



## Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province

Roghayeh Jahdi<sup>a\*</sup>, Mohammad Vasegh Alhaj khalaf<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Associate Professors in Forest Sciences, Department of Forest Science and Engineering, Faculty of of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>b</sup> PhD. Student in Forestry, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 29 January 2024

Revised: 28 May 2024

Accepted: 10 June 2024

### Extended Abstract

#### Introduction

In Iran, various fire spread models have been used to predict fire behavior and spread at regional and local scales (Alhaj Khalaf, Shataee Joibary, Jahdi & Bacciu, 2021; Jahdi, Salis, Alcasena & Del Giudice, 2023). However, the calculation of an integrated fire risk index using these fire spread models has not yet been conducted. Typically, fire risk assessments are based on a set of fire spread descriptors that are used to map fire-prone areas and identify the most appropriate fire and fuel management measures in line with predefined goals (e.g., reducing fire intensity or minimizing fire size). Fire and fuel management involves a comprehensive approach that integrates land management practices, considering fire regimes, impacts, values at risk, and multiple resource use activities. Despite the merits of each approach, limited resources often prevent the implementation of management measures in all areas with significant fire risk. Therefore, it is essential to prioritize high-risk areas and identify appropriate management strategies that maximize ecosystem protection. This study aims to develop an integrated method for identifying areas with the highest fire risk in the forests and rangelands of Guilan Province. The method combines simulation models of fire spread with landscape data (topography and fuel), fire weather conditions, and historical ignition point data.

\*.Corresponding author: Roghayeh Jahdi Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir Tel:+989112340249

**How to cite this Article:** Jahdi, R., & Alhaj Khalaf, M. W. (2024). Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 102-129.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Additionally, anthropogenic factors, such as proximity to roads and settlements, are included in the fire risk modeling process, given their significant influence on fire behavior and regimes (Twidwell et al., 2016). The results of this research can support land-use planning, management, and future studies on fire hazards.

### **Materials and Methods**

**Study Area:** This research was conducted in Guilan Province, which spans 1,404,400 hectares in northern Iran. The area ranges from -74 meters in the north to approximately 3,700 meters in the southeast. The province receives an average of 1,100 mm of annual rainfall, and the relative humidity averages 80%, decreasing during the summer months with 185 mm of rainfall during this period.

### **Methods:**

Three Landsat-8 OLI/TIRS L1TP images from October 2021 were used to identify the main land cover types and produce a land cover map of the study area using ENVI 5.6 software. A map of surface fuel models was created by assigning local fuel models (Jahdi et al., 2020, 2023) and standard fuel models (Scott & Burgan, 2005) to the land cover types. Additionally, a vegetation density map and forest canopy density map (in percentage) for 2021 were generated from Landsat-8 images using the FCD model in ENVI software.

Historical fire ignition data were used to calculate ignition probability by interpolating ignition points using the Inverse Distance Weighting (IDW) algorithm with a fixed radius of 5 km. The frequency of fire recurrence was determined from historical fire perimeters. Weather data, including temperature, relative humidity, wind speed, and wind direction, were collected for the fire season in the study area.

To prepare input data for fire risk modeling:

1. FlamMap 6 fire simulator (Finney, 2006) was used to model fire behavior, including fireline intensity and fire rate of spread, at a 100-meter resolution across the study area.
2. Raster maps showing Euclidean distance from roads and settlements were created using ArcMap 10.8 software.
3. Kernel density estimation was applied to convert the historical ignition point map into a fire density raster map.

The fireline intensity, fire rate of spread, human factor maps, and fire history maps were rescaled to values between 0 and 1. These layers were combined to calculate the fire risk index (Xofis, Konstantinidis, Papadopoulos & Tsiourlis, 2020). The fire risk index values ranged from 0 (low risk) to 1 (highest risk).

### **Results and Discussion**

Fifteen land cover classes were identified in the study area (Fig. 2, Table 4). The overall accuracy of the classification was 91%, with a Kappa statistic of 0.88. Dense broadleaf forest (30.6%) and orchard-irrigation farming (26%) were the dominant land cover types. Approximately 65% of the study area comprised natural forests, plantations, woodlands,

shrublands, and rangelands. The remaining area included agricultural lands, built-up areas, water bodies, and bare lands.

Based on the simulation outputs for fireline intensity and fire rate of spread (Fig. 4):

- In over 93% of the study area, the fire rate of spread did not exceed 0.25, and less than 7% of the area had higher values.
- Similarly, in over 90% of the area, the fireline intensity remained below 0.25, with about 10% exceeding this threshold.
- The highest values for fireline intensity and fire rate of spread were observed at high altitudes with dense vegetation, consistent with findings by Okano & Yamano (2015), which showed topography and slope significantly influenced fire behavior in broadleaf forests.

Human factors, such as proximity to roads and the fire kernel density/fire history (Fig. 5), were found to impact a smaller proportion of the study area. This finding aligns with the study by Xofis et al. (2020).

The integration of these components (Fig. 4 and Fig. 5) produced the final fire risk index map (Fig. 6). Fire risk values ranged from 0.0 to 0.68, with an average value of 0.11. Lowlands covered by non-burnable fuel models had the lowest risk (0.0), while the highest fire risk values were observed in the highlands with dense forest cover.

## Conclusion

This study demonstrates how landscape information (topography and fuel), weather conditions, and historical fire data, combined with human factors, can be used to estimate fire risk spatially using fire behavior modeling. Moderate and high-risk areas account for 21% of Gilan Province, where fire management efforts should be prioritized. Specific measures include:

- Strengthening fire prevention infrastructure.
- Conducting fire prevention training to raise public awareness.
- Enhancing ecosystem resilience in vulnerable areas.

While many fires remain random and difficult to fully control, estimating fire risk and developing prediction models can help mitigate fire hazards, reduce potential damages, and improve the allocation of fire prevention resources.

**Keywords:** Fire Risk Index, Fire Behavior Modeling, Anthropogenic Fire Factors, Ecosystem Resilience, Gilan Province, Iran.

**How to cite this Article:** Jahdi, R., & Alhaj Khalaf, M. W. (2024). Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Gilan province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 102-129.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)



دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/geoeh.2024.86597.1462

مقاله پژوهشی

## مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی رفتار آتش در استان گیلان

رقیه جهدی<sup>۱</sup>-دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
 محمد واثق الحاجی خلف -دانشجوی دکتری جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی  
 گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱

## چکیده

استان گیلان یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های ریسک آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در ایران است. در این تحقیق، شاخص ریسک آتش‌سوزی در این استان بر اساس داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای سنجش‌ازدور که عوامل انسانی و بیوفیزیکی سیمای سرزمین را توصیف می‌کند، تهیه شد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و OLI/TIRS L1TP سال ۲۰۲۱ و نیز الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)، طبقه‌بندی نظارت شده این تصاویر برای تهیه نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه انجام شد. شاخص ریسک آتش‌سوزی (دامنه ارزش از ۰/۰ تا ۱) بر اساس (۱) رفتار آتش‌سوزی (شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش که توسط مدل شبیه‌ساز آتش FlamMap (Finney, 2006) مشخص می‌شود)؛ (۲) تاریخچه آتش‌سوزی (مربوط به داده‌های آماری آتش‌سوزی طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲)؛ و (۳) عوامل انسانی (با استفاده از رابطه معکوس این تأثیر با فاصله اقلیدسی از جاده‌ها و سکونت‌گاه‌ها) محاسبه شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی، ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰ تا ۰/۶۸ با میانگین ۰/۱۱ متغیر بود. مقدار کمینه شاخص ریسک آتش در بخش‌های پست و کم ارتفاع که عمدتاً توسط مدل‌های ماده سوختنی غیرقابل سوختن (اراضی لخت، باغ-زراعت آبی، مناطق انسان‌ساز و مناطق آبی) پوشیده شده است، مشاهده می‌شود. درحالی‌که مقدار بیشینه شاخص ریسک آتش در ارتفاعات، جایی که پوشش‌های جنگلی متراکم و با دسترسی محدود به جاده و تجهیزات اطفای آتش در مقایسه با مناطق کم ارتفاع وجود دارد، مشاهده می‌شود. شاخص ریسک آتش‌سوزی محاسبه شده نشان داد که حدود ۲۱ درصد از استان، از جمله مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های جنگلی اولیه و کهن‌رست از نظر اکولوژیکی، در برابر آتش‌سوزی‌های جنگلی آسیب‌پذیر است. بر اساس این نتایج، در این مناطق

باید منابع مدیریت آتش با تمرکز بیشتری کنترل و برنامه‌ریزی شود، زیرساخت‌های پیشگیری از آتش تقویت شود، آموزش پیشگیری از آتش برای ارتقای آگاهی مردم در برابر آتش انجام شود و اقدامات مختلفی برای افزایش تاب-آوری بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر این مناطق باید در نظر گرفته شود.

**کلیدواژه‌ها:** شاخص خطر آتش‌سوزی، مدل‌سازی رفتار آتش، عوامل انسانی موثر بر آتش‌سوزی، تاب‌آوری اکوسیستم، استان گیلان، ایران.

## ۱- مقدمه

مخاطره آتش<sup>۱</sup> و ریسک آتش<sup>۲</sup>، اگرچه در مواردی با هم در نظر گرفته می‌شوند، اما متمایز هستند. مخاطره آتش، احتمال آتش<sup>۳</sup> (که احتمال آتش‌سوزی سالانه در یک مکان خاص است) و یک ارزیابی کمی از رفتار آتش مانند شدت آتش<sup>۴</sup> را ترکیب می‌کند (Scott, Thompson & Calkin, 2013)، که با هر دو قابلیت‌های اطفاء آتش و سختی آتش<sup>۵</sup> مرتبط است (Parisien, Dawe, Miller, Stockdale & Armitage, 2019). ریسک آتش-سوزی محصول احتمال آتش (یا احتمال سوختن) و آثار بالقوه آتش‌سوزی (منفی یا مثبت) است (Finney, 2005). بخش «آثار» این معادله به هدف کاربر و ماهیت ارزش‌های در معرض خطر بستگی دارد؛ «ریسک» نیز می‌تواند مظاهر مختلفی را به همراه داشته باشد. مدل‌سازی ریسک آتش یک رویکرد کلیدی برای کشف روابط پیچیده بین رخداد آتش، عوامل محرک آن و آثار بالقوه است و با مراحل مختلف آتش‌سوزی شامل پیشگیری، اطفاء و بازیابی مرتبط است (Oliveira, Rocha & Sá, 2021).

مدل‌های گسترش آتش مانند Behave، FARSITE و FlamMap به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی مخاطره، قرار گرفتن در معرض<sup>۶</sup> و ریسک آتش استفاده شده‌اند (Sá et al., 2022; Salis et al., 2021). این مدل‌ها می‌توانند گسترش و رفتار آتش را تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف و سناریوهای مدیریت ماده سوختنی تخمین بزنند و اطلاعاتی را تولید کنند که می‌تواند در حمایت از تصمیمات مدیریت آتش استفاده شود (Finney, 2006). در ایران، شبیه‌سازی‌های گسترش آتش در مقیاس‌های منطقه‌ای و بیشتر محلی برای پیش-بینی رفتار و گسترش آتش (Alhaj Khalaf, Shataee Joibary, Jahdi & Bacciu, 2021)، تجزیه و تحلیل اثربخشی تیمارهای ماده سوختنی (Jahdi, Salis, Alcasena & Del Giudice, 2023) و قرار گرفتن در معرض آتش (Jahdi et al., 2020) استفاده شده است؛ اما تاکنون محاسبه شاخص یکپارچه ریسک آتش با استفاده از

1- Wildfire hazard

2- Wildfire risk

3- Wildfire likelihood

4- Fire intensity

5- Fire severity

6- Exposure

این مدل‌های گسترش آتش انجام نشده است. اگرچه ارزیابی ریسک آتش در جنگل‌ها و مراتع کشور بر پایه سایر روش‌ها مانند رگرسیون لجستیک و تحلیل سلسله‌مراتبی (Heydari, 2023; Teimouri & Kornejady, 2023) انجام شده است. به‌منظور مکان‌یابی مناطق مستعد آتش‌سوزی و تعیین اقدامات مدیریت آتش و ماده سوختنی با توجه به اهداف از پیش تعریف‌شده (مانند شدت آتش کمتر یا اندازه آتش کوچک‌تر)، ارزیابی‌های ریسک آتش‌سوزی بر اساس مجموعه‌ای از مشخصات گسترش آتش انجام می‌شود. در این ارتباط، تیمارهای کاهش ماده سوختنی می‌تواند شدت آتش‌سوزی را کاهش دهد و نیز می‌تواند فرصت‌هایی برای اطفای آتش ایجاد کنند که در نهایت منجر به کاهش قرار گرفتن در معرض و خطر برای افراد، زیرساخت‌ها، و بوم‌سازگان‌ها و خدمات آن‌ها شود (Alcasena et al., 2021).

مدیریت آتش و ماده سوختنی یک رویکرد جامع است که شامل مدیریت یکپارچه زمین است که در آن رژیم‌ها و آثار آتش‌سوزی، ارزش‌های در معرض خطر و فعالیت‌های چندگانه استفاده از منابع در نظر گرفته می‌شود (Hood, Varner, Jain & Kane, 2022). علی‌رغم محاسن و کاستی‌های هر رویکرد، منابع محدود مانع اجرای چنین اقدامات مدیریتی در تمام موقعیت‌های با خطر آتش‌سوزی قابل توجه می‌شود؛ بنابراین، شناسایی موقعیت‌هایی که در معرض خطر بالاتر قرار دارند و مناسب‌ترین نوع اقدامات مدیریتی که حفاظت از بوم‌سازگان‌ها را به حداکثر می‌رساند، بسیار مهم است. از این رو، هدف این تحقیق توسعه یک روش یکپارچه برای شناسایی مناطق با بالاترین ریسک آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع استان گیلان است. در طول دهه‌های گذشته، آتش‌سوزی‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیم و افزایش دما ناشی از فعالیت‌های انسانی همراه با احتراق‌های انسانی به دلایل عمدی و سهوی به‌طور قابل توجهی بر جنگل‌ها و مراتع استان گیلان تأثیر گذاشته است؛ بنابراین، ارائه یک مدل ارزیابی دقیق ریسک آتش برای این استان که در آن آتش‌سوزی‌های جنگلی یک ریسک مکرر هستند و هر ساله خسارات جدی ایجاد می‌کند، ضروری است. روش ارائه شده در این تحقیق مبتنی بر مدل شبیه‌ساز گسترش آتش و با استفاده از داده سیمای سرزمین (توپوگرافی و ماده سوختنی)، شرایط آب‌وهوای آتش و داده نقاط احتراق تاریخی در منطقه مورد مطالعه است. هم‌چنین، با توجه به اینکه انسان‌ها رفتار و رژیم آتش را به طرز چشمگیری تغییر داده و آن را به عاملی در درجه اول انسان‌زا تبدیل کرده است (Twidwell et al., 2016)، در این مطالعه آثار عوامل انسانی مانند فاصله از جاده و سکونت‌گاه‌ها نیز در مدل‌سازی شاخص ریسک آتش لحاظ شده است. برای نخستین بار در مناطق جنگلی کشور، در این تحقیق از داده‌های سنجش‌ازدور، مدل‌سازی رفتار آتش و سایر مؤلفه‌های مرتبط با ریسک آتش برای برآورد مکانی ریسک آتش‌سوزی در یکی از استان‌های شمالی با وجود جنگل‌ها و مراتع حساس به آتش‌سوزی با استفاده از فرمول محاسبه شاخص ریسک آتش (FRI) استفاده شد. انتظار می‌رود شاخص محاسبه شده به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب برای پیشگیری از آتش و نیز کاهش ریسک آتش

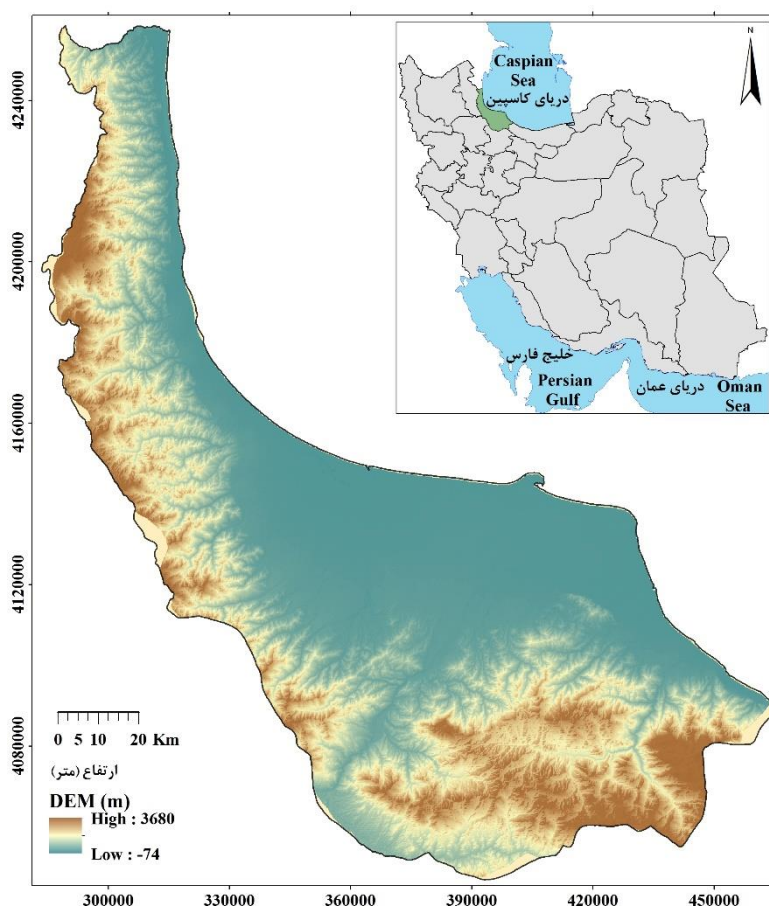
کمک کند. به طور کلی، نتایج این تحقیق می‌تواند در حمایت از برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین و مطالعات بیشتر در مورد ریسک‌های آتش‌سوزی استفاده شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲ منطقه مورد مطالعه

استان گیلان ۱۴۰۴۴۰۰ هکتار وسعت دارد و در شمال ایران (۳۸°۲۷' - ۳۶° ۳۶' عرض شمالی، ۵۰°۲۶' - ۴۸°۳۴' طول شرقی) واقع شده است (شکل ۱). تغییرات ارتفاعی این استان از ارتفاع ۷۴- متری (نواحی شمالی در بخش غربی کرانه‌های جنوبی دریای کاسپین) تا حدود ۳۷۰۰ متری (نواحی جنوب شرقی همراه با کوه‌های دیلمان در امتداد کوه‌های البرز و نواحی غربی در امتداد کوه‌های تالش) است. در طول این شیب ارتفاعی، انواع خاک‌های جلگه‌ای، کوهپایه‌ای و کوهستانی در این استان وجود دارد ( [Statistical Yearbook of Guilan](#) Province, 2019). هم‌چنین، میانگین بارندگی استان ۱۱۰۰ میلی‌متر در سال و میانگین رطوبت نسبی حدود ۸۰ درصد است ( [Janbozorgi, Hanifepour & Khosravi, 2021](#)). رطوبت نسبی در ماه‌های تابستان کمتر می‌شود و به‌طور متوسط حدود ۱۸۵ میلی‌متر بارندگی دارد ( [Meteorological Quarterly of the Guilan](#) Province, 2019).





شکل ۱- نقشه موقعیت استان گیلان در شمال ایران و مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه.

**Fig.1.** Location map of Guilan Province in northern Iran and Digital Elevation Model (DEM) of the study area

## ۲-۲ داده ورودی

سیستم شبیه‌سازی رفتار آتش به مجموعه‌ای از داده‌های ورودی نیاز دارد که شامل لایه‌های رستری برای توصیف سیمای سرزمین، نقاط احتراق تاریخی آتش و اطلاعاتی در مورد شرایط آب‌وهوایی آتش و محتوای رطوبت ماده سوختنی مربوطه است (جدول ۱). لایه‌های رستری فایل سیمای سرزمین شامل داده‌های توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) و پوشش گیاهی (تراکم تاج پوشش و مدل ماده سوختنی سطحی) است که در اندازه تفکیک ۱۰۰ متری در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. داده‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از طریق یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM؛ اندازه تفکیک ۳۰ متر) در دسترس بود (شکل ۱). در این مطالعه، دانش مبتنی بر کارشناس و تحقیق با منابع داده تهیه شده (شامل تصاویر ماهواره‌ای و کار میدانی) برای تولید نقشه‌های مدل‌های ماده سوختنی محلی ترکیب شد. بر این اساس، بعد از تهیه نقشه تیپ‌های پوشش زمین،



مدل‌های ماده سوختنی سطحی به تیپ‌های پوشش زمین اختصاص داده شد تا یک نقشه پایه برای مدل‌سازی آتش تولید شود.

جدول ۱- مجموعه داده‌ها، منابع، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده برای آماده‌سازی آن‌ها به‌عنوان ورودی در مدل‌سازی ریسک آتش در این تحقیق.

**Table 1-** Data sets, sources, models and softwares used to prepare them as input in wildfire risk modeling in this research

نرم‌افزار مورد استفاده Software used	مدل مورد استفاده Model used	منبع Source	نوع داده Data type
ArcMap 10.8	3D Analyst	Digital Elevation Model (DEM; 30 m resolution) - National Cartographic Center of Iran مدل رقمی ارتفاعی (DEM)؛ اندازه تفکیک ۳۰ متر) - سازمان نقشه‌برداری کشور	Topography (slope, direction, and elevation) توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع)
ENVI 5.6	Radiometric Calibration and FLAASH Atmospheric Correction, FMASK algorithm, image composite generation and contrast enhancement, Support Vector Machine (SVM) and FCD classification algorithm کالیبراسیون رادیومتریک و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH، الگوریتم FMASK، تولید ترکیب‌ها و بهبود کنتراست تصاویر، الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) و FCD	Landsat-8 OLI/TIRS L1TP satellite images and fieldwork تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI/TIRS L1TP و کار میدانی	Vegetation (canopy cover and surface fuel model) پوشش گیاهی (تراکم تاج پوشش و مدل ماده سوختنی سطحی)
ArcMap 10.8	Inverse distance weighting (IDW) algorithm and Kernel Density Estimation (KDE) tool الگوریتم وزن‌دهی معکوس فاصله و ابزار برآورد تراکم کرنل	Fire reports registered in the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Guilan Province (2023) and satellite data گزارش‌های آتش ثبت شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان (۱۴۰۲) و داده ماهواره‌ای	Historical ignition point data داده نقاط احتراق تاریخی
R	"Meteoland" software package بسته نرم‌افزاری Meteoland Model (Nelson, 2000) as well as the US National Fire Danger Rating System (NFDRS)	- -	Fire weather آب‌وهوای آتش
-	مدل (Nelson, 2000) و نیز سیستم رتبه‌بندی خطر آتش ملی ایالات متحده آمریکا	-	Fuel moisture رطوبت ماده سوختنی
ArcMap 10.8	Euclidean distance فاصله اقلیدسی	National Cartographic Center of Iran سازمان نقشه‌برداری کشور	Human factors (distance from roads and settlements) عوامل انسانی (فاصله از جاده ها و سکونتگاه‌ها)
FlamMap 6. شبیه‌ساز آتش (Finney, 2006)		Fire behavior modeling using input data مدل‌سازی رفتار آتش با استفاده از داده‌های ورودی	

برای شناسایی تیپ‌های پوشش زمین و تولید نقشه آن در منطقه مورد مطالعه از سه تصویر Landsat-8 OLI/TIRS L1TP استفاده شد و با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.6 تجزیه و تحلیل شد. مشخصات این تصاویر در جدول ۲ ارائه شده است. مراحل پیش‌پردازش برای این تصاویر شامل کالیبراسیون رادیومتریکی و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH است. پس از تصحیح اتمسفری، مقادیر پیکسل‌ها در تصاویر بازتاب سطحی را نشان می‌دهند. به منظور حذف پوشش ابر در این تصاویر از الگوریتم FMASK در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. در ادامه، تولید ترکیب‌ها و بهبود کنتراست تصاویر انجام شد. به منظور طبقه‌بندی نظارت شده این تصاویر، مجموعه داده‌های آموزشی شناسایی شد که تیپ‌های مختلف پوشش زمین را نشان می‌دهند. این تیپ‌های پوشش با بررسی‌های میدانی در هر پوشش زمین مانند مناطق آبی، اراضی دیم، جنگل، مرتع، اراضی لخت، مناطق انسان‌ساز و ... انتخاب شدند. این مناطق بر اساس طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) شناسایی شدند. SVM تکنیک یادگیری ماشین نظارت شده با کارایی بالا است که از یک طبقه‌بندی دودویی یا باینری بر اساس تئوری آماری یادگیری ماشین و ابرصفحه جداکننده بهینه استفاده می‌کند (Awad & Khanna, 2015). هدف ابرصفحه جداکننده بهینه، تفکیک مناسب بین دو کلاس نمونه‌های استفاده شده (کلاس‌های حضور و غیاب) برای به حداکثر رساندن حاشیه بین دو کلاس در یک مجموعه داده است (Ghayour et al., 2021). اطمینان حاصل شد که مجموعه آموزشی دارای تعداد کافی نمونه مستقل برای هر کلاس است تا تنوع بین طبقاتی را نشان دهد. در این مطالعه، از سیستم موقعیت‌یاب جهانی<sup>۱</sup>، تصاویر Google Earth تصحیح شده با وضوح بالا و نیز نقشه کاربری اراضی استان گیلان (Land use plan of Guilan Province, 2016) به عنوان مرجعی برای انتخاب و کنترل کیفیت نمونه‌های تعلیمی با ۱۰۰۰ نقطه واقعیت زمینی به‌طور تصادفی انتخاب شده، استفاده شد. در این مطالعه، در هر پوشش زمین، متناسب با سطح آن پراکنش نقاط واقعیت زمینی انجام شد (جدول ۳). از این نقاط واقعیت زمینی انتخاب شده، ۲۰۰ نقطه مرجع برای ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده استفاده شد. در این راستا، با استفاده از ماتریس خطای طبقه‌بندی کننده، دقت کلی و ضریب کاپا با کاربرد ابزار ROIs واقعیت زمینی در ENVI محاسبه شد.

---

<sup>۱</sup>- GPS

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده برای تهیه نقشه پوشش زمین استان گیلان.

**Table 2-** Characteristics of the satellite images used to prepare the land cover map of Guilan Province.

اندازه تفکیک (متر) Resolution (m)	تعداد باند Bands	نوع داده Data type	سنجنده Sensor	پوشش ابر (درصد) Cloud fraction (%)	شماره گذر / ردیف Path/row number	تاریخ Date	تصویر Image
30	11	L1TP/T1	OLI/TIRS	2.5	34 / 166	2021-10-22	Landsat-8
				8	34 / 165	2021-10-15	
				3.5	34 / 165	2021-10-15	

در این تحقیق، نقشه تیپ‌های پوشش زمین از مجموعه داده بالا تهیه شد. سپس، نقشه مدل‌های ماده سوختنی سطحی با تخصیص انواع مدل‌های ماده سوختنی محلی (Jahdi et al., 2020, 2023) و مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (Scott & Burgan, 2005) به تیپ‌های پوشش زمین منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۱، استخراج شد. هم‌چنین، نقشه تراکم پوشش گیاهی و تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) برای سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر لندست-۸ مورد استفاده برای تهیه نقشه پوشش زمین و بر اساس مدل FCD در نرم‌افزار ENVI تهیه شد.

داده نقاط احتراق تاریخی آتش با تاریخ شروع و پایان آتش‌سوزی‌های مربوطه بر اساس گزارش‌های آتش ثبت شده در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان تهیه شد. با وجود این، منابع مختلف خطا از جمله داده‌های ثبت نشده یا به‌درستی ثبت نشده ممکن است بر دقت این اطلاعات تأثیر بگذارد؛ بنابراین، در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای (محصول آتش فعال از طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط<sup>۱</sup>) برای تکمیل و بهبود دقت موقعیت نقاط احتراق و نیز وسعت آتش‌سوزی استفاده شد. بر اساس این اطلاعات، احتمال احتراق با درونیابی نقاط احتراق تاریخی با استفاده از یک الگوریتم وزن‌دهی معکوس فاصله با شعاع ثابت ۵ کیلومتر تولید شد. هم‌چنین، توزیع تکرار آتش‌سوزی برای محیط آتش تاریخی در منطقه مورد مطالعه، محاسبه شد.

<sup>۱</sup>- MODIS

جدول ۳- تعداد نقاط تعلیمی انتخاب شده در هر پوشش زمین برای طبقه‌بندی پوشش زمین در استان گیلان

**Table 3-** Number of selected training points in each land cover for land cover classification in Guilan Province

پوشش زمین	Land use	تعداد نقاط Points number	درصد نقاط Points percentage
اراضی جنگلی	Woodland	40	4
اراضی لخت	Bare ground	5	0.5
باغ- زراعت آبی	Orchard-irrigation farming	220	22
جنگل پهن برگ کم تراکم	Dense broadleaved forest	50	5
جنگل پهن برگ متراکم	Sparse broadleaved forest	330	33
جنگل پهن برگ نیمه متراکم	Semi-dense broadleaved forest	50	5
جنگل کاری پهن برگ	Broadleaved plantation	15	1.5
جنگل کاری سوزنی برگ	Conifer plantation	15	1.5
درختچه‌زار	Shrublands	5	0.5
زراعت دیم	Dry farming	30	3
مرتع کم تراکم	Scarce & low rangeland	30	3
مرتع متراکم	Dense rangeland	90	9
مرتع نیمه متراکم	Medium density rangeland	70	7
مناطق انسان‌ساز	Water bodies	30	3
مناطق آبی	Built-up lands	20	2
<b>کل</b>		<b>1000</b>	<b>100</b>

داده‌های شرایط آب‌وهوایی شامل متغیرهای دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و جهت باد برای فصل آتش-سوزی در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شدند. در این تحقیق، از بسته نرم‌افزاری "Meteoland" در R استفاده شد که چندین ابزار را برای تسهیل برآورد آب‌وهوای روزانه در سیمای سرزمین، در شرایط فعلی و نیز در شرایط آینده، ادغام می‌کند. این بسته شامل توابع (۱) برای درون‌یابی آب‌وهوای روزانه از جمله آثار توپوگرافی و (۲) برای تصحیح سوگیری‌های یک سری‌های آب‌وهوای معین (به‌عنوان مثال، خروجی‌های مدل اقلیمی) است (De Cáceres, Martin StPaul, Turco, Cabon & Granda, 2018). داده هواشناسی برای دوره ۳۰ ساله با استفاده از این بسته در نرم‌افزار R با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر درون‌یابی شد. علاوه بر این، رطوبت ماده سوختنی براساس مدل نیلسن (Nelson, 2000) و نیز سیستم رتبه‌بندی خطر آتش ملی ایالات متحده آمریکا محاسبه شد و در سه کلاس ۱-ساعت (موادسوختنی ریز دارای قطر کمتر از ۰/۶۴

سانتی‌متر)، ۱۰-ساعت (موادسوختنی با قطر ۰/۶۴ تا ۲/۵۴ سانتی‌متر) و ۱۰۰-ساعت (موادسوختنی با قطر ۲/۵۴ تا ۷/۶۲ سانتی‌متر) به دست آمد.

### مدلسازی رفتار آتش

در این مطالعه از شبیه‌ساز آتش 6 FlamMap (Finney, 2006) برای مدل‌سازی رفتار آتش در اندازه تفکیک ۱۰۰ متری برای کل منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این مدل شبیه‌ساز آتش دوبعدی، نرخ گسترش، شدت خط آتش و طول شعله را با استفاده از شرایط آب‌وهوایی و رطوبت ماده سوختنی زنده ثابت برای ارزیابی رفتار آتش بالقوه برای یک سناریوی معین در یک سیمای سرزمین محاسبه می‌کند. اگرچه این مدل نقاط اشتعال یا تغییرات شرایط آب‌وهوایی را در طول یک رویداد آتش‌سوزی در نظر نمی‌گیرد، این یک روش قدرتمند است که معمولاً برای برآورد ریسک آتش بر اساس پوشش گیاهی و ویژگی‌های توپوگرافی استفاده می‌شود (Calkin, Ager & Gilbertson-Day, 2010). از این نظر، در مقایسه با شبیه‌سازهای دیگر مانند FARSITE (Finney, 2004) برای این مطالعه مناسب‌تر است، زیرا امکان شناسایی مناطق با پتانسیل بالا برای ایجاد آتش با شدت بالا را در صورتی که شرایط آب‌وهوایی مناسب آتش وجود داشته باشد، فراهم می‌کند (Xofis, Konstantinidis, Papadopoulos & Tsiourlis, 2020).

شدت خط آتش ( $I$ ; کیلووات بر متر) که اغلب به آن شدت Byram گفته می‌شود، نرخ آزاد شدن انرژی یا گرما در واحد زمان در واحد طول جبهه آتش است. شدت خط آتش را نمی‌توان به‌طور مستقیم روی زمین اندازه‌گیری کرد (Byram, 1959)، بلکه محاسبه آن از طریق معادله (۱) است:

$$I = H \times w \times r \quad (1)$$

که در آن:

$H$  = بازده حرارتی (کیلوژول بر کیلوگرم)

$W$  = بار ماده سوختنی (کیلوگرم بر مترمربع)؛

$R$  = نرخ گسترش آتش (متر بر ثانیه).

نرخ گسترش آتش ( $R$ ; متر در دقیقه) در هر نقطه از پلی‌گون محیط آتش، با سوختن در شرایط ثابت و گسترش در سطح زمین محاسبه می‌شود. در رابطه (۲) برای محاسبه نرخ گسترش، نسبت بین سرعت گرم-شدن ماده سوختنی و انرژی موردنیاز برای رساندن همان ماده سوختنی به احتراق ارائه می‌شود (Rothermel, 1972):

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad (2)$$

که در آن:

$R$  = نرخ گسترش ( $m \min^{-1}$ )، نرخ پخش روبه‌جلو جبهه آتش سطحی، در شرایط ثابت؛

$I_R$  = شدت واکنش ( $\text{kJ min}^{-1} \text{m}^{-2}$ )، نرخ آزادسازی انرژی در واحد سطح از جبهه آتش؛  
 $\xi$  = نسبت پخش شار<sup>۱</sup> (بدون بعد)، بخشی از انرژی آزاد شده مؤثر در گرم‌شدن و احتراق ماده‌سوختنی مجاور؛  
 $\rho_b$  = تراکم توده ( $\text{kg m}^{-3}$ )، جرم خشک ماده‌سوختنی در هر واحد حجم؛  
 $\varepsilon$  = تعداد منبع گرمایشی مؤثر (بدون بعد)، به‌عنوان عامل وزن‌دهی در مدل روترمل که نسبت بین تراکم توده و جرم ماده‌سوختنی داخل در فرآیند احتراق است؛  
 $Q_{ig}$  = گرمای قبل از احتراق ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )، انرژی موردنیاز برای احتراق؛  
 ضرایب  $\Phi_w$  و  $\Phi_s$  به ترتیب مربوط به شیب زمین و باد است.  
 در این مطالعه، نقشه‌های شبیه‌سازی شده شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش به مقیاسی بین ۰ و ۱ تغییر داده شد تا از آن‌ها برای محاسبه شاخص ریسک آتش (Xofis et al., 2020) استفاده شود.

### محاسبه شاخص ریسک آتش

در این مطالعه از یک رویکرد یکپارچه برای محاسبه شاخص ریسک آتش استفاده شد. ورودی‌های این شاخص شامل مشخصه‌های رفتار آتش (شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش شبیه‌سازی شده) به همراه عوامل انسانی و تاریخی آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه است. در این کار، عوامل انسانی با استفاده از فاصله از جاده‌ها و سکونتگاه‌ها در شاخص ریسک آتش ادغام شد. به این منظور، نقشه‌های رستری نشان دهنده فاصله اقلیدسی از همه جاده‌ها و سکونتگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار ArcMap 10.8 ایجاد شد. در مطالعات متعددی اثر قابل توجه این عوامل انسانی روی ریسک آتش گزارش شده است. به‌عنوان مثال، کتری و همکاران (Catry, Rego, Bação & Moreira, 2009) ارتباط قوی بین ریسک احتراق و فاصله از جاده‌ها برای فواصل کم (مانند ۵۰۰-۰ متر) گزارش کردند. هم‌چنین در مطالعه کلانک و همکاران (Kolanek, Szymanowski & Raczyk, 2021) رخداد آتش با نزدیکی به زیرساخت‌های انسانی، از جمله جاده‌ها و سکونتگاه‌ها ارتباط مستقیم دارد.

علاوه بر عوامل انسانی اشاره شده، تاریخی آتش‌سوزی نیز با ترسیم الگوی مکانی آتش‌سوزی‌های گذشته در منطقه مورد مطالعه در محاسبه شاخص ریسک آتش در نظر گرفته شد. مطابق با مطالعه دورف و همکاران (Dorph, Marshall, Parkins & Penman, 2022)، تاریخی آتش‌سوزی و طرح‌های مکانی نقاط احتراق در ارزیابی ریسک‌های آتش در یک منطقه مهم است؛ بنابراین، داده‌های مربوط به تمام آتش‌سوزی‌هایی که در ۳۰ سال گذشته در منطقه ثبت شده‌اند، از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان جمع‌آوری شده و

<sup>1</sup> Propagating flux ratio

به صورت نقشه وکتور نقطه‌ای و پلی‌گونی تهیه شدند. از ابزار برآورد تراکم کرنل در ArcMap برای تبدیل نقشه نقطه‌ای احتراق تاریخی به نقشه رستری تراکم آتش منطقه مورد مطالعه استفاده شد؛ مانند نقشه‌های مشخصه‌های رفتار آتش شبیه‌سازی شده، نقشه‌های عوامل انسانی و تاریخچه آتش نیز به مقادیر بین ۰ و ۱ تغییر مقیاس داده شد.

مطابق با روش بکار رفته در مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) عواملی که معرف ریسک آتش هستند، باید وزن‌دهی شوند. در این ارتباط، ۲۰ درصد از وزن ریسک آتش به عوامل انسانی (نزدیکی به زیرساخت‌های انسانی) و ۱۰ درصد به الگوی فضایی احتراق‌های گذشته اختصاص داده شد. ۷۰ درصد باقیمانده نیز به مشخصات رفتار آتش شبیه‌سازی شده (شدت خط آتش و نرخ گسترش) اختصاص یافت. این دو مشخصه مهم رفتار آتش که به نوع و شرایط ماده سوختنی مرتبط هستند، تا حد زیادی تعیین می‌کنند که یک آتش‌سوزی چقدر می‌تواند بحرانی و فاجعه‌بار باشد. مطابق با مرور منابع قبلی (Xofis et al., 2020; Scott et al., 2013)، ۵۰ و ۲۰ درصد از وزن ریسک آتش به ترتیب به شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش اختصاص یافت؛ بنابراین با ترکیب چهار عامل محاسبه شده و در نظر گرفتن وزن‌های مرتبط، فرمول نهایی محاسبه شاخص ریسک آتش (FRI) به صورت رابطه (۳) به دست آمد:

$$FRI = (0.5 \times I) + (0.2 \times R) + (0.2 \times HI) + (0.1 \times FH) \quad (3)$$

که در آن:

$I$  = شدت خط آتش

$R$  = نرخ گسترش آتش

$HI$  = شاخص انسانی

$FH$  = تاریخچه آتش.

نقشه حاصل از محاسبه شاخص ریسک آتش نیز به‌مانند ورودی‌های آن در مقادیر بین ۰ و ۱ است که ۰ نشان‌دهنده ریسک کم و ۱ بیشترین ریسک است.

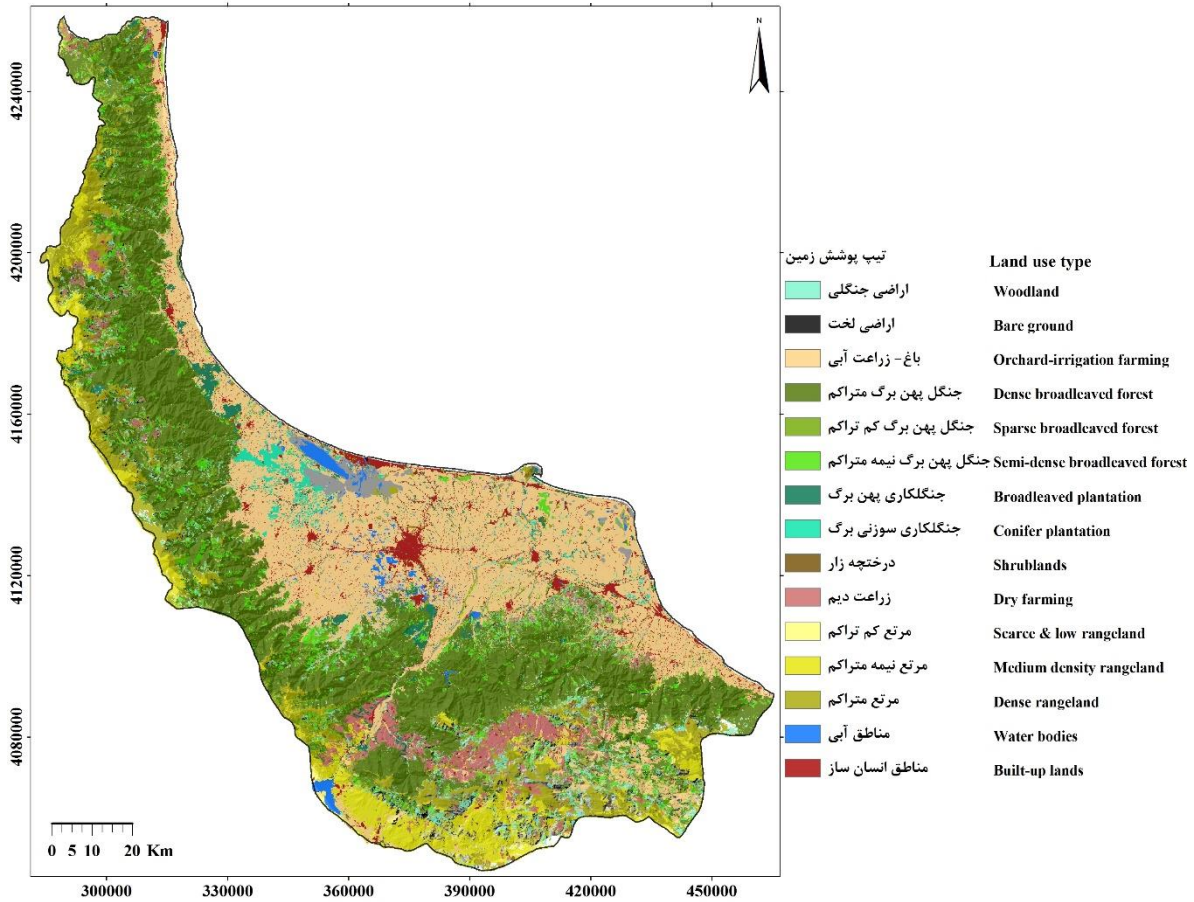
### ۳- نتایج و بحث

در منطقه مورد مطالعه، بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای ۱۵ طبقه پوشش زمین شناسایی شد (شکل ۲ و جدول ۴). صحت کلی و آماره کاپای برآورد شده به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۸۸ بود. دو پوشش جنگل پهن‌برگ متراکم (۳۰/۶ درصد) و باغ-زراعت آبی (۲۶ درصد) در این منطقه غالب هستند. تقریباً ۶۵ درصد از تیپ‌های پوشش زمین شامل جنگل‌های طبیعی، جنگل‌کاری‌ها، اراضی جنگلی، درختچه‌زارها و مراتع هستند. بقیه اراضی کشاورزی، مناطق انسان‌ساز، مناطق آبی و اراضی لخت هستند. مطابق با جدول ۴ مدل‌های ماده



سوختنی محلی و استاندارد (Scott & Burgan, 2005) به تیپ‌های پوشش زمین در استان گیلان اختصاص یافت. این مدل‌ها می‌توانند ورودی برای اجرای شبیه‌سازی رفتار آتش و همچنین برای برآورد شاخص ریسک آتش و آثار آتش باشند.

در منطقه مورد مطالعه، مدل‌های ماده سوختنی جنگل در مناطق مرتفع و کوهستانی غالب است. جنگل پهن-برگ خزان‌کننده متراکم (۳۰/۶ درصد)، نیمه‌متراکم (۴/۳ درصد) و کم‌تراکم (۴/۴ درصد) به‌صورت نواری در سراسر منطقه مورد مطالعه گسترده است، درحالی‌که جنگل‌کاری‌های همیشه‌سبز سوزنی‌برگ (حدود ۱ درصد) در مناطق کم‌ارتفاع به‌صورت پراکنده است. مدل‌های ماده سوختنی مراتع (در مجموع ۱۸/۷ درصد) شامل علفزارها و بوته‌زارها در مناطق جنوبی استان و تا حدی غرب آن غالب است. بیشتر بوته‌زارها دارای تراکم متوسط و زیاد هستند. مدل‌های ماده سوختنی باغ-زراعت آبی (۲۶ درصد) در سراسر شمال استان و تاحدی شرق استان غالب است، درحالی‌که زراعت دیم (۴ درصد) در بخش جنوب-مرکزی استان پراکنش دارد. توزیع بالاتر این مناطق کشاورزی (باغ-زراعت آبی و زراعت دیم) در مقایسه با سایر پوشش‌های زمین در بخش شمالی استان مطابق با نتیجه تحقیق محمد حسنی لر و همکاران (Mohammad Hasani Lor, Vafakhah & Pourghasemi, 2016) است. مدل‌های ماده سوختنی درختچه‌زار (۰/۲۵ درصد) و اراضی جنگلی (۳/۶ درصد) نیز به‌صورت محدود و پراکنده در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. درنهایت، مدل‌های ماده سوختنی مناطق انسان‌ساز (۳/۲ درصد) مربوط به شهرها و روستاها است که بیشتر در بخش شمالی استان و در مرز جنوبی دریای کاسپین در حومه شهرها و مناطق روستایی توزیع شده است. مناطق آبی (۲/۴ درصد) نیز به‌صورت پراکنده در بخش شمالی، مرکزی و جنوبی استان موجود است.



شکل ۲- تپ‌های پوشش زمین در استان گیلان

Fig.2. Land use types of the Gilan Province

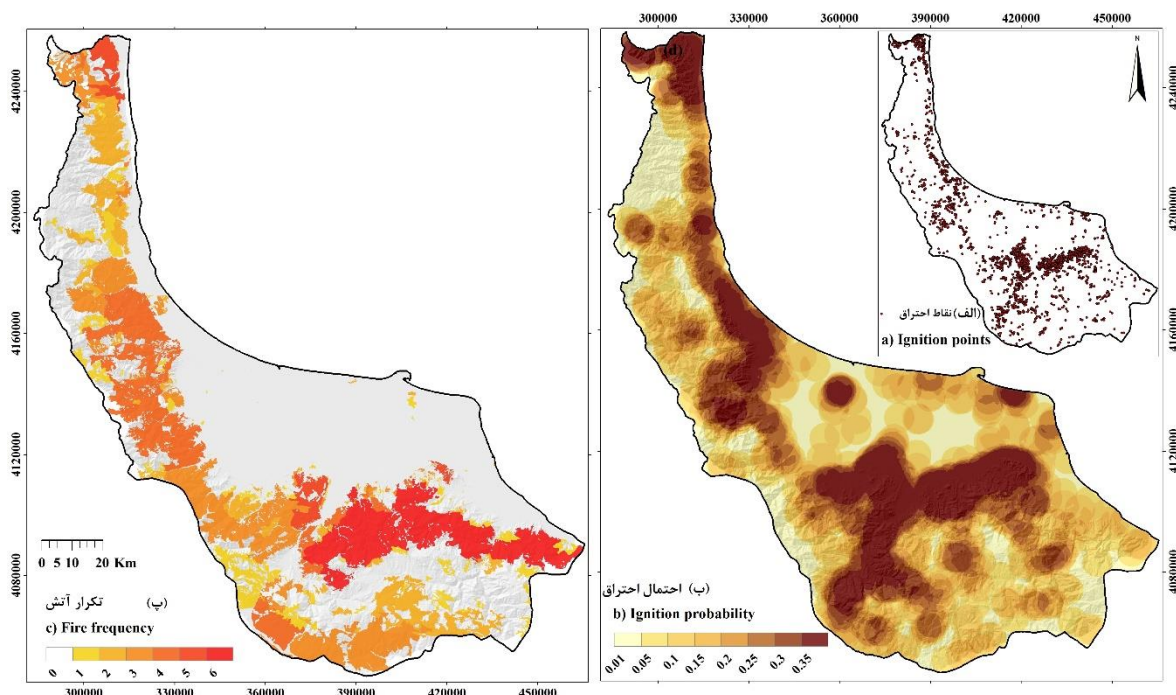
جدول ۴- تپ‌های پوشش زمین و مدل‌های ماده سوختنی محلی و استاندارد (Scott & Burgan, 2005) اختصاص یافته در استان گیلان

Table 4- Land use types and custom and standard (Scott & Burgan, 2005) fuel models designated for the Gilan Province

مدل ماده سوختنی Fuel model	پوشش (درصد) Cover (%)	مساحت (هکتار) Area (ha)	پوشش زمین Land use
FM36	3.58	50209.11	Woodland اراضی جنگلی
NB9 (Scott & Burgan, 2005)	0.10	1407.27	Bare ground اراضی لخت
NB3 (Scott & Burgan, 2005)	26.01	365219.53	Orchard-irrigation farming باغ- زراعت آبی
FM30	4.43	62188.70	Dense broadleaved forest جنگل پهن برگ کم تراکم
FM31	3.62	430023.04	Sparse broadleaved forest جنگل پهن برگ

				متراکم
FM32	4.32	60701.95	Semi-dense broadleaved forest	جنگل پهن‌برگ نیمه متراکم
FM34	1.48	20828.75	Broadleaved plantation	جنگل کاری پهن‌برگ
FM35	0.97	13640.59	Conifer plantation	جنگل کاری سوزنی-برگ
FM33	0.25	3559.43	Shrublands	درختچه‌زار
FM26	4.00	56155.09	Dry farming	زراعت دیم
FM27	2.26	31776.07	Scarce & low rangeland	مرتع کم تراکم
FM28	9.99	140328.11	Dense rangeland	مرتع متراکم
FM29	6.47	90838.43	Medium density rangeland	مرتع نیمه متراکم
NB1 (Scott & Burgan, 2005)	3.16	44361.98	Water bodies	مناطق انسان‌ساز
NB8 (Scott & Burgan, 2005)	2.36	33161.94	Built-up lands	مناطق آبی
-	<b>100</b>	<b>1404400</b>	<b>Total</b>	<b>کل</b>
FM stands for Fuel Model			Fuel Model مخفف (مدل ماده سوختنی)	
NB stands for Non-burnable			Non-burnable مخفف (غیرقابل سوختن)	

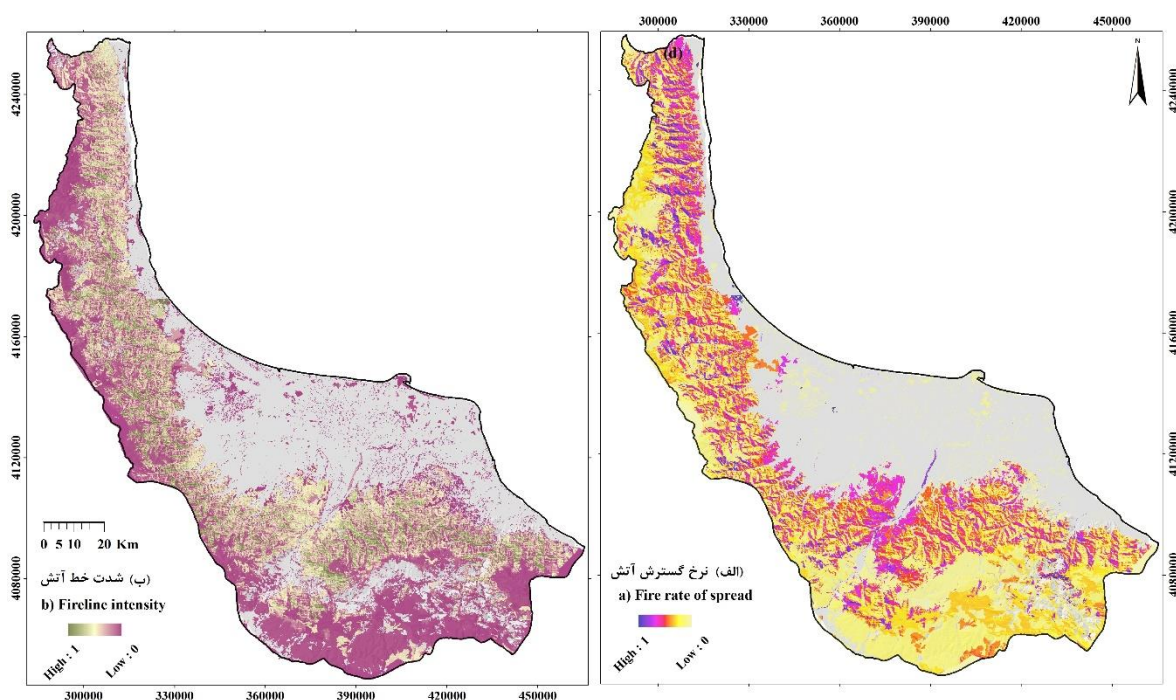
در مورد اطلاعات حوادث آتش‌سوزی تاریخی در منطقه مورد مطالعه، نقشه احتمال احتراق با درون‌یابی نقاط احتراق تاریخی (۲۱۸۰ نقطه احتراق؛ شکل ۳الف) با استفاده از الگوریتم وزن‌دهی معکوس در کل منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۳ب). بر اساس این نقشه، بیشترین احتمال احتراق در مرکز و شمال-غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد که با آتش‌سوزی‌ها از نظر تاریخی هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، شکل ۳پ نقشه توزیع تکرار آتش‌سوزی (فراوانی آتش) برای محیط آتش تاریخی در جنگل‌ها و مراتع منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه، بیشترین تکرار آتش در نواحی شرقی-مرکزی و ناحیه کوچکی در منتهی-الیه غربی استان رخ داده است.



شکل ۳- نقشه‌های توزیع مکانی نقاط احتراق تاریخی (الف: ۱۹۹۲-۲۰۲۲)، احتمال احتراق (ب) و تکرار آتش‌سوزی‌های (پ) مشاهده شده در استان گیلان

**Fig.3.** Spatial distribution maps of historical ignition points (a; 1992-2022), ignition probability (b), and fire frequency (c) observed in Guilan Province.

در ادامه، رفتار آتش برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی شدت خط آتش و نرخ گسترش آتش ارزیابی شد (شکل ۴). نتایج تجزیه و تحلیل توزیع ارزش‌های این خروجی‌ها نشان می‌دهد که در بیش از ۹۳ درصد از منطقه مورد مطالعه ارزش نرخ گسترش آتش از آستانه ۰/۲۵ فراتر نمی‌رود و کمتر از ۷ درصد این منطقه دارای ارزش‌های بالاتر است. هم‌چنین، در بیش از ۹۰ درصد از منطقه مورد مطالعه مقدار شدت خط آتش از ۰/۲۵ فراتر نمی‌رود و حدود ۱۰ درصد این منطقه نیز دارای ارزش‌های بالاتر است. با توجه به نقشه توپوگرافی (شکل ۱) و نقشه پوشش زمین (شکل ۲) به نظر می‌رسد که بالاترین مقادیر شدت خط آتش و نرخ گسترش در بالاترین ارتفاعات و نیز در پوشش‌های گیاهی متراکم باشد. این نتیجه مشابه با نتیجه اوکانو و یامانو (Okano & Yamano, 2015) است که مقادیر حداکثر شدت خط آتش شامل اثر توپوگرافی بود، در جایی که سرایشی قرار داشت و توسط جنگل‌های پهن‌برگ متراکم احاطه شده بود.



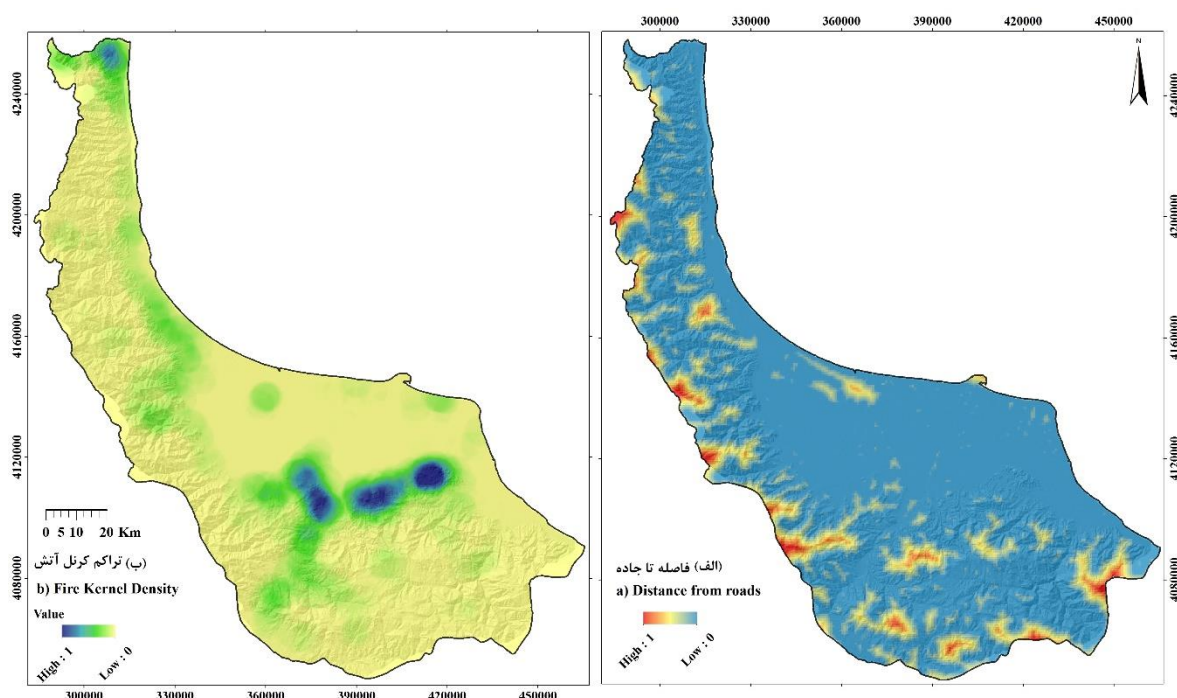
شکل ۴- نقشه‌های توزیع مقادیر تجدید مقیاس‌شده (بدون بعد) نرخ گسترش آتش (الف) و شدت خط آتش (ب)

شبیه‌سازی شده برای استان گیلان

**Fig. 4.** Distribution maps of rescaled (dimensionless) values of fire rate of spread (a) and fireline intensity (b) simulated for Guilan province

دو مؤلفه دیگر شاخص ریسک آتش شامل عامل انسانی فاصله تا جاده و تراکم کرنل آتش/تاریخچه آتش (شکل ۵ الف و ب) که عمدتاً به احتمال وقوع آتش‌سوزی مربوط می‌شود، به نسبت بسیار کمتری از منطقه مورد مطالعه اشاره دارد. این نتیجه مشابه با مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) بود.

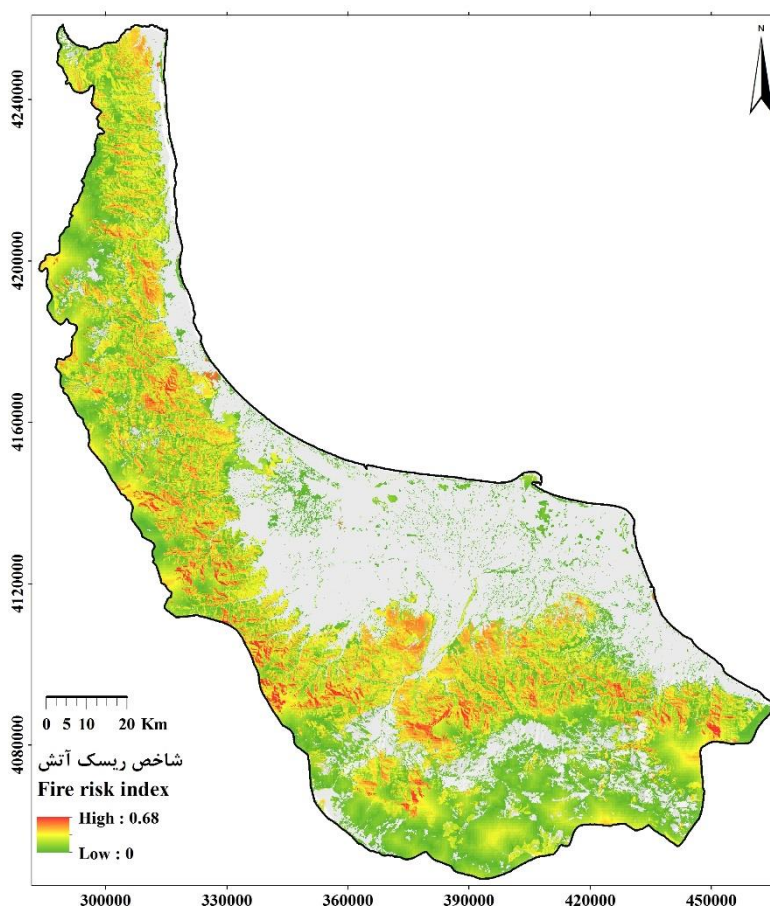




شکل ۵- نقشه‌های توزیع مقادیر تجدید مقیاس شده (بدون بعد) فاصله تا جاده (الف) و تراکم کرنل آتش (ب) برای استان گیلان

**Fig. 5.** Distribution maps of rescaled (dimensionless) values of distance to road (a) and fire kernel density (b) for Guilan province

در نهایت، ادغام چهار مؤلفه بالا (شکل ۴ و شکل ۵) منجر به محاسبه شاخص نهایی و مشخص مکانی ریسک آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه شد (شکل ۶). ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰ تا ۰/۶۸ با میانگین ۰/۱۱ متغیر بود. مقدار شاخص ریسک آتش ۰/۰ در بخش‌های پست و کم‌ارتفاع منطقه مورد مطالعه، که عمدتاً توسط مدل‌های ماده سوختنی غیرقابل سوختن (اراضی لخت، باغ-زراعت آبی، مناطق انسان‌ساز و مناطق آبی؛ جدول ۴) پوشیده شده است، مشاهده می‌شود. در حالی که مقدار بیشینه ریسک آتش در منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات، جایی که پوشش‌های جنگلی متراکم وجود دارد، مشاهده می‌شود. در این مطالعه، مشابه با مطالعه زوفس و همکاران (Xofis et al., 2020) شاخص ریسک آتش موزائیک پیچیده‌ای از مناطق با خواص اشتعال‌پذیری متفاوت و درجه ریسک آتش متفاوت را نشان می‌دهد که منعکس‌کننده تنوع گیاهی ترکیبی و ساختاری و همچنین نقش برجسته توپوگرافی منطقه مورد مطالعه است. هم‌چنین، الگوی توزیع ارزش‌های شاخص ریسک آتش نشان می‌دهد که در حدود ۷۹ درصد از منطقه مورد مطالعه با ریسک آتش‌سوزی کم (شاخص ریسک کمتر از ۰/۲۵) و حدود ۲۱ درصد این منطقه با ریسک آتش‌سوزی زیاد (شاخص ریسک بیش از ۰/۲۵) مواجه است.



شکل ۶- نقشه شاخص ریسک آتش برای استان گیلان

**Fig. 6.** Fire risk index map for Guilan province

مطابق با نتایج به دست آمده در این مطالعه، ریسک آتش از مناطق پست و کم‌ارتفاع به سمت ارتفاعات در منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. از دلایل کم بودن شاخص ریسک آتش در این مناطق می‌توان به این مورد اشاره کرد که اولاً مناطق کم‌ارتفاع اغلب با زمین‌های کشاورزی و سایر فعالیت‌های انسانی ترکیب شده است که این مناطق به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی اغلب با آتش‌سوزی‌های مکرر، اما با سطح کوچک (به دلیل دسترسی زیاد به جاده و تجهیزات اطفای آتش) همراه است که به‌عنوان مثال برای از بین بردن پسرچر مزارع سوزانده می‌شود. دوماً حضور شدید انسان در این منطقه منجر به تخریب پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش بار ماده سوختنی آماده اشتعال و نیز کاهش احتمال آتش‌سوزی با شدت بالا در این مناطق شده است. در مطالعه راتکلیف و همکاران (Ratcliff et al., 2022) نیز مدل‌های رفتار آتش نشان داد که کاهش ماده سوختنی در منطقه مورد مطالعه طول شعله و شدت آتش را کاهش می‌دهد و منجر به آتش‌سوزی‌های قابل کنترل‌تر می‌شود؛ بنابراین، احتمال بالاتری از تبدیل شدن یک آتش‌سوزی به آتش‌سوزی بزرگ در



ارتفاعات و نواحی با دسترسی محدود به جاده و تجهیزات اطفای آتش در مقایسه با مناطق کم ارتفاع وجود دارد. در گزارش گالوس و همکاران (Glaves, Crowle, Bruemmer & Lenaghan, 2020) نیز در مناطق پست تعداد آتش‌سوزی‌های بسیار بیشتر رخ داده است، اگرچه آتش‌سوزی‌های بزرگ با ارتفاعات مرتبط هستند. مطابق با مطالعه نارایانارج و ویمبرلی (Narayanaraj & Wimberly, 2012) اشتعال‌های ناشی از انسان در نزدیکی جاده‌ها، در مناطق پر تراکم جاده‌ها و نزدیک نواحی مسکونی متمرکز شده‌اند. در مقابل، اشتعال‌های طبیعی ناشی از رعدوبرق در مناطق کم تراکم جاده، دور از نواحی مسکونی و در مناطق کم تراکم جمعیت متمرکز بودند. اگرچه بیشتر آتش‌سوزی‌های کوچک در مناطق مجاور جاده‌ها رخ می‌دهد، اما آن‌ها تنها بخش کوچکی از کل سطح سوخته‌شده را تشکیل می‌دهند. در مقابل، آتش‌سوزی‌های بزرگ در مناطق دور از جاده، بیشتر سطح سوخته‌شده را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین، تأثیر جاده‌های جنگلی در محدود کردن اندازه آتش احتمالاً بیشتر از تأثیر جاده‌ها بر افزایش اشتعال آتش است.

در مورد ریسک آتش در جنگل‌های این منطقه که اغلب جنگل‌های معتدله یا پهن‌برگ خزان‌کننده هستند نیز لازم به ذکر است که این جنگل‌ها، علی‌رغم بار ماده سوختنی مرده نسبتاً زیاد، که در اثر ریزش سالانه برگ‌ها و سرعت تجزیه نسبتاً آهسته این منطقه ایجاد می‌شود، به‌طور کلی دارای شرایط مرطوبی هستند که باعث افزایش رطوبت ماده سوختنی و جلوگیری از اشتعال آن و نیز تبدیل شدن به آتش‌سوزی با شدت بالا می‌شود. باین وجود، به دلیل وزش بادهای گرم محلی (گرمیج یا گرمش) در مواقع زیادی از سال به‌ویژه در پاییز و زمستان، این جنگل‌ها به‌سرعت رطوبت خود را از دست داده و آماده اشتعال می‌شوند. در مطالعه عابد و همکاران (Abed, Sahraeyan & Rezaei, 2016) نیز به نقش گرمش به‌عنوان بادی گرم و خشک که بیشتر در فصل سرد سال، در شمال رشته‌کوه البرز می‌وزد و علت اصلی آن استقرار سامانه پرفشار بر روی فلات ایران و سامانه کم‌فشار بر روی جنوب دریای کاسپین است، در افزایش احتمال آتش‌سوزی جنگل‌ها در گیلان اشاره شده است. هم‌چنین، مطابق مطالعه اورز و همکاران (Evers, Holz, Busby & Nielsen-Pincus, 2022) در جنگل‌های بارانی معتدله، فعالیت آتش‌سوزی در این جنگل‌ها که دارای زمستان‌های معتدل و مرطوب و تابستان‌های خشک گرم است، با حوادث آتش‌سوزی اپیزودیک با شدت متوسط تا بالا تحت تأثیر بادهای گرم و خشک مشخص می‌شود. در مطالعه حیدری و همکاران (Heydari, Arabi & Warziniack, 2021a) نیز آتش‌سوزی جنگل‌ها با ماه‌های گرم و خشک مرتبط است و افزایش این ماه‌ها منجر به افزایش فعالیت و ریسک آتش‌سوزی شده است.

تخمین ریسک آتش و شناسایی نواحی پرریسک (آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر آتش با شدت بالا) احتمالاً اولین قدم ضروری برای توسعه یک راهبرد مدیریت آتش مؤثر است (Shi & Zhang, 2023). با شناسایی این نواحی پرریسک، برنامه‌ریزی برای اقدامات کاهش ریسک و آسیب آتش از جمله کاهش یا حذف ماده

سوختنی اقدام ضروری بعدی است (Mauri, Hernández Paredes, Núñez Blanco & García Feded, 2023). این در حالی است که در ایران رویکردهای سنتی مدیریت آتش تقریباً به‌طور انحصاری بر اطفای آتش تکیه دارند و علی‌رغم افزایش میزان منابع تخصیص‌یافته به‌منظور تجهیز نیروها و بهبود فنون و روش‌های اطفاء حریق در دهه‌های گذشته، موفقیتی در این زمینه حاصل نشده است؛ بنابراین، یک رویکرد جایگزین پیشنهاد می‌شود که باید بر اساس تعادل بهتر بین فعالیت‌های اطفای آتش، فعالیت‌های پیشگیرانه و افزایش سطح آمادگی شامل مدیریت ماده سوختنی باشد. همچنین، مدیریت یکپارچه آتش به‌عنوان یک رویکرد مؤثرتر مدیریت آتش پیشنهاد می‌شود که از شیوه‌های مدیریت جنگل‌ها و مراتع از جمله کاهش ماده سوختنی، تبدیل و جداسازی برای کاهش احتمال اشتعال به آتش‌سوزی با شدت بالا و افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان استفاده می‌کند (Wollstein et al., 2022). از سوی دیگر، با وجود عدم قطعیت‌های مربوط به آثار تغییرات اقلیمی بر رژیم‌های آتش‌سوزی، به نظر می‌رسد که آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع در آینده شدیدتر خواهند شد. در مواجهه با این آثار، برنامه‌ریزی برای سوزاندن تجویزی<sup>۱</sup> تحت سناریوهای شبیه‌سازی آتش آزمایش شده، همراه با سایر تیمارهای کاهش ماده سوختنی می‌تواند برای کاهش شدت آتش‌سوزی‌های آینده موردتوجه قرار گیرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد چگونه انواع اطلاعات سیمای سرزمین (توپوگرافی و ماده‌سوختنی)، شرایط آب‌وهوایی و سابقه تاریخی آتش در منطقه به همراه عوامل انسانی مؤثر مانند فاصله تا جاده و سکونت‌گاه‌ها، می‌توانند برای تولید تخمین‌های مکانی ریسک آتش‌سوزی با استفاده از مدل‌سازی رفتار آتش استفاده شوند. آماده‌سازی این ورودی‌ها برای مدل‌سازی بسیار زمان‌بر و دشوار است؛ با این حال، این چالش نباید متخصصان و مدیران جنگل و مرتع را از استفاده از این مدل‌ها منصرف کند. با توجه به توزیع مکانی شاخص ریسک آتش‌سوزی در این مطالعه، مناطق با ریسک متوسط و زیاد ۲۱ درصد از استان گیلان را شامل می‌شود؛ بنابراین، در این مناطق باید منابع مدیریت آتش با تمرکز بیشتری کنترل و برنامه‌ریزی شود، زیرساخت‌های پیشگیری از آتش تقویت شود، آموزش پیشگیری از آتش برای ارتقای آگاهی مردم در برابر آتش انجام شود و اقدامات مختلفی برای افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر این مناطق انجام شود. اگرچه با وجود انجام این اقدامات، آتش‌سوزی‌های احتمالی زیادی همچنان به‌صورت تصادفی و نامشخص باقی می‌مانند و کنترل کامل آن‌ها بسیار دشوار است؛ اما برآورد ریسک آتش‌سوزی و تهیه مدل پیش‌بینی آن می‌تواند در

<sup>1</sup> Prescribed fire

کاهش ریسک آتش‌سوزی، جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از آتش‌سوزی و تخصیص بهتر منابع پیشگیری از آتش‌سوزی کمک کند. روش ارائه شده در این تحقیق، امکان پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی و ارزیابی کمی آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌ها و مراتع را برای تجزیه و تحلیل وضعیت جامع این آتش‌سوزی‌ها، درک توزیع مکانی و درجه آسیب آتش‌سوزی‌ها و ارائه یک راهکار علمی برای پشتیبانی فنی به منظور پیشگیری و مدیریت آتش‌سوزی را فراهم می‌کند.

## References

- Abed, H., Sahraeyan, F., & Rezaei, P. (2016). The Effects of Garmesh Wind on Weather Conditions of Rasht Synoptic Weather Station. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(2), 59-76. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v4i2.29820>
- Alcasena, F., Ager, A., Le Page, Y., Bessa, P., Loureiro, C., & Oliveira, T. (2021). Assessing Wildfire Exposure to Communities and Protected Areas in Portugal. *Fire*, 4, 82. <https://doi.org/10.3390/fire4040082>
- Alhaj Khalaf, M. W., Shataee Joibary, S., Jahdi, R., & Bacciu, V. (2021). Improved forest fire spread mapping by developing custom fire fuel models in replanted forests in Hyrcanian forests, Iran. *Forest Systems*, 30(2), e008. <https://doi.org/10.5424/fs/2021302-17980>
- Awad, M., & Khanna, R. (2015). Support Vector Machines for Classification. In *Efficient Learning Machines*. Apress, Berkeley, CA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_3)
- Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. *Forest Fire Control and Use*, 61 - 89.
- Calkin, D. E., Ager, A. A., & Gilbertson-Day, J. (2010). Wildfire risk and hazard: procedures for the first approximation. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-235*. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Catry, F. X., Rego, F. C., Bação, F. L., & Moreira, F. (2009). Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8), 921-931. <https://doi.org/10.1071/WF07123>
- De Cáceres, M., Martin StPaul, N., Turco, M., Cabon, A., & Granda, V. (2018). Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling & Software*, 108, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.003>
- Dorph, A., Marshall, E., Parkins, K. A., & Penman, T. D. (2022). Modelling ignition probability for human- and lightning-caused wildfires in Victoria, Australia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3487-3499. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3487-2022>.
- Evers, C., Holz, A., Busby, S., & Nielsen-Pincus, M. (2022). Extreme Winds Alter Influence of Fuels and Topography on Megafire Burn Severity in Seasonal Temperate Rainforests under Record Fuel Aridity. *Fire*, 5, 41. <https://doi.org/10.3390/fire5020041>
- Finney, M. A. (2004). *FARSITE, Fire Area Simulator--model development and evaluation*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Finney, M. A. (2005). The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*, 211, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010>

- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: *Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. Fuels Management-How to Measure Success. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 213-220* .
- Ghayour, L., Neshat, A., Paryani, S., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., ... & Ahmad, A. (2021). Performance Evaluation of Sentinel-2 and Landsat 8 OLI Data for Land Cover/Use Classification Using a Comparison between Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing, 13*, 1349. <https://doi.org/10.3390/rs13071349>
- Glaves, D. J., Crowle, A. J. W., Bruemmer, C., & Lenaghan, S. A. (2020). *The causes and prevention of wildfire on heathlands and peatlands in England*. Natural England Evidence Review NEER014. Peterborough: Natural England.
- Heydari, H., Arabi, M., & Warziniack, T. (2021a). Effects of Climate Change on Natural-Caused Fire Activity in Western U.S. National Forests. *Atmosphere, 12*, 981. <https://doi.org/10.3390/atmos12080981>
- Heydari, M., Attar Roshan, S., Jaferyan, E., & Abiyat, M. (2021b). Modeling and Zoning of Fire Prone Areas in Zagros Forests Using Geographic Information System Based on Logistic Regression. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 10*(2), 43-58. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68903.1019>
- Hood, S. M., Varner, J. M., Jain, T. B., & Kane, J. M. (2022). A framework for quantifying forest wildfire hazard and fuel treatment effectiveness from stands to landscapes. *Fire Ecology, 18*, 33. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00157-0>
- Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F. J., Arabi, M., Arca, B., & Duce, P. (2020). Evaluating landscape-scale wildfire exposure in northwestern Iran. *Natural Hazards, 101*, 911–932. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03901-4>
- Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F., & Del Giudice, L. (2023). Assessing the Effectiveness of Silvicultural Treatments on Fire Behavior in the Hyrcanian Temperate Forests of Northern Iran. *Environmental Management, 72*, 682–697. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01785-1>
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modeling, 1* (2), 1-13. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.1215>
- Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human Activity Affects Forest Fires: The Impact of Anthropogenic Factors on the Density of Forest Fires in Poland. *Forests, 12*, 728. <https://doi.org/10.3390/f12060728>
- Land use plan of Guilan Province. (2016). Management and Planning Organization (MPO) of Guilan Province. [In Persian]
- Mauri, E., Hernández Paredes, E., Núñez Blanco, I., & García Feced, C. (2023). Key Recommendations on Wildfire Prevention in the Mediterranean. *European Forest Institute, 10*. <https://doi.org/10.36333/rs6>
- Meteorological Quarterly of the Guilan Province. (2019). General Meteorological Department of Guilan Province. [In Persian]

- Mohammad Hasani Lor, S., Vafakhah, M., & Pourghasemi, H. R. (2016). *Determining the land use area of Gilan Province using supervised classification*. Paper presented of the 2th National Conference on Passive Defense in Agriculture, Natural Resources and Environment with Sustainable Development Approach, Tehran.[In Persian] <https://civilica.com/doc/567112>
- Narayananaraj, G., & Wimberly, M. C. (2012). Influences of forest roads on the spatial patterns of human- and lightning-caused wildfire ignitions *Applied Geography*, *32*(2), 878-888. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.004>
- Nelson Jr, R. M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, *30*(7), 1071-1087. <https://doi.org/10.1139/x00-032>
- Okano, Y., & Yamano, H. (2015). Forest fire propagation simulations for a risk assessment methodology development for a nuclear power plant. *Case Studies in Fire Safety*, *4*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.csfs.2015.05.001>
- Oliveira, S., Rocha, J., & Sá, A. (2021). Wildfire risk modeling. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *23*, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100274>
- Parisien, M. C., Dawe, D. A., Miller, C., Stockdale, C. A., & Armitage, O. B. (2019). Applications of simulation-based burn probability modelling: A review. *International Journal of Wildland Fire*, *28*, 913-926. <https://doi.org/10.1071/WF19069>
- Ratcliff, F., Rao, D., Barry, S., Dewees, S., Macaulay, L., Larsen, R., ... & Forero, L. (2022). Cattle grazing reduces fuel and leads to more manageable fire behavior. *California Agriculture*, *76*(2), 60-69. <https://doi.org/10.3733/ca.2022a0011>
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Vol. 115). Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.
- Sá, A. C. L., Aparicio, B. A., Benali, A., Bruni, C., Salis, M., Silva, F., ... & Pereira, J. (2022). Coupling wildfire spread simulations and connectivity analysis for hazard assessment: a case study in Serra da Cabreira, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*, 3917–3938. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3917-2022>
- Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Palaiologou, P., Alcasena-Urdiroz, F., Ager, A., ... & Duce, P. (2021). Application of simulation modeling for wildfire exposure and transmission assessment in Sardinia, Italy. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *58*, 102189. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102189>
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard Fire Behavior Fuel Models : A Comprehensive Set for Use with Rothermel' S Surface Fire Spread Model*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Scott, J. H., Thompson, M. P., & Calkin, D. E. (2013). *A wildfire risk assessment framework for land and resource management*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Paper RMRS-GTR-315.
- Shi, C., & Zhang, F. (2023). A Forest Fire Susceptibility Modeling Approach Based on Integration Machine Learning Algorithm. *Forests*, *14*, 1506. <https://doi.org/10.3390/f14071506>
- Statistical Yearbook of Guilan Province. (2019). Guilan Province Governor's Planning Office, Office of Statistics and Information GIS(2011-2018). .[In Persian]

- Teimouri, M., & Kornejady, A. (2023). Evaluating Fire Hazard Potentials using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Logistic Regression Approaches in Golestan National Park. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 171-191. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79999.1313>
- Twidwell, D., West, A. S., Hiatt, W. B., Ramirez, A., Winter, J. T., Engle, D. M., ... & Carlson, J. D. (2016). Plant Invasions or Fire Policy: Which Has Altered Fire Behavior More in Tallgrass Prairie?. *Ecosystems*, 19, 356–368. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9937-y>
- Wollstein, K., Creutzburg, M. K., Dunn, C., Johnson, D. D., O'Connor, C., & Boyd, C. S. (2022). Toward Integrated Fire Management to Promote Ecosystem Resilience. *Rangelands*, 44(3), 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2022.01.001>
- Xofis, P., Konstantinidis, P., Papadopoulos, I., & Tsiourlis, G. (2020). Integrating Remote Sensing Methods and Fire Simulation Models to Estimate Fire Hazard in a South-East Mediterranean Protected Area. *Fire*, 3, 31. <https://doi.org/10.3390/fire3030031>