

## The Impact of Climatic Anomalies on Saffron Yield Case Study: Kashmar and Torbat-e Heydariyeh

Mahdiyeh Zynal Zadeh<sup>1</sup>, Gholamreza Janbaz Ghobadi<sup>2\*</sup>, Sadroddin Motevalli<sup>3</sup>, Majid Taherian<sup>4</sup> and Mansoureh Kouhi<sup>5</sup>

<b>Article type:</b> Research Article	<b>How to cite this article:</b> Zynal Zadeh, M., Janbaz Ghobadi, Gh., Motevalli, S., Taherian, M., and Kouhi, M. 2025. The Impact of Climatic Anomalies on Saffron Yield Case Study: Kashmar and Torbat-e Heydariyeh. <i>Saffron Agronomy &amp; Technology</i> , 13(1), 59-81.
<b>Article history:</b> Submitted: 10 March 2025 Revised: 14 June 2025 Accepted: 28 June 2025 Available Online: 21 July 2025	DOI: 10.22048/jsat.2025.511404.1558

As a strategic crop in Iran's economy, saffron is highly vulnerable to climate change. Analyses indicate that extreme events such as frost during the flowering period and prolonged droughts are key factors in reducing saffron yield. This study aims to analyze trends in extreme temperature and precipitation indices and model their impact on saffron yield using multivariate regression. Data on daily low and high temperatures, as well as rainfall from 1990 to 2020, were collected from weather stations in Torbat-e Heydariyeh and Kashmar to calculate extreme climate measures using the ETCCDI method, which was applied using RCLimDex software. Saffron yield data were obtained from the Agricultural Jihad Organization. Trend analysis indicated that annual precipitation has imposed a significant decline. Extreme temperature indices (TNm, TMm, TXm, WSDI) and heavy precipitation indices (R99p at both stations and R95p in Torbat-e Heydariyeh) exhibited significant decreasing trends ( $p < 0.05$ ). For Kashmar, the multivariate regression model incorporated four extreme indices ( $R^2 = 0.70$ , RMSE = 0.49, NRMSE = 16.4%). Key predictors included ID ( $\beta = -0.14$ , the strongest yield-reducing factor), extreme low temperatures or TNn ( $\beta = +0.10$ ), tropical nights (TR20), and consecutive dry days (CDD) negatively impacted yield. For Torbat-e Heydariyeh, the model demonstrated higher accuracy ( $R^2 = 0.83$ , RMSE = 0.43, NRMSE = 15.9%). Significant predictors were TXn ( $\beta = +0.18$ ) and frost days or ID ( $\beta = -0.12$ ) as the most positive and negative drivers. Overall, temperature variables—particularly nighttime temperatures—dominated yield variability. These findings provide a foundation for climate-smart saffron cultivation planning in similar semi-arid regions. Mitigation strategies should prioritize thermal regulation (e.g., altitude selection, mulching) and water management to offset warming-induced stress.

**Keywords:** Extreme Temperature and Precipitation Indices, Multivariate Regression, Kashmar, Torbat-e Heydariyeh, Saffron.

1- Ph.D. Candidate of Climatology,, Department of Geography, No.C., Islamic Azad University, Noor, Iran

2- Associate Professor, Department of Geography, No. C., Islamic Azad University, Noor, Iran\*

3- Associate Professor, Department of Geography, No. C., Islamic Azad University, Noor, Iran

4- Assistant Professor, Horticulture Crop Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

5- Assistant Professor, RIMAS, Climate Research Center, Mashhad, Iran



Corresponding author email: [dr\\_janbaz@iau.ir](mailto:dr_janbaz@iau.ir)

## مقاله پژوهشی

# تأثیر ناهنجاری‌های اقلیمی بر عملکرد زعفران مطالعه موردی: کاشمر و تربت حیدریه

مهديه زينل زاده<sup>۱</sup>، غلامرضا جانباز قبادی<sup>۲\*</sup>، صدرالدين متولی<sup>۳</sup>، مجيد طاهريان<sup>۴</sup> و منصوره کوهی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۲۰ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۲۴ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۷ تیر ۱۴۰۴

زينل زاده، م.، جانبازقبادی، غ. ۱۴۰۴. متولی، ص.، طاهريان، م.، و کوهی، م. ۱۴۰۴. تأثیر ناهنجاری‌های اقلیمی بر عملکرد زعفران مطالعه موردی: کاشمر و تربت حیدریه. زراعت و فناوری زعفران، ۱۳(۱): ۵۹-۸۱.

## چکیده

زعفران به عنوان یک محصول استراتژیک در اقتصاد ایران، به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارد. تحلیل‌ها حاکی از آن است رویدادهای فرین همچون یخبندان طی دوره گلدهی و خشکسالی‌های ممتد از عوامل کلیدی کاهش عملکرد این محصول هستند. هدف از این پژوهش، تحلیل روند نمایه‌های فرین دما و بارش و مدل سازی تأثیر این نمایه‌ها بر عملکرد زعفران با استفاده از رگرسیون چندمتغیره می باشد. برای این منظور، از داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش روزانه ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) دو ایستگاه همدید تربت حیدریه و کاشمر برای محاسبه نمایه‌های فرین دما و بارش تیم تخصصی تشخیص و نمایه‌های تغییر اقلیم (ETCCDI) در نرم افزار RCLimdex استفاده شد. داده‌های عملکرد محصول زعفران برای این دو منطقه از سازمان جهاد کشاورزی اخذ شد. نتایج نشان داد که بارش سالانه به طور قابل توجهی کاهش یافته است. تحلیل روند نمایه‌های فرین دمای طی دوره آماری نشان داد نمایه‌های دمای TXm، TMm، TNm و روزهای گرم (WSDI) و نمایه‌های بارش بسیار سنگین (R99p) در هر دو ایستگاه و بارش سنگین (R95p) در تربت حیدریه کاهش معناداری ( $p < 0.05$ ) داشته‌اند. مدلسازی رگرسیونی نشان داد برای منطقه کاشمر، مدل با ۴ نمایه فرین دمای و بارشی تدوین شد ( $R^2=0.70$ ،  $RMSE=0.49$ ،  $NRMSE=16.4\%$ ). متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر عملکرد زعفران شامل گرمایش شبانه (TNm)، روزهای یخی (با ضریب ۰/۱۰- قوی‌ترین عامل کاهش‌دهنده عملکرد)، شب‌های حاره‌ای و روزهای خشک متوالی (CDD) بودند که نمایه‌های فرین مذکور دارای تأثیر منفی بر عملکرد زعفران در این منطقه بودند. برای منطقه تربت حیدریه مدل رگرسیونی با مقادیر آماره‌های  $R^2=0.83$ ،  $RMSE=0.43$ ،  $NRMSE=15.9\%$  توسعه یافت. متغیرهای مستقل مدل شامل کمینه دمای بیشینه (TXn)، R95p، و FD (با تأثیر مثبت) و نمایه روزهای یخی با ضریب ۰/۱۲- به عنوان تنها نمایه کاهش‌دهنده عملکرد زعفران بود. بر اساس نتایج بدست آمده فرین‌های دمای تأثیر غالب بر عملکرد زعفران در این مناطق داشته‌اند. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های اقلیم‌محور کشت زعفران در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرند.

**کلمات کلیدی:** تربت حیدریه، رگرسیون چندمتغیره، زعفران، کاشمر، نمایه‌های فرین دما و بارش.

۱- دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۲- دانشیار گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۳- دانشیار گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

۵- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

\*-نویسنده مسئول: [dr\\_janbaz@iau.ir](mailto:dr_janbaz@iau.ir)

## مقدمه

زعفران (*Crocus sativus* L) که به طور معمول به عنوان «طلای سرخ» شناخته می‌شود، یکی از گران‌ترین و ارزشمندترین محصولات ادویه‌ای در بازار جهانی است (Gómez-Gómez, 2012). زعفران یک گیاه سه‌گانه است که از طریق بنه تکثیر می‌شود (Bayat et al., 2016). امروزه، کشت زعفران به دلیل کاربردهای عمده آن در صنایع مختلف، از جمله صنایع دارویی و غذایی به منظور رنگ و طعم‌دهی غذا، در صنعت نساجی، برای رنگرزی پارچه‌های مختلف، از جمله ابریشم، پنبه و پشم و به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد سرطان مورد توجه قرار گرفته است (Mykhailenko et al., 2020). سالانه بیش از ۴۱۸ تن زعفران در سراسر جهان از مساحتی بالغ بر ۱۰۸۰۰۰ هکتار در ایران، ۷۵۵۷ هکتار در افغانستان، ۳۶۷۴ هکتار در هند، ۱۰۰۰ هکتار در یونان، ۸۵۰ هکتار در مراکش، ۱۵۰ هکتار در اسپانیا، ۷۰ هکتار در ایتالیا و ۳۷ هکتار در فرانسه تولید می‌شود.

این گیاه، در خاک‌های لومی-شنی با بافت متوسط، با رهکشی خوب و قابل نفوذ، سست، کم‌تراکم، به خوبی آبیاری شده و زهکشی شده با محدوده pH بهینه بین ۶/۸ تا ۷/۸ رشد خوبی دارد (Zarghani et al., 2016). متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش و رطوبت به همراه عامل جغرافیایی ارتفاع، نقش کلیدی بر عملکرد زعفران دارند (Rahimi et al., 2017). این محصول، در دمای حدود ۲۳ تا ۲۷ درجه سلسیوس رشد می‌کند. گلدهی بهینه زمانی رخ می‌دهد که دما در این محدوده حفظ شود. مطالعات نشان داده‌اند که دمای بالاتر می‌تواند گلدهی و عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش کیفیت تولید شود (Kothari et al., 2021). بارش سالانه ایده آل برای زعفران حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است. میزان رطوبت

نسبی ایده آل برای این محصول، حدود ۳۰٪ تا ۴۰٪ است که گلدهی بهتر و رشد کلاله را تسهیل می‌کند. تحقیقات نشان داده است که رطوبت بالاتر می‌تواند منجر به بیماری‌های قارچی و از بین رفتن محصول شود (Zamani et al., 2022). در نهایت ارتفاعی که زعفران در آن کشت می‌شود نیز نقش مهمی در عملکرد آن دارد. ارتفاعات بالاتر (حدود ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ متر از سطح دریا) اغلب به دلیل دمای خنک‌تر مرتبط با عملکرد بالاتر، مناسب هستند (Maleki et al., 2017).

در بررسی ارتباط بین اقلیم و زعفران، پژوهش‌هایی در سطح جهان انجام شده است (de Juan et al., 2009) از آن جمله می‌توان به ارزیابی شرایط اقلیمی بر عملکرد و کیفیت زعفران در منطقه بازیلیکاتا در جنوب ایتالیا اشاره کرد (Cardone et al., 2019). نتایج این تحقیق نشان داد که این محصول در مناطق جنوبی ایتالیا می‌تواند به خوبی رشد کند و با شرایط اقلیمی این منطقه همخوانی بالایی دارد. ارزیابی تناسب اقلیم کشاورزی برای تولید زعفران در مناطق غرب هیمالیا نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است (Kothari et al., 2021). نتایج تحقیق نشان داد که امکان کشت این محصول در مناطق غرب هیمالیا وجود دارد. مقادیر همبستگی بین عملکرد با افزایش ارتفاع و بارش کمتر در منطقه غرب هیمالیا مثبت به دست آمد. پژوهش‌هایی در سطح جهان به منظور بررسی نحوه تغییر عملکرد این محصول نسبت به افزایش دما و در شرایط گرمایش جهانی انجام شده است به عنوان مثال، در پژوهشی به ارزیابی حساسیت عملکرد زعفران به تغییر اقلیم در دره کشمیر پرداخته شد (Ayoub & Suhall, 2024). نتایج نشان داد که دلیل افزایش دما به میزان ۰/۳ درجه سلسیوس بر دهه طی دوره ۲۰۲۱-۱۹۵۱، عملکرد زعفران از ۱۵/۹۵ تن در سال ۱۹۹۷ به ۹/۶ تن در سال ۲۰۱۵ کاهش یافته است. این کاهش در سطح زیر کشت این محصول نیز مشاهده

تغییر در دما، بارش و فراوانی و شدت رویدادهای فرین اقلیمی و جوی می شود (Tarawneh & Faraj, 2020; Khoshakhlagh et al., 2020). خطرناک‌ترین نتیجه ناشی از گرمایش جهانی تغییر در میانگین‌ها نیست بلکه احتمال افزایش همه جانبه در رویدادهای فرین متوسط (نمایه‌های روزانه) و نادر (خشکسالی و سیل) است. پیش‌نگری‌های انجام شده در سراسر ایران نشان داده است که هم دمای کمینه و هم دمای بیشینه افزایش خواهد یافت (Najafi et al., 2025; Ghazi & Jeihouni, 2022). مقدار این افزایش‌ها بستگی به مدل CMIP6 و سناریوی انتشار منتخب دارد (Pegahfar, 2023; Eyring et al., 2016; Riahi et al., 2017). همچنین پیش‌نگری‌های نشان داده است که در شمال شرقی ایران تغییرات قابل توجهی در دماهای فرین قابل انتظار است (Chamanehfar et al., 2024). برای بارش نیز تغییرات افزایشی و کاهش‌ی بسته به فصل و مکان برای ایران پیش‌نگری شده است (Babaeian et al., 2023). این تغییرات می‌تواند اثرات عمیقی بر کشاورزی، منابع آب و اکوسیستم‌ها داشته باشد (Azizi et al., 2022; Rafiei-Sardooi et al., 2022).

بین نمایه‌های فرین دما و بارش با عملکرد زعفران همبستگی معناداری وجود دارد. به عنوان مثال کوزه گران و همکاران (Kouzegaran et al., 2019) نشان دادند که افزایش تعداد روزهای داغ در طول فصل رشد می‌تواند منجر به کاهش عملکرد زعفران شود. برای شناخت این تأثیرات می‌توان از مدل‌هایی مبتنی بر رگرسیون‌های چند متغیره سود جست. با استفاده از چنین مدل‌هایی که بر اساس همبستگی بین نمایه‌های فرین دما و بارش و عملکرد زعفران توسعه می‌یابند، می‌توان عملکرد این محصول را در سال‌های آینده نیز پیش‌نگری کرد (Mokarram & Pham, 2022). این مدل‌ها به شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد این محصول همچنین عوامل محدود کننده آن کمک می‌کنند. چنین مدل‌هایی می‌تواند یک

شد به طوریکه از مقدار آن (سطح زیر کشت) ۵۷۰۷ هکتار در سال ۱۹۹۷ به ۳۶۷۴ هکتار در سال ۲۰۱۵ کاهش یافت. در ایران نیز مطالعات مختلفی به بررسی نقش متغیرهای اقلیمی بر عملکرد محصول زعفران پرداخته‌اند. در بیشتر این پژوهش‌ها، تأثیر متغیر دما بر عملکرد زعفران مد نظر قرار گرفته است. به عنوان نمونه، تأثیر دما بر عملکرد زعفران در مشهد مورد بررسی قرار گرفته (Tosan et al., 2014) و نتایج نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش تولید کلاله زعفران می‌شود. اثرات بارش مناسب و رطوبت نسبی پایین نیز بر عملکرد زعفران نیز بررسی شده است به عنوان مثال پژوهش‌ها نشان داده است بارش‌های نامنظم و خشکی می‌تواند به کاهش عملکرد زعفران منجر شود (Esmaeilnejat & Khashei Soluki, 2018). در همین راستا، Dastranj et al. (2019) نیز نشان دادند کمبود بارش در طول دوره رشد رویشی می‌تواند باعث کاهش تعداد گل‌ها و وزن کلاله شود. (Sahabi & Moallem, 2021) نیز در پژوهش خود به منظور ارزیابی روند عملکرد زعفران و مطالعه رابطه نوسانات عملکرد با پارامترهای اقلیمی در شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه، کاشمر، بیرجند و قاین نشان دادند در شهرهای مورد مطالعه به طور میانگین ۳۳٪ از میزان بارش و ۵/۰ درجه سلسیوس بر میانگین دما افزوده شده است. نتایج رگرسیون بین عملکرد و متغیرهای اقلیمی نیز نشان داد الگوی افزایش دما و کاهش بارش در تمامی شهرستان‌های مورد مطالعه تا حد قابل توجهی با روند کاهش عملکرد زعفران طی این دوره مطابقت داشته‌اند.

مسئله تغییر اقلیم، به عنوان یکی از مهمترین چالش‌های قرن بیست و یکم شناخته می‌شود. تغییر اقلیم چه ناشی از واداشت‌های طبیعی و چه ناشی از فعالیت‌های انسانی، در هر دو حال، منجر به تغییراتی در احتمال وقوع و یا شدت رویدادهای فرین جوی و اقلیمی شده است (Arias et al., 2021). تغییر اقلیم به طور فزاینده‌ای بر الگوهای جوی تأثیر می‌گذارد و باعث

عملکرد زعفران، دشواری در جمع‌آوری داده‌های میدانی، محدودیت زمانی برای پایش، هزینه‌های بالای پایش و نمونه‌برداری، دشواری در تفکیک اثرات تغییر اقلیم از سایر عوامل، محدودیت در تعمیم‌پذیری نتایج، تنوع شرایط خاک و توپوگرافی، تفاوت در شیوه‌های مدیریت زراعی، و تغییرات در الگوهای کشت و تناوب زراعی.

بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که بیشتر پژوهش‌های انجام شده به بررسی تأثیر میانگین متغیرهای اقلیمی بر عملکرد محصول زعفران در ایران و خراسان رضوی پرداختند و در مطالعات معدودی به تأثیر نمایه‌های فرین دما و بارش (تا سال ۲۰۱۵) بر عملکرد این محصول پرداخته شده است (Kouzegaran et al., 2019). لذا این مطالعه با هدف شناخت اثر تغییر اقلیم در قالب فرین‌های جوی بر عملکرد زعفران در نواحی مساعد کشت این محصول در استان خراسان رضوی (دشت تربت حیدریه و دشت کاشمر) صورت گرفته است. لذا در این پژوهش، در راستای آشکار سازی تغییر اقلیم در دو منطقه کاشمر و تربت حیدریه، روند نمایه‌های فرین دما و بارش بررسی شده و در ادامه تأثیر ناهنجاری‌های دما و بارش بر عملکرد محصول زعفران در استان خراسان رضوی طی دوره آماری اخیر ۲۰۲۰-۱۹۹۱ مدل سازی شد. با توجه به افزایش فراوانی و شدت رویدادهای فرین در دهه‌های اخیر بویژه رخداد‌های فرین سرمای و گرمایی، نتایج چنین پژوهش‌هایی می‌توانند به کشاورزان و سیاست‌گذاران کمک کنند تا با اتخاذ روش‌های مناسب در راستای سازگاری با تغییر اقلیم، از تأثیرات منفی این پدیده کاسته و به توسعه پایدار کشت زعفران در این مناطق یاری رسانند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل شهرستان‌های تربت حیدریه و کاشمر در استان خراسان رضوی است (شکل ۱).

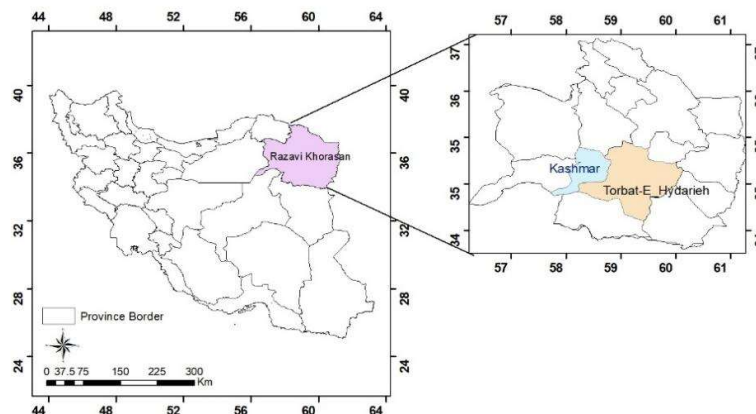
ابزار ارزشمند برای درک اثرات تغییر اقلیم بر این محصول باشد. با استفاده از این اطلاعات، می‌توان استراتژی‌های مدیریتی مناسبی را برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و افزایش عملکرد زعفران اتخاذ کرد.

تغییر اقلیم محسوس کنونی که تأثیر قابل توجهی بر محیط زیست و سامانه‌های کشاورزی دارد، به یک نگرانی جدی برای جامعه بشری تبدیل شده است. به دنبال فعالیت‌های صنعتی جامعه جهانی و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، این تغییرات همچنان به عنوان تهدیدی برای امنیت غذایی و محیط زیست محسوب می‌شوند (Banihashemi et al., 2020). تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی، به ویژه در مناطق تولید زعفران همچون تربت حیدریه و کاشمر اثراتی بر عملکرد زعفران داشته است. به عنوان مثال، در تحقیقی که در مورد تأثیر تغییر اقلیم بر رانت زمین‌های کشاورزی زعفران در خراسان رضوی انجام شده (Rastegaripour & Shybani, 2019)، نشان داده شده که تغییر اقلیم می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد زعفران داشته باشد. در پژوهشی دیگر برای همین منطقه، نتایج نشان داد با افزایش دما در خراسان رضوی، زمان گلدهی زعفران به تأخیر خواهد افتاد، که این امر می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد محصول داشته باشد (Rezaee & Yaqubi, 2023). در تحقیقی دیگر، به بررسی ردپای آب محصول زعفران در دشت بیرجند تحت شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد. نتایج این بررسی نشان داد با افزایش نیاز آبی در دوره آینده، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب کل محصول زعفران تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آینده تقریباً به میزان ۲ برابر نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است (Niroomandfad et al., 2023).

مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران با محدودیت‌های متعددی روبروست، از جمله کمبود داده‌های بلندمدت عملکرد زعفران و داده‌های اقلیمی با دقت مکانی بالا، عدم قطعیت در مدل‌های تدوین شده و پیچیدگی روابط بین متغیرهای اقلیمی و

با توجه به اینکه در عرض های جغرافیایی پایین تر در استان خراسان رضوی به عنوان مثال در شهرستان های گناباد و کاشمر، عملکرد زعفران به شدت کاهش یافته است در حالی که در عرض های جغرافیایی بالاتر استان، همچون شهرهای نیشابور، تربت حیدریه و زاوه عملکرد زعفران از پتانسیل بالاتری برخوردار شده است. لذا به همین دلیل دو شهرستان (کاشمر) واقع در عرض جغرافیایی پایین تر و (تربت حیدریه) واقع در عرض جغرافیایی بالاتر جهت این پژوهش انتخاب شدند. این دو شهرستان به عنوان یکی از مهم ترین مناطق کشت زعفران در ایران و جهان شناخته می شوند و به همین دلیل بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر عملکرد زعفران در این مناطق از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

تربت حیدریه با مختصات جغرافیایی ۳۵/۳۳ درجه عرض شمالی و ۵۹/۲۱ درجه طول شرقی و ارتفاع ۱۴۵۱ متر از سطح دریا، در منطقه ای کوهستانی و در دامنه های جنوبی رشته کوه های بینالود واقع شده است. این موقعیت جغرافیایی، منجر به ایجاد ریزاقلیم های متنوع در منطقه شده است. کاشمر، با مختصات جغرافیایی ۳۵/۲۷ درجه عرض شمالی و ۵۸/۴۷ درجه طول شرقی و ارتفاع ۱۱۰۹ متر از سطح دریا، در غرب استان خراسان رضوی و در دشت کاشمر واقع شده است. این شهر در مجاورت رودخانه شش تراز قرار دارد که نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و شرب منطقه ایفا می کند. توپوگرافی کاشمر نسبت به تربت حیدریه هموارتر است، هرچند در برخی مناطق تپه ماهورهایی نیز مشاهده می شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته های تحقیق)  
Figure 1- Location of the study area (Source: Research findings).

۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در دسترس بوده و پس انجام کنترل کیفیت و آزمون همگنی، به منظور محاسبه نمایه های فرین دما و بارش بکار رفتند.

#### داده های عملکرد محصول زعفران

داده های عملکرد زعفران به صورت سالانه برای دوره آماری

#### داده ها

##### داده های هواشناسی همدید

در این تحقیق، داده های مورد استفاده شامل دمای کمینه ( $^{\circ}\text{C}$ )، دمای بیشینه ( $^{\circ}\text{C}$ ) و بارش روزانه (mm) بود که از دو ایستگاه همدید کاشمر و تربت حیدریه (سازمان هواشناسی کشور) جمع آوری شدند. این داده ها به صورت روزانه از سال

۲۰۲۰-۱۹۹۱ و بر حسب کیلوگرم در هکتار از سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی اخذ شده‌اند. استفاده از داده‌های عملکرد زعفران در این دو منطقه، امکان تحلیل دقیق‌تر تأثیرات متغیرهای اقلیمی و مدیریتی بر روی تولید زعفران را فراهم می‌آورد و به درک بهتر از روندهای تولید و چالش‌های موجود در این صنعت کمک می‌کند.

### نمایه های فرین دما و بارش

تیم تخصصی تشخیص و نمایه های تغییر اقلیم (ETCCDI) یک کارگروه علمی است که تحت نظارت سازمان هواشناسی جهانی (WMO) تشکیل شده است تا نیاز به اندازه‌گیری و توصیف عینی تغییرات و نوسانات اقلیمی را برطرف کند. ETCCDI بر توسعه و ترویج نمایه‌های استاندارد تغییر اقلیم تمرکز دارد که مقایسه داده‌های مشاهده شده و خروجی‌های مدل‌ها را تسهیل می‌کنند (Hong & Ying, 2018). از نمایه‌های کلیدی تعریف شده توسط ETCCDI می‌توان به نمایه‌های فرین دما و بارش اشاره کرد که برای ارزیابی رویدادهای فرین اقلیمی ضروری هستند. این نمایه‌ها شامل نمایه های مانند تعداد روزهای یخبندان، مدت زمان موج گرما و بارش کل در روزهای بارانی است که به کمی‌سازی فراوانی، شدت و مدت زمان رویدادهای اقلیمی فرین کمک می‌کنند (Panda et al., 2016). ETCCDI با ارائه یک چارچوب ثابت برای تجزیه و تحلیل این نمایه‌ها، نقش مهمی در افزایش درک ما از تأثیرات تغییر اقلیم، اطلاع‌رسانی استراتژی‌های سازگاری و حمایت از فرآیندهای تصمیم‌گیری مرتبط با اقلیم در سطح جهانی ایفا می‌کند. نمایه های فرین مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. این نمایه ها با استفاده از نرم افزار RCLimindex در محیط R محاسبه شد (Zhang et al., 2011).

بررسی روند نمایه های فرین دما و بارش آزمون روند من-کندال یکی از روش‌های آماری پرکاربرد برای تشخیص وجود روند در داده‌های زمانی است. این آزمون به دلیل سادگی محاسبات و عدم نیاز به فرض توزیع نرمال برای داده‌ها، در بسیاری از مطالعات هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hamed & Rao, 1998). اصل این آزمون ناپارامتری بر اساس مقایسه همه جفت‌های ممکن از مشاهدات در یک سری زمانی است و در صورت وجود روند صعودی یا نزولی، تعداد جفت‌هایی که در جهت روند قرار دارند، به طور قابل توجهی بیشتر از جفت‌هایی خواهد بود که خلاف جهت روند قرار دارند (Alashan, 2020).

### مدل سازی عملکرد محصول زعفران با روش رگرسیون چندگانه

در این تحقیق، برای بررسی نقش متغیرهای فرین دمایی و بارشی بر عملکرد محصول زعفران در منطقه مورد مطالعه، از روش رگرسیون چندگانه (Multiple Linear Regression) استفاده شده است. رگرسیون چندگانه یک تکنیک آماری است که به محققان این امکان را می‌دهد تا تأثیر چندین متغیر مستقل را بر یک متغیر وابسته بررسی و امکان مدل‌سازی ارتباط خطی بین یک متغیر پاسخ (وابسته) و چندین متغیر پیش‌بین (مستقل) فراهم کند (James et al., 2013; Keith, 2019). کنند. در این پژوهش، این روش این امکان را می‌دهد که با بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل (نمایه های فرین دمایی و بارشی)، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم این نمایه ها بر عملکرد زعفران شناسایی شود. این روش به ویژه برای تحلیل داده‌های پیچیده و چند بعدی مناسب است و می‌تواند به درک بهتری از الگوهای عملکرد زعفران در شرایط مختلف اقلیمی کمک کند.

جدول ۱- نمایه‌های فرین دما و بارش کارگروه کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و نمایه‌ها (ETCCDI) مورد استفاده در این تحقیق  
 Table 1- Extreme temperature and precipitation indices of the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) used in this study (Zhang et al., 2011)

نمایه Index	واحد Unit	تعریف Definitions
روزهای یخبندان Frost days (FD)	day	تعداد روزهایی از سال که دمای کمینه روزانه کم تر از صفر درجه سلسیوس باشد The number of days in a year when the daily minimum temperature is below 0°C.
بزرگ‌ترین دمای بیشینه Max TX <sup>1</sup> (TXx)	°C	بیشینه دمای بیشینه روزانه در ماه The highest daily maximum temperature recorded in a month.
کوچک‌ترین دمای بیشینه Min TX (TXn)	°C	کمینه دمای کمینه روزانه در ماه The lowest daily maximum temperature recorded in a month.
میانگین دمای کمینه روزانه Mean TN <sup>2</sup> (TNm)	°C	میانگین دمای کمینه روزانه The average of daily minimum temperatures in a month.
میانگین دمای بیشینه روزانه Mean TX(TXm)	°C	میانگین دمای بیشینه روزانه The average of daily maximum temperatures in a month.
میانگین دمای روزانه Mean TM (TMm)	°C	میانگین دماهای روزانه در یک ماه The average of daily temperatures in a month.
کوچک‌ترین دمای کمینه Min TN (TNn)	°C	کمینه دمای کمینه در ماه The lowest daily minimum temperature recorded in a month.
نمایه طول دوره گرما Warm Spell Duration Index (WSDI)	day	تعداد روزهایی از سال که حداقل ۶ روز پیاپی دمای روزانه بیش از صدک ۹۰ام دوره مینا باشد The number of days in a year when the daily maximum temperature exceeds the 90th percentile of the baseline period for at least six consecutive days.
نمایه طول دوره سرما Cold Spell Duration Index (CSDI)	day	تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز متوالی دمای شبانه کم تر از صدک ۱۰ام دوره مینا باشد The number of days in a year when the daily minimum temperature is below the 10th percentile of the baseline period for at least six consecutive nights.
دامنه دمای شبانه روزی Daily temperature rang (DTR)	°C	تفاوت میانگین ماهانه دمای روزانه و شبانه The difference between the monthly average of daily maximum temperature and daily minimum temperature.
بیشینه بارش یک روزه Maximum 1-day Precipitation (RX1day)	mm	بیشترین بارش یکروزه ثبت شده در ماه The highest single-day precipitation recorded in a month.
نمایه ساده شدت بارش روزانه Daily PR <sup>3</sup> intensity (SDII)	day mm <sup>-1</sup>	مقدار کل بارش سالانه تقسیم بر تعداد روزهای بارشی (حداقل ۱ میلی‌متر) سالانه The total annual precipitation divided by the number of wet days (days with at least 1 mm of precipitation).
روزهای متوالی خشک Consecutive Dry Days (CDD)	day	بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش کمتر از ۱ میلی‌متر باشد The maximum number of consecutive days with precipitation less than 1 mm.
روزهای متوالی مرطوب Consecutive Wet Days (CWD)	day	بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر باشد The maximum number of consecutive days with precipitation greater than 1 mm.
مقدار کل بارش روزهای مرطوب سالانه Annual total wet- day PR (PRCPTOT)	mm	مقدار کل بارش سالانه روزهای مرطوب (مقدار بارش حداقل از ۱ میلی‌متر بیشتر باشد) The total annual precipitation on days where precipitation is at least 1 mm.

1- Maximum temperature  
 2- Minimum tempaure  
 3- Precipitation

روزهای یخی Ice days (ID)	day	تعداد روزهایی با دمای بیشینه کمتر از صفر درجه سلسیوس طی یک سال The number of days in a year when the daily maximum temperature remains below 0°C.
مجموع سالانه بارش روزانه بیش از آستانه ۹۵ درصد Annual total PRCP when RR > 95th percentile (R95p)	میلی‌متر mm	مجموع بارش سالانه بدست آمده از روزهایی با بارش سنگین Total annual PR from heavy rain days
مجموع سالانه بارش روزانه بیش از آستانه ۹۹ درصد Annual total PRCP when RR > 95th percentile (R99p)	میلی‌متر mm	مجموع بارش سالانه بدست آمده از روزهایی با بارش خیلی سنگین Total annual PR from very heavy rain days

جدول ۲، تغییرات نمایه‌های مختلف بارشی را در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه واقع در استان خراسان رضوی برای دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰) نشان می‌دهد. این نمایه‌ها به منظور بررسی تغییرات شدت، فراوانی و توزیع زمانی بارش مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل این جدول به درک بهتر پیشینه نوسانات اقلیمی و آشکارسازی تغییر اقلیم در منطقه و اثرات آن بر منابع آب و کشاورزی کمک می‌کند. نمایه CDD، تعداد روزهای متوالی خشک را نشان می‌دهد. افزایش این نمایه به معنای افزایش دوره‌های خشکسالی است. نمایه CWD تعداد روزهای متوالی مرطوب را نشان می‌دهد. کاهش این نمایه به معنای کاهش دوره‌های مرطوب و افزایش فاصله بین دوره‌های بارش است. نمایه Rx1day (مقدار بیشینه بارش در یک روز (یک دوره ۵ روزه) را نشان می‌دهد. افزایش این نمایه به معنای افزایش شدت بارش‌های رگباری (افزایش شدت بارش‌های طولانی مدت) است. نمایه Preptot مقدار کل بارش در یک سال را نشان می‌دهد. کاهش این نمایه به معنای کاهش بارش سالانه و افزایش خشکسالی است. نمایه SDII شدت متوسط بارش در روزهای بارشی نشان می‌دهد. افزایش این نمایه به معنای افزایش شدت بارش‌ها است. نمایه R95p (R99p) مجموع بارش‌های روزانه ای است که از صدک ۹۵ (۹۹م) بارش بیشتر بوده‌اند. افزایش این دو نمایه به معنای افزایش سهم بارش‌های بسیار شدید از کل بارش منطقه است.

مدل رگرسیون چندمتغیره خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن:

Y: متغیر وابسته (پاسخ)

$X_1 + X_2 + \dots + X_n$ : متغیرهای مستقل (پیش‌بین)

$\beta_0$ : عرض از مبدأ

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ : ضرایب رگرسیونی که نشان‌دهنده میزان

تأثیر هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته هستند

$\varepsilon$ : خطای تصادفی با توزیع نرمال میانگین صفر و

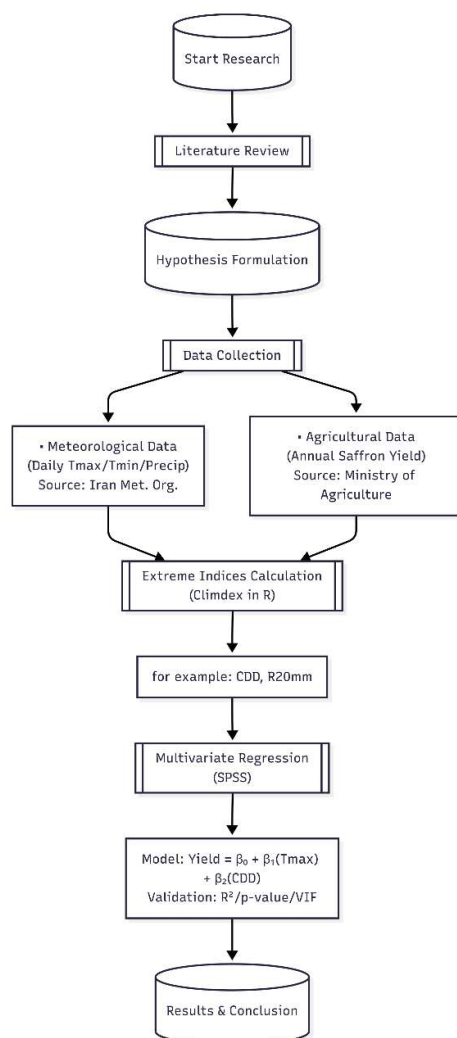
واریانس  $\sigma^2$

برای برآورد پارامترهای مدل  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  از روش کمترین مربعات معمولی (Ordinary Least Squares, OLS) استفاده شد که با کمینه کردن مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها (RSS)، مقادیر بهینه ضرایب را محاسبه می‌کند (Montgomery et al., 2021).

در شکل ۲، فرآیند آماده‌سازی داده‌ها و فرآیند پژوهش آورده شده است.

## نتایج و بحث

تحلیل روند تغییرات نمایه‌های فرین بارشی در ایستگاه‌های کاشمر و تربت حیدریه



شکل ۲- فرآیند پژوهش (منبع: یافته های تحقیق)

Figure 2- Research flowchart (Source: Research findings).

نمایه R99p دارای روند کاهشی معنادار در هر دو ایستگاه می باشد. بارش شدید (R95p) نیز در ایستگاه تربت حیدریه از نظر آماری نزدیک به معناداری است. در سایر نمایه های فرین بارشی، روندی تایید نشد. اما شیب خط برازش یافته بر سری زمانی نمایه کاهشی (به جز CWD و SDII) بدست آمد. دو نمایه روزهای تر و شدت بارش روزانه دارای شیب مثبت اما بدون معناداری در روند بدست آمدند.

بر اساس نتایج آماری جدول ۲، نمایه های شدت بارش مانند Rx1day، Rx5day، R95p و R99p در دو ایستگاه مورد بررسی، دارای شیب کاهشی هستند درحالیکه نمایه SDII دارای شیب صعودی بدست آمد (فاقد روند معنادار) که نشان دهنده تغییرات جدی در الگوی بارش های رگباری است. مقادیر p-value نشان می دهند که برخی از روندهای مشاهده شده از نظر آماری معنادار هستند. این بدان معناست که این تغییرات تصادفی نبوده و احتمالاً ناشی از عوامل اقلیمی است. بر اساس مقدار p،

بیشینه دمای ثبت شده)، TXm (گرمایش روزانه) در هر دو ایستگاه دارای روند معنادار افزایشی و برای DTR (دامنه روزانه تغییرات دما) دارای شیب مثبت و نزدیک به معناداری بدست آمد که با نتایج رحیم‌زاده و همکاران (Rahimzadeh et al., 2009) و رحیمی و حجابی (Rahimi & Hejabi, 2018) برای ایران همخوانی دارد. بررسی نمایه های فرین دمایی سرد شامل CSDI و FD نشان داد در هر دو ایستگاه این دو نمایه دارای شیب کاهشی اما فاقد روند (عدم معناداری در سطح ۰/۰۵) هستند که می توان نتیجه گرفت روزهای سرد و یخبندان در هر دو ایستگاه طی این دوره کاهش یافته اند، اما این روند قطعی نیست.

### تحلیل تغییرات نمایه های فرین دما در ایستگاه‌های کاشمر و تربت حیدریه

جدول (۳)، نتایج آماری مربوط به معناداری روند بر مبنای روش من-کندال نمایه‌های فرین مختلف دمایی را در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه برای دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. تحلیل روند نمایه های فرین دمایی در ایستگاههای مذکور نشان داد دو متغیر نمایه های فرین دمایی و فرین های دمای بیشینه و کمینه در هر دو ایستگاه، روند معنادار (هم کاهشی و هم افزایشی) را نشان دادند. نمایه های فرین مربوط دمای بیشینه و کمینه شامل Tmm، TNm (گرمایش شبانه)، TXn (کمترین

جدول ۲- تغییرات مشاهداتی فرین های بارشی در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه (منبع: یافته های تحقیق)

Table 2- Observed changes in extreme precipitation indices trend at Kashmar and Torbat-e Heydariyeh stations (Source: Research findings)

نمایه / ایستگاه Index/Station	کاشمر Kashmar			تربت حیدریه Torbat-e Heydariyeh		
	میانگین Avergae	شیب سن Sen's slope	مقدار P P-value	میانگین Avergae	شیب سن Sen's slope	مقدار P P-value
روزهای متوالی خشک Consecutive Dry Days (CDD)	151.3	-1.01	0.27	134.9	0.11	0.88
روزهای متوالی مرطوب Consecutive Wet Days (CWD)	3.5	0.01	0.66	25.4	-0.008	0.759
بیشینه بارش یک روزه Maximum 1-day Precipitation (RX1day)	12.1	-0.25	0.17	29.6	-0.37	0.074
بیشینه بارش ۵ روزه Maximum 5-day Precipitation (RX5day)	40.9	-0.35	0.29	49.5	-0.52	0.192
مقدار کل بارش روزهای مرطوب سالانه Annual total wet-day PR (PRCPTOT)	188.1	-0.98	0.45	248	-2.93	0.092
نمایه ساده شدت بارش روزانه Daily PR <sup>1</sup> intensity (SDII)	6.3	0.003	0.89	6.7	-0.03	0.204
مجموع سالانه بارش روزانه بیش از آستانه ۹۵ درصد Annual total PRCP when RR > 95th percentile (R95p)	39.5	-0.82	0.27	52.1	-1.5	0.048
مجموع سالانه بارش روزانه بیش از آستانه ۹۹ درصد Annual total PRCP when RR > 99th percentile (R99p)	11.1	*-0.74	0.009	14.7	-1.13*	0.021

\* معنادار در سطح ۵ درصد.  
\* Significant at 5% level.

های دمایی گرم همچون روزهای داغ و (WSDI, SU) یا توجه به مقدار P بدست آمده، ایستگاه کاشمر شاهد افزایش معنادار

این نتیجه همسو با یافته های مدرس و سرحدی (Modarres & Sarhadi, 2011) می باشد. در ارتباط با فرین

ایستگاه کاشمر است. مقادیر p-value نشان می‌دهند که برخی از روندهای مشاهده شده از نظر آماری معنی‌دار هستند. این بدان معناست که این تغییرات تصادفی نبوده و احتمالاً ناشی از عوامل اقلیمی است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که منطقه کاشمر و تربت حیدریه در معرض افزایش دما قرار دارند. این افزایش دما می‌تواند پیامدهای جدی برای بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، سلامت و محیط زیست داشته باشد.

روزهای گرم بوده است، در حالی که تربت حیدریه شیب کاهشی (اما نه روند کاملاً معنادار) دیده می‌شود که این نتیجه با یافته‌های برخی محققان (Tabari & Hosseinzadeh, 2011) مبنی بر افزایش توالی روزهای گرم در مناطق نیمه خشک و خشک همخوانی دارد. هر دو ایستگاه روند مشابهی را نشان می‌دهند، اما شدت تغییرات در برخی نمایه‌ها بین دو ایستگاه متفاوت است. به عنوان مثال، افزایش دمای بیشینه در ایستگاه تربت حیدریه بیشتر از

جدول ۳- میانگین، شیب سن و مقدار احتمال آزمون من- کندال نمایه‌های فرین دمایی در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه (منبع: یافته‌های تحقیق)

Table 3- Observed changes in extreme temperature indices trends at Kashmar and Torbat-e Heydariyeh stations (Source: Research findings)

نمایه/ایستگاه Index/Station	تربت حیدریه Torbat-e Heydariyeh			کاشمر Kashmar		
	مقدار P	شیب سن	میانگین	مقدار P	شیب سن	میانگین
	P-value	Sen's slope	Avergae	P-value	Sen's slope	Avergae
نمایه طول دوره سرما Cold Spell Duration Index (CSDI)	0.266	-0.12	3	0.81	-0.04	3.7
نمایه طول دوره گرما Warm Spell Duration Index (WSDI)	0.069	-.27	5.4	0.04	0.29	6.3
روزهای یخبندان Frost days (FD)	0.189	-0.34	77.9	0.53	-0.13	33.3
روزی دامنه دمای شبانه Daily temperature rang (DTR)	0.068	0.02	13.2	0.057	0.02	11.8
میانگین دمای روزانه Mean TM (TMm)	0	0.05*	14.6	0.002	0.05*	18.1
میانگین دمای کمینه روزانه Mean TN <sup>1</sup> (TNm)	0	0.04*	8	0.003	0.04*	12.2
کوچک‌ترین دمای کمینه Min TN (TNn)	0.35	0.06	-13.3	0.31	0.05	-7.5
میانگین دمای بیشینه روزانه Mean TX(TXm)	0	0.06*	21.2	0.001	0.06	24.1
کوچک‌ترین دمای بیشینه Min TX (TXn)	0.21	0.06	-1.6	0.36	0.05	1.1
بزرگ‌ترین دمای بیشینه Max TX <sup>2</sup> (TXx)	0.284	0.54	42.6	0.04	0.04	41.4

\* معنادار در سطح ۵ درصد.

\* Significant at 5% level.

افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش بارندگی، افزایش تبخیر، کاهش رطوبت خاک، افزایش وقوع پدیده‌های شدید جوی مانند

1- Minimum temperaure  
2- Maximum temperature

خشکسالی و موج‌های گرما شود.

جدول ارائه شده در شکل (۵)، ماتریس همبستگی بین عملکرد زعفران در منطقه کاشمر در استان خراسان رضوی و نمایه‌های فرین دما و بارش کارگروه ETCCDI را نشان می‌دهد. در این جدول، Saffron Yield عملکرد زعفران سالانه به کیلو گرم در هکتار است. ماتریس همبستگی ابزاری برای بررسی روابط بین متغیرها است. در این ماتریس، ضریب همبستگی بین هر دو متغیر در یک جدول نمایش داده می‌شود. ضریب همبستگی عددی بین ۱- و ۱ است که نشان دهنده قدرت و جهت رابطه بین دو متغیر است. ضریب همبستگی مثبت نشان دهنده رابطه مستقیم بین دو متغیر است. به این معنی که با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد. ضریب همبستگی منفی نشان دهنده رابطه معکوس بین دو متغیر است. به این معنی که با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی نزدیک به صفر نشان دهنده عدم وجود رابطه قوی بین دو متغیر است.

در ماتریس همبستگی ارائه شده، می‌توان مشاهده کرد که عملکرد زعفران (Saffron Yield) با برخی از نمایه‌های فرین دما و بارش کارگروه ETCCDI همبستگی دارد. برای مثال، ضریب همبستگی بین saffron و TXx (حداکثر دمای روزانه) ۰/۲۸ است که نشان دهنده رابطه مستقیم بین این دو متغیر است. به این معنی که با افزایش حداکثر دمای روزانه، عملکرد زعفران نیز به طور ضعیفی افزایش می‌یابد. همچنین، ضریب همبستگی بین saffron و CSDI (طول دوره سرمایی) ۰/۶۵- است که نشان دهنده رابطه معکوس بین این دو متغیر است. به این معنی که با افزایش حداقل دمای شبانه، عملکرد زعفران به طور ضعیفی کاهش می‌یابد.

مدلسازی عملکرد زعفران با استفاده از نمایه‌های فرین دما و بارش

تحلیل ماتریس همبستگی بین عملکرد زعفران در تربت حیدریه با نمایه‌های فرین دما و بارش

ماتریس همبستگی بین عملکرد زعفران در منطقه تربت حیدریه در استان خراسان رضوی و نمایه‌های فرین دما و بارش کارگروه ETCCDI در شکل ۴ نشان داده شده است. در این ماتریس، هر سلول نشان‌دهنده همبستگی بین دو متغیر است. ضریب همبستگی بین ۱- و ۱- متغیر می‌کند. ضریب همبستگی ۱- نشان‌دهنده همبستگی کامل مثبت بین دو متغیر است. ضریب همبستگی ۱- نشان‌دهنده همبستگی کامل منفی بین دو متغیر است. در نهایت ضریب همبستگی صفر نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی بین دو متغیر است (Cohen et al., 2009).

در این ماتریس، می‌توان مشاهده کرد که عملکرد زعفران با TXx (حداکثر دمای روزانه) همبستگی منفی ضعیفی با مقدار ۰/۰۲- دارد اما مقدار عملکرد زعفران با TXn (حداقل دمای شبانه) اما مثبت و قویتر شده است بطوریکه مقدار ۰/۴۲ را نشان می‌دهد. عملکرد زعفران با TXm (حداکثر دمای ماهانه) همبستگی منفی ۰/۱۸- را دارد. همبستگی عملکرد زعفران با TNm (حداقل دمای ماهانه) کمی بیشتر از نمایه پیشین است و مقدار آن ۰/۱۱- است. بالاترین ضرایب همبستگی بین عملکرد زعفران با نمایه‌های PRCPTOT با ۰/۵۸ و Rx1day با مقدار ۰/۵۰ و SDII با ۰/۴۴ محاسبه شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که عملکرد زعفران در ایستگاه تربت حیدریه با نمایه‌های فرین بارش ارتباط قوی دارد. نمایه‌هایی که همبستگی بالاتری دارند برای مدلسازی رگرسیونی استفاده شده است.

تحلیل ماتریس همبستگی بین عملکرد زعفران در کاشمر با نمایه‌های فرین دما و بارش

جدول ۴- ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)

ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)		Extreme Precipitation and Temperature Indices												
ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)			
ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)	ماتریس همبستگی بین نمایه های فرین دا و بارش در منطقه تربت حیدریه یا عملکرد زعفران (منبع: یافته های تحقیق)			
عملکرد زعفران Saffron Yield	1.00	-0.02	-0.06	0.42	-0.18	-0.22	-0.11	0.00	-0.33	0.50	0.44	-0.39	0.22	0.01
روزهای یخبندان Frost days (FD)	-0.02	1.00	0.26	-0.13	-0.33	-0.42	-0.66	-0.26	0.26	0.02	-0.22	0.33	0.14	0.23
بزرگترین دمای یخبندان Max TX (TXa)	-0.06	0.26	1.00	-0.24	0.01	0.01	-0.13	-0.14	0.27	0.31	-0.28	0.03	0.29	0.29
کوچکترین دمای یخبندان Min TX (TXa)	0.42	-0.13	-0.24	1.00	0.05	0.09	0.12	0.06	-0.46	-0.06	0.34	0.06	-0.18	-0.10
میانگین دمای یخبندان Mean TX (TXm)	-0.18	-0.33	0.01	0.05	1.00	0.93	0.78	0.57	-0.03	0.75	-0.32	0.03	-0.19	-0.30
میانگین کمترین دمای یخبندان Min TX (TXm)	-0.22	-0.42	0.01	0.09	0.93	1.00	0.84	0.58	-0.04	0.55	-0.26	0.10	-0.19	-0.39
میانگین بیشترین دمای یخبندان Mean TX (TXm)	-0.11	-0.66	-0.13	0.12	0.78	0.84	1.00	0.55	-0.15	0.29	-0.10	-0.03	-0.18	-0.63
مدت دوره سرما Warm Spell Duration Index (WSDI)	0.00	-0.26	-0.14	0.06	0.57	0.58	0.55	1.00	0.40	0.28	0.11	-0.15	0.21	-0.23
مدت دوره گرما Cold Spell Duration Index (CSDI)	-0.33	0.26	0.27	-0.46	-0.03	-0.04	-0.15	0.40	1.00	-0.06	-0.27	-0.27	0.27	0.29
دامنه دمای یخبندان Daily temperature rang (DTR)	-0.15	0.02	0.31	-0.06	0.75	0.55	0.29	0.28	0.04	1.00	-0.49	-0.55	-0.06	0.05
میانگین بارش سالانه Annual total wet-day PR (PRCPTOT)	0.50	-0.22	-0.28	0.34	-0.32	-0.26	-0.10	0.11	-0.06	-0.49	1.00	0.73	0.26	-0.19
میانگین شدت بارش روزانه Daily PR intensity (SDI)	0.44	-0.01	-0.23	0.29	-0.40	-0.40	-0.34	-0.15	-0.27	-0.36	0.70	1.00	0.06	0.02
مجموع بارش سالانه Annual total wet-day (PRCPTOT/PR)	0.58	0.05	-0.22	0.24	-0.67	-0.67	-0.51	-0.26	-0.22	-0.55	0.73	0.77	0.24	0.08
روزهای متوالی مرطوب Consecutive Wet Days (CWD)	-0.39	0.33	0.05	0.06	0.03	0.10	-0.03	-0.01	0.15	-0.07	-0.06	0.12	-0.14	0.36
روزهای متوالی خشک Consecutive Dry Days (CDD)	0.22	0.14	0.29	-0.18	-0.19	-0.19	-0.18	0.21	0.27	-0.06	0.26	-0.14	1.00	0.17
روزهای یخبندان متوالی Consecutive Wet Days (CWD)	0.01	0.23	0.29	-0.10	-0.20	-0.39	-0.63	-0.23	0.29	0.05	-0.19	-0.14	0.17	1.00

- 1- Maximum temperature
- 2- Minimum temperaure
- 3- Minimum temperaure
- 4- Precipitation

جدول ۵- ماتریس همبستگی بین نمایه‌های فرین و بارش در منطقه کاشمر با عملکرد زعفران (منبع: یافته‌های تحقیق)  
Table 5. Correlation matrix between extreme temperature and precipitation indices and saffron yield in the Kashmar region (Source: Research findings)

Extreme Precipitation and Temperature Indices															
نمایه‌های فرین و بارش	علاکرد زعفران Saffron Yield	روزهای یخبندان Frost days (FD)	بزرگ‌ترین دمای بیشینه Max TX (TXs)	کوچک‌ترین دمای بیشینه Min TX (TXn)	میانگین دمای بیشینه روزانه Mean TX (TXm)	میانگین دمای روزانه Mean TM (TMm)	میانگین کمینه روزانه Mean TN (TNm)	مدت طول دوره گرما Warm Spell Duration Index (WSDI)	مدت طول دوره سرما Cold Spell Duration Index (CSDI)	دامنه دمای شبانه Daily temperature range (DTR)	بیشینه بارش یک روزه Maximum 1-day Precipitation (RX1day)	نمایه سازه شدت بارش روزانه Daily PR intensity (SDI)	مجموع بارش سالانه Annual total wet-day PR (PRCTOT)	روزهای متوالی مرطوب Consecutive Wet Days (CWD)	روزهای یخی (ID)
علاکرد زعفران Saffron Yield	1.00	-0.29	0.28	0.34	-0.12	-0.16	-0.09	-0.32	-0.65	-0.15	0.18	0.11	0.22	-0.01	-0.26
روزهای یخبندان Frost days (FD)	-0.29	1.00	-0.01	-0.50	-0.32	-0.37	-0.47	0.05	0.46	0.09	-0.31	-0.56	-0.31	0.09	0.25
بزرگ‌ترین دمای بیشینه Max TX (TXs)	0.28	-0.01	1.00	-0.06	0.18	0.17	0.10	0.29	-0.13	0.21	0.06	-0.07	-0.01	0.02	0.02
کوچک‌ترین دمای بیشینه Min TX (TXn)	0.34	-0.50	-0.06	1.00	-0.05	0.06	0.17	-0.31	-0.74	-0.41	0.12	0.42	0.48	0.09	-0.47
میانگین دمای بیشینه روزانه Mean TX (TXm)	-0.12	-0.32	0.18	-0.05	1.00	0.94	0.90	0.50	0.07	0.28	-0.17	0.01	-0.53	-0.31	-0.29
میانگین دمای روزانه Mean TM (TMm)	-0.16	-0.37	0.17	0.06	0.94	1.00	0.91	0.46	0.05	0.16	-0.15	0.10	-0.46	-0.28	-0.34
میانگین کمینه روزانه Mean TN (TNm)	-0.09	-0.47	0.10	0.17	0.90	0.91	1.00	0.36	-0.08	0.19	-0.02	0.19	-0.37	-0.30	-0.44
مدت طول دوره گرما Warm Spell Duration Index (WSDI)	-0.32	0.05	0.29	-0.31	0.50	0.46	0.36	1.00	0.45	0.12	-0.16	-0.03	-0.26	-0.14	0.08
مدت طول دوره سرما Cold Spell Duration Index (CSDI)	-0.65	0.46	-0.13	-0.74	0.07	0.05	-0.08	0.45	1.00	0.24	-0.28	-0.41	-0.45	-0.02	0.49
دامنه دمای شبانه Daily temperature range (DTR)	-0.15	0.09	0.21	0.06	0.28	0.16	0.19	0.12	0.24	1.00	0.01	-0.19	-0.31	0.00	0.12
بیشینه بارش یک روزه Maximum 1-day Precipitation (RX1day)	0.18	-0.31	0.06	0.12	-0.17	-0.15	-0.02	-0.16	-0.28	0.01	1.00	0.52	0.51	0.07	-0.28
نمایه سازه شدت بارش روزانه Daily PR intensity (SDI)	0.11	-0.56	-0.07	0.42	0.01	0.10	0.19	-0.03	-0.41	-0.19	0.52	1.00	0.59	-0.19	-0.53
مجموع بارش سالانه Annual total wet-day PR (PRCTOT)	0.22	-0.31	-0.01	0.48	-0.53	-0.46	-0.37	-0.26	-0.45	-0.31	0.51	0.59	1.00	0.34	-0.28
روزهای متوالی مرطوب Consecutive Wet Days (CWD)	-0.47	0.18	0.04	-0.11	0.40	0.45	0.36	0.28	0.26	-0.19	-0.37	-0.42	-0.42	-0.06	0.21
روزهای متوالی خشک Consecutive Dry Days (CDD)	-0.01	0.09	0.02	0.09	-0.31	-0.28	-0.30	-0.14	-0.02	0.00	0.07	1.00	1.00	1.00	0.12
روزهای یخی (ID)	-0.26	0.25	0.02	-0.47	-0.29	-0.34	-0.44	0.08	0.49	0.12	-0.28	-0.53	-0.28	0.12	1.00

Extreme Precipitation and Temperature Indices

نمایه‌های فرین و بارش

در این معادله Yield عملکرد زعفران بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. مقدار پایه عملکرد (عرض از مبدا) به میزان ۶/۰۴۲ کیلوگرم بر هکتار می باشد. ضرایب این معادله نشان می دهد افزایش یا کاهش هر واحد از هر نمایه منجر به چه میزان تغییراتی در عملکرد خواهد شد. بطور کلی، بررسی ضرایب تخصیص یافته به نمایه های فرین منتخب در این معادله نشان می دهد عوامل دمایی (به ویژه TNn و ID) عوامل کاهنده عملکرد زعفران را در این منطقه محسوب می شوند. نمایه ی فرین بارشی از جمله CDD ضرایب کوچکتری را در این معادله به خود اختصاص داده اند و باز هم دارای تأثیر منفی بر عملکرد هستند. اعتبار این مدل با  $R^2 = ۰/۷۰$  و  $RMSE = ۰/۴۹$  و  $NRMSE = ۱۶/۴\%$  ارزیابی شده است که نشان دهنده دقت نسبتاً خوب مدل است. مقدار  $R^2$  نشان می دهد حدود ۰/۷۰ درصد از تغییرات عملکرد توسط این مدل تبیین می شود. از آنجا که  $P\text{-value} < 0.05$  برای آزمون F بدست آمد لذا می توان نتیجه گرفت مدل به طور کلی معنادار است بدین معنی که ترکیب متغیرهای اقلیمی استفاده شده تأثیر معناداری بر عملکرد زعفران دارد.

در منطقه تربت حیدریه، مدل نشان داد که چهار نمایه فرین دمایی و بارشی بر عملکرد زعفران تأثیر گذارند: تعداد روزهای یخی (ID)، روزهای خیلی تر (R95p)، کمینه ماهانه دمایی بیشینه روزانه (TXn) و تعداد روزهای یخبندان (FD). تعداد روزهای یخی (ID) مانند کاشمر تأثیر منفی دارد. روزهای تر (R95p) که روزهایی هستند که بارش بیش از صدک ۹۵ ام است، دارای تأثیر مثبت بر عملکرد هستند. کمینه ماهانه دمایی بیشینه روزانه (TXn) که کمترین دمایی بیشینه ثبت شده در ماه است، تأثیر مثبت دارد، زیرا دماهای پایین تر می تواند به کاهش تنش حرارتی کمک کنند. تعداد روزهای یخبندان (FD) که روزهایی هستند که دمایی بیشینه به زیر صفر درجه سلسیوس

ارتباط بین عملکرد زعفران و نمایه های حد دما و بارش به عوامل مختلفی بستگی دارد. برخی از این عوامل عبارتند از تأثیر دما بر رشد و نمو گیاه. زعفران گیاهی است که به دمای خنک در پاییز و زمستان و دمای گرم در بهار نیاز دارد. دمای بسیار بالا یا بسیار پایین می تواند به رشد و نمو گیاه آسیب برساند. همچنین زعفران به آبیاری کافی در طول دوره رشد نیاز دارد. بارش باران می تواند به تامین نیاز آبی گیاه کمک کند. تنش های محیطی مانند خشکی، گرما و سرما می توانند به عملکرد زعفران آسیب برساند.

#### برازش مدل رگرسیونی چند متغیره

در ادامه، مدل های پیش بینی عملکرد زعفران بر مبنای روش رگرسیونی چند متغیره توسعه یافت. برای منطقه کاشمر، در مدل رگرسیون چند متغیره ضرایب متعلق به چهار نمایه فرین دمایی و بارشی بر اساس آزمون های آماری معنادار می باشند که شامل تعداد روزهای یخی (ID)، تعداد روزهای خشک متوالی (CDD)، کمینه ماهانه دمایی کمینه روزانه (TNn) و شیب های حاره ای است. معادله مدل پیش بینی عملکرد زعفران در کاشمر به صورت رابطه (۲) ارائه شده است. تعداد روزهای یخی (ID) به روزهای اشاره دارد که دمایی بیشینه به زیر صفر درجه سلسیوس می رسد و تأثیر منفی بر عملکرد زعفران دارد، تعداد روزهای خشک متوالی (CDD) نیز تأثیر منفی دارد، زیرا کمبود آب باعث کاهش رشد و گلدهی زعفران می شود. کمینه ماهانه دمایی حداقل روزانه (TNn) که کمترین دمایی حداقل ثبت شده در ماه است، تأثیر منفی دارد، زیرا دماهای بسیار پایین می توانند به گیاه آسیب برسانند. نمایه ID، قویترین عامل کاهنده عملکرد زعفران بدست آمد.

$$Yield = 6.042 - 0.14 ID - 0.006 CDD - 0.105 TNn - 0.027 TR20 \quad (2)$$

بدست نیامد. به طور کلی، کاهش بارش‌های حدی (به ویژه بارش‌های بسیار سنگین) در هر دو منطقه مشاهده می‌شود که می‌تولند نشان دهنده تغییر در الگوی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم باشد.

در کل، نتایج نشان داد که مناطق مورد مطالعه در معرض تغییر اقلیم قابل توجهی قرار دارند که در سایر پژوهش‌ها نیز به این امر اشاره شده است (Rastegaripour & Shyban, 2019). افزایش دما، کاهش بارش، افزایش شدت بارش‌های رگباری و کاهش تعداد روزهای یخبندان از جمله مهم‌ترین تغییرات مشاهده شده هستند. این تغییرات با روند گرمایش جهانی و تغییرات در الگوهای گردش عمومی جو مطابقت دارد. بررسی انجام شده در این پژوهش نشان داد تغییر اقلیم در مناطق کاشمر و تربت حیدریه، به ویژه افزایش دما و کاهش بارش، در حال حاضر تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد محصول زعفران داشته است. بررسی روند ۳۰ ساله عملکرد زعفران در خراسان رضوی نیز نشان می‌دهد، عملکرد این محصول طی سالیان اخیر، روندی نزولی داشته و تحت تأثیر خشکسالی و دماهای فرین قرار گرفته است بطوریکه موج‌های سرمای شدید و خشکسالی‌ها باعث کاهش عملکرد زعفران شده اند (Kafi et al., 2018). بررسی مدل‌های رگرسیونی تدوین شده برای دو منطقه نیز نشان داد عملکرد زعفران به شدت تحت تأثیر نمایه‌های فرین دما و بارش قرار دارد، اما این تأثیرات در دو منطقه از طریق نمایه‌های فرین دمایی و بارشی متفاوت، بدست آمد. برای هر دو منطقه، مدل با ۳ نمایه فرین دمایی و ۱ نمایه فرین بارشی (CDD) نمایه دوره‌های خشک و دیگر نمایه‌های R95p روزهای (تر) تدوین شد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، دمای بیشینه و میانگین دما اصلی‌ترین متغیرهای موثر بر کاهش عملکرد زعفران می‌باشند بطوریکه در تربت حیدریه متغیر میانگین دما به تنهایی ۴۲ درصد از تغییر پذیری میزان عملکرد را تبیین کرده است (Sahabi & Moallem, 2020). این یافته‌ها با نتایج

می‌رسد، نیز تأثیر مثبت دارد، زیرا یخبندان می‌تولند به کنترل آفات و بیماری‌ها کمک کند. معادله مدل پیش‌بینی عملکرد زعفران در تربت حیدریه به صورت زیر ارائه شده است:

$$\text{Yield} = -4.745 - 0.122 \text{ ID} + 0.18 \text{ R95p} + 0.18 \text{ TXn} + 0.016 \text{ FD} \quad (3)$$

این معادله نشان می‌دهد که افزایش روزهای خیلی تر، کمینه دمای بیشینه و تعداد روزهای یخبندان باعث افزایش عملکرد زعفران می‌شود، در حالی که افزایش روزهای یخی تأثیر منفی بر عملکرد دارد. اعتبار این مدل با  $R^2 = 0.83$ ،  $\text{RMSE} = 0.43$  و  $\text{NRMSE} = 15.9\%$  ارزیابی شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.

## نتایج و بحث

تحلیل روند نمایه‌های فرین در دو منطقه تربت حیدریه و کاشمر نشان داد طی دوره آماری مورد بررسی، نمایه‌های دمای کمینه و بیشینه در هر دو ایستگاه از روند صعودی معناداری برخوردار بوده‌اند. همچنین این مناطق با افزایش زیاد در فراوانی روزهای داغ روبرو بوده‌اند. کاهش معنادار در دو نمایه روزهای یخبندان و روزهای سرد متوالی (موج سرمایی) نیز مشاهده شد که نشان از روند گرمایش شدید در دو ایستگاه دارد. تفاوت دو ایستگاه در نمایه WSDI (فراوانی روزهای گرم متوالی) مشاهده شد که برای این نمایه افزایش معنادار در کاشمر بدست آمد درحالی‌که برای ایستگاه تربت حیدریه روند معنادار نبود که این امر که ممکن است ناشی از تفاوت‌های محلی در الگوهای جوی باشد. علاوه بر روند معنادار کاهش مجموع بارش سالانه در هر دو ایستگاه، تحلیل روند سایر نمایه‌های فرین بارش نشان داد در هر دو ایستگاه، بارش‌های بسیار سنگین (R99p) روند کاهش معنادار دارند در تربت حیدریه، بارش‌های سنگین (R95p) نیز کاهش نزدیک به معنادار نشان داد. روند سایر نمایه‌های فرین بارشی در هر دو ایستگاه از نظر آماری معنادار

ترتیب حیدریه به منفی  $20^{\circ}\text{C}$  - رسید، میانگین عملکرد در سال بعد یعنی ۱۴۰۲ به ۱/۵۶ کیلوگرم کاهش یافت. مطالعه‌ای دیگر نیز نشان داده است که افزایش دمای زمستان در خراسان رضوی موجب تغییر در چرخه فنولوژیک زعفران و کاهش کیفیت کلاله شده است (Khorramdel et al., 2019).

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد زعفران بر اساس نمایه‌های فرین اقلیمی در کاشمر و تربت حیدریه نشان می‌دهند که مدیریت دما و آب از عوامل کلیدی در بهبود عملکرد زعفران هستند. افزایش دما می‌تواند منجر به افزایش تبخیر-تعرق، کاهش رطوبت خاک، و در نتیجه کاهش عملکرد زعفران شود. از سوی دیگر، کاهش بارش نیز می‌تواند به کاهش عملکرد زعفران منجر شود. همچنین، افزایش شدت بارش‌های رگباری می‌تواند باعث فرسایش خاک، شستشوی مواد غذایی خاک و آسیب به بوته‌های زعفران شود. تفاوت‌ها در ضرایب و جهت تأثیرگذاری نمایه‌ها در دو منطقه نشان می‌دهد که مدیریت زراعی زعفران باید بر اساس شرایط اقلیمی خاص هر منطقه تنظیم شود. به طور خاص، در کاشمر باید بر کاهش اثرات منفی دماهای فرین تمرکز شود، در حالی که در تربت حیدریه می‌توان از تأثیرات مثبت بارش و دماهای معتدل‌تر بهره برد. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی کشت و افزایش بهره‌وری زعفران در هر دو منطقه کمک کند.

با استفاده از این مدل‌ها، کشاورزان می‌توانند اقدامات پیشگیرانه‌ای را برای کاهش خسارات ناشی از تغییر اقلیم انجام دهند و عملکرد زعفران را بهینه‌سازی کنند. با توجه به اهمیت زعفران در اقتصاد منطقه، این تغییرات می‌تواند پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی داشته باشد. کاهش تولید زعفران می‌تواند منجر به کاهش درآمد، افزایش فقر و بی‌ثباتی اقتصادی در مناطق وابسته به کشت زعفران شود. علاوه بر این، کاهش عرضه زعفران در بازار جهانی می‌تواند باعث افزایش قیمت‌ها شده و تجارت جهانی این محصول را تحت تأثیر قرار

بدست آمده مبنی بر اینکه دمای بهاری عامل اصلی افت عملکرد این محصول است مطابقت دارد (Sanaeinejad & Hosseini, 2008). در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که برای خراسان جنوبی نمایه‌های فرین مثل SU25، TR20، TX10P، TXn، PRCPTOT و SDII به‌طور چشمگیری در تدوین مدل رگرسیونی چند متغیره پیش بینی عملکرد زعفران مؤثر بودند (Kouzegaran et al., 2020).

قوی‌ترین عامل کاهنده عملکرد در کاشمر و تنها نمایه دمای فرین کاهنده عملکرد در تربت حیدریه، نمایه ID بود. بررسی دو مدل نشان می‌دهد که عملکرد زعفران در کاشمر از افزایش دما و خشکی آسیب دیده است در حالیکه در تربت حیدریه افزایش کمینه دمای بیشینه و روزهای تر منجر به افزایش عملکرد شده است. نتایج بدست آمده همسو با نتایج پژوهش‌های مشابه است که نشان داده‌اند دمای کمینه عامل اصلی و تعیین کننده تشکیل گل و خروج گل از خاک می‌باشد (Behdani et al., 2004; Molina et al., 2004). در رابطه با تأثیر منفی روزهای یخی، بررسی‌ها نشان داده است دماهای فرین کمتر از  $18^{\circ}\text{C}$  - درجه سلسیوس مخرب بوده و می‌تواند باعث از بین رفتن کامل محصول شوند. به عنوان مثال، در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۴۰۲ پس از سرماهای شدید، عملکرد زعفران در کاشمر و تربت حیدریه به شدت کاهش یافت. در سال ۱۳۸۶ در برخی مناطق کشت زعفران در خراسان رضوی سرما از  $20^{\circ}\text{C}$  - گذشت و  $27/2^{\circ}\text{C}$  - رسید (افزایش تعداد روزهای یخی یا ID)، خشکسالی‌های ممتد و متوالی با چند ماه گرمای شدید تابستان و متعاقب آن سرمای سخت و طولانی پاییز و زمستان با یخبندان‌های شدید  $10^{\circ}\text{C}$  -  $7^{\circ}\text{C}$  - روزه باعث از بین رفتن مزارع زعفران در بخش‌های زیادی شد. میانگین عملکرد زعفران در سال بعد یعنی ۱۳۸۷ در کاشمر  $7/0$  و در تربت حیدریه  $8/0$  کیلوگرم در هکتار بود. همچنین در دی ماه ۱۴۰۱ که وقوع یخبندان در استان خراسان رضوی اتفاق افتاد و کمینه دما در

دارند که در مدل لحاظ نشده‌اند و لازم است در مطالعات بعدی مد نظر قرار گیرند. همچنین برای برای تعمیم نتایج به مناطق دیگر، نیاز به اعتبارسنجی مدل وجود دارد.

دهد. بنابراین، اتخاذ اقدامات سازگاری مانند تغییر الگوی کشت، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی، بهبود سیستم‌های آبیاری و مدیریت بهینه منابع آب و خاک ضروری است. احتمالاً عوامل دیگری مانند مدیریت مزرعه، خاک و آفات نیز بر عملکرد تأثیر

## منابع

- Alashan, S. (2020). Combination of modified Mann-Kendall method and Şen innovative trend analysis. *Engineering Reports*, 2 (3), e12131. <https://doi.org/10.1002/eng2.12131>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.K., & Rogelj, J. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- 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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19747-3_9)
- Azizi, J., Zarei, N., & Ali, S. (2022). The short-and long-term impacts of climate change on the irrigated barley yield in Iran: an application of dynamic ordinary least squares approach. *Environmental Science & Pollution Research*, 29 (26), 40169-40177. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19046-9>
- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., & Malbusi, S. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49 (2), 431-449. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.354234.1007217>
- Banihashemi, S. M., Eslamian, S. S., & Nazari, B. (2021). The impact of climate change on wheat, barley, and maize growth indices in near-future and far-future periods in qazvin plain, Iran. *International Journal of Plant Production*, 15 (1), 45-60. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00118-0>
- Bayat, M., Amirnia, R., Tajbakhsh, M., & Ramezani, M. (2016). Evaluation of saffron ecotypes for stigma yield and yield components using different maternal corm weights. *Journal of Plant Physiology & Breeding*, 6 (1), 53-64. <https://doi.org/10.22034/jppb.2016.528946>
- Behdani, M. A., Nassiri, M., & Koocheki, A. (2004). Modeling saffron flowering time across a temperature gradient. *Acta Horticulturae*, 650, 215-218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.24>
- Cardone, L., Castronuovo, D., Perniola, M., Cicco, N., & Candido, V. (2019). Evaluation of corm origin and climatic conditions on saffron (*Crocus sativus* L.) yield and quality. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 99 (13), 5858-5869. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9802>
- Chamanehfar, S., Baygi, M. M., Modaresi, F., & Babaeian, I. (2024). Near future variations in temperature extremes in northeastern Iran under CMIP6 projections. *Environmental Monitoring & Assessment*, 196 (10), 972. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13125-9>

- Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., & Benesty, J. (2009). Pearson correlation coefficient. Noise Reduction in Speech Processing, 1-4. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5)
- Dastranj, M., & Sepaskhah, A. R. (2019). Saffron response to irrigation regime, salinity and planting method. *Scientia Horticulturae*, 251, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.027>
- de Juan, J. A., Córcoles, H. L., Muñoz, R. M., & Picornell, M. R. (2009). Yield and yield components of saffron under different cropping systems. *Industrial Crops & Products*, 30 (2), 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.04.004>
- Esmailnejat, M., & Khashei Soluki, A. (2018). Modelling climate change impacts on spatial distribution of saffron cultivation for future: A case study of South Khorasan. *Journal of Saffron Research*, 6 (1), 75-88. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/jsr.2017.378.1016>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Ghazi, B., & Jeyhouni, E. (2022). Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (7), 621. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
- Gómez-Gómez, L., Trapero-Mozos, A., Gómez, M. D., Rubio-Moraga, A., & Ahrazem, O. (2012). Identification and possible role of a MYB transcription factor from saffron (*Crocus sativus*). *Journal of Plant Physiology*, 169 (5), 509-515. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.11.017>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204 (1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hong, Y., & Ying, S. (2018). Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research*, 9 (4), 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.11.002>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning* (Vol. 112, No. 1). New York: springer.
- Kafi, M., Kamili, A. N., Husaini, A. M., Ozturk, M., & Altay, V. (2018). An expensive spice saffron (*Crocus sativus* L.): a case study from Kashmir, Iran, and Turkey. *Global Perspectives On Underutilized Crops*, 109-149. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77776-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77776-4_4)
- Keith, T. Z. (2019). *Multiple Regression and Beyond: An Introduction to Multiple Regression and Structural Equation Modeling*. Routledge. 2<sup>nd</sup> Edition. <https://doi.org/10.4324/9781315749101>
- Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Moallem Banhangi, F., & Mollafilabi, A. (2019). Evaluation of environmental impacts of saffron (*Crocus sativus* L.) agroecosystems in the Khorasan province affected as field size by using life cycle assessment. *Saffron Agronomy & Technology*, 7 (2), 207-225. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22048/jsat.2018.129172.1296>
- Khoshakhlagh, F., Karimi, M., & Jahani, N. (2024). A synoptic analysis on the effect of the polar vortex on the extreme and widespread precipitation in the Midwest of Iran. *Journal of Climate Research*, 57, 45-62. <https://doi.org/10.22034/jcr.2024.193596>
- Kothari, D., Thakur, M., Joshi, R., Kumar, A., & Kumar, R. (2021). Agro-climatic suitability evaluation for saffron production in areas of Western Himalaya. *Frontiers in Plant Science*, 12, 657819. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.657819>

- Kouzegaran, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & Khashei-Siuki, A. (2020). Modeling of the saffron yield in Central Khorasan region based on meteorological extreme events. *Theoretical & Applied Climatology*, *139*, 1207-1217. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03028-y>
- Maleki, F., Kazemi, H., Siahmarguee, A., & Kamkar, B. (2017). Development of a land use suitability model for saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation by multi-criteria evaluation and spatial analysis. *Ecological Engineering*, *106*, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.017>
- Modarres, R., & Sarhadi, A. (2009). Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*, D03103.
- Mokarram, M., & Pham, T. M. (2022). CA-Markov model application to predict crop yield using remote sensing indices. *Ecological Indicators*, *139*, 108952. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108952>
- Molina, R. V., Valero, M., Navarro, Y., Guardiola, J. L., & García-Luis, A. (2004). The effect of time of corm lifting and duration of incubation at inductive temperature on flowering in the saffron plant (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, *103*, 9-91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.008>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.
- Mykhailenko, O., Desenko, V., Ivanauskas, L., & Georgiyants, V. (2020). Standard operating procedure of Ukrainian saffron cultivation according with good agricultural and collection practices to assure quality and traceability. *Industrial Crops & Products*, *151*, 112376. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112376>
- Najafi, M. R., Abbasian, M., Na, W., RahimiMovaghar, M., Bakhtiari, S., Islam, M. R., & Rezvani, R. (2025). Multi-Model projection of climate extremes under 1.5° C-4° C global warming levels across Iran. *International Journal of Climatology*, *45* (4), e8740. <https://doi.org/10.1002/joc.8740>
- Niroomandfad, F., Khashei Siuki, A., Hashemi, S. R., & Ghorbani, K. (2023). Investigating the water footprint of saffron production in Birjand Plain under climate change conditions. *Saffron Agronomy & Technology*, *11* (3), 301-320. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22048/jsat.2023.413847.1506>
- Panda, D. K., Panigrahi, P., Mohanty, S., Mohanty, R. K., & Sethi, R. R. (2016). The 20th century transitions in basic and extreme monsoon rainfall indices in India: Comparison of the ETCCDI indices. *Atmospheric Research*, *181*, 220-235. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.002>
- Pegahfar, N. (2023). Future precipitation and near surface air-temperature projection using CMIP6 models based on TOPSIS method: case study, Sistan-and-Baluchestan Province of Iran. *Environmental Monitoring & Assessment*, *195* (12), 1548. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12084-x>
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Shooshtari, S. J., & Parteli, E. J. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling*, *467*, 109934. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109934>
- Rahimi, H., Shokrpour, M., Tabrizi Raeini, L., & Esfandiari, E. (2017). A study on the effects of environmental factors on vegetative characteristics and corm yield of saffron (*Crocus sativus*). *Iranian Journal of Horticultural Science*, *48* (Special Issue), 45-52. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.224869.1165>
- Rahimi, M., & Hejabi, S. (2018). Spatial and temporal analysis of trends in extreme temperature indices in Iran over the period 1960-2014. *International Journal of*

- Climatology*, 38 (1), 272-282.  
<https://doi.org/10.1002/joc.5175>
- Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29 (3), 329-343. <https://doi.org/10.1002/joc.1739>
- Rastegaripour, F., & Sheybani, M. (2019). Surveying Saffron Farmers' View on Climate Change and Adaptation Strategies (Case study: Torbat-e Heydarieh city). *Saffron Agronomy & Technology*, 7 (4), 551-562. (In Persian with English Abstract).  
<https://doi.org/10.22048/jsat.2019.160631.1329>
- Rezaee, A., & Yaqubi, M. (2023). Investigation of the economic impacts of climate change on saffron land rent in Khorasan Razavi province. *Saffron Agronomy & Technology*, 11 (2), 209-224. (In Persian with English Abstract).  
<https://doi.org/10.22048/jsat.2023.400066.1489>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Sahabi, H., & Moallem Banhangi, F. (2021). Evaluation the impact climatic parameters on flowering behaviour and yield of Saffron (*Crocus sativus* L.) in Razavi and Southern Khorasan Provinces. *Saffron Agronomy & Technology*, 9 (4), 357-373. (In Persian with English Abstract).  
<https://doi.org/10.22048/jsat.2021.283088.1423>
- Sanaeinejad, S. H., & Hosseini, S. N. (2008). Regression models for saffron yields in Iran. In International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (pp. 509-518). Boston, MA: Springer US.
- Tabari, H., & Talaei, P. H. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global & Planetary Change*, 79 (1-2), 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.008>
- Tarawneh, Q. Y., & Faraj, T. K. (2020). The effect of anthropogenic activity on the extreme climate events and solar irradiation in Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-05659-2>
- Tosan, M., Alizadeh, A., Ansari, H., Rezvani Moghddam, P. (2014). Third National Conference on the latest scientific and research achievements of saffron, Mashad. Iran. (In Persian).
- Zamani, A., Sharifi, A., Felegari, S., Tariq, A., & Zhao, N. (2022). Agro-climatic zoning of saffron culture in Miyaneh City by using WLC method and remote sensing data. *Agriculture*, 12 (1), 118.  
<https://doi.org/10.3390/agriculture12010118>
- Zarghani, F., Karimi, A., Khorasani, R., & Lakzian, A. (2016). To evaluate the effect of soil physical and chemical characteristics on the growth characteristics of saffron (*Crocus sativus* L.) corms in Torbat-e Heydariyeh area. *Journal of Agroecology*, 8 (1), 120-133. (In Persian with English Abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jag.v8i1.48511>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2 (6), 851-870.  
<https://doi.org/10.1002/wcc.147>