نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳

صفحات ۱۰۱ – ۱۱۵

تحلیل پتانسیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس: بررسی تغییرات مکانی و زمانی و عوامل مؤثر

نگار حامدی؛ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان، ایران

علی اسماعیلی؛ استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان، ایران

حسن فرامرزی؛ دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران

سعید شعبانی[۱]؛ استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

بهروز محسنی؛ استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

دریافت مقاله :۱۴۰۲/۰۳/۲۷ پذیرش نهایی:۱۴۰۳/۰۷/۰۳

چکیده

آتش‌سوزی جنگل پدیده‌ای طبیعی و در عین حال یک تهدید بالقوه با اثرات محیطی، اکولوژیکی و فیزیکی می‌باشد. با توجه به اهمیت پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی جنگل، این تحقیق مناطق خطر وقوع حریق در جنگل‌های زاگرس را شناسایی و به بررسی تغییرات پتانسیل خطر آتش‌سوزی در سری‌های زمانی مختلف پرداخته است. جهت رسیدن به این هدف، با فازی‌سازی لایه‌ها از روش تحلیل شبکه‌ای و روش میانگین وزنی مرتب استفاده گردید. آتش‌سوزی جنگل‌های زاگرس شهرستان لردگان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مادیس در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ مشخص و عوامل مؤثر برآتش‌سوزی بررسی شد. سپس مناطق پرخطر طبقه‌بندی و مساحت مناطق مستعد آتش‌سوزی و تعداد زون‌ها مشخص گردید. در روش تحلیل شبکه‌ای، بیشترین وزن‌ها را عوامل فاصله از مناطق مسکونی و جاده، شاخص GVMI و حداکثر دمای روزانه هوا (به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۰۹، ۰/۱۹۸، ۰/۰۹ و ۰/۰۷۱۶) بدست آوردند. تحلیل سری زمانی نقشه‌ها نشان داد از عوامل مؤثر بر وقوع حریق در مناطق بحرانی، عامل فاصله از جاده و مناطق مسکونی، شیب، جهت، شاخص GVMI، NDVI و حداکثر دما بیشترین تأثیر را در ایجاد حریق داشتند. سناریوی سطح ریسک پایین و مقدار اندک جبران نیز با میزان ROC بالاتر از ۰/۷ به‌عنوان بهترین مدل ریسک آتش‌سوزی جنگل برآورد گردید. بر اساس یافته‌ها، تهیه نقشه مناطق مستعد آتش‌سوزی و همچنین بررسی و تحلیل سری زمانی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در سال‌های مختلف، به عنوان گامی موثر در کمک به حافظان جنگل و مسئولین و جهت برنامه‌ریزی و اجرای عملیات پیشگیرانه در مناطق پرخطر مفید است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل شبکه، روش میانگین وزنی مرتب، سری زمانی، لردگان

[۱] نویسنده مسئول: Email: saeidshabani07@gmail.com

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

مقدمه

آتش‌سوزی یک اختلال عمده در تمام اکوسیستم‌های زمینی محسوب شده که پیآمدهای مهم بیوفیزیکی و محیط زیستی در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌کند (Eskandari et al., 2020). افزایش فراوانی و شدت آتش‌سوزی‌های جنگلی، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی، اکوسیستم‌ها و رفاه انسان است (Chicas and Nielse, 2022)، که به‌طور معمول به عواملی مانند تغییرات آب و هوایی (درجه حرارت بالا، الگوهای بارش تغییریافته و خشک‌سالی‌های طولانی) و تأثیرات انسانی نسبت داده می‌شود (Dang et al, 2021; Tuyen et al, 2021). در مجموع، این عوامل شرایطی را ایجاد می کنند که منجربه اشتعال و انتشار سریع آتش سوزی می‌شود (Rihan et al, 2023; Saha et al, 2023). بنابراین مطالعه پدیده آتش‌سوزی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد در مدیریت بحران و به‌منظور کنترل و کاهش تخریب‌های آتش‌سوزی مورداستفاده قرار گیرد (Veraverbeke et al, 2012; Bargali et al, 2024). درگذشته، شناسایی و کنترل آتش‌سوزی جنگل متکی به نیروی انسانی و هواپیماها بوده که بسیار پرهزینه است. در سال‌های اخیر، ماهواره‌های سنجش‌ازدور به یک ابزار قدرتمند برای نظارت بر آتش‌سوزی جنگل‌ها با دقت خوب و به‌موقع تبدیل‌شده است (Wang et al, 2012).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه پیش‌بینی رفتار آتش‌سوزی و مدل‌سازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور صورت گرفته است. پرادان و همکاران (۲۰۰۵) توانایی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی را جهت سنجش حساسیت آتش‌سوزی جنگل در منطقه‌ای در مالزی با کاربرد مدل نسبت فراوانی آزمایش نمودند. در این مدل نسبت فراوانی ارتباط بین محل ظهور مناطق حساس به آتش‌سوزی و هر عاملی که باعث ظهور آتش‌سوزی می‌گردد محاسبه گردید. ویلیام و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی به میزان تأثیر توپوگرافی و آب و هوا در الگوی آتش‌سوزی در کوهستان‌های آمریکا پرداختند. نتایج نشان داد که آب و هوا نقشی مؤثر و قوی در هر دو الگوی زمانی و مکانی آتش‌سوزی دارد. همچنین بیشتر آتش‌سوزی‌ها در جهت‌های جنوبی و ارتفاعات پایین به وقوع پیوسته است. وانگ و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی از داده‌های ماهواره‌ای و یک الگوریتم بهبود یافته برای تشخیص آتش‌سوزی جنگل استفاده کردند. نتایج نشان داد که میانگین انحراف معیار از منطقه سوخته ۱۱ درصد، میانگین انحراف معیار بر اساس محصولات آتش MODIS، ۱۳ درصد و دقت پیش‌بینی ۸۹ درصد می‌باشد. از این رو الگوریتم بهبودیافته، پایدار و بسیار قابل اعتماد تشخیص داده شد. مارتینز و همکاران (۲۰۱۶) حساسیت باند L تصاویر ALOS / PALSAR را در شناسایی میزان تخریب جنگل‌های آتش گرفته در شمال آمازون مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که باند L، به تغییرات در ساختار تاج‌پوشش و زیست‌توده هوایی ناشی از آتش‌سوزی جنگل حساس بوده و مدل رگرسیون و قدرت متریک رادار، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه می‌دهند. فرامرزی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی نقش شاه راه پارک ملی گلستان بر روی آتش‌سوزی‌های این منطقه با استفاده از روش میانگین وزنی مرتب شده در شش سناریو پرداختند. نتایج نشان داد جاده ترانزیتی در ۴۱ درصد آتش‌سوزی‌های منطقه نقشی مستقیم داشته و در صورت عدم حضور جاده ترانزیتی مساحت آتش‌سوزی کاهش می‌یابد. آتش در جنگل‌های زاگرس، گذشته از نابودی ذخایر ژنتیکی، سیر تکاملی جنگل در رسیدن به کلیماکس را به تأخیر انداخته و موجب بروز ناهنجاری‌هایی در موجودات زنده شده و هزینه سنگین بازسازی جنگل را بر جامعه تحمیل می‌کند. مطابق آمار سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، ۷۰ درصد از حریق‌ها در سطح کشور در جنگل‌های زاگرس رخ می‌دهد. با توجه به آثار این مسئله، آتش‌سوزی جنگل‌های زاگرس شهرستان لردگان از

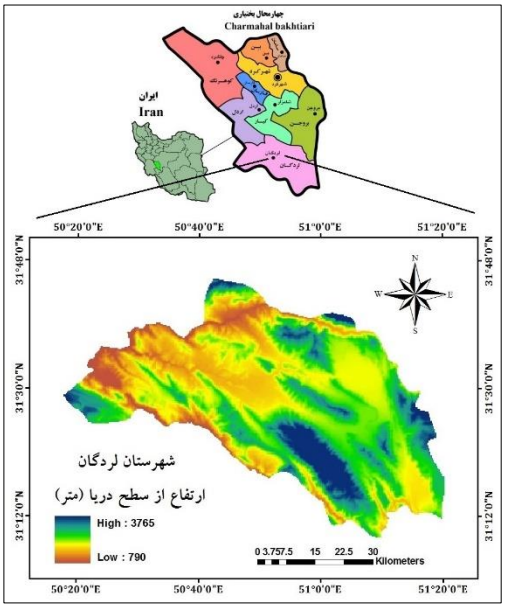
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

توابع استان چهارمحال بختیاری مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس، تحقیق حاضر با تحلیل زمانی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴، مناطق بحرانی خطر حریق در جنگل‌های منطقه را شناسایی و تأثیر عوامل مختلف در وقوع حریق را در نواحی مستعد آتش سوزی مورد بررسی قرار داد. با استفاده از این روش می‌توان با معرفی مناطق بحرانی و عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی به مسئولان منطقه، آن‌ها را جهت ارائه راهکاری برای پیشگیری از وقوع حریق‌های آینده در جنگل‌های منطقه یاری داد.

داده‌ها و روش کار

قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

شهرستان لردگان از توابع استان چهارمحال و بختیاری است که با مساحت ۳۳۹۶۸۱ هکتار در جنوب این استان قرارگرفته است. این شهرستان دارای سه مرکز شهری، چهار بخش، ۱۰ دهستان و ۳۰۰ آبادی دارای سکنه می‌باشد. این منطقه با ارتفاع ۱۶۱۱ متر از سطح دریا دارای میانگین بارندگی ۵۷۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۱۵ سانتی‌گراد در سال می‌باشد (شکل ۱). وسعت عرصه‌های جنگلی این شهرستان ۱۵۷۰۰۰ هکتار بوده و واقع در ناحیه رویشی جنگل‌های سلسله جبال زاگرس با گونه غالب بلوط ایرانی می‌باشد. با توجه به حساسیت و اهمیت زیست‌محیطی این جنگل‌ها و افزایش بحران‌هایی که گریبان‌گیر این منطقه بوده، آتش‌سوزی جنگل باعث ایجاد مسائل اقتصادی - اجتماعی زیادی شده و اتخاذ رویکردهای پیشگیری‌کننده از رخداد حریق در این جنگل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس آمار منتشرشده از مدیرکل منابع طبیعی استان چهارمحال بختیاری، هرساله آتش‌سوزی‌های متعددی در منطقه لردگان اتفاق می‌افتد که می‌توان به آتش‌سوزی‌های صورت گرفته در مردادماه سال ۱۳۹۴ و تیرماه سال ۱۳۹۶ جنگل‌های ارمند لردگان اشاره کرد که با توجه به سخت گذری و کوهستانی بودن منطقه ارمند، دسترسی بالگرد و خودرو آتش‌نشانی به این مناطق مشکل بوده و چندین هکتار از مراتع و جنگل‌های این منطقه که بیشتر درختان بنه و بلوط بودند، طعمه حریق شدند.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه واقع در شهرستان لردگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

روش کار

وقوع حریق در یک منطقه جنگلی به عوامل متعددی بستگی دارد که میزان تأثیرگذاری هریک از این عوامل بنا بر شرایط طبیعی و اقتصادی - اجتماعی خاص منطقه متفاوت است. ازآنجا که این عوامل از تعدد و تنوع بالایی برخوردار هستند، به‌منظور سهولت در انجام و همچنین درک بهتر روند محاسبات، این پارامترها در ۴ گروه اصلی معیارهای توپوگرافی، اقتصادی - اجتماعی، اقلیمی و پوشش گیاهی طبقه‌بندی شدند. در این مطالعه جهت تهیه نقشه‌های اقلیمی (سرعت باد، دما، بارش، رطوبت، نور)، میانگین سالانه شاخص‌های اقلیمی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ تهیه شد. با توجه به پراکنش تصادفی و نامنظم داده‌های هواشناسی از روش کریجینگ معمولی برای تهیه نقشه‌های سطحی اقلیمی استفاده گردید. در این روش اطلاعات ۱۸ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی نزدیک به منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد. در این راستا برای هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی وزن آماری معینی مشخص گردید، به‌طوری‌که برای تمام مقادیر تخمینی، دامنه اطمینان برآورد و با عملیات محاسباتی کمتر و دقت بیشتر نقشه‌های اقلیمی استخراج شد. همچنین با استفاده از مدل رقومی زمین و نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ نقشه عوامل شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا تهیه گردید. نقشه فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از شبکه‌های آبراهه‌ای با مقیاس‌های ۱/۲۵۰۰۰ در نرم‌افزار ARCGIS 10.2 تهیه شد. با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۵ مربوط به تاریخ ۲۰۰۰/۸/۴، ماهواره لندست ۷ مربوط به تاریخ ۲۰۰۷/۸/۲۳، ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به تاریخ ۲۰۱۴/۸/۱۸ و تصاویر ماهواره‌ای مادیس HKM۰۲MOD مربوط به زمان‌های ۲۰۱۴/۸/۱۷، ۲۰۰۷/۸/۱۸ و ۲۰۰۰/۸/۵ به کمک نرم‌افزار ENVI 4.8 شاخص‌های ماهواره‌ای NDVI (شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی)، EVI (شاخص اصلاح‌شده پوشش گیاهی)، GVMI (شاخص جهانی رطوبت پوشش گیاهی) و SR (نسبت ساده) استخراج گردید. دو شاخص EVI و NDVI، شاخص‌های جهانی هستند که برای تهیه اطلاعات مکانی و زمانی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص GVMI برای سنجش حجم آب موجود در پوشش گیاهی کاربرد دارد و از باند ۲ و ۶ مادیس استفاده می‌کند. همچنین شاخص SR یا نسبت ساده در مورد زیست‌توده گیاهان و شاخص سطح برگ، اطلاعات موثری را در اختیارمان قرار می‌دهد. جدول (۱) رابطه شاخص‌های به‌کاربرده شده در این مقاله همراه بانام اندیس مربوط به هر شاخص را نشان می‌دهد.

جدول ۱. شاخص‌های ماهواره‌ای مورداستفاده در تحقیق

ردیف	رابطه	نام اندیس
۱	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	NDVI (Normalized Difference Vegetatio Index)
۲	$GVMI = \frac{(\rho_2 + 0.1) - (\rho_6 + 0.02)}{(\rho + 0.1) + (\rho_6 + 0.02)}$	GVMI (Global Vegetation Moisture Index)
۳	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	SR (Ratio Vegetation Index)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = \frac{2.5(NIR - RED)}{(1 + NIR + 6RED - 7.5BLUE)}$	۴

ابتدا کلیه معیارها اســتانداردســازی گردید. بدین منظور معیارهای کمی و کیفی را با فازی کردن به کمک نرم‌افزار Idrisi selva هم مقیاس کرده و لایه‌ای رستری با دامنه ۰ تا ۲۵۵ ایجاد شد. سپس با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای (ANP: Analytical Network Process) به کمک نرم‌افزار Super decisions تمامی معیارها وزن‌دهی شد.

فرآیند تحلیل شــبکه‌ای ارتباطات پیچیده و وابســتگی متقابل بین معیارها و بازخوردشــان را در نظر می‌گیرد، به طوری که عناصر یک شبکه به هر شکلی می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند. در فرآیند تحلیل شبکه‌ای برای انجام محاســبات، وزن‌های حاصــل شــده در یک ســوپر ماتریس قرار می‌گیرند که پس از ایجاد ســوپر ماتریس اولیه، با نرمال کردن ستون‌ها سوپرماتریس موزون تشکیل می شود. در انتها با به توان رساندن تمامی عناصر سوپر ماتریس موزون تا زمان حصــول واگرایی، ســوپر ماتریس حد دار ایجاد می‌گردد. با این عمل تأثیر نســبی بلندمدت هریک از عناصــر در ماتریس مشخص می شود. بنابراین می‌بایست عناصر سوپر ماتریس حد، نرمالیزه شده، تا حالت احتمالی پیدا کرده و برای وزن‌دهی مورداســتفاده قرار گیرند. درنهایت اقدام به مدل‌ســازی به روش میانگین وزنی مرتب (OWA: Order Weighted Average) گردید. عملگر OWA در بازه پیوســته‌ای از کمیت «همگی» تا کمیت «حداقل یکی» قرار می‌گیرد. برای شناسایی محل عملگر OWA در این بازه، از دو مقدار ORness و tradeoff (سطوح موازنه) استفاده شــد (۳۱). نحوه محاســبه عملگرهای OWA در رابطه‌های (۱)، (۲)، (۳) نشــان داده می‌شــود که در اینجا r ترتیب معیارها، n تعداد معیارها، و Wr وزن معیار در r امین ترتیب می‌باشد (Rinner and Malczewski, 2019).

رابطه ۱
$$ANDness = \frac{1}{n-1}\sum_r (n-r)w_r$$

رابطه ۲
$$ORness = 1 - ANDness$$

رابطه ۳
$$TRADE-OFF = 1 - \sqrt{\frac{n\sum_r (w_r - \frac{1}{n})^2}{n-1}}$$

در این روش علاوه بر وزن معیارها که همان وزن به‌دســت‌آمده از روش تحلیل شــبکه‌ای هســتند، وزن ترتیبی هم تعریف‌شده که این وزن‌های ترتیبی اجازه کنترل مستقیم بر سطوح موازنه و خطر را می‌دهند. درجه خطر، موقعیت بین حداقلی کردن (AND) و حداکثری کردن (OR) محدوده‌هایی اســت که نهایتاً مناســب شــناخته می‌شــوند. مقدار tradeoff بین ۰ و ۱ اســت که عدد یک جبران‌کنندگی کامل و صــفر عدم جبران‌کنندگی را بیان می‌کند و عملگر Orness میزان تأکید مقادیر بهتر و یا بدتر معیارها که همان خطرپذیری و خطرگریزی تصــمیم‌گیرنده اســت را نشــان می‌دهد (Malczewski, 2006a).

عملگر OWA مربوط به موقعیت i ام مجموع وزن‌های ترتیبی v= v1, v2, …, vn اســت، به‌طوری‌که چنانچه

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

$\sum_{j=}^{n} 1v_{j=1}$، و $nv_{j\in[0,1]}$ ،$j=1,2,\ldots,$ OWA به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۴):

رابطه ۴

$$OWA=\sum_{j=}^{n} 1\left(\frac{u_j v_j}{\sum_{j}^{n}=1 u_j v_j}\right) z_j \pi c_i$$

که در آن u_j: وزن باز مرتب شده عامل j، v_j: وزن ترتیب عامل j، c_i: امتیاز محدودیت i و z_j: ارزش باز مرتب شده عامل j می‌باشد (Malczewski, 2006b). وزن‌های ترتیبی در شش سناریو تعریف می‌شود. سناریوی اول شبیه عملگر AND بوده و دارای خطر پایین و بدون موازنه ا ست که وزن رتبه‌ای اول به عامل با بالاترین وزن اخت صاص می‌یابد. در سناریوی دوم وزن رتبه اول به عامل با کمترین وزن داده می شود و سطح خطر بالا و عدم موازنه را داریم. در سناریوی سوم (خطر میانگین و جبران کم) وزن عوامل برابر می‌باشد. بنابراین رتبه وزن‌ها اثر خاصی بر عمل تجمیع عوامل ندا شته و موازنه کامل ا ست. در سناریوی چهارم خطر پایین همراه با مقداری موازنه و مقدار اندک جبران ا ست. بدین معنی که محدوده‌ای در نقشه خروجی شایسته می‌باشد که در عامل با رتبه اول شایسته باشد. ولی در سناریوی پنجم، رتبه اول به عامل با وزن کمتر اختصاص داده می‌شود و بنابراین میزان خطر بالاست. این بدان معنی است که هر ناحیه‌ای در هر عامل مناسب باشد، در نقشه شایستگی خروجی، امتیاز بالا می‌گیرد. در سناریوی ششم، موازنه‌ای برای عواملمان در نظر نمی‌گیریم و سطح خطر متوسط و بدون موازنه یا عدم جبران است. در ادامه پس از فازی کردن نق شه‌ها و وزن دهی عنا صر، اقدام به مدل سازی به روش OWA گردید. سپس وزن‌های به‌د ست‌آمده از روش ANP، به‌عنوان وزن معیارها مورداستفاده قرار گرفت و برای وزن ترتیبی شش سناریو در نظر گرفته شد و در نهایت مدل مناسب از بین سناریوهای مختلف انتخاب گردید. بنابراین پس از شناسایی مناطق پرخطر آتش‌سوزی و زون‌بندی آن‌ها، برای هر زون، کلیه پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی مورد بررسی قرار گرفت و عوامل تأثیرگذار در هر زون بر اساس تعداد پیکسل‌های هر عامل، در صدگیری و شنا سایی شد. با ا ستفاده از نقاط برداشتی با GPS مربوط به منطق آتش سوزی شده در ۱۵ سال گذشته، نقشه واقعیت آتش‌سوزی تهیه گردید و اعتبار سنجی مدل به‌دست‌آمده با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC: Relative Operating Characteristic) و مقایسه با نقشه واقعیت آتش‌سوزی مورد ارزیابی قرار گرفت (فرامرزی، ۱۳۹۷). منحنی ROC یک روش عالی برای ارزیابی اعتبار از یک مدل است که پیش‌بینی محل وقوع یک کلاس با مقایسه یک تصویر منا سب را به تصویر می‌کشد. سطح زیر منحنی ROC نشان می‌دهد که مدل تا چه مقدار توانسته است متغیر وابسته را به‌خوبی پیش‌بینی کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از منحنی ROC و مشخص شدن بهترین سناریو، نقشه‌های حاصل از آن از طریق ماژول Run Macro در نرم‌افزار ایدریسی زون بندی گردید و به برازش مکانی هر یک از زون‌ها پرداخته شد. بدین منظور، لایه‌های مطلوبیت حاصل از فرآیند ارزیابی چند معیاره (MCE: Multi criteria evaluation) که لایه‌ای رستری با ارزش‌های پیوسته در مقیاس مطلوبیت (۰ تا ۲۵۵) هستند، به ماژول Run Macro معرفی شد و بر اساس کمینه آستانه مطلوبیت و کمینه آستانه مساحت، لکه‌های پتانسیل خطر با آستانه بالای ۱۰۰ و آستانه مساحت بالای ۱۰ هکتار از نقشه بهترین سناریو به دست آمد (Rinner and Malczewski, 2000). سپس زون‌ها بر اساس میزان خطر رتبه‌بندی شدند و مساحت هریک از زون‌ها در نقشه پتانسیل خطر موردمحاسبه قرار گرفت. در نهایت تعیین عوامل دارای بیشترین تأثیر در هر یک از زون‌ها، با استفاده از

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

ماژول SCALAR مورد بررسی قرار گرفت و میزان تأثیر آن‌ها نیز مشخص گردید (Saha et al, 2023).

شرح و تفسیر نتایج

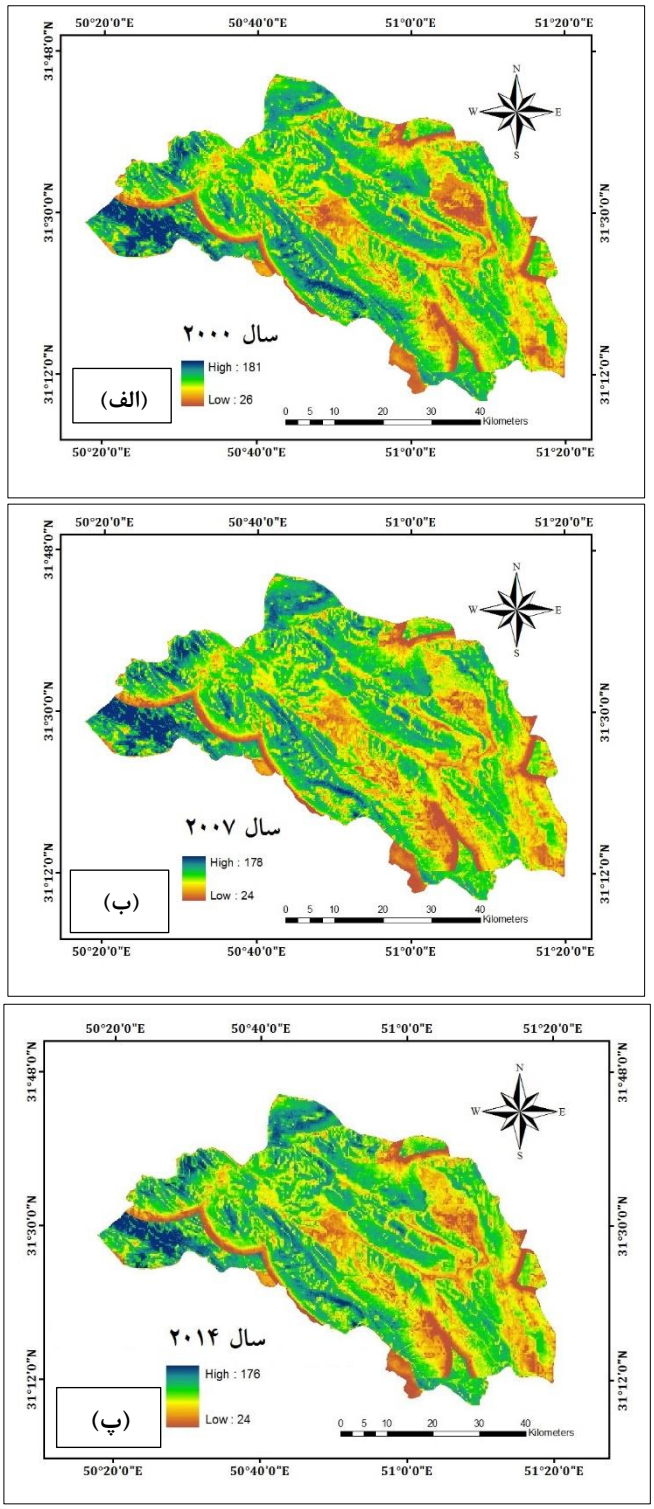
جهت وزن‌دهی معیارها از روش ANP استفاده گردید. جدول ۲ وزن به‌دست‌آمده از روش تحلیل شبکه‌ای را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ماتریس وزن حددار به‌عنوان وزن نهایی در مدل مورد نظر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲. وزن معیارهای به‌دست‌آمده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای

فاکتور	وزن ایده آل	ماتریس ناموزون	ماتریس حددار
فاصله از مناطق مسکونی	۰/۶۸۲	۰/۴۳۹	۰/۲۰۹
فاصله از جاده	۰/۲۱۴	۰/۱۳۸	۰/۱۹۸
شاخص GVMI	۰/۱۳۶	۰/۰۱۰	۰/۰۹۰
میانگین حداکثر دمای روزانه هوا	۰/۰۵۳	۰/۰۱۱	۰/۰۷۱
شیب	۰/۴۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۶۵
جهت	۰/۲۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۶۲
شاخص اختلاف نرمال پوشش گیاهی	۰/۵۴۷	۰/۰۴۱	۰/۰۶۱
مجموع ماهیانه ساعات آفتابی	۰/۲۷۸	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰
ارتفاع از سطح دریا	۰/۴۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵
حداکثر دمای ثبت‌شده برحسب درجه سانتی‌گراد	۰/۲۱۴	۰/۰۴۶	۰/۰۲۶
شاخص اصلاح‌شده پوشش گیاهی	۰/۲۳۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
فاصله از شبکه آبراهه	۰/۰۲۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷
میانگین ماهیانه متوسط دمای روزانه هوا	۰/۱۴۲	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰
مجموع بارندگی ماهیانه به میلی‌متر	۰/۰۷۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۷
شاخص نسبت ساده	۰/۰۷۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶
تعداد روزهای توأم با طوفان گردوغبار	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳

بر مبنای نتایج ROC در هر سه سال مورد بررسی، مناسب‌ترین سناریو بر اساس سطح خطر پایین و مقدار اندک جبران به‌عنوان مدل پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی انتخاب گردید. شکل ۲ نقشه‌های نهایی بهترین سناریوی انتخاب‌شده درروش OWA را نشان می‌دهد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

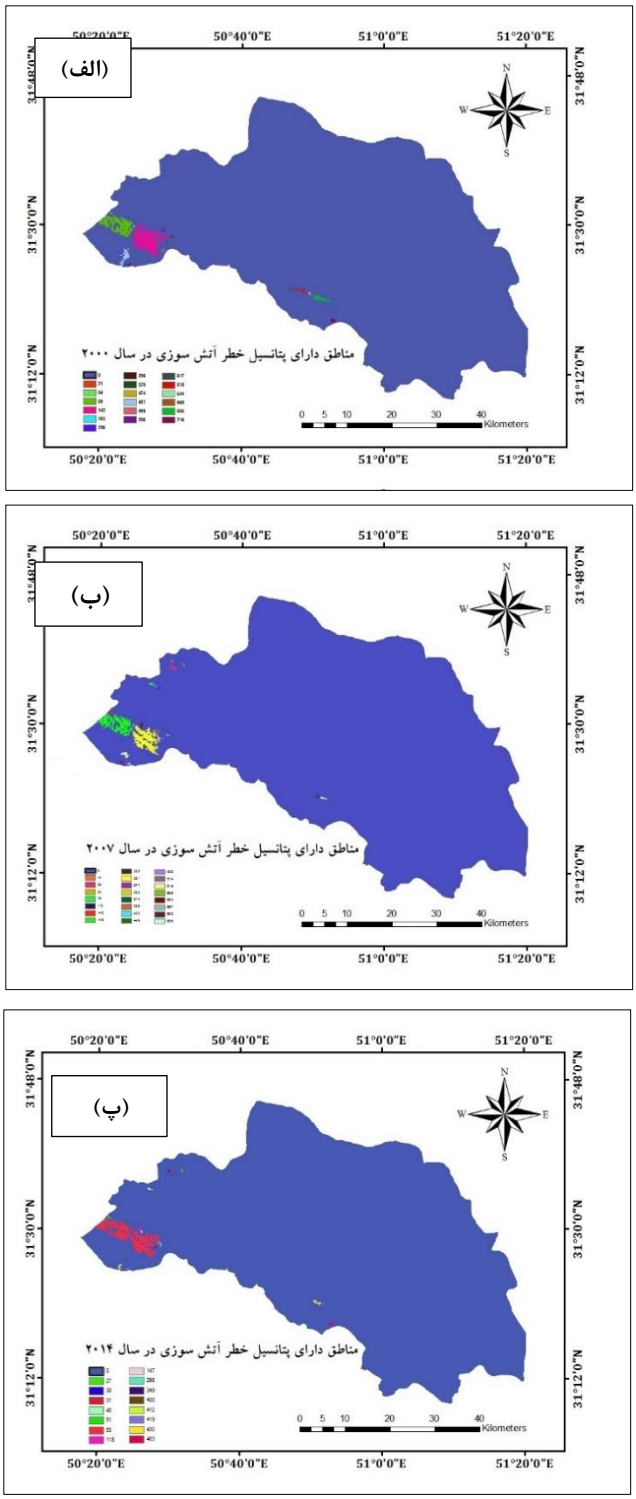


شکل ۲. نقشه سناریوهای سطح ریسک پایین و مقدار اندک جبران سال‌های ۲۰۰۰ (الف)، ۲۰۰۷ (ب) و ۲۰۱۴ (پ)

در ادامه بر اساس نتایج و مقادیر نقشه مدل به‌دست‌آمده، مناطق پرخطر بر اساس مطلوبیتشان طبقه‌بندی گردید، که بر این اساس به تفکیک برای سال ۲۰۰۰، تعداد ۱۵ زون، سال ۲۰۰۷، تعداد ۱۹ زون و همچنین در سال ۲۰۱۴،

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

تعداد ۱۰ زون به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل خطر آتش‌سوزی شناسایی شد. شکل ۳ نقشه‌های مناطق مستعد خطر آتش‌سوزی جنگل در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه‌های مناطق مستعد خطر آتش‌سوزی جنگل در سال‌های ۲۰۰۰ (الف)، ۲۰۰۷ (ب) و ۲۰۱۴ (پ)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در سال ۲۰۰۰ مساحت مناطق مستعد آتش‌سوزی ۴۸۶۰۳۳۹۱ مترمربع بوده و حدود ۱۵ زون شناسایی شد. در سال ۲۰۰۷ مساحت مناطق دارای پتانسیل بالای آتش سوزی ۴۰۵۹۲۱۵۷ مترمربع با ۱۹ عدد زون و در سال ۲۰۱۴ مساحت مناطق مستعد حریق ۳۷۴۵۴۲۰۳ مترمربع با ۱۰ زون شناسایی گردید. در نهایت کلیه زون‌ها مورد بررسی قرار گرفت و عواملی که بیشترین تأثیر بر روی ایجاد حریق داشتند شناسایی شد. اعتبار سنجی نتایج هر سال با استفاده از شاخص سطح زیر منحنی انجام شد. بر اساس یافته‌ها، دقت مدل نهایی برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۷۸ و ۰/۸۳ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت خوب مدل مورد استفاده در پیش‌بینی خطر آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین موقعیت و مساحت مناطق مستعد آتش سوزی مشخص گردید که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. موقعیت و مساحت مناطق مستعد آتش‌سوزی

سال / موقعیت	۲۰۰۰		۲۰۰۷		۲۰۱۴	
	تعداد زون	مساحت ٪	تعداد زون	مساحت٪	تعداد زون	مساحت٪
غرب	۹	۸۹/۴	۱۱	۹۱/۲	۵	۹۱
شمال غربی	۱	۰/۶	۴	۵	۲	۳
جنوب غربی	۲	۸	۳	3	۳	۶
جنوب	۳	۲	۱	۰/۸	۰	۰

یافته‌های تحقیق در رابطه با عوامل مؤثر بر خطر آتش‌سوزی در زون‌های با پتانسیل بالای آتش‌سوزی در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که عوامل فاصله از جاده و مناطق مسکونی به‌عنوان مهم‌ترین عامل در همه زون‌ها بوده و تأثیر عوامل انسانی در ایجاد حریق منطقه بالای ۶۰ در صد می‌باشد. سی و همکاران (۲۰۲۲)، صالح و همکاران (۲۰۲۴) و میشرا و همکاران (۲۰۲۴) اشاره به نقش فعالیت‌های انسانی در ایجاد آتش‌سوزی اشاره می‌کنند که نزدیکی به مناطق با جمعیت انسانی بالا، خطر وقوع آتش‌سوزی را افزایش داده است. از بین عوامل توپوگرافی، شیب و جهت، از بین عوامل اقلیمی، حداکثر دمای روزانه و از بین عوامل پوشش گیاهی، شاخص‌های GVMI و NDVI به‌عنوان مؤثرترین عوامل شناخته‌شده‌اند. مطالعات هانسن و همکاران (۲۰۲۲)، بابو و همکاران (۲۰۲۳) و ژو و همکاران (۲۰۲۳) به نقش عوامل توپوگرافی، دنهام و همکاران (۲۰۲۲) و ساها و همکاران (۲۰۲۳) به نقش متغیرهای اقلیمی و همچنین ددیوس (۲۰۲۱) به تاثیر شاخص‌های پوشش گیاهی بر ایجاد و گسترش آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه اشاره داشته‌اند. با توجه به طبقه‌بندی صورت گرفته، زون ۱ پرخطرترین محدوده مستعد به حریق در غرب شهرستان بوده، به طوری که در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ به ترتیب وسعتی معادل ۱/۳، ۴۳/۱ و ۸۷/۷ درصد از کل منطقه خطر را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ عامل توپوگرافی (شیب و جهت) تأثیر ۲۳ درصدی داشته است، با این تفاوت که در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۷ تأثیر عامل اقلیمی (حداکثر دما) حدود ۱۱ درصد به‌دست‌آمده و عامل پوشش گیاهی در این سال‌ها تأثیر چندانی نداشته است. این در حالی است که در سال ۲۰۱۴ تأثیر عامل پوشش گیاهی (شاخص GVMI) ۱۵ درصد بوده و عامل اقلیمی تأثیر چندانی را نشان نداد. با توجه به وسعت منطقه خطر در

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

سال ۲۰۱۴ می‌توان گفت تغییرات پوشش گیاهی تأثیر بسزایی در ایجاد حریق داشته و به دلیل نزدیکی منطقه به جاده و مناطق مسکونی و کاهش میزان حجم آب موجود در پوشش گیاهی (شاخص GVMI)، غرب منطقه لردگان را به وسیع‌ترین و مستعدترین ناحیه آتش‌سوزی تبدیل کرده است. بادوریا و همکاران (۲۰۲۱) و ژائو و همکاران (۲۰۲۴) تغییر عوامل موثر بر آتش‌سوزی در یک منطقه مشخص را ناشی از برهم‌کنش متغیرهای موثر نسبت داده است، ولی در مجموع نقش عامل توپوگرافی جهت دامنه را بیشتر از سایر عوامل ذکر کرده که دلیل آن را به نقش جهت دامنه بر میزان رطوبت خاک و هوای عرصه نسبت داده است.

یافته‌ها حاکی از آن بود که در سال ۲۰۰۰، ۴۷/۳ درصد از زون ۲ و در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ به ترتیب ۱ و ۰/۷ درصد از این زون در منطقه پرخطر آتش سوزی واقع شدند. با توجه به تأثیر بسزایی که عامل پوشش گیاهی در وقوع حریق دارد، در سال ۲۰۰۰ شاخص GVMI با تأثیر ۱۳ درصدی، منجربه افزایش مساحت منطقه خطر نسبت به سال‌های پیش شده است. درصورتی‌که در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ عامل پوشش گیاهی تأثیر چندانی را نشان نداده و حداکثر دما نقش بیشتری را ایفا کرده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این است که شاخص GVMI و کاهش میزان رطوبت گیاهی و تأثیر عوامل شیب و جهت این محدوده را در سال ۲۰۰۰ به ناحیه‌ای با پتانسیل بالای آتش‌سوزی تبدیل کرده است. البته با گذشت زمان وسعت منطقه خطر حریق مجدد کاهش یافته است. در این رابطه نتایج مطالعه باروس-رزا و همکاران (۲۰۲۲) و کومار و همکاران (۲۰۲۲) با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی دارد.

زون ۳ با مساحتی معادل ۳۲، ۳۹/۸ و ۰/۳ درصد از کل محدوده خطر در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴، در غربی‌ترین ناحیه شهرستان واقع‌شده است. حداکثر دمای روزانه و افزایش دما و کاهش حجم آب موجود در پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۷ باعث شده تا این محدوده نسبت به سال ۲۰۱۴ به‌عنوان منطقه‌ای بزرگ و مستعدتر برای آتش‌سوزی تشخیص داده شود. وود (۲۰۲۱) و تالودکار و همکاران (۲۰۲۴) گزارش می‌کند که با ایجاد تنش خشکی در عرصه و کاهش رطوبت در بافت‌های گیاهی، ماده خشک لازم برای شروع و توسعه آتش فراهم می‌آید. در همین راستا می‌توان سایر زون‌ها را مورد ارزیابی قرارداد. بر این اساس بررسی عوامل مؤثر بر خطر آتش سوزی در هر زون نشان داد که در تمام زون‌ها بیشترین مقدار مربوط به عوامل انسانی می‌باشد که این مسئله نقش مهم عوامل انسانی (Singh and Jeganathan, 2024) را در وقوع آتش‌سوزی‌ها در شهرستان لردگان به خوبی نمایان می‌سازد.

بررسی نمودار درصد مساحت مربوط به هر زون در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۰ زون‌های ۱ و ۲ جمعاً با ۷۹/۳ درصد در غرب منطقه، وسیع‌ترین محدوده با خطر بالای آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. همچنین در سال ۲۰۰۷ زون‌های ۱ و ۳ با ۸۲/۸ درصد در غرب شهرستان و در سال ۲۰۱۴ زون ۱ با ۸۷/۷ درصد در غرب ناحیه به‌عنوان وسیع‌ترین محدوده‌های با پتانسیل بالای حریق شناسایی شده‌اند. نتایج موقعیت و مساحت مناطق مستعد آتش‌سوزی در جدول (۳) نشان می‌دهد که در غرب منطقه مورد مطالعه، مناطق مستعد آتش‌سوزی به مرور زمان افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۰ مساحت محدوده خطر ۸۹/۴ درصد بوده و در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ به ۹۱ درصد افزایش‌یافته است. با توجه به نتایج، مناطق جنگلی بارز وشوارز، چال چندار، گودبنوشیر، زیتی، رمه رون در غرب منطقه مورد مطالعه واقع‌شده‌اند و با توجه به وسعت محدوده خطر در این ناحیه، باید جنگل‌های این مناطق از نظر مدیریتی مورد توجه قرار گرفته و تمهیدات و اقدامات لازم جهت جلوگیری از حریق جنگل‌های منطقه انجام پذیرد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

همچنین در شمال غربی منطقه مورد مطالعه، خطر آتش‌سوزی افزایش‌یافته به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۰ میزان مساحت ۰/۶ درصد بوده ولی به مرور زمان در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ حدود ۳ تا ۵ درصد افزایش مساحت مشاهده می‌شود. مناطق جنگلی بیدله و شهسوار، دره گرم، چل اوره در شمال غربی منطقه واقع شده‌اند. در جنوب غربی شهرستان به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ مساحت مناطق مستعد حریق حدود ۸، ۳ و ۶ درصد برآورد گردیده است. مطابق شواهد، ابتدا خطر حریق حالت نزولی داشته ولی در سال ۲۰۱۴ مجدداً شرایط برای رخداد حریق مساعدتر شده است. در جنوب منطقه مورد مطالعه نیز روند کاهشی خطر حریق مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۷ وسعت منطقه خطر از ۲ به ۰/۸ درصد کاهش‌یافته است. در همین مناطق در سال ۲۰۱۴ در این محدوده، خطر حریق نشان داده نشده است و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مناطق جنگلی دودراء که در جنوب شهرستان لردگان قرار دارند در سال ۲۰۱۴ از شرایط بهتری برخوردار بوده و خطر حریق کمتر شده است.

نتیجه‌گیری

بررسی سری زمانی نقشه‌ها نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ وسعت مناطق بحرانی روند نزولی داشته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ۹۰ در صد از کل وسعت مناطق بحرانی در محدوده غربی منطقه مورد مطالعاتی واقع شده است. بنابراین با توجه به حساسیت و اهمیت زیست‌محیطی جنگل‌های زاگرس، اتخاذ رویکردهای پیشگیری‌کننده از رخداد آتش‌سوزی در این نواحی ضروری به نظر می‌رسد. تهیه نقشه مناطق مستعد و دارای پتانسیل خطر آتش‌سوزی به‌عنوان گامی مهم و مؤثر در کمک به مسئولین و حافظان جنگل جهت برنامه‌ریزی و اجرای عملیات پیشگیرانه لازم در مناطق حساس و پرخطر بسیار مفید و کارساز است. تهیه نقشه‌ها باید به‌عنوان یک اصل مهم در دستور کار سازمان‌ها قرار گیرد تا باقیمانده جنگل‌ها، این سرمایه‌های طبیعی در اثر ناآگاهی، فقدان اطلاعات صحیح از منطقه و عدم برنامه‌ریزی مناسب از بین نرود. مهم‌ترین کاربرد مدل‌های پیش‌بینی در رابطه با وقوع حادثه، هشدار و اعلام‌خطر به مسئولان مربوطه است تا فرصت کافی جهت انجام اقدامات پیشگیرانه داشته باشند. با توجه به نقش ویژه عوامل انسانی در وقوع حریق در منطقه پیشنهاد می‌شود با برگزاری کلاس‌های آموزشی برای کلیه شوراها و دهیاری‌ها، مأموران اطفاء حریق، کشاورزان، عشایر و کودکان و سایر اقشار جامعه، دانش و انگیزه لازم به‌منظور همکاری عمومی در خصوص اطفاء حریق و حفاظت از جنگل‌ها ایجاد شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

منابع

فرامرزی، حسن؛ سیدمحسن حسینی، حمیدرضا پورقاسمی، مهدی فرنقی. ۱۳۹۷. ارزیابی نقش شاه‌راه آسیایی بر روی آتش‌سوزی‌های پارک ملی گلستان در محیط GIS. *پژوهش‌های علوم و فن‌آوری چوب و جنگل*، **۲۵** (۳): ۳۳–۴۸. https://doi,org/10.22069/JWFST.2018.14655.1729

Babu, K.N; R. Gour. K, Ayushi. N, Ayyappan, and N, Parthasarathy. 2023. Environmental drivers and spatial prediction of forest fires in the Western Ghats biodiversity hotspot, India: An ensemble machine learning approach. *Forest Ecology and Management*, **540**: 121057. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121057

Bargali, H; A, Pandey. D, Bhatt. R.C, Sundriyal, and V.P, Uniyal. 2024. Forest fire management, funding dynamics, and research in the burning frontier: A comprehensive review. Trees. *Forests and People*, **16**: 100526. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100526

Barros-Rosa, L; P.H.Z, de Arruda. N.G, Machado. J.C, Pires-Oliveira, and P.V, Eisenlohr. 2022. Fire probability mapping and prediction from environmental data: What a comprehensive savanna-forest transition can tell us. *Forest Ecology and Managemen*, **520**: 120354. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120354

Bhadoria, R.S; M.K, Pandey, and P, Kundu. 2021. RVFR: Random vector forest regression model for integrated & enhanced approach in forest fires predictions. *Ecological Informatic*, **66**: 101471. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101471

Chicas, S.D, and J.Q, Nielsen. 2022. Who are the actors and what are the factors that are used in models to map forest fire susceptibility? A systematic review. *Natural Hazards*, **114**: 2417–2434. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05495-5

Dang, A.T.N; L, Kumar. M, Reid, and O, Mutanga. 2021. Fire danger assessment using geospatial modelling in Mekong delta, Vietnam: effects on wetland resources. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **21**: 100456. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100456

de Dios, V.R; J, Hedo. A.C, Camprubí. P, Thapa. E.M, del Castillo. J.M, de Aragón. J.A, Bonet. R, Balaguer-Romano. R, Díaz-Sierra. M, Yebra, and M.M, Boer. 2021. Climate change induced declines in fuel moisture may turn currently fire-free Pyrenean Mountain forests into fire-prone ecosystems. *Science of The Total Environmen*, **797**: 149104. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149104

Denham, M.M; S, Waidelich, and K, Laneri. 2022. Visualization and modeling of forest fire propagation in Patagonia. *Environmental Modelling & Softwar*, **158**: 105526. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105526

Hansen, W.D; M.A, Krawchuk. A.T, Trugman, and A.P, Williams. 2022. The Dynamic Temperate and Boreal Fire and Forest-Ecosystem Simulator (DYNAFFOREST): Development and evaluation. *Environmental Modelling & Softwar*, **156**: 105473. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105473

Kumar, G; A, Kumar. P, Saikia. P.S, Roy, and M.L, Khan. 2022. Ecological impacts of forest fire on composition and structure of tropical deciduous forests of central India, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/*, **128**: 103240. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103240

Malczewski, J. 2006a. Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging (OWA) approach. *International Journal Environmental Technology and Management*, **6** (1/2): 7–19. https://doi.org/10.1504/IJETM.2006.008251

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

Malczewski, J. 2006b. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, **20** (7): 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Martins, F; J, Santos. L, Galvão Magalhães, and H, Xau. 2016. Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in northern Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformatio*, 163-174. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.009

Mishra, M; R, Guria. B, Baraj. A.P, Nanda. C.A.G, Celso. A.G, Santos. R.M, da Silva, and F.A.T, Laksono. 2024. Spatial analysis and machine learning prediction of forest fire susceptibility: a comprehensive approach for effective management and mitigation. *Science of the Total Environment*, **926**: 171713. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171713

Pham, V.T; T.A.T, Do. H.D, Tran, and A.N.T, Do. 2024. Classifying forest cover and mapping forest fire susceptibility in Dak Nong province, Vietnam utilizing remote sensing and machine learning. *Ecological Informatics*, **79**: 102392. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102392

Pradhan, B; B, Arshad, and M, Binawing. 2005. Application of remote sensing and GIS for forest fire susceptibility mapping using likelihood ratio model. *Forest Managemen*, 1-5. https://doi.org/10.1108/09653560710758297

Rihan, M; M.A, Bindajam. S, Talukdar. M.W, Shahfahad Naikoo. J, Mallick, and A, Rahman. 2023. Forest fire susceptibility mapping with sensitivity and uncertainty analysis using machine learning and deep learning algorithms. *Advances in Space Research*, **72** (2): 426–443. https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.03.026

Rinner, C, and J, Malczewski. 2000. Web-enabled spatial decision analysis using Ordered Weighted Averaging (OWA). *Journal of Geographical System*, 385-403. https://doi.org/10.1007/s101090300095

Saha, S; B, Bera. P.K, Shit. S, Bhattacharjee, and N, Sengupta. 2023. Prediction of forest fire susceptibility applying machine and deep learning algorithms for conservation priorities of forest resources. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **29**: 100917. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100917

Saleh, A; M.A, Zulkifley. H.H, Harun. F, Gaudreault. I, Davison, and M, Spraggon. 2024. Forest fire surveillance systems: A review of deep learning methods. *Heliyon*, **10** (1): e23127. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23127

Si, L; L, Shu. M, Wang. F, Zhao. F, Chen. W, Li, and W, .Li. 2022. Study on forest fire danger prediction in plateau mountainous forest area. *Natural Hazards Researc*, **2** (1): 25-32. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.01.002

Singh, S.S, C, Jeganathan. 2024. Using ensemble machine learning algorithm to predict forest fire occurrence probability in Madhya Pradesh and Chhattisgarh, India. *Advances in Space Research*, **73** (6): 2969-2987. https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.054

Talukdar, N.R; F, Ahmad. L, Goparaju. P, Choudhury. A, Qayum, and J, Rizvi. 2024. Forest fire in Thailand: Spatio-temporal distribution and future risk assessment. *Natural Hazards Research*, **4** (1): 87-96. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.002

Tuyen, T.T; A, Jaafari. H.P.H, Yen. T, Nguyen-Thoi. T.V, Phong. H.D, Nguyen. H.V, Le. T.T.M, Phuong. S.H, Nguyen. I. Prakash, and B.T, Pham. 2021. Mapping forest fire susceptibility using spatially explicit ensemble models based on the locally weighted learning algorithm. *Ecological Informatics*, **63** (3). https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.002

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]

Veraverbeke, S; S, Hook, and G, Hulley. 2012. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sensing of Environmen*, **123**: 72–80. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.025

Wang, S.D; L.L, Miao, and G.X, Peng. 2012. An Improved Algorithm for Forest Fire Detection Using HJ Data. *Procedia Environmental Science*, **13**: 140-150. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.014

William, A.H; B, Orthen, and K.V, Paula. 2011. Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. *Functional Ecology*, **17** (6): 44- 47. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2003.00796.x

Wood, D.A. 2021. Prediction and data mining of burned areas of forest fires: Optimized data matching and mining algorithm provides valuable insight. *Artificial Intelligence in Agricultur*, **5**: 24-42. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.01.004

Xu, Q; W, Li. J, Liu, and X, Wang. 2023. A geographical similarity-based sampling method of non-fire point data for spatial prediction of forest fires. *Forest Ecosystems*, **10**: 100104. https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100104

Yager, RR. 1996. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, **11** (1): 49–73. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-111X(199601)11:1<49::AID-INT3>3.0.CO;2-Z

Zhao, L; Y, Ge. S, Guo. H, Li. X, Li. L, Sun, and J. Chen. 2024. Forest fire susceptibility mapping based on precipitation-constrained cumulative dryness status information in Southeast China: A novel machine learning modeling approach. *Forest Ecology and Management*, **558**: 121771. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121771

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.2.6.8]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.2.101]