

## Calibration and evaluation of the Forest Fire Weather Index (FWI) in the Hamoun wetland area

Mojtaba Shokouhi<sup>1</sup>, Ebrahim Asadi Oskouei<sup>2\*</sup> , Hadis Sadeghi<sup>3</sup>, Mehran Rahnema<sup>4</sup>

1. Assistant Professor of Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran.
2. *Corresponding Author*, Assistant Professor of Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
3. Research Expert, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
4. Assistant Professor of Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received:** 01 March 2023

**Revised:** 19 June 2023

**Accepted:** 26 June 2023

**Keywords:**

Fire occurrence danger, FWI, Raster layers, AUC criterion.

---

### ABSTRACT

Wetlands are important global ecosystems that are expected to be very vulnerable to fires caused by climate change. The adverse effects of climate in recent years have increased the fire occurrence danger in Hamoun wetland. One of the methods of predicting the occurrence of fire is the use of fire weather indicators such as FWI. This index, which is widely used all over the world, evaluates the effect of these factors on the risk of fire by considering air temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation. In this study, after preparing FWI daily raster layers in the Hamoun wetland, new thresholds for different classes of fire danger were estimated. Then, the ability of the FWI index to predict the occurrence of fire based on new thresholds was done. Among the meteorological parameters, the monthly average wind speed has the highest correlation with the monthly changes in the FWI index. The average total value of FWI is more than 70. The cumulative distribution of FWI values in the region showed that for 75% of days (between 1998 and 2021) FWI value is greater than 47. The value of FWI for the northern areas is much higher than the southern areas. The results of the Mann-Kendall trend test show the increasing trend of FWI. The results showed that there is a significant difference between the new thresholds and the standard threshold values. So that the very high danger threshold, which is equal to 38 in standard conditions, has reached 105. Validation results showed that the AUC criterion in predicting the very high danger of fire, considering the new threshold, will reach from 0.576 to 0.834 in standard conditions. It can be said that the new threshold of FWI has been able to predict the danger of fire in the Hamoun wetland with good and acceptable accuracy.

---

**Cite this article:** Shokouhi, M., Asadi Oskouei, E., Sadeghi, H., & Rahnema, M. (2023). Calibration and evaluation of the Forest Fire Weather Index (FWI) in the Hamoun wetland area. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 45-60. DOI: 10.22111/jneh.2023.45016.1944



© Ebrahim Asadi Oskouei.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2023.45016.1944

---

\* Corresponding Author Email: [e-oskouei@asmerc.ac.ir](mailto:e-oskouei@asmerc.ac.ir)

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۳، شماره ۳۹، فروردین ۱۴۰۳

## واسنجی و ارزیابی شاخص وضع هوای آتش‌سوزی FWI در منطقه تالاب هامون

مجتبی شکوهی<sup>۱</sup>، ابراهیم اسعدی اسکویی<sup>۲\*</sup>، حدیث صادقی<sup>۳</sup>، مهدی رهنما<sup>۴</sup>

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

۲. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران (نویسنده مسئول)

۳. کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

۴. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تالاب‌ها از اکوسیستم‌های مهم جهانی هستند که انتظار می‌رود در برابر رخداد آتش‌سوزی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر باشند. اثرات نامطلوب اقلیمی سال‌های اخیر خطر وقوع آتش‌سوزی در محدوده تالاب هامون را افزایش داده است. یکی از روش‌های پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی استفاده از شاخص‌های وضع هوایی آتش‌سوزی مانند FWI است. این شاخص که به‌طور گسترده در سراسر جهان به‌کار می‌رود، با در نظر گرفتن دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارش، اثر این عوامل بر خطر وقوع آتش‌سوزی را ارزیابی می‌نماید. در این مطالعه پس از تهیه لایه‌های رستری روزانه FWI در محدوده تالاب هامون، آستانه‌های جدید برای طبقات مختلف خطر آتش‌سوزی برآورد شد. در ادامه توانایی شاخص FWI در پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی بر اساس آستانه‌های جدید انجام شد. در بین پارامترهای هواشناسی، متوسط ماهانه سرعت باد بیشترین همبستگی را با تغییرات ماهانه شاخص FWI داراست. متوسط کل مقدار FWI در تمام منطقه بیش از ۷۰ است. توزیع تجمعی مقادیر FWI در منطقه نشان داد که برای ۷۵ درصد روزها (طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۱) مقدار FWI بزرگ‌تر از ۴۷ است. مقدار FWI برای نواحی شمالی‌تر به مراتب بالاتر از نواحی جنوبی‌تر است. نتایج آزمون روند من-کندال نشان‌دهنده روند افزایشی مقادیر FWI در سراسر منطقه است. نتایج نشان داد تفاوت قابل‌توجهی بین آستانه‌های جدید با مقادیر آستانه‌های استاندارد وجود دارد؛ به‌طوری که آستانه خطر بسیار بالا که در شرایط استاندارد برابر ۳۸ است، به ۱۰۵ رسیده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد معیار AUC در پیش‌بینی خطر بسیار بالای وقوع آتش با در نظر گرفتن آستانه جدید، از ۰/۵۷۶/۰ در شرایط استاندارد به ۰/۸۳۴ خواهد رسید. می‌توان گفت آستانه جدید FWI با دقت خوب و قابل‌قبولی توانسته خطر وقوع آتش‌سوزی در محدوده تالاب هامون را پیش‌بینی نماید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵	
واژه‌های کلیدی:	
خطر وقوع آتش‌سوزی، شاخص وضع هوای آتش‌سوزی FWI، لایه‌های رستری، معیار AUC.	

استناد: شکوهی، مجتبی، اسعدی اسکویی، ابراهیم، صادقی، حدیث، رهنما، مهدی. (۱۴۰۲). واسنجی و ارزیابی شاخص وضع هوای آتش‌سوزی FWI

در منطقه تالاب هامون. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۳۹)، ۴۵-۶۰. DOI: 10.22111/jneh.2023.45016.1944



© مجتبی شکوهی، ابراهیم اسعدی اسکویی، حدیث صادقی، مهدی رهنما.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

## مقدمه

آتش بخش مهمی از چرخه کربن است و از هزاران سال قبل پیش از پیدایش تمدن بشری، بیشتر اکوسیستم‌ها در معرض آتش‌سوزی‌های طبیعی قرار داشته‌اند (مو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱؛ ون ویز و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۲). آتش‌سوزی‌ها می‌توانند اثرات اکولوژیکی منفی و مثبت داشته باشند. در بسیاری از اکوسیستم‌ها، آتش‌سوزی می‌تواند برای گیاهان و جانوران خاصی مفید و گاهی ضروری باشد؛ اما آتش‌سوزی‌های با شدت بالا می‌توانند حتی برای اکوسیستم‌های سازگار با آتش بسیار مضر باشند (رامو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). امروزه آتش‌سوزی‌های فاجعه‌بار به‌طور فزاینده‌ای در سراسر جهان رایج هستند که با تغییرات آب و هوایی بدتر شده است. تالاب‌ها از اکوسیستم‌های مهم جهانی هستند که خدمات اکوسیستمی قابل‌توجهی را به جامعه انسانی ارائه می‌دهند که انتظار می‌رود در برابر رخداد آتش‌سوزی-های ناشی از تغییرات آب و هوایی بسیار آسیب‌پذیر باشند (سونیر و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). ایران با قرارگرفتن در غرب آسیا، یکی از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که شرایط جوی لازم برای وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع آن فراهم است (کلبالی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۱). خطر وقوع آتش‌سوزی با عوامل محیطی، آب و هوایی و انسانی در ارتباط است؛ اما در این میان، عوامل هوایی در وقوع و گسترش آتش‌سوزی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. شرایط آب و هوایی نه تنها خود می‌تواند در ایجاد آتش‌سوزی به‌صورت یک عامل منفرد موثر باشد بلکه می‌تواند سایر عوامل را تحت تأثیر قرار دهد. اگر شرایط آب و هوایی مساعد نباشد، آتش ایجادشده توسط عامل انسانی نمی‌تواند گسترش یابد. بنابراین، می‌توان گفت شرایط آب و هوایی مهم‌ترین عامل در وقوع و گسترش آتش است. دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارش مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر وقوع و گسترش آتش هستند؛ بنابراین برای پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی، در نظر گرفتن این عوامل بسیار حائز اهمیت است. امروزه برای ارزیابی و پیش‌بینی وقوع آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع، از شاخص‌های وضع هوای آتش‌سوزی توسط آژانس‌های مدیریت آتش‌سوزی استفاده می‌شوند (استاینفلد و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۲). یکی از این شاخص‌ها، شاخص وضع هوای آتش<sup>۷</sup> است که با در نظر گرفتن دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارش، اثر این عوامل بر خطر وقوع و گسترش آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی ارزیابی می‌نماید. شاخص وضع هوای آتش (FWI)، که بخشی از سیستم رتبه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل‌های کانادا<sup>۸</sup> است، به‌طور گسترده‌ای در سراسر جهان به‌عنوان یکی از قابل‌اعتمادترین و مهم‌ترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی تأیید شده و به رسمیت شناخته شده است (وانگ و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۷؛ وارلا و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۹). شاخص FWI به‌طور خاص برای توصیف رفتار آتش‌سوزی در جنگل‌های کانادا توسعه داده شده است. سادگی اجرای این شاخص، آن را به یک انتخاب محبوب در بسیاری از کشورها تبدیل کرده است و نشان داده است که عملکرد قابل‌قبولی در اکوسیستم‌های بسیار متفاوت با جنگل‌های شمالی کانادا دارد (دی جوزپه و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۲۰). با این-

1 - Mu et al.

2 - van Wees et al.

3 - Ramo et al.

4 - Sonnier et al.

5 - Kalbali et al.

6 - Steinfeld et al.

7 - Fire Weather Index.

8 - Canadian Forest Fire Danger Rating System.

9 - Wang et al.

10 - Varela et al.

11 - Di Giuseppe et al.

حال، گاهی تفسیر مقادیر FWI در مورد سطح خطر آتش‌سوزی، منجر به تخمین بیش‌ازحد سیستماتیک یا دست-کم‌گرفتن خطر آتش‌سوزی برای مناطق خاص می‌شود. در همین راستا پژوهشگرانی مانند ون واگنر<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) و وارلا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) طبقات خطر آتش‌سوزی شاخص FWI را برای مناطق دیگر نیز واسنجی کردند. طبق توصیه‌های به‌عمل‌آمده، قبل از استفاده از شاخص وضع هوای آتش FWI باید مقادیر آستانه آن برای طبقه‌بندی کلاس‌های خطر آتش‌سوزی، بر اساس ویژگی‌های محیطی برای هر منطقه واسنجی شود (ون واگنر، ۱۹۸۷).

مرور مطالعات انجام‌شده در داخل ایران حاکی از آن بود که علی‌رغم کارایی قابل‌توجه شاخص FWI در پایش آتش‌سوزی، تاکنون از این شاخص برای پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی در کشور استفاده نشده و فرایند محاسبه و واسنجی کردن آن برای مناطق کشور انجام نشده است. براساس نتایج پژوهش پرنیان و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۱)، در اکثر مطالعات مربوط به پایش و پیش‌بینی آتش‌سوزی در ایران از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی، رگرسیون، الگوریتم درخت تصمیم‌گیری، تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی، هوش مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. در تعداد اندکی از تحقیقات اخیر نیز محصولات آتش فعال تصاویر و سنجش‌ازدور استفاده شده است. در سطح جهانی مطالعات متعددی با استفاده از این شاخص انجام شده است. دی جوزپه و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۰) در پژوهشی، دقت قابل‌توجه شاخص پیش‌بینی وضع هوای آتش‌سوزی (FWI) را نشان دادند که در تنظیم استراتژی‌های مدیریتی بسیار مفید است. پینتو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۰) در پژوهشی برای شبه جزیره ایبری شاخص FWI را بهبود دادند و شاخص FWIe را برای منطقه مود مطالعه خود ایجاد کردند و نشان دادند که شاخص FWIe به‌طور مؤثری احتمال وقوع خطر آتش‌سوزی را برآورد می‌کند. یانگ و دی<sup>۶</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از شاخص پیش‌بینی وضع هوای آتش‌سوزی (FWI)، یک طبقه‌بندی خطر آتش‌سوزی جدید را برای مناطق جنگلی جیبیلین ارائه کردند. نتایج نشان داد که طبقه‌بندی خطر ارائه‌شده به خوبی با وقوع آتش‌سوزی واقعی همبستگی دارد و می‌تواند خطر آتش‌سوزی را در این مناطق توصیف کند. اریکسون و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۳) در پژوهشی شاخص‌های مختلف خطر آتش‌سوزی شامل FWI، KBDI، FFWI و Nesterov را در هفت منطقه جغرافیایی در سوئد برای سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند و نتایج شاخص‌ها را مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص FWI در مقایسه با سه شاخص دیگر کارایی بالاتری دارد. وارلا و همکاران (۲۰۱۸) به منظور برآورد خطر وقوع آتش‌سوزی در یونان از شاخص وضع هوای آتش‌سوزی (FWI) استفاده کردند و نشان دادند که شاخص FWI طبقات مختلف را براساس ویژگی‌های فیزیکی خاص منطقه مورد مطالعه به‌طور مناسبی متفاوت ارائه می‌کند. همچنین براساس یافته‌های وارلا و همکاران (۲۰۱۹)، شاخص FWI معیار خوبی برای تعیین کمیت خطر آتش‌سوزی در سطح جهانی است. آنها نشان دادند علی‌رغم این واقعیت که آب و هوا و پوشش گیاهی منطقه فرانسه، ایتالیا و پرتغال با کانادا متفاوت است، اما شاخص FWI کارایی خوبی در پایش آتش‌سوزی این مناطق دارد.

1 - Van Wagner.  
2 - Varela et al.  
3 - Parnian et al.  
4 - Di Giuseppe et al.  
5 - Pinto et al.  
6 - Yang and Di  
7 - Eriksson et al.

باتوجه به اهمیت اکوسیستمی تالاب هامون در منطقه شرق کشور و اثرات نامطلوب اقلیمی چند سال اخیر (مانند خشکسالی‌ها، وزش بادهای شدید) بر این ناحیه، انتظار می‌رود خطر وقوع آتش‌سوزی عاملی تهدیدکننده در این نواحی باشد. نظر به موارد یادشده، آتش‌سوزی به‌عنوان خطری اکولوژیک از دیدگاه زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و امنیتی از اصلی‌ترین نگرانی‌ها و چالش‌های موجود می‌باشد. تاکنون از شاخص FWI برای پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی در کشور استفاده نشده و فرایند ارزیابی، واسنجی و اعتبارسنجی آن در منطقه مورد مطالعه انجام نشده است. از این‌رو در این پژوهش سعی شده است که کارایی شاخص FWI به‌عنوان یک شاخص موفق و پرکاربرد در دیگر مناطق جهان برای پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی در محدوده تالاب هامون بررسی شود. پیش‌بینی به‌هنگام آتش‌سوزی، نقش مؤثری بر کاهش خسارت‌های جانی و مالی فراهم می‌سازد. بدون شک پیش‌بینی خطر وقوع آتش‌سوزی می‌تواند اصل غافلگیری را به حداقل رسانیده و امکان مدیریت مناسب در این حوزه را عملی سازد.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

تالاب بین‌المللی هامون با مساحتی حدود ۵۷۰۰ کیلومتر مربع یکی از تالاب‌های مهم دنیا و بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین در سراسر فلات ایران به شمار می‌آید که در منطقه کویری و بیابانی ایران در شمال سیستان و بلوچستان قرار دارد (جهان‌تیغ، ۱۳۹۳). در شکل ۱ منطقه مورد مطالعه (ناحیه محدود به کادر قرمز رنگ) در محدوده تالاب هامون و ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی که از آمار آنها در این مطالعه استفاده شده، نشان داده شده است. محدوده مطالعه در برگیرنده نواحی از ۶۰/۸ تا ۶۱/۹۶ درجه شرقی و از ۳۰/۳۹ تا ۳۱/۵۷ درجه شمالی است. براساس نتایج پژوهش اسعدی اسکویی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲)، محدوده تالاب هامون در طبقه اقلیمی گرم و خشک قرار دارد.

### داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های هواشناسی، داده‌های روزانه GFEDv4، داده‌های بازتحلیل (Consolidated version 4) ECMWF ERA5 Reanalysis با اندازه تفکیک مکانی ۰/۲۵ و داده‌های روزانه FWI استفاده شد. داده‌های هواشناسی شامل متغیرهای دما، سرعت باد رطوبت نسبی در ساعت 9UTC (تقریباً همزمان با ظهر محلی است) و بارش ۲۴ ساعته برای ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی نهبندان، زابل، زهک و زاهدان (از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۱) و ایستگاه نصرت‌آباد (از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱) در مقیاس زمانی روزانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. داده‌های این ایستگاه‌ها جهت انجام روش تصحیح خطا، اعتبارسنجی روش تصحیح خطا و درنهایت تهیه لایه‌های رستری روزانه FWI در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای شناسایی سطوح سوخته از داده‌های پایگاه GFED<sup>۲</sup> نسخه ۴ (GFEDv4) استفاده شد (زندرسون و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷). GFED4 بر اساس یک مدل بیوژئوشیمیایی که بر مجموعه داده‌های مختلف از جمله داده ماهواره MODIS مشتق شده، سطوح سوخته را تخمین می‌زند (گیگلیو و همکاران<sup>۴</sup>،

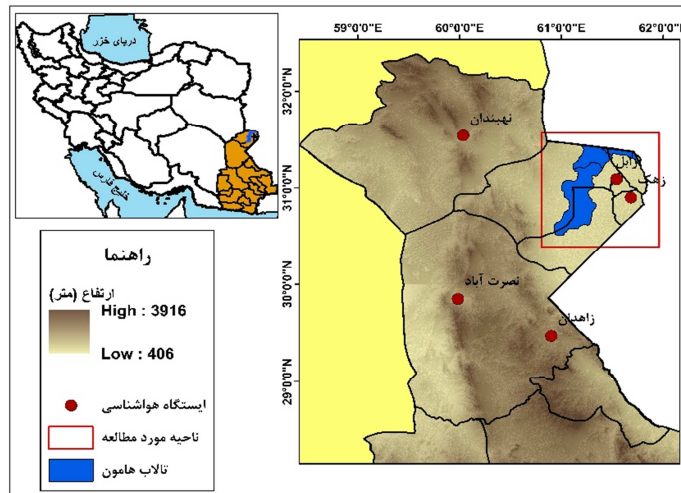
1 - Asadi Oskouei et al.

2 - Global Fire Emissions Database.

3 - Randerson et al.

4 - Giglio et al.

۲۰۱۳). در این مطالعه از داده‌های روزانه GFEDv4 با اندازه تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵، به-عنوان داده‌های مشاهده‌شده سطح سوخته (هکتار) در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. داده‌های روزانه FWI از وبگاه <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cems-fire-historical?tab=form> دریافت شد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک

### تولید لایه‌های رستری روزانه FWI

داده‌های اولیه ورودی ساختار سامانه شاخص وضع هوای آتش (FWI) شامل، داده‌های آب و هوایی (دما، سرعت باد و رطوبت نسبی در ساعت ظهر محلی و بارش ۲۴ ساعته) است. در مرحله بعد کدهای رطوبتی مواد سوختنی (FFMC، DMC و DC) و شاخص‌های خصوصیات آتش (ISI و BUI) محاسبه و در نهایت مقدار شاخص FWI حاصل می‌شود. (لاسون و آرمیتاژ<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). در این سامانه کف جنگل به سه لایه با خصوصیات فیزیکی متفاوت طبقه‌بندی می‌شود. رطوبت مواد سوختنی لایه اول با کد رطوبتی FFMC نشان داده می‌شود که نشانگر سهولت نسبی شروع آتش و قابلیت اشتعال مواد سوختی این لایه است. رطوبت مواد سوختنی لایه دوم با کد رطوبتی DMC نشان داده می‌شود که نشانگر مصرف مواد سوختی و مواد چوبی با اندازه متوسط در این لایه است. رطوبت مواد سوختنی لایه سوم با کد رطوبتی DC نشان داده می‌شود که نشانگر اثرات خشکسالی فصلی بر روی مواد سوختنی و میزان سوختن مواد در این لایه است. شاخص ISI با ترکیب اثر باد و FFMC بر سرعت گسترش، یک رتبه‌بندی عددی از سرعت قابل انتظار گسترش آتش ارائه می‌دهد. شاخص BUI با ترکیب DMC و DC یک رتبه‌بندی عددی از کل سوخت موجود برای احتراق ارائه می‌دهد. در نهایت شاخص FWI با ترکیب ISI و BUI، رتبه‌بندی عددی از خطر وقوع و گسترش آتش سوزی ارائه می‌دهد. در این مطالعه برای محاسبه شاخص FWI از روابط و دستورالعمل‌های ارائه‌شده توسط ون

<sup>1</sup> - Lawson and Armitage.

واگنر و پیکت<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) استفاده شد. در جدول ۱ مقادیر آستانه شاخص FWI و طبقات استاندارد میزان خطر وقوع آتش‌سوزی ارائه شده است (نتینوپولوس و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۲).

جدول ۱: طبقه‌بندی مقادیر FWI

	میزان خطر					
	شدید	خیلی بالا	بالا	متوسط	کم	خیلی کم
آستانه FWI	≥ ۵۰	۳۸ - ۵۰	۲۱/۳ - ۳۸	۱۱/۲ - ۲۱/۳	۵/۲ - ۱۱/۲	۰ - ۵/۲

برای تعیین آستانه‌های جدید شاخص FWI و اعتبارسنجی آن، نیاز به لایه‌های رستری از مقادیر FWI است که منطقه مورد مطالعه را پوشش دهد. دو راه برای تهیه لایه‌های رستری روزانه FWI وجود دارد: اول، محاسبه مقادیر FWI بر اساس داده‌های روزانه آب و هوایی ایستگاه‌های موجود و سپس درون‌یابی آن‌ها و دوم، استفاده از لایه‌های رستری FWI که بر اساس داده‌های باز تحلیل و شبکه‌ای ایجاد شده باشند. در این مطالعه از داده‌های باز تحلیل ECMWF ERA5 Reanalysis (Consolidated version 4) با اندازه تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده شد (ویتولو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰). بررسی مطالعات انجام شده حاکی از آن است مقادیر FWI حاصل از داده‌های باز تحلیل ECMWF ERA5 با خطا همراه هستند (جوانشیری و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰؛ مک‌الینی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰). برای تصحیح خطا، ابتدا در نقاط ایستگاهی (چهار ایستگاه زابل، زهک، نهبندان و زاهدان) مقادیر روزانه  $FWI_{ST}$  برای سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۲۱ محاسبه شد. برای شروع محاسبات FWI، مقدار اولیه کدهای رطوبتی  $FFMC=85$ ،  $DMC=6$  و  $DC=15$  فرض شد (ون واگنر و پیکت، ۱۹۸۵). برای رسیدن مقادیر کدهای رطوبتی به شرایط تعادل و واقعی، محاسبات سه سال اول را کنار گذاشته و مقادیر روزانه در ایستگاه‌ها  $FWI_{ST}$  از سال ۱۹۹۸-۲۰۲۱ مبنای بررسی‌های بعدی قرار می‌گیرند. سپس خطا ( $Error$ ) در محل ایستگاهها طبق رابطه زیر حاصل شد:

$$Error = FWI_{ECMWF\_ERA5} - FWI_{ST} \quad (۱)$$

در ادامه، خطا در محل ایستگاه‌ها با روش درون‌یابی کریجینگ به تمام نقاط شبکه داده‌های باز تحلیل ECMWF ERA5، تعمیم داده شد و لایه‌های رستری روزانه خطا تهیه شد. با کم کردن لایه‌های خطا از مقادیر  $FWI_{ECMWF\_ERA5}$ ، لایه‌های تصحیح شده  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  حاصل می‌شود. ایستگاه نصرت‌آباد چون دوره آماری کوتاهی داشت (سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱)، در فرایند تصحیح خطا کنار گذاشته شد. اما مقادیر FWI در این ایستگاه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در فرایند بررسی توانایی روش تصحیح خطا (نمودار تیلور<sup>۶</sup> و نمره مهارت<sup>۷</sup>) وارد شده‌اند. برای بررسی توانایی روش تصحیح خطا از نمودار تیلور و نمره مهارت استفاده شد. نمره مهارت بین مقادیر

1 - Van Wagner and Pickett.

2 - Ntinopoulos et al.

3 - Vitolo et al.

4 - Javanshiri et al.

5 - McElhinny et al.

6 - Tylor.

7 - Skill Score: SS

$FWI_{ECMWF\_ERA5}$  یا  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  (که با  $m$  نشان داده شده) با مشاهدات ایستگاهی  $FWI_{ST}$  (که با  $o$  نشان داده شده) به صورت زیر تعریف شد (ویلکس<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱):

$$SS = [R^2] - \left[ R - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_o} \right) \right]^2 - \left[ \frac{(\bar{m} - \bar{o})}{\sigma_o} \right]^2 \quad (2)$$

که در آن  $R$  و  $\sigma$  به ترتیب نشان دهنده انحراف معیار و ضریب همبستگی،  $\bar{m}$  و  $\bar{o}$  نیز نشان دهنده میانگین متغیرهای مورد بررسی است. حالتی که دقیقاً کلیه خصوصیات مشاهدات را پیش‌بینی و بازتولید نماید، نمره مهارت آن ۱ است. حدود تغییرات نمره مهارت  $SS$  از منفی بی‌نهایت تا ۱ می‌باشد. برای نشان دادن گرافیکی میزان توافق بین  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  و  $FWI_{ECMWF\_ERA5}$  با  $FWI_{ST}$  از نمودار تیلور استفاده شد (تیلور<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱). در نمودار تیلور هر چه مقادیر مورد مقایسه به مشاهدات شبیه‌تر باشد، آن حالت بر روی نمودار به نقطه مرجع نزدیک‌تر (obs) است.

#### تعیین آستانه‌های خطر برای شاخص FWI در منطقه مورد مطالعه

شاخص FWI به‌طور گسترده‌ای در نقاط مختلف جهان برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی به‌کار گرفته می‌شود. در محاسبه این شاخص از داده‌های اقلیمی (مانند رطوبت هوا، دما و غیره) استفاده می‌شود. این شاخص در اصل برای مناطق جنگلی کانادا توسعه یافت و بر اساس شرایط محیطی آن مناطق، مقادیر FWI در شش سطح هشدار از ۰ تا ۵۰ طبقه‌بندی شد که هر طبقه متناظر با سطوح مختلف خطر آتش‌سوزی است (جدول ۱). بنابراین برای استفاده از آن در مناطق دیگر نیاز به تعیین مقادیر آستانه‌های جدید برای طبقات FWI جهت طبقه‌بندی خطر آتش‌سوزی است.

بر اساس توابع توزیع تجمعی مقادیر روزانه FWI در هر سال (در محدوده تالاب هامون)، صدک ۹۸ام به‌عنوان مقدار آستانه سالانه  $FWI_{extreme\_value}$  در آن سال تعریف می‌شود. در ادامه، میانه مقادیر آستانه سالانه FWI به‌عنوان مقدار آستانه خطر  $FWI_{extreme\_danger}$  تعیین می‌شود. سپس  $FWI_{extreme\_danger}$  با استفاده از رابطه زیر به شدت آستانه آتش  $I_{extreme}$  تبدیل می‌شود (ون واگنر و همکاران، ۱۹۸۷):

$$\ln(0.289I_{extreme}) = 0.98[\ln(FWI_{extreme\_danger})]^{1.546} \quad (3)$$

سپس حدود آستانه دیگر طبقات بر حسب شدت آستانه آتش  $I_{extreme}$  با استفاده از یک نسبت ثابت، بین دو کلاس متوالی بر اساس یک دنباله هندسی تعیین می‌شود. چنانچه تعداد طبقات خطر آتش‌سوزی را شش سطح هشدار در نظر بگیریم، نسبت ثابت با رابطه زیر تعریف می‌شود (ویتولو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸):

$$a = (I_{extreme})^{\frac{1}{6-1}} \quad (4)$$

<sup>1</sup> - Wilks.

<sup>2</sup> - Taylor.

<sup>3</sup> - Vitolo et al.

در ادامه، مقادیر آستانه FWI برای طبقه نام  $FWI_{threshold\_i}$  برحسب رابطه زیر به دست می‌آید (ون واگنر و همکاران، ۱۹۸۷):

$$\ln(FWI_{threshold\_i}) = 1.013[\ln(0.289a^i)]^{0.64} \quad (۵)$$

#### اعتبارسنجی آستانه‌های خطر وقوع آتش‌سوزی

اینکه آیا خطر آتش‌سوزی پیش‌بینی شده به وضوح قابل تشخیص است یا خیر، متناظر با اعتبارسنجی آستانه خطر خیلی بالای آتش‌سوزی است. بدین منظور، مقدار FWI (در محدوده تالاب هامون) برای آستانه خطر خیلی بالای آتش‌سوزی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. از لایه‌های رستری روزانه سطح سوخته GFEDv4 طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۵ به‌عنوان داده وقوع آتش‌سوزی استفاده شد. به هر سلول از این داده‌ها یک مقدار باینری، یک و صفر به ترتیب برای وجود و عدم وجود سطح سوخته اختصاص داده شد. متناظر با این داده‌ها، به هر سلول از لایه‌های رستری روزانه  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  (در محدوده تالاب هامون) یک مقدار باینری، یک و صفر به ترتیب برای مقادیر بزرگ‌تر یا مساوی و کوچک‌تر از آستانه خطر خیلی بالای آتش‌سوزی اختصاص داده شد. چنانچه سلول‌های نظیر به نظیر در لایه سطح سوخته و  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  هر دو دارای مقدار یک باشند (Hits)، به معنای این است که آستانه خطر خیلی بالای FWI به درستی وقوع آتش‌سوزی را پیش‌بینی کرده است و چنانچه سلول سطح سوخته یک و سلول نظیر  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  صفر باشد (Misses)، به معنای از دست رفتن پیش‌بینی صحیح است. احتمال پیش‌بینی صحیح وقوع آتش‌سوزی POD یا حساسیت<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$POD = Sensitivity = \frac{Hits}{Misses+Hits} \quad (۶)$$

چنانچه سلول سطح سوخته صفر و سلول نظیر  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  یک باشد، به معنای هشدار کاذب (FP) وقوع آتش‌سوزی است. چنانچه سلول سطح سوخته و سلول نظیر  $FWI_{Corrected\_ECMWF\_ERA5}$  هر دو صفر باشند، به معنای پیش‌بینی صحیح عدم خطر وقوع آتش‌سوزی (TN) است. احتمال هشدار کاذب وقوع آتش‌سوزی PFA به صورت زیر تعریف می‌شود (فوکسوک و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵):

$$PFA = \frac{FP}{FP+TN} \quad (۷)$$

همچنین، ویژگی تشخیص<sup>۳</sup> به معنای احتمال پیش‌بینی صحیح عدم وقوع آتش‌سوزی است و به صورت زیر تعریف می‌شود (پریخ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸):

$$Specificity = 1 - PFA = \frac{TN}{FP+TN} \quad (۸)$$

برای مقایسه گرافیکی پارامترهای حساسیت در برابر تشخیص برای طیف وسیعی از مقادیر، از منحنی‌های مشخصه عملکرد (ROC) استفاده می‌شود. منحنی ROC یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین معیارهای ارزیابی عملکرد برای مدل‌های طبقه‌بندی کننده است (فام و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰). در نمودار ROC، با افزایش همزمان حساسیت و تشخیص،

1 - Sensitivity.

2 - Fücsök et al

3 - Specificity.

4 - Parikh et al

5 - Pham et al.

قابلیت اعتماد به عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی نیز افزایش می‌یابد. از این رو مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد (AUC) یکی دیگر از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی کننده است. AUC، یک مقدار عددی است که عملکرد کلی و نهایی یک طبقه‌بندی کننده باینری را نشان می‌دهد (هانلی و مک نیل<sup>۱</sup>، ۱۹۸۲). مقدار AUC در محدوده (۰/۵-۱) است که مقدار یک و نیم به ترتیب نشان از مطابقت کامل مدل طبقه‌بندی کننده و مدل طبقه‌بندی کننده کاملاً تصادفی است. در جدول (۲) تفسیر مقادیر AUC بیان شده است. به طور کلی، مقدار AUC باید بزرگ‌تر از ۰/۸ باشد تا عملکرد کلی مدل طبقه‌بندی کننده قابل قبول در نظر گرفته شود (نهم<sup>۲</sup>، ۲۰۲۲).

جدول ۲: تفسیر مقادیر AUC

Area under the curve (AUC)	تفسیر
$0.9 \leq AUC$	عالی
$0.8 \leq AUC < 0.9$	خوب
$0.7 \leq AUC < 0.8$	نسبتاً خوب
$0.6 \leq AUC < 0.7$	ضعیف
$0.5 \leq AUC < 0.6$	غیر قابل قبول

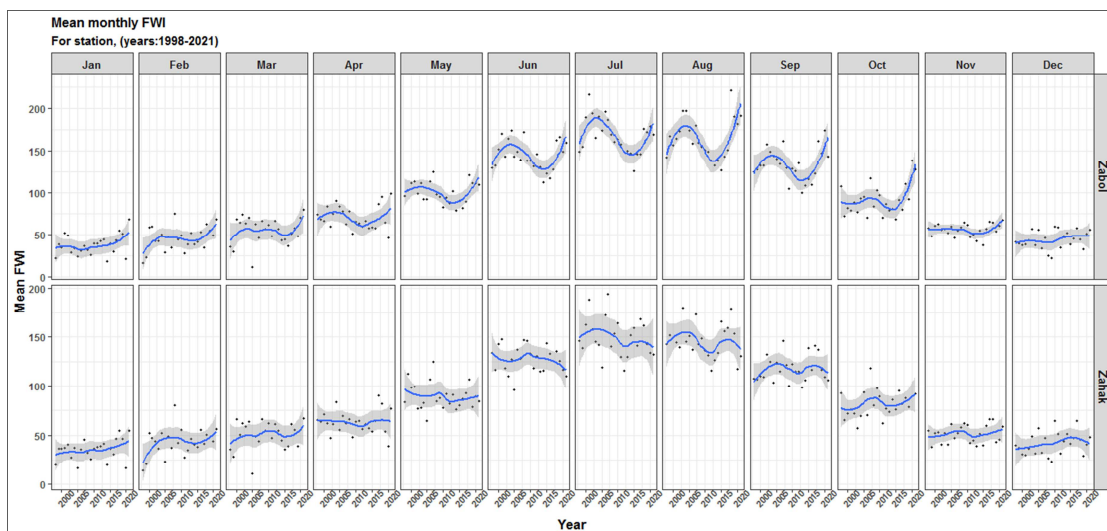
## بحث و نتایج

### شاخص FWI در ایستگاه‌های زابل و زهک

در شکل ۲ مقادیر شاخص FWI طی سال‌های ۱۹۹۸ الی ۲۰۲۱ برای دو ایستگاه زابل و زهک در نزدیکی تالاب هامون میانگین ماهانه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، پایین‌ترین مقدار متوسط ماهانه FWI در ماه‌های ژانویه و فوریه و بالاترین مقدار آن در ماه‌های جولای و آگوست رخ داده است. پس از آن دارای روند کاهشی است (شکل ۲). به طور کلی، در تمام ماه‌ها مقادیر شاخص FWI در ایستگاه زابل نسبت به زهک بیشتر است. روند تغییرات الگوی ماهانه شاخص FWI با روند تغییرات ماهانه پارامترهای هواشناسی سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و بارش متناسب است.

1 - Hanley and McNeil.

2 - Nahm



شکل ۲: میانگین ماهانه مقادیر شاخص FWI طی سال‌های ۱۹۹۸ الی ۲۰۲۱ در دو ایستگاه زابل و زهک

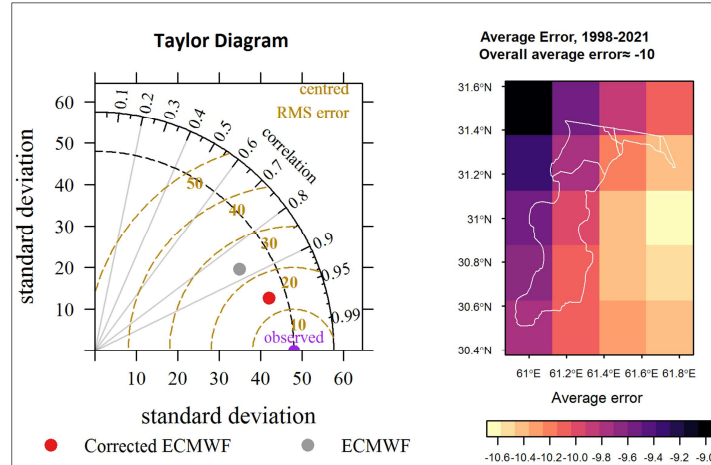
در بین پارامترهای هواشناسی، متوسط ماهانه سرعت باد بیشترین همبستگی را با تغییرات ماهانه شاخص FWI دارا بود (جدول ۳). با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت روند تغییرات الگوی ماهانه شاخص FWI به شدت به متوسط ماهانه سرعت باد وابسته است. پس از آن، دما بیشترین همبستگی را با تغییرات ماهانه شاخص FWI داشت (جدول ۳). با افزایش سرعت باد و دمای هوا مقدار شاخص FWI افزایش (همبستگی مثبت)، اما با افزایش بارش و رطوبت نسبی مقدار شاخص FWI کاهش (همبستگی منفی) یافت (جدول ۳).

جدول ۳: ضریب همبستگی، بین متوسط ماهانه شاخص FWI با متوسط ماهانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه زابل و زهک

بارش	رطوبت نسبی	دما	سرعت باد	ضریب همبستگی
-۰/۴۸	-۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۹۵	ضریب همبستگی

### لایه‌های رستری روزانه FWI

با تصحیح خطای لایه‌های رستری روزانه داده‌های بازتحلیل ECMWF ERA5 FWI با اندازه تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه، لایه‌های رستری روزانه تصحیح شده FWI در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نتایج ارزیابی توانایی روش تصحیح خطا در نمودار تیلور (شکل ۳) و جدول (۴) نشان داده شده است. روش تصحیح خطا باعث بهبود مقادیر داده‌های ECMWF شده و آن‌ها را به مقادیر مشاهده شده نزدیک‌تر کرده است (شکل ۳، نمودار تیلور)؛ به طوری که میزان همبستگی و RMSE مقادیر FWI برای داده‌های ECMWF، به ترتیب از ۰/۸۸ و ۲۳ به ۰/۹۶ و ۱۳ در حالت تصحیح شده رسید (شکل ۴، نمودار تیلور). توزیع مکانی خطای مقادیر FWI ECMWF در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. به طور کلی مقادیر ECMWF کمتر از مقادیر مشاهده شده بود (مقدار خطا منفی). متوسط خطای مقادیر ECMWF FWI طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۱ در منطقه تقریباً ۱۰- بود.



شکل ۳: نمودار تیلور (سمت چپ)، مقایسه مقادیر FWI ECMWF و تصحیح شده آن Corrected ECMWF با مقادیر مشاهده شده و نقشه متوسط توزیع مکانی خطای مقادیر FWI ECMWF در منطقه مورد مطالعه (سمت راست)

نتایج ارزیابی توانایی روش تصحیح خطا نشان داد که بعد از تصحیح خطا، نمره مهارت از ۰/۷۲ به ۰/۹۱ افزایش قابل توجه داشته است (جدول ۴). همچنین میانگین و میانه خطا برای داده‌های ECMWF FWI در حالت قبل از تصحیح خطا<sup>۱</sup> به ترتیب از -۹/۵۲ و -۷/۰۱ به -۰/۰۲ و ۰/۶۷ در حالت بعد از تصحیح خطا رسید. نظر به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت روش تصحیح خطا به خوبی توانسته است مقادیر داده‌های ECMWF FWI را تصحیح و به مقادیر مشاهده شده نزدیک کند. بنابراین، لایه‌های رستری روزانه تصحیح شده FWI با اندازه تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه، مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گرفتند.

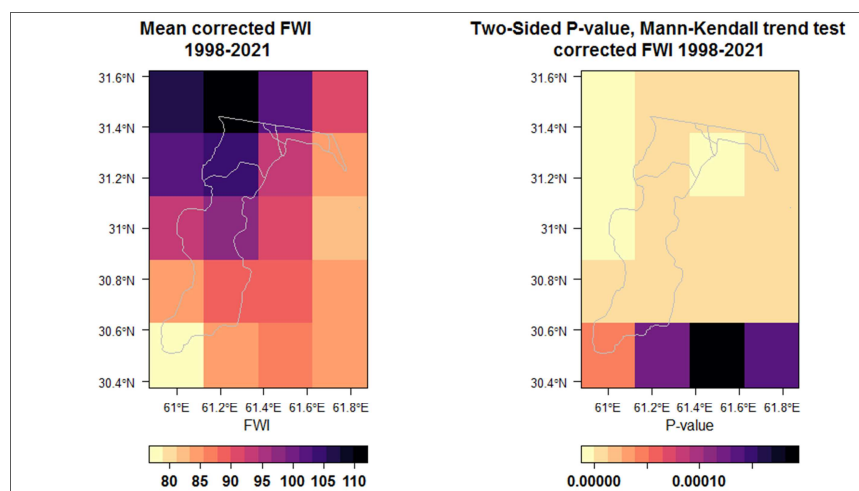
جدول ۴: میانه، میانگین خطا و نمره مهارت برای داده‌های ECMWF FWI در حالت قبل و بعد از تصحیح خطا

	میانه خطا	میانگین خطا	نمره مهارت
قبل از تصحیح خطا	-۷/۰۱	-۹/۵۲	۰/۷۲
بعد از تصحیح خطا	۰/۶۷	-۰/۰۲	۰/۹۱

### تحلیل آماری لایه‌های رستری روزانه FWI

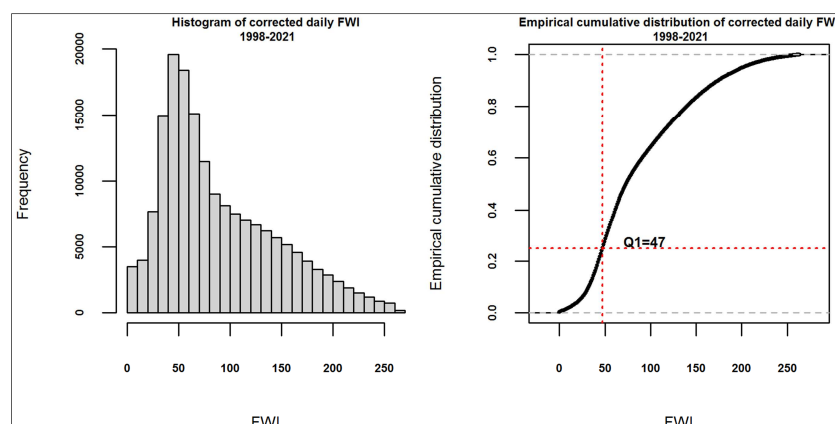
نتایج تحلیل آماری لایه‌های رستری روزانه FWI در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، متوسط کل مقدار FWI در تمام منطقه بیش از ۷۰ است (شکل ۴، نقشه سمت چپ). همچنین می‌توان گفت مقدار FWI برای نواحی شمالی‌تر به مراتب بالاتر از نواحی جنوبی‌تر است (شکل ۴، نقشه سمت چپ). نتایج آزمون روند من‌کندال نشان‌دهنده روند افزایشی مقادیر FWI در سراسر منطقه مورد مطالعه بود (شکل ۴، نقشه سمت راست).

<sup>۱</sup> - Before



شکل ۴: نقشه توزیع مکانی متوسط مقادیر FWI در منطقه (نقشه سمت چپ)، نقشه توزیع مکانی مقادیر احتمال (P-value) آزمون روند من‌کندال (نقشه سمت راست)

فراوانی مقادیر FWI و توزیع تجمعی آن در منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. فراوانی مقادیر FWI در منطقه نشان می‌دهد، بیشترین فراوانی روزانه مقادیر FWI در دسته ۴۰ تا ۵۰ و پس از آن در دسته ۵۰ تا ۶۰ رخ داده است (شکل ۵، نمودار سمت چپ). توزیع تجمعی مقادیر FWI در منطقه نشان داد که برای ۷۵ درصد روزها (طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۱) مقدار FWI بزرگ‌تر از ۴۷ است (شکل ۵، نمودار سمت راست). بنابراین اگر بخواهیم خطر وقوع آتش را بر اساس طبقات استاندارد (جدول ۱) پیش‌بینی نماییم، کل روزهای سال در منطقه مورد مطالعه در طبقات با خطر بسیار بالا و شدید قرار می‌گیرند. بنابراین نیاز است که بر اساس شرایط منطقه، طبقات جدیدی از خطر وقوع آتش تعریف شده و آستانه‌های جدیدی برای طبقات محاسبه شود. بالا بودن مقادیر FWI نسبت به آستانه‌های استاندارد خطر آتش‌سوزی و همچنین روند افزایشی معنادار آن حاکی از افزایش خطر آتش‌سوزی در منطقه خواهد بود.



شکل ۵: نمودار فراوانی مقادیر FWI در منطقه (نمودار سمت چپ) و نمودار توزیع تجمعی آن (نمودار سمت راست). Q1 نشان‌دهنده چارک اول می‌باشد.

### آستانه‌های خطر وقوع آتش سوزی شاخص FWI

در جدول ۵، مقادیر آستانه‌های طبقات مختلف خطر وقوع آتش سوزی شاخص FWI، برای دو ایستگاه زابل و زهک و داده‌های تصحیح و تصحیح نشده ECMWF FWI نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵، تفاوت قابل توجهی بین آستانه‌های طبقات مختلف با مقادیر آستانه‌های استاندارد وجود دارد. به عنوان مثال، مقدار آستانه برای طبقه با خطر بسیار بالا در حالت استاندارد برابر ۳۸، در حالی که برای کل منطقه لایه‌های رستری تصحیح شده<sup>۱</sup>، برابر ۱۰۵ است (جدول ۵). مقادیر آستانه‌های طبقات مختلف در ایستگاه زابل تقریباً با مقادیر آستانه‌های لایه‌های رستری تصحیح شده FWI برابر است (جدول ۵). نکته قابل توجه اینکه که مقدار آستانه FWI برای طبقه خطر شدید در حالت استاندارد برابر ۵۰ است در حالی که مقدار این آستانه در سایر حالات بیشتر از ۲۱۴ است. در این مطالعه از مقادیر آستانه‌های FWI برآورده شده برای کل منطقه یعنی لایه‌های رستری تصحیح شده FWI استفاده شد.

جدول ۵: آستانه‌های خطر وقوع آتش سوزی شاخص FWI، برای دو ایستگاه زابل و زهک و داده‌های تصحیح و تصحیح نشده FWI ECMWF در منطقه مورد مطالعه

	طبقه‌بندی شاخص FWI					
	شدید	خیلی بالا	بالا	متوسط	کم	خیلی کم
زابل	$\geq 226$	۱۰۶-۲۳۶	۴۳-۱۰۶	۱۶-۴۳	۱۶-۴	۰-۴
زهک	$\geq 225$	۱۰۱-۲۲۵	۴۲-۱۰۱	۱۵-۴۲	۴-۱۵	۰-۴
داده‌های تصحیح شده FWI	$\geq 236$	۱۰۵-۲۳۶	۴۳-۱۰۵	۱۶-۴۳	۱۶-۴	۰-۴
داده‌های تصحیح نشده FWI	$\geq 214$	۹۷-۲۱۴	۴۰-۹۷	۱۵-۴۰	۴-۱۵	۰-۴
طبقه‌بندی استاندارد	$\geq 50$	۳۸-۵۰	۲۱/۳-۳۸	۱۱/۲-۲۱/۳	۵/۲-۱۱/۲	۰-۵/۲

### اعتبارسنجی آستانه خطر بسیار بالای وقوع آتش سوزی

در جدول ۶ و شکل ۷ نتایج اعتبارسنجی آستانه خطر بسیار بالای وقوع آتش سوزی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. اعتبارسنجی برای سه آستانه خطر بسیار بالا، آستانه استاندارد ۳۸، آستانه داده‌های تصحیح نشده<sup>۲</sup> و ۹۷ و آستانه داده‌های تصحیح شده<sup>۳</sup> ۱۰۵ انجام شد. احتمال پیش‌بینی صحیح وقوع آتش سوزی یا حساسیت<sup>۴</sup> برای سه آستانه برابر ۱۰۰ درصد بود (جدول ۶). احتمال پیش‌بینی صحیح عدم وقوع آتش سوزی یا تشخیص<sup>۵</sup> برای آستانه ۱۰۵ با مقدار ۶۷ درصد نسبت به سایر آستانه‌ها عملکرد بهتری را دارا بود (جدول ۶). احتمال هشدار کاذب وقوع آتش سوزی PFA با مقدار ۸۵ درصد برای آستانه استاندارد، بدترین عملکرد را داشت (جدول ۶). این در حالی است که برای آستانه جدید ۱۰۵، این احتمال به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و به ۳۳ درصد رسید (جدول ۶). عملکرد و دقت کلی آستانه‌های خطر بسیار بالا بر حسب مقدار AUC و منحنی‌های ROC در شکل ۶ و جدول ۶ نشان داده شده است. آستانه جدید ۱۰۵، مقدار AUC را از ۰/۵۷۶۴ (دقت غیرقابل قبول) به ۰/۸۳۴۱ رساند که نشان‌دهنده

1 - Corrected FWI ECMWF.

2 - Not Corrected FWI ECMWF.

3 - Corrected FWI ECMWF

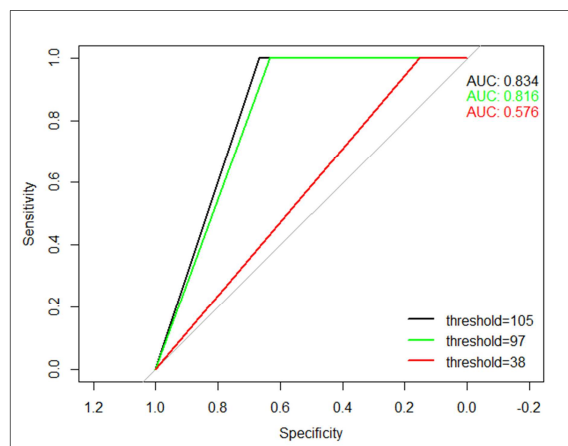
4 - Sensitivity.

5 - Specificity.

دقت خوب و قابل قبول می‌باشد (شکل ۶ و جدول ۶). بنابراین می‌توان گفت تصحیح داده‌های روزانه FWI و سپس تعیین آستانه‌های جدید (آستانه ۱۰۵) سبب دستیابی به بالاترین AUC شده است.

جدول ۶: نتایج اعتبارسنجی آستانه خطر بسیار بالا

آستانه	حساسیت	تشخیص	PFA	AUC	Confidence interval 95% AUC
۱۰۵	۱۰۰	۶۷	۳۳	۰/۸۳۴۱	۰/۸۳۲۵ - ۰/۸۳۵۷
۹۷	۱۰۰	۶۳	۳۷	۰/۸۱۶۳	۰/۸۱۴۶ - ۰/۸۱۷۹
۳۸	۱۰۰	۱۵	۸۵	۰/۵۷۶۴	۰/۵۷۵۲ - ۰/۵۷۷۷



شکل ۶: منحنی‌های ROC و مقادیر AUC حاصل اعتبارسنجی آستانه‌های خطر بسیار بالا برای آستانه استاندارد ۳۸ (قرمز)، آستانه FWI ECMWF تصحیح نشده ۹۷ (سبز) و آستانه ECMWF تصحیح شده ۱۰۵ (سیاه).

### نتیجه گیری

درک و ارزیابی خطر آتش‌سوزی هواشناسی برای مدیریت آتش از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور، شاخص FWI به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی خطر آتش‌سوزی به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که در بین پارامترهای هواشناسی، متوسط ماهانه سرعت باد بیشترین همبستگی را با تغییرات ماهانه شاخص FWI دارد. در همین راستا نتایج پژوهش نیتینوپولوس و همکاران<sup>(۲۰۲۲)</sup> نیز نشان داد که همبستگی بسیار بالایی بین FWI و سرعت باد وجود دارد.

الگوی تغییرات ماهانه FWI شبیه به تغییرات الگوی سرعت باد و دما، یک الگوی افزایشی و کاهش‌ی است. همچنین نتایج حاکی از آن بود که روش تصحیح خطا به خوبی می‌تواند خطای لایه‌های رستری روزانه داده‌های بازتحلیل ECMWF ERA5 FWI را کاهش داده و به مقادیر مشاهده‌شده نزدیک کند. به‌طور متوسط مقادیر روزانه FWI داده‌های بازتحلیل ECMWF ERA5، تقریباً به اندازه ۱۰ واحد کمتر از مقادیر مشاهده‌شده بوده است. در همین زمینه مک‌الینی و همکاران<sup>(۲۰۲۰)</sup> در پژوهش خود نشان دادند که مقادیر FWI محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های ECMWF مطابقت خوبی با محاسبات مبتنی بر داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی دارد (با متوسط خطای مطلق ۵ و

1 - Ntinopoulos et al

2 - McElhinny et al

متوسط انحراف  $(\pm 3/7)$ -. نتایج نشان داد مقدار FWI برای نواحی شمالی‌تر به مراتب بزرگ‌تر از نواحی جنوبی‌تر است و در سراسر منطقه مورد مطالعه روند افزایشی داشته است. با توجه به فراوانی توزیع مقادیر روزانه FWI، تعیین آستانه‌های جدیدی برای طبقات مختلف خطر وقوع آتش یک نیاز اساسی است. نتایج نشان داد تفاوت قابل‌توجهی بین آستانه‌های جدید با مقادیر آستانه‌های استاندارد وجود دارد؛ به‌طوری که آستانه خطر بسیار بالا که در شرایط استاندارد برابر ۲۸ است به ۱۰۵ رسیده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد دقت کل در پیش‌بینی خطر بسیار بالای وقوع آتش با در نظر گرفتن آستانه جدید ۱۰۵، از ۰/۵۷۶ در شرایط استاندارد به ۰/۸۳۴ خواهد رسید که دقت خوبی است.

## منابع

- پرنیان، مینا؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ رهنما، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی روش‌های پایش و پیش‌بینی آتش‌سوزی نواحی رویشی ایران و جهان. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۲(۴۷):، صص ۱۰۱-۱۲۰.
- جهان‌تیغ، منصور. (۱۳۹۳). مقایسه میزان تولید علوفه *Aeluropus lagopides* در تالاب هامون در زمان خشکسالی و پرآبی. نشریه اکو بیولوژی تالاب، ۶(۴)، صص ۷۳-۸۳.
- جوانشیری، زهره؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ فلامرزی، یاشار؛ عباسی، فاطمه. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل پایگاه‌های اقلیمی جهانی CFS-v2، MERRA-2، ERA-5 برای برآورد دمای متوسط در مناطق مختلف کشور. مجله ژئوفیزیک ایران. [doi:10.30499/IJG.2022.360882.1452](https://doi.org/10.30499/IJG.2022.360882.1452)
- Asadi Oskouei, E., Delsouz Khaki, B., Kouzegaran, S., Navidi, M. N., Haghghatd, M., Davatgar, N., Lopez-Baeza, E. (2022). Mapping Climate Zones of Iran Using Hybrid Interpolation Methods. *Remote Sensing*, 14(11), 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs14112632>
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., San-Miguel, J. (2020). Fire weather index: the skill provided by ECMWF ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 20(8): 2365-2378. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2365-2020.2020>.
- Eriksson, C. P., Johansson, N., McNamee, M. (2023). The performance of wildfire danger indices: A Swedish case study. *Safety Science*, 159:106038. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106038>
- Fücsök, F., Müller, C., Scharmach, M. (2005). Measuring of the Reliability of NDE; 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing „Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, Portorož, Slovenia, September 1-3.
- Giglio, L., Randerson, J. T., Van Der Werf, G. R. (2013). Analysis of daily, monthly, and annual burned areas using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Bio geosciences*, 118(1): 317-328. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>
- Hanley, J. A., McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1): 29-36.
- Kalbali, E., Ziaee, S., Najafabadi, M. M., Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production*, 280:124067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124067>
- Lawson, B. D., Armitage, O. B. (2008). Weather guide for the Canadian forest fire danger rating system.; Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta; p 85.
- McElhinny, M., Beckers, J. F., Hanes, C., Flannigan, M., Jain, P. (2020). A high-resolution reanalysis of global fire weather from 1979 to 2018-overwintering the Drought Code. *Earth System Science Data*, 12(3):1823-1833. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1823-2020>
- Mu, M., Randerson, J. T., Van der Werf, G. R., Giglio, L., Kasibhatla, P., Morton, D., Collatz, G. J., DeFries, R. S., Hyer, E. J., Prins, E. M. (2011). Daily and 3-hourly variability in global fire emissions and consequences for atmospheric model predictions of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D24): 1-19. <https://doi.org/10.1029/2011JD016245>
- Nahm, F. S. (2022). Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians. *Korean Journal of Anesthesiology*, 75(1): 25-36. <https://doi.org/10.4097/kja.21209>

- Ntinopoulos, N., Spiliotopoulos, M., Vasiliades, L., Mylopoulos, N. (2022). Contribution to the Study of Forest Fires in Semi-Arid Regions with the Use of Canadian Fire Weather Index Application in Greece. *Climate*, 10(10): 143. <https://doi.org/10.3390/cli10100143>
- Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Sekhar, G. C., Thomas, R. (2008). Understanding and using sensitivity, specificity, and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology*, 56(1): 45-50. <https://doi.org/10.4103/0301-4738.37595>
- Pham, B. T., Jaafari, A., Avand, M., Al-Ansari, N., Dinh Du, T., Yen, H. P. H., Phong, T. Van, Nguyen, D. H., Le, H. Van., Mafi-Gholami, D. (2020). Performance evaluation of machine learning methods for forest fire modeling and prediction. *Symmetry*, 12(6): 1-22. <https://doi.org/10.3390/sym12061022>
- Pinto, M. M., DaCamara, C. C., Hurdud, A., Trigo, R. M., Trigo, I. F. (2020). Enhancing the fire weather index with atmospheric instability information. *Environmental Research Letters*, 15(9): 0940b7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e22>
- Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., Van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E., Van der Werf, G. R. (2021). African burned areas and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse-resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(9): e2011160118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011160118>
- Randerson, J. T.; Van Der Werf, G. R.; Giglio, L., Collatz, G. J; Kasibhatla, P. S.(2017). Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4).; ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1293>
- Sonnier, G., Quintana-Ascencio, P. F., Bohlen, P. J., Fauth, J. E., Jenkins, D. G., Boughton, E. H. (2020). Pasture management, grazing, and fire interact to determine wetland provisioning in a subtropical agroecosystem. *Ecosphere*, 11(8): e03209. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3209>
- Steinfeld, D., Peter, A., Martius, O., Brönnimann, S. (2022). Assessing the performance of various fire weather indices for wildfire occurrence in Northern Switzerland. *EGUsphere*, 2022:1–23. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-92>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. *Canadian Forestry Service. Forestry Technical Report*, 35, 37.
- Van Wagner, C. E., Pickett, T. L. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system (Vol. 33).; Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. *Forestry Technical Report* 33., p18.
- Van Wees, D., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Rogers, B. M., Chen, Y., Veraverbeke, S., Giglio, L., Morton, D. C. (2022). Global biomass burning fuel consumption and emissions at a 500-m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED). *Geoscientific Model Development Discussions*, 15(22): 8411–8437. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>
- 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. <https://doi.org/10.3369/tethys.2018.15.03>
- Varela, V., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Karozis, S., Politi, N., Giroud, F. (2019). Projection of forest fire danger due to climate change in the French Mediterranean region. *Sustainability*, 11(16), 4284. <https://doi.org/10.3390/su11164284>
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Coughlan, R., San-Miguel-Ayanz, J., Libertá, G., Krzeminski, B. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Scientific Data*, 7(1): 1–11. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12497732>
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., D'Andrea, M. (2018). Caliver: An R package for Calibration and Verification of forest fire gridded model outputs. *PloS One*, 13(1): e0189419. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189419>
- Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M.-A., Anderson, K., Moore, B., Flannigan, M. D. (2017). offers an R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecological Processes*, 6(1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0070-z>
- Wilks, D. S., *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 3rd ed.; Academic press., 2011; p200.
- Yang, G., & Di, X. (2011). Adaptation of the Canadian Forest Fire Weather Index system and its application. 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2: 55–58. <https://doi.org/10.1109/CSAE.2011.5952422>

## References

### References (in Persian)

- Jahantigh, M. (2015). Compare forage product of *Aeluropus lagopides* in Hamoun wetland in normal years and drought. *Journal of Wetland Ecology*, 6(4), 73-83. [In Persian]
- Javanshiri, Z; Asadi Oskouei, E; Falamarzi, Y; Abasi, F., Evaluation of the accuracy of the reanalysis data of global climate databases CFS-v2, MERRA-2, ERA-5 for estimating the average temperature in different regions of the country. *Iranian Journal of Geophysics*. [doi:10.30499/IJG.2022.360882.1452](https://doi.org/10.30499/IJG.2022.360882.1452). [In Persian]
- Parnian, M., Asadi Oskouei, E., Rahnama, M. (2021). Investigation of fire monitoring methods in vegetative areas of Iran and the world. *Journal of Climate Research*, 12(47):101–120. [In Persian]

### References (in English)

- Asadi Oskouei, E., Delsouz Khaki, B., Kouzegaran, S., Navidi, M. N., Haghghatd, M., Davatgar, N., Lopez-Baeza, E. (2022). Mapping Climate Zones of Iran Using Hybrid Interpolation Methods. *Remote Sensing*, 14(11), 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs14112632>
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., San-Miguel, J. (2020). Fire weather index: the skill provided by ECMWF ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 20(8): 2365–2378. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2365-2020>
- Eriksson, C. P., Johansson, N., McNamee, M. (2023). The performance of wildfire danger indices: A Swedish case study. *Safety Science*, 159:106038. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106038>
- Fücsök, F., Müller, C., Scharmach, M. (2005). Measuring of the Reliability of NDE; 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing „Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, Portorož, Slovenia, September 1-3.
- Giglio, L., Randerson, J. T., Van Der Werf, G. R. (2013). Analysis of daily, monthly, and annual burned areas using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Bio geosciences*, 118(1): 317–328. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>
- Hanley, J. A., McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1): 29–36.
- Kalballi, E., Ziaee, S., Najafabadi, M. M., Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production*, 280:124067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124067>
- Lawson, B. D., Armitage, O. B. (2008). Weather guide for the Canadian forest fire danger rating system.; Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta; p 85.
- McElhinny, M., Beckers, J. F., Hanes, C., Flannigan, M., Jain, P. (2020). A high-resolution reanalysis of global fire weather from 1979 to 2018—overwintering the Drought Code. *Earth System Science Data*, 12(3):1823–1833. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1823-2020>
- Mu, M., Randerson, J. T., Van der Werf, G. R., Giglio, L., Kasibhatla, P., Morton, D., Collatz, G. J., DeFries, R. S., Hyer, E. J., Prins, E. M. (2011). Daily and 3-hourly variability in global fire emissions and consequences for atmospheric model predictions of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D24): 1-19. <https://doi.org/10.1029/2011JD016245>
- Nahm, F. S. (2022). Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians. *Korean Journal of Anesthesiology*, 75(1): 25–36. <https://doi.org/10.4097/kja.21209>
- Ntinopoulos, N., Spiliotopoulos, M., Vasiliades, L., Mylopoulos, N. (2022). Contribution to the Study of Forest Fires in Semi-Arid Regions with the Use of Canadian Fire Weather Index Application in Greece. *Climate*, 10(10): 143. <https://doi.org/10.3390/cli10100143>
- Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Sekhar, G. C., Thomas, R. (2008). Understanding and using sensitivity, specificity, and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology*, 56(1): 45-50. <https://doi.org/10.4103/0301-4738.37595>
- Pham, B. T., Jaafari, A., Avand, M., Al-Ansari, N., Dinh Du, T., Yen, H. P. H., Phong, T. Van, Nguyen, D. H., Le, H. Van., Mafi-Gholami, D. (2020). Performance evaluation of machine learning methods for forest fire modeling and prediction. *Symmetry*, 12(6): 1-22. <https://doi.org/10.3390/sym12061022>
- Pinto, M. M., DaCamara, C. C., Hurduc, A., Trigo, R. M., Trigo, I. F. (2020). Enhancing the fire weather index with atmospheric instability information. *Environmental Research Letters*, 15(9): 0940b7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e22>
- Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., Van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E., Van der Werf, G. R. (2021). African burned areas and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse-resolution satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(9): e2011160118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011160118>
- Randerson, J. T; Van Der Werf, G. R; Giglio, L., Collatz, G. J; Kasibhatla, P. S.(2017). Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4); ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1293>

- Sonnier, G., Quintana-Ascencio, P. F., Bohlen, P. J., Fauth, J. E., Jenkins, D. G., Boughton, E. H. (2020). Pasture management, grazing, and fire interact to determine wetland provisioning in a subtropical agroecosystem. *Ecosphere*, 11(8): e03209. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3209>
- Steinfeld, D., Peter, A., Martius, O., Brönnimann, S. (2022). Assessing the performance of various fire weather indices for wildfire occurrence in Northern Switzerland. *EGUsphere*, 2022:1–23. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-92>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. Canadian Forestry Service. Forestry Technical Report, 35, 37.
- Van Wagner, C. E., Pickett, T. L. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system (Vol. 33).; Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. Forestry Technical Report 33., p18.
- Van Wees, D., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Rogers, B. M., Chen, Y., Veraverbeke, S., Giglio, L., Morton, D. C. (2022). Global biomass burning fuel consumption and emissions at a 500-m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED). *Geoscientific Model Development Discussions*, 15(22): 8411–8437. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>
- 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. <https://doi.org/10.3369/tethys.2018.15.03>.
- Varela, V., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Karozis, S., Politi, N., Giroud, F. (2019). Projection of forest fire danger due to climate change in the French Mediterranean region. *Sustainability*, 11(16), 4284. <https://doi.org/10.3390/su11164284>
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Coughlan, R., San-Miguel-Ayanz, J., Libertá, G., Krzeminski, B. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Scientific Data*, 7(1): 1–11. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12497732>
- Vitolo, C., Di Giuseppe, F., D'Andrea, M. (2018). Caliver: An R package for Calibration and Verification of forest fire gridded model outputs. *PloS One*, 13(1): e0189419. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189419>.
- Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M.-A., Anderson, K., Moore, B., Flannigan, M. D. (2017). offers an R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecological Processes*, 6(1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0070-z>
- Wilks, D. S., *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 3rd ed.; Academic press., 2011; p200.
- Yang, G., & Di, X. (2011). Adaptation of the Canadian Forest Fire Weather Index system and its application. 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2: 55–58. <https://doi.org/10.1109/CSAE.2011.5952422>.