

Assessment of the Impact of Temperature- and Precipitation-Related Index Fluctuations under Climate Change on Saffron Yield (Case Study: Hamadan Province)

Amirabbas Samavaki and Sanaz Moghim^{1*} 

(Received: May 28-2025 ; Revised: October 24-2025 ; Accepted: November 4-2025)

1. Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: moghim@sharif.edu

Abstract

The effect of climate change on agricultural productivity and efficiency is a major concern and challenge for the agricultural industry. Different hydrometeorological variables, such as extreme temperature, precipitation, and their variations, affect the growth and yield of agricultural products. Saffron is one of the most important agricultural products in Iran. Iran produces the largest amount of Saffron globally, and Hamadan Province is one of the major saffron-producing regions in Iran. This study uses different Artificial Intelligence methods not only for clustering and sensitivity analysis of the hydroclimatological variables but also for evaluating the impacts of climate change on Saffron yield in Hamadan Province. Results indicated that the Random Forest algorithm performs the best for sensitivity analysis among all algorithms. Extreme climate change indices, particularly those related to the monthly maximum and minimum temperatures, have the highest negative impact on saffron yield compared to other hydroclimatological indices. Furthermore, the minimum temperature has a more significant negative impact on saffron yield compared to the maximum temperature. Additionally, the counties of Malayer, Nahavand, and Asadabad, located in the south and west of Hamadan Province, exhibited the highest accuracy in sensitivity analysis. The findings suggest that monthly extreme temperatures can be used to assess the risk of saffron production, increase agricultural productivity, and improve decision-making for the cultivation of this product.

Keywords: Climate change, Artificial intelligence algorithms, Agriculture, Saffron, Hamadan province

How to cite this article: Samavaki, A. and Moghim, S. 2025. Assessment of the Impact of Temperature- and Precipitation-Related Index Fluctuations under Climate Change on Saffron Yield (Case Study: Hamadan Province). *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 140-153. DOI: [10.47176/jwss.29.4.42682](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.42682)

Copyright © 2025 Samavaki and Moghim. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی تأثیر نوسانات شاخص‌های مرتبط با دما و بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران (مطالعه موردی: استان همدان)

سید امیرعباس سماوکی و ساناز مقیم^{*ID}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۳)

۱. گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: moghim@sharif.edu

چکیده

تأثیرات تغییرات اقلیم روی عملکرد و بازدهی محصولات کشاورزی از اصلی‌ترین دغدغه‌ها و چالش‌های صنعت کشاورزی است. عوامل محیط زیستی مختلفی مانند تغییرات شدید دما و نوسانات شدید بارندگی روی رشد و عملکرد محصولات کشاورزی تأثیرگذار است. زعفران یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی کشور ایران است که نقش مهمی در موضع صادرات دارد. ایران دارای بیشترین تولید زعفران در جهان و استان همدان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان آن در ایران است. در این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی برای دسته‌بندی و تحلیل حساسیت داده‌های هواشناسی و کشاورزی، تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران در استان همدان بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های تغییرات شدید اقلیمی ناشی از بیشینه و کمینه دمای ماهانه، بیشترین تأثیر منفی را نسبت به سایر شاخص‌های هواشناسی بر عملکرد زعفران دارند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی، به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تحلیل حساسیت در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بررسی‌شده، عمل می‌کند. سه شهرستان ملایر، نهاوند و اسدآباد، دارای بیشترین دقت در تحلیل حساسیت بودند. یافته‌ها نشان داد که با استفاده از اطلاعات دمایی حدی ماهانه، می‌توان ریسک تولید زعفران را ارزیابی کرد و آگاهی لازم برای کشت این محصول را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، کشاورزی، زعفران، استان همدان

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

بررسی تأثیرات تغییرات اقلیم روی عملکرد محصولات کشاورزی، از نیازهای هر جامعه در هر کشوری است. همواره تأثیرات رویدادهای هیدرواقلمی شدید مانند سیل، خشکسالی، یخزدگی و طوفانهای شدید، از نگرانیهای اصلی کشاورزان برای تولید محصولات کشاورزی بوده است. طبق پنجمین گزارش ارزیابی هیئت بین دولتی تغییرات اقلیم (IPCC)، دمای هوا در بین سالهای ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ به اندازه ۰/۸۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. با توجه به روند افزایشی گرمایش جهانی، افزایش دما و همچنین بارندگیهای ناهمسان در سالهای اخیر در نقاط مختلف ایران، تغییرات شدید اقلیمی در سالهای پیشرو پیشبینی می شود (۲۱). بیشینه دما و تعداد گرمترین روزها و شبهای سال در نیمکره شمالی کره زمین در قرن اخیر روند افزایشی داشته است و کمینه دما و تعداد سردترین روزها و شبهای سال در نیمکره شمالی روند کاهشی داشته است (۲ و ۴). از دیدگاه کشاورزی، دما و بارندگی به عنوان دو عامل محیطی کلیدی، نقش تعیین کننده ای را در رشد، توسعه و عملکرد محصولات کشاورزی ایفا می کنند (۱۵). افزایش تغییرات شدید اقلیمی نیز روی تولید و عملکرد محصولات کشاورزی می تواند تأثیرات قابل توجهی داشته باشد (۱۹ و ۲۰). زعفران به عنوان یکی از محصولات کشاورزی ارزشمند کشور ایران از اثرهای منفی ناشی از تغییرات شدید اقلیمی مصون نمانده و با چالشهای جدی در این زمینه روبرو است. زعفران از ابعاد تاریخی، جایگاه ویژه ای در تکامل کشاورزی ایران داشته است و ارتباط تنگاتنگی با ارزشهای اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و محیط زیستی جامعه کشاورزی ایران ایجاد کرده است (۱۲). تولید زعفران در شهرهای مختلف ایران، طبق سالنامه های آماری، روند افزایشی داشته است که از مهم ترین دلایل آن می توان به مزایای اقتصادی، کاربردهای نوین دارویی، نیاز آبی کم و بهره وری زیاد آب در این گیاه اشاره کرد. گیاه زعفران از گرانترین و ارزشمندترین گیاهان زراعی جهان است که علاوه بر کاربردهای فراوان در صنایع غذایی (۶ و ۱۰)،

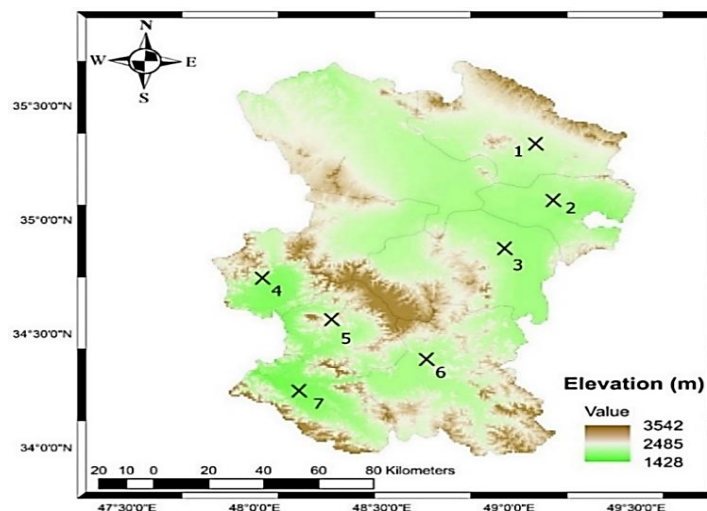
در صنایع دارویی به ویژه داروهای ضد سرطانی مورد استفاده قرار می گیرد (۱). ایران بیشترین سهم تولید زعفران را در جهان دارد؛ به طوری که تولید سالانه این گیاه در جهان بالغ بر ۲۰۵ تن برآورد شده است که حدود ۸۰ درصد آن از مساحتی بالغ بر ۴۶۰۰۰ هکتار واقع در ایران (در استانهای خراسان رضوی و خراسان جنوبی) برداشت می شود (۵). این یافته های آماری، ضرورت انجام مطالعات بیشتر در زمینه عوامل مؤثر بر بازدهی تولید زعفران را نشان می دهد. زعفران یک گیاه نیمه گرمسیری است که در مقابل گرما و سرما مقاومت به نسبت خوبی از خود نشان می دهد. زعفران را می توان در مناطق دارای زمستانهای ملایم و تابستانهای گرم و خشک، کشت کرد. چرخه رشد زعفران از اوایل مهرماه از طریق آبیاری شروع می شود و تا اردیبهشت ماه ادامه دارد. در اردیبهشت به خواب بهاری می رود و خزان می کند. پژوهش ها نشان داده است که در بازه دمایی منفی ۲۰ درجه سانتیگراد (۱۸) تا مثبت ۴۰ درجه سانتیگراد، پیاز زعفران می تواند رشد کند؛ اما خارج از این بازه، پیاز زعفران آسیب می بیند و به مرور از بین می رود. مطالعه دقیق تر تأثیر تغییرات دما بر بازدهی گیاه زعفران می تواند اطلاعات ارزشمندی برای کشاورزان و پژوهشگران فراهم کند. افزایش آگاهی کشاورزان از عوامل مؤثر بر تولید زعفران نیز می تواند به کاهش ریسک کاشت این گیاه کمک کند. به عنوان نمونه، سرمای شدید زمستان ۱۴۰۱ استان خراسان رضوی، با ثبت دمای کمتر از منفی ۲۰ درجه سانتیگراد، پدیده ای بی سابقه در ۱۵ سال اخیر در این استان بود که خسارات قابل توجهی به محصولات کشاورزی، به ویژه زعفران، وارد کرد. آقای غلامرضا قنبری، رئیس وقت سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی، اظهار داشت که این سرمای بی سابقه، هشت هزار و ۲۵۰ میلیارد تومان به کشاورزی استان خراسان رضوی خسارت زد. بیشترین خسارت مربوط به محصولات باغی در سطح ۱۳۴ هزار هکتار معادل ۶۷ درصد کل خسارات وارده به بخش کشاورزی استان به مبلغ پنج هزار و ۵۵۰ میلیارد تومان است. از این میزان، بیشترین خسارت مربوط به مزارع زعفران به میزان سه هزار و

۲۸۳ میلیارد تومان است. سرمازدگی و یخبندان قبل از زمان برداشت گل به طور مستقیم عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به نابودی محصول می‌شود و چنانچه بعد از برداشت گل، مزرعه با یخبندان و سرمازدگی مواجه شود، به سطح سبزینه گیاه آسیب می‌زند و عملکرد سال بعد را کاهش خواهد داد (۱۷). برای مقابله با سرمازدگی پیشنهاد شده است که در هر سال زراعی، پیش‌بینی‌های هواشناسی سالانه به دقت بررسی شود و در صورت احتمال بروز پدیده‌های شدید اقلیمی، آبیاری پاییزه زودتر انجام شده و محصول زودتر برداشت شود. در نتیجه به این طریق می‌توان از آسیب جدی به محصول جلوگیری کرد (۱۳). حسینی و همکاران (۹) با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی و بررسی تغییرات عملکرد زعفران در مناطق اصلی تولید این گیاه در استان خراسان رضوی طی یک دهه، نشان دادند که افزایش کمینه و بیشینه دمای ماهانه، همبستگی معناداری با روند کاهش عملکرد زعفران در این بازه زمانی دارد. همچنین، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که دما تأثیر چشمگیری بر فرایند گلدهی زعفران دارد؛ به‌طوری که کاهش دما نسبت به محدوده بهینه رشد، اگرچه می‌تواند تعداد گل‌های تولیدی را افزایش دهد، اما منجر به کاهش میزان استر و در نتیجه افت کیفیت گل زعفران می‌شود (۷). از مدل‌سازی‌هایی که روی گیاه زعفران انجام شده است، می‌توان به مدل‌سازی زمان گلدهی زعفران با توجه به تغییرات دما توسط بهدانی و همکاران (۳) اشاره کرد که از مدل‌های ساده خطی تا مدل‌های پیشرفته‌تر به کار گرفته شد. نتایج آن، نشان‌دهنده معنادار بودن مدل‌سازی عملکرد زعفران بر اساس تغییرات دما بوده است. بررسی‌ها حاکی از آن است که دمای کمینه، در شش ماهه دوم سال از مهر تا اسفند در بازدهی زعفران نقش مهمی دارد که این مرحله از رشد زعفران، رشد شدید نامیده می‌شود. در این دوره، پیاز مادر پس از پایان گلدهی، به مرور کوچک می‌شود و جای خود را به پیاز دختر که بر بالای او و در انتهای لوله گل به وجود می‌آید، منتقل می‌کند (۲۲). همچنین نتایج پژوهش‌ها (۱۳) نشان می‌دهد که مناسب‌ترین دما برای رشد زعفران در تمام دوره رشد آن،

میانگین دمای ۲۷/۱۹ درجه سانتی‌گراد است. بیشتر شدن آن، اثرهای منفی در گلدهی زعفران خواهد داشت که علت آن هم کاهش سرعت رشد و تأخیر در گلدهی بوده است؛ به‌طوری که در میانگین دمای ۳۰/۲۱ درجه سانتی‌گراد گلدهی صورت نخواهد گرفت. همچنین در پژوهش دیگری دمای مناسب برای زمان گلدهی زعفران (نه در تمام دوره رشد)، ۱۷ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است (۱۶). علاوه بر تغییرات دما، تغییرات بارندگی نیز بر تولید و کیفیت زعفران تأثیرگذار است؛ به‌نحوی که در سال‌هایی که درجه خشکسالی بسیار شدید بوده، عملکرد زعفران نیز به شدت کاهش یافته است و به همان نسبت در سال‌های با درجه خشکسالی متوسط، کاهش عملکرد زعفران از شدت کمتری برخوردار بوده است (۱۱). همه پژوهش‌ها حاکی از اهمیت زیاد بررسی تغییرات دمایی و بارندگی روی محصولات کشاورزی مثل زعفران است و این نیاز را در جامعه پژوهشی ما به وجود می‌آورد که در ارتباط با تأثیرات تغییرات شدید اقلیمی، روی عملکرد محصولات کشاورزی پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شود که این به نوبه خود نیازمند تحلیل‌های دقیق و پیش‌بینی‌های درست این تأثیرات است.

مواد و روش‌ها

بررسی تأثیرات تغییرات اقلیم بر بازدهی محصولات کشاورزی نیازمند روش‌های دقیق و کارآمد در تحلیل داده‌ها است. بررسی دقت داده‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مرحله در تحلیل‌های مهندسی، نقش بسزایی در دستیابی به نتایج قابل اطمینان دارد. داده‌های هواشناسی و کشاورزی این پژوهش مربوط به استان همدان است. منطقه مورد مطالعه، هفت شهرستان تولیدکننده زعفران در دهه اخیر از استان همدان است که در شکل ۱ نشان داده شده است. استان همدان با میانگین ارتفاع حدود ۱۸۰۰ متر از سطح دریا، دارای آب‌وهوای معتدل کوهستانی با تابستان‌های خنک و زمستان‌های سرد است. وجود منابع مناسب آب، خاک حاصلخیز و شرایط اقلیمی مطلوب، از عوامل اصلی توسعه و گسترش فعالیت‌های کشاورزی در این استان به‌شمار می‌روند.

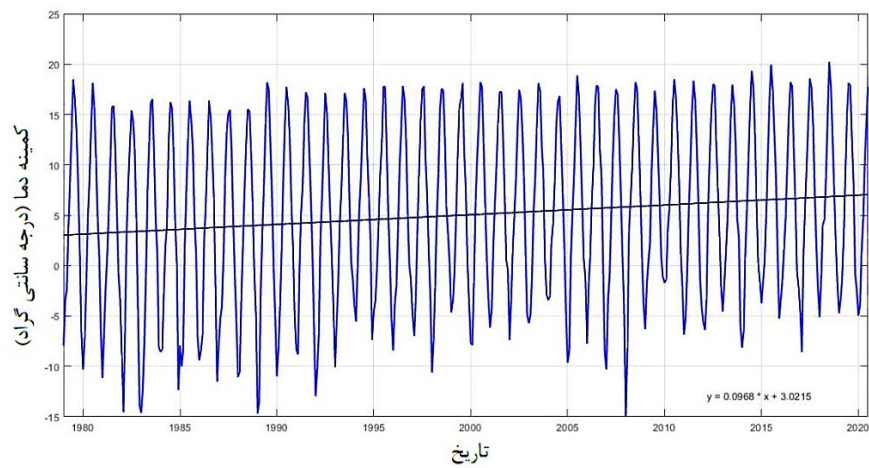


شکل ۱. نقشه توپوگرافی استان همدان. هفت شهرستان مورد مطالعه با علامت ضربدر مشخص شده‌اند: ۱. رزن ۲. فامنین ۳. همدان ۴. اسدآباد ۵. تویسرکان ۶. ملایر ۷. نهاوند

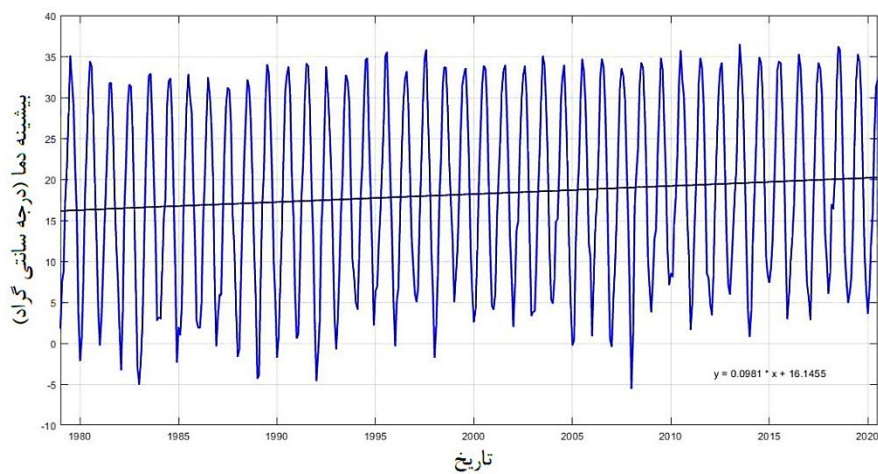
سری زمانی را بررسی می‌کند. با توجه به ماهیت فصلی داده‌های اقلیمی، نسخه فصلی آزمون من - کندال (Seasonal Mann-Kendall) برای حذف اثر نوسانات دوره‌ای ماهانه به کار گرفته شد. همچنین برای تعیین شدت و روند، از برآوردگر شیب سن (Sen's slope estimator) بهره گرفته شد که تغییرات میانگین متغیر را در واحد زمان نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده نشان دادند که دمای کمینه و بیشینه در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ دارای روند افزایشی معناداری هستند ($p\text{-value} < 0.05$). روند مثبت به دست آمده نشان می‌دهد که دمای میانگین در استان همدان، حدود ۰/۱ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یافته است. این روند افزایشی دما، بیانگر تمایل اقلیم منطقه به سمت گرما و افزایش بیشینه و کمینه دما در طول دوره بررسی است. بازه زمانی تأثیرات تغییرات اقلیم بررسی شده این پژوهش، از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ است که داده‌های عملکرد ۱۱ سال اخیر زعفران در استان همدان، از سازمان جهاد کشاورزی استان همدان گرفته شد. همچنین داده‌های هواشناسی استان همدان، از سامانه داده‌های هواشناسی استخراج شد. به منظور بررسی تغییرات شدید اقلیمی، داشتن شاخص‌های مناسب و معتبر امری ضروری است. در این پژوهش ۳۴ شاخص تغییرات شدید اقلیمی به کار رفته است که تعدادی از آنها از شاخص‌های تیم

میزان تولید زعفران در استان همدان طبق آمارهای سازمان جهاد کشاورزی همدان، بیشتر از میانگین تولید زعفران در استان‌های کشور است. پژوهش‌ها نشان داده است که فقط ۱۵/۶۹ درصد از اراضی استان همدان مناسب کشت زعفران نیست (۸) که این خود نشانگر مناسب بودن کشت زعفران در استان همدان است. برای بررسی تغییرات آب‌وهوایی در استان همدان، داده‌های دما و بارش طی بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استخراج شده از Google Earth Engine تحلیل شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که کمینه و بیشینه دمای استان همدان، مشابه روند جهانی تغییرات اقلیمی، دارای روند افزایشی بوده است. این روند در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است. نوسانات بارشی در سطح استان همدان در شکل ۴ نشان داده شده است. این نوسانات در بازه‌های زمانی مختلف طی دهه‌های اخیر، می‌تواند منجر به بروز خساراتی در بخش‌های مختلف کشاورزی شود.

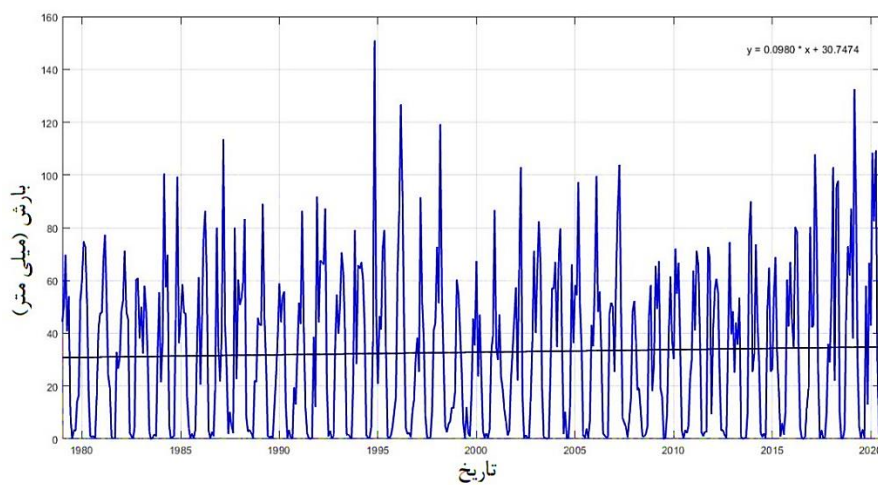
برای بررسی دقیق‌تر روند تغییرات اقلیمی در متغیرهای دما و بارش، از آزمون‌های غیرپارامتری من - کندال (Mann-Kendall) و نسخه اصلاح شده آن (Modified Mann-Kendall) استفاده شد. آزمون من - کندال یکی از روش‌های پرکاربرد در مطالعات اقلیمی است که بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها، روند



شکل ۲. سری زمانی کمینه دمای روزانه در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ در استان همدان



شکل ۳. سری زمانی بیشینه دمای روزانه در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ در استان همدان



شکل ۴. سری زمانی مجموع بارندگی ماهانه در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ در استان همدان

جمع‌آوری شده با استفاده از روش Z-Score بررسی شد. به این طریق تمام داده‌های پرت حذف شد که در معادله ۲ نحوه محاسبه و تشخیص داده‌های پرت نشان داده شده است. برای شناسایی داده‌های پرت، از آستانه برابر با سه استفاده شد. این بدان معناست که هر داده‌ای Z-Score بیشتر از مثبت سه یا کمتر از منفی سه داشته باشد، به عنوان یک نقطه پرت در نظر گرفته می‌شود. به بیان دیگر، اگر داده‌ای بیش از سه انحراف استاندارد از میانگین فاصله داشته باشد، به عنوان یک داده غیرعادی شناسایی و حذف می‌شود. پس از حذف داده‌های پرت، برای جایگزینی داده‌های ثبت‌نشده، از روش K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) استفاده شده است. در این روش، داده‌های ثبت‌نشده با میانگین چهار داده نزدیک به خود جایگزین می‌شوند. این کار به بهبود کیفیت داده‌ها و افزایش دقت تحلیل‌ها کمک می‌کند.

$$Z\text{-Score} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

در معادله ۲، پارامتر X مقدار کمیت قابل بررسی، μ میانگین داده‌ها و σ انحراف معیار داده‌هاست. پس از تحلیل داده‌ها نیاز به روش و الگوریتمی است که داده‌ها را تحلیل کند. در این مطالعه برای بررسی داده‌های آماری، تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر انجام گرفت. بدین منظور از الگوریتم‌های مختلف خطی و غیرخطی یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی، جنگل تصادفی (Random Forest)، XGBoost، AdaBoost و ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد. از آنجایی که بازه زمانی داده‌ها ۱۱ سال است، امکان بیش برآزش توسط مدل‌ها وجود داشت که برای رفع این مشکل، از روش دسته‌بندی داده‌ها استفاده شد. بدین منظور عملکرد محصول زعفران به سه دسته تقسیم شد تا احتمال بیش برآزش کمتر شود و دقت مدل‌ها افزایش یابد. برای تحلیل حساسیت، از روش نوسان داده استفاده شد تا اثر تغییرات جزئی ورودی‌ها بر خروجی‌های مدل‌ها بررسی شود که به فهم عمیق‌تر از دینامیک داده‌ها کمک کند؛ به نحوی که با تغییر مقدار از منفی سه تا مثبت سه، به ازای هر ۰/۲۵ افزایش یا کاهش انحراف معیار مقادیر هر شاخص و اجرای مدل به ازای مقادیر جدید، میزان حساسیت

متخصصان تشخیص شاخص‌های تغییرات اقلیمی (ETCCDI) به دست آمده است. این تیم شامل گروهی از متخصصان در زمینه تغییرات اقلیمی است که زیر نظر سازمان جهانی هواشناسی (WMO) و در چارچوب مأموریت جهانی رصد تغییرات اقلیمی (GCOS) فعالیت می‌کنند. از بین ۲۹ شاخص تیم کارشناسی شاخص‌های تغییرات اقلیمی، ۱۲ شاخص سالانه دمایی، ۱۰ شاخص سالانه بارندگی، ۵ شاخص ماهانه دمایی و ۲ شاخص ماهانه بارندگی در نظر گرفته شد که از بیشینه دمای روزانه، کمینه دمای روزانه، میانگین دمای روزانه و میزان بارندگی روزانه به دست آمده است. جزئیات شاخص‌های دمایی در جدول ۱ آمده است.

شاخص‌های دمایی به گونه‌ای انتخاب شدند که تمامی جنبه‌های لازم برای تحلیل حساسیت را پوشش دهند و امکان بررسی جامع تغییرات شدید اقلیمی فراهم شود. در میان شاخص‌های مرتبط با بارندگی، هفت شاخص از مجموع ۲۹ شاخص متعلق به تیم کارشناسی شاخص‌های تغییرات اقلیمی است. از آنجا که برای شاخص‌های ماهانه بارندگی، تنها دو شاخص در بین تمام شاخص‌ها وجود داشت، سه شاخص ماهانه بارندگی جدید به شاخص‌ها اضافه شد تا تحلیل تغییرات بارندگی در مقیاس ماهانه با دقت بیشتری صورت گیرد. علاوه بر آن، دو شاخص بارندگی سالانه نیز به نحوی اضافه شد تا بتوانند اثرهای همزمان دما و بارندگی را در نظر گیرند و در نتیجه، میزان بارندگی در شرایط دمایی خاص در نظر گرفته شود. جزئیات شاخص‌های بارندگی در جدول ۲ آمده است. شاخص‌هایی که با علامت * مشخص شده‌اند، شاخص‌های طراحی شده برای این پژوهش است.

ضریب تغییرات بارندگی ماهانه (PVI) از شاخص‌های طراحی شده برای این پژوهش است که طبق معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$PVI = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

در معادله ۱، پارامتر μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار بارندگی ماهانه است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، کیفیت داده‌های

جدول ۱. شاخص‌های دمایی تغییرات شدید اقلیمی به کاررفته برای تحلیل حساسیت

مخفف شاخص	نام شاخص	توضیح شاخص
TN10p	شب‌های خنک	درصد روزهایی که دمای کمینه در دهک اول دمایی باشد
TX10p	روزهای خنک	درصد روزهایی که دمای بیشینه در دهک اول دمایی باشد
TN90p	شب‌های گرم	درصد روزهایی که دمای کمینه در دهک آخر دمایی باشد
TX90p	روزهای گرم	درصد روزهایی که دمای بیشینه در دهک آخر دمایی باشد
DTR	اختلاف دمای بیشینه و کمینه	میانگین سالیانه اختلاف دمای بیشینه و کمینه
GSL	طول دوره رشد	فاصله تعداد اولین روزهای سال که میانگین دما در ۶ روز متوالی بیشتر از ۵ درجه سانتی‌گراد است با اولین زمانی که میانگین دما در ۶ روز متوالی کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد است
ID	روزهای یخندان	تعداد روزهای سال که بیشینه دما کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد
FD	روزهای سرد	تعداد روزهای سال که کمینه دما کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد
SU	روزهای تابستانی	تعداد روزهای سال که دمای بیشینه بیشتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد
TR	شب‌های استوایی	تعداد روزهای سال که دمای کمینه بیشتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد باشد
WSDI	شاخص دوره گرما	تعداد دفعاتی از سال که دمای بیشینه در حداقل شش روز متوالی در دهک آخر دمایی باشد
CSDI	شاخص دوره سرما	تعداد دفعاتی از سال که دمای کمینه در حداقل شش روز متوالی در دهک اول دمایی باشد
TXx	گرم‌ترین روز	بیشترین دمای بیشینه ماهانه
TNx	گرم‌ترین شب	بیشترین دمای کمینه ماهانه
TXn	سردترین روز	کمترین دمای بیشینه ماهانه
TNn	سردترین شب	کمترین دمای کمینه ماهانه
ETR	بیشترین اختلاف دما	TXx-TNn

هر شاخص در خروجی محاسبه می‌شود. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از دو معیار استفاده شد. ضریب تعیین (R^2) که نشان‌دهنده میزان دقت برازش مدل به داده‌هاست و نمره اعتبارسنجی (Cross-Validation Score) که معیاری برای توانایی تعمیم‌پذیری مدل به داده‌های دیده‌نشده (داده‌های جدیدی که در آموزش مدل به کار نرفته) است. این معیارها دقت پیش‌بینی و پایداری مدل‌ها را سنجیده و امکان مقایسه بین مدل‌های مختلف را فراهم می‌کنند. به منظور بهینه‌سازی پارامترها از روش تنظیم ابرپارامتر استفاده شد تا بهینه‌ترین ترکیب پارامترهای هر مدل انتخاب شود. این فرایند شامل تنظیم دقیق پارامترهای مدل‌هاست که منجر به افزایش دقت و کارایی مدل‌ها می‌شود. در این پژوهش، از روش Bootstrap به عنوان یکی از روش‌های آماری قدرتمند برای بهبود دقت مدل‌ها و ارزیابی ناپایداری آنها استفاده شد. Bootstrap یک روش بازنمونه‌گیری

است که با ایجاد نمونه‌های تکراری از مجموعه داده اصلی، امکان بررسی ویژگی‌های آماری را بدون نیاز به فرضیات توزیعی فراهم می‌کند. Bootstrap به خصوص در برآورد ناپایداری مدل‌ها و فراهم کردن ابزاری برای ارزیابی خطا و اطمینان از نتایج مدل‌های یادگیری ماشین به کار گرفته می‌شود. به وسیله این روش، می‌توان اطمینان حاصل کرد که مدل‌های به‌کاررفته تحت تغییرات جزئی در داده‌ها پایدار باقی مانده و نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌شود. درنهایت، پژوهش و مطالعه روی اثرهای تأثیرگذار بر رشد و تولید زعفران، می‌تواند نتایج موثری بر بازدهی زعفران داشته باشد. هرچه کشاورزان بیشتر از خصوصیات گیاه زعفران و تأثیرات تغییرات اقلیمی روی عملکرد آن آگاهی پیدا کنند، وضعیت تولید و به تبع آن، صادرات زعفران بهبود پیدا می‌کند و این خود تأثیر بسزایی بر اقتصاد کشاورزی کشور دارد.

جدول ۲. شاخص‌های بارندگی تغییرات شدید اقلیمی به کاررفته برای تحلیل حساسیت

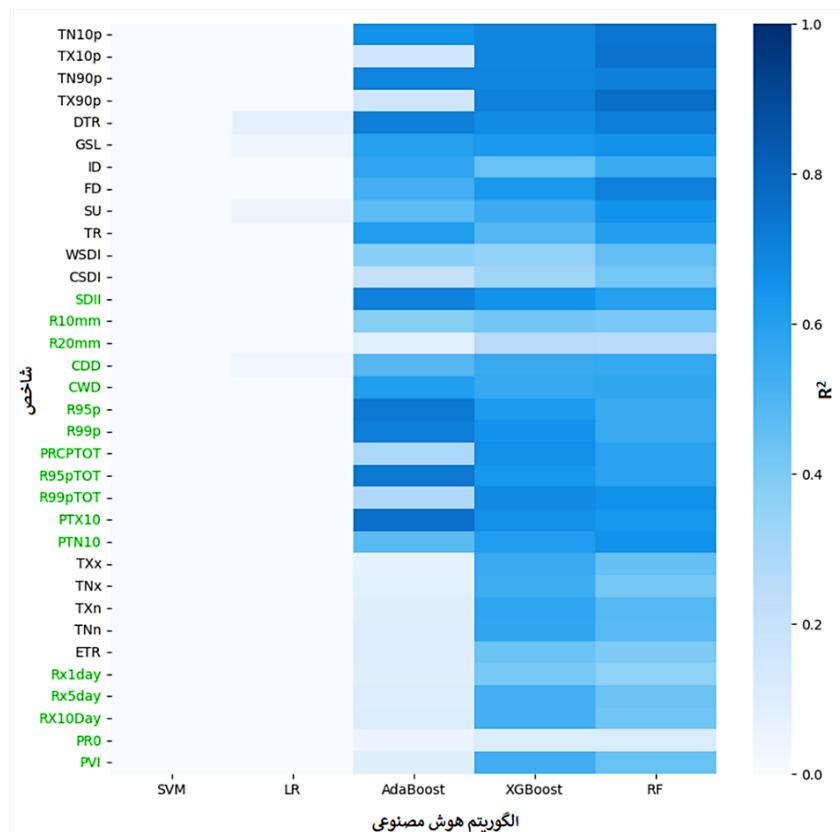
مخفف شاخص	نام شاخص	توضیح شاخص
SDII	شاخص شدت بارندگی	نسبت بارندگی سالانه به تعداد روزهایی که بارندگی بیشتر از یک میلی‌متر بوده است
R10mm	تعداد روزهای بارندگی سنگین	تعداد روزهای سال که بارندگی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر بوده است
R20mm	تعداد روزهای بارندگی بسیار سنگین	تعداد روزهای سال که بارندگی بیشتر از ۲۰ میلی‌متر بوده است
CDD	تعداد روزهای خشک متوالی	بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارندگی کمتر از یک میلی‌متر بوده است
CWD	تعداد روزهای مرطوب متوالی	بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارندگی بیشتر از یک میلی‌متر بوده است
R95p	روزهای بسیار مرطوب	مجموع بارندگی‌های بزرگتر از صدک ۹۵ بارندگی
R99p	روزهای با رطوبت شدید	مجموع بارندگی‌های صدک ۹۹ بارندگی
PRCPTOT	مجموع بارندگی نسبتاً زیاد	مجموع بارندگی‌های بیشتر از یک میلی‌متر
R95pTOT	سهم از روزهای بسیار مرطوب	$\frac{R95p}{PRCPTOT}$
R99pTOT	سهم از روزهای با رطوبت شدید	$\frac{R99p}{PRCPTOT}$
PTX ₁₀ *	بارندگی روزهای سرد	مجموع بارندگی روزهایی که دمای بیشینه کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد است
PTN ₁₀ *	بارندگی شب‌های سرد	مجموع بارندگی روزهایی که دمای کمینه کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد است
Rx1day	بیشینه بارندگی	بیشینه بارندگی ماهانه
Rx5day	بیشینه بارندگی متوالی ۵ روزه	بیشینه بارندگی پنج روز متوالی در ماه
Rx10day*	بیشینه بارندگی متوالی ۱۰ روزه	بیشینه بارندگی ۱۰ روز متوالی در ماه
PR ₀ *	عدم بارندگی	تعداد روزهایی که بارندگی صفر بوده است
PVI*	ضریب تغییرات بارندگی	ضریب تغییرات بارندگی ماهانه (معادله ۱)

نتایج

برای فراهم‌آوردن درک عمیقی از اثرهای شاخص‌های اقلیمی بر عملکرد زعفران، ارزیابی دقیق و علمی نتایج امری ضروری است. بعد از دسته‌بندی عملکرد زعفران در سه دسته و تحلیل حساسیت هر شاخص توسط الگوریتم‌های مورد مطالعه (جنگل تصادفی، رگرسیون خطی، XGBoost، AdaBoost و ماشین بردار پشتیبان)، نتایج مدل‌ها بررسی شد و با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۵ مقایسه مدل‌ها توسط شاخص R2 را نشان می‌دهد.

شکل ۵ نشان می‌دهد که دو الگوریتم جنگل تصادفی و XGBoost دقیق‌ترین الگوریتم‌ها در بین تمامی الگوریتم‌هاست. از آنجایی که در الگوریتم‌های استفاده‌شده، روش تنظیم ابرپارامتر به کار رفته است، مدل‌هایی که پارامترهای الگوریتمی بیشتر و متفاوت‌تری دارند، انعطاف بیشتری برای دسته‌بندی و تحلیل

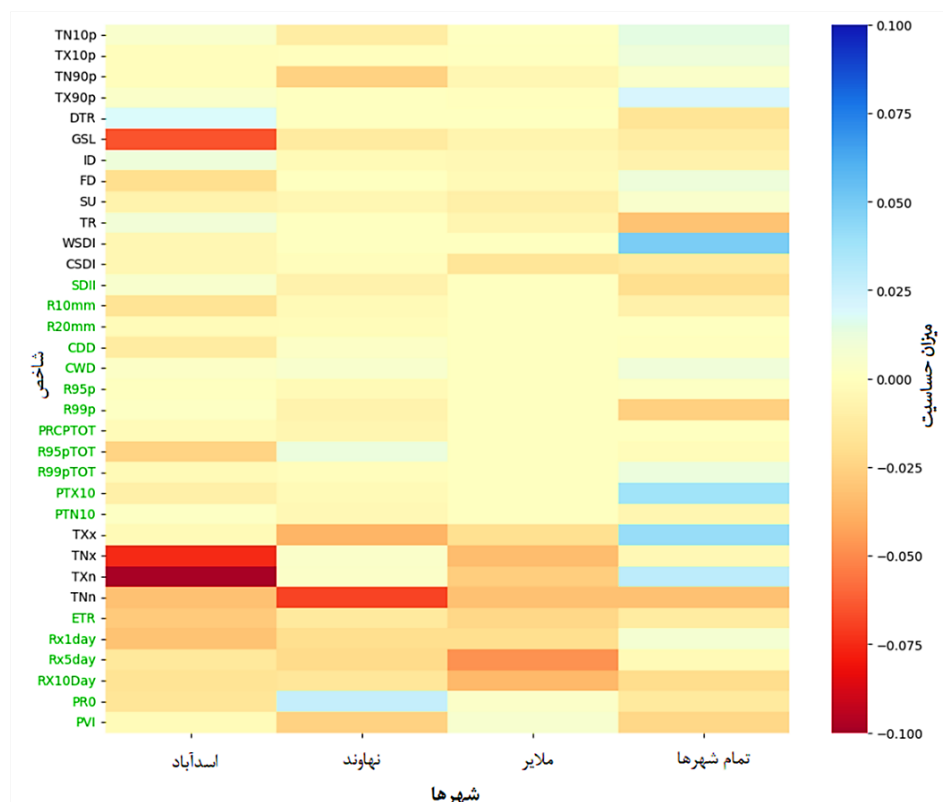
داده‌ها را دارند. همچنین برخی الگوریتم‌ها در مواجهه با مجموعه داده‌های با تعداد کم، کارایی مطلوبی ندارند؛ در نتیجه الگوریتم‌هایی مانند ماشین بردار پشتیبان، کمترین دقت و عملکرد را دارند. برخلاف آنها، الگوریتم جنگل تصادفی، بیشترین دقت و عملکرد را از خود نشان داد. همچنین سه الگوریتم جنگل تصادفی، XGBoost و AdaBoost که بر پایه درخت تصمیم هستند، عملکرد بهتری به نسبت سایر روش‌ها از خود نشان دادند. علت تفاوت دقت یک الگوریتم در شاخص‌های مختلف، مربوط به پراکندگی و مشخصات آماری هر شاخص است؛ به گونه‌ای که شاخص‌های با پراکندگی کمتر، در دسته‌بندی داده‌ها در یک مجموعه قرار می‌گیرند و تحلیل حساسیت نمی‌تواند به دقت مطلوبی دست یابد؛ زیرا تمام خروجی‌ها در یک دسته قرار دارند. گفتنی است که الگوریتم‌های



شکل ۵. مقایسه شاخص R^2 برای شاخص‌های به کاررفته در مدل‌های مختلف (شاخص‌های سبز رنگ، شاخص‌های بارندگی هستند).

با بررسی تحلیل حساسیت انجام شده می‌توان پی برد که شاخص‌های ماهانه دمایی و بارندگی، بیشترین تأثیر را بر عملکرد زعفران دارند؛ به نحوی که در بیشتر شهرستان‌ها این شاخص‌ها تأثیرات منفی بر تولید زعفران دارند. از بین هفت شهرستان مورد مطالعه، برخی شهرستان‌ها مثل شهرستان همدان، دارای میانگین و واریانس کم در داده‌های عملکرد زعفران بود و با توجه به استفاده از روش دسته‌بندی، مدل تنظیم شده عملکرد مناسبی نداشت؛ زیرا بیشتر داده‌های عملکرد زعفران در یک دسته قرار گرفت و با داده‌های ۱۱ ساله، نتایج مطلوبی ارائه نداد. گفتنی است که سه شهرستان ملایر، نهاوند و اسدآباد که واقع در جنوب و جنوب غربی استان همدان هستند، بیشترین دقت را در تحلیل حساسیت در بین شهرستان‌های مورد مطالعه نشان دادند. بیشترین دمای بیشینه ماهانه (TXx)، بیشترین دمای کمینه ماهانه (TNx)، کمترین دمای بیشینه ماهانه (TXn)، کمترین دمای بیشینه ماهانه (TNn) و بیشترین دمای ماهانه (ETR)، پنج شاخص

پیچیده‌تری مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی، شبکه‌های حافظه بلندمدت و کوتاه‌مدت و روش‌هایی مانند Lasso and Ridge و K-means Clustering استفاده شد که دقت و عملکرد مطلوبی به نسبت سایر الگوریتم‌ها نداشت. همچنین روش‌های مختلفی برای تحلیل حساسیت مانند Permutation importance, Morris Method و Sabol's Method به کار گرفته شد که هیچ‌کدام دقت لازم را نداشتند. در نتیجه از روش نوسان داده (Perturbation) برای تحلیل حساسیت استفاده شد. حساسیت یک پارامتر، میزان تأثیرگذاری آن بر خروجی مدل را کمی‌سازی می‌کند. برای نمونه، حساسیت ۰/۰۵- برای یک شاخص خاص نشان می‌دهد که تغییر در این شاخص، می‌تواند تا ۵ درصد در خروجی (میزان بازدهی زعفران) تأثیر منفی داشته باشد. نتیجه تحلیل حساسیت با الگوریتم جنگل تصادفی، نشان می‌دهد که کدام شاخص اثر مثبت یا منفی بیشتر یا کمتری بر عملکرد زعفران دارد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. تحلیل حساسیت شاخص‌های مختلف به کاررفته در شهرهای مختلف (شاخص‌های سبز رنگ، شاخص‌های بارندگی هستند).

نمی‌توان گرفت که تأثیر منفی قطعی داشته است. اما اگر شاخصی (برای نمونه بیشترین دمای بیشینه ماهانه) اثر منفی بر عملکرد زعفران داشته باشد، بیشتر شدن این شاخص، در صورتی که اثر منفی بیشتری در عملکرد زعفران نداشته باشد، اثر کمتری نیز نخواهد داشت و همچنان عامل تأثیرگذار بر کاهش عملکرد زعفران خواهد بود. اگرچه اثر سایر شاخص‌های دمایی و بارندگی نیز تأثیرات منفی بر عملکرد زعفران داشته است؛ اما به نسبت پنج شاخص دمایی یادشده، مقدار تأثیر کمتری دارند که به صورت اثرهای متفاوت در شهرهای مختلف ظاهر می‌شود. شکل ۶ از بین شاخص‌های سالانه دمایی، دو شاخص طول دوره رشد (GSL) و شاخص دوره سرما (CSDI) و در بین شاخص‌های سالانه بارندگی، دو شاخص روزهای با رطوبت شدید (R10mm) و تعداد روزهای بارندگی سنگین (R99P) و شاخص بیشینه بارندگی متوالی ۱۰ روزه (Rx10day) که توسعه داده شده برای این پژوهش بود، در بین گروه‌های خود از

ماهانه دمایی هستند که طبق نتایج به دست آمده، بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد زعفران دارند. این پنج شاخص از دو دمای بیشینه روزانه و دمای کمینه روزانه به دست آمده‌اند که خود دال بر اثرگذاری قابل توجه این دو پارامتر بر بازدهی زعفران است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، برخی شاخص‌ها اثرهای مثبتی بر عملکرد زعفران دارند. برای نمونه، شاخص CWD که نشان‌دهنده بیشترین تعداد روزهای متوالی از سال با بارندگی بیشتر از یک میلی‌متر است، تأثیر منفی بر تولید زعفران نداشت. علت آن می‌تواند جایگزینی بارندگی در دوره آبیاری محصول باشد. به بیان دیگر، بارندگی پاییزه می‌تواند جایگزین دوره آبیاری پاییزه باشد؛ در نتیجه نه تنها تأثیر منفی نداشته، بلکه تأثیر مثبتی هم بر عملکرد زعفران خواهد داشت. اما از آنجایی که تولید زعفران نیاز به آب کمی دارد، بارندگی شدید می‌تواند تأثیر منفی بر تولید زعفران داشته باشد. بیشتر شدن این شاخص، می‌تواند اثر منفی بر بازدهی زعفران داشته باشد؛ اما این نتیجه را

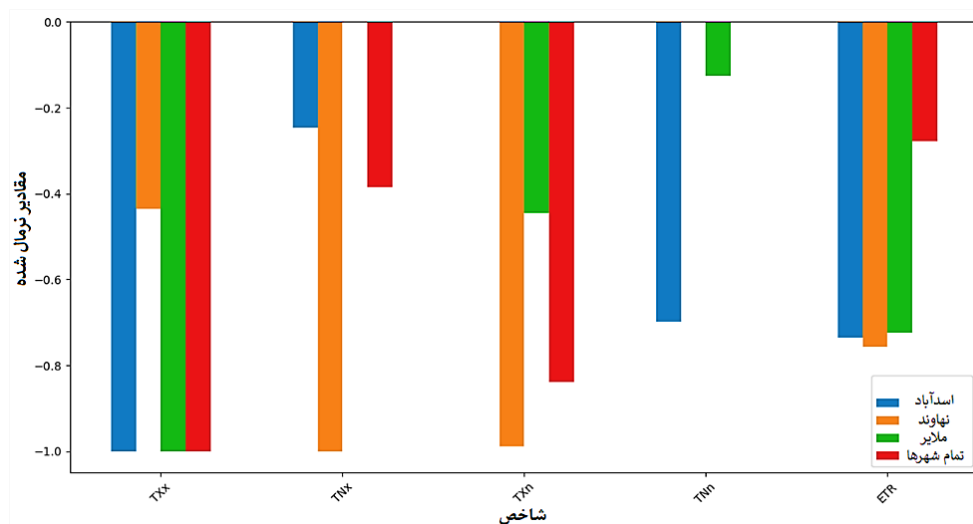
مؤثرترین شاخص‌ها بودند. همچنین نتایج نشان داد که دو شاخص توسعه داده شده توسط این پژوهش شامل بارندگی در روزهای سرد (PTX10) و بارندگی در شب‌های سرد (PTN10)، با دقت خوبی بر بازدهی زعفران مؤثر است. این می‌تواند نشانگر اهمیت شاخص‌های ترکیبی دما و بارندگی در پیش‌بینی میزان بازدهی زعفران باشد. پس از بررسی‌های انجام شده در سطح هر شهرستان، تحلیل حساسیت برای کلیه شهرستان‌ها در سطح کل استان انجام شد که نتایج معناداری را به همراه داشت. یافته‌ها نشان داد که اثر برخی از شاخص‌ها بر عملکرد زعفران در بعضی از شهرستان‌ها، به شکل یکپارچه در سطح استان دیده نشد. به بیان دیگر، نتایج تحلیل حساسیت در سطح استان و در سطح شهرستان متفاوت بود. این امر بر اهمیت انجام تحلیل‌های مستقل برای هر شهرستان تأکید می‌کند. تفاوت قابل توجهی در میزان بارندگی، دما، بافت خاک و سایر ویژگی‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و جغرافیایی بین شهرستان‌ها وجود دارد که سبب متفاوت شدن نتایج تحلیل در سطح استان و شهرستان می‌شود. برای مقایسه بهتر بین شاخص‌های ماهانه دمایی از روش نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. به سبب تأثیرگذاری قابل توجه شاخص‌های دمایی ماهانه بر عملکرد زعفران، این شاخص‌ها به صورت مجزا برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر مورد استفاده قرار گرفتند.

با نرمال‌سازی مقادیر حساسیت به دست آمده در شهرستان‌های دارای دقت محاسباتی زیاد (اسدآباد، نهاوند و ملایر) و مقایسه آن با داده‌های تمامی شهرستان‌ها، مشخص شد که تأثیر بیشینه دمای ماهانه، با اختلاف اندک، بیش از تأثیر کمینه دمای ماهانه است. این نتیجه بیانگر نقش و اهمیت بیشتر بیشینه دما در تغییرپذیری اقلیمی استان است.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی روی محصولات کشاورزی مانند زعفران همواره از اصلی‌ترین دغدغه‌های کشاورزان است. با تحلیل میزان تأثیر این تغییرات روی عملکرد زعفران، می‌توان به

میزان قابل توجهی کشاورزان را از میزان ریسک کاشت این محصول آگاه کرد. این پژوهش با بررسی این تغییرات در هفت شهرستان از استان همدان، نتایج ارزشمندی را ارائه کرد. از بین تمامی شاخص‌های تغییرات شدید اقلیمی که توسط مدل‌های مختلف ارائه شد، شاخص‌های ماهانه دمایی که از دمای بیشینه و کمینه ماهانه به دست آمدند، بیشترین تأثیر منفی را روی عملکرد زعفران در تمام شهرستان‌ها نشان دادند. در نتیجه با بررسی و تحلیل شاخص‌های به دست آمده از بیشینه و کمینه دما، می‌توان به اثرهای منفی آن روی بازدهی زعفران پی برد. در صورت پیش‌بینی وقوع تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های بسیار سرد، می‌توان پیشاپیش اثرهای منفی احتمالی این شرایط بر کشت و عملکرد زعفران در سال زراعی بعدی را ارزیابی کرد. نتایج بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که دمای بیشینه، در مقایسه با دمای کمینه، تأثیرات مخرب‌تری بر بازدهی زعفران دارد. سایر شاخص‌های سالانه بارندگی، شاخص‌های ماهانه بارندگی و شاخص‌های سالانه دمایی به نسبت شاخص‌های ماهانه دمایی، تأثیرات کمتری بر عملکرد زعفران در شهرستان‌های همدان دارند. همچنین سه شهرستان ملایر، نهاوند و اسدآباد واقع در جنوب و غرب استان همدان، دارای بیشترین دقت در تحلیل حساسیت بودند. علت این دقت زیاد، پراکندگی نسبتاً خوب داده‌های ورودی و خروجی الگوریتم در این شهرستان‌هاست که می‌توان نتایج قابل اطمینانی از آنها حاصل کرد. از بین تمامی الگوریتم‌های به کار رفته در این پژوهش، الگوریتم جنگل تصادفی بهترین عملکرد را در دسته‌بندی و تحلیل حساسیت داده‌ها داشت که نشانگر مناسب بودن این الگوریتم برای تحلیل حساسیت داده‌های اقلیمی است. پژوهش‌های گذشته انجام شده در زمینه تحلیل تأثیرات شاخص‌های تغییرات شدید اقلیمی روی سایر محصولات کشاورزی مانند گندم، برنج، سویا و ذرت به عنوان نمونه‌ای از محصولات زراعی نشان می‌دهد که شاخص‌های دمایی در مقایسه با شاخص‌های بارندگی، ارتباط بیشتری با بازدهی این محصولات دارند (۲۳). این یافته، در پژوهش حاضر برای محصول زعفران در استان همدان نیز دیده



شکل ۷. مقایسه شاخص‌های دمای ماهانه

استان نیرداخته است. با تکیه بر اطلاعات پایه‌ای آب‌وهوایی مانند بیشینه و کمینه دما و تحلیل اثر آنها بر بازدهی محصول زعفران، می‌توان کشاورزان را از ریسک کاشت محصول آگاه کرد. همچنین به کشاورزان زعفران توصیه می‌شود برای ارزیابی میزان بازدهی محصول خود، پارامترهای ماهانه دمایی را که به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تغییرات شدید اقلیمی هستند، در برنامه‌ریزی سال زراعی بعدی بررسی کنند تا از خسارات و آسیب‌های احتمالی جلوگیری شود.

شد. همچنین پژوهش‌هایی در خصوص ارتباط معنادار برخی از شاخص‌های تغییرات شدید اقلیمی با بازدهی زعفران با توسعه مدل رگرسیونی مبتنی بر رخدادهای حدی در برخی شهرستان‌های استان خراسان رضوی صورت گرفته است (۱۴). در پژوهش حاضر نیز، این ارتباط معنادار برای شهرستان‌های بررسی‌شده در استان همدان، با استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر و شاخص‌های متنوع‌تر، نشان داده شد. این پژوهش، از نخستین مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیرات تغییرات اقلیم روی بازدهی زعفران در استان همدان به شمار می‌رود. پیش از این، هیچ مدل یا الگوریتم دیگری به طور خاص به بررسی این موضوع در این

منابع مورد استفاده

1. Abdullaev, F.I. and J.J. Espinosa-Aguirre. 2004. Biomedical properties of saffron and its potential use in cancer therapy and chemoprevention trials. *Cancer Detection and Prevention* 28(6): 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.cdp.2004.09.002>
2. Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, R.K. Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J.L. Vazquez-Aguirre. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research* 111(D5): 1-22. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
3. Behdani, M.A., M. Nassiri and A.A. Koocheki. 2004. Modeling saffron flowering time across a temperature gradient. *Acta Horticulturae* 650: 215-218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.24>
4. Christidis, N., P.A. Stott, S. Brown, G.C. Hegerl and J. Caesar. 2005. Detection of changes in temperature extremes during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* 32(20): L20716. <https://doi.org/10.1029/2005GL023885>
5. Ehsanzadeh, P., A.A. Yadollahi and A.M.M. Maibodi. 2004. Productivity, growth and quality attributes of 10 Iranian saffron accessions under climatic conditions of Chahar-Mahal Bakhtiari, Central Iran. *Acta Horticulturae* 650: 183-189. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.18>

6. Gresta, F., G.M. Lombardo, L. Siracusa and G. Ruberto. 2008. Saffron, an alternative crop for sustainable agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28(1): 95-112. <https://doi.org/10.1051/agro:2007030>
7. Gresta, F., G. Avola, G.M. Lombardo, L. Siracusa and G. Ruberto. 2008. Analysis of flowering, stigmas yield and qualitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.) as affected by environmental conditions. *Scientia Horticulturae* 118(3): 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.008>
8. Heydari, M., A. Yousofi, F. Rostami and S.M.S. Hosseini. 2019. Agroclimatic zoning of saffron cultivation in Hamedan Province as an approach for crop pattern change. *Journal of Geography and Environmental Planning* 30(4): 99-114. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.120482.1239>
9. Hosseini, M., N. Malafilabi and M. Nasiri Mahallati. 2008. Effect of long-term fluctuations in temperature and rainfall on saffron yield. *Iranian Journal of Crop Research* 6(1): 79-88 (in Farsi).
10. Kafi, M., A. Koocheki, M.H. Rashed and M. Nassiri. (2006. Saffron (*Crocus sativus*) production and processing. Science Publishers, New Hampshire. <https://doi.org/10.1201/9781482280463>
11. Karimi, M., M. Banayan Aval and M. Mousavi Baygi. 2019. Drought and vulnerability assessment in the fluctuation of saffron production affected by rainfall shortage (case study: Razavi and South Khorasan province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 13(3): 773-787.
12. Koocheki, A. 2013. Research on production of saffron in Iran: past trend and future prospects. *Journal of Saffron Agriculture and Technology* 1(1): 3-21 (in Farsi). <https://doi.org/10.22048/jsat.2013.4808>
13. Koocheki, A., A. Alizadeh and A. Ganjali. 2010. The effect of increased temperature on flowering behaviour of saffron (*Crocus sativus* L.). *Iranian Journal of Crop Research* 8(2) 324-334 (in Farsi). <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i2.7530>
14. Kouzegaran, S., M. Mousavi Baygi, I. Babaeian and A. Khashei-Siuki. 2019. Modeling of the saffron yield in Central Khorasan region based on meteorological extreme events. *Theoretical and Applied Climatology* 139(1): 1207-1217. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03028-y>
15. Lobell, D.B., W. Schlenker and J. Costa-Roberts. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333(6042): 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
16. Molina, R.V., A. Garcia-Luis, V. Coll, C. Ferrer, M. Valero, Y. Navarro and J.L. Guardiola. 2004. Flower formation in the saffron crocus (*Crocus sativus* L.). The role of temperature. *Acta Horticulturae* 650: 39-47. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.2>
17. Nejatianpour, E., M. Ghodoosi and J. Hasanpour. 2018. Application of risk profile in saffron risk management. *Journal of Saffron Agriculture and Technology* 6(4): 513-529 (in Farsi). <https://doi.org/10.22048/jsat.2018.92906.1249>
18. Nezami, A., S. Rezvan Bidokhti and S. Sanjani. 2016. Response of saffron plant to freezing stress under controlled conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences* 9(1): 75-86 (in Farsi). <https://doi.org/10.22077/escs.2016.301>
19. Porter, J.R. and M.A. Semenov. 2005. Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 360(1463): 2021-2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
20. Rosenzweig, C., A. Iglesias, X.B. Yang, P.R. Epstein and E. Chivian. 2001. Climate change and extreme weather events: implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change and Human Health* 2(2): 90-104. <https://doi.org/10.1023/A:1015086831467>
21. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
22. Tosan, M., A. Alizadeh, H. Ansari and P. Rezvani Moghadam. 2014. The effect of various climatic factors on saffron yield in Mashhad. In: Third National Conference on Scientific and Research Achievements of Saffron. University Of Torbat Heydarieh, Mashhad, Iran.
23. Vogel, E., M.G. Donat, L.V. Alexander, M. Meinshausen, D.K. Ray, D. Karoly, N. Meinshausen and K. Frieler. 2019. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters* 14(5): 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>