

Original Article



Identifying Fire-Prone Areas in the Vegetation of Lorestan Province Using Infrared Images

Samad Khosravi Yeganeh, Hamed Heydari, Mustafa Karampour^{*id}**Affiliation**

Dep. of Geography,
Faculty of Literature and
Humanities Sciences,
Lorestan University,
Lorestan, Iran

ABSTRACT

Introduction: In each region, drought conditions vary from moderate to severe and with different durations, which require continuous and operational monitoring. The longer a drought occurs, the greater its effects on vegetation and water resources, and the more severe the drought, which can limit human services and alter natural systems. The effects of drought include habitat destruction for wildlife and water quality, reduced access to water resources, etc. and as a result, disruptions such as fire incidents and other natural disasters increase. Vegetation in each region, especially in different regions of Lorestan province, is at risk of numerous fires every year due to the lack of rain and dryness of the environment. For this reason, the issue of revealing and identifying fire-prone areas in relation to the most important climatic element (rainfall) has been selected and carried out, which can facilitate appropriate and preventive measures to protect vegetation areas. In this research, a combined method has been used.

Material and Methods: In this study, an attempt has been made to investigate the drought condition of vegetation in Lorestan province by using Suomi NPP infrared images using NDVI, VCI and TCI indices. The studied period of 2013-2021 corresponds to the first of April to the end of July (week of 13-26 AD) as a weekly average. The monthly average of Standard Precipitation Index (SPI) using precipitation data, the use of monthly precipitation data from Aligodarz, Durood, Khorramabad, Borujerd, Noorabad, Kohdasht and Azna weather stations was done to analyze the precipitation situation well and separate dry and wet months from each other. Then the correlation coefficient of SPI index with each vegetation index (NDVI, VCI and TCI) is calculated.

Results and Discussion: Based on the rainfall data recorded in the meteorological stations of Lorestan province, it can be said that there is no rainfall in the study area in the summer season (July, August and September) and only in the autumn, winter and spring seasons. Therefore, the water year in Lorestan province starts approximately from the third decade of September and continues until the second and third decade of June every year. This indicates the very dry air and lack of humidity. Dry air or lack of humidity and increase in temperature provide the necessary conditions for causing fire in the province. In this article, they put a dry season in the summer season of Lorestan province and August is the driest month of the year.

Conclusion: The results of this research showed that the vegetation in Lorestan province is always facing the risk of fire and this is very high in the years when there is a lack of rainfall, in different months. It was proved that if there is a lack of rainfall in the first months of the water year, there is a risk of vegetation fire even in the cold months of the year, and this risk increases significantly in the hot months of the year, which is the case in 2021. there have been. SPI calculations showed that the months of July, August and September are negative in Lorestan province. The results show that the best indicator is based on satellite images for monitoring vegetation drought and fire risk in the study area (TCI). In the years 2013 and 2015, the highest fire risk occurred in the western and central regions of Lorestan province. In 2021, the most severe fire risk has occurred in vegetation in the studied area. Due to the large changes and dispersion of vegetation indicators effective in the occurrence of fires in terms of time and place, Spearman's non-parametric correlation has been used.

Keywords: Vegetation fire, Drought, Precipitation, Infrared images, Lorestan pro.

Citation:

Khosravi Yeganeh, S.,
Heydari, H., Karampour, M.,
Identifying Fire-Prone Areas
in the Vegetation of Lorestan
Province Using Infrared
Images, *Iran J Remote Sens
GIS*. 17(1):151-170.

* Corresponding Author: Karampour.m@lu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.234303.1196>

Received: 2023.12.29

Accepted: 2024.03.12





شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان با استفاده از تصاویر فرسرخ

صمد خسروی یگانه، حامد حیدری، مصطفی کرم‌پور*

سمت

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، ایران

چکیده

سابقه و هدف: در هر منطقه‌ای شرایط خشکسالی، از متوسط تا شدید و با مدت‌زمان متفاوت، متغیر است که این مسئله نظارت مداوم و عملیاتی را می‌طلبد. هرچه خشکسالی در مدت‌زمانی طولانی‌تر رخ دهد، تأثیرات آن در پوشش گیاهی و منابع آبی بیشتر است و خشکسالی تشدید می‌شود؛ در نتیجه، ممکن است خدمات‌رسانی به انسان‌ها محدود شود و دستگاه‌های طبیعی تغییر یابد. آثار خشکسالی شامل تخریب زیستگاه‌های حیات‌وحش و کاهش کیفیت آب، کاهش دسترسی به منابع آب و مواردی دیگر می‌شود و در نتیجه آن، اختلالاتی مانند حوادث آتش‌سوزی و دیگر حوادث طبیعی افزایش می‌یابد. پوشش گیاهی در هر منطقه، به‌ویژه در مناطق گوناگون استان لرستان، به‌دلیل کمبود بارش و خشکی محیط، هر ساله در معرض خطر وقوع آتش‌سوزی‌های متعدد قرار دارد. به همین دلیل، موضوع آشکارسازی و مشخص کردن مناطق مستعد آتش‌سوزی در رابطه با مهم‌ترین عنصر اقلیمی (بارش) انتخاب و انجام شده است که می‌تواند اقدامات مناسب و پیشگیرانه برای حفاظت از مناطق پوشش گیاهی را تسهیل کند. در این تحقیق، سعی شده است از روش ترکیبی استفاده شود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، تلاش شده است با استفاده از تصاویر فرسرخ سنجنده Suomi NPP بهره‌گیری از شاخص‌های NDVI، VCI و TCI وضعیت خشکسالی پوشش گیاهی در استان لرستان بررسی شود. دوره مورد مطالعه ۲۰۱۳-۲۰۲۱، از اول آوریل تا انتهای جولای (هفته ۱۳ تا ۲۶ میلادی)، به‌صورت میانگین هفتگی است. میانگین ماهیانه شاخص استاندارد بارش (SPI) با استفاده از داده‌های بارش ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی الیگودرز، دورود، خرم‌آباد، بروجرد، نورآباد، کوهدشت و ازنا مشخص شده است تا وضعیت بارش به‌خوبی تحلیل شود و ماه‌های خشک و مرطوب از یکدیگر تفکیک شود. سپس ضریب همبستگی شاخص SPI با هریک از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI)، VCI و TCI محاسبه شده است.

نتایج و بحث: براساس داده‌های ثبت‌شده بارش در ایستگاه‌های هواشناسی استان لرستان، می‌توان گفت که در فصل تابستان، (ژوئیه، اوت و سپتامبر) در محدوده مطالعاتی بارش رخ نمی‌دهد و فقط در فصل‌های پاییز، زمستان و بهار شاهد بارش هستیم. بنابراین سال آبی در استان لرستان تقریباً از دهه سوم سپتامبر آغاز و تا دهه دوم و سوم ژوئن هر سال ادامه دارد. این نکته نشان‌دهنده خشکی بسیار زیاد هوا و کمبود رطوبت است. خشکی هوا یا کمبود رطوبت و افزایش دما شرایط لازم را برای ایجاد آتش‌سوزی در استان، فراهم می‌کند. در این نوشتار، در فصل تابستان، استان لرستان یک فصل خشک را می‌گذراند و ماه اوت خشک‌ترین ماه سال است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که همواره پوشش گیاهی در استان لرستان با خطر وقوع آتش‌سوزی روبه‌روست و این حوادث، طی سال‌هایی که کمبود بارش وجود داشته است، در ماه‌های گوناگون بسیار زیاد است. اثبات شد که چنانچه در ماه‌های اول سال آبی کمبود بارش وجود داشته باشد، خطر آتش‌سوزی پوشش گیاهی، حتی در ماه‌های سرد سال، وجود دارد. این خطر در ماه‌های گرم سال افزایش شایان توجهی می‌یابد و این مسئله در سال ۲۰۲۱ رخ داده است. محاسبات SPI نشان داد ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر در استان لرستان شاخص بارندگی منفی است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین شاخص مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، به‌منظور پایش خشکسالی پوشش گیاهی و خطر آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه، TCI است. در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ بیشترین شدت خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی، در مناطق غربی و مرکزی استان لرستان، وجود داشته است. در سال ۲۰۲۱، بیشترین شدت خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی، در منطقه مورد مطالعه، به وقوع پیوسته است. به‌دلیل تغییرات زیاد و پراکندگی میزان شاخص‌های پوشش گیاهی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی از لحاظ زمانی و مکانی، همبستگی ناپارامتریک اسپرمن به کار رفته است.

واژه‌های کلیدی: آتش‌سوزی پوشش گیاهی، خشکسالی، بارش، تصاویر فرسرخ، استان لرستان.

استناد: خسروی یگانه، ص.، حیدری، ح.، کرم‌پور، م.، شناسایی مناطق مستعد آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان با استفاده از تصاویر فرسرخ، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴: ۱۵۱-۱۷۰.



۱- مقدمه

در هر منطقه‌ای شرایط خشکسالی، از متوسط تا شدید و با مدت‌زمان متفاوت، متغیر است که به نظارت مداوم و عملیاتی نیاز دارد. هرچه خشکسالی در مدت‌زمانی طولانی‌تر رخ دهد، تأثیرات آن در پوشش گیاهی و منابع آبی بیشتر است و خشکسالی تشدید می‌شود؛ این شرایط می‌تواند خدمات‌رسانی را برای انسان‌ها محدود کند و دستگاه‌های طبیعی را تغییر دهد. تأثیرات خشکسالی شامل تخریب زیستگاه‌های حیات‌وحش و کاهش کیفیت آب، کاهش دسترسی به منابع آب و مواردی دیگر است (Brown et al., 2008) و در نتیجه، اختلالاتی مانند حوادث آتش‌سوزی و دیگر حوادث طبیعی افزایش می‌یابد (Littell et al., 2016). خشکسالی ممکن است در کشاورزی، منابع آب، تولید انرژی و بسیاری از جنبه‌های دیگر جامعه نیز تأثیر بگذارد. پایش خشکسالی برای محققان و مدیران و تصمیم‌گیرندگان، به‌منظور شناسایی مناطق گوناگون، در برنامه‌ریزی برای کاهش خشکسالی ضروری است. سنجش از دور مبتنی بر ماهواره و انواع حسگرهای گوناگون در دسترس برای پایش خشکسالی پوشش گیاهی به‌دلیل پوشش یکپارچه، چرخه تکرار زمانی بالا و مشاهدات مستمر با وضوح مناسب ماهواره‌ای، ابزار مفیدی به‌شمار می‌رود (Tadesse et al., 2014). آتش‌سوزی نقش مهمی در چرخه کربن زمینی و عملکرد اکوسیستم ایفا می‌کند و به‌صورت فرایند اختلال طبیعی، در بیشتر نقاط سطح زمین رواج دارد (Mansoor et al., 2022; Mays et al., 2022). در نتیجه تغییرات آب‌وهوایی طی دهه‌های اخیر، فراوانی و شدت آتش‌سوزی‌های در مناطق جنگلی و مراتع در سطح جهانی افزایش یافته است (Westerling, 2016) و این وضعیت به ایجاد خسارات اقتصادی و انسانی و همچنین آلودگی زیست‌محیطی چشمگیری منجر شده است (Brown et al., 2020). درک چگونگی واکنش آتش‌سوزی‌های جنگلی و تغییرات آب‌وهوایی برای نظارت، پیش‌بینی و توسعه پیشگیری و برنامه‌های

کنترلی در برابر آتش‌سوزی مهم است. شرایط آب‌وهوایی بیشتر از طریق افزایش خشکی هوا، گرمایش سطح زمین و وقوع انفجارهای دمایی در احتمال آتش‌سوزی تأثیر می‌گذارد (Pausas & Keeley, 2009; Pausas & Ribeiro, 2013). امروزه، حتی در مناطق نسبتاً مرطوب، آتش‌سوزی‌های جنگلی رخ می‌دهد. در مقایسه با حالت مرطوب، مناطق خشک به‌منزله محلی در نظر گرفته شده‌اند که امکان تغییر در اشتعال‌پذیری سوخت محلی را فراهم می‌کنند. ازسوی دیگر دوره‌های خشکسالی مکرراً به وقوع می‌پیوندد و در نتیجه، سوخت‌های خشک را فراهم می‌کند (Jones et al., 2022). به‌رغم اینکه پوشش گیاهی معمولاً می‌تواند سوخت کافی در محیط‌های مرطوب و آتش‌سوزی‌های جنگلی را فراهم کند، معمولاً اغلب آتش‌سوزی اتفاق نمی‌افتد. باین‌حال، در مناطقی که مداوماً خشک‌اند، خشکسالی طولانی معمولاً از عوامل اساسی تجمع سوخت و ایجاد زمینه مساعد برای وقوع آتش‌سوزی محسوب می‌شود (Archibald et al., 2009; Parisien & Moritz, 2009). تحقیقات نشان می‌دهد که شرایط آب‌وهوایی هم‌زمان، از جمله افزایش دما، می‌تواند در فعالیت آتش‌سوزی تأثیر بگذارد و مشخص شده است بارش، در طول یک یا دو فصل رشد قبلی، در تولید زیست‌توده و فعالیت‌های آتش‌سوزی بعدی تأثیر می‌گذارد (Archibald et al., 2009; Swetnam, & Betancourt, 1998). باین‌حال درمورد پیوندهای بالقوه سال‌به‌سال بین متغیرهای آب‌وهوایی هم‌زمان و پیشین و فعالیت آتش‌سوزی در مناطق گوناگون، درک جامعی وجود ندارد. امروزه در کشور چین، درباره فعالیت‌های آتش‌سوزی و متغیرهای آب‌وهوایی در مقیاس‌های زمانی گوناگون (ماهانه، فصلی و سالیانه)، با استفاده از اطلاعات مناطق متفاوت این کشور، مطالعات بسیاری انجام شده است (برای نمونه، Zhao & Liu, 2019; 2021). یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد مدل‌هایی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی، مانند شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) و شاخص استاندارد بارش (SPI)، در

پیش‌بینی تغییرات سالیانه آتش‌سوزی دقتی بیشتر از مدل‌های متکی بر سایر متغیرهای اقلیمی دارد (Wells et al., 2004). به دلیل آنکه علل مؤثر در وقوع آتش‌سوزی‌های رخ داده در مناطق دارای پوشش گیاهی، در گذشته، مشخص نشده و همچنین هر دو شاخص PDSI و SPI، در مناطق متفاوت، محدودیت‌های شناخته‌شده زیادی دارند. برای نمونه، مفهوم تعادل آب شامل عواملی مانند بارش، وجود رطوبت، رواناب و مقدار تبخیر سطحی می‌شود (Wells et al., 2004) منجر به رفتار ناسازگار شاخص PDSI در سایر مناطق اغلب طبیعی (مراعات، زمین‌های دارای هر نوع پوشش گیاهی) و ایجاد چالش در توسعه مدل‌های خشکسالی-آتش‌سوزی می‌شود. رفتار شاخص در مناطق گوناگون، شاخص SPI براساس داده‌های بارش است (Vicente-Serrano et al., 2010) اما درباره آب‌وهوا در چین باید اشاره کرد که علاوه بر مواجهه با میزان گرمایش بیشتر در دهه‌های اخیر، در مقایسه با روند جهانی، پیش‌بینی می‌شود با وجود سناریوهای پیش‌بینی‌کننده آینده نامساعدتر شود (You et al., 2020). یکی از مزیت‌های آن ترکیب کاراکتری چندمقیاسی با ظرفیت در نظر گرفتن تأثیر تغییرپذیری دما در ارزیابی خشکسالی است. کمی‌سازی تغییرات مکانی-زمانی، در زمینه تأثیرات هم‌زمان و پیشین شرایط خشکسالی در آتش‌سوزی، برای به دست آوردن آگاهی بیشتر در مورد مدیریت آتش بسیار مهم است. به‌طور خاص شناسایی مدت و زمان خشکسالی‌هایی که مهم‌ترین تأثیر را در آتش‌سوزی دارند و همچنین تأثیر شرایط خشکسالی‌های پیشین حوزه‌ای است که هنوز مطالعه و بررسی درباره آن انجام نشده است. چنین اطلاعاتی، با اقدام به بهبود سیستم‌های هشدار اولیه و اجرای استراتژی‌های مؤثرتر مدیریت آتش، مزایای شایان توجهی برای سیاست‌گذاران و آژانس‌های حفاظت مدنی خواهد داشت (Wells et al., 2004). پوشش گیاهی در مناطق گوناگون استان لرستان، به دلیل کمبود بارش و خشکی محیط، هر ساله با خطر

وقوع آتش‌سوزی‌های متعدد مواجه است. به همین دلیل، موضوع آشکارسازی و مشخص کردن مناطق مستعد آتش‌سوزی، در رابطه با مهم‌ترین عنصر اقلیمی (بارش)، انتخاب و مطالعه شده است و چه‌بسا اقدامات مناسب و پیشگیرانه حفاظتی در مورد مناطق پوشش گیاهی را تسهیل کند. در بیشتر پژوهش‌هایی که انجام شده، کمتر به نقش کمبود بارش در وقوع آتش‌سوزی پرداخته شده است. پس از بررسی و مطالعه پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، می‌توان گفت که بیشتر تحقیقات داخلی پارامترهای شیب، نوع خاک، نوع پوشش گیاهی و عوامل انسانی، پس از وقوع آتش‌سوزی را بررسی کرده‌اند. تفاوت این تحقیق با پژوهش دیگران در این است شرایط و زمینه وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی (قبل از وقوع آتش‌سوزی) مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، در زمینه مدیریت و سامان‌دهی مناسب تأثیرات خشکسالی و پیامدهای آن، همچون آتش‌سوزی، علاوه بر شاخص‌ها و روش‌های آماری، داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای نقش مهمی در پایش خشکسالی و شرایط وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی ایفا می‌کنند.

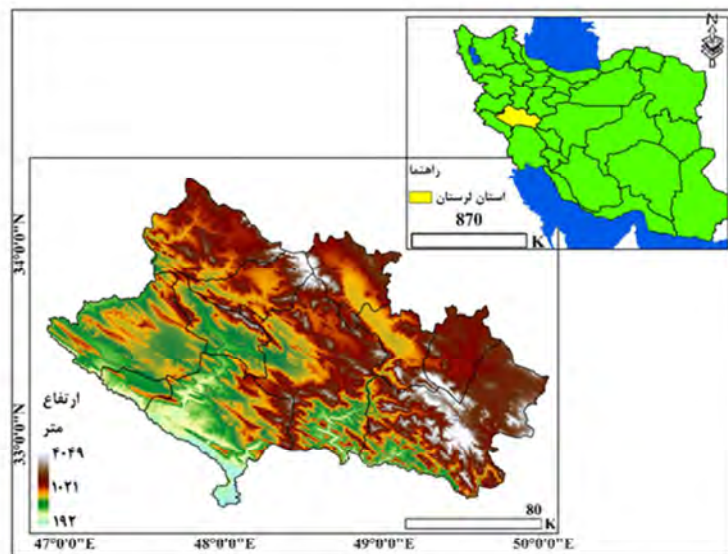
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی این پژوهش استان لرستان است (شکل ۱) که در غرب کشور ایران، بین ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است.

۲-۲- داده‌ها و روش‌ها

ابتدا باید دلیل استفاده از شرایط بارشی را در بررسی شرایط وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی توضیح دهیم. آنچه از تعریف‌های گوناگون خشکسالی به ذهن متبادر می‌شود و نخستین اصلی که در تمامی این تعریف‌ها مشترک است، کمبود بلندمدت بارش در



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

یعنی در شرایطی که خشکسالی فقط یک ماه استمرار داشته باشد، احتمال دارد بارش ماه بعد کمبود ماه مزبور را جبران کند. اما اگر ماه بعدی نیز خود، در قیاس با شرایط طبیعی کمبود داشته باشد، در شدت بخشیدن به حالت خشکسالی به مراتب مؤثر خواهد بود (Lashni Zand, 2003). در این مطالعه تلاش شده است، با استفاده از تصاویر فروسرخ سنجنده Suomi NPP که از وبگاه earth.data.nasa.gov دریافت شده، و نیز بهره‌گیری از شاخص‌های NDVI، VCI و TCI وضعیت خشکسالی پوشش گیاهی در استان لرستان بررسی شود. دوره مورد مطالعه ابتدای آوریل تا انتهای ژوئیه (هفته ۱۳ تا ۲۶ میلادی) ۲۰۱۳-۲۰۲۱ است که به صورت میانگین هفتگی در نظر گرفته می‌شود. میانگین ماهیانه شاخص استاندارد بارش (SPI) با استفاده از داده‌های بارش ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی الیگودرز، دورود، خرم‌آباد، بروجرد، نورآباد، کوهدشت و ازنا محاسبه شده است تا وضعیت بارش به خوبی تحلیل شود و ماه‌های خشک و مرطوب از یکدیگر تفکیک شوند. سپس ضریب همبستگی SPI با هریک از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI)، VCI و TCI محاسبه شد. در تصاویر فروسرخ، باندهای M

منطقه است؛ به عبارتی دیگر کمبود بارش دریافتی در هر منطقه، در مقایسه با میانگین بلندمدت را خشکسالی نامیده‌اند. طبق این اصل، به منظور بررسی و آشکارسازی نقش بارش در فراهم کردن بستر مساعد برای آتش‌سوزی در پوشش گیاهی، باید شرایط بارشی منطقه مورد مطالعه تحلیل شود. به طور کلی تشخیص زمان آغاز و پایان خشکسالی بسیار مشکل و اصولاً به تعریف مورد استفاده وابسته است (با توجه به نوع خشکسالی). آغاز خشکسالی زمانی است که ذخیره رطوبتی، چه در محیط خاک (خشکسالی کشاورزی) و چه در مخازن آبی (خشکسالی آب‌های سطحی و زیرزمینی)، خاتمه یافته باشد. در کشاورزی، پایان خشکسالی زمانی است که نزول باران رطوبت مورد نیاز خاک را تأمین کند و از نظر مباحث هیدرولوژیکی، زمانی که جریان رودخانه بار دیگر برقرار شود و مخازن زیرزمینی دوباره تغذیه شوند، زمان پایان خشکسالی در نظر گرفته می‌شود. زمان آغاز تا پایان خشکسالی دوره تداوم خشکسالی نامیده می‌شود. هرچه میزان بارندگی کمتر از شرایط متوسط باشد، تأثیر خشکسالی بیشتر نمایان می‌گردد. میزان استمرار حالت خشکسالی در منطقه نیز گویای شدت خشکسالی در آن منطقه است؛

شاخص‌های مورد مطالعه در این پژوهش آمده است. برای استخراج نقشه‌های ریسک آتش‌سوزی با استفاده از نرم‌افزار Arc map، تصاویر شاخص‌های تنش رطوبتی و دمایی پوشش گیاهی استفاده شده است (شکل ۲). در نقاطی که تنش رطوبتی و دمایی پوشش گیاهی کمتر از ۴۰ است، بیشترین احتمال آتش‌سوزی در پوشش گیاهی وجود دارد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad (NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red))$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad VCI = 100 \times \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad TCI = 100 \times (BT_{max} - BT) / (BT_{max} - BT_{min})$$

جدول‌های ۱ و ۲ طبقه‌بندی خشکسالی هریک از شاخص‌های را نشان می‌دهند. مقادیر هریک از شاخص‌های مورد بررسی در جدول ۴ آمده است.

۲-۳- شاخص استاندارد بارش

این شاخص را مک‌کی^۱ و همکاران (۱۹۹۵) از دانشگاه ایالتی کلرادو، در سال ۱۹۹۳، تدوین کردند. شاخص استاندارد بارش حاصل برآزش توزیع آماری گاما بر سری بارش و محاسبات احتمالات توزیع تجمعی گاما است. تابع توزیع گاما، به‌صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی، طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\text{رابطه (۱)} \quad g(x) = x^{a-1} e^{-x/\beta} \frac{1}{\gamma(a)\beta^a}$$

دارای قدرت تفکیک ۷۵۰ و قدرت تفکیک باندهای I ۳۷۵ متر هستند. مشخصات باندهای تصاویر فروسرخ در جدول ۳ آمده است. شاخص NDVI (رابطه (۱)) با توجه به باندهای NIR=I2 و Red=I1 محاسبه شده است. از آنجاکه NDVI و دمای روشنائی (BT) مؤلفه‌های آب‌وهوا و اقلیم محیط را در سیگنال سلامت پوشش گیاهی اندازه‌گیری می‌کنند، a به‌میزان ۰/۵ ضربی ثابت است (Holdren & Ehrlich, 1974; Kogan, 1995; Hui, 2006). NDVI_{max} نشان‌دهنده پوشش گیاهی بسیار سالم یا نرمال است که از نظر عددی، ۱۰۰ تخمین زده می‌شود. VHI شاخصی برای ارزیابی سلامت پوشش گیاهی، در مقیاس بسیار سالم تا خیلی ضعیف است و با برخی شرایط میانی، مانند عادی، کمی بالاتر یا پایین‌تر از نرمال و وضعیت استرس را مشخص می‌کند. شاخص وضعیت گیاهی مبتنی بر NDVI و (VCI)، دمای مبتنی بر BT، شاخص وضعیت VCI، TCI و ترکیبی از سلامت گیاهی (VHI) طبق روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود. میزان هریک از شاخص‌ها بین صفر (استرس شدید) و ۱۰۰ (بسیار سالم) تغییر می‌کند. طبق یک اصل، اگر پوشش گیاهی بسیار سبز، شاخص‌ها (رطوبت، حرارتی و ترکیبی) بسیار سالم (به‌مقدار ۱۰۰) و میزان سبزی‌نگی پوشش گیاهی بسیار کم باشد، وضعیت پوشش گیاهی از حالت نرمال خارج و دچار تنش می‌شود (Kogan, 1995; 2001; 1997). در جدول ۲، طبقه‌بندی هریک از

جدول ۱. طبقه‌بندی درجات خشکسالی شاخص‌های VHI, TCI, VCI (Bhuiyan, 2008)

مقدار VHI, TCI, VCI	۱۰<	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰	۶۰-۴۰	۶۰>
شرایط خشکسالی	بسیار شدید	شدید	متوسط	ملازم	نرمال	غیر خشکسالی

جدول ۲. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی شاخص NDVI (Berhan et al., 2011)

مقدار NDVI	۰<	۰/۲-۰	۰/۴-۰/۲	۰/۶-۰/۴	۰/۶≥
خشکسالی	خشکی شدید	خشکی	نرمال	ترسالی	غیر خشکسالی

1. McKee

x میزان تجمعی بارش ماهیانه و a و β پارامترهای توزیع گاما است که با روش حداکثر درست‌نمایی، با استفاده از روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

$$\hat{a} = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$A = L\bar{x} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\hat{a}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این معادلات، $\bar{x}$ میانگین سری داده‌ها با مقیاس زمانی مورد نظر (ماهانه، سالیانه) است. درمورد

احتمالات تجمعی، میزان شاخص استاندارد بارش با توجه به روابط (۵) و (۶) حاصل می‌شود.

$$G(x) = \frac{1}{y(\hat{a})} \int_0^x t^{\hat{a}-1} e^{-t} dt \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$t = \frac{x}{\beta} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این تحقیق، شاخص استاندارد بارش ماهیانه با استفاده از نرم‌افزار اکسل محاسبه شده است. برای محاسبه SPI از آمار ماهیانه بارش ایستگاه‌های الیگودرز، دورود، خرم‌آباد، بروجرد، نورآباد، کوه دشت و ازنا استفاده شده و طبقه‌بندی شاخص استاندارد بارش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. طبقه‌بندی شرایط خشکسالی بر اساس شاخص SPI

SPI	مقدار	≥ 2	۱ تا ۰/۹۹	۰/۹۹ تا ۱/۰۱	۰/۰۱ تا ۰/۹۹	۰/۰۱ تا ۰/۹۹	۰/۰۱ تا ۰/۹۹	۰/۰۱ تا ۰/۹۹
خشکسالی	بسیار شدید	خشکسالی	شدید	خشکسالی	متوسط	نرمال	ترسالی متوسط	ترسالی شدید

جدول ۴. مشخصات باندهای تصاویر VIIRS

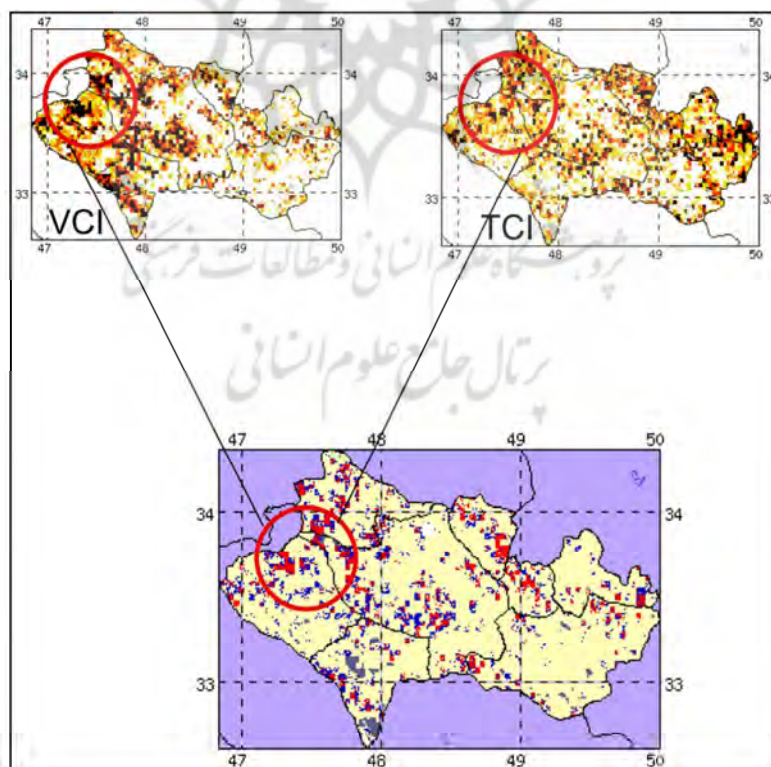
باند	محدوده طیفی (میکرومتر)	موارد استفاده اولیه
M1	۰/۴۰۲-۰/۴۲۲	رنگ اقیانوس و آتروسها
M2	۰/۴۳۶-۰/۴۵۴	رنگ اقیانوس و آتروسها
M3	۰/۴۷۸-۰/۴۹۸	رنگ اقیانوس و آتروسها
M4	۰/۵۴۵-۰/۵۶۵	رنگ اقیانوس و آتروسها
I1	۰/۶۰۰-۰/۶۸۰	تصویرسازی پدیده‌ها
M5	۰/۶۶۲-۰/۶۸۲	رنگ اقیانوس و آتروسها
M6	۰/۷۳۹-۰/۷۵۴	تصحیح اتمسفری
I2	۰/۸۴۶-۰/۸۸۵	شاخص پوشش گیاهی
M7	۰/۸۴۶-۰/۸۸۵	رنگ اقیانوس و آتروسها
M8	۱/۲۳-۱/۲۵	اندازه ذرات ابرها
M9	۰/۳۷۱-۱/۳۸۶	تشخیص نوع ابرها
I3	۰/۶۴۰-۱/۵۸۰	نقشه دوبعدی برف
M10	۱/۵۸۰-۱/۶۴۰	کسر (حذف) برف
M11	۲/۲۲۵-۲/۲۷۵	ابرها
I4	۳/۵۵۰-۳/۹۳۰	تصاویر ابرها
M12	۳/۶۶۰-۳/۸۴۰	دمای سطح آب اقیانوسها
M13	۳/۹۷۳-۴/۱۲۸	دمای سطح آب اقیانوسها و آتش‌سوزیها
M14	۸/۴۰۰-۸/۷۰۰	خواص برتر ابرها
M15	۱۰/۲۶۳-۱۱/۲۶۳	دمای سطح آب اقیانوسها
I5	۱۰/۵۰۰-۱۲/۴۰۰	تصاویر ابرها
M16	۱۱/۵۳۸-۱۲/۴۸۸	دمای سطح آب اقیانوسها
DNB	۰/۵۰۰-۰/۹۰۰	آلودگی نوری

است. به عبارت دیگر استخراج مناطق مستعد آتش‌سوزی براساس تنش هر دو شاخص VCI و TCI انجام می‌شود که در یک نقطه ایجاد شده است.

۲-۴- یافته‌ها

براساس داده‌های بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان لرستان، می‌توان گفت که در فصل تابستان (ژوئیه، اوت و سپتامبر)، در محدوده مطالعاتی، بارش رخ نمی‌دهد و فقط در فصل‌های پاییز، زمستان و بهار شاهد بارش هستیم. بنابراین سال آبی در استان لرستان به‌طور تقریبی از دهه سوم سپتامبر آغاز و تا دهه دوم و سوم ژوئن هر سال ادامه دارد که این مسئله خشکی بسیار زیاد هوا و کمبود رطوبت را می‌رساند. خشکی هوا یا کمبود رطوبت و افزایش دما شرایط لازم را برای ایجاد آتش‌سوزی در منطقه فراهم می‌کند. طبق این نوشتار، در فصل تابستان، استان لرستان فصلی

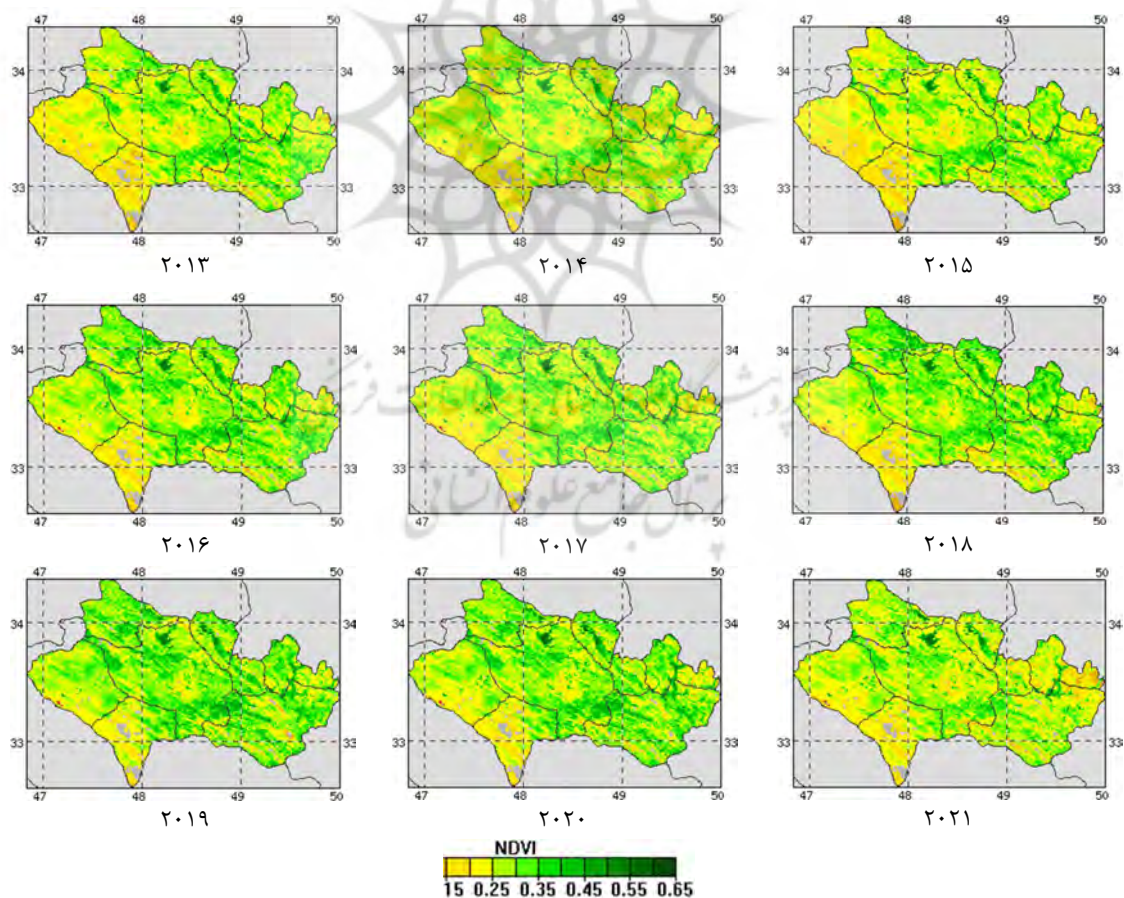
در این نوشتار برای ترسیم هریک از نقشه‌های مناطق مستعد آتش‌سوزی در پوشش گیاهی، همانند شکل ۲، در گام نخست نقشه شاخص‌های VCI و TCI ترسیم و در گام بعدی، نقشه‌ها برحسب طبقات متفاوت ترسالی (شرایط عادی) و خشکسالی پوشش گیاهی تنظیم شدند. پس از ترسیم شاخص‌های VCI و TCI، طبقات تنش شاخص‌های مورد نظر که از نظر عددی کمتر از ۴۰ است، در نقشه‌ای دیگر ثبت و دیگر طبقات حذف شدند. خشکسالی یا تنش هریک از شاخص‌های VCI و TCI با استفاده از روش تلفیق لایه‌ها ترسیم شد. مناطق با بیشترین معرضیت خطر آتش‌سوزی با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. بخش‌های قرمز نمایانگر نقاطی است که تنش، در هریک شاخص‌های VCI و TCI، در حالت حداکثر (بین صفر تا ۴۰) قرار دارد و در یک نقطه متمرکز شده است. بخش‌های آبی گویای مناطقی است که یکی از شاخص‌ها دچار تنش شده



شکل ۲. شناسایی مناطق در معرض خطر آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه

این تصاویر، به‌طور کلی وضعیت نرمال و غیرنرمال خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی، طی این بازه زمانی، در سراسر محدوده مورد مطالعه کاملاً متفاوت بوده است. می‌توان گفت در تمامی سال‌های مورد بررسی (TCI)، در سطح استان لرستان، شرایط یکنواختی وجود نداشته است (شکل ۳). طبق این شکل، پوشش گیاهی در ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱ دچار خشکسالی شده است که شرایط لازم را برای ایجاد آتش‌سوزی مهیا می‌کند. اما در ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ پوشش گیاهی در وضعیت نرمالی قرار داشته است. به‌دلیل آنکه شرط وقوع آتش‌سوزی ناشی از خشکسالی پایین بودن میزان بارش در قیاس با دوره‌ای بلندمدت است، در این تحقیق، میزان بارش دریافتی در استان بررسی و تحلیل شده است.

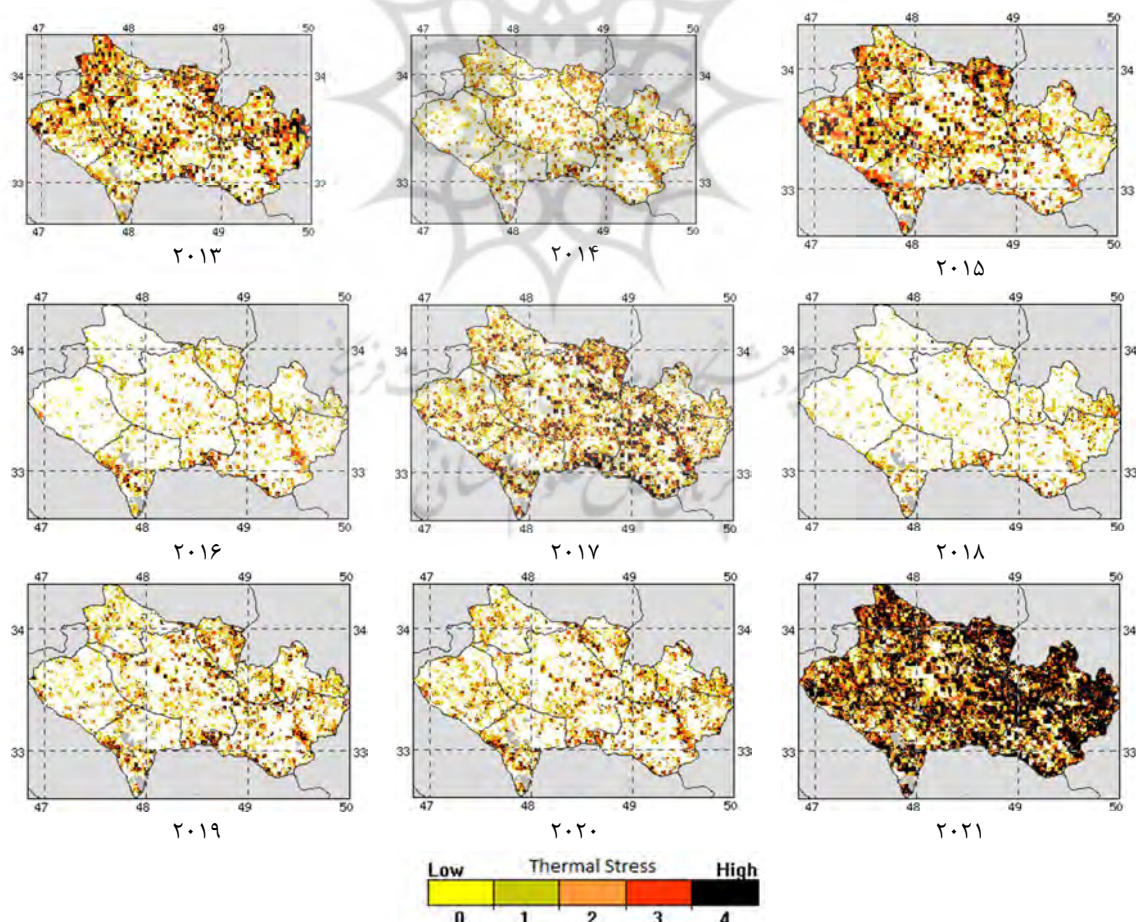
خشک را از سر می‌گذرانند و ماه اوت خشک‌ترین ماه سال است. گفتنی است که به‌دلیل حجم زیاد شکل‌های تولیدشده درمورد هریک از شاخص‌های پوشش گیاهی، برای بررسی اولیه، فقط توانستیم نقشه شاخص‌ها در هفته ۲۶ (میلادی هر سال) را ارائه دهیم. به‌منظور بررسی تغییرات میزان تنش در شرایط رطوبتی و دمایی که نقش مهمی در فراهم کردن زمینه آتش‌سوزی در پوشش گیاهی دارد، نقشه‌های پوشش گیاهی حاصل از نوع سنجنده JPSS S-NPP تهیه شد. این تصاویر از نوع فروسرخ و متعلق به دوره زمانی نه‌ساله‌ای، از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱، و برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه‌اند. در این تصاویر، وضعیت تنش رطوبتی و دمایی پوشش گیاهی در سال‌های متفاوت به‌روشنی مشاهده می‌شود. با توجه به



شکل ۳. میانگین هفتگی شاخص NDVI استان لرستان (هفته ۲۶)، اول ژوئیه (۲۰۲۱-۲۰۱۳)

مطابق شکل ۵، وضعیت خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۳، از لحاظ تغییرات یا جابه‌جایی مکانی و یا درجات خشکسالی پوشش گیاهی، در هر سالی با سال دیگر متفاوت است و شدت آن در هیچ منطقه‌ای شبیه مناطق دیگر نیست. در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۱ ریسک آتش‌سوزی پوشش گیاهی افزایش چشمگیری داشته اما در ۲۰۲۱ شدیدترین و گسترده‌ترین میزان آن اتفاق افتاده است. در بیشتر سال‌ها، در هفته ۲۶ پوشش گیاهی دچار خشکسالی شده اما درجات خشکسالی حادث‌شده متفاوت بوده است. از نظر پراکندگی مکانی در منطقه مورد مطالعه پوشش گیاهی همه‌ساله با میزانی از خشکسالی مواجه بوده است. در ۲۰۲۱، درجه High که بارنگ سیاه در

شکل ۴ شرایط تنش TCI را که همان مقدار کمتر از ۴۰ است، نمایش می‌دهد. این شاخص، در تمامی سطح استان لرستان، شرایط کاملاً متفاوتی دارد و در نتیجه، از نظر تغییرات منطقه‌ای چندان محسوس نبوده است. در سال ۲۰۲۱ که خشک‌ترین وضعیت این شاخص است، از هفته سیزدهم (میلادی) یعنی اول آوریل تا اواخر ژوئن، مقادیر این شاخص روند نزولی داشته است (جدول ۴). به عبارت دیگر در سالی که خشکسالی یا ترسالی در این شاخص رخ داده، از ابتدای آوریل شرایط یکسانی نداشته و روند مقادیر نزولی یا صعودی بوده است. مرطوب‌ترین سال، طبق این شاخص، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ است که به تبع آن، شرایط وقوع آتش‌سوزی با خشکسالی پوشش گیاهی و کمبود بارش هم‌خوانی دارد.



شکل ۴. میانگین هفتگی تنش شاخص TCI استان لرستان (هفته ۲۶)، اول ژوئیه (۲۰۲۱-۲۰۱۳)

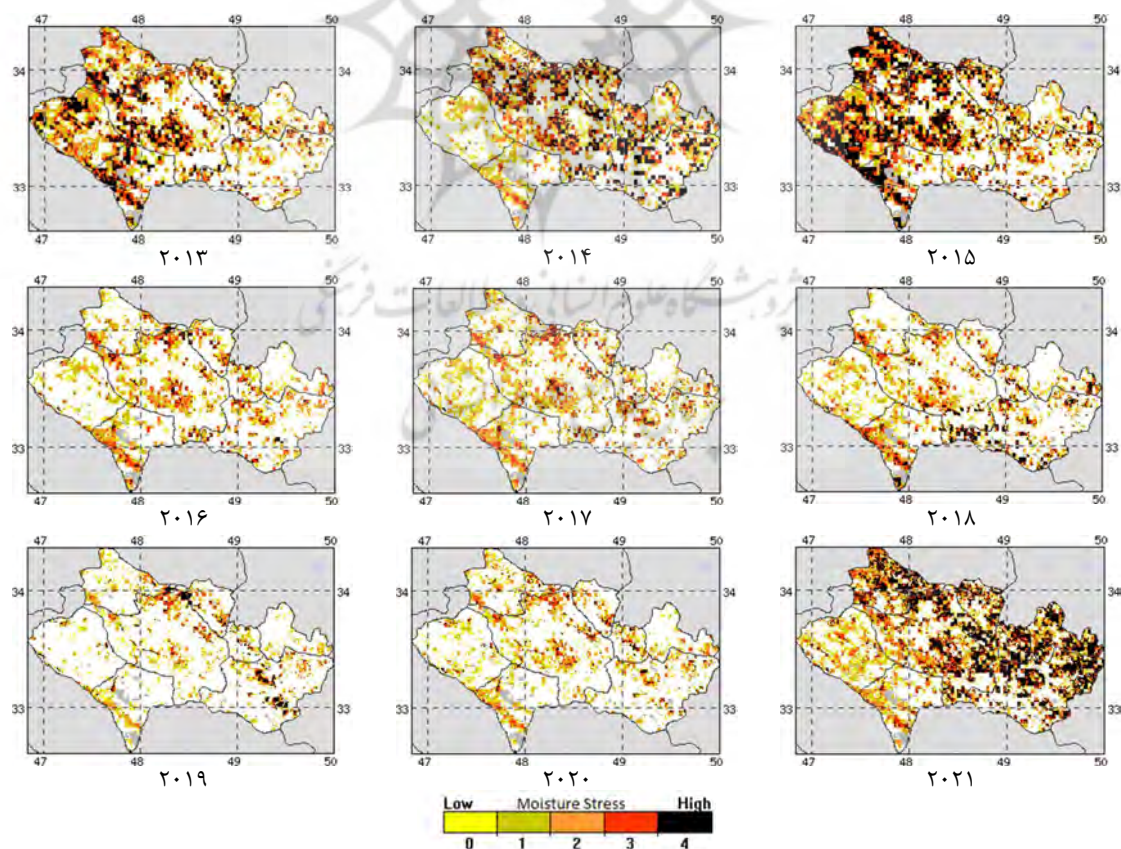
نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

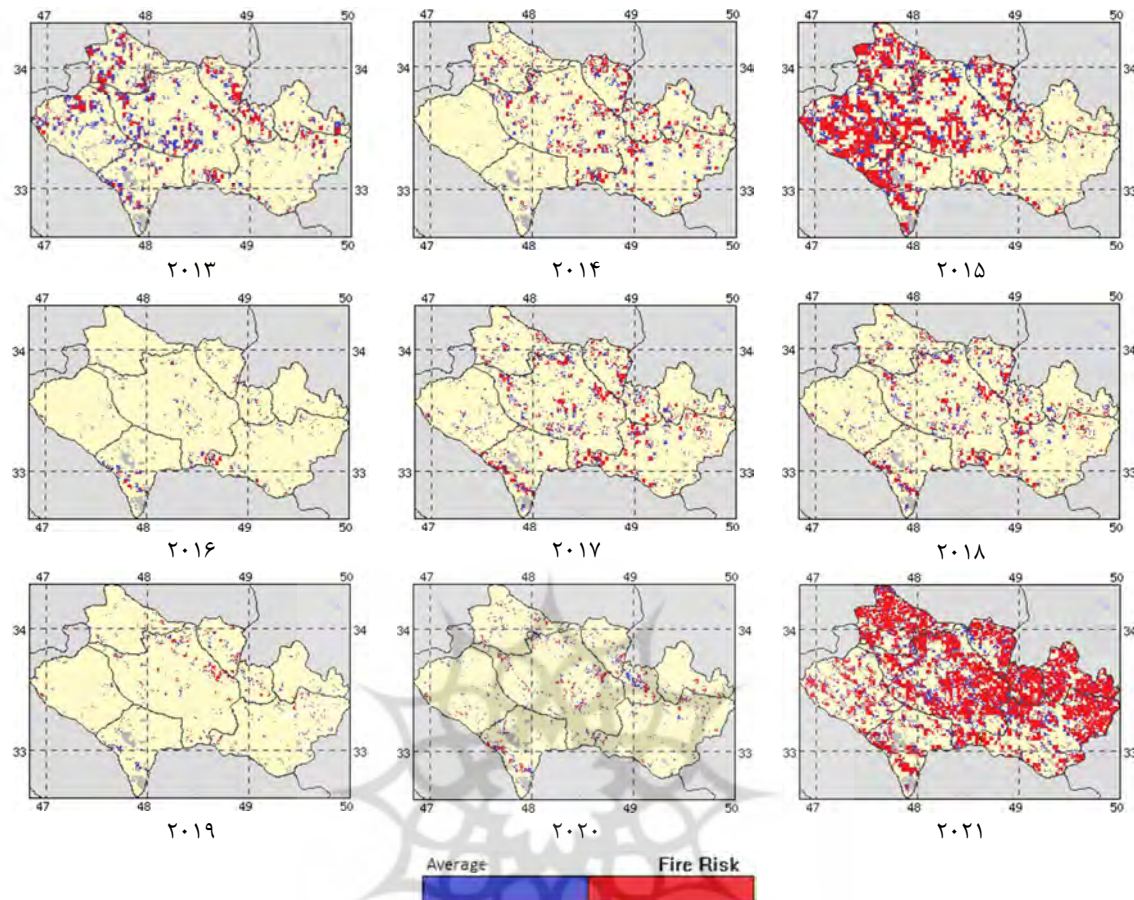
۱۶۰

بازه زمانی اشاره دارد و در تصاویر استخراج ریسک آتش‌سوزی، در منطقه مطالعاتی، به‌وضوح دیده می‌شود. براساس طبقه‌بندی درجات خشکسالی یا ترسالی در شرایط پوشش گیاهی، طبق جدول ۱، می‌توان گفت که بیشتر سال‌ها شرایط پوشش گیاهی در معرض وقوع آتش‌سوزی قرار می‌گیرد و این مسئله را می‌توان از هفته بیستم میلادی پیش‌بینی کرد؛ در این زمان، مقادیر هریک از شاخص‌ها کاهش می‌یابد و در کلاس خشکسالی خفیف و سپس شدید قرار می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر طی سال‌هایی که وقوع خشکسالی در شاخص‌های پوشش گیاهی مشهود بوده است، مقادیر شاخص از ماه آوریل و می روند نزولی داشته و در ژوئن و ژوئیه به سمت خشکسالی شدید میل می‌یابد. هم‌زمانی شرایط وقوع آتش‌سوزی با کمبود بارش در منطقه مطالعاتی بسیار واضح و چشمگیر است؛ در سال‌هایی که پوشش گیاهی با خشکسالی روبه‌رو بوده، میزان خطر آتش‌سوزی در استان لرستان نیز، افزایش یافته است.

بیشتر مناطق استان لرستان مشاهده می‌شود، بالاترین سطح خشکسالی پوشش گیاهی به شمار می‌رود. در ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵، بیشترین خشکسالی پوشش گیاهی در بخش‌های غربی منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است. در سال‌هایی که خشکسالی در پوشش گیاهی گسترده‌ای رخ نداده، مشاهده می‌شود که در برخی بخش‌های جنوبی، پوشش گیاهی دچار خشکسالی شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شاخص‌های بیانگر شرایط پوشش گیاهی به‌صورت میانگین هفتگی محاسبه شده است زیرا، هرچه بازه زمانی بررسی شرایط پوشش گیاهی کوتاه‌تر باشد، بهتر می‌توان به سایر جزئیات پی برد و تحلیل‌های دقیق‌تری انجام داد. براساس مندرجات جدول ۴، می‌توان گفت طی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۱، خشکسالی در پوشش گیاهی استان لرستان به وقوع پیوسته و در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸، شرایط پوشش گیاهی در وضعیت مساعدی قرار داشته و ترسالی حاکم بوده است؛ این نکته به فراهم شدن شرایط وقوع آتش‌سوزی در همین



شکل ۵. میانگین هفتگی تنش شاخص VCI در استان لرستان (هفته ۲۶) اول ژوئیه (۲۰۱۳-۲۰۲۱)



شکل ۶. میانگین هفتگی خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان (هفته ۲۶) اول ژوئیه (۲۰۲۱-۲۰۱۳)

خشکسالی در پوشش گیاهی در همان هفته‌های ابتدایی ژانویه آغاز شده و این روند تا پایان ژوئیه ادامه داشته است. خشک‌ترین زمان هریک از شاخص‌ها متعلق به سال ۲۰۲۱ بوده که به تبع آن، شرایط وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی نیز افزایش یافته است.

براساس جدول ۵ که میانگین هفتگی هریک از شاخص‌های بررسی‌شده را در سطح استان لرستان نشان می‌دهد، می‌توان گفت هریک از شاخص‌ها دارای افت‌وخیز زیادی بوده است. در سال‌هایی که پوشش گیاهی دچار خشکسالی شده (میزان آن کمتر از ۴۰ است)،

جدول ۵. میانگین هفتگی شاخص‌های پوشش گیاهی در استان لرستان

سال	هفته	NDVI	VCI	TCI	سال	هفته	NDVI	VCI	TCI
۲۰۱۳	۱۳	۲۱۲/۰	۴۲/۷۱	۱۲/۲۲	۲۰۱۵	۱۳	۲۲۹/۰	۳۵/۸۱	۹۴/۳۰
۲۰۱۳	۱۴	۲۲۲/۰	۳۳/۶۸	۳۳/۲۷	۲۰۱۵	۱۴	۲۴۴/۰	۱۴/۸۰	۸۳/۳۴
۲۰۱۳	۱۵	۲۲۹/۰	۰۳/۶۵	۸۶/۳۲	۲۰۱۵	۱۵	۲۵۳/۰	۴۷/۷۸	۵۵/۳۳
۲۰۱۳	۱۶	۲۳۲/۰	۹/۶۰	۹۷/۴۰	۲۰۱۵	۱۶	۲۵۸/۰	۶/۷۵	۴۹/۲۹
۲۰۱۳	۱۷	۲۳۴/۰	۵۹/۵۶	۵۷/۴۷	۲۰۱۵	۱۷	۲۵۷/۰	۸۸/۷۰	۵۹/۲۷
۲۰۱۳	۱۸	۲۳۳/۰	۹۷/۵۲	۸۹/۵۳	۲۰۱۵	۱۸	۲۵۱/۰	۸۲/۶۴	۶۶/۲۷
۲۰۱۳	۱۹	۲۳۱/۰	۷۶/۴۹	۹۵/۵۸	۲۰۱۵	۱۹	۲۴۳/۰	۵۶/۵۸	۸۸/۲۶
۲۰۱۳	۲۰	۲۲۶/۰	۰۴/۴۷	۸۲/۶۱	۲۰۱۵	۲۰	۲۳۳/۰	۰۶/۵۳	۹۹/۲۶
۲۰۱۳	۲۱	۲۲/۰	۳۱/۴۵	۸۸/۵۸	۲۰۱۵	۲۱	۲۲۲/۰	۱۳/۴۷	۶۷/۲۷

ادامه جدول ۵

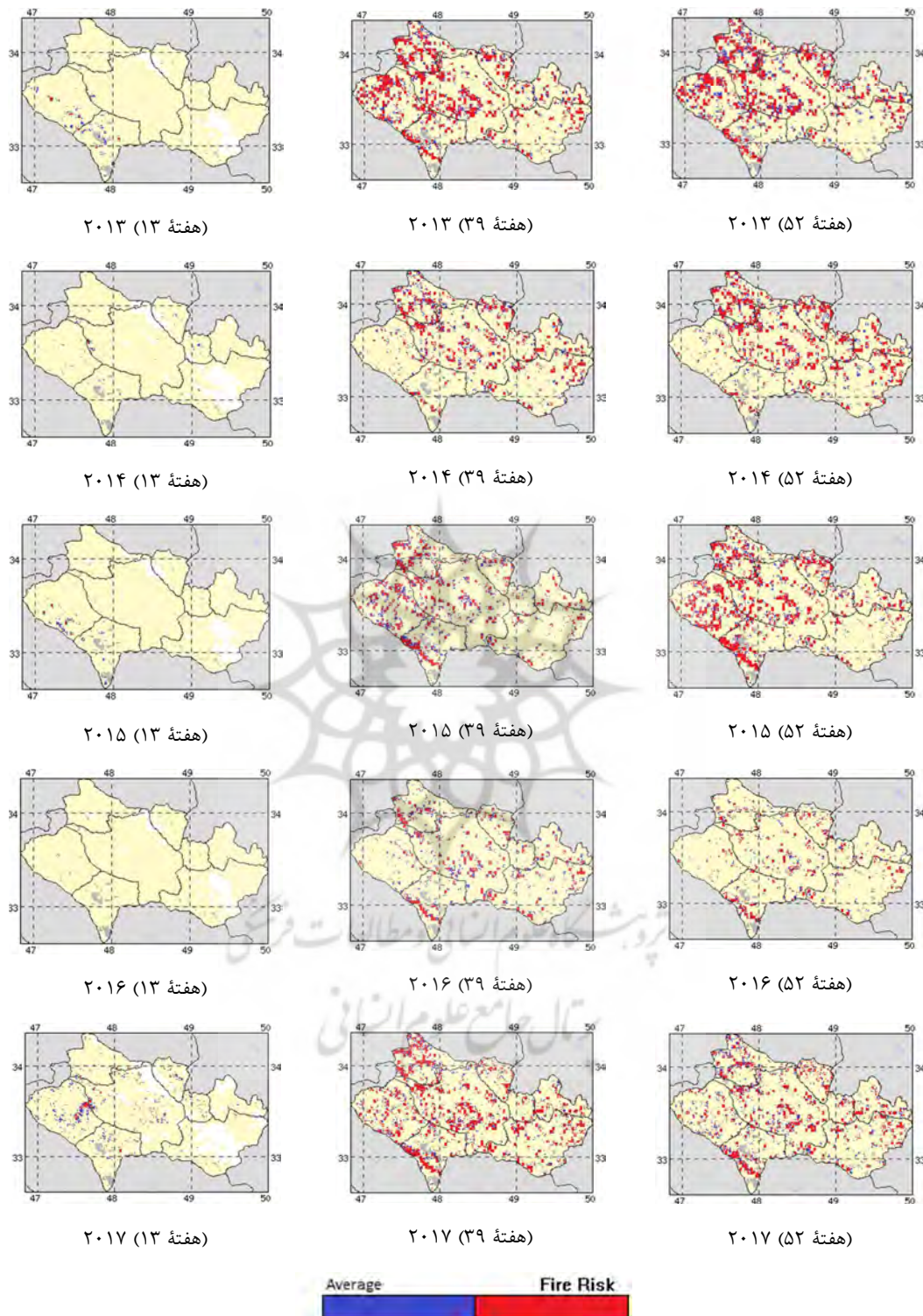
سال	هفته	NDVI	VCI	TCI	سال	هفته	NDVI	VCI	TCI
۲۰۱۳	۲۲	۲۱۳/۰	۳۱/۴۴	۴/۵۵	۲۰۱۵	۲۲	۲۰۹/۰	۷۹/۴۱	۵۹/۲۸
۲۰۱۳	۲۳	۲۰۳/۰	۲۶/۴۴	۷۵/۵۰	۲۰۱۵	۲۳	۱۹۸/۰	۱۵/۳۹	۹۸/۲۸
۲۰۱۳	۲۴	۱۹۱/۰	۳۲/۴۲	۴۱/۴۸	۲۰۱۵	۲۴	۱۸۶/۰	۲۴/۳۷	۴۱/۳۰
۲۰۱۳	۲۵	۱۸/۰	۱۷/۴۱	۵/۴۳	۲۰۱۵	۲۵	۱۷۴/۰	۱۷/۳۵	۸۶/۳۴
۲۰۱۳	۲۶	۱۷/۰	۹۸/۴۱	۲۷/۳۷	۲۰۱۵	۲۶	۱۶۴/۰	۹۲/۳۳	۱۳/۴۰
۲۰۱۴	۱۳	۲/۰	۹۲/۶۵	۳۴/۳۸	۲۰۱۶	۱۳	۲۳۸/۰	۲۱/۸۶	۱۳/۴۳
۲۰۱۴	۱۴	۲۱۵/۰	۷۱/۶۵	۴۵/۴۱	۲۰۱۶	۱۴	۲۵۱/۰	۷۵/۸۴	۴۹
۲۰۱۴	۱۵	۲۲۹/۰	۷۴/۶۶	۵۸/۴۲	۲۰۱۶	۱۵	۲۶۲/۰	۹۳/۸۳	۰۳/۵۳
۲۰۱۴	۱۶	۲۴۲/۰	۵۷/۶۸	۶۶/۴۰	۲۰۱۶	۱۶	۲۷/۰	۳۷/۸۳	۶۹/۵۴
۲۰۱۴	۱۷	۲۵۱/۰	۸۸/۶۸	۲۷/۳۸	۲۰۱۶	۱۷	۲۷۴/۰	۶۸/۸۱	۱۶/۵۷
۲۰۱۴	۱۸	۲۵۲/۰	۴۷/۶۷	۴۹/۳۸	۲۰۱۶	۱۸	۲۷۴/۰	۷۶/۷۹	۸۴/۵۹
۲۰۱۴	۱۹	۲۴۹/۰	۷۲/۶۴	۹/۳۹	۲۰۱۶	۱۹	۲۷/۰	۲۵/۷۷	۶۷/۶۰
۲۰۱۴	۲۰	۲۴۱/۰	۴۹/۵۹	۸۵/۴۵	۲۰۱۶	۲۰	۲۶۳/۰	۸۶/۷۴	۳۴/۶۰
۲۰۱۴	۲۱	۲۲۸/۰	۳۴/۵۳	۵۹/۵۱	۲۰۱۶	۲۱	۲۵۱/۰	۴۵/۷۱	۴۳/۵۹
۲۰۱۴	۲۲	۲۱۷/۰	۲۷/۴۹	۵۴/۵۳	۲۰۱۶	۲۲	۲۴/۰	۶۶/۶۹	۲۹/۶۱
۲۰۱۴	۲۳	۲۰۴/۰	۶۹/۴۵	۹۵/۵۱	۲۰۱۶	۲۳	۲۲۶/۰	۸۵/۶۶	۵۹/۶۱
۲۰۱۴	۲۴	۱۹۱/۰	۴۷/۴۳	۰۷/۵۰	۲۰۱۶	۲۴	۲۱/۰	۲۴/۶۳	۱۱/۶۲
۲۰۱۴	۲۵	۱۷۹/۰	۳۵/۴۱	۷۱/۴۹	۲۰۱۶	۲۵	۱۹۴/۰	۳۹/۵۸	۲۲/۶۳
۲۰۱۴	۲۶	۱۶۸/۰	۰۳/۳۹	۷۵/۵۰	۲۰۱۶	۲۶	۱۸۱/۰	۱۶/۵۵	۶۱/۶۱
۲۰۱۷	۱۳	۱۶۲/۰	۲۵/۴۶	۸۵/۴۳	۲۰۱۹	۱۳	۲۰۱/۰	۸۸/۶۵	۷۷/۶۴
۲۰۱۷	۱۴	۱۷۹/۰	۵۴/۴۶	۳۴/۴۷	۲۰۱۹	۱۴	۲۱۸/۰	۹۳/۶۶	۹۳/۶۸
۲۰۱۷	۱۵	۱۹۴/۰	۹۲/۴۷	۷۱/۴۶	۲۰۱۹	۱۵	۲۳۵/۰	۷۶/۶۹	۰۴/۷۲
۲۰۱۷	۱۶	۲۰۹/۰	۸۷/۴۹	۸۶/۴۴	۲۰۱۹	۱۶	۲۴۸/۰	۶۹/۷۱	۶۳/۷۱
۲۰۱۷	۱۷	۲۲۲/۰	۸۷/۵۱	۴۲/۴۲	۲۰۱۹	۱۷	۲۵۷/۰	۹/۷۲	۰۹/۶۸
۲۰۱۷	۱۸	۲۳۱/۰	۱/۵۳	۵۵/۴۱	۲۰۱۹	۱۸	۲۶۲/۰	۴۸/۷۳	۳۳/۶۵
۲۰۱۷	۱۹	۲۳۶/۰	۸۶/۵۴	۲۴/۳۸	۲۰۱۹	۱۹	۲۶۲/۰	۵۱/۷۳	۷۷/۶۳
۲۰۱۷	۲۰	۲۳۷/۰	۰۶/۵۶	۳۲/۳۵	۲۰۱۹	۲۰	۲۵۷/۰	۰۴/۷۲	۵۱/۶۵
۲۰۱۷	۲۱	۲۳۲/۰	۳۶/۵۵	۶۶/۳۶	۲۰۱۹	۲۱	۲۴۹/۰	۵۹/۷۰	۴۳/۶۳
۲۰۱۷	۲۲	۲۲۵/۰	۵۵/۵۶	۰۷/۳۶	۲۰۱۹	۲۲	۲۳۹/۰	۳۴/۷۰	۹۷/۵۸
۲۰۱۷	۲۳	۲۱۷/۰	۷۸/۵۷	۴/۳۳	۲۰۱۹	۲۳	۲۲۸/۰	۶۵/۶۹	۰۱/۵۶
۲۰۱۷	۲۴	۲۰۳/۰	۵۱/۵۵	۳۳/۳۷	۲۰۱۹	۲۴	۲۱۵/۰	۰۲/۶۹	۸۸/۵۳
۲۰۱۷	۲۵	۱۹/۰	۶۵/۵۳	۸۸/۳۸	۲۰۱۹	۲۵	۲۰۳/۰	۸۹/۶۷	۱۵/۵۲
۲۰۱۷	۲۶	۱۷۹/۰	۶۲/۵۲	۷۱/۳۸	۲۰۱۹	۲۶	۱۹/۰	۲۶/۶۶	۲۱/۵۱
۲۰۱۸	۱۳	۲۰۷/۰	۶۹/۶۹	۰۲/۳۳	۲۰۲۰	۱۳	۲۱۲/۰	۷۹/۷۲	۸۶/۴۵
۲۰۱۸	۱۴	۲۲/۰	۹۸/۶۷	۷۱/۴۱	۲۰۲۰	۱۴	۲۲۹/۰	۰۳/۷۳	۲۲/۴۹
۲۰۱۸	۱۵	۲۲۹/۰	۱۳/۶۷	۳۷/۴۹	۲۰۲۰	۱۵	۲۴/۰	۹۲/۷۲	۷۷/۵۱
۲۰۱۸	۱۶	۲۳۷/۰	۰۹/۶۵	۵۴/۵۸	۲۰۲۰	۱۶	۲۵/۰	۸۲/۷۲	۹۷/۵۲
۲۰۱۸	۱۷	۲۴۲/۰	۱۸/۶۳	۰۱/۶۷	۲۰۲۰	۱۷	۲۵۷/۰	۵۶/۷۲	۴۸/۵۲
۲۰۱۸	۱۸	۲۴۴/۰	۶۳/۶۱	۹۴/۷۱	۲۰۲۰	۱۸	۲۶/۰	۸۱/۷۱	۲۳/۵۱
۲۰۱۸	۱۹	۲۴۴/۰	۰۴/۶۰	۸۹/۷۵	۲۰۲۰	۱۹	۲۵۸/۰	۰۵/۷۰	۲۷/۴۹
۲۰۱۸	۲۰	۲۴۲/۰	۱۳/۵۹	۱۷/۷۸	۲۰۲۰	۲۰	۲۵۲/۰	۶۸/۶۷	۹۴/۴۷
۲۰۱۸	۲۱	۲۳۷/۰	۲/۵۹	۴۲/۷۶	۲۰۲۰	۲۱	۲۴۳/۰	۷۹/۶۴	۸۷/۴۵
۲۰۱۸	۲۲	۲۳۱/۰	۷۵/۶۰	۶۸/۷۵	۲۰۲۰	۲۲	۲۳۲/۰	۱/۶۳	۱۶/۴۵
۲۰۱۸	۲۳	۲۲۲/۰	۹۱/۶۱	۴۵/۷۲	۲۰۲۰	۲۳	۲۲۱/۰	۷۳/۶۲	۷۴/۴۵
۲۰۱۸	۲۴	۲۱/۰	۶۹/۶۱	۳۲/۶۸	۲۰۲۰	۲۴	۲۰۹/۰	۹۳/۶۱	۱۱/۴۷
۲۰۱۸	۲۵	۱۹۷/۰	۶۲/۵۹	۲/۶۵	۲۰۲۰	۲۵	۱۹۶/۰	۸۱/۶۰	۶۵/۴۸

ادامهٔ جدول ۵

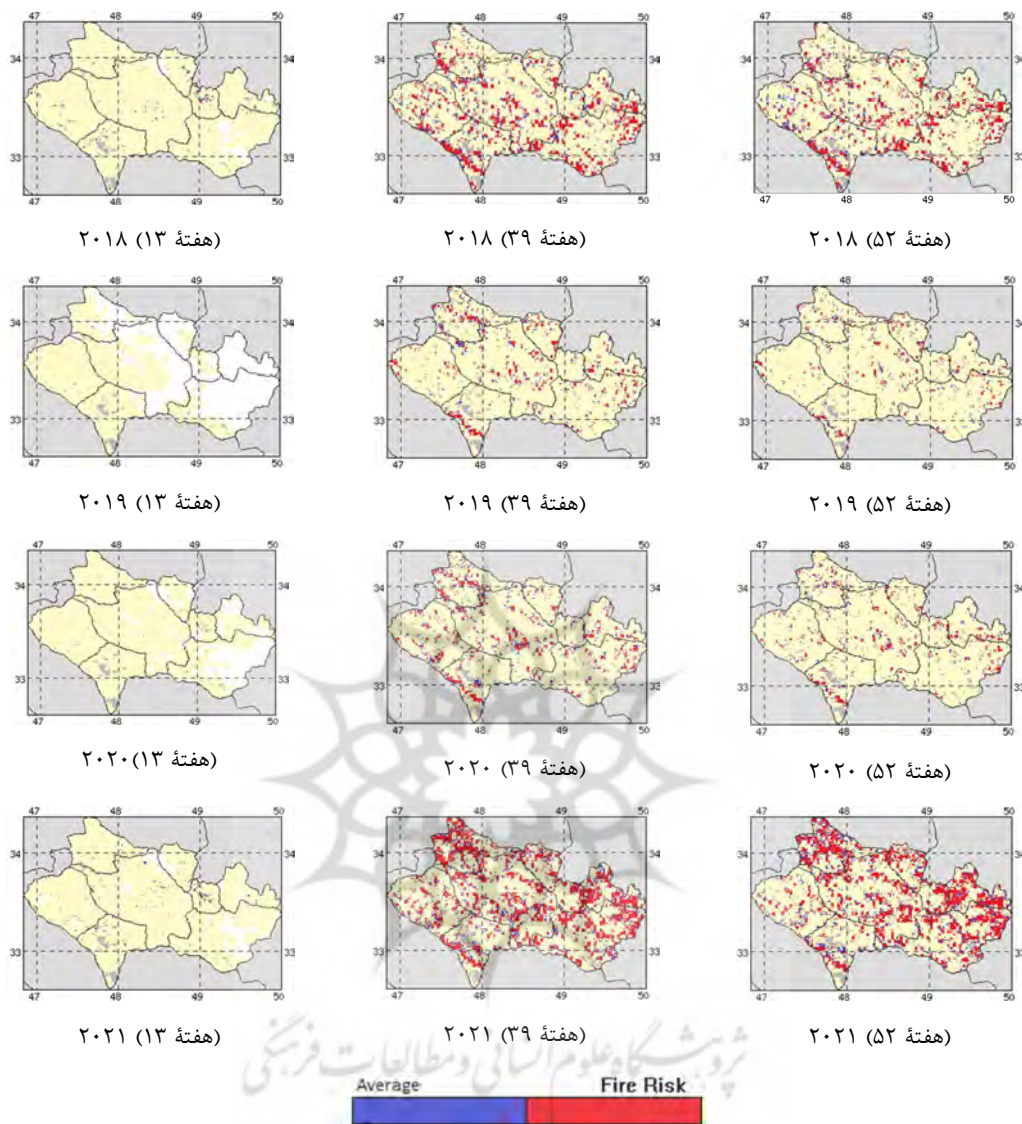
سال	هفته	NDVI	VCI	TCI	سال	هفته	NDVI	VCI	TCI
۲۰۱۸	۲۶	۱۸۳/۰	۰۷/۵۶	۹۲/۶۳	۲۰۲۰	۲۶	۱۸۶/۰	۶۶/۶۰	۶۷/۵۰
۲۰۲۱	۱۳	۲۱۲/۰	۲۹/۷۳	۹۸/۱۷	۲۰۲۱	۲۰	۲۱۵/۰	۹۴/۴۰	۹۸/۸
۲۰۲۱	۱۴	۲۲۵/۰	۳۵/۷۱	۰۱/۱۶	۲۰۲۱	۲۱	۲۰۷/۰	۶۸/۳۶	۰۵/۹
۲۰۲۱	۱۵	۲۳۲/۰	۶۳/۶۸	۸۳/۱۳	۲۰۲۱	۲۲	۲/۰	۰۴/۳۵	۲۳/۹
۲۰۲۱	۱۶	۲۳۵/۰	۴/۶۴	۱۱	۲۰۲۱	۲۳	۱۹۲/۰	۸۳/۳۴	۱۱/۱۰
۲۰۲۱	۱۷	۲۳۴/۰	۲۸/۵۹	۲۹/۸	۲۰۲۱	۲۴	۱۸۴/۰	۱۳/۳۶	۶۷/۱۱
۲۰۲۱	۱۸	۲۳/۰	۱۶/۵۳	۲۶/۸	۲۰۲۱	۲۵	۱۷۶/۰	۷۲/۳۷	۴۳/۱۴
۲۰۲۱	۱۹	۲۲۲/۰	۵/۴۶	۵۷/۸	۲۰۲۱	۲۶	۱۶۹/۰	۹۶/۴۰	۷۷/۲۰

براساس شکل ۷ که تغییرات پوشش گیاهی را در هفته‌های ۱۳، ۳۹ و همچنین هفتهٔ پایانی سال میلادی نشان می‌دهد، می‌توان گفت طی دورهٔ مورد مطالعه، شدت یا ضعف شرایط وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی هر سال با سال دیگر متفاوت بوده است. انتخاب هریک از هفته‌ها، با بازهٔ زمانی دارای تفاوت چند هفته‌ای از هم، به این دلیل است که شرایط وقوع آتش‌سوزی بهتر نشان داده شود و وجود این شرایط، حتی در فصل زمستان را در این استان اثبات کند. باید به این نکته اشاره کرد که پوشش گیاهی در انتهای ماه ژانویه دچار خشکسالی بوده اما در هفته‌های بعد، هرچند با دریافت بارش بیشتر، تغییر چندانی در وضعیت خشکسالی آن حاصل نشده است. به عبارت دیگر ماه‌های ابتدایی هر سال را می‌توان به‌منزلهٔ نمونهٔ وضعیت پوشش گیاهی انتخاب کرد. زمانی که میزان شاخص‌های رطوبتی و دمایی پوشش گیاهی کمتر از ۴۰ باشد، ریسک آتش‌سوزی در آن افزایش چشمگیری می‌یابد و به‌دیگر سخن، می‌توان بین بارش و شرایط خشکسالی و میزان خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی رابطه‌ای مستقیم در نظر گرفت و نیز بیان کرد که خشکسالی‌های پی‌درپی زمینه‌ساز وقوع آتش‌سوزی است. این مسئله زمانی تشدید می‌شود که شرایط بارشی طی دو ماه متوالی تکرار شود (شکل‌های ۷ و ۸).

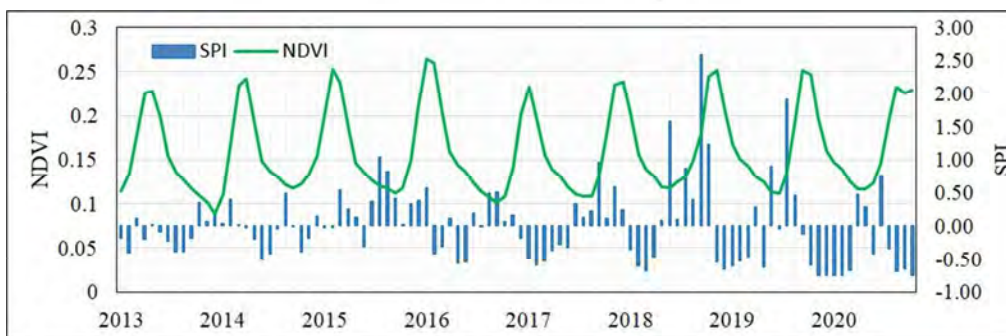
می‌شود گفت که در بسیاری از بخش‌های منطقهٔ مورد مطالعه، طی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱، میزان این شاخص در پایین‌ترین حد بوده است. این وضعیت در بیشتر بخش‌های استان به چشم می‌خورد و در راهنمای شکل‌ها به آن اشاره شده است. وضعیت مساعد دارای خطر پایین با رنگ آبی مشخص شده است. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، در دورهٔ مورد مطالعه، SPI ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر خشک است. در ژوئن، ژوئیه و اوت ۲۰۱۵، SPI مثبت است. اوت خشک‌ترین ماه بارشی در استان لرستان براساس SPI محسوب می‌شود. در ۲۰۱۵ میانگین SPI، در بیشتر ماه‌های سال، مثبت است که می‌توان آن را در افزایش مقادیر NDVI، طی سال ۲۰۱۶، به‌خوبی مشاهده کرد. به‌طور کلی نمودار SPI طی سال‌های اخیر، در بیشتر ماه‌ها، منفی بوده است. نتایج حاصل از همبستگی شرایط بارشی با شاخص‌های پوشش گیاهی نشان‌دهندهٔ ارتباط مثبت بین هریک از شاخص‌ها با شاخص استاندارد بارش است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، میزان همبستگی شاخص استاندارد بارش با NDVI، VCI و TCI به‌ترتیب، ۰/۰۰۳۷، ۰/۰۰۴۸ و ۰/۱۷۴ محاسبه شده است.



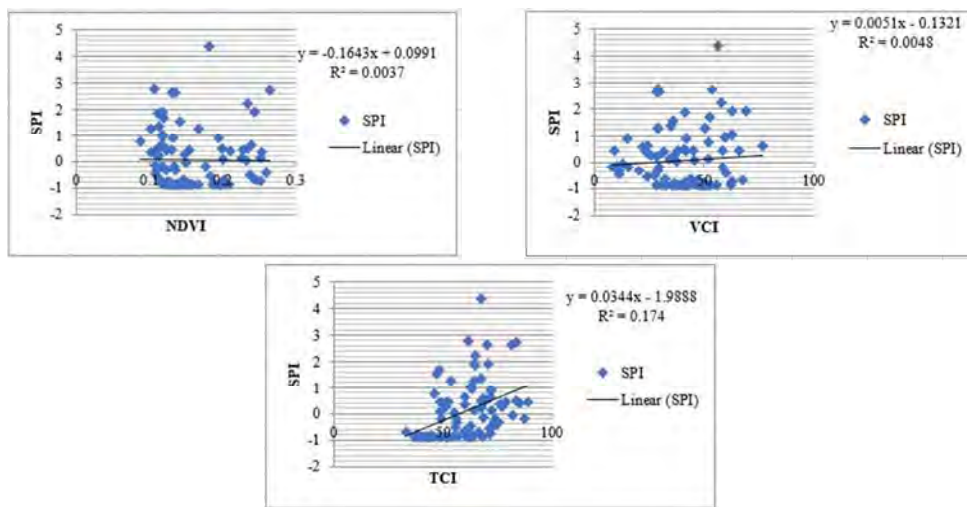
شکل ۷. خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان



شکل ۸. خطر آتش‌سوزی در پوشش گیاهی استان لرستان



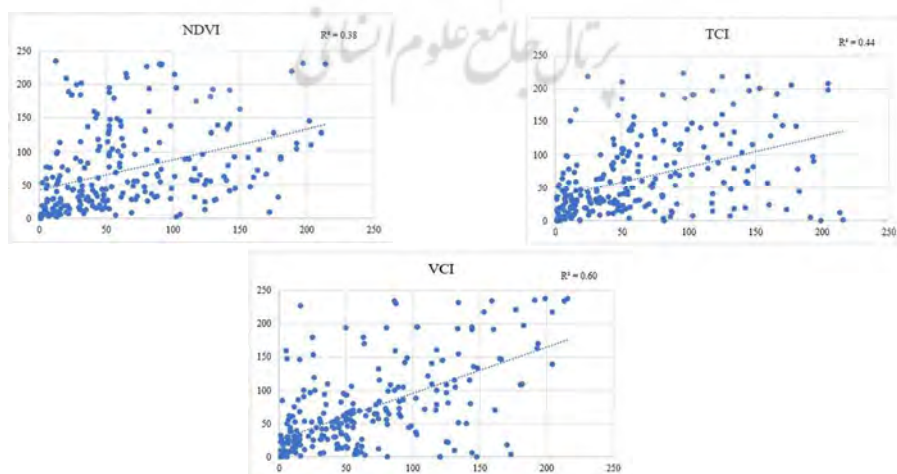
شکل ۹. نمودار سری زمانی میانگین ماهیانه (ژانویه تا دسامبر) NDVI و SPI در استان لرستان



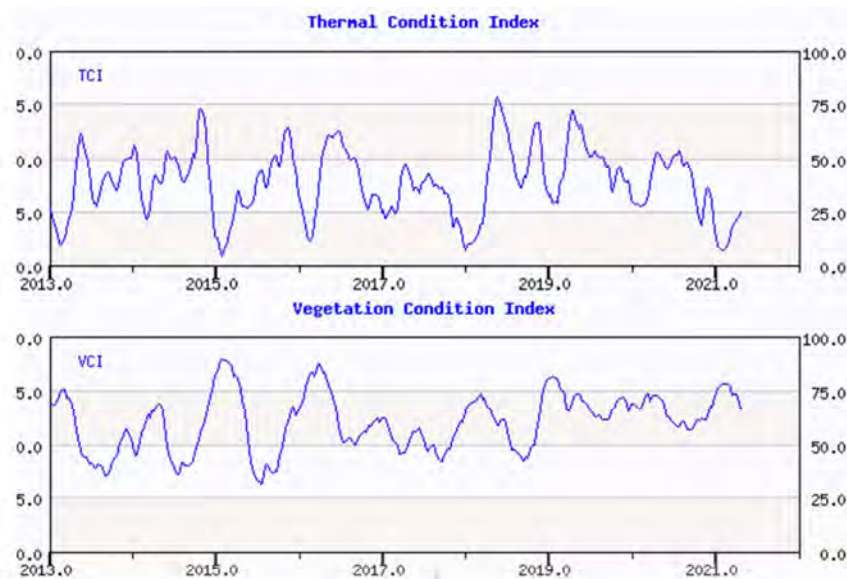
شکل ۱۰. نمودار همبستگی SPI با هریک از شاخص‌های پوشش گیاهی در استان لرستان

بوده است. این روند در سال‌های ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱ کمترین میزان را داشته و خشک‌ترین زمان این شاخص در میانه ۲۰۱۵ بوده است. به دلیل تغییرات زیاد میزان شاخص‌های پوشش گیاهی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی، در قیاس با بارش دریافتی در منطقه مطالعاتی از لحاظ زمانی و مکانی، از همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن استفاده شد و طبق نتایج آن، میزان همبستگی SPI با NDVI، TCI و VCI به ترتیب، ۰/۳۸ و ۰/۴۴ و ۰/۶۰ به دست آمد (شکل ۱۱).

طبق شکل ۱۱، TCI دچار افت و خیز نسبتاً زیادی بوده و در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱، کمترین میزان را داشته است. در میانه سال ۲۰۱۸، مقدار این شاخص در بازه ۷۵ قرار داشته است. روند آن نشان می‌دهد، در هفته‌های اولیه هر سال، این شاخص افزایشی است و در هفته‌های پایانی سال، دچار سیر نزولی می‌شود. براساس نمودار میانگین هفتگی VCI، ملاحظه می‌شود که سری زمانی میانگین هفتگی این شاخص، طی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹، سیر صعودی داشته و میزان افزایش آن ۷۵٪ و حتی بیشتر از آن



شکل ۱۱. نمودار همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن هریک از شاخص‌های پوشش گیاهی با شاخص SPI



شکل ۱۲. میانگین هفتگی هریک از شاخص‌های مورد مطالعه در استان لرستان

۳- نتیجه‌گیری

شد. شاخص وضعیت دمایی (TCI) همبستگی بیشتری با SPI دارد و می‌توان، با استفاده از TCI، مناطق در معرض خطر وقوع آتش‌سوزی در پوشش گیاهی را شناسایی و استخراج کرد. نتایج این نوشتار نشان می‌دهد که بهترین شاخص مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، برای پایش خشکسالی، SPI و TCI است. به‌علاوه، زمانی که پوشش گیاهی دچار خشکسالی شده است، شرایط وقوع آتش‌سوزی در ماه‌های ژوئن و ژوئیه تشدید می‌شود و این شرایط حتی در ماه‌های سرد سال هم، در منطقه مطالعاتی، همچنان وجود دارد و مختص ماه‌های گرم سال نیست که محیط شکننده و بستر ساز وقوع این خطر است. به دلیل تغییرات زیاد شاخص‌های پوشش گیاهی مؤثر در وقوع آتش‌سوزی در قیاس با بارش دریافتی در این منطقه از لحاظ زمانی و مکانی، از همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن استفاده شد و برپایه نتایج آن، میزان همبستگی SPI با TCI، NDVI و VCI به ترتیب، ۰/۳۸ و ۰/۴۴ و ۰/۶۰ به دست آمد. نتایج این پژوهش با پژوهش کیاورز^۱ و همکاران (۲۰۲۴) مقایسه

نتایج این پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی در استان لرستان همواره با خطر وقوع آتش‌سوزی روبه‌روست و این خطر، در سال‌هایی که کمبود بارش وجود داشته، در ماه‌های گوناگون بسیار زیاد است. اثبات شد که چنانچه در ماه‌های اول سال آبی کمبود بارش وجود داشته باشد، حتی در ماه‌های سرد سال خطر آتش‌سوزی پوشش گیاهی وجود دارد و این خطر در ماه‌های گرم افزایش بسیار چشمگیری می‌یابد و چنین رخدادی در سال ۲۰۲۱ به وقوع پیوسته است. محاسبات SPI نشان داد که ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر در استان لرستان شاخص SPI منفی است. برپایه نتایج، بهترین شاخص مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، برای پایش خشکسالی پوشش گیاهی و خطر آتش‌سوزی در منطقه مورد مطالعه، TCI است. در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵، مخاطره آتش‌سوزی در پوشش گیاهی با بیشترین شدت در مناطق غربی و مرکزی استان رخ داده و در سال ۲۰۲۱، شدیدترین آن در منطقه یادشده به وقوع پیوسته است. میزان همبستگی شاخص استاندارد بارش با NDVI، VCI و TCI به ترتیب، ۰/۰۳۷ و ۰/۰۴۸ و ۰/۱۷۴ محاسبه

1. Kiavarz

- California Fire Season**, Bull. Am. Meteorol. Soc., 101, PP. S1-S4, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0275.1>.
- Holdren, J.P. & Ehrlich, P.R., 1974, **Human Population and Global Environment**, Am. Sci., 62, PP. 282-292.
- Hui, C., 2006, **Carrying Capacity, Population Equilibrium, and Environment's Maximal Load**, Ecol. Modell., 192(1-2), PP. 317-320, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.001>.
- Jones, M.W., Abatzoglou, J.T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forke, M., Smith, A.J.P., Burton, C., Betts, R.A., Werf, G.R., ... et al., 2022, **Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change**, Rev. Geophys., 60, PP. 1-76.
- Kiavarz, M., Darvishi Boloorani, A., Neysani Samani, N. & Alavipanah, S.K., 2024, **Spatiotemporal Analysis of Wildfire in the Tigris and Euphrates Basin: A Remote Sensing Based Wildfire Potential Mapping**, Remote Sensing Applications: Society and Environment, 34, P. 101150.
- Kogan, F.N., 1995, **Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data**, Bull. Am. Meteorol. Soc., 76, PP. 655-667, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2).
- Kogan, F.N., 1997, **Global Drought Watch from Space**, Bull. Am. Meteorol. Soc., 78, PP. 621-636.
- Kogan, F.N., 2001, **Contribution of Remote Sensing to Drought Early Warning**, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Environmental Satellite Data and Information Services (NESDIS), Washington: DC. U.S.A.
- Lashni Zand, M., 2003, **Study of the Intensity, Continuity and Frequency of Climatic Droughts in Six Basins Located in the West and Northwest of the Country**, Proceedings of the Third Regional Conference and the First National Conference on Climate Change. Isfahan, October 19-November 1, PP. 266-275 (in Persian).
- شد. این پژوهشگران آتش‌سوزی در حوضه دجله و فرات را به‌صورت فضایی و زمانی تحلیل کردند و پتانسیل آتش‌سوزی را براساس سنجش از دور، نقشه‌برداری نمودند. آنها برای انجام دادن این پژوهش از آمار بارش، دما، سرعت باد، شاخص وضعیت پوشش گیاهی، شاخص خشکسالی، تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق مرجع به‌منزله محرک‌های اصلی آتش‌سوزی‌های جنگلی بهره بردند. می‌توان گفت که نتایج پژوهش حاضر با تحقیق کیاورز و همکاران، در آمار استفاده‌شده و همچنین نتایج کار آنها در زمینه تأثیر بارش در وقوع آتش‌سوزی‌ها، هم‌خوانی بسیاری دارد.

۴- منابع

- Agricultural Research, Education and Extension Organization, 2012, **Draft Strategic Document for the Development of National Drought Management Technology**, Presidential Vice-President for Science and Technology, Water, Drought, Erosion and Environment Development Technology Headquarters (in Persian).
- Archibald, S., Roy, D.P., Wilgen, B.W. & Scholes, R.J., 2009, **What Limits Fire an Examination of Drivers of Burnt Area in Southern Africa**, Glob. Chang., 15, PP. 613-630, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>.
- Berhan, G., Hill, S., Tadesse, T. & Atnafu, S., 2011, **Using Satellite Images for Drought Monitoring: A Knowledge Discovery Approach**, J. Strategic Innov. Sustain., 7(1), P. 135.
- Bhuiyan, C., 2008, **Desert Vegetation during Droughts: Response and Sensitivity**, Int. Arch. Photogr. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 37(B8), PP. 907-912.
- Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J., & Reed, B.C., 2008, **Drought Stress in Vegetation**, GIS Cience Remote Sensing, 45, PP. 16-46, <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.1.16>.
- Brown, T., Leach, S., Wachter, B. & Gardunio, B., 2020, **The Extreme 2018 Northern**

- Littell, J.S., Peterson, D.L., Riley, K.L., Liu, Y. & Luce, C.H., 2015, **Fire and Drought**, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office: Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.1111/gcb.13275>.
- Littell, J.S., Peterson, D.L., Riley, K.L., Liu, Y. & Luce, C.H., 2016, **A review of the relationships between drought and forest fire in the United States**, *Global Change Biology*, 22(7), PP. 2353-2369, <https://doi.org/10.1111/gcb.13074>.
- Mansoor, S., Farooq, I.; Kachroo, M.M., Mahmoud, A.E.D., Fawzy, M., Popescu, S.M., Alyemeni, M.N., Sonne, C., Rinklebe, J. & Ahmad, P., 2022, **Elevation in Wildfire Frequencies with Respect to the Climate Change**, *Environ. Manag.*, 301, P. 113769.
- Mays, C. & McLoughlin, S., 2022, **The Role of Permian-Triassic Wildfires in Extinction, Carbon Cycling, and Environmental Change in Eastern Gondwana**, *Palaaios*, 37, PP. 292-317, <https://doi.org/10.2110/palo.2021.051>.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kliest, J., 1995, **Drought Monitoring with Multiple Time Scales**, Proceedings of the 9th Conference of Applied Climatology, 15-20 January, Dallas TX, American Meteorological Society, Boston, MA., PP. 233-236, <https://doi.org/10.4236/oalib.1106078>.
- Palmer, W.C., 1965, **Meteorological Drought**, Office of Climatology Research Paper, 45, Weather Bureau: Washington, DC, USA.
- Parisien, M.A. & Moritz, M.A., 2009, **Environmental Controls on the Distribution of Wildfire at Multiple Spatial Scales**, *Ecol. Monogr.*, 79, PP. 127-154, <https://doi.org/10.1890/07-1289.1>.
- Pausas, J.G. & Keeley, J.E., 2009, **A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life**, *BioScience*, 59, PP. 593-601, <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>.
- Pausas, J.G. & Ribeiro, E., 2013, **The Global Fire-Productivity Relationship**, *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 22, PP. 728-736. <https://doi.org/10.1111/geb.12043>.
- Swetnam, T.W. & Betancourt, J.L., 1998, **Mesoscale Disturbance and Ecological Response to Decadal Climatic Variability in the American Southwest**, *J. Clim.*, 11, PP. 3128-3147, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<3128:MDAERT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<3128:MDAERT>2.0.CO;2).
- Tadesse, T., Demisse, G.B., Zaitchik, B. & Dinku, T., 2014, **Satellite-Based Hybrid Drought Monitoring Tool for Prediction of Vegetation Condition in Eastern Africa: A Case Study for Ethiopia**, *Water Resour. Res.*, 50, PP. 2176-2190. <https://doi.org/10.1002/2013WR014281>.
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S. & Lopez-Moreno, J.I.A., 2010, **Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standard-ized Precipitation Evapotranspiration Index**, *J. Clim.*, 23, PP. 1696-1718, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Wells, N., Goddard, S. & Hayes, M.J., 2004, **Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index**, *J. Clim.*, 17, PP. 2335-2351, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2).
- Westerling, A.L., 2016, **Increasing Western US Forest Wildfire Activity: Sensitivity to Changes in the Timing of Spring**, *Philos. Trans. R. Soc. Sci.*, 371, P. 20150178.
- You, Q., Wu, T., Shen, L., Pepin, N., Zhang, L., Jiang, Z., Wu, Z., Kang, S. & AghaKouchak, A., 2020, **Review of Snow Cover Variation over the Tibetan Plateau and Its Influence on the Broad Climate System**, *Earth-Sci.* 201, P. 103043, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103043>.
- Yu, L., Zhong, S. & Sun, B., 2020, **The Climatology and Trend of Surface Wind Speed over Antarctica and the Southern Ocean and the Implication to Wind Energy Application**, *Atmosphere*, 11, PP. 108-127, <https://doi.org/10.3390/atmos11010108>.
- Zhao, F. & Liu, Y., 2019, **Atmospheric Circulation Patterns Associated with Wildfires in the Monsoon Regions of China**, *Geophys. Res.*, 46, P. 4873-4882, <https://doi.org/10.1029/2019GL081932>.
- Zhao, F. & Liu, Y., 2021, **Important Meteorological Predictors for Long-Range Wildfires in China**, *For. Ecol.*, 499, P. 119638, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119638>.