



Original Article

Temporal and Spatial Analysis of Meteorological Drought Variations During the Saffron Growing Season using the SPI and SPEI Indices in Khorasan Razavi Province

Ali Shahi ¹, Bromand Salahi ^{2*}

1- PhD of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding author: salahi@uma.ac.ir

Received: 31 May 2026; Revised: 23 June 2026, Accepted: 30 August 2026

Extended Abstract

Introduction: The cultivation of saffron is highly important due to the distinctive characteristics of this valuable crop. Since Iran is the main global production center of saffron and a large proportion of farmers' livelihoods, especially in northeastern Iran, depend on this plant, evaluating its various climatic conditions is essential. Given the economic importance of this crop, special attention must be paid to its growth conditions during the critical season, particularly autumn. Among the most important meteorological variables affecting saffron growth are precipitation and temperature; a decrease in precipitation and an increase in temperature can lead to drought and, consequently, serious damage to saffron plants.

Materials and Methods: In this study, monthly temperature and precipitation data for eight synoptic meteorological stations over a 20-year period (2004–2023) were used, and the data were obtained from the Meteorological Organization of Iran. The study area was Razavi Khorasan Province, located in northeastern Iran, within the geographical coordinates of 33.5° to 37.5° N latitude and 56° to 61.5° E longitude. To analyze the effect of drought on saffron, a 3-month period was calculated for both drought indices because this period precisely overlaps with autumn, the active growth period of saffron. The index calculations were performed using R software. In this study, autumn was considered as the three months of September, October, and November, according to the World Meteorological Organization recommendations. Trend graphs were plotted for each station and each index over the two decades, and the trends and their significance were evaluated using the Mann–Kendall slope. Drought with an intensity lower than –1.5 in the SPI/SPEI indices leads to reduced bud formation, decreased flowering, and



reduced corn growth. Therefore, all values lower than -1.5 were extracted for the autumn season and presented using a heatmap. Based on the number of extreme events at each station, the study area was classified into three categories—low-risk, moderate-risk, and high-risk—in terms of autumn drought risk for saffron. Finally, to determine the spatial pattern of autumn drought in Razavi Khorasan Province, the 20-year average of the two indices was calculated for each station.

Results and Discussion: Drought conditions at the eight synoptic stations were evaluated over the 20-year period based on the Mann–Kendall slope and significance levels. A negative slope indicated a downward trend (intensifying drought), while a positive slope indicated an upward trend (weakening drought). Drought risk classification based on the number of events (0–1: low-risk, 2–4: moderate-risk, 5 or more: high-risk) revealed that Mashhad and Neyshabur were high-risk stations with 7 and 5 events, respectively. In contrast, Kashmar and Torbat Jam were classified as low-risk stations with only one event each. Zoning maps of both indices showed that eastern parts of Razavi Khorasan Province experienced more severe drought conditions compared to the western parts. In other words, autumn moisture stress was lower in the western region, making it more suitable for saffron cultivation. Trend analysis indicated that the SPI index did not exhibit any statistically significant trends at any station, whereas the SPEI index showed significant trends at six stations: three stations at the 99.9% significance level and three at the 99% significance level. This highlights the critical role of temperature and evapotranspiration in intensifying drought across the region. The highest number of extreme drought events occurred at the Mashhad station (7), while the lowest occurred at Kashmar and Torbat Jam stations (1 each).

Conclusion: The findings of this study indicate that the eastern parts of the study area are more sensitive and susceptible to drought, while the western parts, owing to lower drought risk, provide more favorable conditions for saffron cultivation. The results further suggest that precipitation-deficit droughts were more destructive in terms of intensity than thermal–evaporative droughts.

Conflict of Interest: There are no conflicts of interest by the authors.

Keywords : Drought, Khorasan Razavi Province, Saffron, SPEI, SPI.



نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)

جلد چهاردهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۵

شماره صفحه: ۹۲-۱۰۹

doi 10.22077/jsr.2026.11431.1306

مقاله پژوهشی

تحلیل زمانی و مکانی تغییرات خشکسالی هواشناسی در فصل رشد زعفران با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI در استان خراسان رضوی

علی شاهی^۱، برومند صلاحی^{۲*}

۱- دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

* نویسنده مسئول: salahi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی زمانی و مکانی تغییرات خشکسالی هواشناسی در فصل رشد زعفران با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI، در استان خراسان رضوی واقع در ایران در دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ انجام شد. برای این منظور، از ۸ ایستگاه همدیدی منتخب به عنوان نماینده منطقه مورد مطالعه استفاده شد. داده‌های بارش و دما در مقیاس ماهانه برای ایستگاه‌های زمینی از سازمان هواشناسی دریافت شد. نمودارهای روند برای هر ایستگاه و هر شاخص در ۲ دهه ترسیم شدند. خشکسالی با شدت کم‌تر از مقدار ۱/۵- در شاخص‌های SPI/SPEI در فصل پاییز استخراج شد. خروجی به صورت نمودار هیت‌مپ ترسیم گردید. با توجه به تعداد رخداد حدی در هر ایستگاه، طبقه‌بندی منطقه مورد مطالعه به ۳ طبقه (کم‌ریسک، متوسط و پرریسک) از بابت ریسک خشکسالی پاییزه برای زعفران به دست آمد. محاسبات نشان داد که، شاخص SPI فاقد روند معنی‌دار آماری در تمامی ایستگاه‌ها بود، اما شاخص SPEI روند معنی‌داری را در ۶ ایستگاه نشان داد که ۳ ایستگاه با سطح معنی‌داری ۹۹/۹ درصد و ۳ ایستگاه دیگر با سطح معنی‌داری ۹۹ درصد تأیید شدند. این موضوع بیانگر نقش مؤثر مؤلفه‌های دما و تبخیر در تشدید خشکسالی‌های منطقه است. نتایج نشان داد که نواحی شرقی منطقه مطالعه شده استعداد و حساسیت بیشتری نسبت به بروز خشکسالی دارند و در مقابل، نواحی غربی منطقه مورد مطالعه به دلیل ریسک کمتر خشکسالی، شرایط مناسب‌تری برای کشت زعفران را نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که خشکسالی‌های ناشی از کمبود بارش از نظر شدت، مخرب‌تر از خشکسالی‌های حرارتی-تبخیری بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: استان خراسان رضوی، زعفران، خشکسالی، SPI، SPEI.



Copyright © 2026 by the authors
Published by [University of Birjand](https://www.birjand.ac.ir/). Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقدمه

خشکسالی در فصل‌های حساس رشد محصولات خاص پرداخته‌اند. علاوه بر این، در بسیاری از پژوهش‌ها تنها از یک شاخص خشکسالی استفاده شده است، در حالی که ترکیب شاخص‌های مختلف می‌تواند تصویر دقیق‌تری از شرایط واقعی اقلیمی ارائه دهد (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014). بنابراین، بررسی الگوی زمانی و مکانی خشکسالی در فصل پاییز با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI می‌تواند درک دقیق‌تری از تغییرپذیری اقلیم در مناطق اصلی کشت زعفران فراهم کرده و مبنای علمی مناسبی برای مدیریت ریسک خشکسالی و برنامه‌ریزی کشاورزی در این منطقه فراهم آورد.

زعفران یکی از گیاهان استثنایی است که به طلای سرخ شهرت دارد. این محصول کشاورزی در عین نیاز آبی کم، دارای راندمان اقتصادی بسیار بالایی است و با اشتغال‌زایی فراوان موجبات جلوگیری از مهاجرت روستاییان مناطق کم‌آب، را مهیا می‌کند (Shahdost & Ahmadvand, 2021). زعفران از تیره زنبقیان، گران‌ترین محصول کشاورزی جهان محسوب می‌شود و برای تولید هر کیلوگرم کلاله به ۱۵۰ تا ۲۰۰ گل نیاز است و برداشت آن به‌صورت دستی و پرمحمت انجام می‌گیرد (Mehmeti et al., 2024). زعفران به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین محصولات کشاورزی ایران، نقش قابل‌توجهی در افزایش درآمد ارزی، ایجاد فرصت شغلی و توسعه صادرات غیر نفتی دارد (Khodashenas, 2018). ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده زعفران در جهان است (Mehmeti et al., 2024).

بر اساس پیامدهای تغییر اقلیم، مخاطرات جوی نظیر خشکسالی منجر به کم‌آبی و تخریب منابع خاک می‌گردد، در چنین شرایطی کشاورزی پایدار به‌عنوان یک راهکار حیاتی مطرح شده است (Rusdiyana et al., 2024). کشاورزی پایدار به دلیل تأمین امنیت غذایی، حفاظت از منابع طبیعی و توسعه اجتماعی-اقتصادی مناطق روستایی نقش کلیدی دارد (Herman, 2024). در شرایط تشدید بحران آب و لزوم انتقال به کشاورزی پایدار، شناسایی پهنه‌های مستعد برای کشت محصولات کم‌آب و با ارزشی مانند زعفران، از اهمیت استراتژیکی برخوردار است (Aliyari & Sharifzadeh, 2025).

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود و ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند خشک جهانی، به‌طور مکرر تحت تأثیر این پدیده قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که در دهه‌های اخیر، فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در بسیاری از مناطق ایران افزایش یافته و تغییرات اقلیمی به‌ویژه از طریق افزایش دما و تغییر الگوی بارش، نقش مهمی در تشدید این وضعیت داشته است (Tabari, 2020; Spinoni et al., 2015). در چنین شرایطی، پایش دقیق خشکسالی با استفاده از شاخص‌های استاندارد اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در میان شاخص‌های مختلف، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) از پرکاربردترین شاخص‌ها برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی محسوب می‌شوند، زیرا SPI تنها بر پایه تغییرات بارش عمل می‌کند، در حالی که SPEI اثر همزمان بارش و تبخیر و تعرق وابسته به دما را در نظر می‌گیرد و بنابراین برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی مناسب‌تر است (Vicente-Serrano et al., 2010).

استان خراسان رضوی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی در مناطق خشک ایران، به‌طور ویژه در معرض نوسانات اقلیمی قرار دارد. این استان با دارا بودن بخش عمده‌ای از اراضی زیر کشت زعفران، نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید جهانی این محصول ایفا می‌کند؛ به‌طوری که بیش از ۹۰ درصد زعفران جهان در ایران تولید می‌شود و بخش قابل توجهی از آن در استان‌های خراسان رضوی و جنوبی کشت می‌شود (Koocheki & Khajeh-Hosseini, 2008; FAO, 2023). زعفران گیاهی است که به شرایط اقلیمی به‌ویژه الگوی بارش پاییزی بسیار حساس است و کمبود رطوبت خاک در ابتدای فصل رشد می‌تواند موجب کاهش گل‌دهی و افت عملکرد شود (Koocheki, 2004). از آنجایی که دوره گل‌دهی و رشد اولیه این گیاه عمدتاً در فصل پاییز رخ می‌دهد، وقوع خشکسالی در این بازه زمانی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر تولید آن داشته باشد.

با وجود اهمیت اقتصادی و اقلیمی زعفران در منطقه، بسیاری از مطالعات خشکسالی در ایران عمدتاً در مقیاس سالانه یا چندفصلی انجام شده‌اند و کمتر به تحلیل

سال‌های مورد مطالعه در محدوده نرمال قرار دارند و فراوانی خشکسالی در چهار ایستگاه خراسان جنوبی دو برابر ایستگاه‌های مورد مطالعه در خراسان رضوی می‌باشد. همچنین نمودار ریسک-عملکرد استاندارد، ایستگاه‌های قاین، بیشترین و نه‌بندان کمترین ریسک نسبی نسبت به ایستگاه مرجع (تربت حیدریه) را داشتند. ایوب و همکاران (Ayoub et al., 2024) در پژوهشی حساسیت عملکرد زعفران را نسبت به تغییرات دما در کشمیر طی دوره زمانی (۱۹۵۱-۲۰۲۱) را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که به علت افزایش دما به مقدار ۰/۳ درجه سانتی‌گراد در دهه، محصول دهی گیاه زعفران از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۵، ۶ تن کاهش یافته است؛ این کاهش در سطح زیر کشت محصول نیز مشاهده شده تا جایی که در فاصله زمانی اشاره شده، حدود ۲۰۰۰ هکتار کاهش سطح زیر کشت رخ داده است. زینل زاده و همکاران (Zynal Zadeh et al., 2025) به تحلیل روند شاخص‌های حدی بارش و دما و همچنین تأثیر این نمایه‌ها بر عملکرد زعفران در دو ایستگاه همدیدی کاشمر و تربت حیدریه پرداختند. برای این منظور از داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش روزانه ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) با روش رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. نتایج نشان داد که بارش سالانه به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج مطالعه حاکی از آن است که نقش فرین‌های دمایی بر عملکرد زعفران در این مناطق غالب بوده است.

سعیدی و همکاران (Saeedi et al., 2026) به ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر مناطق مناسب برای کشت زعفران در ایران پرداختند. برای این منظور، از نرم‌افزار TerrSet به‌همراه ابزار مدل‌ساز سازگاری تغییر اقلیم (CCAM) استفاده شده و مدل‌های MAGICC7 و SCENGEN برای تولید نقشه‌های تغییرات دمایی و بارشی تا سال ۲۱۰۰ به کار گرفته شدند. داده‌های مرجع اقلیمی (۱۹۸۱-۲۰۱۰) نیز در تحلیل‌های میدانی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی به‌ویژه در سناریوی A1FI-MI تأثیرات قابل توجهی برای مناطق مناسب برای کشت زعفران در ایران خواهد داشت. به‌عبارتی نمایانگر ادامه روند مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و افزایش گرمایش جهانی است، تغییرات شدیدتری در الگوهای بارشی و دمایی ایجاد می‌کند که منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در سازگاری شرایط

ایران، به دلیل قرارگیری در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، از جمله مناطق بسیار حساس به آثار تغییر اقلیم به‌شمار می‌آید. شواهد حاصل از مطالعات اقلیمی متعدد حاکی از آن است که در اغلب دشت‌های کشور، روند کاهش بارش و افزایش میانگین دمای سالانه در حال رخ دادن است (Javan & Movaghari, 2024). علاوه بر این، اقلیم ایران با پدیده خشکسالی‌های شدید مواجه است (Kheyruri et al., 2023)؛ چالش‌هایی که بر اساس پیش‌نگری‌ها، انتظار می‌رود شدت آن‌ها در سال‌های پیش رو بیشتر شود (Ghazi et al., 2025).

شاه و همکاران (Shaha et al., 2015) به بررسی خشکسالی در منطقه سورت با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI پرداختند. برای این منظور داده‌های بارش دوره زمانی ۴۰ ساله را به کار بردند. نتایج مطالعه نشان داد که خشکسالی واقعی با خشکسالی محاسبه شده با SPI، به‌جز شرایط خشکسالی بسیار شدید، بسیار مشابه است.

دولت آبادی و خاشعی (Dowlatabadi & Khashei, 2019) رابطه بین عملکرد زعفران و شاخص RDI در چهار شهر مستعد کشت و تولید آن را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، شاخص RDI سه ماهه در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۳ در ایستگاه‌های همدیدی بیرجند، قاین، فردوس و نه‌بندان محاسبه و پس از مقایسه با عملکرد، رابطه رگرسیونی بین شاخص خشکسالی هر ماه با عملکرد تعیین شد. نتایج نشان داد که شدیدترین خشکسالی در بیرجند و قاین در سال ۸۰-۱۳۷۹، ۲۵ سال آماری مورد مطالعه و در فردوس و نه‌بندان در سال ۷۹-۱۳۷۸ به وقوع پیوست؛ به‌طوری‌که در کلیه ایستگاه‌ها، خشکسالی متوسط بیشترین تداوم را داشته و وقوع آن به‌طور متوسط هر سه سال یک‌بار حتمی است. آقا محمدی و همکاران (Aghamohamadi et al., 2019) در پژوهشی جهت کاهش خسارت‌های ناشی از خشکسالی بر روی محصول زعفران، به ارزیابی ریسک خشکسالی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو پرداختند. برای این منظور ۸ ایستگاه همدیدی در دوره زمانی ۱۳۶۸-۱۳۹۳ از ۲ استان خراسان رضوی و خراسان جنوبی مورد مطالعه قرار گرفتند. در این راستا شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) ماهانه و میانگین دمای ماهانه به‌عنوان متغیرهای مستقل در تابع توزیع عملکرد محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشترین

خشکسالی، دو شاخص پرکاربرد و مکمل شامل SPI و SPEI به‌طور هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده هم‌زمان از این دو شاخص این امکان را فراهم می‌کند که خشکسالی‌های ناشی از کاهش بارش از خشکسالی‌های مرتبط با افزایش دما و تبخیر-تعرق تفکیک و تحلیل شوند؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در این پژوهش با استفاده از داده‌های اقلیمی بیست‌ساله هشت ایستگاه همدیدی منتخب در استان خراسان رضوی، تحلیل‌های زمانی و مکانی خشکسالی پاییزه شامل محاسبه شاخص‌ها در مقیاس سه‌ماهه، استخراج رخداد‌های حدی خشکسالی (کمتر از $-1/5$)، بررسی روند تغییرات شاخص‌ها و محاسبه میانگین‌های بلندمدت انجام شد. در نهایت، نتایج حاصل با هدف شناسایی الگوی مکانی و سطح ریسک خشکسالی در مناطق مختلف استان تحلیل گردید تا امکان تشخیص نواحی کم‌ریسک و پرریسک برای کشت زعفران فراهم شود. این رویکرد می‌تواند به بهبود درک ارتباط بین خشکسالی اقلیمی و پایداری تولید زعفران در یکی از مهم‌ترین مناطق تولید این محصول در جهان کمک کند.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مورد مطالعه

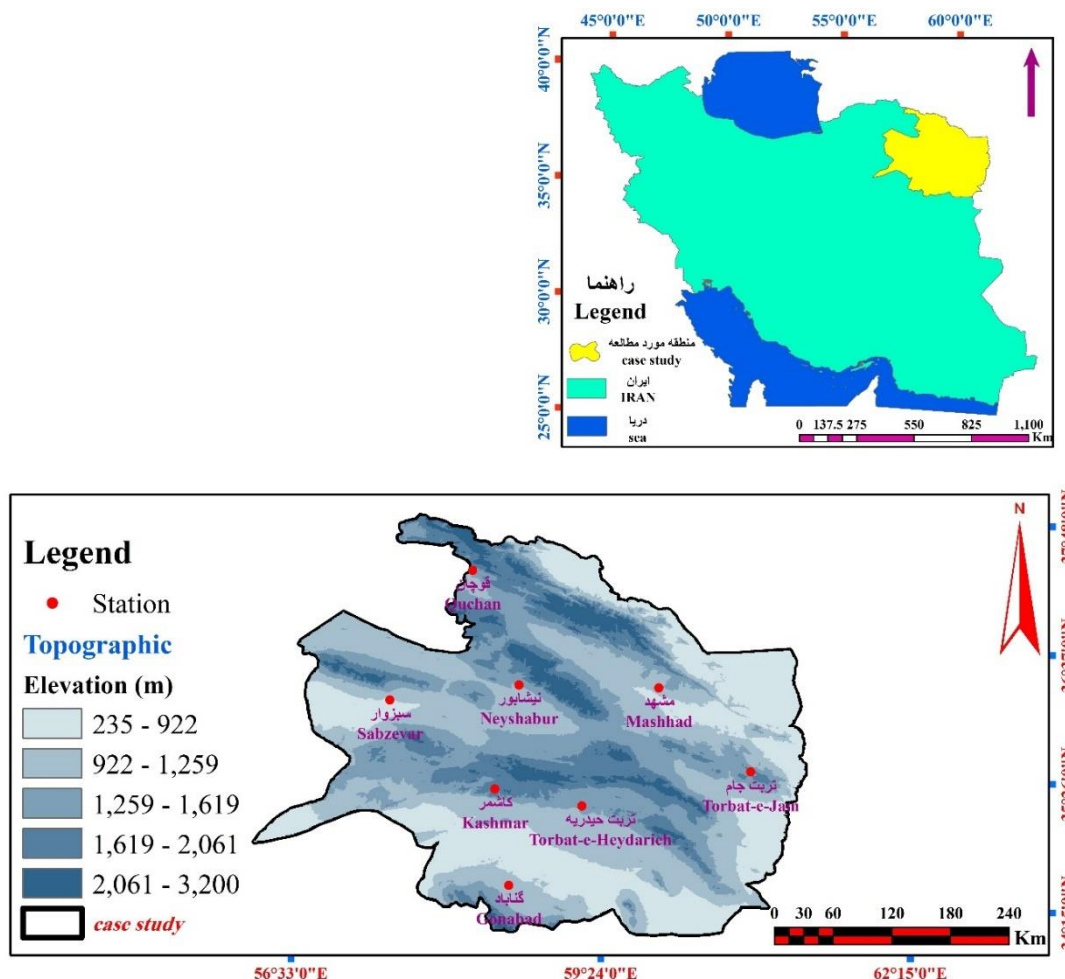
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان خراسان رضوی واقع در شمال شرق کشور ایران است که در محدوده جغرافیایی، عرض‌های $33/5$ تا $37/5$ درجه شمالی و طول‌های 56 تا $61/5$ درجه شرقی قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی دقیق خشکسالی هواشناسی، ۸ ایستگاه همدیدی منتخب واقع در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن معیارهایی همچون پراکنندگی جغرافیایی، تنوع اقلیمی، تفاوت ارتفاعی و دسترسی به داده‌های کامل و معتبر در بازه 2004 تا 2023 انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها شامل مشهد (مرکز استان)، گناباد، کاشمر، نیشابور، قوچان، سبزوار، تربت جام و تربت حیدریه هستند که به‌عنوان نماینده اقلیمی استان خراسان رضوی مورد مطالعه قرار گرفتند (شکل ۱).

اقلیمی برای رشد بهینه زعفران در نواحی سنتی تولید، به‌ویژه در منطقه خراسان می‌شود (تشدید شرایط مسبب برای خشکسالی).

این پژوهش با هدف شناخت دقیق خشکسالی هواشناسی پاییزی در مناطق اصلی کشت زعفران، محاسبه و تحلیل شاخص خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس سه‌ماهه ($SPI 3$ و $SPEI 3$) برای دوره ۲۰ ساله $2004-2023$ در هشت ایستگاه همدیدی استان خراسان رضوی، انجام گرفت. در این راستا، رخداد‌های خشکسالی مضر با آستانه کمتر از $1/5$ - استخراج شده و الگوی مکانی-زمانی آن‌ها در دوره آماری ۲۰ ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است.

با توجه به افزایش محسوس خشکسالی‌های اقلیمی پس از سال 2000 ، به‌ویژه در سال‌های 2018 ، 2021 و 2022 ، که اثرات مستقیم بر عملکرد زعفران در خراسان رضوی داشته‌اند. بر اساس وابستگی مستقیم رشد و گل‌دهی زعفران به شرایط رطوبتی پاییز؛ کوچک‌ترین ناهنجاری بارش یا افزایش تبخیر می‌تواند باعث اختلال در ظهور گل و رشد اندام‌های زیرزمینی شود. مطابق افزایش تقاضای جهانی برای مطالعات ناحیه‌ای خشکسالی با رویکرد محصول‌محور، مشابه استانداردهای نشریات Elsevier و Springer، که تحلیل هم‌زمان SPI و SPEI را لازم می‌دانند. از طرفی کمبود مطالعاتی که دوره رشد زعفران را با رویکرد اقلیمی- فصلی و مبتنی بر داده‌های روزآمد تا سال 2023 تحلیل کرده باشند. موارد ذکر شده اهمیت این پژوهش را در تصمیم‌گیری برای مدیریت خطر، برنامه‌ریزی آبیاری، پایش پیش‌دستانه خشکسالی و کمک به افزایش پایداری تولید زعفران در شرایط تغییر اقلیم را برجسته می‌کند.

با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه پایش و ارزیابی خشکسالی در ایران، اغلب این پژوهش‌ها خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی سالانه یا فصلی عمومی بررسی کرده‌اند و کمتر به تحلیل خشکسالی در دوره‌های بحرانی رشد محصولات کشاورزی پرداخته شده است. از این‌رو، نوآوری اصلی این پژوهش در تمرکز اختصاصی بر فصل پاییز به عنوان حساس‌ترین مرحله فنولوژیک گیاه زعفران در استان خراسان رضوی است؛ دوره‌ای که آغاز رشد رویشی، تشکیل جوانه‌های گل و در نهایت عملکرد محصول به شدت به شرایط رطوبتی آن وابسته است. در این مطالعه برای دستیابی به درک جامع‌تر از ماهیت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، ناهمواری‌ها و ایستگاه‌های منتخب در استان خراسان رضوی
Fig 1. Geographic location of the study area, topography, and selected stations in Razavi Khorasan Province

هواشناسی به کار می‌رود. این شاخص توسعه‌یافته‌ی شاخص SPI است، با این تفاوت که علاوه بر بارش تأثیر دما را نیز در ارزیابی خشکسالی لحاظ می‌کند و بر اساس [رابطه \(۱\) محاسبه می‌شود \(Vicente-Serrano et al., 2010\)](#).

رابطه ۱

$$D = P_i - PET_i$$

که در رابطه فوق P_i : بارش ماهانه، PET_i : تبخیر-تعرق بالقوه ماهانه و D : مازاد یا کمبود آبی ماه i است.

در این مطالعه از داده‌های متغیرهای دما و بارش در مقیاس زمانی ماهانه برای ۸ ایستگاه هواشناسی همدیدی در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۴-۲۰۲۳) استفاده شده است که از سازمان هواشناسی کشور ایران^۱ اخذ گردید. برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی از ۲ شاخص استاندارد استفاده شد:

۱- شاخص استاندارد تبخیر و تعرق SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
SPEI شاخصی آماری و چندمقیاسی است که با استفاده از اختلاف بارش و تبخیر-تعرق و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد، برای اندازه‌گیری و پایش خشکسالی‌های

¹ www.irimo.ir

به صورت مجزا ترسیم شدند. برای کمی سازی روند از برآوردگر شیب سن (Sen's slope estimator) استفاده شد و به منظور ارزیابی معنی داری آماری روندها آزمون ناپارامتری من-کندال (Mann-Kendall) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) به کار گرفته شد و نتایج در سطوح معنی داری ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ (۰/۰۹۵٪، ۹۹٪ و ۹۹.۹٪) مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این چارچوب، مقادیر مثبت شیب سن بیانگر روند افزایشی شاخص (شرایط مرطوب تر) و مقادیر منفی نشان دهنده روند کاهشی شاخص و تشدید شرایط خشکسالی هستند. در ادامه بر اساس منابع علمی، خشکسالی با شدت کم تر از مقدار ۱/۵- در شاخص های SPI/SPEI سبب کاهش تشکیل جوانه، کاهش گل دهی و کاهش رشد بوته ها می گردد. به همین دلیل تمام مقادیر (1.5-value >) در فصل پاییز استخراج شد. خروجی به صورت نمودار هیت مپ^۲ ترسیم گردید و همه رخدادهای حدی به سبک سال/ماه/ایستگاه/شاخص ارائه شد. در مرحله بعد با توجه به تعداد رخداد حدی در هر ایستگاه، طبقه بندی منطقه مورد مطالعه به ۳ طبقه (کم ریسک، متوسط و پرریسک) از بابت ریسک خشکسالی پاییزه برای زعفران به دست آمد. در گام آخر به منظور تعیین الگوی مکانی خشکسالی پاییزه در استان خراسان رضوی، میانگین ۲۰ ساله دو شاخص برای هر ایستگاه محاسبه گردید؛ در این راستا از درون یابی وزن دهی معکوس فاصله (IDW^۳) استفاده شده است. نرم افزارهای مورد استفاده در این تحقیق R، GIS و EXCEL بوده است.

نتایج و بحث

با توجه به شکل های (۲) و (۳) که نمودارهای روند شاخص های خشکسالی هواشناسی را در هشت ایستگاه همدیدی منتخب استان خراسان رضوی نشان می دهند، تغییرات زمانی خشکسالی در دوره آماری ۲۰ ساله با استفاده از شیب سن و سطح معنی داری آزمون من-کندال مورد ارزیابی قرار گرفت. در این نمودارها علامت منفی شیب سن بیانگر روند نزولی شاخص و در نتیجه تشدید شرایط خشکسالی است، در حالی که علامت مثبت آن نشان دهنده روند صعودی شاخص و بهبود شرایط رطوبتی است.

۲- شاخص استاندارد بارش SPI (Standardized Precipitation Index)

یکی از پرکاربردترین شاخص ها برای پایش و ارزیابی خشکسالی هواشناسی است. این شاخص بر اساس داده های بارش محاسبه می شود و هدف آن تعیین میزان انحراف بارش از شرایط نرمال در یک بازه زمانی مشخص است که توسط Mckee et al (1993) معرفی شد. با توجه به رابطه (۲) محاسبه می شود که در آن x : مقدار بارش در مقیاس زمانی مورد بررسی، $g(x)$: تابع چگالی احتمال توزیع گاما برای بارش، α : پارامتر شکل، β : پارامتر مقیاس، $\Gamma(\alpha)$: تابع گاما و c : پایه لگاریتم طبیعی (Stagge et al., 2015).

رابطه ۲

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

در محاسبه شاخص استاندارد بارش (SPI)، داده های بارش در مقیاس زمانی مورد نظر به توزیع گامای دوپارامتری برازش داده می شوند. سپس احتمال تجمعی بارش محاسبه و به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می شود و مقدار حاصل به عنوان مقدار SPI بیانگر شدت خشکسالی یا ترسالی مورد استفاده قرار می گیرد.

برای تحلیل تأثیر خشکسالی بر گیاه زعفران، شاخص های SPI و SPEI در مقیاس زمانی سه ماهه محاسبه شدند؛ زیرا این مقیاس زمانی به طور مستقیم با فصل پاییز، یعنی دوره رشد فعال زعفران، هم پوشانی دارد تا به طور دقیق وضعیت انباشت رطوبت طی فصل بحرانی پاییز (ماه های سپتامبر تا نوامبر) را نشان دهد. این بازه زمانی با چرخه اصلی رشد رویشی و مرحله گل دهی زعفران هم پوشانی کامل دارد و بنابراین برای ارزیابی اثرات خشکسالی کشاورزی بر سلامت بنه (Corm) و تشکیل عملکرد محصول، شاخصی بسیار گویا و کارآمد محسوب می شود. محاسبات شاخص ها در محیط نرم افزار R انجام شد. در این مطالعه فصل پاییز مطابق با توصیه سازمان جهانی هواشناسی شامل سه ماه سپتامبر، اکتبر و نوامبر (SON^۱) در نظر گرفته شد. در گام بعدی، به منظور بررسی روند تغییرات خشکسالی در طول دوره آماری ۲۰ ساله، نمودارهای روند برای هر ایستگاه و هر شاخص

³ Inverse Distance Weighting

¹ September/October/November

².Heatmap

بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، شاخص SPI بیشتر تحت تأثیر تغییرپذیری طبیعی بارش قرار دارد و لزوماً روند بلندمدت مشخصی را نشان نمی‌دهد (Hayes et al., 1999).

مطابق شکل (۳)، تحلیل روند تغییرات شاخص SPEI3 با استفاده از آزمون من-کندال و شیب‌سنج سن، تفاوت معناداری را در الگوی خشکسالی اقلیمی استان نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که روند نزولی شاخص SPEI3 در اکثر ایستگاه‌ها به لحاظ آماری معنی‌دار است:

✓ ایستگاه‌های با روند نزولی بسیار شدید (سطح اطمینان ۹۹٪): در ایستگاه‌های سبزوار ($Slope=-0.0345$, $P-value=0$) و تربت‌جام ($Slope=-0.0272$, $P-value=0.0003$)، روند نزولی شاخص با قدرت بسیار بالایی معنی‌دار است که نشان‌دهنده تشدید سریع خشکسالی اقلیمی در این مناطق است.

✓ ایستگاه‌های با روند نزولی معنی‌دار (سطح اطمینان ۹۹٪): در ایستگاه‌های تربت‌حیدریه ($P-value=0.0044$)، مشهد ($P-value=0.0102$) و گناباد ($P-value=0.0122$)، روند کاهش شاخص SPEI3 کاملاً معنی‌دار است.

✓ ایستگاه با روند صعودی معنی‌دار: ایستگاه قوچان ($P-value=0.0337$) تنها ایستگاهی است که روند افزایشی (مرطوب‌تر شدن) معنی‌داری را نشان می‌دهد.

✓ ایستگاه‌های بدون روند معنی‌دار: در ایستگاه‌های کاشمر ($P-value=1$) و نیشابور ($P-value=0.1274$) روند معنی‌داری مشاهده نشد.

تقابل نتایج شکل (۲) و شکل (۳) یافته‌ای بنیادین را ارائه می‌دهد؛ در حالی که شاخص SPI3 در ایستگاه‌هایی نظیر تربت‌حیدریه، سبزوار و گناباد هیچ روند معنی‌داری را نشان نداد ($Slope=0$)، شاخص SPEI3 در همین ایستگاه‌ها روندهای نزولی بسیار شدید و معنی‌داری را ثبت کرده است. این تضاد آشکار ثابت می‌کند که عامل اصلی تشدید خشکسالی در قطب‌های تولید زعفران خراسان رضوی، نه کاهش بارش، بلکه افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق بالقوه (PET) است. این پدیده موسوم به خشکسالی گرمایش‌محور ($Warming-induced drought$)، ریسک تبخیر رطوبت خاک در

نمودارهای روند تغییرات شاخص SPI3 در دوره آماری ۲۰ ساله برای هشت ایستگاه همدیدی منتخب در استان خراسان رضوی در شکل (۲) ارائه شده است. تحلیل کمی‌سازی شده بر اساس برآوردگر شیب سن ($Sen's slope$) و آزمون ناپارامتری من-کندال نشان می‌دهد که در بخش عمده‌ای از ایستگاه‌های مورد مطالعه (شامل تربت‌جام، تربت‌حیدریه، نیشابور، سبزوار، کاشمر و گناباد)، سری‌های زمانی شاخص SPI3 از نظر آماری فاقد روند معنی‌دار هستند ($Slope=0$, $P-value=1$). این یافته حاکی از پایداری زمانی (Temporal Stationarity) شرایط اقلیمی در این ایستگاه‌هاست؛ به این معنا که خشکسالی‌های رخ داده در فصل پاییز، ناشی از تغییرات اقلیمی جهت‌دار (افزایشی یا کاهش) در طول دو دهه اخیر نبوده، بلکه محصول نوسانات تصادفی و تکرار شونده‌ی اقلیمی است. در این میان، ایستگاه‌های مشهد و قوچان رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهند. ایستگاه مشهد با شیب سن -0.0117 بیشترین گرایش به سمت خشکی را در میان ایستگاه‌ها داشته است و ایستگاه قوچان روند ملایم مثبت ($+0.0034$) را تجربه کرده است. با این حال، بر اساس مقادیر p -value حاصل از آزمون من-کندال (به ترتیب 0.1568 و 0.6415)، این تغییرات از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P-value < 0.05$) معنی‌دار نیستند.

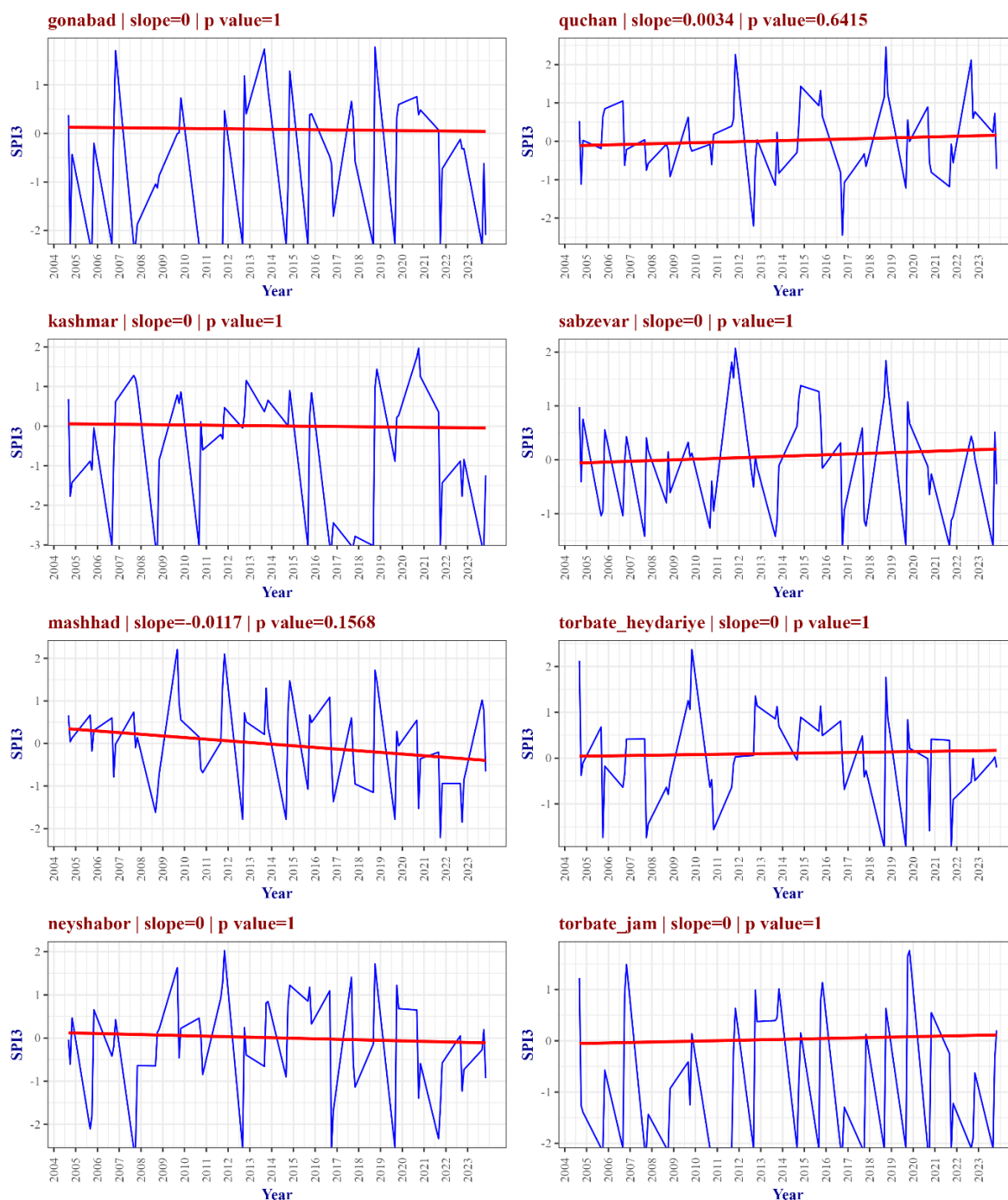
عدم مشاهده روند معنی‌دار در اکثر ایستگاه‌ها، یک یافته کلیدی برای مدیریت ریسک در کشت زعفران است. این موضوع نشان می‌دهد که ریسک خشکسالی در استان خراسان رضوی نه به دلیل یک تغییر روند تدریجی، بلکه به دلیل نوسانات شدید بین‌سالی و ماهیت ناپایدار بارش‌های پاییزی است. در واقع، کشاورزان زعفران‌کار با یک ریسک مزمن و غیرقابل‌پیش‌بینی روبرو هستند که در آن، وقوع دوره‌های خشک شدید ($SPI < -1.5$) بدون هشدار قبلی و فارغ از یک الگوی زمانی مشخص، پایداری تولید محصول را تهدید می‌کند. این پدیده ضرورت وجود سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت منابع آب تکمیلی را در تمامی ایستگاه‌ها، صرف‌نظر از موقعیت جغرافیایی آن‌ها، برجسته می‌سازد.

عدم مشاهده روند معنی‌دار در بسیاری از ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که تغییرات بارش در منطقه بیشتر ماهیت نوسانی و بین‌سالی دارد. نتایج مشابهی در مطالعات اقلیم‌شناسی نیز گزارش شده است که نشان می‌دهد در

نسبت به SPI حساسیت بیشتری به اثرات گرمایش و افزایش تقاضای تبخیری جو دارد و بنابراین قادر است تشدید خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم را بهتر آشکار کند (Beguería et al., 2014).

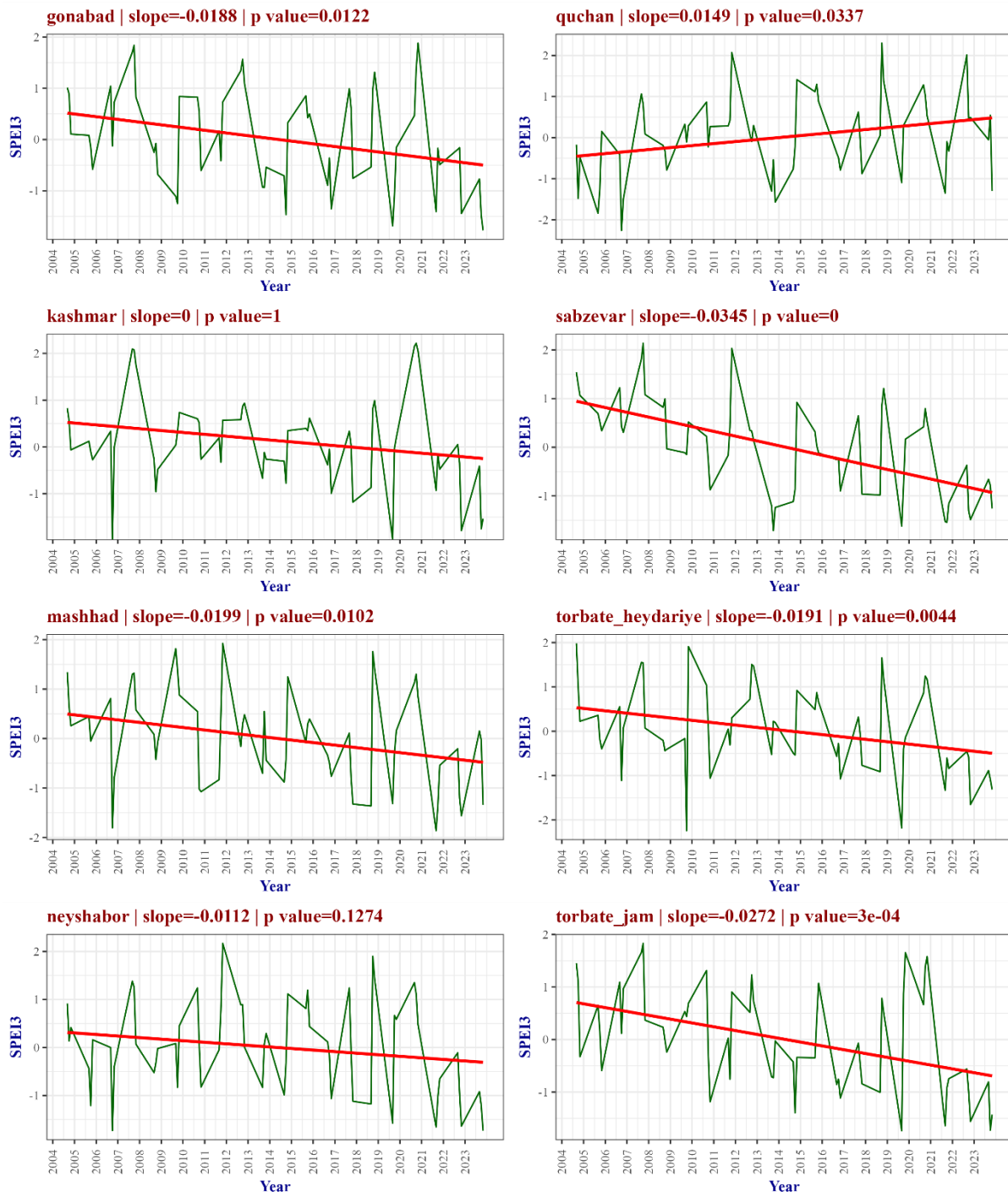
دوره حساس گل‌دهی زعفران (پاییز) را به شدت افزایش داده است.

روند نزولی معنی‌دار SPEI در برخی ایستگاه‌ها بیانگر افزایش نقش دما و تبخیر-تعرق در تشدید خشکسالی است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که شاخص SPEI



شکل ۲. نمودارهای روند خشکسالی هواشناسی در فصل پاییز برای ۲ دهه بر اساس شاخص SPI در منطقه مورد مطالعه

Fig 2. Trends in meteorological drought in the autumn season over two decades based on the SPI in the study area



شکل ۳. نمودارهای روند خشکسالی هواشناسی در فصل پاییز بر اساس شاخص SPEI در استان خراسان رضوی طی دوره ۲۰ سال

Fig 3. Trends in meteorological drought in the autumn season based on the SPEI in Razavi Khorasan Province over a 20-year period

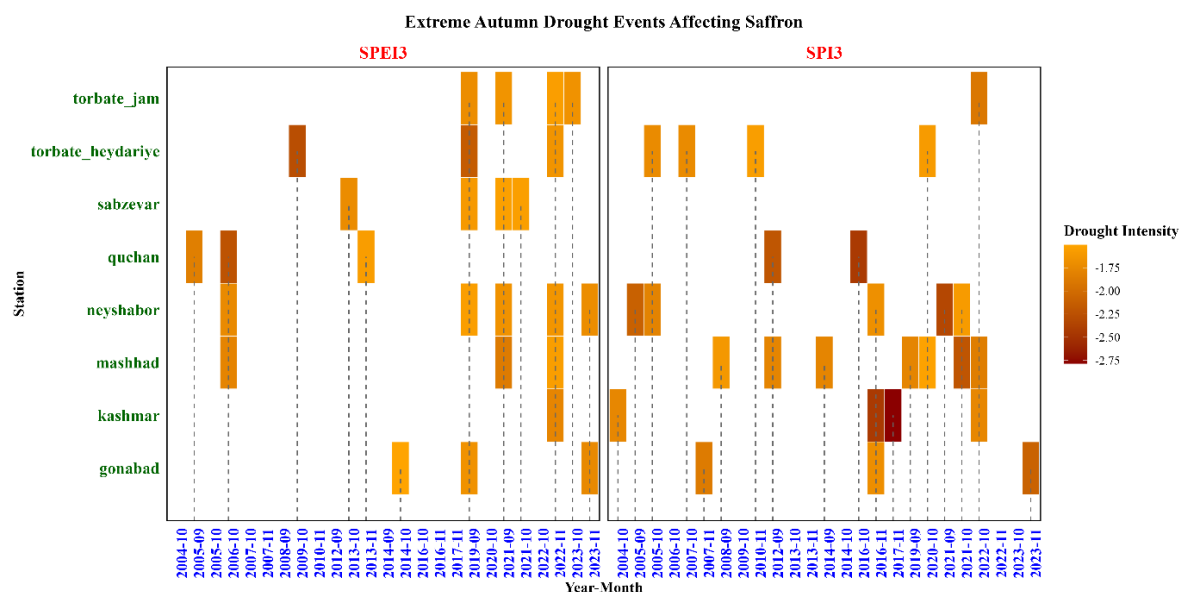
همزمانی و شدت خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است که اهمیت بالایی در ارزیابی ریسک کشت زعفران دارد. محور عمودی بیانگر ایستگاه‌های منتخب و محور افقی نشان‌دهنده توالی زمانی (ماه-سال) است، که با

شکل (۴) نقشه حرارتی (Heatmap) وقایع حدی خشکسالی (با شدت $> 1/5$) را برای شاخص‌های SPI3 و SPEI3 در فصل پاییز طی دوره ۲۰ ساله نشان می‌دهد. این نمودار ابزاری کارآمد برای شناسایی

خشکسالی‌ها می‌توانند به صورت دوره‌های متوالی یا چندساله ظاهر شوند. چنین الگوهایی در مطالعات جهانی نیز گزارش شده است و نشان می‌دهد که وقوع خشکسالی‌ها اغلب دارای تداوم زمانی بوده و ممکن است در قالب دوره‌های خشکی چندساله ظاهر شوند (Spinoni et al., 2015).

به‌منظور تفسیر بهتر شکل (۴)، ارزیابی دقیق‌تر ریسک تولید زعفران و استخراج دقیق رخدادهای حدی خشکسالی توسط شاخص‌های هواشناسی در هر ایستگاه، جدول (۱) ارائه گردید. در جدول فوق علاوه بر تعیین تعداد رخدادها در هر شاخص و هر ایستگاه، طبقه‌بندی ریسک خشکسالی بر اساس تعداد رخداد (۰-۱: کم‌خطر، ۲-۴: متوسط، ۵ یا بیشتر: پرخطر) در هر ایستگاه انجام شد. نتایج جدول (۱) نشان داد که ایستگاه‌های نیشابور و مشهد با ثبت به ترتیب ۵ و ۷ رخداد حدی، در وضعیت پرخطر قرار دارند. نکته قابل‌تأمل این است که در ایستگاه مشهد، شاخص SPI3 تعداد بیشتری از وقایع حدی (۷ مورد) را نسبت به SPI3 (۳ مورد) شناسایی کرده است که نشان‌دهنده غلبه کمبود بارش‌های پاییزی در این منطقه است. در مقابل، در ایستگاه نیشابور، هر دو شاخص هم‌گرایی داشته و با ثبت ۵ رخداد حدی، وضعیت بحرانی ثابتی را نشان دادند. یکی از کلیدی‌ترین یافته‌های این بخش، وضعیت ایستگاه تربت‌جام است.

طیف رنگی از زرد تا قرمز تیره، شدت خشکسالی را به نمایش می‌گذارد. بررسی بصری این هیتمپ نشان‌دهنده تفاوتی آشکار در الگوی توزیع زمانی خشکسالی‌های بارشی (SPI) و اقلیمی (SPEI) است. همان‌طور که در پنل سمت چپ (SPEI3) مشاهده می‌شود، خشکسالی‌های تبخیری-حرارتی در سال‌های اخیر (به‌ویژه در بازه ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳) دچار خوشه‌بندی زمانی (Temporal Clustering) شده‌اند؛ به‌طوری‌که ایستگاه‌هایی نظیر تربت‌جام و نیشابور در این دوره شاهد رخدادهای مکرر و شدید بوده‌اند. این در حالی است که خشکسالی‌های بارشی (پنل سمت راست) ماهیتی پراکنده و گسسته دارند (مانند رخداد شدید کاشمر در سال ۲۰۱۶). این هیتمپ به‌خوبی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های ناشی از دما و تبخیر (SPEI) نه تنها فراوان‌تر، بلکه در سال‌های اخیر دارای تداوم و گستردگی مکانی بیشتری در سطح استان بوده‌اند. این الگو، تهدیدی جدی برای دوره حساس گل‌دهی زعفران (پاییز) محسوب می‌شود؛ زیرا نشان می‌دهد که حتی در صورت وقوع بارش‌های نرمال، فشار حرارتی و تبخیری می‌تواند منجر به وقوع شرایط بحرانی (Extreme Events) شود که شاخص‌های صرفاً بارشی (مانند SPI) قادر به شناسایی و هشدار درباره آن‌ها نیستند. خوشه‌بندی زمانی رخدادهای خشکسالی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که



شکل ۴. نمودار هیتمپ رخدادهای حدی خشکسالی برای ۸ ایستگاه از منطقه مورد مطالعه در ۲ دهه بر اساس شاخص‌ها
Fig 4. Heatmap of extreme drought events for eight stations in the study area over two decades based on the indices

ناشی از کمبود بارش (۴ رخداد در SPI3) با تعدیل تبخیر-تعرق در شاخص SPEI3 به سطح کم‌خطر (۱) رخداد) کاهش یافته است.

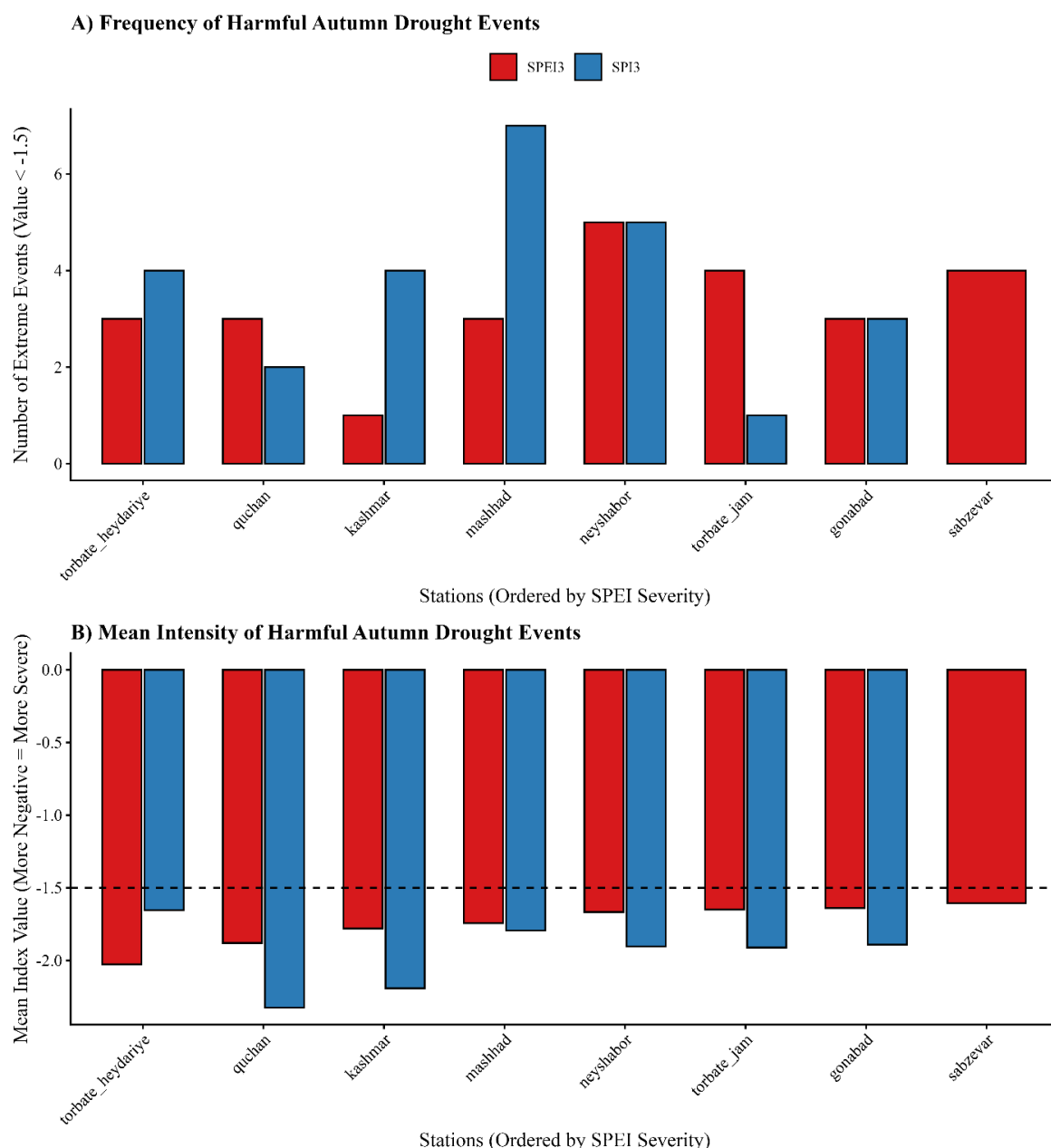
این تحلیل نشان می‌دهد که نگاه تک‌بعدی به بارش (SPI) می‌تواند در مناطقی مثل تربت‌جام منجر به کم‌برآوردی ریسک (Underestimation of Risk) شود. برای مدیریت بهینه مزارع زعفران، به‌ویژه در ایستگاه‌های پرخطر (مشهد و نیشابور) و ایستگاه‌های دما-محور (تربت‌جام)، تدوین تقویم آبیاری تکمیلی بر اساس پایش همزمان دما و بارش الزامی است.

در حالی که این ایستگاه بر اساس شاخص SPI3 در طبقه کم‌خطر (تنها ۱ رخداد) قرار دارد، اما شاخص SPEI3 آن را در طبقه ریسک متوسط (۴ رخداد) جای داده است. این اختلاف فاحش (۴ برابر شدن رخدادها) حدی با ورود فاکتور دما) به وضوح نشان می‌دهد که در منطقه تربت‌جام، خشکسالی‌های شدید پاییزی لزوماً ناشی از کمبود شدید بارش نیستند، بلکه افزایش تبخیر-تعرق ناشی از دما، شرایط نرمال بارشی را به شرایط خشکسالی حدی تبدیل کرده است. در ایستگاه کاشمر نیز عکس این وضعیت مشاهده شد، به طوری که ریسک

جدول ۱. طبقه‌بندی خطر خشکسالی و تعداد رخدادهای حدی خشکسالی در هر ایستگاه

Table 1. Classification of drought risk and the number of extreme drought events at each station

ایستگاه Station	شاخص Index	تعداد رخداد خشکسالی Extreme_Count	طبقه خطر Risk_Class
گناباد GONABAD	SPEI3	3	خطر متوسط Moderate Risk
	SPI3	3	خطر متوسط Moderate Risk
کاشمر KASHMAR	SPEI3	1	کم خطر Low Risk
	SPI3	4	خطر متوسط Moderate Risk
مشهد MASHHAD	SPEI3	3	خطر متوسط Moderate Risk
	SPI3	7	پر خطر High Risk
نیشابور NEYSHABOR	SPEI3	5	پر خطر High Risk
	SPI3	5	پر خطر High Risk
قوچان QUCHAN	SPEI3	3	خطر متوسط Moderate Risk
	SPI3	2	خطر متوسط Moderate Risk
سبزوار SABZEVAR	SPEI3	4	خطر متوسط Moderate Risk
	SPEI3	3	خطر متوسط Moderate Risk
تربت حیدریه Torbate_heydariye	SPI3	4	خطر متوسط Moderate Risk
	SPEI3	4	خطر متوسط Moderate Risk
تربت جام TORBATE_JAM	SPEI3	4	خطر متوسط Moderate Risk
	SPI3	1	کم خطر Low Risk



شکل ۵. نمودارهای ستونی مقایسه عملکرد شاخص‌های SPI و SPEI در شناسایی A: تعداد رخداد های حدی کشاورزی و B: شدت رخداد های حدی کشاورزی فصل پاییز در منطقه مورد مطالعه

Fig 5. Bar charts comparing the performance of SPI and SPEI in identifying (A) the number of extreme agricultural drought events and (B) the severity of extreme agricultural drought events in the autumn season in the study area

الف) تحلیل فراوانی رخدادها (بخش A): مطابق نتایج، در ایستگاه‌های گناباد و نیشابور، هر دو شاخص تعداد یکسانی از وقایع حدی را ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده هم‌گرایی کامل عوامل بارشی و حرارتی در وقوع خشکسالی‌های این مناطق است. اما بارزترین تفاوت در ایستگاه سبزوار مشاهده شد؛ جایی که شاخص SPI3 هیچ رخداد حدی (صفر) را شناسایی نکرده، در حالی که

شکل (۵)، نمودار ستونی مقایسه عملکرد ۲ شاخص خشکسالی هواشناسی در شناسایی رخداد های حدی مضر خشکسالی برای زعفران در فصل پاییز را در دو بعد «فراوانی» و «شدت میانگین» ارائه می‌دهد.

مناطق نیمه‌خشک، شاخص SPEI به دلیل در نظر گرفتن تبخیر و تعرق بالقوه، در بسیاری از موارد رخدادهای خشکسالی بیشتری نسبت به SPI شناسایی می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010; Stagge et al., 2015).

به‌منظور شناسایی کانون‌های بحرانی و تحلیل توزیع مکانی شرایط رطوبتی فصلی، نقشه‌های پهنه‌بندی استان خراسان رضوی بر اساس میانگین ۲۰ ساله شاخص‌های SPI3 و SPEI3 در فصل پاییز ترسیم گردید (ابتدا برای هر ایستگاه، میانگین پاییزی شاخص در کل دوره مطالعه محاسبه گردید و سپس مقادیر میانگین به محیط GIS منتقل و با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله وزنی)، نقشه‌های پهنه‌بندی فضایی تهیه شدند (شکل ۶). از آنجا که مقادیر بالاتر و مثبت‌تر در این شاخص‌ها نشان‌دهنده شرایط مرطوب‌تر (ترسالی) و مقادیر نزدیک به صفر یا منفی نشان‌دهنده شرایط خشک‌تر هستند.

مطابق نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI (شکل ۶-الف)، نواحی غربی و مرکزی استان (شامل ایستگاه‌های سبزوار، کاشمر، تربت‌حیدریه و گناباد) با ثبت مقادیر بزرگتر میانگین (بین ۰/۳۶ تا ۰/۰۶) شرایط بارشی مطلوب‌تری را در فصل پاییز تجربه کرده‌اند. در مقابل، نواحی شرقی استان (به‌ویژه ایستگاه تربت‌جام) با قرارگیری در طبقه عددی بسیار پایین (۰ تا ۰/۱۲)، با کمبود مزمن بارش مواجه بوده و خشک‌ترین پهنه بارشی استان را در این فصل تشکیل داده‌اند.

با اعمال اثر دما و تبخیر-تعرق در شاخص SPEI (شکل ۶-ب)، الگوی مکانی توزیع خشکی با وجود حفظ روند کلی شرق به غرب، با جزئیات دقیق‌تری نمایان شده است. در این نقشه، کانون ترسالی و تعدیل خشکی (بالاترین مقادیر عددی بین ۰/۱۰۴ تا ۰/۱۳) دقیقاً بر روی نواحی مرکزی و غربی به مرکزیت کاشمر متمرکز شده است. این امر نشان می‌دهد که در این مناطق، اثرات دما و تبخیر-تعرق به گونه‌ای نبوده که رطوبت ناشی از بارش را کاملاً خنثی کند و منطقه همچنان پایداری رطوبتی خود را حفظ کرده است. در سمت مقابل، بخش‌های شرقی (تربت‌جام) و شمال‌شرقی (مشهد) با ثبت مقادیر نزدیک به صفر، در معرض شدیدترین وضعیت خشکسالی پاییزه قرار دارند.

هم‌گرایی هر دو نقشه پهنه‌بندی (شکل ۶-الف و ب) گویای آن است که نواحی شرقی استان در مقایسه با

شاخص SPEI3 وقوع ۴ مورد خشکسالی شدید را نشان می‌دهد. این یافته ثابت می‌کند که در سبزوار، خشکسالی‌های بحرانی پاییزی صرفاً ماهیت حرارتی-تبخیری داشته و حتی در صورت نرمال بودن بارش، افزایش دما منجر به ایجاد تنش‌های شدید اقلیمی برای زعفران شده است. در مقابل، در ایستگاه‌هایی نظیر مشهد، کاشمر و تربت‌حیدریه، غلبه تعداد رخدادهای SPI3 بر SPEI3 نشان می‌دهد که در این مناطق، کمبود فاحش بارش، عامل اصلی وقایع حدی بوده و تعدیل دمایی مانع از تبدیل برخی از این کمبودها به خشکسالی‌های ترکیبی شدید شده است. در ایستگاه‌های قوچان و تربت‌جام، برتری تعداد رخدادهای SPEI3 بار دیگر نقش کلیدی گرمایش فصلی را در تشدید خشکسالی‌های خفیف بارشی و تبدیل آن‌ها به رخدادهای بحرانی تأیید می‌کند.

ب) تحلیل شدت میانگین رخدادهای (بخش B):

بررسی شدت میانگین (Mean Intensity) نشان داد که در ایستگاه‌های تربت‌حیدریه و سبزوار، میانگین شدت رخدادهای شناسایی شده توسط SPEI3 منفی‌تر (شدیدتر) از SPI3 است. این موضوع بیانگر آن است که در این دو منطقه، نه تنها فراوانی، بلکه عمق بحران خشکسالی نیز به شدت تحت تأثیر دما و تبخیر-تعرق است. در سایر ایستگاه‌ها، اگرچه SPEI رخدادهای متعددی را شناسایی کرده، اما میانگین شدت وقایع بارشی (SPI) منفی‌تر بوده است. این تضاد میان فراوانی بالا در SPEI و شدت بیشتر در SPI در ایستگاه‌هایی مانند قوچان و تربت‌جام نشان می‌دهد که در این مناطق، خشکسالی‌های بارشی کم‌تعداد اما بسیار شدید و خشکسالی‌های حرارتی متعدد اما با شدت متوسط رخ می‌دهند.

تطبیق دو بخش (شکل ۵) نشان می‌دهد که اتکای صرف به شاخص‌های مبتنی بر بارش (مانند SPI) در مناطقی همچون سبزوار و تربت‌جام، منجر به نادیده گرفتن بخش بزرگی از رخدادهای بحرانی می‌شود که مستقیماً بر فیزیولوژی زعفران در مرحله گل‌دهی اثرگذارند.

تفاوت مشاهده‌شده بین فراوانی رخدادهای خشکسالی در شاخص‌های SPI و SPEI نشان می‌دهد که در برخی مناطق نقش عوامل حرارتی در تشدید خشکسالی قابل توجه است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که در

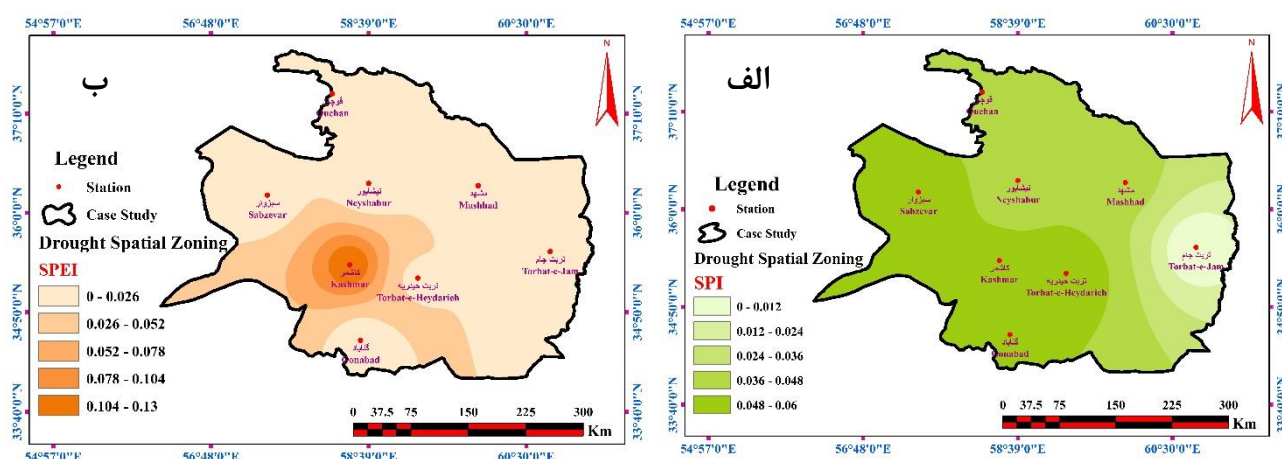
ارزیابی شرایط گوناگون اقلیمی آن اجتناب‌ناپذیر است. آنچه مسلم است با توجه به توجیه اقتصادی این محصول لازم است به شرایط رشد گیاه در فصل حساس، نظیر پاییز توجه ویژه شود. از مهم‌ترین متغیرهای جوی مؤثر در رشد گیاه زعفران بارش و دما را می‌توان نام برد که با کاهش بارش و افزایش دما موجبات ایجاد خشکسالی و در نتیجه آسیب جدی به گیاه زعفران رخ خواهد داد (Khorramdel & Mirzaeian, 2025).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خشکسالی‌های پاییزه در خراسان رضوی نه تنها یک پدیده بارشی، بلکه تحت تأثیر مستقیم گرمایش منطقه‌ای است. تفاوت معنادار در رفتار شاخص‌های SPI و SPEI اثبات می‌کند که تکیه صرف بر داده‌های بارش برای پایش خشکسالی زعفران، منجر به کم‌برآوردی (Underestimation) جدی ریسک در مناطق مرکزی و غربی استان می‌شود. اگرچه نتایج نشان‌دهنده پایداری نسبی بارش‌های پاییزی طی دو دهه اخیر است (فقدان روند در SPI)، اما روند نزولی و معنی‌دار شاخص SPEI در اکثر ایستگاه‌ها، زنگ خطری جدی برای تغییر ماهیت خشکسالی‌ها از کمبود بارش‌محور به گرمایش‌محور است.

بخش‌های غربی و مرکزی، شرایط خشکسالی پاییزه به مراتب شدیدتر و پایداری را تجربه می‌کنند. از منظر مدیریت ریسک کشاورزی، تنش خشکی پاییزه در غرب استان (به‌ویژه در محدوده کاشمر و تربت‌حیدریه که قطب‌های سنتی کشت زعفران هستند) کمتر بوده و این مناطق از پایداری محیطی و پتانسیل بالاتری برای کشت دیم یا کشت با حداقل آبیاری تکمیلی زعفران برخوردارند. در مقابل، توسعه یا حفظ مزارع زعفران در شرق استان (مانند تربت‌جام) به دلیل ریسک بالای خشکسالی در فصل حساس پاییز، نیازمند برنامه‌ریزی جدی جهت تامین آب تکمیلی و استفاده از روش‌های نوین حفظ رطوبت خاک است. الگوی مکانی مشاهده‌شده در توزیع خشکسالی با نتایج مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد که نشان می‌دهد تغییرات مکانی بارش و تبخیر-تعرق می‌تواند موجب شکل‌گیری کانون‌های منطقه‌ای خشکسالی شود (Vicente-Serrano et al., 2010; Spinoni et al., 2015).

کشت گیاه زعفران، بر اساس ویژگی‌های برجسته‌ای که این محصول ویژه دارد حائز اهمیت است. از آن جایی که قطب اصلی تولید این محصول در سطح جهان، کشور ایران می‌باشد و اشتغال بخش عظیمی از کشاورزان به‌خصوص در شمال شرق ایران وابسته به این گیاه است؛



شکل ۶. نقشه‌های پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰ ساله بر اساس شاخص‌های خشکسالی هواشناسی
الف: SPI، ب: SPEI

Fig 6. Zoning maps of the study area over a 20-year period based on meteorological drought indices: (a) SPI and (b) SPEI

بارش به مدیریت جامع منابع آب-خاک-دما تغییر جهت دهد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی، پایش هم‌زمان شاخص‌های بارشی و تبخیر-تعرق ضروری است، چرا که نادیده گرفتن مؤلفه‌های حرارتی، منجر به تصمیم‌گیری‌های اشتباه در تخصیص منابع آب و گسترش سطوح زیر کشت زعفران خواهد شد. نتایج تحقیق حاضر با مطالعه انجام شده توسط ایوب و همکاران (Ayoub et al., 2024) و زینل زاده و همکاران (Zynal Zadeh et al., 2025) و از لحاظ تأیید تضعیف رشد زعفران و کاهش عملکرد تحت تأثیر افزایش دما و کاهش بارش همسو است. همچنین به دلیل تأیید آسیب خشکسالی به رشد بهینه زعفران با پژوهش انجام شده توسط سعیدی و همکاران (Saeedi et al., 2026) همخوانی مطلوبی دارد.

این مطالعه با شناسایی کانون‌های بحرانی (نواحی شرقی) و مناطق پایدارتر (نواحی غربی و مرکزی)، نقشه راهی برای مدیریت ریسک در کشت زعفران فراهم می‌آورد. ایستگاه‌های شرقی استان به دلیل مواجهه با هم‌افزایی کمبود بارش و افزایش تبخیر، بالاترین سطح تنش هیدرولوژیکی را در فصل حساس گل‌دهی تجربه می‌کنند؛ لذا توسعه یا حفظ مزارع در این مناطق بدون سیستم‌های نوین آبیاری و سازه‌های سایه‌بان (برای کاهش دمای خاک و تبخیر) غیراقتصادی ارزیابی می‌شود. در مقابل، پهنه‌های غربی (به‌ویژه کاشمر) اگرچه از نظر تعداد رخداد ایمن‌تر به نظر می‌رسند، اما به دلیل حساسیت به تغییرات دمایی، نیازمند پایش مستمر دما در پاییز هستند. به‌طور کلی، این پژوهش پیشنهاد می‌کند که برای تاب‌آوری زعفران در برابر خشکسالی‌های آتی، مدیریت کشاورزی استان باید از مدیریت متمرکز بر

منابع

- Aghamohamadi, S., khashei, A., Shahidi, A. & Hashemi, S. R. (2019). Drought risk assessment of Saffron by Montcarlo method. *Saffron Agronomy and Technology*, 7(3), 377-396. <https://doi.org/10.22048/jsat.2018.119530.1286>
- Aliyari, V. and Sharifzadeh, M. (2025). Saffron (*Crocus sativus* L.) Cultivation Potential Zoning in Fars Province. *Journal of Saffron Research*, 13(2), 306-332. [in Persian]. <https://doi.org/10.22077/jsr.2026.10735.1298>
- Ayoub, I. B., Ara, S., & Lone, S. A. (2024). Evaluating the sensitivity of saffron yield to climate change in Western Himalaya, India. A study from Kashmir Valley. In *Climate Crisis, Social Responses and Sustainability: Socio-ecological Study on Global Perspectives* (pp. 159-173). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19747-3_9
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Dowlatabadi, S., and Khashei Siuki, A., (2019). Estimation of saffron yield using RDI drought index (Case study: South Khorasan Province). *Journal of Saffron Research*, 7(1), 161-176. <https://doi.org/10.22077/jsr.2017.621.1023>
- FAO (2023). *FAOSTAT agricultural production database*
- Ghazi, B., Salehi, H., Cheshami, M., Zeydalinjad, N., & Linh, N. T. T. (2025). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen-Geiger climate classification in Iran. *Acta Geophysica*, 73 (2), 2017-2027. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01457-6>
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wihite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429-438. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2)
- Herman, E. (2024). Sustainable agriculture and its impact on the rural development in EU countries: A multivariate analysis. *Land*, 13(7), 947. <https://doi.org/10.3390/land13070947>
- Javan, K., & Movaghari, A. (2024). Trend analysis of temperature changes in Northwest of Iran using extreme indices and its relation to atmospheric circulation. *Water & Soil*, 38 (5), 629-647. [in Persian]. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86169.1366>
- Kheyruri, Y., Sharafati, A., & Neshat, A. (2023). The socioeconomic impact of severe droughts on agricultural lands over different provinces of Iran. *Agricultural Water Management*, 289 (30), 21-33 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108550>

- Khodashenas, A. (2018). Separating processing operations from production: A desirable approach for improving the quality and economics of Iranian saffron. *Saffron Promotional Journal*, 1 (1), 41- 48. [in Persian].
https://se.areeo.ac.ir/article_118411.html
- Koocheki, A. (2004). *Saffron production and processing*. Ferdowsi University Press. [in Persian]
- Koocheki, A., & Khajeh-Hosseini, M. (2008). *Opportunities for saffron production in Iran*. Acta Horticulturae.
- Khorramdel, S. and Mirzaeian, A. (2025). Impact of Climate Change on Saffron Production: Issues, Challenges, and Opportunities. *Journal of Saffron Research*, 13(1), 173-197.
<https://doi.org/10.22077/jsr.2025.9147.1269>
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January Anaheim, California
- Mehmeti, A., Candido, V., Canaj, K., Castronuovo, D., Perniola, M., D'Antonio, P., & Cardone, L. (2024). Energy, environmental, and economic sustainability of saffron cultivation: insights from the first European (Italian) case study. *Sustainability*, 16(3), 1179.
<https://doi.org/10.3390/su16031179>
- Rusdiyana, E., Sutrisno, E., & Harsono, I. (2024). A bibliometric review of sustainable agriculture in rural development. *West Science Interdisciplinary Studies*, 2(03), 630-637.
<https://doi.org/10.58812/wsis.v2i03.747>
- Saeedi, I., Mortazavi, S. and Hassanvand, M. (2026). Comparative Analysis of AIFI-MI and BITME Climate Change Scenarios on Iranian Saffron Cultivation. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(49), 29-42.
<https://doi.org/10.22052/deej.2025.257048.1110>
- Shaha, R., Bharadiya, N., and Manekar, V. 2015. Drought index computation using Standardized Precipitation Index (SPI) method for Surat district. Gujarat. *Aquatic Procedia* 4: 1243-1249.
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.162>
- Shahdost, Z., Ahmadvand, M. (2021). Feasibility study of saffron cultivation from farmers' viewpoint in villages of Arsanjan County. *Journal of Saffron Research*, 9(1), 61-78. [in Persian].
<https://doi.org/10.22077/jsr.2020.3270.1128>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50–57.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027–4040.
<https://doi.org/10.1002/joc.4267>
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Zynal Zadeh, M., Janbaz Ghobadi, G., Motevalli, S., Taherian, M. and Kouhi, M. (2025). The Impact of Climatic Anomalies on Saffron Yield Case Study: Kashmar and Torbat-e Heydariyeh. *Saffron Agronomy and Technology*, 13(1), 59-81.
<https://doi.org/10.22048/jsat.2025.511404.1558>