JSST
Journal of Space Science and Technology

P-ISSN: 2008-4560
E-ISSN: 2423-4516

Journal of Space Science and Technology

Vol. ??, No. ?, pp. 1-12, ????
https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1593
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

Original Research Paper

Evaluating Wildfire Hazards in the Protected Areas of the Hyrcanian Temperate Forests

Roghayeh Jahdi

Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 07 September 2025
Revised 15 October 2025
Accepted 02 November 2025
Available Online 03 November 2025

Keywords:

Wildfire hazard assessment
Temperate forests
Protected areas
FlamMap modeling
Geospatial analysis

ABSTRACT

Wildfires are an integral part of the natural dynamics of forest ecosystems and play an important role in plant regeneration, nutrient cycling, biodiversity, and ecosystem structure. However, in recent decades, climate change, along with human activities, have increased the frequency, severity, and extent of these fires. Given the importance of identifying and managing areas with high fire risk, the aim of this study is to assess fire risk in protected areas of the Hyrcanian temperate forests in northern Iran (Guilan Province). For this purpose, the FlamMap MTT simulation model was used to analyze historical fire patterns in the period 1992-2022 in protected areas of Guilan Province. Using a complete and up-to-date dataset of historical fire data allowed for accurate and reliable analysis of the simulation model results. Guilan Province was selected as the study area due to the frequent occurrence of fires, especially in the autumn and winter seasons. Wildfire hazard maps were generated using burn probability (BP) and conditional flame length (CFL) indices and supported by field data and spatial analyses. The results show that about 8% of fires occurred in protected areas, although these areas cover less than 1% of the total area of the province, but approximately 17.6% of protected areas are located in high or very high hazard zones. These findings emphasize the importance of using fire modeling for the effective conservation and management of Hyrcanian temperate forests, preventive planning, and fire risk reduction, and can be valuable guidance for environmental policymakers and natural resource managers.

* Corresponding Author's E-mail: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

How to Cite this Article:
R. Jahdi, "Evaluating wildfire hazards in the protected areas of the Hyrcanian temperate forests," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. ??, No. ?, pp. 1-12, ????, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1593.

COPYRIGHTS
© 2025 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

OPEN ACCESS

Article in Press

JSST
علوم و فناوری فضایی

شاپای چاپی: ۴۵۶۰-۲۰۰۸
شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳

علوم و فناوری فضایی

سال ؟؟؟؟، دوره ؟؟، شماره ؟؟، صفحه ۱-۱۲
https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1593
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

مقاله پژوهشی

ارزیابی مخاطرات آتش‌سوزی در مناطق حفاظت شده جنگل‌های معتدله هیرکانی

رقیه جهدی

۱- دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۶ شهریور ۱۴۰۴
بازنگری ۲۳ مهر ۱۴۰۴
پذیرش ۱۱ آبان ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۲ آبان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

ارزیابی مخاطره آتش‌سوزی
جنگل‌های معتدل
مناطق حفاظت‌شده
مدل‌سازی FlamMap
تحلیل مکانی

چکیده

آتش‌سوزی‌ها بخش جدایی‌ناپذیری از پویایی طبیعی بوم‌سازگان‌ها هستند و نقش مهمی در تجدیدحیات گیاهی، چرخه عناصر غذایی، تنوع‌زیستی و ساختار بوم‌سازگان‌ها ایفا می‌کنند. با این حال، در دهه‌های اخیر، تغییر اقلیم به‌همراه فعالیت‌های انسانی باعث افزایش فراوانی، شدت و دامنه آتش‌سوزی‌ها شده‌اند. با توجه به اهمیت شناخت و مدیریت مناطق با ریسک زیاد آتش‌سوزی، هدف این مطالعه ارزیابی مخاطره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده جنگل‌های معتدل هیرکانی در شمال ایران است. برای این‌منظور، از مدل شبیه‌سازی FlamMap MTT استفاده شد تا الگوهای تاریخی آتش‌سوزی‌های در دوره ۲۰۲۲-۱۹۹۲ در مناطق حفاظت شده استان گیلان تحلیل شود. استفاده از مجموعه داده‌های کامل و به‌روز از داده‌های تاریخی آتش‌سوزی امکان ارائه تحلیل دقیق و قابل اعتماد از نتایج مدل شبیه‌سازی را فراهم آورد. استان گیلان، به‌دلیل وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر، به‌ویژه در فصول پاییز و زمستان، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. نقشه‌های مخاطره آتش‌سوزی با استفاده از شاخص‌های احتمال سوختن (BP) و طول شعله شرطی (CFL) تولید شده و با داده‌های میدانی و تحلیل‌های مکانی پشتیبانی شدند. نتایج نشان می‌دهد که حدود ۸ درصد از آتش‌سوزی‌ها در مناطق حفاظت‌شده رخ داده است، اگرچه این مناطق کمتر از یک درصد کل مساحت استان را شامل می‌شوند، اما تقریباً ۱۷/۶ درصد از مناطق حفاظت‌شده در زون‌های با مخاطره زیاد یا بسیار زیاد قرار دارند. این یافته‌ها بر اهمیت استفاده از مدل‌سازی آتش‌سوزی برای حفاظت و مدیریت مؤثر جنگل‌های معتدل هیرکانی، برنامه‌ریزی پیشگیرانه و کاهش ریسک‌های ناشی از آتش‌سوزی تأکید می‌کنند و می‌توانند راهنمایی ارزشمند برای سیاستگذاران محیط زیست و مدیران منابع طبیعی باشند.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

How to Cite this Article:
R. Jahdi, "Evaluating wildfire hazards in the protected areas of the Hyrcanian temperate forests," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. ??, No. ?, pp. 1-12, ????, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1593.

COPYRIGHTS
© 2025 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Article in Press

علائم و اختصارات

احتمال سوختن	BP
طول شعله شرطی	CFL
مخاطره آتش‌سوزی	FH
حداقل زمان حرکت	MTT

مقدمه

آتش‌سوزی‌ها در بوم‌سازگان‌هایی که تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند، به‌طور فزاینده‌ای شایع‌تر و شدیدتر می‌شوند. افزایش دمای جهانی، طولانی‌تر شدن دوره‌های خشکی، کاهش رطوبت نسبی و تغییر در الگوهای بارش از جمله عواملی هستند که به شکل‌گیری شرایط مساعد برای رخداد آتش‌سوزی کمک می‌کنند [۱،۲]. این تغییرات اقلیمی باعث افزایش تنش‌های محیط زیستی در پوشش گیاهی می‌شود، به‌ویژه در جنگل‌ها و مراتع خشک، که مواد سوختنی (پوشش گیاهی) اشتعال‌زا را فراهم می‌کنند و موجب افزایش شدت و سرعت گسترش آتش‌سوزی می‌شوند.

افزایش فراوانی و شدت آتش‌سوزی‌ها پیامدهای گسترده‌ای بر عملکرد بوم‌سازگان‌ها دارد؛ از جمله کاهش تنوع زیستی، تغییر ترکیب گونه‌ها، فرسایش خاک و تخریب زیستگاه‌های حساس. علاوه بر آثار مستقیم بوم‌شناختی، آتش‌سوزی‌های شدید، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی نیز به‌همراه دارند، از جمله خسارت به منابع طبیعی، تهدید معیشت جوامع محلی و افزایش ریسک‌های بهداشتی و ایمنی. از سوی دیگر، ترکیب تغییر اقلیم با فعالیت‌های انسانی، مانند تخریب جنگل‌ها، گسترش مناطق کشاورزی و مدیریت ناکافی مواد سوختنی جنگل، می‌تواند آثار آتش‌سوزی را تشدید کند. بنابراین، درک دقیق عوامل اقلیمی و محیط زیستی مؤثر بر رخداد و گسترش آتش‌سوزی، همراه با مدل‌سازی پیش‌بینی ریسک، برای تدوین راهبردهای مدیریت پیشگیرانه و افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها در برابر آتش‌سوزی ضروری است.

ریسک آتش‌سوزی یک مفهوم چندبعدی و پویا است که ناشی از تعامل پیچیده میان چهار مؤلفه اصلی می‌باشد: خطر[1]، مخاطره[2]، در معرض قرارگیری[3] و آسیب‌پذیری[4] [۳،۴]. مؤلفه خطر به توانایی احتراق و گسترش آتش در یک بازه زمانی و مکانی مشخص اشاره دارد و تحت تأثیر عواملی مانند شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های پوشش گیاهی، بار ماده سوختنی قابل احتراق و شیب زمین قرار می‌گیرد. مخاطره بیانگر احتمال رخداد آتش در یک نقطه مشخص و شدت احتمالی آن است و می‌تواند به‌عنوان شاخصی از پتانسیل تهدید برای بوم‌سازگان‌ها و جوامع انسانی در نظر گرفته شود. در معرض قرارگیری، به‌میزان هم‌پوشانی آتش با منابع ارزشمند طبیعی، انسانی و اقتصادی اطلاق می‌شود و نشان می‌دهد که چه بخش‌هایی از یک بوم‌سازگان یا جامعه در معرض خطر مستقیم آتش‌سوزی قرار دارند. این مؤلفه شامل پوشش گیاهی حساس، زیرساخت‌های حیاتی، مناطق مسکونی و مناطق حفاظت‌شده می‌شود. در نهایت، آسیب‌پذیری میزان خسارت بالقوه و توان تاب‌آوری جوامع، زیرساخت‌ها و منابع طبیعی در برابر پیامدهای آتش‌سوزی را توصیف می‌کند و تحت تأثیر عواملی نظیر مدیریت منابع، قابلیت پاسخ‌دهی نهادهای محلی، آمادگی جامعه و تنوع زیستی قرار دارد. در عمل، هر یک از این مؤلفه‌ها می‌توانند به‌طور مستقل ارزیابی شوند، اما تجمیع و هم‌پوشانی آن‌ها است که ماهیت پیچیده و چندوجهی ریسک آتش‌سوزی را آشکار می‌کند. به‌عنوان مثال، منطقه‌ای ممکن است از نظر خطر بالاترین پتانسیل گسترش آتش را داشته باشد، اما اگر درمعرض قرارگیری با منابع ارزشمند کم و آسیب‌پذیری پایین باشد، ریسک کلی آن نسبتاً کمتر است. برعکس، مناطقی با آسیب‌پذیری و درمعرض قرارگیری بالا حتی با خطر متوسط نیز می‌توانند ریسک جدی ایجاد کنند. درک این چهار مؤلفه و تعامل آن‌ها برای مدیریت پیشگیرانه، اولویت‌بندی مناطق حفاظتی، طراحی برنامه‌های کاهش خطر و افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها حیاتی است. مدل‌سازی ریسک آتش‌سوزی با در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها، ابزار موثری برای تصمیم‌گیری علمی و تدوین سیاست‌های مدیریت منابع طبیعی در برابر آتش‌سوزی فراهم می‌آورد.

عوامل مؤثر بر مخاطره آتش به‌صورت شبکه‌ای درهم‌تنیده عمل می‌کنند. منبع آتش‌سوزی می‌تواند انسانی (مانند فعالیت‌های کشاورزی و گردشگری) یا طبیعی (مانند برخورد رعدوبرق) باشد. ماده سوختنی در دسترس شامل کمیت، کیفیت، نوع و پیوستگی پوشش گیاهی است. ویژگی‌های توپوگرافی همچون ارتفاع، شیب و جهت دامنه‌ها در سرعت و مسیر گسترش آتش نقش تعیین‌کننده دارند. شرایط آب و هوایی شامل دما، باد و رطوبت نیز می‌توانند به‌طور ناگهانی شدت و پویایی آتش را دگرگون کنند. برای ارزیابی مخاطره آتش، از روش‌های گوناگونی استفاده شده است که عمدتاً بر تحلیل داده‌های محیطی، سری‌های زمانی تاریخچه آتش‌سوزی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف با مدل‌های پیش‌بینی متکی هستند [۵–۸].

1. Danger
2. Hazard
3. Exposure
4. Vulnerability

Article Press

مناطق حفاظت‌شده به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی سیاست‌های محیط زیستی جهان، مأموریت حفاظت از تنوع زیستی، خدمات بوم‌سازگان و چشم‌اندازهای طبیعی را بر عهده دارند [۹]. با این‌حال، تجربه جهانی نشان می‌دهد که این مناطق نیز در برابر مخاطره آتش‌سوزی مصون نیستند و هر ساله بخش قابل توجهی از آن‌ها دچار سوختن می‌شود [۱۲-۱۰]. آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده از آن جهت اهمیت بیشتری می‌یابد که آتش می‌تواند نه تنها پوشش گیاهی و زیستگاه گونه‌های ارزشمند را از بین ببرد، بلکه فرآیندهای بوم‌شناختی بلندمدت را نیز مختل سازد.

در سال‌های اخیر، رویکردهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی آتش‌سوزی در مناطق جنگلی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی، ارزیابی و مدیریت مخاطره آتش‌سوزی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند. پیشرفت در سنجش‌ازدور، داده‌های اقلیمی با وضوح بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین موجب شده است تا مدل‌های نوینی مانند جنگل تصادفی[1]، مدل رگرسیون XGBoost، شبکه‌های عصبی عمیق[2] و مدل‌های احتمالاتی جهانی نظیر احتمال آتش‌سوزی[3] بتوانند الگوهای مکانی و زمانی رخداد آتش‌سوزی را با دقت بالاتری شبیه‌سازی کنند [۱۳،۱۴]. این مدل‌ها با ترکیب داده‌های مربوط به ماده سوختنی، توپوگرافی، شرایط آب و هوایی و متغیرهای انسانی، نقشه‌های مخاطره آتش‌سوزی را برای مناطق حفاظت‌شده تولید می‌کنند و در مدیریت پیشگیرانه و تخصیص منابع اطفای آتش‌سوزی مؤثر بوده‌اند [۱۵]. در ایران و سایر کشورها، مطالعاتی با استفاده از مدل‌های مکانی-تحلیلی رفتار آتش‌سوزی نیز صورت گرفته که با بهره‌گیری از داده‌های محلی و سناریوهای آب و هوایی، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های جنگلی را فراهم ساخته‌اند [۱۶،۱۷]. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی نظیر کمبود داده‌های دقیق از عوامل طبیعی و انسانی آتش‌سوزی، عدم‌قطعیت در سناریوهای آب و هوایی و نیاز به کالیبراسیون محلی مدل‌ها همچنان از موانع اصلی توسعه و تعمیم مدل‌های شبیه‌سازی آتش در مناطق حفاظت‌شده به‌شمار می‌آیند.

مطالعات نسبتاً کمی به‌طور همزمان بر موضوع آتش‌سوزی و مناطق حفاظت‌شده تمرکز کرده‌اند، به‌ویژه در جنگل‌های معتدل که هم حساسیت بوم‌شناختی بالایی دارند و هم فشار انسانی قابل توجهی بر آن‌ها وارد می‌شود. بنابراین، هدف این پژوهش با تمرکز بر استان گیلان، بررسی مخاطره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده پراکنده در جنگل‌های معتدله هیرکانی در شمال ایران است. انتخاب این منطقه از آن جهت اهمیت دارد که گیلان با جنگل‌های هیرکانی، به‌عنوان میراث طبیعی جهانی یونسکو، نقش حیاتی در تنوع زیستی کشور و منطقه ایفا می‌کند. برای مدل‌سازی مخاطره آتش، از مدل انتشار سطحی آتش Rothermel (۱۹۷۲) استفاده شد که یکی از معتبرترین چارچوب‌ها در پیش‌بینی رفتار آتش در مقیاس چشم‌انداز است [۱۸]. متغیرهای محیطی شامل ویژگی‌های ماده‌سوختنی، عوامل توپوگرافی و شرایط اقلیمی، همراه با داده‌های تاریخچه آتش در دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲، در این مدل ترکیب شدند. یافته‌های حاصل از این رویکرد می‌توانند به تصمیم‌گیری بهتر در حوزه مدیریت منابع زمین، طراحی برنامه‌های پیشگیرانه، اولویت‌بندی مناطق پرخطر و کاهش ریسک آتش کمک کنند. علاوه بر این، نتایج می‌توانند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری در سطح محلی و ملی فراهم آورند و درک عمیق‌تری از تعامل میان تغییر اقلیم، پویایی آتش و پایداری بوم‌سازگان‌ها ارائه دهند.

نوآوری این پژوهش در ترکیب داده‌های تاریخی آتش‌سوزی با مدل رفتار آتش‌سوزی برای ارزیابی دقیق مخاطره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده جنگل‌های هیرکانی است. این مطالعه با بهره‌گیری همزمان از داده‌های میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های احتمال سوختن و شدت آتش‌سوزی، تحلیلی نوین از الگوی ریسک آتش‌سوزی ارائه می‌دهد. تمرکز بر رابطه میان درجه حفاظت، توپوگرافی و پوشش گیاهی نیز دیدگاه تازه‌ای برای مدیریت پیشگیرانه و افزایش تاب‌آوری این جنگل‌های ارزشمند فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

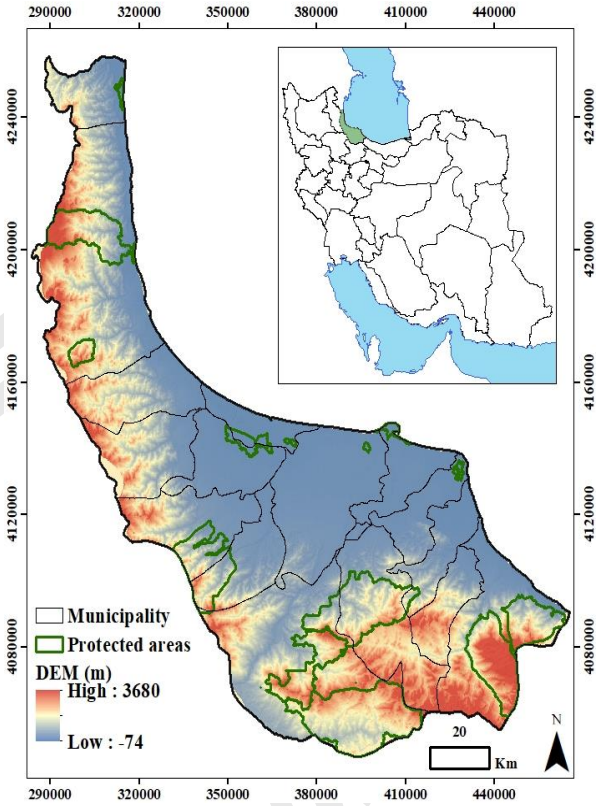
استان گیلان بین عرض‌های جغرافیایی '۳۶ °۳۶ تا '۲۷ °۳۸ شمالی و طول‌های '۳۴ °۴۸ تا '۲۶ °۵۰ شرقی قرار دارد (شکل ۱). این استان دارای اقلیم معتدل است و به ۱۶ شهرستان تقسیم می‌شود. از نظر جمعیت، دهمین استان پرجمعیت ایران و دومین استان پرجمعیت شمال کشور پس از مازندران است. تراکم جمعیت آن ۱۷۷ نفر در هر کیلومتر مربع و جمعیت کل آن ۲،۵۳۰،۶۹۶ نفر بر اساس سرشماری ۲۰۱۶ مرکز آمار ایران است.

پوشش گیاهی حدود ۶۹ درصد از کل مساحت استان را در بر می‌گیرد. جنگل‌ها ۶۳۷۶ کیلومتر مربع (حدود ۴۵/۴ درصد کل مساحت) را شامل می‌شوند. تیپ‌های جنگلی شامل جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده معتدل (۳۹/۴ درصد)، بیشه‌زار (۳/۳۶ درصد)

1. Random Forest
2. Deep Neural Networks
3. Probability of Fire (PoF)

Article in Press

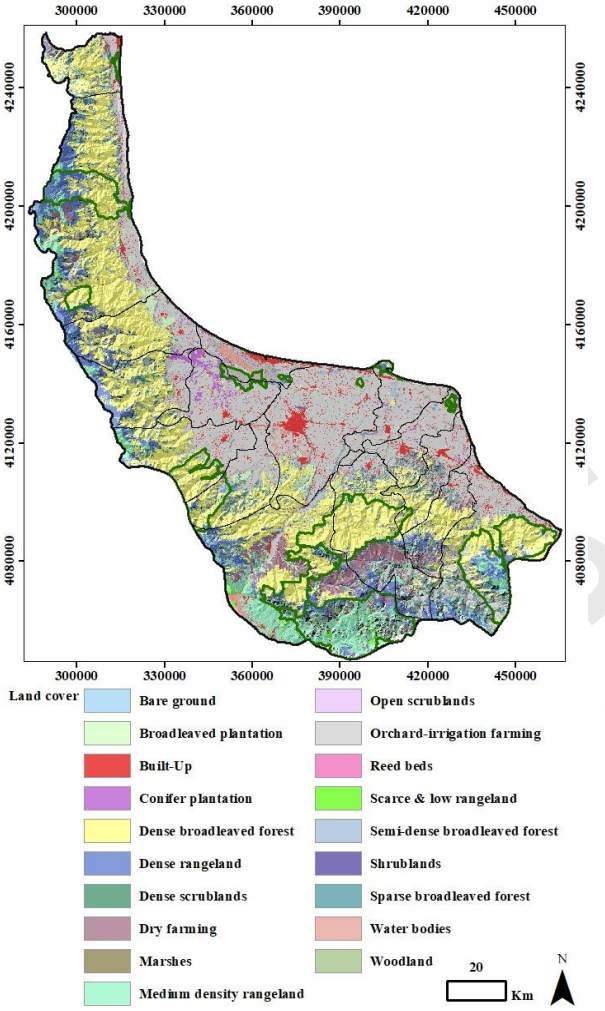
و جنگل‌های دست‌کاشت (۲/۴ درصد) هستند. رایج‌ترین نوع جنگل، جنگل پهن‌برگ خزان‌کننده (۸۷ درصد از کل جنگل‌ها) است که گونه‌های غالب آن‌را راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky.)، ممرز (Carpinus betulus L.)، بلوط بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.)، افرا پلت (*Acer velutinum* Boiss.) و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.) تشکیل می‌دهند.



شکل ۱– موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال ایران (در بالا).

Fig. 1. The location of the study area in northern Iran (on the top).

علاوه بر این، زمین‌های کشاورزی ۳۰ درصد مساحت استان را شامل می‌شوند (باغ و زراعت آبی ۲۶ درصد و دیم ۴ درصد). مراتع حدود ۱۵ درصد مساحت استان را تشکیل می‌دهند. بقیه زمین‌ها شامل مناطق مسکونی (۳/۲ درصد)، اراضی بوته‌زار (۳/۵ درصد)، تالاب‌ها و نی‌زارها (۱/۱ درصد)، منابع آبی (۱/۳ درصد)، درختچه‌زارها (۰/۳ درصد) و زمین بایر (۰/۱ درصد) است. نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲– نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Land cover map of the study area.

روش پژوهش

با توجه به اهمیت مناطق حفاظت‌شده در حفظ تنوع زیستی و پایداری عملکردهای بوم‌سازگان، این مطالعه به ارزیابی مخاطرات آتش‌سوزی در مناطق طبیعی حفاظت‌شده استان گیلان پرداخته است. اطلاعات مربوط به پنج دسته مناطق حفاظت‌شده بر اساس طبقه‌بندی IUCN[1] از اداره کل حفاظت محیط زیست استان گیلان (۱۴۰۳) به‌دست آمد و برای تحلیل مکانی و کمی مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع، ۲۰ منطقه حفاظت‌شده با مساحت کل ۲۵۶,۴۸۸ هکتار، معادل ۱۸/۳ درصد از سطح استان گیلان را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). این مناطق شامل ۵ منطقه حفاظت‌شده با مساحت ۱۰۷,۰۹۶ هکتار، ۶ منطقه شکار ممنوع به مساحت ۱۴۳,۵۶۸ هکتار، ۵ پناهگاه حیات وحش به مساحت ۴,۰۵۳ هکتار، ۱ پارک ملی به مساحت ۱,۷۷۰ هکتار و ۳ اثر طبیعی ملی به

1. International Union for Conservation of Nature

مساحت ۲ هکتار می‌شوند. وجود این تنوع کاربری و درجه حفاظت، فرصت مناسبی برای تحلیل ریسک آتش‌سوزی با در نظر گرفتن تفاوت‌های محیط‌زیستی و مدیریتی فراهم می‌کند. مناطق حفاظت‌شده به‌عنوان مخازن زیستی ارزشمند نقش مهمی در حفظ گونه‌های بومی، پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی و حفظ خدمات بوم‌سازگان ایفا می‌کنند. ارزیابی مخاطرات آتش‌سوزی در این مناطق نه تنها به شناسایی مناطق پرمخاطره کمک می‌کند، بلکه امکان تدوین راهبردهای مدیریت پیشگیرانه، پایش مداوم و تخصیص منابع حفاظت محیط‌زیست را نیز فراهم می‌آورد. با توجه به افزایش شیوع و شدت آتش‌سوزی‌ها در بوم‌سازگان‌های معتدل و جنگل‌های شمال ایران، شناسایی و تحلیل دقیق ریسک آتش‌سوزی در این مناطق حفاظت‌شده اهمیت حیاتی دارد، زیرا می‌تواند در پیشگیری از خسارت‌های محیط‌زیستی و اقتصادی و افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها نقش کلیدی ایفا کند.

مخاطره آتش‌سوزی یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت ریسک آتش‌سوزی است و معمولاً با ترکیب دو شاخص اصلی ارزیابی می‌شود: احتمال سوختن و شدت آتش‌سوزی [۱۹]. احتمال سوختن[1] (BP)، نشان‌دهنده احتمال رخداد احتراق در یک پیکسل یا منطقه مشخص طی دوره مورد مطالعه است. محاسبه BP با شمارش تعداد دفعاتی انجام می‌شود که هر پیکسل در طول شبیه‌سازی‌ها دچار آتش‌سوزی شده و تقسیم آن بر تعداد کل شبیه‌سازی‌ها، ارائه می‌شود. این شاخص به‌عنوان یک معیار مکانی حساسیت مناطق به آتش‌سوزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کنار آن، شدت آتش‌سوزی با شاخص طول شعله شرطی (CFL)[2] سنجیده می‌شود که طول شعله را در هنگام وقوع آتش‌سوزی با وزن احتمال وقوع آن ترکیب می‌کند. CFL نماینده‌ای کمی از شدت و خطر آتش‌سوزی است و به تعیین میزان خسارت بالقوه و شدت آتش‌سوزی در هر نقطه کمک می‌کند [۱۲]. ترکیب BP و CFL امکان تهیه نقشه‌های مخاطره آتش‌سوزی را فراهم می‌آورد که می‌توانند در برنامه‌ریزی مدیریتی، اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه و تخصیص منابع به مناطق پرخطر بسیار مؤثر باشند. به این ترتیب، تحلیل مخاطره آتش‌سوزی با همزمان در نظر گرفتن احتمال و شدت، چارچوبی جامع و علمی برای مدیریت بهینه ریسک آتش‌سوزی ارائه می‌دهد.

الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT)[3]، که بخشی از شبیه‌ساز آتش FlamMap 6. محسوب می‌شود [۲۰]، ابزار مهمی برای شبیه‌سازی رفتار آتش‌سوزی در مقیاس منظم و گسترده است. این الگوریتم قادر است ویژگی‌های اساسی رفتار آتش از جمله نرخ گسترش آتش، جهت حرکت شعله و تأثیر عوامل محیطی مانند شیب زمین، تیپ پوشش گیاهی و شرایط وزش باد را مدل‌سازی کند. یکی از مزیت‌های کلیدی MTT، توانایی پردازش موازی با استفاده از چند هسته پردازشی است که باعث افزایش کارایی محاسبات و امکان شبیه‌سازی هزاران سناریوی آتش‌سوزی در زمان کوتاه می‌شود. در این پژوهش، الگوریتم MTT در منطقه مورد مطالعه که با جنگل‌های معتدل متنوع پوشیده شده است، پیاده‌سازی شد. با استفاده از این مدل، مقادیر BP و CFL برای هر پیکسل منطقه از طریق شبیه‌سازی هزاران مورد آتش‌سوزی محاسبه شد. لازم به‌ذکر است که فرایند کالیبراسیون مدل FlamMap برای منطقه مورد مطالعه انجام شده و نتایج آن در پژوهش‌های پیشین تائید شده است [۱۲،۱۶].

داده‌های ورودی شبیه‌سازی‌ها بر اساس سوابق تاریخی آتش‌سوزی طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ تولید شدند و شامل اطلاعاتی نظیر نقاط احتراق آتش‌سوزی، توپوگرافی، شرایط آب و هوایی و تیپ پوشش زمین بود. در مورد داده‌های تاریخی آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه، گزارش‌های آتش‌سوزی از سال ۱۹۹۲ در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری گیلان، موجود است. همچنین، در مورد مناطق حفاظت شده، گزارش‌های آتش‌سوزی در اداره کل حفاظت محیط زیست این استان موجود است. با این‌حال، بسیاری از این گزارش‌ها فاقد مختصات جغرافیایی وقایع آتش‌سوزی و پلی‌گون‌های مکانی برای هر آتش‌سوزی هستند. بنابراین، در این تحقیق، کار میدانی جامعی برای جمع‌آوری مختصات زمینی موقعیت‌های آتش‌سوزی و ثبت پلی‌گون‌های منطقه سوخته شده انجام شد. این کار میدانی در طول سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ تکمیل شد و در نتیجه داده‌های دقیق تاریخی رخداد آتش‌سوزی از بررسی‌های میدانی جامع با استفاده از سیستم مختصات‌یاب جهانی (GPS) که به‌صورت محلی جمع‌آوری شده بود، تولید شد. این داده‌ها برای تجزیه و تحلیل توزیع و مشخصات آتش‌سوزی‌ها در سه دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت) از مدل رقومی ارتفاع (DEM) ۳۰ متری SRTM برای منطقه مورد مطالعه استخراج شدند. متوسط شرایط آب و هوایی (سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی، دما، بارندگی و ...) در دوره مورد مطالعه از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در استان گیلان تهیه شد. در این پژوهش، به‌منظور استخراج و طبقه‌بندی تیپ‌های پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه، از سه تصویر ماهواره‌ای Landsat-8 (OLI/TIRS L1TP) مربوط به اکتبر ۲۰۲۱ استفاده شد. تصاویر با بهره‌گیری از نرم‌افزار ENVI 5.6 پردازش شدند و مراحل پیش‌پردازش شامل کالیبراسیون رادیومتری و تصحیح اتمسفری به‌روش FLAASH بود تا مقادیر بازتاب سطح زمین به‌درستی برآورد شوند. برای حذف پوشش ابر، الگوریتم FMASK به‌کار رفت. پس از

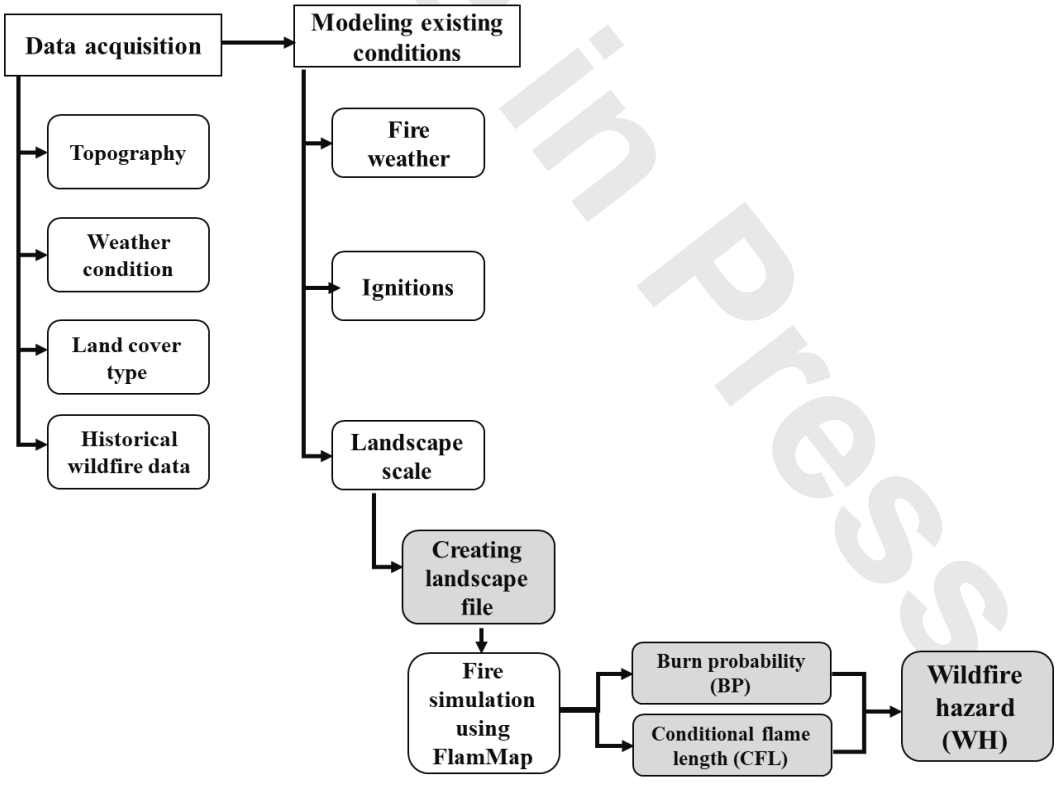
1. Burn Probability
2. Conditional Flame Length
3. Minimum Travel Time

Article in Press

افزایش کنتراست و تولید تصاویر ترکیبی، طبقه‌بندی نظارت شده با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) انجام شد. داده‌های آموزشی با استفاده از بررسی‌های میدانی، تصاویر Google Earth و نقشه پوشش زمین استان گیلان (۲۰۱۶) تعیین شد. به‌منظور ارزیابی دقت، از ۱۰۰۰ نقطه واقعیت زمینی (با ۲۰۰ نقطه مرجع) و ماتریس خطا استفاده شد که دقت کلی ۰/۹۱ درصد را نشان داد. نتایج نهایی بیانگر شناسایی ۱۹ تیپ پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه بودند (شکل ۲).

هدف ثانویه بر ارزیابی مخاطرات آتش‌سوزی مربوط به مناطق حفاظت‌شده در استان متمرکز بود. نتایج به‌دست آمده از MTT امکان تحلیل فضایی و کمی مخاطره آتش‌سوزی را فراهم می‌کند و با ارائه نقشه‌های مخاطره آتش‌سوزی، شناخت دقیق‌تری از مناطق پرخطر و شدت بالقوه آتش‌سوزی در سطح منطقه ارائه می‌شود. برای تولید نقشه مخاطرات آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده، از نتایج شبیه‌سازی شده BP و CFL تحت شرایط تاریخی آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. مقادیر BP به ۱۰۰–۰ تغییر مقیاس داده شدند و مقادیر CFL به شش کلاس (کمتر از ۰/۵؛ ۱–۰/۵؛ ۲–۱؛ ۳–۲؛ ۴–۳؛ و بیشتر از ۴ متر) طبقه‌بندی شدند. در نهایت، با ترکیب نقشه‌های BP و CFL، نقشه مخاطره آتش‌سوزی ایجاد شد. پیکسل‌هایی با مقادیر BP و CFL بیشتر، پتانسیل بیشتری برای ایجاد مخاطره آتش‌سوزی بیشتر و در نتیجه خسارت به اراضی طبیعی، دارایی‌ها و جان انسان‌ها دارند.

مقادیر نقشه مخاطره آتش‌سوزی جنگل در مقیاس ۱۰۰–۰ تغییر مقیاس داده شدند (تغییر مقیاس خطی)، که ۱۰۰ خطرناک‌ترین شرایط در منطقه مورد مطالعه بود. متعاقباً، پنج کلاس مخاطره آتش‌سوزی جنگل از خیلی کم تا خیلی زیاد تعریف شد [۱۹]. فلوچارت روش تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.



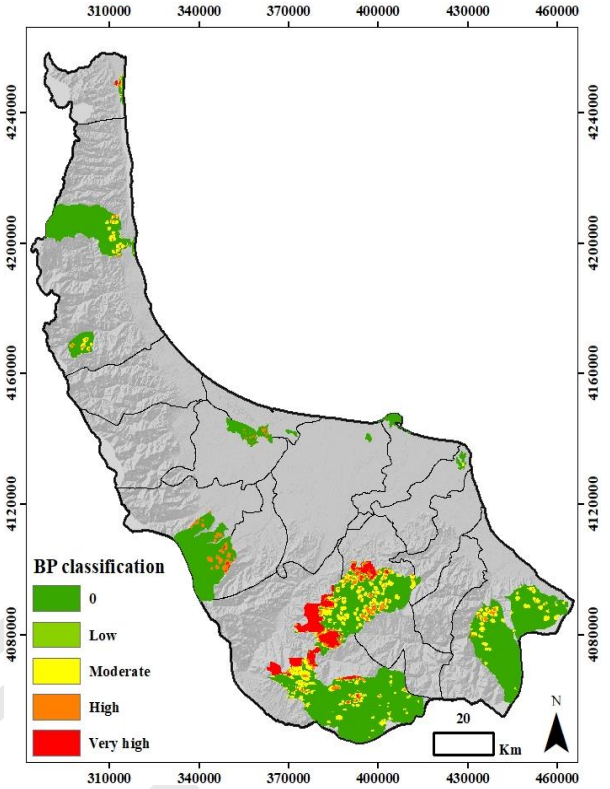
شکل ۳– فلوچارت روش‌شناختی تحقیق.

Fig. 3. Flowchart of the research methodology.

نتایج

این پژوهش به ارزیابی مخاطرات آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده استان گیلان اختصاص یافته است. در این چارچوب، مخاطره آتش‌سوزی جنگل به‌عنوان ترکیبی از دو مؤلفه‌ی اصلی، یعنی احتمال رخداد آتش‌سوزی و شدت آن تعریف شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها (شکل ۴) نشان داد که احتمال سوختن در محدوده‌ی مورد مطالعه از توزیع مکانی ناهمگنی برخوردار بوده و سطوح ریسک در بخش‌های مختلف منطقه تفاوت معناداری دارند.

Article in Press



شکل ۴- طبقه‌بندی احتمال سوختن شبیه‌سازی‌شده (BP) در مناطق حفاظت‌شده منطقه مورد مطالعه.

Fig. 4. Simulated burn probability (BP) classification in the protected areas of the study area.

احتمال سوختن به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، در قالب چهار کلاس ریسک آتش‌سوزی طبقه‌بندی شد. بر اساس این طبقه‌بندی، حدود ۱۰/۸ درصد از مساحت کل منطقه در کلاس «احتمال سوختن متوسط»، ۵/۴ درصد در کلاس «احتمال سوختن زیاد» و ۶/۱ درصد در کلاس «احتمال سوختن بسیار زیاد» قرار گرفت. افزون بر این، بخش قابل‌توجهی از منطقه، معادل ۷۷/۷ درصد، در گروه «غیرقابل سوختن» (BP=0) طبقه‌بندی شد که نشان‌دهنده عدم رخداد آتش‌سوزی در این بخش‌هاست. این ارزش‌های کم BP با مناطق، باتلاق‌ها و نیزارهای قبلاً سوخته شده مرتبط هستند که می‌توانند در برابر آتش‌سوزی‌های با شدت کم مقاومت کنند، به‌خصوص زمانی که رطوبت خاک بالا است و پتانسیل کمی برای آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده به‌ویژه به‌دلیل فاصله بیشتر با عوامل انسانی رخداد آتش‌سوزی، وجود دارد. ارزش‌های زیاد BP در نزدیکی مرز جنوبی منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند و با ارتفاع، تراکم جمعیت و پوشش جنگلی پهن‌برگ مرتبط هستند. به‌طور خاص، جنگل‌های پهن‌برگ متراکم بالای ۵۰۰ متر، BP بالاتری نسبت به جنگل‌های پائین‌بند نشان دادند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که اگرچه بخش اعظم مناطق حفاظت‌شده استان گیلان در برابر آتش‌سوزی جنگل مقاوم ارزیابی می‌شوند، اما وجود درصدی از عرصه‌ها با ریسک زیاد و بسیار زیاد ضرورت اتخاذ رویکردهای مدیریتی پیشگیرانه و برنامه‌ریزی دقیق برای پایش مستمر این مناطق را برجسته می‌سازد. چنین اقداماتی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تهدیدات بالقوه بر تنوع زیستی و پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی ایفا کند.

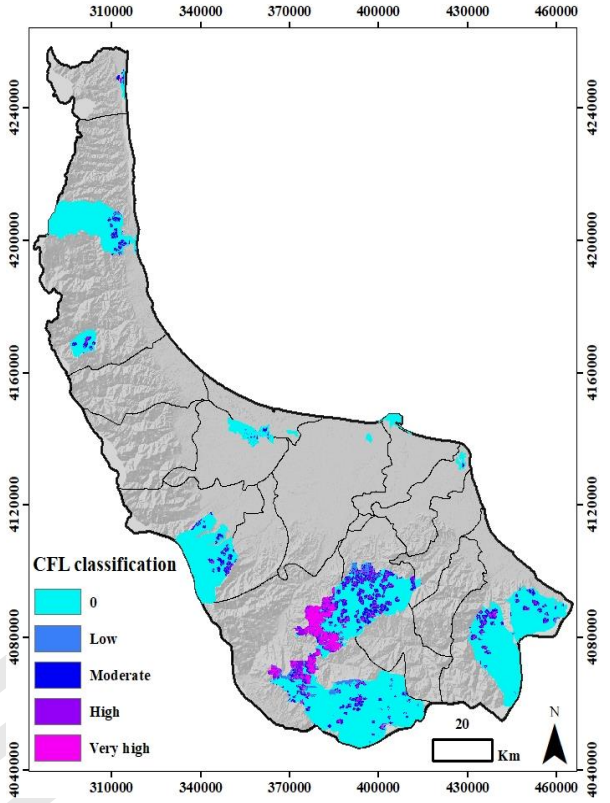
نقشه طول شعله شرطی (CFL) امکان طبقه‌بندی شدت سوختن در پنج کلاس متمایز را فراهم کرد: سوخته‌نشده (CFL = صفر متر)، شدت سوختن کم (CFL بین ۰ تا ۰/۶ متر)، شدت سوختن متوسط (CFL بین ۰/۶ تا ۱/۲ متر)، شدت سوختن زیاد (CFL بین ۱/۲ تا ۲/۴ متر) و در نهایت شدت سوختن بسیار زیاد (CFL بیش از ۲/۴ متر) (شکل ۵). چنین طبقه‌بندی‌ای به‌طور گسترده در مطالعات آتش‌سوزی جنگل برای ارزیابی رفتار آتش و پیامدهای آن بر ساختار و کارکرد بوم‌سازگان استفاده می‌شود.

نتایج نشان داد که مقادیر زیاد و بسیار زیاد CFL حدود ۱۰/۳ درصد از کل محدوده مورد مطالعه را دربر می‌گیرند. این بخش عمدتاً به‌صورت لکه‌ای بزرگ در جنگل‌های پهن‌برگ متراکم و در ارتفاعات پایین تا متوسط (کمتر از ۱۵۰۰ متر از سطح دریا) متمرکز شده است. حضور چنین لکه‌ای می‌تواند بیانگر تجمع مواد سوختنی قابل اشتعال، شرایط میکروکلیمایی مناسب برای گسترش آتش و یا ترکیبی از این عوامل باشد.

از سوی دیگر، حدود ۱۱/۲ درصد از منطقه دارای مقادیر کم و متوسط CFL بود که به‌صورت لکه‌های پراکنده و کوچک در سطح سیمای‌سرزمین مشاهده شد. این الگو نشان می‌دهد که اگرچه احتمال رخداد آتش با شدت کم در بخش‌های متعددی وجود دارد، اما گستره و تداوم آن‌ها محدود بوده و بیشتر ماهیت موضعی دارند.

در نهایت، شبیه‌سازی‌ها آشکار ساخت که ۷۸/۴ درصد از مناطق حفاظت‌شده در دسته سوخته نشده قرار می‌گیرند. این یافته اهمیت نقش مناطق حفاظت‌شده در کاهش ریسک آتش‌سوزی را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این نواحی می‌توانند به‌عنوان پناهگاه‌های بوم‌شناختی برای تنوع زیستی عمل کنند. علاوه بر آن، نتایج به مدیران منابع طبیعی این امکان را می‌دهد که نواحی پرریسک (با شدت سوختن زیاد و بسیار زیاد) را شناسایی کرده و راهبردهای مدیریتی پیشگیرانه مانند کاهش بار موادسوختنی یا پایش مستمر را در آن نقاط در اولویت قرار دهند.

Article in Press



شکل ۵- طبقه‌بندی شبیه‌سازی شده طول شعله شرطی (CFL) در مناطق حفاظت‌شده منطقه مورد مطالعه.

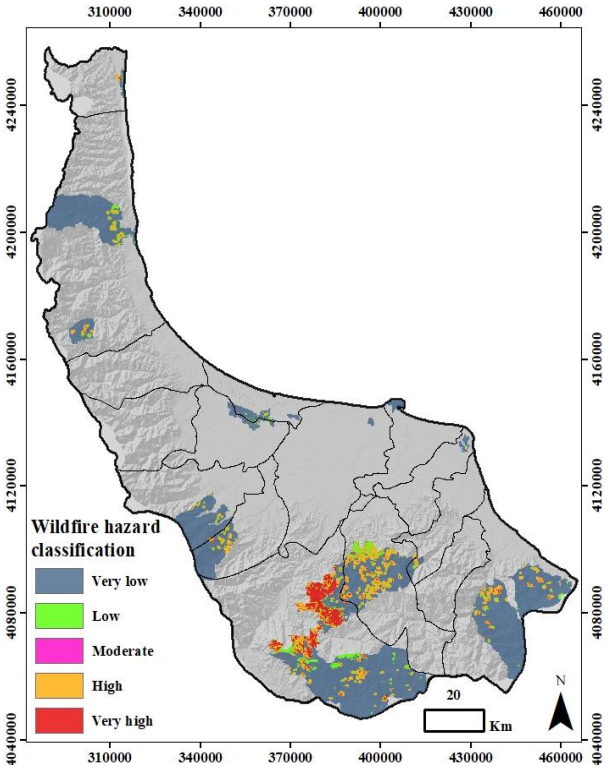
Fig. 5. Simulated conditional flame length (CFL) classification in the protected areas of the study area.

ما با بهره‌گیری از مدلی که دو پارامتر کلیدی BP (شاخص احتمال سوختن) و CFL (شاخص طول شعله شرطی یا شدت سوختن) را در شرایط تاریخی آتش‌سوزی‌های ادغام می‌کند، به تهیه نقشه مخاطرات آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده استان گیلان پرداختیم. این مدل، مناطق مطالعه را در پنج کلاس مجزا از نظر سطح مخاطره (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد؛ شکل ۶) طبقه‌بندی کرده است.

یافته‌ها نشان می‌دهند که بیشترین مساحت مناطق حفاظت‌شده (حدود ۸۲/۴ درصد) در طبقات مخاطره بسیار کم و کم جای می‌گیرند، که بیانگر نقش غالب شرایط زیست اقلیمی مرطوب و پوشش گیاهی انبوه در کاهش شدت و احتمال آتش‌سوزی در بخش وسیعی از استان است. در مقابل، حدود ۱۷/۶ درصد از مساحت این مناطق در طبقات مخاطره زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. این بخش‌ها عموماً در مناطقی با بار مواد سوختنی بالا، توپوگرافی پیچیده و شرایط اقلیمی خشک‌تر شکل گرفته‌اند و به‌ویژه در دوره‌های خشک (به‌ویژه در پائیز با وزش بادهای گرم محلی به نام گرمیج) یا تابستان‌های گرم می‌توانند به کانون‌های بالقوه آتش‌سوزی تبدیل شوند.

بر اساس نقشه مخاطره (شکل ۶)، بخش عمده‌ای از مناطق حفاظت‌شده در محدوده‌های شمالی و مرکزی استان قرار دارند که در کلاس مخاطره بسیار کم طبقه‌بندی شده‌اند و از نظر پایداری محیط‌زیستی وضعیت مطلوب‌تری دارند. با این‌حال، نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در نواحی جنوبی استان بیش از ۳۰ درصد از مناطق حفاظت‌شده در طبقات پرمخاطره جای دارند. این تمرکز مکانی مخاطره، آسیب‌پذیری این نواحی را در برابر آتش‌سوزی‌های گسترده افزایش داده و بر لزوم تدوین راهبردهای مدیریتی ویژه مانند پایش مستمر، مدیریت بار موادسوختنی و توسعه زیرساخت‌های اطفای آتش‌سوزی تأکید دارد.

به‌طور کلی، تحلیل حاضر نه تنها الگوی فضایی مخاطره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده گیلان را آشکار می‌کند، بلکه به تصمیم‌گیران و مدیران منابع طبیعی این امکان را می‌دهد که با تمرکز بر مناطق پرخطر، تخصیص بهینه منابع و اقدامات پیشگیرانه را در اولویت قرار دهند.



شکل ۶- طبقه‌بندی مخاطره آتش‌سوزی بر اساس متغیرهای رفتار آتش‌سوزی شبیه‌سازی شده (BP (شکل ۴) و CFL (شکل ۵)) در مناطق حفاظت‌شده منطقه مورد مطالعه تحت شرایط تاریخی آتش‌سوزی.

Fig. 6. Wildfire hazard classification based on simulated fire behavior variables (BP (Fig.4) and CFL (Fig. 5)) in the protected areas of the study area under historical fire condition.

Article in Press

بحث

بیشتر مناطق حفاظت‌شده (۸۲/۴ درصد) در طبقات مخاطره آتش‌سوزی «بسیار کم» و «کم» قرار دارند. این امر به‌طور عمده ناشی از ویژگی‌های ماده سوختنی غالب در این مناطق است؛ به‌ویژه حضور پوشش‌های علفی در مراتع کم‌تراکم و با تراکم متوسط که قابلیت احتراق پایینی دارند. افزون بر این، بسیاری از این مناطق شامل زیست‌بوم‌هایی مانند باتلاق‌ها، تالاب‌ها و نیزارها هستند که به‌دلیل رطوبت بالای خاک و ظرفیت حرارتی زیاد، مقاومت بیشتری در برابر آتش‌سوزی‌های با شدت کم نشان می‌دهند. این الگو به‌خوبی نشان می‌دهد که ساختار پوشش گیاهی و شرایط هیدرولوژیکی نقش مهمی در تعیین شدت و گستره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده ایفا می‌کند.

از منظر تاریخی، سهم مناطق حفاظت‌شده از سطح کل سوخته شده در استان کمتر از ۱ درصد گزارش شده است. این واقعیت مؤید فعالیت آتش‌سوزی محدود در این زیستگاه‌هاست و بیشتر با رخداد آتش‌سوزی‌های کوچک و پراکنده مرتبط است. عوامل متعددی از جمله حفاظت شدید، اعمال اقدامات پیشگیرانه زودهنگام و دسترسی دشوار به این مناطق (به‌دلیل ارتفاع زیاد، شیب‌های تند و فاصله از سکونت‌گاه‌ها و جاده‌ها) در کاهش احتمال گسترش آتش‌سوزی مؤثر بوده‌اند. یافته‌های پژوهشگران پیشین نیز این موضوع را تقویت می‌کند؛ به‌عنوان نمونه، Nelson و Chomitz (۲۰۱۱) اثربخشی مناطق حفاظت‌شده در کاهش وقوع آتش‌سوزی جنگلی را گزارش کرده‌اند [۲۱] و Liu و Xu (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که این مناطق به‌طور معناداری با کاهش احتمال آتش‌سوزی ارتباط دارند [۲۲].

با این‌حال، شواهد متناقضی نیز وجود دارد. در برخی مطالعات، به‌ویژه در ایالات متحده، مناطق حفاظت‌شده با سطوح مخاطره بالاتری از آتش‌سوزی مطابقت دارند. علت اصلی این تناقض به سیاست‌های تاریخی مهار آتش باز می‌گردد. مهار مداوم آتش‌سوزی‌های طبیعی در این مناطق سبب انباشت ماده سوختنی در طول زمان شده و در نتیجه، احتمال رخداد آتش‌سوزی‌های گسترده و مقاوم‌تر در برابر مهار افزایش یافته است [۲۳]. مدل‌سازی تازه‌ای حتی نشان می‌دهد اریبیِ سرکوب آتش می‌تواند طی یک نسل اثراتی فراتر از صرفاً انباشت ماده سوختنی یا تغییر اقلیم بر الگوی آتش بگذارد [۲۴]. همچنین مرور شواهد غرب قاره آمریکا نشان می‌دهد پس از بیش از یک قرن سرکوب آتش، آتش‌سوزی‌ها بزرگ‌تر و شدیدتر شده‌اند و مقیاس و پیوستگی تیمارهای کاهش ماده سوختنی کافی نبوده است [۲۵–۲۷]. بنابراین، الگوهای مخاطره آتش‌سوزی در مناطق حفاظت‌شده تابعی از راهبردهای مدیریتی، تاریخچه آشفتگی‌های بوم‌شناختی و شرایط محیطی منطقه هستند [۲۸].

در مقابل، حدود ۱۷/۶ درصد از مناطق حفاظت‌شده در طبقات مخاطره «زیاد» و «بسیار زیاد» قرار می‌گیرند. این بخش‌ها عمدتاً با جنگل‌های پهن‌برگ متراکم مطابقت دارند که به‌دلیل انباشت زیست توده و مواد سوختنی چوبی ریز و درشت، پتانسیل بیشتری برای آتش‌سوزی‌های شدید دارند. وجود این نواحی نشان می‌دهد که حتی در مناطق حفاظت‌شده نیز، تفاوت در نوع پوشش گیاهی و ویژگی‌های توپوگرافی می‌تواند تنوع بالایی در میزان مخاطره آتش‌سوزی ایجاد کند. مطالعات جدیدتر نیز نشان می‌دهد در برخی زیست‌بوم‌های معتدل، مناطق حفاظت‌شده می‌توانند کانون‌های نامتناسبِ فعالیت آتش باشند و حتی شدت آتش در آن‌ها بالاتر گزارش شود [۲۹]؛ نکته‌ای که توضیح می‌دهد چرا با وجود میانگین پایین مخاطره، هنوز ۱۷/۶ درصد از پهنه‌های حفاظت‌شده در منطقه مورد مطالعه در طبقات مخاطره «زیاد/بسیار زیاد» قرار می‌گیرند خصوصاً جایی‌که جنگل‌های پهن‌برگ انبوه و ماده‌سوختنی چوبی فراوان دارند.

با وجود دقت مدل FlamMap MTT در شبیه‌سازی رفتار آتش‌سوزی، نتایج این پژوهش با چند محدودیت همراه است که باید در تفسیر یافته‌ها مدنظر قرار گیرد. نخست، داده‌های تاریخی آتش‌سوزی به‌ویژه در سال‌های اولیه (۲۰۰۲-۱۹۹۲) ممکن است به‌دلیل نبود سامانه‌های ثبت منظم و داده‌های مکانی دقیق، دارای خطا باشند. همچنین، نقشه‌های پوشش گیاهی حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای ممکن است نتوانند تفاوت‌های جزئی بین تیپ‌های گیاهی را به‌درستی بازنمایی کنند. از سوی دیگر، مدل فرض می‌کند شرایط باد و آب و هوا طی فرایند شبیه‌سازی ثابت است، در حالی‌که در واقعیت این متغیرها به‌صورت پویا تغییر می‌کنند و می‌توانند بر مسیر و شدت آتش‌سوزی اثرگذار باشند. افزون بر این، تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر جاده‌ها، دسترسی، و اقدامات اطفا در مدل لحاظ نشده است، در حالی‌که این عوامل در گسترش یا کنترل آتش نقش دارند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از داده‌های میدانی دقیق‌تر، مدل‌های پویا با ورودی‌های آب و هوا متغیر و در نظر گرفتن شاخص‌های انسانی–بوم‌شناختی ترکیبی، دقت ارزیابی مخاطره آتش‌سوزی در جنگل‌های هیرکانی را ارتقا دهند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که شبیه‌سازی‌های آتش‌سوزی با استفاده از مدل FlamMap MTT می‌تواند الگوهای مکانی مشخصی از رفتار آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران ارائه دهد. شناسایی مناطق پرمخاطره بر اساس شاخص‌های احتمال سوختن و شدت سوختن، به‌ویژه در نواحی جنوبی و مرکزی، بیانگر آن است که مخاطره

Article in Press

آتش‌سوزی در این مناطق نیازمند توجه ویژه و طراحی راهبردهای هدفمند جنگل‌شناسی و مدیریت جنگل است. این نتایج علاوه بر افزایش درک علمی از پویایی آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های جنگلی معتدل، می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه‌ی ابزارهای تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک آتش‌سوزی باشد.

از منظر کاربردی، به‌کارگیری این یافته‌ها در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی حفاظت از جنگل‌ها اهمیت دوچندانی دارد. اجرای اقداماتی نظیر مدیریت ماده‌سوختنی (با هدف کاهش یا حذف آن)، پایش مستمر با فناوری‌های سنجش از دور، آموزش جوامع محلی و افزایش هماهنگی بین نهادهای مسئول، می‌تواند در کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی‌ها نقشی کلیدی ایفا کند. همچنین، ادغام معیارهای ریسک در سطوح مختلف برنامه‌ریزی ملی و منطقه‌ای، به‌همراه در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم، زمینه را برای طراحی راهبردهایی پایدار و بلندمدت فراهم می‌سازد. در نهایت، این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب ابزارهای علمی شبیه‌سازی با رویکردهای مدیریتی و سیاستی، مسیر مؤثری برای افزایش تاب‌آوری جنگل‌های شمال ایران در برابر آتش‌سوزی‌های آینده فراهم می‌آورد.

بر اساس نتایج و محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده در چند محور توسعه یابد. نخست، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی و زمانی بالاتر مانند Sentinel می‌تواند به بهبود دقت نقشه‌های پوشش گیاهی و الگوی رفتار آتش کمک کند. دوم، به‌کارگیری مدل‌های پویا و چندبعدی که قادر به شبیه‌سازی تغییرات لحظه‌ای شرایط آب و هوایی (دما، رطوبت و باد) هستند، می‌توانند پیش‌بینی‌های واقعی‌تری ارائه دهد. سوم، پیشنهاد می‌شود تأثیر فعالیت‌های انسانی از جمله جاده‌ها، دسترسی، بهره‌برداری جنگل و اقدامات پیشگیرانه در مدل‌سازی مخاطره آتش لحاظ شود تا ارزیابی‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر گردد. همچنین، بررسی اثر تغییر اقلیم بر پویایی آتش‌سوزی‌ها و تغییرات بلندمدت در ساختار پوشش گیاهی در چارچوب سناریوهای اقلیمی آینده، می‌تواند بینش ارزشمندی برای مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی فراهم آورد. در نهایت، توسعه سیستم‌های هشدار سریع مبتنی بر داده‌های مکانی و هوش مصنوعی پیشنهاد می‌شود تا امکان پیش‌بینی و واکنش سریع به رخدادهای آتش‌سوزی در این مناطق حساس فراهم شود.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] C. X. Cunningham, G. J. Williamson, and D. M. J. S. Bowman, "Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth," *Nature Ecology & Evolution*, vol. 8, pp. 1420–1425, 2024, https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2.

[2] T. N, Wasserman and S. E. Mueller, "Climate influences on future fire severity: A synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States," *Fire Ecology*, vol. 19, no. 1, 2023, Art. no. 43, https://doi.org/10.1186/s42408-023-00200-8.

[3] E. Chuvieco *et al.,* "Towards an integrated approach to wildfire risk assessment: When, where, what and how may the landscapes burn," *Fire*, vol. 6, no. 5, 2023, Art. no. 215, https://doi.org/10.3390/fire6050215.

[4] J. R. Meldrum *et al.,* "Parcel-level risk affects wildfire outcomes: Insights from pre-fire rapid assessment data for homes destroyed in 2020 East troublesome fire," *Fire*, vol. 5, no. 1, 2022, Art. no. 24, https://doi.org/10.3390/fire5010024.

[5] S. Shabani, A. Jaafari, and P. Bettinger, "Spatial modeling of forest stand susceptibility to logging operations," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 89, 2021, Art. no. 106601, https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106601.

[6] M. Salis *et al.,* "Assessing cross-boundary wildfire hazard, transmission, and exposure to communities in the Italy-France Maritime cooperation area," *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 6, 2023, Art. no. 1241378, https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1241378.

[7] Z. Wang, M. Zha, J. Ji, W. Wu, and L. Ding, "Dynamic risk assessment of wildfire-induced transmission line breakdown based on data assimilation method," *Fire Technology*, vol. 61, pp. 3293-3321, 2025, https://doi.org/10.1007/s10694-025-01728-8.

[8] S. Moghim and M. Mehrabi, "Wildfire assessment using machine learning algorithms in different regions," *Fire Ecology*, vol. 20, no. 1, 2024, Art. no. 104, https://doi.org/10.1186/s42408-024-00335-2.

[9] T. M. Boucher, M. Spalding, and C. Reveng, "Role and trends of protected areas in conservation," in *Encyclopedia of Biodiversity*, 2rd ed. S. A. Levin, Ed. Academic Press, 2013, pp. 485-503, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00348-8.

[10] E. Da *et al.,* "Assessing wildfire activity and forest loss in protected areas of the Amazon basin," *Applied Geography*, vol. 157, 2023, Art. no. 102970, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102970.

[11] W. Wang, W. Wu, F. Guo, and G. Wang, "Fire regime and management in Canada's protected areas," *International Journal of Geoheritage and Parks*, vol. 10, no. 2, pp. 240-251, 2022, https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.04.003.

[12] R. Jahdi and M. Masihpoor, "Probability-based modeling for a quantitative wildfire risk analysis

in the protected areas of Guilan Province," *Water and Soil Management and Modelling*, vol. 5, no. 1, pp. 265-282, 2025, (in Persian), https://doi.org/10.22098/mmws.2025.16219.1518.

[13] F. Di Giuseppe, J. McNorton, A. Lombardi, and F. Wetterhall, "Global data-driven prediction of fire activity," *Nature Communications*, vol. 16, 2025, Art. no. 2918, https://doi.org/10.1038/s41467-025-58097-7.

[14] F. Bilucan, A. Teke, and T. Kavzoglu, "Susceptibility mapping of wildfires using XGBoost, random forest and AdaBoost: A case study of Mediterranean ecosystem," in *Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology*, M. Bezzeghoud *et al.,* Eds. Proceedings of the 2nd MedGU, Marrakesh 2022 (Volume 3), MedGU 2022, Advances in Science, Technology & Innovation, Springer, Cham, 2024, pp. 99-101, https://doi.org/10.1007/978-3-031-48715-6_22.

[15] P. Potapov *et al.,* "Unprecedentedly high global forest disturbance due to fire in 2023 and 2024," *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 122, no. 30, 2025, Art. no. e2505418122, https://doi.org/10.1073/pnas.2505418122.

[16] R. Jahdi, M. Salis, F. Alcasena, and L. Del Giudice, "Assessing the effectiveness of silvicultural treatments on fire behavior in the Hyrcanian temperate forests of Northern Iran," *Environmental Management*, vol. 72, no. 3, pp. 682-697, 2023, https://doi.org/10.1007/s00267-023-01785-1.

[17] K. P. Joshi, G. Adhikari, D. Bhattarai, A. Adhikari, and S. Lamichanne, "Forest fire vulnerability in Nepal's Chure region: Investigating the influencing factors using generalized linear model," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, 2024, Art. no. e28525, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28525

[18] R. C. Rothermel, *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*, Research Paper INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, 1972.

[19] S. Erni *et al.,* "Mapping wildfire hazard, vulnerability, and risk to Canadian communities," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 101, 2024, Art. no. 104221, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104221.

[20] M. A. Finney, "An overview of FlamMap fire modeling capabilities," in *Fuels Management-How to Measure Success conference proceedings, 2006, Portland, OR*, P. L. Andrews and B. W. Butler, Eds. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 213–220.

[21] A. Nelson and K. M. Chomitz, "Effectiveness of strict vs. multiple use protected areas in reducing tropical forest fires: A global analysis using matching methods," *PLOS ONE*, vol. 6, no. 8, 2011, Art. no. e22722, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022722.

[22] S. Liu and J. Xu, "Wildfire, protected areas and forest ownership: The case of China," *Land Use Policy*, vol. 122, 2022, Art. no. 106372, https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106372.

[23] M. Kirkland *et al.,* "Protected areas, drought, and grazing regimes influence fire occurrence in a fire-prone Mediterranean region," *Fire Ecology*, vol. 20, no. 1, 2024, Art. no. 88, https://doi.org/10.1186/s42408-024-00320-9.

[24] M. R. Kreider, P. E. Higuera, S. A. Parks, W. L. Rice, N. White, and A. J. Larson. "Fire suppression makes wildfires more severe and accentuates impacts of climate change and fuel accumulation," *Nature Communications*, vol. 15, 2024, Art. no. 2412, https://doi.org/10.1038/s41467-024-46702-0.

[25] C. P. Brucker *et al.,* "Wildfires drive multi-year water quality degradation over the western United States," *Communications Earth & Environment,* vol. 6, 2025, Art. no. 489, https://doi.org/10.1038/s43247-025-02427-6.

[26] J. T. Abatzoglou and A. P. Williams, "Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests," *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 113, no. 42, pp. 11770-11775, 2016, https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113.

[27] A. L. Westerling, H. G. Hidalgo, D. R. Cayan, and T. W. Swetnam, "warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity," *Science*, vol. 313, no. 5789, pp. 940-943, 2006, https://doi.org/10.1126/science.1128834.

[28] H. L. Martínez Torres, D. R. Pérez Salicrup, A. Castillo, and M. I. Ramírez, "Fire management in a natural protected area: what do key local actors say?," *Human Ecology*, vol. 46, pp. 515–528, 2018, https://doi.org/10.1007/s10745-018-0013-z.

[29] V. R. de Dios, S. J. Schütze, À. C. Camprubí, R. Balaguer Romano, M. M. Boer, and P. M. Fernandes, "Protected areas as hotspots of wildfire activity in fire-prone Temperate and Mediterranean biomes," *Journal of Environmental Management,* vol. 385, 2025, Art. no. 125669, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125669.