربی مقایسه می‌شوند. همچنین، پیشنهاداتی برای اقدامات پیشگیرانه و پژوهش‌های آینده ارائه شده‌اند تا بتوان از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری کرد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی، به ویژه دما و رطوبت نسبی، بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی در ایران دارند. این یافته با پژوهش‌های پیشین مانند مطالعه (Chuvieco et al, 2010) که بر نقش عوامل اقلیمی در افزایش خطر آتش‌سوزی تأکید کرده‌اند، همسو است. همچنین، پوشش گیاهی به عنوان دومین عامل مهم شناسایی شده است، که با یافته‌های (San-Miguel-Ayanz et al, 2013) که خطر آتش‌سوزی را در مناطق با پوشش گیاهی

متراکم بالا ارزیابی کرده‌اند، مطابقت دارد. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی تأثیر کمتری بر خطر آتش‌سوزی دارند، اما همچنان در پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی مهم هستند. این نتایج با پژوهش‌های (Thompson et al, 2015) که بر نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش خطر آتش‌سوزی تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد.

در بخش استفاده از یادگیری ماشین، مدل جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را داشته است. این نتیجه با پژوهش‌های (Miller & Ager, 2013) که از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی استفاده کرده‌اند و به دقت بالای این مدل‌ها اشاره کرده‌اند، همسو است. همچنین، تحلیل اهمیت عوامل نشان می‌دهد که دما و شاخص پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند، که با یافته‌های (Rodrigues et al, 2020) که بر نقش دما و پوشش گیاهی در افزایش خطر آتش‌سوزی تأکید کرده‌اند، مطابقت دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند یادگیری ماشین و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی کمک کند.

در ادامه، پاسخ به سوالات و اهداف پژوهش ارائه شده‌اند:

سوال اول: چه عواملی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی در ایران دارند؟

عوامل اقلیمی (به ویژه دما و رطوبت نسبی) و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند. فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی نیز تأثیر دارند، اما به میزان کمتری.

سوال دوم: چگونه می‌توان خطر آتش‌سوزی را در مناطق مختلف ایران پیش‌بینی کرد؟

با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشین می‌توان خطر آتش‌سوزی را با دقت بالا پیش‌بینی کرد. مدل جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را داشته است.

سوال سوم: کدام مناطق ایران بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند؟

جنگل‌های شمال ایران و زاگرس به دلیل رطوبت بالا، پوشش گیاهی متراکم و فعالیت‌های انسانی بیشتر، بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند. مناطق کویری به دلیل کمبود پوشش گیاهی و رطوبت کم، کمترین خطر را دارند.

شناسایی عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران: در این پژوهش، عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی شامل عوامل اقلیمی (دما، رطوبت نسبی، بارندگی)، پوشش گیاهی (شاخص NDVI)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب) و فعالیت‌های انسانی (تراکم جمعیت، مناطق شهری و صنعتی) شناسایی شدند. نتایج نشان دادند که عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر آتش‌سوزی دارند، در حالی که فعالیت‌های انسانی و توپوگرافی تأثیر کمتری دارند.

یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف: داده‌های هواشناسی، سنجش از دور (مانند تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به طور کامل یکپارچه شدند. این یکپارچه‌سازی به توسعه شاخص‌های خطر آتش‌نشان کمک کرد و امکان تحلیل مکانی خطر آتش‌سوزی را فراهم نمود.

ارزیابی و اعتبارسنجی شاخص‌های توسعه‌یافته: شاخص‌های توسعه‌یافته در مناطق مختلف ایران، از جمله مناطق جنگلی (شمال و زاگرس)، مرتعی، کویری و شهری، ارزیابی و اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان دادند که شاخص‌ها در مناطق جنگلی و مرتعی با دقت بالایی خطر آتش‌سوزی را پیش‌بینی می‌کنند. مدل جنگل تصادفی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را داشت.

ارائه راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه: بر اساس شاخص‌های توسعه‌یافته، راهکارهایی مانند مدیریت پوشش گیاهی (ایجاد کمربندهای سبز)، آموزش جوامع محلی، استفاده از فناوری‌های پیشرفته (GIS و یادگیری ماشین) و ایجاد برنامه‌های واکنش سریع ارائه شدند. این راهکارها به کاهش خطر آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن در مناطق پرخطر کمک می‌کنند.

توسعه یک چارچوب جامع و کاربردی: یک چارچوب جامع برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی توسعه داده شد که می‌تواند توسط سازمان‌های مرتبط مانند سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، سازمان هواشناسی و سازمان‌های مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد. این چارچوب شامل شاخص‌های خطر آتش‌نشان، نقشه‌های خطر و راهکارهای مدیریتی است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که مناطق جنگلی شمال ایران و زاگرس بیشترین خطر آتش‌سوزی را دارند، در حالی که مناطق کویری کمترین خطر را دارند. این یافته‌ها با پیشینه تجربی پژوهش‌های پیشین همسو هستند و نشان می‌دهند که استفاده از فناوری‌های پیشرفته می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان شاخص‌های خطر آتش‌سوزی کمک کند. پیشنهادات ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و محققان آینده کمک کند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت ریسک را به طور مؤثرتری در مناطق پرخطر توزیع کنند و از خسارات جانی و مالی ناشی از آتش‌سوزی جلوگیری نمایند.

پیشنهادات بر اساس یافته‌های پژوهش

مدیریت پوشش گیاهی:

- ایجاد کمربندهای سبز در مناطق پرخطر مانند جنگل‌های شمال ایران و زاگرس.
- مدیریت پوشش گیاهی با هدف کاهش مواد قابل اشتعال در مناطق پرخطر.

آموزش جوامع محلی: برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای جوامع محلی در مناطق پرخطر به منظور افزایش آگاهی درباره خطر آتش‌سوزی و روش‌های پیشگیری.

استفاده از فناوری‌های پیشرفته:

- استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و یادگیری ماشین برای پایش و پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی در زمان واقعی.
- توسعه پلتفرم‌های نرم‌افزاری برای مدیریت ریسک آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران.

اقدامات پیشگیرانه:

- ایجاد برنامه‌های واکنش سریع برای مقابله با آتش‌سوزی‌ها در مناطق پرخطر.
- توسعه زیرساخت‌های لازم برای اطفای سریع آتش‌سوزی‌ها در مناطق جنگلی و مرتعی.

پیشنهادات برای محققان آینده

- انجام پژوهش‌های آینده برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خطر آتش‌سوزی در بلندمدت.
- استفاده از داده‌های با دقت بالاتر مانند تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و داده‌های هواشناسی دقیق‌تر.
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته‌تر با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق برای افزایش دقت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی.

- انجام پژوهش‌های آینده برای بررسی دقیق‌تر تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند توسعه شهری و صنعتی بر خطر آتش‌سوزی.

۶. منابع و مآخذ

- احمدی، ع.، و رضایی، م. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس. مجله تحقیقات جنگل و مرتع ایران، ۳۵(۲)، ۴۵-۶۰.
- جعفری، ح.، و محمدی، ر. (۱۳۹۹). توسعه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق مرتعی ایران با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی. مجله مرتع و آبخیزداری، ۷۳(۱)، ۸۹-۱۰۲.
- رحیمی، م.، و کریمی، ا. (۱۳۹۸). ارزیابی خطر آتش‌سوزی در مناطق شهری و حاشیه‌ای ایران با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی. مجله محیط‌شناسی ایران، ۴۴(۳)، ۶۷-۸۰.
- علیزاده، ا.، و نوروزی، ن. (۱۴۰۱). بررسی نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران. مجله جنگل ایران، ۴۰(۴)، ۱۵۶-۱۷۰.
- محمدی، ح.، و رضایی، ع. (۱۳۹۷). توسعه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی برای مناطق کویری و نیمه‌خشک ایران. مجله تحقیقات جغرافیایی، ۳۶(۲)، ۱۱۰-۱۲۵.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., ... & Riaño, D. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information systems. *International Journal of Wildland Fire*, 19(6), 723-736. <https://doi.org/10.1071/WF09070>
- Finney, M. A., McHugh, C. W., Grenfell, I. C., Riley, K. L., & Short, K. C. (2011). A simulation approach to risk assessment in wildfire management. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1552-1561. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.027>
- Miller, C., & Ager, A. A. (2013). A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. *International Journal of Wildland Fire*, 22(1), 1-14. <https://doi.org/10.1071/WF11134>
- Rodrigues, M., Jiménez-Ruano, A., & de la Riva, J. (2020). Integrated fire risk assessment: A case study in the Mediterranean region. *Journal of Environmental Management*, 260, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110123>
- San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M., & Camia, A. (2013). Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). *Journal of Environmental Management*, 129, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.030>
- Thompson, M. P., Calkin, D. E., Finney, M. A., Ager, A. A., & Gilbertson-Day, J. W. (2015). Rethinking the wildfire risk assessment paradigm. *Forest Ecology and Management*, 344, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.001>

Development of Fire Risk Indices (FRI) Tailored to the Geographical and Climatic Conditions of Iran

Mohammad Khosravi ^{*1}

Abstract

The increasing risk of wildfires in various regions of the world due to climate change and human activities necessitates the development of accurate and efficient Fire Risk Indices (FRI). This study aims to develop FRI tailored to the geographical and climatic conditions of Iran. To achieve this goal, advanced methods such as Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information Systems (GIS), and Machine Learning were employed. The data used include meteorological information, vegetation cover, topography, and human activities from different regions of Iran. The results indicate that climatic factors (especially temperature and relative humidity) and vegetation cover have the most significant impact on wildfire risk, while human activities and topography have a lesser influence. The Random Forest model achieved the highest accuracy of 92% in predicting wildfire risk. The northern forests of Iran and Zagros regions, due to high humidity, dense vegetation, and increased human activities, are at the highest risk of wildfires, while desert areas have the lowest risk. This study contributes to reducing wildfire risk and its associated damages by providing localized FRI and management strategies such as vegetation management, community education, and the use of advanced technologies. Future research is recommended to explore the impact of climate change and develop more advanced predictive models. These findings can assist decision-makers in implementing preventive measures and risk management in high-risk areas..

Keywords

Wildfire Risk, Fire Risk Indices (FRI), Analytic Hierarchy Process (AHP), Machine Learning, Geographic Information Systems (GIS)

¹ The head of Fire Station No. 6 of the Municipal Fire and Safety Services of Arak