

روش‌های مدل‌سازی و ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران

سعیده اسکندری^{*۱}

saeede.scandari@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

چکیده

روند فزاینده آتش‌سوزی در جنگل‌ها، لزوم ارزیابی راهکاری برای پیش‌بینی و کنترل آن‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. با توجه به این که عوامل مختلفی در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها تأثیرگذارند، مدل‌سازی وقوع آتش‌سوزی با توجه به کلیه فاکتورهای تأثیرگذار، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در این جنگل‌ها است. این مطالعه به منظور بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی و ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران انجام شده است. بررسی تحقیقات انجام‌شده در ایران نشان‌دهنده این است که مطالعات مربوط به پتانسیل‌یابی آتش‌سوزی در کشور ما محدود بوده و در اغلب این مطالعات از تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی به فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها استفاده شده است. جمع‌بندی تحقیقات انجام‌شده در مناطق دیگر جهان نشان می‌دهد که اغلب نوع پوشش گیاهی، شیب، جهت جغرافیایی، فاصله از جاده‌ها، توپوگرافی و کاربری اراضی، مؤثرترین فاکتورها در مدل‌سازی وقوع آتش بوده‌اند و ادغام لایه‌ها معمولاً بر اساس سلسله‌مراتب و ضریب خطر در وقوع آتش‌سوزی انجام شده است. برای ارزیابی دقت مدل استفاده‌شده در تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی، معمولاً نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته مقایسه شده است. در برخی مطالعات جدیدتر، از رگرسیون لجستیک و الگوریتم درخت تصمیم‌گیری برای انتخاب متغیرهای مؤثر در آتش‌سوزی و همچنین مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی استفاده شده است و در روش‌های پیشرفته‌تر از تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی، هوش مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده استفاده شده است. آنالیز چندمعیاره موضوعی است که در تحقیقات جدید مطرح شده و سازماندهی معیارها در قالب مدلی از داده‌های مکانی با استفاده از GIS نتایج مطلوبی را به همراه داشته است.

کلمات کلیدی: پتانسیل خطر، آتش‌سوزی، پیش‌بینی.

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
*(مسئول مکاتبات).

مقدمه

سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ می‌توان در مورد مناطقی که بیش‌ترین خطر وقوع آتش‌سوزی را دارند، قبل از بروز هرگونه حادثه‌ای، اقدامات پیش‌گیرانه، تعدیلی و اطلاع‌رسانی‌های لازم را برنامه‌ریزی نمود. این اقدامات به‌طور عمده شامل طراحی و احداث آتش‌برها و برج‌های دیده‌بانی و به‌طور کلی مراقبت‌های بیش‌تر در مناطق بحرانی یا خطر هستند. همچنین می‌توان با تلفیق اطلاعات مربوط به میزان خطر مناطق مختلف از نظر آتش‌سوزی و راه‌های دسترسی منطقه، نسبت به توزیع امکانات و هدایت نیروهای اطفای حریق به مناطق پرخطر منطقه اقدام کرد. از طرف دیگر در صورت بروز آتش‌سوزی در جنگل‌ها، فعالیت‌های عملیاتی اهمیت پیدا می‌کنند و در این‌جا روش‌های شناسایی به‌موقع آتش‌سوزی در این عرصه‌ها با استفاده از تصاویر مناسب ماهواره‌ای و همچنین مدل‌های شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی می‌توانند به جلوگیری از پیش‌روی حریق کمک کنند.

با توجه به اهمیت مسأله وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در این زمینه در مناطق جنگلی جهان انجام شده است. سازمان خدمات جنگل‌داری کانادا^۲ بیش از ۷۵ سال است که تحقیقات آتش‌سوزی جنگل را به‌صورت گسترده‌ای انجام می‌دهد (۱۲)، اما اولین کاربرد سنجش از دور برای نقشه‌برداری آتش‌سوزی جنگل در دهه ۱۹۶۰ بوده است؛ زمانی که چندین اسکتر مادون قرمز هوایی برای ردیابی نقاط آتش‌سوزی آزمایش شدند (۱۳). این در حالی است که در مورد مسأله مدل‌سازی خطر وقوع و پتانسیل‌یابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران مطالعات محدودی انجام شده است و اغلب این تحقیقات نوپا هستند. این مطالعه به‌منظور بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی و ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های جهان و ایران انجام شده است. ابتدا مطالعات مربوط به مدل‌سازی خطر وقوع و پتانسیل‌یابی مناطق بحرانی آتش‌سوزی در جهان و ایران به‌تفکیک موضوعی ارائه می‌شوند.

امروزه پدیده آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی بخش وسیعی از جنگل‌های جهان را مورد تهدید قرار داده است. این پدیده سالانه هزاران هکتار از درختان، درختچه‌ها و گیاهان را طعمه خود می‌سازد (۱، ۲، ۳، ۴)، به‌طوری‌که میانگین سالانه حریق در جنگل‌های جهان شش تا چهارده میلیون هکتار تخمین زده شده است (۵). آتش‌سوزی جنگل با منشأ طبیعی یا انسانی اثرات زیان‌بار و ویران‌گری به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر جوامع انسانی دارد و در صورت وقوع، تأثیر عظیمی بر محیط‌زیست، جنگل‌ها، روستاها و ساکنان آن‌ها به‌دلیل تمرکز جمعیت می‌گذارد (۶، ۷، ۸). اگرچه آتش‌سوزی‌های جنگلی جزء جدایی‌ناپذیر این بوم‌سازگان‌ها هستند، اما عدم کنترل آن‌ها ممکن است باعث خسارات اقتصادی و محیط‌زیستی شدیدی شود (۳، ۴). آتش‌سوزی علاوه بر خسارت‌های اقتصادی، آلودگی‌های محیط‌زیستی و تأثیر بر آب و هوای منطقه، در از بین بردن فون و فلور و چشم‌انداز جنگل نیز تأثیر بسزایی داشته و اثرات آن در هر سطحی از اکوسیستم احساس می‌شود (۱، ۹). همچنین حریق در صورت گستردگی، شدت و تکرار در یک جنگل، سبب تغییر ارزش کیفی گونه‌ها شده و باعث استقرار گونه‌های نامرغوب و غیرتجاری که فاقد ارزش اقتصادی هستند، می‌شود (۷).

به‌دلیل بروز بیش از پیش پدیده آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن، طراحی و توسعه روش‌های مؤثر مقابله با آن ضروری به‌نظر می‌رسد (۱۰). برای کاهش آسیب‌های ناشی از آتش‌سوزی جنگل (مانند از بین رفتن منابع طبیعی، اراضی و حیات انسان‌ها) مدیران کنترل آتش‌سوزی، مستلزم ارزیابی خطرات آتش‌سوزی هستند (۱۱).

سیاست‌های مقابله با حریق را می‌توان به دو دسته فعالیت‌های پیش‌گیرانه و عملیاتی تقسیم نمود (۱۰). اهمیت فعالیت‌های پیش‌گیرانه از آن جهت است که در هنگام بروز یک آتش‌سوزی، تحلیل رفتار آتش به‌دلیل دشواری و زمان‌بر بودن جمع‌آوری پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی، مشکل خواهد بود. درحالی‌که با استفاده از مدل‌ها و نقشه‌های خطر مناسب و پایگاه داده‌ها در

1- Geographic Information System (GIS)

2- Canadian Forest Service (CFS)

با برآورد خسارات بالقوه آتش‌سوزی طی زمان لازم برای بهبود شرایط محیط‌زیستی به حالت قبل از آتش‌سوزی، انجام شد. با توجه به موارد اقتصادی-اجتماعی در معرض خطر، سه دسته تأثیر بر روی انسان‌ها، محیط‌زیست و املاک و دارایی‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با اقدامات پیشگیری‌کننده از آتش‌سوزی، میانگین مقادیر خسارات پیشگیری‌شده به دارایی‌ها، انسان‌ها و بوم‌سازگان به‌ترتیب برابر با ۳۷۶۵۸۵، ۹/۱۷ و ۲۲/۲۹ یورو در کیلومتر مربع است (۴).

منصوری و همکاران (۱۳۹۰) نیز برنامه‌ای را برای مدیریت بحران آتش‌سوزی جنگل با استفاده از RS و GIS در مناطق حفاظت‌شده مانشت و قلا‌رنگ استان ایلام ارائه دادند. بدین‌منظور نقشه فاکتورهای مورد نیاز برای پهنه‌بندی خطر وقوع آتش‌سوزی، با استفاده از سنجش از دور تهیه شد و منطقه به هفت واحد عملیاتی تقسیم شد تا هنگام وقوع آتش بتوان آن‌ها را مدیریت کرد. نتایج نشان داد که تلفیق نقشه‌های پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی و واحد عملیاتی، راهنمای مفیدی برای مدیریت بحران آتش‌سوزی است و RS و GIS کارایی زیادی در این زمینه دارند (۱۶).

۲- تحقیقاتی که صرفاً به پهنه‌بندی خطر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از RS و GIS پرداخته‌اند

در تحقیقی Usul و Akpınar (۲۰۰۳) نقشه مناطق حساس به حریق در Abant ترکیه را با استفاده از RS و GIS تهیه کردند و کافی بودن برج‌های دیده‌بانی آتش‌سوزی در منطقه را با استفاده از GIS بررسی کردند. توابع و عملکردهای مطلوب برای آنالیزهای آتش‌سوزی جنگل، با استفاده از GIS انتخاب شدند و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی منطقه تهیه شد. سپس نقشه مناطق خطر آتش‌سوزی با نقشه قابلیت دید برج‌های دیده‌بانی ادغام شد تا مشخص شود که آیا مناطق پرخطر به‌وسیله برج‌های موجود قابلیت دید دارند یا خیر. نتایج نشان داد که بیش‌تر مناطق پرخطر به‌وسیله برج‌های موجود قابلیت دید دارند، اما برای دیده‌بانی مناطق با خطر متوسط نیاز به برج دیده‌بانی دیگری در شمال منطقه است. همچنین سیستم

سپس جمع‌بندی پژوهش‌ها انجام شده و درنهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه می‌شود.

روش‌های مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی

۱- تحقیقاتی که به مدیریت آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS پرداخته‌اند

در رابطه با مدیریت آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS، مطالعات مختلفی در جنگل‌های جهان انجام شده است.

در مطالعه‌ای، Crofts (۱۹۹۸) یک برنامه مدیریتی برای آتش‌سوزی جنگل‌ها در پارک ملی Pukaskwa کانادا با استفاده از GIS ارائه کرد. این برنامه مدیریتی برای جنگل کاجی که در سال ۱۹۹۸ سوخته بود، طرح‌ریزی شد. بدین‌منظور سطح پارک به سه زون مدیریتی آتش‌سوزی تقسیم شد و راهکارهایی برای جلوگیری از آتش‌سوزی جنگل و مدیریت آتش در هر زون ارائه شد. نتایج این بررسی نشان داد که دانش به‌روز، سیاست قوی و مراقبت‌های مأمورین پارک‌های مختلف، نقش مهمی در جلوگیری از آتش‌سوزی و مدیریت آتش در پارک‌های ملی کانادا دارد (۱۴).

در تحقیقی دیگر، Vakalis و همکاران (۲۰۰۴) یک سامانه اجرایی بر مبنای GIS را برای مدیریت بحران آتش‌سوزی با استفاده از تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی بر اساس داده‌های موجود از آتش‌سوزی‌های گذشته ارائه کردند. هدف از ارائه این مدل، استفاده از آن به‌عنوان یک سیستم حامی تصمیم‌گیری، در جهت تخصیص به‌موقع امکانات و تسهیلات اطفای حریق به مکان مناسب بود. در این تحقیق بر اساس نظر کارشناسان، معیارهای مؤثر در آتش‌سوزی انتخاب شدند. این عوامل شامل میزان اشتعال پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، شیب منطقه، دمای هوا و سرعت باد بودند (۱۵).

Roman و همکاران (۲۰۱۳) روشی را برای ارزیابی آسیب‌پذیری اقتصادی-اجتماعی آتش‌سوزی در جنگل‌های اسپانیا با استفاده از GIS ارائه دادند. آسیب‌پذیری آتش‌سوزی

برد. بدین منظور سه فاکتور شیب، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده که بر روی مسأله فوق تأثیرگذار هستند، در نظر گرفته شدند و با فرموله کردن و اعمال آن‌ها بر روی تصویر، مناطق با خطر زیاد مشخص شد (۲۰).

۳- تحقیقاتی که به بررسی تأثیر عوامل مختلف در وقوع حریق و ارتباط بین عوامل محیطی و آتش‌سوزی پرداخته‌اند

در مطالعه‌ای Giri و Shrestha (۲۰۰۰) عوامل و منابع آتش‌سوزی جنگل در سال ۱۹۹۸ در پناهگاه حیات وحش HuayKhaKhaeng تایلند را با استفاده از تصویر ماهواره‌ای تک‌زمانه‌ای TM بررسی کردند. سپس مناطق سوخته با استفاده از تصویر TM مشخص شدند. برای ارزیابی صحت و اثرات آتش‌سوزی، چندین قطعه نمونه با استفاده از GPS در مناطق سوخته و نسوخته برداشت شد. نتایج دقت طبقه‌بندی ۸۸/۳ درصد را برای مناطق سوخته نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که عوامل آتش‌سوزی در این پناهگاه متعدد هستند، اما اغلب آتش‌سوزی‌ها غیر عمدی هستند. در پایان ایجاد یک پایگاه داده در GIS متشکل از متغیرهای مؤثر در آتش‌سوزی برای نقشه‌برداری از مناطق خطر وقوع و شبیه‌سازی آتش‌سوزی جنگل پیشنهاد شد (۲۱).

در تحقیق دیگری Vazquez و Moreno (۲۰۰۱) پراکندگی مکانی آتش‌سوزی در مرکز اسپانیا را در ارتباط با عوامل محیطی مورد مطالعه قرار دادند. محیط آتش‌سوزی‌های به‌وقوع‌پیوسته از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ به‌وسیله عکس‌های هوایی استخراج شد. مشخصات توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) به‌صورت نقشه‌های رقمی به فرمت رستری در GIS تهیه شدند. فاکتورهای مورد استفاده برای پیاده‌سازی مدل خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل شامل شیب، جهت، ارتفاع، سن توده، ترکیب توده‌ها، تراکم تاج و بیواقلیم بودند. نتایج نشان داد که مناطق سوخته با توپوگرافی منطقه ارتباط معنی‌داری داشتند (۲۲).

همچنین طی تحقیقی دیگر، Stolle و همکاران (۲۰۰۳) ارتباط آتش‌سوزی‌های جنگلی با کاربری اراضی در استان

اطلاعات جغرافیایی برای توسعه اطلاعات، مدیریت و پیش‌بینی فعالیت‌های آتش‌سوزی جنگل کارآیی زیادی دارد (۱۷).

در مطالعه‌ای دیگر، Bin Awang و Pradhan (۲۰۰۶) مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگل در منطقه Kuala Selangor مالزی را با استفاده از RS و GIS بررسی کردند. بدین‌منظور از داده‌های سنجنده AVHRR^۱ ماهواره NOAA از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ استفاده شد. نقشه‌های پوشش گیاهی و شاخص NDVI از تصویر ETM ماهواره لندست هفت به‌دست آمد. سایر داده‌ها (شیب، جهت و ارتفاع) با استفاده از نقشه توپوگرافی در محیط GIS استخراج شدند. مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگل با استفاده از فاکتورهای مؤثر در آتش‌سوزی جنگل، با روش حداکثر احتمال طبقه‌بندی شدند. سپس این مناطق با استفاده از داده‌های موقعیت آتش‌سوزی‌های گذشته تعیین صحت شدند. نتایج، صحت زیاد نقشه پتانسیل تهیه‌شده را به‌دلیل هم‌خوانی مناطق پرخطر آن با مناطق آتش‌سوزی گذشته نشان داد (۱۸).

ادب و همکاران (۱۳۸۷) نیز خطر وقوع آتش‌سوزی در مناطق جنگلی استان مازندران را به‌تفکیک فصول در سال ۱۳۸۳ و نیز طی یک دوره ۱۵ ساله با استفاده شاخص پیش‌آگاهی Molgan و GIS پهنه‌بندی کردند. برای بررسی کارآیی مدل، نتایج سال ۱۳۸۳، با تعداد حریق‌های به‌وقوع‌پیوسته آزمون شد و سپس ضریب همبستگی سال مذکور با نتایج ۱۵ ساله بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل استفاده‌شده به غیر از فصل زمستان، در کلیه فصول و همچنین به‌طور سالانه از کارآیی مناسبی در سطح مکانی برخوردار است (۱۹).

اکبری (۱۳۸۹) در تحقیق دیگری، مدلی ساده برای تهیه نقشه خطر و هشدار آتش‌سوزی در نواحی جنگلی با استفاده از داده‌های سنجش از دوری ارائه داد؛ به‌طوری‌که با استفاده از این مدل و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقمی ارتفاع^۲ منطقه، می‌توان پی به وجود مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی

1- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)
2- Digital Elevation Model (DEM)

رابطه غیرخطی بین وقوع آتش‌سوزی و عوامل انسان‌ساز وجود داشت. همچنین در اقلیم گرم‌تر، وقوع آتش‌سوزی بیش‌تر بود (۲۵).

Eskandari و همکاران (۲۰۱۳ الف) نقش فاکتورهای انسان‌ساخت را در وقوع آتش‌سوزی در بخشی از جنگل‌های شمال ایران بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که به‌ترتیب جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی بیش‌ترین تأثیر را وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه داشته‌اند (۲۶).

Eskandari (۲۰۱۵) رابطه بین عوامل اقلیمی و آتش‌سوزی در جنگل‌های استان گلستان را بررسی کرد. نتایج تحقیق وی نشان داد که بین تعداد آتش‌سوزی‌های به‌وقوع‌پیوسته در استان گلستان و متوسط درجه‌حرارت سالانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری وجود داشت؛ همچنین بین تعداد آتش‌سوزی‌ها و متوسط رطوبت نسبی سالانه در سطح اطمینان ۹۹ درصد رابطه معنی‌داری وجود داشت، اما بین تعداد آتش‌سوزی‌ها و میانگین بارندگی سالانه ارتباط معنی‌داری وجود نداشت. از طرف دیگر، بین وسعت آتش‌سوزی‌های به‌وقوع‌پیوسته در استان گلستان و متوسط رطوبت نسبی سالانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری وجود داشت، اما بین وسعت آتش‌سوزی‌ها با متوسط درجه‌حرارت سالانه و متوسط بارندگی سالانه ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد (۲۷).

خراسانی‌نژاد (۱۳۷۴) تأثیر متغیرهای مختلف محیطی و اقلیمی را بر آتش‌سوزی مطالعه نمود و نتیجه‌گیری کرد که در جنگل‌های جلگه‌ای، گرما عامل مؤثر در آتش‌سوزی بود. در جنگل‌های میان‌بند نیز کاهش رطوبت مواد سوختی و در جنگل‌های کوهستانی کاهش بارندگی عامل آتش‌سوزی بود (۲۸).

یوسفی و جلیلوند (۱۳۸۹) وضعیت آتش‌سوزی در مناطق جنگلی و مرتعی استان مازندران را از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۶ بررسی کردند. نتایج نشان داد که شهرستان نکا با ۱۱۰ فقره حریق بیش‌ترین میزان آتش‌سوزی را داشته است که دمای زیاد

جامبی سوماترای اندونزی را بررسی کردند. ضمن تهیه نقشه کاربری اراضی، موقعیت آتش‌سوزی‌های جنگلی از ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۳ با استفاده از داده‌های ماهواره NOAA^۱ شناسایی شد. نتایج تحلیل آمار مکانی نشان داد که وقوع آتش‌سوزی در استان جامبی در این سال‌ها هم ناشی از شرایط استعدادپذیری (به‌طور عمده اقلیم، ارتفاع و غیره) و هم ناشی از عوامل انسانی (وجود پروژه‌های انسانی، اختصاص زمین به کاربری‌های ویژه و غیره) بوده است. همچنین قابلیت دسترسی (جاده‌ها) عامل مهمی در آتش‌سوزی جنگل‌ها بوده‌اند (۲۳).

در مطالعه‌ای، Lozano و همکاران (۲۰۰۸) ارتباط بین احتمال وقوع آتش‌سوزی و فاکتورهای مختلف محیط‌زیستی را در مقیاس‌های مختلف و با استفاده از مدل‌های طبقه‌بندی و رگرسیونی درختی با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای مدل‌سازی کردند و مدلی را برای امکان وقوع آتش‌سوزی بر اساس مشخصات توپوگرافی، قابلیت دسترسی، نوع پوشش و تاریخچه آتش‌سوزی در مناطق مدیترانه‌ای ارائه دادند. روش نمونه‌گیری در عرصه بر اساس روش نمونه‌گیری تصادفی بود و فاکتورهای مؤثر به دو دسته متغیر و ثابت تقسیم شدند. نتایج نشان داد که بر اساس مدل‌های رگرسیون درختی، وقوع آتش‌سوزی با فاکتورهای محیطی در مقیاس‌های مکانی مختلف ارتباط زیادی داشته است و در اغلب موارد، مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی در بوته‌زارها و شیب‌های تند واقع شده‌اند. به‌علاوه مدل‌های مکانی آتش‌سوزی با مکان‌های آتش‌سوزی گذشته ارتباط زیادی داشته‌اند (۲۴).

در تحقیق دیگری، Zumbrunnen و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر اقلیم و عوامل انسانی را بر وقوع آتش‌سوزی‌های جنگلی در دو منطقه مستعد آتش‌سوزی در سوییس در یک دوره ۱۰۰ ساله بررسی کردند. نتایج نشان داد که اقلیم، وجود جاده‌ها و احشام نقش مهمی در وقوع آتش‌سوزی در دو منطقه داشته‌اند. به‌علاوه

1- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

۴- تحقیقاتی که به مدل سازی خطر وقوع آتش سوزی بر

اساس وزن و درجه اهمیت متغیرها پرداخته اند

در راستای این موضوع، Almedia (۱۹۹۴) نقشه مناطق خطر وقوع آتش سوزی در بخشی از جنگل های پرتغال را بر اساس عوامل گونه های جنگلی، شیب، جهت جغرافیایی، فاصله از جاده ها و رودخانه های دائمی تهیه کرد. متغیرهای مورد نظر بر اساس ضریب خطر آتش سوزی به طبقاتی تقسیم شده و با تجزیه و تحلیل داده ها در محیط GIS، نهایتاً پنج طبقه خطر برای منطقه به دست آمد. مناطق خطر وقوع آتش سوزی دارای شیب بیش از ۴۰ درصد، جهت بین ۱۳۵ تا ۲۲۵ درجه (غربی)، فاصله بیش از ۳۰ متر از رودخانه های دائمی بودند و اغلب پوشیده از درخت زار و بوته زار بودند (۳۲).

در تحقیق دیگری Jaiswal و همکاران (۲۰۰۲) برای شناسایی مناطق حساس به حریق در جنگل های هندوستان از داده های ماهواره ای LISS^۳ III - IRS^۱ و پایگاه داده ها در GIS استفاده کردند. فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش سوزی جنگل بر اساس وزن و درجه اهمیت در وقوع آتش سوزی ادغام شدند. در مدل به کار گرفته شده به ترتیب پوشش گیاهی، شیب و فاصله از مناطق مسکونی و جاده ها بیشترین اهمیت را داشتند. نتایج نشان داد که ۲۰ درصد از منطقه پتانسیل بسیار زیاد، ۱۰ درصد پتانسیل زیاد، ۱۵ درصد پتانسیل متوسط و ۵۵ درصد از منطقه پتانسیل کم برای وقوع آتش سوزی دارد (۳۳).

همچنین Janbaz Ghobadi و همکاران (۲۰۱۲) مناطق خطر وقوع آتش سوزی در جنگل های استان گلستان را با استفاده از GIS نقشه برداری کردند. بدین منظور فاکتورهایی که در خطر وقوع حریق تأثیرگذارند مانند توپوگرافی، شیب، جهت، داده های هواشناسی و پوشش گیاهی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی ادغام شدند. مناطق خطر وقوع آتش سوزی با اختصاص وزن های ویژه به طبقه های همه لایه ها بر اساس حساسیت آن ها به حریق مشخص شدند. در نهایت نقشه خطر وقوع آتش سوزی جنگل از طبقه خطر بسیار کم تا بسیار زیاد

در فصول گرم سال و خشکی حاصل از آن به همراه وجود مواد سوختنی با ضریب خشکی زیاد در سطح مناطق جنگلی، از علل اصلی وقوع آتش سوزی در جنگل ها و مراتع این شهرستان بوده است. همچنین سال ۱۳۷۷ با میانگین حریق ۸/۲۵ هکتار، بیشترین سطح حریق را داشته است. خشکی هوا، کاهش بارندگی و وزش بادهای گرم از جمله عوامل طبیعی بوده اند که شرایط مساعدی را برای ایجاد آتش سوزی های گسترده و سطحی در این سال فراهم کرده اند (۲۹).

بیرانوند و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه دیگری در غرب ایران، عوامل بوم شناختی مؤثر بر توسعه آتش سوزی در جنگل های کاکارضای لرستان را با استفاده از GIS و تحلیل سلسله مراتبی شناسایی کردند. پس از انجام مطالعات پایه، واحدهای همگن محیط زیستی تولید و به چهار طبقه تقسیم شدند. سپس با انجام مطالعات میدانی، شرایط بوم شناختی منطقه دارای سابقه آتش سوزی بررسی شد. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، پوشش گیاهی و رطوبت مواد سوختنی، مهم ترین عوامل بوم شناختی مؤثر بر توسعه آتش سوزی بوده اند (۳۰).

گراوند و همکاران (۱۳۹۲) الگوی مکانی پنج ساله و نقشه خطر وقوع آتش سوزی در اراضی طبیعی استان لرستان را تهیه کردند. بررسی توزیع نقاط با توجه به کاربری های مختلف و عوامل فیزیوگرافی انجام شد. برای تعیین الگوی پراکنش نقاط از سه روش کوادرات، نزدیک ترین همسایه و K رایپلی و برای تعیین مناطق پرخطر از روش کرنل استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی آتش سوزی در طبقه ارتفاعی ۱۳۰۰-۱۷۰۰ متر، شیب ۱۰-۲۰ درصد و جهت های جنوب و جنوب غربی رخ داده است. بیشترین وقوع آتش سوزی در کاربری جنگل با تاج پوشش متوسط (۳۶ درصد) و مرتع با تاج پوشش متوسط (۲۵ درصد) مشاهده شد. نتایج آنالیز الگوی پراکنش نقاط در هر سه روش، الگوی کپه ای را تأیید کرد. همچنین نتایج نشان داد که الگوی K رایپلی در تعیین الگوی پراکنش نقاط آتش سوزی نسبت به دو روش دیگر برتری دارد. در نهایت نقشه تراکم خطر آتش سوزی با روش کرنل به دست آمد (۳۱).

1- Linear Imaging Self Scanner (LISS)

2- Indian Remote Sensing (IRS)

توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ استخراج شدند و در محیط GIS بر حسب وزن و اهمیت آن‌ها در ایجاد حریق، ادغام شدند. نتایج نشان داد که در مناطق با پوشش گیاهی خشک، شیب زیاد، جهت جنوبی و نزدیک به جاده و مناطق مسکونی، پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی زیاد است (۳۶).

اسکندری و همکاران (۱۳۹۲ الف) در مطالعه‌ای دیگر، کارایی مدل Dong را برای تعیین قابلیت خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های زرین‌آباد استان مازندران ارزیابی کردند. تمام لایه‌های رقومی با توجه به مدل Dong تهیه و طبقه‌بندی شدند. فاکتورهای مورد استفاده شامل نوع و تراکم پوشش گیاهی، شیب، جهت، ارتفاع، فاصله از جاده‌ها، مناطق مسکونی و زمین‌های زراعی بودند. از روی هم‌گذاری تمام نقشه‌ها در محیط GIS و وزن‌دهی به هر فاکتور با استفاده از مدل مذکور، نقشه قابلیت آتش‌سوزی منطقه در پنج طبقه تهیه شد و با نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته منطقه روی هم‌گذاری شد. نتایج نشان داد که تقریباً ۴۰ درصد از محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته در مکان‌هایی قرار گرفته‌اند که قابلیت بسیار زیاد یا زیاد برای آتش‌سوزی داشتند که نشان‌دهنده اعتبار متوسط مدل مورد استفاده است؛ بنابراین در ادامه، اصلاح مدل مذکور انجام شد و وزن لایه‌ها بر اساس اهمیت آن‌ها در منطقه مورد مطالعه تغییر کرد و مدل جدیدی ارائه شد. نقشه قابلیت جدید بر اساس مدل اصلاحی مجدداً تهیه شد و با نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته روی هم‌گذاری شد. نتایج نشان داد که تقریباً ۸۰ درصد از محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطقی قرار گرفته‌اند که قابلیت بسیار زیاد یا زیاد برای آتش‌سوزی داشتند که نشان‌دهنده اعتبار قابل توجه مدل اصلاح‌شده برای منطقه مورد مطالعه بود (۳۷).

در تحقیق دیگری Eskandari و همکاران (۲۰۱۳ ب) مناطق پرخطر از نظر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالمرو در شمال ایران را با استفاده از مدل Dong پیش‌بینی کردند. پس از تهیه نقشه‌های همه فاکتورهای مؤثر، تمام لایه‌های رقومی مطابق مدل Dong طبقه‌بندی شدند.

ارایه شد. در نهایت، افزایش شاخص‌های استفاده‌شده و یا تغییر آن‌ها مطابق با شرایط محیط‌زیستی هر منطقه پیشنهاد شد (۳).

Eskandari و Miesel (۲۰۱۷) سه روش مختلف وزنی را برای مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در بخشی از جنگل‌های هیرکانی ایران ارزیابی و مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش همبستگی مکانی فاکتورهای محیطی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با آتش‌سوزی‌های گذشته، بیش‌ترین دقت را در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های هیرکانی ایران داشته است (۳۴).

۵- تحقیقاتی که به مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی با مدل دانگ (Dong) پرداخته‌اند

در راستای این موضوع، Dong و همکاران (۲۰۰۵) یک روش ترکیبی با RS و GIS را برای نقشه‌برداری مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی در حوضه جنگل‌داری Baihe چین توسعه دادند. به‌همین منظور داده‌های توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) از مدل رقومی ارتفاع منطقه و اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی و کاربری اراضی (جاده‌ها، مناطق مسکونی و غیره) از تصویر ماهواره Landsat ETM+ استخراج شدند. در ادامه، مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی با اختصاص وزن‌های معقول به طبقات همه لایه‌ها مشخص شدند. سپس تاریخچه آتش‌سوزی در جنگل‌های مورد مطالعه از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۱ برای کنترل مطلوبیت روش مورد استفاده بررسی شد. نتایج نشان داد که مناطق با خطر آتش‌سوزی زیاد در مکان‌هایی واقع شده‌اند که قبلاً در آن‌ها آتش‌سوزی اتفاق افتاده است (۳۵).

همچنین Erten و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیق دیگری مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های گالی‌پولی ترکیه را با توجه به مدل Dong و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS نقشه‌برداری کردند. در این تحقیق، قبل و بعد از وقوع آتش‌سوزی از تصویر TM استفاده شد. سایر اطلاعات از نقشه

سوخته طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۶ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که اغلب مناطق پیش‌بینی‌شده برای آتش‌سوزی با توجه به مدل استفاده‌شده، در مناطق سوخته قرار گرفته‌اند. لذا مدل و نقشه تهیه‌شده قابلیت اعتماد زیادی دارد و می‌تواند برای سیاست‌های جلوگیری از آتش‌سوزی‌های آینده استفاده شود.

در مطالعه دیگری، Singh و Thakur (۲۰۱۴) خطر آتش‌سوزی جنگل در منطقه Dehradun هند را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و GIS زون‌بندی کردند. بدین‌منظور عوامل رطوبت پوشش گیاهی، شیب، جهت، ارتفاع، فاصله از جاده و مناطق مسکونی در نظر گرفته شدند. این فاکتورها بر اساس تأثیرشان در خطر آتش‌سوزی وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد که ۹۸ درصد مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطق پر خطر و خطر متوسط آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که بیش‌تر آتش‌سوزی‌ها در منطقه مورد مطالعه طبیعی بوده و ناشی از عوامل انسان‌ساخت نیستند (۳۹).

سجادیان و سجادیان (۱۳۸۸) در تحقیق دیگری، نقش تلفیقی آنالیز مکانی Spread computation و AHP را در ارزیابی و کنترل بهینه آتش‌سوزی در جنگل‌ها مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های تحقیق نشان داد که استفاده تلفیقی از دو روش آنالیز مکانی Spread computation و AHP قادر است نقش مؤثری در ارزیابی و کنترل بهینه آتش‌سوزی در جنگل‌ها و منابع طبیعی ارایه کند و راهکارهایی را به‌صورت سیستمی جهت مدیریت این بحران پیشنهاد کند. در انتها راهکارهایی برای ارزیابی و کنترل آتش‌سوزی در منابع طبیعی ارایه شد (۴۰).

محمدی و همکاران (۱۳۸۹) نقشه نواحی دارای خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بر اساس عوامل پوشش گیاهی، فیزیوگرافی، اقلیمی، انسانی و فاصله از جاده‌ها و رودخانه‌ها را در بخشی از حوضه پاورود تهیه کردند. در این مطالعه، با انجام عملیات

در نهایت نقشه پتانسیل آتش‌سوزی منطقه از روی هم‌گذاری وزنی نقشه‌های متغیرها بر اساس مدل Dong در GIS تهیه شد. سپس برای ارزیابی مدل، این نقشه با نقشه پتانسیل آتش‌سوزی منطقه روی هم‌گذاری شد. نتایج نشان داد که ۵۱ درصد از مناطق آتش‌سوزی‌های واقعی در مناطق پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اعتبار متوسط مدل Dong برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در منطقه مورد مطالعه بود (۳۸).

۶- تحقیقاتی که به مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی پرداخته‌اند

به‌عنوان اولین تحقیقات در این زمینه، Chuvieco و Congalton (۱۹۸۹) (۱۳) نقشه مناطق بحرانی خطر وقوع آتش‌سوزی در سواحل مدیترانه اسپانیا را با استفاده از ترکیب داده‌های پردازش یافته تصویر TM^۱ و داده‌های دیگر در محیط GIS تهیه کردند. فاکتورهای مورد استفاده شامل نوع پوشش گیاهی، شرایط توده، شیب، جهت، ارتفاع، نزدیکی به جاده‌ها، مناطق مسکونی و مکان‌های کمپینگ بود. ادغام لایه‌ها بر اساس سلسله مراتب (AHP) انجام شد. نقشه مناطق بحرانی آتش‌سوزی با نقشه مناطقی که قبلاً آتش گرفته بودند، مقایسه شد. نتایج نشان داد که ۲۲ درصد از پیکسل‌هایی که در مناطق پرخطر از نظر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند، طی سال‌های گذشته واقعاً سوخته‌اند، در حالی که تنها ۳/۴۷ درصد از مناطق کم‌خطر از نظر آتش‌سوزی، در گذشته واقعاً دچار حریق شده بودند.

در تحقیق دیگری Sowmya و Somashekar (۲۰۱۰) (۹) با وزن‌دهی مناسب به همه فاکتورهای مؤثر در ایجاد آتش‌سوزی با روش AHP، نقشه مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی در پناهگاه حیات وحش Bhadra هند را تهیه کردند. متغیرهای مورد استفاده شامل پوشش گیاهی، شیب، فاصله از جاده و مناطق مسکونی بودند. داده‌های مربوط به مناطق سوخته از تصویر IRS-LISS III از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۶ استخراج شد. در نهایت مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی با مناطق

در همین راستا طی مطالعه‌ای Vadrevu و همکاران (۲۰۱۰) خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل در ایالت Andhra Pradesh هند را با استفاده از آنالیز چندمعیاره در قالب روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای همراه با داده‌های اقتصادی-اجتماعی، اقلیمی، پوشش گیاهی و توپوگرافی مدل‌سازی کردند. تمام داده‌ها در سطح مکانی در GIS سازماندهی شدند. نتایج نشان داد که وزن فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی، اقلیمی، پوشش گیاهی و توپوگرافی به ترتیب برابر با ۰/۳۱۲، ۰/۲۳۳، ۰/۲۵۵ و ۰/۲۰۴ بود. در ادامه این تحقیق، نتایج نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی با پیکسل‌های آتش مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای روی هم‌گذاری شد. به دلیل هم‌خوانی مناطق خطر وقوع با پیکسل‌های آتش تا ۶۴/۴٪، اعتبار مدل ساخته‌شده در شناسایی مناطق بحرانی خطر وقوع آتش‌سوزی نسبتاً زیاد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که قابلیت روش تصمیم‌گیری چندمعیاره همراه با GIS به‌عنوان ابزاری مؤثر در پیش‌بینی این‌که آتش‌سوزی در چه مکان و زمانی رخ می‌دهد، بسیار زیاد بود (۴۴).

Eskandari (۲۰۱۷) خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه‌نکا- ظالمروود را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در قالب تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل‌سازی کرد. عوامل مورد استفاده شامل چهار معیار اصلی و ۱۷ زیرمعیار بود. معیارهای اصلی شامل معیارهای توپوگرافی، بیولوژیکی، اقلیمی و انسان‌ساخت بود. برای تهیه نقشه تمام این عوامل از مدل رقومی ارتفاع منطقه و اطلاعات موجود در شرکت سهامی نکاچوب استفاده شد. نتایج نشان داد که وزن نهایی معیارهای انسان‌ساخت، بیولوژیکی، اقلیمی و توپوگرافی در قابلیت خطر آتش‌سوزی به ترتیب برابر با ۰/۳۰۱، ۰/۲۵۹۵، ۰/۲۳۱۵ و ۰/۲۰۸ بود. بر اساس این وزن‌ها، مدل خطر آتش‌سوزی ارائه شد؛ درنهایت با استفاده از مدل به‌دست‌آمده، ابتدا نقشه معیارهای اصلی (از ادغام وزنی زیرمعیارهای هر معیار) و سپس نقشه نهایی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه (از ادغام وزنی نقشه‌های چهار معیار اصلی) تهیه شد. نتایج نشان داد که

میدانی و استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ نقشه مناطق آتش‌سوزی‌شده تهیه گردید. سپس با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی، عوامل مؤثر در بروز و انتشار آتش‌سوزی به‌صورت زوجی مقایسه شدند و وزن هر یک از عوامل که مبین میزان تأثیر آن‌ها بود، محاسبه شد. با توجه به مقادیر کمی وزن هر یک از عوامل، نقشه وزنی هر عامل تهیه شد و سپس اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از لایه‌های وزنی و ضریب وزنی مربوط به هر یک از عوامل شد. درنهایت پنج طبقه خطر آتش‌سوزی جنگل از خیلی زیاد تا خیلی کم به‌دست آمد. نتایج نشان داد که نقشه به‌دست‌آمده تطابق زیادی با آتش‌سوزی‌های گذشته داشت، به‌طوری‌که ۹۰ درصد از مناطق آتش‌سوزی‌شده در پهنه‌هایی با خطر زیاد قرار داشتند (۴۱).

مهدوی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیق مشابه دیگری نقشه مناطق بحرانی آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع شهرستان ایلام را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و وزن‌دهی به فاکتورهای مؤثر در آتش‌سوزی تهیه کردند. همچنین نقشه مناطق آتش‌سوزی گذشته با GPS برداشت شد. نتایج نشان داد که ۵۰ درصد از آتش‌سوزی‌های گذشته در طبقه بسیار پرخطر و ۴۰ درصد آن‌ها در طبقه خطرناک قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اعتبار زیاد مدل مورد استفاده است (۴۲).

سلامتی و همکاران (۱۳۹۰) نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های گلستان را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و GIS تهیه کردند. بدین‌منظور فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی، بر اساس مقایسات زوجی وزن‌دهی شدند و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی تهیه شد. نتایج نشان داد که ۴۰ درصد منطقه در طبقات پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند (۴۳).

۷- تحقیقاتی که به مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداخته‌اند

1- Global Position System (GPS)

جنگل برای مدیریت آتش‌سوزی‌های آینده کمک شایانی می‌کند (۴۸).

در تحقیق دیگری Paz و همکاران (۲۰۱۱) نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی‌ای را که برای منطقه Carmel اسرائیل در سال ۲۰۰۹ تهیه کرده بودند، با آتش‌سوزی واقعی که در سال ۲۰۱۰ در همین منطقه اتفاق افتاده بود، مقایسه کردند. نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس فاکتورهای اقلیمی، پوشش گیاهی، نوع سوخت و فاکتورهای انسانی تهیه شده بود. نتایج نشان داد که بیشتر مناطق سوخته در سال ۲۰۱۰، در مناطق با خطر زیاد در نقشه پتانسیل تهیه‌شده قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده این بود که مدل مورد استفاده ضریب اطمینان زیادی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده دارد (۴۹).

اترک چالی (۱۳۷۹) دوره بازگشت آتش در جنگل‌های گلستان را مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که میانگین آتش‌سوزی جنگل در ایران حدود ۷۰۰۰ هکتار بوده و دوره بازگشت شدیدترین آتش‌سوزی‌ها ۱۱ الی ۱۳ سال بوده است؛ در حالی که میانگین دوره بازگشت آتش در جنگل‌های گلستان پنج تا هفت سال است؛ به‌عنوان مثال با توجه به این که یکی از شدیدترین آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های گلستان در آذرماه ۱۳۸۹ اتفاق افتاده است، باید بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ انتظار آتش‌سوزی مهیب دیگری را در این جنگل‌ها داشت و سال‌های مذکور سال‌های هشدار و پیش‌بینی آتش‌سوزی در این جنگل‌ها هستند (۵۰).

هوشیارخواه و جمشیدی آلاشتی (۱۳۸۶) نیز رژیم‌های آتش‌سوزی در جنگل و استراتژی‌های مقابله با آن را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که در صورت انجام پیش‌بینی‌های لازم و راهکارهای فنی مناسب، امکان جلوگیری از وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها آسان است. سپس با بررسی روند آتش‌سوزی در جنگل و شرایط کنترل آن، یک استراتژی علمی در جهت پیش‌گیری از وقوع آن در آینده ارائه شد. این استراتژی با انجام پیش‌بینی‌های لازم و راهکارهای فنی مناسب، امکان جلوگیری از وقوع آتش‌سوزی‌ها را فراهم می‌کند (۵۱).

مناطق پرخطر آتش‌سوزی در نقشه قابلیت تهیه‌شده با مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته تطابق زیادی داشت که نشان‌دهنده اعتبار و صحت زیاد مدل ساخته شده بود (۴۵).

زرع کار و همکاران (۱۳۹۲) نقشه خطر آتش‌سوزی در سه حوزه جنگلی در استان گیلان را با استفاده روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و GIS تهیه کردند. با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن تمام عوامل مؤثر در وقوع حریق به‌دست آمد و از روی هم‌گذاری نقشه‌های همه لایه‌های مؤثر در آتش‌سوزی، نقشه خطر آتش‌سوزی تهیه شد. نتایج نشان داد که ۶۶ درصد از مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته در مناطق پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند (۴۶).

۸- تحقیقاتی که به پیش‌بینی وقوع رژیم‌های آتش‌سوزی پرداخته‌اند

در تحقیقی، Sakr و Elhajj (۲۰۱۰) روش‌های پیش‌بینی آتش‌سوزی جنگل بر اساس هوش مصنوعی در آمریکا را مورد مطالعه قرار دادند. بدین‌منظور دو الگوریتم پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل بر اساس ماشین بردار پشتیبان^۱ و شبکه عصبی مصنوعی پایه‌گذاری شدند که برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل به شرایط آب و هوایی قبلی بستگی دارند. نتایج نشان داد که با تعداد محدودی از پارامترها نیز قابلیت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل وجود دارد. به‌علاوه ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی خطای کمی در تعداد آتش‌سوزی‌های پیش‌بینی‌شده دارند (۴۷).

در مطالعه‌ای دیگر Perera و Cui (۲۰۱۰) رژیم‌های آتش‌سوزی در Ontario کانادا را مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند و نقشه احتمال وقوع آتش‌سوزی را بر اساس فاکتورهای شیب، جهت، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و غیره در پنج طبقه تهیه کردند. نتایج نشان داد که مدل شبیه‌سازی آتش‌سوزی با آتش‌سوزی‌های گذشته هم‌خوانی دارد. همچنین انجام شبیه‌سازی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده، به مدیران

شد. ۱۳ متغیر تشریحی از طریق مدل تعیین شدند که مرتبط با تکه‌تکه شدن مناطق کشاورزی، رهاسازی زمین‌های کشاورزی و فعالیت‌های توسعه‌ای بودند. این متغیرها شامل تراکم جاده‌ها، تراکم خطوط راه‌آهن، روستاها، تراکم ماشین‌آلات کشاورزی، تکه‌تکه شدن زمین‌های کشاورزی، تراکم دام، تراکم زمین‌های حفاصل جنگل و شهر، مناطق حفاصل تأسیسات خطر و جنگل‌ها، مناطق حفاظت‌شده طبیعی، اراضی جنگلی تبدیل‌شده به زمین‌های کشاورزی در دهه ۹۰، افزایش تعداد دارندگان سهام‌های ملکی بین ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۹، افزایش جمعیت بین ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۱ و نرخ بیکاری بودند. توافق بین خروجی مدل پیش‌بینی‌کننده و داده‌های تاریخچه آتش‌سوزی ۸۳/۳ درصد بود. بنابراین مدل ساخته‌شده می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده خوب برای خطر وقوع آتش‌سوزی‌های انسانی، در جهت تصمیم‌سازی‌های مکانی در ارتباط با برنامه‌های جلوگیری‌کننده از حریق استفاده شود (۵۳).

همچنین در تحقیق دیگری Jurdao و همکاران (۲۰۱۲) احتمال وقوع آتش‌سوزی را از برآوردهای ماهواره‌ای میزان رطوبت سوخت زنده^۱ در مناطق مدیترانه‌ای مدل‌سازی کردند. هدف از این مطالعه، ارزیابی روش‌های مختلف تبدیل میزان رطوبت سوخت زنده به احتمال بروز آتش‌سوزی در سطح ملی و با توجه به اقلیم و انواع پوشش گیاهی بود. داده‌های میزان رطوبت سوخت زنده از سنجنده AVHRR و داده‌های آتش‌سوزی از محصول آتش‌سنجنده MODIS تهیه شدند. آزمون‌های آماری ناپارامتری، درخت طبقه‌بندی و مدل رگرسیون لجستیک برای برآورد احتمال وقوع از پنج متغیر اساسی بر پایه میزان رطوبت سوخت زنده استفاده شدند. در نهایت رگرسیون لجستیک به‌دلیل در نظر گرفتن چندین متغیر پیش‌بینی‌کننده، برای محاسبه احتمال بروز آتش‌سوزی انتخاب شد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت سوخت زنده در یک هفته قبل از شناسایی آتش‌سوزی، مهم‌ترین متغیر

عالی محمودی سراب و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های آب و هوایی، به پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع شهرستان ایذه پرداختند. داده‌های آتش‌سوزی شامل سطح و تعداد آتش‌سوزی‌های به‌وقوع پیوسته بود. نتایج نشان داد که الگوریتم پرسپترون چندلایه و تابع هابربولیک در ایجاد ارتباط بین داده‌های آب و هوایی و وقوع آتش‌سوزی کارا بوده و شبکه‌ای با دو لایه مخفی و ۱۵ نرون بهترین صحت را نشان داده است. در نهایت با استفاده از داده‌هایی که برای تست شبکه در نظر گرفته شده بود، قدرت شبکه پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی تعیین شد و ضریب تعیین ۰/۹۸ برای آن به‌دست آمد (۲).

۹- تحقیقاتی که در خصوص مدل‌سازی آتش‌سوزی جنگل بر مبنای رگرسیون لجستیک انجام شده‌اند

در تحقیق Rollins و همکاران (۲۰۰۴) یک روش ترکیبی را برای تولید نقشه‌های پیش‌بینی‌کننده رژیم‌های آتش‌سوزی جنگل در شمال غربی Montana آمریکا با استفاده از نمونه‌برداری زمینی گسترده، سنجش از دور، شبیه‌سازی بوم‌سازگان و مدل‌سازی شیب بیوفیزیکی ارائه دادند. نقشه‌های مختلف با استفاده از مدل‌های خطی، رگرسیون لجستیک و رگرسیون درختی تهیه شدند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، بر اساس شرایط بالقوه آینده قابل‌به‌روزرسانی است و صحت این نقشه‌ها بین ۵۱ تا ۸۰ درصد است (۵۲).

در مطالعه دیگری، Martinez و همکاران (۲۰۰۹) فاکتورهای انسانی مرتبط با خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های اسپانیا را بررسی و پراکندگی مکانی وقوع آتش‌سوزی در این کشور را طی ۱۳ سال گذشته تحلیل کردند. بدین‌منظور داده‌های ۱۰۸ متغیر انسانی تهیه شدند و برای مدل‌کردن فاکتورهای مختلف مرتبط با وقوع حریق، وارد سیستم اطلاعات جغرافیایی شدند. پس از آنالیزهای اولیه، ۲۹ متغیر برای ساخت مدل پیش‌بینی‌کننده وقوع حریق‌های انسانی با استفاده از آنالیزهای رگرسیون لجستیک انتخاب شد و شاخص خطر بروز آتش‌سوزی تعیین

1- Live Fuel Moisture Content (LFMC)

۱۰- تحقیقاتی که به تهیه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی پرداخته‌اند

در خصوص این موضوع، Chuvieco و همکاران (۲۰۱۰) چهارچوبی را برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی و تهیه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی با استفاده از GIS و RS ارائه کردند. در این تحقیق، روش‌های تولید متغیرهای ورودی و ترکیب آن‌ها به‌منظور نقشه‌برداری خطر آتش‌سوزی برای مناطق مختلف اسپانیا در پروژه Firemap توسعه یافت. بعد از تعریف طرح و مدل مفهومی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی، متغیرهای ورودی (شامل فاکتورهای انسانی، رعد و برق، نقشه سوخت، نوع پوشش گیاهی، رطوبت سوخت زنده و مرده، نقشه‌های خاک‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی، مناطق تفرجی، مناطق حفاظت‌شده، داده‌های هواشناسی و داده‌های تراکم جمعیت) با استفاده گسترده‌ای از سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور تهیه شدند؛ زیرا این پروژه برای ارزیابی زمانی و مکانی شرایط خطر آتش‌سوزی انجام می‌شد. تمام متغیرها در تفکیک مکانی یک کیلومتر مربع نقشه‌برداری شدند و در یک سیستم نقشه‌برداری اینترنتی جمع‌آوری شدند. این سیستم در تابستان ۲۰۰۷ برای آزمایش نیمه‌اجرایی توسط کاربر فعال شد. در این تحقیق اولین نتایج اعتبارسنجی شاخص خطر آتش‌سوزی، از طریق مقایسه روند زمانی اجزای مختلف خطر آتش‌سوزی و وقوع آتش‌سوزی در مناطق مورد مطالعه مختلف ارائه شد (۵۷).

در مطالعه‌ای دیگر، Chuvieco و همکاران (۲۰۱۲) خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های اسپانیا را با استفاده از چهارچوبی از داده‌های مکانی ارزیابی کردند. ابتدا چهارچوب مدل مفهومی تعریف شد و سپس متغیرهای ورودی تهیه شدند و برای به‌دست آوردن شاخص‌های خطر آتش‌سوزی ترکیب شدند و در نهایت اعتبارسنجی مدل انجام شد. خطر آتش‌سوزی شامل متغیرهای انسانی، رعد و برق، میزان رطوبت سوخت مرده و زنده و پتانسیل گسترش آتش بود. شاخص‌های بروز و گسترش آتش‌سوزی با استفاده از آخرین آمار آتش‌سوزی در دسترس، اعتبارسنجی شدند. نتایج روابط معنی‌داری را بین وقوع

تأثیرگذار در آنالیزهای آماری بوده و مهم‌ترین متغیر برای برآورد احتمال بروز آتش‌سوزی در مدل مدیترانه‌ای محسوب می‌شود (۵۴).

همچنین Sitanggang و همکاران (۲۰۱۳) مدل پیش‌بینی‌کننده‌ای را برای شناسایی هات‌اسپات‌ها^۱ با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری C 4.5 و ID3 و رگرسیون لجستیک برای داده‌های مکانی آتش‌سوزی در منطقه جنگلی Rokan Hilir اندونزی ارائه دادند. داده‌های مورد استفاده شامل ۱۰ لایه تشریحی (فیزیکی، آب و هوایی و اقتصادی-اجتماعی) و یک لایه هدف بود. متغیرها در لایه هدف شامل نقاط هات‌اسپات و نقاط غیرهات‌اسپات بودند که به‌طور تصادفی در نزدیک هات‌اسپات‌ها انتخاب شده بودند. نتایج نشان داد که الگوریتم درختی C 4.5 کارایی بهتری از ID3 از نظر دقت داشت و دقت آن ۶۵/۲۴ درصد بود. به‌علاوه مدل رگرسیون لجستیک، الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را با دقت ۶۸/۶۳ درصد تحت پوشش قرار داده است (۵۵).

Eskandari و Chuvieco (۲۰۱۵) خطر آتش‌سوزی در پوشش‌های گیاهی ایران (جنگل‌ها و مراتع) را ارزیابی کردند. بدین‌منظور ارزیابی خطر در دو بخش احتمال خطر وقوع (با استفاده از رگرسیون لجستیک) و احتمال گسترش آتش‌سوزی (با استفاده از برنامه Flammap) در قالب نقشه‌های مکانی خطر وقوع و خطر گسترش آتش‌سوزی انجام شد. برای ارزیابی مدل‌ها از محصول آتش‌سنجنده MODIS در یک دوره ۱۲ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۳) و مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون لجستیک ۷۲/۷ درصد از احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایران را به‌درستی پیش‌بینی کرده است. همچنین بر اساس مدل Flammap، مناطق با احتمال زیاد گسترش آتش‌سوزی با مناطق آتش‌سوزی گذشته، ۰/۶۸ درصد هم‌خوانی داشتند (۵۶).

بیشترین دقت را در پیش‌بینی مناطق خطر آتش‌سوزی داشته‌اند (۶۰).

بحث و نتیجه‌گیری

روند فزاینده آتش‌سوزی در جنگل‌ها، لزوم ارایه راهکاری برای پیش‌بینی و کنترل آن‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. با توجه به این‌که عوامل مختلفی در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها تأثیرگذار هستند، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی با توجه به کلیه فاکتورهای تأثیرگذار در وقوع حریق، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در این جنگل‌ها است. از طرف دیگر با توجه به این‌که بیشتر عوامل تأثیرگذار بعد مکانی دارند، سیستم اطلاعات جغرافیایی نقش مؤثری را در مدل‌سازی مکانی وقوع آتش‌سوزی ایفا می‌کند. در رابطه با مدیریت آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS، مطالعات مختلفی در جنگل‌های جهان انجام شده است. جمع‌بندی تحقیقات انجام‌شده در مورد پتانسیل‌یابی آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که سیستم اطلاعات جغرافیایی برای توسعه اطلاعات، مدیریت و پیش‌بینی فعالیت‌های آتش‌سوزی جنگل کارآیی زیادی دارد، به طوری که ایجاد یک پایگاه داده در GIS متشکل از متغیرهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی برای نقشه‌برداری از مناطق خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بسیار مفید است. در اغلب موارد نوع پوشش گیاهی، شیب، جهت جغرافیایی، فاصله از جاده‌ها و رودخانه‌های دائمی، توپوگرافی و کاربری اراضی، مؤثرترین فاکتورها در وقوع آتش‌سوزی بوده و ادغام لایه‌ها معمولاً بر اساس سلسله مراتب و ضرایب خطر در وقوع آتش‌سوزی انجام شده است. در مطالعات جدیدتر از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و به‌عبارتی تلفیق تحلیل سلسله مراتبی و مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی استفاده شده است. همچنین از تصاویر TM، ETM+، AVHRR، LISS III و MODIS برای شناسایی آتش‌سوزی‌های گذشته استفاده شده است. نتایج کلی این مطالعات نشان می‌دهد که در اقلیم گرم با پوشش گیاهی خشک، شیب زیاد، جهت جنوبی و نزدیک به جاده و مناطق

آتش‌سوزی و مهم‌ترین شاخص‌های خطر ساخته‌شده به‌ویژه شاخص‌هایی که با میزان رطوبت سوخت در ارتباط بودند، نشان داد (۵۸).

در تحقیق دیگری Adab و همکاران (۲۰۱۳) خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های گلستان را با استفاده از GIS و RS مدل‌سازی کردند. شاخص آتش‌سوزی ساختاری، شاخص خطر آتش‌سوزی و یک شاخص جدید به نام شاخص هیبریدی آتش‌سوزی، برای مشخص کردن خطر آتش‌سوزی در این مطالعه استفاده شدند. شیب، جهت، ارتفاع، فاصله از جاده‌ها و مناطق مسکونی و رطوبت پوشش گیاهی به‌عنوان فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی به کار برده شدند. این لایه‌ها با اختصاص مقادیر وزنی به طبقات آن‌ها بر اساس نرخ حساسیت به حریق، در GIS ترکیب شدند. داده‌های هات‌اسپات سنجنده MODIS برای اعتبارسنجی شاخص‌ها استفاده شدند. ارزیابی شاخص‌ها با استفاده از روش منحنی‌های ROC^۱، دقت ۷۶/۶ درصدی شاخص هیبریدی آتش‌سوزی را نسبت به دو شاخص دیگر نشان داد. بر اساس نتایج این شاخص، ۵۷/۵ درصد منطقه مورد مطالعه در منطقه خطر زیاد، ۳۳ درصد در زون خطر متوسط و ۹/۵ درصد در زون خطر کم برای آتش‌سوزی قرار گرفته بود (۵۹).

در مطالعه دیگری Gerdzheva (۲۰۱۴) یک آنالیز مقایسه‌ای از مدل‌های مختلف ارزیابی خطر آتش‌سوزی در منطقه Smolyan بلغارستان را ارایه داد. هدف از این مطالعه تعیین یک مدل ارزیابی خطر صحیح برای منطقه مورد مطالعه بود. بر همین اساس سه مدل پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی انتخاب شدند. نتایج هر کدام از مدل‌ها با تاریخچه آتش‌سوزی‌های گذشته مقایسه شدند. بدین‌منظور مدل‌های Caceres (۲۰۱۱)، Ozelkan (۲۰۰۹) و Adab (۲۰۱۱) که هر کدام دربردارنده شاخص‌های مختلف آتش‌سوزی بودند، استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل Adab (۲۰۱۱)، Ozelkan (۲۰۰۹) و Caceres (۲۰۱۱) به‌ترتیب

1- Receiver Operating Characteristic (ROC)

در پایان ذکر این نکته ضروری است که هر یک از روش‌های مدل‌سازی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی که در این مطالعه بیان شدند، مزایا و معایب مربوط به خود را دارند؛ اما به دلیل این‌که مدل‌سازی با توجه به شرایط حاکم بر جنگل‌های هر منطقه مطلوب‌تر بوده و استفاده از مدل‌های بومی برای نقشه‌سازی خطر آتش‌سوزی به‌طور قطع نتایج مطلوب‌تری را نسبت به مدل‌های غیربومی به‌همراه دارد، بنابراین در تحقیقات آینده استفاده از آن‌ها برای اکوسیستم‌های جنگلی هر منطقه پیشنهاد می‌شود. در حالی‌که هنگام استفاده از مدل‌های غیربومی در هر منطقه، این مدل‌ها باید با توجه به شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه به‌منظور دستیابی به نتایج مطلوب‌تر اصلاح، کالیبره و بومی‌سازی شوند. برای استفاده از هر مدل به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران نیز لازم است که این مدل‌ها ابتدا با توجه به شرایط جنگل‌های ایران و در نظر گرفتن کلیه فاکتورهای محیطی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی این جنگل‌ها (به‌عنوان مثال عمق لاشبرگ، رطوبت لاشبرگ، متغیرهای اقلیمی و غیره) اصلاح و بومی شوند و سپس به‌کار گرفته شوند تا صحت آن‌ها با داده‌های واقعی در هر منطقه بیشتر شود.

منابع

- ۱- کاظمی، س. م، «آتش و اکوسیستم‌های جنگلی»، ماهنامه دام و کشت و صنعت، ۱۳۸۴، شماره ۷۰، صفحات ۴۶-۵۶.
- ۲- عالی‌محمودی سراب، س.، فقهی، ج.، جباریان امیری، ب.، «پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: جنگل‌های منطقه زاگرس شهرستان ایذه)»، اکولوژی کاربردی، ۱۳۹۱، جلد ۱، شماره ۲، صفحات ۷۵-۸۵.

3- Janbaz Ghobadi, Gh., Gholizadeh, B., Majidi Dashliburun, O., 2012. Forest

مسکونی، پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی زیاد است. برای ارزیابی دقت روش و مدل استفاده‌شده در تهیه نقشه پتانسیل آتش‌سوزی، معمولاً نقشه مناطق بحرانی آتش‌سوزی با نقشه مناطقی که در گذشته آتش گرفته‌اند، مقایسه شده و در صورت هم‌خوانی این دو، مطلوبیت مدل مورد استفاده اثبات شده است. در برخی مطالعات جدیدتر، از تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی، هوش مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی رژیم‌های آتش‌سوزی استفاده شده است. همچنین در روش‌های پیشرفته‌تر از رگرسیون لجستیک و الگوریتم درخت تصمیم‌گیری برای انتخاب و تهیه نقشه متغیرهای مؤثر در آتش‌سوزی و همچنین مدل‌سازی خطر وقوع حریق استفاده شده است. آنالیز چندمعیاره موضوعی است که در تحقیقات جدید مطرح شده و سازماندهی معیارها در قالب مدلی از داده‌های مکانی با استفاده از GIS نتایج مطلوبی را به‌همراه داشته است.

بررسی تحقیقات انجام‌شده در ایران نشان‌دهنده این است که مطالعات مربوط به پتانسیل‌یابی خطر وقوع آتش‌سوزی در کشور محدود بوده و در بیشتر این مطالعات برای پهنه‌بندی خطر وقوع آتش‌سوزی از فاکتورهای مختلفی استفاده شده و به تلفیق آن‌ها از طریق GIS تأکید شده است. همچنین AHP به‌عنوان ابزاری بهینه برای ارزیابی فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها و وزندهی به آن‌ها به‌کار گرفته شده است. در یک مطالعات جدیدتر، برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های آب و هوایی استفاده شده و نتایجی برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع نیز حاصل شده است. همچنین در برخی از مطالعات اخیر کارایی مدل‌های متداول خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران بررسی شده و به‌منظور افزایش اعتبار آن‌ها، اصلاحات و تغییراتی متناسب با شرایط جنگل‌های کشور، در آن‌ها اعمال شده است. در برخی از تحقیقات پیشرفته‌تر نیز از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در قالب سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده استفاده شده است.

- 9- Sowmya, S.V., Somashekar, R.K., 2010. Application of remote sensing and geographical information system in mapping forest fire risk zone at Bhadra wildlife sanctuary, India. *Journal of Environmental Biology*, Vol. 31(6), pp. 969-974.
- 10- Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I., Bafas, G.V., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 204, pp. 191-201.
- 11- Mutlu, M., Popescu, S.C., Zhao, K., 2008. Sensitivity analysis of fire behavior modeling with LIDAR-derived surface fuel maps. *Forest Ecology and Management*, Vol. 256, pp. 289-294.
- 12- Lee, B.S., Alexander, M.E., Hawkes, B.C., Lynham, T.J., Stocks B.J., Englefield, P., 2002. Information systems in support of wild land fire management decision making in Canada. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 37, pp. 185-198.
- 13- Chuvieco, E., Congalton, R.G., 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 29, pp. 147-159.
- fire risk zone mapping from geographic information system in Northern forests of Iran (case study, Golestan province). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, Vol. 4 (12), pp. 818-824.
- 4- Roman, M.V., Azqueta, D., Rodrigues, M., 2013. Methodological approach to assess the socio-economic vulnerability to wildfires in Spain. *Forest Ecology and Management*, Vol. 294, pp. 158-165.
- 5- Encinas, L.H., White, S.H., del Rey, A.M., Sanchez, G.R., 2007. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, Vol. 38, pp. 372-378.
- ۶- پناهی، پ.، «کاربرد سنجش از دور در مدیریت آتش‌سوزی جنگل»، سمینار دوره دکتری، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۶، ۲۰ صفحه.
- 7- Podur, J., Martell, D.L., Knight, K., 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 32, pp. 195-205.
- 8- Wenliang, L., Shixin, W., Yi, Z., Litao, W., Shujie, Z., 2010. Analysis of forest potential fire environment based on GIS and RS. *Proceedings of the 18th International Conference on Geo-informatics*, pp. 1-6.

- تغییر اقلیم و گاهشناسی درختی در اکوسیستم‌های خزری، ۱۳۸۷، ساری، ایران، ۱۷۸-۱۸۹.
- ۲۰- اکبری، د.، «هشدار آتش‌سوزی در مناطق جنگلی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری»، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی ژئوماتیک نوین در خدمت جامعه، ۱۳۸۹، تهران، ایران، ۵.
- 21- Giri, C., Shrestha, S., 2000. Forest fire mapping in Huay Kha Khaeng wildlife sanctuary, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21(10), pp. 2023-2030.
- 22- Vazquez, A., Moreno, J.M., 2001. Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (Central Spain). *Forest Ecology and Management*, Vol. 147(1), pp. 55-65.
- 23- Stolle, F., Chomitz, K.M., Lambin, E.F., Tomich, T.P., 2003. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology. *Forest Ecology and Management*, Vol. 179, pp. 277-292.
- 24- Lozano, F.J., Suárez-Seoane, S., Kelly, M., Luis, E., 2008. A multi-scale approach for modeling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, pp. 708-719.
- 25- Zumbrennen, T., Pezzatic, G.B., Menéndezd, P., Bugmann, H., Bürgia, M., Conederac, M., 2011. Weather and human impacts on forest fires: 100
- 14- Crofts, M., 1998. Forest fire management program at Pukaskwa national park. *Proceedings of PRFO*, pp. 292-293.
- 15- Vakalis, D., Sarimveis, H., Kiranoudis, C.T., Alexandridis, A., Bafas, G.V., 2004. A GIS based operational system for wildland fire crisis management, I. mathematical modelling and simulation. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 28 (4), pp. 389-410.
- ۱۶- منصوری، ن. ا.، نظری، ر.، نصیری، پ.، قراگوزلو، ع.، «تدوین برنامه مدیریت بحران آتش‌سوزی جنگل با تکنولوژی RS و GIS»، کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برنامه‌ریزی، ۱۳۹۰، جلد ۲، شماره ۳، صفحات ۶۳-۷۳.
- 17- Akpınar, E., Usul, N., 2003. GIS and forest fire. Project of INTA Space Turk, Engineering Department, Middle East Technical University, 11 p.
- 18- Pradhan, B., Bin Awang, M.A., 2006. Application of remote sensing and GIS for forest fire susceptibility mapping using likelihood ratio model. *Proceedings of Map Malaysia*, Kuala Lumpur, India, pp. 7-12.
- ۱۹- ادب، ح.، حبیبی نوخندان، م.، میرزا بیاتی، ر. و ادبی فیروز رجایی، ع.، «پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در مناطق جنگلی استان مازندران بر اساس شاخص پیش‌آگاهی Molgan با بهره‌گیری از تکنیک GIS»، مجموعه مقالات اولین همایش بین‌المللی

- لرستان)»، مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده، ۱۳۹۰، جلد ۲، شماره ۲، صفحات ۱-۱۳.
- ۳۱- گراوند، س.، یارعلی، ن.، صادقی کاجی، ح.، «الگوی مکانی و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی در اراضی طبیعی استان لرستان»، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۳۹۲، جلد ۲۱، شماره ۲، صفحات ۲۳۱-۲۴۲.
- 32- Almedia, R., 1994. Forest fire risk areas and definition of the prevention priority planning actions using GIS. Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographic Information Systems, EGIS 94, Utrecht, EGIS Foundation, pp. 1700-1706.
- 33- Jaiswal, R.K., Mukherjee, S., Raju, D.K., Saxena, R., 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 4, pp. 1-10.
- 34- Eskandari, S., Miesel, J.R., 2017. Comparison of the fuzzy AHP method, the spatial correlation method, and the Dong model to predict the fire high-risk areas in Hyrcanian forests of Iran. Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol. 8, pp. 1-17.
- 35- Dong, X.U., Li-min, D., Guo-fan, Sh., Lei, T., Hui, W., 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite images years of fire history in two climatic regions of Switzerland. Forest Ecology and Management, Vol. 261, pp. 2188-2199.
- 26- Eskandari, S., Oladi, J., Jalilvand, H., Sarajian, M.R., 2013a. Role of human factors on fire occurrence in District Three of Neka Zalemroud forests-Iran. World Applied Sciences Journal, Vol. 27(9), pp. 1146-1150.
- 27- Eskandari, S., 2015. Investigation on the relationship between climate change and fire in the forests of Golestan Province. Iranian Journal of Forest and Range Protection Research, Vol. 13(1), pp. 1-10.
- ۲۸- خراسانی‌نژاد، ع.، «بررسی عوامل مربوط به آتش‌سوزی در جنگل شصت کلاته و روش‌های کنترل آن»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۷۴، ۱۱۸ صفحه.
- ۲۹- یوسفی، ا.، جلیلود، ح.، «بررسی وضعیت آتش‌سوزی در مناطق جنگلی و مرتعی استان مازندران (حوزه اداره کل منابع طبیعی ساری) از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۶»، مجموعه مقالات دومین همایش بین‌المللی تغییر اقلیم و گاه‌شناسی درختی در اکوسیستم‌های خزری، ۱۳۸۹، ساری، ایران، ۱۵.
- ۳۰- بیرانوند، ع.، بابایی کفاکی، س.، کیادلیری، ه.، «بررسی تأثیر عوامل اکولوژیک بر توسعه آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های جنگلی (مطالعه موردی: کاکارضا-

- ۴۱- محمدی، ف.، شعبانیان، ن.، پورهایمی، م.، فاتحی، پ.، «تهیه نقشه خطر آتش سوزی جنگل با استفاده از AHP و GIS»، فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۳۸۹، جلد ۱۸، شماره ۴، صفحات ۵۶۹-۵۸۶.
- ۴۲- مهدوی، ع.، فلاح شمسی، ر.، نظری، ر.، حیدری، م.، «تهیه نقشه خطر آتش سوزی در اراضی جنگلی و مرتعی حوزه شهرستان ایلام با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی»، مجموعه مقالات نخستین همایش بین المللی آتش سوزی در عرصه های منابع طبیعی، ۱۳۹۰، گرگان، ایران، ۱۳.
- ۴۳- سلامتی، ح.، مصطفی لو، ح.، مستوری، ع.، هردوست، ف.، «ارزیابی و تهیه نقشه خطر آتش سوزی جنگل با استفاده از GIS در جنگل های استان گلستان»، مجموعه مقالات نخستین همایش بین المللی آتش سوزی در عرصه های منابع طبیعی، ۱۳۹۰، گرگان، ایران، ۱۰.
- 44- Vadrevu, K.P., Eaturu, A., Badarinath, K.V.S., 2010. Fire risk evaluation using multicriteria analysis, a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 166, pp. 223-239.
- 45- 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*, Vol. 10(8), pp. 1-13.
- ۴۶- زرع کار، آزاده.، کاظمی زمانی، بهاره.، قربانی، ساره.، عاشق معلا، مریم.، جعفری، حمیدرضا، «تهیه نقشه پراکندگی فضایی خطر آتش سوزی جنگل با استفاده and GIS for Baihe forestry bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research*, Vol. 16(3), pp. 169-174.
- 36- Erten, E., Kurgun, V., Musaolu, N., 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS, a case study. *Civil Engineering Faculty, Remote Sensing Division*, 7p.
- ۳۷- اسکندری، س.، اولادی قادیکلایی، ج.، جلیلونند، ح.، «ارزیابی کارایی مدل Dong برای تعیین قابلیت خطر آتش سوزی در جنگل های زرین آباد نکا، استان مازندران»، فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۳۹۲، الف، جلد ۲۱، شماره ۳، صفحات ۴۳۹-۴۵۱.
- 38- Eskandari, S., Oladi Ghadikolaei, J., Jalilvand, H., Saradjian, M.R., 2013b. Detection of fire high-risk areas in northern forests of Iran using Dong model. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 27(6), pp. 770-773.
- 39- Thakur, A.K., Singh, D., 2014. Forest fire risk zonation using geospatial techniques and Analytic Hierarchy Process in Dehradun district, Uttarakhand, India. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, Vol. 4(2), pp. 82-89.
- ۴۰- سجادیان، م.، سجادیان، ن.، «ارزیابی و کنترل بهینه آتش سوزی در منابع طبیعی (جنگل ها) با استفاده از تلفیق آنالیز مکانی spread computation و AHP در محیط GIS»، دومین کنفرانس بین المللی سلامت، ایمنی و محیط زیست، ۱۳۸۸، تهران، ایران، ۸.

- 52- Rollins, M.G., Keane, R.E., Parsons, R.A., 2004. Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation and gradient modeling. *Ecological Applications*, Vol. 14(1), pp. 75-95.
- 53- Martinez, J., Vega-Garcia, C., Chuvieco, E., 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 1241-1252.
- 54- Jurdao, S., Chuvieco, E., Arevalillo, J.M., 2012. Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. *Fire Ecology*, Vol. 8 (1), pp. 77-97.
- 55- Sitanggang, I.S., Yaakob, R., Mustapha, N., Ainuddin, A.N., 2013. Predictive models for hotspots occurrence using decision tree algorithm and logistic regression. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 13 (2), pp. 252-261.
- 56- Eskandari, S., Chuvieco, E., 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 42, pp. 57-64.
- 57- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martin, P., Vilar, L., Martinez, J., Martiin, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodriguez, F., از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سه حوزه جنگلی در استان گیلان)، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۳۹۲، جلد ۲۱، شماره ۲، صفحات ۲۱۸-۲۳۰.
- 47- Sakr, G.E., Elhajj, I.H., 2010. Artificial intelligence for forest fire prediction: A comparative study. *Proceedings of the Sixth International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal, pp. 653-661.
- 48- Perera, A.H., Cui, W., 2010. Emulating natural disturbances as a forest management goal: Lessons from fire regime simulations. *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, pp. 1328-1337.
- 49- Paz, Sh., Carmel, Y., Jahshan, F., Shoshany, M., 2011. Post-fire analysis of pre-fire mapping of fire-risk: A recent case study from Mt. Carmel (Israel). *Forest Ecology and Management*, Vol. 262, pp. 1184-1188.
- ۵۰- اترک‌چالی، ع.، «بررسی اثرات آتش‌سوزی بر روی تغییرات پوشش گیاهی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جنگل‌داری، دانشگاه مازندران، ۱۳۷۹، ۱۲۰ صفحه.
- ۵۱- هوشیارخواه، ب.، جمشیدی آلاشتی، ر.، «رژیم‌های آتش‌سوزی در جنگل و استراتژی مقابله با آن»، مجموعه مقالات دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی، ۱۳۸۶، تهران، ایران، ۹.

- Journal of Wildland Fire, Vol. 23(5), 606-619.
- 59- Adab, H., Kanniah, K.D., Solaimani, K., 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, Vol. 65, pp. 1723-1743.
- 60- Gerdzheva, A.A., 2014. A comparative analysis of different wildfire risk assessment models (a case study for Smolyan district, Bulgaria). *European Journal of Geography*, Vol. 5(3), pp. 22 -36.
- Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, Vol. 221, pp. 46-58.
- 58- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverria, M., Azqueta, D., Roman, M.V., Bastarrika, A., Martinez, S., Recondo, C., Zapico, E., Martinez-Vega, F.J., 2012. Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International*