University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Detection of burned areas following vegetation fires using Sentinel-2 spectral indices integrated with Machine Learning Algorithms (Case study: Golestan Province)

Sayyad Asghari Saraskanroud[1]✉ | Fatemeh Samadi Shalveh Alia[2] | Sina Khonkham[3] | Batool Zeinali[4]

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: s.asghari@uma.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: samadi.f.2019@gmail.com
3. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: sinakhonkham.rs@gmail.com
4. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: zeynali.b@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 4 July 2026

Received in revised form 2 September 2026

Accepted 18 September 2026

Keywords:

Burned Area Detection,
Google Earth Engine,
Multi-Sensor,
Remote Sensing,
Sentinel-2,
Vegetation fire.

ABSTRACT

Vegetation fires are among the most important ecological threats, altering vegetation structure and surface properties and reducing ecosystem stability. This study mapped burned areas in Golestan Province using Sentinel-2 spectral indices and machine learning in Google Earth Engine. Pre-fire (15 September–1 November 2025) and post-fire (28 November–16 December 2025) imagery underwent cloud and invalid-pixel masking using the Scene Classification Layer, followed by topographic correction and median compositing. Snow cover was excluded using an NDSI-based mask. NDVI, NBR, and NDMI were calculated for both periods, followed by their difference indices (dNDVI, dNDMI, and dNBR) and complementary indices (RBR, MIRBI, and BSI). Manually selected burned and unburned samples were randomly divided into training (70%) and validation (30%) datasets. Random forest (RF; 500 trees) and gradient tree boosting (GTB; 100 trees) classifiers were evaluated using confusion matrices, overall accuracy, and Cohen's kappa. The largest spectral changes occurred in southern and eastern forests, particularly within the Hyrcanian forest zone in Galikesh, Minoodasht, Ramian, Azadshahr, and parts of Kalaleh. RF and GTB produced similar spatial patterns, identifying 39.92 and 35.42 km² of burned areas, respectively. Overall accuracy and Cohen's kappa were 0.94 and 0.86, respectively, indicating effective discrimination between burned and unburned areas. These findings demonstrate the utility of integrating Sentinel-2 spectral indices with machine learning for rapid burned area mapping, fire assessment, and forest fire crisis management.

Cite this article: Saraskanroud, S.A., Samadi Shalveh Alia, F., Khonkham, S., & Zeinali, B. (2026). Detection of burned areas following vegetation fires using Sentinel-2 spectral indices integrated with Machine Learning Algorithms (Case study: Golestan Province). *Journal of Natural Environment*, *79* (4), 687-701. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.417872.2927

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Forests represent one of the most vital components of the terrestrial biosphere, playing a fundamental role in regulating the global carbon cycle, maintaining biodiversity, and providing essential ecosystem services upon which human societies depend. Forest fires constitute one of the most significant environmental crises affecting global forest ecosystems, encompassing a wide range of ecological disturbances and impacts. Fire, which emerged shortly after the establishment of terrestrial vegetation in the geological record, annually destroys millions of hectares of forested areas worldwide, causing severe and often irreversible damage to terrestrial ecosystems. Wildfires significantly influence global ecosystem patterns and processes, including vegetation distribution and structure, carbon cycling, and climate dynamics.

Material and Methods

This study delineated areas burned during the 2025 wildfire event in Golestan Province, Iran, using Sentinel-2 imagery and machine learning algorithms within Google Earth Engine (GEE). Two periods were considered: pre-fire (September 15–November 1, 2025) and post-fire (November 28–December 16, 2025). Clouds and invalid pixels were masked using the Scene Classification Layer (SCL), followed by topographic correction and median compositing for each period. A Normalized Difference Snow Index (NDSI)-based mask was also applied to minimize potential snow effects. NBR, NDVI, and NDMI were calculated for both periods, together with their differences (dNBR, dNDVI, and dNDMI) and the MIRBI, BSI, and RBR indices. Reference data were generated through manual sampling of burned and unburned areas. Landsat 8–9 imagery supported spatial verification of fire occurrence and visual interpretation of burned areas. Samples were split into training (70%) and validation (30%) subsets using stratified partitioning. Random Forest (RF) with 500 trees and Gradient Tree Boosting (GTB) with 100 trees were trained using identical samples and predictor variables. Classification performance was evaluated using confusion matrices, from which overall accuracy and the Kappa coefficient were calculated. Burned-area maps were generated, and burned areas were quantified in square kilometers.

Results and Discussion

Ecological conditions before and after wildfire

Pre-fire NDVI, NDMI, and NBR revealed pronounced spatial heterogeneity across Golestan Province. Dense Hyrcanian forests in the southern and eastern highlands contrasted with agricultural plains and sparsely vegetated areas in the north and west. Following the wildfire, affected forests, particularly in the eastern and southeastern sectors, exhibited reduced NDVI and NBR, indicating vegetation loss and altered surface reflectance. Lower NDMI values indicated reduced vegetation moisture. These spatial changes corresponded to burned patches mapped by both classifiers, especially in the forested highlands around Galikesh, Minudasht, and southern Kalaleh.

Spectral change analysis

The differential indices dNDVI, dNDMI, and dNBR captured the spatial distribution of changes in vegetation cover, moisture, and burn conditions. Higher values characterized affected forested areas, indicating reductions in the corresponding post-fire indices. Among these measures, dNBR showed the closest spatial correspondence with mapped burned patches. The overlapping patterns of all three indices supported discrimination of fire-affected forests from relatively unchanged land surfaces.

Complementary spectral indices

RBR and MIRBI highlighted fire-affected forests in southern and eastern Golestan, with spatial patterns corresponding to burned patches identified by RF and GTB. BSI provided complementary information on exposed soil associated with vegetation loss. These indices supported burned area discrimination, although similar spectral responses from naturally bare or sparsely vegetated surfaces required cautious interpretation across the heterogeneous landscape of the province.

Burned area mapping

Random Forest (RF) estimated a burned area of 39.92 km², whereas Gradient Tree Boosting (GTB) estimated 35.42 km². Both models identified broadly similar spatial patterns, with burned patches concentrated along the Hyrcanian forest belt and southern and eastern mountainous areas. Differences occurred mainly in scattered patches and transition zones between burned and unburned surfaces. The 4.50 km² difference may reflect variations in model learning and the assignment of pixels containing

mixtures of burned material, damaged vegetation, and exposed soil. Both classifications captured the overall spatial distribution of burned areas.

Accuracy assessment

Both models achieved an overall accuracy (OA) of 0.94 and a Kappa coefficient of 0.86 on the same validation samples. These results indicated substantial agreement between the classifications and manually labeled reference data. The matching aggregate scores showed comparable classification performance within the validation dataset, despite differences in the mapped burned area.

Conclusion

This study evaluated the use of Sentinel-2 imagery, spectral indices, and machine learning algorithms for mapping areas affected by vegetation fires in Golestan Province, Iran. Integrating pre- and post-fire spectral information within Google Earth Engine provided a practical approach to rapid burned area mapping. Changes in NDVI, NBR, and NDMI indicated vegetation degradation and moisture loss, particularly in the southern and eastern forested highlands. The differential indices dNDVI, dNDMI, and dNBR, together with RBR, MIRBI, and BSI, supported the identification of burned patches and associated changes in vegetation and exposed soil. Random Forest (RF) and Gradient Tree Boosting (GTB) estimated burned areas of 39.92 and 35.42 km², respectively. Both models achieved an overall accuracy of 0.94 and a Kappa coefficient of 0.86, indicating satisfactory agreement with the reference data. Their broadly consistent spatial patterns suggest that the selected spectral predictors captured the principal contrasts between burned and unburned land surfaces. Burned patches were concentrated along the eastern and southeastern Hyrcanian forest belt, particularly around Ramian, Azadshahr, Minudasht, Galikesh, and southern Kalaleh. Scattered patches also occurred around Aliabad Katul, southern Gorgan, and Kordkuy. This distribution was consistent with dense forest cover, mountainous terrain, and the availability of vegetation fuels. Nevertheless, the lack of extensive, independent field observations limited the assessment of burn severity and associated damage. Weather conditions, terrain effects, and spectral similarities between some unburned surfaces and burned areas may also influence detection accuracy. Future studies should examine the integration of optical and radar observations, additional ground reference data, and advanced deep learning methods to improve burned area discrimination. From a management perspective, the findings can support rapid wildfire monitoring, preliminary assessment of forest damage, prioritization of affected areas, and decision-making by natural resource and emergency management agencies in Golestan Province. These applications should be interpreted within the limitations of the available reference data and the environmental heterogeneity of the study area.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

محیط زیست طبیعی

انتشارات دانشگاه تهران

شاپای الکترونیکی: ۲۴۲۳-۷۸۱۷

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

آشکارسازی مناطق سوخته ناشی از آتش‌سوزی پوشش گیاهی با تلفیق شاخص‌های طیفی Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (مطالعهٔ استان گلستان)

صیاد اصغری سراسکانرود[۱]✉ | فاطمه صمدی شلوه علیا[۲] | سینا خون خام[۳] | بتول زینالی[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: s.asghari@uma.ac.ir

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: samadi.f.2019@gmail.com

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: sinakhonkham.rs@gmail.com

۴. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zeynali.b@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۷

کلیدواژه‌ها:

آتش‌سوزی پوشش گیاهی، آشکارسازی مناطق سوخته، سنجش از دور چندسنجنده، سنتینل-۲، گوگل ارث انجین.

چکیده

آتش‌سوزی پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین تهدیدات اکولوژیک است که می‌تواند ساختار پوشش گیاهی را تخریب کند، ویژگی‌های سطح زمین را تغییر دهد و پایداری اکوسیستم را کاهش دهد. هدف از این مطالعه شناسایی مناطق سوخته شدهٔ ناشی از آتش‌سوزی پوشش گیاهی در استان گلستان با استفاده از شاخص‌های طیفی تصاویر Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در محیط Google Earth Engine است. در این تحقیق تصاویر Sentinel-2 از دوره قبل از آتش‌سوزی (۱۵ سپتامبر تا ۱ نوامبر ۲۰۲۵) و دوره پس از آتش‌سوزی (۲۸ نوامبر تا ۱۶ دسامبر ۲۰۲۵) پس از حذف ابرها و پیکسل‌های نامعتبر با استفاده از لایهٔ SCL، اعمال تصحیح توپوگرافی و تهیهٔ ترکیب میانه مورد استفاده قرار گرفتند. برای به حداقل رساندن اثر بالقوهٔ پوشش برف از ماسکی براساس شاخص NDSI استفاده شد. سپس شاخص‌های NDVI، NBR و NDMI برای دوره‌های قبل و بعد از آتش‌سوزی استخراج و شاخص‌های تغییر dNDVI، dNDMI، dNBR و همچنین شاخص‌های RBR، MIRBI و BSI محاسبه شدند. داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی با استفاده از نمونه‌برداری دستی از منطقهٔ سوخته و نسوخته تهیه و به‌ترتیب در ۷۰ و ۳۰ درصد توزیع شدند. طبقه‌بندی مناطق سوخته با استفاده از الگوریتم‌های جنگل تصادفی (RF) با ۵۰۰ درخت و تقویت درخت گرادیان (GTB) با ۱۰۰ درخت انجام شد و عملکرد مدل‌ها از طریق ماتریس خطا، دقت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات طیفی و اکولوژیک در مناطق جنگلی جنوب و شرق استان، عمدتاً ارتفاعات هیرکانی و محدودهٔ شهرستان‌های گالیکش، مینودشت، رامیان، آزادشهر و بخش‌هایی از کلاله مشاهده شده است. علاوه بر این نقشه‌های به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های RF و GTB الگوی مکانی مشابهی از مناطق سوخته را نشان دادند. در نهایت مساحت مناطق سوخته استخراج‌شده توسط الگوریتم RF، ۳۹/۹۲ کیلومتر مربع و توسط الگوریتم GTB، ۳۵/۴۲ کیلومتر مربع تخمین زده شد. علاوه بر این ارزیابی دقت نشان داد که هر دو مدل دارای دقت کلی ۰/۹۴ و ضریب کاپا ۰/۸۶ هستند که نشان‌دهندهٔ توانایی کافی آنها در تفکیک مناطق سوخته و نسوخته است. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب شاخص‌های طیفی Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند رویکردی کارآمد برای پایش سریع تشخیص مناطق سوخته و پشتیبانی از مدیریت بحران آتش‌سوزی در مناطق جنگلی ارائه دهد.

استناد: اصغری سراسکانرود، صیاد؛ صمدی شلوه علیا، فاطمه؛ خون خام، سینا؛ و زینالی، بتول (۱۴۰۵). آشکارسازی مناطق سوخته ناشی از آتش‌سوزی پوشش گیاهی با تلفیق شاخص‌های طیفی Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (مطالعهٔ استان گلستان). *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۴)، ۷۰۱-۶۸۷.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.417872.2927

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

جنگل‌های جهان یکی از حیاتی‌ترین اجزای زیست‌کرهٔ زمینی را تشکیل می‌دهند و نقش اساسی در تنظیم چرخهٔ جهانی کربن، حفظ تنوع زیستی و تأمین خدمات اکوسیستمی ضروری دارند که جوامع انسانی به آن وابسته هستند (Chazdon *et al*., 2016). آتش‌سوزی‌های جنگلی یکی از مهم‌ترین بحران‌های محیط‌زیستی در جنگل‌های جهان هستند که مجموعهٔ وسیعی از بحران‌ها را در خود جای داده است. آتش‌سوزی که در تاریخ زمین‌شناسی اندکی پس از ظهور گیاهان خشکی‌زی ظاهر شد سالانه میلیون‌ها هکتار از مناطق جنگلی را از بین می‌برد و منجر به خسارات قابل‌توجه و اغلب جبران‌ناپذیری به اکوسیستم‌های زمین می‌شود. آتش‌سوزی بر الگوها و فرآیندهای اکوسیستم جهانی مانند توزیع و ساختار پوشش گیاهی، چرخهٔ کربن و آب و هوا تأثیر می‌گذارد (Bowman *et al*., 2009; Mahmoudi, 2023). در سطوح منطقه‌ای و محلی آتش‌سوزی‌ها پیامدهای اجتماعی–اقتصادی قابل‌توجهی بر جان و مال انسان‌ها دارند. در سال‌های اخیر شاهد فصل‌های فاجعه‌بار (تلفات بالای انسانی) بوده‌ایم که عمدتاً با امواج گرما و خشکسالی مرتبط هستند. یونان، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۸؛ استرالیا، ۲۰۰۹؛ روسیه، ۲۰۱۰؛ ایالات متحده، ۲۰۱۳، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸؛ کانادا، ۲۰۱۶؛ شیلی، ۲۰۱۷؛ و پرتغال، ۲۰۰۳، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۷، و سایر کشورها. آتش‌سوزی همچنین بر فرسایش خاک و چرخهٔ هیدرولوژیک تأثیر می‌گذارد. تنوع پیامدهای آتش‌سوزی مستلزم ارزیابی‌های جامع از آسیب‌پذیری در برابر آتش‌سوزی است که شامل تجزیه‌وتحلیل آسیب‌های احتمالی آتش‌سوزی به ارزش‌های اجتماعی و اکولوژیک و ادغام این آسیب‌ها در طول زمان با در نظر گرفتن فواصل بازسازی است (Chuvieco *et al*., 2019).

ایران یکی از کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا است که در معرض خطر بالای آتش‌سوزی جنگل‌ها قرار دارد. در شمال شرقی ایران آتش‌سوزی‌های جنگلی در سال‌های اخیر بیشتر شده است و این وضعیت نگران‌کننده است زیرا تعداد حوادث مشابه احتمال افزایش زیادی در آینده دارد. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۱۰ آتش‌سوزی‌های متناوب جنگلی بیش از ۱۶۰۰۰ هکتار از این مناطق را در کمتر از یک ماه سوزاند. علاوه بر این میانگین تعداد آتش‌سوزی‌ها در سال ۱۳۰ مورد و مساحت سوخته شده در سال به‌طور متوسط ۵۴۰۰ هکتار است. طبق گزارش‌ها بزرگترین آتش‌سوزی در سال ۱۹۹۳ رخ داد و ۳۳۰۰۰ هکتار از اراضی جنگلی را سوزاند. آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌عنوان یک خطر مکرر در استان گلستان به‌ویژه در پارک ملی گلستان در کوه‌های البرز در شمال شرقی ایران در نظر گرفته می‌شود. آتش‌سوزی‌ها معمولاً از مرداد تا پایان آذر به‌دلیل کاهش رطوبت و افزایش سرعت باد رخ می‌دهند. با این وجود آتش‌سوزی‌ها عمدتاً توسط انسان در این منطقه شعله‌ور می‌شوند. برخی از مناطق جنگلی استان گلستان در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش دما، کاهش بارندگی و افزایش خطر آتش‌سوزی با خسارت‌های ناشی از حریق مواجه شده‌اند. این عوامل ممکن است بر شدت، مساحت توزیع و الگوی مکانی آتش‌سوزی‌ها تأثیر بگذارند (Adab *et al*., 2013; Abdi *et al*., 2018).

از نظر تاریخی سازمان‌های دولتی وجود دارند که اطلاعات مربوط به آتش‌سوزی‌های گسترده را از تخمین‌های زمینی براساس گزارش‌های تیم‌های مدیریت آتش‌سوزی جمع‌آوری می‌کنند (Mouillot and Field, 2005). تفاوت در روش‌های مورد استفاده توسط کشورهای مختلف و ناپیوستگی در جمع‌آوری داده‌ها توسط سازمان‌های دولتی در طول سال امکان استفاده از آنها را در تجزیه و تحلیل‌های مربوط به مقیاس‌های منطقه‌ای، قاره‌ای یا جهانی غیرقابل اعتماد می‌کند. از زمان آغاز مشاهدات ماهواره‌ای از تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص آتش‌سوزی‌های گسترده به‌عنوان جایگزینی مناسب برای جمع‌آوری اطلاعات قابل اعتماد در مورد مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی استفاده شده است (Chuvieco *et al*., 2019). مطالعات اخیر با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و مقایسهٔ تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی توانسته‌اند شدت سوختگی را تخمین بزنند و نشان دهند که شاخص‌های طیفی در محدوده‌های لبهٔ قرمز برای تشخیص شدت سوختگی مناسب هستند. این مطالعات همچنین کارایی باندهای مختلف حسگر MSI در شناسایی مناطق سوخته را تأیید کرده و پتانسیل بالای این داده‌ها و نیاز به تحقیقات بیشتر برای توسعهٔ یک چارچوب سیستماتیک برای نقشه‌برداری از مناطق سوخته با استفاده از Sentinel-2، MSI را برجسته می‌کنند (Filipponi *et al*., 2018). محصولات آتش‌سوزی چند سالهٔ جهانی که از حسگرهای با وضوح متوسط مانند محصول منطقهٔ سوختهٔ MODIS با وضوح ۵۰۰ متر مشتق شده‌اند منبع مهمی از اطلاعات را برای جوامع کاربری متعدد درگیر در علم و کاربردهای آتش‌سوزی فراهم می‌کنند (Roy *et al*., 2019). با این حال چالش‌های متعددی وجود دارد که مانع از پذیرش فناوری‌های سنجش از دور

برای تجزیه‌وتحلیل آتش‌سوزی‌های جنگلی در مناطق وسیع می‌شود. یکی از این چالش‌ها لزوم پردازش حجم عظیمی از داده‌های RS (که اغلب شامل هزاران تصویر می‌شود) است. در این راستا تعدادی پلتفرم محاسبات ابری توسعه داده شده‌اند که یکی از پرکاربردترین آنها Google Earth Engine (GEE) است. این پلتفرم فرصتی بی‌نظیر برای انجام مطالعات تحقیقاتی رصد زمین (EO) فراهم کرده است. همچنین برای امکان ذخیره‌سازی، پردازش و نقشه‌برداری از داده‌های RS متنوع در مقیاس‌های مکانی متعدد طراحی شده است. GEE به‌دلیل ویژگی‌های پیشرفتهٔ کلیدی خود از جمله رایگان بودن، ارائهٔ پردازش پرسرعت بدون دانلود داده‌ها و کاربرپسند بودن به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه‌وتحلیل آتش‌سوزی‌های جنگلی و تحلیل روند مورد استفاده قرار گرفته است (Seydi *et al*., 2021).

پیشینهٔ تحقیق

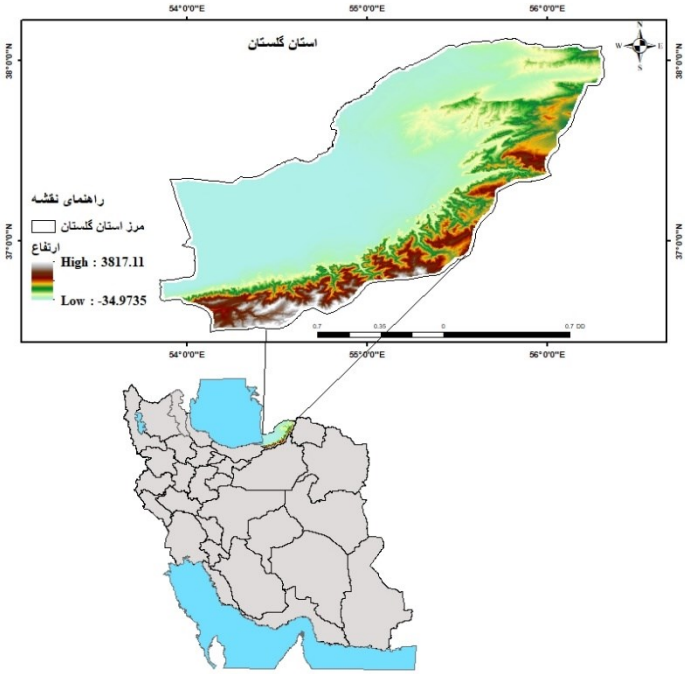
در مطالعات انجام‌شده در داخل کشور استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های طیفی برای بررسی آثار آتش‌سوزی، ارزیابی شدت سوختگی و تحلیل الگوی وقوع حریق در مناطق جنگلی ایران مورد توجه قرار گرفته است. Alhaji Khalaf و همکاران (۲۰۲۰) از داده‌های Sentinel-2 و Landsat-8 برای تخمین پتانسیل شاخص‌های طیفی برای پهنه‌بندی شدت آتش‌سوزی در جنگل عربداغ، استان گلستان استفاده کردند. شاخص‌های تک‌زمانه و دوزمانه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی استخراج و طبقه‌بندی شدند. نتایج مطالعه نشان داد که ترکیب باندهای NIR و SWIR2 بهترین عملکرد را از نظر تمایز مناطق سوخته براساس شدت آنها نشان می‌دهد. بهترین عملکرد نیز با استفاده از داده‌های Landsat-8 در حالت دوزمانه با ضریب کاپا ۰/۹۶ به‌دست آمد. Feizollahpour (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل شاخص NBR+ برای تحلیل طیفی آتش‌سوزی جنگل در مقایسه با سایر شاخص‌های طیفی انجام داد. برای این منظور از تصویر Sentinel-2 در منطقهٔ جنگلی نزدیک منطقهٔ سوختهٔ روستای بهارستان استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد که شاخص NBR+ به‌دلیل توانایی بالای آن در حذف اثر پوشش ابر و توده‌های آبی بر نتایج عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. علاوه بر این نتایج مطالعه مشخص کرد که استفاده از شاخص NBR+ در رویکرد تک زمانی (دو زمانی) با ضریب کاپا ۰/۹۲ بهترین عملکرد را در تشخیص مناطق سوخته ارائه می‌دهد و این موضوع با مقایسهٔ آن با سایر شاخص‌ها تأیید شد. Pichaghchi Bahrami و همکاران (۲۰۲۴) روند وقوع آتش‌سوزی و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی در استان مازندران را با استفاده از داده‌های سنجش از دور بررسی کردند. در این مطالعه، از داده‌های MODIS شامل شاخص‌های BRIGHT_T31 و FRP به‌همراه داده‌های هواشناسی روزانه در دورهٔ ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین وقوع آتش‌سوزی در مناطق شرقی استان و در ماه‌های گرم سال رخ داده است و دما با ضریب همبستگی ۰/۷۲ مهم‌ترین عامل اقلیمی مؤثر بر وقوع آتش‌سوزی بوده است. همچنین، آزمون پتیت وجود روند افزایشی در وقوع آتش‌سوزی از سال ۲۰۱۱ را تأیید کرد. این مطالعه بر نقش مؤثر شرایط اقلیمی در تغییر الگوی زمانی و مکانی آتش‌سوزی‌های جنگلی تأکید دارد. Hasanlu و همکاران (۲۰۲۶) روش‌های مختلف شناسایی مناطق سوخته را با استفاده از شاخص‌های طیفی و تصاویر Sentinel-2 در آتش‌سوزی کنت در لس‌آنجلس مقایسه کردند. در این مطالعه، از باندهای طیفی و شاخص‌های مربوط به سوختگی، پوشش گیاهی و رطوبت به‌عنوان ورودی مدل‌های آماری، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی با دقت کلی حدود ۹۹/۶۷ و کمترین خطای طبقه‌بندی، بهترین عملکرد را در بین مدل‌های یادگیری ماشین داشته است در حالی‌که مدل‌های CNN و MLP نیز نتایج بسیار نزدیکی ارائه داده‌اند. این مطالعه بر برتری روش‌های یادگیری ماشین و ادغام شاخص‌های طیفی در بهبود دقت نقشه‌برداری از مناطق سوخته تأکید دارد.

در مطالعات خارجی نیز پژوهش‌های متعددی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و روش‌های مختلف پردازش و طبقه‌بندی به آشکارسازی و پایش مناطق سوخته پرداخته‌اند. Filipponi (۲۰۱۹) امکان‌سنجی استفاده از سری‌های زمانی Sentinel-2 از مناطق سوخته را در مقیاس ملی با تمرکز بر آتش‌سوزی‌های جنگلی سال ۲۰۱۷ در ایتالیا بررسی کرد. در این مطالعه روشی مبتنی بر آستانه‌گذاری و تشخیص تغییرات ناگهانی برای شناسایی اثرات آتش‌سوزی با استفاده از شاخص‌های طیفی چندزمانه توسعه داده شد. نتایج نشان داد که این روش قادر به استخراج مناطق سوخته بدون نیاز به اطلاعات قبلی در مورد وقوع آتش‌سوزی است. ارزیابی دقت همچنین خطای کمیسیون حدود ۲۵٪ و خطای حذف حدود ۴۰٪ را نشان داد که قدرت بالای Sentinel-2 را در

پایش عملیاتی آتش‌سوزی برجسته می‌کند. Seydi و همکاران (۲۰۲۱) خسارات ناشی از آتش‌سوزی‌های جنگلی در استرالیا را با استفاده از تصاویر Sentinel-2 و محصولات پوشش زمین MODIS در پلتفرم Google Earth Engine ارزیابی کردند. در این مطالعه چارچوبی مبتنی بر تحلیل تغییرات برای استخراج مناطق سوخته و طبقه‌بندی آنها توسعه داده شد. نتایج نشان داد که این روش عملکرد خوبی در شناسایی مناطق سوخته با دقت کلی ۰/۹۱درصد و ضریب کاپا ۰/۸۲ نشان می‌دهد که اثربخشی ترکیب Sentinel-2، MODIS و GEE را برجسته می‌کند. Jimenez و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات الگوی آتش‌سوزی در شرق اوکراین را طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های MODIS و Sentinel-2 بررسی کردند.

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینهٔ تشخیص مناطق سوخته با استفاده از داده‌های سنجش از دور هنوز چالش‌هایی از جمله جداسازی دقیق مناطق سوخته از مناطقی با پاسخ طیفی مشابه، وابستگی نتایج به نوع داده و شاخص مورد استفاده و نیاز به توسعهٔ روش‌های خودکار که بتوانند در مقیاس منطقه‌ای اعمال شوند، وجود دارد. بسیاری از مطالعات قبلی بر استفاده از یک یا تعداد محدودی از شاخص‌های طیفی، داده‌های چند حسگری یا محصولات آماده مناطق سوخته متمرکز بوده‌اند. در حالی‌که استفادهٔ همزمان از مجموعه‌ای از شاخص‌های تغییر طیفی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند توانایی تشخیص مناطق سوخته و نسوخته را بهبود بخشد. همچنین با توجه به اهمیت جنگل‌های هیرکانی استان گلستان و وقوع مکرر آتش‌سوزی در این منطقه نیاز به توسعهٔ چارچوبی مبتنی بر داده‌ها با وضوح مکانی مناسب و قابلیت پردازش سریع وجود دارد. بنابراین مطالعهٔ حاضر با هدف تشخیص مناطق سوختهٔ ناشی از آتش‌سوزی پوشش گیاهی در استان گلستان با ترکیب شاخص‌های طیفی استخراج شده از تصاویر Sentinel-2 و الگوریتم‌های Random Forest و Gradient Tree Boosting در محیط Google Earth Engine انجام شد.

استان گلستان با مساحتی حدود ۷/۲۰۴۶۰ کیلومتر مربع نزدیک به ۳۳/۱ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد که حدود ۴۰ درصد آن نواحی دشتی و مابقی را مناطق کوهستان تشکیل می‌دهد. این استان از نظر موقعیت جغرافیایی در محدودهٔ عرض ′۲۴ °۳۶ تا ′۰۵ °۳۸ شمالی و ′۵۱ °۵۳ تا ′۱۴ °۵۶ طول شرقی قرارگرفته است. از شمال با کشور ترکمنستان از جنوب با استان سمنان از شرق با استان خراسان شمالی و از غرب با دریای خزر و استان مازندران هم مرز است. ارتفاع استان از حدود ۲۶- متر در نواحی ساحل دریای مازندران تا حدود ۲۵۰۰ متر در ارتفاعات جنوبی متغیر است (Aghajan Liafo *et al*., 2025). این استان به سه ناحیهٔ جلگه‌ای کوهپایه‌ای و کوهستانی تقسیم شده و دارای تنوع اقلیمی از خشک و نیمه‌خشک تا معتدل کوهستانی است. میانگین بارش سالانه در سطح استان حدود ۴۵۰ میلی‌متر برآورد می‌شود. درحالی‌که این مقدار در نواحی شمالی به کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. همچنین میانگین تبخیر سالانه در ارتفاعات و بخش‌های جنوبی حدود ۸۰۰ میلی‌متر و در مناطق شمالی تا حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر نیز افزایش می‌یابد Jahani and Delbari, 2009). حجم کل منابع آب سطحی و زیرزمینی استان بیش از ۲۴۰۰ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود. که از این مقدار حدود ۵۲ درصد به آب‌های سطحی و ۴۸ درصد به آب‌های زیرزمینی اختصاص دارد. آب‌های سطحی در قالب بیش از ۴۰ شاخه رودخانه‌ای جریان دارند. که عمدتاً دارای جهت جریان جنوب به شمال و شرق به غرب هستند. رود اترک گرگان رود و رود قره‌سو سه رود از مهم‌ترین رودحانه های استان گلستان محسوب می‌شوند (Yalghi and Mohammadi, 2026). سطح جنگل‌های طبیعی استان گلستان حدود ۳۷۹ هزار هکتار و مساحت مراتع آن نیز بیش از ۱۱۲۶ هزار هکتار برآورد می‌شود. جنگل‌های این استان بخشی از جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شوند که از آستارا در غرب تا گلیداغ در شمال شرق استان گلستان گسترش یافته‌اند(شکل۱) (Ahmadi *et al*., 2025).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه
Figure 1. Location of the study area

روش‌شناسی پژوهش

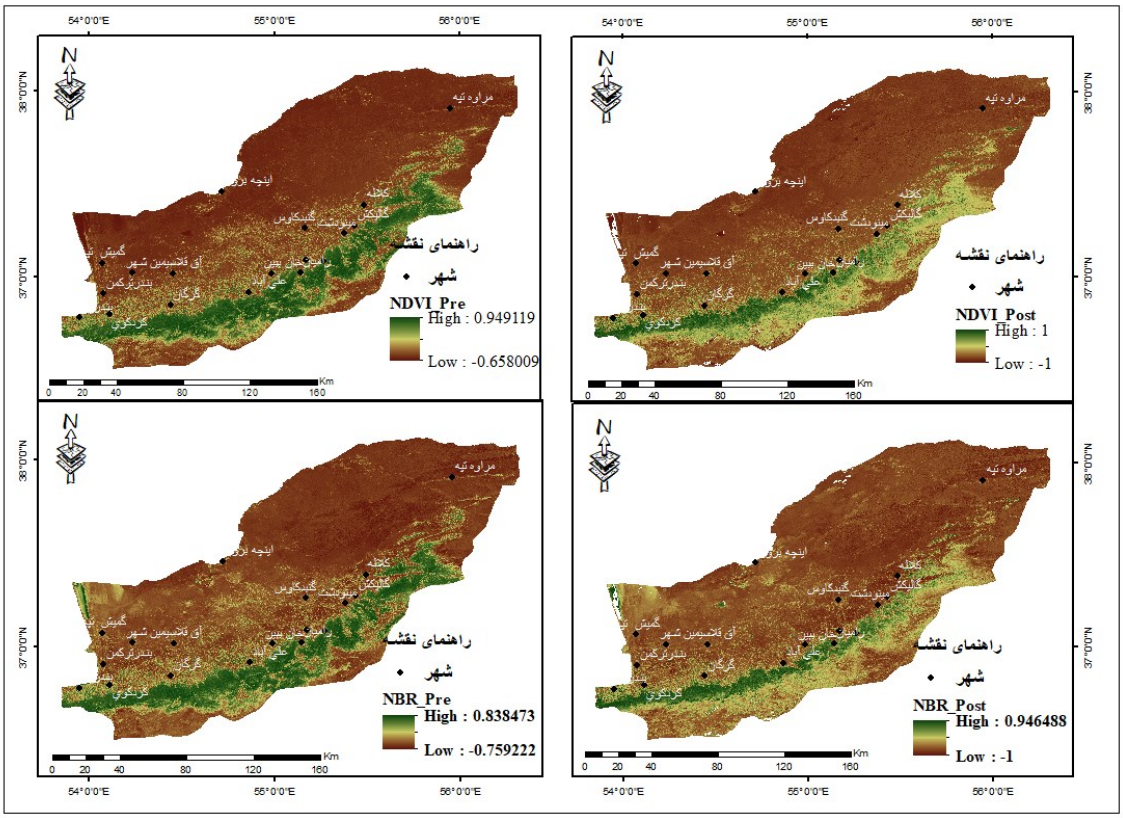
مطالعهٔ حاضر به‌منظور تعیین محدودهٔ سوخته شده در رویداد آتش‌سوزی ۱۴۰۴ در استان گلستان با استفاده از تصاویر Sentinel-2 در دورهٔ پیش از آتش (۱۵ سپتامبر تا ۱ نوامبر۲۰۲۵) و پس از آتش‌سوزی (۲۸ نوامبر تا ۱۶ دسامبر۲۰۲۵) با الگوریتم‌های جنگل تصادفی(RF) و تقویت درخت گرادیان (GTB) در محیط Google Earth Engine انجام شد. پس از فیلتر ابر و حذف پیکسل‌های نامعتبر با استفاده از لایهٔ SCL، تصحیح توپوگرافی اعمال شد و برای تصویر هر دوره ترکیب میانه تهیه شد. علاوه بر این اعمال ماسک مبتنی بر NDSI برای به‌حداقل رساندن اثرات پوشش برف احتمالی انجام شد. سپس شاخص‌های NBR، NDVI و NDMI را برای هر دو دورهٔ قبل و بعد از آتش‌سوزی استخراج و شاخص‌های تغییر dNBR، dNDVI، dNDMI و شاخص‌های MIRBI، BSI و RBR محاسبه شدند. داده‌های مرجع از طریق نمونه‌برداری دستی مناطق سوخته و نسوخته تولید شدند. تصاویر Landsat 8-9 به‌عنوان اطلاعات کمی برای کنترل مکانی وقوع آتش‌سوزی و تفسیر بصری منطقهٔ سوخته شده استفاده شدند. نمونه‌ها به‌صورت طبقه‌بندی شده به مجموعه‌های آموزش ۷۰ درصد/اعتبارسنجی ۳۰ درصد تقسیم شدند. در این مطالعه از الگوریتم RF با ۵۰۰ درخت و الگوریتم GTB با ۱۰۰ درخت استفاده کردند. هر دو الگوریتم با استفاده از نمونه‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌های یکسان آموزش دیده‌اند. با استفاده از ماتریس خطا، دقت کلی و ضریب کاپا محاسبه شدند. در نهایت نقشه‌های مناطق سوخته تولید و مساحت آنها به کیلومتر مربع محاسبه شد.

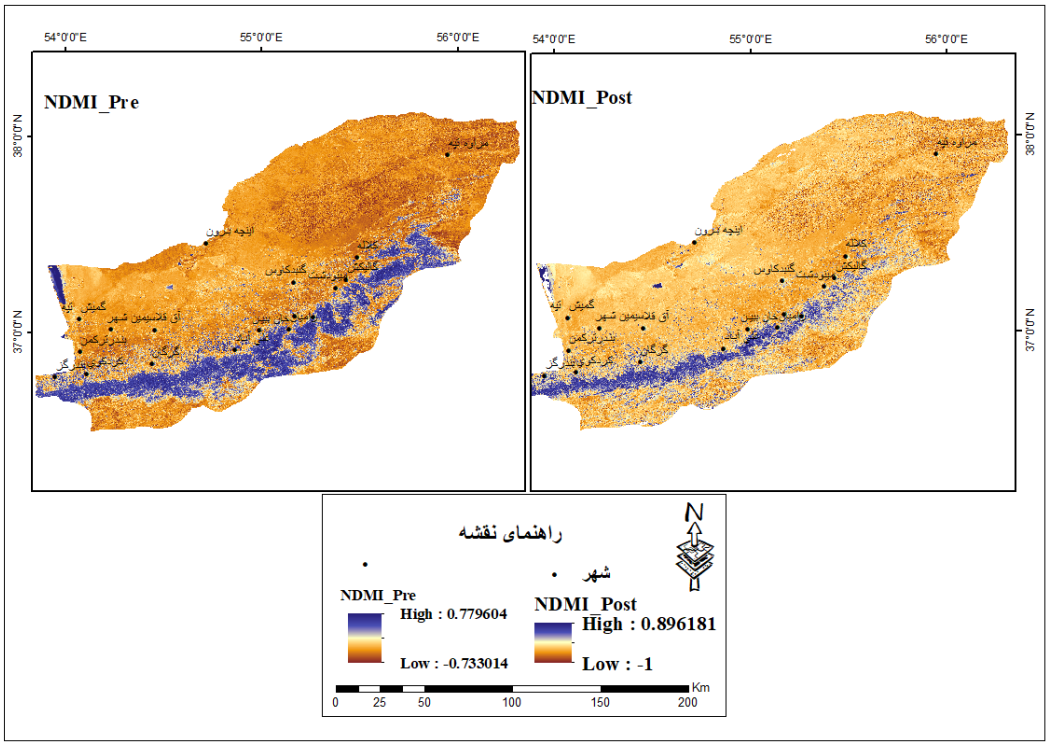
یافته‌های پژوهش و بحث

شاخص‌های اکولوژیک قبل و بعد از آتش‌سوزی: تجزیه‌وتحلیل نتایج شاخص‌های NDVI، NDMI و NBR قبل و بعد از آتش‌سوزی (شکل۲) نشان می‌دهد که ماهیت تغییرات اکولوژیک تا حد زیادی به ناهمگونی پوشش زمین و شرایط طبیعی در استان گلستان بستگی دارد. بخش‌های شمالی و غربی استان تحت سلطه دشت‌ها، زمین‌های کشاورزی و مناطق با پوشش گیاهی کم هستند. درحالی‌که جنوب و شرق استان (به‌دلیل قرار گرفتن ارتفاعات البرز شرقی) تحت سلطهٔ جنگل‌های انبوه هیرکانی است و از این‌رو پاسخ طیفی شاخص‌ها بسته به موقعیت مکانی در استان متفاوت است.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که بالاترین مقادیر شاخص NDVI در دورهٔ قبل از آتش‌سوزی در مناطق جنگلی جنوب و شرق استان مشاهده شده که نشان‌دهندهٔ تراکم بالای پوشش گیاهی است. این الگو به‌ویژه در محدوده‌های جنوبی شهرستان‌های کردکوی، گرگان، علی‌آباد کتول، رامیان، آزادشهر، مینودشت، گالیکش و بخش‌هایی از جنوب کلاله قابل مشاهده است. پس از آتش‌سوزی مقادیر NDVI در مناطق جنگلی آسیب‌دیده به‌ویژه در شرق و جنوب شرقی استان کاهش یافته است که نشان‌دهندهٔ کاهش پوشش گیاهی زنده و تخریب ساختار پوشش گیاهی است. الگوی تغییرات NBR نیز مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ کاهش مقادیر این شاخص در مناطق سوخته است. این کاهش به‌دلیل کاهش بازتاب باند NIR به‌دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی و افزایش بازتاب SWIR به‌دلیل وجود خاک در معرض دید و مواد سوخته شده است. بیشترین تغییرات NBR در امتداد مناطق جنگلی شهرستان‌های گالیکش، مینودشت و بخش‌های جنوبی کلاله مشاهده شد. علاوه بر این، شاخص NDMI نشان‌دهندهٔ کاهش رطوبت پوشش گیاهی در مناطق آسیب‌دیده است. تغییرات در این شاخص و همچنین شاخص‌های NDVI و NBR تأیید می‌کند که مناطق سوختهٔ شناسایی‌شده (۳۹/۹۲ کیلومتر مربع توسط الگوریتم RF و ۳۵/۴۲ کیلومتر مربع توسط الگوریتم GBT) عمدتاً در اراضی جنگلی و مناطق کوهستانی در شرق و جنوب شرقی منطقهٔ مورد مطالعه متمرکز بوده‌اند. بنابراین این داده‌ها نشان‌دهندهٔ اثربخشی شاخص‌های طیفی Sentinel-2 در تشخیص تأثیر آتش‌سوزی پوشش گیاهی هستند.

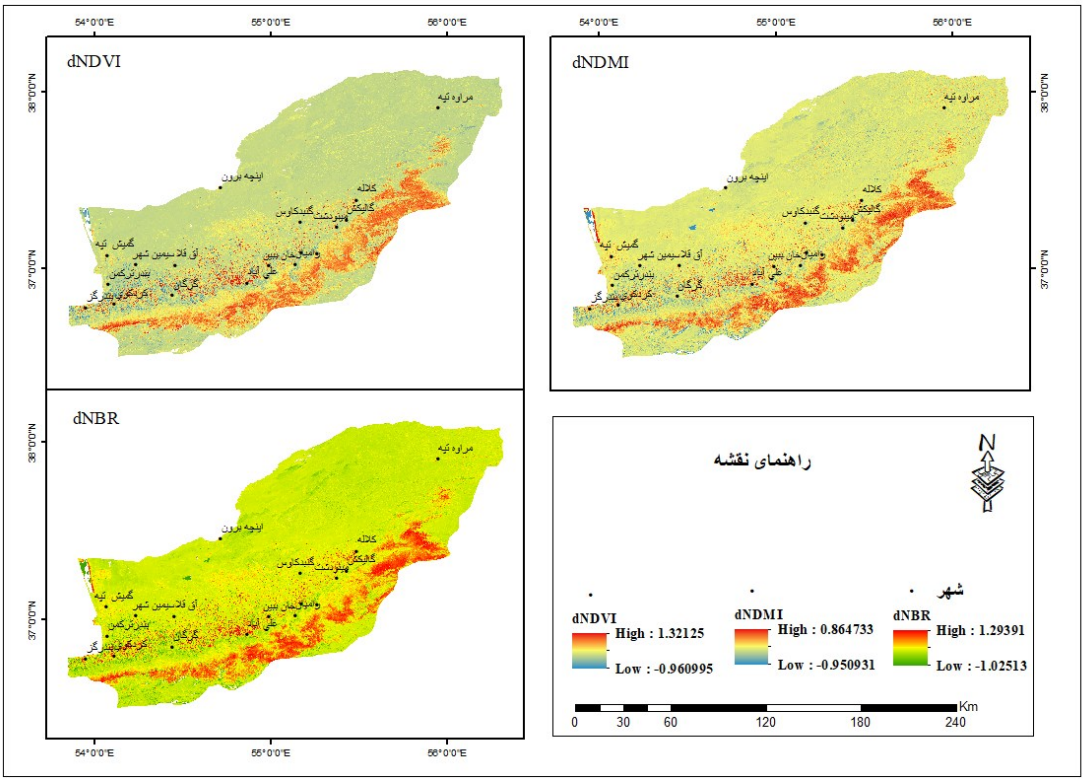
تحلیل تغییرات طیفی ناشی از آتش‌سوزی: نتایج شاخص‌های تفاضلی dNDVI، dNDMI و dNBR (شکل ۳) الگوی مکانی تغییرات پوشش گیاهی، رطوبت و شرایط سوختگی ناشی از آتش‌سوزی در استان گلستان را نشان داد. توزیع مکانی مقادیر بالای این شاخص‌ها عمدتاً در مناطق جنگلی جنوب و شرق استان به‌ویژه در امتداد ارتفاعات هیرکانی و محدودهٔ شهرستان‌های گالیکش، مینودشت و بخش‌های جنوبی کلاله مشاهده شد در حالی‌که لکه‌های پراکنده‌ای از تغییرات در ارتفاعات شهرستان‌های رامیان ، آزادشهر و علی‌آباد نیز قابل مشاهده است که با مناطقی که توسط مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان نقاط سوختهٔ شناسایی شده‌اند مطابقت داشتند.





شکل ۲- تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI)، سوختگی (NBR) و رطوبت پوشش گیاهی (NDMI) قبل و بعد از آتش‌سوزی در استان گلستان

Figure 2. Pre- and post-fire variations in the normalized difference vegetation index (NDVI), normalized burn ratio (NBR), and normalized difference moisture index (NDMI) in Golestan Province

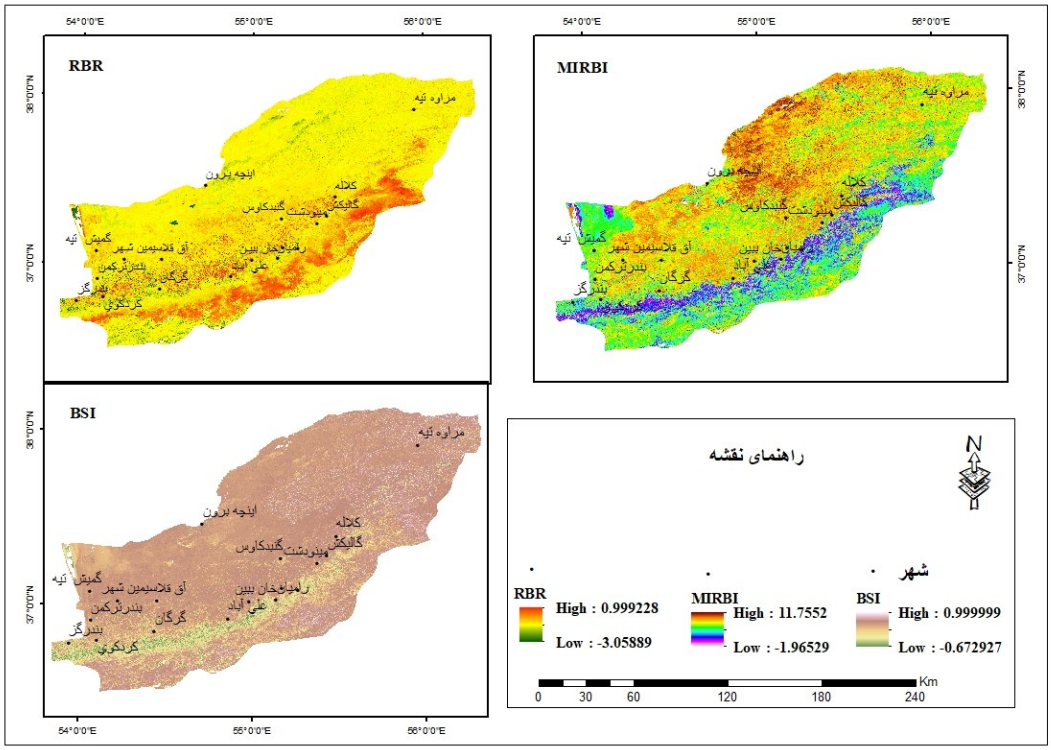


شکل ۳- توزیع مکانی شاخص‌های تغییر طیفی ناشی از آتش‌سوزی (dNDVI، dNDMI و dNBR) در استان گلستان

Figure 3. Spatial distribution of fire-induced spectral change indices (dNDVI, dNDMI, and dNBR) in Golestan Province

شاخص dNDVI کاهش میزان پوشش گیاهی را در نتیجه آتش‌سوزی نشان داد. مقادیر بالای این شاخص در مناطقی با پوشش جنگلی متراکم، نشان‌دهندهٔ کاهش قابل‌توجه فعالیت فتوسنتزی و تخریب پوشش گیاهی در اثر آتش‌سوزی است. در همین حال، مقادیر منفی یا پایین در مناطقی یافت شد که تغییر کمی در پوشش گیاهی وجود داشت یا هیچ تغییری ایجاد نشده بود یا آتش‌سوزی سطح زمین را تحت تأثیر قرار نداده بود. الگوی مکانی dNDMI نشان‌دهندهٔ کاهش رطوبت پوشش گیاهی در مناطق سوخته است. در مقابل، افزایش مقادیر این شاخص در مناطق آسیب‌دیده نشان‌دهندهٔ کاهش رطوبت گیاهان و تغییرات در وضعیت فیزیولوژیک پوشش گیاهی در نتیجه آتش‌سوزی است. شاخص dNBR همچنین بیشترین تطابق را با الگوی مکانی مناطق سوخته نشان داد. مقدار بالای dNBR در مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی ناشی از کاهش قابل‌توجه بازتاب باند مادون قرمز نزدیک (NIR) به‌دلیل تخریب پوشش گیاهی و افزایش مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) به‌دلیل تشکیل خاکستر و مواد سوخته است. به‌همین دلیل dNBR به‌عنوان یکی از شاخص‌های استاندارد و حساس برای تشخیص تغییرات ناشی از آتش‌سوزی توانست مرز بین مناطق آسیب‌دیده و بدون تغییر را به خوبی تشخیص دهد. به‌طور کلی همپوشانی الگوی مکانی dNDVI، dNDMI و dNBR با مناطق سوخته استخراج شده توسط الگوریتم RF و GTB نشان می‌دهد که تغییرات طیفی ناشی از آتش‌سوزی عمدتاً در مناطقی با پوشش جنگلی رخ داده است. این نتایج تأیید می‌کند که شاخص‌های تغییر طیفی Sentinel-2 توانایی خوبی در تشخیص اثرات اکولوژیک آتش‌سوزی و تمایز مناطق آسیب‌دیده از سایر سطوح زمین دارند.

بررسی شاخص های طیفی برای تفکیک مناطق سوخته: نتایج شاخص‌های طیفی مکمل RBR، MIRBI و BSI (شکل ۴) نشان داد که پاسخ طیفی مناطق سوخته شده در استان گلستان الگوی مکانی مشخصی دارد و بیشترین تغییرات در مناطق جنگلی جنوب و شرق استان مشاهده می‌شود. شاخص RBR با دامنهٔ تغییرات ۳/۰۵- تا ۰/۹۹ توانست مناطقی با تغییرات شدید ناشی از آتش‌سوزی را شناسایی کند. مقادیر بالاتر این شاخص عمدتاً در امتداد ارتفاعات جنگل‌های هیرکانی به ویژه در مجاورت شهرستان‌های علی‌آباد کتول، رامیان، آزادشهر، مینودشت، گالیکش و بخش‌های جنوبی کلاله مشاهده شد که با لکه‌های سوخته استخراج شده توسط الگوریتم‌های RF و GTB مطابقت دارد.

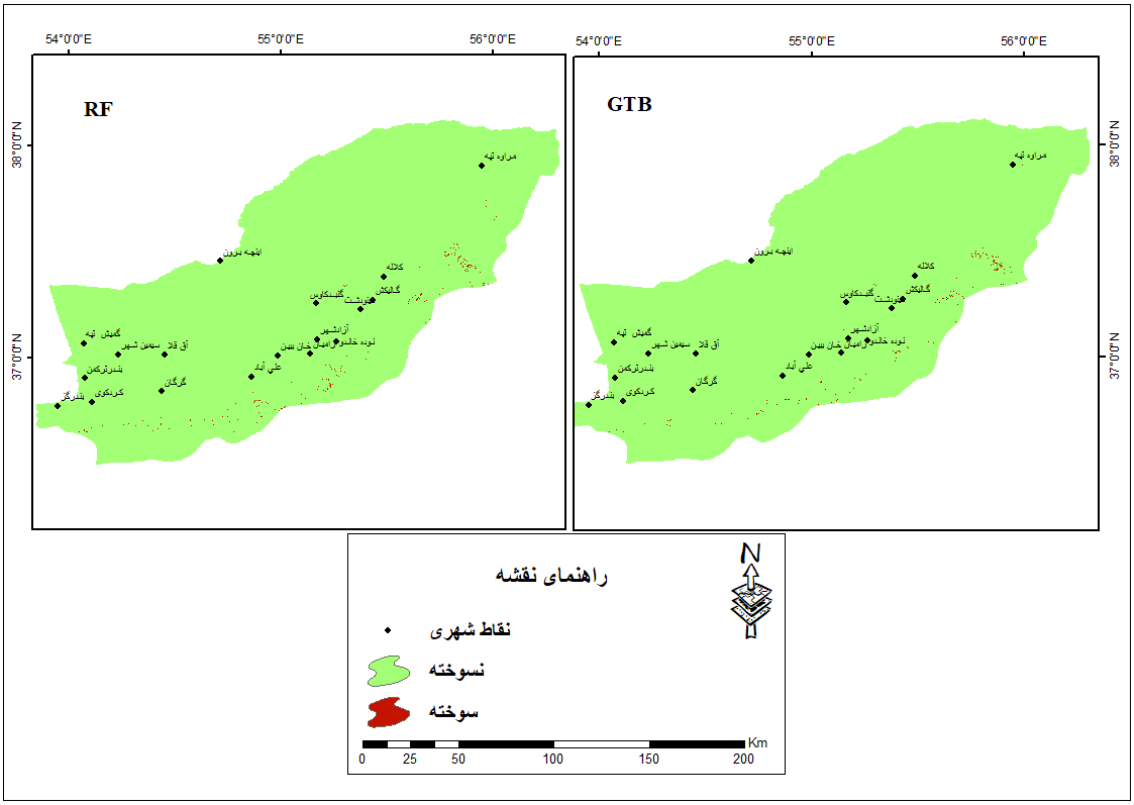


شکل ٤- توزیع مکانی شاخص‌های طیفی مکمل پس از آتش‌سوزی (RBR، MIRBI و BSI) در استان گلستان

Figure 4. Spatial distribution of complementary post-fire spectral indices (RBR, MIRBI, and BAI) in Golestan Province

شاخص MIRBI نیز به‌دلیل حساسیت به مواد سوخته، خاکستر و تغییرات در بازتاب پوشش گیاهی توانست مناطق سوخته و نسوخته را شناسایی کند. در واقع اکثر مقادیر بالای این شاخص در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی استان جایی که مناطق جنگلی با آسیب آتش‌سوزی قرار داشتند شناسایی شد. در مقابل بخش‌های شمالی، مرکزی و غربی منطقه که عمدتاً زمین‌های کشاورزی و باز هستند الگوی متفاوتی را نشان دادند. علاوه بر این، برخی از لکه‌های آسیب‌دیده در نقشهٔ شاخص BSI نیز قابل مشاهده بودند. این شاخص برای برجسته‌سازی خاک لخت به‌کار می‌رود. از این‌رو، مقادیر بالاتر آن در این لکه‌ها می‌تواند با کاهش پوشش گیاهی و افزایش سهم خاک آشکارشده پس از آتش‌سوزی مرتبط باشد. با این حال مقادیر بالای BSI به‌تنهایی نشان‌دهندهٔ افزایش مواد سوخته یا شدت سوختگی نیستند. به‌طور کلی همخوانی مکانی سه شاخص RBR، MIRBI و BSI با مناطق سوخته شناسایی شده نشان داد که استفادهٔ ترکیبی از شاخص‌های مربوط به تغییرات پوشش گیاهی، پاسخ طیفی سطوح سوخته و آشکارشدن خاک می‌تواند به تفکیک مناطق آسیب‌دیده کمک کند. با توجه به ناهمگونی پوشش زمین در استان گلستان تفسیر این شاخص‌ها باید با احتیاط انجام شود. زیرا اراضی کشاورزی، خاک‌های لخت و سطوح کم‌پوشش نیز ممکن است پاسخ‌های طیفی مشابهی ایجاد کنند. بنابراین تفسیر BSI باید همراه با شاخص‌های تغییر طیفی و شواهد مکانی وقوع آتش‌سوزی انجام شود.

تهیهٔ نقشهٔ مناطق سوخته با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین: نتایج طبقه‌بندی تصاویر Sentinel-2 با استفاده از دو الگوریتم جنگل تصادفی (RF) و تقویت درخت گرادیان (GTB) نشان داد که هر دو عملکرد خوبی در تشخیص مناطق سوخته از مناطق نسوخته در منطقهٔ مورد مطالعه دارند. نقشه‌های حاصل از تولید با استفاده از دو الگوریتم در شکل ۵ ارائه شده است. مقایسهٔ مکانی نقشه‌های حاصل از دو الگوریتم نشان داد که اکثر لکه‌های سوختهٔ یافت‌شده توسط هر دو الگوریتم دارای ساختار مکانی مشابهی هستند و تفاوت‌ها در برخی از مناطق پراکنده و پیکسل‌های واقع در مناطق انتقالی بین مناطق سوخته و نسوخته مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که ترکیب باندهای طیفی Sentinel-2 و شاخص‌های تغییر طیفی مورد استفاده اطلاعات کافی برای تشخیص اثرات آتش‌سوزی را فراهم کرده است.



شکل ۵- مقایسهٔ مکانی نتایج طبقه‌بندی مناطق سوخته با استفاده از RF و GTB

Figure 5. Spatial comparison of burned area classification results obtained using RF and GTB

بررسی الگوی مکانی مناطق سوختهٔ استخراج شده نشان داد که لکه‌های سوخته عمدتاً در مناطق جنگلی و ارتفاعات کوهستانی جنوب و شرقی استان گلستان پراکنده هستند. بیشترین تراکم لکه‌های سوخته در مناطق نوار جنگلی هیرکانی و مجاورت محدودهٔ جنوب کردکوی، جنوب گرگان، علی‌آباد کتول، آزادشهر، رامیان، مینودشت، گالیکش و بخش‌هایی از جنوب کلاله مشاهده می‌شود. این لکه‌ها عمدتاً شامل مناطق طبیعی مجاور سکونتگاه‌ها می‌شوند. توزیع مکانی مناطق سوخته با ویژگی‌های محیطی منطقه از جمله پوشش جنگلی متراکم، توپوگرافی کوهستانی و وجود سوخت‌های گیاهی سازگار است. در مقابل دشت‌های شمالی و شمال غربی استان که عمدتاً زمین‌های کشاورزی و باز هستند تراکم قابل‌توجهی کمتری از مناطق سوخته را نشان دادند.

مساحت مناطق سوختهٔ استخراج شده با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ۳۹/۹۲ کیلومتر مربع و با استفاده از الگوریتم تقویت درخت گرادیان ۳۵/۴۲ کیلومتر مربع بود (جدول ۱). تفاوت مشاهده شده در مساحت استخراج شده توسط دو الگوریتم ممکن است به ساختار یادگیری متفاوت مدل‌ها، حساسیت آنها به الگوهای طیفی و نحوهٔ تخصیص پیکسل‌ها با شرایط طیفی مشابه نسبت داده شود. در مناطقی که تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند تغییرات در شدت آسیب پوشش گیاهی، ترکیب بازتاب طیفی سطوح سوخته، پوشش گیاهی آسیب‌دیده، خاک لخت و سایر ویژگی‌های سطح زمین می‌تواند منجر به تفاوت در تصمیم‌گیری الگوریتم‌ها در پیکسل‌های مرزی شود. بنابراین تفاوت در مساحت بین دو مدل نشان‌دهندهٔ تفاوت در روش‌های تعمیم الگوهای طیفی آموخته‌شده در سطح منطقه‌ای است. با توجه به تفاوت محدود بین نتایج دو مدل هر دو الگوریتم توانستند الگوی کلی توزیع مناطق سوخته در استان گلستان را به شیوه‌ای مشابه شناسایی کنند.

جدول ۱- مقایسهٔ کمی مساحت مناطق سوخته براساس دو الگوریتم یادگیری ماشین

Table 1. Quantitative comparison of burned area estimates obtained using two machine learning algorithms

Gradient Tree Boosting	Random Forest
35.42	39.92

ارزیابی دقت و اعتبارسنجی: نتایج ارزیابی دقت نشان داد که هر دو الگوریتم مناطق سوخته و نسوخته را به‌طور مناسب طبقه بندی کرده اند. با توجه به جدول ۲ صحت کلی برای هر دو مدل ۰/۹۴ و ضریب کاپا ۰/۸۶ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که سطح قابل‌توجهی از توافق بین داده‌های مرجع و طبقه‌بندی شده وجود دارد.

جدول ۲- مقایسهٔ دقت طبقه‌بندی RF و GTB در آشکارسازی مناطق سوخته

Table 2. Comparison of RF and GTB classification accuracy for burned area detection

الگوریتم‌های طبقه‌بندی	صحت کلی	ضریب کاپا
Random Forest	0.94	0.86
Gradient Tree Boosting	0.94	0.86

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور شناسایی مناطق سوخته شدهٔ ناشی از آتش‌سوزی پوشش گیاهی استان گلستان با استفاده از تصاویر Sentinel-2، شاخص‌های طیفی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی (RF) و تقویت درخت گرادیان (GTB) بررسی شدند. نتایج نشان داد که ترکیب اطلاعات طیفی قبل و بعد از آتش‌سوزی در محیط Google Earth Engine می‌تواند روشی مناسب برای پایش سریع و نقشه‌برداری از مناطق آسیب‌دیده باشد. تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های NDVI، NBR و NDMI نشان داد که بیشترین تغییرات اکولوژیک در مناطق جنگلی جنوب و شرق استان به‌ویژه در ارتفاعات هیرکانی و مناطق گالیکش، مینودشت و بخش‌هایی از کلاله رخ داده است. علاوه بر این شاخص‌های تفاضلی dNDVI، dNDMI و dNBR و شاخص‌های مکمل RBR، MIRBI و BSI توانستند الگوی تخریب پوشش گیاهی و مناطق سوخته شده را به‌خوبی شناسایی کنند. نتایج طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم‌های RF و GTB نشان داد که هر دو مدل توانایی خوبی در تفکیک مناطق سوخته و نسوخته دارند. مساحت مناطق سوختهٔ استخراج شده با RF ۳۹/۹۲ کیلومتر مربع و با GTB ۳۵/۴۲ کیلومتر مربع تخمین زده شد. علاوه بر

این نتایج اعتبارسنجی با دقت کلی ۰/۹۴ و ضریب کاپا ۰/۸۶ نشان‌دهندهٔ قابلیت اطمینان مناسب مدل‌ها در تشخیص مناطق سوخته بود. الگوی مکانی مناطق سوخته نشان داد که بیشترین تمرکز لکه‌های سوخته در کمربند جنگلی هیرکانی شرق و جنوب شرقی استان به‌ویژه در محدودهٔ شهرستان‌های رامیان، آزادشهر، مینودشت، گالیکش و بخش‌هایی از جنوب کلاله قرار دارد. همچنین لکه‌های پراکنده‌ای در مناطق جنگلی علی‌آباد کتول، جنوب گرگان و کردکوی مشاهده شد. این الگو با ویژگی‌های محیطی منطقه از جمله تراکم پوشش جنگلی، شرایط کوهستانی و وجود سوخت‌های گیاهی مطابقت دارد. با وجود نتایج مطلوب یکی از محدودیت‌های این مطالعه فقدان داده‌های میدانی گسترده و مستقل برای ارزیابی دقیق شدت و خسارت سوختگی است. همچنین شرایط آب و هوایی، ناهمواری و اثرات توپوگرافی و احتمال شباهت طیفی برخی از سطوح نسوخته با مناطق سوخته می‌تواند بر دقت تشخیص تأثیر بگذارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از ترکیبی از داده‌های اپتیکی و راداری، داده‌های زمینی بیشتر و روش‌های پیشرفته یادگیری عمیق برای افزایش دقت تشخیص مناطق سوخته استفاده شود. از نظر کاربرد مدیریتی، نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پایش سریع آتش‌سوزی، ارزیابی خسارت پوشش جنگلی، اولویت‌بندی مناطق بحرانی و پشتیبانی تصمیم‌گیری برای سازمان‌های مسئول منابع طبیعی و مدیریت بحران در استان گلستان مورد استفاده قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Abdi, O., Kamkar, B., Shirvani, Z., Teixeira da Silva, J.A., Buchroithner, M.F., 2018. Spatial-statistical analysis of factors determining forest fires: A case study from Golestan, Northeast Iran. Geomatics, Natural Hazards and Risk 9(1), 267-280.

Adab, H., Kanniah, K.D., Solaimani, K., 2013. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. Natural Hazards 65(3), 1723-1743.

Aghajan Liafo, A., Farrokhandeh, M., Javid, M., Javaneh, M., Mojahjedost, M., Nazarnejad, P., 2025. Validation of rainfall estimation methods in Golestan Province. Journal of Rainwater Catchment Systems 13(1), 1-16. (In Persian)

Ahmadi, A., Bayat, M., Shabani, S., Zavar, S., Moslehi, M., Taheri, S., Parsaei, L., 2025. Artificial plantations in western Golestan Province forests: current status, existing challenges, and improvement suggestions. Ecology of Iran's Forests 13(1), 1-13 (In Persian)

Alhaji Khalaf, M., Mohammadvasegh, M., Shataei, S., Shabani, S., Jahdi, R., 2020. Assessment and sensitivity analysis of satellite spectral indices for burn severity mapping in forested areas (Case study: Arab Dagh forests, Golestan Province). Journal of Forest and Wood Products 73(1), 97I110. (In Persian).

Bahrami Pichaghchi Hadigheh, N., Norouz Valashdi, R., Gholami Sefidkoohi, M.A., 2024. Investigation of wildfire trends and their relationship with climatic variables using satellite data (Case study: Mazandaran Province). Natural Environmental Hazards 13(39), 127-140. (In Persian)

Bowman, D.M.J.S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C. A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., van der Werf, G.R., Pyne, S.J., 2009. Fire in the Earth system. Science 324(5926), 481-484.

Chazdon, R.L., Brancalion, P.H., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Wilson, S.J., 2016. When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. Ambio 45(5), 538-550.

Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G.R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T.J., Giglio, L., 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. Remote Sensing of Environment 225, 45-64.

Feizollahpour, H., 2024. Spectral analysis of forest fire using NBR index and its comparison with other spectral indices from Sentinel-2 imagery (Case study: Baharestan village). Journal of Natural Environmental Hazards 48(15), 1-18. (In Persian)

Filipponi, F., 2018. BAIS2: Burned area index for Sentinel-2. In *Proceedings* 2(7), 346.

Filipponi, F., 2019. Exploitation of sentinel-2 time series to map burned areas at the national level: A case study on the 2017 italy wildfires. Remote Sensing 11(6), 622.

Hasanlu, M., Roodsarabi, Z., Hossein Teymouri, P., 2026. Comparison of different burned area detection methods using spectral indices and Sentinel-2 imagery: statistical approaches, machine learning, and deep learning (Case study: Kenneth wildfire, Los Angeles). Journal of Remote Sensing and Geospatial Information Research 1(7), 39-56. (In Persian).

Jahani, S., Delbari, M., 2009. Evaluation and estimation of maximum 24-hour precipitation in Golestan Province. Water Resources Engineering 4(2), 13-22 (In Persian)

Mahmoudi, B., 2023. Analysis of managerial perspectives and conceptual statements regarding forest fires in Iran. Natural environment 1(76), 173-184 (In Persian)

Mouillot, F., Field, C.B., 2005. Fire history and the global carbon budget: a 1× 1 fire history reconstruction for the 20th century. Global Change Biology 11(3), 398-420.

Ramola, J., Prakash, R., Vidyarthi, A., 2025. Environmental Computing Framework for Daily Fire Detection in the Himalayan Foothills Using Sentinel-2, MODIS, and VIIRS. In International Conference on Information and Communication Technology for Competitive Strategies 462-472. Cham: Springer Nature Switzerland.

Rodriguez-Jimenez, F., Novo, A., Hall, J.V., 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, 101240.

Roy, D. P., Huang, H., Boschetti, L., Giglio, L., Yan, L., Zhang, H. H., Li, Z., 2019. Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping: A combined sensor multi-temporal change detection approach. Remote Sensing of Environment 231, 111254.

Seydi, S. T., Akhoondzadeh, M., Amani, M., Mahdavi, S., 2021. Wildfire damage assessment over Australia using sentinel-2 imagery and MODIS land cover product within the google earth engine cloud platform. Remote Sensing 13(2), 220.

Yalghi, M., Mohammadi, H., 2026. Spatiotemporal analysis of drought variability in Golestan Province, Iran. Climate Change Research 7(25), 85-103. (In Persian)