



Investigating the Relationship between Vegetation Indices and the Occurrence of Wildfire in the Vegetation Areas of Iran

Kobra Shojaeizadeh ^a, Mahmoud Ahmadi ^{b*}, Abbas Ali Dadashi-Roudbari ^c

^a PhD Candidate in Climatology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^b Associate Professor in Climatology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^c Postdoctoral Research Associate in Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 27 October 2022

Revised: 18 December 2022

Accepted: 27 December 2022

Abstract

The risk of wildfire in Iran has increasingly become a serious risk throughout the year and is no longer limited to a few months of the year. Accordingly, forest monitoring for identifying areas prone to fires is an effective step for the development of early warning systems. This research was conducted to see the relationship between the vegetation indices with the occurrence of fire in the vegetation areas of Iran. The MODIS sensor data of the Terra satellite, including the active fire product (MOD14A2) and vegetation indices NDVI and EVI (MOD13A3) were used from 2001 to 2020. The results showed that the maximum occurrence of wildfire in the vegetation areas of Iran occurs from the end of spring to the beginning of autumn. The increasing trend of wildfire occurrence in the warm period of the year is related to the increase in temperature, decrease in humidity, and early melting of snow in the spring season and the autumn season, simultaneously with the fall of vegetation and the late start of autumn precipitation. The maximum average height of wildfire occurrences in the Arsbaran vegetation area is 1791 meters in October and the maximum height of wildfire occurrences in the Irani-Turani area is 1565 meters in August. Spatial distribution of NDVI and EVI indices showed that the density of vegetation is effective in the intensity and spread of wildfire and provides the conditions for the spread of wildfire in such a way that barren areas with low vegetation cover the center, east, and southeast of Iran. Almost no wildfire occurred and the maximum number of active fires was observed in the north, west, and northwest of Iran.

Keywords: Active Fire, NDVI Index, EVI Index, Vegetation Areas of Iran, MODIS

*.Corresponding author: Mahmoud Ahmadi Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir Tel:+989121487497

How to cite this Article: Shojaeizadeh, K., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). Investigating the relationship between vegetation indices and the occurrence of wildfire in the vegetation areas of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 99-116.

DOI: 10.22067/geoeh.2022.78468.1276



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 4 - Number 48, Winter 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>


 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78468.1276> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره چهارم و هشتم، زمستان ۱۴۰۲، صص ۹۹-۱۱۶

مقاله پژوهشی

ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی با رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران

کبری شجاعی زاده- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

 محمود احمدی^۱ - دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

عباسعلی داداشی رودباری - پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۲۷ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۰/۶

چکیده

مخاطره آتش‌سوزی در ایران به‌طور فزاینده‌ای به یک ریسک جدی در طول سال تبدیل شده و محدود به چند ماه از سال نیست؛ بر این اساس پایش جنگل‌ها برای شناسایی و تعیین نواحی مستعد رخداد آتش‌سوزی‌ها گامی مؤثر برای توسعه سامانه‌های هشدار سریع است. این پژوهش با هدف ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی با رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران انجام شده است. در این پژوهش از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Terra شامل محصول آتش‌سوزی فعال (MOD14A2) و شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI (MOD13A3) در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰ استفاده شده است. نتایج نشان داد بیشینه رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران از اواخر فصل بهار تا اوایل فصل پاییز رخ می‌دهد. روند افزایشی رخداد آتش‌سوزی در دوره گرم سال با افزایش دما، کاهش رطوبت و ذوب زودهنگام برف در فصل بهار و در فصل پاییز هم‌زمان با خزان پوشش گیاهی و شروع دیر هنگام بارش‌های پاییزی مرتبط است. بیشینه متوسط ارتفاعی رخدادهای آتش‌سوزی در ناحیه رویشی ارسباران با ۱۷۹۱ متر در ماه اکتبر و بیشینه ارتفاعی رخدادهای آتش‌سوزی در ناحیه ایرانی-تورانی با ۱۵۶۵ متر در ماه

Email: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۴۸۷۴۹۷

نحوه ارجاع به این مقاله:

شجاعی زاده، کبری؛ احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ۱۴۰۲. ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی با رخداد آتش‌سوزی

در نواحی رویشی ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۲(۴)، صص ۹۹-۱۱۶.

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78468.1276>

اوت مشاهده شده است. توزیع فضایی شاخص‌های NDVI و EVI حاکی از آن است که تراکم پوشش گیاهی در شدت و گسترش آتش‌سوزی تأثیرگذار بوده و شرایط را برای گسترش آتش‌سوزی‌ها فراهم می‌سازد به گونه‌ای که مناطق بایر با پوشش گیاهی کم در مرکز، شرق و جنوب شرق ایران تقریباً بدون رخداد آتش‌سوزی و بیشینه رخداد آتش‌سوزی‌های فعال در شمال، غرب و شمال غرب ایران مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: آتش‌سوزی فعال، شاخص NDVI، شاخص EVI، نواحی رویشی ایران، MODIS.

۱- مقدمه

آتش‌سوزی جنگل یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که نه تنها باعث خسارات غیرقابل جبران به منابع طبیعی می‌شود، بلکه امنیت جان و مال مردم را نیز تهدید می‌کند (شیانو و همکاران^۱، ۲۰۱۵). منشأ آتش‌سوزی جنگل ممکن است طبیعی یا غیرطبیعی باشد. اگرچه به‌عنوان یک قاعده کلی در سطح جهانی، تنها حدود ۴ درصد از تمام آتش‌سوزی جنگل‌ها دلایل طبیعی مانند عوامل هواشناسی دارند ولی در تمام موارد دیگر، انسان‌ها به‌طور عمدی و غیرعمدی، مسئول آتش‌سوزی‌ها هستند. پیش‌بینی می‌شود که شدت و فراوانی آتش‌سوزی‌ها تا پایان قرن ۲۱ در سراسر جهان به‌ویژه در عرض‌های شمالی افزایش یابد (فلانینگ و همکاران^۲، ۲۰۱۳) که همراه با پیامدهای منفی مانند فرسایش خاک، تخریب زمین و افزایش انتشار دی‌اکسید کربن است (بارو و کونارد^۳، ۱۹۹۱)؛ بنابراین پایش دقیق مناطق دارای پتانسیل آتش‌سوزی، اندازه و شدت آن‌ها اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند (تاناس و همکاران^۴، ۲۰۱۸). بدین منظور، تلاش‌های زیادی برای پیشگیری یا کاهش این رخداد از طریق تشخیص زودهنگام آن با تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی صورت گرفته است (پرادان و همکاران^۵، ۲۰۰۷).

لازمه شناسایی گستره‌های خطر آتش‌سوزی، مشخص کردن عوامل مؤثر بر رخداد و گسترش آتش‌سوزی است. نتایج مطالعات نشان داده است که آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع نتیجه برهم‌کنش عوامل متعددی است که اهمیت این عوامل در اکوسیستم‌های مختلف، متفاوت است (کاللز و همکاران^۶، ۲۰۱۵). این عوامل به‌طور عمده به چهار دسته اقلیمی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و انسانی تقسیم می‌شوند (وو و همکاران^۷، ۲۰۲۱). فراوانی، شدت و زمان آتش‌سوزی جنگل‌ها ارتباط تنگاتنگی با این عوامل دارد (کاسترو و همکاران^۸، ۲۰۰۳). طی دهه‌های گذشته پایش جنگل

-
- 1 Xiao et al
 - 2 Flannigan et al
 - 3 Barro & Conard
 - 4 Tanase et al
 - 5 Pradhan et al
 - 6 Collins et al
 - 7 Wu et al
 - 8 Castro et al

ها به ابزاری مهم برای مدیریت بحران آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع تبدیل شده است. انجام این کار با استفاده از روش‌های معمول دشوار و پرهزینه است (کر و استروفسکی^۱، ۲۰۰۳). لذا فن‌آوری سنجنش‌ازدور راهکاری مناسب برای شناسایی و مدیریت آتش‌سوزی است.

از جمله داده‌های قابل‌استفاده در این زمینه می‌توان به محصولات ماهواره‌ای سنجنده MODIS (پاراجولی و همکاران^۲، ۲۰۲۰؛ سابدی و همکاران^۳، ۲۰۲۲) اشاره کرد. سنجنده MODIS دستگاهی با تفکیک رادیو متریکی زیاد (۱۲ بیت) است که با دو ماهواره آمریکایی Terra (از سال ۲۰۰۰ تاکنون) و Aqua (از سال ۲۰۰۲ تاکنون) حمل می‌شود (تام و همکاران^۴، ۲۰۰۳). این دو ماهواره می‌توانند روزانه چهار بار از مناطق دارای رخداد آتش‌سوزی بر روی سطح زمین تصویربرداری کنند (گیگلیو و همکاران^۵، ۲۰۰۳).

بررسی منابع مرتبط با آتش‌سوزی جنگل در سطح جهانی نشان می‌دهد که این مطالعات در سال‌های اخیر به دلیل دسترسی بهتر به محصولات ماهواره‌ای، داده‌های باز تحلیل و خروجی مدل‌ها رشد قابل توجهی داشته‌اند. این مطالعات را می‌توان در دو دسته محصولات ماهواره‌ای (چویکو و همکاران^۶، ۲۰۲۰) و برونداد مدل‌ها (سالیوان^۷، ۲۰۰۹) تقسیم کرد. مطالعاتی که آتش‌سوزی جنگل‌ها را با داده‌های ماهواره‌ای موردبررسی قرار داده‌اند بسته به نوع سنجنده/ماهواره طیف گسترده‌ای را در برمی‌گیرند. بیش‌تر این مطالعات از داده‌های ماهواره‌های NOAA، NOAA و LANDSAT و Terra و Aqua استفاده کرده‌اند. برای مثال می‌توان به پژوهش‌های انجام شده ماهواره NOAA سنجنده AVHRR (اوتن و همکاران^۸، ۲۰۱۹)، سری ماهواره‌های LANDSAT شامل سنجنده‌های TM، MSS، TM⁺، OLI، ETM⁺ و TIRS (یانکوویچ و همکاران^۹، ۲۰۱۹)، سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra و Aqua (مارتین و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۰)، سنجنده VIIRS از ماهواره S-NPP (فو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۰) اشاره کرد. از بین ماهواره‌ها و سنجنده‌های اشاره شده، سنجنده MODIS به دلیل طیف دوره روزانه، دوره آماری بلندمدت‌تر (داده‌های ماهواره Terra برای بیش از دو دهه در دسترس است) و محصولات متنوع‌تر (همانند محصول آتش‌سوزی فعال و مناطق سوخته شده) بیشتر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است (آلبار و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۸؛ زینگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۲).

- 1 Kerr & Ostrovsky
- 2 Parajuli et al
- 3 Subedi et al
- 4 Thome et al
- 5 Giglio et al
- 6 Chuvieco et al
- 7 Sullivan
- 8 Otón et al
- 9 Yankovich et al
- 10 Martyn et al
- 11 Fu et al
- 12 Albar et al
- 13 Zeng et al

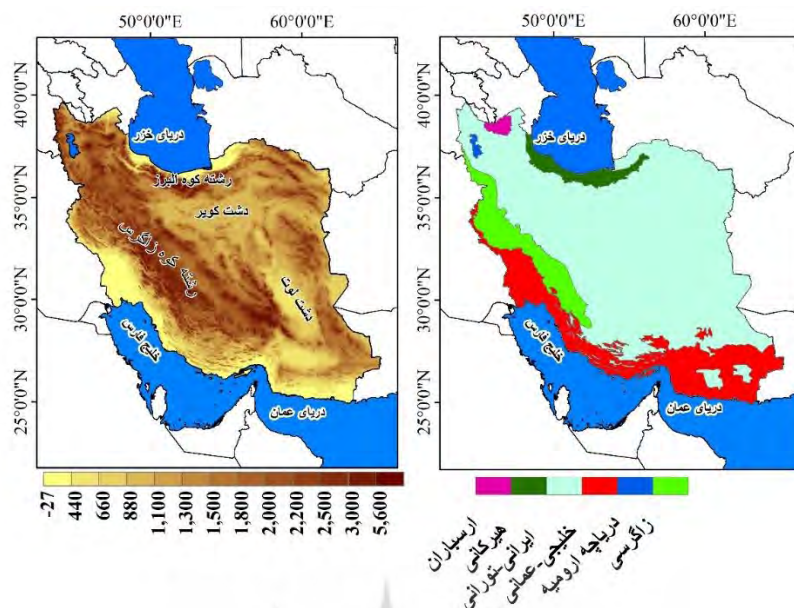
همچنین کارایی محصولات آتش‌سوزی سنجنده MODIS نیز توسط پژوهش‌های بسیاری (کوماری و پندی، ۲۰۲۰؛ تمشین و سالوویف، ۲۰۲۲) در سراسر جهان مورد تأیید قرار گرفته است. مطالعات بسیاری نیز آتش‌سوزی جنگل را در ایران مورد بررسی قرار داده‌اند. تمرکز اصلی این مطالعات، ارزیابی رخدادهای آتش‌سوزی به‌صورت موردی و در ناحیه رویشی خاصی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم طبقه‌بندی (فرج زاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ شریف‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸) ارتباط عوامل محیطی و آتش‌سوزی (عالی محمودی سراب و همکاران، ۱۳۹۱؛ امامی و شهریار، ۱۳۹۸) و مدیریت آتش‌سوزی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ جانباز قبادی، ۱۳۹۸) بوده است. مرور پژوهش‌های صورت گرفته در ایران نشان می‌دهد، مطالعه‌ای دقیق برای پایش و شناسایی آتش‌سوزی‌های فعال و هم‌چنین الگوی زمانی- مکانی آتش‌سوزی جنگل‌ها در ایران بر مبنای شاخص‌های پوشش گیاهی و با توان تفکیک افقی بسیار بالا ارائه نشده است. از آنجایی که شناسایی آتش‌سوزی‌های فعال می‌تواند اطلاعاتی درباره توزیع زمانی- مکانی آتش‌سوزی‌ها و در نتیجه اتخاذ راهبردهای مدیریتی برای پیش‌گیری از آتش‌سوزی‌ها را در عرصه‌های طبیعی ارائه دهد، لذا ضرورت پژوهش‌های کاربردی‌تر با داده‌های دقیق‌تر (همانند داده‌های ۱۰۰۰ متری در مقیاس ایران) بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این تحقیق با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra طی یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) به شناسایی آتش‌سوزی فعال و بررسی تغییرات زمانی- مکانی آن در نواحی رویشی ایران در ارتباط با شاخص‌های پوشش گیاهی پرداخته شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است. قرارگیری در کمربند خشک کره زمین شرایط جوی و بیوفیزیکی لازم برای رخداد آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایران را فراهم کرده است. طبق آخرین اعلام سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۹ خورشیدی، سطح جنگل‌های ایران ۱۷۶۴۹۸۹۰ هکتار است که در پنج پهنه رویشی قرار دارند. این پنج پهنه رویشی عبارتند از ناحیه رویشی هیرکانی با ۱۴ درصد، ناحیه رویشی ایرانی-تورانی با ۲۸/۲ درصد، ناحیه رویشی ارسباران با حدود ۱/۴۰ درصد، ناحیه رویشی خلیج-عمانی با حدود ۱۴/۸ درصد و ناحیه رویشی زاگرس با ۴۱/۹ درصد. وسیع‌ترین رویشگاه جنگلی ایران زاگرس است که از منتهی‌الیه شمال غربی آغاز و تا جنوب ایران را در بر می‌گیرد (شکل ۱).

1 Kumari & Pandey

2 Tomshin & Solovyev



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نواحی رویشی و ارتفاعی ایران

۳- داده‌ها و روش‌های مورداستفاده

در این پژوهش از داده‌های ماهواره Terra سنجنده MODIS استفاده شده است. زمان عبور ماهواره Terra ساعت ۱۰:۳۰ به وقت محلی ایران است. پهنای نوارهای تصویربرداری (Swath) سنجنده MODIS، ۲۳۳۰ کیلومتر هست، بنابراین هر یک الی دو روز تصویر کاملی از سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی از ۰.۴ میکرومتر تا ۱۴.۴ میکرومتر ارائه می‌دهد. تفکیک افقی محصولات MODIS با توجه به بلندهای طیفی متفاوت است. بطوریکه این تفکیک برای باندهای یک و دو ۲۵۰ متر، باندهای سه تا هفت ۵۰۰ متر و برای باندهای هشت تا ۳۶، ۱۰۰۰ متر است (منجن و همکاران، ۲۰۱۶). در ادامه سه شاخص آتش‌سوزی فعال (Active Fire)، شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) و پوشش گیاهی بازسازی شده (EVI) که در این تحقیق استفاده شد، توضیح داده شده است.

۳-۱- شاخص آتش‌سوزی فعال (Active Fire)

سنجنده MODIS دارای دو محصول مرتبط با آتش‌سوزی هست. این دو محصول عبارت‌اند از محصول آتش‌سوزی فعال^۲ (ولنگ و همکاران، ۲۰۲۱) و مناطق سوخته شده^۴ (کتاگیس و گیتاس، ۲۰۲۲). از جمله

1 Mangeon et al
2 Active Fire
3 Wang et al
4 Burned Area
5 Katagis & Gitas

محصولات رخداده آتش‌سوزی فعال MODIS می‌توان به محصول MOD14A2 اشاره کرد (چامپین و همکاران^۱، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران^۲، ۲۰۲۲). در محصول آتش‌سوزی فعال به هر نقطه شبکه یک طبقه اختصاص داده می‌شود که ۳ طبقه از طبقات موجود در آن (طبقات ۷، ۸ و ۹) رخداده آتش‌سوزی را با سطوح اطمینان مختلف نشان می‌دهد. نقطه شبکه‌های با عدد هفت دارای سطح اطمینان کم (۳۰-۰ درصد)، نقطه شبکه‌های با عدد هشت دارای سطح اطمینان متوسط-اسمی (بین ۸۰-۳۰ درصد) و نقطه شبکه‌های با عدد نه (بین ۱۰۰-۸۰ درصد) دارای سطح اطمینان بالا هستند (جاستیس و همکاران^۳، ۲۰۱۱).

۳-۲- شاخص‌های اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) و پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI)

شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص پوشش گیاهی بارزسازی شده (EVI) از مجموعه ۶۱ (MOD13A3) سنجنده MODIS با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر به صورت ماهانه به عنوان محصول سطح سه ارائه می‌شوند. در الگوریتم این محصول از میانگین زمانی وزنی، برای تولید داده‌های ماهانه از سری زمانی داده‌های روزانه MODIS استفاده می‌شود (گوان و همکاران^۴، ۲۰۲۱). در حالی که شاخص NDVI به کلروفیل گیاه حساس است، EVI به تغییرات ساختاری تاج پوشش و اکس نشان می‌دهد (هیت و همکاران^۵، ۲۰۰۲). این دو شاخص، در مطالعات مرتبط با پوشش گیاهی جهانی مکمل یکدیگر هستند و با تشخیص تغییرات پوشش گیاهی و استخراج متغیرهای بیوفیزیکی تاج پوشش بهبود می‌یابند.

در این پژوهش به منظور شناسایی مناطقی از ایران که دارای آتش‌سوزی فعال هستند و تحلیل فضایی شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI و ارتباط آن‌ها با آتش‌سوزی جنگل، مراحل زیر انجام شده است.

- استخراج رخداده آتش‌سوزی با سطوح اطمینان کم (۳۰-۰ درصد)، سطح اطمینان متوسط-اسمی (بین ۸۰-۳۰ درصد) و سطح اطمینان بالا (بین ۱۰۰-۸۰ درصد) با بررسی دو میلیون دویست و چهار هزار و ششصد و شصت و پنج (۲۲۴۰۶۶۵) نقطه شبکه برای تعداد ۹۲۱ روز (محصول مورد استفاده هشت روزه بوده است) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۱.

- تعیین میانگین و بیشینه ارتفاعی رخداده آتش‌سوزی برای هر نقطه شبکه برای ۱۲ ماه سال و ارائه آن به تفکیک هر پهنه رویشی با بررسی تمامی نقطه شبکه‌ها در گستره ایران.

1 Champin et al

2 Li et al

3 Justice et al

4 Guan et al

5 Huete et al

- محاسبه میانگین بلندمدت شاخص‌های NDVI، EVI برای هر نقطه شبکه (۲۲۴۰۶۶۵ نقطه شبکه در گستره ایران) در مقیاس ماهانه برای ۲۴۰ ماه (محصولات مورد استفاده برای دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI ماهانه بوده است) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۱.
- تعیین میانگین شاخص‌های NDVI و EVI برای هر ماه و به تفکیک هر پهنه یک از پهنه‌های رویشی ایران.
- ارزیابی وضعیت نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی فعال در ارتباط با پوشش گیاهی و توپوگرافی
- تعیین کانون‌های اصلی فراوانی رخداد آتش‌سوزی فعال در ایران.

۴- نتایج

نتایج بر اساس اشکال ۲ و ۳ نشان داد که محصول آتش‌سوزی فعال (MOD14A2) سنجنده MODIS ماهواره Terra برای نواحی رویشی ایران در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در مجموع ۲۶۰۶۰، ۲۲۴۹۲ و ۲۵۳۹۶ نقطه شبکه دارای رخداد آتش‌سوزی به ترتیب در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه شناسایی شده است. ناحیه رویشی خلیج-عمانی با ۸۲/۹۷ درصد دارای بیشترین نقطه شبکه دارای رخداد آتش‌سوزی در ماه دسامبر و ناحیه رویشی ارسباران با ۰/۰۳ درصد پایین‌ترین سطح آتش‌سوزی را در ماه فوریه دارا هستند. از میان نقطه شبکه‌های شناسایی شده در سطوح اطمینان مختلف در ماه‌های سرد سال، رخدادهایی با سطح اطمینان اسمی - متوسط (۷۹/۴ درصد) در سطح اطمینان ۳۰ تا ۸۰ درصد، در ماه دسامبر بیشترین فراوانی را داشته است.

بیشینه متوسط ارتفاعی رخداد آتش‌سوزی در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی با ۱۵۸۳ متر در ماه دسامبر و کمینه متوسط ارتفاعی رخداد آتش‌سوزی در ارسباران با ۲۹۳ متر در ماه فوریه قرار دارد. بیشینه ارتفاعی رخداد آتش‌سوزی در پهنه رویشی ایرانی-تورانی در ماه دسامبر با ارتفاع متوسط (۲۹۰۲ متر) مشاهده شده است. نتایج بررسی محصول نامبرده برای شناسایی آتش‌سوزی‌های فعال در ماه‌های فصل بهار (مارس، آوریل و می) برای دوره ۲۰ ساله به شکل تجمعی نشان داد، ۲۴۰۹۴، ۲۳۳۱۹ و ۳۸۹۷۹ نقطه شبکه دارای رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران برای ماه‌های مارس تا می ثبت شده است. نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی به صورت پراکنده و متفاوت در تمامی نواحی رویشی ایران مشاهده می‌شوند ولی همچنان کانون آتش‌سوزی‌های فعال در جنوب و جنوب غرب ایران قرار دارد. علیرغم بارش‌های بهاری اما خطر بروز آتش‌سوزی در برخی مناطق ایران وجود دارد. بارش قابل توجه در اوایل بهار موجب رشد گیاهان علفی شده و این گیاهان با افزایش دما خشک شده و با کوچک‌ترین عامل، آتش گرفته و شعله‌هایشان گسترده می‌شود. در واقع افزایش دما و بادهای بهاری به سرعت سطح بالایی زمین را خشک و باعث رخداد آتش‌سوزی‌ها می‌شود.

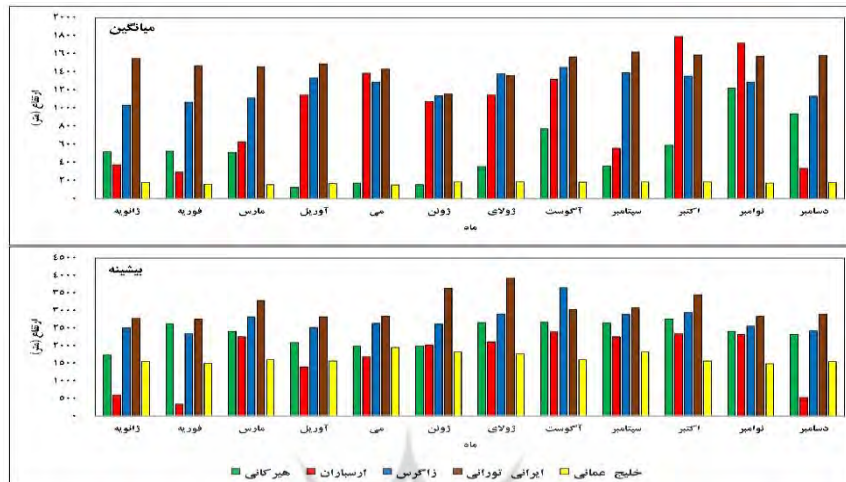
بیشینه رخداد آتش‌سوزی در ناحیه رویشی خلیج-عمانی در ماه می رخ داده است که تقریباً ۷۲/۱۴ درصد از کل نقطه شبکه‌های آتش‌سوزی را در متوسط ارتفاعی ۱۵۱ متر شامل شده است. پس از آن، ناحیه ایرانی-تورانی (۱۹)

درصد) و زاگرس (۷ درصد) دارای بیشترین نقطه شبکه‌های آتش‌سوزی در ماه می هستند. ۶۹/۸۸ درصد نقطه شبکه‌های این فصل در ماه مارس و سطح اطمینان اسمی - متوسط قرار دارد. در فصل بهار نقطه شبکه‌های دارای سطح اطمینان بالا افزایش یافته به گونه‌ای که در ماه می با ۳۳/۰۶ درصد در بالاترین سطح (۸۰-۱۰۰ درصد) رخ داده‌اند. بیشینه متوسط ارتفاعی و بیشینه ارتفاعی رخداد آتش‌سوزی در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی با ۱۴۹۰ و ۳۲۹۳ متر قرار دارد (شکل ۲). با توجه به سیر صعودی دما، کاهش بارش و رطوبت نسبی تعداد نقطه شبکه‌های دارای آتش‌سوزی در ماه‌های گرم سال (ژوئن، ژوئیه و اوت) افزایش یافته است. نتایج ما با پژوهش (توسیک و همکاران، ۲۰۱۹) دریافتند آتش‌سوزی‌های بزرگ در شرایط دمای بالا و کمبود بارندگی در فصل تابستان بیش‌تر مشاهده می‌شود هم راستاست. از طرفی ضعیف شدن پوشش گیاهی شرایط مساعد برای ایجاد آتش‌سوزی را فراهم کرده است؛ بنابراین تمامی عوامل برای شروع و گسترش آتش‌سوزی در این فصل فراهم است.

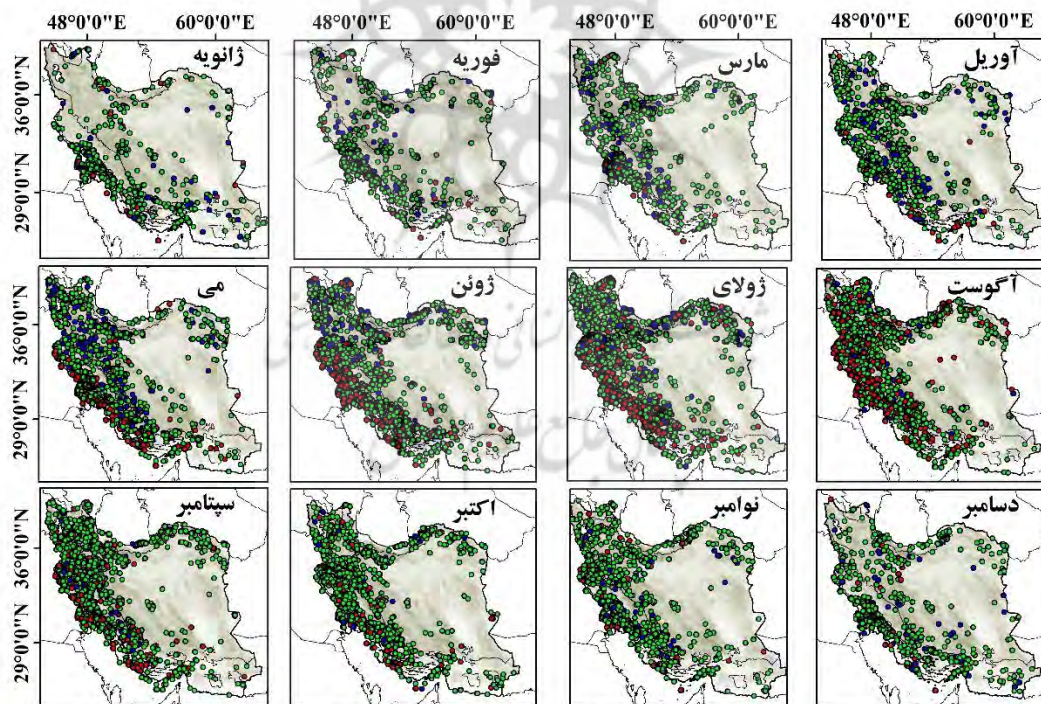
آتش‌سوزی‌های شناسایی شده در نواحی رویشی ایران توسط الگوریتم آتش‌سوزی فعال سنجنده MODIS برای ماه‌های ژوئن تا اوت برابر با ۵۰۹۱۶، ۳۷۸۱۷ و ۳۰۷۰۶ نقطه شبکه است (شکل ۳). ناحیه رویشی خلیج-عمانی در ماه ژوئن دارای بیشترین نقطه شبکه دارای رخداد آتش‌سوزی است که ۵۳ درصد آتش‌سوزی‌های شناسایی شده این ماه را در بر گرفته است. کمینه رخدادهای آتش‌سوزی در ماه اوت در پهنه رویشی ارسباران با ۰/۱۳ مشاهده شده است. در این فصل نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی در سطح اطمینان ۸۰-۱۰۰ افزایش چشمگیری داشته به گونه‌ای که در ماه اوت ۵۰ درصد نواحی رویشی ایران را پوشش داده است.

بالاترین رخدادهای آتش‌سوزی در سطح اطمینان اسمی -متوسط با ۴۹/۶۹ درصد در ماه ژوئن مشاهده شده است. این رخدادها در سطح اطمینان ۳۰-۸۰ درصد رخ داده‌اند. بیشینه متوسط ارتفاعی و بیشینه ارتفاعی رخدادهای آتش‌سوزی در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی با ۱۵۶۵ متر و ۳۹۲۴ متر قرار دارد (شکل ۲). برای نواحی رویشی ایران در ماه‌های فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) به صورت تجمعی، ۳۳۰۷۵ نقطه شبکه برای ماه سپتامبر، ۲۶۲۹۳ برای ماه اکتبر و ۲۸۶۷۴ نقطه شبکه برای ماه نوامبر توسط سنجنده MODIS ثبت شده است (شکل ۳). به لحاظ پهنه‌ای بیشترین نقطه شبکه آتش‌سوزی در ناحیه رویشی خلیج-عمانی ماه نوامبر بوده است که ۷۹/۶۹ درصد رخداد آتش‌سوزی‌ها را به خود اختصاص داده است. در همین ماه نیز ناحیه رویشی ارسباران کمترین رخداد آتش‌سوزی را دارا است. نکته قابل توجه افزایش میانگین ارتفاعی رخداد آتش‌سوزی در پهنه ارسباران طی ماه‌های اکتبر (۱۷۹۱ متر) و نوامبر (۱۷۱۹ متر) است. بیشینه ارتفاعی که در آن رخداد آتش‌سوزی رخ داده در ناحیه ایرانی-تورانی با ۳۴۵۱ متر در ماه اکتبر قرار دارد. نقطه شبکه‌های دارای سطح اطمینان ۳۰-۸۰ درصد، با ۷۷/۹۶ درصد در ماه اکتبر و نقطه

شبکه‌های دارای سطح اطمینان ۸۰-۱۰۰ درصد با بالاترین درصد (۳۸/۳۵ درصد) در ماه سپتامبر، نواحی رویشی ایران را در بر گرفته‌اند.



شکل ۲- متوسط ارتفاعی و بیشینه ارتفاعی نواحی دارای رخداد آتش در نواحی رویشی ایران (۲۰۰۱-۲۰۲۰)



● آتش سوزی با سطح اطمینان پایین ● آتش سوزی با سطح اطمینان اسی-متوسط ● آتش سوزی با سطح اطمینان زیاد

شکل ۳- نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش در نواحی رویشی ایران طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰ مبتنی بر

برونداد سنجنده MODIS ماهواره Terra با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر

ویژگی‌های پوشش گیاهی سطح زمین، مانند زیست‌توده و رطوبت، می‌تواند رژیم‌های آتش‌سوزی از جمله فراوانی آتش‌سوزی، چرخه، فصل، شدت و اندازه منطقه سوخته شده را تعیین کند، از طرفی آتش‌سوزی ساختار پوشش گیاهی، توالی و تکامل آن را نیز تغییر می‌دهد (لیزوندا و همکاران، ۲۰۲۰). این تأثیرات متقابل بین پوشش گیاهی و آتش‌سوزی، اهمیت نظارت و تحلیل پوشش گیاهی و تغییرات آن را تحت تأثیر آتش‌سوزی برجسته می‌کند. شاخص NDVI و EVI برای تعیین تغییرات پوشش گیاهی و بررسی اثرات آتش‌سوزی کاربرد دارند. توزیع فضایی شاخص NDVI در ماه‌های سرد سال (دسامبر، ژانویه و فوریه) در شکل (۴) مشخص شده است. مقادیر شاخص NDVI برای ماه‌های دسامبر تا فوریه بین ۰/۲- تا ۰/۷۸ در نوسان است. بیشینه شاخص در ناحیه ریشی هیرکانی و کمینه آن در جنوب شرق و بیابان‌های داخلی ایران قرار گرفته است. مقادیر شاخص EVI نیز بین ۰/۱۱- تا ۰/۵۷ در نوسان است. علت افزایش شاخص NDVI نسبت به شاخص EVI، کاهش اثرات جوی و اصلاح پس‌زمینه‌های تاج پوشش گیاهی در شاخص EVI بوده است. بر اساس شکل‌های ۵ و ۶، بیشینه میانگین شاخص NDVI و EVI به ترتیب با مقدار ۰/۴۷ و ۰/۱۷ در ناحیه ریشی هیرکانی قرار دارد.

شرایط اقلیمی، موقعیت جغرافیایی و جنس خاک، پوشش گیاهی متراکم و متنوعی را در این ناحیه ریشی به وجود آورده است. کمینه آن با مقدار ۰/۱۱ برای شاخص NDVI و ۰/۰۶ برای شاخص EVI در ناحیه ریشی ایرانی-تورانی قرار دارد. فقر پوشش گیاهی در این ناحیه متأثر از پایین بودن بارش سالانه، دمای بالا و خشکی زیاد در فصل رویش هست. همچنان که این مناطق در نقشه آتش‌سوزی فعال فاقد یا دارای رخداد آتش‌سوزی محدود می‌باشند. از جمله عوامل افزایش رخداد آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال در ماه‌های سرد سال می‌توان به کاهش سطح برگ (خان محمدی و همکاران، ۱۳۹۵)، تراکم لاشبرگ‌ها و خشک بودن آن‌ها اشاره کرد. همچنین در فصل سرد سال حاکمیت جریان‌های جنوبی با ایجاد گرماد باعث رخداد آتش‌سوزی و گسترش آن در مناطق شمالی ایران می‌شود (رحیمی و خادمی، ۱۳۹۷).

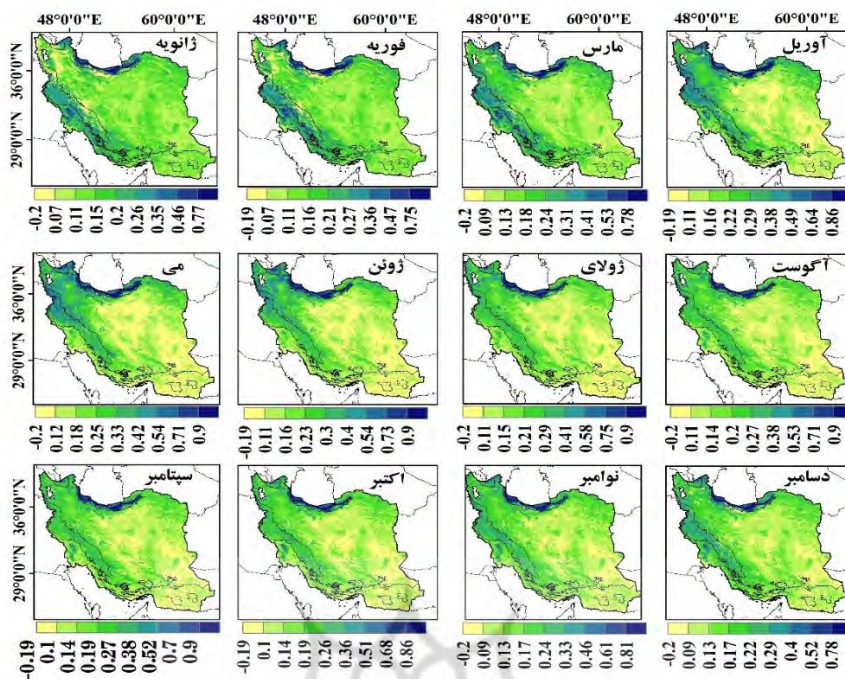
پوشش گیاهی در ماه‌های فصل بهار (مارس، آوریل و می) به دلیل هم‌زمانی با فصل رشد به بیشینه گسترش سطحی خود می‌رسد. شاخص NDVI از ۰/۲- تا ۰/۹ و شاخص EVI از ۰/۱۳- تا ۰/۶۸ در نوسان است. به گونه‌ای که نقاط اوج محدوده NDVI و EVI در بخش‌های شمالی ایران، ناحیه ریشی هیرکانی و پس از آن در قسمت‌های جنوب‌غرب و غرب به صورت پراکنده و متفاوت دیده می‌شود. در این ماه مقدار هر دو شاخص پوشش گیاهی به ویژه در ناحیه ریشی زاگرس و قسمت‌های شمال‌غربی و جنوب‌غربی ایران در ناحیه ریشی ایرانی-تورانی افزایش یافته است. میزان پوشش گیاهی در نواحی مرکزی، شرق، جنوب‌شرق و جنوب به کمترین میزان خود رسیده است. هر چه از ماه آوریل به سمت ماه می پیش می‌رویم به دلیل شرایط خشکی و گرمای هوا، شرایط محیطی برای

پوشش گیاهی نامساعد می‌شود. به‌طورمعمول، در این فصل دما شروع به افزایش می‌کند و رطوبت به‌صورت باران یا برف در ماه‌های مارس و آوریل شروع به کاهش می‌کند. برگ‌ها و شاخه‌های کوچک روی زمین خشک و به‌عنوان منبع احتراق باعث رخداد آتش‌سوزی می‌شوند. با توجه به نتایج شاخص آتش‌سوزی فعال و شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI ارتباط مستقیمی بین افزایش رخداد آتش‌سوزی با پوشش گیاهی وجود دارد به‌گونه‌ای که در مناطق با بیشینه رخداد آتش‌سوزی، افزایش شاخص پوشش گیاهی مشاهده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شد میانگین شاخص NDVI با مقدار ۰/۴۴ در ماه آوریل در ناحیه رویشی هیرکانی از بیشترین مقدار و در مقابل، کمینه آن با مقدار ۰/۱۴ در ناحیه رویشی خلیج-عمانی قرار دارد.

بیشینه میانگین شاخص EVI (نشان‌دهنده تاج پوشش جنگلی) با مقدار ۰/۲۶ در ناحیه هیرکانی و کمینه آن در ناحیه ایرانی-تورانی با مقدار ۰/۰۹ قرار دارد (شکل ۶). توزیع شاخص NDVI و EVI در ماه‌های فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) حاکی از آن است که پوشش گیاهی دستخوش تغییرات زیادی شده است که بیانگر کاهش یافتن یا متوقف شدن فعالیت رویشی در فصل تابستان است. در طی ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت پوشش گیاهی به دلیل کاهش بارش و افزایش دمای هوا روبه‌زوال است. به‌جز مناطق شمالی ایران با پوشش گیاهی متراکم که علت آن به بیشتر بودن بارش، رطوبت و افزایش فعالیت‌های کشاورزی وابسته است و به‌عنوان یک استثنا قلمداد می‌شود در بقیه نواحی، توزیع پوشش گیاهی ضعیف و نامنظم است. ناحیه رویشی هیرکانی با (۰/۴۴) و ناحیه رویشی خلیج-عمانی با (۰/۱۰) به ترتیب از بیشترین و کمترین مقدار شاخص NDVI در میان نواحی رویشی ایران برخوردار هستند. مقادیر بیشینه و کمینه میانگین شاخص EVI که نشان‌دهنده تاج پوشش جنگلی است نیز در ناحیه هیرکانی و خلیج-عمانی قرار دارد. در این فصل افزایش متغیرهای دمایی با خشکی پوشش گیاهی و کاهش رطوبت مواد سوختنی همراه است. در نتیجه پوشش گیاهی خشک‌تر، زمینه‌ی ایجاد آتش‌سوزی را فراهم می‌سازد.

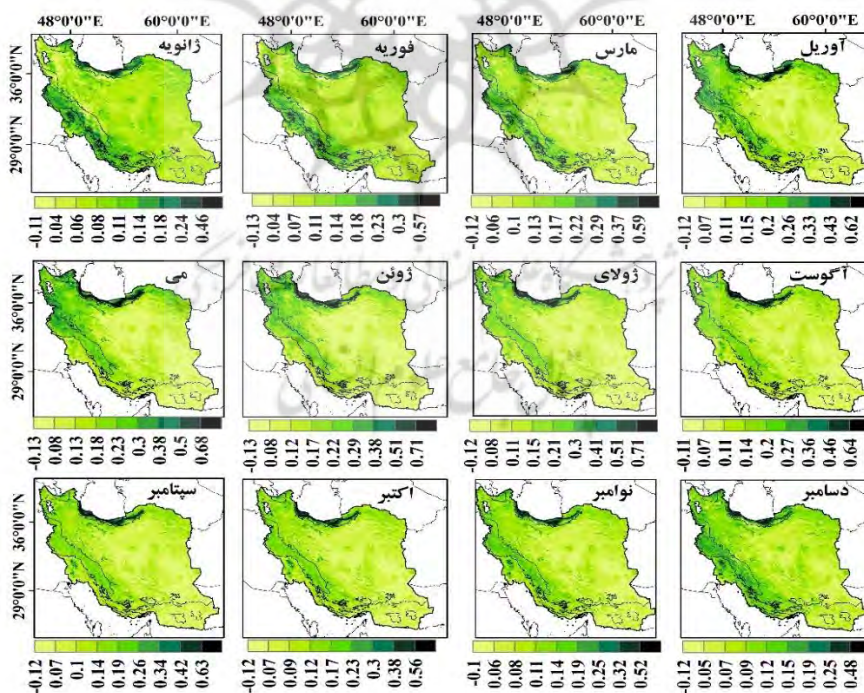
روند صعودی و افزایش نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی این فصل با دمای بالا و کاهش دسترسی به رطوبت ارتباط معنادار دارد. توزیع فضایی مقادیر NDVI و EVI در ماه‌های فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) به ترتیب دامنه‌ای از ۰/۲- تا ۰/۹۰ و ۰/۱۲- تا ۰/۵۶ را ارائه داده است.

بررسی نقشه شاخص NDVI و EVI نشان داد پوشش گیاهی در نوار غربی در محدوده زاگرس و بخش‌هایی از شمال غرب در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی و همچنین ناحیه رویشی هیرکانی افزایش یافته است (شکل‌های ۴ و ۵). از طرفی بخش زیادی از نواحی رویشی دارای پوشش گیاهی تنک و ضعیفی است. در این ماه میانگین شاخص NDVI با مقدار ۰/۵۰ در ناحیه رویشی هیرکانی به بیشترین مقدار خود در میان تمامی ماه‌ها رسیده است. بیشینه و کمینه میانگین شاخص EVI به ترتیب در ناحیه رویشی هیرکانی (۰/۲۲) و ایرانی-تورانی (۰/۰۸) قرار دارد. رخدادهای آتش‌سوزی با خزان پوشش گیاهی و شروع دیر هنگام بارش‌های پاییزی هم‌زمان شده‌اند.



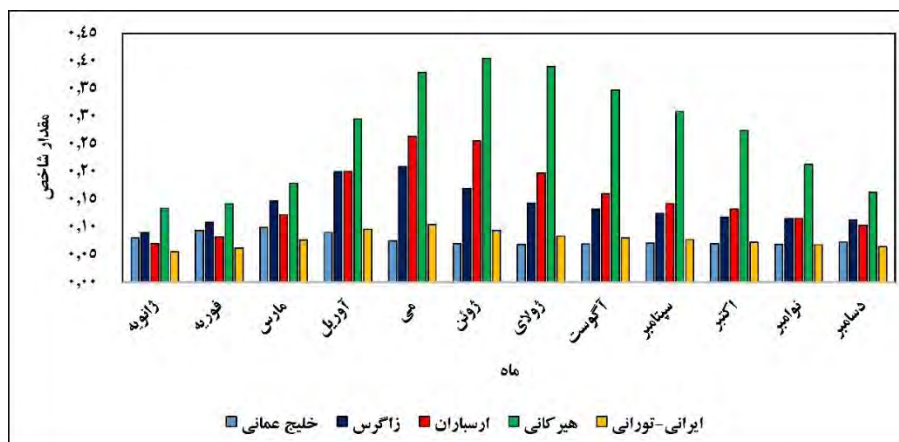
شکل ۴- مقدار شاخص NDVI در نواحی رویشی ایران طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مبتنی بر پرونداد سنجنده

MODIS ماهواره Terra با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر

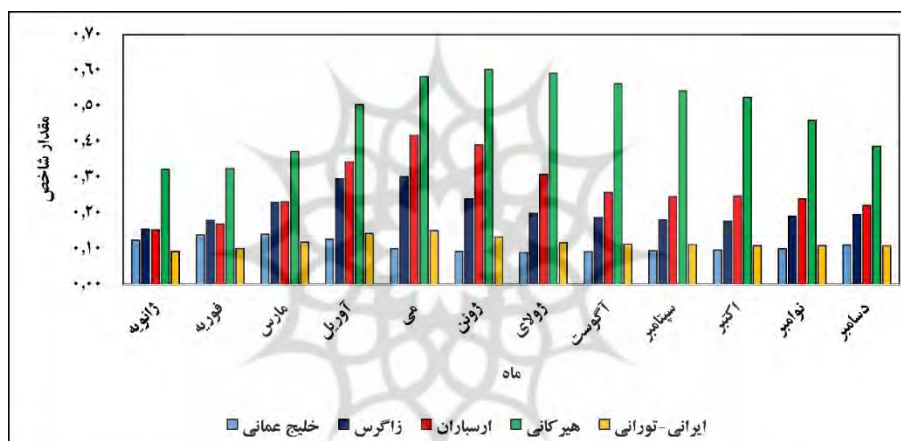


شکل ۵- مقدار شاخص EVI در نواحی رویشی ایران طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مبتنی بر پرونداد سنجنده

MODIS ماهواره Terra با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر



شکل ۶- پراکنش ماهانه شاخص EVI در نواحی رویشی ایران بر اساس سنجنده MODIS (۲۰۰۱-۲۰۲۰)



شکل ۷- پراکنش ماهانه شاخص NDVI در نواحی رویشی ایران بر اساس سنجنده MODIS (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

۵- نتیجه گیری

آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع یکی از مخاطرات جدی در سراسر جهان است. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش امواج گرمایی، شدت یافتن خشکسالی‌ها، کاهش بارش و افزایش دما رخداد آتش‌سوزی جنگل در سراسر جهان روندی افزایشی را نشان داده است. این پژوهش با استفاده از آخرین محصولات ماهواره‌ای سنجنده MODIS با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر به بررسی رخداد آتش‌سوزی جنگل در ایران برای یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) پرداخته است.

نتایج نشان داد در ماه‌های سرد سال (دسامبر، ژانویه و فوریه) تعداد نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی در این فصل نسبت به دوره گرم سال کاهش چشمگیری داشته و به جنگل‌های گیلان واقع در ناحیه رویشی هیرکانی و

به صورت گسترده و متمرکز بر روی جنگل‌های خوزستان واقع در ناحیه رویشی خلیج-عمانی محدود شده است. از طرفی نقشه‌های شاخص‌های پوشش گیاهی نشان دادند، مقادیر بیشینه EVI و NDVI منطبق بر نقطه شبکه‌های (سطح اطمینان اسمی-متوسط) دارای بیشینه رخداد آتش‌سوزی در این فصل هستند. در فصل بهار نیز رخداد‌های آتش‌سوزی بررسی شده، طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ افزایش قابل توجهی به ویژه در نواحی غرب و جنوب غرب کشور داشته است. توزیع فضایی شاخص‌های NDVI و EVI حاکی از افزایش مقادیر این شاخص‌ها در نوار شمالی، شمال غرب و غرب کشور دارد. از جمله دلایل رخداد آتش‌سوزی در فصل بهار می‌توان به رشد گونه‌های گیاهی و خشک شدن آن‌ها با افزایش دمای هوا و ذوب زود هنگام برف در اوایل بهار اشاره کرد.

پراکنش فصلی رخداد‌های آتش‌سوزی نواحی رویشی ایران در ماه‌های گرم سال نشان داد تعداد نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی روندی افزایشی دارند. افزایش دما (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹) و کاهش بارش (عساکره و همکاران، ۱۳۹۹) طی سال‌های اخیر باعث تشدید پدیده خشکسالی در ایران شده است. همچنین پژوهش مختلفی که به پیش‌نگری نمایه‌های خشکسالی (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ الف) و دوره‌های خشکسالی متوالی (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ ب) در ایران پرداخته‌اند، نشان دادند که شدت خشکسالی به همراه روزهای خشک متوالی در آینده روند افزایشی خواهد داشت. در نتیجه در شرایط خشکسالی و افزایش دما، مواد سوختنی لازم جهت آتش‌سوزی (پوشش گیاهی) فراهم می‌شود. از طرف دیگر خشکسالی می‌تواند احتمال اشتعال و سرعت گسترش آتش‌سوزی را افزایش دهد (لتل و همکاران، ۲۰۱۶).

در این فصل مناطق دارای رخداد آتش‌سوزی با سطح اطمینان مختلف در نواحی رویشی ایران پراکنده شده‌اند. فراوانی نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی در سطح اطمینان ۸۰-۱۰۰ درصد در ماه‌های گرم سال (ژوئن، ژوئیه و اوت) بیش‌تر از سایر ماه‌ها است. گرم شدن طولانی مدت هوا همراه با کاهش بارش فصل پاییز، احتمال آتش‌سوزی را افزایش داده است. در فصل پاییز نقطه شبکه‌های دارای رخداد آتش‌سوزی در سطح اطمینان اسمی-متوسط (بین ۸۰-۳۰) افزایش قابل توجهی را به ویژه در غرب ایران واقع در جنگل‌های کرمانشاه و کردستان در ناحیه رویشی زاگرس نشان می‌دهند. همچنین پدیده گرمباد (فون) در شروع، پخش و تشدید آتش‌سوزی‌های ناحیه رویشی هیرکانی در فصل پاییز تأثیر به سزایی دارد.

با توجه به اینکه رخداد مخاطره آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران در دهه‌های اخیر به لحاظ زمانی و مکانی، نوع و مدت آتش‌سوزی افزایش یافته است مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی به ویژه در ارتفاعات شمال غرب و غرب کشور، جنگل‌های زاگرس و ارسباران که دارای بیشترین آتش‌سوزی هستند، می‌تواند به عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم و اساسی برای ارائه نقشه‌های خطر آتش‌سوزی، ارائه الگوی زمانی-مکانی رخداد‌های آتش‌سوزی و شناسایی

عوامل مؤثر در رخداد آتش‌سوزی در این مناطق بکار رود. از آنجایی که ناهمگونی زمانی-مکانی زیادی در آتش‌سوزی جنگل‌های ایران به دلیل تفاوت بین عوامل محیطی و انسانی وجود دارد. تولید و به‌هنگام سازی نقشه‌های خطر آتش‌سوزی به‌عنوان ابزاری مؤثر در هشدار مناطق حساس به خطر آتش‌سوزی و انجام مراقبت‌های ویژه (کنترل، مهار و خاموش کردن آتش) است؛ بنابراین شناسایی مناطق مستعد، تشخیص به‌هنگام آتش‌سوزی، پیش‌بینی اقدامات لازم برای مقابله با آن و فراهم بودن تجهیزات و زیرساخت‌های مهار آتش‌سوزی از طریق مدلسازی و پیش‌بینی، گام‌های مؤثر در راستای پیشگیری از آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی و ذخایر ملی است.

کتابنامه

- امامی، حسن؛ شهریاری، حسن؛ ۱۳۹۸. کمی سازی عوامل محیطی و انسانی در وقوع آتش‌سوزی جنگل با روش‌های RS و GIS؛ مناطق حفاظت شده ارسباران. فصلنامه علمی- پژوهشی *اطلاعات جغرافیایی سپهر*. ۲۸ (۱۱۲)، ۵۳-۳۵. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38606>
- جانناز قبادی، غلامرضا؛ ۱۳۹۸. بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان، بر اساس شاخص خطر آتش‌سوزی (FRSI) با بهره‌گیری از تکنیک (GIS). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۶ (۳)، ۱۰۲-۸۹. <https://doi.org/10.29252/jsaeh.6.3.89>
- خان‌محمدی، مرتضی؛ رحیمی، محمد؛ کرتولی نژاد، داود؛ ۱۳۹۵. تحلیل خطر آتش‌سوزی جنگل‌های هیرکانی شمال‌شرق ایران با استفاده از شاخص‌های کچ-بایرام و مک-آرتور. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*. ۱۴ (۱)، ۵۷-۴۸. <https://doi.org/10.22092/IJFRPR.2016.107641>
- رحیمی، داریوش؛ خادمی، سمانه؛ ۱۳۹۷. تحلیل الگوهای همدید خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران (استان گلستان). *مخاطرات محیط طبیعی*. ۷ (۱۷)، ۱۹-۳۶. <https://doi.org/10.22111/JNEH.2017.3279>
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ۱۳۹۹. پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6). *فیزیک زمین و فضا*. ۴۶ (۳)، ۵۸۳-۶۰۲. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2020.304870.1007226>
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ۱۴۰۰ الف. پیش‌نگری همادی نمایه‌های خشکسالی در ایران مبتنی بر برون‌داد چند مدلی CMIP5. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*. ۲ (۷)، ۷۱-۸۲. <https://doi.org/10.30488/CCR.2021.317280.1058>
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ۱۴۰۰ ب. پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6. *فیزیک زمین و فضا*. ۴۷ (۳)، ۵۶۱-۵۷۸. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2021.319270.1007295>
- شریف نژاد، طوبی؛ خاوریان نه‌زک، حسن؛ ورامش، سعید؛ ۱۳۹۸. قابلیت‌های سنجش از دور در پایش آتش‌سوزی‌های عرصه‌های منابع طبیعی، اولین کنفرانس بین‌المللی و چهارمین کنفرانس ملی صیقلت از منابع طبیعی و محیط زیست. <https://civilica.com/doc/961387>

عالی محمودی سراب، سجاده؛ فقهی، جهانگیر؛ جباریان امیری، بهمن؛ ۱۳۹۱. پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: جنگل‌های منطقه زاگرس، شهرستان ایذه). بوم‌شناسی

کاربردی. ۱ (۲)، ۷۵-۸۶. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-188-fa.html>

عساکره، حسین؛ مسعودیان، سید ابوالفضل؛ ترکارانی، فاطمه؛ ۱۳۹۹. آشکارسازی روند بلندمدت بارش سالانه ایران‌زمین در ارتباط با تغییر فراوانی فرین‌های بارش روزانه. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۹ (۴)، ۱۲۳-۱۴۳.

<https://doi.org/10.22067/GEOEH.2021.67028.0>

فرج زاده اصل، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مکرری، ساحل؛ ۱۳۹۴. تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشأ آب و هوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۲ (۳)، ۸۳-۱۰۴.

<https://doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.3.83>

محمدی، فریده؛ شعبانیان، نقی؛ پورهاشمی، مهدی؛ فاتحی، پرویز؛ ۱۳۸۹. تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از GIS و AHP در بخشی از جنگل‌های پاوه. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. ۱۸ (۴)، ۵۸۶-۵۶۹.

https://ijfpr.areeo.ac.ir/article_107645.html

Albar, I., Jaya, I.N.S., Saharjo, B.H., Kuncahyo, B. and Vadrevu, K.P., 2018. Spatio-temporal analysis of land and forest fires in Indonesia using MODIS active fire dataset. Land-atmospheric research applications in South and Southeast Asia, 105-127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67474-2_6

Barro, S.C. and Conard, S.G., 1991. Fire effects on California chaparral systems: an overview. Environment International, 17(2-3), 135-149. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(91\)90096-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(91)90096-9)

Castro, F.X., Tudela, A. and Sebastià, M.T., 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). Agricultural and Forest Meteorology, 116(1-2), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00248-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00248-4)

Champin, L., Taïbi, A.N. and Ballouche, A., 2022. Spatial analysis of the occurrence and spread of wildfires in Southwest Madagascar. Fire, 5(4), 98. <https://doi.org/10.3390/fire5040098>.

Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M. and Oliva, P., 2020. Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. Current Forestry Reports, 6, 81-96. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5>.

Collins, K.M., Price, O.F. and Penman, T.D., 2015. Spatial patterns of wildfire ignitions in south-eastern Australia. International Journal of Wildland Fire, 24(8), 1098-1108. <https://doi.org/10.1071/wf15054>.

Flannigan, M., Cantin, A.S., De Groot, W.J., Wotton, M., Newbery, A. and Gowman, L.M., 2013. Global wildland fire season severity in the 21st century. Forest Ecology and Management, 294, pp.54-61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.022>

Fu, Y., Li, R., Wang, X., Bergeron, Y., Valeria, O., Chavardès, R.D., Wang, Y. and Hu, J., 2020. Fire detection and fire radiative power in forests and low-biomass lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products. Remote Sensing, 12(18), 2870. <https://doi.org/10.3390/rs12182870>.

Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O. and Kaufman, Y.J., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote sensing of environment, 87(2-3), 273-282. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(03\)00184-6](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(03)00184-6).

- Guan, X., Shen, H., Wang, Y., Chu, D., Li, X., Yue, L., Liu, X. and Zhang, L., 2021. Fusing MODIS and AVHRR products to generate a global 1-km continuous NDVI time series covering four decades. *Earth System Science Data Discussions*, 1-32. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-156>.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2).
- Justice, C.O., Giglio, L., Roy, D., Boschetti, L., Csiszar, I., Davies, D., Korontzi, S., Schroeder, W., O'Neal, K. and Morisette, J., 2011. MODIS-derived global fire products. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*, 661-679. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_29.
- Katagis, T. and Gitas, I.Z., 2022. Assessing the accuracy of MODIS MCD64A1 C6 and FireCCI51 burned area products in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing*, 14(3), 602. <https://doi.org/10.3390/rs14030602>.
- Kerr, J.T. and Ostrovsky, M., 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in ecology & evolution*, 18(6), pp.299-305. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(03\)00071-5](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(03)00071-5).
- Kumari, B. and Pandey, A.C., 2020. MODIS based forest fire hotspot analysis and its relationship with climatic variables. *Spatial Information Research*, 28(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00275-z>
- Li, Y., Gao, X., Li, Z., Jiang, J. and Li, P., 2022. Analysis of Atmospheric Factors affecting wildfires. *Authorea Preprints*. <https://essopenarchive.org/doi/full/10.1002/essoar.10506515.1>
- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H., 2016. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2353–2369. *Portico*. <https://doi.org/10.1111/gcb.13275>
- Lizundia-Loiola, J., Otón, G., Ramo, R. and Chuvieco, E., 2020. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 236, p.111493. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>.
- Mangeon, S., Field, R., Fromm, M., McHugh, C. and Voulgarakis, A., 2016. Satellite versus ground-based estimates of burned area: A comparison between MODIS based burned area and fire agency reports over North America in 2007. *The Anthropocene Review*, 3(2), 76-92. <https://doi.org/10.1177/2053019615588790>.
- Martyn, I., Petrov, Y., Stepanov, S., Sidorenko, A. and Vagizov, M., 2020. Monitoring forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data. In *IOP conference series: earth and environmental science*, 507(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012019>.
- Oton, G., Ramo, R., Lizundia-Loiola, J. and Chuvieco, E., 2019. Global detection of long-term (1982–2017) burned area with AVHRR-LTDR data. *Remote Sensing*, 11(18), 2079. <https://doi.org/10.3390/rs11182079>.
- Parajuli, A., Gautam, A.P., Sharma, S.P., Bhujel, K.B., Sharma, G., Thapa, P.B., Bist, B.S. and Poudel, S., 2020. Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major landscapes of Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), pp.2569-2586. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1853251>.
- Pradhan, B., Suliman, M.D.H.B. and Awang, M.A.B., 2007. Forest fire susceptibility and risk mapping using remote sensing and geographical information systems (GIS). *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 16(3), 344-352. <https://doi.org/10.1108/09653560710758297>.
- Subedi, P.B., Ayer, K., Miya, M.S., Parajuli, B. and Sharma, B., 2022. Forest Fire Risk Zone Mapping of Aalital Rural Municipality, Dadeldhura District, Nepal. *Journal of*

- Multidisciplinary Applied Natural Science, 2(2),70-81. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.115>.
- Sullivan, A.L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 387-403. <https://doi.org/10.1071/wf06144>.
- Tanase, M.A., Aponte, C., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T. and Heurich, M., 2018. Detection of windthrows and insect outbreaks by L-band SAR: A case study in the Bavarian Forest National Park. *Remote Sensing of Environment*, 209, 700-711. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.009>.
- Thome, K.J., Czaplá-Myers, J.S. and Biggar, S.F., 2003. Vicarious calibration of Aqua and Terra MODIS. In *Earth Observing Systems VIII* (Vol. 5151, 395-405). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.506364>.
- Tomshin, O. and Solovyev, V., 2022. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020. *Geocarto International*, 37(25), 7339-7357. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1973581>
- Tosic, I., Mladjan, D., Gavrilov, M.B., Zivanovic, S., Radakovic, M.G., Putnikovic, S., Petrovic, P., Mistrizdelovic, I.K. and Markovic, S.B., 2019. Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000-2017. *Open Geosciences*, 11(1), 414-425. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0033>.
- Wang, J., Wang, G., Qi, J., Liu, Y., & Zhang, W., (2021). Research of Forest Fire Points Detection Method Based on MODIS Active Fire Product. In *2021 28th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF54055.2021.9687646>
- Wu, Z., Li, M., Wang, B., Quan, Y. and Liu, J., 2021. Using artificial intelligence to estimate the probability of forest fires in Heilongjiang, northeast China. *Remote Sensing*, 13(9), 1813. <https://doi.org/10.3390/rs13091813>.
- Xiao, Y., Zhang, X. and Ji, P., 2015. Modeling forest fire occurrences using count-data mixed models in qiannan autonomous prefecture of Guizhou Province in China. *PloS one*, 10(3), e0120621. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120621>.
- Yankovich, K.S., Yankovich, E.P. and Baranovskiy, N.V., 2019. Classification of vegetation to estimate forest fire danger using landsat 8 images: Case study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019,1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/6296417>.
- Zeng, A., Yang, S., Zhu, H., Tigabu, M., Su, Z., Wang, G. and Guo, F., 2022. Spatiotemporal dynamics and climate influence of forest fires in Fujian Province, China. *Forests*, 13(3), p.423. <https://doi.org/10.3390/f13030423>.