


Spectral Analysis of Forest Fire Based on the +NBR Index and its Comparison with Spectral Indices in Sentinel-2 Satellite (Case Study: Baharestan Village)

Mehdi Feyzolahpour^{*} 

1. Corresponding Author, Assistant Professor of Geomorphology, Faculty of Human Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Email: feyzolahpour@znu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4126-0234>

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: 22 May 2024 Revised: 12 July 2024 Accepted: 14 August 2024 Published: 22 June 2026</p> <p>Keywords: Normalized burn indices, spectral index, forest fire, Sentinel 2, Heyran.</p>	<p>Burned areas can be easily monitored using multispectral satellite images. Indices were provided to show the difference between healthy vegetation areas and burned areas. To avoid errors and optimize the results, based on the reflective condition of the Sentinel 2 satellite bands, the normalized burn ratio index +NBR was presented. The efficiency of this index was confirmed by comparing it with four other indices in an area of 47.4 square kilometers in the downstream part of the Hiran region on the border between Iran and the Republic of Azerbaijan, around the village of Baharestan. To achieve this goal, two single- and two-time approaches were adopted. To separate the pixels of burned and non-burned areas, the differentiation method was used between the periods before and after the fire on January 8, 2021, and January 25, 2021. The NBR+ index achieved favorable results due to the removal of cloud masses and water areas that were wrongly classified in the other indices. Pearson's correlation coefficient values also showed that the NBR and NDSWIR index with values of 0.95 had the highest correlation with the NBR + index, and the MIRBI index with values of 0.16 had the lowest correlation. Meanwhile, the NBR+ index with the highest Kappa coefficient of 0.92 can detect areas affected by fire.</p>
<p>How to Cite: Feyzolahpour, M. (2026). Spectral Analysis of Forest Fire Based on the +NBR Index and Its Comparison with Spectral Indices in Sentinel-2 Satellite (Case Study: Baharestan Village). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15(48), 1-18.</p>	
	<p>© The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2024.48813.2047 Publisher: University of Sistan and Baluchestan</p>

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

One of the important research topics in the use of satellite imagery is the monitoring of fires, their impact on air quality, and the effects they leave on the environment (Saidi et al., 2021). Therefore, to preserve natural and man-made landscapes, it is essential to identify appropriate methods for monitoring burned areas and preparing intensity estimation maps using satellite data (Amos et al., 2019). In recent decades, several sensors, such as the Advanced High-Resolution Radiometer (AVHRR) and the Advanced Spatial Thermal Radiation and Reflection Radiometer (ASTER), have been installed on satellites to monitor fires (Seydi et al., 2021). Another widely used sensor is the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), which has attracted attention due to its high temporal resolution and allows for the rapid detection of active fires, identification of burned areas, or assessment of forest fire risk (Seydi et al., 2021). This research aims to improve the performance of the existing forest fire index, and for this purpose, Sentinel 2 images were used.

In this study, the NBR+ index is proposed based on Sentinel 2 multispectral images to identify burned areas and the methodological approach adopted to determine the performance level of this index is shown. First, previously presented indices in this field are introduced and a comparison between them and the NBR+ index is made. In the meantime, the reasons that determined the formulation of the proposed index are explained and finally, the method of verifying the accuracy of the results is described based on the conventional approach applied in remote sensing, including the confusion matrix (Hasmadi et al., 2009). All experiments were performed using Arc GIS software. The raster calculator tool allows the implementation of index equations using software operators. Near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) bands are used to detect burned areas. The NIR band highlights changes in canopy cover and reflectance of burned leaves. While the SWIR band identifies changes in dryness (Silva et al., 2003). After a fire, NIR reflectance decreases sharply as vegetation cover is lost, while SWIR reflectance increases due to the removal of water-retaining vegetation (Schepers et al., 2014). Several algorithms have been developed to detect burned areas by combining NIR and SWIR bands. Although some spectral indices have been developed based on SWIR, red, and NIR bands only. Among the wide range of available spectral indices, four indices, normalized burn ratio (NBR), normalized burn ratio in SWIR band (NBR_{SWIR}), normalized difference shortwave infrared index (NDSWIR), and mean infrared bispectral index (MIRBI), were compared.

According to the NBR_{SWIR} index, the maximum reflectance on January 8, 2 days before the fire, was 0.08. While this value reached 0.32 on January 25, showing a significant increase. The area of this area on this day was 4.05 km², which did not show a significant change compared to the threshold of 0.08 on January 8, which was 14.4 km². However, the spectral reflectance of -0.07 on January 8 increased from 7.85 km² to 9.93 km², increasing from 16.5% to 20.9%, which was an increase of 4.4%. Accordingly, the highest values affected by the fire were in the northern part of the region, which is located within the territory of the Republic of Azerbaijan. In the NDSWIR index, the maximum threshold on January 8 was 0.16. If positive values are considered as areas with high reflectances, then at a threshold of 0.04 and above, an area of 26.86 km² has high reflectances. Positive values started at 0.12 on January 25 and covered an area of 23.99 km², but no significant changes were observed. The extent of this area indicated the area affected by the fire.

CONCLUSION

The results of this study confirm the ability to accurately map burned areas using remote sensing. Multispectral images provided by Sentinel 2 satellite sensors have a high ability to detect fire zones, but they require the appropriate selection and combination of bands. The presence of several indicators allows for the achievement of desired results. However, environmental characteristics can reduce the level of accuracy of the final map. Water bodies and clouds cause errors for some indicators, and false reflections with an unjustified increase in pixels are considered burned areas. Even if the disturbance

of water bodies and clouds can be removed using special methods, the indicators must have the ability to reduce the effect of these phenomena. The new indicator presented in this study for Sentinel 2 images makes it possible to detect the reflections of burned areas even in the presence of water bodies and cloud masses. This index has achieved high Kappa coefficient values of 0.92 compared to the MIRBI, NDSWIR, NBRSWIR, and NBR indices.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abdi, O., Shetaei, S., Shirvani, Z., Naghavi, M. (2012). Forest management impacts on forest fires in Golestan province by GIS application, *Iranian Journal Forest and Range Protection Research*, 9(18), pp 100- 108. [In Persian]
- Abedi Gheshlaghi, H., Valizadeh, K. (2018). Evaluation and zoning of forest fire risk using multi-criteria decision-making techniques and GIS, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(15), pp 49- 66. [In Persian]
- Emami, Hassan., Shahriyari, H. (2020). Quantifying environmental and human factors affecting the occurrence and spread of wildfire using RS and GIS methods protected area of Arasbaran, *Scientific- research Quarterly of Geographical Data*, 28(112), pp 35-53. [In Persian]
- Farajzadeh, M., Ghavidel, Y., Mokri, S. (2015). The analysis of forest fires with climatic approach using satellite data in Alborz area Iran, *Journal of spatial analysis environmental hazards*, 2(3), pp 83- 104. [In Persian]
- Janbazghobadi, G. (2019). Investigation of forest fire hazard areas in Golestan province based on fire risk system index (FRSI) using the technique, *Journal of Spatial Analysis environmental hazards*, 6(3), pp 89-102. [In Persian]
- Roodsarabi, Z., Sam Khaniani, A., Kiani, A. (2023), A review of remote sensing methods in identifying and monitoring forest fires, *Iranian Journal of remote sensing & GIS*, 4(56), pp 19- 52. [In Persian]

References (in English)

- Amos, C., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2019). Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection. *International journal of remote sensing*, 40(3), 905-930.
- Hasmadi, M., Pakhriazad, H.Z., Shahrin, M.F. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Geogr. Malays. Journal of Society and Space*, 5, 1–10.
- Saidi, S., Younes, A.B., Anselme, B. (2021). A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: Case of Bizerte region, Tunisia. *Applied Geomatic*, 13, 587–603.
- Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Vanden Borre, J., Goossens, R. (2014). Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sensing*, 6, 1803–1826.
- 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, 220- 246.
- Silva, J.M.N., Pereira, J.M.C., Cabral, A.I., Sa', A.C.L., Vasconcelos, M.J.P., Mota, B., Gre'Goire, J.-M. (2003). An estimate of the area burned in southern Africa during the 2000 dry season using SPOT-VEGETATION satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8498- 8522.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

تحلیل طیفی آتش‌سوزی جنگل بر اساس شاخص NBR+ و مقایسه آن با شاخص‌های طیفی در ماهواره سنتینل ۲ (منطقه مورد مطالعه: روستای بهارستان)

مهدی فیض اله پور 

۱. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان (نویسنده مسئول)

ایمیل: feyzolahpour@znu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4126-0234>

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>نظارت بر مناطق سوخته را می‌توان به راحتی با استفاده از تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای انجام داد. برای نمایش تفاوت بین مناطق پوشش گیاهی سالم و مناطق سوخته‌شده، شاخص‌هایی ارائه شده است. برای جلوگیری از خطا و بهینه‌سازی نتایج، بر اساس وضعیت بازتابی باندهای ماهواره سنتینل ۲، شاخص نسبت سوختگی نرمال شده NBR+ ارائه شد. کارایی این شاخص با مقایسه آن با چهار شاخص دیگر در منطقه‌ای با وسعت ۴۷/۴ کیلومتر مربع در قسمت پایین‌دست منطقه حیران در مرز بین ایران و جمهوری آذربایجان در حوالی روستای بهارستان تأیید شد. برای دستیابی به این هدف، دو رویکرد تک زمانی و دو زمانی اتخاذ شد. برای جداسازی پیکسل‌های نواحی سوخته‌شده و نواحی فاقد سوختگی، روش تفاضل‌گیری بین دوره‌های قبل و بعد از آتش‌سوزی در تاریخ‌های ۸ ژانویه ۲۰۲۱ و ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱ به کار گرفته شد. برای ارزیابی کارایی شاخص‌ها، ماتریس‌های سردرگمی ساخته شده و با یکدیگر مقایسه شدند. شاخص NBR+ به دلیل حذف توده‌های ابر و پهنه آبی که در شاخص‌های دیگر به اشتباه طبقه‌بندی شده بودند، به نتایج مطلوبی دست یافته است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون نیز نشان داد که شاخص NBR و NDSWIR با مقادیر ۰/۹۵ از بیشترین همبستگی با شاخص NBR+ برخوردار بوده و شاخص MIRBI با مقادیر ۰/۱۶ از کمترین همبستگی برخوردار بوده است. این درحالیست که شاخص NBR+ با بیشترین ضریب کاپا به میزان ۰/۹۲ از قابلیت بالایی در تشخیص مناطق متأثر از آتش‌سوزی برخوردار است.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶</p> <p>واژه‌های کلیدی: شاخص‌های سوختگی نرمال شده، شاخص طیفی، آتش‌سوزی جنگل، سنتینل ۲، گردنه حیران.</p>

استناد: فیض اله پور، مهدی. (۱۴۰۵). تحلیل طیفی آتش‌سوزی جنگل بر اساس شاخص NBR+ و مقایسه آن با شاخص‌های طیفی در ماهواره سنتینل ۲ (منطقه مورد مطالعه: روستای بهارستان) *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱-۱۸.

مقدمه

یکی از مباحث تحقیقاتی مهم در زمینه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نظارت بر آتش‌سوزی‌ها، تاثیر آنها بر کیفیت هوا و آثاری است که بر روی محیط‌زیست بر جای می‌گذارند (سیدی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین برای حفظ چشم اندازهای طبیعی و انسان‌ساخت، شناسایی روش‌های مناسب برای پایش مناطق سوخته و تهیه نقشه‌های برآورد شدت با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای ضروری می‌باشد (آموس^۲ و همکاران، ۲۰۱۹).

در دهه‌های اخیر، چندین حسگر مانند رادیومتر پیشرفته با وضوح بالا (AVHRR) و رادیومتر تابش گرمایی و انعکاس فضایی پیشرفته (ASTER) به منظور بررسی آتش‌سوزی، بر روی ماهواره‌ها نصب شده‌اند (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی دیگر از سنجنده‌های پرکاربرد، طیف سنج تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) است که به دلیل وضوح زمانی بالای آن مورد توجه قرار گرفته و امکان تشخیص سریع آتش‌سوزی‌های فعال، شناسایی مناطق سوخته یا ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها را فراهم می‌کند (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱).

پرتاب ماهواره لندست ۸ که با همکاری ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده صورت گرفته به همراه ماهواره سنتینل ۲ این امکان را فراهم می‌سازد تا تصاویری با وضوح فضایی بهتر از سنجنده‌های ماهواره قبلی به دست آید. به طور خاص، ماهواره سنتینل ۲ تصاویر چند طیفی سطح زمین را توسط دو ماهواره با چرخه بازبینی ۵ روزه در وضوح مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر جمع‌آوری می‌کند. پردازش داده‌های سنجنش‌زدور پیش‌نیازی برای تولید اطلاعات مکانی قوی و با کیفیت بوده و برای پایش آتش در مقیاس‌های مختلف و در طول زمان مناسب می‌باشد (باربوزا^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). در واقع، تحقق شاخص‌های عملکردی فزاینده در حوزه RS برای تشخیص و تحلیل پدیده‌هایی مانند آتش‌سوزی در حال توسعه مداوم بوده است. بنابراین افزایش وضوح مکانی و طیفی سنجنده‌های ماهواره‌ای همراه با توسعه شاخص‌ها در سنجنش‌زدور به این معنی است که حتی آتش‌سوزی‌ها در مقیاس کوچک را می‌توان با دقت بالا تشخیص داد. تشخیص آتش‌سوزی به شدت با نظارت بر پوشش گیاهی مرتبط است. برای این منظور، چندین روش مبتنی بر استفاده از شاخص‌های طیفی پیشنهاد شده است. شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) بر اساس روابط بین باندهای مادون قرمز نزدیک و باند قرمز این امکان را می‌سازد تا رابطه بین میزان پوشش گیاهی آسیب‌دیده و شدت آتش‌سوزی مشخص گردد (منیسس^۴، ۲۰۲۱). علاوه بر این، شاخص‌های خاصی مانند شاخص نسبت نرمال‌شده سوختگی (NBR) ایجاد شده‌اند که اثرات آتش را با کنتراست طیفی بالا ثبت می‌کنند. در این شاخص از نسبت نرمال‌شده باندهای مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه استفاده شده است. ترکیب این باندهای پرتاب‌شده امکان تحلیل پدیده را در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی فراهم می‌کند. در طول موج‌های NIR، جذب پوشش گیاهی کم و بازتاب عبور، قابل توجه می‌باشد. در مقابل در طول موج SWIR بازتاب و ضریب عبور پوشش گیاهی کم و جذب در حد بسیار بالایی بوده است. پس از آتش‌سوزی، مناطق سوخته‌شده بازتاب نسبتاً کم در باند مادون قرمز نزدیک و بازتاب بالایی در باند مادون قرمز موج کوتاه نشان می‌دهند (روی^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). پیشرفت‌های اخیر در فناوری سنجنش‌زدور، رویکردهای جدیدی را برای آتش‌سوزی از جنبه‌های مختلفی از قبیل تشخیص آتش‌سوزی فعال، برآورد میزان و شدت آتش‌سوزی و نظارت بر احیای پوشش گیاهی پس از آتش‌سوزی

¹ Seydi

² Amos

³ Barboza

⁴ Meneses

⁵ Roy

فراهم کرده است (سزپاکووسکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). شاخص‌های خاصی بر اساس باندهای طیفی برای تشخیص آتش‌سوزی توسعه یافته‌اند. بخش بزرگی از این پژوهش مبتنی بر رویکردهای دو زمانی است که این امکان را می‌دهد تا مناطق سوخته‌شده به‌عنوان نتایج تغییرات ناشی از پوشش گیاهی در تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی شناسایی گردد. با این حال سایر پدیده‌های سطح زمین ممکن است در باندهای خاصی مانند NIR و SWIR پاسخ‌های مشابهی را داده و باعث افزایش خطا گردد (لیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، ویژگی‌های منطقه می‌تواند بر دقت تشخیص آتش‌سوزی تاثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، ابر و سایه‌ها ممکن است بازتاب طیفی کاذب ایجاد کنند. بنابراین اقدامات اصلاحی خاصی لازم است (نولد^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). با بهره‌گیری از باند SWIR، میزان این خطاها کاهش می‌یابد؛ زیرا در این باند بازتاب نواحی آتش‌گرفته نسبتاً ثابت مانده و یا رشد کمی را نشان می‌دهند (اولیورا^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

در ایران تحقیقات مختلفی برای بررسی نقش سنجش‌ازدور در مطالعات مربوط به آتش‌سوزی جنگل انجام گرفته است. عبدی و همکاران (۱۳۹۰) اثر مدیریت جنگل روی آتش‌سوزی جنگل‌های استان گلستان در سال ۱۳۸۹ را با استفاده از GIS مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی وجود طرح‌های جنگل‌داری ضمن اینکه باعث حفاظت جنگل در مقابل گسترش سطح و مدت زمان تداوم آتش‌سوزی می‌گردد، به‌کارگیری شاخص‌های مدیریتی مهم داخل طرح‌های جنگل‌داری مطابق با اصول علم جنگل‌داری، در حفاظت جنگل در مواقع بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. فرج‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) به تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشا آب‌وهوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز پرداختند. نتایج نشان داد که در روز آتش‌سوزی در سطح زمین استیلای زبانه کم فشار و در تراز میانی فراز مانع موجب انتقال هوای گرم عرض‌های جغرافیایی بالا به منطقه مورد مطالعه شده است. عابدی قشلاقی و ولی‌زاده (۱۳۹۷) با استفاده از فن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل نمودند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده با ضریب ۰/۶۴ از دقت خوبی در پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل برخوردار می‌باشد. جانباز قبادی (۱۳۹۸) بر اساس شاخص خطر آتش‌سوزی (FRSI) و با بهره‌گیری از فن GIS اقدام به بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان نمود. نتایج نشان داد که ۹۰ درصد آتش‌سوزی‌های به‌وقوع پیوسته در منطقه با خطر زیاد قرار گرفته است. امامی و شهریاری (۱۳۹۸) با بهره‌گیری از GIS و RS عوامل انسانی و محیطی را در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌های ارسباران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که راه‌های ارتباطی و مناطق مسکونی به‌ترتیب حداقل ۳۲ درصد و حداکثر ۶۸ درصد همپوشانی با خطر وقوع آتش‌سوزی در منطقه مطالعاتی را دارا هستند. رودسرابی و همکاران (۱۴۰۱) روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور را در شناسایی و پایش آتش‌سوزی جنگل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده درباره مطالعات آتش‌سوزی در کشور، حدود ۴۸ درصد از پژوهش‌ها به شناسایی و گسترش آتش‌سوزی و حدود ۵۲ درصد به احیا و بازیابی پرداختند.

هدف از این پژوهش بهبود عملکرد به‌دست‌آمده از شاخص موجود در زمینه آتش‌سوزی جنگل بوده و به این منظور از تصاویر سنتینل ۲ بهره گرفته شده است. با بهره‌گیری از شاخص NBR، شاخص جدیدی با نام NBR+ ارائه گردید.

¹ Szpakowski

² Liu

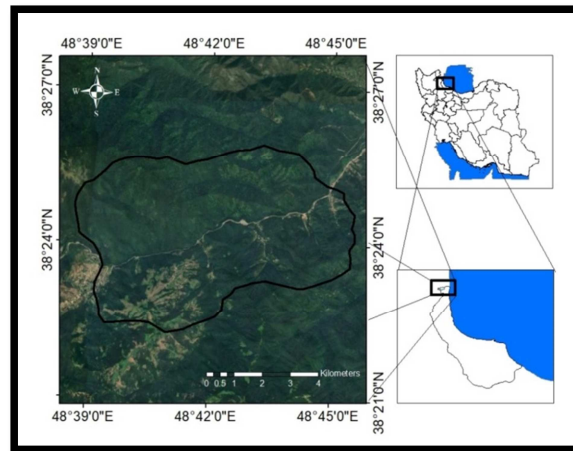
³ Nolde

⁴ Oliveira

این شاخص در منطقه‌ای واقع در پایین‌دست گردنه حیران در حوالی روستای بهارستان در مرز بین ایران و جمهوری آذربایجان و تحت تاثیر آتش‌سوزی در ۱۰ ژانویه ۲۰۲۱ آزمایش شده و عملکرد آن ارزیابی شده و با چهار شاخص دیگر مقایسه شد. برای رخدادهای قبل و بعد از آتش‌سوزی نیز از داده‌های چند طیفی سنتینل ۲ استفاده شد. نوآوری عمده این پژوهش در اولین گام، استفاده از تصاویر سنتینل ۲ بوده و در گام بعدی، استفاده از شاخص جدید NBR+ می‌باشد. این شاخص برخلاف شاخص‌های دیگر توانسته است تا تفکیک دقیقی بین پهنه‌های متاثر از آتش با پهنه‌های آبی و توده‌های ابری به عمل آورد. لیکن اصلی‌ترین نوآوری، استفاده از روش تفاضل‌گیری از تصاویر قبل و بعد از وقوع آتش‌سوزی بوده است. بدین طریق، تمامی پهنه‌های تغییر یافته در تصویر نمایش داده شد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۴۸ درجه ۴۶ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی در پایین‌دست گردنه حیران در مرز بین کشور ایران و جمهوری آذربایجان در غرب شهر آستارا و حوالی روستای بهارستان واقع شده است. در تاریخ ۲۱ دی ماه ۱۳۹۹ شمسی یا ۱۰ ژانویه ۲۰۲۱ آتش‌سوزی وسیعی در جنگل‌های هیرکانی جمهوری آذربایجان رخ داد که ۹ روز تداوم داشته و جنگل‌های هیرکانی در نواحی مرزی ایران را نیز متاثر ساخت. در این پژوهش محدوده‌ای به وسعت ۴۷/۷ کیلومتر مربع مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در پایین‌دست گردنه حیران

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ توسط سازمان فضایی اروپا و در قالب برنامه کپرنیک به شکل ماهواره‌های سنتینل 2A و سنتینل 2B و به صورت رایگان ارائه می‌شود. برای این پژوهش از تصاویر ارائه‌شده توسط ماهواره سنتینل 2A استفاده شده است. برنامه کپرنیک از طریق استفاده از ماهواره‌های سنتینل به نظارت مستمر زمین می‌پردازد. این تصاویر کانال اصلی دریافت داده‌های کپرنیک بوده و برای بررسی مخاطرات و احیای مناطق به‌کار گرفته می‌شود. دو مجموعه داده سنتینل 2A در این پژوهش استفاده شده است. اولین مجموعه داده‌ها در ۸ ژانویه ۲۰۲۱ به‌دست آمده و سناریوی پیش از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. دومین سری از داده‌ها در ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱ تهیه شده و نشان‌دهنده وضعیت پس از آتش‌سوزی است.

در این پژوهش شاخص NBR+ بر اساس تصاویر چند طیفی سنتینل ۲ برای شناسایی مناطق سوخته‌شده پیشنهاد گردیده و رویکرد روش‌شناختی اتخاذشده برای تعیین سطح عملکرد این شاخص نشان داده شده است. در ابتدا شاخص‌های ارائه‌شده قبلی در این زمینه معرفی شده و مقایسه‌ای بین آنها با شاخص NBR+ صورت گرفت. در این بین، دلایلی که فرمول‌بندی شاخص پیشنهادی را تعیین کرده است، توضیح داده شده و در نهایت، روش تأیید صحت نتایج بر اساس رویکرد متعارف اعمال‌شده در سنجش‌ازدور از جمله ماتریس سردرگمی تشریح شد (هاسمادی^۱ و همکاران، ۲۰۰۹). همه آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS انجام شد. ابزار محاسبه‌گر رستری امکان پیاده‌سازی معادلات شاخص را با استفاده از عملگرهای نرم‌افزار فراهم می‌سازد.

برای تشخیص مناطق سوخته، باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) به‌کار گرفته شده است. باند NIR تغییرات در پوشش تاج و بازتاب برگ‌های سوخته را برجسته می‌کند. درحالی‌که باند SWIR تغییرات در میزان خشکی را شناسایی می‌کند (سیلوا^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). پس از آتش‌سوزی، با از بین رفتن پوشش گیاهی، بازتاب NIR به‌شدت کاهش می‌یابد و ازسوی‌دیگر، بازتاب SWIR به‌دلیل حذف پوشش گیاهی نگهدارنده آب افزایش می‌یابد (شیپردز^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). برای تشخیص مناطق سوخته، با ترکیب باندهای NIR و SWIR چندین الگوریتم ابداع شدند. اگرچه برخی از شاخص‌های طیفی تنها بر اساس باندهای SWIR، قرمز و NIR توسعه یافته‌اند. در میان طیف گسترده‌ای از شاخص‌های طیفی موجود، چهار شاخص نسبت نرمال‌شده سوختگی (NBR)، نسبت نرمال‌شده سوختگی در باند SWIR (NBRSWIR)، شاخص تفاوت نرمال‌شده مادون قرمز موج کوتاه (NDSWIR) و متوسط شاخص دو طیفی مادون قرمز (MIRBI) با یکدیگر مقایسه شدند. ویژگی اصلی این شاخص‌ها به همراه خصوصیت‌های شاخص اصلی در زیر شرح داده شده است.

شاخص معروفی که به‌طور گسترده برای نمایش مناطق سوخته استفاده می‌شود، نسبت نرمال‌شده سوختگی است که به‌عنوان شاخص استاندارد در ارزیابی شدت آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شود (گارسیا^۴ و همکاران، ۱۹۹۱). این شاخص، طول موج‌های NIR (باند 8A) و SWIR (باند ۱۲) را ترکیب می‌کند که در آن مقدار بالای NBR پوشش گیاهی سالم را نشان داده و مقدار پایین، زمین‌های خالی و سوخته را نمایش می‌دهد. شاخص NBR مشابه شاخص NDVI می‌باشد. شاخص NBR به‌عنوان نسبتی بین مقادیر NIR و SWIR محاسبه شده و می‌تواند به‌صورت زیر تعریف گردد. مناطقی که مقادیر نزدیک به صفر دارند، مناطق بدون سوختگی در نظر گرفته می‌شوند.

$$NBR = \frac{B12 - B8A}{B12 + B8A} \quad (1)$$

شاخص آتش‌سوزی جدیدی که بر اساس داده‌های لندست ۸ توسعه یافته، نسبت نرمال‌شده سوختگی در باند SWIR است که توسط لیو و همکاران (۲۰۲۰) طراحی شده است. این شاخص مشابه شاخص NBR می‌باشد؛ ولی از باندهای SWIR1 (باند ۱۱) و SWIR2 (باند ۱۲) بهره گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). در این معادله دو مقدار عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود. در صورت معادله، مقدار ۰/۰۲ کم می‌شود تا تغییرات آب نزدیک به صفر یا مقادیر منفی شود و در مخرج نیز مقدار ۰/۱ اضافه شد تا از تغییرات غیر طبیعی آب و افزایش مقادیر به سمت مثبت جلوگیری شود.

¹ Hasmadi

² Silva

³ Schepers

⁴ García

$$NBR_{SWIR} = \frac{B_{12} - B_{11} - 0.02}{B_{12} + B_{11} + 0.1} \quad (۲)$$

از آنجایی که باند SWIR برای تشخیص آتش‌سوزی‌های قدیمی مفید تشخیص داده شده است، جرارد و همکاران از طول موج SWIR و شاخص NDSWIR برای شناسایی آتش‌سوزی جنگل استفاده کردند (جرارد^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). بر این اساس تشخیص مناطق آتش‌گرفته تا ۱۰ سال پس از سانحه با استفاده از بازتاب طیفی مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه میسر بوده است.

$$NDSWIR = \frac{B_{11} - B_{8A}}{B_{11} + B_{8A}} \quad (۳)$$

شاخص سوختگی مادون قرمز میانی (MIRBI) که توسط تریگ و فلاس در سال ۲۰۰۱ توسعه یافت، در فضای طول موج‌های کوتاه مادون قرمز میانی و طول موج بلند مادون قرمز میانی طراحی شد (تریگ^۲ و فلاس، ۲۰۰۱). این طول موج‌ها به ترتیب در ماهواره سنتینل ۲ باندهای ۱۱ و ۱۲ را در بر می‌گیرد. این شاخص نسبت به تغییرات طیفی ایجاد شده به وسیله آتش‌سوزی، حساس می‌باشد.

$$MIRBI = 10 \times B_{12} - 9.8 \times B_{11} + 2 \quad (۴)$$

به منظور استفاده صحیح از شاخص‌های تشخیص سوختگی لازم است تا پهنه‌های آبی و ابرها حذف شوند. بنابراین از ماسک‌هایی برای رسیدن به این هدف استفاده می‌شود (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). همان‌طور که در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است (پولویرنی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هوانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷)، پهنه‌های آبی را می‌توان با شاخص‌هایی مانند NBR با پهنه‌های سوخته اشتباه گرفت؛ زیرا مناطق سوخته، بازتابی مشابه سطوح آبی از خود نشان می‌دهند (دیندار اوغلو و همکاران، ۲۰۲۱). به‌طور کلی، برای حذف پهنه‌های آبی از شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) استفاده شد (مک فیتر^۶، ۱۹۹۶). آب به‌طور معمول در طول موج‌های سبز و آبی از بازتاب قوی برخوردار است (ایپ^۷ و همکاران، ۲۰۰۴) بنابراین، نسخه پیشرفته‌ای از شاخص NBR پیشنهاد شد که بازتاب آب را در نظر گرفته و با عنوان +NBR شناخته می‌شود.

$$+NBR = \frac{(B_{12} - B_{8A} - B_3 - B_2)}{(B_{12} + B_{8A} + B_3 + B_2)} \quad (۵)$$

از سوی دیگر، این معادله مقادیر منفی را برای ابرها در نظر می‌گیرد؛ زیرا بازتاب آن در باند ۱۲ به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مجموع سه باند دیگر است. در نتیجه از آنجایی که مقادیر +NBR می‌تواند در محدوده بین -۱ و ۱ متفاوت باشد، پیکسل‌های مربوط به ابرها در این شاخص مقادیر منفی را نشان داده و بنابراین نمی‌توان آنها را با مقادیر مناطق سوخته‌شده اشتباه گرفت. مناطق با مقادیر بالا نشان‌دهنده زمین‌های سوخته می‌باشد.

در این پژوهش از رویکرد تک زمانی و دو زمانی برای هر شاخص استفاده شد. اولین طبقه‌بندی بر روی تصاویر پس از آتش‌سوزی انجام شده و طبقه‌بندی دوم بر اساس مقایسه تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی به‌دست آمد. در پژوهش‌های مختلفی از این رویکرد بهره گرفته شده است (آریلانو^۸ و همکاران، ۲۰۱۸؛ پورومانو^۹ و همکاران، ۲۰۲۲).

¹ Gerard

² Trigg

³ Wang

⁴ Pulvirenti

⁵ Huang

⁶ McFeeters

⁷ Ip

⁸ Arellano

⁹ Ponomarev

از آنجایی که رویکرد تک زمانی تنها تصاویر پس از آتش‌سوزی را بررسی می‌کند، بنابراین سریع‌تر اجرا شده و فاقد خطاهای رویکرد دو زمانی از قبیل تفاوت در فنولوژی، ثبت اشتباه تصاویر، تفاوت در کالیبره کردن سنجنده و اثرات اتمسفری می‌باشد (وراویک^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ مالینیس^۲ و همکاران، ۲۰۱۳؛ وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، یافتن تصاویر در دو زمان مختلف که توسط پوشش ابر پوشانده نشده است، همیشه آسان نبوده و ابرها و سایه‌ها به راحتی با پهنه‌های سوخته‌شده اشتباه گرفته می‌شوند (تاناسی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰؛ سانچز^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). فقدان تصاویر مرجع قبل از آتش‌سوزی می‌تواند مشکلاتی را در نقشه‌برداری ایجاد کرده و در آن ممکن است که آب و پوشش گیاه کهنسال با مناطق سوخته‌شده اشتباه گرفته شود (اپتینگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۵). تجزیه و تحلیل دو زمانی با محاسبه شاخص‌های بالا در زمان قبل و بعد از آتش‌سوزی و ایجاد تفاوت بین آنها انجام می‌شود. به این منظور از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta index = post\ Burn\ index - Pre\ Burn\ index \quad (۶)$$

به منظور ارزیابی صحت موضوعی نتایج به دست آمده، از نقاط آزمایشی استفاده شد. این نقاط با نقاط آموزش داده شده متفاوت هستند. این نقاط بیانگر مناطق سوخته‌شده و فاقد آتش‌سوزی هستند (اپتینگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۵). مکان‌های آزمایشی از تجزیه و تحلیل بصری تصاویر چند طیفی به دست می‌آیند. نقاط بالا این امکان را می‌دهند که مشخص شود چند پیکسل به درستی و چند پیکسل به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. رویکرد بالا بیشتر بر اساس ماتریس سردرگمی اعمال می‌شود. این ماتریس ابزار ساده و قدرتمندی است که دقت طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور را نشان می‌دهند. ماتریس سردرگمی جدولی است که مطابقت بین نتیجه طبقه‌بندی و داده‌های زمین را نشان داده و از بازرسی بصری استخراج می‌گردد (استوری^۸ و کانگالتون، ۱۹۸۶). به جای در نظر گرفتن کل تصاویر، ماتریس‌های سردرگمی معمولاً از مقادیر گرفته‌شده از نقاط آموزشی ساخته شده و امکان ارزیابی دقت موضوعی روش طبقه‌بندی را فراهم می‌کند (دیبس^۹ و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش برای تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی، ماتریس سردرگمی ایجاد شده و تحلیل عددی دقت موضوعی با بهره‌گیری از شاخص کاپا انجام شد (لیو و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت به منظور بررسی روابط همبستگی بین شاخص‌های طیفی با شاخص NBR+ از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده و مقادیر ضریب تعیین R^2 محاسبه گردید.

یافته‌های پژوهش

اولین ارزیابی از هر نقشه سطح سوختگی را می‌توان با استفاده از بازرسی بصری انجام داد. مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های طیفی بر اساس ضریب شکست طبیعی جنکز در شکل ۲ نشان داده شده است.

با مقایسه تصاویر در شکل ۲ مشاهده می‌شود که بازتاب مربوط به مناطق مرطوب اندکی کاهش یافته است؛ ولی همچنان باعث اختلال شده است. هنگامی که تحلیل دو زمانی انجام می‌شود اگر دو تصویر قبل و بعد از آتش‌سوزی

¹ Veraverbeke

² Mallinis

³ Wang

⁴ Tanase

⁵ Sanchez

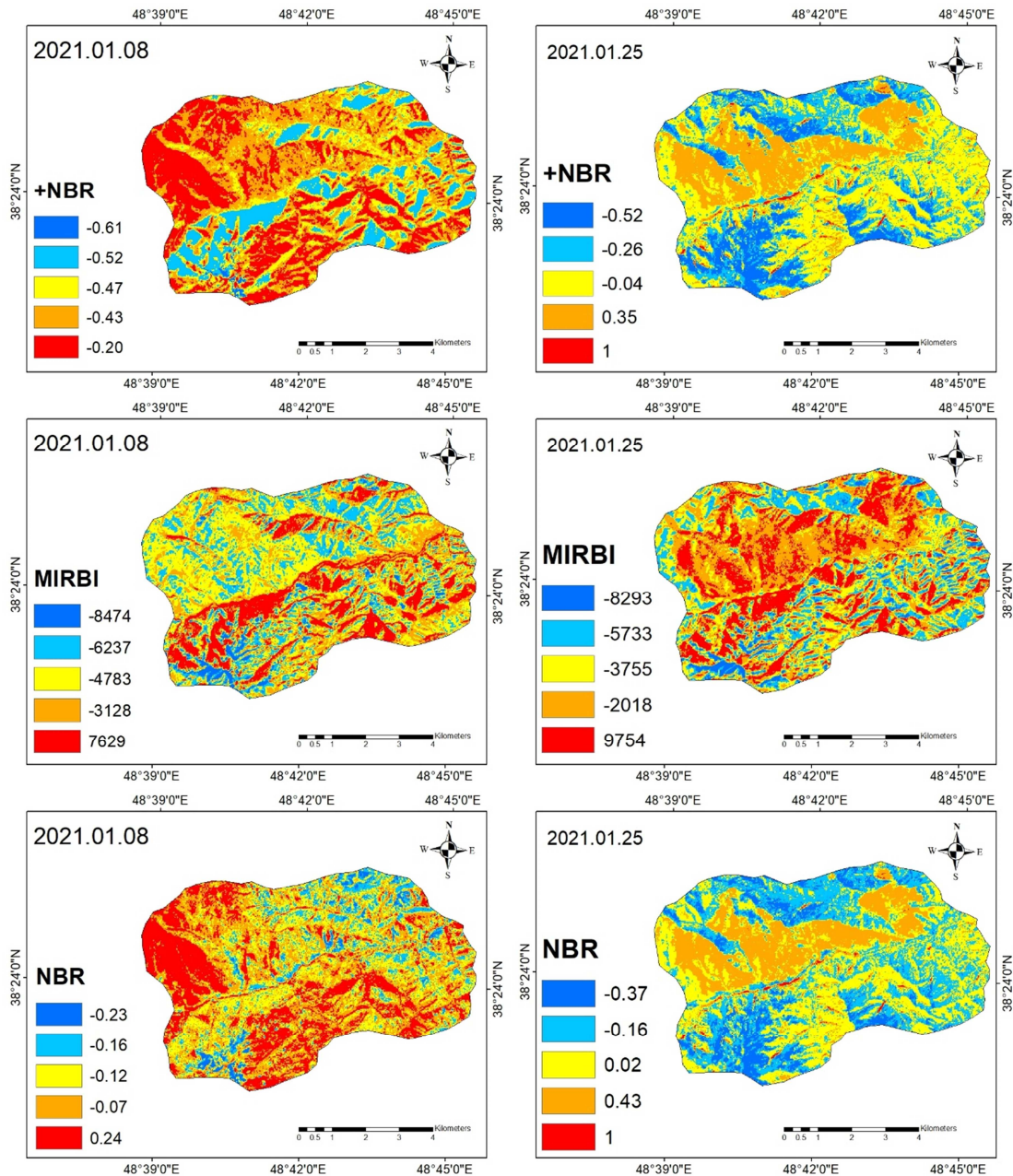
⁶ Epting

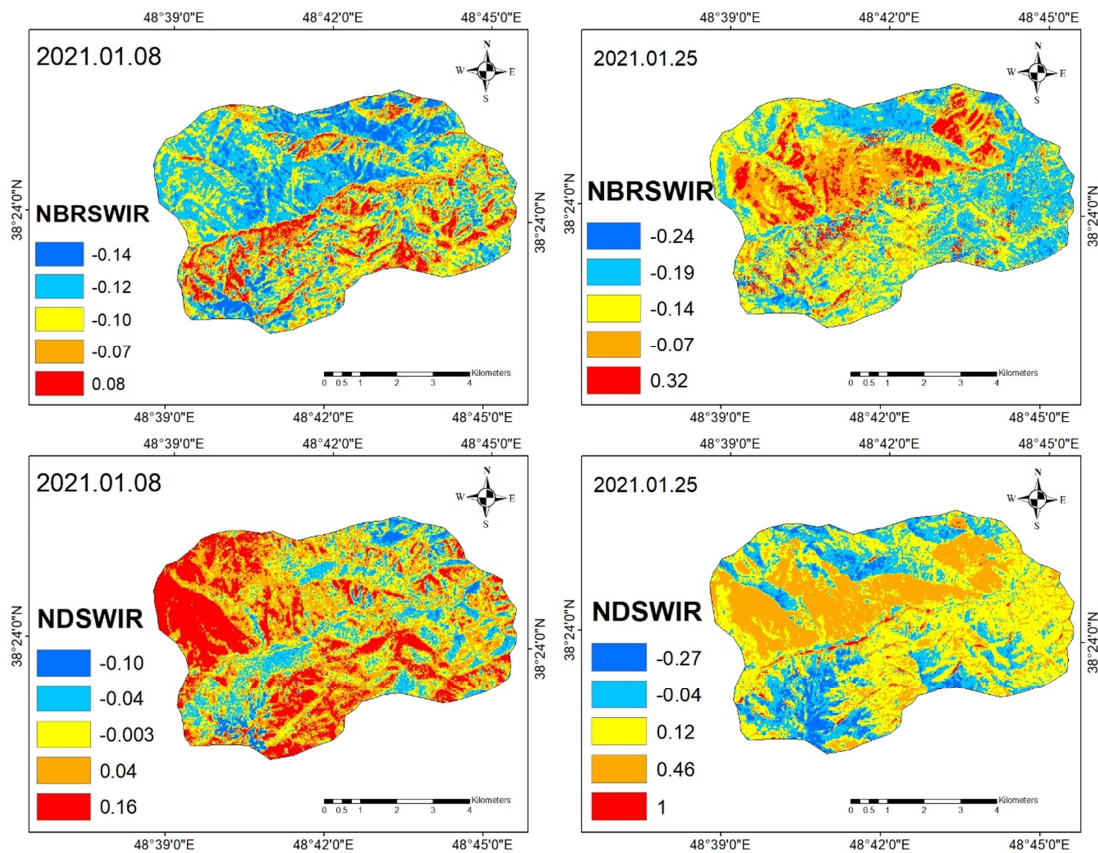
⁷ Epting

⁸ Story

⁹ Dibs

هر دو دارای پوشش ابر باشند، این موارد روی تصاویر تفاوت شاخص‌ها به روشی متفاوت نشان داده می‌شوند؛ بدین صورت که ابرها در تصاویر قبل از آتش‌سوزی با مقادیر کم درخشندگی نشان داده شده و در تصاویر پس از آتش‌سوزی با درخشندگی بالا نمایش داده می‌شوند. بنابراین در صورت استفاده از شاخص NBR، ابرها و مناطق مرطوب می‌توانند به اشتباه به‌عنوان نواحی سوخته‌شده طبقه‌بندی شوند. در تصاویر مربوط به شاخص +NBR، مناطق سوخته‌شده به‌علت بازتاب بالا جلب توجه می‌کنند و به‌ندرت با ابر اشتباه گرفته می‌شوند.





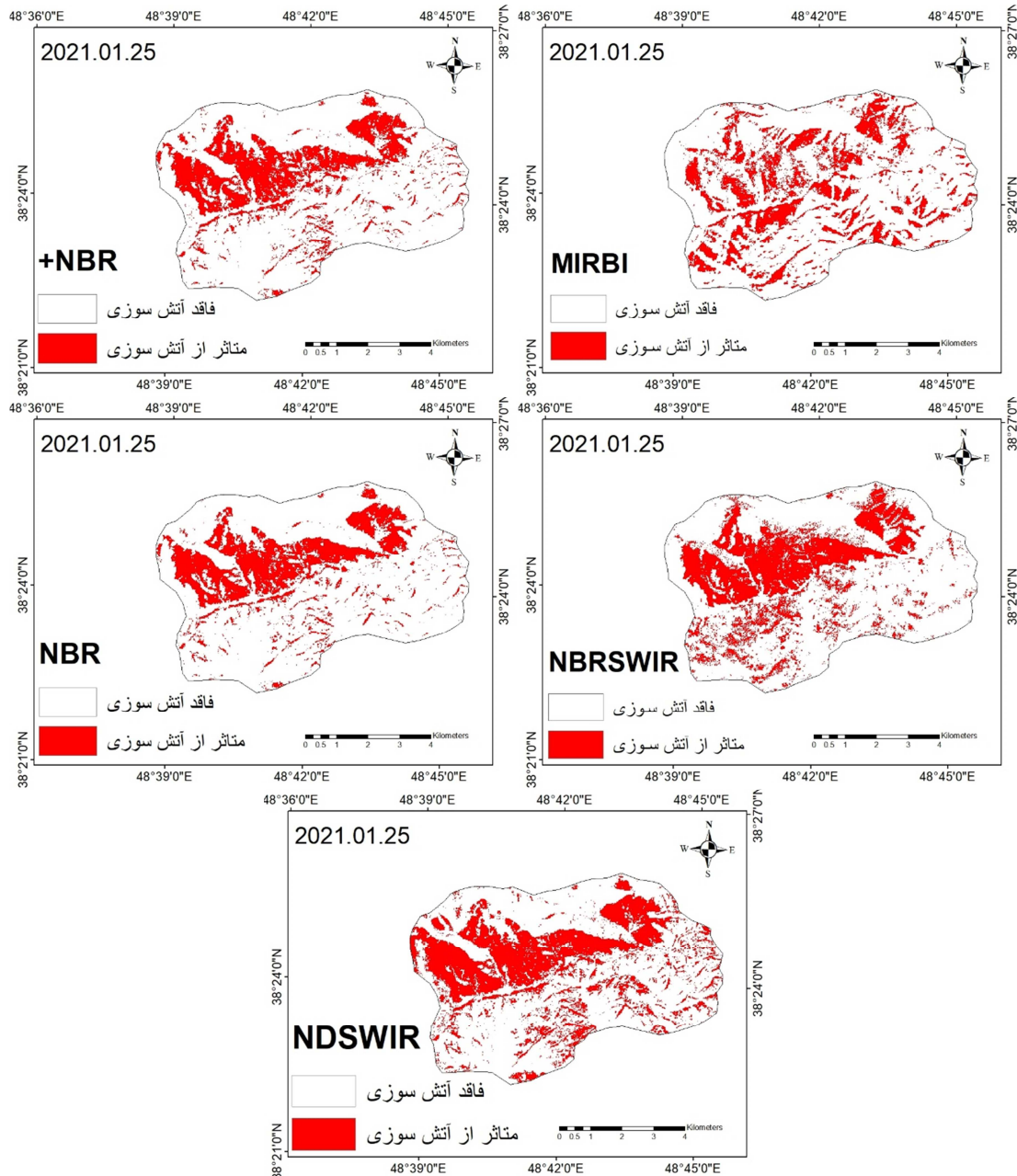
شکل ۲: مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های طیفی بر اساس میزان بازتاب طیفی در بازه زمانی قبل و بعد از آتش‌سوزی. منبع: نویسنده

بر اساس شاخص NBRSWIR حداکثر بازتاب در ۸ ژانویه، یعنی ۲ روز قبل از آتش‌سوزی، معادل ۰/۰۸ بوده است. در حالی که این میزان در ۲۵ ژانویه به ۰/۳۲ رسیده و افزایش قابل توجهی را به نمایش گذاشت. وسعت این پهنه در این روز معادل ۴/۰۵ کیلومتر مربع بوده که نسبت به آستانه ۰/۰۸ در ۸ ژانویه که معادل ۴/۱۴ کیلومتر مربع بوده است، تغییر قابل توجهی را نشان نداد. لیکن بازتاب طیفی ۰/۰۷- در روز ۸ ژانویه از ۷/۸۵ کیلومتر مربع به ۹/۹۳ کیلومتر مربع رسیده و از ۱۶/۵ درصد به ۲۰/۹ درصد افزایش یافته و این افزایش معادل ۴/۴ درصد بوده است. بر این اساس بیشترین مقادیر متأثر از آتش در بخش شمالی ناحیه بوده که در داخل خاک جمهوری آذربایجان قرار گرفته است. در شاخص NDSWIR، حداکثر میزان آستانه در ۸ ژانویه معادل ۰/۱۶ بوده است. اگر مقادیر مثبت به‌عنوان پهنه‌هایی با بازتاب‌های بالا در نظر گرفته شود، در آستانه ۰/۰۴ به بالا پهنه‌ای به مساحت ۲۶/۸۶ کیلومتر مربع از بازتاب‌های بالا برخوردارند. مقادیر مثبت در تاریخ ۲۵ ژانویه از ۰/۱۲ شروع شده و پهنه‌ای به وسعت ۲۳/۹۹ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد؛ ولی تغییرات قابل توجهی دیده نشد. گستره این پهنه، محدوده متأثر از آتش‌سوزی را نشان داد (جدول ۱).

جدول ۱: مقادیر مساحت آستانه‌های طیفی بر اساس شاخص‌های طیفی

شاخص	۸ ژانویه ۲۰۲۱			۲۵ ژانویه ۲۰۲۱		
	آستانه	مساحت (km ²)	درصد	آستانه	مساحت (km ²)	درصد
NBR	-۰/۱۴	۵/۳۳	۱۱/۲	-۰/۲۴	۲/۰۵	۴/۳۲
	-۰/۱۲	۱۵/۸۳	۳۳/۴	-۰/۱۹	۱۳/۹۴	۲۹/۴
	-۰/۱۰	۱۴/۲۳	۳۰/۰۲	-۰/۱۴	۱۷/۴	۳۶/۷
	-۰/۰۷	۷/۸۵	۱۶/۵	-۰/۰۷	۹/۹۳	۲۰/۹
	-۰/۰۸	۴/۱۴	۸/۷۳	-۰/۳۲	۴/۰۵	۸/۵۴
NDSWIR	-۰/۱۰	۱/۳۵	۲/۸۴	-۰/۲۷	۳	۶/۳۲
	-۰/۰۴	۷/۴۵	۱۵/۷	-۰/۰۴	۱۰/۴	۲۱/۹
	-۰/۰۰۳	۱۱/۷۲	۲۴/۷	-۰/۱۲	۲۰/۱۶	۴۲/۵
	-۰/۰۴	۱۴/۸۳	۳۱/۲	-۰/۴۶	۱۳/۴۵	۲۸/۳
	-۰/۱۶	۱۲/۰۳	۲۵/۳	۱	۰/۳۸	۰/۸
+NBR	-۰/۶۱	-۰/۱۷	-۰/۳۵	-۰/۵۲	۶/۴	۱۳/۵
	-۰/۵۲	۶/۷۱	۱۴/۱۵	-۰/۲۶	۱۰/۳۴	۲۱/۸
	-۰/۴۷	۹/۰۲	۱۹/۰۲	-۰/۰۴	۱۹/۳۶	۴۰/۸
	-۰/۴۳	۱۶/۴۳	۳۴/۶	-۰/۳۵	۱۰/۹	۲۳
	-۰/۲۰	۱۵/۰۵	۳۱/۷	۱	۰/۳۵	۰/۷۳
MIRBI	-۸۴۷۴	۱/۴۳	۳/۰۱	-۸۲۹۳	۱/۹۵	۴/۱۱
	-۶۲۳۷	۹/۰۸	۱۹/۱۵	-۵۷۳۳	۸/۰۶	۱۷
	-۴۷۸۳	۱۶/۷۷	۳۵/۳	-۳۷۵۵	۱۱/۲	۲۳/۶
	-۳۱۲۸	۱۱/۸۶	۲۵/۰۲	-۲۰۱۸	۱۵/۱	۳۱/۸
	۷۶۲۹	۸/۲۴	۱۷/۳	۹۷۵۴	۱۰/۹	۲۳
NBR	-۰/۲۳	۱/۱۵	۲/۴۲	-۰/۳۷	۴/۸۹	۱۰/۳
	-۰/۱۶	۵/۲۹	۱۱/۱۶	-۰/۱۶	۱۴/۹	۳۱/۴
	-۰/۱۲	۱۲/۷۶	۲۶/۹	-۰/۰۲	۱۷/۳	۳۶/۵
	-۰/۰۷	۱۵/۴۵	۳۲/۵	-۰/۴۳	۹/۹۳	۲۰/۹۴
	-۰/۲۴	۱۲/۷۳	۲۶/۸	۱	۰/۲۸	۰/۵۹

شاخص MIRBI به تناسب معادله‌ای که برای محاسبه آن استفاده شده به مقادیری در دامنه -۱ و +۱ دست نیافته و وضعیت بازتاب را به شکل دیگری نشان داد. بیشترین میزان آستانه در تاریخ ۸ ژانویه معادل ۷۶۲۹ بوده و وسعت آن معادل ۸/۲۴ کیلومتر مربع می‌باشد. در تاریخ ۲۵ ژانویه، حداکثر بازتاب از وسعتی معادل ۱۰/۹ کیلومتر مربع برخوردار می‌باشد که افزایشی در حد ۲/۶۶ کیلومتر مربع را نشان داد. بر اساس این شاخص نیز مناطق متأثر از آتش‌سوزی در قسمت شمالی منطقه در خاک جمهوری آذربایجان قرار دارد. در شاخص NBR مقادیر مثبت نشان‌دهنده مقادیر بالای بازتاب هستند. حداکثر آستانه در ۸ ژانویه معادل ۰/۲۴ بوده و وسعت آن معادل ۱۲/۷۳ کیلومتر بوده است و وسعتی معادل ۲۶/۸ درصد از محدوده مورد مطالعه را در بر گرفت. این میزان در ۲۵ ژانویه به ۵۷/۵۷ درصد محدوده رسید که افزایش قابل توجهی را نشان داده است. این امر نشان از مناطقی دارد که درگیر پدیده آتش‌سوزی شده‌اند. میزان بازتاب پس از گذشت ۱۵ روز به شکل قابل توجهی افزایش یافته و دوباره مشاهده شد که بخش شمالی از بیشترین تمرکز مناطق آسیب‌دیده برخوردار است.



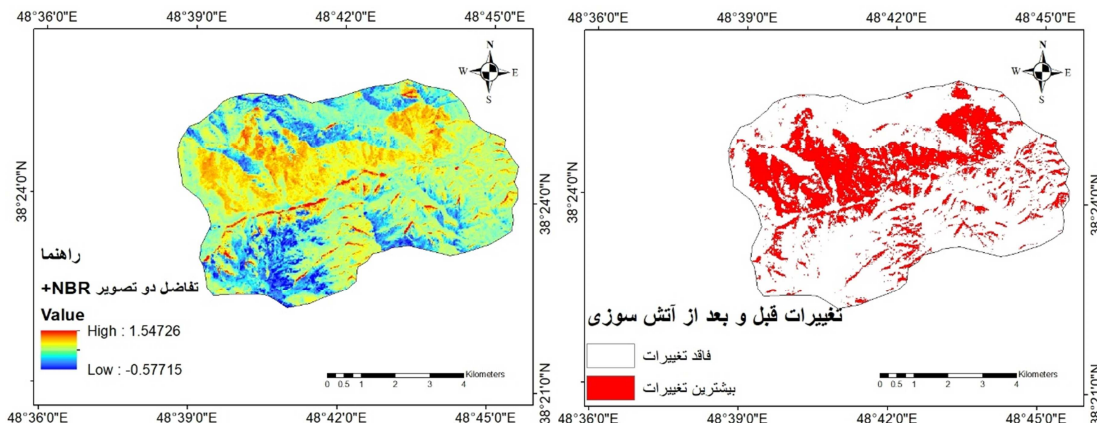
شکل ۳: پهنه متأثر از آتش‌سوزی بر اساس شاخص‌های طیفی در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱. منبع: نویسنده

نتایج و بحث

در این پژوهش با توجه به اینکه پوشش ابر و پهنه‌های آبی بازتاب‌هایی را مشابه مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی نشان می‌دهند، از شاخص +NBR استفاده شد تا تاثیر این پهنه‌ها کاهش یابد. بر این اساس مشاهده شد که در روز ۸ ژانویه هیچ میزان بازتاب مثبتی در منطقه مورد مطالعه دیده نشده است؛ ولی در ۲۵ ژانویه حدود ۱۱/۲۵ کیلومتر مربع از مقادیر بازتاب مثبت برخوردار بودند که حدود ۲۳/۷۳ درصد منطقه را در بر می‌گرفت. البته لازم به یادآوری

است که در انتخاب تصویر پس از رخداد آتش‌سوزی، روزی انتخاب شد که کمترین میزان پوشش ابر را داشته است. اما آتش‌سوزی در فصل زمستان رخ داده و میزان رطوبت خاک قابل توجه بوده که می‌توانسته در میزان بازتاب و ایجاد اختلال نقش داشته باشد.

با مقایسه تصاویر در شکل ۴، واضح است که شاخص NBR بازتاب‌هایی را در مناطق مرطوب ارائه می‌دهد؛ ولی این بازتاب‌ها در شاخص +NBR مشاهده نمی‌شود. مناطق تحت تاثیر این بازتاب‌ها به اشتباه به‌عنوان مناطق سوخته طبقه‌بندی می‌شوند؛ زیرا دارای مقادیر درخشندگی بالایی هستند. دومین عنصر مزاحم در این مورد ابرها و سایه‌هایی است که در تصاویر وجود دارند. این پارامترها نه تنها نواحی سوخته‌شده را از سنجنده پنهان می‌کند حتی در مورد شاخص NBR ممکن است که آنها را با نواحی سوخته‌شده اشتباه گرفت. این مشکل در شاخص +NBR حل شده است. در واقع این مناطق نسبت به مناطق سوخته‌شده درخشندگی بسیار پایینی داشته‌اند.



شکل ۴: تفاضل حاصل از تصاویر شاخص +NBR در دوره قبل و بعد از آتش‌سوزی. منبع: نویسنده

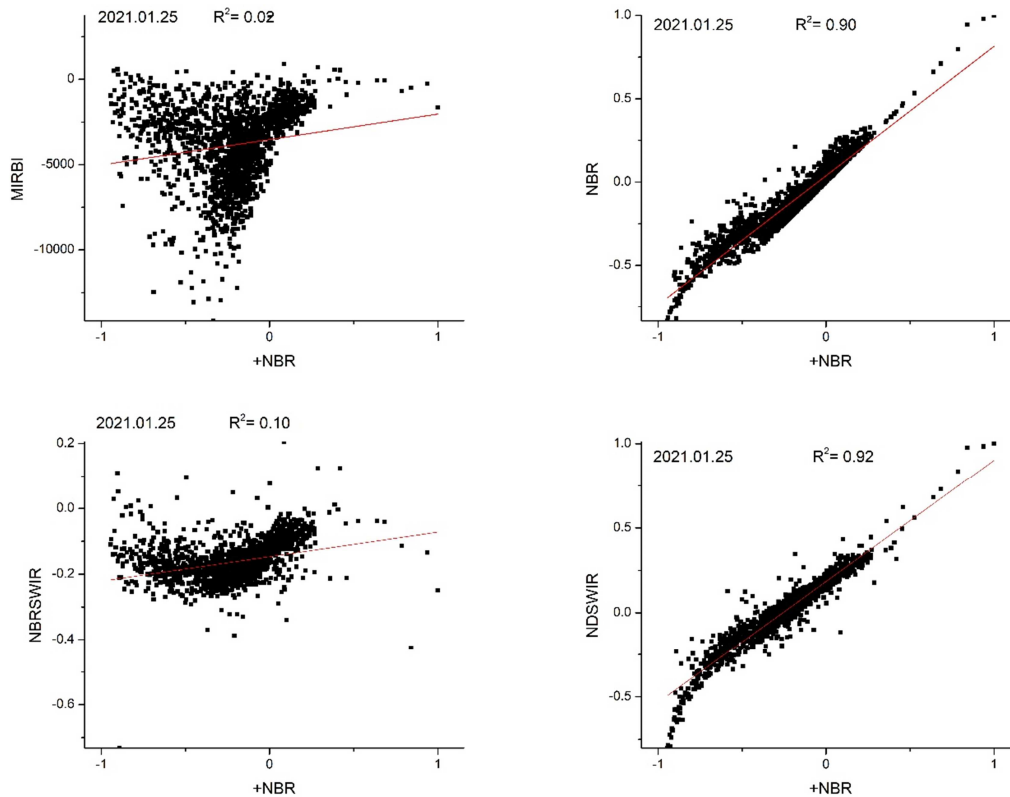
به منظور صحت‌سنجی شاخص‌ها از ضریب کاپا استفاده شد. مقادیر ضریب کاپا برای هر شاخص در جدول ۲ نمایش داده شد. مشاهده می‌شود که شاخص +NBR از بیشترین مقادیر ضریب کاپا در حدود ۰/۹۲ برخوردار است. این درحالیست که شاخص NBR با مقادیر کاپا در حد ۰/۸۶ در جایگاه دوم قرار دارد. ضعیف‌ترین ضریب کاپا به میزان ۰/۴۶ متعلق به شاخص MIRBI بوده است. این شاخص در تشخیص پهنه‌های متأثر از آتش‌سوزی بسیار ضعیف عمل کرده است.

جدول ۲: میزان ضریب کاپا برای شاخص‌های طیفی استفاده‌شده در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱

شاخص طیفی	ضریب کاپا
NDSWIR	۰/۷۳
NBR	۰/۸۶
+NBR	۰/۹۲
NBRSWIR	۰/۵۲
MIRBI	۰/۴۶

در آخرین بخش از پژوهش، بین شاخص +NBR با شاخص‌های دیگر همبستگی پیرسون برقرار شد. بر این اساس مشاهده شد که شاخص‌های NDSWIR و NBR بیشترین ضریب همبستگی را به میزان ۰/۹۵ با شاخص +NBR داشته‌اند. ولی ضریب R2 برای شاخص NDSWIR به میزان ۰/۹۲ بوده و نسبت به شاخص NBR که معادل ۰/۹۰

است، بیشتر می‌باشد. کمترین میزان همبستگی به میزان ۰/۱۶ نیز متعلق به شاخص MIRBI بوده که همبستگی بسیار ضعیفی را نشان می‌دهد (شکل ۵، جدول ۳).



شکل ۵: نمودار پراکنش شاخص‌های طیفی با شاخص +NBR در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱. منبع: نویسنده

جدول ۳: مقادیر ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین R2 بین شاخص‌های طیفی با شاخص +NBR

شاخص	همبستگی پیرسون	R ²
+NBR, NDSWIR	۰/۹۵	۰/۹۲
+NBR, NBRSWIR	۰/۳۱	۰/۱۰
+NBR, NBR	۰/۹۵	۰/۹۰
+NBR, MIRBI	۰/۱۶	۰/۰۲

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش قابلیت نقشه‌برداری دقیق مناطق سوخته را با استفاده از علم سنجش‌ازدور تایید می‌کند. تصاویر چندطیفی ارائه‌شده توسط سنجنده‌های ماهواره سنتینل ۲ از قابلیت بالایی در تشخیص پهنه‌های آتش‌سوزی برخوردارند؛ ولی نیاز به انتخاب و ترکیب مناسب باندها می‌باشد. در واقع وجود چندین شاخص امکان دستیابی به نتایج مطلوب را فراهم می‌سازد. باین‌حال ویژگی‌های محیطی می‌تواند سطح دقت نقشه نهایی را کاهش دهد. توده-

های آبی و ابرها برای برخی از شاخص‌ها ایجاد خطا نموده و بازتاب‌های کاذب با افزایش غیرموجه در پیکسل‌ها، به-عنوان مناطق سوخته در نظر گرفته می‌شود. حتی اگر بتوان با استفاده از روش‌های خاص اختلال توده آبی و ابرها را حذف کرد؛ اما شاخص‌ها بایستی از چنان توانایی برخوردار باشند که اثر این پدیده‌ها را کاهش دهند. شاخص جدید که در این پژوهش برای تصاویر سنتینل ۲ ارائه شده، این امکان را ایجاد می‌کند که بازتاب‌های مناطق سوخته را حتی در صورت وجود پهنه‌های آبی و توده‌ها ابر تشخیص دهد. این شاخص در مقایسه با شاخص‌های MIRBI، NDSWIR، NBR و NBRSWIR به مقادیر بالای ضریب کاپا به میزان ۰/۹۲ دست یافته است. عملکرد بالای شاخص +NBR هم در مورد رویکرد تک زمانی و هم در رویکرد دو زمانی به اثبات رسید. سایر شاخص‌ها در رویکرد تک زمانی به نتایج ضعیف‌تری نسبت به این شاخص دست یافتند؛ ولی شاخص +NBR حتی در این شرایط نیز عملکرد بهتری را به نمایش گذاشت. تنها با استفاده از باندهای ۱۲ و 8A اجسام آبی تمایل به داشتن مقادیر روشنایی بالا در پیکسل‌ها دارند. با کم کردن میزان انرژی، پیکسل‌های باند آب تمایل دارند که تاریک دیده شوند. بنابراین در نهایت مناطق سوخته روشن دیده شده و به راحتی قابل‌شناسایی هستند. علاوه بر این شاخص +NBR با ایجاد مقادیر منفی برای ابرها باعث می‌گردد که این عوارض با پیکسل سوختگی اشتباه گرفته نشود. قابلیت این شاخص توسط تحقیقات روی و همکاران (۲۰۱۶) به تایید رسیده و نتایج مشابهی به دست آمده است.

منابع

- امامی، حسن؛ شهریاری، حسن. (۱۳۹۸). کمی‌سازی عوامل محیطی و انسانی در وقوع آتش‌سوزی جنگل با روش‌های RS و GIS مناطق حفاظت‌شده ارسباران، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۸، شماره ۱۱۲، ۵۳-۳۳.
- جانباز قبادی، غلامرضا. (۱۳۹۸). بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان بر اساس شاخص خطر آتش‌سوزی (FRSI) با بهره‌گیری از تکنیک (GIS)، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۶، شماره ۳، ۱۰۲-۸۹.
- رودسرای، زهره؛ سام خانیانی، علی؛ کیانی، عباس. (۱۴۰۱). مروری بر روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور در شناسایی و پایش آتش‌سوزی جنگل، نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران، دوره ۱۴، شماره ۴، ۵۲-۱۹.
- عابدی قشلاقی، حسن؛ ولی‌زاده کامران، خلیل. (۱۳۹۷). ارزیابی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS، مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۷، شماره ۱۵، ۶۶-۴۹.
- عبدی، امید؛ شتایی، شعبان؛ شیروانی، زینب؛ نقوی، محمدرضا. (۱۳۹۰). اثر مدیریت جنگل روی آتش‌سوزی جنگل‌های استان گلستان در سال ۱۳۸۹ با استفاده از GIS، نشریه تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، دوره ۹، شماره ۲، ۱۰۸-۱۰۰.
- فرج زاده، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مکری، ساحل. (۱۳۹۴). تجزیه‌وتحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشا آب‌وهوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۲، شماره ۳، ۱۰۴-۸۳.
- Arellano-Pérez, S., Ruiz-González, A. D., Álvarez-González, J. G., Vega-Hidalgo, J. A., Díaz-Varela, R., & Alonso-Rego, C. (2018). Mapping fire severity levels of burned areas in Galicia (NW Spain) by Landsat images and the dNBR index: Preliminary results about the influence of topographical, meteorological, and fuel factors on the highest severity level. *Advances in Forest Fire Research*, 1053-1060.
- Amos, C., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2019). Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection. *International journal of remote sensing*, 40(3), 905-930.
- Barboza Castillo, E., Turpo Cayo, E.Y., de Almeida, C.M., Salas López, R., Rojas Briceño, N.B., Silva López, J.O., Espinoza-Villar, R. (2020). Monitoring wildfires in the northeastern Peruvian Amazon using Landsat-8 and sentinel-2 imagery in the GEE platform. *International Journal of Geoinformation*, 9, 564- 576.
- Dibs, H., Hasab, H.A., Al-Rifaie, J.K., Al-Ansari, N. (2020). An optimal approach for land-use/land-cover mapping by integration and fusion of multispectral Landsat OLI images: A case study in Baghdad, Iraq. *Water Air Soil Pollution*, 231, 488- 498.
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing Environment*, 96, 328-339.

- García, M.J.L., Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, 6, 31–37.
- Gerard, F., Plummer, S., Wadsworth, R., Sanfeliu, A.F., Iliffe, L., Balzter, H., Wyatt, B. (2003). Forest fire scar detection in the boreal forest with multitemporal spot-vegetation data. *IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing*, 41, 2575–2585.
- Hasmadi, M., Pakhriazad, H.Z., Shahrin, M.F. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Geogr. Malays. Journal of Society and Space*, 5, 1–10.
- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., Zhu, Z. (2017). Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing Environment*, 202, 166–176.
- Ip, F., Dohm, J.M., Baker, V.R., Doggett, T., Davies, A.G., Castano, B., Cichy, B. (2004). ASE floodwater classifier development for EO-1 Hyperion imagery. *Lunar Planet. Sci*, 35, 1–2.
- Liu, C., Frazier, P., Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing Environment*, 107, 606–616.
- Liu, S., Zheng, Y., Dalponte, M., Tong, X. (2020). A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data. *Eur. Journal of Remote Sensing*, 53, 104–112.
- Mallinis, G., Gitas, I.Z., Giannakopoulos, V., Maris, F., Tsakiri-Strati, M. (2013). An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *Journal of Digital Earth*, 6, 124–136.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal Remote Sensing*, 17, 1425–1432.
- Meneses, B.M. (2021). Vegetation recovery patterns in burned areas were assessed with Landsat 8 OLI imagery and environmental biophysical data. *Fire*, 4, 76–92.
- Nolde, M., Plank, S., Riedlinger, T. (2020). An adaptive and extensible system for satellite-based, large-scale burnt area monitoring in near-real time. *Remote Sensing*, 12, 2162–2189.
- Oliveira, E.R., Disperati, L., Alves, F.L. (2021). A new method (MINDED-BA) for automatic detection of burned areas using remote sensing. *Remote Sensing*, 13, 5164–5191.
- 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, 19–35.
- Pulvirenti, L., Squicciarino, G., Fiori, E., Fiorucci, P., Ferraris, L., Negro, D., Puca, S. (2020). An automatic processing chain for near real-time mapping of burned forest areas using sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12, 674–691.
- Roy, D.P., Zhang, H.K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Kovalsky, V. (2016). A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing Environment*, 176, 255–271.
- Saidi, S., Younes, A.B., Anselme, B. (2021). A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: Case of Bizerte region, Tunisia. *Applied Geomatics*, 13, 587–603.
- Sanchez, A.H., Picoli, M.C.A., Camara, G., Andrade, P.R., Chaves, M.E.D., Lechler, S., Queiroz, G.R. (2020). Comparison of cloud cover detection algorithms on sentinel-2-2 images of the Amazon tropical forest. *Remote Sensing*, 12, 1284–1302.
- Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Vanden Borre, J., Goossens, R. (2014). Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sensing*, 6, 1803–1826.
- Silva, J.M.N., Pereira, J.M.C., Cabral, A.I., Sa, A.C.L., Vasconcelos, M.J.P., Mota, B., Gre'Goire, J.-M. (2003). An estimate of the area burned in southern Africa during the 2000 dry season using SPOT-VEGETATION satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8498–8522.
- 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, 220–246.
- Story, M., Congalton, R.G. (1986). Accuracy assessment: A user's perspective. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 52, 397–399.
- Szpakowski, D.M., Jensen, J.L. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11, 2638–2652.
- Tanase, M.A., Belenguer-Plomer, M.A., Roteta, E., Bastarrika, A., Wheeler, J., Fernández-Carrillo, Á., Chuvieco, E. (2020). Burned area detection and mapping: Intercomparison of sentinel-1 and sentinel-2 based algorithms over tropical Africa. *Remote Sensing*, 12, 334–351.
- Trigg, S., Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2641–2647.
- Veraverbeke, S., Hook, S., Hulley, G. (2012). An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sensing Environment*, 123, 72–80.
- Wang, L., Qu, J.J., Hao, X. (2008). Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. *Agricultural and forest Meteorological*, 148, 1767–1776.