

بررسی تغییرات خطر آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر بی‌نظمی، مطالعه
موردی: جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی

حمید ابراهیمی^۱ - کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
علی اکبر رسولی - استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
داوود مختاری - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۹ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۷/۱۱

چکیده

آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی نه فقط از دیدگاه محیط زیست، بلکه از نظر اقتصادی، اجتماعی و امنیتی از جمله اصلی‌ترین نگرانی‌ها و چالش‌های موجود در بسیاری از نقاط جهان است. از جمله معضلات پیش‌روی مدیریت جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی، آتش‌سوزی‌هایی است که سالانه خسارات زیست‌محیطی و مالی زیادی را به استان وارد می‌کند؛ از این‌رو بررسی و تحلیل تغییرات وضعیت منطقه از نظر خطر آتش‌سوزی و همچنین پارامترهای مؤثر بر آن در زمینه رویکردهای مدیریتی و کنترلی بحران آتش‌سوزی بسیار کاربردی خواهد بود. فرآیند پژوهش حاضر در سه بخش به انجام رسیده است؛ نخست با مطالعه مبانی نظری موضوع، ۱۲ پارامتر (تراکم مراکز سکونتی، فاصله از مراکز سکونتی، تراکم شبکه ارتباطی، فاصله از شبکه ارتباطی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، حداکثر دمای ماهانه، حداقل دمای ماهانه، میانگین دمای ماهانه، بارندگی سالیانه و پوشش گیاهی) به عنوان عوامل مؤثر در تحلیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع شناسایی و با استفاده از منابع اطلاعاتی موجود و تکنیک‌های مختلف و متناسب مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، نقشه‌های مربوط به معیارهای مورد نظر تولید گردیده است. در ادامه با استفاده از داده‌های مربوط به آتش‌سوزی‌های صورت گرفته و عوامل زیست‌محیطی - انسانی ایجادشده، در بستر مدل حداکثر بی‌نظمی به مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی در سه دوره زمانی (۱۳۸۶-۱۳۸۸، ۱۳۸۹-۱۳۹۱ و ۱۳۹۲-۱۳۹۴) پرداخته شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل با استفاده از تکنیک مساحت سطح زیر منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده، حاکی از کارایی بسیار بالا و مناسب مدل‌های اجراشده (۰/۹۱، ۰/۸۲ و ۰/۸۳) می‌باشد. در مرحله پایانی پژوهش، بر

اساس نتایج حاصل بیشترین میزان تغییرات مربوط به کاهش مساحت پهنه‌های با خطر بسیار کم و افزایش مساحت اراضی واقع در پهنه‌های با خطر متوسط و بسیار پرخطر است. همچنین بررسی عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی نشان‌دهنده تغییرات گسترده در تأثیرگذاری این عوامل و افزایش نقش عوامل انسانی در طی دوره مورد بررسی می‌باشد؛ به صورتی که در دوره سوم عوامل تراکم مراکز سکونتی و فاصله از شبکه ارتباطی بیشترین تأثیر را بر وقوع آتش‌سوزی‌ها داشته‌اند.

واژگان کلیدی: آتش‌سوزی، تحلیل خطر، مدل حداکثر بی‌نظمی، جنگل‌ها و مراتع، آذربایجان شرقی

۱- مقدمه

محیط طبیعی جنگل‌ها و مراتع همیشه در معرض آسیب‌های طبیعی و تخریب قرار دارند. به‌طور کلی هرگونه تغییرات مضر و قابل اندازه‌گیری در کیفیت فیزیکی، شیمیایی یا توان زیستی منابع طبیعی که موجب از دست رفتن یا کاهش کمی و کیفی خدمات منابع طبیعی مانند کارکردهای فیزیکی و بیولوژیکی آن‌ها گردد، اصطلاحاً تخریب یا آسیب به منابع طبیعی نامیده می‌شود. امروزه خشک‌سالی، فعالیت‌های شهری و کشاورزی انسان و آتش‌سوزی جز فراگیرترین عوامل تخریب‌کننده اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌روند (Yin et al., 2004). در میان عوامل مخرب، آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب اکوسیستم‌های طبیعی شناخته شده که سالانه خسارت فراوانی را به این عرصه‌ها وارد می‌سازد و علاوه بر خسارت‌های اقتصادی، آلودگی‌های شدید زیست‌محیطی را نیز به دنبال دارند. آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی نه فقط از دیدگاه محیط زیست بلکه از نقطه نظر اقتصادی، اجتماعی و امنیتی از جمله اصلی‌ترین نگرانی‌ها و چالش‌های موجود در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد (Leblon et al., 2007; Pourtaghi et al., 2016). بر اساس آمار منتشر شده از طرف سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور سالانه هزاران مورد آتش‌سوزی با علل طبیعی یا انسانی در مناطق مختلف ایران رخ می‌دهد که به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم اثرات زیان‌بار و ویرانگری بر زندگی بشر بر جای می‌گذارد (Eskandari & Chuvieco, 2015).

به‌منظور کنترل و مدیریت پیشگیرانه آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع، شناسایی نقاط بحرانی و عوامل تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی ضروری است، از طرف دیگر عدم شناخت کافی از شرایط منطقه باعث گسترش آتش‌سوزی، تأخیر در مهار و کنترل آن و وارد آمدن صدمه به حیات جانوران و گیاهان خواهد شد (Jaiswal et al., 2002). از این‌رو تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی و پارامترهای تأثیرگذار بر آن اهمیت بسزایی در کاهش تعداد دفعات آتش‌سوزی و جلوگیری از تخریب جنگل‌ها و مراتع داشته و به مدیران و برنامه‌ریزان برای پیش‌گیری قبل از وقوع آتش‌سوزی کمک می‌کند تا با انجام فعالیت‌های ویژه و متناسب در مناطق مستعد، از وقوع آتش‌سوزی‌های احتمالی جلوگیری کنند (Dong et al., 2005).

بررسی توزیع خطر آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر آن، وابسته به بررسی آتش‌سوزی‌های رخ داده است (Syphardet et al., 2008; Massada et al., 2012). در سالیان اخیر فعالیت‌های انسانی تأثیرات مهمی بر وقوع آتش‌سوزی‌ها داشته است؛ از این رو مدل‌سازی کارآمد و قابل اعتماد این پدیده نیازمند بررسی عوامل انسانی و محیطی به صورت هم‌زمان می‌باشد (Chuvienco et al., 2010). به منظور تجزیه و تحلیل خطر آتش‌سوزی با استفاده از نقاط وقوع و معیارهای زیست‌محیطی - انسانی تاکنون مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج برخی از مطالعات صورت گرفته نشان‌دهنده دقت بالای مدل حداکثر بی‌نظمی (MaxEnt) می‌باشد (Ferrarini et al., 2012; Massada et al., 2012; Parisien et al., 2012; Renard et al., 2012; Arpaci et al., 2014; Chen et al., 2015).

داده‌های مربوط به تغییرات توزیع مکانی احتمال وقوع آتش‌سوزی، اطلاعات ارزشمندی را در جهت پیش‌بینی روند مخاطرات زیست‌محیطی در عرصه‌های طبیعی در اختیار سازمان‌های حفاظتی قرار می‌دهد، از طرف دیگر شناخت خصوصیات و ویژگی‌های جنگل‌ها و مراتع در زمینه توزیع مکانی مناطق مستعد آتش‌سوزی به‌عنوان مکمل و راهنما در زمینه رویکردهای مدیریت پدیده آتش‌سوزی از قبیل بازداري از وقوع بسیار کاربردی خواهند بود. از این رو با استفاده از مدل‌های مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشینی همچون مدل حداکثر بی‌نظمی با اطلاعات یکپارچه، درست و بهنگام در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بررسی دقیق تغییرات احتمال وقوع آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر وقوع آن میسر می‌گردد. در این مطالعه به مدل‌سازی تغییرات مناطق مستعد آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی با بهره‌گیری از داده‌های آماری و مکانی آتش‌سوزی‌های رخ داده در یک دوره آماری ۹ ساله و متغیرهای زیست‌محیطی - انسانی مختلف پرداخته شده و همچنین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی و تغییرات این عوامل نیز بررسی خواهند شد. با توجه به اهمیت فراوان مطالعات مربوط به تحلیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته است. عالی محمودی سراب و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ای به پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع شهرستان ایذه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نگارندگان بین داده‌های اقلیمی و داده‌های مکانی نقاط آتش‌سوزی ارتباط برقرار کرده و در نهایت نتایج به‌دست آمده حاکی از صحت متوسط پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط شبکه عصبی مصنوعی بوده است. Neito و همکاران (2012)، به بررسی وقوع آتش‌سوزی ناشی از رعد و برق طی یک دوره سه‌ساله بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ با استفاده از روش رگرسیون لجستیک پرداختند. در این مطالعه پارامترهایی از جمله صاعقه، توپوگرافی، پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که صاعقه مهم‌ترین عامل آتش‌سوزی در این منطقه بوده است و میزان دقت مدل ۰/۷ برآورد شده که نشان‌دهنده عملکرد متوسط مدل مورد استفاده بوده است. Arpaci و همکاران (2014)، به بررسی و مقایسه دو الگوریتم یادگیری ماشینی حداکثر بی‌نظمی و جنگل تصادفی پرداخته و به تحلیل قابلیت تطبیق آن‌ها با متغیرهای محیطی و انسانی در

مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های تیرولین (Tyrolean) استرالیا پرداخته‌اند، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از دقت بیشتر مدل حداکثر بی‌نظمی و همچنین تأثیر بیشتر عوامل انسانی بر وقوع آتش‌سوزی در این منطقه داشته است. Thomason (2015)، با بهره‌گیری از مدل حداکثر بی‌نظمی و استفاده از داده‌های آماری ۳۰ ساله مربوط به آتش‌سوزی‌های رخ داده و متغیرهای محیطی مختلف به مدل‌سازی تغییرات مکانی مناطق مستعد آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایالت کالیفرنیا، امریکا مبادرت کرده است. نتایج تحقیق نشان‌دهنده توزیع ناهمگن از احتمال وقوع آتش‌سوزی در ایالت کالیفرنیا، دقت بالای الگوریتم حداکثر بی‌نظمی در مدل‌سازی مناطق مستعد آتش‌سوزی و همچنین بروز تغییر در عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در این دوره سی ساله داشته است. Rodrigues و همکاران (2016)، در پژوهشی با استفاده از داده‌های آتش‌سوزی‌های رخ داده در دوره‌ای ۲۴ ساله به بررسی و تحلیل نقش عوامل انسانی در وقوع آتش‌سوزی و تغییرات این عوامل پرداخته‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده تغییرات گسترده مکانی - زمانی عوامل مؤثر داشته است، همچنین نگارندگان این تحقیق به لزوم استفاده از معیارهای محیطی برای مدل‌سازی دقیق‌تر روابط میان آتش‌سوزی و عوامل مؤثر اشاره کرده‌اند.

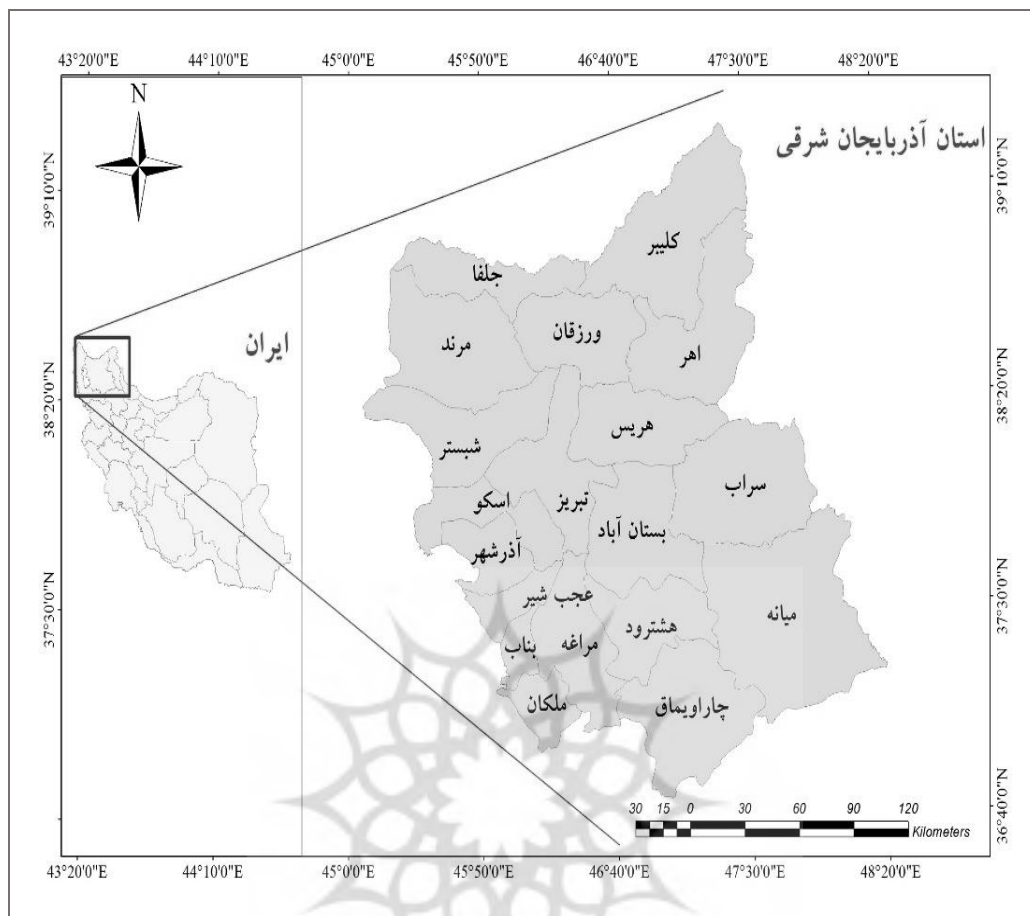
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی با وسعتی معادل ۴۷ هزار کیلومتر مربع در شمال غرب ایران و در موقعیت ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این استان دارای تنوع زیاد از لحاظ شرایط توپوگرافی، اقلیمی و پوشش گیاهی بوده و با توجه به قرارگیری آن در یک منطقه کوهستانی، به‌طور طبیعی اختلاف ارتفاع یکی از ویژگی‌های بارز این منطقه بوده، به‌طوری‌که ارتفاع عمومی استان از ۶۰ متر تا ۴۸۱۱ متر متغیر است و در نتیجه استان آذربایجان شرقی از تنوع اقلیمی قابل توجهی نیز برخوردار است.

۲-۲- روش کار

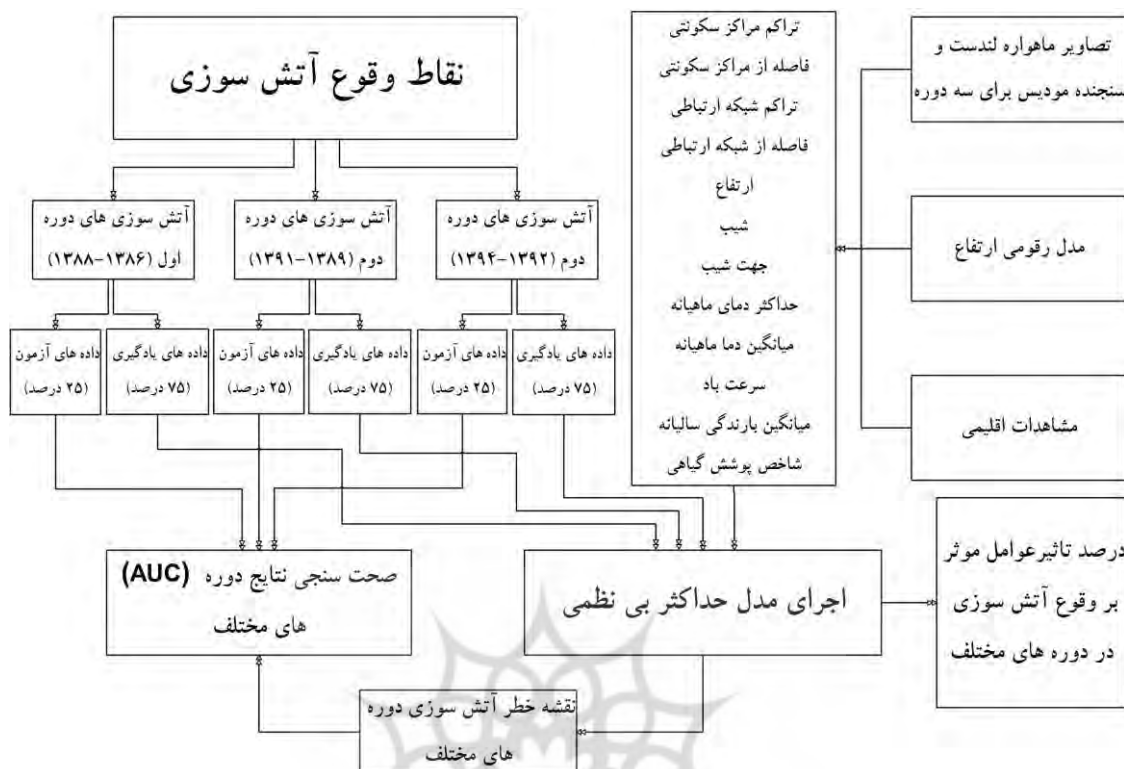
شکل ۲ نمایش‌دهنده روند کلی پژوهش پیش‌روی در سه بخش می‌باشد. در بخش اول؛ با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های GIS مبنای پایگاه داده مربوط به متغیرهای زیست‌محیطی - انسانی و نقاط وقوع آتش‌سوزی ایجاد گردید. در بخش دوم با بهره‌گیری از نقاط وقوع آتش‌سوزی و ۱۲ متغیر مستقل به بررسی و مدل‌سازی خطر وقوع آتش‌سوزی در سه دوره (۱۳۸۶-۱۳۸۸، ۱۳۸۹-۱۳۹۱ و ۱۳۹۲-۱۳۹۴) با استفاده از مدل حداکثر بی‌نظمی پرداخته شده است. در بخش پایانی تغییرات خطر آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر وقوع آن در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

۲-۳- مدل حداکثر بی‌نظمی

حداکثر بی‌نظمی به‌عنوان یک الگوریتم یادگیری ماشینی به نقاط وقوع (متغیر مستقل) وابسته بوده و به‌طور مکرر مقادیر متغیرهای محیطی (متغیر وابسته) در نقاط وقوع را با مقادیر متغیرهای محیطی در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌دهد. این مدل به‌عنوان یک روش پیشرفته در زمینه مدل‌سازی توزیع جغرافیایی پدیده‌ها در یک فضای چندبعدی با استفاده از تنها نقاط وقوع مورد استفاده قرار گرفته (Philips et al., 2006; Deblauwe et al., 2008) و همچنین قابلیت برقراری روابط غیرخطی بین متغیرهای مستقل و وابسته را دارا بوده و از این‌رو توانایی توصیف و حل روابط پیچیده را دارا می‌باشد (Parisien et al., 2012).



شکل ۲. روند کلی تحقیق

مدل حداکثر بی نظمی تخمینی از احتمال پراکندگی هدف موردنظر را با استفاده از جانمایی (جایگزینی) احتمال توزیع متغیرهای مستقل در هریک از نقاط وقوع در شرایط با حداکثر بی نظمی را محاسبه می نماید، به بیان دیگر این مدل با جانمایی شرایط زیست محیطی ورودی در نقاط وقوع به تخمین همبستگی (برازندگی) شرایط زیست محیطی برای وقوع رخداد موردنظر در منطقه مورد مطالعه می پردازد.

معادله کلی مدل MaxEnt به شکل زیر تعریف می شود:

$$P_r((y=1|z)) = f_1(z) \quad (1)$$

در این معادله؛ $P_r((y=1|z))$ به عنوان احتمال وقوع رخداد تحت تأثیر شرایط زیست محیطی (با توجه به متغیرهای مستقل) در نظر گرفته می شود. همچنین $(y=1)$ به معنای وقوع پدیده موردنظر و پارامتر Z بیانگر متغیرهای مستقل در منطقه مورد مطالعه می باشد که این متغیرها بیانگر شرایط زیست محیطی - انسانی متأثر بر پراکنش و توزیع پدیده موردنظر است. $f(z)$ به عنوان تابع توزیع احتمالی متغیرهای مستقل در کل منطقه مورد بررسی و همچنین $f_1(z)$ به عنوان تابع توزیع احتمالی متغیرهای مستقل در نقاط وقوع می باشد.

۲-۴- متغیر وابسته

اطلاعات مکانی و زمانی مناطق وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴ از طریق دو منبع شامل؛ اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی و محصولات آتش‌سوزنده مودیس MYD14A1 و MOD14A1 اخذ و مورد استفاده قرار گرفته است (Vadrevu et al., 2010; Maeda et al., 2011; Adab et al., 2013; Eskandari & Chuvieco, 2015). اطلاعات مذکور شامل مختصات جغرافیایی منطقه دچار آتش‌سوزی، مساحت آتش‌سوزی و تاریخ وقوع می‌باشد (جدول ۱). طبق اطلاعات موجود در بازه ۹ ساله مورد بررسی تعداد ۳۵۸ فقره آتش‌سوزی ثبت گردیده و در این پژوهش این اطلاعات در دوره‌های سه‌ساله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

جدول ۱. تعداد آتش‌سوزی‌های ثبت‌شده (منبع: سازمان منابع طبیعی و محصولات سنجنده مودیس)

دوره مورد بررسی	۱۳۸۸-۱۳۸۶	۱۳۹۱-۱۳۸۹	۱۳۹۴-۱۳۹۲
تعداد وقوع آتش‌سوزی	۸۳	۱۲۸	۱۴۷

۲-۵- متغیرهای مستقل

نتایج مدل حداکثر بی‌نظمی وابستگی مستقیم به انتخاب متغیرهای تأثیرگذار در وقوع پدیده موردنظر داشته و انتخاب این پارامترها مرحله‌ای بسیار اساسی در مدل‌سازی با این روش می‌باشد. با استناد به مطالعات پیشین، پارامترهای مؤثر به‌عنوان متغیرهای کمکی در مدل‌سازی مناطق مستعد آتش‌سوزی با استفاده از مدل حداکثر بی‌نظمی به همراه منابع تهیه آن‌ها در جدول ۲ شرح داده شده‌اند.

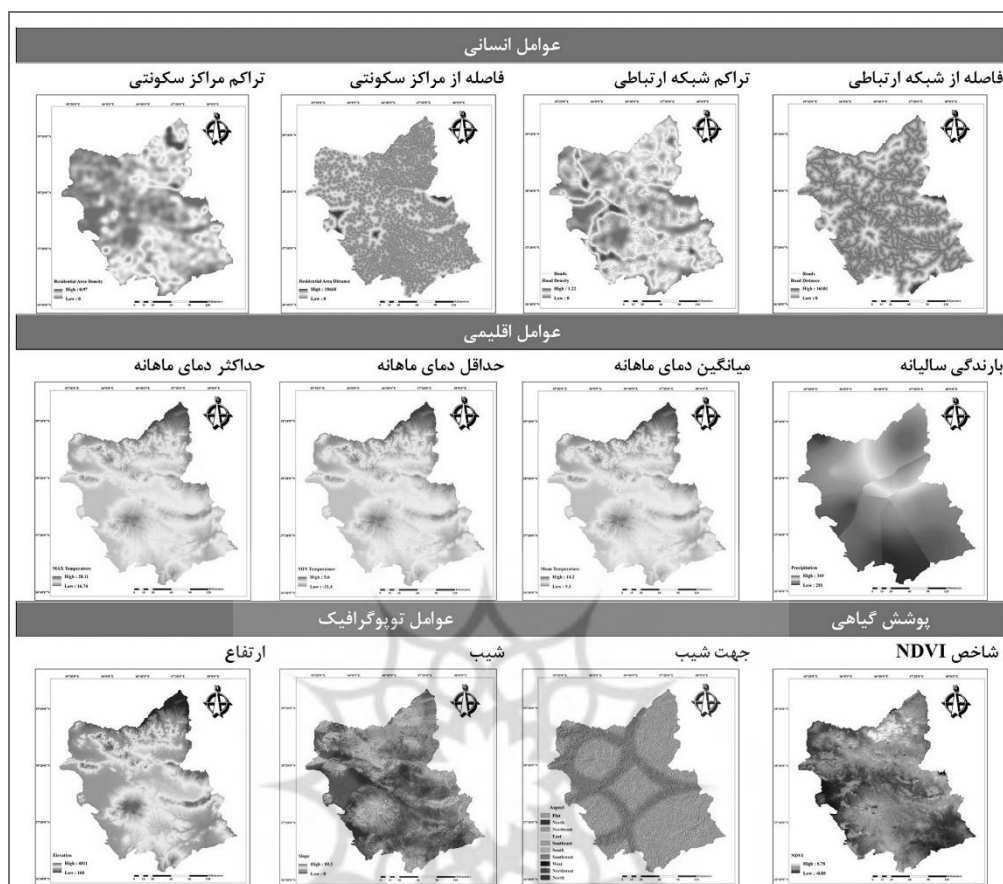
نقشه‌های کاربری- پوشش اراضی استان در سه دوره مورد بررسی به‌صورت جداگانه با تهیه تصاویر ماهواره لندست از منطقه مورد مطالعه پس از اعمال مراحل پیش‌پردازش مناسب و استفاده از روش طبقه‌بندی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۱ (Shao & Lunetta, 2012) تولید شده است. در مرحله بعدی با استفاده از نقشه‌های کاربری- پوشش اراضی و نقشه شبکه‌های ارتباطی، به‌منظور تهیه لایه فاصله از مراکز سکونت و فاصله از شبکه ارتباطی از تابع فاصله اقلیدسی و برای ایجاد لایه‌های تراکم مراکز سکونت و تراکم شبکه ارتباطی از تابع تراکم در محیط نرم‌افزار ArcMap استفاده شده است، لازم به ذکر است که با توجه به امکان بروز تغییرات در معیارها، برای هر یک از دوره‌ها تمامی لایه‌ها به صورت جداگانه تولید شده‌اند.

1 Multilayer perceptron neural networks

جدول ۲. متغیرهای زیست محیطی - انسانی مورد استفاده در مدل

منابع استنادشده	منبع تهیه	پارامتر	نوع	ردیف	
Rundel & King, 2001; Balzter et al 2005; Tanskanen et al., 2005; Adab et al., 2013; Arpaci et al., 2014; Thomason, 2015; Chen et al., 2015.	۵ فریم از تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ (سالهای ۱۳۸۸، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴)	تراکم مراکز سکونتی	عوامل انسانی	۱	
		فاصله از مراکز سکونتی		۲	
		تراکم شبکه ارتباطی		۳	
		فاصله از شبکه ارتباطی		۴	
	مدل رقومی ارتفاع سنجنده استر (ASTER GDEM)	ارتفاع	ارتفاع	عوامل توپوگرافیک	۵
			شیب		۶
			جهت شیب		۷
	مشاهدات اقلیمی ۳۰ ساله از اداره هواشناسی استان	حداکثر دمای ماهانه	حداکثر دمای ماهانه	عوامل اقلیمی	۸
			حداقل دمای ماهانه		۹
			میانگین دمای ماهانه		۱۰
			بارندگی سالیانه		۱۱
	تصاویر سنجنده مودیس (سالهای ۱۳۸۸، ۱۳۹۱، ۱۳۹۴)	شاخص NDVI	پوشش گیاهی	۱۲	

به منظور تهیه عوامل توپوگرافیکی مدنظر شامل؛ ارتفاع، شیب و جهت شیب، از مدل رقومی ارتفاع سنجنده استر (ASTER Global DEM) استفاده شده است. در طی آماده سازی معیارهای حداکثر دمای ماهانه، حداقل دمای ماهانه و میانگین دمای ماهانه از روش درون یابی جبری استفاده گردیده است (ولی زاده، ۱۳۹۳). تهیه لایه میانگین بارندگی سالیانه از طریق روش درون یابی کریجینگ معمولی صورت گرفته است (مهام و همکاران، ۱۳۹۰). بررسی وضعیت و شرایط پوشش گیاهی منطقه با استفاده از شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI) حاصل از تصاویر سنجنده مودیس (۱۳۸۸، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴) صورت گرفته است. نقشه های مربوط به متغیرهای مستقل دوره اول در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. متغیرهای مستقل دوره اول

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اجرای مدل

مدل‌سازی مناطق مستعد آتش‌سوزی با استفاده از بسته نرم‌افزاری رایگان MaxEnt 3.3.3k^۱ انجام گرفته است. خروجی‌های اصلی این مدل شامل؛ نقشه خطرپذیری منطقه مورد مطالعه نسبت به آتش‌سوزی، نمودار تحلیل منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده (ROC)^۲ برای ارزیابی کیفیت کلی مدل و همچنین تحلیل جک‌نایف^۳ برای بررسی اهمیت هریک از متغیرهای مستقل، می‌باشد.

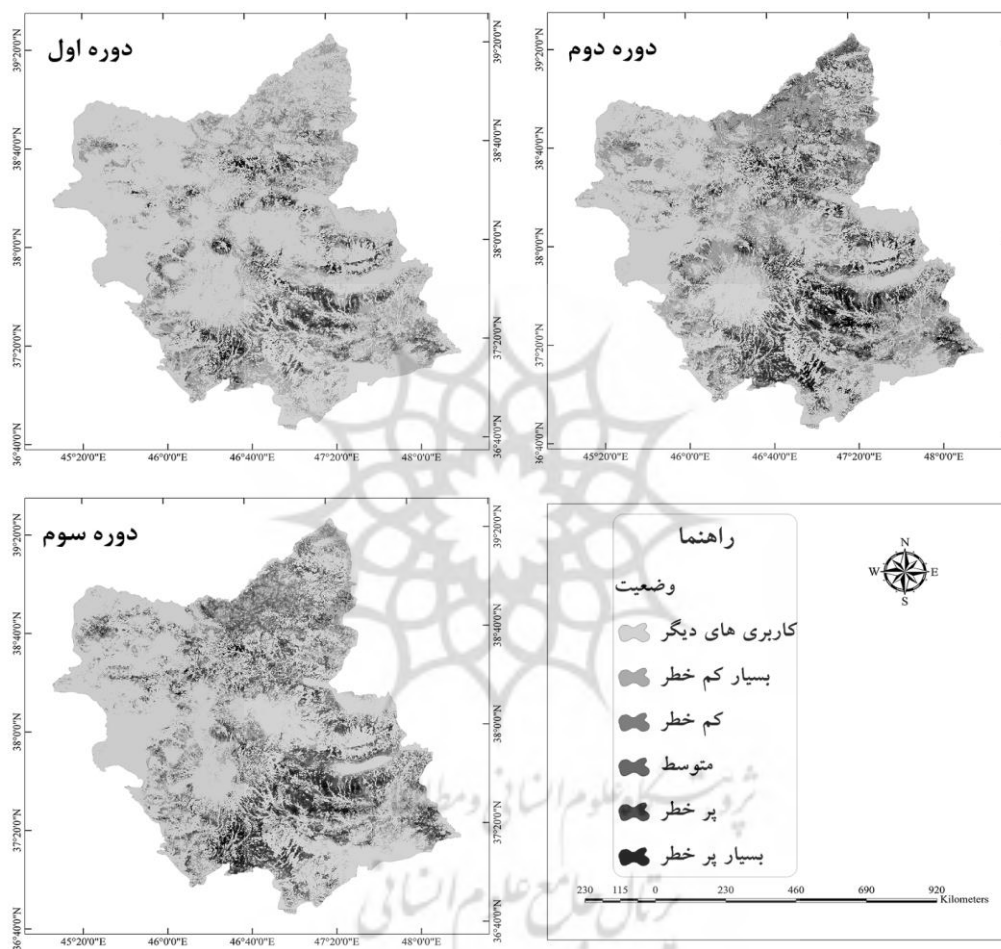
فرآیند اجرای مدل برای سه دوره زمانی سه‌ساله با استفاده از نقاط وقوع آتش‌سوزی به‌عنوان متغیر وابسته و ۱۲ معیار زیست‌محیطی-انسانی به‌عنوان متغیر مستقل، به انجام رسید. در مدل‌های اجرا شده در این پژوهش، ۷۵ درصد

1 <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>

2 Receiver Operating Characteristic curve

3 Jackknife test

از نقاط وقوع برای ساخت مدل (داده‌های یادگیری) و ۲۵ درصد دیگر برای ارزیابی مدل (داده‌های آزمون) مورد استفاده قرار گرفته، همچنین تعداد تکرار مدل ۱۵ بار در نظر گرفته شد که در این حالت مدل ۱۵ بار به صورت مستقل از دفعات دیگر اجرا شده و در نهایت میانگین آن‌ها به عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته می‌شود. خروجی حاصل از مدل‌های اجرا شده برای سه دوره مورد بررسی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. نقشه خطرپذیری آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی در سه دوره مورد بررسی

جدول ۳ نشان‌دهنده وضعیت پهنه‌های مختلف از نظر خطر آتش‌سوزی، مساحت پهنه‌ها و همچنین روند تغییرات خطر آتش‌سوزی در دوره‌های مورد بررسی می‌باشد. بر این اساس بیشترین میزان تغییرات مربوط به کاهش مساحت پهنه‌های با خطر بسیار کم و افزایش مساحت اراضی واقع در پهنه‌های با خطر متوسط و بسیار پرخطر می‌باشد، به نظر می‌رسد که با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه و تشدید عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی نتایج بدست آمده قابل توجه است.

جدول ۳. تغییرات وضعیت خطر آتش‌سوزی در بازه زمانی ۹ ساله مورد بررسی

میزان تغییرات	دوره سوم		دوره دوم		دوره اول		وضعیت
	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	
		کیلومتر مربع		کیلومتر مربع		کیلومتر مربع	
۱۳۹۴-۱۳۸۶							
کیلومتر مربع							
+ ۴۶۸/۰۲	۵۳/۸۶	۲۵۳۱۳/۲۱	۵۳	۲۴۹۱۲/۶۹	۵۲/۸۷	۲۴۸۴۵/۱۹	کاربری‌های دیگر
- ۳۶۵۸/۰۷	۱۸/۴۳	۸۶۶۶	۲۱/۶	۱۰۱۴۹/۸۳	۲۶/۲۲	۱۲۳۲۴/۰۷	بسیار کم خطر
- ۸۸۴/۵۷	۶/۲۷	۲۹۴۶/۶	۷/۰۵	۳۳۱۱/۹۵	۸/۱۵	۳۸۳۱/۱۷	کم خطر
+ ۱۴۶۸/۰۷	۸/۰۳	۳۷۷۲/۵۳	۶/۶۶	۳۱۳۱/۲۵	۴/۹	۲۳۰۴/۴۶	متوسط
+ ۱۳۰۱/۳۹	۷/۱۷	۳۳۶۹/۱۲	۶/۳۸	۳۰۰۰/۵۴	۴/۴	۲۰۶۷/۸۳	پرخطر
+ ۱۳۰۵/۱۳	۶/۲۴	۲۹۳۲/۵۴	۵/۳۱	۲۴۹۳/۸۴	۳/۴۶	۱۶۲۷/۴۱	بسیار پرخطر

۳-۲-دقت مدل

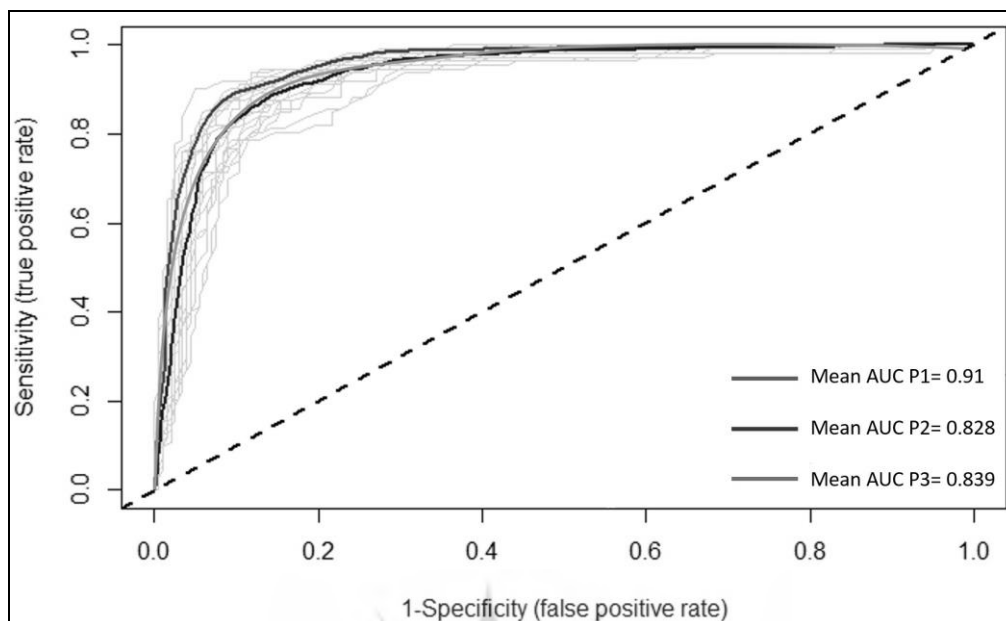
منحنی ویژگی عامل دریافت‌کننده (ROC) از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Suzen & Doyuran, 2004). در مدل‌های اجرا شده منحنی ROC بر اساس داده‌های یادگیری و آزمون تولید گردیده است، در واقع منحنی ROC بر اساس تقسیم نسبت بین حساسیت^۱ (درصد مثبت‌های صحیح) بر ویژگی^۲ (درصد منفی‌های کاذب) به دست می‌آید. سطح زیر این منحنی یعنی AUC^۳، بیانگر احتمال پیش‌بینی صحیح یک پیکسل انتخاب شده به صورت تصادفی می‌باشد، از این رو با افزایش میزان AUC قابلیت اطمینان از دقت نتایج مدل افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی مقادیر AUC بین ۰/۵ تا ۰/۸ بیانگر یک مدل متوسط و خوب، مقادیر بین ۰/۸ تا ۰/۹ مدل عالی و مقادیر بیش از ۰/۹، بیانگر قابلیت پیش‌بینی بسیار عالی مدل می‌باشد (Giovanelli et al., 2010). مساحت سطح زیر منحنی ROC مدل‌های اجرا شده برای دوره‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۸۲۸ و ۰/۸۳۹ می‌باشد. مقادیر بدست آمده نشان‌دهنده دقت بسیار مناسب مدل‌های اجرا شده در سطح جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی می‌باشد، همچنین کارایی مناسب مدل حداکثر بی‌نظمی در مدل‌سازی وقوع آتش‌سوزی در تحقیقات دیگری نیز مشاهده شده است (Parisien et al., 2012; Arpaci et al., 2014).

1 Sensitivity

2 Specificity

3 Area Under the ROC Curve



شکل ۵. منحنی ROC و مقادیر AUC مربوط به اعتبار سنجی مدل‌ها (P1 دوره اول، P2 دوره دوم و P3 دوره سوم)

۳-۳- ارزیابی اهمیت متغیرها

اهمیت هریک از متغیرهای مستقل با استفاده از آزمون جک‌نایف ارزیابی و نتایج آن برای هر سه مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. روش کار این آزمون بدین صورت است که هر بار یک متغیر کمکی از مدل خارج و مدل با استفاده از سایر متغیرها اجرا می‌شود و همچنین مدل تنها با متغیر کنار گذاشته شده به صورت مجزا نیز اجرا می‌شود، در نتیجه اشتراک هر متغیر با مدل چند متغیره (با در نظر گرفتن تمام متغیرها) محاسبه می‌شود. متغیری که کارایی مدل را بیش‌تر از سایر متغیرها می‌کاهد، جداشده و همچنین متغیری که بیش‌ترین تأثیر را بر روی مدل دارد، به‌عنوان مهم‌ترین متغیر انتخاب می‌شود (Philips et al., 2006; Arpaci et al., 2014). بررسی متغیرهای تأثیرگذار بر وقوع آتش‌سوزی‌های صورت گرفته در سطح استان آذربایجان شرقی، نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه عوامل مؤثر بر وقوع و افزایش نقش عوامل انسانی در طی دوره مورد بررسی می‌باشد. با توجه به نتایج در دوره اول عوامل زیست‌محیطی همچون وضعیت پوشش گیاهی و حداکثر دمای ماهانه تأثیرگذاری بیشتری بر وضعیت خطر آتش‌سوزی داشته است، قابل ذکر است که پوشش گیاهی همواره به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع در نظر گرفته می‌شود (Pourtaghi et al., 2015; Holsinger et al., 2016). در دوره دوم عامل شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شده که این عامل نیز در مناطق مختلفی از دنیا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع و گسترش آتش‌سوزی شناخته شده است (Erten et al., 2004; Bui et al., 2017). حال آنکه، در دوره سوم عوامل

انسانی همچون تراکم مراکز سکونتی و تراکم شبکه ارتباطی تأثیرگذاری به مراتب بیشتری نسبت به سایر عوامل داشته‌اند، اهمیت زیاد و نقش تعیین‌کننده عوامل انسانی بر وقوع آتش‌سوزی در تحقیقات دیگری نیز مشاهده شده است (Martinez et al., 2009; Salis et al., 2013; Rodrigues et al., 2016). در رابطه با عوامل انسانی، به نظر می‌رسد که آتش‌سوزی‌های ناشی از بی‌دقتی مسافران و گردشگران، آتش‌سوزی‌های عمدی به‌منظور تغییر کاربری و افزایش مساحت زمین‌های کشاورزی از مهم‌ترین علل وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع این منطقه بوده است.

جدول ۴. درصد تأثیر متغیرهای مستقل در مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی

ردیف	دوره اول (۱۳۸۸ - ۱۳۸۶)		دوره دوم (۱۳۹۱ - ۱۳۸۹)		دوره سوم (۱۳۹۲ - ۱۳۹۴)	
	نام متغیر	درصد تأثیر	نام متغیر	درصد تأثیر	نام متغیر	درصد تأثیر
۱	پوشش گیاهی	۲۳/۷	شیب	۲۵	تراکم مراکز سکونتی	۲۶/۷
۲	حداکثر دما ماهانه	۱۷/۲	تراکم مراکز سکونتی	۱۹/۲	تراکم شبکه ارتباطی	۱۸/۸
۳	شیب	۱۴/۲	پوشش گیاهی	۱۴/۴	جهت شیب	۱۷/۸
۴	تراکم مراکز سکونتی	۱۱/۲	تراکم شبکه ارتباطی	۱۰/۳	پوشش گیاهی	۸/۸
۵	ارتفاع	۱۰/۷	حداکثر دما ماهانه	۸/۸	میانگین دما ماهانه	۸/۷
۶	تراکم شبکه ارتباطی	۸/۵	ارتفاع	۸/۴	شیب	۸
۷	جهت شیب	۶	فاصله از مراکز سکونتی	۵/۳	حداکثر دما ماهانه	۵/۷
۸	فاصله از مراکز سکونتی	۳/۷	جهت شیب	۳/۶	فاصله از شبکه ارتباطی	۲/۵
۹	فاصله از شبکه ارتباطی	1/2	بارندگی سالیانه	۲/۴	ارتفاع	۱/۲
۱۰	بارندگی سالیانه	۱/۴	حداقل دما ماهانه	۱/۱	فاصله از مراکز سکونتی	۰/۹
۱۱	میانگین دما ماهانه	۰/۸	فاصله از شبکه ارتباطی	۰/۹	بارندگی سالیانه	۰/۴
۱۲	حداقل دما ماهانه	۰/۵	میانگین دما ماهانه	۰/۶	حداقل دما ماهانه	۰/۳

۴- جمع‌بندی

مدل‌سازی و تحلیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع با توجه به اثرگذاری متفاوت و متغیر عوامل محیطی - انسانی فرآیندی بسیار پیچیده و غیرخطی می‌باشد، از این رو استفاده از رویکردی مناسب با قابلیت مدل‌سازی فرآیند-های غیرخطی همچون تکنیک‌های یادگیری ماشینی همچون روش حداکثر بی‌نظمی منجر به ارتقا عملکرد و قابلیت تجزیه و تحلیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع خواهد شد. در این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های آماری و

مکانی آتش‌سوزی‌های رخ داده در سه دوره زمانی (۱۳۸۶-۱۳۸۸، ۱۳۸۹-۱۳۹۱ و ۱۳۹۲-۱۳۹۴) و ۱۲ متغیر زیست‌محیطی-انسانی در بستر الگوریتم حداکثر بی‌نظمی (MaxEnt) به بررسی تغییرات خطر آتش‌سوزی و عوامل مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی پرداخته شده است.

مقادیر کمی حاصل از ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC در دوره اول برابر با ۰/۹۱ بوده و در دوره دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۸۲۸ و ۰/۸۳۹ است که نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب مدل حداکثر بی‌نظمی در مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی می‌باشد. با توجه به نتایج این پژوهش و ارزیابی‌های صورت گرفته از مطالعات پیشین، مدل حداکثر بی‌نظمی به‌عنوان روشی بسیار مناسب برای ارزیابی و مدل‌سازی خطر و عوامل تأثیرگذار بر آتش‌سوزی مطرح شده و نتایج حاصل از آن بایستی در جهت اقدامات پیشگیرانه برای استقرار ابزار و ادوات مهار آتش و همچنین تصمیم‌گیری‌های مناسب و علمی‌تر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با مشخص شدن میزان نقش پارامترهای مؤثر در این مطالعه، امکان مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب‌تر عوامل تشدیدکننده آتش‌سوزی منابع طبیعی با برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد میسر می‌گردد. بررسی تغییرات خطر وقوع آتش‌سوزی و روند صعودی خطر آتش‌سوزی در منطقه لزوم توجه هرچه بیشتر به این مسئله و برنامه‌ریزی‌های کلان و مناسب را نمایان می‌سازد، از طرف دیگر افزایش تأثیر عوامل انسانی بر وقوع آتش‌سوزی در طی سالیان اخیر لزوم فرهنگ‌سازی، افزایش آگاهی‌های عمومی و همچنین بهره‌گیری از پتانسیل‌های مردمی در زمینه فعالیت‌های پیشگیرانه از وقوع آتش‌سوزی را طلب می‌کند.

نگارندگان بر این باورند که در تحقیقات آینده توجه به بحث تحلیل حساسیت، عدم قطعیت و امکان بهینه‌سازی مدل‌های یادگیری ماشینی در تحلیل خطر آتش‌سوزی و همچنین بررسی دقت و عملکرد روش‌های دیگر مبتنی بر محاسبات نرم از جمله؛ ماشین بردار پشتیبان (SVM) و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) به‌عنوان تحقیقاتی ارزشمند خواهند بود.

منابع

رسولی، علی‌اکبر؛ ۱۳۸۷. مبانی سنجش از دور کاربردی با تأکید بر پردازش تصاویر ماهواره‌ای. انتشارات دانشگاه تبریز.

زاهدی، مجید؛ رسولی، علی‌اکبر؛ فرجی، عبدالله؛ ۱۳۸۸. تهیه اطلس اقلیمی آذربایجان. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۲۷، ۲۱۵-۲۳۰.

عالی محمود سراب، سجاده؛ فقهی، جهانگیر؛ جباریان امیری، بهمن؛ ۱۳۹۱. پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه‌ی موردی: جنگل‌های منطقه زاگرس، شهرستان ایذه). اکولوژی کاربردی، شماره ۱(۲)، ۷۵-۸۵.

مهام، اکرم؛ ولی زاده کامران، خلیل؛ قهرمانی، محمد؛ ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آمار جهت بررسی تغییرات منطقه‌ای بارش در شمال غرب کشور و پیشنهاد بهترین مدل با استفاده از GIS. همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین، یزد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد. ولی زاده کامران، خلیل؛ ۱۳۹۲. برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفنز با استفاده از GIS. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۱۸(۴۹)، ۳۱۷-۳۳۴.

- Adab H, Kanniah KD, Solaimani K., 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural hazards*, 65(3): 1723-1743.
- Anderson P, Dudík R, Ferrier M, Guisan S, Hijmans AJ, Huettmann R, Loiseau B., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151.
- Arnett JT, Coops NC, Daniels LD, fall RW., 2015. Detecting forest damage after a low-severity fire using remote sensing at multiple scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35: 239-246.
- Arpaci A, Malowerschnig B, Sass O, Vacik H., 2014. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Journal of Applied Geography*, 53: 258-270.
- Balster H, Gerard FF, George CT, Rowland CS, Jupp TE, McCallum I, Schmulius C., 2005. Impact of the Arctic Oscillation pattern on internal forest fire variability in Central Siberia. *Geophysical Research Letters*: 32(14).
- Bui DT, Bui QT, Nguyen QP, Pradhan B, Nampak H, Trinh PT., 2017. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233: 32-44.
- Chen F, Du Y, Niu S, Zhao J., 2015. Modeling Forest Lightning Fire Occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. *Journal of Forest*, 6: 1422-1438.
- Chuvieco E, Aguado I, Yebra M, Nieto H, Salas J, Martin P, Vilar L, Martinez J, Martin S, Ibarra P, de la Riva J, Baeza J, Rodríguez F, Molina JR, Herrera MA, Zamora R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221: 46-58.
- Deblauwe V, Barbier N, Couteron P, Lejeune O, Bogaert J., 2008. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecology and Biogeography* 17: 715-723.
- Dong XU, Li-min D, Guo-fan S, Lei T, Hui W., 2005. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, and China. *Journal of forestry research*, 16(3): 169-174.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43-57.
- Erten E, Kurgun V, Musaoglu N., 2004. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS: a case study. *XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, July, Istanbul, Turkey, Proceeding, 222-230.
- Eskandari S, Chuvieco E., 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42: 57-64.
- Ferrarini A., 2012. Why not use niche modelling for computing risk of wildfire ignition and

- Spreading? Environmental Skeptics and Critics, 1(4): 56-60.
- Giovanelli JG, de Siqueira MF, Haddad CF, Alexandrino J., 2010. Modeling a spatially restricted distribution in the Neotropics: How the size of calibration area affects the performance of five presence-only methods. *Ecological Modelling*, 221(2): 215-224.
- Hernandez-Leal PA, Arbelo M, Gonzalez-Calvo A., 2006. Fire risk assessment using satellite data. *Advances in Space research*, 37(4): 741-746.
- Holsinger L, Parks SA, Miller C., 2016. Weather, fuels, and topography impede wildland fire spread in western US landscapes. *Forest Ecology and Management*, 380: 59-69.
- Jaiswal RK, Mukherjee S, Raju KD, Saxena R., 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1): 1-10.
- Leblon B, García PAF, Oldford S, Maclean DA, Flannigan M., 2007. Using cumulative NOAA-AVHRR spectral indices for estimating fire danger codes in northern boreal forests. *International journal of applied earth observation and Geoinformation*, 9(3): 335-342.
- Maeda EE, Arcoverde GF, Pellikka PK, Shimabukuro YE., 2011. Fire risk assessment in the Brazilian amazon using MODIS imagery and change vector analysis. *Applied Geography*, 31: 76-84.
- Martínez J, Vega-García C, Chuvieco E., 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of environmental management*, 90(2): 1241-1252.
- Massada A, Syphard AD, Stewart S., 2012. Wildfire ignition-distribution modelling: a comparative study in the Huron e Manistee National Forest. *International Journal of Wildfire*, 22(2): 174-183.
- Nieto H, Aguado I, García M, Chuvieco E., 2012. Lightning-caused fires in Central Spain: Development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. *Agricultural and forest meteorology*, 162: 35-43.
- Parisien MA, Snetsinger S, Greenberg JA, Nelson CR, Schoennagel T, Dobrowski SZ, Moritz MA., 2012. Spatial variability in wildfire probability across the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 21(4): 313-327.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE., 2006. Maximum k8entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Pourtaghi ZS, Pourghasemi HR, Rossi M., 2015. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(4): 1515-1533.
- Renard Q, Péliissier R, Ramesh BR, Kodandapani N., 2012. Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. *International journal of Wildland Fire*, 21: 368-379.
- Rodrigues M, Jiménez A, de la Riva J., 2016. Analysis of recent spatial-temporal evolution of human driving factors of wildfires in Spain. *Natural Hazards*, 84(3): 2049-2070.
- Rundel PW, King JA., 2001. Ecosystem processes and dynamics in the urban/wildland interface of Southern. California. *Journal of Mediterranean Ecology*, 2: 209-220.
- Salis M, Ager AA, Finney MA, Arca B, Spano D., 2014. Analyzing spatiotemporal changes in wildfire regime and exposure across a Mediterranean fire-prone area. *Natural Hazards*, 71(3): 1389-1418.
- Shao Y, Lunetta RS., 2012. Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 70: 78-87.

- Süzen ML, Doyuran V., 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5): 665-679.
- Syphard AD, Radeloff VC, Keuler NS, Taylor RS, Hawbaker TJ, Stewart SI, Clayton MK., 2008. Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildfire*, 17: 602-613.
- Tanskanen H, Venäläinen A, Puttonen P, Granström A., 2005. Impact of stand structure on surface fire ignition potential in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(2): 410-420.
- Thomason AC., 2015. Modeling Burn Probability: A MaxEnt Approach to Estimating California's Wildfire Potential. (Doctoral dissertation, University of Southern California).
- Vadrevu KP, Eaturu A, Badarinath KV., 2010. Fire risk evaluation using multicriteria analysis—a case study. *Environmental monitoring and assessment*, 166(1-4): 223-239.
- Yin H, Kong FH, Li XZ., 2004. RS and GIS based forest fire zone mapping in Dahinggan Mountains. *Chinese Geographical Science*, 14 (3): 251- 25.

