

## پیش‌نگری تغییرات عملکرد زعفران طی دوره‌های آتی (مطالعه موردی: تربت حیدریه و کاشمر)

مهديه زينل زاده<sup>۱</sup>، غلامرضا جانباز قبادی<sup>۲\*</sup>، صدرالدین متولی<sup>۳</sup>، مجید طاهری<sup>۴</sup>، منصوره کوهی<sup>۵</sup>

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

۲- دانشیار اقلیم‌شناسی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۳- دانشیار جغرافیای طبیعی، 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 اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

### چکیده

زعفران به عنوان یک محصول استراتژیک در اقتصاد ایران، به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارد. هدف از این تحقیق، شناسایی نمایه‌های فرین دمایی و بارشی موثر بر عملکرد زعفران و پیش‌نگری عملکرد این محصول برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای خط سیر مشترک اقتصادی-اجتماعی (SSPs) می‌باشد. برای این منظور از داده‌های دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۱ دو ایستگاه همایید تربت حیدریه و کاشمر شامل متغیرهای دمای کمینه، بیشینه و بارش برای محاسبه نمایه‌های فرین دما و بارش تیم تخصصی تشخیص و شاخص‌های تغییر اقلیم (ETCCDI) در نرم افزار Rclimdex استفاده شد. داده‌های عملکرد زعفران از مرکز تحقیقات کشاورزی استان تهیه شد. به منظور پیش‌نگری عملکرد این محصول، در این مطالعه از پرونداد مدل اقلیمی ACCESS-ESM1.5 از آخرین نسخه موجود مدل‌های فاز ششم (CMIP6) تحت دو سناریوی SSP برای دو دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ استفاده شد. ابتدا داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش مدل منتخب ACCESS-ESM1.5 با استفاده از نرم افزار CMhyde و با روش تغییر عامل دلنا ریزمقیاس شدند. تحلیل رگرسیون نشان داد در کاشمر حدود ۷۰ درصد و در تربت حیدریه حدود ۸۳ درصد از تغییرات عملکرد زعفران توسط مدل رگرسیونی قابل توجیه است. برای هر دو منطقه، مدل پیش‌بینی عملکرد با ۳ نمایه فرین دمایی و ۱ نمایه فرین بارشی تدوین شد. بر اساس شبیه‌سازی عملکرد زعفران با استفاده از پرونداد این مدل تحت دو سناریوی میانه و بدبینانه به ترتیب SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کاهش عملکرد زعفران در دوره‌های آتی پیش‌نگری شد. در سناریوی SSP2-4.5 کاهش عملکرد برای تربت حیدریه (کاشمر) در دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ به ترتیب ۱۰٪ و ۱۴/۵ درصد (۱۱/۵٪ و ۱۶٪) بدست آمد، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5 این کاهش به ترتیب ۱۷٪ و ۲۸٪ (۱۹/۵٪ و ۳۱/۳٪) تخمین زده شد. با توجه به نتایج بدست آمده ضروری است از طریق مدیریت بهینه منابع آب، اصلاح شیوه‌های کشت و بکارگیری روش‌های نوین پیش‌نگری و سازگاری، اثرات منفی این تغییرات را کاهش داده و پایداری تولید زعفران را در منطقه تضمین گردد.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، عملکرد زعفران، کاشمر، تربت حیدریه.

## مقدمه

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). در واقع، خطرناک‌ترین نتیجه ناشی از گرمایش جهانی تغییر در میانگین‌ها نیست بلکه احتمال افزایش همه جانبه در رویدادهای فرین متوسط (نمایه های روزانه) و نادر (خشکسالی و سیل) است (Tarawneh & Faraj, 2020; Khoshakhlagh et al., 2024). که مقدار این افزایش‌ها بستگی به مدل اقلیمی و سناریوی انتشار منتخب دارد (Pegahfar, 2023; Eyring et al. 2016; Riahi et al., 2017). این پدیده بر تمامی بخش‌های زندگی بشر تاثیر گذاشته است. تاثیر قابل توجه آن بر محیط زیست و سامانه های کشاورزی به یک نگرانی جدی برای جامعه بشری تبدیل شده است (Banihashemi et al., 2021).

برای ایران، پیش‌نگری‌های انجام شده نشان داده است که هم دمای کمینه و هم دمای بیشینه افزایش خواهد یافت (Najafi et al., 2025; Haghighi et al., 2025; Usta et al., 2022). به عنوان مثال، نتایج پژوهش حقیقی و همکاران (۱۴۰۴) نشان داد تغییرات دمای بیشینه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۰) در هر سه ایستگاه آباده، شیراز و لار و هر سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 افزایشی خواهد بود. برای بارش نیز تغییرات افزایشی و کاهش‌ی بسته به فصل و مکان پیش‌نگری شده است (Babaeian et al., 2023). که این تغییرات می‌تواند اثرات عمیقی بر کشاورزی، منابع آب و اکوسیستم‌ها داشته باشد (Azizi et al., 2022; Rafiei-Sardooi et al., 2022) و ضروری است که تاثیر آن بر روی محصولات مهم کشاورزی کشور بررسی شود.

زعفران (*Crocus sativus L.*) که به طور معمول به عنوان «طلای سرخ» شناخته می‌شود، یکی از گران‌ترین و

ارزشمندترین محصولات ادویه ای در بازار جهانی است (Gómez-Gómez, 2012). زعفران یک گیاه سه گانه است که از طریق پیاز تکثیر می‌شود (Bayat et al., 2016). بر اساس آمارهای جهانی کشور ایران با تولید ۸۵ درصد از زعفران مصرفی کل دنیا، به عنوان بزرگترین تولیدکننده بزرگترین در جهان شناخته می‌شود (FAO, 2023).

طی سالیان اخیر، تغییر اقلیم به ویژه در مناطق تولید زعفران همچون تربت حیدریه و کاشمر اثراتی بر عملکرد این محصول داشته است. این در حالی است که در آینده نیز پیش‌نگری‌های نشان داده است که در شمال شرقی ایران تغییرات قابل توجهی در دماهای فرین قابل انتظار است (Chamanehfar et al., 2024). به عنوان مثال، در تحقیقی که در مورد تاثیر تغییر اقلیم بر رانت زمین‌های کشاورزی زعفران در خراسان رضوی انجام شده (Rastegaripour & Shybani, 2019)، نشان داده شد 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 تاثیر تغییر اقلیم در دوره آینده تقریباً به میزان ۲ برابر نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت (Niroomandfad et al., 2023). در سایر مناطق جهان مانند دره کشمیر هند بررسی انجام شده نشان داد تغییر اقلیم، به‌ویژه افزایش دما، تأثیر قابل توجهی بر تولید زعفران در این ناحیه داشته است (Ayoub et al., 2024). این مطالعه با بررسی داده های هواشناسی (دما و بارش) و آمار تولید زعفران، افزایش قابل توجه دما (۳/۰ درجه سلسیوس در هر دهه از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۱) را گزارش داد. این افزایش دما

منجر به کاهش قابل توجه تولید زعفران از ۱۵/۹۵ تن در سال ۱۹۹۷ به ۹/۶ تن در سال ۲۰۱۵ شد. در اولین مطالعه موردی اروپایی (جنوب ایتالیا)، پایداری کشت زعفران را از جنبه‌های انرژی، محیط زیست و اقتصاد مورد بررسی قرار گرفت (Mehmeti et al., 2024). آنها نشان دادند که تولید زعفران از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. با این حال، تأثیرات زیست محیطی قابل توجهی، به ویژه در مراحل کوددهی و عملیات مکانیکی، وجود دارد. این مطالعه بر اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی در کشت زعفران تأکید کرد.

در ایران نیز مطالعات مختلفی به بررسی نقش متغیرهای اقلیمی بر عملکرد محصول زعفران پرداخته اند. در بیشتر این پژوهش‌ها، تأثیر متغیر دما بر عملکرد زعفران مد نظر قرار گرفته است. به عنوان نمونه، توسان و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر دما بر عملکرد زعفران در مشهد را مورد بررسی قرار دادند 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 بررسی شده است به عنوان مثال پژوهش‌ها نشان داده‌اند بارش‌های نامنظم و خشکی می‌تواند به کاهش عملکرد زعفران منجر شود (اسماعیل نژاد و خشایی سلوکی، ۲۰۱۸). در همین راستا، دسترنج و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند کمبود بارش در طول دوره رشد رویشی می‌تواند باعث کاهش تعداد گل‌ها و وزن کلاله شود.

با توجه به وجود رابطه بین نمایه های فرین دما و بارش با عملکرد زعفران می‌توان برای شناخت این تأثیرات از مدل‌هایی مبتنی بر رگرسیون‌های چند متغیره سود جست. با استفاده از چنین مدل‌هایی که بر اساس همبستگی بین این نمایه ها 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 و ابزاری ارزشمند برای درک اثرات تغییر اقلیم بر این محصول محسوب می‌شوند. با استفاده از این اطلاعات، می‌توان

استراتژی‌های مدیریتی مناسبی را برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و افزایش عملکرد زعفران اتخاذ کرد. در این راستا، کوزه گران و همکاران (۲۰۱۹)، نشان دادند که افزایش تعداد روزهای داغ در طول فصل رشد می‌تواند منجر به کاهش عملکرد زعفران شود. صحابی و معلم (۲۰۲۱) 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 کاسته 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 داشته است.

بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که برای منطقه کاشمر و تربت حیدریه تا کنون پژوهشی به منظور برآورد میزان تغییرات عملکرد این محصول تحت شرایط آبی تغییر اقلیم انجام نشده است. لذا این مطالعه با هدف شناخت اثر تغییر اقلیم در قالب فرین های اقلیمی بر عملکرد زعفران در این دو منطقه انجام شد. با توجه به افزایش فراوانی و شدت رویدادهای فرین در دهه های اخیر بویژه رخدادهای فرین سرمایی و گرمایی، نتایج چنین پژوهش هایی می‌تواند 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 مقاله شامل دو شهرستان تربت حیدریه و کاشمر در استان خراسان رضوی است (شکل ۱). 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

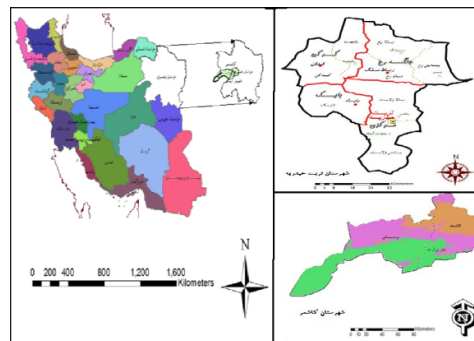
داده های عملکرد زعفران نیز به صورت سالانه برای دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۲۰ و بر حسب کیلوگرم در هکتار از سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی اخذ شده‌اند.

سناریوهای آبی نمایه های فرین بر اساس پرونداد مدل‌های اقلیمی

مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس<sup>۱</sup> (AOGCM)، معتبرترین ابزار به منظور ارایه پیش‌نگری‌هایی از متغیرهای اقلیمی هستند که برای دوره های آبی تا ۲۱۰۰ (برخی تا ۲۳۰۰) از سال ۱۹۵۰ در قالب پروژه ارزیابی متقابل مدل‌های جفت شده (CMIP) در دسترس جامعه علمی قرار گرفته اند (Arias et al., 2021). شناخت مولفه های فیزیکی و دینامیکی سامانه اقلیم (جو، اقیانوس، سطح زمین و یخ دریا) تابع اصلی این مدل‌ها محسوب می‌شود و پیش‌نگری‌های این مدل‌ها بر اساس واداشت گازهای گلخانه ای و آئروسول‌ها می‌باشد (Eyring et al., 2016). گزارش ششم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم که در سال ۲۰۲۱ منتشر شد از فاز ششم پرونداد مدل‌های CMIP که تحت سناریوهای جدید انتشار با نام خط سیر مشترک اقتصادی-اجتماعی یا SSPs<sup>۲</sup> اجرا شده‌اند، استفاده شد. (Riahi, et. al., 2017).

در این سناریوها، سناریوی SSP1 نماینده مسیر سبز، توسعه پایدار است که در آن بهبود سطح زندگی با توسعه جوامع به صورت فراگیر، پایدار با سرمایه گذاری در زمینه آموزشی و بهداشتی، تعهد کشورها به اهداف توسعه هزاره سازمان ملل و کاهش نابرابری در بین کشورها رخ خواهد داد. کمترین سطح انتشار CO<sub>2</sub> در این سناریو و مقدار آن کمتر از ۴۰۰ ppm در سال ۲۱۰۰ خواهد بود. در سناریوی SSP2 (مسیر میانه)، عدم تغییر در روندهای اقتصادی، اجتماعی و فناوری جوامع نسبت به شرایط کنونی، عدم برابری در پیشرفت جوامع، تخریب محیط زیست و وجود چالش‌های زیست محیطی به رغم تلاش‌های بین‌المللی در نظر گرفته شده است. در

کاشمر واقع شده است. این شهر در مجاورت رودخانه شش‌تراز قرار دارد که نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و شرب منطقه ایفا می‌کند. 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 کوه‌های بینالود واقع شده است. این موقعیت جغرافیایی، منجر به ایجاد ریزاقلیم های متنوع در منطقه شده است. این دو شهرستان به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق کشت زعفران در ایران و جهان شناخته می‌شوند و به همین دلیل بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر عملکرد زعفران در این مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته های تحقیق)

داده ها:

#### داده های هواشناسی همدید

در این تحقیق، داده های مورد استفاده شامل دمای کمینه (°C)، دمای بیشینه (°C) و بارش روزانه (mm) بود که از دو ایستگاه همدید واقع در شهرستان کاشمر و تربت حیدریه (سازمان هواشناسی کشور) جمع آوری شدند. داده ها برای دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ پس از انجام کنترل کیفیت و آزمون همگنی، به منظور محاسبه نمایه های فرین دما و بارش بکار رفتند.

<sup>2</sup> The [Shared Socioeconomic Pathways](#) scenarios (SSPs)

<sup>1</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Model

و همچنین منابع انرژی کم‌کربن. در بدبینانه‌ترین سناریو SSPs سناریوی SSP5 به رغم افزایش توجه به بازارهای رقابتی، نوآوری و بازارهای مشارکتی در جهت نیل به پیشرفت‌های سریع فنی و سرمایه‌های انسانی در راستای توسعه پایدار، انجام سرمایه‌گذاری‌ها در بخش سلامتی، آموزش و موسسات، ولیکن فشار بر توسعه اقتصادی و اجتماعی از طریق بهره‌برداری از منابع سوخت‌های فسیلی و سبک زندگی با مصرف انرژی بیشتر، افزایش یافته و رشد اقتصادی سریع جهانی همراه با وقوع پیک جمعیتی و سپس کاهش آن در قرن ۲۱ خواهد بود. این شرایط منجر به افزایش غلظت CO<sub>2</sub> تا بیش از ppm ۱۰۰۰ تا سال ۲۱۰۰ خواهد شد (Babaeian et al., 2023).

سناریوی SSP3 افزایش رقابت‌های منطقه‌ای، چالش‌های امنیتی و درگیری‌های منطقه‌ای و صرف بیشتر هزینه‌ها به منظور دستیابی به منابع انرژی و امنیت غذایی دیده شده است و بنابراین توسعه کاهش و نابرابری استمرار می‌یابد. رشد جمعیت در کشورهای صنعتی کم و در کشورهای در حال توسعه زیاد خواهد بود. کم شدن اولویت‌های بین‌المللی در خصوص نگرانی‌های زیست‌محیطی، منجر به تخریب محیط زیست در برخی مناطق می‌گردد. در سناریوی SSP4 (نابرابری، انشقاق)، سرمایه‌گذاری‌های بسیار نابرابر در منابع انسانی و فرصت‌های اقتصادی و قدرت‌های سیاسی، منجر به افزایش نابرابری در سطح ملی و بین‌المللی می‌گردد. توسعه فناوری در اقتصاد و بخش‌های دارای فناوری‌های پیشرفته افزایش خواهد یافت. منابع متنوعی از انرژی در سطح جهان وجود خواهد داشت، از قبیل ذغال سنگ، نفت نامتعارف

جدول ۱. مشخصات مدل منتخب CMIP6

نام مدل	قدرت تفکیک	کشور	مرکز مدل سازی
ACCESS-ESM1.5	1.25° x 1.875°	استرالیا	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع (CSIRO)

### نمایه‌های فرین دما و بارش

نمایه‌های فرین دما و بارش از مجموعه نمایه‌های فرین توصیه شده توسط تیم تخصصی تشخیص و نمایه‌های تغییر اقلیم<sup>۴</sup> (ETCCDI) انتخاب شد. 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. این تیم، بر توسعه و ترویج نمایه‌های استاندارد تغییر اقلیم تمرکز دارد که مقایسه داده‌های مشاهده شده و خروجی‌های مدل‌ها را تسهیل می‌کنند (Hong & Ying, 2018). نمایه‌های فرین مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. این نمایه‌ها با استفاده از نرم افزار

داده‌های پیش‌نگری اقلیمی با اجرای مدل‌های AOGCMs تحت سناریوهای مسیر مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) بدست می‌آیند. برونداد دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش روزانه مدل منتخب (جدول ۱) در دو گروه داده تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۱) و دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) تحت دو سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 از پایگاه داده کوپرنیک<sup>۱</sup> (مرکز پیش‌بینی میان مدت وضع هوا یا ECMWF<sup>۲</sup> در زمینه‌ی تهیه و تجمیع داده‌های اقلیمی، مشاهداتی، ماهواره‌ای و ...) با فرمت netCDF<sup>۳</sup> استخراج و برای موقعیت جغرافیایی دو ایستگاه بدست آمد.

<sup>۴</sup> Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

<sup>۱</sup> Copernicus

<sup>۲</sup> The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>۳</sup> network Common Data Form

است و می‌تواند به درک بهتری از الگوهای عملکرد زعفران در شرایط مختلف اقلیمی کمک کند.

مدل رگرسیون چندمتغیره خطی از رابطه ۱ بدست می‌آید:

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

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

باقی‌مانده ها (RSS)، مقادیر بهینه ضرایب را محاسبه

می‌کند (Montgomery et al., 2021).

RClindex در محیط R محاسبه شد ( Zhang et al., )

2011). نمایه های مانند تعداد روزهای یخبندان، تعداد

روزهای یخی و بارش کل است از جمله نمایه های

معرفی شده در این مجموعه است که به کمی سازی

فراوانی، شدت و مدت زمان رویدادهای اقلیمی فرین

کمک می‌کنند (Panda et al., 2016).

مدل‌سازی عملکرد محصول زعفران با روش

رگرسیون چندگانه

در این تحقیق، برای بررسی نقش نمایه های 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). این روش این

امکان را فراهم می‌آورد تا تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم این

نمایه ها بر عملکرد زعفران شناسایی شود. این روش به

ویژه برای تحلیل داده‌های پیچیده و چند بعدی مناسب

جدول ۲. نمایه های فرین دما و بارش کارگروه کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و نمایه ها (ETCCDI) مورد استفاده در این تحقیق

(Zhang et al., 2011)

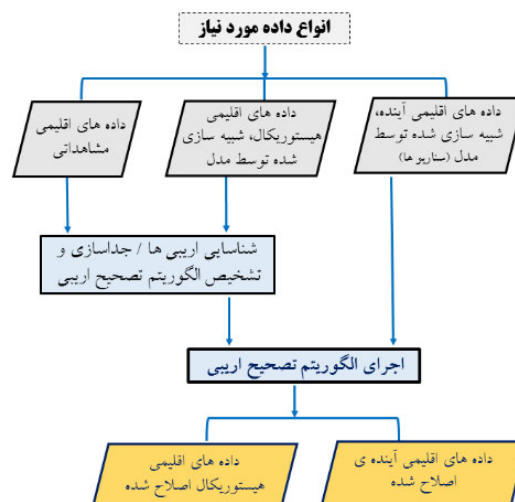
نمایه	واحد	تعریف
FD	روز	روزهای یخبندان: تعداد روزهایی از سال که دمای کمینه روزانه کوچکتر از صفر درجه سلسیوس باشد
TXx	°C	بزرگ‌ترین دمای بیشینه: میزان حداکثر دمای بیشینه روزانه در ماه
TXn	°C	کوچک‌ترین دمای بیشینه: میزان حداقل دمای کمینه روزانه در ماه
TNm	°C	میانگین دمای کمینه روزانه
TXm	°C	میانگین دمای بیشینه روزانه
TMm	°C	میانگین دمای روزانه
TNn	°C	کوچک‌ترین دمای کمینه: میزان حداقل دمای کمینه در ماه
WSDI	روز	موج گرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز پیاپی دمای روزانه بیشتر از صدک ۹۰ام دوره منبأ باشد

CSDI	روز	موج سرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز متوالی دمای شبانه کوچکتر از صدمک ۱۰ ام دوره مینا باشد
DTR	°C	دامنه دمای شبانه روزی: تفاوت میانگین ماهانه دمای روزانه و شبانه
RX1day	mm	بیشترین مقدار بارش یکروزه: بیشترین بارش یکروزه در ماه
SDII	mm/day	نمایه ساده شدت بارش روزانه: از تقسیم مقدار کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارشی (دستکم امیلیمتر) سالانه به دست می‌آید.
CDD	روز	روزهای متوالی خشک: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش کمتر از امیلیمتر باشد.
CWD	روز	روزهای متوالی مرطوب: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش بیشتر از امیلیمتر باشد
PRCPTOT	mm	مقدار کل بارش روزهای مرطوب سالانه: مقدار کل بارش روزهای مرطوب (مقدار بارش دستکم از امیلیمتر بیشتر باشد)
ID	روز	روزهای یخی (دمای بیشینه کمتر از صفر درجه سلسیوس)

### ریزمقیاس گردانی آماری

برونداد دما و بارش روزانه مدل‌ها با استفاده از نرم افزار<sup>۱</sup> CMhyd (شکل ۲) و با روش تغییر دلتا انجام شد. این نرم افزار برای تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های مستقر در یک حوضه آبریز استفاده می‌شود (Rathjens et al., 2016).

از آنجایی که مدل منتخب دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی است، لذا خروجی این مدل باید قبل از استفاده برای مطالعات ارزیابی اثرات، ریزمقیاس شود که این امر را می‌توان به روش‌های آماری و دینامیکی انجام داد. در این مطالعه، فرآیند ریزمقیاس گردانی و تصحیح اریبی



شکل ۲. فرآیند ریزمقیاس‌نمایی یا تصحیح اریبی با CMhyd (Rathjens et al., 2016)

<sup>۱</sup> Climate Model data for hydrologic modeling

## معیارهای ارزیابی مدل

آماره‌ی ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> (r) که به درجه همبستگی خطی مربوط می‌شود و دامنه آن بین -۱ تا ۱ است (رابطه ۲).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

درجایی که n تعداد نمونه‌ها،  $O_i$  دمای دیدبانی در روز i ام،  $P_i$  دمای به دست آمده از داده‌های مدل در ماه i ام و  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  مقادیر متوسط  $O_i$  و  $P_i$  در n ماه است.

## ضریب تعیین

معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد. این معیار درصد واریانس تبیین شده از کل واریانس توجیهی توسط عامل‌های مستقل مدل رگرسیون چند متغیره برای هر دوره زمانی را نشان می‌دهد. رابطه (۳) نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد (Kutner, 2005):

$$R^2 = \frac{\sum_1^n P_i O_i}{\sqrt{\sum_1^n P_i^2 \sum_1^n O_i^2}} \quad (3)$$

## مجذور میانگین مربعات خطا

معمولاً هرچه پیش‌بینی مدل بیشتر بر داده‌های مشاهداتی منطبق باشد، با توجه به واحد اندازه‌گیری داده‌ها، مقدار آن کمتر و به صفر نزدیک‌تر می‌شود (Makridakis et al., 2008):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

ارایی نسبی (رابطه ۵) برای تشخیص تفاوت بین دو مجموعه داده به کار می‌رود. مقادیر منفی آن بیش برآورد مجموعه داده‌های مدل را نشان می‌دهد.

$$Bias = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - R_i))}{(\sum_{i=1}^n O_i)} \times 100\% \quad (5)$$

در روابط فوق  $P_i$  مقادیر برآورد شده روزانه،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی روزانه و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

## نتایج و بحث

صحت سنجی بارش و دمای کمینه و بیشینه مدل ACCESS-ESM1.5 در ایستگاه‌های منتخب استان

## خراسان رضوی

بر اساس پژوهش‌های انجام شده مدل ACCESS-ESM1.5 دارای توانمندی مناسبی در شبیه‌سازی دما و بارش در مقیاس سالانه نسبت به چندین مدل منتخب CMIP6 در ایستگاه‌های مورد بررسی است (زینل زاده و همکاران، ۱۴۰۴). لذا در این پژوهش برون‌داد دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ماهانه این مدل مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۳). نتایج ارزیابی مدل اقلیمی نشان داد مدل در شبیه‌سازی متغیرهای دمایی (دمای کمینه و بیشینه) با دقت بسیار بالایی عمل نموده، به طوری که ضریب همبستگی ۰/۹۶ برای هر دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه بدست آمد. اگرچه مدل تمایل به کم برآوردی دما (مقادیر PBIAS منفی) به ویژه در ایستگاه کاشمر نشان داد. در مقابل، مدل در شبیه‌سازی بارش ماهانه از کارایی ضعیفی برخوردار بود که با ضریب همبستگی پایین (۰/۲۹) و مقادیر RMSE بالا برای هر دو ایستگاه بدست آمد. پژوهش‌های انجام شده نیز نشان داده‌اند مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس از جمله آنهایی که در پروژه‌ی مقایسه‌ی بین‌المللی ششم (CMIP6) استفاده شده‌اند به طور کلی در شبیه‌سازی متغیرهای دمایی (مانند میانگین دمای سطحی) دقیق‌تر از متغیرهای بارشی هستند. این امر به ویژه در مناطق پیچیده‌ای مانند ایران که تحت تأثیر سامانه‌های اقلیمی مختلف و توپوگرافی متنوع است، صدق می‌کند (Almazroui et al., 2021; Babaoumail et al., 2021; Arias et al., 2021)

<sup>1</sup> Pearson correlation coefficient



کاشمر در دهه های آینده با تغییراتی در نمایه های فرین موثر بر عملکرد زعفران روبرو خواهد شد. مهم‌ترین این تغییرات عبارتند از کاهش معنادار روزهای یخبندان و کاهش شدت سرمای حدی و افزایش چشمگیر شب های حاره ای و طولانی‌تر شدن دوره های خشک سال (بویژه تحت سناریوی SSP5-8.5). در ایستگاه تربت حیدریه (جدول ۵) نیز کاهش ۳۰-۴۰ درصدی روزهای یخبندان تا دوره ۲۰۷۵-۲۰۵۱ بدست آمد. همچنین افزایش در نمایه سردترین روز سال و بی‌نظمی‌هایی در نمایه R95p پیش‌نگری شد که نشان دهنده ی افزایش خطر بارش‌های سنگین در دوره برداشت محصول است که می‌تواند به محصول آسیب برساند.

بطور کلی، بررسی ضرایب تخصیص یافته به نمایه های فرین منتخب در این معادله نشان می‌دهد عوامل دمایی (به ویژه TNn و ID) عوامل کاهنده عملکرد زعفران را در این منطقه محسوب می‌شوند. نمایه ی فرین بارشی از جمله CDD ضرایب کوچکتری را در این معادله به خود اختصاص داده و دارای اثر منفی بر عملکرد هستند. اعتبار این مدل با  $R^2 = 0.70$  و  $RMSE = 0.49$  و  $16.4\%$   $NRMSE =$  ارزیابی شد که نشان‌دهنده دقت نسبتاً خوب مدل است.

#### پیش‌نگری و تخمین عملکرد زعفران در آینده

در جدول ۴ و ۵، مقدار پیش‌نگری شده نمایه های فرین بکار رفته در مدل‌های رگرسیونی دو منطقه در مقایسه با مقادیر آن طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۱) آورده شده است. همانطوریکه در جدول ۴ مشاهده می‌شود منطقه

جدول ۴. مقادیر پیش‌نگری شده ی نمایه های فرین دما و بارش بکار رفته در مدل رگرسیونی برای دو دوره آبی ( ایستگاه کاشمر)

۲۰۵۱-۲۰۷۵		۲۰۵۰-۲۰۲۶		دوره پایه	نمایه فرین
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5		
۲	۵/۵	۹	۹/۷	۲۴	FD
-۰/۲	-۰/۲۳	-۱/۸	-۱/۴	-۲/۹	TNn
۱۳۵/۶	۱۱۹/۶	۱۱۳/۶	۱۰۹	۸۴/۵	TR20
۱۵۲/۶	۱۴۴/۵	۱۴۱	۱۵۸	۱۵۶/۶	CDD

جدول ۵. مقادیر پیش‌نگری شده ی نمایه های فرین دما و بارش بکار رفته در مدل رگرسیونی برای دو دوره آبی ( ایستگاه تربت

حیدریه)

۲۰۵۱-۲۰۷۵		۲۰۵۰-۲۰۲۶		دوره پایه	نمایه فرین
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5		
۳۱	۵۳/۶	۵۵	۶۴/۱	۷۴/۹	FD
۳۳	۳۲	۲۲	۳۲	۳۰	R95p
۶/۹	۵/۹	۵/۶	۵/۱	۳/۸	TXn

محاسبه شد. بر این اساس مشاهده شد که عملکرد زعفران در دوره های آبی در هر دو منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد. در کل، در سناریوی SSP2-4.5 کاهش عملکرد برای تربت حیدریه (کاشمر) در دوره‌های

به منظور برآورد و پیش‌نگری عملکرد زعفران طی دو دوره آبی در دو منطقه مورد بررسی، با جای گذاری مقادیر میانگین نمایه های فرین محاسبه شده برای سه دوره آبی در روابط ۶ و ۷، مقدار میانگین عملکرد سالانه

۲۰۵۰-۲۰۲۶ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ به ترتیب ۱۰ و ۱۴/۵ درصد (۱۱/۵ و ۱۶٪) بدست آمد، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5 این کاهش به ترتیب ۱۷ و ۲۸ درصد (۱۹/۵ و ۳۱/۳٪) تخمین زده شد.

### نتیجه‌گیری

افزایش دما، کاهش بارش، افزایش شدت بارش‌های رگباری و کاهش تعداد روزهای یخبندان از جمله مهم‌ترین تغییرات مشاهده شده در دو ایستگاه تربت حیدریه و کاشمر هستند (جانابزقبادی و همکاران، ۱۴۰۴). 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 داد، 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 (نمایه دوره‌های خشک و دیگر نمایه‌ی R95p روزهای تر) تدوین شد.

قوی‌ترین عامل کاهنده عملکرد در کاشمر و تنها نمایه دمای فرین کاهنده عملکرد در تربت حیدریه، نمایه ID بود. بررسی دو مدل نشان داد 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 Molina et al., (2004) و Behdani et al., (2004) است که در پژوهش‌های خود نشان داده‌اند که دمای کمینه عامل اصلی و تعیین‌کننده تشکیل گل و خروج گل از خاک می‌باشد. در رابطه با تأثیر منفی روزهای یخی، 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 مرز C ۲۰- گذشت و C ۲۷/۲- 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 ۷۰-۱۰۳ روزه باعث از بین رفتن مزارع زعفران در بخش‌های زیادی از استان شد. میانگین عملکرد زعفران در سال بعد یعنی ۱۳۸۷ در کاشمر ۰/۷ و در تربت حیدریه ۰/۸ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین در دی ماه ۱۴۰۱ که وقوع یخبندان در استان خراسان رضوی اتفاق افتاد و کمینه دما در تربت حیدریه به منفی C ۲۰- رسید، میانگین عملکرد در سال بعد یعنی ۱۴۰۲ به ۱/۵۶ کیلوگرم کاهش یافت. مطالعه خرم دل و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده است که افزایش دمای زمستان در خراسان رضوی موجب تغییر در چرخه فنولوژیک زعفران و کاهش کیفیت کلانه شده است. Kouzegaran et al., (2020) در مطالعه خود نشان دادند برای خراسان جنوبی نمایه‌های فرین مثل SU25، TR20، TX10P، TXn، PRCPTOT و SDII به‌طور چشمگیری در مدل رگرسیونی چند متغیره پیش‌بینی عملکرد زعفران مؤثر بودند. صحابی و معلم (۲۰۲۰) نیز در پژوهش خود نشان دادند دمای بیشینه و میانگین دما اصلی‌ترین متغیرهای مؤثر بر کاهش عملکرد زعفران بودند بطوریکه در تربت حیدریه متغیر میانگین دما به تنهایی ۴۲ درصد از تغییر پذیری میزان عملکرد را تبیین کرد.

مطالعات بعدی مد نظر قرار گیرند. همچنین برای برای تعمیم نتایج به مناطق دیگر، نیاز به اعتبارسنجی مدل وجود دارد.

### منابع

- 1- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., ... & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 155-183.
- 2- 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/>
- 3- 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)
- 4- 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 and Pollution Research*, 29(26), 40169-40177. DOI:10.1007/s11356-022-19046-9
- 5- 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>
- 6- Babaoosmail, H., Hou, R., Ayugi, B., Ojara, M., Ngoma, H., Karim, R., ... & Ongoma, V. (2021). Evaluation of the performance of CMIP6 models in reproducing rainfall patterns over North Africa. *Atmosphere*, 12(4), 475.
- 7- 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

در ادامه، این مطالعه به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران در دو منطقه مهم کشت این محصول در ایران (کاشمر و تربت حیدریه) پرداخت. یافته ها نشان دهنده یک روند نزولی در عملکرد پتانسیل زعفران در افق‌های زمانی آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم بود. این کاهش تحت هر دو سناریوی میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) مشهود بود. این نتایج نشان دهنده ی پیامدهای جدی تغییر اقلیم برای امنیت اقتصادی و معیشتی جوامع محلی وابسته به کشت زعفران است. کاهش شدید عملکرد نه تنها درآمد ملی از صادرات این محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند منجر به جاب‌جایی اجتماعی-اقتصادی و ناپایداری در این مناطق شود. در کل تفاوت‌ها در ضرایب نمایه ها 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 معتدل تر بهره برد. این یافته ها می‌تواند به بهبود برنامه ریزی کشت و افزایش بهره وری زعفران در هر دو منطقه کمک کند.

مطالعه تاثیر تغییر اقلیم بر عملکرد زعفران با محدودیت های متعددی روبروست، مانند کمبود داده های بلندمدت عملکرد زعفران و داده های اقلیمی با دقت مکانی بالا، عدم قطعیت در مدل های تدوین شده و پیچیدگی روابط بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد زعفران، دشواری در جمع آوری داده های میدانی .

پیشنهادات پژوهشی می‌تواند شامل بررسی اثر ترکیبی تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیکی خاص زعفران (مانند گلدهی) با جزئیات بیشتر و ارایه راهبردهای سازگاری خاص منطقه با استفاده از مدل‌های شبیه ساز عملکرد محصول به صورت کمی باشد احتمالاً عوامل دیگری مانند مدیریت مزرعه، خاک و آفات نیز بر عملکرد تأثیر دارند که در مدل لحاظ نشده اند و لازم است در

- 218-226.  
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.11.002>
- 18- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning (Vol. 112, No. 1). New York: Springer.
- 19- 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)
- 20- Keith, T. Z. (2019). Multiple regression and beyond: An introduction to multiple regression and structural equation modeling. Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9781315749101>
- 21- Khorramdel, S. , Nassiri Mahallati, M. , Moallem Banhangi, F. and 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 and Technology*, 7(2), 207-225. doi: 10.22048/jsat.2018.129172.1296
- 22- Khoshakhlagh, F. , Karimi, M. and 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*, 1403(57), 45-62. doi: 10.22034/jcr.2024.193596
- 23- 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 and Applied Climatology*, 139, 1207-1217. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03028-y>
- 24- Kutner, M. H. (2005). *Applied linear statistical models*.
- 25- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (2008). *Forecasting methods and applications*. John Wiley & sons.
- 26- Mehmeti, A., Candido, V., Canaj, K., Castronuovo, D., Perniola, M., D'Antonio, P., & Cardone, L. (2024). Energy, environmental, and economic sustainability of saffron cultivation: insights from the first European (Italian) case study. *Sustainability*, 16(3), 1179.
- 27- 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>
- 28- Molina, R.V., Valero, M., Navarro, Y., Guardiola, J.L., and García-Luis, A., (2004). The effect of time of corm lifting and duration of incubation at inductive qazvin plain, Iran. *International Journal of Plant Production*, 15(1), 45-60. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00118-0>.
- 8- 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 and Breeding*, 6(1), 53-64. <https://doi.org/10.22034/jppb.2016.528946>
- 9- Behdani, M.A., Nassiri, M., and Koocheki, A.,(2004). Modeling saffron flowering time across a temperature gradient. *Acta Hort.* 650, 215-218. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.650.24
- 10- Chamanehfar, S., Baygi, M. M., Modaresi, F., & Babaeian, I. (2024). Near future variations in temperature extremes in northeastern Iran under CMIP6 projections. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 972. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13125-9>
- 11- 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>
- 12- 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. <https://doi.org/10.22077/jsr.2017.378.1016>
- 13- 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>
- 14- FAO. (2023), Fasostat website
- 15- 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>
- 16- Haghghi, P. , Soleimanpour, S. M. and Moradi, A. (2025). The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2), 199-218. doi: 10.22098/mmws.2024.14691.1425
- 17- 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),

- 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>
- 38- Sahabi, H. and 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 and Technology*, 9(4), 357-373. doi: 10.22048/jsat.2021.283088.1423
- 39- 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>
- 40- Tosan, M., Alizadeh, A., Ansari, H., Rezvani Moghdam, P. 2014. Third National Conference on the latest scientific and research achievements of saffron, Mashad. Iran. (In Persian)
- 41- Usta, D. F. B., Teymouri, M., & Chatterjee, U. (2022). Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 416.
- 42- 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>
- 43- Zynal Zadeh, M., janbazghobadi, G., Motevalli, S., taherian, M. and Kouhi, M. (2025). Projecting the changes of extreme climate indices in Razavi Khorasan province (Case study: Torbat Heydarieh and Kashmar). *Journal of Climate Research*, 1403(59), 47-60. doi: 10.22034/jcr.2025.206844.
- temperature on flowering in the saffron plant (*Crocus sativus* L.) *Sci. Hort.* 103,9-91.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.008>
- 29- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.
- 30- 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>
- 31- 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 and Technology*, 11(3), 301-320.  
<https://doi.org/10.22048/jsat.2023.413847.1506>
- 32- 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.  
 doi: 10.1016/j.atmosres.2016.07.002
- 33- 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 and Assessment*, 195(12), 1548.  
 DOI:10.1007/s10661-023-12084-x
- 34- 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>
- 35- Rastegaripour, F. and Sheybani, M. (2019). Surveying Saffron Farmers' View on Climate Change and Adaptation Strategies (Case study: Torbat-e Heydarieh city). *Saffron Agronomy and Technology*, 7(4), 551-562.  
 doi: 10.22048/jsat.2019.160631.1329. (In Persian)
- 36- Rezaee, A., Yaqubi, M. (2023). Investigation of The Economic Impacts of Climate Change on Saffron Land Rent in Khorasan Razavi Province, *Saffron Agronomy and Technology*, 11(2), 209-224.  
<https://doi.org/10.22048/jsat.2023.400066.1489>
- 37- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic