

پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش ترکیبی نسبت فراوانی - انتروپی شانون

ابوالفضل جعفری^{۱*} و داوود مافی‌غلامی^۲

*۱- نویسنده مسئول، دکتری جنگل‌داری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

پست الکترونیک: ajaafari@gmail.com

۲- استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۰۱

چکیده

پژوهش پیش‌رو به بررسی قابلیت روش نسبت فراوانی و ترکیبی از این روش با انتروپی شانون در تهیه نقشه حساسیت آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری می‌پردازد. در ابتدا مناطق آتش‌سوزی گذشته در این استان بر مبنای اطلاعات موجود و عملیات میدانی شناسایی شدند. از ۱۳۲ آتش‌سوزی شناسایی شده، به‌طور تصادفی ۹۲ مورد (۷۰٪) برای فرآیند مدل‌سازی و ۴۰ مورد (۳۰٪) باقیمانده برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. بر اساس اطلاعات موجود در منطقه مورد مطالعه، ۱۳ عامل مرتبط با خصوصیات توپوگرافی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان عامل‌های مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در نظر گرفته شد. با استفاده از مدل نسبت فراوانی و مدل ترکیبی ارتباط بین نقاط آتش‌سوزی و عامل‌های مؤثر بررسی شد. نتایج مدل‌ها مبنای ساخت نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی قرار گرفت. نتایج ارزیابی که با استفاده از روش مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) انجام شد، نشان داد که مدل ترکیبی با قابلیت محاسبه میزان اهمیت عامل‌ها و همچنین هر یک از طبقات آنها، کارایی بهتری در تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی دارد. نرخ موفقیت و پیش‌بینی برای مدل نسبت فراوانی و مدل ترکیبی به ترتیب ۷۹/۰۲ و ۷۵/۷۲ درصد و ۸۵/۱۶ و ۸۲/۹۱ درصد محاسبه شد. بر اساس نتایج، بیشتر از یک‌سوم مساحت استان چهارمحال و بختیاری در طبقات خطر زیاد تا خیلی زیاد آتش‌سوزی قرار می‌گیرند که در این میان، عامل‌های کاربری اراضی، نوع خاک و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت هستند.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های زاگرس، چهارمحال و بختیاری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل‌سازی.

مقدمه

آتش بخشی جدایی‌ناپذیر از بوم‌سازگان‌های گیاهی است، اما در شرایط کنونی تغییرات اقلیمی، آتش‌سوزی تبدیل به یکی از مهم‌ترین عامل‌های تخریب این اکوسیستم‌ها شده است (Pausas & Keeley, 2009). طی سال‌های اخیر تحقیقات زیادی انجام شده‌اند که بیانگر افزایش تعداد و شدت آتش‌سوزی‌ها در آینده نزدیک هستند

(Silva et al., 2015). در ایران، به‌رغم عدم وجود اطلاعات دقیق از آتش‌سوزی‌های گذشته، کاهش سالانه ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هکتار از وسعت جنگل‌ها در اثر آتش‌سوزی قابل تخمین است (Adab et al., 2013). این آتش‌سوزی‌ها به‌طور معمول در اثر آذرخش، بروز دوره‌های خشکی و وزش بادهای گرم ایجاد می‌شوند. با این حال، نقش عامل‌های انسانی که به‌طور مستقیم (آتش‌سوزی‌های عمدی)

Mohammadi *et al.*, 2010; Beygi Heidarlou *et al.*, 2014), رگرسیون لجستیک (Faramarzi *et al.*, 2014), شبکه‌های عصبی مصنوعی (Mohammadi Sarvaleh *et al.*, 2013), نسبت فراوانی (Beygi Heidarlou *et al.*, 2015) و شاخص آنتروپی شانون (Pourtaghi *et al.*, 2014; Pourtaghi *et al.*, 2015) انجام شده‌اند، در زمره این موارد هستند.

در پژوهش پیش‌رو، امکان مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی برای استان چهارمحال و بختیاری بررسی شد. دو روش نسبت فراوانی و شاخص آنتروپی شانون برای فرآیند مدل‌سازی و روش مشخصه عملکرد سیستم و سطح زیر منحنی برای ارزیابی کارایی فرآیند مدل‌سازی و مقایسه دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. این پژوهش، اولین تلاش برای پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در سطح یک استان از جنگل‌های زاگرس است که نتایج آن می‌تواند برای پیش‌بینی و هشدار مخاطرات محیطی ناشی از آتش مورد استفاده قرار گیرد تا علاوه بر کاهش هزینه‌های انسانی، اقتصادی و اجتماعی، سمت‌گیری برنامه‌های توسعه‌ای را در نواحی حساس به آتش‌سوزی مشخص کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سطح کل استان چهارمحال و بختیاری با وسعت ۱۶۵۳۳ کیلومتر مربع انجام شد (شکل ۱). وضعیت توپوگرافی این استان با حداقل و حداکثر ارتفاع ۷۸۳ و ۴۱۷۸ متر از سطح دریا و تغییرات شیب صفر تا بیشتر از ۸۰ درجه بسیار متنوع است. مقدار بارندگی سالانه استان با ۱۴۰۰ میلی‌متر در شمال غرب و ۲۵۰ میلی‌متر در شرق و جنوب شرق تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. میانگین دمای سالانه ۱۰ درجه سانتیگراد است که مناطق مرکزی استان با ۵ درجه سانتیگراد و مناطق غربی با ۱۶ درجه سانتیگراد کمترین و بیشترین دمای سالانه را به خود اختصاص می‌دهند. این استان از نظر رژیم باد نیز متغیر است. در اغلب طول سال جهت وزش باد از غرب و جنوب غرب است،

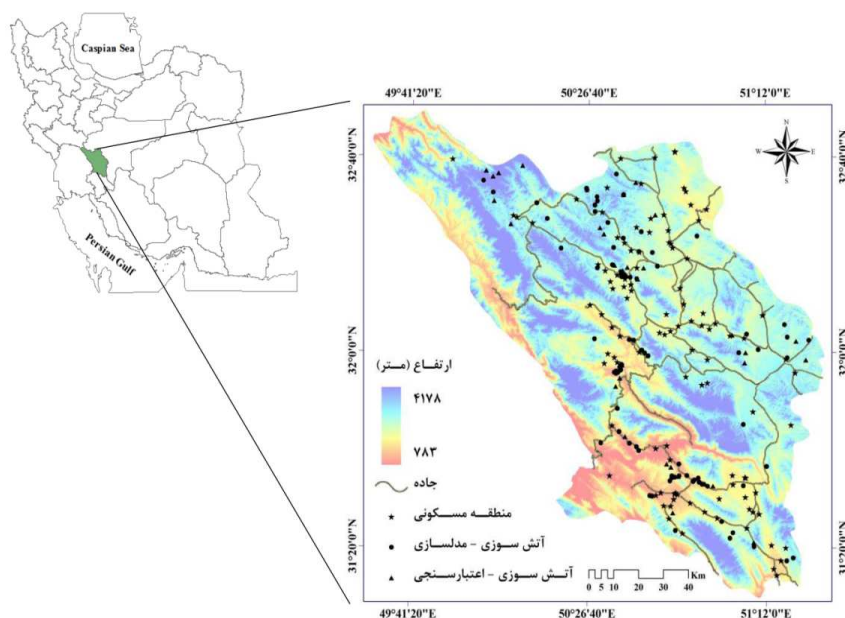
و غیرمستقیم (تغییر کاربری اراضی) باعث آتش‌سوزی می‌شود، شایان توجه است (Adab *et al.*, 2013; 2015).

به‌رغم تعدد عوامل‌های آتش‌سوزی، وقوع آتش در یک منطقه به‌طور معمول بر اساس الگوی‌های زمانی و مکانی منظم ایجاد می‌شود (Chen *et al.*, 2015) که امکان مدل‌سازی آنها را فراهم می‌کند (Semeraro *et al.*, 2016). مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی که با هدف پهنه‌بندی خطر آتش و تعیین مناطق حساس انجام می‌شود، از ابتدایی‌ترین اقدامات مدیریت بحران آتش‌سوزی است (Silva *et al.*, 2015). اولین مدل‌سازی پیش‌بینی آتش‌سوزی جنگل توسط Congalton و Chuvieco (۱۹۸۹) انجام شد. در این تحقیق که در سواحل مدیترانه‌ای اسپانیا انجام شد، پژوهشگران با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، اقدام به شناسایی آتش‌سوزی‌های گذشته، پردازش و تولید نقشه‌های موضوعی کردند. سپس با استفاده از یک مدل رگرسیونی ارتباط بین آتش‌سوزی‌ها و عامل‌های توپوگرافی و اکولوژی بررسی شد. در پژوهشی دیگر، ضمن در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تری از مشخصه‌های توپوگرافی، اقلیمی و محیطی نسبت به مطالعه Congalton و Chuvieco (۱۹۸۹)، شاخص‌هایی برای بررسی رابطه بین این عامل‌ها و آتش‌سوزی‌های گذشته معرفی شد (Chuvieco & Salas, 1996). این مطالعه شروعی برای ارزیابی سریع و مقرون به‌صرفه مناطق حساس به آتش‌سوزی بود. در سال‌های اخیر نیز تکامل علوم دورسنجی و پردازش اطلاعات جغرافیایی از یک‌سو و گسترش روش‌های داده‌کاوی از سوی دیگر موجب افزایش دقت و سهولت فرآیند مدل‌سازی حساسیت به آتش‌سوزی شد (Oliveira *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015; Semeraro *et al.*, 2016).

در ایران، به‌رغم سابقه اندک مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی، انجام این دسته از تحقیقات به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است (Adab *et al.*, 2015). تحقیقاتی که با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Eskandari *et al.*, 2013)، تحلیل سلسله‌مراتبی

ونک، منج و خراسان و سه حوزه استحفاظی بازفت، اردل و لردگان قرار گرفته‌اند (Jaafari et al., 2017).

در حالی که در فصل تابستان جریان وزش باد از سمت شرق استان است. جنگل‌های این استان با وسعت ۳۰۷ هزار هکتار در پنج حوزه آبخیز رودخانه‌های بازفت، کارون،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان چهارمحال و بختیاری و موقعیت آتش‌سوزی‌های مورد مطالعه

پیشین و اطلاعات موجود در منطقه مورد مطالعه، ۱۳ مشخصه شامل درجه شیب، جهت، ارتفاع، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافیک، درجه حرارت، بارندگی، اثر باد، کاربری اراضی، نوع خاک و فاصله تا رودخانه، جاده و مناطق مسکونی در نظر گرفته شدند. اطلاعات پایه برای تهیه این ۱۳ عامل از دو سازمان نقشه‌برداری و هواشناسی کشور اخذ شد. آماده‌سازی عامل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و SAGA GIS و به فرمت رستر با اندازه سلول ۵۰×۵۰ متر انجام شد. ایده کلی برای طبقه‌بندی عامل‌ها بر پایه تحقیقات پیشین (Eskandari et al., 2013; Beygi et al., 2014; Pourtaghi et al., 2015) بود. تعدادی از طبقه‌بندی‌ها مانند درجه شیب، جهت و شکل شیب به‌طور دقیق مطابق با تحقیقات مذکور انجام شد. طبقه‌بندی عامل‌هایی مانند کاربری اراضی و نوع خاک بر

جمع‌آوری داده‌ها

محل آتش‌سوزی‌های گذشته در استان چهارمحال و بختیاری بر اساس اطلاعات موجود در اداره کل منابع طبیعی استان، بررسی تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و کنترل زمینی تعیین شد که بر این اساس، ۱۳۲ آتش‌سوزی مربوط به دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ به‌دست آمد. با در نظر گرفتن نسبت ۷۰:۳۰، تقسیم‌بندی داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی انجام شد که در نتیجه ۷۰٪ داده‌ها (۹۲ آتش‌سوزی) برای ساخت مدل‌ها و ۳۰٪ باقیمانده (۴۰ آتش‌سوزی) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند (شکل ۱). برای مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی علاوه بر محل آتش‌سوزی گذشته به مجموعه‌ای از مشخصه‌های توپوگرافی، محیطی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه نیز نیاز است. در این پژوهش، بر مبنای پژوهش‌های

شاخص انتروپی شانون (Shannon's index of entropy) اگرچه روش نسبت فراوانی به سادگی در قالب یک سامانه اطلاعات جغرافیایی قابل اجرا است و نتایج به دست آمده از آن در اکثر موارد رضایت بخش گزارش شده است (Jaafari et al., 2014; Pourtaghi et al., 2015)، اما ضعف اصلی این روش در فرض یکسان بودن اهمیت عامل‌های ورودی است که در این حالت لازم است این ضعف با کاربرد همزمان یک روش دیگر و محاسبه اهمیت هر یک از عامل‌ها برطرف شود (Jaafari et al., 2014). انتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و عدم قطعیت‌های موجود در یک سیستم استفاده می‌شود. تئوری مذکور اولین بار توسط Stefan Boltzmann (اصل دما پویا یا ترمودینامیک) مطرح و در نهایت توسط Shannon به صورت کمی ارائه شد (Shannon, 1948). در این پژوهش برای اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از روش انتروپی شانون از رابطه‌های ۳ تا ۸ استفاده شد:

$$P_{ij} = \frac{b}{a} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$H_{j_{\max}} = \log_2 S_j, S_j - \text{number of classes} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$I_j = \frac{H_{j_{\max}} - H_j}{H_{j_{\max}}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$IoE = I_j P_{ij} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن‌ها: a: نسبت پیکسل‌های آتش‌سوزی هر یک از طبقات به کل پیکسل‌های آتش‌سوزی، b: نسبت پیکسل‌های هر طبقه از عامل‌ها به کل پیکسل‌های منطقه، P_{ij}: تراکم

اساس طبقه‌بندی نقشه‌های پایه سراسری کشور بود. برخی دیگر از عامل‌ها مانند عامل‌های فاصله‌ای، درجه حرارت و بارندگی، با توجه حداقل و حداکثر مقادیر و در نظر گرفتن پراکنش آتش‌سوزی‌ها در سطح استان طبقه‌بندی شدند.

روش نسبت فراوانی (Frequency ratio)

روش نسبت فراوانی از جمله مدل‌های آماری است که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی مخاطرات محیطی نظیر زمین‌لغزش و سیل دارد. فرضیه این روش بر این اساس است که مخاطرات آینده در مکان‌هایی با شرایط مشابه با مخاطرات پیشین رخ خواهند داد (Jaafari et al., 2014). در این تحقیق برای محاسبه نسبت فراوانی، نسبت مناطق آتش‌سوزی به کل منطقه و همچنین نسبت مناطق آتش‌سوزی به مناطق بدون آتش‌سوزی محاسبه شد (رابطه ۱).

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(SX_i)}{\sum_{i=1}^m SX_i}}{\frac{N_{pix}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: N_{pix}(SX_i): تعداد پیکسل‌های آتش‌سوزی در طبقه نام از متغیر X، N_{pix}(X_j): تعداد کل پیکسل‌های متغیر X_j، m: تعداد طبقات در متغیر X_i و n: تعداد متغیرهای مورد بررسی هستند.

در این پژوهش، با اجرای روش نسبت فراوانی، اهمیت طبقات هر یک از مشخصه‌های مورد بررسی محاسبه شد. در نهایت، تهیه نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از رابطه ۲ به دست آمد:

$$I = \sum_{i=1}^{13} C_{FR} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن: I: مجموع ۱۳ لایه عامل و C_{FR}: لایه‌های عامل که هر یک از طبقات آن‌ها با استفاده از روش نسبت فراوانی وزن‌دار شدند.

پس از پایان مراحل مدل‌سازی، با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی (Natural Breaks) موجود در نرم‌افزار ArcGIS اقدام به تقسیم‌بندی نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی به چهار طبقه خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد شد (Pourtaghi et al., 2015).

نتایج

روش نسبت فراوانی

نتیجه استفاده از روش نسبت فراوانی برای مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی، مشخص شدن مقدار اهمیت هر طبقه از عامل‌های مؤثر بود (جدول ۱). در اینجا به دلیل اختصار، تفسیر نتایج تنها برای سه عامل درجه شیب، جهت و ارتفاع ارائه می‌شود. بر اساس نتایج، حدود ۴۱ و ۳۷٪ آتش‌سوزی‌های منطقه در طبقات شیب ۵ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ درجه اتفاق افتاده است. این دو طبقه از عامل شیب به ترتیب با نسبت فراوانی ۱/۳۶۰ و ۱/۱۷۳ بیشترین حساسیت را به وقوع آتش‌سوزی داشتند. در مورد عامل جهت جغرافیایی، دو طبقه جنوب شرقی و جنوب غربی با وزن ۱/۲۵۲ و ۱/۲۵۵ در مقابل جهت‌های جغرافیایی هموار، شمال و شمال غربی حساسیت بیشتری به آتش‌سوزی نشان دادند. همچنین، برای عامل ارتفاع، طبقه ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر در حالی که تنها حدود ۱۸٪ منطقه مورد را شامل می‌شد، با در بر گرفتن بیشتر از ۳۳٪ از آتش‌سوزی‌های رخ داده در استان و نسبت فراوانی ۱/۸۷۸، حساس‌ترین طبقه ارتفاعی به آتش‌سوزی بود.

شاخص انترویی شانون

مقدار اهمیت هر یک از عامل‌های تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی با استفاده از شاخص انترویی شانون نیز در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج، کاربری اراضی، نوع خاک و فاصله از جاده بیشترین تأثیر و شکل شیب، درجه حرارت و اثر باد کمترین تأثیر را در وقوع آتش‌سوزی داشتند.

آتش‌سوزی در هر طبقه، (P_{ij}) : احتمال تراکم آتش‌سوزی هر عامل و طبقات مرتبط با آن، H_j و H_{jmax} : مقادیر انترویی و بیشینه انترویی، I_j : ضریب اطلاعات و IoE : وزن نهایی هر عامل است.

پس از محاسبات فوق، مدل نهایی حساسیت به آتش‌سوزی با استفاده از رابطه ۹ تهیه شد:

$$W = \sum_{i=1}^{13} C_{FR} \times IoE \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن: W : مجموع حاصلضرب لایه‌های عامل در وزن انترویی، C_{FR} : هر یک از لایه‌های عامل که طبقات آن با استفاده از وزن نسبت فراوانی وزن‌دار شده است و IoE : وزن هر عامل که با استفاده از شاخص انترویی شانون به دست آمد.

اعتبارسنجی

کارایی مدل ارائه شده در این پژوهش با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (Receiver Operating Characteristic/ROC) و سطح زیر منحنی (Area Under Curve/AUC) ارزیابی شد. این روش رایج‌ترین روش بررسی کارایی مدل‌سازی است که در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی کاربرد دارد (Jaafari et al., 2015). روش ROC نمایشی گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای نوع اول (False Positive) و خطای نوع دوم (False Negative) برای هر مقدار احتمالی است. سطح زیر منحنی ROC، AUC، بیانگر مقدار پیش‌بینی مدل از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده و یا عدم وقوع آنها است. مقادیر AUC بر اساس دو منحنی نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی محاسبه می‌شود. این منحنی‌ها به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد مدل با استفاده از داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی هستند (Jaafari et al., 2015). مقادیر AUC بین صفر تا یک متغیر است. به طور کلی، AUC با مقدار ۱-۰/۸ نشان‌دهنده کارایی خیلی خوب؛ ۰/۷-۰/۸ کارایی خوب؛ ۰/۶-۰/۷ کارایی متوسط و ۰/۵-۰/۶ کارایی ضعیف مدل است.

جدول ۱- تعیین وزن عامل‌ها و طبقات آنها با استفاده از روش نسبت فراوانی و انتروپی شانون

عامل	طبقه	تعداد پیکسل طبقه	تعداد آتش‌سوزی	درصد مساحت طبقه	درصد مساحت نقاط آتش‌سوزی	نسبت فراوانی (FR)	وزن انتروپی (IoE)
درجه شیب	۰-۵	۱۵۷۲۰۵۳	۱۸	۲۴/۲۷۵	۱۹/۵۶۵	۰/۸۰۶	۰/۱۱۰
	۵-۱۵	۱۹۶۷۰۱۴	۳۸	۳۰/۳۷۴	۴۱/۳۰۴	۱/۳۶۰	
	۱۵-۳۰	۲۰۴۰۵۸۴	۳۴	۳۱/۵۱۰	۳۶/۹۵۷	۱/۱۷۳	
	> ۳۰	۸۹۶۴۱۰	۲	۱۳/۸۴۲	۲/۱۷۴	۰/۱۵۷	
جهت	هموار	۷۵۶۴۲۱	۸	۱۱/۶۸۰	۸/۶۹۶	۰/۷۴۴	۰/۱۰۰
	شمال	۷۵۲۰۹۶	۱۰	۱۱/۶۱۳	۱۰/۸۷۰	۰/۹۳۶	
	شمال شرقی	۸۳۱۵۰۲	۱۲	۱۲/۸۴۰	۱۳/۰۴۳	۱/۰۱۶	
	شرق	۵۵۰۲۱۴	۷	۸/۴۹۶	۷/۶۰۹	۰/۸۹۶	
	جنوب شرقی	۸۹۹۶۸۰	۱۶	۱۳/۸۹۲	۱۷/۳۹۱	۱/۲۵۲	
	جنوب	۸۱۱۵۲۵	۱۰	۱۲/۵۳۱	۱۰/۸۷۰	۰/۸۶۷	
	جنوب غربی	۸۹۷۲۲۱	۱۶	۱۳/۸۵۴	۱۷/۳۹۱	۱/۲۵۲	
	غرب	۴۶۱۰۱۷	۷	۷/۱۶۵	۷/۶۰۹	۱/۰۶۲	
شمال غربی	۵۱۳۳۸۵	۶	۷/۹۲۷	۶/۵۲۲	۰/۸۳۲		
ارتفاع (متر)	۰-۱۰۰۰	۱۳۳۲۶	۰	۰/۲۰۶	۰	۰	۰/۱۶۶
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۲۱۱۸۸۶	۳	۳/۲۷۲	۳/۲۶۱	۰/۹۹۷	
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۱۶۱۷۰۱	۳۱	۱۷/۹۳۸	۳۳/۶۹۶	۱/۸۷۸	
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۳۲۵۵۹۴۹	۴۵	۵۰/۲۷۷	۴۸/۹۱۳	۰/۹۷۳	
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۱۳۵۷۲۵۱	۱۲	۲۰/۹۵۸	۱۳/۰۴۳	۰/۶۲۲	
شکل شیب	مفعر	۶۲۸۴۵۸	۶	۹/۷۰۴	۶/۵۲۲	۰/۶۷۲	۰/۰۱۶
	مسطح	۴۶۳۷۲۴۱	۶۸	۷۱/۶۰۶	۷۳/۹۱۳	۱/۰۳۲	
	محدب	۱۲۱۰۳۶۲	۱۸	۱۸/۶۹۰	۱۹/۵۶۵	۱/۰۴۷	
شاخص رطوبت توپوگرافیک	< ۱۰	۱۶۹۴۴۹۶	۲۴	۲۶/۱۶۶	۶/۵۲۲	۰/۶۷۲	۰/۰۳۸
	۱۰-۱۵	۳۴۶۸۹۴۱	۵۴	۵۳/۵۶۶	۷۳/۹۱۳	۱/۰۳۲	
	۱۵-۲۰	۱۱۲۴۷۷۳	۱۳	۱۷/۳۶۸	۱۹/۵۶۵	۱/۰۴۷	
	> ۲۰	۱۸۷۸۵۱	۱	۲/۹۰۱	۰	۰	
حرارت (درجه سانتیگراد)	< ۸	۸۷۴۷۱۹	۱۱	۱۳/۵۰۷	۱۱/۹۵۷	۰/۸۸۵	۰/۰۳۰
	۸-۱۰	۲۱۸۱۱۵۴	۲۲	۳۳/۶۸۰	۲۳/۹۱۳	۰/۷۱۰	
	۱۰-۱۲	۱۶۳۶۰۴۶	۲۱	۲۵/۲۶۳	۲۲/۸۲۶	۰/۹۰۴	
	> ۱۲	۱۷۸۴۱۴۲	۳۸	۲۷/۵۵۰	۴۱/۳۰۴	۱/۴۹۹	
بارندگی (میلی‌متر)	< ۳۰۰	۲۷۲۳۳۵	۴	۴/۲۰۵	۳/۳۴۸	۱/۰۳۴	۰/۰۶۳
	۳۰۰-۵۰۰	۳۱۱۲۰۹۱	۳۷	۴۸/۰۵۵	۴۰/۲۱۷	۰/۸۳۷	
	۵۰۰-۷۰۰	۱۶۲۳۹۸۰	۴۰	۲۵/۰۷۷	۴۳/۴۷۸	۱/۷۳۴	
	۷۰۰-۹۰۰	۵۶۳۸۵۱	۶	۸/۷۰۷	۶/۵۲۲	۰/۷۴۹	
	> ۹۰۰	۹۰۳۸۰۴	۵	۱۳/۹۵۶	۵/۴۳۵	۰/۳۸۹	
اثر باد	< ۰/۸	۲۱۳۴۳۳	۵	۳/۲۹۶	۵/۴۳۵	۱/۶۴۹	۰/۰۳۴
	۰/۸-۱	۳۲۱۲۴۰۶	۴۹	۴۹/۶۰۴	۵۳/۲۶۱	۱/۰۷۴	
	۱-۱/۲	۲۱۴۹۲۷۸	۲۸	۳۳/۱۸۸	۳۰/۴۳۵	۰/۹۱۷	
	> ۱/۲	۹۰۰۹۴۴	۱۰	۱۳/۹۱۲	۱۰/۸۷۰	۰/۷۸۱	
کاربری اراضی	اراضی کشاورزی	۷۰۲۹۸۴	۴	۱۰/۸۵۵	۴/۳۴۸	۰/۴۰۱	۰/۱۸۶
	باغ	۳۳۰۵۹	۰	۰/۵۱۰	۰	۰	
	کشتزارهای دیم	۴۴۳۹۷	۱	۰/۶۸۶	۱/۰۸۷	۱/۵۸۶	
	مرتع ضعیف	۱۱۷۶۸۴۱	۲۴	۱۸/۱۷۲	۲۶/۰۸۷	۱/۴۳۶	
	جنگل	۱۵۷۷۲۲۶	۲۹	۲۴/۳۵۵	۳۱/۵۲۲	۱/۲۹۴	
	مرتع متوسط - خوب	۲۸۹۱۰۸۴	۳۴	۴۴/۶۴۳	۳۶/۹۵۷	۰/۸۲۸	
نوع خاک	دامداری	۴۰۰۱۰	۰	۰/۶۱۸	۰	۰	۰/۱۸۴
	تالاب	۱۰۴۳۰	۰	۰/۱۶۱	۰	۰	
	انتی سول	۳۱۲۳۸۹۴	۵۴	۴۸/۲۳۸	۵۸/۶۹۶	۱/۲۱۷	

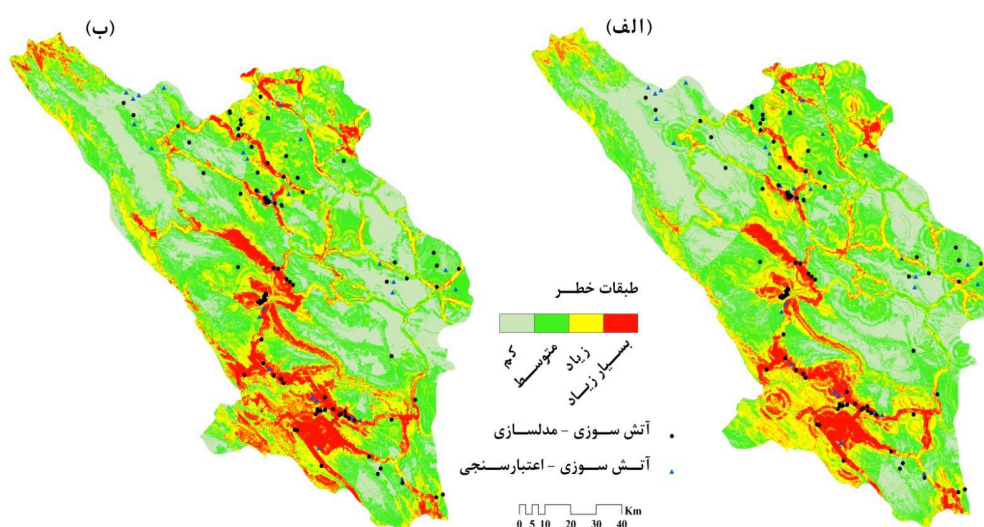
عامل	طبقه	تعداد پیکسل طبقه	تعداد آتش‌سوزی	درصد مساحت طبقه	درصد مساحت نقاط آتش‌سوزی	نسبت فراوانی (FR)	وزن انتروپی (IoE)
فاصله تا رودخانه (متر)	۰-۲۰۰	۲۷۱۹۷۱۷	۳۵	۴۱/۹۹۶	۳۸/۰۴۳	۰/۹۰۶	
	۲۰۰-۴۰۰	۳۹۹۴۳۹	۳	۶/۱۶۸	۳/۲۶۱	۰/۵۲۹	
	۴۰۰-۶۰۰	۱۸۹۱۷۸	۰	۲/۹۲۱	۰	۰	
	۶۰۰-۸۰۰	۳۳۶۴۹	۰	۰/۵۲۰	۰	۰	
	۸۰۰-۱۰۰۰	۱۰۱۸۴	۰	۰/۱۵۷	۰	۰	
فاصله تا جاده (متر)	۰-۲۰۰	۳۲۲۷۱۶	۵	۴/۹۸۳	۵/۵۳۵	۱/۰۹۱	
	۲۰۰-۴۰۰	۲۸۹۱۵۲	۳	۴/۴۶۵	۳/۲۶۱	۰/۷۳۰	
	۴۰۰-۶۰۰	۲۷۴۶۵۵	۳	۴/۲۴۱	۳/۲۶۱	۰/۷۶۹	۰/۰۴۵
	۶۰۰-۸۰۰	۲۸۱۴۸۴	۸	۴/۳۴۷	۸/۶۹۶	۲/۰۰۱	
	۸۰۰-۱۰۰۰	۲۷۳۵۵۱	۳	۴/۲۲۴	۳/۲۶۱	۰/۷۷۲	
فاصله تا مناطق مسکونی (کیلومتر)	> ۱۰۰۰	۵۰۳۴۵۰۲	۷۰	۷۷/۷۴۰	۷۶/۰۸۷	۰/۹۷۹	
	۰-۲۰۰	۲۲۵۶۲۳	۸	۳/۴۸۴	۸/۶۹۶	۲/۴۹۶	
	۲۰۰-۴۰۰	۱۹۸۱۲۴	۷	۳/۰۵۹	۷/۶۰۹	۲/۴۸۷	
	۴۰۰-۶۰۰	۱۸۴۵۱۲	۹	۲/۸۴۹	۶/۵۲۲	۲/۲۸۹	۰/۱۱۵
	۶۰۰-۸۰۰	۱۸۶۵۴۳	۶	۲/۸۸۱	۹/۷۸۳	۳/۳۹۶	
فاصله تا مناطق مسکونی (کیلومتر)	۸۰۰-۱۰۰۰	۱۸۰۷۵۷	۳	۲/۷۹۱	۳/۲۶۱	۱/۱۶۸	
	> ۱۰۰۰	۵۵۰۰۵۰۲	۵۹	۸۴/۹۳۶	۶۴/۱۳۰	۰/۷۵۵	
	۰-۲	۴۸۹۱۵۰	۱۵	۷/۵۵۳	۱۶/۳۰۴	۲/۱۵۹	۰/۰۶۵
	۲-۳	۵۰۰۷۰۶	۱۱	۷/۷۳۲	۱۱/۹۵۷	۱/۵۴۶	
	۳-۴	۵۴۵۲۷۰	۱۵	۸/۴۲۰	۱۶/۳۰۴	۱/۹۳۶	
فاصله تا مناطق مسکونی (کیلومتر)	۴-۵	۵۳۸۴۵۱	۶	۸/۳۱۴	۶/۵۲۲	۰/۷۸۴	
	۵-۶	۵۲۴۹۷۷	۱۰	۸/۱۰۶	۱۰/۸۷۰	۱/۳۴۱	
	> ۶	۳۸۷۷۵۰۷	۳۵	۵۹/۸۷۴	۳۸/۰۴۳	۰/۶۳۵	

نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی

روش ترکیبی نسبت فراوانی - انتروپی شانون به چهار طبقه

خطر تقسیم شدند (شکل ۲).

نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از دو روش نسبت فراوانی و همچنین

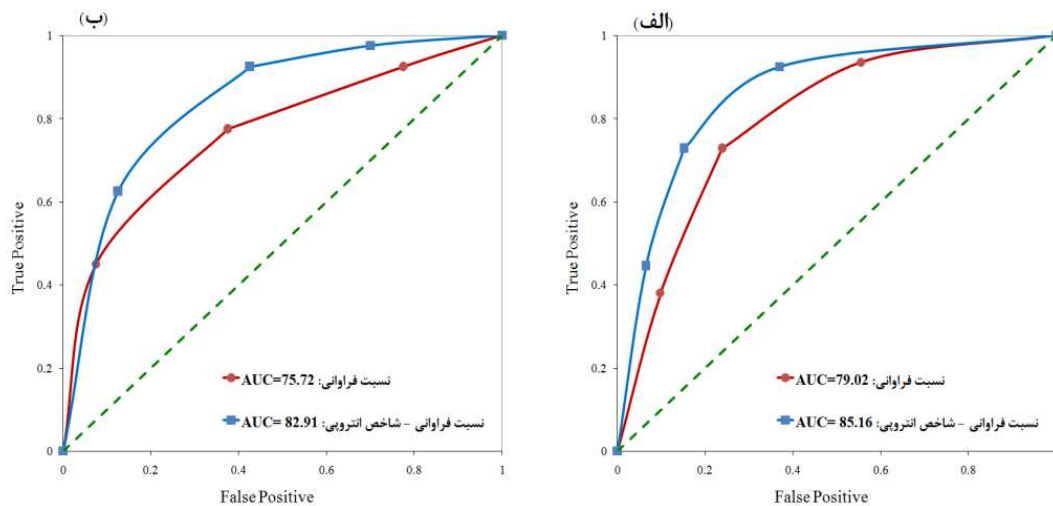


شکل ۲- طبقات خطر آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری به دو روش الف) نسبت فراوانی و ب) نسبت فراوانی - انتروپی شانون

اعتبارسنجی و مقایسه نقشه‌ها

نتایج اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. روش ترکیبی نسبت فراوانی - انترویی شانون با نرخ‌های موفقیت و پیش‌بینی ۸۵/۱۶ و ۸۲/۹۱٪ عملکرد بهتری نسبت به روش نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری

داشت. جدول ۲ مقایسه بین درصد وسعت هر یک از طبقات خطر را در دو نقشه تهیه شده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از مقایسه دو نقشه، طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد به ترتیب ۲۵/۹۴-۲۴/۴۶ و ۹/۵۹-۱۱/۹۲٪ از وسعت استان چهارمحال و بختیاری را در بر می‌گیرند.



شکل ۳- نتایج اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل خطر آتش‌سوزی؛ (الف) نرخ موفقیت و (ب) نرخ پیش‌بینی

جدول ۲- مقایسه درصد طبقات خطر در دو مدل

				طبقات خطر
خطر خیلی زیاد	خطر زیاد	خطر متوسط	کم خطر	مدل
۹/۵۹	۲۵/۹۴	۳۶/۸۱	۲۷/۶۶	مدل نسبت فراوانی
۱۱/۹۲	۲۴/۴۶	۳۸/۱۵	۲۵/۴۷	مدل ترکیبی

بحث

شیب‌های محدب و شاخص رطوبت توپوگرافیک ۱۰ تا ۱۵ واحد بسیار حساس‌تر از سایر مناطق به وقوع آتش‌سوزی است. از سویی دیگر، بررسی وزن انترویی برای هر یک از عامل‌های فوق نشان داد که ارتفاع و شیب تأثیرگذارترین عامل‌های توپوگرافی بودند. تأثیر عامل ارتفاع بر وقوع آتش‌سوزی به‌طور معمول به مجموعه‌ای از عامل‌های دیگر مرتبط می‌شود که یا در زمره عامل‌های انسانی قرار می‌گیرند (مانند توسعه مناطق مسکونی، تراکم جمعیت و شدت تغییرات کاربری اراضی) و یا مرتبط با عامل‌های محیطی و

نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش پیش‌رو نشان‌دهنده مقدار اهمیت هر یک از عامل‌ها و طبقات آن‌ها بر وقوع آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری بود. با توجه به اینکه مقدار بیشتر نسبت فراوانی نشان‌دهنده اهمیت بیشتر طبقه یا طبقات است (Jaafari *et al.*, 2014)، می‌توان بیان کرد که استان چهارمحال و بختیاری از نظر توپوگرافی در شیب‌های ۵ تا ۱۵ درجه، جهت‌های جنوب غربی و جنوب شرقی، طبقه ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر و مناطق با

در پژوهش پیش‌رو، عامل کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده وقوع آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری تشخیص داده شد. در واقع، وجود ماده سوختنی کافی دلیل اصلی وقوع بیشتر از ۹۵٪ آتش‌سوزی‌های استان در مراتع، جنگل‌ها و اراضی کشاورزی است. صرف‌نظر از آتش‌سوزی طبیعی در این مناطق، نقش عامل‌های انسانی که با ایجاد آتش‌سوزی عمدی سعی در حذف پس‌ماند محصولات کشاورزی، دفع حیوانات موذی و مخرب محصولات کشاورزی و تسریع تجدید حیات گونه‌های علفی مراتع دارند، شایان توجه است. همچنین، برخی گزارشات غیررسمی، بسیاری از آتش‌سوزی‌های رخ‌داده در اراضی جنگلی را به اختلافات قومیتی نسبت می‌دهند که نیازمند بررسی‌های بیشتر است. سه کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی به‌همراه باغ‌های میوه به‌طور معمول روی خاک‌های انتی‌سول و اینسپتی‌سول گسترش دارند که در مجموع ۹۷٪ آتش‌سوزی‌های استان را دربر می‌گیرند. تحقیقات انجام شده در خصوص ارتباط آتش‌سوزی با نوع خاک نشان می‌دهد که محتوای رطوبتی خاک و همچنین تأثیر آن بر تنوع گونه‌های گیاهی مهم‌ترین عامل‌های کنترل وقوع یا عدم وقوع آتش هستند (Pourtaghi et al., 2016). همچنین، به‌دلیل ارتباط مستقیم نوع کاربری و نوع و کیفیت خاک، در این پژوهش عامل نوع خاک با اختلاف اندک در وزن انتروپی نسبت به عامل کاربری اراضی به‌عنوان دومین عامل کنترل‌کننده آتش‌سوزی در استان چهارمحال بختیاری تشخیص داده شد.

از بین سه عامل فاصله‌ای، عامل فاصله تا جاده بیشترین وزن انتروپی را کسب کرد. این عامل جزو عامل‌هایی به حساب می‌آید که منعکس‌کننده نقش انسان در وقوع آتش‌سوزی است (Adab et al., 2015). در استان چهارمحال و بختیاری حدود ۱۵٪ از مناطق در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری جاده‌ها قرار دارند که در مجموع ۳۶٪ درصد آتش‌سوزی‌های استان را به‌خود اختصاص می‌دهند. ۸۵٪ باقیمانده مساحت استان با واقع شدن در فاصله‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متری جاده‌ها، ۶۴٪ آتش‌سوزی‌ها را به‌خود اختصاص دادند. این نتایج هم‌راستا با نتایج تحقیقاتی است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم سهولت دسترسی انسان و فراوانی آتش‌سوزی هستند (Eskandari & Chuvieco, 2015).

اقلیمی (بارندگی، درجه حرارت، رطوبت و تبخیر و تعرق) هستند (Adab et al., 2015). به‌طور معمول، در ارتفاعات پایین تا میانی یک منطقه به‌دلیل درجه حرارت به‌نسبت زیادتر، رطوبت کمتر و سهولت دسترسی انسان، احتمال وقوع آتش‌سوزی بسیار بیشتر از سایر دامنه‌های ارتفاعی است. در استان چهارمحال و بختیاری، دامنه ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر به‌طور دقیق دربرگیرنده جنگل‌ها و اراضی کشاورزی هستند که در کنار عامل‌های مذکور، با فراهم کردن ماده سوختنی کافی شرایط را برای وقوع آتش‌سوزی بیشتر نسبت به سایر مناطق استان فراهم کرده است.

در تحقیقات متعددی تأثیر شیب بر وقوع آتش‌سوزی مشخص شده است که بیانگر حساسیت بیشتر مناطق با شیب زیاد به وقوع آتش‌سوزی است (Pourtaghi et al., 2015; Chen et al., 2015). با این حال، در پژوهش پیش‌رو شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه حساسیت کمتری به آتش‌سوزی داشتند، زیرا مناطق تحت پوشش این شیب‌ها در استان چهارمحال و بختیاری به‌طور عموم مناطق صخره‌ای فاقد ماده سوختنی بودند. در پژوهش پیش‌رو مشخص شد که در اثر عامل‌های اقلیمی، بیشترین پتانسیل خطر آتش‌سوزی در مناطق با دمای زیاد و بارش کم وجود دارد که این مورد به دلیل ایجاد شرایط محیطی مناسب برای آتش‌سوزی، منطقی است. در مناطقی با این مشخصات در صورت وجود ماده سوختنی که به‌طور معمول دارای مقدار رطوبت کمی نیز هستند، پتانسیل وقوع آتش بسیار زیاد است (Oliveira et al., 2014). در این پژوهش با هدف بررسی هم‌زمان جهت و سرعت باد، عامل اثر باد (Pourtaghi et al., 2015) در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که در مقادیر کم عامل اثر باد، پتانسیل بروز آتش‌سوزی بیشتر است. این نتایج مخالف با نتایج Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۵) و Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۶) است. این مغایرت علاوه بر اینکه می‌تواند به تحت تأثیر قرار گرفتن عامل اثر باد توسط سایر عامل‌های محیطی و توپوگرافی نسبت داده شود، هم‌راستا با نتایج تحقیقاتی است که باد را به‌عنوان غیرقابل پیش‌بینی‌ترین عامل برای مدل‌سازی خطر و رفتار آتش یاد کرده‌اند (Pourtaghi et al., 2016).

مطابق با شرایط واقعی انجام شد. کاربرد مدل ترکیبی نسبت فراوانی - انترویی شانون که پیش از این در مدل‌سازی مسائل دیگری چون خطر زمین‌لغزش (Jaafari *et al.*, 2014) و پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی (Naghibi *et al.*, 2015) گزارش شده بود، نشان‌دهنده قابلیت مدل‌های ترکیبی در برخورد با مسایل است. از این‌رو، استفاده از سایر مدل‌های ترکیبی مبتنی بر تکنیک‌های داده‌کاوی که در زمینه‌های تحقیقاتی مختلف استفاده می‌شوند، برای مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی قابل توصیه است. همچنین، در نظر گرفتن دامنه وسیع‌تری از عامل‌های مؤثر، به‌ویژه عامل‌های مرتبط با تأثیرات انسانی، می‌تواند روند مدل‌سازی را به‌نحوی هدایت کند که نتایج به‌دست‌آمده انطباق بیشتری با شرایط واقعی داشته باشند. با توجه به پویایی اکوسیستم و تغییرات روزافزون انسانی در شرایط منطقه، به‌روزرسانی نتایج مدل‌سازی در فاصله‌های زمانی منظم نیز مهم‌ترین پیشنهاد این پژوهش است.

References

- 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.
- Adab, H., Kanniah, K.D., Solaimani, K. and Sallehuddin, R., 2015. Modelling static fire hazard in a semi-arid region using frequency analysis. *International Journal of Wildland Fire*, 24(6): 763-777.
- Beygi Heidarlou, H., Banj Shafiei, A. 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).
- 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

با اینحال ذکر این نکته ضروری است که در پژوهش پیش‌رو تنها جاده‌هایی در فرآیند مدل‌سازی وارد شدند که نقشه آنها موجود بود (جاده‌های آسفالتی و آزادراه‌ها). در صورت وجود اطلاعات کامل‌تر و امکان در نظر گرفتن جاده‌های محلی، نقش سهولت دسترسی انسان به مناطق مختلف در افزایش پتانسیل وقوع آتش‌سوزی با اطمینان بسیار بیشتری قابل اثبات خواهد بود. عامل فاصله تا مناطق مسکونی نیز همانند عامل فاصله تا جاده نشان داد که با افزایش فاصله از فراوانی آتش‌سوزی‌ها کاسته شده است. این روند مشابه در تحقیقاتی چون Chuvieco و Salas (۱۹۹۶)، Syphard و همکاران (۲۰۰۸) و Adab و همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش شده است. در واقع، شبکه جاده و مناطق مسکونی با ایجاد شرایطی چون تغییر نوع، مقدار و پیوستگی پوشش گیاهی (مواد سوختنی) امکان تغییر در وقوع آتش‌سوزی‌های طبیعی را فراهم می‌کنند (Adab *et al.*, 2015). نتایج این پژوهش نشان داد که طبقات ۸۰۰ تا ۱۰۰۰، صفر تا ۲۰۰ و بیشتر از ۱۰۰۰ متر از رودخانه به ترتیب بیشترین تأثیر را بر بروز آتش‌سوزی در استان چهارمحال و بختیاری داشتند که بیانگر وجود روندی نامنظم و تا حد زیادی غیر قابل توضیح برای این عامل است. اگرچه در برخی تحقیقات مانند Pourtaghi و همکاران (۲۰۱۶) و Semeraro و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر زیاد برخی از طبقات فاصله از رودخانه به تجمع گردشگران نسبت داده شده است، اما بر اساس بررسی‌های منطقه‌ای، این مورد را نمی‌توان برای استان چهارمحال و بختیاری در نظر گرفت. تنها توضیح قابل ارایه برای این نتایج می‌تواند توپوگرافی بسیار متغیر استان باشد که موجب تغییر در رطوبت نسبی هوا، رطوبت مواد سوختنی و روند تبخیر و تعرق در برخی مناطق شده است.

نقشه‌های نهایی پتانسیل خطر آتش‌سوزی که در این پژوهش تهیه شد، نشان می‌دهد که بیشتر از یک‌سوم مساحت استان چهارمحال و بختیاری در طبقات حساسیت زیاد تا خیلی زیاد به آتش‌سوزی قرار دارد. نتایج نهایی مدل‌سازی بیانگر قابلیت بیشتر مدل ترکیبی نسبت به مدل نسبت فراوانی در مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی بود. در این مدل با تعیین اهمیت هر یک از طبقات عامل و همچنین عامل مربوطه، مدل‌سازی تا حد امکان

- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S. and Rezaei, A., 2015. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*, 8(1): 171-186.
- Oliveira, S., Pereira, J. M., San-Miguel-Ayanz, J. and Lourenço, L., 2014. Exploring the spatial patterns of fire density in southern Europe using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 51: 143-157.
- Pausas, J.G. and Keeley, J.E., 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *Bioscience*, 59: 593-601.
- 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.
- 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.
- Shannon, C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *Bulletin System Technology Journal*, 27: 379-423.
- 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: 723-733. In: Bourguignon, J.P., Jeltsch, R., Pinto, A.A. and Viana, M. (Eds.). *Dynamics, Games and Science*. Springer, Switzerland, 772p.
- 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.
- spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3): 333-345.
- Eskandari, S. and Chuvieco, E., 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42: 57-64.
- Eskandari, S., Oladi Ghadikolaei, J., Jalilvand, H. and Saradjian, M.R., 2013. Forest fire risk modeling and prediction in district three of Neka-Zalemroud forest using geographic information system. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(2): 203-217 (In Persian).
- Faramarzi, H., Hosseini, S.M. and Gholamalifard, M., 2014. Fire hazard zoning in Golestan National Park using logistic regression and GIS. *Geography and Environmental Hazards*, 3(10): 73-90 (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.
- Mohammadi, F., Shabaniyan, N., Pourhashemi, M. and Fatehi, P., 2010. Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(4): 569-586.
- Mohammadi Sarvaley, F., Pir bavaghar, M. and Shabaniyan, N., 2013. 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).

Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy

A. Jaafari ^{1*} and D. Mafi Gholami ²

1* - Corresponding author, Ph.D. Forestry, Young Researchers and Elite Club, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail: ajaafari@gmail.com

2- Assistant Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 17.05.2016

Accepted: 22.09.2016

Abstract

This study investigates the capability of frequency ratio and an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy to produce a reliable map of wildfire susceptibility for Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. At first, the fire locations were identified in the study area from historical archives and field surveys. Ninety two cases (70%) out of 132 detected fire locations were randomly selected for modeling, and the remaining 40 (30 %) cases were used for the validation. Thirteen fire conditioning factors representing topography, climate, and human activities of the study area were extracted from the spatial database. Using the frequency ratio and the ensemble model, the relationship between the conditioning factors and fire locations were explored. The results were then used to produce distribution maps of wildfire hazard. The verification analysis using Receiver Operating Characteristic (ROC) curves and the Areas Under the Curve (AUC) revealed that the ensemble model with the capability of computing the weights of factors and their categories is more efficient than frequency ratio. The success and prediction rates for the frequency ratio and ensemble model were found to be 79.2 and 75.72%, and 85.16 and 82.92%, respectively. Further, the results suggest that more than one-third of the study area falls into the high and very high hazard classes, and the conditioning factors of land use, soil types, and distance from roads play major roles in fire occurrence and distribution in the study area.

Keywords: Chaharmahal and Bakhtiari, GIS, modeling, Zagros forests.