

## مقایسه سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش سوزی جنگل - مطالعه موردی بخشی از جنگل‌های مازندران

سعیده اسکندری

- دانش‌آموخته دکترای منابع طبیعی، گرایش جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

پست الکترونیک: saeedeheskandari119@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۲

### چکیده

با توجه به روند روزافزون وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها طی سال‌های اخیر، پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی‌های آینده در مناطق جنگلی از طریق انتخاب روش مناسب و مدل‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای ارزیابی خطر آتش‌سوزی به‌کار گرفته شده است، که در این میان مقایسه کارایی مدل‌های مرسوم‌تر، دقیق‌تر و جدیدتر برای استفاده از بهترین مدل در تحقیقات آینده ضروریست. این تحقیق با هدف ارزیابی سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ در تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود انجام شد. دلیل استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، دقت آن بر اساس تحقیقات قبلی؛ دلیل استفاده از روش همپوشانی، جدید بودن آن و مدل دانگ مرسوم بودن آن در تحقیقات ارزیابی خطر آتش‌سوزی است. در مرحله اول از فرایند تحلیل سلسله مراتبی همراه با مجموعه‌های فازی برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده شد. در مرحله دوم از روش همپوشانی بین زیرمعیارهای محیطی و انسانی با آتش‌سوزی‌های گذشته برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده شد. در مرحله سوم از مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده گردید. پس از تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی از طریق سه روش، به‌منظور اعتبارسنجی این روش‌ها، نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته روی آنها همپوشانی شد. بدین منظور از آماره مساحت طبقه‌های پرخطر نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی در محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته استفاده شد. از این رو مساحت طبقه‌های پرخطر و بسیار پرخطر هر نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی، در محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته محاسبه شد. نتایج نشان داد که مناطق پرخطر آتش‌سوزی در نقشه پتانسیل خطر تهیه‌شده با روش همپوشانی تطابق بسیار زیادی با مناطق آتش‌سوزی گذشته دارد که نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل ساخته‌شده با این روش می‌باشد. به‌علاوه اینکه مناطق پرخطر آتش‌سوزی در نقشه پتانسیل خطر تهیه‌شده با تحلیل سلسله مراتبی فازی تطابق زیادی با مناطق آتش‌سوزی گذشته داشته که نشان‌دهنده دقت بالای مدل ساخته‌شده با روش مذکور می‌باشد. همچنین مناطق پرخطر آتش‌سوزی در نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده با مدل دانگ (Dong)، همپوشانی متوسطی با مناطق آتش‌سوزی گذشته نشان داد. نتایج نهایی این تحقیق نشان داد که روش همپوشانی (با دقت ۰/۹۲)، تحلیل سلسله مراتبی فازی (با دقت ۰/۸) و دانگ (با دقت ۰/۵۱) به ترتیب بیشترین کارایی را در پیش‌بینی مناطق خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، مدل دانگ، همپوشانی و جنگل‌های مازندران

## مقدمه

پدیده آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی همواره 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 (کاظمی، ۱۳۸۴)، به طوری که میانگین سالانه حریق در جنگل‌های جهان شش تا چهارده میلیون هکتار تخمین زده شده است (Encinas *et al.*, 2007). از این رو این پدیده یکی از مهمترین عوامل مخرب بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب شده و خسارت‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد (Marozas *et al.*, 2007). آتش‌سوزی جنگل با منشأ طبیعی و یا انسانی اثرات زیان‌بار و ویران‌گری را بر جوامع انسانی تحمیل می‌کند و تأثیر زیادی بر محیط‌زیست جنگل‌ها، روستاها و ساکنان آنها می‌گذارد (پناهی، ۱۳۸۶).

جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود از جمله مناطقی است که در سال‌های اخیر دچار آتش‌سوزی‌های مکرر و مداومی شده است، به طوری که بیشترین آتش‌سوزی استان مازندران در سال‌های اخیر در جنگل‌های نکا اتفاق افتاده است. تنها در سال ۱۳۸۹، تعداد ۵۳ فقره آتش‌سوزی در این جنگل‌ها گزارش شده است که در اثر آن حدود ۳۸ هکتار جنگل از بین رفته است (اداره کل منابع طبیعی مازندران، ۱۳۹۰).

به دلیل افزایش خطر آتش‌سوزی و خسارت‌های ناشی از آن، طراحی و توسعه روش‌های مؤثر کنترل و پیش‌بینی آن ضروری به نظر می‌رسد (Alexandridis *et al.*, 2008). شناسایی مناطق بحرانی آتش‌سوزی یکی از زمینه‌های پژوهش برای کنترل آتش‌سوزی‌های جنگل است (Jaiswal *et al.*, 2002)، که اهمیت بسزایی در کاهش تعداد آتش‌سوزی و جلوگیری از تخریب جنگل‌های منطقه دارد (Dong *et al.*, 2005). اکبری (۱۳۸۹) مدلی ساده برای تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی در نواحی جنگلی ایران با استفاده از داده‌های سنجش از دور ارائه داد؛ با استفاده از این مدل و بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع (لایه DEM) مربوط به منطقه، می‌توان به مناطق پرخطر

آتش‌سوزی پی‌برد. بدین منظور سه فاکتور شیب، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) که روی آتش‌سوزی تأثیرگذارند، در نظر گرفته شده و با فرموله کردن و اعمال آنها بر روی تصویر، مناطق با خطر زیاد مشخص شد. در تحقیق دیگری محمدی و همکاران (۱۳۸۹) با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اقدام به تهیه نقشه نواحی خطر آتش‌سوزی بر پایه عوامل پوشش گیاهی، فیزیوگرافی، اقلیمی، انسانی و فاصله از جاده‌ها و رودخانه‌ها، در بخشی از جنگل‌های حوضه پاوه‌رود کردند. سپس نقشه پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی با استفاده از لایه‌های رقومی عوامل و ضریب وزنی مربوط به هر یک از عوامل تهیه گردید. نتایج نشان داد که ۹۰ درصد از مناطق سوخته در پهنه‌هایی باخطر زیاد قرار دارند. سلامتی و همکاران (۱۳۹۰) نقشه خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های گلستان را با استفاده از AHP و GIS تهیه کردند. نتایج آنان نشان داد که ۴۰ درصد منطقه در طبقه‌های پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد. در تحقیق دیگری نقشه مناطق بحرانی خطر آتش‌سوزی در سواحل مدیترانه اسپانیا با استفاده از ترکیب داده‌های پردازش یافته تصویر TM و داده‌های نوع پوشش گیاهی، شیب، جهت، ارتفاع، جاده‌ها و مناطق مسکونی در محیط GIS تهیه شد. سپس ادغام لایه‌ها بر اساس AHP انجام گردید. نتایج نشان داد که ۲۲ درصد از پیکسل‌هایی که در مناطق پرخطر از نظر آتش‌سوزی قرار گرفته بودند، طی سال‌های گذشته دچار حریق شده بودند، درحالی‌که تنها ۳/۴۷ درصد از مناطق کم‌خطر از نظر آتش‌سوزی، واقعاً سوخته بودند (Chuvieco & Congalton, 1989). در تحقیق مشابه دیگری برای شناسایی مناطق حساس به حریق در جنگل‌های هندوستان از داده‌های ماهواره‌ای IRS LISS و پایگاه داده‌ها در GIS استفاده شد. نتایج نشان داد که ۲۰ درصد از منطقه مورد مطالعه پتانسیل بسیار زیاد، ۱۰ درصد پتانسیل زیاد، ۱۵ درصد پتانسیل متوسط و ۵۵ درصد از منطقه پتانسیل کم برای وقوع آتش‌سوزی دارد (Jaiswal *et al.*, 2002). Dong و همکاران (۲۰۰۵) یک روش ترکیبی با RS و GIS را برای نقشه‌برداری مناطق خطر

آتش‌سوزی منطقه Carmel اسرائیل را که در سال ۲۰۰۹ تهیه کرده بودند، با آتش‌سوزی واقعی که در سال ۲۰۱۰ در همین منطقه اتفاق افتاده بود، مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که اغلب مناطق سوخته در سال ۲۰۱۰ در مناطق با خطر زیاد در نقشه پتانسیل تهیه‌شده قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد مدل مورد استفاده ضریب اطمینان بالایی برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده دارد. اسکندری و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای دیگر، کارآیی مدل دانگ را برای تعیین قابلیت خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های زرین‌آباد استان مازندران ارزیابی کردند. نتایج آنان نشان داد که ۴۰ درصد از مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته در مکان‌هایی قرار گرفته‌اند که قابلیت بسیار زیاد یا زیادی برای آتش‌سوزی دارد. از این‌رو در ادامه، اصلاح مدل مذکور انجام شد و نقشه قابلیت خطر جدید براساس مدل اصلاحی مجدداً تهیه شد. نتایج نشان داد که ۸۰ درصد از آتش‌سوزی‌های گذشته در مکان‌های پرخطر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اعتبار قابل توجه مدل اصلاح‌شده برای منطقه مورد مطالعه است.

تحقیقات اولیه در خصوص ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل، عمدتاً به شناسایی متغیرهای مؤثر در آتش‌سوزی جنگل و ادغام آنها بر اساس یک مدل ریاضی تأکید کرده است. همچنین اغلب آنها فقط به عوامل اقلیمی (Goncalves & Lourenco, 1990; Van Wagner, 1993) و یا پوشش گیاهی (Maselli et al., 2003; Hernandez-Leal et al., 2006) به تنهایی تمرکز کرده‌اند. در حالی که پیش‌بینی طبیعت پویا و متغیر آتش‌سوزی جنگل‌ها تنها از طریق شناسایی متغیرهای اقلیمی و پوشش گیاهی امکان‌پذیر نیست (Vadrevu et al., 2009)، بلکه ادغام متناسب و معقولی از متغیرهای توپوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسانی را بر اساس اهمیت نسبی آنها در یک مدل مناسب می‌طلبد. در تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی همواره باید به این نکته توجه شود که کدام مدل یا روش دقت قابل‌قبولی را در تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی داشته و می‌تواند پیش‌بینی دقیقی از وقوع آتش‌سوزی‌های آینده ارائه دهد. با وجود مطالعات مختلف

آتش‌سوزی در حوضه جنگلداری بیهه (Baihe) چین توسعه دادند. به همین منظور داده‌های توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع منطقه و اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی و کاربری اراضی (جاده‌ها، مناطق مسکونی و غیره) از تصویر ETM+ لندست استخراج شدند. سپس مناطق خطر آتش‌سوزی با اختصاص وزن‌های معقول به طبقه‌های همه لایه‌ها مشخص شدند. نتایج نشان داد که مناطق با خطر آتش‌سوزی زیاد در مکان‌هایی واقع شده‌اند که قبلاً در آنها آتش‌سوزی اتفاق افتاده است. Erten و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیق دیگری مناطق خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های گالی‌پولی ترکیه را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS نقشه‌برداری کردند. نتایج آنان نشان داد که در مناطق با پوشش گیاهی خشک، شیب بالا، جهت جنوبی و نزدیک به جاده و مناطق مسکونی، پتانسیل خطر آتش‌سوزی زیاد است. Pradhan و Bin Awang (۲۰۰۶) مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگل در منطقه Kuala Selangor مالزی را با استفاده از RS و GIS بررسی کردند. مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگل با استفاده از داده‌های موقعیت آتش‌سوزی‌های گذشته تعیین صحت شدند. نتایج، صحت بالای نقشه پتانسیل تهیه‌شده را به دلیل همخوانی مناطق پرخطر آن با مناطق آتش‌سوزی‌شده در گذشته نشان داد. در تحقیق مشابه دیگری Sowmya و Somashekar (۲۰۱۰) با وزن‌دهی مناسب به همه فاکتورهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با روش AHP، نقشه مناطق خطر آتش‌سوزی در پناهگاه حیات‌وحش Bhadra هند را تهیه کردند. نتایج آنان نشان داد که اغلب مناطق پیش‌بینی‌شده برای آتش‌سوزی با توجه به مدل استفاده‌شده، در مناطق سوخته قرار گرفته‌اند. Maeda و همکاران (۲۰۱۱) مناطق آتش‌سوزی‌شده در بخشی از جنگل‌های آمازون برزیل را به‌عنوان مناطق پرخطر از نظر آتش‌سوزی شناسایی کردند. سپس با استفاده از تصاویر MODIS آتش‌سوزی‌های فعال در منطقه شناسایی شد و نتایج آتش‌سوزی‌های گذشته با مناطق آتش‌سوزی‌های فعال مقایسه گردید. نتایج ضریب همبستگی ۰/۸۴ را بین این نقاط نشان داد. Paz و همکاران (۲۰۱۱) نقشه خطر

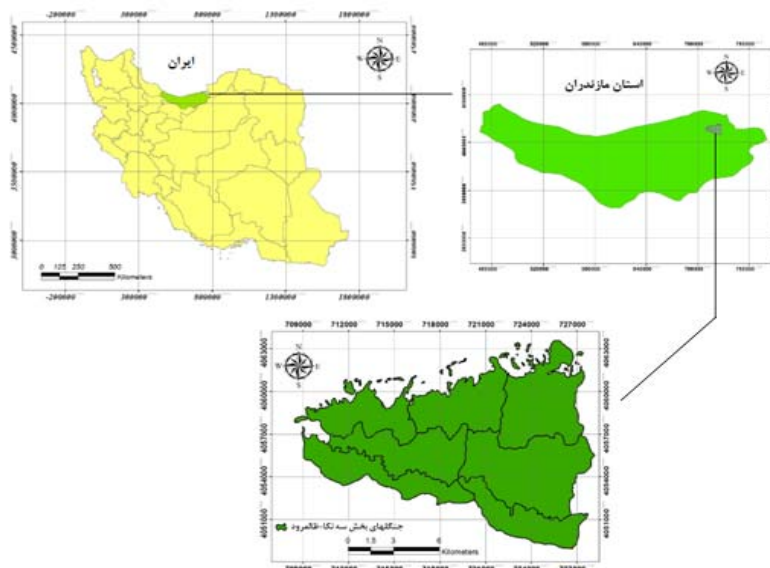
می‌گردد (شکل ۱). بخش سه از ارتفاعات کوتاه تا نسبتاً بلند با شیب توپوگرافی اغلب ملایم، عمق خاک نسبتاً زیاد و پوشش جنگلی نسبتاً انبوه تشکیل شده است. حداقل ارتفاع آن از سطح دریای آزاد حدود ۹۰ متر و حداکثر ارتفاع آن ۸۲۰ متر می‌باشد. جنگل‌های این منطقه از نوع دانه‌زاد ناهمسال و آمیخته می‌باشد. گونه‌های گیاهی منطقه شامل انواع گونه‌های درختی از جمله راش، ممرز، بلوط، توسکا، افرا، نمدار، انجیلی، آزاد و غیره و درختچه‌ها مانند ازگیل، ولیک، شمشاد، گوجه‌وحشی و غیره و همچنین گونه‌های علفی و خشبی مانند اسپرولا، کارکس، کوله‌خاس، سیکلامن، بنفشه، پامچال، تمشک، سرخس و غیره می‌باشد. بخش سه با توجه به اجرای طرح در سال‌های گذشته دارای ۱۰۳/۴ کیلومتر جاده جنگلی احداث شده، ۲۷ کیلومتر جاده روستایی و ۲۱ کیلومتر جاده آسفالتی است. جاده‌ها عمدتاً جاده جنگلی درجه دو محسوب می‌شود. این بخش به هفت سری تقسیم شده است که طی سال‌های گذشته، سابقه آتش‌سوزی‌های شدید و وسیع را داشته‌اند. براساس اطلاعات موجود، چهار فقره آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالم‌رود اتفاق افتاده است که اغلب این آتش‌سوزی‌ها از نوع سطحی و بعضاً تنه‌ای بوده است (شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹).

انجام‌شده در ایران در خصوص ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل، تاکنون مطالعه‌ای که روش‌های مختلف مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر حریق را از نظر کارایی و دقت مورد مطالعه قرار دهد، انجام نشده است. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی دقت سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالم‌رود می‌باشد تا با انتخاب بهترین مدل، امکان پیش‌بینی دقیقی از وقوع آتش‌سوزی‌های آینده در این جنگل‌ها فراهم شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در بخش سه طرح جنگل‌داری نکا-ظالم‌رود در حوضه آبخیز ۷۷ و در جنوب استان مازندران انجام شد. منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود ۱۵۳۰۷/۲ هکتار در عرض شمالی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه و طول شرقی ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۶ دقیقه واقع شده است. از شرق به یال چاخانی در دامنه راست (شمال مهربان رود) و یال سوتر آباد روی دامنه چپ (جنوب مهربان رود)، از غرب به یال آبلو، از جنوب به یال زرن‌دین - خرم چماز و از شمال نیز به جاده آسفالتی نکا- بهشهر محدود



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

استفاده از آن محسوب می‌شود، اما اعتبار و دقت قابل قبول آن در مطالعات قبلی اثبات شده است که از مزیت‌های استفاده از آن به‌شمار می‌رود.

در مدل همپوشانی از تطابق بین زیرمعیارهای محیطی و انسانی با آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود. لازمه استفاده از این مدل، داشتن اطلاعات آتش‌سوزی‌های گذشته و طبقه‌بندی نقشه‌های هر یک از معیارهای مؤثر بر اساس حساسیت آنها به آتش‌سوزی است. در نهایت برای دستیابی به میزان اهمیت (وزن) هر معیار در وقوع آتش‌سوزی، باید میزان همپوشانی طبقات پرخطر هر یک از نقشه‌های معیارها (از نظر حساسیت به حریق) را با آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته بررسی کرد. از مزایای مهم این روش دقت مطلوب آن می‌باشد. چنانچه بر اساس مطالعات گذشته، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس همپوشانی داده‌های محیطی با داده‌های واقعی آتش‌سوزی‌های گذشته، نسبت به روش‌های دیگر مطلوب‌تر و رضایت‌بخش‌تر بوده است (Lozano et al., 2008). اما داشتن اطلاعات کافی از آتش‌سوزی‌های گذشته و معیارهای مؤثر در آتش‌سوزی جنگل، استفاده از این روش را محدود می‌کند.

مدل Dong و همکاران (۲۰۰۵) نیز مدلی مرسوم برای تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی است، که در برخی از مطالعات به‌کار گرفته شده است (Dong et al., 2005; Erten et al., 2005؛ اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲). مطلوبیت این مدل به این دلیل است که مهمترین عوامل کلی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل در آن لحاظ شده است. به علاوه اینکه سادگی این مدل، از مزایای استفاده از آن محسوب می‌شود. درحالی‌که محدودیت استفاده از این مدل تنها برای مناطقی با شرایط مشابه به محلی که مدل‌سازی بر اساس شرایط آنجا انجام شده است، استفاده از آن را محدود می‌کند. مدل خطر آتش‌سوزی جنگل بر اساس روش دانگ به صورت زیر است:

مدل‌های ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی

تاکنون مدل‌های مختلفی برای ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما برای دستیابی به نتایج دقیق، همواره باید به این نکته توجه شود که کدام مدل یا روش دقت قابل‌قبولی را در تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی دارد. با وجود اهمیت این موضوع، تا به حال مطالعاتی که روش‌های مختلف مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر حریق را از نظر کارایی و دقت مورد مطالعه قرار دهد، انجام نشده است. از این‌رو در این تحقیق کارایی روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای ارزیابی خطر وقوع آتش‌سوزی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. از این‌رو در ابتدا به معرفی و بررسی مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها و مدل‌ها پرداخته می‌شود.

در مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی از ترکیب فرایند تحلیل سلسله مراتبی همراه با مجموعه‌های فازی برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود. لازمه استفاده از این مدل، استفاده از نظر کارشناسان برای بیان ارجحیت معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل نسبت به یکدیگر است، درحالی‌که برای رفع مشکلات مربوط به روش تحلیل سلسله مراتبی، مجموعه‌های فازی نیز برای بیان عدم قطعیت و دستیابی به نتایج دقیق‌تر وارد روند محاسبات و مدل‌سازی می‌شوند (Vadrevu et al., 2009). برای استفاده از این مدل، بعد از دستیابی به وزن همه معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل، تمام نقشه‌های رقومی معیارهای مؤثر نیز باید بر اساس توابع عضویت فازی به صورت فازی در بیابند. از این‌رو انجام تجزیه و تحلیل‌های مربوطه نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی بیشتر خواهد بود. پیچیدگی محاسبات مربوطه و انجام آنالیزهای بیشتر بر روی نقشه‌های رقومی، استفاده از این روش را دشوار می‌کند که از معایب

## جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق برای مدل‌سازی با روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی و همپوشانی شامل نقشه‌های ۴ معیار اصلی (معیارهای توپوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسانی) و ۱۷ زیرمعیار مربوط به آنها می‌باشد (شکل ۲).

$$Rc = 7 (V_t + V_d) + 5 (S+A+E) + 3 (D_r + D_f + D_s)$$

که در آن Rc شاخص عددی پتانسیل آتش‌سوزی،  $V_t$  عامل نوع پوشش گیاهی،  $V_d$  تراکم پوشش گیاهی، S شیب، A جهت، E ارتفاع از سطح دریا،  $D_r$  فاصله از جاده،  $D_f$  فاصله از زمین‌های کشاورزی و  $D_s$  فاصله از مناطق مسکونی (روستا) می‌باشد. ضمناً اعداد صحیح (ضرایب) نشان‌دهنده وزن هر معیار (وزن برون‌لایه‌ای) می‌باشد.



شکل ۲- معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی جنگل (Vadrevu et al., 2009)

تهیه گردید و مسیر رودخانه در نرم‌افزار GIS رقومی گردید. سپس در اطراف این نقشه، بافرهای (حائل‌های) ۲۰۰ متری در نظر گرفته شد و نقشه مربوطه تهیه گردید. معیارهای زیست‌شناختی شامل زیرمعیارهای نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، عمق لاشبرگ، رطوبت لاشبرگ، رطوبت خاک و بافت خاک می‌باشد (Vadrevu et al., 2009). نقشه‌های این معیارها از شرکت سهامی نکاچوب تهیه و در GIS رقومی گردید.

معیارهای توپوگرافی شامل زیرمعیارهای شیب، جهت، ارتفاع و فاصله از رودخانه می‌باشد. برای تهیه نقشه‌های شیب و جهت و ارتفاع، از داده‌های مدل رقومی ارتفاع (لایه DEM) سنجنده ASTER با اندازه پیکسل ۲۵ متر استفاده شد. هر کدام از این نقشه‌ها بر حسب هدف تحقیق طبقه‌بندی شده و در پنج طبقه تقسیم‌بندی گردیدند (Vadrevu et al., 2009). نقشه تنها رودخانه موجود در جنگل‌های بخش سه نکا-ظالم‌رود (مهربان‌رود) نیز از شرکت سهامی نکاچوب

عوامل انسانی، کلیه جاده‌ها، مناطق مسکونی (روستاها) و زمین‌های زراعی منطقه، با استفاده از اطلاعات موجود در شرکت سهامی نکاچوب و نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ شناسایی شده و نقشه‌های مربوط به آنها به صورت رقومی در GIS تهیه شد. سپس در اطراف جاده‌ها بافرهایی با شعاع ۲۰۰ متری و در اطراف مناطق مسکونی (روستاها) و زمین‌های زراعی بافرهایی با شعاع ۱۰۰۰ متری در نظر گرفته شد (Jaiswal et al., 2002; Dong et al., 2005; Santiago & Kheladze, 2011) و نقشه‌های بافر آنها بر اساس هدف تحقیق در GIS طبقه‌بندی گردید.

همچنین داده‌های واقعی مناطق آتش‌سوزی گذشته در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود، با استفاده از نمونه‌برداری زمینی و برداشت محدوده‌های آتش‌سوزی با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) تهیه شد. سپس مرز مناطق (لکه‌هایی) که قبلاً در آنها آتش‌سوزی اتفاق افتاده بود، بسته شد و نقشه این مناطق در GIS تهیه شد. بر اساس اطلاعات موجود، طی سال‌های گذشته، چهار آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه به وقوع پیوسته است. اطلاعات این آتش‌سوزی‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

معیارهای اقلیمی شامل زیرمعیارهای میانگین بارندگی سالانه، میانگین رطوبت نسبی سالانه، میانگین درجه حرارت سالانه و میانگین شدت باد سالانه می‌باشد. اطلاعات مربوط به این عوامل طی ۲۰ سال گذشته از اداره کل هواشناسی استان مازندران و ایستگاه‌های هواشناسی بایعکلا، تیرتاش، افرجال، دشت‌ناز و ساری که در اطراف محدوده جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود قرار دارند، تهیه شد. سپس از اطلاعات این ایستگاه‌ها در ۲۰ سال گذشته میانگین گرفته شد تا یک عدد واحد برای هر یک از داده‌های اقلیمی (بارندگی، رطوبت نسبی، درجه حرارت و شدت باد) مربوط به هر ایستگاه به دست آید (Santiago & Kheladze, 2011). برای تهیه نقشه رقومی این داده‌های اقلیمی، از روش درون‌یابی IDW در GIS استفاده شد. سپس نقشه مربوط به این عوامل طبقه‌بندی شده و نقشه نهایی آنها تهیه شد.

معیارهای انسانی شامل زیرمعیارهای فاصله از جاده‌ها (کلیه جاده‌ها و مسیرهای مالرو)، فاصله از مناطق مسکونی و فاصله از زمین‌های زراعی است (Jaiswal et al., 2002; Dong et al., 2005; Sowmya & Somashekar, 2010; Santiago & Kheladze, 2011). برای تهیه نقشه زیرمعیارهای

جدول ۱- اطلاعات آتش‌سوزی‌های واقعی در منطقه مورد مطالعه

( )
/
/
/
/
/

#### روش تحقیق

روش تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی با سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ در مرحله اول از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Saaty, 1980) همراه با مجموعه‌های فازی در یک سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رتبه‌بندی و وزندهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و

تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده شد. روش انجام شامل ۴ مرحله اصلی بود. (۱) ایجاد ساختار سلسله مراتبی معیارهای خطر آتش‌سوزی و آماده‌سازی نقشه معیارها و زیرمعیارها (شکل ۲، ۲) وزندهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی و مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی جنگل با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی از طریق توزیع پرسشنامه و نظرات کارشناسان، (۳) استانداردسازی (فازی‌سازی) معیارها

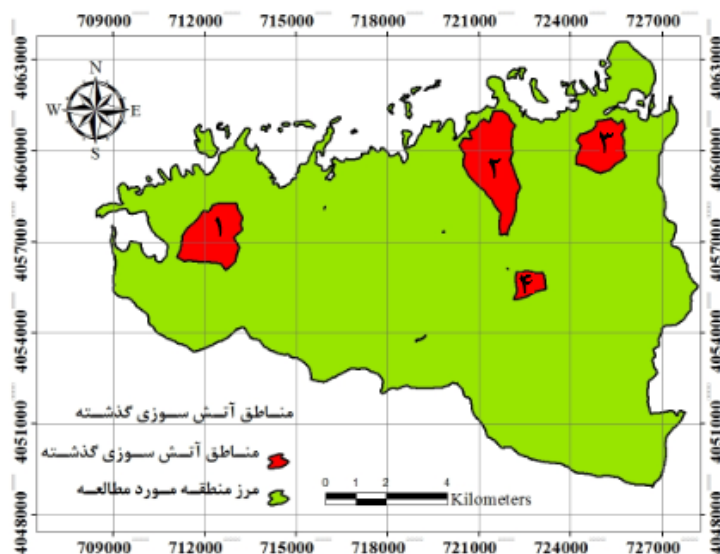
با استفاده از توابع عضویت فازی، ۴) اختصاص وزن معیارها و ادغام نقشه‌های معیارها (لایه‌ها) از طریق ترکیب وزنی لایه‌ها برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در محیط GIS (Vadrevu et al., 2009).

در مرحله دوم از روش تطابق (همپوشانی) بین زیرمعیارهای محیطی و انسانی با آتش‌سوزی‌های گذشته برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در آتش‌سوزی، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی استفاده شد. هر یک از نقشه‌های زیرمعیارها بر اساس حساسیت طبقه‌های آنها به آتش و با توجه به مطالعات انجام‌شده پیشین، از طبقه‌های بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر طبقه‌بندی شدند. به‌منظور بررسی تطابق (همپوشانی) بین زیرمعیارهای مختلف مؤثر در آتش‌سوزی جنگل و آتش‌سوزی‌های واقعی به وقوع پیوسته در جنگل‌های منطقه، مساحت طبقه‌های پرخطر هر نقشه زیرمعیار در محدوده آتش‌سوزی‌های واقعی، محاسبه شد. سپس از تقسیم مساحت طبقه‌های پرخطر هر نقشه زیرمعیار در محدوده آتش‌سوزی‌های واقعی، به مساحت کل محدوده‌های آتش‌سوزی‌های واقعی، میزان همپوشانی هر نقشه زیرمعیار با آتش‌سوزی‌های واقعی بدست آمد. این تحلیل برای همه نقشه‌های زیرمعیارها انجام شده و میزان همپوشانی هر نقشه زیرمعیار با آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته به صورت عددی بین ۰ تا ۱ بدست آمد. بدین ترتیب اگر طبقه پرخطر زیرمعیاری در محدوده‌های آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته، مساحت بیشتری را به خود اختصاص دهد، آن زیرمعیار تطابق (همپوشانی) بیشتری با آتش‌سوزی داشته و عامل مؤثرتری در وقوع آتش‌سوزی محسوب می‌شود. در نهایت میزان همپوشانی هر زیرمعیار با آتش‌سوزی به صورت عددی بین ۰ تا ۱ ارائه شد و به عنوان وزن (ضریب) هر زیرمعیار (متغیر) در مدل خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بر اساس روش همپوشانی در نظر گرفته شد. بر اساس مدل ساخته‌شده و ادغام وزنی نقشه‌های زیرمعیارها بر اساس وزن (میزان همپوشانی) آنها در GIS، نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی تهیه شد. با توجه به اینکه نقشه‌های همه زیرمعیارها دارای طبقه‌های بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر بودند، نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی نیز در پنج طبقه از

بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر به‌دست آمد. در مرحله سوم از مدل Dong و همکاران (۲۰۰۵) که مدلی مرسوم برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی است، استفاده شد. مطلوبیت این مدل به این دلیل است که مهمترین عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل در آن لحاظ شده است. پس از تهیه نقشه عوامل مؤثر در آتش‌سوزی بر اساس این مدل، از روی هم‌گذاری تمام این نقشه‌ها در محیط GIS و دادن وزن اختصاصی به هر فاکتور با استفاده از مدل مذکور (وزن ۷ برای نوع و تراکم پوشش گیاهی، وزن ۵ برای شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا، وزن ۳ برای فاصله از جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی) نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی منطقه در GIS تهیه گردید.

ارزیابی دقت سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی به‌منظور اعتبارسنجی کیفی نقشه‌های خطر آتش‌سوزی تهیه‌شده بر اساس سه روش، نقشه مناطق آتش‌سوزی گذشته با نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع تهیه‌شده در محیط GIS همپوشانی شد. بر این اساس، در صورتی که مناطق پرخطر نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با محدوده‌هایی که قبلاً آتش گرفته‌اند همپوشانی داشته باشد، کارایی و صحت مدل ساخته‌شده برای تهیه نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی اثبات خواهد شد. منظور از همپوشانی، روی هم قرار گرفتن مناطق پرخطر در نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی با محدوده‌های آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته است. به‌منظور اعتبارسنجی کمی نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی و مدل‌های استفاده‌شده برای تهیه آنها، از معیار مساحت طبقه‌های بسیار پرخطر و پرخطر آتش‌سوزی در محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته استفاده شد. بدین منظور، مساحت طبقه‌های بسیار پرخطر و پرخطر نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته محاسبه شد. در صورتی که بخش وسیعی از طبقه‌های بسیار پرخطر و پرخطر در محدوده آتش‌سوزی‌های گذشته قرار گرفته باشند، صحت مدل استفاده‌شده و نقشه پتانسیل خطر حاصل از آن اثبات خواهد شد.





شکل ۳- نقشه موقعیت آتش سوزی های گذشته در جنگل های بخش سه نکا- ظالم رود

## نتایج

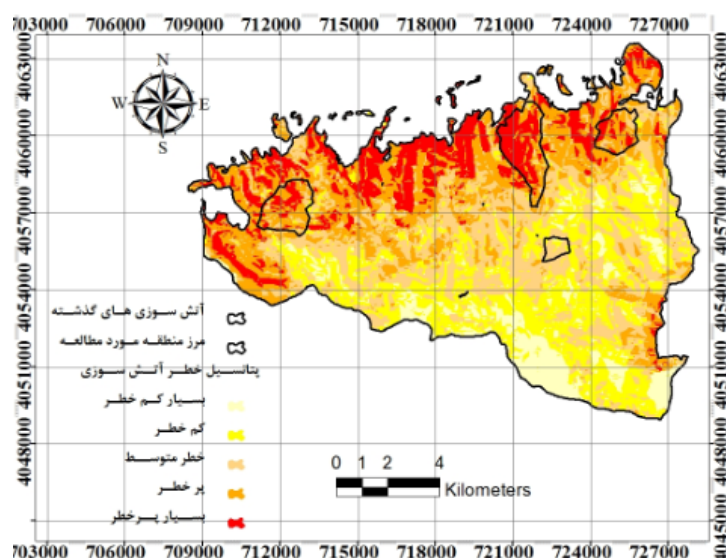
نقشه آتش سوزی های گذشته در جنگل های بخش سه نکا- ظالم رود  
نقشه آتش سوزی های گذشته در جنگل های بخش سه نکا- ظالم رود در شکل ۳ ارائه شده است.

مدل و نقشه خطر وقوع آتش سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و اعتبارسنجی  
مدل خطر وقوع آتش سوزی جنگل بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی عبارت است از:

$$\text{Fire risk index} = 0.208 (\text{Topographic index}) + 0.2595 (\text{Biologic index}) + 0.2315 (\text{Climatic index}) + 0.301 (\text{Human index})$$

بدین ترتیب برای هر یک از معیارهای اصلی در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (معیارهای توپوگرافی، زیست شناختی، اقلیمی و انسانی) یک نقشه فازی به دست آمد. این نقشه های فازی معیارهای اصلی، از ترکیب وزنی (Weighted Overlay) نقشه های زیرمعیارهای هر معیار و با در نظر گرفتن وزنی که برای هر زیرمعیار از روش

تحلیل سلسله مراتبی فازی حاصل شده بود، در محیط GIS به دست آمدند. در نهایت نقشه نهایی پتانسیل خطر وقوع آتش سوزی در جنگل های بخش سه نکا- ظالم رود نیز از طریق تلفیق وزنی نقشه های معیارهای اصلی بر اساس وزن های به دست آمده آنها از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و مدل خطر آتش سوزی حاصل شد (شکل ۴). نتایج روی هم گذاری نقشه خطر وقوع آتش سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و نقشه آتش سوزی های گذشته به منظور اعتبارسنجی مدل ساخته شده برای تهیه نقشه خطر آتش سوزی جنگل در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش سوزی و مدل ساخته شده برای تهیه آن با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده، از مجموع مساحت ۱۰۳۹/۵۰ هکتاری کل آتش سوزی های واقعی گذشته، ۸۳۳/۸۵ هکتار از سطح آنها در طبقات پرخطر و بسیار پرخطر نقشه پتانسیل خطر آتش سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی قرار گرفته اند (جدول ۲).



شکل ۴- نقشه خطر آتش‌سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و اعتبارسنجی آن

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه خطر آتش‌سوزی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

( )	( )
/	/
/	/
/	/
/	/
/	/

در نهایت نقشه نهایی پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود از طریق تلفیق نقشه‌های معیارهای مؤثر در خطر آتش‌سوزی جنگل بر اساس میزان تطابق آنها و مدل خطر وقوع آتش‌سوزی با روش همپوشانی حاصل شد (شکل ۵). نتایج روی هم‌گذاری نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل با روش همپوشانی و نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته به منظور اعتبارسنجی مدل ساخته شده برای تهیه نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی و مدل ساخته شده برای تهیه آن با روش همپوشانی در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده، از مجموع مساحت

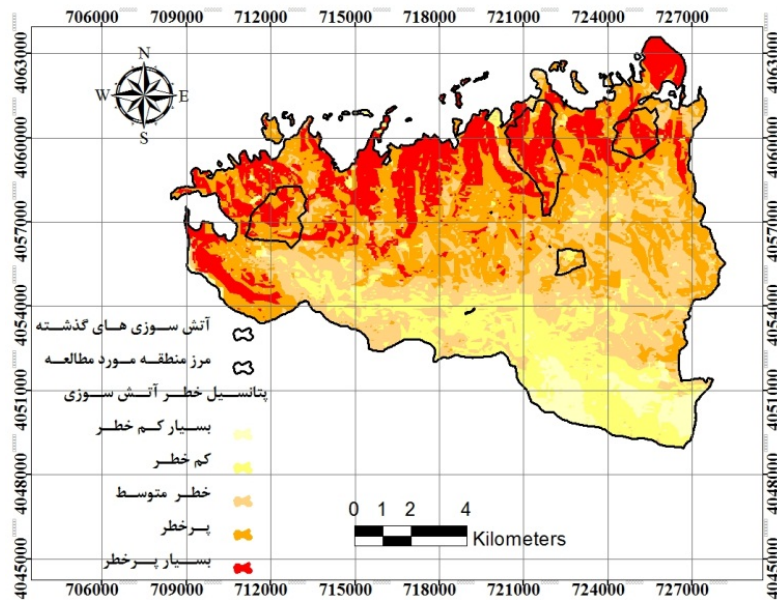
مدل و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی با روش همپوشانی و اعتبارسنجی

بر اساس تطابق (همپوشانی) هر یک از معیارها با وقوع آتش‌سوزی‌های گذشته، مدل خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل به صورت زیر ارائه شد:

$$\text{Fire risk index} = 0.9 (\text{distance from river} + \text{relative humidity}) + 0.7 (\text{distance of road} + \text{Vegetation type} + \text{Vegetation density}) + 0.6 (\text{leaf litter depth} + \text{temperature} + \text{distance from farmland}) + 0.5 (\text{elevation} + \text{aspect} + \text{soil texture}) + 0.3 (\text{slope} + \text{precipitation} + \text{wind velocity}) + 0.2 (\text{distance from settlement})$$

۱۰۳۹/۵۰ هکتاری کل آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته،  
 ۹۵۶/۸۱ هکتار از سطح آنها در طبقات پرخطر و بسیار

پرخطر نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی بر اساس روش  
 همپوشانی قرار گرفته‌اند (جدول ۳).



شکل ۵- نقشه خطر آتش‌سوزی با روش همپوشانی و اعتبارسنجی آن

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه خطر آتش‌سوزی با روش همپوشانی

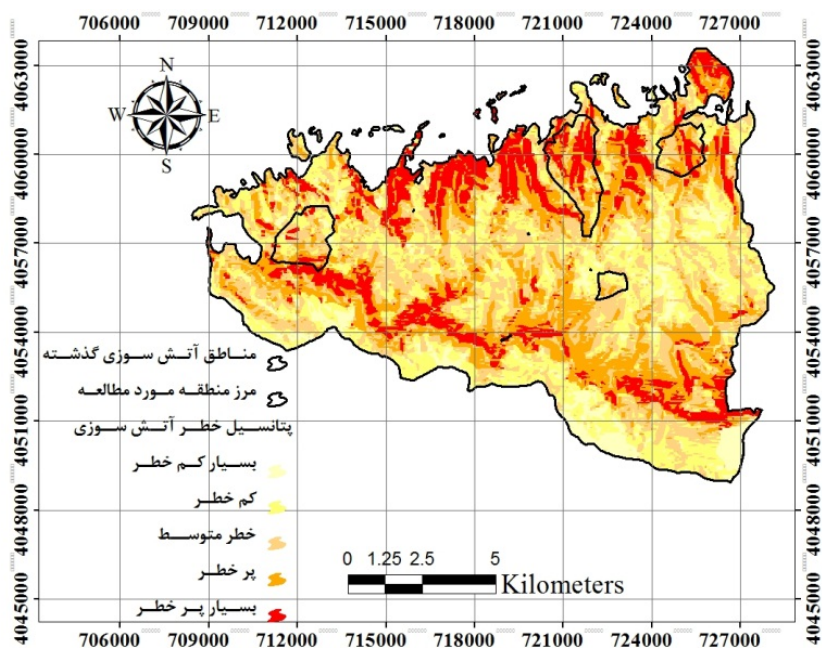
( )		( )	
/	/	/	/
/	/	/	/
/	/	/	/
/	/	/	/
/	/	/	/

نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی و مدل دانگ در جدول ۴ ارائه شده است. براساس نتایج بدست آمده، از مجموع مساحت ۱۰۳۹/۵۰ هکتاری کل آتش‌سوزی‌های واقعی گذشته، ۵۲۸/۰۰۱۲ هکتار از سطح آنها در طبقات پرخطر و بسیار پرخطر نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی بر اساس مدل دانگ قرار گرفته‌اند (جدول ۴). ارزیابی دقت سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی

جدول ۵ مقایسه دقت سه روش مورد استفاده در این تحقیق برای تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی را نشان می‌دهد.

مدل و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی با روش دانگ و اعتبارسنجی

مدل خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بر اساس روش دانگ پیش‌تر در بخش مواد و روش‌ها ارائه شد. نقشه نهایی پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود از طریق تلفیق نقشه‌های معیارهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بر اساس وزن آنها در مدل دانگ حاصل شد (شکل ۶). نتایج روی هم‌گذاری نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل با روش دانگ و نقشه آتش‌سوزی‌های گذشته به منظور اعتبارسنجی مدل دانگ برای تهیه نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل در شکل ۶ ارائه شده است. همچنین



شکل ۶- نقشه خطر آتش سوزی با روش دانگ و اعتبارسنجی آن

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی کمی نقشه خطر آتش سوزی با روش دانگ

( )	( )
( )	( )
/	/
/	/
/	/
/	/
/	/

جدول ۵- ارزیابی دقت سه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش همپوشانی و مدل دانگ برای تهیه نقشه خطر آتش سوزی

( )	( )
/	/
/	/
/	/

**بحث**

حد زیادی همخوانی دارند و تقریباً ۸۰ درصد از مساحت مناطق سوخته در محدوده‌های بسیار پرخطر و پرخطر برای آتش سوزی قرار گرفته‌اند. همچنین ۱۷ درصد از مناطق سوخته در محدوده خطر متوسط برای آتش سوزی قرار گرفته‌اند و مساحت محدوده‌های کم خطر و بسیار کم خطر در مناطق

نتایج روی هم گذاری نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش سوزی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی با آتش سوزی‌های گذشته نشان داد مناطقی که قبلاً در منطقه دچار آتش سوزی شده‌اند، با مناطق بسیار پرخطر و پرخطر از نظر آتش سوزی تا

خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس روش همپوشانی با آتش‌سوزی‌های گذشته نشان داد، مناطقی که قبلاً در منطقه دچار آتش‌سوزی شده‌اند با مناطق بسیار پرخطر و پرخطر از نظر آتش‌سوزی تا حد بسیار زیادی همخوانی دارند و تقریباً ۹۲ درصد از مساحت مناطق سوخته در محدوده‌های بسیار پرخطر و پرخطر از نظر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند. همچنین ۶ درصد از مناطق سوخته در محدوده خطر متوسط برای آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند و مساحت محدوده‌های کم‌خطر و بسیار کم‌خطر در مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته بسیار محدودتر است (۲ درصد). نتیجه این تحقیق، نشان‌دهنده اعتبار بالای روش همپوشانی در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و صحت بالای نقشه پتانسیل آتش‌سوزی تهیه شده بر اساس آن است. نتایج این تحقیق، همچنین با نتایج تحقیقات سایر محققان که نشان دادند مناطق آتش‌سوزی شده با مناطق پرخطر آتش‌سوزی هم‌پوشانی دارند، هم‌خوانی لازم را دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ سلامتی و همکاران، ۱۳۹۰؛ اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲؛ Congalton و Chuvieco، ۱۹۸۹؛ Jaiswal و همکاران، ۲۰۰۲؛ Dong و همکاران، ۲۰۰۵؛ Erten و همکاران، ۲۰۰۵؛ Bin Awang و Pradhan، ۲۰۰۶؛ Lozano و همکاران، ۲۰۰۸؛ Sowmya و Somashekar، ۲۰۱۰؛ Paz و Perera، ۲۰۱۱؛ Maeda و همکاران، ۲۰۱۱؛ اما در این تحقیق، استفاده از روش همپوشانی داده‌های محیطی با آتش‌سوزی‌های گذشته در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل، که روش متفاوتی از روش‌های قبلی بود، باعث دستیابی به نتایج مطلوب‌تر و دقت بالاتری در تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی شد. چنانچه براساس مطالعات گذشته، مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس ارتباط واقعی داده‌های محیطی با داده‌های واقعی آتش‌سوزی‌های گذشته مطلوب‌تر و رضایت‌بخش‌تر خواهد بود (Lozano et al., 2008). زیرا مدل‌سازی براساس واقعیت زمینی متغیرهای محیطی و چگونگی ارتباط آنها با آتش‌سوزی‌های واقعی، نتایج واقعی‌تری را ارائه خواهد داد.

در ادامه این تحقیق، نتایج روی هم‌گذاری نقشه پتانسیل خطر

آتش‌سوزی‌های گذشته بسیار محدودتر است (۳ درصد). نتیجه این تحقیق، نشان‌دهنده اعتبار بالای روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و صحت بالای نقشه پتانسیل آتش‌سوزی تهیه شده بر اساس آن است. قابلیت روش آنالیز چندمعیاره در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی، قبلاً نیز توسط محققان دیگری اثبات شده است (Vadrevu et al., 2009). نتایج این تحقیق، همچنین با نتایج تحقیقات سایر محققان که نشان دادند مناطق آتش‌سوزی شده با مناطق پرخطر از نظر آتش‌سوزی هم‌پوشانی دارند، هم‌خوانی لازم را دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ سلامتی و همکاران، ۱۳۹۰؛ اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲؛ Congalton و Chuvieco، ۱۹۸۹؛ Jaiswal و همکاران، ۲۰۰۲؛ Dong و همکاران، ۲۰۰۵؛ Erten و همکاران، ۲۰۰۵؛ Bin Awang و Pradhan، ۲۰۰۶؛ Lozano و همکاران، ۲۰۰۸؛ Sowmya و Somashekar، ۲۰۱۰؛ Paz و Perera، ۲۰۱۱؛ Maeda و همکاران، ۲۰۱۱؛ اما در این تحقیق، استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در وزن‌دهی به معیارهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل، که روشی متفاوت از روش‌های قبلی بود، باعث دستیابی به نتایج مطلوب‌تر و دقت بالاتری در تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی شد. زیرا در روش مذکور، برای رفع مشکلات مربوط به روش تحلیل سلسله مراتبی، مجموعه‌های فازی نیز برای بیان عدم قطعیت و دستیابی به نتایج دقیق‌تر وارد روند محاسبات و مدل‌سازی می‌شوند. ترکیب روش تحلیل سلسله مراتبی فازی با بکارگیری GIS در یک سیستم چندمعیاره (شامل معیارها و زیرمعیارهای توپوگرافی، زیست‌شناختی، اقلیمی و انسانی) روش متفاوتی از مطالعات قبلی است که برای پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌های شمال ایران، روش مناسبی می‌باشد؛ زیرا بسیاری از متغیرهای مؤثر در خطر وقوع آتش‌سوزی جنگل بطور ذاتی دارای مشخصات فازی هستند (Vadrevu et al., 2009). این عوامل باعث شد که روش مذکور در این تحقیق دقت قابل قبولی را ارائه دهد.

در ادامه این تحقیق، نتایج روی هم‌گذاری نقشه پتانسیل

همراه داشته باشد (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۲). همانطور که نتایج حاصل از مدل‌سازی خطر با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و همپوشانی نیز اهمیت عوامل انسانی را در وقوع آتش‌سوزی جنگل اثبات کرده‌اند. این در حالیست که اهمیت عوامل انسانی در مدل دانگ تنها با ضریب ۳ و کمتر از عوامل زیست‌شناختی و توپوگرافی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب نتیجه حاصل از این تحقیق می‌تواند اعتبار متوسط مدل Dong و همکاران (۲۰۰۵) را برای تهیه نقشه پتانسیل آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران و منطقه مورد مطالعه این تحقیق نشان دهد که البته بومی‌سازی این مدل با توجه به شرایط جنگل‌های ایران ضروری به نظر می‌رسد. از این رو برای استفاده از مدل دانگ برای تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌شود که این مدل ابتدا با توجه به شرایط جنگل‌های شمال ایران و در نظر گرفتن کلیه عوامل محیطی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی این جنگل‌ها (به‌عنوان مثال عمق و رطوبت لاشبرگ، متغیرهای اقلیمی و غیره) اصلاح و بومی گردد و بعد به‌کار گرفته شود تا صحت آن با داده‌های واقعی در هر منطقه بیشتر شود.

نتایج حاصل از مقایسه دقت سه روش تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی در این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های همپوشانی (با دقت ۰/۹۲) و تحلیل سلسله مراتبی فازی (با دقت ۰/۸) در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی و تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع آتش‌سوزی نسبت به روش دانگ (با دقت ۰/۵۱) دقیق‌تر می‌باشند (جدول ۵). علت آن است که در هر منطقه تحقیقی، مدل‌سازی براساس واقعیت و شرایط منطقه نتایج مطلوب‌تری را خواهد داشت، از این رو مدل‌های بومی که براساس شرایط واقعی منطقه طراحی شده‌اند، نسبت به مدل‌های غیربومی، نتایج واقعی‌تری را به دنبال خواهند داشت. بنابراین روش همپوشانی به‌عنوان روش متفاوتی از مطالعات قبلی و با دقت قابل توجه در مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی، روش بسیار مطلوبی برای پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌های شمال ایران است. به علاوه اینکه استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی که روش متفاوتی از مطالعات قبلی است، برای مدل‌سازی خطر

وقوع آتش‌سوزی بر اساس مدل Dong و همکاران (۲۰۰۵) با نقشه مناطق آتش‌سوزی گذشته نشان می‌دهد مناطقی که قبلاً در منطقه دچار آتش‌سوزی شده‌اند، همپوشانی متوسطی با مناطق بسیار پرخطر و پرخطر از نظر آتش‌سوزی دارند و تقریباً نیمی از مساحت مناطق سوخته (۵۱٪) در محدوده‌های بسیار پرخطر و پرخطر قرار گرفته‌اند. همچنین ۳۰٪ از مناطق سوخته در محدوده با خطر متوسط برای آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند و مساحت محدوده‌های کم‌خطر و بسیار کم‌خطر در مناطق آتش‌سوزی‌های گذشته محدودتر است (۱۹٪). این در حالیست که نتایج مطالعه مشابه انجام شده با مدل مذکور در جنگل‌های چین نشان داده که بخش اعظم (۸۰٪) مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی در مکان‌هایی واقع شده‌اند که قبلاً در آنها آتش‌سوزی اتفاق افتاده است (Dong et al., 2005). این مسئله می‌تواند بیانگر این باشد که مدل Dong و همکاران (۲۰۰۵) برای پهنه‌بندی پتانسیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های چین کارایی بیشتری نسبت به جنگل‌های شمال ایران دارد و به عبارت دیگر مدل مذکور برای جنگل‌های چین با توجه به شرایط خاص آنها بومی‌سازی شده است. از این رو این مدل تنها برای مناطقی با شرایط مشابه به محلی که مدل‌سازی بر اساس شرایط آنجا انجام شده است، کارایی بالایی دارد. به علاوه همانطور که قبلاً ذکر شد، یکی از معایب دیگر این مدل در نظر نگرفتن تمام متغیرهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌هاست. اگرچه در این مدل مهمترین عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی جنگل در نظر گرفته شده‌اند، اما بسیاری از عواملی که ممکن است در مناطق دیگر نقش مهمی در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها داشته باشند، در این مدل لحاظ نشده‌اند. به‌عنوان مثال یکی از علل مهم وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران، تجمع لاشبرگ خشک می‌باشد (اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ۱۳۹۰)، درحالی‌که این عامل در مدل دانگ اصلاً در نظر گرفته نشده است. به علاوه با توجه به اینکه ۹۰ درصد آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های شمال ایران ناشی از عوامل انسانی است (اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ۱۳۹۰)، اهمیت این عامل برای مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در ایران باید خیلی بیشتر باشد تا نتایج درستی به

حاکم بر جنگل‌های منطقه مورد مطالعه مطلوب‌تر بوده و استفاده از مدل‌های بومی برای نقشه‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی در این تحقیق نتایج مطلوب‌تری را نسبت به مدل‌های غیربومی به همراه داشته است، بنابراین استفاده از آنها در تحقیقات مشابه آینده برای جنگل‌های شمال کشور پیشنهاد می‌شود. در حالی که مدل‌های غیربومی مانند مدل دانگ، قبل از استفاده در این مناطق برای دستیابی به نتایج مطلوب‌تر باید اصلاح و بومی شوند.

### منابع مورد استفاده

- اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ۱۳۹۰. آمار و اطلاعات آتش‌سوزی در استان مازندران. انتشارات یگان حفاظت اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، ساری، ۱۲۰ صفحه.
- اسکندری، س.، اولادی قادیکلایی، ج.، جلیلود، ح.، ۱۳۹۲. ارزیابی کارایی مدل Dong برای تعیین قابلیت خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زرین‌آباد نکا، استان مازندران. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. ۲۱ (۳): ۴۳۹-۴۵۱.
- اکبری، د.، ۱۳۸۹. هشدار آتش‌سوزی در مناطق جنگلی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی ژئوماتیک نوین در خدمت جامعه، تهران، اسفند ۱۳۸۹: ۵.
- پناهی، پ.، ۱۳۸۶. کاربرد سنجش از دور در مدیریت آتش‌سوزی جنگل. سمینار دوره دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه مازندران، ساری، ۲۰ صفحه.
- سلامتی، ح.، مصطفی‌لو، ح.، مستوری، ع.، هنردوست، ف.، ۱۳۹۰. ارزیابی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS در جنگل‌های استان گلستان. مجموعه مقالات نخستین همایش بین‌المللی آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی، گرگان، آبان، ۱۰.
- شرکت سهامی نکاچوب، ۱۳۸۹. طرح جنگلداری جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود. انتشارات سازمان جنگل‌ها مراتع و آبخیزداری کشور، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران، ساری، ۱۰۹ صفحه.
- کاظمی، س. م.، ۱۳۸۴. آتش و اکوسیستم‌های جنگلی. ماهنامه دام و کشت و صنعت. ۷۰: ۴۶-۵۶.
- محمدی، ف.، شعبانیان، ن.، پوره‌اشمی، م.، فاتحی، پ.، ۱۳۸۹. تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از AHP و GIS. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. ۱۸ (۴): ۵۶۹-۵۸۶.

وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران، مناسب به نظر می‌رسد؛ با وجود آنکه دقت دو روش در خصوص مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی زیاد است، اما دقت روش همپوشانی به مراتب بیشتر از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی بر اساس همپوشانی داده‌های محیطی با داده‌های واقعی آتش‌سوزی‌های گذشته مطلوب‌تر و رضایت‌بخش‌تر خواهد بود. چنان‌که نتایج مطالعه Lozano و همکاران (۲۰۰۸) نیز بر اساس مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی بر پایه ارتباط بین احتمال وقوع آتش‌سوزی و فاکتورهای مختلف زیست‌محیطی نشان داد که مدل‌های مکانی آتش‌سوزی با منطقه‌های آتش‌سوزی گذشته ارتباط زیادی داشته و اعتبار بالایی دارند که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

با توجه به اینکه بر اساس هر سه مدل آزمایش‌شده در این تحقیق، بیشتر جنگل‌های منطقه مورد مطالعه پتانسیل خطر زیاد و بسیار زیاد برای آتش‌سوزی دارد، بنابراین جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود در معرض آتش‌سوزی‌های آینده خواهند بود؛ از این رو اقدامات پیشگیری‌کننده از وقوع آتش‌سوزی‌های آینده در این جنگل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به علاوه با توجه به اینکه مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی و همپوشانی برای وقوع آتش‌سوزی جنگل در این تحقیق دقت و اعتبار بالایی را نشان داده‌اند، بنابراین پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده در جنگل‌های بخش سه نکا- ظالم‌رود با استفاده از نقشه‌های پتانسیل تهیه‌شده حاصل از این مدل‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. بدین ترتیب، همان‌طور که در گذشته ۸۰٪ و ۹۲٪ آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی (در نقشه‌های پتانسیل تهیه‌شده) به وقوع پیوسته‌اند، در آینده نیز به احتمال زیاد، آتش‌سوزی‌ها در مناطق با خطر زیاد اتفاق خواهند افتاد. از این رو اقدامات مدیران جنگل برای پیشگیری و کنترل آتش‌سوزی‌های آینده (مانند ایجاد برج‌های دیده‌بانی و استقرار یگان حفاظت در مناطق پرخطر، احداث آتش‌بر در محل‌های مناسب و وجود بال‌گرد) در مناطق با خطر زیاد آتش‌سوزی باید با حساسیت بیشتری انجام گیرد. در پایان، با توجه به اینکه مدل‌سازی با توجه به شرایط

- Mahdavi, A., Fallah Shamsi, S. R., Nazari, R., 2012. Forests and rangelands' wildfire risk zoning using GIS and AHP techniques. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 10 (1): 43-52 pp.
- Marozas, V., Racinkas, J. Bartkevicius, E., 2007. Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemi boreal *Pinus sylvestris* forests. *Forest Ecology and Management*, 250: 47-55.
- Maselli, F., Romanelli, S., Bottai, L., Zipoli, G., 2003. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environment*, 86: 187-197.
- 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*, 262: 1184-1188.
- Perera, A. H. Cui, W., 2010. Emulating natural disturbances as a forest management goal: Lessons from fire regime simulations. *Forest Ecology and Management*, 259: 1328-1337.
- 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*, 7-12.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill Press, New York.
- Santiago, I. T. F., Kheladze, N., 2011. GIS wildland fire hazard modeling in Georgia. MATRA project report, Caucasus Environmental NGO Network, 98 p.
- 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*, 31(6): 969-974.
- Vadrevu, K. P., Eaturu, A., Badarinath, K. V. S., 2009. Fire risk evaluation using multicriteria analysis, a case study. *Environment Monitoring Assessment*, DOI: 10.1007/s10661-009-0997-3.
- Van Wagner, C. E., 1993. Prediction of crown fire behavior in two stands of Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 18: 818-820.
- 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*, 204:191-201.
- Chuvieco, E., Congalton, R. G., 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of the Environment*, 29: 147-159.
- Dong, X. U., Li-min, D., Guo-fan, Sh., Lei, T., Hui, W., 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research*, 16(3): 169-174.
- Encinas, A. H., 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*, 38: 372-378.
- 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*, 7 p.
- Goncalves, Z. J., Lourenco, L., 1990. Meteorological index of forest fire risk in the Portuguese mainland territory. *Proceedings of the international conference on forest fire research, Coimbra*, 1-14.
- Hernandez-Leal, P. A., Arbelo, M., Gonzalez-Calvo, A., 2006. Fire risk assessment using satellite data. *Advances in Space Research*, 37: 741-746.
- 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*, 4: 1-10.
- 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*, 112: 708-719.
- Maeda, E. E., Arcoverde, G. F. B., Pellikka, P. K. E., Shimabukuro, Y. E., 2011. Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and change vector analysis. *Applied Geography*, 31: 76-84.