

## Seasonal assessment of fire weather index (FWI) in the forest regions of Iran using an ensemble of ECMWF-ERA5

Shojaeizadeh, K.<sup>1</sup>  | Ahmadi, M.<sup>1</sup>  | Dadashi-Roudbari, A. A.<sup>2</sup> 

1. Department of Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2. Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: [ma\\_ahmadi@sbu.ac.ir](mailto:ma_ahmadi@sbu.ac.ir)

(Received: 31 Jan 2023, Revised: 4 March 2023, Accepted: 2 May 2023, Published online: 15 Nov 2023)

### Summary

Since one of the important steps in the management of natural areas is to know when and where the wildfire is more likely to occur or where it has a more negative effect, examining and preparing a fire risk map of sensitive and high-risk areas is crucial. In terms of wildfires, this is one of the main necessities in wildfire control and management. Wildfire risk indicators can be very useful for predicting areas with wildfire risk potential. One of the most widely used wildfire risk indices is the Forest service fire Weather Index (FWI), which has been based on the Canadian forest service fire risk rating system since 1971.

In order to evaluate the effectiveness of FWI indicators in identifying wildfire-prone areas in the vegetation areas of Iran from the climate variables of temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation of 53 meteorological stations were monitored on a daily basis for the period of 1981-2020. In order to analyze the climate of the vegetation areas under investigation, combined satellite product of burned areas and FWI indices during the period (1981-2020) were used. After downloading and an initial processing, the examined indicators were co-located for the border of Iran. Then, their time series was analyzed, using zonal statistics. Then the area-averaged of each of Iran's forest regions was calculated, and their seasonal maps were prepared by the kriging interpolation method. Finally, the Pearson correlation coefficient method was used to determine the relationship and correlation between FWI indices and burned areas.

The results of the analysis of the combined satellite product of the burned areas showed that the maximum extent of wildfire in the forest regions of Iran is related to the summer season. In this season, a large part of the country's forests, especially in the forest regions of Arsbaran, that has the occurrence of wildfires, and the minimum amount of wildfire was related to the spring season, which was observed in a limited area in the southwest of Iran. The values of atmospheric fire indicators vary according to the different characteristics of forest regions such as vegetation, topography, and climate. The drier parts of the south, east, and southeast of Iran mainly have the highest values of FWI indices, which shows that the increase in temperature and drought affects the moisture content and, as a result, increases the occurrence and spread of fire. The FWI indices in spring for all forest regions of Iran have a high efficiency for identifying areas with wildfire occurrences. Also, in the hot season of the year, when most wildfires occur in the vegetation areas of Iran, FFMC and FWI indices had the best performances.

According to the climate variability and topography of Iran's forests, it is difficult to control the occurrence of fire. Hence identifying wildfire critical areas, and determining and preparing a map of fire-risk areas is an effective step in helping forest managers to plan and manage high-risk areas in terms of fire. In addition to this, wildfire atmospheric indices obtained with high horizontal resolution can help better understand the spatiotemporal variability of fire risk, especially in Iran with its complex and diverse topography.

**Keywords:** Fire risk index, Fire occurrence, Drought code, Fine fuel moisture code.

Cite this article: Shojaeizadeh, K., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). Seasonal assessment of fire weather index (FWI) in the forest regions of Iran using an ensemble of ECMWF-ERA5. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 781-798. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.354513.1007500>

E-mail: (1) [k\\_shojaeizadeh@sbu.ac.ir](mailto:k_shojaeizadeh@sbu.ac.ir) (2) [a-dadashi@um.ac.ir](mailto:a-dadashi@um.ac.ir)



# ارزیابی فصلی شاخص‌های جوی آتش‌سوزی (FWI) جنگل در نواحی رویشی ایران با کاربست پرونداد همادی ECMWF-ERA5

کبری شجاعی‌زاده<sup>۱</sup> | محمود احمدی<sup>۱</sup> | عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [ma\\_ahmadi@sbu.ac.ir](mailto:ma_ahmadi@sbu.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۲/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

## چکیده

روند آتش‌سوزی جنگل در سال‌های اخیر از نظر تعداد و همچنین مساحت در عرصه‌های طبیعی ایران افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. لذا تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی مناطق آسیب‌پذیر و تعیین نواحی با ریسک بالای آتش‌سوزی لازم و ضروری است. هدف از این پژوهش ارزیابی و مقایسه محصولات همادی آتش‌سوزی جوی FWI منتج‌شده از پایگاه ECMWF-ERA5 در نواحی رویشی ایران است. برای دستیابی به این هدف از محصول ترکیبی ماهواره‌ای مناطق سوخته‌شده (FireCCI 5.1.1) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰ و شاخص‌های DC، DMC، FFMC، BUI، ISI و FWI با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی طی دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۸۱) استفاده شده است. نتایج نشان داد، آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران فصلی بوده و بیشتر در فصل تابستان و سپس پاییز رخ می‌دهد. بیشترین سطح سوخته‌شده فصل تابستان و پاییز به ترتیب مربوط به ارسباران با ۱۰۲ هکتار و زاگرس و ۱۸/۱ هکتار است. پایین‌ترین سطح سوخته‌شده نیز در ناحیه ایرانی-تورانی مشاهده شد. بر اساس شاخص‌های رطوبتی DC، DMC و FFMC کاهش رطوبت مواد سوختنی ناشی از افزایش دما و کاهش بارش در تمامی نواحی رویشی ایران به‌ویژه در فصل پاییز و تابستان مشاهده می‌شود. شاخص DC دارای بالاترین مقادیر در بین شاخص‌های رطوبتی است به گونه‌ای که مقادیر آن از ۳۵۸/۷ تا ۱۲۲۱/۷ به ترتیب در ناحیه رویشی ارسباران تا خلیج-عمانی متغیر است. شاخص‌های رفتار و گسترش آتش‌سوزی شامل BUI، ISI و FWI در شناسایی مناطق دارای خطر آتش‌سوزی کارایی مناسبی در فصل بهار داشتند. شاخص DMC با ۰/۸۰ بالاترین همبستگی را با مناطق سوخته‌شده نشان داد.

واژه‌های کلیدی: شاخص خطر آتش‌سوزی، رخداد آتش‌سوزی، کد خشکسالی، مواد سوختنی.

## ۱. مقدمه

مشخصه‌های طبیعی محل؛ ۵-پوشش جنگل و ۶-دما در رخداد آتش‌سوزی جنگل نقش دارند. سه متغیر از شش متغیر نامبرده مستقیماً با اقلیم و تغییرات آن در ارتباط هستند. همچنین عامل چهارم نیز به شکل مستقیم توسط جغرافیای محیط تعیین می‌شود. لذا اقلیم و بی‌هنجاری‌های آن، نقش اصلی را در رخداد و گسترش آتش‌سوزی‌ها دارد (پریرا و همکاران، ۲۰۰۵). به گونه‌ای که منجر به ارائه شاخص‌های خطر آتش‌سوزی متکی به شرایط اقلیمی شده است (گریلاکیس و همکاران، ۲۰۲۲). این شاخص‌ها با کمک

آتش‌سوزی جنگل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل اختلال و تغییر وضعیت جنگل‌ها و مراتع است (پنتیلا و همکاران، ۲۰۱۳). این پدیده در نتیجه برهمکنش پیچیده بین محرک‌های مختلف محیطی و انسانی است که در مقیاس‌های زمانی-مکانی متفاوت عمل می‌کند (آرچیبالد و همکاران، ۲۰۱۳). بسیاری از تغییرات در نحوه گسترش و رفتار آتش‌سوزی با متغیرهای اقلیمی در ارتباط است (چوویکو و همکاران، ۲۰۱۰). شش متغیر مؤثر شامل ۱-مواد سوختنی موجود در جنگل؛ ۲-رطوبت سطحی؛ ۳-سمت و تندی باد؛ ۴-

استناد: شجاعی‌زاده، کبری؛ احمدی، محمود و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۲). ارزیابی فصلی شاخص‌های جوی آتش‌سوزی (FWI) جنگل در نواحی رویشی ایران با کاربرد پرونداد همادی ECMWF-ERA5. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۳)، ۷۸۱-۷۹۸. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.354513.1007500>

رایانامه: (۱) [k\\_shojaeizadeh@sbu.ac.ir](mailto:k_shojaeizadeh@sbu.ac.ir) (۲) [dadashi@um.ac.ir](mailto:dadashi@um.ac.ir)



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349992.1007463>

گرفتن عوامل مؤثر بر رخداد و گسترش آتش‌سوزی، به‌شکل کمی و در سطوح مختلف خطر رخداد آتش‌سوزی را نشان می‌دهند. از دیگر شاخص‌های پایش و پیش‌بینی آتش‌سوزی می‌توان به شاخص خطر آتش‌سوزی سامانه رتبه‌ای نسخه ۵ مک آرتور استرالیا (AMM5RS Australian McArthur) (Mark 5 Rating System) (بلانچی و همکاران، ۲۰۱۴) و سامانه رتبه‌ای خطر آتش‌سوزی سامانه ملی جنگل‌های ایالات متحده آمریکا (U.S.FSNFDRS U.S. Forest Service) (National Fire-Danger Rating System) (تیلور و الکساندر، ۲۰۰۶) اشاره کرد.

آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع یکی از مهم‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی مناطق مختلف ایران است. روند آتش‌سوزی‌ها طی دو دهه گذشته در ایران نشان می‌دهد که به‌طور متوسط هر ساله به‌ویژه با فرارسیدن ماه‌های گرم، بیش از ۱۰۰۰ فقره رخداد آتش‌سوزی صرفاً در جنگل‌ها رخ داده و نزدیک به ۳۵۰۰ هکتار از عرصه‌های جنگلی از بین می‌رود (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۹). آنچه در مورد مناطق رویشی ایران حائز اهمیت است، جلوگیری از روند تخریب کمی و کیفی این عرصه‌ها است که در سال‌های اخیر روندی افزایش داشته است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹). به‌دلیل کمبود امکانات مهار آتش‌سوزی، صعب‌العبور بودن مناطق جنگلی، کمبود شبکه جاده‌های ارتباطی داخل جنگل به‌منظور دسترسی سریع و قرارگیری ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق شهری شناسایی مناطق پرخطر از نظر رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران با دشواری مواجه است.

به‌دلیل اهمیت رخداد آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع پژوهش‌های بسیاری در سطح جهانی انجام شده است که این پژوهش‌ها بسته به نوع هدف و داده در دسترس، در دسته‌های مختلفی قرار می‌گیرند. همان‌طور که پیش‌تر نیز بحث شده است یکی از شاخص‌های پرکاربرد در بررسی رخداد آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع شاخص FWI است. مطالعات نشان

متغیرهای اولیه‌ای همانند متغیرهای هواشناسی و اطلاعات مربوط به سوخت، خروجی‌های قابل‌اطمینانی جهت شناسایی نواحی مستعد آتش‌سوزی و پیش‌بینی تغییرات زمانی-مکانی رخدادهای آتش‌سوزی ارائه می‌دهند (دودی و همکاران، ۲۰۰۹) و تا زمانی که بتوان از این شاخص‌ها برای پیش‌بینی شرایط بالقوه آتش‌سوزی استفاده کرد، از کارایی بالایی برخوردار هستند (لیتل و همکاران، ۲۰۰۹).

یکی از گام‌های مهم در راستای مدیریت عرصه‌های طبیعی آگاهی از رخداد آتش‌سوزی است. رخداد این پدیده تابع زمان و مکان بوده و بر این اساس شناخت دقیق مناطق با احتمال رخداد بیشتر آتش‌سوزی دارای اهمیت بسیار زیادی است. لذا بررسی و تهیه نقشه خطر آتش‌سوزی مناطق حساس و پرخطر در کنترل و مدیریت این پدیده ضروری است (چوویکو و همکاران، ۲۰۱۰). شاخص‌های خطر آتش‌سوزی جنگل در پایش و پیش‌بینی مناطق مستعد می‌توانند بسیار کاربردی و دارای اهمیت باشند. برخی از این شاخص‌ها متغیرهای دما و رطوبت را ترکیب می‌کنند (شارپلز و همکاران، ۲۰۰۹)، در حالی که برخی دیگر رخداد و شدت آتش‌سوزی را برآورد می‌کنند (ون‌واگنر و پیکت، ۱۹۸۵).

یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خطر آتش‌سوزی، شاخص اقلیمی آتش‌سوزی کانادا (FWI Fire Weather Index) است که از سال ۱۹۷۱ بر اساس سامانه رتبه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های کانادا ارائه شده است (ون‌واگنر و پیکت، ۱۹۸۵). در حال حاضر مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جو اروپایی (The European Centre for Medium-Range) ECMWF (Weather Forecasts) شاخص FWI را تحت‌عنوان مدل خطر آتش‌سوزی جهانی برای سامانه اطلاعات آتش‌سوزی جنگل اروپا (European Forest Fire Information) EFFIS (System) ارائه داده است. این شاخص، خطر آتش‌سوزی را از نظر اشتعال و رفتار آتش‌سوزی، آزادشدن انرژی و سرعت گسترش آن بررسی می‌کند (سان میگل آیازو و همکاران، ۲۰۰۳). در واقع شاخص‌های خطر آتش‌سوزی با در نظر

ایران انجام شده است اما تاکنون در زمینه شاخص‌های جهانی آتش‌سوزی که بر پایه داده‌های بازتحلیل هستند پژوهش مستقلی در ایران انجام نشده است. با توجه به این که بیشتر مطالعات انجام‌شده در ایران به یک منطقه به‌خصوص جغرافیایی توجه کردند و لذا یک رویکرد همه‌جانبه‌نگر در این زمینه ضروری است و لزوم انجام این تحقیق بیش از پیش احساس می‌شود.

در ایران روند آتش‌سوزی‌ها در سال‌های اخیر به‌خصوص از نظر فراوانی و گستره مناطق سوخته‌شده نسبت به گذشته افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده است (اسکندری و اسکندری، ۱۴۰۰). از طرفی الگوی آتش‌سوزی‌ها در مناطق مختلف ایران با وجود دشت‌ها، ارتفاعات و اقلیم‌های متنوع، متفاوت است. به‌گونه‌ای که برخلاف انتظار و شرایط عادی که آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران (هیرکانی) فقط در فصل پاییز رخ می‌داد، در سال‌های اخیر در فصل بهار و تابستان نیز رخداد آتش‌سوزی در این پهنه رویشی مشاهده شده است (شیخی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین علاوه بر تغییر الگوی زمانی آتش‌سوزی‌ها، شدت آتش‌سوزی نیز تغییر کرده است که عوامل متعددی در این تغییر الگو و شدت تأثیر دارند (تیوکاوینا و همکاران، ۲۰۲۲). لذا ارزیابی و برآورد احتمال خطر آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران، بررسی تغییرات زمانی-مکانی و نقش متغیرهای اقلیمی مؤثر در رخداد آن از اهداف این پژوهش می‌باشد.

## ۲. داده و روش تحقیق

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش نواحی رویشی ایران است. ایران به جهت اقلیمی کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. خشکی ذاتی اقلیم ایران نقشی مؤثر در پوشش گیاهی آن داشته است. به‌طوری‌که مرز پهنه‌های رویشی ایران را می‌توان عموماً

داده است که این شاخص در سایر مناطق جهان مانند نیوزلند (بریگر و همکاران، ۲۰۰۵)، مدیترانه (دیمیتراکوپولوس و همکاران، ۲۰۱۱)، یونان (کارالی و همکاران، ۲۰۱۴)، مالزی و اندونزی (گروت و همکاران، ۲۰۰۷) نتایج قابل‌قبولی ارائه داده و به‌عنوان مبنایی برای یک سامانه هشدار اولیه جهانی در آتش‌سوزی‌ها پیشنهاد شده است. همچنین این شاخص از اهمیت بسیار بالایی در بین شاخص‌های در دسترس آتش‌سوزی جنگل برخوردار است. به‌طوری‌که از این شاخص در مطالعات مختلفی در جنگل‌ها و مراتع مناطق مختلف جهان همانند جنگل‌های کانادا (آمیرو و همکاران، ۲۰۰۴)، مدیترانه شرقی (دیمیتراکوپولوس و همکاران، ۲۰۱۱)، شبه‌جزیره ایبری (بدیا و همکاران، ۲۰۱۲)، یونان (وارلا و همکاران، ۲۰۱۸)، در سطح جهانی (دی‌جوزپه و همکاران، ۲۰۲۰) و شبه‌جزیره ایبری (کالهیرس و همکاران، ۲۰۲۱) استفاده شده است و کارایی آن مورد تأیید قرار گرفته است.

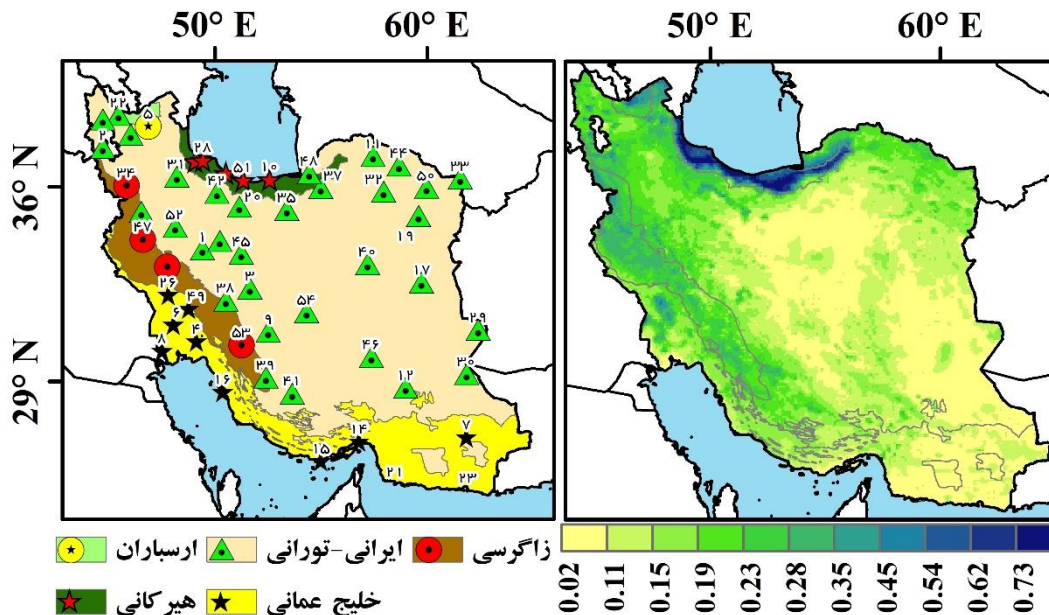
در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی به بررسی رخداد آتش‌سوزی با روش‌های مختلفی پرداخته‌اند. در یکی از این پژوهش‌ها خان‌محمدی و همکاران (۱۳۹۵) به تحلیل خطر آتش‌سوزی جنگل‌های هیرکانی با استفاده از شاخص‌های کچ-بایرام و مک-آرتور پرداختند. نتایج آنها نشان داد شاخص آتش‌سوزی مک-آرتور مناطق پرخطر را به‌خوبی شناسایی کرده است. پهنه‌بندی مناطق مستعد آتش‌سوزی در مناطق جنگلی زاگرس شمالی توسط دشتی و همکاران (۱۴۰۰) انجام شده است. آنها با طبقه‌بندی مناطقی با ریسک رخداد آتش‌سوزی به این نتیجه رسیدند که بیش از ۷ درصد از منطقه در محدوده خطر آتش‌سوزی زیاد قرار دارد. حیدری و همکاران (۱۴۰۰) نیز در پژوهش دیگری مناطق مستعد آتش‌سوزی جنگل‌های زاگرس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ارتفاع، فاصله از آبراهه و درصد شیب، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در آتش‌سوزی جنگل در منطقه بودند. علی‌رغم مطالعات مختلفی که از آتش‌سوزی جنگل در

با پهنه‌های اقلیمی آن مرتبط دانست. بر اساس اطلاعات سازمان جنگل‌ها و مراتع، ایران دارای پنج پهنه رویشی کلان مقیاس شامل ناحیه رویشی هیرکانی، ارسباران، زاگرس، ایرانی-تورانی و خلیج-عمانی است که در مجموع ۱۲/۴ میلیون هکتار وسعت دارند (شکل ۱). علی‌رغم این‌که ایران در مقایسه با سایر نقاط جهان به لحاظ پوشش جنگلی، کشوری فقیر محسوب می‌شود ولی به‌لحاظ تنوع گونه‌ای و گیاهی و ذخایر ژنتیکی در جهان کم‌نظیر است (مودنی و همکاران، ۱۳۹۷).

۳. داده‌های مورد استفاده

۳-۱. داده‌های ایستگاهی هواشناسی همدید

در این پژوهش از متغیرهای اقلیمی دما، رطوبت نسبی، تندی باد و بارش ۵۴ ایستگاه هواشناسی همدید به شکل روزانه با دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۱ به‌منظور تحلیل وضعیت اقلیمی پهنه‌های رویشی مورد بررسی، استفاده شد (شکل ۱). در انتخاب این ایستگاه‌ها، علاوه‌بر پراکنش مناسب در ایران، سعی بر آن بود تا بیشتر از مناطقی، ایستگاه انتخاب شود که تحت‌تأثیر آتش‌سوزی‌های گسترده قرار دارند.



ایستگاه	کد	ایستگاه	کد	ایستگاه	کد	ایستگاه	کد	ایستگاه	کد
مسجد سلیمان	۴۹	شاهرود	۳۷	خوی	۲۵	بندر انزلی	۱۳	اراک	۱
مشهد	۵۰	شهرکرد	۳۸	دزفول	۲۶	بندرعباس	۱۴	ارومیه	۲
نوشهر	۵۱	شیراز	۳۹	رامسر	۲۷	بندرلنگه	۱۵	اصفهان	۳
همدان	۵۲	طیس	۴۰	رشت	۲۸	بوشهر	۱۶	امیدیه	۴
یاسوج	۵۳	فسا	۴۱	زابل	۲۹	بیرجند	۱۷	اهر	۵
یزد	۵۴	قزوین	۴۲	زاهدان	۳۰	تبریز	۱۸	اهواز	۶
		قم	۴۳	زنجان	۳۱	تربت حیدریه	۱۹	ایرانشهر	۷
		قوچان	۴۴	سبزوار	۳۲	تهران	۲۰	آبادان	۸
		کاشان	۴۵	سرخس	۳۳	جاسک	۲۱	آباده	۹
		کرمان	۴۶	سنقر	۳۴	چلقا	۲۲	بابلسر	۱۰
		کرمانشاه	۴۷	سمنان	۳۵	چابهار	۲۳	بجنورد	۱۱
		گرگان	۴۸	سندج	۳۶	خرم‌آباد	۲۴	بیم	۱۲

شکل ۱. شاخص پوشش گیاهی NDVI سنجنده MODIS ماهواره TERRA (الف)، موقعیت جغرافیایی نواحی رویشی ایران (ب). موقعیت ایستگاه‌های همدید مورد استفاده در هر پهنه با نماد منحصربفرد ارائه شده است.

## ۲-۳. محصول ترکیبی ماهواره‌ای مناطق سوخته‌شده

با توجه به این که شاخص‌های خطر آتش‌سوزی احتمال رخداد آتش‌سوزی را بر اساس متغیرهای اقلیمی نشان می‌دهند لذا جهت بررسی درستی و کارایی آنها در این پژوهش مجموعه داده FireCCI 5.1.1 توسعه‌یافته در برنامه CCI (Climate Change Initiative Project) استفاده شده است. این محصول از سنجنده‌هایی با تفکیک افقی متوسط Sentinel-3 OLCI و MODIS-Terra توسعه داده شده است. داده‌های ماهانه این محصول با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی و طول دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ از طریق پایگاه خدمات تغییر اقلیم کوپرنیک استخراج شده است. برای درک بهتر از عرصه‌های سوخته‌شده رویشی در ایران واحد اولیه داده‌های مناطق سوخته‌شده (متر مربع) به هکتار تبدیل شده است.

## ۳-۳. شاخص‌های FWI

شاخص FWI شامل شش مؤلفه است که تأثیر متغیرهای هواشناسی بر رطوبت مواد سوختنی جنگل و رفتار آتش‌سوزی را نشان می‌دهد (وارلا و همکاران، ۲۰۱۸). این شاخص متغیرهای دمای هوا، رطوبت نسبی، بارش و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری را در نظر می‌گیرد (لاوسون و آرمیتج، ۲۰۰۸) تا رطوبت مواد سوختنی را در سه لایه که به ترتیب با سه کد رطوبت FFMC، DMC و DC نشان داده شده‌اند، محاسبه

کند (جدول ۱). کدهای رطوبت سوخت، رتبه‌بندی عددی رطوبت کف جنگل و سایر مواد آلی مرده را نشان می‌دهد که مقادیر آنها با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. این کدها برای تولید شاخص‌های رفتار آتش‌سوزی ISI و BUI استفاده می‌شوند، که نشان‌دهنده نرخ گسترش آتش، سوخت موجود برای احتراق و شدت آتش‌سوزی هستند. در نهایت از ترکیب شاخص‌های ISI و BUI شاخص FWI به دست می‌آید که نشان‌دهنده شدت آتش در حال گسترش است و به‌عنوان یک شاخص کلی و روزانه خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود (بدیا و همکاران، ۲۰۱۲).

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در FWI از مجموعه داده ECMWF-ERA5 به دست آمده است. داده‌های نسل پنجم مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت جو اروپا (ECMWF) موسوم به ERA5 (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰) جدیدترین بازتحلیل از داده‌های اقلیمی در سطح جهانی است. مجموعه داده ERA5 متغیرهای جوی، سطح زمین و اقیانوسی را همراه با عدم قطعیت‌های آنها از ژانویه ۱۹۵۰ تاکنون در اختیار کاربران قرار می‌دهد که بر یک شبکه منظم با تفکیک مکانی ۳۰ کیلومتر و تفکیک زمانی یک ساعته ارائه می‌شود. مجموعه داده ERA5 متغیرهای جوی را در ۱۳۷ تراز فشار مختلف فراهم می‌کند (تارک و همکاران، ۲۰۲۰). طبقات مختلف خطر آتش‌سوزی شاخص‌های FWI در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های جوی آتش‌سوزی مورد استفاده در این مطالعه و متغیرهای ورودی هواشناسی اثر گذار آن.

منبع	متغیر اقلیمی اثرگذار				اختصار	شاخص آتش‌سوزی کانادایی
	T		W	P		
ون واگنر و پیکت (۱۹۸۵)	•	Fine fuel moisture code	•	•	FFMC	Fine fuel moisture code
	•	Duff moisture code		•	DMC	Duff moisture code
	•	Drought Code		•	DC	Drought Code
	•	Initial spread index	•	•	ISI	Initial spread index
	•	Buildup index		•	BUI	Buildup index
	•	Fire weather index	•	•	FWI	Fire weather index

T دمای هوا، H رطوبت نسبی، W تندی باد و P بارش است.

جدول ۲. مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های جوی آتش‌سوزی ون واگنر و پیکت (۱۹۸۵).

FWI	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	شاخص آتش‌سوزی
۱-۰	۰-۸۰/۵	۹-۰	۰-۴۴	۰-۱/۹	۱۲-۰	بسیار پایین
۲-۴	۸۰/۶-۸۵	۱۰-۱۳	۴۵-۷۷	۲-۳/۴	۱۳-۱۸	پایین
۵-۹	۸۵/۱-۸۸/۵	۱۴-۲۳	۷۸-۱۳۰	۳/۵-۵/۸	۱۹-۲۹	متوسط
۱۰-۱۷	۸۸/۶-۹۰/۵	۲۴-۳۹	۱۳۰-۲۰۰	۵/۹-۹/۵	۳۰-۴۶	بالا
۱۸-۳۰	۹۰/۶-۹۳/۵	۷۰-۷۶	۲۰۰-۳۰۰	۹/۶-۱۶	۴۷-۸۰	بسیار بالا
>۳۰	>۹۳/۵	>۷۶	>۳۰۰	>۱۶	>۸۰	بی نهایت

#### ۴. روش‌های مورد استفاده

در این مطالعه به منظور ارزیابی شاخص‌های FWI در شناسایی مناطق مستعد رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران مراحل زیر انجام شده است.

- دانلود شاخص‌های DC، DMC، FFMC، BUI، ISI و FWI از مجموعه محصولات همادی و برش دادن آنها با مرز ایران

- تولید میانگین بلندمدت اقلیمی (۱۹۸۱-۲۰۲۰) از شاخص‌های شش‌گانه مورد بررسی

- درون‌یابی شاخص‌های جوی آتش‌سوزی با استفاده از روش کریجینگ که از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی مبتنی بر مدل‌ها و روابط آماری است (اولیور و وستر، ۱۹۹۰).

- در ادامه برای بررسی ارتباط بین داده‌های ماهواره‌ای مناطق سوخته شده و شاخص‌های DC، DMC، FFMC، BUI، ISI و FWI از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. این ضریب یک روش مبتنی بر آمار پارامتریک است که شدت و جهت رابطه دو متغیر را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین +۱ و -۱ تغییر می‌کند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱). به جهت سادگی این روش و پرتکرار بودن استفاده از آن رابطه مربوطه ارائه نشد.

- جهت ارائه دید کلی از وضعیت پوشش گیاهی نواحی رویشی ایران، از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) مجموعه ۶/۱ سنجنده MODIS محصول (MOD131A3) با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر استفاده شده است.

#### ۵. یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های متفاوت عرصه‌های رویشی ایران (پوشش گیاهی، اقلیم و توپوگرافی) سبب شده است الگوی مکانی و سری زمانی رخدادهای آتش‌سوزی در این نواحی با هم متفاوت باشد. به دلیل تأثیرات متقابل بین پوشش گیاهی و آتش‌سوزی جنگل، نقشه سالانه شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) نواحی رویشی ایران ترسیم و در شکل ۱ ارائه شده است. بیشینه شاخص NDVI در ناحیه رویشی هیرکانی واقع در شمال ایران قرار دارد. موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی و جنس خاک پوشش گیاهی متراکم و متنوعی را در این ناحیه رویشی به وجود آورده است. پس از آن ناحیه رویشی ارسباران در شمال غرب ایران به دلیل شرایط اقلیمی خاص، از پوشش گیاهی بالایی برخوردار است. در واقع عرصه‌های رویشی هیرکانی و ارسباران علی‌رغم وسعت کمتر نسبت به سایر نواحی رویشی ایران از بالاترین تراکم پوشش گیاهی برخوردار هستند. پوشش گیاهی علفی و درختی در ناحیه رویشی زاگرس متأثر از پارامترهای محیطی از قبیل توپوگرافی، عرض جغرافیایی، دما، بارش و همچنین خاک‌های متنوع قابل مشاهده است. دو ناحیه رویشی دیگر ایران شامل نواحی ایرانی-تورانی و خلیج-عمانی با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران قرار گرفتند لذا میزان بارش در این مناطق کم و از طرفی میزان تبخیر نیز بالاتر از میزان بارش‌ها بوده، لذا محیط مناسبی برای رشد گیاهان و پوشش گیاهی فراهم نبوده و بنابراین کاهش مقادیر NDVI در

این عرصه‌های رویشی بیان‌گر فقر پوشش گیاهی است (شکل ۱).

یکی دیگر از عوامل مؤثر در رخداد و گسترش آتش‌سوزی جنگل‌های ایران، متغیرهای اقلیمی است. بررسی متغیرهای اقلیمی دمای هوا، رطوبت نسبی، بارش و تندی باد که اهمیت آنها در فصول و مناطق مختلف، متفاوت است نشان داد، بالاترین میانگین دما در فصل تابستان و سپس در بهار در پهنه رویشی خلیج-عمانی رخ داده است. این ناحیه رویشی بخشی از جنوب غرب و تمام سواحل جنوبی ایران را در بر می‌گیرد که اختلاف دما در فصول مختلف و شب و روز آن زیاد نیست، همچنین زیاد شدن تندی باد و کم شدن رطوبت نسبی به واسطه بارش کم در آن قابل مشاهده است (جدول ۳).

مقایسه میانگین دما بین فصول بهار و پاییز حاکی از اختلاف کم این متغیر بین فصول است. در فصل بهار میانگین بارش از

۱۳۱/۳۶ میلی‌متر در ناحیه رویشی ارسباران تا ۴۱/۶۸ میلی‌متر در ناحیه رویشی خلیج-عمانی متغیر بوده است. همچنین دما در نواحی رویشی ایران از ۲۳/۹۱ تا ۱۱/۴۳ درجه سلسیوس در نوسان است. در فصل پاییز بیشینه مقدار متوسط دمایی در ناحیه رویشی خلیج-عمانی قرار دارد. در سایر نواحی رویشی توزیع و پراکنش شرایط دمایی اختلاف اندکی دارد. به سمت شمال و سواحل دریای خزر (ناحیه رویشی هیرکانی)، سهم بارش‌های پاییزی بیشتر از سایر نواحی رویشی می‌شود. در فصل زمستان نواحی رویشی هیرکانی، ارسباران و زاگرس به دلیل تأثیرپذیری بیشتر از الگوهای غالب زمستانه و وجود پوشش برف از دماهای پایین‌تر و رطوبت نسبی بیشتری برخوردار هستند. کاهش دما در سایر نواحی رویشی ایران در این فصل به دلیل کاهش زاویه تابش خورشید و کاهش طول روز در این موقع از سال است (جدول ۳).

جدول ۳. مقادیر متوسط پهنه‌ای متغیرهای اقلیمی ایران بر اساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید.

متغیر	ایرانی-تورانی	هیرکانی	ارسباران	زاگرس	خلیج-عمانی
زمستان					
دما	۶/۶۷	۶/۳۷	۱/۸۹	۶/۷۸	۱۲/۹۳
تندی باد	۳/۱۹	۱/۶۵	۲/۴۵	۱/۷۸	۱۲/۷۱
بارش	۸۷/۷۱	۱۸۲	۱۱۳/۴۴	۱۶۴/۰۲	۷۹/۹۴
رطوبت نسبی	۵۷/۴۹	۷۶/۱۰	۷۱/۱۷	۶۰/۲۸	۵۴/۰۵
بهار					
دما	۱۸/۰۸	۱۵/۰۶	۱۱/۴۳	۱۶/۴۳	۲۳/۹۱
تندی باد	۳/۳۹	۲/۰۵	۲/۹۶	۲/۲۷	۸/۶۹
بارش	۷۰/۸۰	۱۱۷/۳۳	۱۳۱/۳۶	۱۰۸/۸۳	۴۱/۶۸
رطوبت نسبی	۴۲/۷۰	۹۶/۲۶	۶۱/۳۲	۴۴/۶۸	۴۰/۱۱
تابستان					
دما	۲۷/۹۳	۲۵/۸۶	۲۲/۵۹	۲۵/۰۵	۳۲/۸۰
تندی باد	۳/۳۷	۲/۱	۳/۳	۲/۱۲	۶/۲۶
بارش	۱۴/۳۱	۸۵/۷۲	۵۲/۷۳	۲۰/۹۷	۵/۷۰
رطوبت نسبی	۳۰/۰۷	۶۲/۰۸	۵۰/۲۰	۲۹/۰۶	۳۲/۲۳
پاییز					
دما	۱۶/۹۹	۱۶/۹۷	۱۳/۷۰	۱۴/۶۹	۲۳/۱۴
تندی باد	۲/۱۳	۱/۶۳	۲/۴۶	۱/۶۴	۳/۰۹
بارش	۵۲/۳۸	۲۸۴/۶۶	۱۴۹/۴۸	۹۳/۸۵	۲۵/۵۲
رطوبت نسبی	۴۲/۲۱	۶۹/۸۴	۶۰/۲۳	۴۶/۳۵	۴۰/۷۹
دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس؛ تندی باد بر حسب متر بر ثانیه؛ بارش بر حسب میلی‌متر؛ رطوبت نسبی بر حسب درصد					



امکان رخداد آتش‌سوزی به‌علت عدم وجود پوشش گیاهی مناسب، کم است. شاخص DC توانسته است مناطق مستعد آتش‌سوزی در شمال (جنگل گلستان)، غرب و جنوب غرب ایران را مشخص کند. چراکه هسته‌های بیشینه مناطق سوخته‌شده این فصل در نواحی پرخطر قرار گرفته‌اند (شکل ۳).

از آنجا که عامل تعیین‌کننده در تغییرات شاخص DMC دمای هوا، رطوبت نسبی و بارش است لذا دامنه تغییرات این شاخص در نواحی رویشی مورد پژوهش زیاد است. از طرفی بالا بودن مقادیر شاخص آتش‌سوزی حتماً همراه با آتش‌سوزی نیست حتی زمانی که پتانسیل رخداد آتش‌سوزی وجود داشته باشد. به‌گونه‌ای که نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی از بالاترین آستانه‌ها و پایین‌ترین سطح سوخته‌شده برخوردار هستند. نواحی رویشی ارسباران، هیرکانی و زاگرس که در این فصل جز مناطق بیشینه سطح سوخته‌شده قرار داشتند، دارای پتانسیل آتش‌سوزی متوسطی هستند. شاخص FFMC میزان رطوبت سوخت‌های نرم و سبک را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر این شاخص نواحی رویشی هیرکانی، ارسباران، زاگرس و بخش‌های از پهنه ایرانی-تورانی در شمال غرب ایران از پتانسیل بسیار پایین برای رخداد آتش‌سوزی برخوردار هستند. سوخت‌های سبک در سایر نواحی رویشی قابلیت اشتعال بالایی برای رخداد آتش‌سوزی دارند. هرچه مقدار شاخص BUI بیشتر باشد، سوخت موجود بیشتر و خشک‌تر و در نتیجه احتمال رخداد آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص شده است، بر اساس آستانه‌های تعریف‌شده این شاخص، پهنه رویشی زاگرس، هیرکانی و ارسباران از مقدار سوخت کمی برای آتش‌سوزی برخوردار هستند. این شاخص در ناحیه رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی بالاترین آستانه را دارد. این شاخص در شناسایی مناطق دارای خطر آتش‌سوزی در جنوب غرب ایران کارایی مناسبی نشان داده است. شاخص ISI بیان‌گر سرعت گسترش آتش‌سوزی است. با توجه به تأثیرپذیری این شاخص از FFMC و تندی

توزیع فضایی مناطق سوخته‌شده محصول ترکیبی ماهواره‌ای مناطق نشان داد، کل مساحت سوخته‌شده فصل زمستان در نواحی رویشی مختلف ایران برابر با ۲۰۲ هکتار است. در بین مناطق جنگلی شمال ایران، منطقه گلستان به‌دلیل کم‌تر بودن میزان بارش سالیانه، نزدیکی به مناطق خشک شمال شرق ایران و حضور گونه‌های خشکی‌پسند و سوزنی‌برگ استعداد بیشتری برای رخداد آتش‌سوزی دارد. همچنان‌که کانون بیشینه سطح سوخته‌شده این فصل در جنگل‌های گلستان و پس از آن در جنگل‌های گیلان مشاهده شده است. از دیگر دلایل فراوانی بالا بودن سطح سوخته‌شده این ناحیه رویشی می‌توان به تراکم لاشبرگ‌ها و خشک‌بودن جنگل‌های خزان‌کننده شمال ایران اشاره کرد. همچنین در فصل سرد سال حاکمیت جریان‌های جنوبی با ایجاد گرم‌باد باعث رخداد آتش‌سوزی و گسترش آن در مناطق شمالی ایران می‌شود (رحیمی و خادمی، ۱۳۹۷). سایر پهنه‌های سوخته‌شده به‌صورت محدود در نواحی رویشی ایران پراکنده شده‌اند. با توجه به این‌که بیشینه تغییرات دمایی ایران در فصل زمستان (میری و همکاران، ۲۰۲۱) و از طرفی کاهش بارش سالانه در این فصل (منصوری‌دانشور و همکاران، ۲۰۱۹) گزارش شده است انتظار می‌رود که رخداد آتش‌سوزی در فصل زمستان در حال افزایش باشد (شکل ۲).

بررسی مؤلفه‌های رطوبتی شاخص FWI در این فصل نشان داد، شاخص DC در تمامی عرصه‌های رویشی ایران از مقادیر بالایی برخوردار و از شمال به جنوب ایران در حال افزایش است. بر اساس آستانه‌های این شاخص ناحیه رویشی خلیج-عمانی از وضعیت خشکی بالایی به‌دلیل دمای بالاتر، بارش و رطوبت نسبی کمتر نسبت به سایر نواحی رویشی ایران برخوردار است. پس از آن ناحیه رویشی ایرانی-تورانی دارای بالاترین مقدار شاخص DC است؛ بنابراین از نظر مکانی می‌توان عنوان داشت که پتانسیل رخداد آتش‌سوزی در این نواحی نسبت به سایر نواحی رویشی ایران بیشتر است. اما علی‌رغم دما و خشکی بالا در عرصه‌های رویشی مذکور

باد مشاهده می‌شود که سرعت گسترش آتش‌سوزی در پهنه‌های رویشی هیرکانی، ارسباران و همچنین بخش‌های از زاگرس با توجه به رطوبت پایین سوخت‌های سبک پایین است. بر اساس مقادیر FWI پهنه‌های رویشی هیرکانی، ارسباران و زاگرس دارای پتانسیل پایینی برای رخداد آتش‌سوزی در این فصل هستند. لذا شاخص ISI و FWI به جز بخش‌های اندکی از زاگرس و خلیج-عمانی در جنگل‌های خوزستان در سایر پهنه‌ها کارایی مناسبی در این فصل برای شناسایی مناطق دارای خطر آتش‌سوزی ارائه نداده‌اند (شکل ۴).

نتایج حاصل از استخراج مساحت مناطق سوخته‌شده فصل بهار حاکی از سوختن ۳۲۶/۵ هکتار از مناطق جنگلی را دارد. علی‌رغم بارش‌های بهاره در شمال‌غرب، شمال شرق و دامنه‌های البرز اما خطر رخداد آتش‌سوزی در برخی مناطق ایران کماکان وجود دارد. بارش قابل‌توجه 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. کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده این فصل در جنوب غرب ایران در ناحیه رویشی خلیج-عمانی متمرکز شده است (شکل ۲).

افزایش تدریجی دما و سوخت کافی شرایط محیطی لازم برای آتش‌سوزی در ناحیه رویشی خلیج-عمانی را فراهم کرده است. به‌گونه‌ای که این ناحیه رویشی دارای مقادیر بالای شاخص DC و در نتیجه پتانسیل رخداد آتش‌سوزی بالا است. پس از ناحیه رویشی خلیج-عمانی، مقادیر بیشینه شاخص DC در ناحیه رویشی ایرانی-تورانی مشاهده شده است. پهنه رویشی هیرکانی پتانسیل پایینی برای رخداد آتش‌سوزی دارد همان‌گونه که سبزبودن درختان و در نتیجه کمبود مواد سوختنی از دلایل کاهش رخداد آتش‌سوزی این ناحیه رویشی در فصل بهار است. پهنه رویشی زاگرس و ارسباران به‌صورت محدود و پراکنده دارای سطح سوخته‌شده هستند و شاخص DC این مناطق را با پتانسیل پایین برای آتش‌سوزی

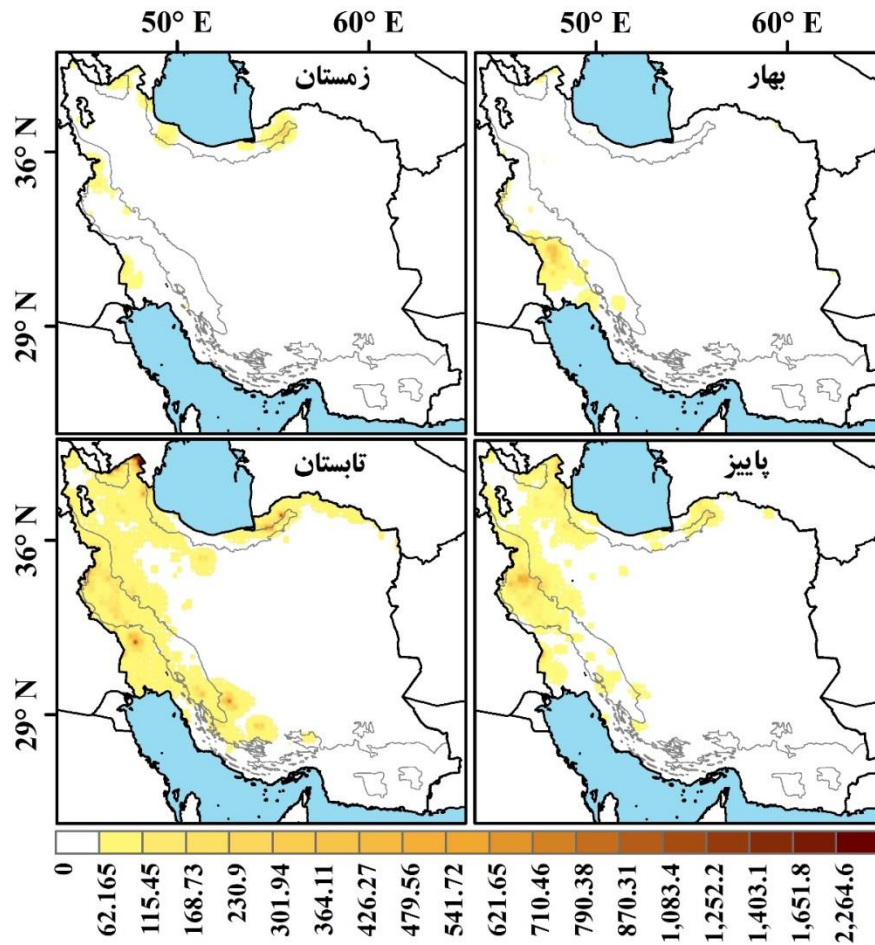
شناسایی کرده است (شکل ۳). بر اساس شکل ۳ الگوی فصلی شاخص DMC برای نواحی رویشی ایران حاکی از آن است که ناحیه رویشی خلیج-عمانی و ایرانی تورانی دارای بالاترین آستانه و بیشترین پتانسیل آتش‌سوزی در فصل بهار هستند. افزایش تدریجی دما، کاهش بارش و در نتیجه کاهش رطوبت نسبی از دلایل افزایش شاخص DMC در این نواحی است. پهنه رویشی هیرکانی و ارسباران پتانسیل بسیار پایینی برای رخداد آتش‌سوزی در این فصل دارند. پهنه رویشی زاگرس از خطر متوسط برای آتش‌سوزی برخوردار است. شاخص DMC کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده فصل بهار را در طبقه پرخطر قرار داده که حاکی از کارایی مناسب این شاخص در این فصل است. تغییرات قابل توجه بارش همراه با کاهش رطوبت نسبی و افزایش دما در افزایش شاخص FFMC تأثیرگذار بوده است. مطابق با آستانه‌های این شاخص ناحیه رویشی خلیج-عمانی و ناحیه ایرانی-تورانی پتانسیل بسیار بالایی برای رخداد آتش‌سوزی دارند به‌همین ترتیب سایر پهنه‌های رویشی ایران از پتانسیل بسیار پایینی برای رخداد این پدیده برخوردار هستند (شکل ۳).

بر اساس خروجی شاخص BUI، مقدار این شاخص در نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی در محدوده بسیار بالایی قرار دارد. با توجه به این که این شاخص به انباشتگی سوخت اشاره دارد، افزایش آن باعث افزایش شدت و گسترش آتش به اطراف خواهد شد. حجم مواد سوختنی در ناحیه رویشی هیرکانی و ارسباران بسیار پایین و در زاگرس در وضعیت متوسط قرار دارد در نتیجه شدت اشتعال و سرعت گسترش آتش در این مناطق کمتر خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر بالای شاخص ISI در نواحی مرکزی، شرق، جنوب شرق و قسمت‌های از جنوب غرب در ناحیه رویشی خلیج-عمانی مشاهده شده است که نشان‌دهنده سرعت بالای گسترش آتش در مدت کوتاهی پس از احتراق است. شاخص FWI نیز که اثرات رطوبت سوخت و تندی باد را بر رفتار و گسترش آتش‌سوزی نشان می‌دهد خطر رخداد

معضلات حوزه محیط‌زیست و منابع طبیعی ایران شده است. نتایج حاکی از آن است که روند صعودی آتش‌سوزی‌ها و افزایش مساحت مناطق سوخته‌شده تا سواحل جنوبی ایران در ناحیه رویشی خلیج-عمانی مشاهده می‌شود. در واقع مناطق سوخته‌شده در تمامی پهنه‌های رویشی ایران با شدت و مساحت متفاوت به‌صورت نامنظم قرار گرفته‌اند. تغییرات متغیرهای اقلیمی می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر میزان و شدت پتانسیل آتش‌سوزی در نواحی رویشی مختلف تأثیرگذار باشد. به این معنی که پتانسیل آتش‌سوزی در نواحی رویشی مختلف طی فصول مختلف، متفاوت است. به‌عنوان مثال ناحیه رویشی ارسباران در فصل بهار از پتانسیل متوسطی برای رخداد آتش‌سوزی برخوردار است و در فصل تابستان از پتانسیل شدیدی برای این پدیده برخوردار شده است.

آتش‌سوزی در مناطق رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی را در طبقه شدید قرار داده است. همچنین در پهنه رویشی زاگرس خطر رخداد آتش‌سوزی در طبقه بالا و در هیرکانی و ارسباران در طبقه بسیار ضعیف قرار داده است. در واقع در این فصل تمامی شاخص‌های آتش‌سوزی کارایی مناسبی برای شناسایی مناطقی با پتانسیل آتش‌سوزی را نشان داده‌اند (شکل ۴).

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود بیشترین سطح سوخته‌شده اراضی جنگلی ایران در فصل تابستان (۲۲۶۵ هکتار) و پس از آن در فصل پاییز رخ داده است. با شروع فصل گرما و خشکی هوا رخدادهای آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران به مراتب بیشتر اتفاق می‌افتد، به‌گونه‌ای که رخداد آتش‌سوزی در فصل گرم سال یکی از مهم‌ترین



شکل ۲. مساحت مناطق سوخته‌شده در نواحی رویشی ایران طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰ مبتنی بر محصول ترکیبی ماهواره‌ای مناطق سوخته‌شده.

در فصل تابستان افزایش قابل توجهی در همه پهنه‌های رویشی ایران داشته است. روند افزایشی دما و کاهش بارش (عدم رطوبت) بر رطوبت مواد سوختنی تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه مواد سوختنی خشک زودتر آتش گرفته، به شدت می‌سوزند و با سرعت بیشتری به اطراف گسترش می‌یابند. پهنه رویشی زاگرس، خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی توسط شاخص FWI با خطر آتش‌سوزی شدید مشخص شده است. شاخص FWI در پهنه رویشی ارسباران و هیرکانی احتمال خطر آتش‌سوزی را در طبقه بسیار بالا قرار داده است. بر اساس شاخص ISI سرعت اشتعال و گسترش آتش‌سوزی در ناحیه رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس بسیار بالا و در هیرکانی و ارسباران در محدوده پایین قرار دارد (شکل ۴). به صورت کلی کارایی شاخص FFMC و FWI در این فصل نسبت به سایر شاخص‌ها بهتر است. سایر شاخص‌ها در شناسایی مناطق مستعد رخداد آتش‌سوزی در ناحیه رویشی زاگرس، بخش‌هایی از جنگل‌های خوزستان و گلستان کارایی مناسبی داشتند.

در فصل پاییز تمامی نواحی رویشی ایران با وسعت و شدت کمتر نسبت به فصل تابستان همچنان درگیر رخداد آتش‌سوزی هستند (شکل ۲). ناحیه رویشی زاگرس بالاترین سطح سوخته‌شده را دارا است. پس از آن ناحیه رویشی ارسباران و هیرکانی بیشترین سطح سوخته‌شده را به خود اختصاص داده‌اند. قسمت عمده مناطق سوخته‌شده جنگلی غرب ایران مربوط به جنگل‌های کرمانشاه است. از دلایل فراوانی رخداد آتش‌سوزی این فصل می‌توان به آتش‌زدن باقی‌مانده محصول کشاورزی بعد از برداشت محصول و خزان برگ درختان جنگلی اشاره کرد. به‌رحال با شروع فصل پاییز، انباشته‌شدن برگ‌ها و وزش باد گرم شرایط دشواری در کلیه مناطق جنگلی ایجاد می‌شود. روند خشک شدن سوخت‌های زیرسطحی (زمینی) نشان می‌دهد در صورت مساعدبودن شرایط، اندازه و شدت آتش‌سوزی‌های جنگلی افزایش می‌یابد. تداوم افزایش دما و بارش‌های دیر هنگام پاییز

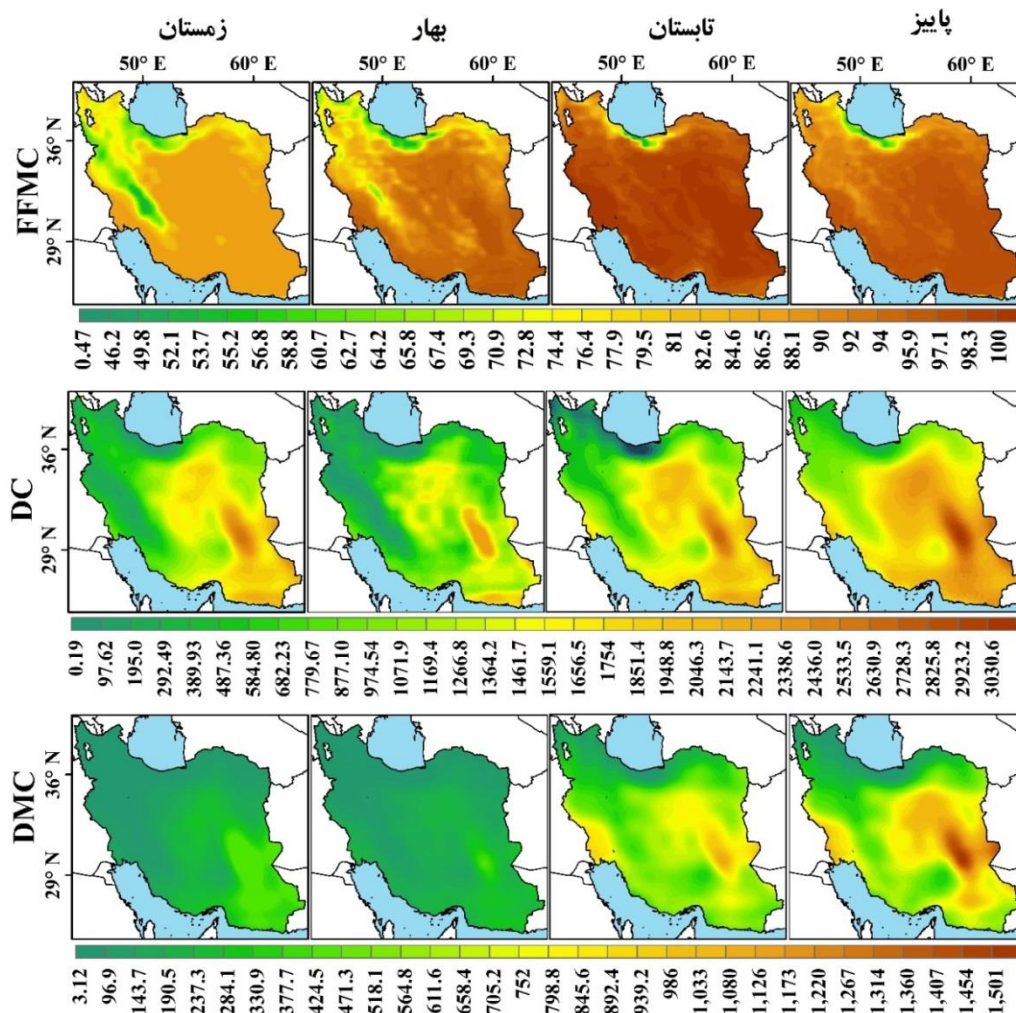
افزایش مقادیر شاخص DC در نواحی رویشی خلیج-عمانی، زاگرس و ایرانی-تورانی نشان‌دهنده آتش‌سوزی‌های زیرسطحی (زمینی) با سوخت سنگین و پتانسیل شدید آتش‌سوزی در این مناطق است. بخش زیادی از مناطق سوخته‌شده ناحیه هیرکانی در جنگل‌های گلستان قرار دارد. این مناطق بر اساس شاخص DC از پتانسیل بسیار بالایی برای رخداد آتش‌سوزی برخوردار هستند. در صورتی که ناحیه رویشی ارسباران و بخش‌هایی از پهنه هیرکانی بر اساس این شاخص پتانسیل پایینی برای رخداد آتش‌سوزی دارند (شکل ۳). بر اساس شکل ۳ کانون‌های بیشینه مناطق سوخته‌شده (خلیج-عمانی، زاگرس و ایرانی-تورانی) با آستانه بسیار پرخطر شاخص DMC همخوانی دارد. اما با وجود بالا بودن شاخص DMC، این مناطق پتانسیل پایینی برای رخداد آتش‌سوزی به‌شکل واقعی دارند. بر اساس این شاخص پهنه رویشی ارسباران و بخش‌هایی از هیرکانی دارای قابلیت آتش‌سوزی ضعیفی است. با توجه به این که مقدار شاخص DMC بعد از هر بارش کاهش می‌یابد (ون‌واگنر و پیکت، ۱۹۸۵) یکی از دلایل کاهش این شاخص در ناحیه رویشی هیرکانی در مقایسه با سایر نواحی می‌تواند بارش‌های تابستانه این ناحیه باشد.

شاخص FFMC در نواحی رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس بالاترین مقدار را دارد که نشان از کاهش رطوبت مواد سوختنی و اشتعال سریع آنها در این مناطق است. کاهش مقادیر این شاخص در بخش‌هایی از ناحیه هیرکانی به رطوبت بیشتر و در نتیجه پتانسیل پایین رخداد آتش‌سوزی اشاره دارد. تغییرات قابل توجه این شاخص در پهنه رویشی ارسباران نشان‌دهنده افزایش بالقوه آتش‌سوزی جنگل در این منطقه است (شکل ۳). شاخص FFMC نسبت به دو شاخص رطوبتی دیگر (DC و DMC) علاوه بر شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی در سایر پهنه‌های ایران کارایی مناسبی در ارسباران نیز نشان داده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص BUI

گسترش آتش‌سوزی برخوردار هستند. همچنین ناحیه رویشی زاگرس با دارا بودن مقادیر بالایی از این شاخص دارای پتانسیل آتش‌سوزی بالا است. این شاخص نواحی رویشی هیرکانی و ارسباران را که جزء مناطق مستعد آتش‌سوزی در این فصل هستند و به‌صورت کانون مشخص شده‌اند را با پتانسیل ضعیف برای رخداد آتش‌سوزی شناسایی کرده است. مقادیر بالای شاخص FFMC در ناحیه رویشی خلیج-عمانی، ایرانی-تورانی و زاگرس متمرکز شده است که نشان می‌دهد مواد سوختنی به‌دلیل خشک‌بودن، امکان اشتعال بسیار سریع آنها وجود دارد. در ناحیه رویشی هیرکانی و ارسباران پتانسیل آتش‌سوزی و در نتیجه سرعت اشتعال مواد سوختنی در وضعیت پایینی قرار دارد (شکل ۳).

سبب کاهش رطوبت مواد سوختنی شده که احتمال آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد. افزایش شاخص DC در تمامی نواحی رویشی ایران در این فصل قابل مشاهده است (شکل ۳). در ناحیه رویشی زاگرس کارایی بهتر این شاخص برای شناسایی نواحی مستعد آتش‌سوزی با پتانسیل بالا مشاهده شده است. با توجه به پوشش گیاهی بالا ناحیه رویشی ارسباران و هیرکانی، امکان آتش‌سوزی در شرایط خشکی بالا است. همچنان‌که این مناطق بر اساس محصول سوخته‌شده جهانی جزء کانون‌های سوخته‌شده این فصل قرار دارند. نتایج شاخص DMC نشان می‌دهد، ناحیه رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی دارای بالاترین مقادیر و در نتیجه از پتانسیل بالایی برای رخداد و



شکل ۴. پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های رطوبتی FFMC, DC و DMC در نواحی رویشی ایران.

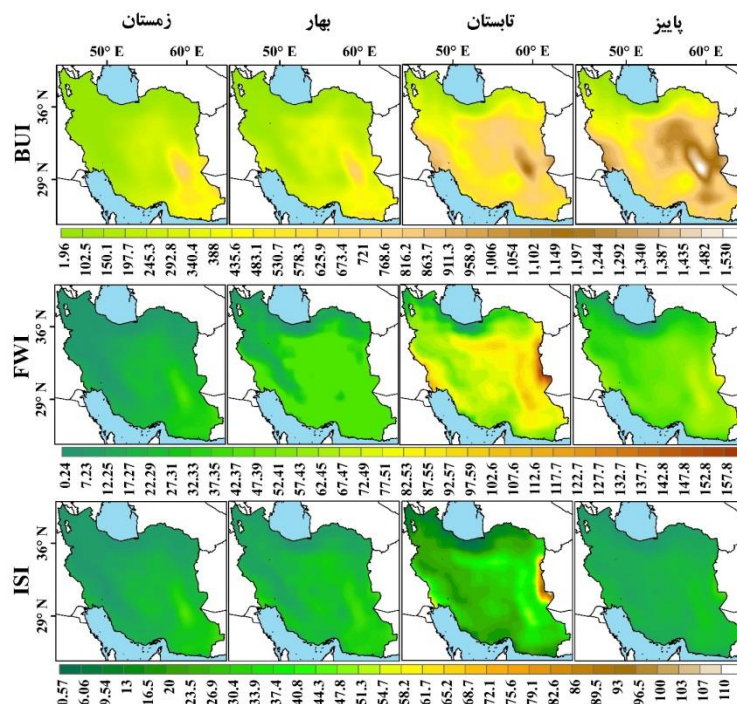
هیرکانی و ارسباران پتانسیل متوسطی برای رخداد آتش‌سوزی برخوردار است.

با افزایش تندی باد احتمال افزایش شاخص ISI نیز وجود دارد به گونه‌ای که در نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی تورانی بالاترین مقادیر شاخص ISI رخ داده است (شکل ۴). نواحی رویشی هیرکانی و ارسباران بر مبنای آستانه‌های این شاخص از پتانسیل پایینی برای رخداد آتش‌سوزی برخوردار هستند. به صورت کلی در این فصل شاخص DC و FWI در شناسایی مناطقی با پتانسیل بالا برای رخداد آتش‌سوزی کارایی بهتری دارد.

جدول ۴ همبستگی مناطق سوخته‌شده فصلی ایران با شاخص‌های آتش‌سوزی (DC، DMC، FFMC، BUI، ISI) و FWI را نشان داده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه همبستگی شاخص‌های آتش‌سوزی با محصول سوخته شده، DMC متعلق به فصل بهار است. در این فصل، شاخص DMC، بیشترین همبستگی را با مناطق سوخته شده دارد. در سایر فصول مقدار همبستگی بین محصول سوخته شده و شاخص‌های آتش‌سوزی منفی است.

با توجه به نتایج شاخص BUI احتمال رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی خلیج-عمانی و ایرانی-تورانی بیشتر از سایر مناطق است. با افزایش مقادیر BUI در ناحیه رویشی زاگرس احتمال رخداد آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. ناحیه رویشی ارسباران و هیرکانی به دلیل خزان پاییزی و ریزش برگ درختان دارای سوخت در دسترس قابل توجهی نسبت به سایر مناطق است. این نواحی در رتبه‌بندی شاخص BUI در محدوده با پتانسیل پایین قرار گرفتند. با توجه به این که این مناطق جزء کانون‌های اصلی آتش‌سوزی در فصل پاییز هستند می‌توان گفت این شاخص در شناسایی نواحی مستعد آتش‌سوزی کارایی مناسبی ندارد (شکل ۴).

نتایج شاخص FWI نشان می‌دهد که مناطق خشک در مرکز، جنوب، شرق و جنوب شرق و بخش‌های از جنوب غرب ایران عمدتاً دارای بالاترین مقادیر FWI هستند. ولی با توجه به شرایط خشکی حاکم بر این مناطق و عدم پوشش گیاهی مناسب پتانسیل آتش‌سوزی در این مناطق بسیار پایین‌تر از سایر مناطق است. بر اساس آستانه‌های تعریف‌شده این شاخص ناحیه رویشی زاگرس نیز از پتانسیل بسیار بالا و ناحیه رویشی



شکل ۴. پهنه‌بندی شاخص‌های رفتار و گسترش آتش‌سوزی BUI، ISI و FWI در نواحی رویشی ایران.

جدول ۴. ضریب همبستگی بین مناطق سوخته‌شده و شاخص‌های جوی آتش‌سوزی.

شاخص	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
DC	-۰/۶۸	۰/۶۴	-۰/۶۷	-۰/۴۳
DMC	-۰/۶۵	۰/۸۰	-۰/۶۱	-۰/۲۶
FFMC	-۰/۶۵	۰/۶۷	-۰/۳۴	-۰/۱۵
BUI	-۰/۶۵	۰/۷۷	-۰/۶۲	-۰/۲۹
ISI	-۰/۶۸	۰/۷۵	-۰/۶۳	-۰/۲۸
FWI	-۰/۶۷	۰/۷۵	-۰/۶۰	-۰/۲۴

### ۶. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق در خصوص ارزیابی کارایی شاخص‌های FWI در شناسایی مناطق مستعد رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران بر اساس یافته‌های شکل‌های ۴-۱ و جدول‌های ۳-۱ به شرح زیر منتج به ۴ یافته شد.

۱- در فصل سرد سال بیشترین رخداد آتش‌سوزی از نظر فراوانی و گستره تحت تأثیر مربوط به ناحیه رویشی هیرکانی به‌ویژه جنگل‌های گلستان است. از بین شاخص‌های بررسی‌شده شاخص رطوبتی DC کارایی مناسبی برای شناسایی نواحی مستعد آتش‌سوزی به‌ویژه در بخش‌های از شمال و شمال‌غرب کشور نشان داده است.

۲- کانون بیشینه مناطق سوخته‌شده فصل بهار در جنوب غرب ایران ناحیه خلیج-عمانی قرار دارد. کاهش رطوبت خاک و رطوبت پوشش گیاهی همراه با خشک‌شدن تجمعی پوشش مرده جنگل نیز باعث تشدید و گسترش سریع آتش‌سوزی‌های سطحی شده است. در پژوهشی در منطقه Daxing'anling در چین، تیان و همکاران (۲۰۱۰) نیز به نتیجه رسیدند که بیشتر آتش‌سوزی‌های رخ داده با افزایش بالای مقادیر FWI، FFMC و شاخص گسترش اولیه (ISI) همراه است.

۳- توزیع زمانی داده‌های مناطق سوخته‌شده نشان داد بیشترین رخداد آتش‌سوزی‌ها مربوط به فصل تابستان و ناحیه رویشی ارسباران می‌باشد که همزمان با آن نیز هم مقادیر شاخص‌های آتش‌سوزی و هم روزهایی که از آستانه‌های خطر بسیار بالا و شدید فراتر می‌رود، افزایش

می‌یابد و بر رطوبت سوخت تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه رخداد و گسترش آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد. همچنین شاخص‌های FWI و FFMC در شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی کارایی بهتری داشتند. به‌نحوی که پایدوک و کورنول (۲۰۱۶) نیز در پژوهشی مشابه در کانادا افزایش دما را عاملی برای باعث افزایش مقادیر شاخص FFMC نشان دادند.

۴- کانون بیشینه آتش‌سوزی‌های رخ داده فصل پاییز در ناحیه رویشی زاگرس و به‌ویژه جنگل‌های کرمانشاه قرار دارد. شاخص DC و FWI بهترین کارایی را در مورد قابلیت پیش‌بینی رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی مورد مطالعه در این فصل دارند. این یافته منطبق بر پژوهش استاینفلد و همکاران (۲۰۲۲) است که در تحقیقی در سوئیس بیان داشتند شاخص DC بهترین کارایی را در ارزیابی خطر آتش‌سوزی در فصل پاییز دارد.

این نتایج آسیب‌پذیری جنگل‌های ایران و پتانسیل بالای آنها برای رخداد آتش‌سوزی را نسبت به روند خشک‌شدن مواد سوختنی نشان می‌دهد. از طرفی رطوبت مواد سوختنی با تغییر شرایط آب‌وهوایی، هم در فصل و هم در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر تغییر می‌کند. لذا شناسایی سوخت‌های مختلف، مبنای مفیدی برای پیش‌بینی پتانسیل آتش‌سوزی است. علاوه بر این شاخص‌های جوی آتش‌سوزی که با تفکیک افقی بالا به‌دست می‌آیند، می‌توانند به درک بهتر تغییرپذیری زمانی-مکانی خطر آتش‌سوزی، به‌ویژه در ایران با توپوگرافی پیچیده و

متنوع آن کمک کنند.

## مراجع

- رحیمی، د. و خادمی، س. (۱۳۹۷). تحلیل الگوهای همدید خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های شمال ایران (استان گلستان). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۷(۱۷)، ۱۹-۳۶.
- شیخی، م.؛ رحیمی، م. و کابلی، ح. (۱۳۹۲). بررسی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از شاخصهای مبتنی بر پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: استان مازندران). *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان*.
- عزیزی، م.؛ پوررضا، م. و خسروی، م. (۱۳۹۹). تغییرات زمانی و مکانی رخداد‌های آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی استان کرمانشاه و ارتباط آن با عوامل محیطی، *پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته علوم مهندسی جنگل، دانشگاه رازی کرمانشاه*.
- مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۳۹۹). *علل، آثار، چالش‌ها و راهکارهای مقابله با آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع کشور، گزارش کارشناسی با شماره ۱۷۲۸۸، تهران*.
- موذنی، ن.؛ سیاح‌نیا، ر. و اسماعیل‌زاده، ح. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی ریسک آتش‌سوزی جنگل در بیوم زاگرس (مطالعه موردی استان کردستان). *پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی*.
- Amiro, B. D., Logan, K. A., Wotton, B. M., Flannigan, M. D., Todd, J. B., Stocks, B. J., & Martell, D. L. (2004). Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 13(4), 391-400.
- Archibald, S., Lehmann, C. E., Gómez-Dans, J. L., & Bradstock, R. A. (2013). Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6442-6447.
- Baidoc, R., & Cornwell, A. R. (2016). Using fine fuel moisture codes to understand the effects of climate change on the eastern boreal forests of Canada. *Prairie Perspectives: Geographical Essays*, 18, 42-49.
- Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Zavala, G., Urbieto, I. R., & Moreno, J. M. (2012). Sensitivity of fire weather index to different reanalysis products in the Iberian Peninsula. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 699-708.
- Blanchi, R., Leonard, J., Haynes, K., Opie, K., James, M., & de Oliveira, F. D. (2014). Environmental circumstances surrounding bushfire fatalities in Australia 1901-2011. *Environmental Science & Policy*, 37, 192-203.
- Briggs, C. M., Price, R., & Pearce, H. G. (2005). Spatial prediction of wildfire hazard across New Zealand: a significant upgrade. Landcare Research.
- Calheiros, T., Pereira, M. G., & Nunes, J. P. (2021). Assessing impacts of future climate change on extreme fire weather and pyro-regions in Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 754, 142233.
- اسکندری، س. و اسکندری، س. (۱۴۰۰). آتش‌سوزی جنگل‌های ایران، پیامدها، روش‌های مقابله و راهکارها. *انسان و محیط‌زیست*، ۱۹(۱)، ۱۷۵-۱۸۷.
- حیدری، م.؛ عطار روشن، س.؛ جافریان، ا. و عیبات، م. (۱۴۰۰). مدل‌سازی و پهنه‌بندی مناطق مستعد آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی بر پایه رگرسیون لجستیک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۴۳-۵۸.
- خان‌محمدی، م.؛ رحیمی، م. و کرتولی نژاد، د. (۱۳۹۵). تحلیل خطر آتش‌سوزی جنگل‌های هیرکانی شمال‌شرق ایران با استفاده از شاخص‌های کج-بایرام و مک-آرتور. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران*، ۱۴(۱)، ۴۸-۵۷.
- دشتی، ش.؛ امینی، ج.؛ احمدی ثانی، ن. و جوانمرد، ع. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی مناطق مستعد آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس شمالی (مطالعه موردی: جنگل‌های سردشت در آذربایجان غربی). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۰(۳۰)، ۱۰۵-۱۲۶.



- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A., & Zamora, R. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), 46-58
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., Barnard, C., Maciel, P., & San-Miguel, J. (2020). Fire Weather Index: the skill provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2365-2378.
- Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M., & Mitsopoulos, I. D. (2011). Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18(1), 83-93.
- Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., & De Groot, W. (2009). *Australian fire weather as represented by the McArthur forest fire danger index and the Canadian forest fire weather index* (p. 91). Melbourne: Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Grillakis, M., Voulgarakis, A., Rovithakis, A., Seiradakis, K.D., Koutroulis, A., Field, R.D., Kasoar, M., Papadopoulos, A., & Lazaridis, M. (2022). Climate drivers of global wildfire burned area. *Environmental Research Letters*, 17(4), 045021.
- Groot, W. J. D., Field, R. D., Brady, M. A., Roswintarti, O., & Mohamad, M. (2007). Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 165-180.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Karali, A., Hatzaki, M., Giannakopoulos, C., Roussos, A., Xanthopoulos, G., & Tenentes, V. (2014). Sensitivity and evaluation of current fire risk and future projections due to climate change: the case study of Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 143-153
- Lawson, B. D., & Armitage, O. B. (2008). Weather guide for the Canadian forest fire danger rating system.
- Littell, J. S., McKenzie, D., Peterson, D. L., & Westerling, A. L. (2009). Climate and wildfire area burned in western US ecoprovinces, 1916-2003. *Ecological Applications*, 19(4), 1003-1021.
- Mansouri Daneshvar, M.R., Ebrahimi, M. & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10.
- Miri, M., Masoompour Samakosh, J., Razinei, T., Jalilian, A., & Mahmodi, M. (2021). Spatial and temporal variability of temperature in Iran for the twenty-first century foreseen by the CMIP5 GCM models. *Pure and Applied Geophysics*, 178(1), 169-184.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4(3), 313-332.
- Penttilä, R., Junninen, K., Punttila, P., & Siitonen, J. (2013). Effects of forest restoration by fire on polypores depend strongly on time since disturbance—a case study from Finland based on a 23-year monitoring period. *Forest Ecology and Management*, 310, 508-516.
- Pereira, M. G., Trigo, R. M., da Camara, C. C., Pereira, J. M., & Leite, S. M. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), 11-25.
- San-Miguel-Ayanz, J., Carlson, J. D., Alexander, M., Tolhurst, K., Morgan, G., Sneeuwjagt, R., & Dudley, M. (2003). Current methods to assess fire danger potential. In *Wildland fire danger estimation and mapping: The role of remote sensing data*, (pp. 21-61).
- Sharples, J. J., McRae, R. H., Weber, R. O., & Gill, A. M. (2009). A simple index for assessing fire danger rating. *Environmental Modelling & Software*, (24)6, 764-774.
- Steinfeld, D., Peter, A., Martius, O., & Brönnimann, S. (2022). Assessing the performance of various fire weather indices for wildfire occurrence in Northern Switzerland. *EGU sphere*, 1-23.
- Tarek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
- Taylor, S. W., & Alexander, M. E. (2006). Science, technology, and human factors in fire danger

- rating: the Canadian experience. *International Journal of Wildland Fire*, 15(1), 121-135.
- Tian, X., McRae, D. J., Jin, J., Shu, L., Zhao, F., & Wang, M. (2010). Changes of forest fire danger and the evaluation of the FWI System application in the Daxing'anling region. *Scientia silvae sinicae*, 46(5), 127-132.
- Tyukavina, A., Potapov, P., Hansen, M.C., Pickens, A., Stehman, S., Turubanova, S., Parker, D., Zalles, V., Lima, A., Kommareddy, I., Song, X-P, Wang, L., & Harris, N. (2022) Global trends of forest loss due to fire, 2001-2019. *Frontiers in Remote Sensing*.
- Ullah, M. R., Liu, X. D., & Al-Amin, M. (2013). Spatial-temporal distribution of forest fires and fire weather index calculation from 2000 to 2009 in China. *Journal of Forest Science*, 59(7), 279-287.
- Van Wagner, C. E., & Pickett, T. L. (1985). Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system, (Vol. 33).
- Varela, V., Sfetsos, A., Vlachogiannis, D., & Gounaris, N. (2018). Fire Weather Index (FWI) classification for fire danger assessment applied in Greece. *Tethys*, 15, 31-40.
- Yang, Q., Kang, Q., Huang, Q., Cui, Z., Bai, Y., & Wei, H. (2021). Linear correlation analysis of ammunition storage environment based on Pearson correlation analysis. *In Journal of physics: Conference series*, 1948(1), 012064. IOP Publishing.