



جغرافیا و روابط انسانی، بهار ۱۴۰۵، دوره ۹ شماره ۱، صص ۱۰۳۹-۱۰۱۸

بررسی و تحلیل طیفی آتش‌سوزی جنگل با استفاده از شاخص NBR+ و مقایسه آن با شاخص‌های طیفی ماهواره سنتینل-۲ (مطالعه موردی: منطقه حفاظت‌شده کوه دیل)

مهدی فیض‌اله پور، امیرحسین محمدی*۲

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

mohammadi.znu.ac@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳

چکیده

پایش مناطق سوخته با بهره‌گیری از تصاویر چند طیفی ماهواره‌ای به‌سادگی قابل‌انجام است. به‌منظور تفکیک پوشش گیاهی سالم از نواحی آسیب‌دیده، شاخص‌هایی طراحی و ارائه شده‌اند. در راستای کاهش خطا و بهبود دقت نتایج، با در نظر گرفتن ویژگی‌های بازتابی باندهای سنجنده سنتینل-۲، شاخص سوختگی نرمال‌شده NBR+ معرفی گردید. کارایی این شاخص از طریق مقایسه با چهار شاخص دیگر، در منطقه‌ای به وسعت ۵۵ کیلومتر مربع در منطقه حفاظت‌شده کوه دیل، واقع در شمال شهرستان گچساران در استان کهگیلویه و بویراحمد، مورد تأیید قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، دو رویکرد تک‌زمانه و دوزمانه مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تفکیک پیکسل‌های مربوط به نواحی سوخته از نواحی فاقد سوختگی، از روش تفاضل‌گیری میان تصاویر مربوط به پیش و پس از آتش‌سوزی در تاریخ‌های ۱۲ مه ۲۰۲۰ و ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰ استفاده شد. همچنین، جهت ارزیابی عملکرد شاخص‌ها، ماتریس‌های سردرگمی تهیه شده و با یکدیگر مقایسه گردیدند. شاخص NBR+ به دلیل حذف توده‌های ابری و پهنه‌های آبی که در سایر شاخص‌ها به‌طور نادرست طبقه‌بندی شده بودند، به نتایج مطلوب‌تری دست‌یافته است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون نیز نشان داد که شاخص‌های NBR و NDSWIR با مقدار ۰/۹۲ بالاترین همبستگی را با شاخص NBR+ دارند، در حالی که شاخص MIRBI با مقدار ۰/۳۷ کمترین میزان همبستگی را نشان داده است. در همین حال، شاخص NBR+ با دستیابی به بالاترین ضریب کاپا معادل ۰/۹۰، توانمندی بالایی در شناسایی نواحی تحت‌تأثیر آتش‌سوزی از خود نشان داده است.

واژگان کلیدی: شاخص‌های نرمال‌شده سوختگی، شاخص‌های طیفی، آتش‌سوزی جنگل، سنتینل-۲

آتش‌سوزی جنگل‌ها و گسترش آن یکی از پدیده‌های طبیعی در سراسر کره خاکی می‌باشد. پدیده‌های طبیعی همواره پیچیده بوده و عوامل زیادی بر روی آنها تأثیرگذار می‌باشد، پدیده آتش‌سوزی در جنگل‌ها و گسترش آن از این قاعده مستثنی نبوده و سالیانه در مناطق مختلف کشور رخ می‌دهد (صالحی و زارعی، ۱۳۹۷). ایران یک کشور حادثه‌خیز است که در آن آتش‌سوزی جنگل‌ها یک بحران اساسی محسوب و سالانه هزاران هکتار از پوشش گیاهی طعمه حریق می‌شود. دلایل آتش‌سوزی ممکن است انسانی یا جوی باشد. حدود ۵۰ سال است که تلاش برای مطالعات آتش‌سوزی جنگل‌ها با تصاویر ماهواره‌ای شروع شده است. (Farajzadeh et al, 2015) در ایران نیز، جنگل‌های زاگرس و سایر مناطق حفاظت‌شده با توجه به ویژگی‌های خاص خود، یکی از آسیب‌پذیرترین نواحی در برابر آتش‌سوزی‌های جنگلی هستند (Khosravi et al, 2016).

فنون مبتنی بر سنجش‌ازدور از سال برای شناسایی آتش‌سوزی جنگل، ارزیابی و نظارت، از میانه دهه ۱۹۸۰ توسعه یافتند (Lentile et al., 2006). آتش‌سوزی جنگل‌ها می‌تواند منجر به کاهش رطوبت کلروفیل و تاج پوشش و قرار گرفتن در معرض خاک لخت در زیر تاج پوشش شود که منجر به کاهش بازتاب در ناحیه طول موج مادون قرمز نزدیک (NIR) و افزایش بازتاب در ناحیه طول موج مادون قرمز میانی (MIR) می‌شود (Jensen, 2000). بنابراین شاخص‌های طیفی مشتق شده از باندهای NIR و MIR از تکنیک‌های اصلی مورد استفاده در تهیه نقشه آتش‌سوزی جنگل‌ها هستند (Bretreger et al., 2024). با توجه به اینکه منطقه مادون قرمز میانی (MIR) به طور گسترده‌ای نسبت به رطوبت خاک و پوشش گیاهی حساس است (Miller and Yool, 2002)، داده‌های بازتاب آن ناحیه طیفی باعث بهبود وضعیت زیر مناطق سوخته و الگوهای باززایی آن‌ها شده است.

برخی از شایع‌ترین شاخص‌ها که برای پایش مناطق سوخته مفید بوده‌اند، نسبت سوختگی نرمال شده (NBR) و شاخص آب تفاضل نرمال شده (NDWI) هستند (Nasery and Kalkan, 2020). نسبت سوختگی نرمال شده (NBR) یک شاخص طیفی است که برای برآورد مساحت سوختگی و شدت سوختگی توسعه داده شده است (Key and Benson, 2006). در این شاخص، نسبت باندهای نرمال‌شده مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و موج کوتاه (SWIR) به کار گرفته شده است. ترکیب این باندها امکان پایش و تحلیل تغییرات پدیده را در مراحل قبل و بعد از آتش‌سوزی فراهم می‌سازد. در طول موج‌های NIR، میزان جذب انرژی در پوشش گیاهی اندک و بازتاب نور بالا است، در حالی که در طول موج‌های SWIR، این روند معکوس شده و بازتاب و عبور نور کاهش می‌یابد، اما جذب انرژی به شدت افزایش پیدا می‌کند. پس از آتش‌سوزی، مناطق آسیب‌دیده ویژگی‌های متفاوتی نشان می‌دهند، به طوری که بازتاب در باند NIR کاهش یافته و در باند SWIR به طرز محسوس‌تری افزایش می‌یابد. (Roy et al, 2016). علاوه بر این،

ویژگی‌های محیطی منطقه می‌تواند بر دقت شناسایی آتش‌سوزی تأثیرگذار باشد. به‌عنوان نمونه، وجود ابرها و سایه‌ها ممکن است بازتاب‌های طیفی کاذبی ایجاد کرده و نتایج تحلیل را دچار خطا کنند. از این رو، انجام اقدامات اصلاحی ضروری است (Nolde et al, 2020). با استفاده از باند مادون قرمز موج کوتاه (SWIR)، میزان این خطاها کاهش می‌یابد، چرا که در این باند، بازتاب نواحی سوخته معمولاً نسبتاً ثابت باقی می‌ماند یا تنها تغییرات جزئی نشان می‌دهد. (Oliveira et al, 2021).

در ایران نیز تحقیقات مؤثری در ارتباط با آتش‌سوزی جنگل صورت پذیرفته است که نشان‌دهنده نقش کلیدی و مهم سنجش‌ازدور در مطالعات طبیعی می‌باشد.

طیبیان (۱۴۰۱) در مقاله‌ای با عنوان پهنه بندی کالبدی خطر آتش‌سوزی جنگل با روش AHP فازی و GIS به بررسی منطقه اسالم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد مناطقی که در سال‌های گذشته دارای سابقه آتش‌سوزی بودند با نقشه نهایی کاملاً مطابقت داشته و ۴۸ درصد از آتش‌سوزی‌های به وقوع پیوسته در مناطقی با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار گرفتند. فروتن و اسلام زاده (۱۴۰۱) در مقاله‌ای آتش‌سوزی در مراتع و جنگل‌های مازندران با استفاده از تصاویر لندست، بررسی کردند. در این تحقیق از روش NBR استفاده شد و همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که روش NBR، داده‌های آماری و همچنین NDVI هماهنگی وجود دارد و آتش‌سوزی بیشتر از ۵۰۰ هکتار متعلق به پوشش گیاهی مناطق سوادکوه، بهشهر، نور و تنکابن است. در ادامه به منظور تسریع تصمیم‌گیری‌های آینده، وضعیت آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع مازندران برای ۱۰ سال آینده پیش‌بینی و نقشه‌سازی شد. صالحی و همکاران (۱۴۰۲) در مقاله‌ای به پهنه بندی ریسک آتش‌سوزی مناطق جنگلی با استفاده از روش تلفیقی شبکه عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات مکانی به بررسی منطقه حفاظت شده شیمبار، استان خوزستان پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که بیست درصد مساحت منطقه در طبقه متوسط پتانسیل وقوع آتش‌سوزی، یازده درصد در طبقه زیاد و ده درصد در طبقه خیلی زیاد قرار دارد. همچنین مهم‌ترین متغیرهای موثر بر وقوع آتش‌سوزی شامل فاصله از رودخانه، تپ‌اراضی، ارتفاع و حداقل دما است. جهدی و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از GIS و با روش (BWM) به مطالعه محدوده جنگلی شهرستان دوره چگنی، استان لرستان را پرداختند. بر اساس نتایج، منطقه مورد مطالعه به چهار کلاس خطر آتش‌سوزی طبقه بندی شد. مناطق با خطر آتش خیلی زیاد (۷ درصد) و زیاد (۱۱ درصد) در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. همچنین به ترتیب ۸ و ۷۴ درصد از منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های خطر آتش متوسط و کم قرار گرفت. حامدی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان تحلیل پتانسیل خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از روش GIS و RS نظیر فازی سازی لایه‌ها از روش تحلیل شبکه‌ای و روش میانگین وزنی مرتب استفاده کردند. آتش‌سوزی جنگل‌های زاگرس شهرستان لردگان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مادیس در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ مشخص و عوامل موثر

بر آتش سوزی بررسی شد. سپس مناطق پرخطر طبقه بندی و مساحت مناطق مستعد آتش سوزی و تعداد زون‌ها مشخص گردید. بر اساس نتایج تحلیل سری زمانی نقشه‌ها نشان داد از عوامل موثر بر وقوع حریق در مناطق بحرانی، عامل فاصله از جاده و مناطق مسکونی، شیب، جهت، شاخص GVM ، $NDVI$ و حداکثر دما بیشترین تاثیر را در ایجاد حریق داشتند. سناریوی سطح ریسک پایین و مقدار اندک جبران نیز با میزان ROC بالاتر از 0.7 به عنوان بهترین مدل ریسک آتش سوزی جنگل برآورد گردید. بیگلری قلدره و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی خطر آتش سوزی جنگل‌های استان مازندران با استفاده از مدل AHP فازی، نتایج این مطالعه نشان داد که ۷۲ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل خطر آتش سوزی متوسط تا خیلی زیاد است. از مجموع مساحت حدود 2373189 هکتاری استان مازندران؛ $4/8$ درصد از منطقه در آسیب پذیری خیلی کم؛ $3/18$ درصد در آسیب پذیری کم؛ $66/23$ درصد در آسیب پذیری متوسط؛ $62/25$ درصد در آسیب پذیری زیاد و بالغ بر ۲۴ درصد در محدوده آسیب پذیری خیلی زیاد قرار دارد. بخش‌های شرق و جنوب شرقی نسبت به سایر بخش‌های منطقه مطالعاتی از پتانسیل آتش سوزی بالاتری برخوردار هستند.

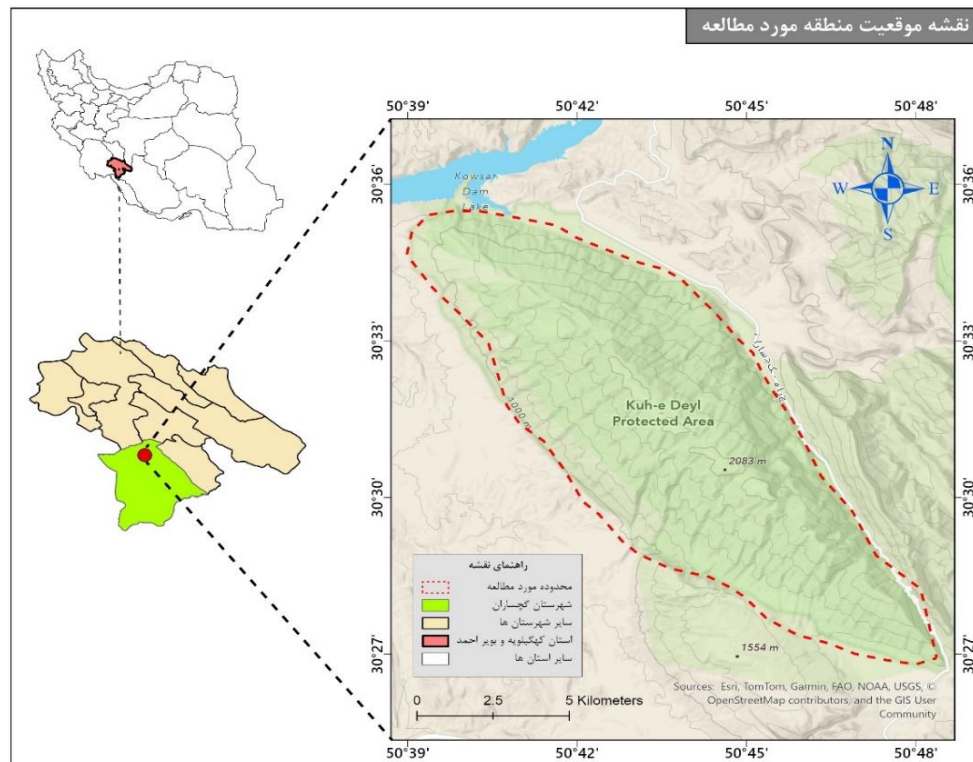
این پژوهش باهدف بهبود و ارتقای کارایی شاخص‌های موجود در حوزه شناسایی و ارزیابی آتش‌سوزی‌های جنگلی انجام شده است. آتش‌سوزی‌های جنگلی از جمله مخاطرات زیست‌محیطی هستند که می‌توانند خسارات جبران‌ناپذیری به اکوسیستم وارد کنند؛ از این‌رو، پایش دقیق و به‌موقع این رخدادها اهمیت بسیاری دارد. در راستای دستیابی به این هدف، از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ به دلیل توان تفکیک مکانی و طیفی بالای آن استفاده شده است. در این تحقیق، با بهره‌گیری از شاخص استاندارد تفاضل نرمال‌شده سوختگی (NBR)، شاخص جدیدی با نام $+NBR$ طراحی و توسعه داده شد. این شاخص به‌گونه‌ای بهبود یافته که حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات ناشی از آتش‌سوزی داشته باشد. عملکرد $+NBR$ از طریق آزمایش‌های متعدد ارزیابی شده و نتایج به‌دست‌آمده با چهار شاخص دیگر در زمینه سنجش میزان تأثیر آتش‌سوزی مقایسه شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر این شاخص‌ها، از تصاویر چندطیفی سنتینل-۲ مربوط به قبل و بعد از وقوع آتش‌سوزی استفاده گردید. این داده‌ها اطلاعات متنوعی درباره پوشش گیاهی و تغییرات ناشی از آتش‌سوزی ارائه می‌دهند و امکان بررسی دقیق‌تر سطح آسیب‌دیده را فراهم می‌کنند. نتایج این مطالعه می‌تواند در آینده برای مدیریت بهتر منابع طبیعی و کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی‌های جنگلی به کار گرفته شود.

نوآوری اصلی این تحقیق در دو مرحله کلیدی شکل گرفته است. نخستین گام، بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ است که به دلیل توان تفکیک مکانی و طیفی بالا، امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات ناشی از آتش‌سوزی را فراهم می‌کند. در گام بعدی، توسعه و استفاده از شاخص جدیدی با عنوان $+NBR$ صورت گرفته است. این شاخص، در مقایسه با شاخص‌های رایج، توانسته است تفکیک بهتری بین مناطق تحت‌تأثیر آتش‌سوزی، پهنه‌های آبی، و

توده‌های ابری ایجاد کند و از این نظر، به بهبود دقت ارزیابی‌ها کمک شایانی کرده است. با این حال، برجسته‌ترین نوآوری این پژوهش، استفاده از روش تفاضل‌گیری از تصاویر قبل و بعد از وقوع آتش‌سوزی است. این روش باعث شد تمامی پهنه‌های دچار تغییر در پوشش سطحی به‌صورت واضح در تصاویر نمایش داده شوند و مناطق آسیب‌دیده به‌طور دقیق‌تر شناسایی گردند. ترکیب این شاخص بهبودیافته با روش تفاضل زمانی، به تشخیص دقیق‌تر و مؤثرتر تغییرات ناشی از آتش‌سوزی انجامید و زمینه‌ساز ارتقای دقت تحلیل‌های مرتبط با مدیریت بحران در اکوسیستم‌های جنگلی شد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد بررسی با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی در جنوب غربی ایران و در محدوده شهرستان گچساران واقع شده است. این منطقه بخشی از رشته‌کوه‌های زاگرس جنوبی بوده و در نزدیکی ارتفاعات کوه دیل قرار دارد. منطقه حفاظت‌شده کوه دیل با دارا بودن اقلیم نیمه‌خشک، پوشش گیاهی متنوعی نظیر بلوط ایرانی، بنه، بادام کوهی، گون و زالزالک دارد. این تنوع گیاهی زیستگاه مناسبی برای حیات وحش منطقه ایجاد کرده است. در این محدوده گونه‌های جانوری متعددی از جمله کل و بز، گرگ، شغال، خرگوش، کبک، تیهو و پرندگان شکاری مختلف زندگی می‌کنند. در این پژوهش، محدوده‌ای به وسعت حدود ۵۵ کیلومتر مربع تحت بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه، منبع: نگارنده

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ که تحت برنامه کپرنیک توسط سازمان فضایی اروپا (ESA) ارائه می‌شوند، شامل دو ماهواره سنتینل-2A و سنتینل-2B هستند و به‌صورت رایگان در اختیار عموم قرار دارند. در این تحقیق از داده‌های ماهواره سنتینل-2A بهره گرفته شده است. برنامه کپرنیک با استفاده از این ماهواره‌ها، امکان نظارت مداوم بر تغییرات زمین را فراهم می‌کند. تصاویر دریافتی از سنتینل به‌عنوان منبع اصلی جمع‌آوری اطلاعات در این برنامه، برای پایش مخاطرات محیطی و بازسازی مناطق آسیب‌دیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، دو مجموعه داده از تصاویر سنتینل-2A به کار گرفته شده است: داده‌های مربوط به ۱۲ مه ۲۰۲۰ که شرایط منطقه پیش از آتش‌سوزی را نمایش می‌دهد و داده‌های ثبت‌شده در ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰ که وضعیت منطقه پس از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. این تصاویر به‌عنوان ابزار تحلیلی برای بررسی تغییرات ناشی از آتش‌سوزی و ارزیابی اثرات آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، شاخص NBR+ بر پایه تصاویر چندطیفی سنتینل-۲ به‌منظور شناسایی مناطق سوخته ارائه شده و رویکرد روش‌شناختی به‌کارگرفته‌شده برای ارزیابی عملکرد این شاخص تشریح گردیده است. در ابتدا، شاخص‌های پیشین مرتبط با شناسایی مناطق سوخته معرفی شده و مقایسه‌ای میان آنها و شاخص NBR+ صورت گرفته است. در ادامه، دلایلی که منجر به فرمول‌بندی شاخص پیشنهادی شده‌اند توضیح داده شده و مبنای علمی این انتخاب مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، روش ارزیابی دقت نتایج با استفاده از رویکردهای مرسوم در سنجش‌ازدور، از جمله ماتریس سردرگمی، توضیح داده شده و مراحل مربوط به صحت‌سنجی تشریح شده است (Hasmadi et al ,)

2009). تمامی آزمایش‌ها در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام شد. در این فرایند، از ابزار Raster Calculator استفاده گردید که امکان پیاده‌سازی معادلات شاخص‌ها را با بهره‌گیری از عملگرهای موجود در نرم‌افزار فراهم می‌کند و به اجرای دقیق محاسبات مربوط به شاخص‌های مدنظر کمک می‌نماید.

برای شناسایی مناطق سوخته، از باندهای مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR) استفاده شده است. باند NIR قادر است تغییرات در پوشش تاج گیاهی را برجسته کرده و بازتاب برگ‌های سوخته را به‌وضوح نشان دهد، درحالی‌که باند SWIR تغییرات مرتبط با میزان خشکی و کاهش رطوبت را شناسایی می‌کند (Silva et al, 2003). این ترکیب باندها به تشخیص دقیق‌تر و مؤثرتر مناطق آسیب‌دیده کمک می‌کند. پس از وقوع آتش‌سوزی، با تخریب پوشش گیاهی، بازتاب باند مادون‌قرمز نزدیک (NIR) به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، بازتاب باند مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR) به دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی حفظ‌کننده رطوبت و افزایش خشکی سطح زمین افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات در بازتاب باندها، به شناسایی و تفکیک مناطق سوخته کمک می‌کند (Schepers et al, 2014).

برای تشخیص مناطق سوخته، الگوریتم‌های متعددی با ترکیب باندهای مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR) طراحی شده‌اند. با این حال، برخی شاخص‌های طیفی تنها با استفاده از باندهای SWIR، قرمز و NIR توسعه یافته‌اند. در میان شاخص‌های طیفی گوناگون، چهار شاخص کلیدی شامل نسبت نرمال شده سوختگی (NBR)، نسبت نرمال شده سوختگی مبتنی بر (NBR-SWIR)، شاخص تفاوت نرمال شده مادون‌قرمز موج‌کوتاه (NDSWIR) و متوسط شاخص دو طیفی مادون‌قرمز (MIRBI) انتخاب و با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه، ویژگی‌های اصلی این شاخص‌ها و خصوصیات شاخص پیشنهادی توضیح داده شده است.

یکی از شاخص‌های شناخته‌شده و پرکاربرد برای شناسایی مناطق سوخته، نسبت نرمال شده سوختگی (NBR) است که به‌عنوان شاخص استاندارد در ارزیابی شدت آتش‌سوزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص با ترکیب طول‌موج‌های مادون‌قرمز نزدیک (NIR) از باند 8A و مادون‌قرمز موج‌کوتاه (SWIR) از باند ۱۲ عمل می‌کند. شاخص NBR در شناسایی مناطق سوخته و تعیین شدت آتش‌سوزی بسیار مفید است. این شاخص می‌تواند مناطقی را که تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند، شناسایی کند و برای برنامه‌ریزی و مدیریت بلایا استفاده شود (Lentile et al, 2006). یکی از کاربردهای مهم NBR، ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی پس از آتش‌سوزی است. این شاخص می‌تواند کمک کند تا مناطقی که به طور شدید تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند شناسایی شوند (Oliveira et al, 2015). این شاخص برای ارزیابی تأثیرات آتش‌سوزی بر پوشش گیاهی و اکوسیستم‌ها استفاده می‌شود و به‌ویژه در مطالعات مربوط به بازسازی مناطق آسیب‌دیده مفید است (Key and Benson, 2006).

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

شاخص جدیدی برای تشخیص مناطق سوخته، به نام نسبت نرمال شده سوختگی در باند (NBR) SWIR، بر اساس داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و توسط لیو و همکاران (۲۰۲۰) توسعه یافته است. این شاخص که عملکردی مشابه شاخص NBR دارد، به جای باندهای NIR و SWIR، از باندهای SWIR1 (باند ۱۱) و SWIR2 (باند ۱۲) استفاده می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). در این شاخص، دو مقدار عددی ثابت در فرمول اعمال شده است. نخست، برای کاهش تأثیر تغییرات آب، عدد ۰/۰۲ از صورت کسر کم می‌شود تا مقدار آب نزدیک به صفر یا حتی منفی شود. دوم، در مخرج، عدد ۰/۱ اضافه می‌شود تا از تغییرات غیرطبیعی ناشی از تغییرات آب و افزایش ناخواسته مقادیر شاخص جلوگیری شود. این اصلاحات باعث می‌شود شاخص دقت بیشتری در شناسایی مناطق سوخته داشته باشد و تغییرات رطوبتی را بهتر مدیریت کند.

$$NBRSWIR = \frac{B12-B11-0.02}{B12+B11+0.1} \quad (2)$$

از آنجایی که باند SWIR در تشخیص آتش‌سوزی‌های قدیمی مؤثر تشخیص داده شده است، (Gerard et al, 2003). از طول موج SWIR و شاخص تفاوت نرمال شده مادون قرمز موج کوتاه (NDSWIR) برای شناسایی مناطق آتش‌سوزی جنگلی استفاده کردند. بر اساس یافته‌های آن‌ها، این شاخص قادر است مناطق آتش‌گرفته را حتی تا ۱۰ سال پس از وقوع آتش‌سوزی، با استفاده از بازتاب طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR)، شناسایی کند. شاخص NDSWIR به‌عنوان ابزاری برای نظارت بر خشکی و سلامت گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده می‌شود و می‌تواند به‌ویژه در ارزیابی آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و آتش‌سوزی‌ها مفید باشد (Van der Werf et al., 2008).

$$NDSWIR = \frac{B11-B8A}{B11+B8A} \quad (3)$$

شاخص سوختگی مادون قرمز میانه (MIRBI) برای شناسایی و ارزیابی آتش‌سوزی‌ها از طریق داده‌های سنجنش‌ازدور استفاده می‌شود. این شاخص به طور خاص برای شناسایی آتش‌سوزی‌های جنگلی و تعیین نواحی آسیب‌دیده از سوختگی در سطح جهانی کاربرد دارد. MIRBI معمولاً از داده‌های ماهواره‌ای در باندهای مادون قرمز میانه (MIR) برای تمایز مناطق سوخته از مناطق غیرسوخته استفاده می‌کند. این باندها به دلیل حساسیت به دما و ویژگی‌های سوختگی، ابزاری مؤثر برای شناسایی آتش‌سوزی‌ها هستند (Roy et al, 2008). شاخص سوختگی مادون قرمز میانه (MIRBI) به‌عنوان ابزاری برای شناسایی و ارزیابی آتش‌سوزی‌ها از طریق داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود. این شاخص به‌ویژه در پایش آتش‌سوزی‌ها در نواحی دورافتاده و مناطق با پوشش گیاهی انبوه کاربرد دارد. باندهای مادون قرمز میانه به دلیل حساسیت بالای خود به تغییرات دما و ویژگی‌های سوختگی، ابزار مؤثری برای شناسایی

آتش سوزی‌ها محسوب می‌شوند. در بسیاری از مطالعات، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS برای تعیین نواحی سوخته و ارزیابی شدت سوختگی از طریق MIRBI مورد توجه قرار گرفته است (Kaufman et al, 2003).

$$MIRBI = 10 \times B12 - 9.8 \times B11 + 2 \quad (4)$$

برای استفاده بهینه از شاخص‌های شناسایی سوختگی، ضروری است که نواحی آبی و ابرها از داده‌ها حذف شوند. به همین منظور، معمولاً از ماسک‌ها استفاده می‌شود تا به این هدف دست یابیم (Wang et al., 2008). همان‌طور که در پژوهش‌های مختلف ذکر شده است (Pulivienti et al., 2020; Huang et al., 2017). به‌طور کلی، برای حذف نواحی آبی، از شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) استفاده می‌شود (McFeeters, 1996). آب معمولاً در باندهای سبز و آبی بازتاب قوی از خود نشان می‌دهد (Ip et al., 2004). به همین دلیل، نسخه‌ای پیشرفته از شاخص NBR معرفی شد که بازتاب آب را در نظر می‌گیرد و با نام +NBR شناخته می‌شود.

$$+NBR = \frac{(B12 - B8A - B3 - B2)}{(B12 + B8A + B3 + B2)} \quad (5)$$

از سوی دیگر، این معادله مقادیر منفی را برای ابرها در نظر می‌گیرد، زیرا بازتاب ابرها در باند ۱۲ به‌طور قابل توجهی کمتر از مجموع سه باند دیگر است. به همین دلیل، از آنجایی که مقادیر +NBR می‌تواند در بازه‌ای بین ۱- و ۱ تغییر کند، پیکسل‌های مربوط به ابرها در این شاخص مقادیر منفی را نشان می‌دهند و به این ترتیب نمی‌توان آن‌ها را با مقادیر نواحی سوخته اشتباه گرفت. مناطق با مقادیر بالاتر نشان‌دهنده زمین‌های سوخته هستند که بازتاب بالایی در باندهای مادون قرمز نزدیک و کوتاه‌موج دارند و به راحتی از سایر نواحی قابل تشخیص‌اند. این ویژگی باعث می‌شود که +NBR ابزاری مفید برای تفکیک دقیق مناطق سوخته از ابرها و سایر پوشش‌های گیاهی یا خاکی باشد.

در این مطالعه، از دو رویکرد تک‌زمانی و دوزمانی برای تحلیل هر یک از شاخص‌ها استفاده شد. رویکرد تک‌زمانی به‌طور ویژه بر روی تصاویر پس از آتش‌سوزی تمرکز دارد، درحالی‌که رویکرد دوزمانی از تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی برای مقایسه و ارزیابی دقیق‌تر تغییرات استفاده می‌کند. تجزیه و تحلیل دوزمانی با محاسبه شاخص‌های مختلف در دو بازه زمانی و ایجاد تفاوت بین این مقادیر انجام می‌شود. این روش به‌ویژه برای شبیه‌سازی دقیق‌تر تغییرات پوشش گیاهی و ارزیابی دقیق‌تر تأثیرات آتش‌سوزی بر اکوسیستم‌ها مفید است. به‌منظور محاسبه این تفاوت‌ها، معادله زیر به کار گرفته می‌شود که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تغییرات ایجادشده به‌طور شفاف‌تر شناسایی می‌شود. این رویکرد به محققان این امکان را می‌دهد که تأثیرات مختلف آتش‌سوزی‌ها را در سطح وسیع‌تر و با دقت بیشتری بررسی کنند. به این منظور از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$\Delta index = post\ Burn\ index - Pre\ Burn\ index \quad (6)$$

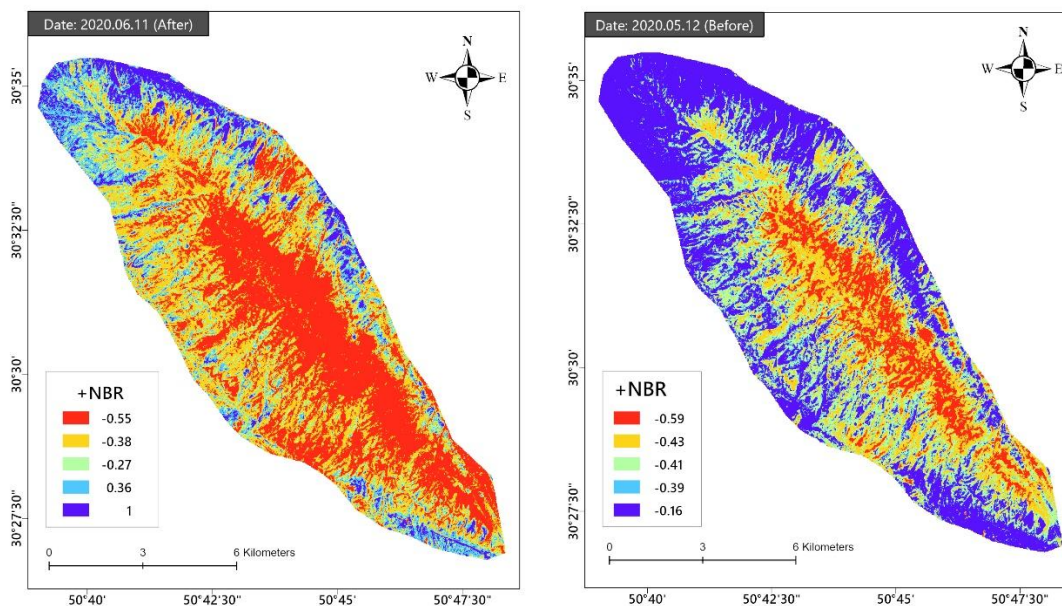
موضوعی نتایج به دست آمده، از نقاط آزمایشی استفاده شد. این نقاط با نقاط آموزش داده شده متفاوت هستند. این نقاط بیانگر مناطق سوخته شده و فاقد آتش‌سوزی هستند (Epting et al, 2005). مکان‌های آزمایشی از تجزیه و تحلیل بصری تصاویر چند طیفی به دست می‌آیند. نقاط فوق این امکان را فراهم می‌کنند که مشخص شود چند پیکسل

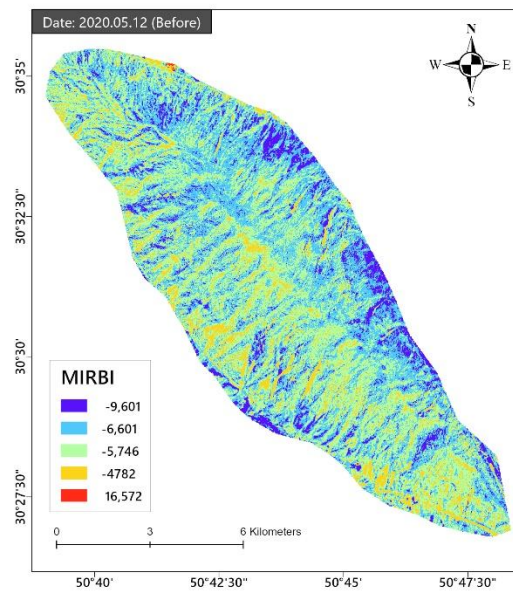
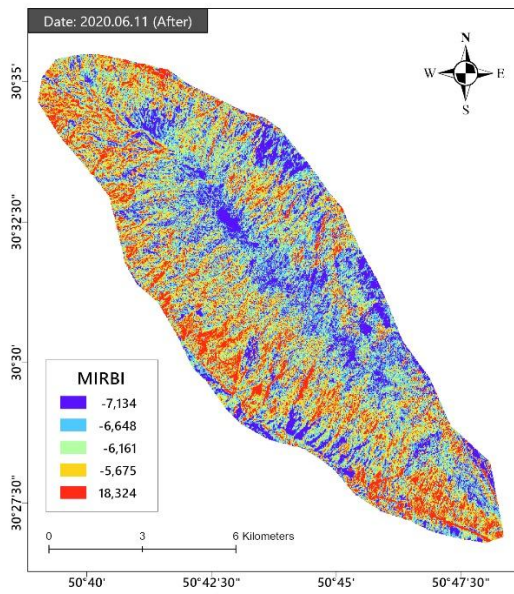
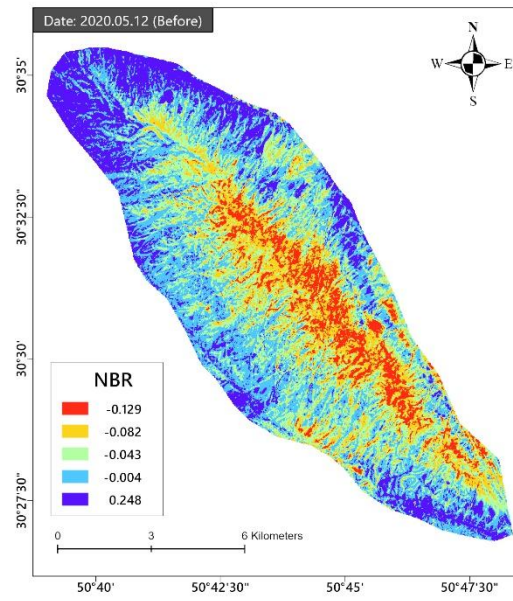
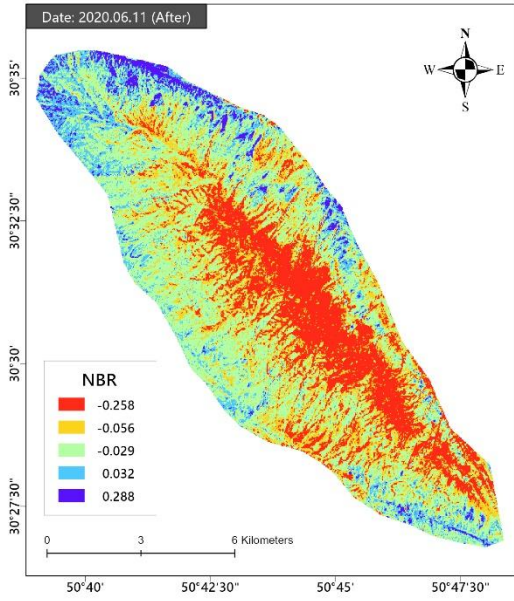
به درستی و چند پیکسل به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. رویکرد مذکور عمدتاً بر اساس ماتریس سردرگمی اعمال می‌شود. این ماتریس ابزاری ساده و قدرتمند است که دقت طبقه‌بندی تصاویر سنجنش از دور را نشان می‌دهد. ماتریس سردرگمی جدولی است که مطابقت بین نتایج طبقه‌بندی و داده‌های زمینی را نشان می‌دهد و از بازرسی بصری استخراج می‌شود (Story & Congalton, 1986). به جای در نظر گرفتن کل تصاویر، ماتریس‌های سردرگمی معمولاً از مقادیر گرفته شده از نقاط آموزشی ساخته می‌شوند و این امکان را فراهم می‌کنند که دقت موضوعی روش طبقه‌بندی ارزیابی شود (Dibs et al, 2020). در این تحقیق برای تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی، ماتریس سردرگمی ایجاد شده و تحلیل عددی دقت موضوعی با بهره‌گیری از شاخص کاپا انجام شد (Liu et al, 2007).

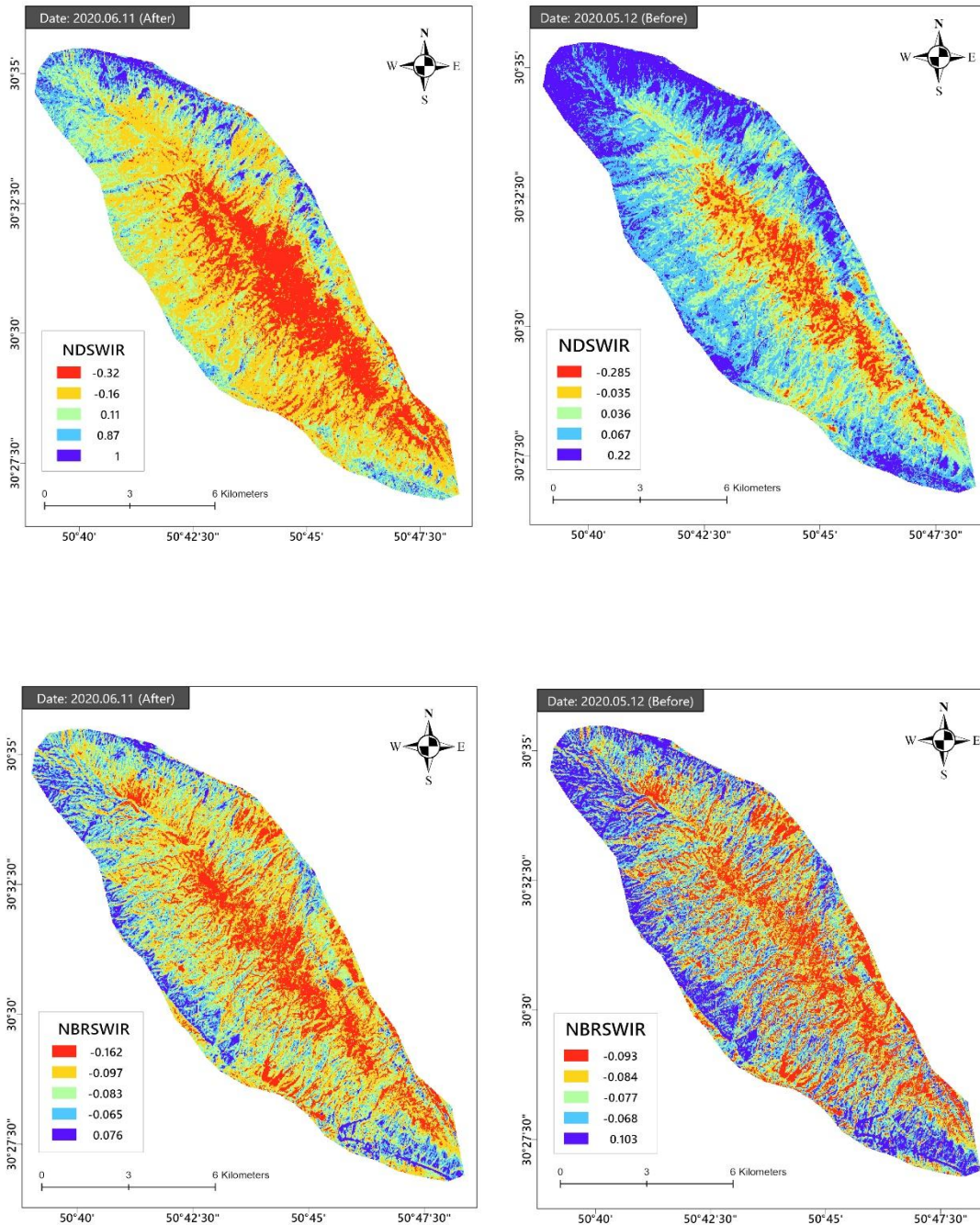
در نهایت، به منظور بررسی روابط همبستگی بین شاخص‌های طیفی با شاخص NBR+ از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده و مقادیر ضریب تعیین R2 محاسبه گردید.

یافته‌های تحقیق

اولین ارزیابی از سطح سوختگی هر نقشه می‌تواند از طریق بازرسی بصری انجام گیرد. مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های طیفی مطابق با ضریب شکست طبیعی جنکز در شکل ۲ ارائه شده است. تصاویر استفاده شده در تحقیق حاضر، در محدوده مورد مطالعه فاقد هر گونه پوشش ابر می‌باشد و از این جهت، با خطاهای ناشی از پوشش ابر در تحلیل این تصاویر مواجه نیستیم.







شکل ۲: مقادیر طبقه بندی شده شاخص های طیفی بر اساس میزان بازتاب طیفی در بازه زمانی قبل و بعد از آتش سوزی. منبع: نویسندگان

بر اساس شاخص NBRSWIR حداکثر بازتاب در ۱۲ مه یعنی قبل از وقوع آتش سوزی ۰/۱۰۳ بوده است. اما درحالی که این میزان در ۱۱ ژوئن به ۰/۰۷۶ رسیده است. وسعت این پهنه نیز از ۱/۸۳۰ کیلومتر مربع به ۰/۸۰۳ مترمربع تغییر پیدا کرده است که از ۱۸/۱۱ درصد به ۷/۹۴ درصد رسیده است. بر اساس این شاخص، بیشترین مقادیر متأثر از آتش سوزی در بخش های شمالی، شمال شرقی و نواحی جنوبی منطقه می باشد. در شاخص NDSWIR در تاریخ ۱۲

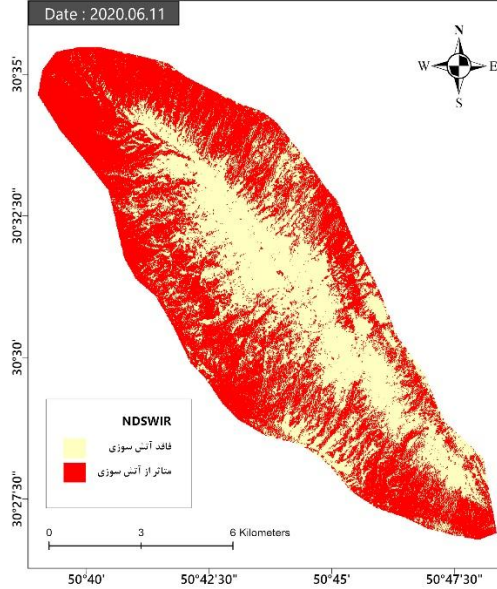
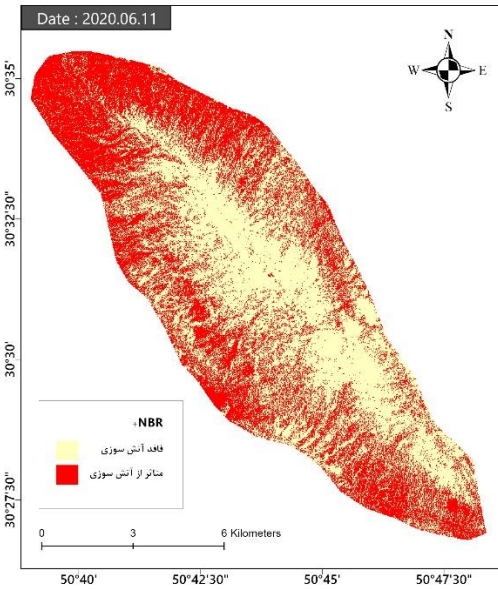
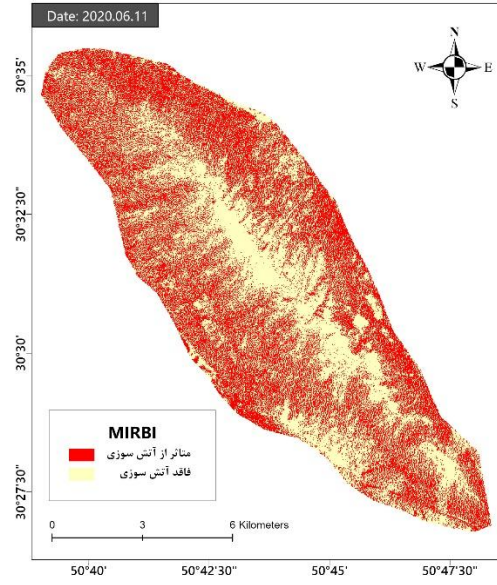
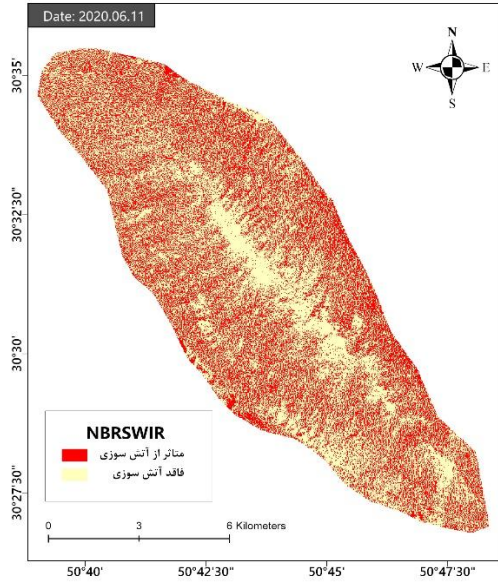
مه حداکثر میزان آستانه با ۰/۲۲ برابر بوده است. مقدار مساحت این مقدار ۱/۹۴۵ کیلومترمربع برابر با ۱۹/۲۵ درصد از کل مساحت منطقه می‌باشد. اما در تاریخ ۱۱ ژوئن حداکثر میزان آستانه به ۰/۱۱ رسیده است. همچنین مساحت این آستانه با ۰/۴۴۸ کیلومترمربع کاهش یافته و این کاهش معادل ۴/۳۸ درصد از مساحت کل بوده است که نشان‌دهنده تغییرات فاحشی است. 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. مقادیر بالای MIRBI معمولاً نشان‌دهنده مناطقی است که بیشترین آسیب را از آتش‌سوزی دیده‌اند. در ۱۲ مه حداکثر مقدار این شاخص ۱۶۵۷۲ بوده است که مساحتی بالغ بر ۰/۰۳ کیلومترمربع را دارا می‌باشد. اما در تاریخ ۱۱ ژوئن حداکثر آستانه به ۱۸۳۲۴ رسیده و مساحت آن معادل ۱/۶۵۰ کیلومترمربع می‌باشد (جدول ۱).

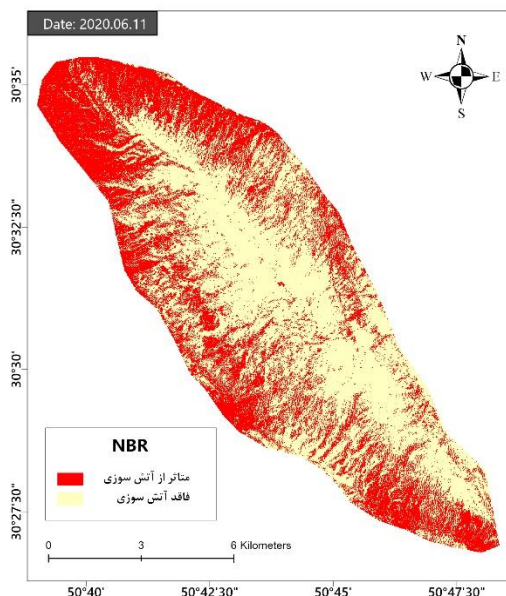
جدول ۱- مقادیر مساحت آستانه‌های طیفی بر اساس شاخص‌های طیفی

شاخص	۱۲ مه ۲۰۲۰			۱۱ ژوئن ۲۰۲۰		
	آستانه	مساحت (Km ²)	درصد	آستانه	مساحت (Km ²)	درصد
NBR SWIR	-۰/۰۹۳	۰۳۹/۲	۲۰/۱۹	-۰/۱۶۲	۹۰۰/۱	۱۸/۸۰
	-۰/۰۸۴	۱۴۸/۲	۲۱/۲۶	-۰/۰۹۷	۲۸۶/۳	۳۲/۵۲
	-۰/۰۷۷	۹۹۶/۱	۱۹/۷۶	-۰/۰۸۳	۶۰۲/۲	۲۵/۷۵
	-۰/۰۶۸	۰۸۷/۲	۲۰/۶۶	-۰/۰۶۵	۵۱۱/۱	۱۴/۹۵
	۰/۱۰۳	۸۳۰/۱	۱۸/۱۱	۰/۰۷۶	۸۰۳/۰	۷/۹۴
NDSWIR	-۰/۲۸۵	۷۲۲/۰	۷/۱۴	-۰/۳۲	۰۲۹/۲	۲۰/۰۸
	-۰/۰۳۵	۵۰۲/۱	۱۴/۸۷	-۰/۱۶	۲۰۲/۴	۴۱/۵۹
	۰/۰۳۶	۵۹۲/۲	۲۵/۶۶	۰/۱۱	۴۷۷/۲	۲۴/۵۲
	۰/۰۶۷	۳۳۹/۳	۳۳/۰۵	۰/۸۷	۹۴۴/۰	۹/۴۳
	۰/۲۲	۹۴۵/۱	۱۹/۲۵	۰/۱۱	۴۴۸/۰	۴/۳۸
+NBR	-۰/۵۹	۰۸۹/۱	۱۰/۷۸	-۰/۵۵	۸۱۲/۳	۳۷/۷۳
	-۰/۴۳	۲۲۱/۲	۲۱/۹۸	-۰/۳۸	۱۵۱/۳	۳۱/۱۹
	-۰/۴۱	۹۲۹/۲	۲۸/۹۹	-۰/۲۷	۰۹۹/۱	۱۰/۸۸
	-۰/۳۹	۵۸۷/۲	۲۵/۶۱	۰/۳۶	۲۱۳/۱	۱۲
	-۰/۱۶	۲۷۵/۱	۱۲/۶۲	۱	۸۲۶/۰	۸/۱۷
MIRBI	-۹۶۰۱	۰۸/۱	۱۰/۷۳	-۷۱۳۴	۸۳۵/۱	۱۸/۱۶
	-۶۶۰۱	۶۶۷/۳	۳۶/۳۰	-۶۶۴۸	۱۰۸/۲	۲۰/۸۷
	-۵۷۴۶	۱۰۶/۴	۴۰/۶۵	-۶۱۶۱	۴۸۹/۲	۲۴/۶۳
	-۴۷۸۲	۲۴۰/۱	۱۲/۲۸	-۵۶۷۵	۰۱۹/۲	۱۹/۹۸
	۱۶۵۷۲	۰۰۳/۰	۰/۰۳	۱۸۳۲۴	۶۵۰/۱	۱۶/۳۳

۲۳/۲۶	۳۵۰/۲	-۰/۲۵۸	۸/۰۷	۰۸۱/۰	-۰/۱۲۹	NBR
۲۰/۷۶	۰۹۸/۲	-۰/۰۵۶	۱۶/۵۶	۶۷۳/۱	-۰/۰۸۲	
۴۰/۸۸	۱۳۰/۴	-۰/۰۲۹	۲۴/۵۰	۴۷۶/۲	-۰/۰۴۳	
۱۰/۹۴	۱۰۶/۱	۰/۰۳۲	۳۱/۶۳	۱۹۶/۳	-۰/۰۰۴	
۴/۱۳	۴۱۷/۰	۰/۲۸۸	۱۹/۲۲	۹۴۲/۱	۰/۲۴۸	

در شاخص NBR، مقادیر مثبت به طور کلی نشان‌دهنده نواحی با بازتاب طیفی بالا هستند که به‌ویژه در تحلیل تغییرات پوشش گیاهی و اثرات آتش‌سوزی بسیار مفید می‌باشند. در تاریخ ۱۲ مه، حداکثر بازتاب طیفی برابر با ۰/۲۴۸ بوده است. این مقدار بازتاب طیفی به نواحی با پوشش گیاهی سالم و آسیب‌دیده در منطقه اشاره دارد و مساحتی بالغ بر ۱/۹۴۲ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد که معادل ۱۹/۲۲ درصد از مساحت کل منطقه مورد بررسی است. این داده‌ها نشان‌دهنده وضعیت به نسبت پایدار منطقه پیش از آتش‌سوزی است، که بازتاب‌های طیفی بالاتر به معنی وجود پوشش گیاهی سالم و بدون آسیب است. اما در تاریخ ۱۱ ژوئن، پس از وقوع آتش‌سوزی، حداکثر بازتاب طیفی به ۰/۲۸۸ افزایش یافته که نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در ساختار پوشش گیاهی منطقه است. این مقدار بازتاب طیفی در مقایسه با تاریخ قبلی نشان‌دهنده نواحی آسیب‌دیده از آتش‌سوزی می‌باشد. مساحت نواحی با این بازتاب طیفی به ۰/۴۱۷ کیلومتر مربع رسیده که معادل ۴/۱۳ درصد از مساحت کل منطقه است. این تغییرات در شاخص NBR نشان‌دهنده تغییرات ملموس در وضعیت پوشش گیاهی منطقه است، به‌ویژه پس از تأثیرات آتش‌سوزی. این کاهش در مساحت بازتاب‌های بالا می‌تواند نشان‌دهنده کاهش سلامت و تراکم پوشش گیاهی و یا به عبارتی دیگر، منطقه‌ای است که تحت تأثیر شدید آتش‌سوزی قرار گرفته است.





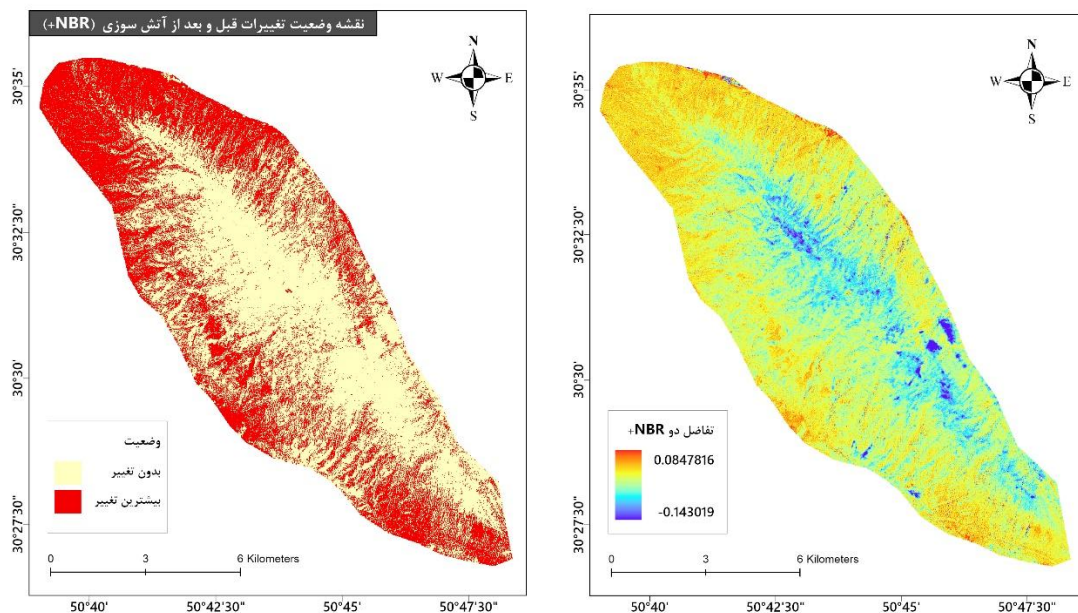
شکل ۳: پهنه متاثر از آتش سوزی بر اساس شاخص‌های طیفی در تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰. منبع: نویسندگان

نتایج و بحث

در این تحقیق، تصاویری که قبل و بعد از آتش‌سوزی انتخاب شدند، به‌طور خاص پوشش ابر نداشتند. با توجه به اینکه برخی ویژگی‌های سطح زمین ممکن است بازتاب‌هایی مشابه مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی نشان دهند، از شاخص $NBR+$ استفاده شد تا اثر این ویژگی‌ها بر تحلیل‌ها کاهش یابد و دقت و صحت نتایج افزایش یابد. این شاخص به‌ویژه به تفکیک بهتر مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی کمک کرده و باعث بهبود کیفیت تحلیل‌های تصویری می‌شود. مطابق نتایج مشاهده می‌شود که در روز ۱۲ مه ۲۰۲۰ میزان بازتاب مثبتی در منطقه مورد مطالعه دیده نشده است. اما در ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰ حدود ۲۰ درصد از مساحت کل را منطقه را شامل می‌شود. از آنجایی که آتش‌سوزی در فصل بهار و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد رخ داده است، و میزان رطوبت خاک می‌تواند از بارش‌های بهاری متاثر باشد و در بازتاب طیفی اختلال ایجاد کند.

با مقایسه تصاویر ارائه‌شده در شکل ۴، به وضوح مشخص می‌شود که شاخص NBR بازتاب‌هایی را در مناطق مرطوب نمایش می‌دهد که ممکن است باعث اختلال در تحلیل دقیق مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی شود. اما این بازتاب‌ها در شاخص $NBR+$ مشاهده نمی‌شود. استفاده از شاخص $NBR+$ به‌ویژه در این تحقیق کمک می‌کند تا تأثیر این ویژگی‌ها بر تحلیل‌ها کاهش یابد و دقت و صحت نتایج افزایش یابد، به طوری که تفکیک دقیق‌تر مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی انجام می‌شود و مناطق مرطوب که ممکن است شبیه به مناطق آسیب‌دیده به نظر برسند، از نتایج حذف می‌شوند. با مقایسه تصاویر و تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان گفت که مناطق تحت تأثیر بازتاب‌های

ناخواستگی به اشتباه به عنوان مناطق سوخته طبقه‌بندی می‌شوند، چرا که این مناطق دارای مقادیر درخشندگی بالایی هستند که مشابه به مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی به نظر می‌آید. علاوه بر این، دومین عامل مزاحم در این نوع تحلیل‌ها، ابرها و سایه‌های موجود در تصاویر هستند که نه تنها نواحی سوخته شده را از سنجنده پنهان می‌کنند، بلکه می‌توانند باعث اشتباه در تشخیص این مناطق و اشتباه گرفتن آن‌ها با نواحی سوخته شده شوند. این مشکل به ویژه در شاخص **NBR** بیشتر مشهود است، چرا که در برخی موارد این نواحی مرطوب یا سایه‌دار ممکن است با مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی اشتباه گرفته شوند. اما این چالش در شاخص **+NBR** به‌طور مؤثری حل شده است. در واقع، این شاخص توانسته است این مناطق را که در مقایسه با مناطق سوخته شده دارای درخشندگی بسیار پایین‌تری هستند، از نتایج حذف کند و تحلیل دقیق‌تری از مناطق آسیب‌دیده ارائه دهد.



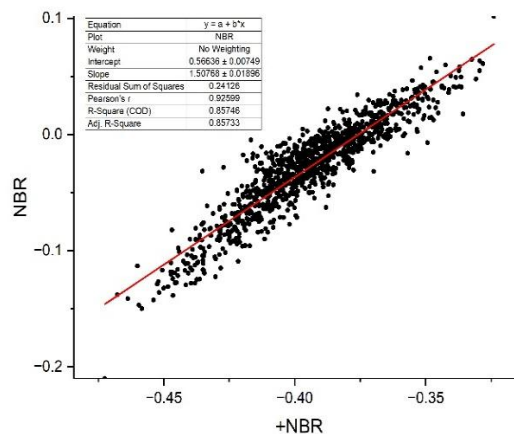
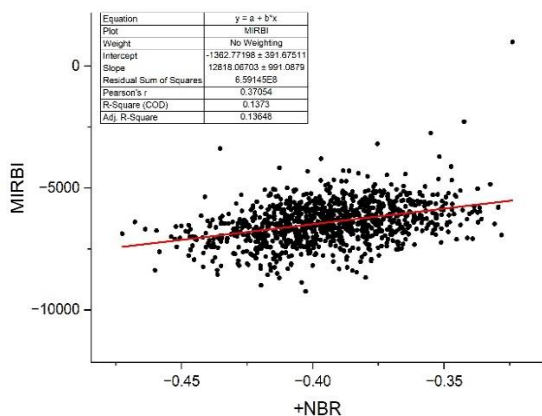
شکل ۴: تفاضل حاصل از تصاویر شاخص **+NBR** در دوره قبل و بعد از آتش سوزی. منبع: نویسندگان

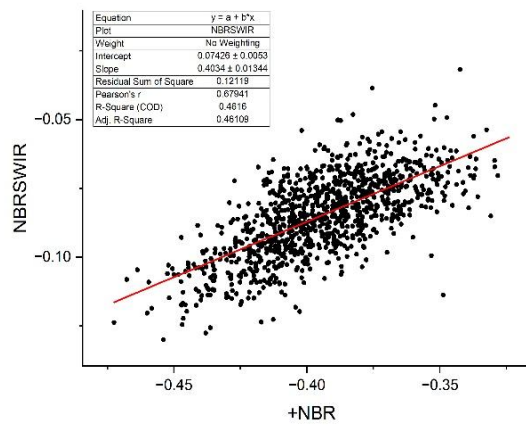
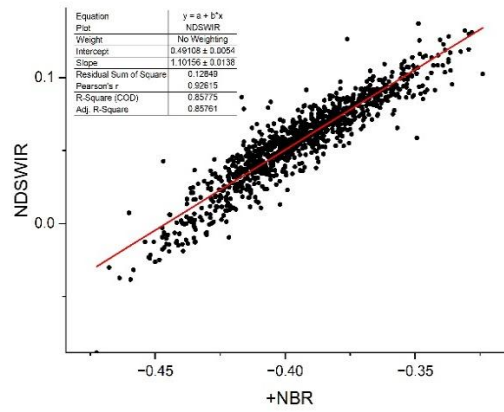
برای ارزیابی دقت شاخص‌ها، از ضریب کاپا استفاده شد. مقادیر مربوط به این ضریب برای هر شاخص در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص **+NBR** بالاترین مقدار ضریب کاپا، در حدود ۰/۹۰، را داراست. در مقابل، شاخص **NBR** با ضریب کاپای ۰/۸۳ در رتبه دوم قرار گرفته است. کمترین مقدار ضریب کاپا، معادل ۰/۴۹، به شاخص **MIRBI** اختصاص دارد که عملکرد بسیار ضعیفی در شناسایی مناطق تحت‌تأثیر آتش‌سوزی از خود نشان داده است.

جدول ۲- میزان ضریب کاپا برای شاخص‌های طیفی استفاده شده در تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰

شاخص طیفی	ضریب کاپا
NDSWIR	۰/۶۹
NBR	۰/۸۳
+NBR	۰/۹۰
NBRSWIR	۰/۵۴
MIRBI	۰/۴۹

در بخش پایانی پژوهش، ضریب همبستگی پیرسون میان شاخص +NBR و سایر شاخص‌ها محاسبه گردید. یافته‌ها نشان داد که میان شاخص +NBR و دو شاخص NDSWIR و NBR، همبستگی بسیار بالایی به میزان ۰/۹۲ برقرار بوده است. با این حال، مقدار ضریب تعیین (R^2) برای شاخص NDSWIR برابر با ۰/۸۵ به دست آمد که و این نتیجه با اختلاف بسیار کمی در شاخص NBR تکرار شد که نشان‌دهنده عملکرد مشابه این دو شاخص می‌باشد. در مقابل، پایین‌ترین میزان همبستگی مربوط به شاخص MIRBI با مقدار ۰/۳۷ بوده که نشان‌دهنده‌ی ارتباطی ضعیف است.





شکل ۵: نمودار پراکنش شاخص‌های طیفی با شاخص +NBR در تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۲۰. منبع: نویسندگان

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

شاخص	همبستگی پیرسون	R ²
+NBR, NDSWIR	۰/۹۲	۰/۸۵
+NBR, NBRSWIR	۰/۶۷	۰/۴۶
+NBR, NBR	۰/۹۲	۰/۸۵
+NBR, MIRBI	۰/۳۷	۰/۱۳

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش، قابلیت بالای علم سنجش از دور را در شناسایی و نقشه‌برداری دقیق از مناطق دچار آتش‌سوزی تأیید می‌کند. داده‌های چندطیفی حاصل از سنجنده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ نشان دادند که این تصاویر از توان تفکیک مناسب و دقت بالایی برای تشخیص پهنه‌های سوخته برخوردارند. با این وجود، کارایی نهایی این داده‌ها به شدت وابسته به نحوه‌ی انتخاب و ترکیب باندهای طیفی مناسب است. انتخاب دقیق باندها می‌تواند به بهبود تفکیک نواحی آسیب‌دیده از سایر پوشش‌های زمینی منجر شده و در نهایت، دقت نقشه‌های تولیدشده را افزایش دهد. از این رو، بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی و الگوریتم‌های مناسب برای ترکیب باندهای مختلف، نقش کلیدی در استخراج اطلاعات قابل اعتماد از تصاویر ماهواره‌ای ایفا می‌کند. در واقع، بهره‌گیری از شاخص‌های متنوع، امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر و تحلیل جامع‌تری از مناطق آسیب‌دیده را فراهم می‌آورد. با این حال، شرایط محیطی می‌تواند به طور قابل توجهی دقت نهایی نقشه‌های تولیدشده را تحت تأثیر قرار دهند. به عنوان مثال، حضور توده‌های آبی و پوشش ابری در تصاویر ماهواره‌ای، برای برخی از شاخص‌ها منجر به بروز خطاهایی می‌شود که در نهایت بازتاب‌های نادرست و افزایش غیرواقعی مقادیر بازتابی در پیکسل‌ها را به دنبال دارد. این پدیده باعث می‌شود برخی نواحی، به اشتباه به عنوان مناطق سوخته شناسایی شوند. حتی در صورتی که بتوان با استفاده از تکنیک‌های اصلاحی، اثرات ناشی از توده‌های آبی و ابرها را کاهش داد یا حذف کرد، شاخص‌های انتخاب‌شده باید از چنان پایداری و دقتی برخوردار باشند که مقاومت کافی در برابر این گونه اغتشاشات محیطی را داشته باشند و از تضعیف کیفیت نتایج جلوگیری کنند. شاخص جدید معرفی شده در این پژوهش برای تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ قادر است بازتاب‌های مربوط به مناطق سوخته را حتی در حضور پهنه‌های آبی و توده‌های ابری تشخیص دهد. این شاخص نسبت به شاخص‌های MIRBI، NDSWIR، NBR و NBRSWIR، ضریب کاپای بالاتری به میزان ۰/۹۰ کسب کرده است. کارایی بالای شاخص +NBR هم در رویکرد تک‌زمانه و هم در رویکرد دوزمانه تأیید شد. سایر شاخص‌ها در حالت تک‌زمانه عملکرد ضعیف‌تری نسبت به این شاخص داشتند، اما شاخص +NBR حتی در این شرایط نیز نتایج بهتری ارائه داد. با استفاده

صرف از باندهای ۱۲ و 8A، اجسام آبی گرایش به داشتن مقادیر روشنایی بالا در پیکسل‌ها دارند، اما با کاهش میزان انرژی، پیکسل‌های مربوط به آب تمایل به تاریک‌تر دیده‌شدن پیدا می‌کنند. در نتیجه، مناطق سوخته به‌صورت روشن ظاهر شده و به‌راحتی قابل‌شناسایی خواهند بود. افزون بر این، شاخص $+NBR$ با تولید مقادیر منفی برای نواحی ابری، از اشتباه‌گرفتن آن‌ها با پیکسل‌های مربوط به سوختگی جلوگیری می‌کند.

منابع

- صالحی، سعدی و زارعی، زانکو. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی مناطق دارای ریسک بالای آتش‌سوزی در جنگل‌ها با استفاده از GIS (مطالعه موردی جنگل‌های استان کرمانشاه). جغرافیا و روابط انسانی، ۱(۱)، ۳۰۴-۳۱۹.
- Bretreger, D., Hancock, G.R., Lowry, J., Senanayake, I.P., Yeo, I.Y., (2024). The impacts of burn severity and frequency on erosion in Western Arnhem Land, Australia. *Sensors*, 24, 2282.
- Farajzadeh, M., Ghavidel Rahimi, Y., & Mokri, S. (2015). The Analysis of Forest Fires with Climatic Approach Using Satellite Data in Alborz Area_ Iran. *Jsaeh*, 2 (3), 83-104.
- 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.
- 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.
- Jensen, J.R. (2000). *Remote sensing of environment: an earth resource perspective*, 1st ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.
- Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Giglio, L., Korontzi, S., Chu, D. A., Hao, W. M.,... & Justice, C. O. (2003). Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument--products, validation, and operational use. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8), 1765-1781.
- Key, C.H., Benson, N.C. (2006). Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio, in: FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT., p. LA 1-51.
- Khosravi, H., Esfahani, S., & Asgari, M. (2016). Application of remote sensing data for fire risk monitoring in the Zagros forests. *Geospatial Science Journal*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/301217813>.
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morgan, P., Lewis, S.A., Gessler, P.E., & Benson, N.C. (2006). Remote Sensing Techniques to Assess Active Fire Characteristics and Post-Fire Effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15, 319-345.
- Lentile, L.B., et al. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 295-314.
- Liu, C., Frazier, P., Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing Environment*, 107, 606–616.

- 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.
- Miller, J.D., Yool, S.R. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sens. Environ.*, 82, 481–496. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00071-8).
- Nasery, S., Kalkan, K. (2020). Burn area detection and burn severity assessment using sentinel 2 MSI data: the case of Karabağlar district. *Turkish J. Geosciences*, 1, 72–77.
- 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.
- 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., Kovalskyy, V. (2016). A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing Environment*, 176, 255–271.
- Roy, D. P., et al. (2008). The MODIS active fire detection algorithm and the fire product. *Remote Sensing of Environment*, 102(3), 250-273.
- 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.
- Story, M., Congalton, R.G. (1986). Accuracy assessment: A user's perspective. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 52, 397–399.
- 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.
- Zhang, X., Liu, H., Li, M., Yan, W., & Yin, X. (2021). A novel method for fire severity monitoring in boreal forests. *Remote Sensing Letters*, 12(9), 878-889.