

Zoning Forest Fires Using the Random Forest Model in the Forests of Kurdistan Province in the Google Earth Engine Platform

Abdul Majed Bostani^{ID} | Sharareh Pourebrahim^{*ID} | Afshin Danehkar

Department of Environment, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
E-mail: sh_pourebrahim@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 08 Aug. 2024
Revised: 25 Sep. 2024
Accepted: 03 Oct. 2024
Published online: 01 Mar. 2025

Keywords:
Wildfire,
Enhancement,
Google Earth Engine Platform,
dNBR Index,
Random Forest Model.

Abstract

Recognizing and mapping the sensitivity of forests to fires is crucial for the preservation of ecosystems and biodiversity. This study, utilizing the time-series capabilities of Landsat 8 satellite imagery and developing an efficient model within the Google Earth Engine (GEE) platform, successfully mapped the sensitivity of forests in Kurdistan Province to fires over the past decade (2013–2023) in two study areas located in Marivan, Sarvabad, and Baneh counties. The study provided valuable information for land use management and effective resource allocation to prevent and mitigate the impacts of forest fires in the Kurdistan region. The Normalized Burn Ratio (NBR) index was applied to pre- and post-fire season images to detect forest fires. To enhance classification results, areas such as vegetation, residential zones, and water bodies were highlighted as non-fire regions. The Random Forest (RF) model within the GEE platform was employed to achieve the highest classification accuracy. Appropriate training samples were derived from the highlighted results, and image classification using the RF model with 50 decision trees was performed on the GEE platform. To ensure the reliability of the selected training samples, the fire mapping results were compared with point-based fire data from the Kurdistan Province Natural Resources Department. The classification results for the two forest study areas—Marivan and Sarvabad regions in 2016, 2018, and 2020, and the Baneh region in 2018—demonstrated an overall accuracy of 99% and a Kappa coefficient of 0.97. The findings of this study underscore the capability of Landsat 8 imagery in mapping forest fire susceptibility and confirm the high accuracy of the RF model in this context.

Cite this article: Bostani, A.M., Pourebrahim, S., Danehkar, A. (2025). Zoning Forest Fires Using the Random Forest Model in the Forests of Kurdistan Province in the Google Earth Engine Platform. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (1), 107-123. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.380584.1780>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

تدوین مدل یکپارچه در برآورد حساسیت جنگل‌های استان کردستان به آتش‌سوزی با استفاده از مدل جنگل تصادفی در سامانه گوگل ارث انجین

عبدالماجد بستانی ^{ID} | شراره پوراابراهیم* ^{ID} | افشین دانه کار

گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

رایانامه: sh_pourebrahim@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

شناخت و نقشه‌سازی حساسیت جنگل‌ها به آتش‌سوزی برای حفظ اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی دارای اهمیت است. این مطالعه با بررسی قابلیت سری‌زمانی تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ و تولید مدلی کارا در بستر سامانه گوگل ارث انجین (GEE) توانست حساسیت جنگل‌های استان کردستان به آتش‌سوزی را در فاصله زمانی ده سال اخیر از سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ و در دو محدوده‌ی مطالعاتی واقع در شهرستان‌های مریوان، سروآباد و بانه پهنه‌بندی کند و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پیشگیرانه زمین و تخصیص مؤثر منابع به منظور پیشگیری و کاهش تأثیرات آتش‌سوزی جنگل‌ها در منطقه کردستان ارائه دهد. در این مطالعه برای شناسایی حریق جنگلی از شاخص نسبت سوختگی نرمال شده (NBR) برای تصاویر قبل و بعد از فصل آتش‌سوزی استفاده شد. به منظور بهبود نتایج طبقه‌بندی شاخص‌های گیاهی، مسکونی و پهنه‌های آبی به عنوان منطقه بدون حریق بارزسازی شدند. برای دستیابی به بهترین صحت طبقه‌بندی از مدل جنگل تصادفی (RF) در سامانه GEE استفاده گردیده است. سپس با تهیه نمونه‌های آموزشی مناسب از نتایج بارزسازی، طبقه‌بندی تصاویر با مدل RF به تعداد ۵۰ درخت تصمیم‌گیری در سامانه GEE انجام شد. به منظور اطمینان از صحت نمونه‌های آموزشی انتخاب شده، نتایج نقشه‌سازی آتش‌سوزی با داده‌های نقطه‌ای حریق اداری منابع طبیعی استان کردستان مقایسه شد. نتایج طبقه‌بندی در دو محدوده‌ی مطالعاتی جنگلی، منطقه مریوان و سروآباد در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ و منطقه بانه در سال ۲۰۱۸ صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۷ را نشان داد. نتایج حاصل شده در این تحقیق علاوه بر تأکید بر قابلیت تصاویر لندست ۸ در نقشه‌سازی حساسیت جنگل، نشان دهنده‌ی صحت قابل قبول مدل RF در این زمینه است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

آتش‌سوزی،

بارزسازی،

سامانه گوگل ارث انجین،

شاخص dNBR

مدل جنگل تصادفی.

استناد: بستانی، عبدالماجد، پوراابراهیم؛ شراره، دانه کار؛ افشین (۱۴۰۴). تدوین مدل یکپارچه در برآورد حساسیت جنگل‌های استان کردستان به آتش‌سوزی با استفاده از مدل جنگل تصادفی

در سامانه گوگل ارث انجین. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸(۱)، ۱۲۳-۱۰۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.380584.1780>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

آتش‌سوزی در سراسر جهان در مناطق دارای پوشش جنگلی وجود دارد، اگرچه نواحی نیمه‌خشک^۱ دارای بیشترین سهم آتش‌سوزی هستند (Krawchuk et al., 2009; Massetti et al., 2019). آتش‌سوزی جزء جدایی‌ناپذیر بسیاری از اکوسیستم‌ها در سراسر جهان است که نقش کلیدی در پویایی اکوسیستم را ایفا می‌کند، به نحوی که گونه‌های گیاهی و جانوری که نسبت به عامل آتش‌سوزی تکامل یافته‌اند را حفظ می‌کند (Pausas & Keeley, 2019). در طی سالیان گذشته آتش‌سوزی در سراسر جهان افزایش چشمگیری داشته است (Sharma et al., 2020; Williams et al., 2014). علاوه بر تأثیرات آتش‌سوزی بر جنگل، جوامع انسانی به خصوص جوامع روستایی تأثیر زیادی از آتش‌سوزی گرفته است (Charizanos & Demirhan, 2023; Davis et al., 2024). در مقیاس جهانی و محلی آتش‌سوزی می‌تواند اثرات جانبی از جمله فرسایش خاک، تخریب جنگل، آلودگی هوا، کاهش تنوع زیستی و آسیب به زیرساخت‌ها را به همراه داشته باشد (Eskandari & Chuvieco, 2015; Jaafari et al., 2017).

ایران کشوری است که آتش‌سوزی اثرات زیادی بر روی محیط زیست آن دارد (Eskandari & Chuvieco, 2015) به گونه‌ای که در بین کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا، ایران جایگاه چهارم را در زمینه وقوع آتش‌سوزی جنگلی دارد (Hamed et al., 2011). در جنگل‌های استان کردستان در طی ده سال‌های گذشته شدت و تکرار آتش‌سوزی‌ها افزایش یافته است که این میزان از افزایش آتش‌سوزی رابطه‌ی معناداری را با تغییرات اقلیمی دارد (Mueller et al., 2020; Ponomarev et al., 2022).

امروزه سیستم‌های نظارت ماهواره‌ای، امکان پایش و کنترل اراضی جنگلی را با دقت فراوانی فراهم کرده است. به صورتی که داده‌های ماهواره‌ای نقش مهمی را در زمینه شناسایی درجه تخریب ناشی از آتش‌سوزی ایفا می‌کنند (Bartalev & Stytsenko, 2021). تصاویر سنجنش از دور به صورت گسترده‌ای در تشخیص آتش‌سوزی استفاده می‌شود. زیرا قابلیت نظارت و ارائه‌ی مداوم در مقیاس بزرگ را دارد (Liu et al., 2023). ماهواره‌ی لندست ۸ توانایی پهنه‌بندی آتش‌سوزی جنگلی با استفاده از شاخص‌های گیاهی را دارد (Sivrikaya et al., 2024a). رایج‌ترین شاخص برای شناسایی آتش‌سوزی نسبت سوختگی نرمال شده^۲ (NBR) و تفاضل شاخص سوختگی نرمال شده^۳ (dNBR) است که می‌تواند اراضی جنگلی مورد حریق را شناسایی کند (Giddey et al., 2022; Tariq et al., 2021).

مدل‌های ماشین یادگیری^۴ دارای قابلیت شناسایی الگوریتم در داده‌های سنجنش از دور است که امروزه در طبقه‌بندی تصاویر در سنجنش از دور به کار می‌رود (Heydari & Mountrakis, 2018). در میان روش‌های ماشین یادگیری مدل جنگل تصادفی^۵ (RF) دارای بیشترین صحت طبقه‌بندی نظارت شده^۶ برای تصاویر ماهواره‌ای جهت تولید نقشه‌ی حساسیت آتش‌سوزی است (Collins et al., 2020; Parks et al., 2019). روش RF در سال ۲۰۰۱ توسط بریمن^۷ ارائه گردید، این روش ترکیبی از تعدادی درخت تصمیم‌گیری پیش‌بینی کننده برای طبقه‌بندی می‌باشد (Breiman, 2001). سامانه‌ی ابری گوگل ارث انجین^۸ (GEE) با دسترسی آسان به یک فضای ابری قابلیت پردازش داده‌های بزرگ را برای تصمیم‌گیری دارد. این سامانه ابری از سال ۲۰۱۰ کار خود را شروع کرده است که تا سال ۲۰۱۹ در مقالات بیش از ۱۵۸ نشریه به کار گرفته شده است (Mutanga & Kumar, 2019).

مطالعات بسیاری به پهنه‌بندی حریق جنگلی با استفاده از روش‌های مختلف پرداخته‌اند. در مطالعه‌ی پونومارف^۹ و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ در طی سال ۲۰۲۰ الی ۲۰۲۱، نقشه‌ی آتش‌سوزی برای جنگل‌های شمال سیبری تولید

1 Semi-arid

2 Normalized Burn Ratio

3 Differenced Normalized Burn Ratio

4 Machine Learning

5 Random Forest

6 Supervised Classification

7 Breiman

8 Google earth engine

9 Ponomarev

شد. به منظور شناسایی اراضی سوخته جنگلی و پهنه‌بندی جنگل‌های سیبری نسبت به آتش‌سوزی از شاخص‌های NBR و dNBR استفاده شده است. استفاده از مدل RF برای پهنه‌بندی جنگل‌های استرالیا به آتش‌سوزی در سامانه GEE توسط کالینز^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ انجام شده است. در این مدلسازی بالغ‌بر ۱۰۸۵۵ نمونه تعلیمی از مناطق مختلف اراضی سوخته با استفاده از شاخص‌های NBR و dNBR برای سری‌زمانی سال‌های ۲۰۰۶ الی ۲۰۱۵ استفاده شد و صحت مناسبی گزارش گردید.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ حیدری و همکاران در جنگل‌های زاگرس با استفاده از شاخص dNBR میزان حساسیت اراضی جنگلی به عامل آتش‌سوزی را طبقه‌بندی کردند. به منظور تشخیص مناطق سوخته آموس^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۸ از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل ۲ استفاده کردند، در این پژوهش شاخص‌های NBR، dNBR، نرمال شده پوشش گیاهی^۳ (NDVI) و تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی^۴ (dNDVI) جهت پهنه‌بندی آتش‌سوزی به کار گرفته شدند. در پژوهشی در جنگل‌های آفریقا گیدی^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ میزان حساسیت جنگل به آتش‌سوزی را مشخص کردند، به منظور شناسایی و طبقه‌بندی اراضی سوخته جنگلی و پهنه‌بندی آتش‌سوزی از شاخص dNBR استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی خطی مثبت معناداری بین آتش‌سوزی و مقدار شاخص dNBR است.

در مطالعه‌ای دیگر که توسط کنکاتی و شتی^۶ در سال ۲۰۲۱ انجام شده است که با به کارگیری شاخص‌های dNBR و نسبت سوختگی نسبی^۷ (RBR) پهنه‌بندی حریق جنگل تولید گردید در این مطالعه از دو ماهواره‌ی لندست ۸ و سنتینل ۲ به صورت جداگانه برای هر شاخص انجام شده که نتایج نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن صحت مکانی هر دو ماهواره در شناسایی آتش‌سوزی جنگلی است. در پژوهشی دیگر در زمینه پهنه‌بندی جنگل به عامل آتش‌سوزی با استفاده از دانش سنجش از دور که توسط اسمیت^۸ و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد، نقشه شاخص‌های NDVI، dNDVI، NBR و dNBR برای تصاویر ماهواره سنتینل ۲ تولید گردید. همچنین از روش‌های ماشین یادگیری از جمله ماشین بردار پشتیبان^۹ و جنگل تصادفی برای پهنه‌بندی حساسیت جنگل به عامل آتش‌سوزی در دو ناحیه جنگلی مجزا در آلاسکا به کار گرفته شد. در این پژوهش ارتباط بین توپوگرافی و نوع ماده سوختنی نسبت به حساسیت جنگل به عامل آتش‌سوزی بررسی شد. برای سنجش میزان صحت نقشه‌های تولید شده از داده واقعیت زمینی^{۱۰} استفاده گردید.

شناسایی سری‌زمانی اراضی سوخته جنگلی هدف اصلی این پژوهش است. در این راستا قابلیت داده‌های سنجنده OLI^{۱۱} ماهواره لندست ۸ را جهت پهنه‌بندی آتش‌سوزی جنگل‌های کردستان بررسی شد که اطلاعات مناسبی در راستای کاهش اثرات نامطلوب آتش‌سوزی بر جنگل‌های استان کردستان برای برنامه‌ریزان سرزمین فراهم می‌آورد (Jaafari et al., 2017; Sivrikaya et al., 2024b). تاکنون پهنه‌بندی حریق جنگلی برای داده‌های سری‌زمانی ماهواره‌ای، در استان کردستان صورت نگرفته است. محاسبه‌ی میزان مساحت حریق‌های جنگلی در طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ نتایج مناسبی جهت برنامه‌ریزی سرزمین در این منطقه ارائه می‌کند.

1 Collins

2 Amos

3 Normalized Difference Vegetation Index

4 Differenced Normalized Difference Vegetation Index

5 Giddey

6 Konkathi & Shetty

7 Relativized Burn Ratio

8 Smith

9 Support Vector Machine

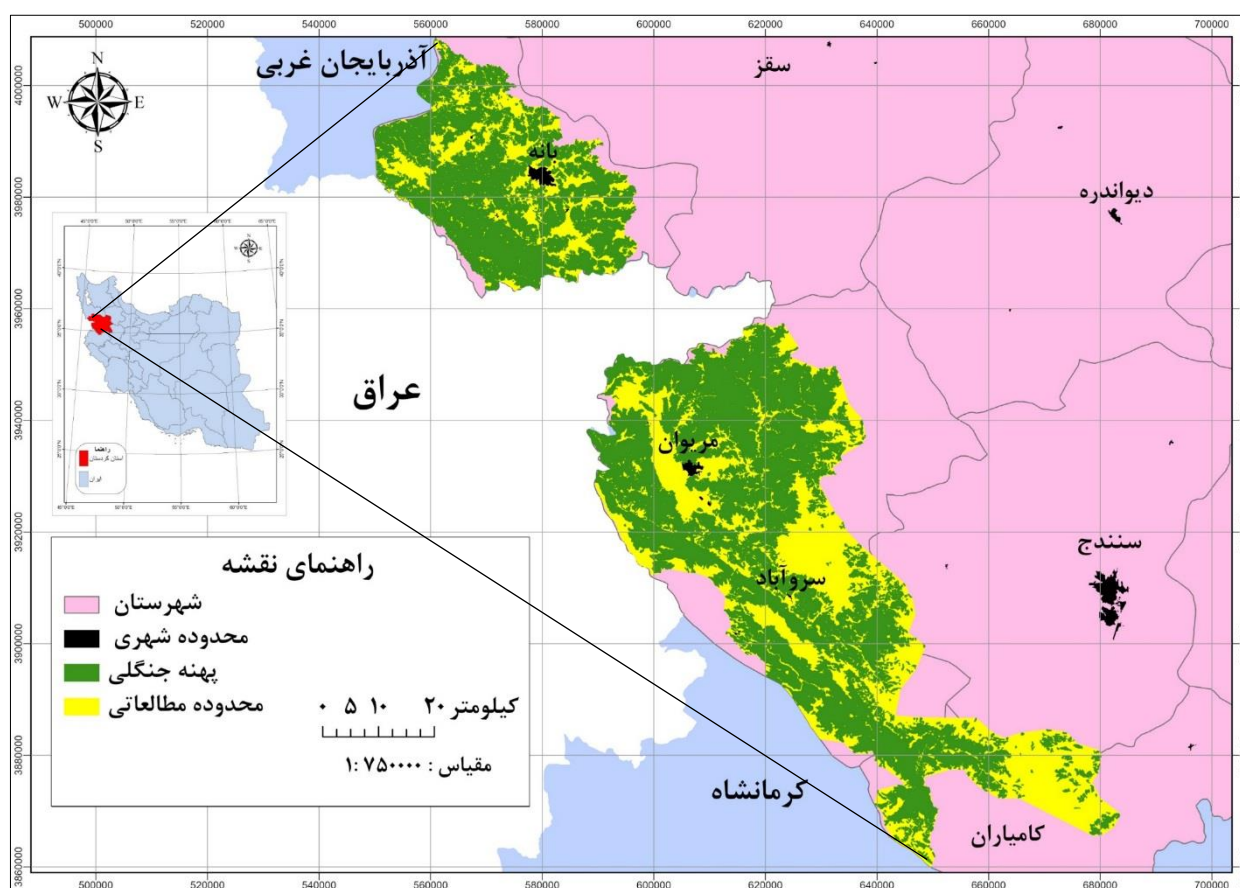
10 Ground Truth Data

11 Operational Land Imager

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق، جنگل‌های استان کردستان دارای مساحت ۳۷۳۰۰۰ هکتار است. شکل ۱ موقعیت مکانی تحقیق را نشان می‌دهد. این جنگل‌ها بین عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۴ درجه و ۴۳ دقیقه الی ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه عرض شمالی و بین دو طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه الی ۴۶ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی امتداد یافته است. جنگل‌های استان کردستان در شهرستان‌های سنندج، مریوان، سروآباد، بانه و کامیاران قرار دارد که بخش عمده این جنگل‌ها در شهرستان‌های مریوان، سروآباد و بانه است که در ناحیه کوهستانی غرب استان قرار گرفته‌اند. تغییرات ارتفاعی محدوده مطالعاتی مریوان و سروآباد از ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متر و محدوده شهرستان بانه از ۸۰۰ تا ۲۶۰۰ متر از سطح آزاد دریا است. همچنین اقلیم جنگل‌های استان کردستان بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن در طبقه‌ی مدیترانه‌ای، مرطوب و بسیار مرطوب قرار می‌گیرد (سند آمایش استان کردستان، ۱۳۹۸).

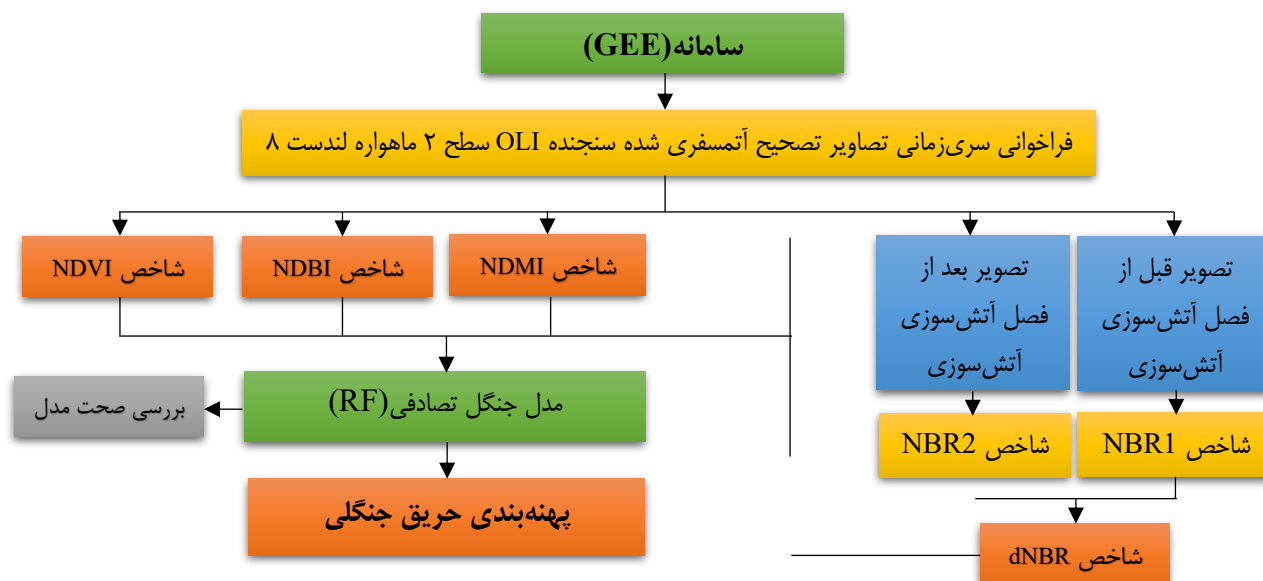


شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

۲-۲. روش تحقیق

در این تحقیق به کمک سامانه گوگل ارث انجین به بررسی قابلیت داده‌های سنجنده OLI و باند دهم سنجنده‌ی TIR ماهواره‌ی لندست ۸ در پهنه‌بندی سری‌زمانی اراضی سوخته جنگلی استان برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ پرداخته شده است. شکل ۲ مدل مفهومی تحقیق را

نشان می دهد. برای بررسی تطابق هندسی تصاویر استفاده شده در این تحقیق از لایه‌ی جاده‌های محدوده مطالعاتی استفاده شد. همچنین کلیه تصاویر دارای تصحیح رادیومتری شده بازتاب سطح ۱۲ هستند. تمامی تصاویر فراخوانی شده در سامانه GEE دارای پوشش ابری زیر ۱۰ درصد می باشد. این تصاویر با استفاده از بازسازی با شاخص‌های مناسب جهت ورودی مدل RF برای پهنه‌بندی حریق جنگلی در هر دو محدوده مطالعاتی به کار گرفته شدند



شکل ۲. مدل مفهومی تحقیق

۲-۱-۲. فراخوانی تصاویر سری زمانی

در این مطالعه از تصاویر تصحیح رادیومتری شده بازتاب سطحی ۲ ماهواره لندست ۸ استفاده شده است، سپس سنجنده (OLI) با اندازه تفکیک ۳۰ متر در بلندهای آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک و میانی و بلند ۱۰ سنجنده TIR با اندازه تفکیک ۱۰۰ متر برای سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ در مقیاس آمایش سرزمین با پوشش ابری زیر ۱۰ درصد در سامانه (GEE) فراخوانی شده است (Collins et al., 2018). تمامی تصاویر دارای تصحیح خطای هندسی و تصحیح خطای ارتفاع هستند. کلیه تصاویر موجود از منطقه که از نظر تاریخ و کیفیت برای قبل و بعد از فصل آتش‌سوزی در طی سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ از نظر کیفی می‌توانستند مورد استفاده قرار گیرند، بررسی شدند. سپس برای هر سال دو تصویر برای قبل و بعد از فصل آتش‌سوزی انتخاب شد (Danneyrolles et al., 2024). بدین ترتیب برای انتخاب هریک از تصاویر قبل و بعد از فصل آتش‌سوزی با فیلتر ابری مناسب فراخوانی و به دلیل گستردگی زیاد منطقه موزائیک شد. همچنین تصویر اول در اواخر خرداد تا اوایل تیر ماه قبل از آغاز فصل آتش‌سوزی انتخاب شده و تصویر دوم در مهرماه پس از پایان فصل آتش‌سوزی انتخاب گردید. در این محدوده زمانی پوشش گیاهی کف جنگل خشک شده و دارای بازتاب طیفی متفاوتی از بازتاب سبز رنگ درختان جنگل است. در نتیجه امکان بررسی پوشش جنگلی در این بازه‌ی زمانی فراهم می‌شود. همچنین ورودی مدل جنگل تصادفی تصویر مهرماه بوده است که امکان بررسی تمامی نواسانات پوشش جنگلی به‌ویژه آتش‌سوزی در بازه‌ی زمانی را فراهم می‌کند.

۲-۲-۲. بارسازی

قبل از انجام مدل جنگل تصادفی، برای شناسایی مناطقی که در آن حریق رخ داده از تصاویر رنگی حقیقی^۱ بعد از فصل آتش‌سوزی و شاخص NBR برای تصاویر قبل و بعد از فصل آتش‌سوزی برای هر سال استفاده شده است (Moghadam M. H et al., 2024; Widya & Lee, 2024). شاخص dNBR توانایی تشخیص حساسیت جنگل به عامل آتش‌سوزی را دارد. این شاخص به وسیله‌ی باند مادون قرمز نزدیک^۲ (NIR) و مادون قرمز کوتاه^۳ (SWIR₂) محاسبه می‌شود. برای بدست آوردن شاخص dNBR، طبق رابطه (۱) از تفاضل تصویر قبل از آتش‌سوزی NBR₁ با تصویر بعد از آتش‌سوزی NBR₂ استفاده شد (Gibson et al., 2020; Lee et al., 2024; Smith et al., 2021).

$$dNBR = NBR_{Prefire} - NBR_{Postfire} \quad \text{رابطه (۱)}$$

به منظور تفکیک مکانی مناطق فاقد حریق، برای مناطق مسکونی از شاخص ساخت و ساز تفاضلی نرمال شده^۴ (NDBI)، میزان رطوبت گیاهی شاخص آب تفاضلی نرمال شده^۵ (NDWI) و برای اراضی جنگلی بدون حریق از NDVI برای هر سال بعد از فصل آتش‌سوزی استفاده شد. نحوه‌ی محاسبه‌ی شاخص‌های فوق به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. شاخص‌های استفاده شده در مجموعه تصاویر سری‌زمانی ماهواره لندست-۸ در سامانه GEE

شاخص	معادله	زمان محاسبه	منابع
NBR	$\frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2}$	قبل و بعد از آتش‌سوزی	(Alcaras et al., 2022; Cai & Wang, 2020; Chen et al., 2021; Konkathi & Shetty, 2021)
NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	بعد از آتش‌سوزی	(Amos et al., 2018; Dindaroglu et al., 2021b; Epoka U & M, 2020; Feliu et al., 2021)
NDWI	$\frac{R_{green} - R_{NIR}}{R_{green} + R_{NIR}}$	بعد از آتش‌سوزی	(Dindaroglu et al., 2021a; Le et al., 2021; Rodriguez-Jimenez et al., 2024)
NDBI	$\frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR}$	تفاوتی ندارد	(Bhomi et al., 2024; Fernandez-Carrillo et al., 2019; Sinha et al., 2023)

۲-۲-۳. انتخاب نمونه‌های تعلیمی

پس از بارسازی با شاخص‌های مناسب نمونه‌های تعلیمی در سامانه GEE استخراج شدند (Cardille et al., 2023)، بدین ترتیب نمونه‌های تعلیمی در دو کلاس حریق و پهنه‌ی بدون حریق برداشت شد. انتخاب نمونه‌های تعلیمی در پهنه‌ی حریق از شاخص dNBR و در پهنه بدون حریق از نتایج بارسازی داده‌ها استفاده شد. نمونه‌ای از نحوه‌ی انتخاب نمونه‌های تعلیمی در سال ۲۰۲۳ در شمال منطقه مریوان در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۲-۲-۴. مدل جنگل تصادفی

مدل پرکاربرد جنگل تصادفی باتوجه به مطالعات پیشین (Collins et al., 2018; Gibson et al., 2020; Ngadze et al., 2020) در سامانه GEE برای پهنه‌بندی آتش‌سوزی انتخاب گردید. به دلیل تأثیر بالای نمونه‌های تعلیمی در صحت نتایج طبقه‌بندی نظارت شده، باتوجه به

1 True color

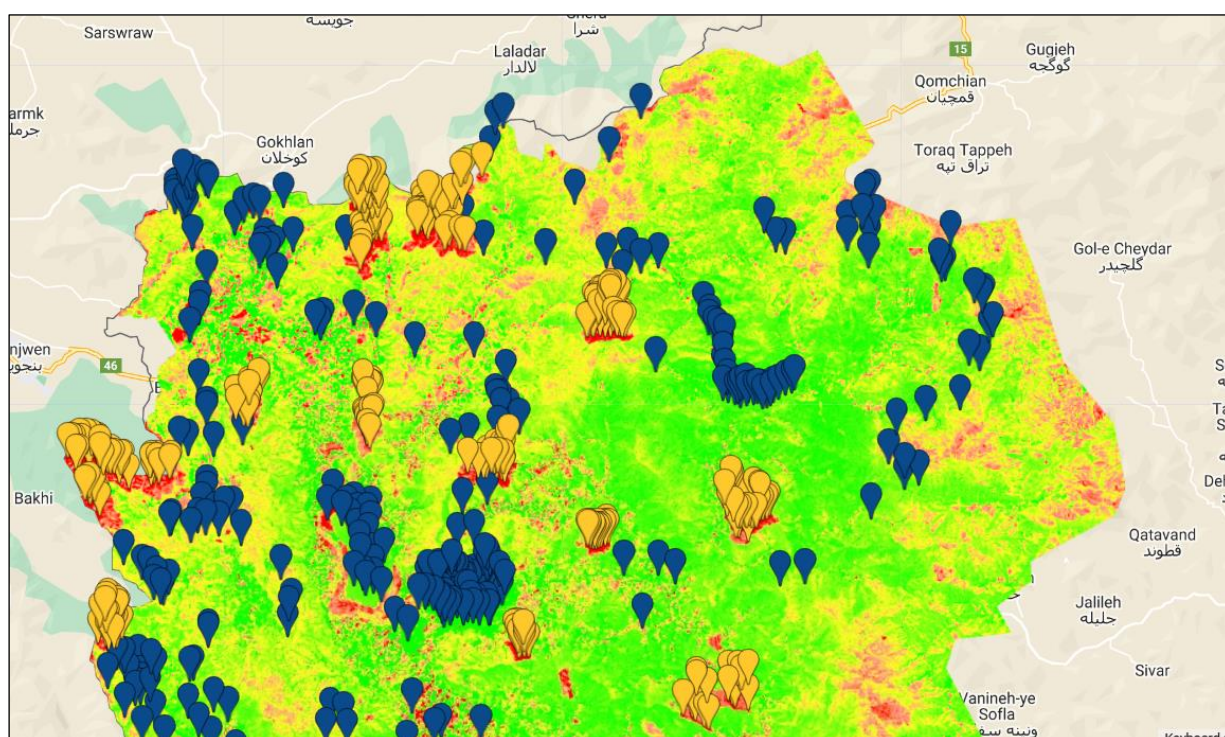
2 Near-Infrared

3 Shortwave Infrared

4 Normalized Difference Built up Index

5 Normalized Difference Water Index

نتایج حاصل از بارزسازی، نمونه‌های تعلیمی مطابق جدول ۲ در دو کلاسه‌ی سوخته و غیر سوخته بارویکرد بولین برداشت شدند (Badda et al., 2023). به دلیل فاصله زیاد، گستردگی و تفاوت پوشش گیاهی مدل جنگل تصادفی برای هر دو محدوده مطالعاتی به صورت جداگانه انجام شد و به صورت میانگین در هر مدلسازی در هر یک از محدوده‌های مطالعاتی ۵۰۰ نمونه منطقه بدون حریق و ۱۰۰ تا ۴۰۰ نمونه حریق برای هر سال در نظر گرفته شد. برای بررسی صحت مدل، ۸۰ درصد نمونه‌ها به عنوان داده‌های تعلیمی و ۲۰ درصد تست در نظر گرفته شد، سپس جدول صحت کلی و ضریب کاپا تشکیل شد. در این مدلسازی از ۵۰ درخت تصمیم‌گیری در مدل استفاده گردید. همچنین به منظور اطمینان از صحت نمونه‌های تعلیمی، طبقه‌بندی‌های مختلف با نقاط واقعیت زمینی برداشت شده سه ساله حریق جنگلی توسط اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان مقایسه شدند (Cardille et al., 2023).



شکل ۳. انتخاب نمونه‌های تعلیمی

جدول ۲. کلاسه‌های پوشش زمین

کد	کلاسه
۰	پوشش گیاهی و جنگلی
۰	پهنه آبی
۰	مسکونی
۱	اراضی سوخته

۲-۲-۵. پهنه‌بندی حریق جنگلی

پس از اتمام فرآیند طبقه‌بندی با روش جنگل تصادفی جهت پردازش خروجی، تصاویر رستری اراضی سوخته جنگلی برای انجام پردازش‌های لازم به نرم‌افزارهای ArcGIS Pro 3.1.41 و IDRISI TerrSet2020 انتقال داده شدند. تمامی تصاویر برای هر سال پس از کلاسه‌بندی به فرمت وکتور تبدیل گردید. همچنین تمامی واحدهای آتش‌سوزی کمتر از ۶/۵ هکتار در واحد مجاور خود تلفیق شدند. برای تولید نقشه‌ی نهایی آتش‌سوزی، نتایج با نقشه‌ی محدوده‌ی جنگل ارائه شده توسط اداره کل منابع طبیعی استان کردستان ماسک گردید. سپس نقشه‌ی نهایی آتش‌سوزی تمامی سال‌ها روی هم‌گذاری شدند. در نهایت خروجی به صورت نقشه و جدول مساحت کلاسه‌های آتش‌سوزی و تکرار آتش‌سوزی در اراضی جنگلی استان به ترتیب برای هر سال و سری‌زمانی ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ با مقیاس نقشه‌ی ۱:۷۵۰۰۰۰ نمایش داده شد.

۳. یافته‌های پژوهش

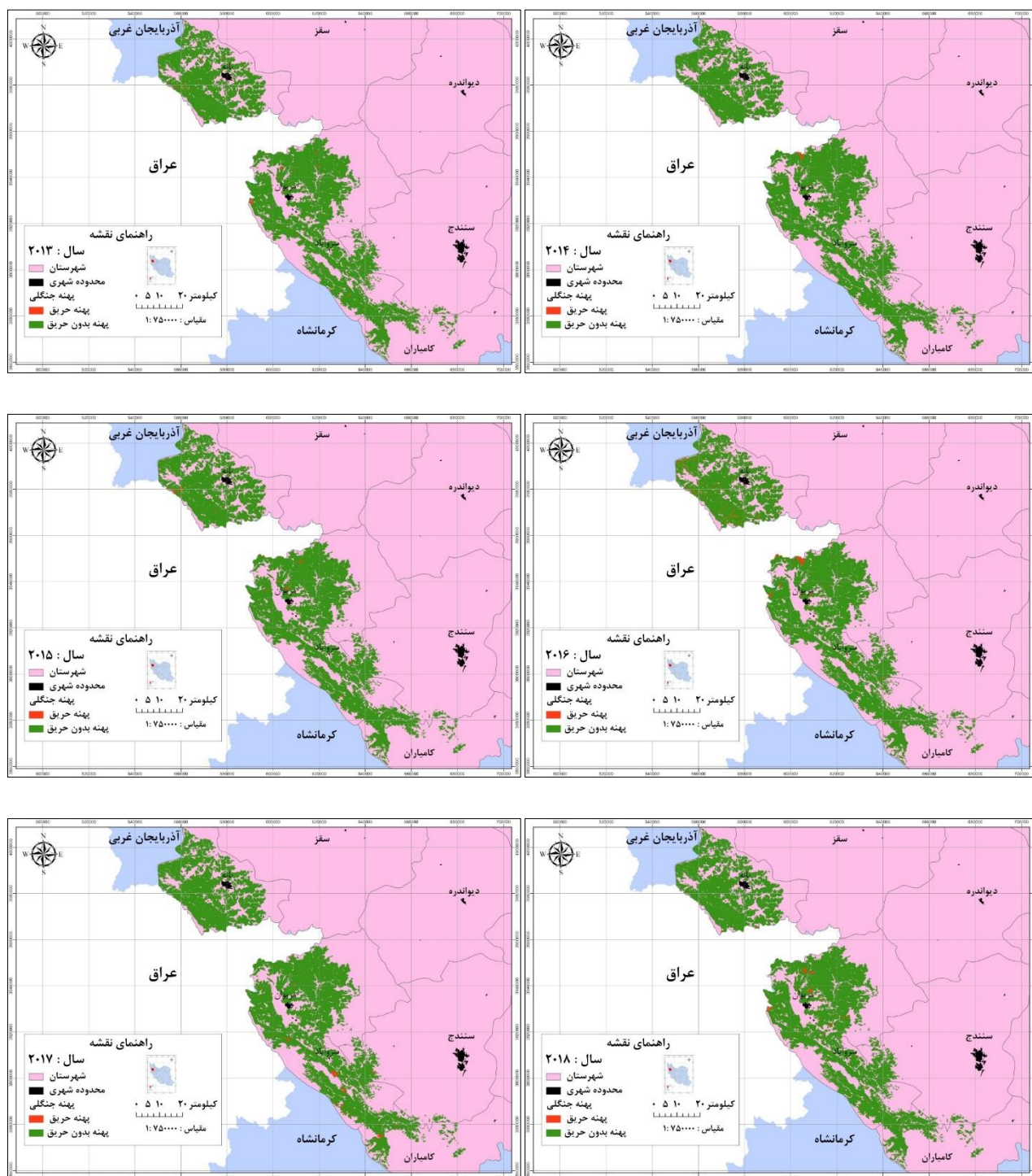
۳-۱. نتایج مدل جنگل تصادفی

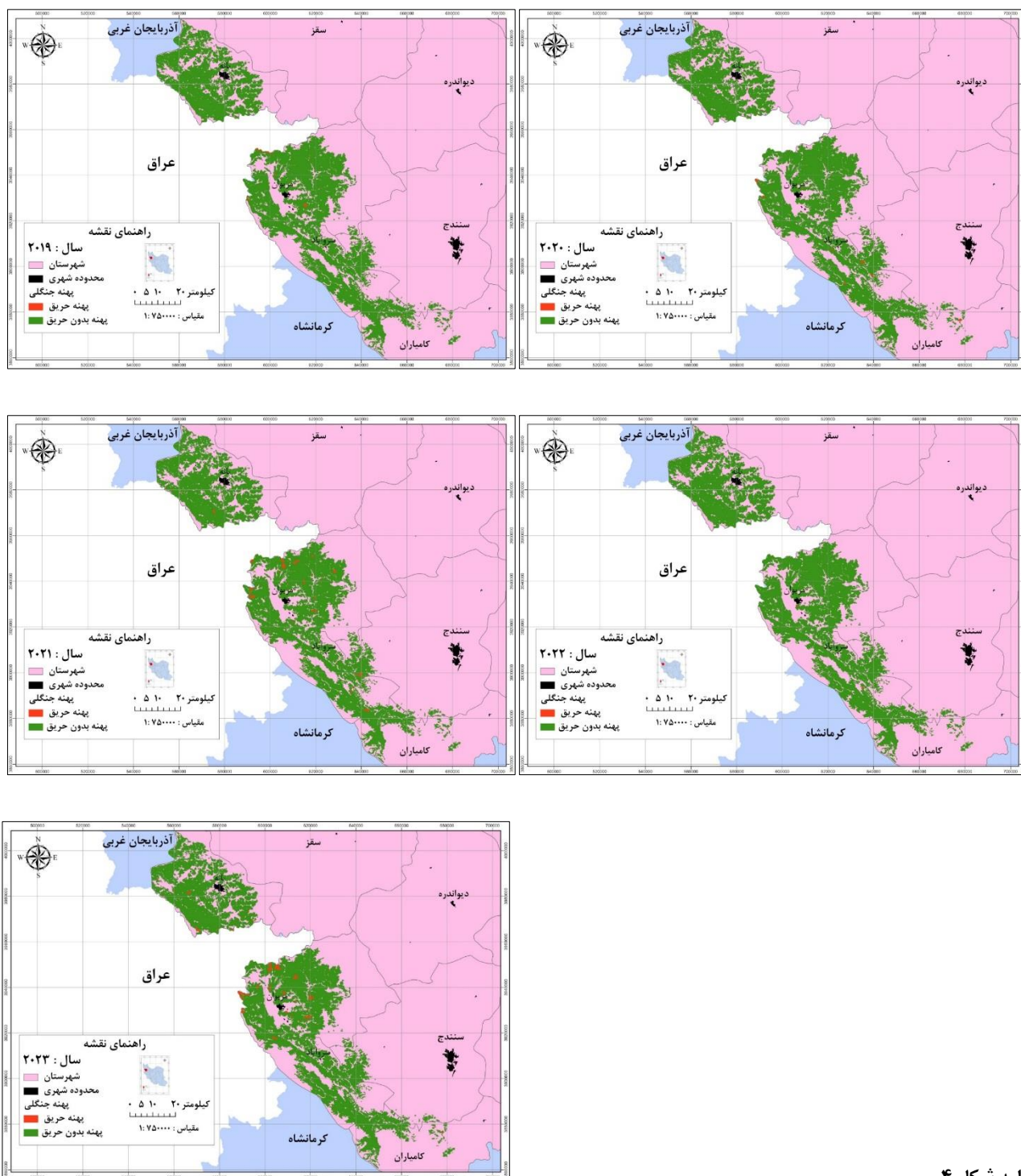
در دو محدوده مطالعاتی جنگلی، نتایج طبقه‌بندی حاصل از مدل جنگل تصادفی برای تصاویر ماهواره لندست ۸ نشان داد که این مدل دارای صحت بالایی در نقشه‌سازی آتش‌سوزی در جنگل‌های استان کردستان است. مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین صحت طبقه‌بندی در محدوده مطالعاتی جنگل‌های مریوان و سروآباد بوده است. در این مطالعه برای ارزیابی صحت مدل از صحت کلی و معیار کاپا در سامانه GEE استفاده شد (جدول ۳). به منظور اطمینان از صحت نهایی انتخاب نمونه‌های تعلیمی، نقشه‌ی نهایی آتش‌سوزی جنگلی با نقاط کنترل زمینی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مقایسه شده است. میزان صحت کلی طبقه‌بندی مدل در طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ در جنگل‌های مریوان و سروآباد و جنگل‌های بانه بیش از ۹۶ درصد بوده است، همچنین در این مدل‌سازی، معیار کاپا در هر دو محدوده مطالعاتی به صورت میانگین بیش از ۰/۹۰ گزارش شده است. در طبقه‌بندی جنگل‌های مریوان و سروآباد برای سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰، صحت کلی ۹۹ درصد و معیار کاپا ۰/۹۷ گزارش شده است از طرفی در جنگل‌های بانه بیشترین صحت کلی ۹۹ درصد و معیار کاپا ۰/۹۷ برای سال ۲۰۱۸ بوده است.

جدول ۳. میزان صحت طبقه‌بندی مدل

جنگل‌های مریوان و سروآباد			جنگل‌های بانه		
سال	صحت کلی (درصد)	ضریب کاپا	سال	صحت کلی (درصد)	ضریب کاپا
۲۰۱۳	۹۸	۰/۹۳	۲۰۱۳	۹۸	۰/۹۴
۲۰۱۴	۹۷	۰/۸۴	۲۰۱۴	۹۸	۰/۸۹
۲۰۱۵	۹۸	۰/۹۳	۲۰۱۵	۹۸	۰/۹۳
۲۰۱۶	۹۹	۰/۹۷	۲۰۱۶	۹۸	۰/۹۳
۲۰۱۷	۹۸	۰/۹۲	۲۰۱۷	۹۹	۰/۹۱
۲۰۱۸	۹۹	۰/۹۷	۲۰۱۸	۹۹	۰/۹۷
۲۰۱۹	۹۷	۰/۹۱	۲۰۱۹	۹۸	۰/۸۵
۲۰۲۰	۹۹	۰/۹۷	۲۰۲۰	۹۹	۰/۹۵
۲۰۲۱	۹۶	۰/۸۸	۲۰۲۱	۹۹	۰/۹۵
۲۰۲۲	۹۸	۰/۸۲	۲۰۲۲	۹۹	۰/۸۹
۲۰۲۳	۹۹	۰/۹۶	۲۰۲۳	۹۷	۰/۹۰

نقشه‌های پهنه‌بندی اراضی سوخته جنگلی طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ به صورت شکل ۴ آورده شده است.





ادامه شکل ۴.

بیشترین مساحت حریق مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ است که طبق جدول ۴ برای کل استان به ترتیب ۲۷۴۸ هکتار و ۳۹۰۶ هکتار بوده است. درحالی که کمترین میزان حریق در جنگل‌های کل استان در سال ۲۰۲۲ با مساحت ۲۰۶ هکتار است. بیشترین مساحت

حریق در بین دو محدوده مطالعاتی متعلق به جنگل‌های شهرستان مریوان و سروآباد در سال ۲۰۲۳، با مساحت ۳۹۰۶ هکتار گزارش شده است. در طی سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳، با توجه به نتایج نقشه‌سازی آتش‌سوزی از داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در سامانه GEE، ۱۸۹۷۷ هکتار اراضی جنگلی استان دچار حریق شده‌اند، از این میزان ۱۵۷۳۹ هکتار در جنگل‌های شهرستان‌های مریوان و سروآباد و ۳۲۳۸ هکتار در جنگل‌های شهرستان بانه رخ داده است.

جدول ۴. مساحت اراضی سوخته جنگلی طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳

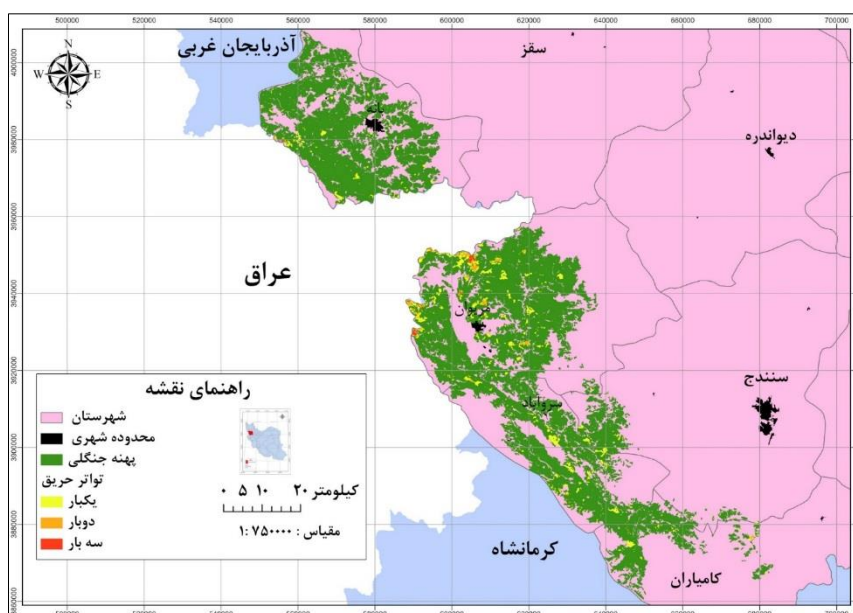
سال	بانه (هکتار)	مریوان (هکتار)	کل استان (هکتار)
۲۰۱۳	۶۶۵	۱۱۶۴	۱۸۲۹
۲۰۱۴	۲۷	۷۲۶	۷۵۳
۲۰۱۵	۷۳۶	۷۵۳	۱۴۸۹
۲۰۱۶	۴۹۱	۱۷۷۷	۲۲۶۸
۲۰۱۷	۴۹	۲۱۱۷	۲۱۶۶
۲۰۱۸	۱۵۱	۱۶۲۳	۱۷۷۴
۲۰۱۹	۱۳۹	۷۲۸	۸۶۷
۲۰۲۰	۷۱	۹۰۰	۹۷۱
۲۰۲۱	۲۳۷	۲۵۱۱	۲۷۴۸
۲۰۲۲	۲۸	۱۷۸	۲۰۶
۲۰۲۳	۶۴۴	۳۲۶۲	۳۹۰۶
کل	۳۲۳۸	۱۵۷۳۹	۱۸۹۷۷

برای بررسی بیشتر آتش‌سوزی جنگل با توجه به تواتر حریق در سری زمانی ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ لایه‌های اطلاعاتی وکتوری ۱۱ سال حریق جنگلی در محیط GIS روی هم‌گذاری شدند. طبقه‌بندی طبق میزان تکرار آتش‌سوزی طبق شکل ۵ به سه کلاس حریق یکبار، دوبار و سه‌بار صورت گرفت. پس از طبقه‌بندی نقشه‌ی تواتر حریق مساحت هر یک از کلاس‌ها طبق جدول ۵ محاسبه شد. در طی سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳، ۳۴۵ هکتار از جنگل‌های استان سه‌بار، ۲۵۴۲ هکتار دو بار و ۱۲۱۲۵ هکتار یکبار مورد حریق قرار گرفته‌اند.

جدول ۵. مساحت طبقات تواتر حریق جنگلی

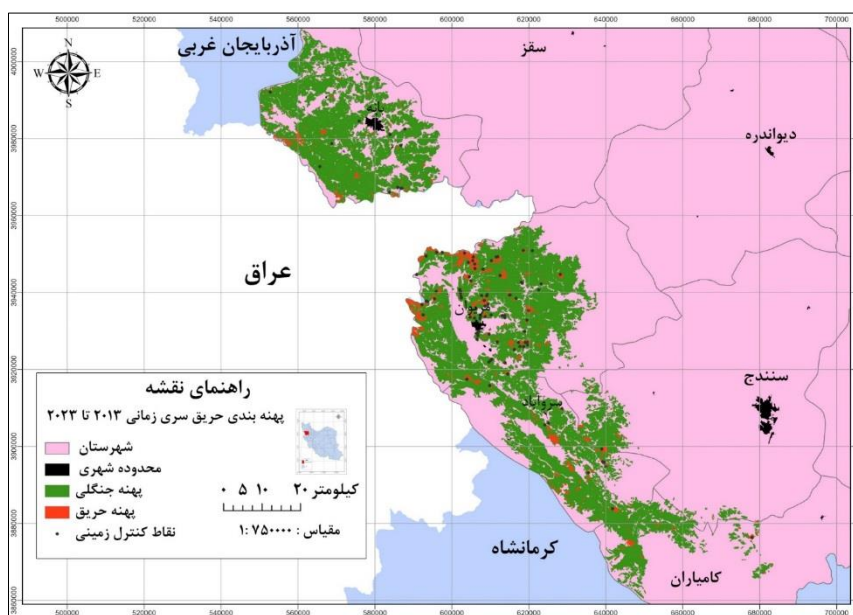
تواتر حریق	بانه (هکتار)	مریوان (هکتار)	استان (هکتار)
یکبار	۳۳۴۳	۹۷۸۲	۱۲۱۲۵
دوبار	۳۱۱	۲۲۳۱	۲۵۴۲
سه‌بار	۸۵	۲۶۰	۳۴۵

در طی تصاویر سری زمانی مطالعه‌ی حال حاضر در جنگل‌های مریوان و سروآباد ۲۶۰ هکتار سه بار، ۲۲۳۱ هکتار دو بار و ۹۷۸۲ هکتار از اراضی جنگلی یکبار مورد حریق قرار گرفته است در حالی که نتایج مساحت تواتر حریق در جنگل‌های شهرستان بانه به ترتیب ۸۵ هکتار سه‌بار، ۳۱۱ هکتار دو بار و ۲۳۴۳ هکتار یک بار، گزارش شد. عمده‌ی تکرار حریق در مناطق مرزی شمالی و غربی جنگل‌های مریوان رخ داده است که در بررسی داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، بیشترین عامل تکرار آتش‌سوزی در مناطق مرزی شهرستان مریوان، حریق‌های بزرگ جنگلی در کشور همسایه و انتقال آن به جنگل‌های مناطق مرزی می‌باشد.



شکل ۵. نقشه‌ی تواتر حریق طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

به منظور سنجش صحت نهایی حریق طبقه‌بندی‌های مختلف با نقاط کنترل زمینی حریق جنگلی برداشت شده توسط یگان حفاظت اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان مقایسه شد که به شرح شکل ۶ می‌باشد. نقاط کنترل زمینی گزارش شده توسط یگان حفاظت اداره‌ی کل منابع طبیعی استان تنها برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ به صورت کامل وجود دارد در حالی که مطالعه حاضر با بررسی سری‌زمانی ۱۱ ساله حریق نشان دهنده‌ی قرارگیری تمامی نقاط کنترل زمینی آتش‌سوزی گزارش شده توسط این سازمان است.



شکل ۶. نقشه‌ی آتش‌سوزی جنگل‌های استان کردستان طی سری‌زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، بررسی قابلیت ماهواره‌ی لندست ۸ در ارزیابی سری‌زمانی تصاویر آتش‌سوزی در جنگل‌های استان کردستان است. تمامی تصاویر فراخوانی شده در سامانه GEE دارای تصحیحات اتمسفری و رادیومتری سطح ۲ هستند. در این پژوهش سعی شد تا قابلیت سری‌زمانی داده‌های سنجنده‌ی OLI ماهواره‌ی لندست ۸ در ارزیابی حریق دو محدوده‌ی مطالعاتی جنگلی استان در شهرستان‌های مریوان، سروآباد و بانه بررسی شود. نتایج نقشه‌سازی آتش‌سوزی در جنگل‌های استان کردستان نشان می‌دهد که گسترش و شدت آتش‌سوزی در سال‌ها اخیر به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است، به طوری که در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۱ بیشترین حریق جنگلی در ۱۱ سال گذشته اتفاق افتاده است. محدوده مطالعاتی مریوان و سروآباد نسبت به محدوده‌ی جنگلی شهرستان بانه دارای حریق بیشتری است که بخش عمده‌ی حریق‌ها در مناطق جنگلی شهرستان مریوان به ویژه نواحی غربی و شمالی آن رخ داده است. این مناطق به مراتب دارای انبوهی بیشتری نسبت به سایر نواحی جنگلی استان است. با توجه به افزایش رو به رشد مخاطره آتش‌سوزی به دلایل انسانی یا تغییرات اقلیمی، نیاز به انجام مطالعه گسترده در مورد تواتر و علت‌های وقوع حریق‌های جنگلی به‌ویژه در جنگل‌های نیمه خشک کاملاً ضرورت می‌یابد. انجام مطالعات جامع از حریق‌های جنگلی استان کردستان در طی سری‌زمانی در مقیاس آمایش سرزمین با توجه به افزایش تغییرات اقلیمی، توسعه ناپایدار و افزایش آتش‌سوزی‌های با منشاء انسانی می‌تواند به حصول برنامه‌های آمایشی و توسعه پایدار این منطقه کمک کند. در این راستا، استفاده از داده‌های سری‌زمانی اقلیمی و دخیل کردن عوامل انسانی در برنامه‌های توسعه‌ای در حفظ جنگل‌ها نقش کلیدی دارد.

وجود متوسط بارش بیشتر و نفوذ بیشتر توده هوای مدیترانه‌ای به جنگل‌های مریوان و سروآباد منجر به انبوهی بیشتر درختان این مناطق نسبت به شهرستان بانه شده است. همچنین استفاده از داده‌های سری‌زمانی این امکان را فراهم می‌کند که تفاوت آتش‌سوزی در بین دو محدوده‌ی مطالعاتی بیشتر مشخص شود. تصاویر برای هر دو محدوده از اواخر خرداد ماه تا اوایل تیر برای قبل از فصل آتش‌سوزی و تصاویر اواخر شهریور تا آخر مهرماه به عنوان اتمام فصل آتش‌سوزی انتخاب شدند، لازم به ذکر است که در این فاصله زمانی تنها پوشش عمده‌ی سبز درختان جنگلی می‌باشند و عمده‌ی پوشش گیاهی کف جنگل به رنگ زرد است که میزان صحت تفکیک مکانی جنگل را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد. ارزیابی صحت تصاویر بر اساس صحت کلی و معیار کاپا موید نتایج قابل قبول بود، به صورتی که در طبقه‌بندی آتش‌سوزی جنگل‌های مریوان و سروآباد در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ با کمترین فاصله بین صحت کلی و معیار کاپا دارای بیشترین صحت نهایی است. طبقه‌بندی حریق‌های جنگلی در محدوده‌ی شهرستان‌های مریوان و سروآباد دارای صحت بیشتری نسبت به جنگل‌های شهرستان بانه است و کمترین میزان صحت متعلق به سال ۲۰۲۰ در شهرستان بانه می‌باشد. از مهم‌ترین دلایل تفاوت صحت طبقه‌بندی در دو محدوده مطالعاتی تنک بودن پوشش جنگلی در شهرستان بانه و تنوع طیفی بالاتر است. به عبارتی وجود طبقات پوششی متنوع با پراکنش زیاد سبب ایجاد پیکسل‌های آمیخته در مرز مشترک پدیده‌ها می‌شود، در نتیجه احتمال اینکه پیکسل‌های بیشتری به اشتباه در طبقات دیگر طبقه‌بندی شوند افزایش می‌یابد. همچنین وجود تشابه بازتاب طیفی در بین مناطق جنگلی که دچار حریق شده اند با پدیده سایه به ویژه در مهر ماه، به دلیل کاهش زاویه تابش خورشید از عوامل اصلی کاهش صحت طبقه‌بندی در هر دو محدوده‌ی مطالعاتی است. استفاده از بارزسازی شاخص‌های پوشش گیاهی نتایج طبقه‌بندی مدل RF در هر دو محدوده مطالعاتی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

نتایج مطالعه حاضر، تحقیقات قبلی در این زمینه را تایید می‌کند. کالینز و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای پهنه‌بندی تصاویر حریق از مدل جنگل تصادفی در سامانه GEE استفاده کرد که مبنایی برای ارزیابی حریق در مطالعه حاضر شد. مطالعه حاضر توانست با انتخاب نمونه‌های تعلیمی مناسب با استفاده از تکنیک بارزسازی شاخص‌های گیاهی صحت بالایی را در طبقه‌بندی ارائه دهد. یکی از عوامل کاهش صحت طبقه‌بندی، نمایش حریق‌های ضعیف است که می‌تواند به علت گستره کم و مشابهت آن با بازتاب طیفی سایه و خاک باشد. علی‌رغم اینکه هر دو محدوده‌ی مطالعاتی دارای وسعت زیادی هستند اما به کمک بارزسازی مناسب، مدل RF صحت قابل قبولی را

از خود نشان داده است که مشابه نتایج بادا^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۳ می‌باشد، در این مطالعه با استفاده از مدل RF در سامانه GEE پهنه‌بندی آتش‌سوزی در سه مدل اجرا شده است، در مدل A بارزسازی فقط بر اساس شاخص dNBR می‌باشد درحالی که در مدل‌های B و C شاخص‌های بیشتری برای بارزسازی بهتر و انتخاب مناسب نمونه‌های تعلیمی به کمک شاخص dNBR آمده‌اند که نتایج صحت کلی و معیار کاپا را در مدل‌های B و C به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داده است.

با این حال، نتایج اندک تحقیقات منتشر شده در زمینه آتش‌سوزی در جنگل‌های استان کردستان سبب شده است که مدیریت کارآمد و لازم برای پیش‌بینی حریق‌های احتمالی وجود نداشته باشد. با توجه به افزایش حریق‌ها در سال‌های اخیر لزوم‌های انجام مطالعات گسترده در زمینه‌های بررسی میزان تخریب اراضی جنگلی، تعیین نرخ بازیابی جنگل، پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه و ارائه روش‌های کارآمد جهت بهبود اقتصاد و معیشت مردم محلی، آموزش گردشگران و اجرای طرح‌های مشارکت مردمی در جهت کاهش آتش‌سوزی با مت‌شاء انسانی زمینه‌ای را برای برنامه ریزی صحیح فراهم می‌آورد.

References

- Alcaras, E., Costantino, D., Guastaferrero, F., Parente, C., & Pepe, M. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071727>
- Amos, C., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2018). Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection. *International Journal of Remote Sensing*, 40(3), 905-930. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1519284>
- Badda, H., Cherif, E. K., Boulaassal, H., Wahbi, M., Yazidi Alaoui, O., Maatouk, M., Bernardino, A., Coren, F., & El Kharki, O. (2023). Improving the Accuracy of Random Forest Classifier for Identifying Burned Areas in the Tangier-Tetouan-Al Hoceima Region Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/rs15174226>
- Bartalev, S. A., & Stytsenko, F. V. (2021). Assessment of Forest-Stand Destruction by Fires Based on Remote-Sensing Data on the Seasonal Distribution of Burned Areas. *Contemporary Problems of Ecology*, 14(7), 711-716. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070027>
- Bhomi, A. K., Poudyal, R., Tolange, S. K., & Chaudhary, S. (2024). Assessing the Impact of Urban Expansion on Forest Cover using LULC Maps, NDVI, and NDBI: A Case Study of Kathmandu District. *Journal on Geoinformatics, Nepal*, 1-7.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cai, L., & Wang, M. (2020). Is the RdNBR a better estimator of wildfire burn severity than the dNBR? A discussion and case study in southeast China. *Geocarto International*, 37(3), 758-772. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1737973>
- Cardille, J. A., Crowley, M. A., Saah, D., & Clinton, N. E. (2023). Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine. 115-148.
- Charizanos, G., & Demirhan, H. (2023). Bayesian prediction of wildfire event probability using normalized difference vegetation index data from an Australian forest. *Ecological Informatics*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101899>
- Chen, D., Fu, C., Hall, J. V., Hoy, E. E., & Loboda, T. V. (2021). Spatio-temporal patterns of optimal Landsat data for burn severity index calculations: Implications for high northern latitudes wildfire research. *Remote Sensing of Environment*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112393>
- Collins, L., Griffioen, P., Newell, G., & Mellor, A. (2018). The utility of Random Forests for wildfire severity mapping. *Remote Sensing of Environment*, 216, 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.005>
- Collins, L., McCarthy, G., Mellor, A., Newell, G., & Smith, L. (2020). Training data requirements for fire severity mapping using Landsat imagery and random forest. *Remote Sensing of Environment*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111839>
- Dannevrolles, V., Smetanka, C., Fournier, R., Boucher, J., Guindon, L., Waldron, K., Bourdon, J.-F., Bonfils, D., Beaudoin, M., Ibarzabal, J., Rossi, S., & Boucher, Y. (2024). Assessing spatial patterns of burn severity for guiding post-fire salvage logging in boreal forests of Eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, 556. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121756>

- Davis, K. T., Peeler, J. L., Fargione, J. E., Haugo, R. D., Metlen, K. L., Robles, M. D., & Woolley, T. (2024). Tamm review: A meta-analysis of thinning, prescribed fire, and wildfire effects on subsequent wildfire severity in conifer dominated forests of the Western US. *Forest Ecology and Management*.
- Dindaroglu, T., Babur, E., Yakupoglu, T., Rodrigo-Comino, J., & Cerdà, A. (2021a). Evaluation of geomorphometric characteristics and soil properties after a wildfire using Sentinel-2 MSI imagery for future fire-safe forest. *Fire Safety Journal*, 122, 103318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103318>
- Dindaroglu, T., Babur, E., Yakupoglu, T., Rodrigo-Comino, J., & Cerdà, A. (2021b). Evaluation of geomorphometric characteristics and soil properties after a wildfire using Sentinel-2 MSI imagery for future fire-safe forest. *Fire Safety Journal*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103318>
- Epoka U, & M, U. o. (2020). Testing NDVI, tree cover density and land cover type as fuel indicators in the wildfire spread capacity index (WSC1): case of Montenegro. 48. <https://doi.org/10.15835/48411993>
- Eskandari, S., & Chuvieco, E. (2015). Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.006>
- Feliu, S., Pedro, D., Andrew, T., & M, F. (2021). Estimating heterogeneous wildfire effect using synthetic control and satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 265.
- Fernandez-Carrillo, A., McCaw, L., & Tanase, M. A. (2019). Estimating prescribed fire impacts and post-fire tree survival in eucalyptus forests of Western Australia with L-band SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 224, 133-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.005>
- Gibson, R., Danaher, T., Hehir, W., & Collins, L. (2020). A remote sensing approach to mapping fire severity in south-eastern Australia using sentinel 2 and random forest. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111702. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111702>
- Giddey, B. L., Baard, J. A., & Kraaij, T. (2022). Verification of the differenced Normalised Burn Ratio (dNBR) as an index of fire severity in Afrotropical Forest. *South African Journal of Botany*, 146, 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.11.005>
- Hamed, A., Kanniah, D., & S, K. (2011). GIS-based Probability Assessment of Fire Risk in Grassland and Forest Landscapes of Golestan Province, Iran. *international conference Environmental and Computer science*, 19.
- Heydari, S. S., & Mountrakis, G. (2018). Effect of classifier selection, reference sample size, reference class distribution and scene heterogeneity in per-pixel classification accuracy using 26 Landsat sites. *Remote Sensing of Environment*, 204, 648-658. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.035>
- Jaafari, A., Gholami, D. M., & Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics*, 39, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.003>
- Konkathi, P., & Shetty, A. (2021). Inter comparison of post-fire burn severity indices of Landsat-8 and Sentinel-2 imagery using Google Earth Engine. *Earth Science Informatics*, 14(2), 6. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00566-2>
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K. (2009). Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. *PLOS ONE*, 4(4), e5102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>
- Le, H. V., Hoang, D. A., Tran, C. T., Nguyen, P. Q., Tran, V. H. T., Hoang, N. D., Amiri, M., Ngo, T. P. T., Nhu, H. V., Hoang, T. V., & Tien Bui, D. (2021). A new approach of deep neural computing for spatial prediction of wildfire danger at tropical climate areas. *Ecological Informatics*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101300>
- Lee, K., van Leeuwen, W. J. D., Gillan, J. K., & Falk, D. A. (2024). Examining the Impacts of Pre-Fire Forest Conditions on Burn Severity Using Multiple Remote Sensing Platforms. *Remote Sensing*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/rs16101803>
- Liu, W., Guan, H., Hesp, P. A., & Batelaan, O. (2023). Remote sensing delineation of wildfire spatial extents and post-fire recovery along a semi-arid climate gradient. *Ecological Informatics*, 78, 102304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102304>
- Massetti, A., Rüdiger, C., Yebra, M., & Hilton, J. (2019). The Vegetation Structure Perpendicular Index (VSPi): A forest condition index for wildfire predictions. *Remote Sensing of Environment*, 224, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.004>
- Moghadam M. H, R., A, F., Z, M., & S, P. (2024). Burned area assessment using Sentinel-2A satellite imagery and DNBR spectral index (Case study: forest areas on the anticline in the Khaiz region, Iran). *BOHR International Journal of Civil Engineering and Environmental Science*, 2(1), 12-20. <https://doi.org/10.54646/bijcees.2024.15>
- Mueller, S. E., Thode, A. E., Margolis, E. Q., Yocom, L. L., Young, J. D., & Iniguez, J. M. (2020). Climate relationships with increasing wildfire in the southwestern US from 1984 to 2015. *Forest Ecology and Management*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117861>

- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
- Ngadze, F., Mpakairi, K. S., Kavhu, B., Ndaimani, H., & Maremba, M. S. (2020). Exploring the utility of Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI in burned area mapping for a heterogenous savannah landscape. *PLOS ONE*, 15(5), e0232962. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232962>
- Parks, S., Holsinger, L., Koontz, M., Collins, L., Whitman, E., Parisien, M.-A., Loehman, R., Barnes, J., Bourdon, J.-F., Boucher, J., Boucher, Y., Caprio, A., Collingwood, A., Hall, R., Park, J., Saperstein, L., Smetanka, C., Smith, R., & Soverel, N. (2019). Giving Ecological Meaning to Satellite-Derived Fire Severity Metrics across North American Forests. *Remote Sensing*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/rs11141735>
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5), 289-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fee.2044>
- Ponomarev, E., Zabrodin, A., & Ponomareva, T. (2022). Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index. *Fire*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/fire5010019>
- Rodriguez-Jimenez, F., Novo, A., & V. Hall, J. (2024). Influence of wildfires on the conflict (2006–2022) in eastern Ukraine using remote sensing techniques (MODIS and Sentinel-2 images). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101240>
- Sharma, P., Chettri, N., Uddin, K., Wangchuk, K., Joshi, R., Tandin, T., Pandey, A., Gaira, K. S., Basnet, K., Wangdi, S., Dorji, T., Wangchuk, N., Chitale, V. S., Uprety, Y., & Sharma, E. (2020). Mapping human–wildlife conflict hotspots in a transboundary landscape, Eastern Himalaya. *Global Ecology and Conservation*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01284>
- Sinha, A., Nikhil, S., Ajin, R. S., Danumah, J. H., Saha, S., Costache, R., Rajaneesh, A., Sajinkumar, K. S., Amrutha, K., Johny, A., Marzook, F., Mammen, P. C., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., & Abioui, M. (2023). Wildfire Risk Zone Mapping in Contrasting Climatic Conditions: An Approach Employing AHP and F-AHP Models. *Fire*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/fire6020044>
- Sivrikaya, F., Günlü, A., Küçük, Ö., & Ürker, O. (2024a). Forest fire risk mapping with Landsat 8 OLI images: Evaluation of the potential use of vegetation indices. *Ecological Informatics*, 79, 102461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102461>
- Sivrikaya, F., Günlü, A., Küçük, Ö., & Ürker, O. (2024b). Forest fire risk mapping with Landsat 8 OLI images: Evaluation of the potential use of vegetation indices. *Ecological Informatics*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102461>
- Smith, C. W., Panda, S. K., Bhatt, U. S., Meyer, F. J., Badola, A., & Hrobak, J. L. (2021). Assessing Wildfire Burn Severity and Its Relationship with Environmental Factors: A Case Study in Interior Alaska Boreal Forest. *Remote Sensing*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/rs13101966>
- Tariq, A., Shu, H., Gagnon, A. S., Li, Q., Mumtaz, F., Hysa, A., Siddique, M. A., & Munir, I. (2021). Assessing Burned Areas in Wildfires and Prescribed Fires with Spectral Indices and SAR Images in the Margalla Hills of Pakistan. *Forests*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/f12101371>
- Widya, L. K., & Lee, C.-W. (2024). Geospatial technologies for estimating post-wildfire severity through satellite imagery and vegetation types: a case study of the Gangneung Wildfire, South Korea. *Geosciences Journal*, 28(2), 247-260. <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0045-2>
- Williams, T., Williams, B. J., & Song, B. (2014). Modeling a historic forest fire using GIS and FARSITE. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*, 6, 80-88 .

