


Spatiotemporal changes of forest fire in vegetation areas of Iran based on MODIS sensor

Kobra Shojaeizadeh¹, Mahmoud Ahmadi^{2*} , Abbasali Dadashi-Roudbari³

1. PhD student of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. *Corresponding Author*, Associate Professor of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Postdoctoral Research Associate of Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 24 February 2022

Revised: 13 July 2022

Accepted: 02 August 2022

Keywords:

forest fire, active fire, MODIS sensor, Iran.

ABSTRACT

The increase in fire activity in many regions of Iran in recent decades has raised concerns about the short-term and long-term consequences. Forest and pasture fires will affect the quantity, quality, and health of natural ecosystems. The first step in controlling and preventing forest fires is monitoring. Therefore, this study was conducted to estimate fire areas and identify the spatial-temporal changes of these events in the vegetation areas of Iran. To achieve this goal, TERRA satellite MODIS sensor data including active fire products (MOD14A1) and burned areas (MCD64A1) for 20 years (2001-2020) have been used. The results showed that the maximum extent of fires in the vegetation areas of Iran is related to July, which covers about 4100 hectares. This month, a large part of the country's forests, especially in the northwestern parts of the Arasbaran vegetation area, has caught fire. In contrast, the minimum amount of fire areas in the vegetation areas of Iran is related to April, which was observed as two limited zones in the northwest and west of the country. Due to the maximum time of forest fires in the hot and dry months of the year, including June, July, August, and September in the western part of the country in the Zagros. The linear correlation between the burned areas and the areas with active fires in Iran showed that there is a significant relationship between these two satellite products. This connection shows that the burned areas in the vegetation areas of Iran are among the active centers of forest fires.

Cite this article: Shojaeizadeh, K., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Spatiotemporal changes of forest fire in vegetation areas of Iran based on MODIS sensor. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36), 41-60. DOI: 10.22111/jneh.2022.41725.1881



© Mahmoud Ahmadi.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.41725.1881

* Corresponding Author Email: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir



مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۶، تیر ۱۴۰۲

تغییرات زمانی-مکانی آتش سوزی نواحی رویشی ایران مبتنی بر پرونداد

سنجنده MODIS

کبری شجاعی زاده^۱، محمود احمدی^{۲*}، عباسعلی داداشی رودباری^۳

۱. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران (نویسنده مسئول)

۳. پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش آتش‌سوزی در بسیاری از عرصه‌های رویشی ایران در دهه‌های اخیر نگرانی‌ها را در مورد پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت ناشی از آن افزایش داده است. آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع بر کمیت، کیفیت و سلامت اکوسیستم‌های طبیعی تأثیر خواهد داشت. گام اول در مهار و پیشگیری از آتش‌سوزی جنگل‌ها پایش دقیق آن است. بنابراین این پژوهش با هدف برآورد مساحت گستره‌های آتش‌سوزی و شناسایی تغییرات زمانی-مکانی این رخدادهای، در نواحی رویشی ایران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره TERRA شامل محصولات آتش‌سوزی فعال (MOD14A1) و مناطق سوخته‌شده (MCD64A1) در یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) استفاده شده است. نتایج نشان داد که بیشینه گستره آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران مربوط به ماه ژوئیه می‌باشد که حدود ۴۱۰۰ هکتار از اراضی ایران را در بر می‌گیرد. در این ماه بخش وسیعی از جنگل‌های کشور به‌خصوص در قسمت‌های شمال غربی در ناحیه رویشی ارسباران دارای رخداد آتش‌سوزی می‌باشد. در مقابل، کمینه مقدار گستره‌های آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران مربوط به ماه آوریل می‌باشد که به‌صورت دو پهنه محدود در شمال غرب و غرب کشور مشاهده شد. به جهت زمانی بیشینه رخدادهای آتش‌سوزی جنگل در ماه‌های گرم‌و‌خشک سال شامل ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر در نوار غربی کشور در رویشگاه زاگرس رخ داده است. همبستگی خطی بین مناطق سوخته‌شده و مناطق دارای آتش‌سوزی فعال در ایران نشان داد که یک ارتباط معنی‌دار بین این دو محصول ماهواره‌ای وجود دارد. این ارتباط نشان می‌دهد مناطق سوخته‌شده در نواحی رویشی ایران جز کانون‌های فعال آتش‌سوزی جنگل هستند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱	
واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی جنگل، آتش‌سوزی فعال، سنجنده MODIS، ایران.	

استناد: شجاعی زاده، کبری، احمدی، محمود، داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۲). تغییرات زمانی-مکانی آتش سوزی نواحی رویشی ایران مبتنی بر

پرونداد سنجنده MODIS. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۶)، ۴۱-۶۰. DOI: 10.22111/jneh.2022.41725.1881



© کبری شجاعی زاده، محمود احمدی، عباسعلی داداشی رودباری.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع، فراگیرترین اختلال طبیعی در سراسر جهان است که منجر به تغییر ساختار و عملکرد پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی می‌شود (بلچر^۱ و همکاران، ۲۰۱۰) و تهدیدی جدی برای عرصه‌های طبیعی و انسانی است (رنارد^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). رخدادهای آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع در صورت گسترده‌گی، شدت و فراوانی باعث تغییر مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۴)، افزایش آلودگی هوا (زو^۴ و همکاران، ۲۰۱۸) و نابودی بخش قابل توجهی از اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود (کردیانوف^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

خطر آتش‌سوزی به عوامل طبیعی و انسانی زیادی بستگی دارد که می‌تواند در بعد مکان و زمان تغییر کنند. توپوگرافی، مواد سوختنی و شرایط جوی سه ضلع اصلی آتش‌سوزی را تشکیل می‌دهند (کانترینمن^۶، ۱۹۷۲). در واقع همه این عوامل بر اجزای رژیم‌های آتش‌سوزی (تعداد و وسعت آتش‌سوزی) تأثیرگذارند. علی‌رغم فراوانی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی جنگل، رخداد این پدیده در یک مکان معمولاً بر اساس پیش‌بینی و تعیین الگوی زمانی-مکانی خاص ایجاد می‌شود (چن^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). این موضوع امکان مدل‌سازی کارآمد و قابل‌اعتماد رخدادهای آتش‌سوزی را فراهم کرده و می‌تواند روند تغییرات زمانی-مکانی آتش‌سوزی را به شرایط زیست‌محیطی منطقه مرتبط کند (سامارو^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). از این‌رو، روشن است که داده‌های مربوط به تغییرات زمانی-مکانی رخدادهای آتش‌سوزی در یک دوره زمانی طولانی می‌تواند به برنامه‌ریزان جنگل‌ها و مراتع کمک شایانی در رسیدن به اهداف حمایتی و حفاظتی کند.

در سال‌های اخیر رژیم‌های آتش‌سوزی در بسیاری از نقاط جهان در پی تغییر اقلیم، افزایش جمعیت و فعالیت‌های انسانی و تغییر کاربری اراضی تغییر فراوانی داشته است (یه^۹ و همکاران، ۲۰۱۷). وردایی در رژیم آتش‌سوزی دارای پیامدهای کوتاه مدت و بلندمدت بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی دارد (بانازونتاس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۶). به همین دلیل درک تغییرات زمانی-مکانی آتش‌سوزی و تعیین نقش هر کدام از عوامل اثرگذار در بحث مدیریت پیشگیری آتش‌سوزی‌ها ضرورت ویژه‌ای داشته که لزوم مطالعه آن بیش از پیش احساس می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

پدیده آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران همواره به‌عنوان یک مخاطره جدی مورد توجه بوده که فراوانی آن نیز در سال‌های اخیر افزایش داشته است. روند آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع در ایران طی دو دهه گذشته افزایشی بوده است، به‌گونه‌ای که به‌طور متوسط هر ساله به‌ویژه با فرارسیدن ماه‌های گرم، بیش از ۱۰۰۰ رخداد آتش‌سوزی صرفاً در جنگل‌ها رخ داده و نزدیک به ۳۵۰۰ هکتار از عرصه‌های جنگلی در طعمه آتش‌سوزی گرفتار شده و بخشی از این

1 - Belcher

2 - Renard

3 - Wang

4 - Zhu

5 - Kirdyanov

6 - Countryman

7 - chen

8 - sameraro

9 - Ye

10 - Banazountas

عرصه‌ها نیز کاملاً از بین رفته‌اند. بر اساس میانگین آتش سوزی‌های رخ داده در عرصه‌های جنگلی و مرتعی در ۱۳ سال اخیر (۱۳۹۸-۱۳۸۶)، ۴۵ درصد آتش سوزی‌ها در مراتع، ۲۳ درصد در جنگل‌های طبیعی، ۱۴ درصد در اراضی جنگلی و ۹ درصد در جنگل‌های دست کاشت رخ داده است. به‌طور میانگین ۷۰ درصد آتش سوزی‌ها در ناحیه زاگرس رخ می‌دهد، ۱۴ درصد در ناحیه رویشی ایرانی- تورانی، ۱۱ درصد در ناحیه رویشی هیرکانی و چهار درصد نیز در ناحیه رویشی ارسباران به وقوع پیوسته است. ۷۷/۳ درصد از سطح جنگل‌های زاگرس تحت تأثیر یا در خطر بالقوه آتش‌سوزی قرار دارند (گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۳۹۹).

بر اساس آنچه گفته شد، در دست داشتن داده‌های دقیق و قابل اعتماد در مورد کانون‌های آتش‌سوزی و مناطق سوخته (به‌عنوان مثال رخداد آتش‌سوزی) و آمارهای مرتبط، همانند فراوانی و گستردگی برای تعیین کمیت روندها و الگوهای رخداد آتش‌سوزی، توصیف عوامل تأثیرگذار در رخداد آتش‌سوزی، پیش‌بینی رفتارهای الگوی آتش‌سوزی در آینده ضروری می‌باشد. از آنجایی که آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی و مرتع اتفاق می‌افتد و دسترسی به این مناطق دشوار بوده و اغلب ایستگاه اندازه‌گیری نیز در این مناطق وجود ندارد، بر همین اساس استفاده از داده‌های بازتحلیل یا ماهواره‌ای برای مطالعه تغییرات زمانی-مکانی آتش‌سوزی‌ها ضروری است. از طرف دیگر، روشن است که بازتحلیل‌ها یا خروجی مدل‌ها عموماً با خطای زیادی همراه هستند. بنابراین محصولات سنجش‌ازدور به‌عنوان جایگزین یک داده مشاهداتی می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای را در شناخت صحیح مناطق دارای آتش‌سوزی داشته باشند.

به‌کارگیری فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند به شناسایی و مطالعه آتش‌سوزی‌های فعال، شناسایی مناطق سوخته و نواحی با پتانسیل آتش‌سوزی پرداخت و این مناطق را شناسایی کرد. این مسئله برای مناطقی که گزارش دقیق آتش‌سوزی موجود نباشد و برای نواحی جنگلی بزرگ و دوردست مفید می‌باشد (اکبرزاده، ۱۳۹۱). به‌علاوه اطلاعات به‌دست‌آمده از تحلیل محصولات سنجش‌ازدور به آسانی در سامانه اطلاعات جغرافیایی قابل‌استفاده است که به کاربر اجازه می‌دهد تا بخش زیادی از اطلاعات را ذخیره، تحلیل و بازیابی نمایند (چویکو^۱، ۱۹۹۶). یکی از سنجنده‌های که به‌طور گسترده برای کشف و شناسایی آتش‌سوزی‌های فعال، تعیین محدوده مناطق سوخته‌شده و تحلیل زمانی-- مکانی آن‌ها استفاده می‌گردد، سنجنده MODIS^۲ می‌باشد که به‌دلیل دارا بودن تعدادی باند طیفی و دوره‌ی تکرار مناسب جهت پایش و آشکارسازی آتش‌سوزی‌ها به‌کار می‌رود.

با توجه به افزایش فراوانی و وسعت رخدادهای آتش‌سوزی در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در زمینه رخداد و علل آتش‌سوزی‌ها، رژیم‌های آن و عوامل مؤثر بر آن‌ها بر اساس داده‌های سنجش‌ازدور و داده‌های هواشناسی انجام شده است. (سان میگل و همکاران، ۲۰۱۲؛ ونلایتن و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاردیل و همکاران، ۲۰۱۵؛ نیونس و همکاران، ۲۰۱۶؛ گونگالس و همکاران، ۲۰۱۷؛ مارین و همکاران، ۲۰۱۸؛ وانته و همکاران، ۲۰۲۱؛ برنر و همکاران، ۲۰۲۱؛ باب و همکاران، ۲۰۲۲؛ پیرا و همکاران، ۲۰۲۲). در یکی از این مطالعات سیفارد^۳ و همکاران (۲۰۰۸) الگوهای مکانی آتش‌سوزی درکوه‌های سانتا مونیکا در جنوب کالیفرنیا را با توجه به عوامل انسانی و بیوفیزیکی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بیشتر آتش‌سوزی‌ها در منطقه مورد مطالعه توسط انسان رخ داده

¹ - Chuvieco

² - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

³ - Syphard

است. همچنین با وجود اینکه شروع بیشتر آتش‌سوزی‌ها توسط انسان رخ می‌دهد، اما گسترش اغلب آتش‌سوزی‌ها که مرتبط با وسعت آن‌ها است، در نهایت به متغیرهای بیوفیزیکی مرتبط بوده و بزرگ‌ترین آتش‌سوزی‌ها در جنوب کالیفرنیا به نوعی تابعی از سرعت باد، توپوگرافی و نوع پوشش گیاهی می‌باشد. خانال^۱ (۲۰۱۵) برای بررسی الگوهای زمانی- مکانی آتش‌سوزی در نپال طی یک دوره ۱۴ ساله از ۲۰۰۱-۲۰۱۴ از داده‌های سنجنده مودیس استفاده نمود. تحلیل مناطق سوخته‌شده به‌صورت ماهانه بررسی و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که از ژوئن تا آگوست، میزان بارندگی در نپال بیشتر است، بنابراین فعالیت آتش‌سوزی کمتر است. روند زمانی- مکانی رخداد‌های آتش‌سوزی در ایالت فلوریدا پژوهشی است که مکلمور^۲ (۲۰۱۷) بین سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۵ با توجه به متغیرهای اکولوژیکی و انسانی مورد تحلیل قرار داده است. نتایج پژوهش وی نشان داد که هیچ همبستگی معنی‌داری بین متغیرهای مورد مطالعه و میزان رخداد آتش‌سوزی وجود ندارد. با این حال بخش قابل‌توجهی از آتش‌سوزی‌های جنگل به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و برخورد صاعقه می‌باشد. کوتر^۳ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تحلیل تراکم کرنل مبتنی بر رگرسیون چندمتغیره به تحلیل زمانی- مکانی رخداد‌های آتش‌سوزی طی بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۰ در جنگل Mumcular کشور ترکیه پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها بیانگر آن بوده است که با در نظر گرفتن یک پارامتر هموارسازی واحد به- جای محدوده‌ای از مقادیر برآوردشده در یک فاصله زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد بهتر است. بررسی و مقایسه تفاوت‌های زمانی- مکانی چهار محصول منطقه سوخته جهانی (Copernicus Burnt, Fire CCI, MODIS MCD64A1 و MODIS MCD45A1 Area)، بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۱ پژوهشی است که هامبر^۴ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی آن پرداختند. نتایج نشان داد که محصول MCD64A1 بیشترین مساحت سوخته‌شده را شناسایی کرده است این در حالی است که محصول CCI کمترین سطح سوخته‌شده را شناسایی کرده است. شولی و تیرتا^۵ (۲۰۲۱) روند زمانی- مکانی آتش‌سوزی جنگل‌های کالیفرنیا بین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۰ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در طول دو دهه گذشته، فراوانی آتش‌سوزی‌های کوچک (کمتر از ۵۰۰ هکتار) به سرعت افزایش یافته است و به‌طور گسترده در مرکز و غرب کالیفرنیا پراکنده شده‌اند. شو و او^۶ (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های آتش‌سوزی جنگل طی سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۸ و روش تحلیل مولفه اصلی و خوشه‌بندی به ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل و توزیع زمانی- مکانی آتش‌سوزی‌ها در چین پرداختند. بررسی روند تعداد آتش‌سوزی‌ها و مساحت سوخته‌شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۸ در چین نشان داد که طی سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸ بیشینه رخداد آتش‌سوزی به‌ترتیب با ۱۳۴۶۶ و ۱۴۱۴۴ فقره آتش‌سوزی در جنگل‌های چین رخ داده است. همچنین آن‌ها نشان داده آتش‌سوزی از نظر مکانی، مناطقی که تراکم جمعیت و پوشش گیاهی بالاتری داشتند بیشتر در معرض آتش‌سوزی قرار دارند. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد در اکثر مطالعات برای ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی رخداد‌های آتش‌سوزی به بررسی فاکتورهای اقلیمی، فیزیوگرافی و انسانی (زرع کار و همکاران، ۱۳۹۲؛ اسکندری و جلیوند، ۱۳۹۶؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ گراوند و همکاران، ۱۳۹۲؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹؛ غلام رضایی و همکاران، ۱۳۹۹) مؤثر بر گسترش آتش‌سوزی با استفاده از سامانه اطلاعات

¹ - Khanal

² - Mclemore

³ - Kuter

⁴ -Humber

⁵ - Shu Li, & Tirtha

⁶ - shu & Wu

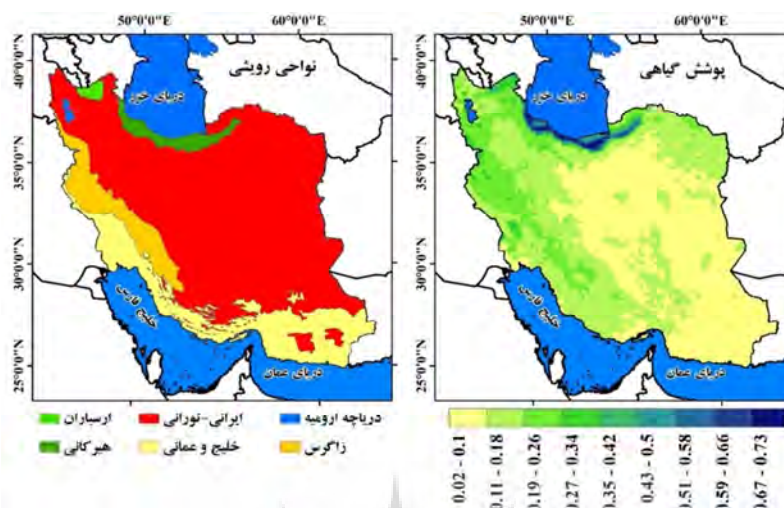
جغرافیایی و تحلیل سلسه‌مراتبی (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ بیرانوند و همکاران، ۱۳۹۰؛ اسکندری، ۱۳۹۴؛ جانباز قبادی، ۱۳۹۸) پرداخته شده است.

مرور منابع پژوهش نشان می‌دهد به‌رغم توسعه الگوریتم‌های بسیاری که برای آتش‌سوزی جنگل ارائه شده است و در دسترس بودن محصولات ماهواره‌ای بسیاری برای آتش‌سوزی جنگل در ایران، اما کماکان مطالعه‌ای دقیق از رفتار بلندمدت آتش‌سوزی جنگل در ایران ارائه نشده است که لزوم یک مطالعه در این زمینه احساس می‌شود. همچنین بیشتر مطالعات به یک منطقه به‌خصوص جغرافیایی در ایران توجه کردند و بنابراین یک رویکرد همه‌جانبه نگر در این زمینه دیده نشده است که لزوم انجام این پژوهش را بیش از پیش نشان می‌دهد. از طرفی آشکارسازی الگوی زمانی-مکانی مناطق پرخطر به پیش‌بینی روند آن‌ها در آینده کمک خواهد کرد و گامی مؤثر در کمک به مدیران جنگل‌ها و مراتع جهت برنامه‌ریزی و مدیریت کانون‌های پرخطر آتش‌سوزی است. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن یک دوره ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا سعی شده است که به بررسی تغییرات زمانی-مکانی گستره‌های آتش‌سوزی و برآورد مساحت مناطق سوخته‌شده نواحی رویشی ایران پرداخته شود.

داده‌ها و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است. طبق آخرین اعلام سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۷، از ۱۳۵ میلیون هکتار عرصه‌های طبیعی، سطح جنگل‌های ایران ۱۴/۳۱۹ میلیون هکتار است که حدود ۸/۸ درصد از مساحت ۱۶۴ میلیون و ۸۰۰ هزار هکتاری کل ایران را شامل می‌شود. ۱۴ درصد جنگل‌های ایران در ناحیه رویشی هیرکانی شامل ۳ استان شمالی گلستان، گیلان و مازندران می‌باشد. ناحیه رویشی ایرانی-تورانی (با ۲۸/۲ درصد)، ناحیه رویشی ارسباران (با ۱/۴ درصد)، ناحیه رویشی زاگرس (۴۱/۹) و ناحیه رویشی خلیج فارس-عمانی (با ۱۴/۸) مساحت کشور را شامل می‌شوند (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۹۹). موقعیت نواحی رویشی ایران در شکل (۱) ارائه شده است. شاخص اختلاف بهنجارشده پوشش گیاهی (NDVI) با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره ترا (MOD13A2) با تفکیک افقی ۵۰۰ متر برای بررسی دقیق‌تر نواحی رویشی ایران در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه هیرکانی با ۰/۴۸ بیشینه مقدار پوشش گیاهی را نسبت به سایر نواحی رویشی کشور به خود اختصاص داده است. پس از آن ناحیه رویشی ارسباران در شمال غرب کشور با مقدار ۰/۲۶، ناحیه رویشی زاگرس با ۰/۲۲ و کمترین مقدار پوشش گیاهی به ترتیب با ۰/۱۱ و ۰/۱۰ در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی و خلیج - عمانی مشاهده می‌شود. دقت داده‌های سنجنده مودیس در تشخیص و آشکارسازی شاخص اختلاف بهنجارشده پوشش گیاهی تأییدی بر پهنه‌های رویشی ایران می‌باشد که توسط سازمان جنگل‌ها، مرتع و آبخیزداری کشور تهیه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی نواحی رویشی ایران و شاخص پوشش گیاهی NDVI سنجنده MODIS منبع: نگارندگان

داده‌های مورد استفاده و روش پردازش آن‌ها

امروزه با پیشرفت فناوری سنجنش‌زدور می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای در زمینه پایش و آشکارسازی آتش‌سوزی‌ها استفاده کرد. از جمله داده‌های مفید و قدرتمند در این زمینه می‌توان به محصولات ماهواره‌ای سنجنده مودیس اشاره کرد. سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره ترا و آکوا نصب شده است. این سنجنده دارای ۳۶ باند طیفی در طول موج-های ۰/۴ - ۱۴/۴ می‌باشد که محدوده طیفی مرئی تا مادون قرمز را پوشش می‌دهد و با تفکیک‌های مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر از زمین تصویربرداری می‌کند که در بحث نظارت و پایش آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان از باندهای طیفی در محدوده ۴ و ۱۱ میکرومتر با توان تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استفاده می‌شود (گیگلیو^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). محصول ۶ سنجنده مودیس پردازش‌های لازم برای آشکارسازی آتش‌سوزی بر روی داده‌های این سنجنده انجام شده و داده‌های مربوط به زمان و مکان رخدادهای آتش‌سوزی با دقت بالا و خطای کم (۱/۲ درصد) به‌عنوان خروجی این الگوریتم در اختیار کاربران قرار می‌گیرد (گیگلیو و همکاران، ۲۰۱۶). رخدادهای آتش‌سوزی دارای کدهای ۰ و ۲ به‌ترتیب در محدوده پوشش گیاهی و سایر منابع زمینی هستند (گیگلیو و همکاران، ۲۰۱۸).

دو نوع محصول آتش‌سوزی برای سنجنده مودیس ارائه شده است. محصولات آتش‌سوزی فعال (MO/Y14، MO/Y14A1، MO/Y14A2) که محل آتش‌سوزی را مشخص می‌کنند و محصولات منطقه‌ی سوخته‌شده (MCD45A1، MCD64A1) که منطقه‌ی سوخته‌شده را مشخص می‌کنند. این محصولات به‌وسیله‌ی الگوریتم متنی که از حد آستانه‌های ثابت و نقطه شبکه‌های همسایه برای شناسایی نقطه شبکه آتش استفاده می‌کنند، در سطح جهانی تولید می‌شوند (گیگلیو و همکاران، ۲۰۰۶). محصول آتش فعال (MOD14A1) هر هشت روز یکبار با تفکیک افقی ۱ کیلومتر به‌عنوان محصول سطح ۳ تولید می‌شود. هر شبکه نشان‌دهنده ترکیبی از نقطه شبکه آتش شناسایی-شده در طی یک شبانه روز است. داده‌های جمع‌آوری‌شده آتش‌سوزی در طی هشت روز در یک فایل مجزا ذخیره

¹ - Gigolo

می‌شود. این محصول شامل زیر مجموعه‌های ماسک آتش، ارزیابی کیفیت نقطه شبکه، حداکثر قدرت تابشی آتش و داده‌های نمونه‌برداری می‌باشد (گیگلیو، ۲۰۱۵). الگوریتم ترکیبی محصول سوخته‌شده (MCD64A1) از داده‌های ۵۰۰ متری بازتاب سطحی و محصول آتش‌سوزی فعال یک کیلومتری مودیس استفاده می‌کند. این الگوریتم از یک شاخص گیاهی (VI) حساس به سوختگی، باندهای مادون قرمز طول موج کوتاه مودیس مشتق می‌شود (گیگلیو، ۲۰۱۶).

به منظور شناسایی پوشش گیاهی در داده‌های ماهواره‌ای، از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) استفاده می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده نحوه توزیع ماده سوختنی است. ارزش عددی این شاخص بین ۱ و -۱ در نوسان است. زمانی که مقدار این شاخص از صفر کمتر است محدوده شامل منابع آبی و زمانی که از صفر بیشتر می‌شود محدوده شامل مناطق دارای پوشش گیاهی است و هر چقدر این عدد به یک نزدیک‌تر باشد مناطق جنگلی را نشان می‌دهد که دارای مواد سوختنی زیادی است (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۸). شاخص یادشده در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در مقیاس ماهانه با تفکیک افقی ۵۰۰ متر از سنجنده مودیس ماهواره تراخذ شد.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، این پژوهش با هدف بررسی محصولات ماهواره‌ای سنجنده مودیس برای آتش‌سوزی عرصه‌های رویشی ایران انجام شده است. برای این منظور از دو محصول آتش‌سوزی فعال (MOD14A1) و مناطق سوخته‌شده (MCD64A1) سنجنده مودیس ماهواره تراخذ استفاده گردید. تفکیک افقی محصولات نامبرده ۰/۱ درجه قوسی (حدوداً ۱۰ کیلومتر) است. بر این اساس ماتریسی با ابعاد ۱۵۵۶۰×۲۴۰ در گام نخست ایجاد شد. در این ماتریس ۱۵۵۶۰ تعداد نقطه شبکه‌های مودیس در پهنه ایران و ۲۴۰ تعداد تجمعی ماه‌های سال است. برای درک بهتر از عرصه‌های سوخته‌شده رویشی در ایران واحد اولیه داده‌های مناطق سوخته‌شده (متر مربع) به هکتار تبدیل گردید.

پیش از به‌کارگیری داده‌ها و یا محصولات ماهواره‌ای، لازم است تا درستی آن‌ها مورد سنجش قرار گیرد. برای این منظور، برای نمونه مساحت مناطق سوخته‌شده بر حسب هکتار در ناحیه رویشی ارسباران مورد بررسی قرار گرفته است. بر این منظور از آمار و اطلاعات تعداد فقرات و مساحت عرصه‌های سوخته‌شده سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور استفاده گردید. این داده‌ها متأسفانه فقط تعداد و مساحت مناطق سوخته‌شده را از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ در اختیار داشته‌اند که از سازمان مربوطه اخذ گردید. با این حال، مساحت عرصه‌های سوخته‌شده طی این بازه ۱۰ ساله در جنگل‌های ارسباران بر اساس گزارش سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور ۳۹۸/۵ هکتار است. این در حالیست که محصولات مناطق سوخته‌شده مودیس برای دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ مناطق سوخته‌شده ارسباران را $۳۵۱/۸$ هکتار برآورد کرده است. همان‌طور که پیداست با در نظر گرفتن اختلاف در سری زمانی آماری مورد استفاده، محصول ماهواره‌ای برای میانگین دوره تنها ۴۶/۷ هکتار کمتر مناطق سوخته‌شده را برآورد کرده است که بر این اساس می‌توان گفت محصولات ماهواره‌ای مرتبط با آتش‌سوزی کارایی مناسبی در برآورد این مخاطره در ایران دارند. برای بررسی متوسط مناطق سوخته‌شده در هر ناحیه رویشی از روش آمار منطقه‌ای (Zonal Statistics) متوسط پهنه‌ای دو محصول مورد استفاده برای هر یک از پنج پهنه رویشی مورد استفاده محاسبه و در نتایج ارائه شده است. در ادامه

برای بررسی ارتباط بین مناطق سوخته‌شده و آتش‌سوزی فعال از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است که به جهت سادگی این روش و پرتکرار بودن استفاده از آن رابطه مربوطه ارائه نگردید.

یافته‌های پژوهش

پراکنش جغرافیایی مناطق سوخته‌شده نواحی رویشی ایران برای ماه ژانویه تا دسامبر طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره ترا در شکل (۲) و میانگین پهنه‌ای نواحی رویشی آتش‌سوزی فعال و مناطق سوخته‌شده به صورت ماهانه در جدول (۱) نشان داده شده است. با بررسی نقشه مناطق سوخته‌شده، چند هسته بیشینه با مساحت متفاوت و پراکنش نامنظم در سطح جنگل‌های کشور در ماه ژانویه مشاهده شده است. مهم‌ترین هسته بیشینه به‌طور مشخص و گسترده در ناحیه رویشی هیرکانی بر روی جنگل‌های آستارا و رودبار مستقر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل خزان پاییزی درختان و وجود مواد سوختنی فراوان در مناطق جنگلی بیشترین میزان آتش‌سوزی و سطح سوخته‌شده در جنگل‌های استان گیلان رخ داده است، این نتیجه در تأیید یافته‌های حسینیان و وظیفه‌دوست (۱۳۹۲) و نبی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) است. دو هسته دیگر به صورت محدود در ناحیه رویشی ارسباران، جنگل‌های کلیبر و ناحیه رویشی خلیج - عمانی، جنگل‌های دشت آزادگان گسترده شده است. در ۵ درصد از مساحت سوخته‌شده، ۵ هکتار از منابع جنگلی و مرتعی متمرکز می‌باشد که به صورت پراکنده بخش‌های از نواحی رویشی هیرکانی در استان‌های مازندران، گلستان و گیلان، ناحیه رویشی زاگرس در استان کهگیلویه و بویراحمد و بخش‌های شمالی آذربایجان شرقی در جنگل‌های ارسباران را تحت سیطره خود درآورده است.

بخش وسیعی از جنگل‌های ناحیه ایرانی-تورانی و خلیج - عمانی با بیش از ۹۴ درصد و مساحتی کمتر از یک هکتار نسبت به بخش‌های دیگر، فاقد یا کمتر دچار آتش‌سوزی می‌باشند. این نواحی به دلیل شرایط اقلیمی دارای تنوع گونه‌ای کمتر نسبت سایر نواحی می‌باشند. نتایج حاصل از محصول آتش فعال ماه‌های ژانویه تا دسامبر در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، این محصول ماهواره‌ای توانسته است از گستره‌های درگیر با آتش‌سوزی در سراسر کشور در ماه ژانویه، فقط آتش‌سوزی‌های جنوب غرب کشور در محدوده استان خوزستان در ناحیه رویشی خلیج - عمانی و بخش‌های اندکی از آتش‌سوزی‌های صورت‌گرفته در استان کهگیلویه و بویراحمد ناحیه رویشی زاگرس را مشخص کنند. شرایط اقلیمی مرطوب، پوشش ابر (تادجی و همکاران، ۲۰۰۸؛ گیگیلیو و همکاران، ۲۰۰۳) از یکسو و تفکیک افقی داده‌های مورد استفاده از سوی دیگر می‌تواند از دلایل عدم شناسایی آتش‌ها در قسمت‌های شمالی کشور باشد.

در ماه فوریه جابه‌جایی مکانی بیشینه مناطق سوخته‌شده به سمت غرب کشور مشاهده شده است. کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده در این ماه در جنوب غرب ایران، ناحیه رویشی خلیج - عمانی قرار دارد به گونه‌ای که از مجموع ۶۹ هکتار مساحت سوخته‌شده، سطحی معادل ۴۰ هکتار در جنگل‌های دشت آزادگان قرار دارد. جنگل‌های آستارا و کلیبر در نوار شمالی کشور با مساحت ۲۰/۱ هکتار در رده دوم بیشترین سطح سوخته‌شده قرار دارند. قسمت‌های شمالی استان‌های آذربایجان غربی، بخش‌های از غرب کشور به مقدار بیشتر در ایلام، کرمانشاه و خوزستان و همچنین بخشی از جنگل‌های هیرکانی در استان گیلان با ۱/۵ هکتار سطح سوخته‌شده، بیش از دو درصد از مساحت سوخته‌شده جنگلی کشور را به خود اختصاص داده‌اند. در این ماه مناطق کمتر از یک هکتار سطح سوخته که بیش از

۹۶ درصد مساحت کشور را شامل می‌شوند بیشترین بروز و نمود را داشته است. از آنجایی که آتش‌های با وسعت بیشتر برتری بالاتری برای شناسایی دارند (اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ پورشکوری اله ده و همکاران، ۱۳۹۲)، شاخص آتش‌سوزی فعال فقط کانون‌های فعال آتش‌سوزی‌های غرب کشور را نشان دهد. وسعت کم آتش‌سوزی‌ها، پایین بودن درجه حرارت آتش‌سوزی‌ها، وجود پوشش ابر و تاج پوشش بسته‌ی پوشش گیاهی از دلایل آشکار نشدن آتش‌سوزی-ها در بقیه مناطق کشور توسط محصولات آتش مودیس می‌باشد. ضریب همبستگی ($r=0.11$) مقدار همبستگی ضعیفی بین محصول سوخته‌شده و آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از استخراج مساحت مناطق سوخته‌شده ماه مارس در ایران حاکی از سوختن ۳۱۷ هکتار از مناطق جنگلی را دارد. همچنین دامنه آتش‌سوزی‌ها تا شرق کشور کشیده شده است. در این ماه نیز کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده همچنان بر روی جنگل‌های دشت آزادگان در استان خوزستان قرار دارد. شواهد حاکی از سوختن بخش قابل توجهی از جنگل‌های آن را دارد. پهنه بیشینه با مساحت سوخته‌شده تقریبی ۱۶ هکتار در شمال غرب کشور بر روی جنگل‌های کلیبر مشاهده شده و کمتر از یک درصد سطح سوخته‌شده را در بر گرفته است. وسعتی در حدود ۵ هکتار (کمتر از ۲ درصد مساحت مناطق سوخته‌شده) بخش‌های کوچکی از شرق، شمال و شمال غرب کشور را پوشش داده است. ۹۸ درصد کشور، کمترین میزان سطح سوخته‌شده را به خود اختصاص دادند. نتایج حاصل از محصولات آتش فعال در این ماه (شکل ۳) نشان می‌دهد، کانون‌های فعال آتش‌سوزی در این ماه همچنان در غرب کشور متمرکز و بخش زیادی از ناحیه رویشی خلیج - عمانی را در بر گرفته و این محصول توانسته این کانون‌ها را به خوبی شناسایی نماید. نتایج همبستگی بین محصول سوخته‌شده و آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس مقدار ($r=0.37$) را نشان می‌دهد.

نقشه پراکندگی مکانی مناطق سوخته‌شده در ماه آوریل حکایت از سوختن بالغ بر ۰/۳۰ هکتار از مناطق نواحی رویشی ایران دارد. مساحت مناطق سوخته‌شده در این ماه نسبت به ماه‌های گذشته روند نزولی داشته و به دو پهنه نسبتاً محدود در ناحیه رویشی ایرانی - تورانی در شمال غرب و خلیج - عمانی در جنوب غرب کشور محدود شده است. به طوری که در بعضی از نقاط جنگلی این مناطق وسعتی تا ۰/۲۶۴ هکتار با رخداد آتش‌سوزی جنگل مواجه بوده‌اند. بالغ بر ۹۹ درصد وسعت کشور دارای آتش‌سوزی بسیار محدود و کمتر از یک هکتار می‌باشد. اگرچه در کل منطقه مورد مطالعه مساحت پهنه بدون آتش‌سوزی نسبت به پهنه‌های دیگر بیشتر است. اما این بدان معنا نیست که در این نواحی وقوع آتش‌سوزی صفر است. نتایج حاصل از شاخص آتش‌سوزی فعال در این ماه نشان می‌دهد که همچنان تداوم کانون‌های فعال آتش‌سوزی در غرب کشور ادامه دارد، به گونه‌ای که محصول آتش فعال تا حدی توانستند این کانون‌ها را در غرب کشور شناسایی کند؛ ولی هسته بیشینه سوخته‌شده در شمال غرب کشور شناسایی نشد. ضریب همبستگی پیرسون بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس رابطه معکوس و منفی ($r=-0.36$) وجود دارد.

همان‌گونه که از نقشه ماه می قابل مشاهده است، پراکنش نقاط سوخته‌شده اکثراً شمال غربی تا جنوب غربی می‌باشد. کانون اصلی مناطق سوخته‌شده در این ماه، در غرب و جنوب غرب ایران جنگل‌های استان ایلام و به‌ویژه استان خوزستان ناحیه رویشی خلیج - عمانی قرار دارد. در این مناطق مساحت سوخته‌شده به نسبت بالایی رخ داده به-

گونه‌ای که از مجموع ۹۷۹ هکتار مساحت سوخته‌شده، ۹۴۸ هکتار در این مناطق رخ داده است. بیش از ۱۱ درصد سطح سوخته‌شده با مساحت ۳۱ هکتار به‌صورت پراکنده و نامنظم در قسمت‌های شمالی، غربی و جنوبی ایران متمرکز شده‌اند. ۸۸ درصد مساحت کشور در محدوده کمتر از یک هکتار مناطق سوخته‌شده جنگلی و مرتعی قرار دارد. محصولات آتش فعال توانستند کانون‌های فعال آتش‌سوزی در غرب کشور را با توجه به حرارت بالا آتش و دمای بالا در این ماه به خوبی شناسایی کنند. مساحت کم آتش‌سوزی‌های پراکنده و نامنظم در سایر نواحی کشور دلیلی بر عدم شناسایی آن‌ها است. ضریب همبستگی خطی پیرسون بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس رابطه معکوس و منفی ($r=-0.36$) وجود دارد. رابطه همبستگی منفی به‌دست‌آمده در دو ماه آوریل و مه به‌دلیل آغاز رشد پوشش گیاهی و افزایش کامل سبزیگی در این دو ماه از سال است. این تغییر سریع در فعالیت پوشش گیاهی نقش تعیین‌کننده‌ای را در همبستگی به‌دست‌آمده دارد. به‌طوری‌که الگوریتم آتش‌سوزی فعال یک آتش‌سوزی را تشخیص می‌دهد؛ اما در مقابل محصول سوخته‌شده به‌دلیل جایگزینی سریع پوشش گیاهی این گزارش را ندارد بر همین اساس همبستگی به‌دست‌آمده منفی شده است.

با آغاز فصل گرما و بالارفتن دمای هوا در روزها و ماه‌های گرم سال، احتمال رخداد آتش‌سوزی در سطح جنگل‌های ایران بیشتر می‌شود. به‌گونه‌ای که در این ماه روند صعودی و افزایش مساحت مناطق سوخته‌شده تا ناحیه رویشی ایرانی- تورانی در قسمت‌های جنوبی کشور مشاهده می‌شود. در تحلیل نقشه پراکنده‌گی مکانی مناطق سوخته‌شده ماه ژوئن، قسمت‌های شمالی استان خوزستان در ناحیه رویشی خلیج - عمانی دارای بالاترین مساحت سوخته‌شده می‌باشد که به خوبی توسط محصول آتش فعال سنجنده مودیس شناسایی شده‌اند. دومین کانون مناطق سوخته‌شده در جنگل‌های گلستان و بعد از آن در استان اردبیل قرار دارد. این مناطق تا حدودی توسط محصول آتش‌سوزی فعال شناسایی شده است. در واقع این مناطق با ۴ درصد سطح سوخته‌شده دارای بیشترین مساحت سوخته به مقدار ۳۳۱۸ هکتار می‌باشند. ۲۷ درصد مناطق سوخته‌شده با مساحتی بالغ بر ۸۱ هکتار به‌صورت پراکنده در نوار شمالی، غربی و جنوبی کشور قرار گرفته‌اند. آتش تندتر و حرارت بالاتر در کانون‌های آتش‌سوزی با توجه به شرایط محیطی و مواد سوختنی باعث شده که توسط محصولات آتش به خوبی شناسایی شوند. از دلایل عدم شناسایی سایر پهنه‌ها توسط این محصولات می‌توان به حرارت پایین آنها هنگام سوختن اشاره کرد. در این ماه از فراوانی و سطح مناطق سوخته‌شده کمتر از یک هکتار، کاسته و به ۶۹ درصد رسیده است. همبستگی خطی پیرسون یک رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0.5$) بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال را نشان می‌دهد.

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محدوده مناطق سوخته‌شده برای ماه ژوئیه طی متوسط بلند مدت ۲۰ ساله در شکل (۲) نشان داده شده است. کل مساحت محدوده سوخته‌شده ۴۰۶۰ هکتار می‌باشد. در این ماه جابه‌جایی مکانی آتش-سوزی‌ها قابل مشاهده است. به‌گونه‌ای که بیشینه مناطق سوخته‌شده در مراتع استان اردبیل و با شدت کمتر در جنگل‌های فارس با مساحت ۳۶۳۰ هکتار قرار دارد. که مساحتی معادل با ۲/۹ درصد از مساحت مناطق سوخته‌شده کشور را شامل می‌شود. کانون بیشینه آتش‌سوزی در جنگل‌های استان فارس به‌وسیله محصول آتش‌سوزی فعال مودیس شناسایی شده که به‌دلیل بالا بودن دمای آتش و دمای هوا در این منطقه نسبت به کانون بیشینه شمال کشور می‌باشد (شکل ۳). ۳۰ درصد مناطق سوخته‌شده با مساحتی بالغ بر ۶۴ هکتار به‌صورت پراکنده در نوار شمالی، غربی و جنوبی کشور متمرکز شده است که در این میان تنها آتش‌سوزی‌های جنگل‌های استان خوزستان شناسایی

شده‌اند. حرارت کم در حین سوختن اصلی‌ترین دلیل عدم شناسایی آتش‌سوزی‌ها در بقیه مناطق است. با افزایش دمای هوا و استمرار هوای گرم، ناحیه رویشی ارسباران و زاگرس تقریباً به‌طور کامل به‌همراه استان‌های گیلان، گلستان، خراسان رضوی در معرض ریسک بالای آتش‌سوزی قرار خواهند گرفت (امامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسکندری و جلیوند، ۱۳۹۶؛ پورشکوری اله ده و همکاران، ۱۳۹۲). قسمت اعظم جنگل‌های ایرانی- تورانی و خلیجی- عمانی با ۶۶/۸۱ درصد نسبت به بخش‌های دیگر فاقد یا کمتر درگیر مناطق سوخته‌شده می‌باشند. میزان ضریب همبستگی بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال در این ماه ($r=0.50$) است که همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان می‌دهد.

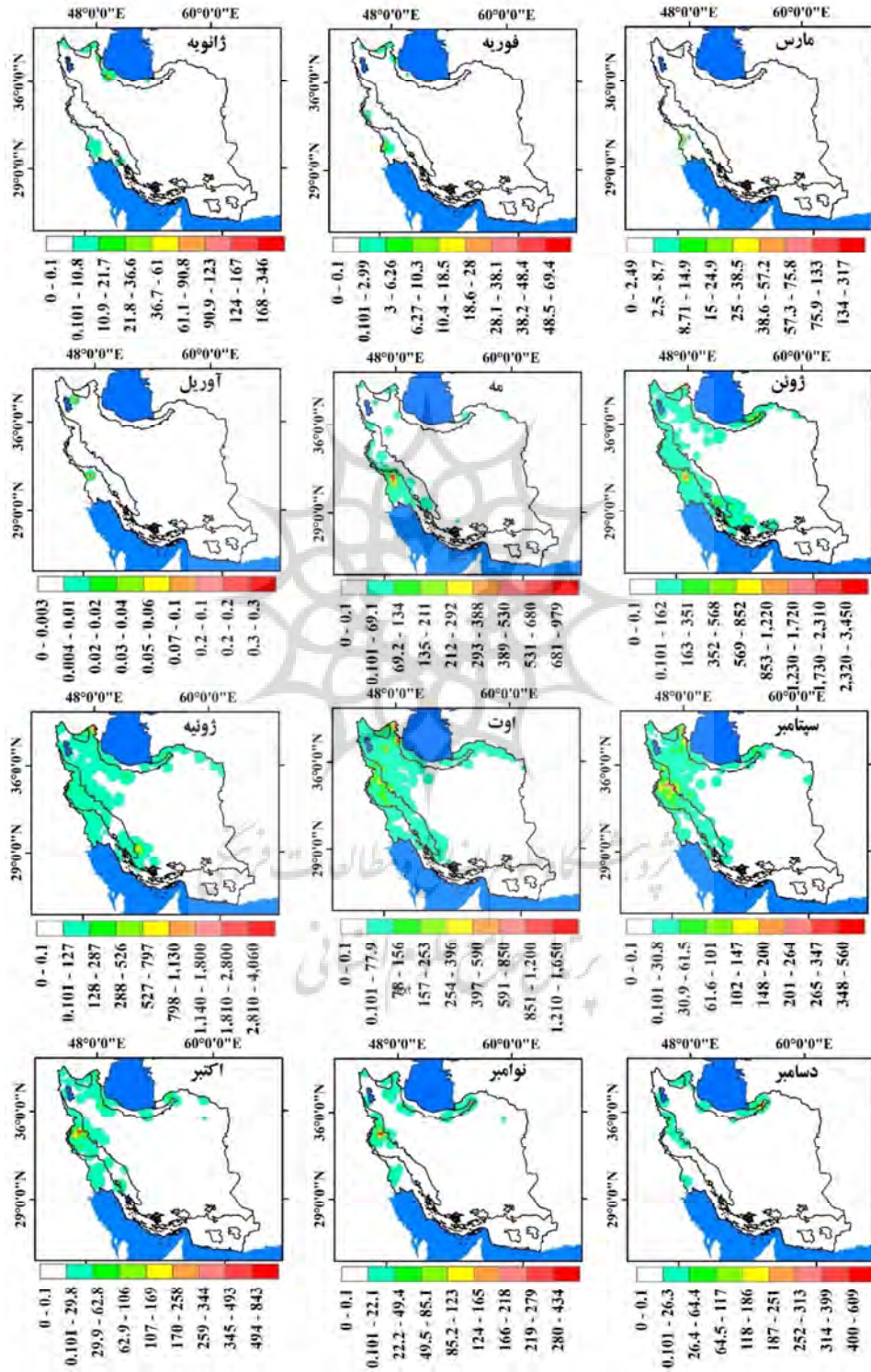
گستره مکانی مناطق سوخته‌شده در ماه اوت وضعیت متغیری را برای کشور نشان می‌دهد. بیشینه میزان سطح سوخته در جنگل‌های ایرانی- تورانی محدوده اردبیل و کلیبر قرار دارد. دومین کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده این ماه در مناطق غربی کشور قرار دارد که زاگرس شمالی را از کردستان، سنندج، کرمانشاه تا ایلام در بر می‌گیرد. به صورت میانگین مساحت مناطق سوخته‌شده هسته‌های بیشینه در نقاط مختلف کشور ۱۶۵۴ هکتار می‌باشد که در ۵/۷ درصد مساحت کشور گسترده شده است. ۴۵ هکتار از اراضی جنگلی و مرتعی سوخته‌شده نواحی رویشی ارسباران، زاگرس، هیرکانی را با ۲۸,۶ درصد تحت سیطره خود درآورده است. بخش گسترده‌ای از کشور در مناطق مرکزی، شرقی، جنوبی و جنوب‌شرقی علی‌رغم برخورداری از دمای بالا و سرعت باد لازمه برای آتش‌سوزی به دلیل عدم پوشش گیاهی و عرصه‌های جنگلی فاقد مناطق آتش‌سوزی هستند. این مناطق که کمتر از یک درصد از مناطق سوخته‌شده را به خود اختصاص داده‌اند، ۶۵/۶۵ درصد مساحت کشور را شامل می‌شوند. این مناطق در تصاویر مربوط به آتش‌سوزی فعال مودیس شناسایی نشد. مساحت کم آتش‌های رخ داده در این مناطق باعث شده است که آتش‌ها شناسایی نشوند. میزان ضریب همبستگی بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال ($r=0.50$) حاصل شده است.

نتایج حاصل از بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق سوخته‌شده در ماه سپتامبر حاکی از آن است که ۵۶۰ هکتار از نواحی رویشی کشور سوخته شده است. در این ماه جابه‌جایی مکانی هسته‌های بیشینه مناطق سوخته‌شده به سمت نوار غربی کشور و قرارگیری این هسته‌ها به صورت گسترده و متمرکز بر روی جنگل‌های استان کرمانشاه واقع در ناحیه رویشی زاگرس مشاهده شده است. همچنین کانون‌های فعال و نسبتاً شدیدی به ترتیب در غرب استان خوزستان، شرق استان اردبیل و آستارا مشاهده می‌شود. ۷ درصد وسعت مناطق سوخته‌شده معادل با ۵۴۱ هکتار به این مناطق اختصاص دارد. ۱۸ هکتار از کل مناطق سوخته‌شده به صورت پراکنده در بخش‌های شمالی، غربی، شمال شرق و همچنین جنوب غربی کشور قرار دارند که ۲۴ درصد کشور را پوشش می‌دهند. ۶۹ درصد کشور درگیر آتش-سوزی محدود می‌باشد. در این ماه درصد شناسایی مناطق دارای آتش‌سوزی به خصوص در مناطقی که بیشینه سطح سوخته‌شده را داشتند پایین بود و تنها آتش‌های اتفاق افتاده در ناحیه رویشی خلیج- عمانی منطقه خوزستان به خوبی شناسایی شده‌اند. مقدار همبستگی بین محصولات آتش مورد استفاده برای ماه سپتامبر ($r=0.53$) به دست آمده است. مناطق سوخته‌شده در بازه زمانی ۲۰ ساله برای ماه اکتبر نشان داد که در این ماه از وسعت مناطق سوخته‌شده کاسته شده است؛ ولی همانند ماه قبل، کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده بر روی جنگل‌های کرمانشاه در ناحیه

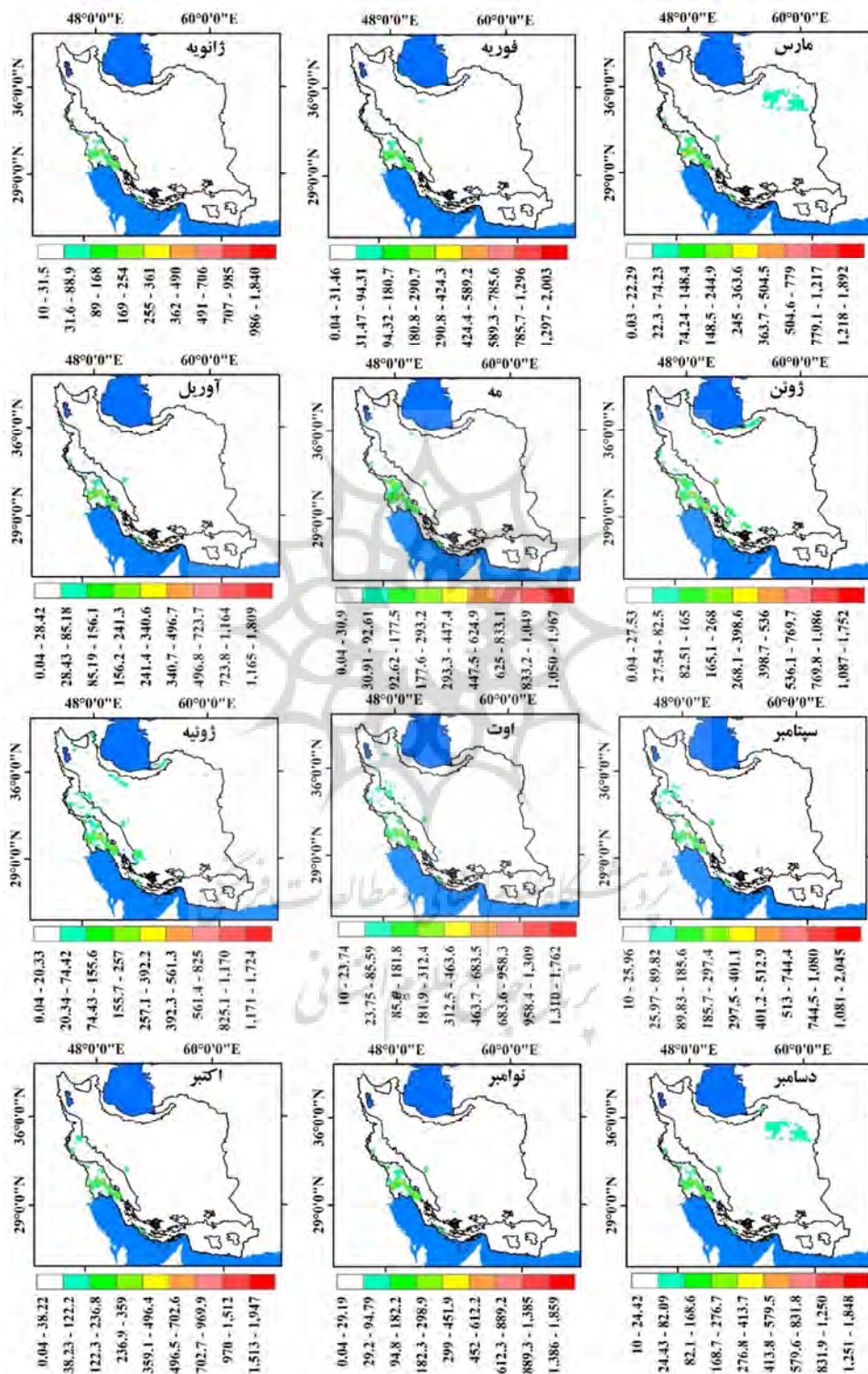
رویشی زاگرس قرار دارد. کانون‌های بیشینه‌ای با مساحت متفاوت و نامنظم در قسمت‌های غربی، شمالی، شمال شرقی کشور متمرکز شده‌اند. در مجموع این مناطق ۳ درصد مساحت سوخته‌شده که معادل با ۸۲۶ هکتار می‌باشد را به خود اختصاص داده‌اند. در همین نواحی نیز مناطق سوخته‌شده با شدت کمتر اتفاق افتاده است و ۱۷/۲۰ درصد مساحت کشور که شامل ۱۸ هکتار از اراضی سوخته‌شده می‌باشد را تحت پوشش خود درآوردند. قسمت اعظم جنگل‌های ایرانی- توراتی و عمانی- خلیج فارس با ۸۰ درصد وسعت در محدوده مناطق فاقد آتش‌سوزی قرار دارند. این موضوع که هر قدر میزان شدت آتش‌سوزی بیشتر باشد، احتمال شناسایی آن بیشتر خواهد بود نسبی است و نمی‌تواند در همه موارد صحت داشته باشد (پورشکوری اله ده و همکاران، ۱۳۹۲)، به‌گونه‌ای که در این ماه آتش‌های با مساحت ۱۸ هکتار توسط محصول آتش‌سوزی فعال شناسایی و آتش‌سوزی‌هایی با مساحت ۸۲۶ هکتار شناسایی نشده‌اند. میزان ضریب همبستگی بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال ماه اکتبر ($r=0.30$) به‌دست آمده است.

پراکندگی مکانی مناطق سوخته‌شده در ماه نوامبر نشان می‌دهد که فراوانی و وسعت این مناطق به مراتب کمتر و به ۴۳۴ هکتار رسیده است. در این ماه علاوه بر هسته بیشینه فعال بر روی جنگل‌های کرمانشاه در غرب کشور، هسته بیشینه دیگری در جنوب و جنوب شرق جنگل‌های گلستان ناحیه هیرکانی قرار گرفته است که ابرناکی و پوشش ابری باعث شده تا آتش‌های مورد مطالعه در این منطقه رویت نشود. کانون دوم هسته‌های بیشینه در بخش‌های شمالی، شمال غربی و جنوب غربی مشاهده می‌شود. به‌صورت کلی ۲ درصد مساحت سوخته‌شده معادل ۴۲۱ هکتار در این مناطق متمرکز و همچنان شاهد تداوم مکانی آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های کرمانشاه مشاهده می‌شود. ۸/۵ هکتار از اراضی جنگلی و مرتعی سوخته‌شده این ماه ۱۰/۳۶ درصد وسعت کشور را در بخش‌های شمالی، غربی، جنوب غربی و غربی کشور در بر گرفته است. ۸۷ درصد وسعت کشور نیز با آتش‌سوزی ناچیز درگیر هستند. سنجنده مودیس قادر به شناسایی آتش‌سوزی‌های صورت‌گرفته در قسمت‌های غربی ناحیه رویشی زاگرس شده است. مقدار ضریب همبستگی پیرسون این ماه حاکی از رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0.42$) بین محصول سوخته‌شده و آتش‌سوزی فعال دارد.

نقشه عرصه جنگلی سوخته‌شده ماه دسامبر نشان می‌دهد، از کل محدوده دچار آتش‌سوزی‌شده (۶۰۹ هکتار)، مقدار ۵۹۷ هکتار عرصه جنگلی و دارای پوشش درختی در مناطق جنوب و جنوب شرق استان گلستان، جنگل‌های زاگرس شمالی از کردستان تا جواترود در استان کرمانشاه و همچنین جنگل‌های ارسباران در محدوده شهرستان کلیبر با سهم ۱/۲۸ درصد از کل منطقه در معرض آتش‌سوزی قرار گرفته است. بالاترین درصد سطح سوخته‌شده در جنگل‌های گلستان ناحیه رویشی هیرکانی قرار دارد. افزایش تعداد روزهای ابری باعث مخفی ماندن این آتش‌ها از دید سنجنده مودیس شده است. ۱۲ هکتار از مناطق سوخته‌شده به‌صورت پراکنده و نقطه‌ای ۷/۲۵ درصد مساحت کشور را در جنگل‌های هیرکانی (استان گیلان)، جنگل‌های زاگرس شمالی (بخش‌های از کردستان، کرمانشاه، همدان و در شمال غرب کشور اطراف دریاچه ارومیه) و جنگل‌های ارسباران (محدوده کلیبر و اردبیل) به خود اختصاص داده‌اند. در ۹۱ درصد از مساحت کشور فراوانی و سطح آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌ها و مراتع کمتر از یک هکتار می‌باشد. نتایج آزمون پیرسون برای همبستگی بین محصول سوخته‌شده و محصول آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس نشان می‌دهد که رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0.42$) وجود دارد.



شکل ۲: مساحت مناطق سوخته شده به هکتار در نواحی رویشی کشور طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ مبتنی بر برونداد سنجنده MODIS



شکل ۳: مناطق آتش سوزی فعال در نواحی رویشی کشور طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مبتنی بر برون داد سنجنده MODIS

متوسط پهنه‌ای دو محصول مناطق سوخته‌شده و دارای آتش‌سوزی فعال سنجنده مودیس برای هر یک پنج ناحیه رویشی ایران محاسبه و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که پیداست تقریباً در تمامی نواحی رویشی ایران در دوره گرم سال آتش‌سوزی‌ها بیشتر از دوره سرد سال است. از منظر بیشینه مساحت مناطق سوخته‌شده در متوسط نواحی رویشی، ناحیه رویشی ارسباران هر چند که کوچک‌ترین ناحیه رویشی ایران است اما بالاترین مناطق سوخته‌شده را دارد. بیشینه مناطق سوخته‌شده با $116/8$ هکتار در ماه ژوئن در ناحیه رویشی ارسباران و کمینه آن نیز در ناحیه ایرانی- تورانی دیده می‌شود. علت پایین بودن مناطق سوخته‌شده در ناحیه ایرانی- تورانی به دلیل پایین بودن مقدار پوشش گیاهی در این ناحیه رویشی ایران است که در شکل (۱) در نقشه NDVI ارائه‌شده بر اساس داده‌های سنجنده مودیس این امر به روشنی دیده می‌شود. پس از ناحیه رویشی ارسباران ناحیه رویشی زاگرس بیشترین آتش‌سوزی‌ها را در ایران دارد. نتایج به‌دست‌آمده برای نواحی رویشی ایران به روشنی نشان می‌دهد که ارسباران و زاگرس دارای تهدید جدی آتش‌سوزی جنگل در ایران هستند که باید مورد توجه ویژه برنامه‌های اقدام برای مقابله با این مخاطره طبیعی (و انسانی) قرار گیرند.

جدول ۱: متوسط پهنه‌ای مناطق آتش‌سوزی فعال (A.F) و سوخته‌شده (B.A) در نواحی رویشی کشور طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مبتنی

بر پرونداد سنجنده MODIS

ناحیه رویشی	شاخص	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
هیرکانی	A. F	۱۰/۲	۹/۸	۹/۹	۹/۷	۹/۸	۱۲/۶	۱۰/۶	۱۱/۲	۱۰/۹	۹/۸	۹/۸	۱۱/۶
	B. A	۵/۵	۰/۲	۰/۰۵	۰	۰/۰۱	۴۴	۶	۱۷/۷	۶/۹	۳/۷	۵	۱۹/۶
ارسباران	A. F	۱۰/۸	۱۰/۵	۱۰/۴	۱۰/۲	۱۰/۶	۱۱/۷	۱۰/۹	۱۱/۲	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۱	۱۰/۲
	B. A	۵	۱/۳	۰/۸	۰	۰/۲	۱۱۶/۸	۹۰/۴	۹۸/۸	۲۲/۷	۴/۴	۳/۵	۷/۹
زاگرس	A. F	۱۱	۱۱/۱۲	۱۱/۱	۱۲/۱	۱۳/۳	۱۵/۶	۱۴/۲	۱۴/۵	۱۵/۱	۱۴/۹	۱۲/۴	۱۱/۲
	B. A	۰	۰/۰۳	۰	۰	۱/۷	۳۵/۴	۳۲/۶	۵۰	۲۸/۸	۱۶/۷	۸/۷	۱/۸
ایرانی- تورانی	A. F	۱۰/۳	۱۰/۴	۱۱/۵	۱۰/۵	۱۰/۸	۱۲/۱	۱۱/۵	۱۱/۱	۱۱	۱۰/۷	۱۰/۵	۱۱/۵
	B. A	۰/۰۸	۰	۰	۰	۰/۰۳	۷/۹	۸/۱	۷/۳	۳/۱	۰/۶۱	۰/۳۵	۰/۴۰
خلیج- عمانی	A. F	۳۶/۹	۲۷/۶	۲۷/۴	۲۶/۷	۳۲/۳	۳۱/۵	۲۷/۲	۲۸/۷	۲۹/۳	۳۱	۳۰/۱	۲۸/۲
	B. A	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۷۹	۰	۱۵/۳	۲۵/۴	۳/۹	۳/۲	۲/۲	۰/۸	۰/۳	۰/۰۶

نتیجه‌گیری

آتش‌سوزی‌هایی که مناطق وسیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند معمولاً جوامع گیاهی و محیط زیستی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. پایش دقیق و بهنگام آتش‌سوزی‌های جنگل بسیار مهم و حیاتی است. با این حال، الگوهای بازیابی پس از آتش‌سوزی ممکن است اثرات ناهمگونی از چشم‌انداز را بر روند بازسازی طبیعی جوامع گیاهی نشان دهد. این مطالعه از فن‌های تفسیر محصولات سنجنش‌ازدور برای ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی آتش‌سوزی جنگل در عرصه‌های رویشی ایران استفاده کرده است.

این پژوهش به بررسی تغییرات زمانی- مکانی گستره‌های آتش‌سوزی در سطح جنگل‌های کشور با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس شامل محصول آتش‌سوزی فعال و محصول مناطق سوخته‌شده طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱

پرداخته است. به‌طور کلی در دوره‌ی آماری ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) مورد بررسی تعداد و مساحت آتش‌سوزی‌های رخ داده در سطح جنگل‌های کشور روند افزایشی را نشان می‌دهد.

بررسی داده‌های مربوط به سطح مناطق سوخته‌شده نشان داد که از نظر زمانی بیشترین رخداد آتش‌سوزی‌ها به ترتیب مربوط به ماه‌های جولای، ژوئن و آگوست می‌باشد و کمترین تعداد آتش‌سوزی‌های رخ داده مربوط به ماه‌های فصل بهار (آوریل) و زمستان (فوریه) است. در واقع همان‌گونه که انتظار می‌رود در ایام گرم سال به دلیل گرمای زیاد هوا و کمبود بارش آتش‌سوزی بیشتری در پهنه گسترده‌ای از کشور به‌ویژه نواحی رویشی زاگرس روی دهد. این نتیجه با پژوهش پورشکوری الله ده و همکاران (۱۳۹۲) که دریافتند ناحیه رویشی زاگرس تابستانی گرم و خشک دارد و آتش در این جنگل‌ها با سرعت گسترش می‌یابد همخوانی دارد. از طرفی چنین ارتباط مستقیمی بین دوره گرم سال و فصل آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال کشور دیده نمی‌شود و بیشترین رخداد آتش‌سوزی از نظر تعداد و بیشترین هکتار مربوط به فصل سرد سال به‌ویژه جنگل‌های گلستان است. نزدیکی به مناطق خشک شرق کشور، وجود درخت‌های خزان‌کننده در پهنه رویشی هیرکانی، خشک‌شدن برگ‌ها و انباشت مواد سوختنی در جنگل، خطر رخداد آتش‌سوزی در این فصل افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های حسینیان و وظیفه دوست (۱۳۹۲) و نبی پور و همکاران (۱۳۹۴) هم‌راستا است. سبزبودن برگ‌های درختان، علف‌ها و بوته‌های کف جنگل و در نتیجه کمبود مواد سوختنی برای آتش‌سوزی از دلایل عدم رخداد آتش‌سوزی در فصل گرم سال در این نواحی می‌باشد. اوج تعداد و مساحت آتش‌سوزی‌های رخ داده در فصل پاییز به لحاظ زمانی و مکانی در ماه سپتامبر و ناحیه رویشی زاگرس و به‌ویژه جنگل‌های استان کرمانشاه قرار دارد. با توجه به کاهش تدریجی دما در این فصل از علل این فراوانی، می‌توان به سهل‌انگاری کشاورزان و یا جارسوزی زمین‌های کشاورزی و مراتع توسط مردم اشاره داشت. نتیجه به‌دست‌آمده با پژوهش عزیز و همکاران (۱۳۹۹) که دریافتند در مراتع استان کرمانشاه طی ماه‌های سپتامبر و اکتبر با وجود کاهش تدریجی دما، حداکثر فراوانی رخداد آتش‌سوزی اتفاق افتاده است هم‌راستا می‌باشد.

روند آتش‌سوزی در انواع مختلف نواحی رویشی به‌طور چشمگیری متفاوت است. در جنگل‌های غرب ایران روند آتش‌سوزی به‌طور قابل‌توجهی در دوره مورد مطالعه افزایش داشته است، این مناطق در پهنه‌های اقلیمی نیمه خشک تا مرطوب و پوشش گیاهی متراکم زاگرسی قرار دارند. با توجه به اینکه اساس شناسایی آتش‌سوزی در محصولات مودیس حرارت است، وجود پوشش ابر و پایین بودن درجه حرارت آتش‌ها از دلایل عدم شناسایی آتش‌سوزی‌های رخ داده در نوار شمالی کشور در ماه‌های سرد سال توسط محصولات آتش‌سوزی فعال می‌باشد. پیش‌تر در پژوهش‌های بسیاری که بررسی محصولات ماهواره‌ای مودیس برای آتش‌سوزی جنگل پرداختند، عوامل مؤثر در شناسایی نشدن آتش‌سوزی را عوامل مختلفی عنوان کرده‌اند که می‌توان به پوشش ابر (تود و همکاران، ۲۰۰۸، گیگلیو و همکاران، ۲۰۰۳، جان و همکاران، ۲۰۰۸، وانگ و همکاران، ۲۰۰۷) اندازه کم آتش‌سوزی (گیگلیو و همکاران، ۲۰۰۶، فیلیپ و همکاران، ۲۰۰۷)، شدت کم آتش‌سوزی (تود و همکاران، ۲۰۰۸، گیگلیو و همکاران، ۲۰۰۳؛ جان و همکاران، ۲۰۰۸) و تاج پوشش بسته جنگل (تود و همکاران، ۲۰۰۸) اشاره نمود. عوامل یادشده همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد می‌تواند در جنگل‌های شمال کشور باعث شناسایی نشدن آتش‌سوزی در محصول نامبرده باشند.

منابع

- ابراهیمی، حمید؛ رسولی، علی اکبر؛ مختاری، داوود. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات خطر آتش سوزی و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر بی نظمی، مطالعه موردی: جنگل‌ها و مراتع استان آذربایجان شرقی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۱)، ۵۷-۷۳.
- احمدزاده، بهروز؛ فقهی، جهانگیر؛ شیروانی، انوشیروان. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر و برنامه‌ریزی پیشگیری و مبارزه با آتش سوزی در جنگل‌های ارسباران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته مهندسی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی تهران.
- اسکندری، سعیده. (۱۳۹۴). رابطه بین تغییر اقلیم و آتش سوزی در جنگل‌های استان گلستان. تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، ۱۳(۱)، ۱-۱۰.
- اسکندری، سعیده؛ جلیوند، حمید. (۱۳۹۶). تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر رژیم آتش سوزی جنگل‌های نکا و بهشهر، تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، ۱۵(۱)، ۳۰-۳۹.
- اکبرزاده، جلال؛ سرکارگر اردکانی، علی؛ محمدزاده، علی. (۱۳۹۱). مقایسه و ارزیابی روش‌های متداول کشف آتش و بررسی تأثیر دما و رطوبت در دقت آشکارسازی نقاط ثابت آتش سوزی توسط سنجنده MODIS، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، رشته عمران نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری (ژئودزی و ژئوماتیک) دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- امامی، حسن؛ شهریاری، حسن. (۱۳۹۸). کمی‌سازی عوامل محیطی و انسانی در وقوع آتش سوزی جنگل با روش‌های RS و GIS؛ مناطق حفاظت‌شده ارسباران. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیای سپهر، ۲۸(۱۱۲)، ۳۵-۵۳.
- بیرانوند، عطیه؛ بابایی کفای، ساسان؛ کیادلیری، هادی. (۱۳۹۰). بررسی تأثیر عوامل اکولوژیک بر توسعه آتش سوزی در اکوسیستم‌های جنگلی (مطالعه موردی: کاکا رضا- لرستان). تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده، ۲(۲)، ۱۳-۱.
- پورشکوری الله ده، فرخ؛ درویش صفت، علی اصغر؛ صمد زادگان، فرهاد؛ عطارد، پدram؛ سلیمانی، جواد. (۱۳۹۳). ارزیابی الگوریتم جهانی کشف آتش در شناسایی آتش فعال در عرصه‌های منابع طبیعی به کمک تصاویر سنجنده (MODIS) مطالعه موردی: پارک ملی گلستان، فصلنامه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲۰(۴)، ۸۱.
- پورشکوری اله ده، فرخ؛ درویش صفت، علی اصغر؛ صمدزادگان، فرهاد؛ عطارد، پدram. (۱۳۹۳). کارایی تصاویر سنجنده‌ی MODIS و الگوریتم جهانی کشف آتش برای شناسایی آتش فعال در جنگل‌های زاگرس. جنگل و فرآورده‌های چوب، ۶۷(۲)، ۲۱۳-۲۰۱.
- پورشکوری اله ده، فرخ؛ درویش صفت، علی اصغر؛ صمدزادگان، فرهاد؛ عطارد، پدram. (۱۳۹۲). صحت‌سنجی محصول آتش سنجنده MODIS در جنگل‌های شمال ایران در سال ۱۳۸۸. همایش ملی ژئوماتیک، ۲۰(۲)، ۹۰-۸۱.
- تارنمای رسمی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۹۹/۰۵/۲۷: ش: ۷۵۹۳۸.
- جانباذ قبادی، غلامرضا. (۱۳۸۹). بررسی مناطق خطر آتش سوزی جنگل در استان گلستان، بر اساس شاخص خطر آتش سوزی (FRSI) با بهره‌گیری از تکنیک (GIS). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۶(۳)، ۱۰۲-۸۹.
- حسینیان، الهه؛ وظیفه دوست، مجید. (۱۳۹۲). شناسایی مناطق دارای پتانسیل آتش در جنگل‌های استان گیلان با استفاده از تصاویر سنجنده (MODIS) مطالعه موردی: شهرستان شفت. همایش ملی ژئوماتیک، ۱۳۹۲.
- زرع کار، آزاده؛ کاظمی زمانی، بهاره؛ قربانی، ساره؛ عاشق معلا، مریم؛ جعفری، حمیدرضا. (۱۳۹۲). تهیه نقشه پراکندگی فضایی خطر آتش سوزی جنگل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سه حوزه جنگلی در استان گیلان)، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱(۲)، ۲۱۸-۲۳۰.
- عزیزی، معصومه؛ پوررضا، مرتضی؛ خسروی، محمد. (۱۳۹۹). تغییرات زمانی و مکانی رخداد‌های آتش سوزی در عرصه‌های طبیعی استان کرمانشاه و ارتباط آن با عوامل محیطی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته علوم مهندسی جنگل، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- غلام رضایی، اشکان؛ پوررضا، مرتضی؛ خسروی، محمد. (۱۳۹۹). تغییرات زمانی و مکانی گستره‌های آتش سوزی در اکوسیستم جنگل‌های زاگرس (استان کرمانشاه)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته علوم مهندسی جنگل، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- فرج زاده اصل، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مکرری، ساحل. (۱۳۹۴). تجزیه و تحلیل آتش سوزی جنگل با منشا آب‌وهوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۳)، ۱۰۴-۸۳.

- گراوند، سودابه؛ یارعلی، نبی‌الله؛ صادقی کاجی، حمدالله. (۱۳۹۲). الگوی مکانی و نقشه خطر وقوع آتش‌سوزی در اراضی طبیعی استان لرستان. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱(۲)، ۲۳۱-۲۴۲.
- 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)، ۵۶۹-۵۸۶.
- محمدی، حسین؛ یلمه، اسماعیل. (۱۳۹۲). تحلیل آماری - همدیدی آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان (مطالعه موردی: روزهای ۲۵ آذر و ۱۸ بهمن سال ۱۳۸۴). پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۳۹۲(۱۵)، ۶۳-۸۰.
- مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۳۹۹). علل، آثار، چالش‌ها و راهکارهای مقابله با آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع کشور، گزارش کارشناسی با شماره ۱۷۲۸۸، تهران.
- نبی پور، نسرین؛ بذرافشان، جواد؛ قهرمان، نوذر. (۱۳۹۴). بررسی رابطه بین خشکسالی و آتش‌سوزی‌های جنگلی در استان گلستان، مازندران و گیلان. کنفرانس بین‌المللی توسعه با محوریت کشاورزی، محیط زیست و گردشگری، تبریز.
- Belcher, C. M., Yearsley, J. M., Hadden, R. M., McElwain, J. C., & Rein, G. (2010). Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems is estimated from paleo atmospheric oxygen over the past 350 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52), 22448-22453.
- Berenguer, E., Carvalho, N., Anderson, L. O., Aragão, L. E., França, F., & Barlow, J. (2021). Improving the spatial-temporal analysis of Amazonian fires. *Global Change Biology*, 27(3), 469-471.
- Bonazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P., & Passas, N. (2007). A decision support system for managing forest fire casualties. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 412-418.
- Bubb, I. E., & Williams, Z. B. (2022). Spatial and temporal patterns of fire on Saipan, CNMI. *Pacific Science*, 76(1), 1-15.
- Cardil, A., Eastaugh, C. S., & Molina, D. M. (2015). Extreme temperature conditions and wildland fires in Spain. *Theoretical and applied climatology*, 122(1), 219-228.
- Chen, Z., Zhu, J., & Zhou, M. (2015). How does a servant leader fuel the service fire? A multilevel model of servant leadership, individual self-identity, group competition climate, and customer service performance. *Journal of applied psychology*, 100(2), 511.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203), 371.
- Countryman, C. M. (1972). The fire environment concept. USDA forest service, pacific southwest forest, and range experiment station. General Technical Report PSW, 7, 12.
- Giglio, L., Csizsar, I., & Justice, C. O. (2006). Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 111(G2).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote sensing of environment*, 87(2-3), 273-282.
- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection of 6 MODIS active fire detection algorithms and fire products. *Remote sensing of environment*, 178, 31-41.
- Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. (2017). The fire in the Mediterranean region: a case study of forest fires in Portugal. *Mediterranean Identities-Environment, Society, Culture*; Fuerst-Bielis, B., Ed, 305-335.
- Hawbaker, T. J., Radeloff, V. C., Syphard, A. D., Zhu, Z., & Stewart, S. I. (2008). Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2656-2664.
- Humber, M. L., Boschetti, L., Giglio, L., & Justice, C. O. (2019). Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. *International journal of digital earth*, 12(4), 460-484.
- Khanal, S. (2015). Wildfire trends in Nepal based on MODIS burnt-area data. *Banko Janakari*, 25(1), 76-79.
- Kirdyanov, A. V., Saurer, M., Siegwolf, R., Knorre, A. A., Prokushkin, A. S., Churakova, O. V., ... & Büntgen, U. (2020). Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034061.
- Kuter, N., & Kuter, S. (2018). Investigation of wildfires at forested landscapes: a novel contribution to nonparametric density mapping at a regional scale. *Appl Ecol Environ Res*, 16(4), 4701-4716.
- Li, S., & Banerjee, T. (2021). Spatial and temporal pattern of wildfires in California from 2000 to 2019. *Scientific reports*, 11(1), 1-17.
- Marín, P. G., Julio, C. J., Dante Arturo, R. T., & Daniel Jose, V. N. (2018). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25-37.
- McLemore, sh. (2017). Spatio-Temporal Analysis of Wildfire Incidence in the State of Florida, Master of Science thesis, Geographic Information Science and Technology, Faculty of the USC Graduate School, University of Southern California, 92p.

- Nunes, A. N., Lourenço, L., & Meira, A. C. (2016). Exploring spatial patterns and drivers of forest fires in Portugal (1980-2014). *Science of the Total Environment*, 573, 1190-1202.
- Pereira, M., Parente, J., & Tonini, M. (2022). Spatial and temporal characterization of wildfires, human and biophysical factors in Portugal (No. EGU22-9277). Copernicus Meetings.
- Philip, S. (2007, March). Active fire detection using remote sensing based polar-orbiting and geostationary observations: an approach towards near real-time fire monitoring. ITC.
- Qu, J. J., Wang, W., Dasgupta, S., & Hao, X. (2008). Active fire monitoring and fire danger potential detection from space: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 2(4), 479-486.
- Renard Q, Pe lissier R, Ramesh BR, Kodandapani N (2012) Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. *International Journal of Wildland Fire* 21, 368–379. doi:10.1071/WF10109
- San-Miguel-Ayanz, J., Rodrigues, M., Oliveira, S. S. D., Pacheco, C. K., Moreira, F., Duguy, B., & Camia, A. (2012). Land cover change and fire regime in the European Mediterranean region. In *Post-fire management and restoration of southern European forests* (pp. 21-43). Springer, Dordrecht.
- Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G., & Petrosillo, I. (2016). GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of environmental management*, 168, 94-103.
- Syphard, A. D., Radeloff, V. C., Keuler, N. S., Taylor, R. S., Hawbaker, T. J., Stewart, S. I., & Clayton, M. K. (2008). Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5), 602-613.
- Valente, F., & Laurini, M. (2021). Spatio-temporal analysis of fire occurrence in Australia. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(9), 1759-1770.
- Venäläinen, A., Korhonen, N., Hyvärinen, O., Koutsias, N., Xystrakis, F., Urbietá, I. R., & Moreno, J. M. (2014). Temporal variations and change in forest fire danger in Europe for 1960–2012. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1477-1490.
- Wang, W., Qu, J. J., Hao, X., Liu, Y., & Sommers, W. T. (2007). An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States. *Remote sensing of Environment*, 108(2), 163-170.
- Wang, X., Parisien, M. A., Taylor, S. W., Candau, J. N., Stralberg, D., Marshall, G. A., ... & Flannigan, M. D. (2017). Projected changes in daily fire spread across Canada over the next century. *Environmental Research Letters*, 12(2), 025005.
- Wang, Y., Xu, Z., & Zhou, Q. (2014). Impact of fire on soil gross nitrogen transformations in forest ecosystems. *Journal of Soils and Sediments*, 14(6), 1030-1040.
- Ward, M., Tulloch, A. I., Radford, J. Q., Williams, B. A., Reside, A. E., Macdonald, S. L., ... & Watson, J. E. (2020). Impact of 2019–2020 mega-fires on Australian fauna habitat. *Nature Ecology & Evolution*, 4(10), 1321-1326.
- Wu, S. (2021). The Temporal-Spatial Distribution and Information-Diffusion-Based Risk Assessment of Forest Fires in China. *Sustainability*, 13(24), 13859.
- Ye, T., Wang, Y., Guo, Z., & Li, Y. (2017). Factor contribution to fire occurrence, size, and burn probability in a subtropical coniferous forest in East China. *PLoS one*, 12(2), e0172110.
- Zhu, Q., Liu, Y., Jia, R., Hua, S., Shao, T., & Wang, B. (2018). A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on the air pollution over Asia. *Atmospheric Environment*, 182, 263-274.

References

References (in Persian)

- Ahmadzadeh, Behrouz, Fegghi, Jahangir, Shirvany, Anoushirvan. (2019). Forest Fire Risk Zoning and Prevention and Fire Fighting Planning in Arasbaran Forest, A thesis submitted to the Graduate Studies Office in partial fulfillment of the requirements for the degree of M.Sc in forestry, University College of Agriculture & Natural Resources. [In Persian]
- Akbarzadeh, J. (2013). Comparison and evaluation of common fire detection methods and the effect of temperature and humidity on the accuracy of detection of fixed points of fire by MODIS sensor. Master Thesis, Surveying Civil Engineering, Photogrammetric, Faculty of Surveying Engineering (Geodesy and Geomatics), Khajeh Nasir al-Din Tusi University of Technology. [In Persian]
- Azizi, M. (2021). Temporal and spatial changes of fire events in natural areas of Kermanshah province and its relationship with environmental factors, Master Thesis, Department of Forest Engineering, Razi University of Kermanshah. [In Persian]
- Biranvand A., Babaei Kafaki, S., Kiadaliri, H. (2011). Investigation of the effect of ecological factors on the development of fires in forest ecosystems (Case study: Kaka Reza-Lorestan). *Renewable Natural Resources Research*, 2(2): 13-1. [In Persian]
- Ebrahimi, H., Rasuly, A., Mokhtari, D. (2018). Analyzing Fire Susceptibility and its Driving Factors Using Maximum Entropy Model (Case Study: Forest and Rangeland of East Azerbaijan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(1), 57-73. [In Persian]
- Emami, H., Shahriyari, H. (2020). Quantifying environmental and human factors affecting the occurrence and spread of wildfires using RS and GIS methods protected area of Arasbaran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 35-53. [In Persian]
- Eskandari, S. (2015). Investigation of the relationship between climate change and fire in the forests of Golestan Province. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 13(1), 1-10. [In Persian]
- Eskandari, S., Jalilvand, H. (2017). Effect of weather changes on fire regime of Neka and Behshahr forests. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 15(1), 30-39. [In Persian]
- Farajzadeh M, Ghavidel Rahimi Y, Mokri S. The Analysis of Forest Fires with Climatic Approach Using Satellite Data in Alborz Area_ Iran. *jsaeh*. 2015; 2 (3) :83-104. [In Persian]
- Garavand, S., Yaralli, N., Sadeghi, H. (2013). Spatial pattern and mapping fire risk occurrence at natural lands of Lorestan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(2), 231-242. [In Persian]
- Ghulam Rezaei, A. (2021). Temporal and spatial changes of fire areas in Zagros Forest ecosystem (Kermanshah province), Master Thesis, Forest Engineering, Razi University of Kermanshah. [In Persian]
- Islamic Consultative Assembly Research Center (2020). Causes, effects, challenges, and strategies to deal with forest and rangeland fires, expert report No. 17288, Tehran. [In Persian]
- Janbaz Ghobadi, Gh (2011). Survey of forest fire risk areas in Golestan province, based on fire risk index (FRSI) using the technique (GIS). *Spatial Analysis of Autumn Environmental Hazards*, 6(3): 102-89. [In Persian]
- Mohammadi, F., Shabaniyan, N., Pourhashemi, H., Fatehi, P. (2010). Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(4), 586-569. [In Persian]
- Mohammadi, H.; Yalme, A (2013). Statistical and Synoptic Analysis of Forest Fire in Golestan Province (Case Study: 16 December 2005 and 9 March 2006), *Journal of Climate Research*, 4(15), 63-80. [In Persian]
- Nabipour, Nasrin; Bazrafshan, Javad; Hero, Nozar. (2015). Investigating the relationship between drought and forest fires in Golestan, Mazandaran, and Gilan provinces. *International Development Conference focusing on Agriculture, Environment and Tourism, Tabriz*. [In Persian]
- Porshkouri Allahdeh, Farrokh; Darvish Sefat, Ali Asghar; Samadzadegan, Farhad; Mercury, Pedram. (2013). Validation of MODIS fire meter product in the forests of northern Iran in 2009. *National Geomatics Conference*, 20 (2), 90-81. [In Persian]
- Pourshakouri Allahdeh, F, Darvishsefat, A, Samadzadegan, F, Attarod, P. (2014). The potential of MODIS Images and Contextual Algorithm for Active Fire Detection in the Zagros Forests, West of Iran. *Forest and Wood Products*, 67(2), 201-213. [In Persian]
- Pourshakouri, F., Darvishsefat, A., Samadzadegan, F., Attarod, P., Selyari, J. (2014). Assessment of active fire detection algorithm for fire detection in natural resources using MODIS images (case study: Golestan national park). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 20(4), 81-97. [In Persian]
- The official website of the Forests, Range and Watershed Management Organization, 2020/08/17, p: 75938. [In Persian]
- Zarekar, A., Kazemi Zamani, B., Ghorbani, S., Ashegh Moalla, M., Jafari, H. (2013). Mapping Spatial Distribution of Forest Fire using MCDM and GIS (Case Study: Three Forest Zones in Guilan Province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(2), 218-230. [In Persian]
- Hosseinian, elah; vazifedoust, Majid. (2012). Identification of fire potential areas in the forests of Gilan province using sensor images (MODIS) case study: Shaft city. *National Geomatics Conference*, 2012. [In Persian]

References (in English)

- Belcher, C. M., Yearsley, J. M., Hadden, R. M., McElwain, J. C., & Rein, G. (2010). Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems is estimated from paleo atmospheric oxygen over the past 350 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52), 22448-22453.
- Berenguer, E., Carvalho, N., Anderson, L. O., Aragão, L. E., França, F., & Barlow, J. (2021). Improving the spatial-temporal analysis of Amazonian fires. *Global Change Biology*, 27(3), 469-471.
- Bonazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P., & Passas, N. (2007). A decision support system for managing forest fire casualties. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 412-418.
- Bubb, I. E., & Williams, Z. B. (2022). Spatial and temporal patterns of fire on Saipan, CNMI. *Pacific Science*, 76(1), 1-15.
- Cardil, A., Eastaugh, C. S., & Molina, D. M. (2015). Extreme temperature conditions and wildland fires in Spain. *Theoretical and applied climatology*, 122(1), 219-228.
- Chen, Z., Zhu, J., & Zhou, M. (2015). How does a servant leader fuel the service fire? A multilevel model of servant leadership, individual self-identity, group competition climate, and customer service performance. *Journal of applied psychology*, 100(2), 511.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203), 371.
- Countryman, C. M. (1972). The fire environment concept. USDA forest service, pacific southwest forest, and range experiment station. *General Technical Report PSW*, 7, 12.
- Giglio, L., Csizsar, I., & Justice, C. O. (2006). Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 111(G2).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote sensing of environment*, 87(2-3), 273-282.
- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection of 6 MODIS active fire detection algorithms and fire products. *Remote sensing of environment*, 178, 31-41.
- Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. (2017). The fire in the Mediterranean region: a case study of forest fires in Portugal. *Mediterranean Identities-Environment, Society, Culture*; Fuerst-Bielis, B., Ed, 305-335.
- Hawbaker, T. J., Radeloff, V. C., Syphard, A. D., Zhu, Z., & Stewart, S. I. (2008). Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2656-2664.
- Humber, M. L., Boschetti, L., Giglio, L., & Justice, C. O. (2019). Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. *International journal of digital earth*, 12(4), 460-484.
- Khanal, S. (2015). Wildfire trends in Nepal based on MODIS burnt-area data. *Banko Janakari*, 25(1), 76-79.
- Kiryanov, A. V., Saurer, M., Siegwolf, R., Knorre, A. A., Prokushkin, A. S., Churakova, O. V., ... & Büntgen, U. (2020). Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034061.
- Kuter, N., & Kuter, S. (2018). Investigation of wildfires at forested landscapes: a novel contribution to nonparametric density mapping at a regional scale. *Appl Ecol Environ Res*, 16(4), 4701-4716.
- Li, S., & Banerjee, T. (2021). Spatial and temporal pattern of wildfires in California from 2000 to 2019. *Scientific reports*, 11(1), 1-17.
- Marín, P. G., Julio, C. J., Dante Arturo, R. T., & Daniel Jose, V. N. (2018). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25-37.
- McLemore, sh. (2017). Spatio-Temporal Analysis of Wildfire Incidence in the State of Florida, Master of Science thesis, Geographic Information Science and Technology, Faculty of the USC Graduate School, University of Southern California, 92p.
- Nunes, A. N., Lourenço, L., & Meira, A. C. (2016). Exploring spatial patterns and drivers of forest fires in Portugal (1980-2014). *Science of the Total Environment*, 573, 1190-1202.
- Pereira, M., Parente, J., & Tonini, M. (2022). Spatial and temporal characterization of wildfires, human and biophysical factors in Portugal (No. EGU22-9277). *Copernicus Meetings*.
- Philip, S. (2007, March). Active fire detection using remote sensing based polar-orbiting and geostationary observations: an approach towards near real-time fire monitoring. *ITC*.
- Qu, J. J., Wang, W., Dasgupta, S., & Hao, X. (2008). Active fire monitoring and fire danger potential detection from space: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 2(4), 479-486.
- Renard Q, Pe'lissier R, Ramesh BR, Kodandapani N (2012) Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. *International Journal of Wildland Fire* 21, 368-379. doi:10.1071/WF10109
- San-Miguel-Ayanz, J., Rodrigues, M., Oliveira, S. S. D., Pacheco, C. K., Moreira, F., Duguy, B., & Camia, A. (2012). Land cover change and fire regime in the European Mediterranean region. In *Post-fire management and restoration of southern European forests* (pp. 21-43). Springer, Dordrecht.
- Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G., & Petrosillo, I. (2016). GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of environmental management*, 168, 94-103.

- Syphard, A. D., Radeloff, V. C., Keuler, N. S., Taylor, R. S., Hawbaker, T. J., Stewart, S. I., & Clayton, M. K. (2008). Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5), 602-613.
- Valente, F., & Laurini, M. (2021). Spatio-temporal analysis of fire occurrence in Australia. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(9), 1759-1770.
- Venäläinen, A., Korhonen, N., Hyvärinen, O., Koutsias, N., Xystrakis, F., Urbietta, I. R., & Moreno, J. M. (2014). Temporal variations and change in forest fire danger in Europe for 1960–2012. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1477-1490.
- Wang, W., Qu, J. J., Hao, X., Liu, Y., & Sommers, W. T. (2007). An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States. *Remote sensing of Environment*, 108(2), 163-170.
- Wang, X., Parisien, M. A., Taylor, S. W., Candau, J. N., Stralberg, D., Marshall, G. A., ... & Flannigan, M. D. (2017). Projected changes in daily fire spread across Canada over the next century. *Environmental Research Letters*, 12(2), 025005.
- Wang, Y., Xu, Z., & Zhou, Q. (2014). Impact of fire on soil gross nitrogen transformations in forest ecosystems. *Journal of Soils and Sediments*, 14(6), 1030-1040.
- Ward, M., Tulloch, A. I., Radford, J. Q., Williams, B. A., Reside, A. E., Macdonald, S. L., ... & Watson, J. E. (2020). Impact of 2019–2020 mega-fires on Australian fauna habitat. *Nature Ecology & Evolution*, 4(10), 1321-1326.
- Wu, S. (2021). The Temporal-Spatial Distribution and Information-Diffusion-Based Risk Assessment of Forest Fires in China. *Sustainability*, 13(24), 13859.
- Ye, T., Wang, Y., Guo, Z., & Li, Y. (2017). Factor contribution to fire occurrence, size, and burn probability in a subtropical coniferous forest in East China. *PloS one*, 12(2), e0172110.
- Zhu, Q., Liu, Y., Jia, R., Hua, S., Shao, T., & Wang, B. (2018). A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on the air pollution over Asia. *Atmospheric Environment*, 182, 263-274.

