

تحلیل تطبیقی سناریوهای A1FI-MI و B1TME تغییر اقلیم در کشت زعفران

ایران

ایمان سعیدی^{۱*}، ثمر مرتضوی^۲، میلاد حسنوند^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

چکیده

زعفران (*Crocus sativus L.*) به عنوان یک محصول با ارزش اقتصادی بالا، به دلیل وابستگی عمیق به شرایط اقلیمی منطقه، در برابر تغییرات اقلیمی، آسیب پذیری ویژه ای دارد. این تحقیق به ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر مناطق مناسب برای کشت زعفران در ایران پرداخته و دو سناریوی اقلیمی A1FI-MI (نمایانگر ادامه روند مصرف سوخت های فسیلی) و B1TME (نمایانگر گذار به سمت فناوری های پایدار) را با یکدیگر مقایسه می کند. در این مطالعه از نرم افزار TerrSet به همراه ابزار مدل ساز سازگاری تغییر اقلیم (CCAM) استفاده شده و مدل های MAGICC7 و SCENGEN برای تولید نقشه های تغییرات دمایی و بارشی تا سال ۲۱۰۰ به کار گرفته شدند. داده های مرجع اقلیمی (۱۹۸۱-۲۰۱۰) نیز در تحلیل های میدانی در نظر گرفته شده اند. نتایج نشان می دهد که تحت سناریوی A1FI-MI، مساحت مناطق با «توان بسیار زیاد» برای کشت زعفران تا سال ۲۱۰۰ حدود ۸۵٪ کاهش یافته و از ۴/۰۵٪ به ۰/۶۲٪ از مساحت کل کشور می رسد. هم زمان، سهم کل زمین های فاقد توان کشت به بیش از ۸۰٪ افزایش می یابد که حاکی از کاهش شدید پتانسیل تولید، به ویژه در مناطق شرقی است. در مقابل، تحت سناریوی B1TME، اگرچه مناطق با «توان بسیار زیاد» کاهش (تا ۰/۹۳٪) می یابند، یک تغییر مکانی مثبت رخ داده و سهم زمین های فاقد توان به طور چشمگیری از ۷۸/۷۲٪ به ۵۵/۰۲٪ کاهش می یابد. این کاهش عمدتاً به نفع ایجاد یک ذخیره راهبردی از زمین های با «توان کم» (افزایش از ۵/۰۷٪ به ۵۹/۱۴٪) و «توان بسیار کم» (افزایش از ۳/۰۵٪ به ۱۴/۱۲٪) است. یافته ها بر ضرورت فوری تدوین راهبردهای سازگاری، مدیریت هوشمند منابع و برنامه ریزی برای بهره برداری از پتانسیل مناطق جدید در غرب و شمال غرب کشور تحت سناریوی پایدار تأکید می کنند.

کلیدواژه ها: سازگاری، ارزیابی مطلوبیت، گرمایش جهانی، MAGICC-SCENGEN.

۱. استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، نویسنده مسئول، isaeedi@malayeru.ac.ir

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، mortazavi.s@gmail.com

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران،

miladhassanvand1992@gmail.com

مقدمه

تغییر اقلیم در عصر حاضر، مهم ترین تهدید برای توسعه پایدار است که منابع طبیعی، منابع پایه، محیط زیست، سلامت انسان، امنیت غذایی، فعالیت های اقتصادی و دیگر بخش های کشاورزی را تحت تأثیر قرار می دهد (لی^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). در این بین، محیط زیست به سبب تعاملات گسترده و مستقیم با محیط، بیشترین تأثیر را از فرایند پدیده تغییر اقلیم می پذیرد (نورتون^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). امروزه مطالعات بسیاری سعی بر شناخت تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات آن دارند. اجرای طرح های عمرانی، اقتصادی، اجتماعی و... نیاز به شناخت تغییر اقلیمی برای برنامه ریزی صحیح و قابل قبول دارد و از این رو ضرورت و اهمیت مطالعات اقلیمی در کالبد برنامه ریزی خرد و کلان کشور و در مقیاس کوچک تر استان و شهر قابل لمس است (زنگنه و همکاران، ۲۰۱۴).

مدل های اقلیمی و آب و هوایی افزایش درجه حرارت متوسط سراسر جهان را با آثار گسترده بر درجه حرارت و بارندگی محلی پیش بینی می کنند. این تغییرات در حال حاضر خطری برای تأمین مواد غذایی، معیشت کشاورزان و جوامع روستایی به شمار می روند (لی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، واکنش بخش کشاورزی به تغییر عملکرد، الگوی بهره وری، هزینه های تولید و در دسترس بودن منابع وابسته است.

امروزه در مطالعات ارزیابی های محیط زیستی سازگاری گونه های گیاهی علاوه بر اطلاعات جامع در مورد تغییرات اقلیمی نیازمند شرایط اقلیم آینده با بهترین مقیاس های ممکن از نظر مکانی و زمانی نیز هست. پیش بینی های اقلیمی و ارزیابی های تغییر اقلیم هنوز یک علم جوان است و با مشکلات زیادی از جمله انجام برآوردهای نرخ و سطح انتشار گازهای گلخانه ای و سایر آلاینده ها در دهه های آینده توسط کشورهای مختلف همراه است.

زعفران و شرایط رشدی آن

زعفران (*Crocus sativus L.*)، به عنوان یکی از محصولات راهبردی کشاورزی، به واسطه ویژگی های گیاه شناسی متمایزش،

جایگاه ویژه ای در سبد محصولات درمانی، ادویه ای و صنایع غذایی دارد. این گیاه در مناطقی که ویژگی هایی نظیر خاک های زهکشی شده، pH معتدل (بین ۷ تا ۸) و الگوهای دمایی و بارشی متناسب را دارا باشند، بهترین عملکرد را از خود به نمایش می گذارد (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۲۰). رضوانی مقدم و همکاران، ۲۰۱۵).

ایران به عنوان کشور تولیدکننده اصلی زعفران در جهان، حدود ۹۰٪ از تولید جهانی این محصول گران بها را بر عهده دارد؛ به گونه ای که براساس آمارهای اخیر، مساحت زیرکشت و تولید سالانه زعفران در این کشور به عنوان معیاری از اهمیت راهبردی آن در حوزه کشاورزی و صادرات محسوب می شود (شاهنوشی و همکاران، ۲۰۲۰). از جنبه های اقتصادی، زعفران نه تنها به دلیل ارزش افزوده بالا، بلکه به دلیل نیاز آبی محدود و سازگاری نسبی با شرایط اقلیمی خشکسالی نواحی مرکزی و خراسانی ها، به عنوان یک گزینه مطلوب در برنامه های توسعه کشاورزی در نظر گرفته می شود (سوگندی، ۲۰۲۳).

نوسانات دمایی نیز طی فصل رشد زعفران و زمان خواب پیازهای زعفران بر گل دهی و تعداد گل های تولیدی تأثیر دارد و نگهداری پیازها در دمای ثابت ۱۵ درجه تعداد گل های تولیدی را کاهش می دهد (میخایلنکو^۳، ۲۰۲۰). بدیهی است که با افزایش تولید زعفران، افزایش بهره وری و توسعه صادرات این گیاه، می توان درآمدهای ارزی قابل اطمینانی برای کشور ایجاد کرد (صادقی، ۲۰۱۲).

تحلیل روندهای دمایی و بارشی با استفاده از مدل های پیشرفته اقلیمی، امکان شناسایی نواحی مستعد و مناسب برای کشت و توسعه زعفران را فراهم می کند. این مطالعات می تواند به تدوین سیاست های مدیریتی منسجم در حوزه منابع آبی و کشاورزی کمک نماید. به علاوه، شناخت صحیح الگوهای تغییر اقلیمی زمینه ساز ایجاد راهکارهای نوین برای سازگاری و افزایش مقاومت تولیدکنندگان زعفران در برابر بحران های اقلیمی است.

در نهایت، تحقیقات جامع در این زمینه موجب ارتقای توسعه پایدار و تأمین امنیت غذایی در مناطق کشت زعفران

1. Lee
2. Norton

3. Mykhailenko

در شاخه دیگری از تحقیقات، بررسی پاسخ‌های مولکولی و فیزیولوژیکی زعفران در شرایط تنش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی است. پژوهشی با رویکردهای omics به شناسایی نقش‌های ژنتیکی در مقاومت زعفران به نوسانات دمایی و تغییرات الگوهای بارشی پرداخته است (حسینی، ۲۰۱۳). در این مطالعه محققان در زمینه بیوانفورماتیک زعفران نشان دادند که تحلیل‌های مولکولی می‌تواند نقاط ضعف و قوت فرایندهای زیستی در شرایط تغییر اقلیم را مشخص کند و زمینه‌های بهره‌برداری از این داده‌ها در جهت توسعه گونه‌های مقاوم‌تر فراهم گردد.

در استان خراسان ایران، پژوهش‌هایی نشان داده‌اند که استفاده از فناوری‌های مدرن در کنار دانش بومی می‌تواند به بهبود سازگاری و پایداری کشت زعفران در مواجهه با تغییرات اقلیمی کمک کند (بیداد، ۲۰۱۶). این تحقیقات با استفاده از مدل‌سازی‌های اقلیمی و ارزیابی دقیق متغیرهای محیط‌زیستی، راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد زعفران ارائه داده‌اند.

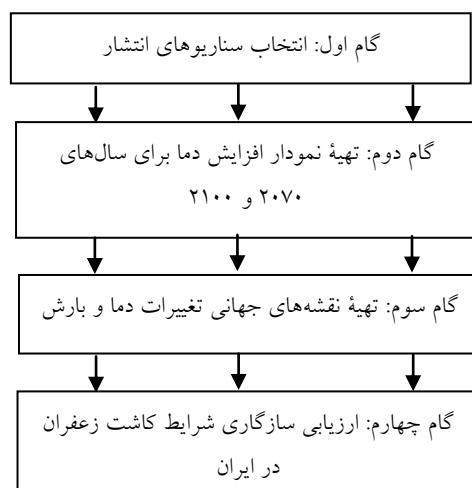
همان‌گونه که مشخص است، مطالعات گذشته تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشت زعفران را با استفاده از مدل‌های مختلف بررسی کرده و به نقش عوامل اقلیمی مانند دما و بارش در کاهش بهره‌وری این محصول پرداخته‌اند. مدل‌های نظیر Rclimindex، SCENGEN و CCSM برای تحلیل روندهای اقلیمی و بررسی شاخص‌های بحرانی در مناطق مستعد استفاده شده و نتایج این تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش دما و کاهش بارندگی می‌تواند منجر به کاهش سطح زیرکشت و افت کیفیت محصول شود. با این حال، خلأ تحقیقاتی مهمی در ارزیابی دقیق و مقایسه‌ای سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و میزان تطبیق‌پذیری مناطق مختلف ایران به شرایط متغیر اقلیمی وجود دارد. در بسیاری از مطالعات، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید زعفران در مقیاس محلی و منطقه‌ای به‌طور جامع بررسی نشده و رویکردهای مدیریتی برای مقابله با این تغییرات به‌صورت عملیاتی پیشنهاد نشده‌اند. در مطالعه حاضر با بهره‌گیری از ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته مانند TerrSet و CCAM و تمرکز بر دو سناریوی متضاد A1FI-MI و B1TME، تلاش بر بررسی

خواهد شد. در ادامه، به مرور متون معتبر علمی در رابطه با مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر کشت زعفران پرداخته شده است. در مطالعات اخیر، ارزیابی تطبیقی شرایط اقلیمی مناطق مختلف برای کشت زعفران مورد توجه قرار گرفته است. مطالعاتی در نواحی غیرستنی مانند مناطق غربی هیمالیا نشان می‌دهد که ویژگی‌های اقلیمی چون ارتفاع، دمای مناسب و الگوهای بارشی کنترل‌شده می‌تواند شرایط لازم برای رشد زعفران را حتی در مناطقی که به‌طور مرسوم به این محصول اختصاص نیافته‌اند، ایجاد نماید (کوتاری^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). این نتایج اهمیت استفاده از داده‌های اقلیمی دقیق و تحلیل‌های مبتنی بر مدل‌های پیشرفته مانند MAGICC و SCENGEN در شناسایی نقاط مستعد و تدوین راهبردهای مدیریت منابع آبی را برجسته می‌کند.

مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد زعفران در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی را با استفاده از مدل ریکاردین و مدل خودتوضیح مکانی (SAR) پرداخته است (وفایی و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوهای اقلیمی، به‌ویژه بارش، دما و سرعت باد، تأثیر چشمگیری بر عملکرد زعفران دارند. افزایش بارش به‌عنوان عاملی مثبت، باعث بهبود رشد و افزایش تولید زعفران می‌شود. در مقابل، افزایش دمای متوسط سالانه در دوره‌های حساس رشد، منجر به بروز تنش حرارتی و کاهش شکوفه‌دهی می‌گردد.

در مطالعه‌ای مشابه از نرم‌افزار Rclimindex برای تحلیل روند شاخص‌های اقلیمی تأثیرگذار بر عملکرد زعفران در شرق ایران، شامل استان خراسان جنوبی و بخش جنوبی خراسان رضوی، استفاده کرده است (کوزه‌گران و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج نشان‌دهنده افزایش وقایع شدید گرمایی و کاهش بارندگی هستند که عوامل کلیدی کاهش عملکرد زعفران در آینده محسوب می‌شوند. بیشترین کاهش عملکرد، برابر با ۳۱٪، در بازه زمانی ۲۰۷۶ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 پیش‌بینی شده که نشان‌دهنده تأثیرات شدیدتر شرایط اقلیمی بر کشت زعفران در آینده است.

و مدل سازی داده های فضایی استفاده شده است. یکی از مجموعه ابزارهای کلیدی این نرم افزار مدل ساز سازگاری با تغییرات اقلیمی^۱ یا CCAM است، است که به طور خاص برای بررسی مسائل مرتبط با تغییرات سریع اقلیم جهانی طراحی شده است. CCAM دارای یک رابط کاربری پیشرفته برای پیش بینی تغییرات اقلیمی آینده تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مدیریتی مختلف است. این ابزار از مدل های MAGICC7 و SCENGEN بهره می برد که امکان شبیه سازی دقیق تغییرات جوی را فراهم می سازند. CCAM در راستای ارزیابی های ارائه شده در چهارمین گزارش هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC)^۲ توسعه یافته است و نقش مهمی در مطالعات مرتبط با تغییرات اقلیمی، سناریو سازی و سازگاری با شرایط متغیر محیط زیستی ایفا می کند.



شکل (۲): مراحل انجام تحقیق

Figure (2): Research Implementation Stages

گام اول: انتخاب سناریوهای انتشار

برای این پژوهش، دو سناریوی انتشار شامل A1FI-MI و B1TME از چهارمین گزارش هیئت چهارمین گزارش هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی انتخاب شدند. سناریوی A1FI-MI نمایانگر جهانی با تقاضای انرژی بالا، همکاری های بین المللی و توسعه فناوری های جایگزین جدید است. این سناریو بر پایه ترکیب گسترده سوخت های فسیلی، از جمله زغال سنگ و نفت، بنا شده است. انتخاب این سناریو بر این

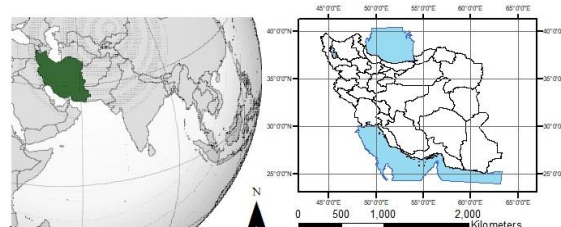
دقیق تفاوت های منطقه ای و پیشنهاد راهبردهای عملی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم است که می تواند به سیاست گذاران و مدیران کشاورزی در تدوین برنامه های سازگاری و مدیریت پایدار منابع آبی و خاکی کمک کند. یافته های این پژوهش علاوه بر بهبود درک از الگوهای تغییر اقلیم، زمینه ای برای طراحی راهبردهای پیشگیرانه برای حفظ تولید زعفران در مناطق مستعد فراهم می آورد.

مواد و روش ها

محدوده مطالعاتی

کشور ایران، که در جنوب غربی قاره آسیا و به عنوان یکی از کشورهای خاورمیانه شناخته می شود، با مساحتی بالغ بر ۱ میلیون و ۶۴۸ هزار و ۱۹۵ کیلومتر مربع زمینه مناسبی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوزه کشاورزی فراهم می آورد (شکل ۱). از نظر جغرافیایی، ایران در نیمه معتدل جنوبی شمالی قرار داشته و از حدود ۲۵° ۳۰ تا ۳۹° ۴۷ عرض شمالی و از ۴۴° ۱۴ تا حدود ۶۳° ۲۰ طول شرقی از نصف النهار گرینویچ گسترده شده است. ویژگی های اقلیمی ایران، از جمله نیاز آبی نسبتاً کمتر و مقاومت نسبی در برابر تغییرات دمایی، این کشور را به یک بستر راهبردی برای توسعه و بهبود بهره وری در بخش زعفران کاری تبدیل کرده است.

ویژگی های محیط زیستی و خاک های زهکشی شده در استان هایی نظیر خراسان جنوبی، خراسان رضوی و خراسان شمالی، شرایط ایدئالی را برای رشد زعفران فراهم نموده و ایران تقریباً ۹۰٪ از تولید جهانی این محصول ارزشمند را به خود اختصاص داده است (ریاحی و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل (۱): موقعیت محدوده مطالعاتی

Figure (1): The location of the study area

روش تحقیق

مراحل انجام این تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است. در این مطالعه، از نرم افزار TerrSet به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل

Scenario به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تولید سناریوهای اقلیمی آینده بهره‌مند شده است. این مدل به عنوان یک جزء از سیستم ترکیبی MAGICC-SCENGEN در نرم‌افزار Terrset عمل می‌کند و با استفاده از خروجی‌های مدل MAGICC7 که تغییرات دمای میانگین سطح زمین و دریا را بر مبنای سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای محاسبه می‌کند، نقشه‌های تغییرات اقلیمی را براساس داده‌های ورودی دما و بارش ایجاد می‌کند. بدین ترتیب، SCENGEN امکان ارائه پیش‌بینی‌های فضایی مقیاس‌دار را در قالب نقشه‌های دیجیتالی فراهم می‌سازد.

در مرحله تولید سناریو (Generate Scenario)، تنظیمات اولیه به گونه‌ای انجام شد که خروجی‌های مدل بر مبنای میانگین نتایج ۲۰ مدل اقلیمی اقیانوسی-اتمسفری محاسبه گردد. به طور پیش‌فرض، مدل‌های انتخاب‌شده شامل GFDL-CM2.0، GFDL-CM2.1، CCCMA-3.0 و GISS-EH بودند که برای کاهش عدم قطعیت میان نتایج، به صورت میانگین جمع‌بندی به کار گرفته شدند. همچنین سال پیش‌بینی به عنوان نقطه مرجع در این بخش برابر با ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ انتخاب شده است. علاوه بر این، در بخش تنظیمات مدل، گزینه‌ای برای مقیاس‌گذاری خطی به کار گرفته شده است تا روند تغییرات به صورت طبیعی بدون گرایش نمایی مدل‌سازی شود. در نهایت، خروجی‌های به دست آمده از مدل SCENGEN شامل نقشه‌های دیجیتالی تغییرات میانگین دما و بارش به تفکیک فصلی و سالانه است که برای تحلیل اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شدند. این نتایج علاوه بر ارائه درک عمیق از روند تغییرات اقلیمی، موجبات تدوین راهبردهای سازگاری و برنامه‌ریزی دقیق در سطح منطقه‌ای را فراهم ساخت.

گام چهارم: ارزیابی سازگاری شرایط کاشت زعفران در ایران
در این گام، از مدل تناسب محصولات زراعی که در قالب مدل تناسب اقلیمی محصولات زراعی (CCSM) ارائه شده است، به منظور ارزیابی سازگاری شرایط اقلیمی با نیازهای کاشت زعفران استفاده می‌شود. هدف از این بخش، تعیین سازگاری مناطق مختلف ایران در شرایط تغییر اقلیم با دو سناریوی نام‌برده شده برای رشد بهینه زعفران است. از داده‌های اقلیمی

اساس بود که شرایط موجود در این مدل تا حد زیادی با وضعیت کنونی جهان هم‌خوانی دارد.

در مقابل، سناریوی B1TME بر پایداری اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی تمرکز داشته و بر کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش حفاظت از انرژی تأکید دارد که با اهداف توافق‌نامه پاریس سازگار است. خانواده سناریوی B1 شباهت‌هایی به A1 دارد، اما تفاوت اساسی آن در تمرکز بر تولید انرژی پاک و پایداری است که در توصیف B1TME نیز به آن اشاره شده است.

گام دوم: تهیه نمودار افزایش دما

در این مرحله با استفاده از مدل MAGICC و ارائه سناریوهای A1FI-MI و B1TME، به همراه مجموعه‌ای از پارامترها برای هریک از این مدل‌ها مدل MAGICC اجرا گردید و نمودار افزایش دما برای سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ تهیه شد. شایان ذکر است که سال مرجع برای خروجی مدل آب‌وهوایی ۱۹۹۰ انتخاب شد که داده‌های مربوط به سال‌های پیشین در مدل به شکل پیش‌فرض وجود دارد. برای هر دو سناریوی نام‌برده شده مطابق توصیه‌های راهنمای مدل، مقدار چرخه کربن در محدوده متوسط $1/1 \text{ GtC/year}$ تنظیم شد. گردش ترموهالین، با این فرض که احتمالاً با افزایش دما کاهش می‌یابد، به صورت متغیر در نظر گرفته شد. فشار آتروسل در سطح متوسط $1/3 \text{ W/m}^2$ تنظیم گردید. میزان انتشار عمودی و نرخ اختلاط آب اقیانوس برابر با $2/3$ سانتی‌متر مربع بر ثانیه تعیین شد که متوسط مقدار ارائه شده در میان هفت مدل موجود در نرم‌افزار است. سطح ذوب یخ نیز براساس برآوردهای مرکزی منتشرشده در چهارمین گزارش سالانه IPCC تعیین شد. همچنین، پارامتر حساسیت اقلیمی، که واکنش دمای زمین به دو برابر شدن غلظت CO_2 را نشان می‌دهد، مقدار ۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. این مقدار در بازه توصیه شده توسط IPCC بین $0/5$ تا $5/5$ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. سال مرجع برای خروجی مدل آب‌وهوایی ۱۹۹۰ و سال نهایی ۲۱۰۰ تعیین شد.

گام سوم: تهیه نقشه‌های جهانی تغییرات دما و بارش

در این مطالعه از مدل SCENGEN – Generate Climate

از بارش به عنوان یک شاخص، به تعیین میزان رطوبت کافی برای فرایندهای فیزیولوژیکی زعفران کمک می‌کند. ارزیابی‌های به صورت هم‌زمان برای دما و بارش، تصویری جامع از تناسب شرایط اقلیمی ارائه می‌دهد که می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در بخش کشاورزی ایران کمک کند.

در نهایت، با ترکیب نتایج به دست آمده از ارزیابی‌های دمایی و بارشی، مدل تناسب اقلیمی توانست نقشه‌های تفصیلی از سازگاری شرایط کاشت زعفران در مناطق مختلف ایران ایجاد کند. این نقشه‌های خروجی به صورت پیکسلی و با استفاده از روش‌های ترکیبی مانند ضرب نمرات عوامل یا استفاده از کمترین مقدار میان شاخص‌ها، شرایط محیطی را به دقت مدل‌سازی می‌کنند.

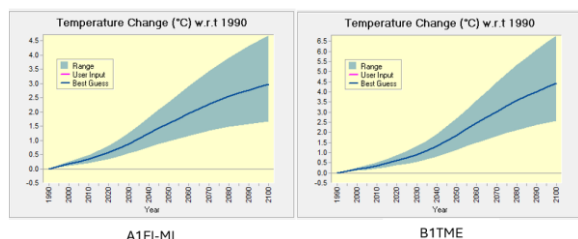
برای ارتقای دقت و عملیاتی‌سازی نتایج مدل تناسب اقلیمی کشت زعفران، لازم بود تا برون‌دادهای مدل با محدودیت‌های زیست‌فیزیکی و حقوقی مناطق مستعد کشت زعفران تطبیق یابد. این فرایند با هدف حذف زمین‌هایی که کشت در آن‌ها از نظر فیزیکی ناممکن، پرهزینه، یا از نظر قانونی ممنوع است، انجام پذیرفت. برای این منظور، از مجموعه داده‌های پوشش زمین ماهواره مودیس (MODIS MCD12Q1 V6.1) با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر استفاده شد که به دلیل دقت بالا در مقیاس بزرگ مطالعات کشوری مناسب تشخیص داده شد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های فیزیکی اعمال شده، شیب زمین بود؛ به این صورت که کلیه مناطقی که دارای شیب تندتر از ۸ درجه بودند، به دلیل خطر فرسایش خاک و عدم سازگاری با عملیات کشاورزی، از مناطق مطلوب حذف شدند. در نهایت، با تلفیق داده‌های شیب با نقشه کاربری اراضی، یک ماسک جامع از مناطق غیرقابل کشت تولید شد تا ارزیابی نهایی صرفاً محدود به پتانسیل اقلیمی نباشد.

در راستای اعمال دقیق‌تر محدودیت‌های کاربری اراضی و ملاحظات حقوقی، مجموعه‌ای از کلاس‌های پوشش زمین براساس طبقه‌بندی IGBP ماهواره مودیس به صورت دائمی از مناطق مناسب خارج شدند. این کلاس‌ها شامل تمامی انواع جنگل‌ها و درختچه‌زارها، مناطق شهری و ساخته شده، پهنه‌های آبی دائمی، تالاب‌ها و مناطق مرطوب به دلیل مشکل غرقاب

ماهانه شامل بارش، دمای حداقل و دمای میانگین بهره گرفته شده و این اطلاعات از منابع معتبر جهانی یا داده‌های بومی جمع‌آوری می‌شوند. همچنین، این مدل با استفاده از اطلاعات موجود در پایگاه داده گونه‌های زراعی EcoCrop که توسط سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد توسعه یافته است، شاخص‌های لازم برای بررسی تناسب شرایط رشد گیاه را در اختیار قرار می‌دهد. برای ارزیابی دقیق‌تر این شاخص‌ها با شرایط محیطی و رشدی زعفران در ایران هماهنگ شدند. استفاده از این مدل سازگار شده، امکان شناسایی دقیق مناطق دارای پتانسیل مناسب برای کاشت زعفران را فراهم می‌کند و در نتیجه استانداردهای پژوهشی و مدیریتی لازم را در این حوزه بهبود می‌بخشد.

این مدل، سال را به ۱۲ بخش یا دوره رشد تقسیم می‌کند که هر بخش نمایانگر یک ماه از سال است. در هر دوره، ابتدا شاخص‌های مربوط به دمای محیط بررسی می‌شود و شرایط دمایی برای رشد زعفران ارزیابی می‌گردد. مدل از چندین پارامتر دمایی کلیدی بهره می‌برد؛ از جمله دمای مطلق خطرناک (KTMP) که میزان بالاتر بودن دما از این مقدار نشان‌دهنده خطر از بین رفتن گیاه است، و همچنین دماهای حداقل (TMIN)، حداقل بهینه (TOPMIN)، حداکثر بهینه (TOPMAX) و حداکثر (TMAX) که هر کدام نقش مهمی در تعیین تناسب دمایی بازی می‌کنند. برای مثال، اگر میانگین دمای یک پیکسل حداقل ۴ درجه سانتی‌گراد بالاتر از KTMP باشد، آن ماه به عنوان دوره‌ای نامناسب برای رشد محسوب می‌شود. این رویکرد دمایی، امکان شناسایی دقیق دوره‌های حساس و مناسب برای رشد زعفران را در مناطق مختلف به ما می‌دهد.

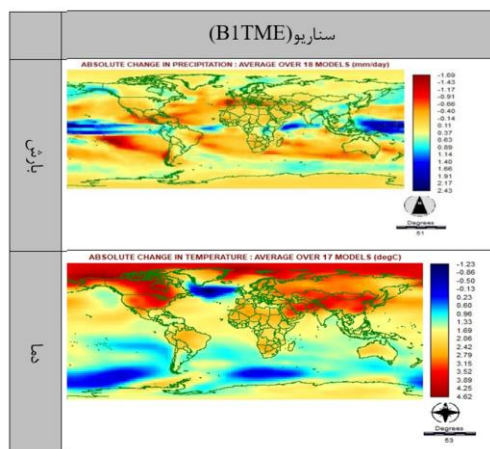
علاوه بر ارزیابی دمایی، این مدل از بارش به عنوان یک متغیر مهم برای تعیین سازگاری شرایط کاشت استفاده می‌کند. شاخص‌های مربوط به بارش شامل حداقل بارش سالانه (RMIN)، حداقل بارش بهینه (ROPMIN)، حداکثر بارش بهینه (ROPMAX) و حداکثر بارش مجاز (RMAX) است که تمامی مقادیر به میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شوند. در این مدل، ارزیابی بارش به صورت تجمعی برای کل فصل رشد (که در این مورد کل سال در نظر گرفته می‌شود) انجام می‌شود. استفاده



شکل (۳): نمودار تغییرات جهانی دما برای دو سناریوی مطالعه‌شده در مدل MAGGICC
Figure (3): Global Temperature Change Diagram for the Two Scenarios Studied in the MAGGICC Model

گام دوم

پس از اعمال تنظیمات اشاره‌شده در روش تحقیق، مدل اقلیمی برای دو سناریوی A1FI-MI (نماینگر ادامه روند مصرف سوخت‌های فسیلی) و B1TME (نماینگر گذار به سمت انرژی‌های پایدار) اجرا گردید و خروجی‌های دما به صورت درجه سانتی‌گراد محاسبه شدند. در اجرای مدل SCENGEN، برای هر ماه تصاویر جهانی تولید شد، که از این میان چهار تصویر مربوط به الگوی بارش و چهار تصویر دیگر به توزیع دمای سطح زمین اختصاص یافته است. برای استخراج داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، میانگین خروجی‌ها از ۱۸ مدل انتخاب‌شده به دست آمده است؛ به طوری که از مجموع ۲۰ مدل پیشنهادی اولیه، دو مدل با ضریب همبستگی آماری بسیار پایین پس از ارزیابی‌های اولیه حذف شدند. خروجی‌های حاصل از مدل SCENGEN شامل نقشه‌های جهانی پیش‌بینی‌شده از توزیع فضایی دما و الگوهای بارش به تفکیک ماهانه، فصلی و سالانه، با استفاده از سناریوهای A1FI-MI و B1TME تا پایان سال ۲۱۰۰ ارائه می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل (۴): نقشه‌های جهانی تغییر بارش و دما برای سناریوی B1TME
Figure (4): Global maps of precipitation and temperature change for the B1TME scenario

شدن پیاز زعفران، و همچنین مناطق برف و یخ دائمی بودند. علاوه بر این، محدودیت‌های فیزیکی، مناطق چهارگانه حفاظت‌شده کشور نیز به صورت کامل از نقشه پتانسیل کشت حذف شدند تا انطباق طرح‌های توسعه کشاورزی با اهداف حفاظت از محیط‌زیست تضمین شود. نکته قابل توجه در این ماسک‌گذاری، حفظ کلاس اراضی بایر یا پوشش گیاهی پراکنده به عنوان یک استثنا مهم بود؛ چراکه زعفران به مقاومت به خشکی در خاک‌های خوب زهکشی‌شده و بایر، اغلب به عنوان بستر مناسبی برای کشت سنتی این محصول در ایران شناخته می‌شوند.

برای تحلیل فضایی دقیق و منطبق بر نیازهای مقیاس ملی، وضوح نقشه‌های خروجی مدل‌های TerrSet در مرحله نهایی‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار بود. در حالی که مدل‌های پایه SCENGEN و MAGICC داده‌های تغییر اقلیم را در مقیاس‌های درشت جهانی تولید می‌کنند، نقشه‌های مطلوبیت نهایی پس از اعمال فیلترهای زیست‌فیزیکی، با وضوح عملیاتی ۵۰۰ متر تهیه شدند.

نتایج

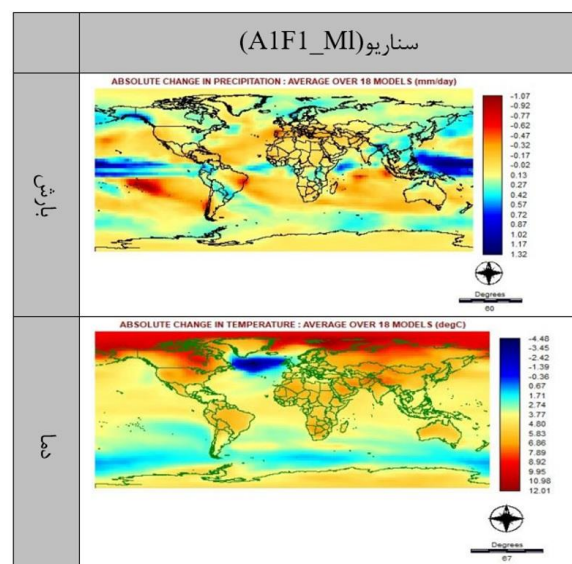
گام اول

در شکل (۳)، نمودارهایی ارائه شده‌اند که تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای جهانی را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ بر مبنای شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با مدل MAGGICC برای دو سناریوی A1FI-MI (سناریوی مبتنی بر ادامه روند مصرف سوخت‌های فسیلی) و B1TME (سناریوی گذار به سمت انرژی‌های پایدار) به تفصیل نمایش می‌دهند. در این شکل، برای هر سناریو نمودارهایی جداگانه نشان‌دهنده تغییرات مقادیر میانگین دما (به درجه سانتی‌گراد) رسم شده است؛ به علاوه، نواحی سایه‌دار در اطراف منحنی‌های میانگین، عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی‌ها را بازتاب می‌دهد. به طور کلی، نمودارهای نمایش داده‌شده روند افزایشی دما در هر دو سناریو را نشان می‌دهند، اما در سناریوی A1FI-MI افزایش دما و تغییرات ناشی از آن به صورت قابل توجه و با دامنه بزرگ‌تری بیان شده است.

B1TMI سردتر از سناریوی A1F1_MI است. بزرگ‌ترین تفاوت در قطب شمال و کمترین میزان اختلاف در شمال اقیانوس اطلس و مناطق اقیانوس جنوبی است. در توزیع جهانی بارش اختلاف زیادی وجود ندارد. براساس سناریوهای بالا بیشترین میزان بارش در امتداد منطقه استوایی متمرکز است.

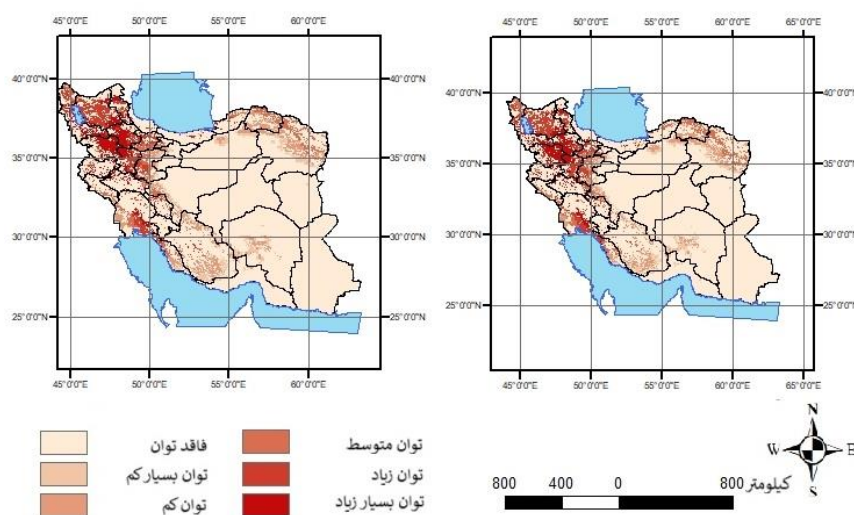
گام سوم

نقشه‌های آینده براساس دو سناریو ترسیم شده‌اند: سناریوی A1FI-MI (با انرژی فسیلی بالا): در این سناریو، تا سال ۲۰۷۰ تغییرات اقلیمی تشدید می‌شود و مناطقی در غرب کشور (مانند همدان و کردستان) شرایط بهتری پیدا می‌کنند. تا سال ۲۱۰۰، مساحت کلی زمین‌های مناسب برای کشت زعفران به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و کانون مناسب بودن به سمت استان‌های غرب و شمال غرب (مانند کرمانشاه و همدان) منتقل می‌شود (شکل ۷). سناریوی B1TME (پایدار): در این سناریو، با تمرکز بر انرژی پاک، تغییرات اقلیمی ملایم‌تر است و بسیاری از مناطق مناسب سال ۲۰۲۰ حفظ شده یا حتی شرایط بهتری پیدا می‌کنند (شکل‌های ۶ و ۷).



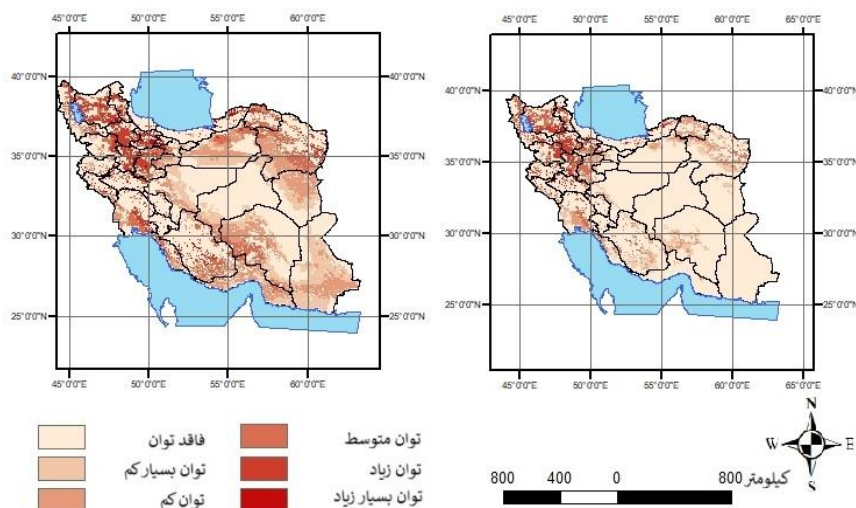
شکل (۵): نقشه‌های جهانی تغییر بارش و دما برای سناریوی A1F1-MI
Figure (5): Global maps of precipitation and temperature change for the A1F1-MI scenario

شباهت‌هایی در توزیع مکانی متغیرهای زیست‌اقلیم بین دو سناریوی A1FI-MI و B1TME وجود دارد. تصاویر مربوط به شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد در سناریوی A1F1_MMI، کمترین دما با $1/07-^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد متعلق به قطب جنوب است و در سناریوی B1TMI کمترین دما $1/23-^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد نمایش داده می‌شود. دمای جهانی در سناریوی



شکل (۶): سازگاری اقلیمی ایران برای کشت زعفران در سال ۲۰۷۰ میلادی بر مبنای سناریوی A1FI-MI (سمت راست) و B1TME (سمت چپ)

Figure (6): Iran's climate adaptation for saffron cultivation in 2070 based on the A1FI-MI (right) and B1TME (left) scenarios



شکل (۷): سازگاری اقلیمی ایران برای کشت زعفران در سال ۲۱۰۰ میلادی بر مبنای سناریوی A1FI-MI (سمت راست) و B1TME (سمت چپ)

Figure (7): Iran's climate adaptation for saffron cultivation in 2100 based on the A1FI-MI (right) and B1TME (left) scenarios

مختلف، تغییرات محسوسی خواهد داشت. در سال ۲۰۷۰، در سناریوی A1FI-MI، مساحت مناطق فاقد توان کشت ۱ میلیون و ۲۹۸ هزار و ۵۶۸ کیلومتر مربع بوده و تنها ۶۶ هزار و ۱۸۲ کیلومتر مربع در طبقه «توان بسیار زیاد» قرار گرفته است. در مقابل، در سناریوی B1TME، اگرچه مساحت مناطق فاقد توان اندکی کمتر (۱ میلیون و ۲۸۴ هزار و ۹۸۵ کیلومتر مربع) است، اما مناطق با «توان بسیار زیاد» نیز با ۶۴ هزار و ۴۹۵ کیلومتر مربع، تفاوت چندانی با سناریوی اول ندارد.

با گذر زمان تا سال ۲۱۰۰، این تفاوت‌ها تشدید می‌شود. تحت سناریوی A1FI-MI، مساحت مناطق با «توان بسیار زیاد» به شدت کاهش یافته و به ۱۰ هزار و ۱۹۶ کیلومتر مربع می‌رسد و هم‌زمان، مناطق فاقد توان به ۱ میلیون و ۳۰۸ هزار و ۷۸ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. این امر حاکی از کاهش چشمگیر قابلیت کشت زعفران در ایران تحت سناریوی مبتنی بر مصرف بالای سوخت‌های فسیلی است. در مقابل، تحت سناریوی B1TME، اگرچه مناطق با «توان بسیار زیاد» همچنان کم‌مساحت (۱۵ هزار و ۱۲۹ کیلومتر مربع) باقی می‌مانند، مساحت کل مناطق فاقد توان با کاهش قابل توجهی به ۸۹۸ هزار و ۲۲۰ کیلومتر مربع رسیده و سهم مناطق با توان‌های «کم» و «بسیار کم» افزایش می‌یابد. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری در جهت توسعه پایدار (B1TME) می‌تواند از کاهش شدید مناطق مستعد کشت زعفران در بلندمدت جلوگیری کند.

جدول (۱): مقایسه مساحت طبقات مختلف در سناریوهای شبیه‌سازی شده

Table (1): Comparing the area of different floors in simulated scenarios

سال	سناریو	کلاس	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد (%)
۲۰۷۰	A1F1	فاقد توان	۱۲۹۸۵۶۸/۴۰	۷۹/۵۵
		توان بسیار کم	۴۶۴۴۴/۳۲	۲/۸۵
		توان کم	۷۹۶۰۹/۲۶	۴/۸۸
		توان متوسط	۶۹۴۲۳/۹۶	۴/۲۵
		توان زیاد	۷۲۱۶۰/۲۸	۴/۴۲
		توان بسیار زیاد	۶۶۱۸۲/۰۲	۴/۰۵
۲۰۷۰	B1TME	فاقد توان	۱۲۸۴۹۸۴/۷۶	۷۸/۷۲
		توان بسیار کم	۴۹۷۶۶/۲۳	۳/۰۵
		توان کم	۸۲۸۲۴/۷۱	۵/۰۷
		توان متوسط	۶۲۲۶۳/۶۳	۳/۸۱
		توان زیاد	۷۰۴۳۶/۳۸	۴/۳۱
		توان بسیار زیاد	۶۴۴۹۵/۲۷	۳/۹۵
۲۱۰۰	A1F1	فاقد توان	۱۳۰۸۰۷۷/۹۷	۸۰/۱۳
		توان بسیار کم	۷۵۴۵۳/۳۲	۴/۶۲
		توان کم	۹۶۶۳۱/۷۰	۵/۹۲
		توان متوسط	۶۳۲۱۸/۷۹	۳/۸۷
		توان زیاد	۶۲۲۹۲/۷۶	۳/۷۵
		توان بسیار زیاد	۱۰۱۹۶/۴۳	۰/۶۲
۲۱۰۰	B1TME	فاقد توان	۸۹۸۲۲۰/۴۰	۵۵/۰۲
		توان بسیار کم	۱۹۸۱۱۰/۲۳	۱۲/۱۴
		توان کم	۲۳۸۱۱۷/۲۷	۱۴/۵۹
		توان متوسط	۱۵۱۴۷۶/۸۶	۹/۲۸
		توان زیاد	۱۱۳۷۱۷/۰۸	۶/۹۷
		توان بسیار زیاد	۱۵۱۲۹/۱۴	۰/۹۳

براساس داده‌های جدول (۱)، نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که مساحت مناطق دارای توان اقلیمی مناسب برای کشت زعفران تحت تأثیر سناریوهای

بحث

نتایج به دست آمده از مدل سازی با استفاده از نرم افزار TerrSet و مدل های MAGICC-SCENGEN تغییرات روندی را در دما و الگوهای بارش ایران نشان می دهد. در تمامی مناطق کشور، افزایش قابل توجه دما در دهه های آینده، به ویژه پس از سال ۲۰۷۰ مشاهده می شود. الگوهای بارشی نیز به گونه ای تغییر خواهند کرد که در برخی نواحی شاهد کاهش بارش و در برخی تغییرات فصلی قابل تشخیص خواهیم بود.

در این پژوهش، اثرات دو سناریوی تغییر اقلیم (A1FI-MI) با تغییرات شدید و B1TME با تغییرات معتدل) بر کشت زعفران بررسی شد. نتایج نشان داد که سناریوی پایدار (B1TME) با تمرکز بر سیاست های پایدار، تغییرات اقلیمی ملایم تری ایجاد کرده و اهمیت انتخاب راهبردهای مدیریتی مناسب را در کاهش اثرات منفی و برنامه ریزی برای سازگاری مؤثر برجسته می کند (آیدین و سارپتاش،^۱ ۲۰۱۸؛ نگوی و شیبیتز،^۲ ۲۰۲۰).

تحلیل کمی داده های جدول (۱) عمق تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی را به وضوح نشان می دهد. تحت سناریوی A1FI-MI، مساحت زمین های با «توان بسیار زیاد» برای کشت زعفران بین سال های ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ از ۶۶ هزار و ۱۸۲ به ۱۰ هزار و ۱۹۶ کیلومتر مربع کاهش می یابد. این کاهش شدید، هم زمان با افزایش مساحت زمین های با «توان بسیار کم» (از ۴۶ هزار و ۴۴۴ به ۷۵ هزار و ۴۵۳ کیلومتر مربع) است که حاکی از تنزل کیفیت شدید زمین های مستعد موجود است. در مقابل، تحت سناریوی B1TME، اگرچه مناطق با «توان بسیار زیاد» نیز کاهش می یابند، این سناریو منجر به افزایش چشمگیر مجموع مساحت زمین های در طبقات «توان کم»، «متوسط» و «زیاد» در مقایسه با سناریوی A1FI-MI تا سال ۲۱۰۰ می شود. این الگو نه تنها از کاهش فاجعه بار پتانسیل کشت در سناریوی پراشتار جلوگیری می کند، بلکه نشان می دهد که یک مسیر توسعه پایدار چگونه می تواند یک ذخیره راهبردی از زمین های با قابلیت کشت در سطوح مختلف را برای انعطاف پذیری بیشتر

در آینده حفظ نماید. این یافته ها به طور کمی مؤید مطالعات پیشین مانند کوزه گران و همکاران (۲۰۲۰) است که بر کاهش عملکرد زعفران در شرق ایران تحت سناریوهای پراشتار تأکید داشتند، اما در عین حال، بینش جدیدی در مورد امکان حفظ ظرفیت تولید در سطح کلان از طریق سیاست گذاری صحیح ارائه می دهد.

در مطالعات پیشین نیز تغییرات الگوهای اقلیمی و تأثیرات آن ها بر بخش کشاورزی به عنوان یکی از چالش های اصلی مطرح شده است. برای مثال، در مطالعه ای با استفاده از نرم افزار RCLindex و شاخص های مرتبط با بارش و دما برای مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر کشت زعفران در استان خراسان جنوبی و بخش جنوبی استان خراسان رضوی (شرقی ایران) به کار گرفته شدند (کوزه گران و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج به دست آمده نشان دهنده روند افزایشی شاخص های اقلیمی دمای گرم و روند کاهشی شاخص های بارشی است که به عنوان عوامل مهم در کاهش عملکرد زعفران محسوب می شوند. نتایج این تحقیق کاملاً در راستای نتایج ارائه شده در این مقاله است که نشان دهنده کاهش مطلوبیت کشت زعفران در شرق کشور با تشدید اثرات تغییر اقلیم است.

با توجه به نتایج پژوهش، ضروری است سیاست گذاران و مدیران کشاورزی با بهره گیری از فناوری های هوشمند آبیاری، تدوین سیاست های حمایتی و برگزاری دوره های آموزشی، به مدیریت بهینه منابع آب و خاک اقدام کنند. همچنین توسعه مطالعات میدانی با استفاده از داده های بلندمدت، اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی ها و تقویت همکاری های بین رشته ای و بین المللی، به عنوان راهکارهای کلیدی برای کاهش عدم قطعیت ها و طراحی استراتژی های مؤثر در مدیریت منابع کشاورزی پیشنهاد می شود.

اگرچه این مطالعه با بهره گیری از آخرین مدل ها و سناریوهای بین المللی، تصویر روشنی از تأثیرات تغییر اقلیم بر کشت زعفران ارائه می کند، همچنان از محدودیت ها و عدم قطعیت های ذاتی این گونه مطالعات مصون نیست. نخست، پیش بینی های اقلیمی خود متأثر از عدم قطعیت در سناریوهای انتشار آتی، پاسخ سیستم اقلیم به افزایش غلظت گازهای

بنابراین، اگرچه روندهای کلی شناسایی شده معتبرند، مقادیر عددی دقیق ممکن است با استفاده از چارچوب‌های جدیدتر، تعدیل شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در چارچوب سناریوهای A1FI-MI و B1TME، تأثیرات قابل توجهی بر مناطق مناسب برای کشت زعفران در ایران خواهد داشت؛ به‌ویژه، سناریوی A1FI-MI که نمایانگر ادامه روند مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و افزایش گرمایش جهانی است، تغییرات شدیدتری در الگوهای دمای و بارشی ایجاد می‌کند که منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در سازگاری شرایط اقلیمی برای رشد بهینه زعفران در نواحی سنتی تولید، به‌ویژه منطقه‌های خراسان می‌شود. در مقابل، سناریوی B1TME که بر مبنای پایداری اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی تنظیم شده، تغییرات نسبتاً ملایم و قابل‌پذیری را در شرایط اقلیمی به ارمغان می‌آورد و در برخی مناطق امکان حفظ یا حتی بهبود شرایط مناسب رشد زعفران را فراهم می‌کند. با توجه به عدم قطعیت‌های ذاتی در مدل‌های بلندمدت، توصیه می‌شود پژوهش‌های آتی با استفاده از داده‌های دقیق‌تر منطقه‌ای و فناوری‌های نوین مدل‌سازی، محیط‌های کشت زعفران را با دقت بیشتری شناسایی و راهبردهای مدیریتی بهینه برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی تدوین گردد.

گلخانه‌ای (حساسیت اقلیمی)، و تغییرپذیری طبیعی اقلیم هستند. اگرچه استفاده از میانگین ۱۸ مدل گردش عمومی جو-اقیانوس تا حدی این عدم قطعیت را کاهش می‌دهد، نمی‌توان آن را به‌طور کامل مرتفع نمود. دوم، مدل سازگاری اقلیمی کشت، اگرچه ابزاری قدرتمند است، پارامترهای آن عمدتاً براساس مقادیر سراسری و دمای میانگین تنظیم شده و ممکن است اثرات امواج گرمایی کوتاه‌مدت و شدید یا یخبندان‌های دیررس بهاره را که برای زعفران حیاتی هستند، به‌طور کامل پیش‌بینی نکند. سوم، این تحلیل بر متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) متمرکز بوده و محدودیت‌های مهم دیگری مانند دسترسی به منابع آبی زیرزمینی، کیفیت خاک، و مسائل اجتماعی-اقتصادی مؤثر بر تصمیم‌گیری کشاورزان را به‌طور مستقیم در نظر نگرفته است. بنابراین، نتایج این پژوهش باید به‌عنوان راهنمایی برای شناسایی روندهای کلان و مناطق پرخطر در نظر گرفته شده و اعتبارسنجی نهایی و برنامه‌ریزی عملیاتی مستلزم مطالعات میدانی دقیق‌تر و یکپارچه‌سازی داده‌های محلی است. علاوه بر این، این پژوهش به دلیل وابستگی به چارچوب از پیش تعریف‌شده ماژول CCAM در نرم‌افزار TerrSet، از داده‌ها و پارامترهای منطبق با چهارمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده نموده است. اگرچه این امر برای حفظ سازگاری و پایداری درونی مدل‌سازی ضروری بود، بدین معناست که یافته‌ها از پیشرفت‌ها و داده‌های به‌روزتر ارائه شده در گزارش‌های ارزیابی پنجم و ششم IPCC، که حاوی اطلاعات دقیق‌تر در مورد سیستم اقلیمی هستند، بهره نبرده‌اند.

منابع

1. Aydın, F., & Sarptaş, H. (2018). The impact of the climate change to crop cultivation: the case study with model crops for Turkey. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 512–521.
2. Bidad, H. (2016). Resilience to climate change of saffron production in the Khorasan province of Iran. *V International Symposium on Saffron Biology and Technology: Advances in Biology, Technologies, Uses and Market 1184*, 253–258.
3. Ebrahimi, M., Pouyan, M., & Nezhad, M. M. (2020). Possibility of replacing manure with other organic amendments in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation at different mother corm weights.
4. Hosseini, S.S., Nazari, M., & Eraghi Nejad, S. (2013). Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44(1), 1-16. [In Persian with English Summary].
5. 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.
6. Kouzegaran, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & Khashei-Siuki, A. (2020). Future projection of the effects of climate change on saffron yield and spatial-temporal distribution of cultivation by incorporating

- the effect of extreme climate indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1109–1118.
7. Lee, C.-C., Zeng, M., & Luo, K. 2024. How does climate change affect food security? Evidence from China. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107324.
 8. 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.
 9. Ngoy, K. I., & Shebitz, D. 2020. Potential impacts of climate change on areas suitable to grow some key crops in New Jersey, USA. *Environments*, 7(10), 76.
 10. Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
 11. Rezvani Moghaddam, P., Khorramdel, S., & Mollafilabi, A. (2015). Evaluation of soil physical and chemical characteristics impacts on morphological criteria and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Saffron Research*, 3(2), 188–203.
 12. Riahi, R., Mirdamadi, S. M., Hoseini, S. J. F., & Najafabadi, M. O. (2024). How to develop saffron business clusters in Iran. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e279525.
 13. Sadeghi, B. (2012). Effect of corm weight on Saffron flowering. In *4th International Saffron Symposium* (pp. 22–25).
 14. Shahnoushi, N., Abolhassani, L., Kavakebi, V., Reed, M., & Saghaian, S. (2020). Economic analysis of saffron production. In *Saffron* (pp. 337–356). Elsevier.
 15. Sogandi, F. 2023. Quality control and surveying the capability indices of the saffron production process. *Saffron Agronomy and Technology*, 11(4), 449–469.
 16. Vafaei, M., Ziaee, S., Mohammadi, H., & Borazjani, M. A. 2024. Spatial analysis of climate change on saffron yield (Case study of Khorasan Razavi, North Khorasan and South Khorasan cities). *Journal of Agricultural Economics Research*, 16(2),
 17. Zanganeh, M., Alizadeh, A., & Shayan, A., 2014. Analysis of climate parameters, temperature and rainfall Bojnourd city of 1977 to (2010). *The First National Conference Meteorological*. Tehran, Iran. [In Persian].

Comparative Analysis of A1FI-MI and B1TME Climate Change Scenarios on Iranian Saffron Cultivation

Iman Saeedi,^{1*} Samar Mortazavi,² Milad Hassanvand³

Received: 20/09/2025

Accepted: 16/12/2025

Extended Abstract

Introduction: Saffron (*Crocus sativus* L.), the dried stigmas of the *Crocus sativus* flower, is the world's most valuable spice by weight. Its exceptional economic value is underpinned by a precise dependence on specific climatic conditions, making it acutely vulnerable to global climate change. As the dominant global producer, contributing approximately 90% of world output, Iran's agricultural sector, rural economies, and export revenues are intrinsically linked to the sustainable cultivation of this "red gold." The crop's phenology, especially its critical flowering stage, is highly sensitive to subtle variations in temperature and precipitation regimes, underscoring the necessity for long-term strategic planning.

This study conducts a rigorous comparative analysis of the potential impacts of two divergent climate change scenarios on the spatial and qualitative suitability for saffron cultivation across Iran. These scenarios represent contrasting futures for global development and energy policy. The first, the A1FI-MI scenario from the IPCC's Special Report on Emissions Scenarios (SRES), projects a future of rapid economic growth driven by intensive fossil fuel consumption. The second, the B1TME scenario, envisions a globally convergent pathway prioritizing sustainability, characterized by a transition to a service and information economy and the widespread adoption of clean, resource-efficient technologies.

The primary objective of this research is to project 21st-century changes in key climatic variables—specifically temperature and precipitation—and to quantitatively evaluate their effects on the geographic distribution and quality of land deemed climatically optimal for saffron production in Iran. By employing advanced geospatial modeling, this work addresses a critical knowledge gap. It provides a detailed, scenario-based assessment essential for policymakers, agricultural planners, and farmers to formulate robust, long-term adaptation and resource management strategies to protect this cornerstone of Iranian agriculture.

Materials and Methods: This study employed an integrated geospatial modeling approach, primarily utilizing the TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System. The core climatic analysis was performed using the system's Climate Change Adaptation Modeler (CCAM) component. The methodology comprised four sequential steps.

First, the two representative emission scenarios, A1FI-MI (fossil-fuel intensive) and B1TME (sustainable transition), were selected to encompass a range of plausible future climates.

Second, the MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) model was employed to generate global-scale temperature change projections. Key MAGICC parameters were configured following IPCC guidelines, including a climate sensitivity of 3.0°C for a doubling of atmospheric CO₂ concentration. The baseline year was set to 1990, with projections extended to 2100.

Third, the SCENGEN (SCENario GENerator) model was used to statistically downscale the global climate projections from MAGICC. SCENGEN translated broad-scale temperature changes into high-resolution (approximately 50 km) spatial datasets of projected changes in temperature and precipitation. To enhance the reliability of the projections and account for inter-model variability, an ensemble average of 18 different Ocean-Atmosphere General Circulation Models (OAGCMs) was computed for each scenario for the target years of 2070 and 2100.

The fourth step involved assessing the impact of these projected climatic changes on saffron cultivation suitability, using the Crop Climate Suitability Modeling (CCSM) module within TerrSet. The CCSM model evaluates suitability based on a crop's specific biophysical requirements, defined by optimal and absolute threshold parameters for temperature (e.g., TMIN, TOPMIN, TOPMAX, TMAX, KTMP) and precipitation (e.g., RMIN, ROPMIN, ROPMAX, RMAX). The parameterization for saffron was calibrated using established ecological requirements from the scientific literature. To ensure practical applicability, the initial climatic suitability outputs were refined by applying a series of constraining "mask" layers. These masks systematically excluded areas unsuitable or unavailable for agriculture, including urban zones, water bodies, dense forests, protected areas, and lands with slopes exceeding 8 degrees, based on data from MODIS land cover classification.

1. Assistant Prof., Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran, Corresponding Author. Email: isaeeedi@malayeru.ac.ir

2. Associate Prof., Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran, Email: mortazavi.s@gmail.com

3. MSc Student, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran, Email: miladhassanvand1992@gmail.com

The final outputs were detailed raster maps classifying Iran's land area into six suitability categories for saffron cultivation: "Unsuitable," "Very Low," "Low," "Medium," "High," and "Very High."

Results

The modeling results reveal starkly divergent futures for Iranian saffron cultivation, fundamentally dependent on the global emission pathway followed.

Under the high-emission A1FI-MI scenario, a pronounced and sustained increase in global mean temperature was projected, driving severe alterations in Iran's local climatic patterns. The analysis indicates a dramatic contraction in land area with high suitability for saffron. Specifically, the area classified as "Very High" suitability plummeted from 4.05% (66,182 km²) of the country's total area in 2070 to a mere 0.62% (10,196 km²) by 2100—representing a decline of approximately 85%. Concurrently, the total area deemed "Unsuitable" for cultivation expanded significantly, rising from 79.55% to over 80.13% by the century's end. Geographically, this trend manifested as a severe degradation of suitability in the traditional saffron heartlands of the eastern provinces (South Khorasan, Razavi Khorasan, and North Khorasan), driven primarily by extreme heat stress and adverse shifts in precipitation regimes. Notably, the model projected a distinct spatial shift, with some areas in western and northwestern provinces (e.g., Kermanshah, Hamedan, and Kurdistan) emerging as newly suitable or retaining suitability due to more moderated future climate conditions.

In direct contrast, the sustainable B1TME scenario projected a far more attenuated rise in global temperatures. The consequent climatic changes across Iran were less severe, resulting in a significantly more favorable outlook. While the area of "Very High" suitability also decreased (from 3.95% to 0.93% by 2100), the overall landscape of suitability underwent a transformative change. The most critical finding was the substantial contraction of "Unsuitable" land, which fell from 78.72% in 2070 to 55.02% in 2100. This reduction corresponded with a marked expansion in land area classified as having "Low" suitability (increasing from 5.07% to 14.59%) and "Very Low" suitability (increasing from 3.05% to 12.14%). This indicates that while optimal "Very High" suitability zones diminish under both scenarios, the B1TME pathway preserves an extensive strategic reserve of land with marginal to moderate climatic suitability. This provides critical adaptive capacity and long-term resilience, allowing cultivation to persist—though potentially requiring adjusted agronomic practices—across significantly larger portions of the country, particularly in central and western regions.

Discussion and Conclusion

The findings of this study underscore the profound threat that unmitigated climate change poses to Iranian saffron production, while simultaneously highlighting how global policy decisions critically determine the severity of these impacts. The drastic reduction in climatically suitable land under the A1FI-MI scenario quantifies the significant yield declines previously projected for eastern Iran under high-emission pathways, driven primarily by increased extreme heat and altered precipitation.

The identification of a potential north-western shift in suitability under the A1FI-MI scenario offers a crucial, novel insight, though it necessitates detailed investigation into non-climatic factors such as soil quality, water resource availability, and socio-economic readiness for adopting a new cash crop in these regions.

The most salient conclusion is the clear quantitative evidence for the benefits of mitigation. The comparative success of the B1TME scenario in preserving a vast area of cultivable land validates the imperative to integrate sustainable development and clean energy policies into strategic planning. This research moves beyond identifying vulnerabilities; it provides a compelling, evidence-based argument that a sustainable global pathway is not merely an environmental goal but a direct economic necessity for safeguarding Iran's flagship agricultural product and the livelihoods it supports.

In conclusion, to ensure the resilience of Iran's saffron industry, the following strategic actions are recommended:

1. **Prioritize Immediate Adaptation in Vulnerable Regions:** Develop and deploy climate-smart agricultural practices in the eastern heartlands. This requires investment in efficient irrigation technologies, the development of drought and heat-tolerant cultivars, and the implementation of soil moisture conservation techniques.
2. **Champion Sustainable Development Policies:** The results unequivocally demonstrate that a B1TME-like pathway offers a far more secure future. National policy should actively promote reduced fossil fuel dependency, renewable energy adoption, and the integration of environmental sustainability into all economic and agricultural planning.
3. **Initiate Feasibility Studies in Emerging Regions:** Conduct detailed agro-ecological and socio-economic feasibility studies in the identified potential new suitable areas in western and northwestern Iran. This preparatory work is essential to inform a managed, equitable, and beneficial geographic transition, should it become necessary.
4. **Enhance Integrated Research and Monitoring:** Invest in long-term, high-resolution regional climate modeling and establish robust environmental monitoring networks. Future research must integrate climatic projections with hydrological data, detailed soil mapping, and socio-economic analysis to provide a holistic foundation for adaptive decision-making.

Keywords: Adaptation, Suitability Assessment, Global Warming, MAGICC-SCENGEN.