

مدل سازی مکانی احتمال وقوع آتش سوزی در جنگل ها و مراتع با استفاده از مدل های نسبت فراوانی و وزن شاهد

مرجان امیدی^۱، داود مافی غلامی^{۲*}، بیت الله محمودی^۳ و ابوالفضل جعفری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲* - نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

پست الکترونیک: d.mafigholami@nres.sku.ac.ir

۳- استادیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۴- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۱۹

چکیده

طی سال های اخیر، تلاش های زیادی برای مدیریت و مهار آتش سوزی در جنگل ها و مراتع شده است. از مهمترین این اقدامات، مدل سازی احتمال وقوع آتش سوزی و تهیه نقشه های پهنه بندی در مناطق حساس به آتش سوزی است. در این تحقیق، قابلیت مدل های نسبت فراوانی و وزن شاهد در پیش بینی احتمال وقوع آتش سوزی در جنگل ها و مراتع استان کهگیلویه و بویراحمد بررسی شده است. فرایند مدل سازی و پیش بینی وقوع آتش سوزی های آینده بر مبنای بررسی ارتباط بین ۲۷۱ مورد آتش سوزی از دوره ۱۳۹۵-۱۳۸۱ و ۱۰ عامل درجه شیب، جهت، ارتفاع، درجه حرارت، سرعت باد، کاربری اراضی، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و فاصله تا رودخانه، جاده و مناطق مسکونی انجام شد. طی فرایند مدل سازی، میزان تأثیر هر طبقه از عوامل بر وقوع آتش سوزی محاسبه شد. نتایج مدل ها مبنای ساخت نقشه های حساسیت به آتش سوزی در سطح استان قرار گرفت. نتایج ارزیابی و مقایسه مدل ها که با استفاده از روش منحنی مشخصه نسبی، میزان موفقیت، نرخ پیش بینی و آزمون مقایسه جفتی ویلکاکسون انجام شد، اختلاف معنی داری را در عملکرد دو مدل نشان داد. به طوری که مدل وزن شاهد با نرخ موفقیت و پیش بینی ۰/۸۶۲ و ۰/۸۲۱ عملکرد بهتری نسبت به مدل نسبت فراوانی در تحلیل داده های آموزشی و پیش بینی آتش سوزی های آینده داشت. براساس نتایج به دست آمده حدود ۳۰ درصد از وسعت جنگل ها و مراتع استان کهگیلویه و بویراحمد در طبقات حساسیت زیاد تا بسیار زیاد به آتش سوزی قرار می گیرد که نیازمند اقدامات پیشگیرانه و مدیریت صحیح برای کاهش مخاطرات ناشی از آتش است.

واژه های کلیدی: مخاطرات طبیعی، مدل سازی، آتش سوزی، پهنه بندی حساسیت.

مقدمه

عوامل متعددی در تخریب جنگل ها و مراتع مؤثر هستند که آتش سوزی یکی از مهمترین این عوامل است (FAO, 2007; Fischer et al., 2016). وقوع سالیانه بیش از ۲۰۰ هزار آتش سوزی در دنیا و ناپودی ۳/۵ تا ۴/۵ میلیون کیلومتر مربع اراضی جنگلی تخمین زده شده است (Meng

et al., 2015). در ایران نیز کاهش سالیانه ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هکتار از وسعت جنگل ها در اثر آتش سوزی برآورد شده است (Adab et al., 2013; Jahdi et al., 2015; Jaafari & Mafi Gholami, 2017). این آتش سوزی ها اغلب در دوره های خشکی با وزش بادهای گرم ایجاد می شوند و گسترش می یابند (Jaafari & Mafi Gholami, 2017).

شروعی برای ارزیابی سریع و مقرون‌به‌صرفه احتمال وقوع آتش‌سوزی در مناطق حساس بود (Jaafari & Mafi, 2017; Gholami, 2017). در اغلب تحقیقات اولیه، مدل‌های رگرسیونی روش غالب برای مطالعه بودند (Hong et al., 2019). این مدل‌ها با وجود سهولت استفاده، به دلیل فرض یک رابطه خطی بین یک آتش‌سوزی و مشخصه‌های مختلف، دقت مناسبی در پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده از خود نشان نمی‌دادند. در مطالعات مقایسه‌ای متعددی که توسط محققان مختلف انجام شده است، ضعف مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی احتمال بروز آتش‌سوزی به اثبات رسیده است (Oliveira et al., 2012; Guo et al., 2016; Hong et al., 2019). از دیگر روش‌هایی که برای مدل‌سازی احتمال وقوع آتش‌سوزی استفاده شده است می‌توان به وزن شاهد (Hong et al., 2017; Jaafari et al., 2017)، تابع باور شهودی (EBF) (Nami et al., 2018)، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Eskandari & Miesel, 2017; Güngöroğlu, 2017)، تحلیل سلسله‌مراتبی (Beygi, 2014; Heidarlou et al., 2014)، مدل دانگ (Eskandari & Miesel, 2017; Rasooli & Bonyad, 2019)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Sarvaley et al., 2014; Satir et al., 2016)، نسبت فراوانی (Pourtaghi et al., 2015; Jaafari, 2017) و شاخص انتروپی شانون (Mafi & Gholami, 2017) اشاره کرد. (Pourtaghi et al., 2015; Jaafari & Mafi Gholami, 2017)

با وجود تفاوت در فرایند اجرای روش‌های مختلف مدل‌سازی، اطلاعات آتش‌سوزی گذشته و مجموعه‌ای از مشخصه‌های جغرافیایی، محیطی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه مهمترین اطلاعات مورد نیاز برای اجرای این روش‌ها هستند (Chen et al., 2015; Pourtaghi et al., 2016; Jaafari et al., 2018, 2019). مدل‌های پیش‌بینی آتش با بررسی روابط بین این دو مجموعه از اطلاعات ورودی، اقدام به پیش‌بینی امکان وقوع آتش‌سوزی در بخش‌های مختلف از یک منطقه می‌کنند که در نهایت آن منطقه از نظر میزان حساسیت به آتش‌سوزی به طبقات مختلف مرزبندی

این حال نقش انسان که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث آتش‌سوزی می‌شود شایان توجه است (Adab et al., 2013; Jaafari et al., 2018). فعالیت‌های انسانی که باعث رشد گسترده شهرها، تبدیل جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی شده است، تغییرات شدید اقلیمی را به دنبال داشته‌اند که این تغییرات نیز موجب افزایش بیش‌ازپیش تعداد و شدت آتش‌سوزی‌ها شده است (Bedia et al., 2015; Meng et al., 2015). خسارت‌های شدید آتش‌سوزی بر انواع اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری، همچنین بر شرایط اجتماعی-اقتصادی زندگی انسان (Fischer et al., 2016)، مدیران و محققان را بر آن داشته است که تلاش زیادی برای پیش‌بینی و تخمین احتمال بروز آتش‌سوزی داشته باشند.

دهه ۱۹۸۰ میلادی شروع اولین تحقیقات در مورد مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی بود (Nami et al., 2018). در سال ۱۹۸۵ یک مدل احتمالی بر مبنای معادلات مشتق جزئی برای پیش‌بینی گسترش جبهه آتش در مواجهه با مشخصه‌های پویای محیطی ارائه شد (Ivanilova, 1985). مدل ارائه شده به دلیل پیچیدگی محاسباتی چندان مورد توجه محققان قرار نگرفت. در سال ۱۹۸۹ اولین مطالعه برای پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های مدیترانه‌ای اسپانیا انجام شد (Chuvieco & Congalton, 1989). در این تحقیق با استفاده از یک مدل رگرسیونی ارتباط بین آتش‌سوزی‌های گذشته و مشخصه‌های توپوگرافیک و اکولوژیک بررسی شد. رابطه به دست آمده که نشان‌دهنده اثرگذاری بیشتر پوشش گیاهی و شیب نسبت به سایر عوامل بود، مبنای ساخت نقشه پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی قرار گرفت. در مطالعه دیگری که توسط Chuvieco و Salas (۱۹۹۶) انجام شد، محققان با در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تری از مشخصه‌های توپوگرافی، اقلیمی و محیطی نسبت به مطالعه Chuvieco و Congalton (۱۹۸۹)، شاخص‌هایی (Human Risk, FuelHazard Component, Fire Danger Index و Index) برای بررسی رابطه بین این عوامل و آتش‌سوزی‌های گذشته معرفی کردند. این مطالعه

می‌شود (Jaafari et al., 2019).

ترکیبی بر پایه سیستم نرو-فازی و الگوریتم‌های فراابتکاری معرفی شدند. با استفاده از این مدل‌ها، پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی با دقت بسیار زیادی نسبت به مدل‌های دیگر امکان‌پذیر شد.

نگرانی‌های روزافزونی از افزایش تعداد و شدت آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع زاگرس وجود دارد. با وجود محدودیت در تجهیزات و امکانات برای اقدامات پیشگیرانه، به‌دست آوردن اطلاعات دقیق از حساسیت بخش‌های مختلف زاگرس به وقوع آتش‌سوزی بسیار ضروریست. به‌ویژه باید مشخص شود که در چه محدوده‌ای از عوامل مختلف، بیشترین احتمال وقوع آتش‌سوزی وجود دارد. در پژوهش پیش‌رو قابلیت مدل‌های نسبت فراوانی و وزن شاهد در پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان کهگیلویه و بویراحمد بررسی شده است. نتایج مدل‌ها مبنای ساخت نقشه‌های حساسیت به آتش‌سوزی در سطح استان قرار گرفت. نتایج ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، با استفاده از روش منحنی مشخصه نسبی (ROC)، سطح زیر منحنی (AUC) و آزمون ویلکاکسون انجام شد.

مواد و روش‌ها

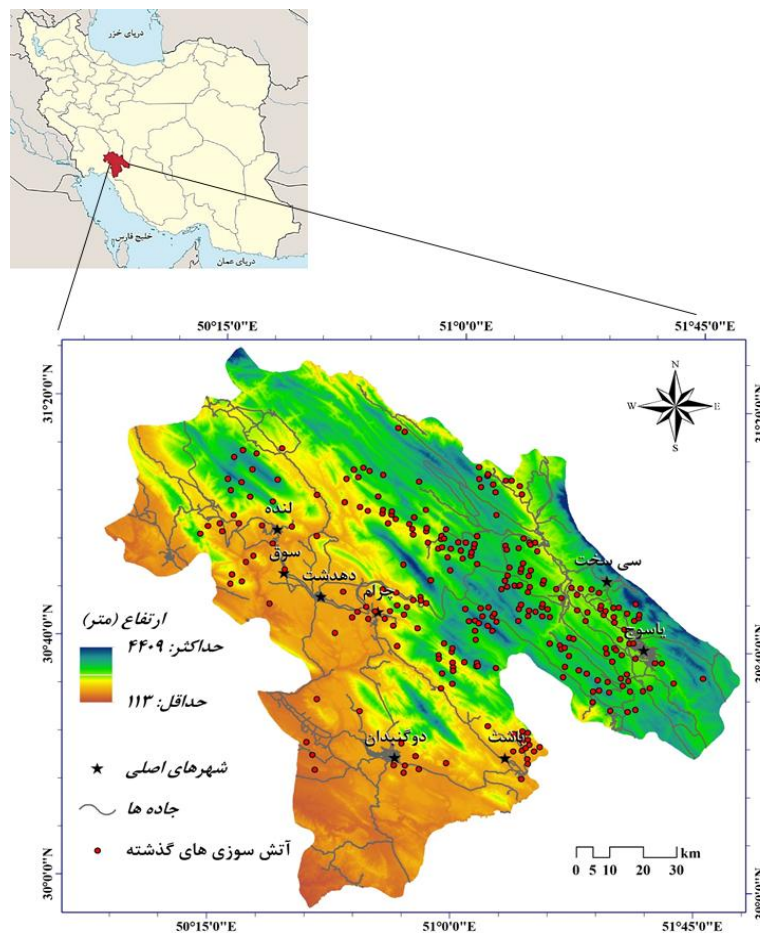
منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در سطح کل استان کهگیلویه و بویراحمد انجام شد (شکل ۱). این استان با وسعت تقریبی ۱۵۵۰۴ کیلومترمربع دارای هفت شهرستان است و در همسایگی استان‌های چهارمحال و بختیاری، اصفهان، فارس، بوشهر و خوزستان قرار گرفته است. وضعیت توپوگرافیکی این استان با حداقل و حداکثر ارتفاع ۱۱۳ و ۴۴۰۹ متر (متوسط ارتفاع: ۱۵۵۷ متر) از سطح دریا و تغییرات شیب صفر تا بیش از ۸۰ درجه (متوسط شیب: ۱۷ درجه) بسیار متنوع است. حدود ۴۵ درصد مساحت استان از ارتفاعات و تپه ماهورها تشکیل شده است و ۱۵ درصد مساحت آن را دشت‌ها و دره‌ها دربرگرفته‌اند. تغییرات شدید توپوگرافی

در سال‌های اخیر تکامل و گسترش روش‌های داده‌کاوی و معرفی مدل‌های جدید موجب افزایش دقت و سهولت فرایند مدل‌سازی حساسیت به آتش‌سوزی شده است (Jaafari et al., 2018, 2019). در تحقیقی که در جنگل‌های اتریش توسط Arpaci و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد امکان تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به آتش‌سوزی با استفاده از دو مدل انتروپی بیشینه و جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. مدل جنگل تصادفی کارایی نسبتاً بهتری نسبت به مدل انتروپی بیشینه نشان داد. در این تحقیق عامل تراکم جمعیت به‌عنوان مهمترین عامل بروز یا عدم بروز آتش شناخته شد. در تحقیقی که توسط Silva و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد امکان مدل‌سازی پیش‌بینی آتش‌سوزی با استفاده از یک مدل رگرسیونی بتا، مبتنی بر تئوری بیزین مورد بررسی قرار گرفت. آنان با در نظر گرفتن هفت عامل شیب، جهت، ارتفاع، جمعیت، درجه حرارت، بارندگی و فاصله از جاده و همچنین ترکیبی دو به دو از این عوامل، یک نقشه احتمال وقوع آتش‌سوزی را برای کشور پرتغال تهیه کردند. Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و شاخص انتروپی شانون اقدام به پهنه‌بندی قابلیت خطر آتش‌سوزی برای جنگل‌ها و مراتع شهرستان مینودشت در گلستان کردند. نتایج ارزیابی مدل‌سازی نشان داد که شاخص انتروپی شانون دقت بالاتری نسبت به مدل نسبت فراوانی دارد. در تحقیقی که توسط Goleiji و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد، نقشه احتمال وقوع آتش‌سوزی برای جنگل‌های منطقه دوهزار و سه‌هزار شهرستان تنکابن با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و ترکیب خطی وزن‌دار تهیه شد. در تحقیقی که در استان چهارمحال و بختیاری توسط Jaafari و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، قابلیت پنج مدل مبتنی بر درخت تصمیم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی بیانگر دقت بالای مدل‌ها در پیش‌بینی آتش‌سوزی‌های آینده بود. در تحقیق دیگری که توسط Jaafari و همکاران (۲۰۱۹) در محدوده شهرستان مینودشت استان گلستان انجام شد، چهار مدل

کهگیلویه و بویراحمد دارای حدود ۱/۴ میلیون هکتار جنگل و مرتع طبیعی و بیش از دو هزار هکتار جنگل دست‌کاشت است. گسترده‌ترین جامعه جنگلی که بخش عمده‌ای از سطح استان را دربر می‌گیرد، جامعه بلوط است (حدود ۸۰ درصد) که در مناطق سردسیر و معتدل استان قرار دارد. در سطح استان نیز سایر گونه‌های جنگلی همانند بنه (۱۵ درصد وسعت جنگل‌های استان)، کلخونگ، افرا، زبان‌گنجشک، مهلب، ارس، مورد، کنار، کهور، انارشیطان، بادامک، انجیر وحشی و بید پراکنده است که از ارتفاعات ۲۷۰۰ متری از سطح دریا تا پست‌ترین مناطق استان (۱۸۰ متری از سطح دریا در گجساران) قرار دارند (Anonymous, 2014).

باعث ایجاد دو اقلیم متفاوت گرمسیری (قسمت جنوب و غرب استان) و سردسیری (شمال و شرق استان) در این استان شده است. منطقه گرمسیری دارای آب‌وهوای گرم و خشک است و بادهای موسمی (فصلی) و محلی متعددی در این ناحیه می‌وزند. باران این منطقه از آبان‌ماه آغاز شده و تا اردیبهشت به تناوب ادامه می‌یابد. در این مناطق یخبندان به ندرت اتفاق می‌افتد. در منطقه سردسیری بارش معمولاً از آبان‌ماه شروع و تا اردیبهشت‌ماه ادامه دارد که اغلب بارش‌ها به صورت برف است. این قسمت از استان که در واقع جنوبی‌ترین بخش زاگرس مرطوب است با جنگل‌های وسیع بلوط پوشیده شده و سرچشمه رودهای بزرگی است. در مجموع، این استان دارای متوسط بارندگی و درجه حرارت سالیانه ۴۹۵ میلی‌متر و ۲۰/۶ درجه سانتی‌گراد است. استان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (استان کهگیلویه و بویراحمد) و آتش‌سوزی‌های دوره ۱۳۸۱-۱۳۹۵

روش پژوهش

نقشه برداری و هواشناسی کشور و اداره کل منابع طبیعی استان در محیط نرم افزار ArcGIS و ENVI و با استفاده از ابزارهای آنالیز مکانی و روش های درون یابی پردازش شدند. همچنین برای محاسبه لایه NDVI از تصاویر سال ۲۰۱۱ ماهواره Landsat-7 ETM+ و رابطه (۱) استفاده شد.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

در این رابطه، R و IR به ترتیب مقادیر انعکاس طیفی در مناطق مرئی (قرمز) و مادون قرمز است. لازم به ذکر است که لایه های کاربری اراضی و NDVI بر مبنای اطلاعات سال ۱۳۹۰ تهیه شدند تا نماینده دوره ۱۴ ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۵) وقوع آتش سوزی ها باشند. نقشه های نهایی همه عوامل به فرمت رستر و با اندازه سلول ۳۰×۳۰ تهیه شد. برای اجرای فرایند مدل سازی لازم بود که نقشه های عامل طبقه بندی شوند. در این تحقیق، طبقه بندی نقشه ها بر پایه تحقیقات گذشته (Pourtaghi et al., 2015; Adab et al., 2015; Hong et al., 2017, 2019; Jaafari et al., 2018, 2019) و نحوه پراکنش (وقوع یا عدم وقوع آتش سوزی در طبقات مختلف) آتش سوزی ها انجام شد. برای عوامل درجه شیب و جهت، طبقه بندی ها دقیقاً مطابق با تحقیقات گذشته انجام شد (Pourtaghi et al., 2015; Adab et al., 2015; Hong et al., 2017, 2019; Jaafari et al., 2018, 2019). طبقه بندی نقشه کاربری اراضی بر اساس طبقه بندی نقشه های پایه سراسری کشور انجام گردید. برخی دیگر از عوامل مانند ارتفاع، NDVI، عوامل فاصله ای، سرعت باد، درجه حرارت و بارندگی با توجه به حداقل و حداکثر مقادیر و در نظر گرفتن پراکنش آتش سوزی ها در سطح استان طبقه بندی شدند (Jaafari et al., 2017, 2019; Mafi Gholami, 2017) (شکل ۲).

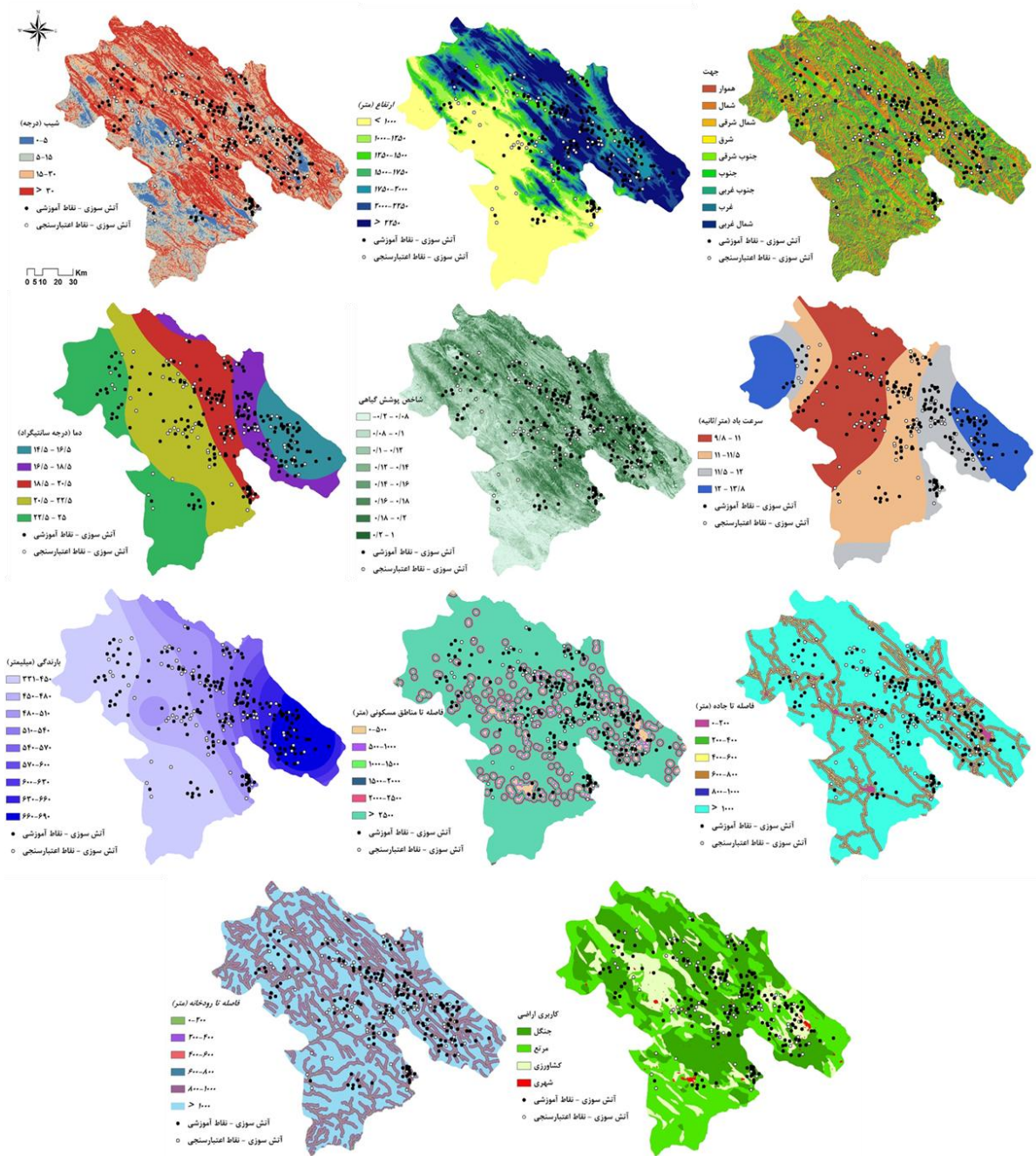
به طور کلی، پژوهش پیش رو در چهار مرحله شامل جمع آوری داده، آزمون هم خطی مشخصه ها، فرایند مدل سازی و اعتبارسنجی و مقایسه مدل ها انجام شد. در ادامه، هریک از مراحل تحقیق تشریح می شوند.

جمع آوری داده

برای انجام این تحقیق، مختصات جغرافیایی و زمان وقوع آتش سوزی های رخ داده از اداره کل منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد گرفته شد. مختصات جغرافیایی آتش سوزی ها از طریق کنترل زمینی، بررسی تصاویر ماهواره MODIS، همچنین تصاویر ماهواره ای موجود در Earth Google مورد ارزیابی قرار گرفت. از مجموع ۶۸۰ لکه آتش سوزی مربوط به دوره زمانی ۱۳۹۵-۱۳۸۱، ۲۷۱ مورد که صحت مختصات جغرافیایی آنها تأیید شد برای فرایند مدل سازی انتخاب شدند (شکل ۱). طی یک فرایند انتخاب تصادفی، ۷۰٪ (۱۹۰ آتش سوزی) برای ساخت و آموزش مدل ها و ۳۰٪ باقی مانده (۸۱ آتش سوزی) برای اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل ها در نظر گرفته شد (Pourtaghi et al., 2016; Jaafari et al., 2017, 2019).

در این پژوهش، مدل سازی خطر آتش سوزی بر مبنای بررسی ارتباط بین آتش سوزی های گذشته و مجموعه ای از مشخصه های توپوگرافی، محیطی و اقلیمی منطقه انجام شد. در این تحقیق، بر مبنای تحقیقات گذشته (Pourtaghi et al., 2015; Adab et al., 2015; Hong et al., 2017; Jaafari et al., 2018, 2019) و اطلاعات موجود در منطقه مورد مطالعه، ۱۱ مشخصه در نظر گرفته شد: درجه شیب، جهت، ارتفاع از سطح دریا، درجه حرارت، بارندگی، سرعت باد، کاربری اراضی، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) و فاصله تا رودخانه، جاده و مناطق مسکونی.

برای تهیه نقشه موضوعی مربوط به هریک از این مشخصه ها، اطلاعات به دست آمده از دو سازمان



شکل ۲- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع آتش سوزی

در تحلیل نتایج می شود (Dormann *et al.*, 2013). اگرچه آزمون هم خطی بیشتر در تحلیل های رگرسیونی انجام می شود، اما استفاده از آن در سایر روش های مدل سازی نیز سودمند خواهد بود (Jaafari *et al.*, 2017, 2018; Nami)

آزمون هم خطی مشخصه ها هم خطی زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند متغیر مستقل نسبت به یکدیگر از همبستگی بالایی برخوردار باشند. وجود هم خطی در یک پدیده اغلب باعث ایجاد خطا

مدل نسبت فراوانی (Frequency Ratio) یک روش داده‌کاوی تک‌متغیره است که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی و پیش‌بینی انواع مخاطرات محیطی داشته است (Jaafari *et al.*, 2014). فرضیه این روش در فرایند مدل‌سازی بر این اساس است که مخاطرات آینده در مکان‌هایی با شرایط مشابه با مخاطرات گذشته رخ خواهند داد (Lee & Pradhan, 2007). برای مدل‌سازی احتمال وقوع آتش‌سوزی، نسبت فراوانی بر مبنای رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(SX_i)}{\sum_{i=1}^m SX_i}}{N_{pix}(X_j)}}{\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)} \quad (2)$$

مدل وزن شاهد

مدل وزن شاهد (Weight-of-Evidence) یک مدل احتمالاتی مبتنی بر تئوری بیزین (Bayesian) است که توسط Bonham-Carter معرفی شد (Bonham-Carter *et al.*, 1989). تئوری بیزین روشی برای دسته‌بندی پدیده‌ها، بر پایه احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پدیده است و در نظریه احتمالات با اهمیت و پرکاربرد است. مدل‌های متعددی بر پایه تئوری بیزین معرفی شده است که مدل وزن شاهد یکی از پرکاربردترین آنها است که در موارد متعددی برای مدل‌سازی پیش‌بینی مخاطرات محیطی استفاده شده است (Jaafari *et al.*, 2015, 2017; Hong *et al.*, 2019). مهمترین ویژگی این مدل توانایی بررسی انواع داده‌های ناهمگن و چندگانه و کشف روابط بین آنهاست (Kayastha *et al.*, 2012; Jaafari *et al.*, 2015, 2017). با کاربرد این مدل برای پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی، به هر طبقه از نقشه‌های عامل براساس میزان ارتباط با آتش‌سوزی‌های گذشته یک وزن مثبت یا منفی اختصاص داده می‌شود (Jaafari *et al.*, 2017).

(et al., 2018). محاسبه دو معیار تورم واریانس (Variance Inflation Factor (VIF) و حد تغییرات (Tolerance) رایج‌ترین روش تشخیص هم‌خطی است (Hair *et al.*, 2006) که در این تحقیق نیز در نظر گرفته شد. اگر $VIF > 5$ ، یا $Tolerance < 0.2$ باشد وجود هم‌خطی محتمل است (Hair *et al.*, 2006). در این تحقیق آزمون هم‌خطی مشخصه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

فرایند مدل‌سازی
مدل نسبت فراوانی

در این رابطه، $N_{pix}(SX_i)$: تعداد پیکسل‌های آتش‌سوزی در طبقه i ام از عامل X ، $N_{pix}(X_j)$: تعداد کل پیکسل‌های عامل X_j ، m : تعداد طبقات در عامل X_i و n : تعداد عوامل مورد بررسی هستند. با اجرای روش نسبت فراوانی، میزان اهمیت (وزن) طبقات هریک از مشخصه‌های مورد بررسی در ارتباط با آتش‌سوزی‌های رخ داده در منطقه محاسبه شد. با داشتن مجموعه‌ای از مشخصه‌های وزن‌دار و ترکیب آنها با استفاده از رابطه (۳)، نقشه نهایی احتمال بروز آتش‌سوزی در استان کهگیلویه و بویراحمد به دست می‌آید (Jaafari & Mafi Gholami, 2017).

$$Y = \sum_{i=1}^n B_{FR} \quad (3)$$

در این رابطه، Y : مجموع لایه‌های وزن‌دار شده عوامل، n : تعداد عوامل و B_{FR} : لایه‌های عامل است که در آن هریک از طبقات با استفاده از روش نسبت فراوانی وزن‌دار شده‌اند.

خطای مدل در تشخیص و طبقه بندی بخش هایی از منطقه اشاره خواهد کرد که به رغم عدم وجود آتش سوزی به عنوان مناطق سوخته شده شناسایی می شوند. در مقابل، خطای نوع دوم به خطای مدل در تشخیص و طبقه بندی بخش هایی از منطقه اشاره خواهد کرد که به رغم وقوع آتش سوزی در آنها، به عنوان مناطق بدون سابقه آتش سوزی شناخته می شوند. دقت هر مدل برابر با سطح زیر منحنی (AUC) است که بیانگر کیفیت عملکرد مدل در برخورد با داده های آموزشی، همچنین قدرت مدل در تخمین درست وقوع آتش سوزی، یا عدم وقوع آن در آینده است. مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر هستند (Swets, 1988) و ایدئال ترین مدل بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. بر اساس تقسیم بندی پیشنهادی Swets (1988) کیفیت عملکرد یک مدل بر حسب مقدار AUC بدین صورت است: ۰/۹-۱، عالی؛ ۰/۸-۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷-۰/۸، خوب؛ ۰/۶-۰/۷، متوسط و ۰/۵-۰/۶، ضعیف. در این تحقیق، برای مقایسه آماری عملکرد دو مدل در پردازش داده های آموزشی (میزان موفقیت) و دقت آنها در پیش بینی آتش سوزی های آینده (نرخ پیش بینی) از آزمون مقایسه جفتی ویلکاکسون (Wilcoxon, 1945) استفاده شد (Hong et al., 2019). در اجرای این روش فرض صفر این است که بین میزان موفقیت و پیش بینی دو مدل در سطح $p=0.05$ اختلاف معنی دار آماری وجود ندارد. در صورتی که مقادیر آماره Z بیشتر از مقادیر $\pm 1/96$ باشد فرض صفر رد می شود که بیانگر وجود اختلاف معنی دار آماری بین نتایج دو مدل است (Wilcoxon, 1945).

به عنوان آخرین مرحله از مدل سازی احتمال وقوع آتش سوزی، نقشه به دست آمده به طبقات حساسیت تقسیم بندی می شود. در این تحقیق با استفاده از روش شکستگی های طبیعی (Natural Breaks) (Jenks & Caspall, 1971) که در تحقیقات متعددی استفاده شده است (Pourtaghi et al., 2015; Jaafari et al., 2017, 2018,) (2019)، اقدام به طبقه بندی نقشه قابلیت خطر آتش سوزی به پنج طبقه حساسیت بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد شد.

$$w_i^+ = \ln \left(P \frac{\{B | F\}}{\{B | \bar{F}\}} \right) \quad (4)$$

$$w_i^- = \ln \left(P \frac{\{\bar{B} | F\}}{\{\bar{B} | \bar{F}\}} \right) \quad (5)$$

در آن، w_i^+ و w_i^- : وزن های مثبت و منفی، \ln : لگاریتم بر مبنای عدد نپر، P : احتمال شرطی بر حسب وقوع یا عدم وقوع آتش سوزی، B و \bar{B} : وجود و عدم وجود یکی از عوامل آتش سوزی، F و \bar{F} : وجود و عدم وجود آتش سوزی.

برای تعیین وزن نهایی هر طبقه از روابط (۶) و (۷) استفاده می شود.

$$C = w_i^+ - w_i^- \quad (6)$$

$$W = \frac{C}{S_C} \quad (7)$$

که در این روابط، C : تفاضل برای وزن های مثبت و منفی، W : وزن نهایی استاندارد شده و S_C : انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هریک از وزن های مثبت و منفی است. نقشه نهایی احتمال بروز آتش سوزی در جنگل ها و مراتع استان کهگیلویه و بویراحمد با ترکیب همه نقشه های وزنی عوامل مؤثر در آتش سوزی با یکدیگر (رابطه ۲) به دست می آید.

اعتبارسنجی و مقایسه مدل ها

ارزیابی عملکرد مدل ها با استفاده از ۳۰٪ از نقاط آتش سوزی که وارد مرحله مدل سازی نشدند و بر مبنای منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) انجام شد. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه خطای نوع اول یا مثبت کاذب (False Positive) و خطای نوع دوم یا مثبت حقیقی (True Negative) برای هر مقدار احتمالی است. در مدل سازی پیش بینی وقوع آتش سوزی، خطای نوع اول به

نتایج

آزمون هم خطی

نتایج آزمون هم خطی بین عوامل بیانگر وجود هم خطی بالا بین عامل بارندگی و سایر عوامل بود (جدول ۱). برای

این عامل مقادیر تورم واریانس و حد تغییرات به ترتیب ۱۶/۴۸۸ و ۰/۰۶۱ به دست آمد که از حدود مجاز (۵ $VIF <$ و یا $Tolerance > ۰/۲$) تخطی کرده اند. بنابراین عامل بارندگی از ادامه فرایند مدل سازی کنار گذاشته شد.

جدول ۱- نتایج آزمون هم خطی بین عوامل

شاخص های هم خطی		عوامل
تورم واریانس	حد تغییرات	
۱/۲۶۶	۰/۷۹۰	شیب (درجه)
۲/۳۴۵	۰/۴۲۶	ارتفاع (متر)
۱/۱۲۷	۰/۸۸۷	جهت
۳/۲۸۷	۰/۲۸۹	دما (درجه سانتی گراد)
۱۶/۴۸۸	۰/۰۶۱	بارندگی (میلی متر)
۱/۳۰۱	۰/۷۶۹	شاخص پوشش گیاهی
۱/۷۸۴	۰/۵۶۰	سرعت باد (متر/ثانیه)
۱/۱۵۹	۰/۸۶۳	فاصله تا مناطق مسکونی (متر)
۱/۱۹۱	۰/۸۴۰	فاصله تا جاده (متر)
۱/۱۴۹	۰/۸۷۰	فاصله تا رودخانه (متر)
۱/۰۹۴	۰/۹۱۴	کاربری اراضی

داشتن نسبت فراوانی ۱/۷ و وزن شاهد ۳/۶۶۸ حساس ترین طبقه ارتفاعی به آتش سوزی است. همچنین نتایج نشان می دهد مناطقی با ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر کمترین حساسیت را به بروز آتش سوزی دارند. در مورد عامل جهت جغرافیایی، طبقه شمال غربی با نسبت فراوانی ۱/۵۰۶ و وزن شاهد ۱/۳۱۷ حساسیت بیشتری به آتش سوزی نشان می دهد. بیش از ۳۹٪ وسعت اراضی استان کهگیلویه و بویراحمد که دارای درجه حرارت کمتر از ۲۰/۵ درجه سانتی گراد هستند، بیشترین حساسیت را به بروز آتش سوزی دارند. در مقابل، مناطق با درجه حرارت بیشتر از ۲۰/۵ درجه سانتی گراد همبستگی منفی با احتمال بروز آتش سوزی دارند. در مورد عامل NDVI نتایج روند نامنظمی از بروز آتش سوزی در طبقات مختلف نشان می دهد.

بررسی ارتباط بین آتش سوزی های گذشته و عوامل مستقل حاصل کاربرد مدل های نسبت فراوانی و وزن شاهد برای مدل سازی احتمال وقوع آتش سوزی مشخص شدن میزان اهمیت هر طبقه از مشخصه های منطقه مورد مطالعه بر بروز آتش سوزی بود. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است طبقات شیب بیشتر از ۱۵ درجه با کسب بیشترین مقادیر نسبت فراوانی و وزن شاهد بیشترین حساسیت را به بروز آتش سوزی دارند. این طبقات که بیشتر از ۴۸ درصد وسعت استان کهگیلویه و بویراحمد را شامل می شوند، دربرگیرنده بیش از ۵۳ درصد از آتش سوزی های گذشته هستند. براساس نتایج به دست آمده برای عامل ارتفاع، طبقه ارتفاعی ۲۰۰۰-۲۲۵۰ متر درحالی که تنها حدود ۱۳٪ منطقه را شامل می شود، با دربرگرفتن بیش از ۲۲٪ از آتش سوزی رخ داده در استان کهگیلویه و بویراحمد و

جدول ۲- تعیین وزن هر طبقه از عوامل آتش سوزی با استفاده از مدل های نسبت فراوانی و وزن شاهد

وزن شاهد (WOE)	نسبت فراوانی (FR)	درصد نقاط آتش سوزی	درصد مساحت طبقه	تعداد آتش- سوزی	تعداد پیکسل طبقه	طبقه	عامل
-۰/۶۱۴	۰/۹۲۳	۲۳/۱۵۸	۲۵/۰۸۹	۴۵	۴۲۷۳۴۷۶	۰-۵	شیب (درجه)
-۰/۸۵۳	۰/۸۹۷	۲۳/۶۸۴	۲۶/۴۱۶	۴۵	۴۴۹۹۴۳۷	۵-۱۵	
۰/۶۶۴	۱/۰۷۵	۳۱/۵۷۹	۲۹/۳۸۴	۶۰	۵۰۰۴۹۳۲	۱۵-۳۰	
-۰/۸۶۴	۱/۱۲۹	۲۱/۵۷۹	۱۹/۱۱۱	۴۱	۳۲۵۵۲۸۲	>۳۰	
-۵/۳۷۴	۰/۳۹۷	۱۲/۶۳۲	۳۱/۸۵۸	۲۴	۵۴۲۶۳۳۴	<۱۰۰۰	ارتفاع (متر)
-۰/۶۲۱	۰/۸۳۵	۵/۷۸۹	۶/۹۳۶	۱۱	۱۱۸۱۴۹۸	۱۰۰۰-۱۲۵۰	
-۰/۹۶۵	۰/۷۵۶	۵/۷۸۹	۷/۶۵۹	۱۱	۱۳۰۴۵۹۴	۱۲۵۰-۱۵۰۰	
۱/۰۵۹	۱/۲۴۰	۱۱/۵۷۹	۹/۳۳۸	۲۲	۱۵۹۰۵۰۴	۱۵۰۰-۱۷۵۰	
۰/۷۲۹	۱/۳۶۳	۱۴/۷۳۷	۱۰/۸۲۱	۲۸	۱۸۴۳۱۱۷	۱۷۵۰-۲۰۰۰	
۳/۶۶۸	۱/۷۰۰	۲۲/۱۰۵	۱۳/۰۰۲	۴۲	۲۲۱۴۵۷۴	۲۰۰۰-۲۲۵۰	
۲/۳۷۴	۱/۳۴۲	۲۷/۳۶۸	۲۰/۳۸۷	۵۲	۳۴۷۲۵۰۶	>۲۲۵۰	
-۰/۰۹۵	۰/۹۸۷	۲۲/۱۰۵	۲۲/۳۹۳	۴۲	۳۸۱۴۱۹۰	هموار	
۰/۱۸۳	۱/۰۴۳	۸/۹۴۷	۸/۵۷۶	۱۷	۱۴۶۰۷۵۲	شمال	
-۱/۲۴۴	۰/۷۸۳	۱۱/۵۷۹	۱۴/۷۹۴	۲۲	۲۵۱۹۸۷۳	شمال شرقی	
-۰/۶۱۱	۰/۷۸۳	۳/۱۵۸	۴/۰۳۱	۶	۶۸۶۶۷۶	شرق	
-۰/۰۴۳	۰/۹۹۳	۱۶/۸۴۲	۱۶/۹۵۸	۳۲	۲۸۸۸۴۶۴	جنوب شرقی	جهت
-۰/۸۷۷	۱/۱۸۹	۴/۰۳۱	۱۰/۱۷۸	۲۳	۱۷۳۳۵۶۹	جنوب	
۰/۸۱۹	۱/۱۳۵	۱۶/۹۵۸	۱۶/۲۲۹	۳۵	۲۷۶۴۲۶۰	جنوب غربی	
-۱/۳۲۲	۰/۴۷۲	۳/۳۴۶	۳/۳۴۶	۳	۵۶۹۹۶۵	غرب	
۱/۳۱۷	۱/۵۰۶	۳/۴۹۵	۳/۴۹۵	۱۰	۵۹۵۳۷۸	شمال غربی	
۳/۹۳۴	۱/۸۰۰	۲۱/۰۵۳	۱۱/۶۹۳	۴۰	۱۹۹۱۷۴۹	۱۶/۵ - ۱۴/۵	دما (درجه سانتی گراد)
۳/۷۹۹	۱/۷۹۳	۲۰/۰۰۰	۱۱/۱۵۲	۳۸	۱۸۹۹۴۵۵	۱۸/۵ - ۱۶/۵	
۳/۹۶۶	۱/۶۶۹	۲۶/۸۴۲	۱۶/۰۸۵	۵۱	۲۷۳۹۷۸۶	۲۰/۵ - ۱۸/۵	
-۳/۶۸۲	۰/۶۱۰	۲۰/۰۰۰	۳۲/۷۷۱	۳۸	۵۵۸۱۸۴۹	۲۲/۵ - ۲۰/۵	
-۴/۷۳۴	۰/۴۲۸	۱۲/۱۰۵	۲۸/۲۹۹	۲۳	۴۸۲۰۲۸۸	۲۵ - ۲۲/۵	

وزن شاهد (WOE)	نسبت فراوانی (FR)	درصد نقاط آتش سوزی	درصد مساحت طبقه	تعداد آتش- سوزی	تعداد پیکسل طبقه	طبقه	عامل
-۳/۷۶۲	۰/۱۲۶	۱/۵۷۹	۱۲/۵۳۳	۳	۲۱۳۴۷۱۵	-۰/۲ - ۰/۰۸	شاخص پوشش گیاهی (NDVI)
-۲/۷۳۸	۰/۵۲۰	۷/۸۹۵	۱۵/۱۸۶	۱۵	۲۵۸۶۶۶۲	۰/۱ - ۰/۰۸	
-۰/۵۸۵	۱/۰۷۹	۲۴/۲۱۱	۲۲/۴۴۰	۴۶	۳۸۲۲۲۳۰	-۰/۱۲ - ۰/۱	
۱/۳۱۷	۱/۲۱۶	۲۰/۰۰۰	۱۶/۴۴۸	۳۸	۲۸۰۱۶۷۲	۰/۱۴ - ۰/۱۲	
۱/۶۴۷	۱/۳۳۴	۱۵/۲۶۳	۱۱/۴۴۲	۲۹	۱۹۴۸۸۷۸	۰/۱۶ - ۰/۱۴	
-۰/۴۷۸	۱/۱۱۸	۸/۹۴۷	۸/۰۰۶	۱۷	۱۳۶۳۶۱۰	۰/۱۸ - ۰/۱۶	
-۰/۴۹۱	۱/۱۴۸	۶/۳۱۶	۵/۵۰۳	۱۲	۹۳۷۳۳۹	۰/۲ - ۰/۱۸	
۳/۵۶۷	۱/۸۷۰	۱۵/۷۸۹	۸/۴۴۲	۳۰	۱۴۳۸۰۲۱	۱ - ۰/۲	
-۳/۸۷۳	۰/۵۶۱	۱۶/۸۴۲	۳۰/۰۲۷	۳۲	۵۱۱۴۶۱۶	۱۱ - ۹/۸	سرعت باد (متر/ثانیه)
-۱/۳۶۰	۰/۸۹۳	۲۹/۴۷۴	۳۳/۰۱۲	۵۶	۵۶۲۲۹۳۲	۱۱/۵ - ۱۱	
۵/۵۸۱	۱/۸۷۵	۳۴/۷۳۷	۱۸/۵۲۸	۶۶	۳۱۵۵۹۲۵	۱۲ - ۱۱/۵	
-۰/۱۸۳	۱/۰۲۸	۱۸/۹۴۷	۱۸/۴۳۳	۳۶	۳۱۳۹۶۵۴	۱۳/۸ - ۱۲	
-۰/۵۱۶	۱/۲۰۷	۴/۷۳۱	۳/۹۲۵	۹	۶۶۸۴۶۶	-۰۵۰۰	فاصله تا مناطق مسکونی (متر)
-۰/۶۴۵	۰/۸۰۱	۴/۲۱۱	۵/۲۵۷	۸	۸۹۵۴۶۰	۵۰۰-۱۰۰۰	
۳/۳۸۶	۱/۹۵۶	۱۲/۶۳۲	۶/۴۵۷	۲۴	۱۰۹۹۷۸۱	۱۰۰۰-۱۵۰۰	
۱/۵۹۴	۱/۴۲۳	۱۰/۰۰۰	۷/۰۲۶	۱۹	۱۱۹۶۷۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰	
۳/۲۷۱	۱/۸۸۴	۱۳/۱۵۸	۶/۹۸۵	۲۵	۱۱۸۹۷۲۲	۲۰۰۰-۲۵۰۰	
-۴/۴۷۴	۰/۷۸۶	۵۵/۲۶۳	۷۰/۳۵۱	۱۰۵	۱۱۹۸۲۹۹۸	>۲۵۰۰	
-۰/۱۶۱	۱/۰۴۲	۷/۳۶۸	۷/۰۶۹	۱۴	۱۲۰۳۹۹۰	-۰۲۰۰	فاصله تا جاده (متر)
۱/۰۶۱	۱/۳۱۸	۷/۳۶۸	۵/۵۹۳	۱۴	۹۵۲۵۸۹	۲۰۰-۴۰۰	
-۰/۶۱۶	۰/۸۰۹	۴/۲۱۱	۵/۲۰۵	۸	۸۸۶۵۴۶	۴۰۰-۶۰۰	
۱/۷۶۳	۱/۵۸۵	۷/۳۶۸	۴/۶۴۹	۱۴	۷۹۱۸۵۵	۶۰۰-۸۰۰	
-۰/۸۷۷	۱/۲۹۵	۵/۷۸۹	۴/۴۷۹	۱۱	۷۶۱۴۷۴	۸۰۰-۱۰۰۰	
-۱/۵۸۶	۰/۹۳۰	۶۷/۸۹۵	۷۳/۰۱۵	۱۲۹	۱۲۴۳۶۶۷۳	>۱۰۰۰	

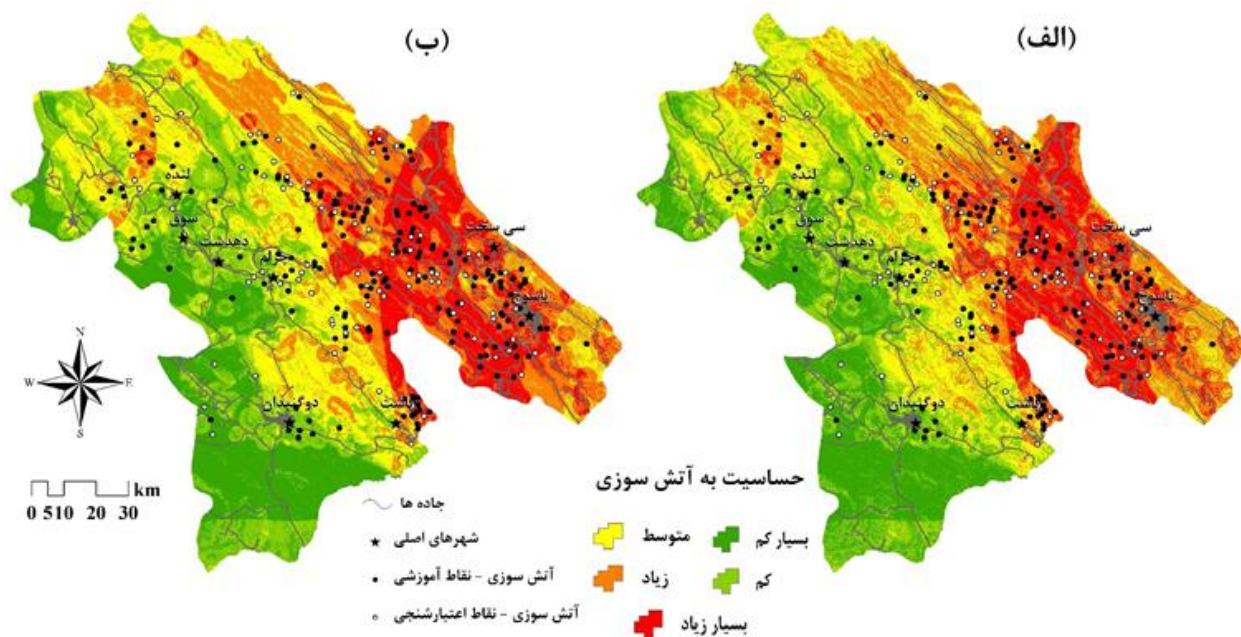
عامل	طبقه	تعداد پیکسل طبقه	تعداد آتش-سوزی	درصد مساحت طبقه	درصد نقاط آتش‌سوزی	نسبت فراوانی (FR)	وزن شاهد (WOE)
	۲۰۰-	۱۸۱۱۳۲۷	۱۷	۱۰/۶۳۴	۸/۹۴۷	۰/۸۴۱	-۰/۷۵۳
فاصله تا رودخانه (متر)	۲۰۰-۴۰۰	۱۶۷۵۲۸۱	۱۷	۹/۸۳۵	۸/۹۴۷	۰/۹۱۰	-۰/۴۱۱
	۴۰۰-۶۰۰	۱۶۳۹۲۷۹	۸	۹/۶۲۴	۴/۲۱۱	۰/۴۳۷	-۲/۴۰
	۶۰۰-۸۰۰	۱۴۷۸۰۵۲	۲۲	۸/۶۷۸	۱۱/۵۷۹	۱/۳۳۴	۱/۴۱۵
	۸۰۰-۱۰۰۰	۱۴۱۸۳۵۱	۲۱	۸/۳۲۷	۱۱/۰۵۳	۱/۳۲۷	۱/۳۵۴
	>۱۰۰۰	۹۰۱۰۸۳۷	۱۰۵	۵۳/۹۰۲	۵۵/۲۶۳	۱/۰۴۵	۰/۶۵۲
کاربری اراضی	جنگل	۷۲۲۶۴۸۶	۱۰۰	۴۲/۴۲۶	۵۲/۶۳۲	۱/۲۴۱	۲/۸۲۶
	مرتع	۶۷۱۳۱۷۷	۵۳	۳۹/۴۱۲	۲۷/۸۹۵	۰/۷۰۸	-۳/۲۱۳
	اراضی کشاورزی	۲۹۸۱۱۰۳	۳۷	۱۷/۵۰۲	۱۹/۴۷۴	۱/۱۱۳	۰/۷۱۵
	مناطق شهری	۱۱۲۳۶۱	۰	۰/۶۶۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

۱۷ درصد از مساحت استان می‌شوند. در این بین، جنگل‌های استان با کسب بالاترین وزن‌های نسبت فراوانی و وزن شاهد حساس‌ترین مناطق به وقوع آتش‌سوزی هستند.

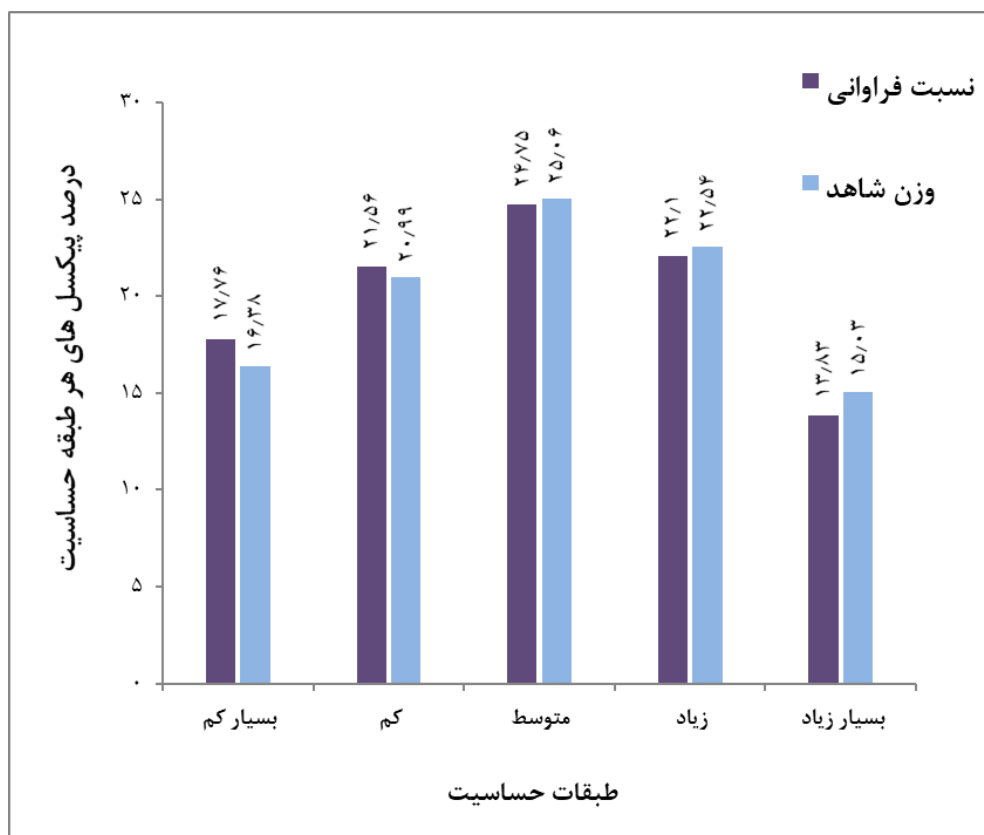
پهنه‌بندی حساسیت به آتش‌سوزی

پس از تعیین وزن هر طبقه از عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی با استفاده از دو مدل نسبت فراوانی و وزن شاهد، وزن‌های به‌دست آمده در طبقات اعمال شدند و برای هر عامل یک لایه وزن‌دار تهیه شد. با تلفیق این لایه‌های وزن‌دار بر مبنای رابطه (۳)، نقشه‌های حساسیت به وقوع آتش‌سوزی برای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد که در مرحله بعد به پنج طبقه حساسیت تقسیم‌بندی شدند (شکل ۳). شکل ۴ مقایسه بین درصد وسعت هر یک از طبقات حساسیت را در دو نقشه تهیه شده نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده از مقایسه دو نقشه، طبقات حساسیت زیاد و بسیار زیاد به‌ترتیب حدود ۲۲/۳ (۳۴۵۷ کیلومتر مربع) و ۱۴/۴ درصد (۲۲۳۳ کیلومتر مربع) از وسعت استان کهگیلویه و بویراحمد را دربرمی‌گیرد.

با این حال طبقه ۲/۰-۱ که بیانگر حداکثر تراکم پوشش گیاهی در سطح استان است با کسب نسبت فراوانی ۱/۸۷۰ و وزن شاهد ۳/۵۶۷ بیشترین حساسیت را به بروز آتش‌سوزی دارد. بررسی ارتباط عامل سرعت باد با آتش‌سوزی‌های استان نشان می‌دهد در مناطقی که مقدار این عامل بیشتر از ۱۱/۵ متر بر ثانیه است حساس‌ترین مناطق به آتش‌سوزی هستند. این مناطق در مجموع ۳۷ و ۵۴ درصد از وسعت استان کهگیلویه و بویراحمد و آتش‌سوزی‌های رخ داده در این استان را دربرمی‌گیرند. بررسی ارتباط بین آتش‌سوزی‌های استان کهگیلویه و بویراحمد و عوامل فاصله‌ای نشان می‌دهد که بخش‌هایی از استان که در فاصله ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متری از مناطق مسکونی و همچنین در فاصله ۶۰۰-۸۰۰ متری از جاده‌ها و رودخانه‌ها واقع شده‌اند، دارای بیشترین حساسیت به آتش‌سوزی هستند. براساس نتایج به‌دست آمده، آتش‌سوزی‌های رخ داده در استان کهگیلویه و بویراحمد بیشترین پراکنش را به‌ترتیب در جنگل‌ها، مراتع و اراضی کشاورزی دارند. این مناطق به‌ترتیب شامل حدود ۴۲، ۳۹ و



شکل ۳- طبقات حساسیت به آتش سوزی در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل الف) نسبت فراوانی و ب) وزن شاهد

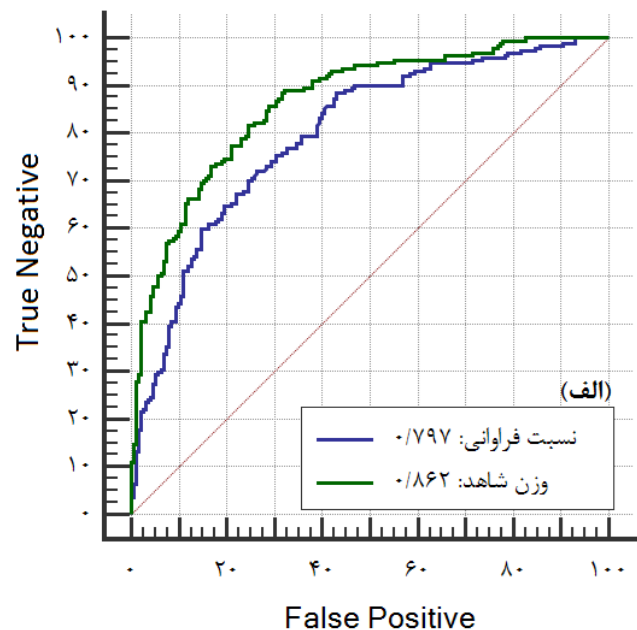
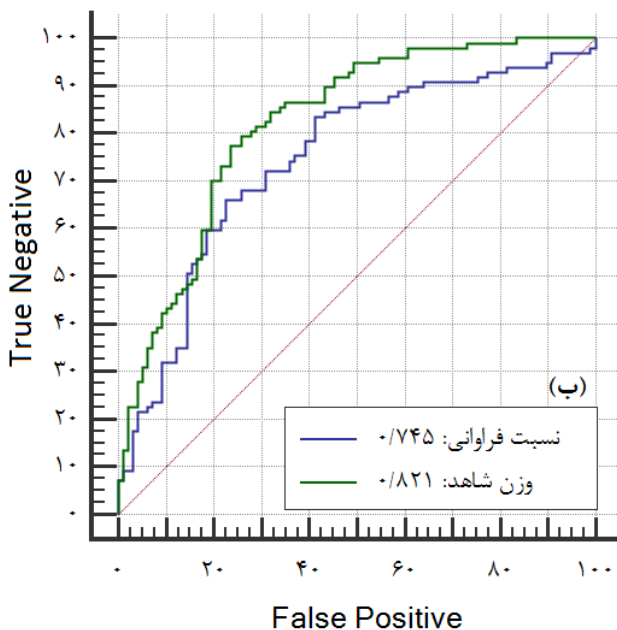


شکل ۴- مقایسه درصد طبقات حساسیت به آتش سوزی در دو مدل

ارزیابی مدل‌ها

۰/۸۲۱ عملکرد بهتری نسبت به مدل نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در استان کهگیلویه و بویراحمد داشته است. جدول ۳ مقایسه کامل‌تری از مقادیر میزان موفقیت و نرخ پیش‌بینی را بین دو مدل نشان می‌دهد. براساس این نتایج، مدل وزن شاهد از نظر آماری نیز برتری معنی‌داری نسبت به مدل نسبت فراوانی دارد.

نتایج ارزیابی عملکرد دو مدل نسبت فراوانی و وزن شاهد در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به آتش‌سوزی که بر مبنای روش ROC و منحنی‌های میزان موفقیت و نرخ پیش‌بینی به‌دست آمدند در شکل ۵ نمایش داده شده است. مدل وزن شاهد با میزان موفقیت و پیش‌بینی ۰/۸۶۲ و



شکل ۵- الف) نرخ موفقیت و ب) نرخ پیش‌بینی برای دو مدل نسبت فراوانی و وزن شاهد

جدول ۳- مقایسه آماری بین نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی دو مدل

نرخ پیش‌بینی	نرخ موفقیت	
۰/۰۷۶	۰/۰۶۵	اختلاف بین AUC دو مدل
۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۶۵۷	خطای استاندارد میانگین
۴/۳۶۶	۱۰/۰۶۳	p-value
$P < ۰/۰۰۰۱$	$P < ۰/۰۰۰۱$	معنی‌داری

بحث

بر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان کهگیلویه و بویراحمد بود. طبقاتی که بیشترین مقادیر نسبت فراوانی و وزن شاهد را کسب کردند، مؤثرترین طبقات هر عامل در

نتایج حاصل از این تحقیق مشخص‌کننده میزان اهمیت طبقات مختلف از ده عامل توپوگرافیکی، اقلیمی و محیطی

موجب تغییرات شدید در میزان حساسیت جهات مختلف جغرافیایی به آتش‌سوزی شده است.

از میان عوامل اقلیمی که در این تحقیق در نظر گرفته شد، عامل بارندگی به دلیل داشتن هم‌خطی بالا با سایر عوامل و به‌ویژه با عواملی مانند ارتفاع و دما از ادامه فرایند مدل‌سازی کنار گذاشته شد. دو عامل باقی‌مانده، دما و سرعت باد بودند که بررسی طبقات مختلف عامل دما نشان داد که تأثیر این عامل بر وقوع آتش‌سوزی وابسته بر عواملی دیگری مانند تراکم پوشش گیاهیست. زیرا در استان کهگیلویه و بویراحمد آتش‌سوزی‌ها با مقادیر بالای درجه حرارت همبستگی منفی (حساسیت کمتر به آتش‌سوزی) نشان دادند و همبستگی مثبت (حساسیت بیشتر به آتش‌سوزی) در مناطقی با درجه حرارت کمتر و پوشش گیاهی بیشتر مشاهده شد. با وجود گزارش نتایجی مشابه توسط Hong و همکاران (۲۰۱۷)، Hong و همکاران (۲۰۱۸) و Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۵)، نتایج متفاوتی توسط Jaafari و همکاران (۲۰۱۷) و Jaafari & Mafi و Gholami (۲۰۱۷) برای بخش دیگری از رویشگاه‌های زاگرس (استان چهارمحال و بختیاری) ارائه شده است که بیانگر رابطه مثبت مقادیر بالای درجه حرارت با افزایش تعداد آتش‌سوزی‌ها است. بررسی ارتباط بین سرعت باد و آتش‌سوزی‌ها نشان داد که طبقه ۱۱/۵-۱۲ سرعت باد با نسبت فراوانی ۱/۸۷۵ و وزن شاهد ۵/۵۸۱ مهمترین طبقه از بین طبقات ده عامل مورد بررسی است. با بررسی نقشه‌های عوامل مستقل (شکل ۲)، مشخص شد که این طبقه از سرعت باد منطبق با طبقات $NDVI > 0/2$ است که دربرگیرنده تراکم بالایی از پوشش گیاهی (مواد سوختنی) هستند. همچنین بررسی نقشه‌های حساسیت (شکل ۳) نشان می‌دهد که توزیع طبقات حساسیت به آتش‌سوزی در سطح استان تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر عوامل سرعت باد و درجه حرارت است؛ به‌نحوی که طبقات با اهمیت سرعت باد و درجه حرارت به‌طور کامل در نقشه‌های حساسیت نمایان هستند. عامل NDVI که بیانگر تراکم پوشش گیاهی است، نشان داد که در مناطق با پوشش گیاهی متراکم احتمال بروز

احتمال وقوع آتش‌سوزی بودند (Jaafari et al., 2014, Rahmati et al., 2016). بدین لحاظ می‌توان بیان کرد که در مناطق حساس به آتش‌سوزی در استان کهگیلویه و بویراحمد، شیب‌های بالاتر از ۱۵ درجه، طبقات ارتفاعی بیشتر از ۱۵۰۰ متر و جهات‌های شمال‌غربی حساسیت بیشتری دارند.

در مورد عامل شیب، روند مشخصی از میزان تأثیر طبقات مختلف آنها بر وقوع آتش‌سوزی در تحقیقات گذشته گزارش نشده است. درحالی‌که برخی از تحقیقات (Conedera et al., 2006; Pourtaghi et al., 2015; Chen et al., 2015) حساسیت بیشتر مناطق با شیب بالا را به بروز آتش‌سوزی گزارش کرده‌اند، برخی دیگر (Jaafari et al., 2017) مناطق پرشیب را به علت صخره‌ای بودن و عدم وجود مواد سوختنی فاقد حساسیت به بروز آتش‌سوزی دانسته‌اند. عامل ارتفاع که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با توسعه مناطق مسکونی، تراکم جمعیت، شدت تغییرات کاربری اراضی، بارندگی، درجه حرارت، رطوبت و تبخیر و تعرق در ارتباط است، به‌طور معمول در طبقات میانی بیشترین حساسیت را به وقوع آتش‌سوزی نشان می‌دهد (Catry et al., 2010; Adab et al., 2015; Jaafari et al., 2017). نتایج این تحقیق نشان داد که ارتفاعات بیش از ۱۵۰۰ متر در استان کهگیلویه و بویراحمد به دلیل تراکم بالاتر پوشش گیاهی حساسیت بیشتری به آتش‌سوزی دارند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده وجود روندی نامنظم و تا حد زیادی غیرقابل توضیح برای ارتباط بین عامل جهت و آتش‌سوزی‌های گذشته است. اگرچه در برخی تحقیقات مانند Adab و همکاران (۲۰۱۵) و Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۶) میزان تأثیر جهات‌های مختلف جغرافیایی بر وقوع آتش‌سوزی بر پایه معیارهایی مانند میزان و شدت تابش خورشید، میزان رطوبت و سرعت و جهت باد به‌خوبی تفکیک شده است، اما با نتایج به‌دست آمده از این تحقیق چنین تقسیم‌بندی‌هایی را نمی‌توان برای استان کهگیلویه و بویراحمد در نظر گرفت. البته تنها توضیح قابل ارائه برای این نتایج می‌تواند توپوگرافی بسیار متغیر استان باشد که

۶۰۰ تا ۱۰۰۰ قرار گرفتند بیشترین حساسیت را دارند. این تغییر روند در حساسیت مناطق می‌تواند به دلیل تغییر در رطوبت نسبی هوا، رطوبت مواد سوختنی و مقدار تبخیر و تعرق (Pourtaghi et al., 2016; Semeraro et al., 2016; Jaafari & Mafi Gholami, 2017) در مناطق با فاصله کمتر و بیشتر از ۶۰۰ متر تا رودخانه‌ها باشد. البته مناطق با فاصله بیش از ۱۰۰۰ متر که نزدیک به ۵۴ درصد از وسعت استان را دربرمی‌گیرند، حساسیت کمی به آتش‌سوزی دارند. نقشه‌های نهایی احتمال وقوع آتش‌سوزی که در این مطالعه تهیه شدند نشان می‌دهند که نزدیک به ۳۷ درصد از وسعت استان کهگیلویه و بویراحمد در طبقات حساسیت زیاد تا بسیار زیاد به آتش‌سوزی قرار دارد. این مناطق که اغلب در بخش شرقی استان قرار گرفتند جزو مناطق با پوشش جنگلی هستند.

از نظر مدل‌سازی، نتایج این تحقیق بیانگر برتری مدل وزن شاهد بر مدل نسبت فراوانی در مدل‌سازی احتمال وقوع آتش‌سوزی در استان کهگیلویه و بویراحمد بود. مدل وزن شاهد که بر پایه تئوری بیزین عمل می‌کند، نسبت به مدل‌های آماری توانایی بالاتری را در کشف روابط پیچیده بین یک پدیده و عوامل مختلف دارد. محاسبات مبتنی بر تئوری بیزین از آن جهت مفید است که می‌توان از طریق آن، احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پیش‌آمد را با مشروط کردن آن نسبت به وجود یا عدم وجود یک عامل دیگر محاسبه کرد. در بسیاری از حالت‌ها، محاسبه احتمال یک پیش‌آمد به صورت مستقیم کاری دشوار است. به طوری که با استفاده از این قضیه و مشروط کردن پیش‌آمد مورد نظر نسبت به عوامل دیگر، می‌توان احتمال مورد نظر را محاسبه کرد (Bonham-Carter et al., 1989; Jaafari et al., 2017). کاربرد مدل وزن شاهد که پیش از این تحقیق در مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش (Jaafari et al., 2015; Jaafari, 2018)، سیل (Rahmati et al., 2016)، پهنه‌بندی آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری (Jaafari et al., 2017) و بسیاری دیگر از مسائل زیست‌محیطی (Abdullahi & Pradhan, 2018) گزارش شده است، نشان‌دهنده قابلیت این

آتش‌سوزی بیشتر از سایر مناطق استان است. این مناطق به ترتیب تراکم پوشش گیاهی، جنگل‌ها، مراتع و اراضی کشاورزی استان هستند. اگر وقوع اغلب آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع به دلیل عوامل طبیعی شامل بروز دوره‌های خشکی یا صاعقه تصور شود، تمامی آتش‌سوزی‌های اراضی کشاورزی عمدی هستند که با هدف حذف پس‌مانده محصولات کشاورزی و فراری دادن حیوانات موزی و مخرب محصولات کشاورزی ایجاد می‌شوند (Jaafari & Mafi Gholami, 2017). موارد بسیاری نیز گزارش شده است که این آتش‌سوزی‌های عمدی به دلیل سهل‌انگاری افراد و عدم رعایت اقدامات پیشگیرانه، به جنگل‌ها و مراتع حاشیه اراضی کشاورزی سرایت کرده است. از سویی، برخی گزارش‌های غیررسمی بسیاری از آتش‌سوزی‌های رخ داده در اراضی جنگلی و مرتعی زاگرس را به اختلافات قومیتی، یا آزمندی افراد برای گسترش اراضی تحت مالکیتشان نسبت می‌دهند که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و بیشتر است. از بین سه عامل فاصله‌ای، وزن طبقات عامل فاصله تا مناطق مسکونی بیشتر از طبقات سایر عوامل است که بیانگر اهمیت این عامل بر احتمال وقوع آتش‌سوزی در استان است. طبقات ۱۰۰۰-۲۵۰۰ متر از مناطق مسکونی که همبستگی بالایی با آتش‌سوزی‌های گذشته استان نشان دادند، اغلب در مناطق کم شیب و کم ارتفاع استان قرار گرفته‌اند. این مناطق اغلب به دلیل سهولت دسترسی، محل تجمع گردشگران هستند که از این نظر حساسیت بیشتری به بروز آتش‌سوزی دارند (Semeraro et al., 2016; Nami et al., 2018; Ricotta et al., 2018; Hong et al., 2019). همچنین برای مناطقی با حداکثر فاصله از جاده‌ها و مناطق مسکونی، کمترین مقدار نسبت فراوانی و وزن شاهد به دست آمد. این روند مشابه در تحقیقات افرادی مانند Syphard و همکاران (۲۰۰۸)، Adab و همکاران (۲۰۱۵) و Jaafari و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشاهده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، مناطقی که در فاصله ۶۰۰ متری از رودخانه‌ها قرار گرفتند کمترین حساسیت را به وقوع آتش‌سوزی دارند. پس از آن، مناطقی که در فاصله

- International Journal of Wildland Fire, 24(6): 763-777.
- Adab, H., Kanniah, K.D. and Solaimani, K. 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural hazards*, 65(3): 1723-1743.
- Anonymous, 2014. Administrative office of natural resources of the Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, 284p.
- Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O. and Vacik, H. 2014. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Applied Geography*, 53: 258-270.
- Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Benali, A., Brands, S., Mota, B. and Moreno, J.M. 2015. Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214: 369-379.
- Beygi Heidarlou, H., Shafiei, A.B. and Erfanian, M. 2014. Forest fire risk mapping using analytical hierarchy process technique and frequency ratio method (case study: Sardasht Forests, NW Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4): 559-573 (In Persian).
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wrigh, D.F. 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth science, geological survey of Canada*, 171-183.
- Catry, F.X., Rego, F.C., Bação, F.L. and Moreira, F. 2010. Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8): 921-931.
- Chen, F., Du, Y., Niu, S. and Zhao, J. 2015. Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. *Forests*, 6(5): 1422-1438.
- Chuvieco, E. and Congalton, R.G. 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing of Environment*, 29(2): 147-159.
- Chuvieco, E. and Salas, J. 1996. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3): 333-345.
- Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, G.B., Zumbrennen, T. and Spinedi, F. 2006. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. *Forest Ecology and Management*, 234(1): S68.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G. and Münkemüller, T. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1): 27-46.
- Eskandari, S. and Miesel, J.R. 2017. Comparison of the fuzzy AHP method, the spatial correlation method, مدل در برخورد با مسائل مختلف است.
- طی سالهای اخیر، مدل‌های بی‌شماری معرفی شده‌اند که با تکیه بر اصول یادگیری ماشینی (Machine learning) امکان پیش‌بینی دقیق وقوع پدیده‌های مختلف را تا حد زیادی تضمین کرده‌اند. اگرچه این مدل‌ها اغلب برای پیش‌بینی وقوع پدیده‌هایی مانند سیل و زمین‌لغزش به‌کار رفته‌اند، اما به دلیل ماهیت مشابه مسئله پیش‌بینی آتش‌سوزی با سایر مسائل پیش‌بینی مخاطرات طبیعی امکان کاربرد این مدل‌ها برای پیش‌بینی آتش‌سوزی نیز میسر است. بنابراین اولین پیشنهاد این تحقیق تلاش برای ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های دیگر است تا در صورت امکان دقت پیش‌بینی آینده افزایش یابد. پیشنهاد دوم، افزایش تعداد مشخصه‌های توپوگرافی، اقلیمی و انسانی مورد استفاده در مدل‌سازی است تا نتایج انطباق بیشتری با واقعیت داشته باشند. تحقیقات بعدی می‌توانند عوامل دیگری مانند تراکم جمعیت، مناطق تفرجگاهی و نوع پوشش گیاهی (مواد سوختنی) را در نظر بگیرند. پیشنهاد سوم، برنامه‌ریزی برای اقدامات پیشگیرانه و تلاش برای ایجاد یک برنامه مدیریتی کارآمد برای کاهش مخاطرات ناشی از آتش است. تدوین برنامه‌های این‌چنینی باید برای تمامی مناطقی که دارای حساسیت زیاد تا بسیار زیاد به وقوع آتش‌سوزی هستند در نظر گرفته شود. درنهایت، با توجه به شرایط کنونی تغییرات شدید اقلیمی و همچنین فعالیت‌های روزافزون انسانی که دائماً در حال تغییر وضعیت و کاربری اراضی هستند، به‌روزرسانی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به آتش‌سوزی در فواصل زمانی منظم چهارمین و مهم‌ترین پیشنهاد این پژوهش است.
- منابع مورد استفاده**
- Abdullahi, S. and Pradhan, B. 2018. Land use change modeling and the effect of compact city paradigms: integration of GIS-based cellular automata and weights-of-evidence techniques. *Environmental Earth Sciences*, 77(6): 251.
- Adab, H., Kanniah, K.D., Solaimani, K. and Sallehuddin, R. 2015. Modelling static fire hazard in a semi-arid region using frequency analysis.

- Jaafari, A. 2018. LiDAR-supported prediction of slope failures using an integrated ensemble weights-of-evidence and analytical hierarchy process. *Environmental Earth Sciences*, 77(2): 42.
- Jaafari, A. and Mafi Gholami, D. 2017. Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2): 232-243 (In Persian).
- Jaafari, A., Gholami, D.M. and Zenner, E.K. 2017. A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological informatics*, 39: 32-44.
- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian, J. and Sattarian, A. 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4): 909-926.
- Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. and Ghajar, I. 2015. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran. *Land Use Policy*, 47: 198-208.
- Jaafari, A., Zenner, E.K. and Pham, B.T. 2018. Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers. *Ecological Informatics*, 43: 200-211.
- Jaafari, A., Zenner, E.K., Panahi, M. and Shahabi, H. 2019. Hybrid artificial intelligence models based on a neuro-fuzzy system and metaheuristic optimization algorithms for spatial prediction of wildfire probability. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266: 198-207.
- Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Alcasena, F., Mostafavi, M.A., Etemad, V., Lozano, O.M. and Spano, D. 2015. Evaluating fire modelling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran. *Forestry*, 89(2): 136-149.
- Jenks, G.F. and Caspall, F.C. 1971. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2): 217-244.
- Kayastha, P., Dhital, M.R. and De Smedt, F. 2012. Landslide susceptibility mapping using the weight of evidence method in the Tinau watershed, Nepal. *Natural hazards*, 63(2): 479-498.
- Lee, S. and Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1): 33-41.
- Meng, Y., Deng, Y. and Shi, P. 2015. Mapping forest wildfire risk of the world. In *World Atlas of Natural Disaster Risk*. Springer, Berlin, Heidelberg, 261-275.
- and the Dong model to predict the fire high-risk areas in Hyrcanian forests of Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2): 933-949.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007. *Fire Management-Global Assessment 2006. A Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO, Rome, Italy.
- Fischer, A.P., Spies, T.A., Steelman, T.A., Moseley, C., Johnson, B.R., Bailey, J.D. and Kline, J.D. 2016. Wildfire risk as a socioecological pathology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(5): 276-284.
- Güngöroğlu, C. 2017. Determination of forest fire risk with fuzzy analytic hierarchy process and its mapping with the application of GIS: The case of Turkey/Çakırlar. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(2): 388-406.
- Goleiji, E., Hosseini, S.M., Khorasani, N. and Monavari, S.M. 2017. Forest fire risk assessment an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12): 612.
- Guo, F., Zhang, L., Jin, S., Tigabu, M., Su, Z. and Wang, W. 2016. Modeling anthropogenic fire occurrence in the boreal forest of China using logistic regression and random forests. *Forests*, 7(11): 250.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E. and Tatham, R.L. 2006. *Multivariate data analysis Vol. 6*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 734p.
- Hong, H., Jaafari, A. and Zenner, E.K. 2019. Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators. *Ecological Indicators*, 101: 878-891.
- Hong, H., Naghibi, S.A., Dashtpajardi, M.M., Pourghasemi, H.R. and Chen, W. 2017. A comparative assessment between linear and quadratic discriminant analyses (LDA-QDA) with frequency ratio and weights-of-evidence models for forest fire susceptibility mapping in China. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(7): 167.
- Hong, H., Tsangaratos, P., Ilija, I., Liu, J., Zhu, A.X. and Xu, C. 2018. Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu County, China. *Science of the Total Environment*, 630: 1044-1056.
- Ivanilova, T.N. 1985. Set probability identification in forest fire simulation. *Annual Review in Automatic Programming*, 12: 185-188.

- Sarvaley, F.M., Bavaghar, M.P. and Shabanian, N. 2014. Application of artificial neural network for forest fire risk mapping based on physiographic, human and climate factors in Sarvabad, Kurdistan province. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 11(2): 97-107 (In Persian).
- Satir, O., Berberoglu, S. and Donmez, C. 2016. Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5): 1645-1658.
- Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G. and Petrosillo, I. 2016. GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of environmental management*, 168: 94-103.
- Silva, G.L., Soares, P., Marques, S., Dias, M.I., Oliveira, M.M. and Borges, J.G. 2015. A Bayesian Modelling of Wildfires in Portugal. In *Dynamics, Games and Science*, Springer International Publishing, 723-733.
- Swets, J.A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857): 1285-1293.
- Syphard, A.D., Radeloff, V.C., Keuler, N.S., Taylor, R.S., Hawbaker, T.J., Stewart, S.I. and Clayton, M.K. 2008. Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5): 602-613.
- Wilcoxon, F. 1945. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, 1(6): 80-83.
- Nami, M.H., Jaafari, A., Fallah, M. and Nabiuni, S. 2018. Spatial prediction of wildfire probability in the Hyrcanian ecoregion using evidential belief function model and GIS. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2): 373-384.
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A. and Pereira, J.M. 2012. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management*, 275: 117-129.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H. R., Aretano, R. and Semeraro, T. 2016. Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological indicators*, 64: 72-84.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R. and Rossi, M. 2015. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(4): 1515-1533.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Zeinivand, H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1): 42-70.
- Rasooli, S.B. and Bonyad, A.E. 2019. Evaluating the efficiency of the Dong model in determining fire vulnerability in Iran's Zagros forests. *Journal of Forestry Research*, 30(4): 1447-1458.
- Ricotta, C., Bajocco, S., Guglietta, D. and Conedera, M. 2018. Assessing the Influence of Roads on Fire Ignition: Does Land Cover Matter?. *Fire*, 1(2): 24.

Spatial modeling the probability of wildfire occurrence using frequency ratio and weight-of-evidence models

M. Omid¹, D. Mafi-Gholami^{2*}, B. Mahmoudi¹ and A. Jaafari³

1- Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2* - Corresponding author, Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
E-mail: d.mafigholami@nres.sku.ac.ir

3- Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 10.11.2018

Accepted: 22.05.2019

Abstract

In recent years, many attempts have been made to manage and control wildfires. Modeling and mapping wildfire probability across fire-prone landscapes is one of the most important measures. In the present study, the capability of frequency ratio and weight-of-evidence models for predicting the probability of wildfires occurrence in the Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province were investigated. The modeling process and prediction of future fires were based on an analysis of the relationship between 271 historical fires occurred during the 2002-2014 period and 10 predictor variables including slope degree, aspect, altitude, temperature, wind speed, land use, NDVI, and proximity to rivers, roads, and human settlement. During the modeling process, the significance of each variable class on wildfire occurrence was quantified. The model results were used to produce distribution maps of wildfire probability. The results of the evaluation and comparison of the models, which were carried out using the receiver operating characteristic method, success rate, prediction rate, and Wilcoxon test showed that the weight-of-evidence model with success and prediction rates of 0.886 and 0.821 performed better than the frequency ratio model in both training and validation datasets. Overall, the results revealed that approximately 30% of the forests and rangelands of the province fall within the high and very high probability to wildfire occurrence, which requires prudent management measures to mitigate the risk of fire.

Key words: Natural hazards, Modeling, Wildfire, susceptibility mapping.