

تهیه نقشه ریسک وقوع آتش‌سوزی مناطق جنگلی با استفاده از روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین (مطالعه موردی: استان گلستان)

علی شاه‌حیدری پور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

پرهام پهلوانی*

استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

بهناز بیگدلی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت؟ - تاریخ پذیرش؟)

چکیده

جنگل‌ها از مهم‌ترین منابع طبیعی و اکولوژیکی در کره زمین و از ارکان مهم توسعه پایدار در هر کشوری به حساب می‌آیند. آتش‌سوزی هر سال حدود ۵۵۰۰ هکتار از جنگل‌ها را در ایران از بین می‌برد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آتش‌سوزی سازمان جنگل‌ها در تلفیق با داده‌های سنجنده MODIS بین سال‌های ۹۱ تا ۹۶ نقاط آتش‌سوزی شناسایی شدند. از آنجا که بیش از ۷۵ درصد آتش‌سوزی‌ها در فصل گرم سال یعنی سه ماه تیر، مرداد و شهریور اتفاق افتاده بود، از داده‌های این سه ماه برای مدل‌سازی استفاده شد. پارامترهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی ارزیابی و پارامترهای وابسته حذف شدند. سپس دو روش رگرسیون چندگانه خطی و رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین برای پیش‌بینی ریسک وقوع آتش‌سوزی بررسی شدند. برای ارزیابی از چند پارامتر مهم شامل جذر میانگین مربعات خطاها، ضریب تعیین R^2 ، درصد برآورد درست نقاط آتش و غیرآتش و توزیع خطا استفاده شد. نتایج نشان داد که روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین با داشتن خطای میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها داده‌های آموزشی برابر با ۰/۱۶۲۸، R^2 داده‌های آموزشی برابر با ۰/۸۹۳۲، درصد پیش‌بینی درست نقاط آتش آزمایشی نزدیک به ۹۴ درصد، درصد پیش‌بینی درست نقاط غیرآتش آزمایشی نزدیک به ۸۸ درصد و توزیع مناسب‌تر خطا عملکرد بهتری نسبت به روش دیگر دارد. این امر در واقع نشان‌دهنده مدل‌سازی دقیق‌تر یک روش محلی در مقایسه با یک روش غیرمحلی است. به همین دلیل نقشه ریسک تهیه‌شده با رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین اعتمادپذیری بیشتری از روش دیگر دارد. در نهایت با استفاده از نقشه ریسک این روش مناطق پرریسک شناسایی شدند. ویژگی این مناطق شامل فاصله کم تا مناطق مسکونی و راه، دارای خاک غنی از مواد عالی، دمای به نسبت زیاد و ارتفاع کم بود.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی جنگل، رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین (MARS)، رگرسیون چندگانه خطی (MLR)، نقشه ریسک آتش‌سوزی.

مقدمه

جنگل‌ها از مهم‌ترین منابع طبیعی و اکولوژیکی کره زمین و از ارکان اصلی توسعه پایدار در هر کشوری به حساب می‌آیند. در دنیای معاصر ارزش تولیدی جنگل‌ها رقمی نزدیک به ۱۲۰ میلیارد دلار است و معیشت حدود ۹/۱ میلیارد نفر به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به جنگل وابسته است [۵].

براساس نظر کارشناسان جهانی از جمله فائو چنانچه سطح جنگل‌های هر کشور کمتر از ۲۵ درصد خاک آن کشور باشد، از نظر محیط زیست انسانی آن کشور در وضعیت بحرانی قرار دارد [۶]. از این رو ایران یکی از کشورهایی است که از لحاظ منابع جنگلی بسیار فقیر است. در یک دوره ۲۸ ساله حدود ۱۹۰۰۰۰ هکتار از جنگل‌های کشور بر اثر آتش‌سوزی از دست رفته است. آتش‌سوزی جنگل علاوه بر تغییر در اکوسیستم طبیعی و نابودی بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری یک منطقه، آثار مخرب دیگری از جمله آلودگی هوا، فرسایش خاک و حتی تغییرات آب‌وهوایی از خود بر جای می‌گذارد [۷]. در واقع امروزه اهمیت روزافزون حفاظت از جنگل‌ها و منابع طبیعی سبب شده است که توجه از مدیریت بحران به مدیریت ریسک تغییر یابد.

تا کنون مدل‌های متنوعی در زمینه ارزیابی ریسک وقوع آتش‌سوزی و تعیین پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی و گسترش آن در مناطق جنگلی معرفی شده است. در حوزه ارزیابی ریسک آتش‌سوزی، چوویکو و کونگالتون [۸] از نخستین کسانی بودند که به این موضوع پرداختند. در تعدادی از تحقیقات، تنها روش‌های آماری [۹،۱۰] و در مواردی علاوه بر روش آماری، روش‌های دیگری مانند شبکه عصبی مصنوعی [۱۱] برای تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی مناطق جنگلی استفاده شد. همچنین در برخی تحقیقات با به‌کارگیری مدل‌های فازی روی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی، نقشه ریسک مناطق جنگلی در شمال شرق و غرب ایران تهیه شد [۲،۱]. در سال‌های اخیر نیز تحقیقات متعددی درباره پهنه‌بندی نقشه ریسک با به‌کارگیری پارامترهای بیوفیزیکی و انسانی همچون ارتفاع، جنس خاک، دما و فاصله از سکونتگاه در مناطق مختلفی از جمله جنگل‌های هند، ایران و کانادا انجام گرفته است [۱۶-۱۲]. در نهایت نقشه پهنه‌بندی ریسک برای مناطق تحت مطالعه تهیه شده است. در حوزه تعیین پارامترهای بهینه نیز تاکنون تحقیقات متعددی انجام گرفته است. در تعدادی از این تحقیقات [۱۷،۱۸] عنوان شد که پارامترهای انسانی بیشترین تأثیر را در وقوع آتش‌سوزی دارند. در برخی پژوهش‌ها [۱۹،۲۰] ضمن تعیین روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی به‌عنوان روش بهینه در شناسایی عوامل مؤثر در آتش‌سوزی مناطق جنگلی، پارامترهایی همچون

میانگین دما، جنس خاک و فاصله از جاده به‌عنوان پارامترهای مؤثر معرفی شد. در زمینه گسترش آتش‌سوزی نیز مدل‌های متنوعی با به‌کارگیری روش‌های مختلف از جمله اتوماتای سلولی و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی ارائه شده است [۳، ۴، ۲۱].

تحقیق حاضر به مدل‌سازی، تهیه نقشه ریسک و تعیین ویژگی مناطق پرریسک آتش‌سوزی می‌پردازد. پارامترهای بهینه آتش‌سوزی از تحقیق جامع راعی و همکاران [۲۰] استخراج شد. ابتدا روی لایه‌های اطلاعاتی پارامترهای مؤثر و لایه آتش‌سوزی پیش‌پردازش انجام گرفت و پارامترهای وابسته حذف شد. برای مدل‌سازی ریسک وقوع آتش‌سوزی با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین‌شده، از روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین^۱ در مقایسه با رگرسیون چندگانه خطی^۲ استفاده گردید. سپس پارامترهای ارزیابی مقایسه و روش بهینه تعیین شد. سپس نقشه ریسک هر روش برای منطقه تحقیق تولید شد. در نهایت مناطق پرریسک استخراج و ویژگی این مناطق بررسی شد. استفاده از روش مدل‌سازی محلی دقیق (رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین)، به‌کارگیری پارامترهای مؤثر متنوع انسانی، فیزیکی و آب‌وهوایی در کنار هم در یک دوره شش‌ساله، وسعت منطقه و تحلیل مکانی روی ویژگی‌های مناطق پرریسک سبب تمایز و نوآوری این مدل‌سازی شد.

روش تحقیق

منطقه و داده‌های مکانی تحت مطالعه

از آنجا که استان گلستان دارای پوشش گیاهی متنوع، دسترسی‌های مختلف انسانی، تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی و از همه مهم‌تر بیشترین تعداد وقوع آتش‌سوزی در طول سال است، این استان به‌عنوان منطقه تحقیق انتخاب شد. منطقه تحقیق در محدوده $36^{\circ}31' - 38^{\circ}22'$ شمالی و $53^{\circ}91' - 56^{\circ}19'$ شرقی واقع شده است و مساحتی در حدود ۲۰۲۵ کیلومتر مربع دارد.

معرفی داده‌های مکانی

برای استخراج پارامترهای مدل‌سازی منطقه، به مجموعه‌ای از لایه‌های اطلاعاتی نیاز بود. جمع‌آوری این لایه‌های اطلاعاتی در سه بخش کلی است که در زیر به تفکیک به آنها اشاره شده است.

• اطلاعات آتش‌سوزی

داده‌های آتش‌سوزی بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ میلادی) از سازمان

1. Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)
2. Multiple Linear Regression (MLR)

جنگل‌ها اخذ شد. از آنجا که این داده‌ها کامل نبودند، داده‌های آتش‌سوزی سنجنده MODIS با توان تفکیک یک کیلومتر نیز برای تکمیل مجموعه داده‌ها استخراج شد. در نهایت با تکمیل داده‌های آتش‌سوزی سازمان جنگل‌ها با داده‌های سنجنده ذکرشده، ۵۷۶ نقطه آتش بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ در استان گلستان شناسایی شد.

با بررسی‌های آماری زمان وقوع آتش‌سوزی‌ها، مشخص شد بیش از ۷۵ درصد آتش‌سوزی‌ها (۴۳۲ نقطه آتش) در سه ماه تابستان یعنی تیر، مرداد و شهریور اتفاق افتاده است. از این رو پیاده‌سازی روی داده‌های این سه فصل داغ سال صورت گرفت.

از آنجا که برای مدل‌سازی به نقاط غیرآتش نیز نیاز بود، ۳۸۵ نقطه غیرآتش در کل استان انتخاب شد. این نقاط به صورت تصادفی در کل استان، با فاصله معین از نقاط آتش و با توزیع تصادفی در طول ۶ سال انتخاب شدند. برای این نقاط پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی با استفاده از نقشه‌های از پیش تولیدشده، در محیط ArcGIS استخراج شدند.

• اطلاعات هواشناسی

اطلاعات هواشناسی چهار ایستگاه هواشناسی استان گلستان شامل ایستگاه‌های گرگان، گنبدکاووس، مراوه‌تپه و علی‌آباد از سازمان هواشناسی بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ تهیه شد. این اطلاعات شامل میانگین دما (درجه سانتی‌گراد)، متوسط سرعت باد (کیلومتر بر ساعت)، میانگین رطوبت نسبی (درصد)، مقدار بارندگی (میلی‌متر)، ساعات آفتابی (ساعت) و مقدار تبخیر (میلی‌متر) است. نقشه هر یک از پارامترهای استفاده‌شده به صورت ماهیانه در طول ۶ سال تهیه شد. سپس مقدار هر پارامتر با استفاده از ArcGIS برای هر نقطه در زمان خود از نقشه مورد نظر استخراج شد.

• اطلاعات زمینی

لایه اطلاعاتی زمینی شامل شبکه راه‌ها، شبکه رودخانه‌ها، مناطق مسکونی، مدل رقومی ارتفاعی^۱ و جنس خاک است. لایه جنس خاک با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و لایه‌های اطلاعاتی شبکه راه‌ها و رودخانه‌ها با مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شد. مدل رقومی ارتفاعی زمین از سازمان نقشه‌برداری با قدرت تفکیک ۳۰ متر تهیه شد.

رگرسیون چندگانه خطی

از رگرسیون چندگانه خطی به منظور بررسی ارتباط یک متغیر وابسته با یک یا چند متغیر مستقل استفاده می‌شود. شکل رگرسیون به صورت رابطه ۱ است [۲۲]:

1. Digital Elevation Model

$$Y_i = B + \sum_K B_K X_K + \varepsilon_i \quad (1)$$

Y_i ریسک وقوع آتش‌سوزی در هر نقطه، X_k پارامترهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی، B_k ضرایب پارامترهای استفاده‌شده و ε_i اختلاف مقادیر واقعی و برآورد شده است. برای محاسبه ضرایب پارامترهای رگرسیون چندگانه خطی از روش کمترین مربعات (رابطه ۲) استفاده می‌شود [۲۲]:

$$X = (B^T P B)^{-1} * B^T P Y \quad (2)$$

X بردار متغیر مستقل، B ماتریس ضرایب، P ماتریس وزن و Y بردار متغیر وابسته است.

رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین

رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین یکی از مدل‌های غیرپارامتریک محلی است که اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط فریدمن ارائه شد [۲۳]. با توجه به اینکه آتش‌سوزی به صورت غیرخطی عمل می‌کند، این روش می‌تواند بدون در نظر گرفتن هیچ فرض آماری بین متغیرهای مستقل و متغیر هدف، روابط غیرخطی بین این متغیرها را مدل‌سازی کند. این تکنیک داده‌ها را به زیرمجموعه‌هایی تقسیم کرده و متناسب با پیچیدگی داده‌ها در هر ناحیه اقدام به برازش توابعی به نام توابع پایه می‌کند. در روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین از تابع لولا به‌عنوان تابع پایه، برای بسط خطی و غیرخطی استفاده می‌شود [۲۴].

مجموعه‌ای از توابع پایه و پارامترهای مدل در کنار هم با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا با وارد کردن ورودی‌ها یک مقدار خروجی تولید کنند. مدل کلی روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین به صورت رابطه ۳ است [۲۴]:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_m h_m(X) \quad (3)$$

در این معادله Y متغیر خروجی (وابسته) برابر است با جمع پارامتر عرض از مبدأ (β_0) با ضرب تعدادی از توابع پایه (h_m) در وزن‌های معین (β_m) و X مقدار متغیر مستقل است.

پیاده‌سازی

پارامترهای بهینه برای مدل‌سازی وقوع آتش‌سوزی در مناطق جنگلی از تحقیق راعی و همکاران [۲۰] استخراج شد. این پارامترها شامل میانگین دما، مقدار بارندگی، متوسط سرعت باد، مقدار رطوبت، مقدار تبخیر، جنس خاک، فاصله از رودخانه، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از مناطق مسکونی و فاصله از راه است. پیش از مدل‌سازی لازم بود میزان همبستگی بین پارامترها در این مدل‌سازی

بررسی شود. برای به دست آمدن نتیجه مطلوب تر ابتدا داده‌ها به شکل نرمال درآمدند. برای محاسبه همبستگی بین دو پارامتر از ضریب همبستگی (رابطه ۴) استفاده شد.

$$r(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_X * \sigma_Y} \quad (4)$$

همبستگی بین پارامترهای آب‌وهوایی به نسبت بیشتر از پارامترهای دیگر بود. تبخیر-رطوبت بیشترین همبستگی (۰/۹۹) را داشتند. همچنین تبخیر-بارندگی و رطوبت-بارندگی در رده‌های بعدی بیشترین همبستگی (۰/۹۲) قرار گرفتند. این وابستگی از لحاظ علمی نیز منطقی به نظر می‌رسد. از این رو دو پارامتر وابسته اصلی یعنی مقدار تبخیر و رطوبت از پارامترها کنار گذاشته شد.

با شناسایی پارامترهای بهینه، نوبت به انتخاب روش دقیق تر در مدل‌سازی ریسک وقوع آتش‌سوزی می‌رسد. برای ارزیابی روش‌ها، داده‌ها در دو گروه داده‌های آموزشی^۱ و داده‌های آزمایشی^۲ تقسیم شدند. داده‌های آموزشی به عنوان ابزار اصلی مدل‌سازی و آموزش روش، استفاده می‌شوند و قسمت عمده داده‌ها متعلق به این گروه است. دسته دیگر، داده‌های آزمایشی است که در فرایند آموزش دخالتی ندارند و تنها برای آزمودن آموزش صورت گرفته استفاده می‌شوند. به طور یکسان برای هر دو روش، ۷۰ درصد نقاط در گروه داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد نقاط در گروه داده‌های آزمایشی قرار گرفتند. پس از فرایند آموزش با هر یک از روش‌ها به صورت جداگانه، مقدار ریسک برای هر دو گروه از داده‌های آموزشی و آزمایشی برآورد شد. پس از برآورد ریسک آتش‌سوزی، پارامترهای ارزیابی و کنترل هر روش برای هر گروه از داده‌ها به صورت جداگانه محاسبه شد.

پارامترهای ارزیابی شامل ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها^۳ و درصد مدل‌سازی درست داده‌های آزمایشی است. R^2 در واقع بیانگر ضریب رگرسیون برازش مدل به مقدار برآورد شده است. هرچه این مقدار به ۱ نزدیک تر باشد، روند مدل‌سازی با دقت بیشتری انجام گرفته است [۲۵]. $RMSE$ در واقع شاخص خطای به وجود آمده در روند مدل‌سازی است. هرچه این مقدار به صفر نزدیک تر باشد، برآورد به واقعیت نزدیک تر است [۲۶]. ارزیابی نقشه مدل‌سازی ریسک با استفاده از دو پارامتر صورت گرفت. پارامتر اول درصد برآورد درست داده‌های آزمایشی آتش‌سوزی و دیگری درصد برآورد درست داده‌های غیر آتش‌سوزی

1. Train data
2. Test data
3. Root Mean Squares Error

است. براساس این دو پارامتر دو حالت اصلی اتفاق می‌افتد: حالت اول، اگر برآورد نقاط آتش و غیرآتش به‌طور هم‌زمان غیردقیق (درصد برآورد درست آتش و غیرآتش کم) صورت گرفته باشد، نقشه ریسک دارای کمترین اعتمادپذیری است؛ حالت دوم، زمانی که برآورد نقاط آتش و غیرآتش به‌طور دقیق (درصد برآورد درست آتش و غیرآتش بالا) صورت گرفته باشد، نقشه ریسک دارای بیشترین اعتمادپذیری است.

بحث

پس از حذف پارامترهای وابسته از میان پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی، پارامترهای بهینه مؤثر در وقوع آتش‌سوزی مطابق جدول ۱ است.

در ادامه مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از دو روش صورت گرفت. در بخش داده‌های آموزشی و آزمایشی؛ $RMSE$ و R^2 برای روش‌های رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین و رگرسیون چندگانه خطی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای مؤثر در وقوع آتش‌سوزی در منطقه تحقیق

پارامترهای آب‌وهوایی	پارامترهای فیزیکی زمین	پارامترهای انسانی
میانگین دما (°)	جنس خاک	فاصله از مناطق مسکونی (ظ)
مقدار بارندگی (ظ)	ارتفاع (ظ)	فاصله از جاده (ظ)
متوسط سرعت باد (سظ)	فاصله از رودخانه (ظ)	
	جهت شیب	

جدول ۲. پارامترهای ارزیابی روش‌های مدل‌سازی ریسک

پارامتر	داده	R^2	$RMSE$	درصد برآورد درست نقاط غیرآتش	درصد برآورد درست نقاط آتش	توزیع خطاها		
							ML	R
داده‌های آموزشی	داده‌های آموزشی	۰/۶۷۲۸	۰/۲۸۴۶	۴۲٪	۷۴٪	نرمال		
		۰/۵۸۷۷	۰/۳۱۸۰			پراکندگی زیاد		
داده‌های آزمایشی	داده‌های آزمایشی	۰/۸۹۳۲	۰/۱۶۲۸	۷۸٪	۹۴٪	نرمال		
		۰/۸۲۱۱	۰/۲۰۷۸			پراکندگی کم		

نتایج به دست آمده در بخش داده‌های آموزشی بیانگر این است که در روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه خطی، روند آموزش مدل به نسبت دقیق‌تر (R^2 نزدیک‌تر به یک)، با خطای کمتر ($RMSE$ کمتر) و توزیع خطای مناسب‌تر صورت گرفته است.

یکی از ضعف‌های روش رگرسیون چندگانه خطی ثابت ضرایب پارامترها معادله برای همه نقاط منطقه است. در واقع این روش به صورت عمومی^۱ عمل می‌کند. این در حالی است که روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین به صورت محلی^۲ عمل می‌کند. این عملکرد سبب انطباق زیاد مدل بر واقعیت می‌شود. در واقع معادله برازش از هر منطقه تا منطقه دیگر متفاوت است. ممکن است در یک موقعیت یک پارامتر تأثیر مثبت و در موقعیت دیگر همان پارامتر تأثیر منفی بر افزایش ریسک آتش‌سوزی داشته باشد.

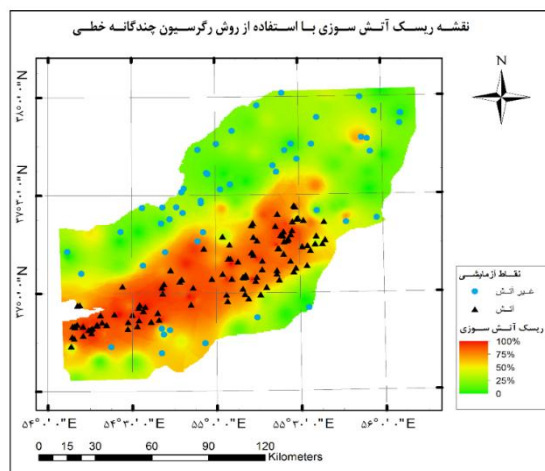
با استفاده از مقادیر ریسک برآورد شده داده‌های آزمایشی با هر روش، نقشه ریسک آتش‌سوزی هر یک از روش‌ها با درون‌یابی IDW تهیه شد. نقشه ریسک تهیه شده با روش‌های رگرسیون چندگانه خطی و رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

همان‌طور که از خروجی‌های مدل‌سازی به دست آمد، با به‌کارگیری روش رگرسیون چندگانه خطی دقت برآورد نقاط آتش و غیرآتش کم بود؛ از این رو نقشه ریسک تولید شده با این روش اعتمادپذیری کمی دارد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، بیشتر نقاط با ریسک ۵۰ درصد برآورد شده‌اند. همین مسئله قطعیت در تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد. از این رو تصمیم‌گیری با این روش پذیرفتنی نیست. از طرف دیگر روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین، نقاط آتش و غیرآتش را با دقت زیادی برآورد کرد. این امر در نقشه تولید شده با این روش (شکل ۲) مشهود است. همان‌طور که در نقشه دیده می‌شود، علاوه بر اینکه نقاط آتش با دقت مناسبی برآورد شده‌اند، نقاط غیرآتش هم با اینکه به منطقه پرریسک نزدیک بوده‌اند، به خوبی از این مناطق تفکیک شده‌اند. همان‌طور که گفته شد، ماهیت محلی بودن این روش به شدت بر عملکرد مثبت آن در برآورد ریسک تأثیرگذار بوده است.

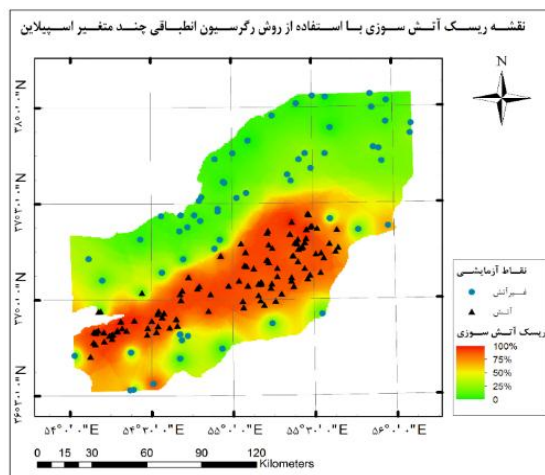
بر اساس آنچه گفته شد، نقشه تهیه شده با روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین نسبت به روش رگرسیون چندگانه خطی اعتمادپذیری بسیار بیشتری دارد. به همین دلیل از

1. Global
2. Local

نقشه ریسک تولید شده روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین برای تعیین ویژگی مناطق پرریسک آتش سوزی استفاده شد. از آنجا که ریسک آتش سوزی دارای توزیع نرمال بود، مناطقی که در رابطه ۵ صدق می کنند، جزو ۲/۵ درصد مناطق با بیشترین ریسک آتش سوزی هستند (شکل ۳).



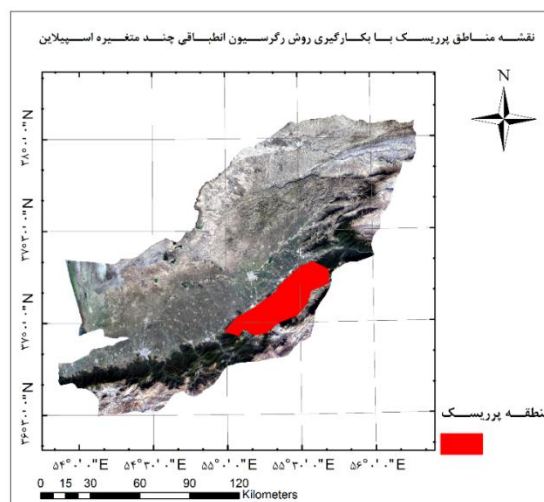
شکل ۱. نقشه ریسک آتش سوزی با استفاده از روش MLR روی داده های آزمایشی



شکل ۲. نقشه ریسک آتش سوزی با استفاده از روش MARS روی داده های آزمایشی

$$\mu + 2\sigma \leq R \quad (5)$$

که در آن μ میانگین، σ انحراف استاندارد و R ریسک آتش‌سوزی است. از ویژگی‌های اصلی مناطق ذکر شده می‌توان به‌عنوان ابزاری مهم برای تصمیم‌گیری استفاده کرد. بررسی آماری ویژگی پارامترهای مؤثر در این مناطق نشان‌دهنده چند نکته مهم بود. ویژگی این مناطق شامل فاصله کم تا مناطق مسکونی (کمتر از ۲ کیلومتر)، فاصله کم تا راه (کمتر از ۲ کیلومتر)، دارای خاک غنی از مواد عالی^۱، میانگین دمای به‌نسبت زیاد (دمای ۲۸ درجه به بالا) و ارتفاع کم (کمتر از ۵۰ متر) بود.



شکل ۳. نقشه مناطق پرریسک با روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد با استفاده از پارامترهای آب‌وهوایی، فیزیکی زمین و انسانی مختلف، روش بهینه در مدل‌سازی ریسک نقاط آتش را شناسایی کرده و با استفاده از این مدل‌سازی، نقشه ریسک آتش‌سوزی منطقه را تهیه کنیم. از این‌رو برای بهترین انتخاب، از یک روش محلی دقیق (رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین) در کنار یک روش غیرمحلی (رگرسیون چندگانه خطی) استفاده شد.

هم در بخش داده‌های آموزشی و هم در بخش داده‌های آزمایشی روش رگرسیون انطباقی

چندمتغیره اسپیلاین دارای $RMSE$ نزدیک‌تر به صفر و R^2 نزدیک‌تر به ۱ بود. همان‌طور که خروجی‌ها نشان می‌داد، روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین از روش رگرسیون چندگانه خطی هم در بخش برآورد نقاط آتش و هم غیرآتش، با دقت به نسبت بیشتری عمل کرد. این امر نشان‌دهنده اعتمادپذیری زیاد روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین بود. به‌طور کل، با توجه به دقت هر یک از روش‌ها می‌توان گفت روش رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپیلاین عملکرد بسیار دقیقی در مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی نقاط داشته است. دقت زیاد این روش در مدل‌سازی برگرفته از ماهیت محلی بودن است. پس از تعیین روش بهینه مدل‌سازی آتش‌سوزی منطقه، نقاط با ریسک زیاد آتش‌سوزی منطقه شناسایی شدند. با تحلیل آماری مشخص شد این نقاط دارای چند ویژگی اساسی شامل فاصل G کم تا مناطق مسکونی، فاصل G کم تا راه، دارای خاک غنی از مواد عالی، میانگین دمای به نسبت زیاد و ارتفاع کم هستند.

با توجه به اینکه پارامترهای انسانی تأثیر بسزایی در این پیش‌بینی داشتند، پیشنهاد می‌شود در ادامه این تحقیق از پارامترهای انسانی بیشتری مانند سطح تحصیلی، فرهنگی و اقتصادی مردم، تعداد گردشگر، قوانین و سیاست‌های مدیریت جنگل استفاده شود. از طرفی دیگر عامل‌های بیوفیزیکی مانند نوع و تراکم پوشش گیاهی و ویژگی‌های سوختی آنها نقش مهمی در وقوع آتش‌سوزی دارند. از این رو پیشنهاد می‌شود از این عوامل نیز برای بهبود عملکرد مدل استفاده شود.

منابع

- [۱]. بیگی حیدرلو، هادی؛ و بانج شفیع، عباس (۱۳۹۳)، «ارزیابی روش ترکیب خطی وزنی فازی در تهیه نقشه ریسک آتش‌سوزی جنگل»، نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، جلد ۲۲، ش ۳.
- [۲]. زرع‌کار، آزاده؛ کاظمی زمانی، بهاره؛ قربانی، ساره؛ عاشق معلا، مریم؛ و جعفری، حمیدرضا (۱۳۹۲)، «تهیه نقشه پراکندگی فضایی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سه حوزه جنگلی در استان گیلان)»، نشریه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱ (۲): ۲۱۸-۲۳۰.
- [۳]. قائمی‌راد، طاهره (۱۳۹۳)، «بررسی و ارزیابی رویکردهای مختلف جهت شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اتوماتای سلولی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی.

- [۴]. صحرایان، حمیدرضا (۱۳۹۶)، «مدل سازی گسترش آتش سوزی جنگل بر مبنای اتوماتای سلولی و به کارگیری روش های هوشمند»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [5]. López-Mondéjar, Ruben; Brabcová, Vendula; Štursová, Martina; Davidová, Anna; Jansa, Jan; Cajthaml, Tomas; Baldrian, Petr (2018). "Decomposer food web in a deciduous forest shows high share of generalist microorganisms and importance of microbial biomass recycling", *The ISME journal*, p: 1.
- [6]. FAO (2010). "Global forest resources assessment", Main report, *FAO Forest paper 163*.
- [7]. Mercer, Evan; Prestemon, Jeffrey (2007). "Comparing production function model for wild fire risk analysis in the wildland-urban interface", *Forest policy and economics*, 7(5), pp: 782-795
- [8]. Chuvieco, Emilio; Congalton, Russell (1989). "Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping", *Remote Sensing of Environment*. Vol 29: pp: 147-159.
- [9]. Li, Xiaowei; Zhao, Gang; Yu, Xiubo; Yu, Qiang (2014). "A comparison of forest fire indices for predicting fire risk in contrasting climates in China", *Natural hazards*, vol. 70, pp: 1339-1356.
- [10]. Coelho Eugenio, Fernando; Rosa dos Santos, Alexandre (2016). "Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espirito Santo", Brazil. *Journal of Environmental Management*. Vol 173 , pp: 65-71.
- [11]. Jafari Goldarag, Yunes; Mohammadzadeh, Ali. (2016). "Fire Risk Assessment Using Neural Network and Logistic Regression", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Volume 44, Issue 6, pp: 885-894.
- [12]. Pourtaghi, Zohre Sadat; Pourghasemi, Hamid Reza; Rossi, Mauro (2015). "Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran", *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, pp: 1515-1533.
- [13]. Ajin, Res; Loghin, Ana-Maria; Vinod, ;Jacob, Mathew (2016). "Forest fire risk zone mapping in Chinnar Wildlife Sanctuary, Kerala, India: A study using geospatial tools", *Journal of Global Resources*, vol. 3, pp: 16-26.
- [14]. Bernier, Pierre; Gauthier, Sylvie; Jean, Pierre-Olivier; Manka, Francis; Boulanger, Yan; Beaudoin, Andre et al. (2016). "Mapping local effects of forest properties on fire risk across Canada", *Forests*, vol. 7, p: 157.
- [15]. Suryabagavan, Karuturi; Alemu, Moi; Balakrishnan, Mia (2016). "GIS-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: a case study in Harena forest, southwestern Ethiopia", *Tropical Ecology*, vol. 57, pp: 33-43.
- [16]. Luckose, Maneesha; Arunkumar, Pier; Gopi, Ahana; Mathew, John (2017). "Forest fire hazard zonation mapping of Wayanad district of India using geospatial technology" in Disaster, Risk and Vulnerability Conference 2017, p: 91.
- [17]. Rodriguez, Taylor; Ramirez, Mason; Tchikoue, Jace (2008). "Factors affecting the accident rate of forest fire", *Ciencia Forestal en Mexico*, Vol.33, No.104, PP. 38-57.

- [18]. Romero-Calcerrada, Raul; Novillo, Charles; Millington, James (2008). "GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain)", *Landscape Ecol.* Vol.23 PP. 341–354.
- [19]. Avila, Diana; Pompa-Garcia, Marin; Antonio-Nemiga, Xanat (2010). "Driving Factors for Forest Fire Occurrence in Durango State of Mexico: A Geospatial Perspective", *Chin. Geogra. Sci.* Vol.20, No.6, PP. 491–497.
- [20]. Raei, Amin; Pahlavani, Parham; Hasanlou, Mahdi (2016). "Determining Effective Factors on Forest Fire Using the Compound of Geographically Weighted Regression and Genetic Algorithm, a Case Study: Golestan, Iran", *Iran. Journal of Geospatial Information Technology*. Vol 3, Issue 4, pp 97-120.
- [21]. Srivas, Thayjes; Artés, Tomàs; de Callafon, Raymond; Altintas, Ilkay (2016). "Wildfire Spread Prediction and Assimilation for FARSITE Using Ensemble Kalman Filtering", *Procedia Computer Science*, vol. 80, pp. 897-908.
- [22]. Berger, Paul; Maurer, Robert; Celli, Giovana (2018). "Multiple Linear Regression", in *Experimental Design*, ed: Springer, pp. 505-532.
- [23]. Friedman, Jerome (1991). "Multivariate adaptive regression splines", *The annals of statistics*, pp. 1-67.
- [24]. Knafl, George; Ding, Kai (2016). "Adaptive regression for modeling nonlinear relationships". Springer.
- [25]. Vidyullatha, Paul; Rao, Dominic (2016). "Machine Learning Techniques on Multidimensional Curve Fitting Data Based on R-Square and Chi-Square Methods", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, p. 974.
- [26]. Chai, Tony; Draxler, Randy (2014) "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature", *Geoscientific model development*, vol. 7, pp. 1247-1250.