مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هفدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۴
ص ۱۴۳-۱۲۵
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.437484.1968
CC BY 4.0

مدل‌سازی مکانی حساسیت‌پذیری آتش‌سوزی براساس تأثیر جادهٔ جنگلی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در جنگل‌های غرب استان مازندران

سید عطاءاله حسینی[۱*]، نیما شفیعی کیگاسری[۲] و حمیدرضا پورقاسمی[۳]

[۱] استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
[۲] دانش‌آموختهٔ دکتری عمران و بهره‌برداری جنگل، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
[۳] استاد بخش علوم خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸)

چکیده

مقدمه: جنگل‌های هیرکانی به لحاظ ارزش‌های زیستی و اکوسیستمی، از دارایی‌های بیولوژیکی گرانبها به شمار می‌روند. آتش‌سوزی در عرصه‌های منابع طبیعی از بحران‌هایی است که خسارت‌های جبران‌ناپذیری به بوم‌سازگان وارد می‌کند. هدف این پژوهش، بررسی و مدل‌سازی ارتباط مکانی شبکهٔ جاده‌های جنگلی و حساسیت‌پذیری آتش‌سوزی است.

مواد و روش‌ها: عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی شامل کاربری اراضی، فاصله از جاده، ارتفاع از سطح دریا، خاک، تیپولوژی، تراکم جاده، اقلیم و جهت شیب جاده‌های موجود بررسی و نقشهٔ حساسیت آنها با استفاده از روش یادگیری ماشین مدل‌سازی جنگل تصادفی و روش آماری آنتروپی بیشینه تولید شد. با ارزیابی مدل‌های مورد استفاده توسط منحنی‌های مشخصهٔ عملکرد و سطح زیر منحنی و منحنی‌های پاسخ و آزمون جک نایف، درصد اهمیت هر پارامتر در وقوع آتش‌سوزی و میزان اثرگذاری هر پارامتر در مدل‌سازی تعیین شد.

یافته‌ها: درصد اهمیت و مشارکت عوامل مؤثر در پتانسیل آتش‌سوزی برمبنای روش حداکثر آنتروپی نشان‌دهندهٔ آن است که تأثیرگذارترین متغیرها بر مدل حساسیت‌پذیری وقوع آتش‌سوزی عبارت‌اند از ارتفاع از سطح دریا با ۷۶ درصد، فاصله از جاده با ۹/۱ درصد و کاربری اراضی با ۵/۴ درصد. برمبنای مدل‌سازی تصادفی نیز به‌ترتیب بیشترین اثر را پارامترهای ارتفاع از سطح دریا با میانگین ۰/۱ درصد، فاصله از جاده با ۰/۹ درصد و کاربری اراضی و پوشش گیاهی با ۰/۴ درصد دارند. منحنی پاسخ فاصله از جاده و تراکم جاده بیانگر افزایش رخداد آتش‌سوزی نزدیک به جاده است و جاده‌ها نقش بسزایی در وقوع آتش‌سوزی در منطقه دارند.

نتیجه‌گیری: نقشه‌های حساسیت‌پذیری مکانی آتش‌سوزی نشان می‌دهد که فاصله از جاده، عامل مهمی است که تأثیر زیادی بر پتانسیل آتش‌سوزی دارد، یعنی می‌تواند بر افزایش رخداد و برعکس بر مهار آتش تأثیر بگذارد.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی، جاده، جنگل غرب مازندران، مدل‌سازی تصادفی.

[*] نویسندهٔ مسئول
شماره تماس: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۲
ایمیل: At.hosseini@ut.ac.ir

مقدمه

جنگل یکی از مواهب الهی است که عملکرد آن، اثری نقش مهم و اساسی در حفظ تعادل اکولوژیک دارد. جنگل‌های هیرکانی شمال کشور به لحاظ قدمت تکاملی و تحولاتی که پشت سر گذاشته‌اند، ارزش فراوانی دارند و از جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده‌اند که از نظر تنوع گیاهی جزو جنگل‌های غنی جهان محسوب می‌شوند. قدمت جنگل‌های شمال ایران ۲۵ تا ۵۰ میلیون سال است. پیشینهٔ این جنگل‌ها به دوران سوم زمین‌شناسی بازمی‌گردد، در صورتی که قدمت جنگل‌های راش و بلوط اروپای مرکزی کمتر از ۱۰ هزار سال است، جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران کانون تنوع زیستی محسوب می‌شوند (Marvi Mohajer, 2007). آتش‌سوزی جنگل‌ها که در مناطق مختلف جهان رخ می‌دهد، فاجعه‌ای اقتصادی و دارای اثرهای محیط زیستی (Burgess, 2011) است و از مخرب‌ترین حوادثی است که در سال‌های اخیر رخ داده و موجب خسارات جانی و مالی شده است (Najafi et al., 2016). بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶، حدود ۴۲۲۵۰۰۰ کیلومتر مربع زمین در جهان به‌دلیل آتش‌سوزی‌های کنترل‌ناپذیر سوخته است (Abdusalomov et al., 2023). جنگل‌های شمال کشور جزو مناطق پرخطر از نظر وقوع آتش‌سوزی هستند (Hajimohammadi et al., 2017). در دهه‌های اخیر به‌ویژه در فصل گرم سال و هنگام برگ‌ریزان، تعداد رخدادهای آتش‌سوزی در غرب مازندران افزایش یافته است. این حادثه در مدتی کوتاه به پوشش‌های گیاهی خاک و زندگی موجودات زنده آسیب جدی می‌زند؛ بنابراین مدیریت مناسب و مؤثر برای مقابله با رخداد آتش‌سوزی در این مناطق همواره ضرورت دارد (Eskandari & Easkandari, 2021). آتش از سوخت‌های طبیعی موجود مثل لاشبرگ‌ها، شاخ و برگ گیاهان، درختان و ... استفاده می‌کند و به‌راحتی در عرصه‌های طبیعی گسترش می‌یابد. رفتار آتش به بزرگی، جهت و شدت گسترش آن و شرایط محیطی شامل پوشش گیاهی (مادهٔ سوختنی)، توپوگرافی و آب‌وهوا بسیار وابسته است (Jain et al., 2020). پدیدهٔ آتش‌سوزی سبب از بین رفتن چوب، رستنی‌های کف جنگل، زادآوری‌ها و همچنین فرسایش خاک در اکوسیستم‌های جنگلی می‌شود. در دهه‌های اخیر شدت آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های جنگلی در حال افزایش است که علت اصلی آن دخالت‌های بشری از جمله تغییرات بی‌رویهٔ کاربری اراضی است (Lymberopoulos et al., 1996).

فعالیت انسان در جنگل به‌واسطهٔ تغییر کاربری اراضی سبب شده است که امکان رخداد آتش‌سوزی به‌طور چشمگیری در سراسر جهان افزایش یابد (Ahmadi et al. 2020). تعیین عامل‌های مؤثر بر ایجاد و توسعهٔ آتش‌سوزی به‌منظور تشخیص به‌موقع و واکنش به آن ضروری است (Eshaghi & Shataeei., 2016; Eskandari, 2017; Chen et al., 2017; Pourghasemi et al., 2020) با این‌حال، افزون‌بر عامل انسانی در جنگل، عوامل اقلیمی و ... نیز در این فرایند مؤثرند (Jiao et al., 2023). در بسیاری از موارد، عوامل بیوفیزیکی مانند مقدار سوخت در دسترس آتش تنها عامل‌هایی هستند که در مدیریت بحران آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شوند، درحالی که انسان با ایجاد یا خاموش کردن حریق تأثیر مستقیمی در روند آتش‌سوزی جنگل‌ها دارد. بنابراین بهتر است هر دو دسته از عوامل (انسانی و طبیعی) در فرایند مدیریت آتش‌سوزی در نظر گرفته شوند (Abdusalomov et al., 2023). از مدل‌های متنوعی برای شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در جنگل استفاده شده است و در نتایج به‌دست‌آمده، هر دو دسته عوامل بیوفیزیکی و انسانی حضور دارند. برای مثال، نتایج تحقیقات حاکی از وجود ارتباط معنی‌دار بین آتش‌سوزی جنگل‌ها، تراکم جاده‌ها و نوع کاربری کشاورزی است (Chavan et al., 2012). بیشتر عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل که در تحقیقات گذشته بررسی شده‌اند در دو گروه اصلی عامل‌های بیولوژیکی

یا به‌طور خلاصه بیوفیزیکی و اقتصادی- اجتماعی یا انسانی قرار می‌گیرند (Omidi et al., 2020). الگوی مکانی آتش‌سوزی‌های جنگل با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه برای فاکتورهای انسانی و بیوفیزیکی نشان داد که تعداد آتش‌سوزی‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل انسانی و گسترهٔ آنها تحت تأثیر ویژگی‌های بیوفیزیکی است (Pourghasemi et al., 2020). تاکنون مدل‌های زیادی همچون مدل ماشین بردار پشتیبان، مدل‌سازی تصادفی و شبکهٔ عصبی مصنوعی (Eshaghi & Shataeei , 2016) در مدل‌سازی آتش‌سوزی در جنگل‌های داخل کشور بررسی شده است. افزایش غیراصولی و غیرضروری جاده در جنگل سبب افزایش دسترسی مردم به داخل جنگل می‌شود و زمینهٔ افزایش رخداد آتش‌سوزی را فراهم می‌کند. براساس تحقیقات در جهان، عامل اصلی آتش‌سوزی در جنگل، دسترسی انسان است که از طریق جاده میسر است (Pourghasemi et al., 2020). از سوی دیگر در مناطق مستعد حریق با پوشش مناسب که در فواصل کمتر از یک کیلومتری جاده‌ها قرار دارند، لکه‌های ناشی از آتش‌سوزی به‌علت سهولت و افزایش سرعت دسترسی برای اطفای حریق، مساحت کوچک‌تری از نقاط دورتر از جاده‌ها دارند. بنابراین توسعهٔ مدل‌های آماری که تأثیر آتش‌سوزی را در اراضی جنگلی برآورد کنند، در مدل‌های تصمیم‌گیری و مدیریت جنگل اهمیت دارد (Abdusalomov et al., 2023). می‌توان گفت جنگل‌های طبیعی در معرض مخاطرات متعددی قرار دارند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکدیگر در ارتباط‌اند. عوامل مختلفی بر احتمال آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال کشور تأثیر دارد، اما شدت تأثیر این عوامل در بخش‌های مختلف جنگل متفاوت است. در بیشتر پژوهش‌های گذشته، به اهمیت احداث جاده در مناطق جنگلی و اثرگذاری آن بر مخاطرات آتش‌سوزی جنگل کمتر توجه شده است. تحقیقات پیشین اغلب بر تأثیر عوامل انسانی یا طبیعی بر وقوع آتش‌سوزی‌ها تمرکز داشته‌اند، اما ارتباط و تعامل این دو دسته از عوامل به‌صورت جامع بررسی نشده است. همچنین در تحقیقات قبلی به اثر شبکهٔ جاده‌ها کمتر توجه شده است. در این تحقیق، با بهره‌گیری از روش‌های علمی و تحلیل دقیق، نوآوری‌های زیر معرفی و بررسی شده‌اند:

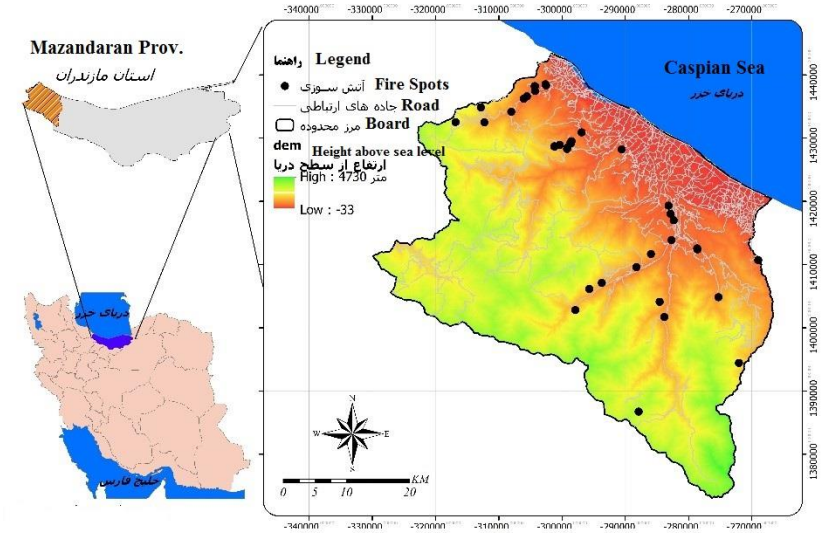
الف) استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی برای تحلیل ارتباطات بین متغیرهای مختلف و تأثیر آنها بر وقوع آتش‌سوزی که گذشته از شناخت بهتر اثرهای هر عامل بر وقوع آتش‌سوزی، امکان پیش‌بینی و مدیریت بهتر رخداد آتش‌سوزی در مناطق جنگلی را نیز فراهم می‌کند؛ ب) معرفی معیارهای مؤثر در وقوع حریق در مناطق جنگلی. از این‌رو هدف این پژوهش ترکیب دقیق نقشه‌های رستری با داده‌های میدانی به‌دست‌آمده از مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها و تحلیل دقیق‌تر و به تصویر کشیدن الگوهای وقوع آتش‌سوزی در تشخیص مناطق حساس به آتش‌سوزی و همچنین بررسی و مدل‌سازی ارتباط مکانی شبکهٔ جاده‌های جنگلی و رخداد آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشین در محدودهٔ شهرستان‌های تنکابن و رامسر است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ پژوهش شامل جنگل حوضه‌های آبخیز شمارهٔ ۳۰ تا ۳۶ در استان مازندران، حوزهٔ ادارهٔ کل منابع طبیعی شهرستان نوشهر است که از نظر مختصات جغرافیایی بین طول شرقی "۳۳ '۱۹ ۵۰ تا "۲۸ '۱۳ ۵۰ و عرض شمالی "۲۳ '۱۹ ۳۶ تا "۱۴ '۵۷ ۳۶ واقع شده است (شکل ۱). میزان جاده‌های موجود در طرح‌های جنگلداری ۴۸۱ کیلومتر است. مساحت کل منطقهٔ پژوهش براساس مطالعات طرح جامع جنگل‌های شمال کشور اعم از جنگل، بیشه‌زار، مرتع و زراعی ۲۵۱۹۵/۶۷ هکتار اعلام شده است. حداقل ارتفاع از سطح دریا ۱۰۰ متر و حداکثر ارتفاع

از سطح دریا ۳۵۲۰ متر است. مساحت کل منطقهٔ پژوهش براساس مطالعات طرح جامع جنگل‌های شمال کشور اعم از جنگل، بیشه‌زار، مرتع و زراعی ۲۳۴۱۰۰ هکتار اعلام شده است. حداقل ارتفاع از سطح دریا در منطقه که شامل جنگل است ۱۵۰ متر است که تا ارتفاع ۳۵۰ متر از سطح دریا شامل جنگلکاری‌های سنوات گذشته با گونه‌های پهن‌برگ مانند بلندمازو *Quercus castaneifolia* C.A. Mey.، پلت *Acer velutinum* Boiss. و توسکای ییلاقی *Alnus subcordata* C.A.Mey. به‌صورت آمیخته یا گاه توده‌های دست‌کاشت خالص است و جنگل‌های طبیعی آن از ارتفاع ۳۵۰ متری از سطح دریا تا ارتفاع ۱۹۰۰-۲۰۰۰ متری و گاه تا حدود ارتفاعی ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ و در حاشیهٔ دره‌ها تا ارتفاع ۲۸۰۰ متری از سطح دریا نیز گسترش دارد. متوسط بارش سالانه ۱۰۰۰ میلی‌متر است که بیشترین مقدار در قسمت‌های غربی و کمترین مقدار در نواحی شرقی است. طول دورهٔ خشکی نیز از غرب به شرق افزایش می‌یابد، به‌طوری که متوسط دورهٔ خشک در غرب یک ماه و در مناطق مرکزی دو ماه است و در نواحی شرقی گاهی به سه ماه در سال هم می‌رسد. از نظر خاک‌شناسی، خاک‌های جنگل‌های شمال اغلب تحول‌یافته و از نظر تیپ شامل خاک‌های رندزین، قهوه‌ای جنگلی و رانکر در ارتفاعات بالا است. منطقهٔ پژوهش در طبقهٔ اقلیمی معتدل خیلی مرطوب با میانگین بارندگی سالانهٔ ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر قرار دارد (Natural Resources & Watershed Organization, 2007).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش
Figure 1. Location of the study area

شیوهٔ اجرای پژوهش

پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع تحت بررسی از نوع مطالعات کاربردی است. ابتدا داده‌های لازم شامل نقشه‌های خاک‌شناسی (نوع بافت خاک از نظر نگهداشت رطوبت و خشکی خاک در تشدید آتش‌سوزی نیز می‌تواند مؤثر باشد)، واحدهای زمین‌شناسی (واحدهای سنگی کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل و رسوبات آبرفتی کواترنر با ضخامت زیاد تأثیر مثبتی بر حساسیت وقوع آتش‌سوزی می‌گذارند که از دلایل آن می‌توان به جذب آب در این واحدها اشاره کرد؛ این بدان معناست که در مناطق دارای سنگ‌ها و خاک‌های خشک، احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتر است)، پراکنش جاده‌ها، شیب، جهت، ارتفاع، کاربری اراضی (مرتع، زمین کشاورزی، باغ، جنگل، مناطق مسکونی، پهنه‌های آبی) و اقلیم (سرد و خشک، سرد و مرطوب، مرطوب و معتدل، مرطوب و نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و

معتدل) جمع‌آوری شد. همچنین برای محاسبهٔ میانگین تراکم و مقدار سبزی پوشش گیاهی از محصول ۱۶ روزه ماهوارهٔ لندست ۸ در دامنهٔ زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در محیط سامانهٔ گوگل ارث انجین استفاده شد.

سپس اطلاعات آتش‌سوزی‌های رخداده در منطقه جمع‌آوری شد. برای جمع‌آوری مشخصات این رخداد مانند مساحت و موقعیت، بازدید صحرایی در عرصهٔ تحت بررسی صورت گرفت و داده‌های پراکنش آتش‌سوزی تهیه شد. داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش به دو روش مراجعه به عرصه و مراجعه به مراکز اطلاعاتی گردآوری شد. در مرحلهٔ اول با مراجعه به ادارهٔ کل منابع طبیعی شهرستان نوشهر، اطلاعات پایه همچون نقشه‌های موقعیت آتش‌سوزی منطقه در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰، جاده‌های احداثی منطقه و طرح‌های بهره‌برداری و جنگلکاری گردآوری شد. سپس براساس بازدیدهای میدانی در مجموع ۳۸ نقطهٔ آتش‌سوزی در منطقه مشخص و موقعیت آنها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی برداشت شد.

با توجه به یافته‌های داخلی و خارجی در زمینهٔ مدل‌سازی آتش‌سوزی، از مدل‌سازی تصادفی در نرم‌افزار (RStudio) r و آنتروپی بیشینه در نرم‌افزار maxent استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های یادگیری ماشین، داده‌ها به دو گروه تعلیمی و آزمایشی (ارزیابی) تقسیم شد. در حالت کلی ۷۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و واسنجی و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل‌های مذکور استفاده شد (Pourghasemi et al., 2020). پس از تعیین نمونهٔ تعلیمی، داده‌های آتش‌سوزی وارد نرم‌افزارهای r و maxent شد و مدل‌سازی آتش‌سوزی با استفاده از مدل‌سازی تصادفی (پکیج راندوم فارست) و آنتروپی بیشینه (پکیج دیسمو) انجام گرفت.

در مدل آنتروپی بیشینه داده‌های وقوع آتش‌سوزی ابتدا در نرم‌افزار arcgis به فرمت ascii تبدیل و وارد نرم‌افزار شد. عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی بر دو دسته‌اند: ۱. عوامل طبیعی شامل زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، جهت شیب، درجهٔ شیب، ارتفاع از سطح دریا و اقلیم؛ ۲. عوامل انسانی شامل فاصله از جاده‌ها و کاربری اراضی. موارد به‌صورت لایه‌های ascii به مدل وارد و اهمیت عوامل مؤثر بر رخداد آتش‌سوزی در این مدل با استفاده از آزمون جک نایف[1] تعیین شد. توزیع احتمال این روش به‌صورت نمایی و براساس تقسیم مجموع وزن متغیرهای محیطی بر یک مقیاس ثابت برآورد می‌شود، به‌طوری که مقادیر احتمال بین صفر و ۱ قرار می‌گیرد و مجموع احتمالات برابر ۱ می‌شود. در این روش به‌صورت چرخشی هر عامل به‌طور آگاهانه از گردونهٔ مدل‌سازی حذف شده و با استفاده از بقیهٔ عوامل، مدل ساخته می‌شود. سپس عملکرد پیش‌بینی مدل ایجادشده با استفاده از تمام عوامل با مدل ساخته‌شده از بقیهٔ عوامل مقایسه می‌شود؛ در نتیجه، توزیع عامل حذف‌شده قابل آزمون است. مدل‌سازی تصادفی نیز در واقع یک مدل یادگیری ماشین الحاقی از درخت رگرسیون است که اولین بار توسط Breiman et al. (1984) ایجاد و توسعه داده شد. الگوریتم مدل‌سازی تصادفی مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است و در حال حاضر از بهترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. در این شیوه، متغیرهای مستقل مانند عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری به مدل وارد شده و در نهایت رخداد آتش‌سوزی به‌عنوان یک تصمیم در نظر گرفته می‌شود. این مدل برای طبقه‌بندی یک شیء جدید بردار ورودی را در انتهای هر یک از درختان مدل‌سازی تصادفی قرار می‌دهد و هر درخت به یک طبقه‌بندی منجر می‌شود که گفته می‌شود این درخت به آن طبقه «رأی» می‌دهد. در نتیجه جنگل حاصل از طبقه‌بندی که بیشترین رأی را داشته باشد (بین همهٔ درخت‌های جنگل) انتخاب می‌شود (Dimopoulou et al., 2004). برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص سطح زیرمنحنی[2] برای منحنی مشخصهٔ عملکرد[3] استفاده

1. Jackknife
2. Area Under the ROC Curve
3. Receiver Operating Characteristic

شد. این منحنی از متداول‌ترین روش‌های آماری است که برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی کاربرد گسترده‌ای دارد (Breiman et al., 1984). سطح زیر منحنی برابر با احتمال قدرت تشخیص میان نقاط حضور و نبود توسط یک مدل (Omidi et al., 2020) و نمایانگر اعتبار مدل است. مرحلهٔ نهایی، اعتبارسنجی مدل است. در ارزیابی به روش منحنی مشخصهٔ عملکرد هرچه سطح زیر منحنی بیشتر باشد، دقت مدل بیشتر است. این میزان بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است (Eskandari et al., 2020). روش رگرسیون خطی در این تحقیق به‌دلیل سادگی و قابلیت تفسیر، قابلیت تحلیل تأثیر چند متغیر مستقل، تشخیص رابطهٔ خطی در داده‌ها و امکان بررسی اطلاعات کامل از متغیرها انتخاب شد. این روش امکان پژوهش و تحلیل دقیق تأثیرات را برای محققان فراهم می‌کند و در عین‌حال با معیارهای تحمل و عامل تورم واریانس سازگاری دارد و بدین ترتیب تضمین‌کنندهٔ اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی است. نقشه‌های نهایی براساس مدل مخدوم و متناسب با ارزیابی مقالات در این زمینه به پنج طبقهٔ حساسیت مکانی (از کم تا خیلی زیاد) طبقه‌بندی شدند (Makhdoom et al., 2003).

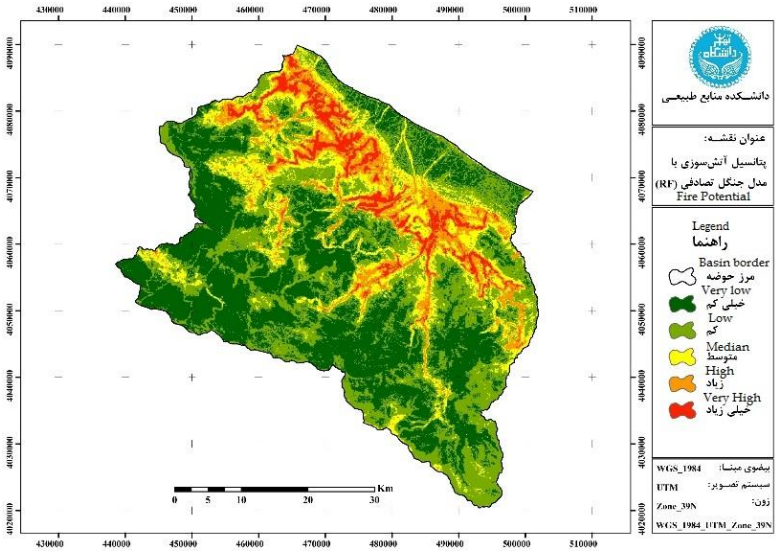
نتایج

پارامترهای طبیعی و غیرطبیعی زیادی از جمله عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسانی (احداث جاده) در وقوع آتش‌سوزی در اراضی جنگلی مؤثرند. امروزه پیش‌بینی مکان و زمان آتش‌سوزی در اراضی جنگلی مورد توجه محققان قرار گرفته است. مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی نیز شناسایی و در ادامه نتایج ارائه می‌شود.

پیش‌بینی مدل‌سازی تصادفی

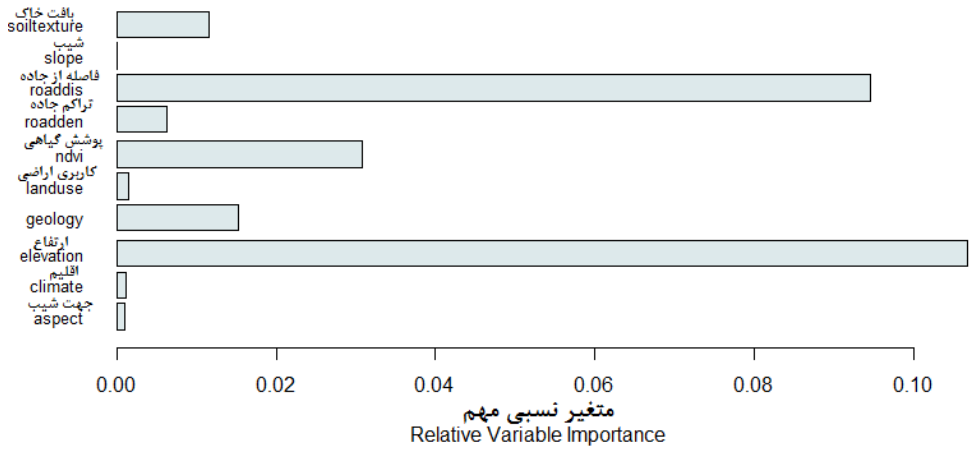
براساس نتایج حاصل از شکل ۲، طبقهٔ خیلی زیاد نسبت به بقیهٔ طبقه‌ها دارای بیشترین تعداد رخداد آتش‌سوزی (۲۲ رخداد)، بیشترین میانگین درصد آتش‌سوزی (۴۰/۶ درصد) و کمترین مساحت متوسط (میانگین ۲۵۰۰۰ هکتار) است. این نتایج نشان‌دهندهٔ احتمال رخداد بسیار زیاد حریق در این مناطق است. در مقابل، طبقهٔ خیلی کم با تنها ۲ رخداد، میانگین درصد آتش‌سوزی ۳/۲ درصد و مساحت بسیار بزرگ (میانگین ۱۰۰هزار هکتار) نشان‌دهندهٔ اهمیت کمتر این منطقهٔ در معرض رخداد آتش‌سوزی است. نمودار درصد مشارکت پارامترهای مؤثر (شکل ۳) نیز نشان می‌دهد که متغیر فاصله از جاده از اهمیت بیشتری برخوردار است، به‌طوری که در مناطق حاشیهٔ جاده‌ها با میزان ۰/۰۹ درصد احتمال وقوع آتش‌سوزی وجود دارد و با نزدیکی به جاده‌ها وقوع آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد که ارتفاع از سطح دریا نیز عاملی تأثیرگذار در رخداد آتش‌سوزی است، به‌طوری که هرچه از ارتفاع از سطح دریا کاسته می‌شود، به‌علت دسترسی و هموار بودن نقل و انتقالات جاده‌ای تأثیرگذاری در رخداد آتش‌سوزی‌ها به همان نسبت به میزان ۰/۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

تحلیل جدول ۱ نشان می‌دهد که مساحت و درصد پتانسیل آتش‌سوزی در هر طبقه براساس مدل‌سازی تصادفی به‌ترتیب از خیلی کم تا خیلی زیاد تغییر می‌کند (طبقهٔ خیلی کم با مساحت ۱۴۴۰۴۲/۳۳ هکتار و درصد ۶۲/۲۱ از کل مساحت، طبقهٔ کم با ۳۷۶۳۴/۷۵ هکتار و ۱۶/۲۵ درصد از کل مساحت، طبقهٔ متوسط با ۲۴۱۹۳/۳۹ هکتار و ۱۰/۴۵ درصد از کل مساحت، طبقهٔ زیاد با ۱۴۴۹۳/۷۷ هکتار و ۶/۲۵ درصد از کل مساحت و طبقهٔ خیلی زیاد با ۱۱۱۹۵/۱۰ هکتار و ۴/۸۳ درصد از کل مساحت). ارزیابی منحنی مشخصهٔ عملکرد و سطح زیر آن برای مدل پیش‌بینی نقشهٔ مکانی حساسیت‌پذیری آتش‌سوزی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشهٔ پتانسیل آتش‌سوزی با مدل‌سازی تصادفی

Figure 2. Wildfire potential map using the Random Forest model



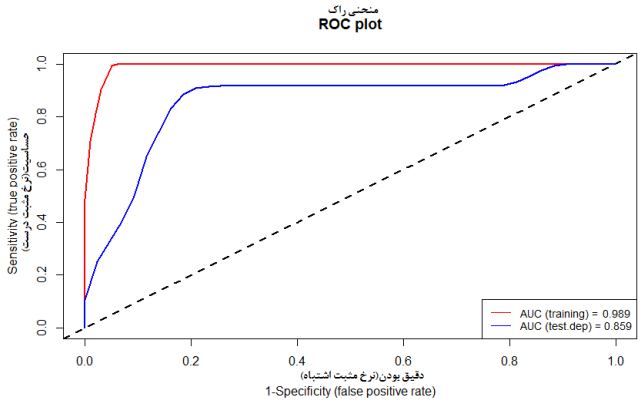
شکل ۳- درصد تأثیر عوامل در پیش‌بینی پتانسیل آتش‌سوزی با استفاده از مدل‌سازی تصادفی

Figure 3. Percentage of factor influence in predicting wildfire potential using the Random Forest model

جدول ۱- مساحت و درصد پتانسیل آتش‌سوزی هر طبقه نسبت به کل مساحت منطقه براساس مدل‌سازی تصادفی

Table 1. Area and percentage of wildfire potential for each class relative to the total area of the region based on the Random Forest model

طبقات classes	مساحت هر طبقه (هکتار) Area of each class in hectares	مساحت هر طبقه (درصد) Percentage of area for each class
very low خیلی کم	144042.33	62.21
low کم	37634.75	16.25
moderate متوسط	24193.39	10.45
high زیاد	14493.77	6.26
very high خیلی زیاد	11195.1	4.83



شکل ۴- منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) مدل‌سازی تصادفی در پیش‌بینی پتانسیل آتش‌سوزی

Figure 4. Receiver Operating Characteristic (ROC) curve of the Random Forest model in predicting wildfire potential

براساس شکل ۴، مقدار سطح زیرمنحنی[1] برای مدل‌سازی تصادفی در مرحلهٔ آموزش ۰/۹۸۹ و در مرحلهٔ آزمون ۰/۸۵۹ به‌دست آمده است. این نتایج نشان‌دهندهٔ دقت بسیار زیاد مدل در تشخیص و پیش‌بینی پتانسیل آتش‌سوزی در دو مرحلهٔ مختلف است. این دقت بسیار مهم است، زیرا نشان می‌دهد که مدل توانایی خوبی در تمایز بین دسته‌های مثبت و منفی دارد و به‌خوبی نمونه‌های آتش‌سوزی را تشخیص می‌دهد.

پیش‌بینی مدل آنتروپی بیشینه در پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی

شکل ۵ نشان می‌دهد که نواحی همجوار شبکهٔ جاده‌های جنگلی، به‌طور معمول در معرض رخداد آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که جاده مهم‌ترین عامل در آتش‌سوزی‌های رخداده در منطقه است و باید در کاهش این معضل برنامه‌ریزی کرد. نواحی دارای پتانسیل وقوع آتش‌سوزی سهم بزرگی از مناطق حساس را به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر ترکیب فعالیت‌های انسانی و طبیعی در وقوع آتش‌سوزی است. بر طبق شکل ۵ پتانسیل وقوع آتش‌سوزی با استفاده از مدل آنتروپی بیشینه نیز نشان داد که بیشینهٔ فاصله از جاده با ۰/۹ درصد و کاربری اراضی و تراکم پوشش درختان با ۰/۵ درصد مهم‌ترین عوامل در وقوع آتش‌سوزی‌اند. براساس آزمون جک نایف نیز پارامترهای طبقات ارتفاعی با ۰/۸ درصد و تراکم پوشش درختان و جاده‌ها با ۰/۶ درصد در وقوع آتش‌سوزی اثرگذاری بیشتری دارند.

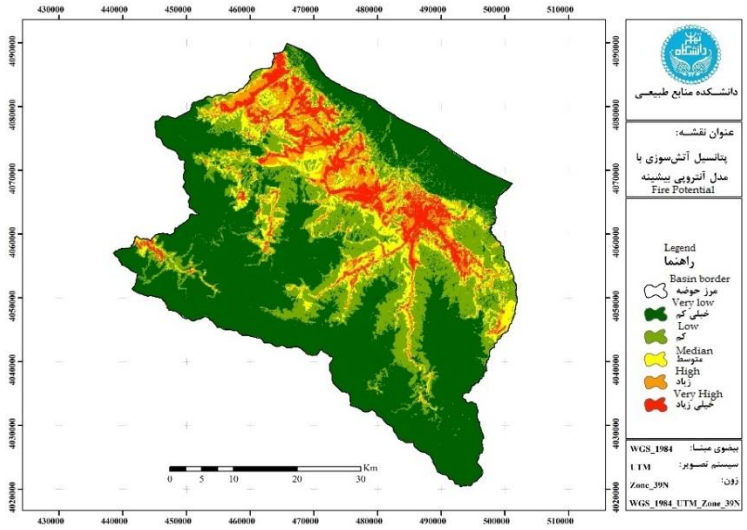
تحلیل جدول ۲ نشان می‌دهد که مساحت و درصد پتانسیل آتش‌سوزی در هر طبقه نسبت به کل مساحت منطقهٔ گسترده‌ای از خیلی کم تا خیلی زیاد تغییر می‌کند. در طبقهٔ خیلی کم، با مساحت ۱۴۴۲۳۱/۳۸ هکتار و درصد ۶۲/۲۹ درصد از کل مساحت، طبقهٔ کم نیز با ۳۷۹۴۹/۶۱ هکتار و ۱۶/۳۹ درصد از کل مساحت، طبقهٔ متوسط با ۲۴۱۸۱/۴۲ هکتار و ۱۰/۴۴ درصد از کل مساحت، طبقهٔ زیاد با ۱۴۰۶۵/۳۰ هکتار و ۶/۰۷ درصد از کل مساحت و در نهایت، طبقهٔ خیلی زیاد با ۱۱۱۳۰/۳۷ هکتار و ۴/۸۱ درصد از کل مساحت به ترتیب کمترین تا بیشترین پتانسیل آتش‌سوزی را دارند.

ارزیابی مدل آنتروپی بیشینه در پیش‌بینی پتانسیل آتش‌سوزی

در شکل ۶، محور افقی نشان‌دهندهٔ آستانه پیش‌بینی و محور عمودی نشان‌دهندهٔ میزان خطای جاافتادگی است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آستانهٔ پیش‌بینی، میزان خطای جاافتادگی کاهش می‌یابد، اما ممکن است خطای تشخیص افزایش یابد؛ بنابراین، انتخاب آستانه مناسب نیازمند توازن بین این

1. Area Under the ROC Curve

دو خطاست. آستانهٔ ۰/۶ با خطای جاافتادگی ۰/۲۵ و خطای تشخیص ۰/۱۵ به‌عنوان گزینهٔ بهینه شناسایی شد. به‌طوری که نزدیکی خطای جاافتادگی به خط اصلی و خط آموزش به خط جاافتادگی نشان‌دهندهٔ بهینگی و دقت زیاد مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد آتش‌سوزی است.



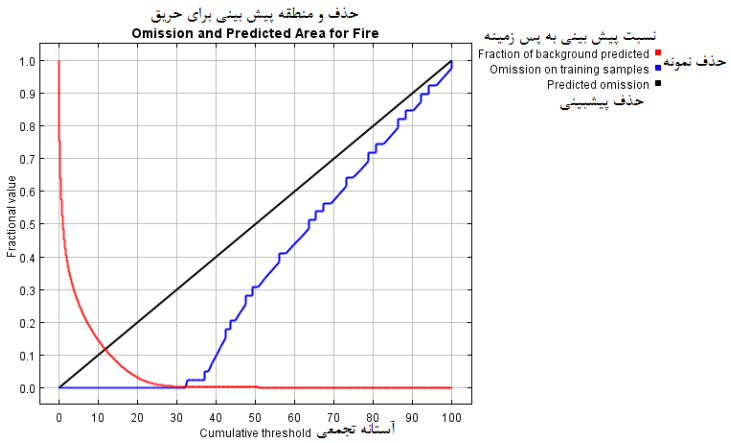
شکل ۵- نقشهٔ پتانسیل آتش‌سوزی براساس روش آنتروپی بیشینه

Figure 5. Wildfire potential map based on the maximum entropy method

جدول ۲- مساحت و درصد پتانسیل آتش‌سوزی هر طبقه نسبت به کل مساحت منطقه برمبنای روش حداکثر آنتروپی

Table 2. Area and percentage of wildfire potential for each class relative to the total area of the region based on the maximum entropy method

طبقات classes	مساحت هر طبقه (هکتار) Area of each class in hectares	مساحت هر طبقه (درصد) Percentage of area for each class
very low خیلی کم	144231.38	62.29
low کم	37949.61	16.39
moderate متوسط	24181.42	10.44
high زیاد	14065.3	6.07
very high خیلی زیاد	11130.37	4.81



شکل ۶- منحنی خطای جاافتادگی مدل MaxEnt برای پیش‌بینی آتش‌سوزی

Figure 6. Error-occurrence curve of the MaxEnt model for predicting wildfires

درصد مشارکت و اهمیت عوامل مؤثر در مدل‌سازی آتش‌سوزی

میزان تأثیر هر کدام از پارامترها با استفاده از میزان مشارکت متغیرهای مستقل در پهنه‌بندی نقشهٔ مکانی حساسیت‌پذیری آتش‌سوزی محاسبه شد. درصد مشارکت و اهمیت هر یک از عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی نیز با استفاده از مدل آنتروپی بیشینه[1] به‌دست آمد (جدول ۳). با توجه به جدول ۳، درصد مشارکت متغیرهای به‌کارگرفته‌شده در مدل نشان‌دهندهٔ آن است که بیشترین متغیرهای تأثیرگذار بر مدل وقوع رخداد آتش‌سوزی به‌ترتیب ارتفاع (۷۶ درصد)، فاصله از جاده (۹/۱ درصد)، کاربری اراضی (۵/۴ درصد)، بافت خاک (۴/۵ درصد)، زمین‌شناسی (۲/۸ درصد)، اقلیم (۱/۶ درصد)، جهت شیب (۰/۴ درصد) و مقدار شیب (۰/۲ درصد) هستند. براساس نتایج جدول ۳، نقش ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، پوشش گیاهی و بافت خاک در وقوع آتش‌سوزی با مطالعات میدانی که بیانگر تغییرات کاربری و جاده‌سازی‌ها در منطقهٔ پژوهش بوده مطابقت دارد.

عوامل مؤثر در پتانسیل آتش‌سوزی (جدول ۳)، در تحلیل و پیش‌بینی آتش‌سوزی در منطقه اهمیت بسیار زیادی دارند. ارتفاع از سطح دریا با اهمیت ۳۵ درصدی به‌شکل طبیعی بر شرایط اقلیمی منطقه تأثیر گذاشته است. به‌طوری که مناطق پرارتفاع (۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر) دمای کمتر و رطوبت بیشتر داشته‌اند که این امر می‌تواند پتانسیل آتش‌سوزی را کاهش دهد. در این مورد، ترکیب متغیرهای مختلف، از جمله زمین‌شناسی، ارتفاع و عوامل دیگر سبب شد که پتانسیل آتش‌سوزی در منطقه به‌درستی تخمین زده شده و برنامه‌های مناسبی برای پیش‌بینی و کنترل آتش‌سوزی در نظر گرفته شود. فاصله از جاده با اهمیت ۲۰/۴۵ درصدی از عوامل مهم مؤثر در تعیین پتانسیل آتش‌سوزی در منطقه است. فاصلهٔ منطقه از جاده هم در دسترسی به مناطق آتش‌سوزی و هم در تعداد آتش‌زاهای احتمالی اثر مهمی دارد. مناطقی که به جاده‌ها نزدیک‌ترند، به‌راحتی در دسترس عوامل مختلف از جمله تردد انسانی و حمل‌ونقل هستند. این وضعیت ممکن است سبب افزایش احتمال وقوع آتش‌سوزی شود. فاصلهٔ کمتر از جاده، تراکم ساخت‌وساز در این مناطق را نیز افزایش می‌دهد و سبب متراکم‌تر شدن مسکونی و تجاری منطقه می‌شود. به‌عبارت دیگر، تراکم جاده سبب شده است که مساحت منطقه به ساخت‌وساز و تردد انسانی واکنش نشان دهد که این عوامل گاه موجب افزایش خطر آتش‌سوزی در منطقه شده است. کاربری اراضی نیز با اهمیت ۱۹ درصدی اثر مهمی در تعیین پتانسیل آتش‌سوزی داشته است. نوع کاربری اراضی تراکم گیاهان خشکی و گیاهان محترقه را تعیین می‌کند. مناطقی با کاربری اراضی کشاورزی یا مناطق جنگلی پرتراکم با درختان شاداب ممکن است به‌طور طبیعی دارای تنش خشکی کمتری باشند و به‌تبع آن پتانسیل آتش‌سوزی آنها کمتر باشد. زمین‌شناسی نیز با اهمیت ۶/۹ درصدی در تعیین پتانسیل آتش‌سوزی از عوامل اصلی است. نوع زمین‌شناسی منطقه، تراکم گیاهان خشکی و بیابانی را تعیین می‌کند که می‌تواند منطقه را به عاملی خطرناک‌تر تبدیل کند.

جدول ۳- درصد اهمیت و مشارکت عوامل مؤثر در پتانسیل آتش‌سوزی برمبنای روش حداکثر آنتروپی

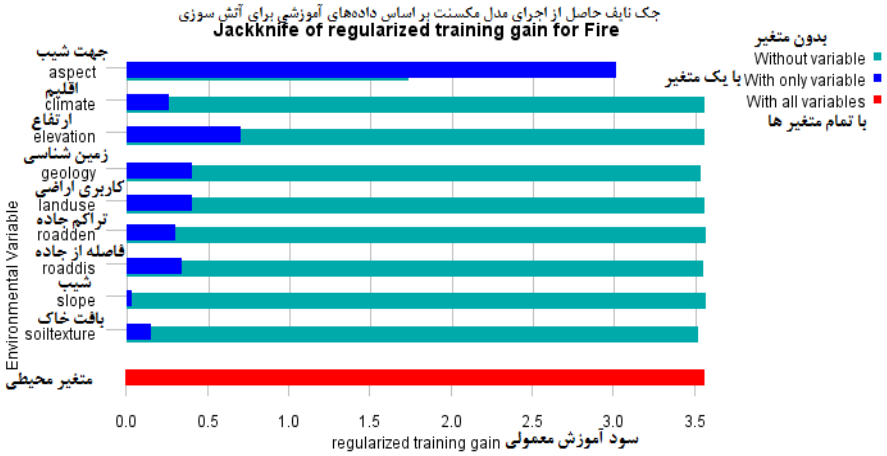
Table 3. Percentage of importance and contribution of factors affecting wildfire potential based on the maximum entropy method

اهمیت importance	مشارکت contribution	
76	35	ارتفاع از سطح دریا Elevation
9.1	20.45	فاصله از جاده Road distance
5.4	19	کاربری اراضی Land-use
4.5	16.3	بافت خاک Soil texture
2.8	6.9	زمین‌شناسی Geology
0.4	2.2	جهت شیب Aspect
1.6	0.1	اقلیم Climate
0.2	0.05	مقدار شیب Slope

1. Maximum Entropy Principle

آزمون جک نایف

آزمون جک نایف، حد تأثیر هر کدام از عوامل را در مدل‌سازی نشان می‌دهد. این آزمون در سه حالت بدون داده‌های آموزشی، با داده‌های آموزشی و برای مقادیر شاخص سطح زیرمنحنی به‌دست آمد (شکل ۷). با توجه به شکل ۷، میزان دسترسی بیشتر به سطح جنگل از طریق نزدیکی به جاده‌ها از جمله در مناطق کم‌ارتفاع، فاصلهٔ کمتر از جاده و دامنه‌های با شیب کمتر مورد توجه است و نقش مهمی در آتش‌سوزی دارد. با توجه به اینکه اغلب آتش‌سوزی‌های جنگل‌های شمال ایران عامل انسانی دارد، می‌توان تأثیر هر عامل در وقوع آتش‌سوزی را به عامل انسانی مرتبط دانست. مدل جک نایف که برمبنای آنتروپی بیشینه تولید شده است، به‌طور کلی به نتایج موفقیت‌آمیزی در تحلیل پتانسیل آتش‌سوزی منطقه منجر شده است. این مدل توانسته است تأثیر و عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی را به‌صورت جامع بررسی کند. از بین متغیرهای مدل، جهت شیب با ۳/۱ درصد، ارتفاع با ۰/۶ درصد، کاربری اراضی و زمین‌شناسی با ۰/۵ درصد و فاصله از جاده با ۰/۴ درصد، مهم‌ترین عوامل در تعیین پتانسیل آتش‌سوزی شناخته شده‌اند. تحلیل منحنی‌های پاسخ نیز اثر مهمی در تبیین روابط بین این عوامل و وقوع آتش‌سوزی دارد، به‌طور کلی، نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تحلیل دقیق و مدیریت پتانسیل آتش‌سوزی مستلزم درک دقیق تأثیرات متغیرهای مختلف است و مدل‌های برمبنای آنتروپی می‌توانند ابزارهای مؤثری برای تصمیم‌گیری و اقدام دربارهٔ پیش‌بینی و کنترل آتش‌سوزی در مناطق مختلف باشند.



شکل ۷- نمودار جک نایف حاصل از اجرای مدل مکسنت برای داده‌های آموزشی

Figure 7. Jackknife plot resulting from the execution of the MaxEnt model for training data

منحنی‌های پاسخ[1]

تأثیر هر کدام از عوامل در مدل‌سازی و محدودهٔ اثر آنها در منحنی‌های پاسخ مشاهده می‌شود. تحلیل منحنی پاسخ نشان داد که فاصله از جاده با ۲۳ درصد و ارتفاع با ۳۰ درصد مهم‌ترین متغیرها هستند (شکل ۹). به‌منظور ارزیابی نهایی مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی وقوع رخداد آتش‌سوزی جنگل در منطقهٔ پژوهش از سطح منحنی مشخصهٔ عملکرد استفاده شد (جدول ۴).

با توجه به جدول ۴، تئوری آنتروپی بیشینه در پیش‌بینی مخاطرات آتش‌سوزی نسبت به مدل‌سازی تصادفی در هر دو مرحلهٔ آموزش و آزمون عملکرد بهتری را نشان می‌دهد، زیرا تئوری آنتروپی بیشینه به‌طور معمول ویژگی‌های جدیدی از داده‌ها را استخراج می‌کند و در مواجهه با شرایط آتش‌سوزی، توانایی مدل

1. Response Curves

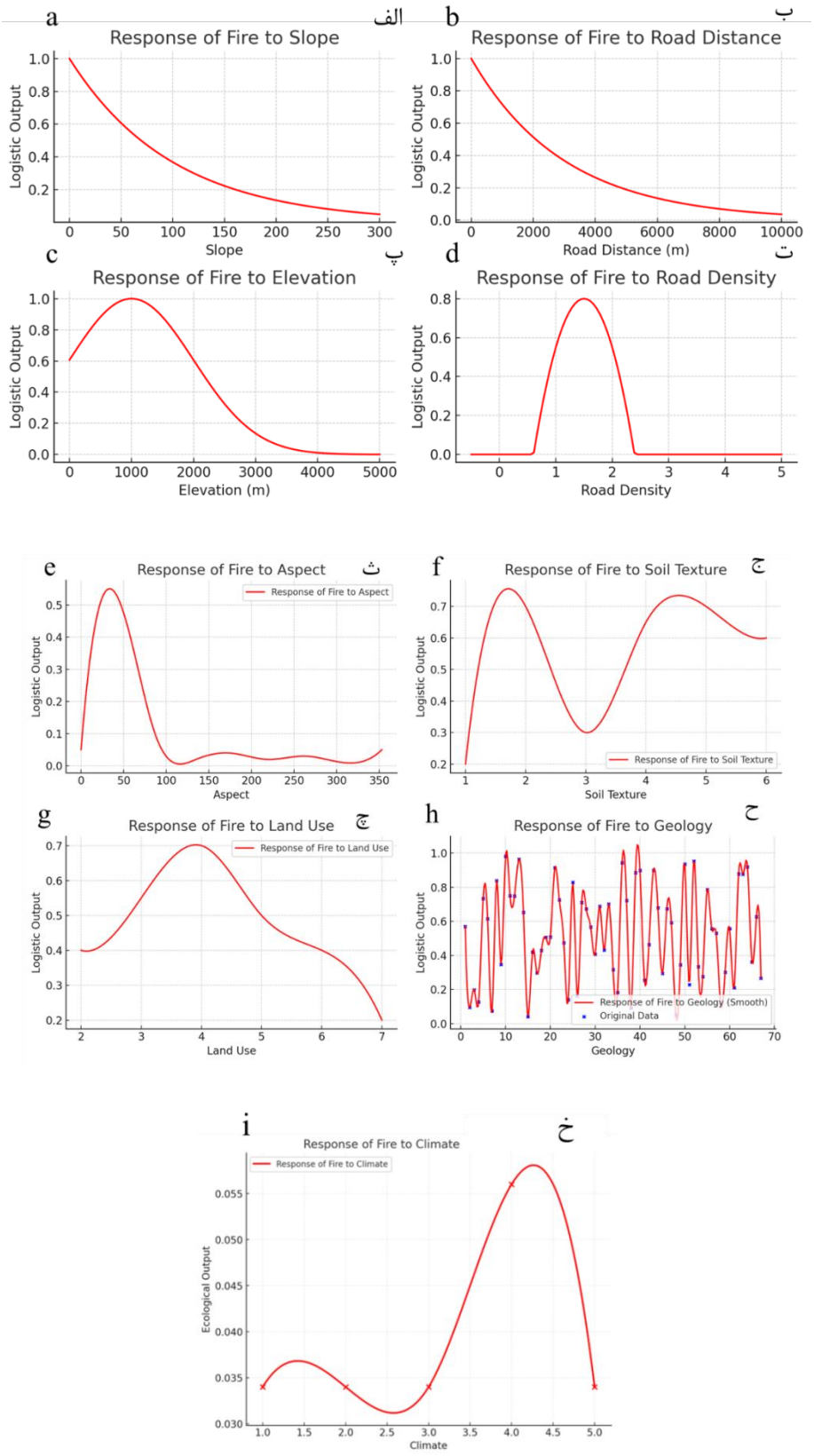
را در تفسیر الگوهای پیچیده‌تر ارتقا می‌بخشد. منحنی‌های پاسخ (شکل ۸) نشان می‌دهند که در ارتفاعات میان‌بند بیشترین اثر آتش‌سوزی وجود دارد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در این مناطق به‌دلیل دسترسی نسبی بیشتر وقوع رخداد آتش‌سوزی در جنگل بیشتر خواهد بود. منحنی پاسخ فاصله از جاده (۰/۹ درصد) نیز نشان می‌دهد که در مناطق قابل دسترس عوامل انسانی که مجاور جاده‌ها هستند احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتر خواهد بود و با فاصله گرفتن از جاده میزان آن کاهش پیدا می‌کند. منحنی پاسخ تراکم جاده (شکل ۸ ث) با میزان اثر ۰/۸ درصد نیز بیانگر آن است که مناطق دارای تراکم جاده‌ای بین $۱۰^{۳}×۱۲۸$ تا $۱۰^{۴}×۳۱۷$ متر هستند و احتمال وقوع آتش‌سوزی در کمترین حد قرار دارد. در منطقهٔ پژوهش و به‌طور نسبی با کم شدن تراکم جاده یعنی بین $۱۰^{۳}×۶۳۵$ تا $۱۰^{۴}×۱۲۷$ متر که اغلب در نواحی خالی از سکنه یا جاده‌های بین‌شهری و بین روستایی هستند، احتمال وقوع آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. منحنی پاسخ (شکل ۸ د) میزان شیب دامنه نیز نشان داد که در نواحی کم‌شیب، احتمال وقوع آتش‌سوزی زیاد است و با افزایش شیب به‌خصوص در مناطق پرشیب منطقهٔ پژوهش، احتمال آتش‌سوزی کاهش پیدا می‌کند. بقیهٔ عوامل نیز بر احتمال آتش‌سوزی تأثیر دارند، اما تأثیر آنها کمتر از فاصله از جاده و ارتفاع است. اقلیم تأثیر مثبتی بر احتمال آتش‌سوزی دارد؛ بدان معنا که در مناطق دارای دمای زیاد، رطوبت کم و وزش باد شدید، احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتر است. جهت شیب تأثیر منفی بر احتمال آتش‌سوزی دارد. در دامنه‌های دارای شیب رو به شمال یا غرب، احتمال آتش‌سوزی کمتر است. زمین‌شناسی تأثیر مثبتی بر احتمال آتش‌سوزی دارد و در مناطق دارای سنگ‌ها و خاک‌های خشک و قابل اشتعال، احتمال آتش‌سوزی بیشتر است. کاربری اراضی تأثیر مثبتی بر احتمال آتش‌سوزی دارد و در مناطق دارای کاربری اراضی با پوشش گیاهی کم، احتمال وقوع آتش‌سوزی بیشتر است. بافت خاک هم تأثیر مثبتی بر احتمال آتش‌سوزی دارد و در مناطق دارای خاک‌های خشک و قابل اشتعال، احتمال آتش‌سوزی در آنها بیشتر است.

نتایج حاصل از شکل ۹ نشان داد که طبقهٔ خیلی کم حاوی سه رخداد آتش‌سوزی با میانگین ۶/۵۶ درصد است. مساحت در این طبقه بسیار بیشتر از طبقه‌های دیگر است (میانگین ۱۱۳۷۷۱/۴۴ هکتار). این دسته با سه رخداد دارای رخدادهای آتش‌سوزی کمی است. در طبقه‌های کم و متوسط، در هر کدام چهار رخداد آتش‌سوزی وجود دارد و میانگین درصد آتش‌سوزی در هر طبقه ۱۸/۵۴ درصد است. مساحت در این طبقه‌ها متوسط است (میانگین ۴۸۸۳۰/۴۱ هکتار). در این طبقه‌ها احتمال رخدادهای آتش‌سوزی کم است. در طبقهٔ زیاد، هفت رخداد آتش‌سوزی وجود دارد و میانگین درصد آتش‌سوزی ۲۳ درصد است. مساحت در این طبقه کمتر از طبقه‌های خیلی کم و کم است (میانگین ۱۰۹۸۸/۳۳ هکتار). این طبقه دارای احتمال بیشتری از رخدادهای آتش‌سوزی است. در طبقهٔ «خیلی زیاد» بیشترین تعداد رخداد آتش‌سوزی (۲۰ رخداد) و درصد آتش‌سوزی ۵۱/۴۶ درصد وجود دارد. مساحت این طبقه کمترین مقدار را دارد (میانگین ۸۷۴۱/۴۱ هکتار). این طبقه دارای بیشترین احتمال رخدادهای آتش‌سوزی است و به تدابیر ایمنی و پیشگیری بیشتر نیاز دارد.

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل‌های استفاده‌شده در پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی

Table 2. Evaluation results of the models used in predicting wildfire occurrence

نوع مخاطرهtype of risk	مدل Model	آموزش (Trainnig)	آزمون (Test)
آتش‌سوزی Fire	آنتروپی بیشینه (Maximum entropy)	0.998	0.955
	جنگل تصادفی (Random Forest)	0.859	0.989



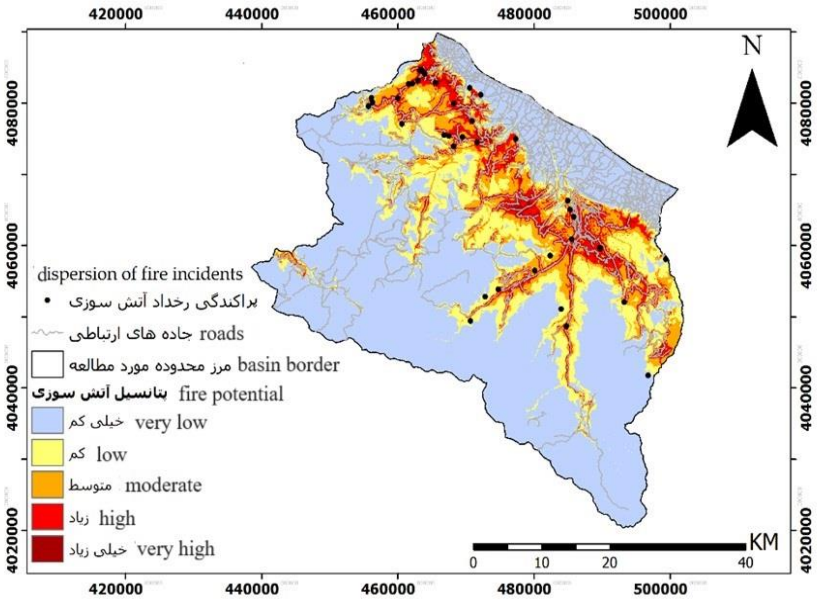
شکل ۸- نمودارهای پاسخ متغیرهای استفاده‌شده در مدل‌سازی پتانسیل آتش‌سوزی جنگل به‌ترتیب شامل: الف) شیب؛ ب) فاصله از جاده؛ پ) ارتفاع؛ ت) تراکم جاده؛ ث) جهت شیب؛ ج) بافت خاک؛ چ) کاربری اراضی؛ ح) زمین‌شناسی؛ خ) اقلیم

Figure 8 - Response curves of the variables used in modeling forest fire potential: a) slope; b) distance from road; c) elevation; d) road density; e) slope aspect; f) soil texture; g) land use; h) geology; i) climate

براساس شکل ۹، می‌توان نتیجه گرفت که در فاصلهٔ یک کیلومتری از جاده، طبقات با پتانسیل آتش‌سوزی به‌ترتیب به مساحت‌ها و درصدهای زیر تقسیم شده‌اند:

خیلی زیاد با ۷/۷۶ درصد (۸۷۳۴/۸ هکتار)، زیاد با ۹/۶۵ درصد (۱۰۸۶۳/۸ هکتار)، متوسط با ۱۵/۱۶ درصد (۱۷۰۵۹/۸ هکتار)، کم با ۱۸/۳۳ درصد (۲۰۶۳۰/۴ هکتار) و خیلی کم ۴۹/۰۷ درصد (۵۵۲۰۴/۸ هکتار).

در فاصلهٔ ۱ تا ۲ کیلومتری از جاده طبقات دارای احتمال آتش‌سوزی خیلی زیاد با ۰/۰۲ درصد (۶/۵۳ هکتار)، زیاد با ۰/۳۸ درصد (۱۲۴/۴ هکتار)، متوسط با ۵/۷۸ درصد (۱۸۸۵/۷ هکتار)، کم با ۲۶/۵۳ درصد (۸۶۴۷/۰ هکتار) و خیلی کم با ۶۷/۲۸ درصد (۲۱۹۳۱/۱ هکتار) قرار دارند. در فواصل بیشتر از دو کیلومتر، طبقه‌ای با پتانسیل رخداد آتش‌سوزی خیلی زیاد تا متوسط وجود ندارد و سراسر پهنه‌ای با پتانسیل آتش‌سوزی خیلی کم را شامل می‌شود. شایان ذکر است که هر ۳۸ لکهٔ آتش‌سوزی با مساحت ۱۱۵/۲ هکتار در فاصلهٔ یک کیلومتری از جاده‌ها هستند. این تحلیل نشان می‌دهد که مناطق نزدیک به جاده‌ها به نظارت مدیریتی بیشتر در برنامه‌های حفاظتی برای پیشگیری از آتش‌سوزی نیاز دارند. آموزش مردم در این مناطق در زمینهٔ اطفای حریق و استفادهٔ ایمن از منابع اشتعال‌زا می‌تواند به کاهش رخدادهای آتش‌سوزی کمک کند.



شکل ۹- نقشهٔ همبستگی پتانسیل آتش‌سوزی و ارتباط بین پراکندگی رخدادهای آتش‌سوزی با شبکهٔ جاده‌های جنگلی

Figure 9. Map of the correlation of wildfire potential and the relationship between the dispersion of wildfire events and the forest road network

جدول ۵- مقدار همبستگی پارامترهای طبیعی در آتش‌سوزی با حساسیت مکانی در محدودهٔ رخدادهای آتش‌سوزی

Table 5. Correlation values of natural parameters related to wildfires with spatial sensitivity in the range of fire incidents

پارامترهای طبیعی Natural parameters	ارتفاع Elevation	شیب Slope	جهت شیب Aspect	اقلیم Climate	جاده Road	زمین‌شناسی Geology	کاربری اراضی Land-use	بافت خاک Soil texture
مقدار همبستگی Correlation values	0.86	0.15	0.27	0.21	0.78	0.33	0.54	0.48

بحث

مناطق نزدیک به جاده‌ها با پتانسیل آتش‌سوزی بیشتری روبه‌رو هستند، به‌خصوص در فواصل کمتر از یک کیلومتر از جاده‌ها (شکل ۱۰). طبقه‌های خیلی زیاد و زیاد در این فواصل با احتمال بیشتر رخداد آتش‌سوزی مواجه‌اند، درحالی که طبقه‌های خیلی کم و کم به‌طور معمول مساحت بیشتری دارند و احتمال وقوع آتش‌سوزی در آنها کمتر است.

نتایج منحنی‌های مشخصهٔ عملکرد و سطح زیر آن (شکل‌های ۴ و ۶) مشخص کرد که مدل آنتروپی بیشینه در پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی به‌ترتیب در مرحلهٔ آموزش و آزمون مدل دارای مقادیر شاخص سطح زیرمنحنی برابر با ۰/۹۹۸ و ۰/۹۵۵ است که با نتایج Himmy & Rhinane (2023) مطابقت دارد که بیان داشتند مدل آنتروپی بیشینه نسبت به بقیهٔ مدل‌های آماری عملکرد بهتری در تولید نقشهٔ آتش‌سوزی داشته است. به‌طور کلی از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل آنتروپی بیشینه، عملکرد بهتری از مدل راندوم فارست برای تولید نقشهٔ مکانی حساسیت وقوع آتش‌سوزی دارد. مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی براساس میزان مشارکت و اهمیت آن در مدل آنتروپی بیشینه به‌ترتیب عبارت است از ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، کاربری اراضی، خاک، تیپولوژی، اقلیم جهت شیب و مقدار شیب. با توجه به شکل ۸ منحنی‌های پاسخ آتش‌سوزی نشان می‌دهند که در ارتفاعات پایین (پایین‌تر از ۱۰۰۰ متر) بیشترین اثر وجود دارد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در این مناطق به‌دلیل در دسترس بودن، درصد وقوع آتش‌سوزی در جنگل بیشتر خواهد بود. همچنین براساس منحنی پاسخ میزان شیب مشخص شد که در نواحی کم‌شیب، احتمال وقوع آتش‌سوزی زیاد است و با افزایش شیب مخصوص مناطق پرشیب حوضه، احتمال آتش‌سوزی کاهش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از مدل آنتروپی بیشینه در مدل‌سازی آتش‌سوزی جنگل مشخص کرد که عوامل اقلیمی و نوع پوشش منطقه نیز در وقوع رخداد آتش‌سوزی اهمیت دارند. پژوهش Renard et al. (2012) بیان داشت که عامل اول در مستعد بودن برای وقوع آتش‌سوزی شرایط آب‌وهوایی است؛ یعنی مقدار رطوبت در طول فصل، وقوع آتش‌سوزی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. عامل مهم دوم، نوع پوشش گیاهی منطقه است که مناطق مختلف را در مقابل آتش‌سوزی مستعد می‌کند. منحنی پاسخ فاصله از جاده نیز نشان می‌دهد که در مناطق در دسترس انسان در مجاورت جاده‌ها، احتمال آتش‌سوزی بیشتر خواهد بود و با فاصله گرفتن از جاده این احتمال کاهش پیدا خواهد کرد. منحنی پاسخ تراکم جاده نیز بیانگر آن است که در مناطق پرتراکم که مختص نواحی مسکونی و شهری است، احتمال آتش‌سوزی در کمترین حد قرار دارد و با کم شدن تراکم جاده که به‌طور معمول در نواحی حالی از سکنه یا جاده‌های بین‌شهری و بین روستایی هستند، احتمال آتش‌سوزی افزایش می‌یابد.

براساس نتایج، دامنه‌های کم‌شیب، محیط مناسبی برای آتش‌سوزی‌اند، زیرا برای سکونت انسان مناسب‌ترند.این خود عامل ایجاد آتش‌سوزی است. این یافته با نتایج پژوهش‌های دیگر (Setiawan et al., 2004; Dong et al., 2005; Phillips et al., 2006) همخوانی دارد. دلیل این موضوع، مجاورت جنگل و جاده‌ها در فاصله‌های نزدیک است، چنانکه حتی پرتاب سیگار رانندگان نیز می‌تواند سبب آتش‌سوزی شود که همخوانی کامل با نتایج برخی پژوهش‌ها (Setiawan et al., 2004) دارد.

نتایج این بخش با یافته‌های برخی پژوهش‌ها (Chang et al., 2013; Palialexis et al., 2009) مطابقت دارد. نوع پوشش گیاهی، شیب، جهت جغرافیایی، فاصله از جاده‌ها، توپوگرافی و کاربری اراضی، مؤثرترین عوامل در مدل‌سازی وقوع آتش بوده‌اند. نتایج این تحقیق با یافته‌های Somashekar et al. (2009) نیز همسو است.

نتایج تحقیقات(2022) .Azizi et al نشان می‌دهد که بررسی و پایش آتش‌سوزی در جنگل‌ها اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی‌های کنونی و آیندهٔ مدیریت آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی دارد که همسو با نتایج و اهداف این تحقیق است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Pouyan et al. (2022) در بعد مدل‌سازی و انتخاب عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی نیز همسو است.

یافته‌های تحقیق با یافته‌های Mirshekrlou et al. (2023) در پایش مناطق حساس به آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع همسو است. آنها به این نتیجه دست یافتند که مدل‌سازی احتمال وقوع آتش‌سوزی و تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی در مناطق حساس به آتش‌سوزی از مهم‌ترین اقدامات است. نتایج این تحقیق با یافته‌های Ikhsan et al. (2023) در خصوص اینکه مناطق نزدیک به جاده‌ها بیشتر در معرض آتش‌سوزی قرار دارند نیز همسویی دارد.

نتایج حاصل از مدل‌های مختلف آتش‌سوزی نشان دادند که هر دو مدل به پارامترهای به‌نسبت مشابهی دست یافته‌اند. برای بهبود مدل‌سازی آتش‌سوزی، در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود که مدل مناسب با پارامترهای مشترک اجرا و نتایج آن مقایسه شود. این مقایسه می‌تواند دید جامع‌تری از کارایی مدل‌ها و تأثیرات مختلف عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی ارائه دهد.

برای بهبود این نتایج در تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که پراکنش داده‌ها در نواحی مختلف بهبود یابد و همچنین داده‌های بیشتری برای متغیرهای شیب و جهت جمع‌آوری شود تا تأثیر این عوامل به‌طور دقیق‌تر ارزیابی شود. استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر که توانایی درک و مدل‌سازی دقیق‌تر روابط پیچیده بین متغیرها را دارند نیز می‌تواند به بهبود نتایج کمک کند.

براساس نتایج حاصل از تحلیل، توسعهٔ برنامه‌های آموزشی با هدف افزایش آگاهی جامعه در مناطق نزدیک به جاده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. این برنامه‌ها باید مهارت‌های ایمنی در اطفای حریق و جلوگیری از رفتارهای مسبب آتش‌سوزی را به مردم آموزش دهند. محققان و مدیران منطقه می‌توانند براساس نتایج تحلیل، تدابیر مدیریتی ایجاد کنند تا خطر آتش‌سوزی در نواحی حساس کاهش یابد. اعمال تدابیر مهندسی محیطی مانند ایجاد ایستگاه‌های واکنش سریع آتش‌سوزی در مسیرهای حساس به رخداد آتش‌سوزی و ایجاد مناطق ایمن در اطراف جاده‌ها به کاهش اثر آتش‌سوزی و مدیریت بهتر ریسک‌ها کمک می‌کند. بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند سامانه‌های نظارتی مبتنی بر داده و هوش مصنوعی برای نظارت بر شرایط جوی و اطلاع‌رسانی سریع در صورت آتش‌سوزی به کاهش زمان پاسخگویی و مدیریت آتش‌سوزی کمک می‌کند. ادامهٔ تحقیقات در زمینهٔ پیش‌بینی و مدیریت آتش‌سوزی با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفتهٔ تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و مدل‌های پیشرفته در بهبود مدیریت آتش‌سوزی و کاهش خسارات بیشتر یاریگر خواهد بود.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه تهران بابت تخصیص اعتبار پژوهشی، از کارمندان و کارشناسان محترم برای اجرای این پژوهش و از داوران ارجمند بابت کمک در بهبود و ارتقای این پژوهش سپاسگزاری و تقدیر می‌کنند.

References

Abdusalomov, A.B., Islam, B.M.S., Nasimov, R., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T.K. (2023). An improved forest fire detection method based on the detectron2 model and a deep learning approach. *Sensors*, *23*(3), 1512.

Abdusalomov, A.B., Islam, B.M.S., Nasimov, R., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T.K. (2023). An improved forest fire detection method based on the detectron2 model and a deep learning approach. *Sensors*, *23*(3), 1512.

Ahmadi, K., Alavi, S.J., Amiri, G.Z., Hosseini, S.M., Serra-Diaz, J.M., & Svenning, J.C. (2020). The potential impact of future climate on the distribution of European yew (Taxus baccata L.) in the Hyrcanian Forest region (Iran). *International Journal of Biometeorology, 64,* 1451-1462. (In persian)

Azizi, M., Khosravi, M., & Pourreza, M. (2022). Time Series model of fires forests and rangelands of Kermanshah province using MODIS data from 2002 to 2018. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research, 19*(2), 279-296. (In persian)

Breiman, L.J., HFriedman, R.A., Olshen, C.J..(1984). Classification and regression trees, P368.

Burgess, R. (2011). Development of a spatial, dynamic, fuzzy fire risk model for Chitwan District, Nepal. M.Sc. thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, 96p.

Chang, Y., Zhu, Z., Bu, R., Chen, H., Feng, Y., Li, Y., Hu, Y., & Wang, Z. (2013). Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. *Landscape Ecology, 28(*10), 1989-2004. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9935-4

Chavan, M.E., Das, K.K., & Suryawanshi, R.S. (2012). Forest fire risk zonation using remote sensing and GIS in Huynial watershed, Tehri Garhwal district, UA. *International Journal of Basic and Applied Research, 2*(7), 6-12.

Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D.T.,& Ma, J. (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena, 151*, 147-160.

Dimopoulou, M., & Giannikos, I. (2004). Towards an integrated framework for forest fire control. *European Journal of Operational Research, 152*(2), 476-486.

Dong, X., 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, 3*(16), 169- 174

Eshaghi, M.A., & Shataeei, S. (2016). Preparation map of Forest Fire Risk Using SVM, RF & MLP Algorithms (Case Study: Golestan National Park, Northeastern Iran). *Journal of Wood and Forest Science and Technology, 23*(4), 1333-154. (In persian)

Eskandari, S. (2017). Methods of modeling and evaluation of fire occurrence risk in the forests of world and Iran. *Human & Environment, 15*(3), 91-110. (In persian)

Eskandari, S., & Eskandari, S. (2021). Fire of Iranian forests, consequences, opposition methods and solutions. *Human and Environment, 19*(1), 175-187. (In persian)

Eskandari, S., Pourghasemi, H.R., Tiefenbacher, J.P. (2020). Relations of land cover, topography, and climate to fire occurrence in natural regions of Iran: Applying new data mining techniques for modeling and mapping fire danger. *Forest ecology and management, 473*, 118338 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118338

Natural Resources and Watershed Organization, (2007). Forest Management Plans for Zones 30 to 36. (In persian)

Hajimohammadi, H., Baaqideh, M., & Fallah Ghalehri, G.A. (2017). Investigating Atmospheric Structure at the Time of Wildfire Occurrence in Northern Iran. *Geographical Planning of Space, 7*(25), 187-206.

Himmy, O., & Rhinane, H. (2023). Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning Algorithms Study Case AL Hoceima Region, Northern Morocco. The International Archives of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48*, 153-158.

Ikhsan, A.N., Hadmoko, D.S., & Widayani, P. (2023). Spatial Modeling of Forest and Land Fire Susceptibility Using the Information Value Method in Kotawaringin Barat Regency, Indonesia. *Fire, 6*(4), 170. https://doi.org/10.3390/fire6040170

Jain, P., Coogan, S.C., Subramanian, S.G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M.D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews, 28*(4), 478-505.

Jiao, Q., Fan, M., Tao, J., Wang, W., Liu, D., & Wang, P. (2023). Forest fire patterns and lightning-caused forest fire detection in Heilongjiang Province of China using satellite data. *Fire, 6*(4), 166.

Lymberopoulos, N., Papadopoulos, C., Stefanakis, E., Pantalos, N., & Lockwood, F. (1996). A GIS - based forest fire management information system. *EARSel Journal–Advances in Remote Sensing, 4*(1), 68-75.

Makhdoom, M., Darvish Safat, A., Jafarzadeh, H., & Makhdoom, A. (2003). Environmental Assessment and Planning with Geographic Information Systems "GIS". Tehran University Press, 304 p.

Marvi Mohajer, M.R. (2007). Sylviculture, University of Tehran Publication, 2709, 387. (In persian)

Najafi, A., Irannezhad, M.H., Sotoudeh, A., Mokhtari, M.H., Kiani, B. (2016). Modeling and Risk Mapping of Forest Fires using Remote Sensing and GIS (Case Study: Baghe-Shadi Protected Area, Yazd Province). *Iranian Journal of Applied Ecology, 4*(14), 13-26. (In persian)

Omidi, M., Mafi Gholami, D., Mahmoodi, B., & Jafari, A. (2020). Spatial modeling the probability of wildfire occurrence using frequency ratio and weight- of-evidence models. Iranian *Journal of Forest and Range Protection Research, 17*(2), 125-144. (In persian)

Omidi, M., Mafi Gholami, D., Mahmoodi, B., & Jafari, A. (2020). Spatial modeling the probability of wildfire occurrence using frequency ratio and weight- of-evidence models. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research, 17*(2), 125-144. (In persian)

Palialexis, A., Georgakarakos, S., Lika, K., & Valavanis, V. D. (2009). Comparing novel approaches used for prediction of species distribution from presence/absence acoustic data. In Proceedings of the Second International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 09).

Phillips, S.J., Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling ofspecies geographic distributions. *Ecological modelling, 190*, 231-259.

Pourghasemi, H.R., Gayen, A., Edalat, M., Zarafshar, M., & Tiefenbacher, J.P. (2020b). Is multi-hazard mapping effective in assessing natural hazards and integrated watershed management?. *Geoscience Frontiers, 11*(4), 1203-1217. (In persian)

Pourghasemi, H.R., Kariminejad, N., Amiri, M., Edalat, M., Zarafshar, M., Blaschke, T., & Cerda, A. (2020a). Assessing and mapping multi-hazard risk susceptibility using a machine learning technique. *Scientific reports, 10*(1), 3203. (In persian)

Pouyan, S., Khojandi, K., & Pourghasemi, H. (2022). Spatial modeling of forest fire susceptibility in Khuzestan Province, The 17th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran with a Focus on Watershed Management and Sustainable Food Security, Jiroft. https://civilica.com/doc/1623688 (in Persian)

Renard, Q., Pélissier, R., Ramesh, B.R., & Kodandapani, N. (2012). Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. *International Journal of Wildland Fire, 21*(4), 368-379.

Setiawan, I., Mahmud, A.R., Mansor, S., Mohamed Shariff, A.R. & Nuruddin, A.A. (2004). GIS- grid-based and multi-criteria analysis for identifying and mapping peat swamp forest fire hazard in Pahang, Malaysia. *Disaster Prevention and Management, 13*(5), 379-386.

Somashekar, R., Ravikumar, P., Mohankumar, C., Prakash, K., & Nagaraja, B. (2009). Burnt area mapping of Bandipur National Park, India using IRS1C/1D LISS III data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37*, 37-50.

Iranian Journal of Forest
Vol. 17, No. 1, Spring 2025
pp. 125-143
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.437484.1968
CC BY 4.0

Spatial Modeling of Wildfire Susceptibility Based on the Impact of Forest Roads Using Machine Learning Methods in the Western Forests of Mazandaran Province

Seyed Ata O. Hosseini[1*], Nima Shafiee kigasari[2] and Hamid Reza Pourghasemi[3]

[1]Prof., Forest Engineering, Forestry and Forest Economics Dept. Faculty of Natural Resources, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran
[2]Ph.D. graduated of Forest Engineering, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran
[3]Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University

(Received: 5 March 2024; Accepted: 7 January 2025)

Abstract

Introduction: The Hyrcanian forests are considered valuable biological assets due to their biodiversity and ecosystem functions. Wildfires in natural resource areas are among the crises that cause irreparable damage to ecosystems. Therefore, the purpose of this study is to investigate and model the spatial relationship of the forest road network and wildfire susceptibility using modern machine learning methods in the cities of Tankabon and Ramsar.

Materials and methods: The factors affecting wildfire occurrence including land use, distance from the road, height above sea level, soil, typology, road density, climate and slope direction, including existing roads, were investigated and their sensitivity maps were obtained using the Random Forest machine learning method and maximum entropy statistical method. In order to evaluate the models used by receiver operating characteristic curves and the area under the curves and by the response curves and the jackknife test, the percentage of importance of each parameter in the occurrence of wildfire occurrence and its influence in modeling were determined.

Results: According to Maximum Entropy method, the percentage of importance and participation of the effective factors in the wildfire potential show that the most influencing variables on the fire susceptibility model are height above sea level (76%), distance from the road (9.1%), land use (5.4%). Also, based on the Random Forest model, the parameter of height above sea level with an average of 0.10%, distance from the road 0.9%, land use and vegetation 0.4% have the highest effect. The response curve for distance from the road and road density indicate an increased occurrence of wildfire near roads, and roads play a significant role in the occurrence of fire in the region.

Conclusion: The wildfire spatial susceptibility maps show that road distance is an important factor that greatly influences wildfire potential; that is, it can both increase the likelihood of fire occurrence and, conversely, affect fire suppression.

Keywords: Random Forest modeling, Road,Western Mazandaran,Wildfire.

[*] Corresponding author Tel: +98 2632249312 Email: At.hosseini@ut.ac.ir