J. Soil Plant Interact. 2026; 17(1): 95–117. https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21881

**Journal of Soil and Plant Interactions**

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

# Projecting The Impact of Climate Change on Temperature Extreme Indices and Phenological Stages of Key Agricultural Crops in Mazandaran Province, Iran

**Reza Norooz-Valashedi*** **and Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi**

Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
* Corresponding author, Email: r.norooz@sanru.ac.ir

(Received: 1 January 2026; Revised: 20 February 2026; Accepted: 22 February 2026)

## Abstract

**Background and Objective:** The sensitivity of agricultural crops to climatic fluctuations is well-documented. However, assessing the impact of future climate scenarios on the phenological stages of key crops in Mazandaran province—a region with distinct climatic diversity and cultivation practices—remains a critical research need. This study aims to project changes in extreme temperature indices and their subsequent effects on the timing of phenological stages for key agricultural crops in Mazandaran province under different climate change scenarios.

**Methods:** Minimum and maximum temperatures for future periods under the SSP245 and SSP585 scenarios were simulated and statistically downscaled. Extreme temperature indices were then calculated using the RClimDex software. Breakpoints in these indices were identified using the Pettitt test and spatially mapped within a GIS environment. Subsequently, by integrating available climatic and plant data with the ChillR model, phenological shifts for horticultural (citrus, kiwifruit and peach) and field (rice and rapeseed) crops were projected under the SSP245 and SSP585 scenarios and compared against the baseline period (2000–2020).

**Results:** The results indicate that in the future, heat-related indices such as the number of hot days, warm nights, and the length of the warm period will show a significant increasing trend. Conversely, cold-related indices such as frost days and the length of the cold period will decrease. Furthermore, the findings suggest that rising temperatures will shift the cooling and heating phases, leading to either a delay or an advancement in the flowering time of different crops. Climate change may also positively affect the yield of some crops, such as kiwifruit.

**Conclusion:** Increasing temperatures under future scenarios will lead to shifts in plant phenology, alterations in the suitability of agricultural lands, and impacts on farming profitability. These projected climatic impacts underscore the importance of adjusting planting calendars and adopting climate adaptation strategies in sustainable agricultural management.

**Keywords:** Pettitt test, Planting calendar, Climate, Plant, Modeling, Chilling requirement.

**How to Cite:** Norooz-Valashedi, R., Bararkhanpour Ahmadi, S., 2026. Projecting the impact of climate change on temperature extreme indices and phenological stages of key agricultural crops in Mazandaran province, Iran. J. Soil Plant Interact. 17(1), 95–117 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21881

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. 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.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ (۱)۱۷: ۱۱۷-۹۵، https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21881

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

# پیش‌یابی اثر تغییر اقلیم بر نمایه‌های حدی دما و مراحل فنولوژیک محصولات کشاورزی شاخص در استان مازندران (ایران)

**رضا نوروز ولاشدی* و صدیقه برارخان‌پور احمدی**

گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: r.norooz@sanru.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۳)

## چکیده

**پیشینه پژوهش و هدف:** حساسیت محصولات کشاورزی به نوسانات اقلیمی در پژوهش‌های مختلف تأیید شده است؛ با این‌حال، بررسی تأثیر مدل‌های اقلیمی آینده بر مراحل فنولوژیک محصولات کلیدی استان مازندران که دارای تنوع اقلیمی و کشت‌های خاص است، همچنان یک نیاز پژوهشی باقی مانده است. بنابراین، هدف این پژوهش، برآورد تغییرات احتمالی در نمایه‌های حدی دما و تأثیر آن بر تغییر زمان‌بندی مراحل فنولوژیک محصولات کشاورزی شاخص استان مازندران تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم است.

**روش‌ها:** ابتدا دمای کمینه و بیشینه برای سناریوهای اقلیمی SSP245 و SSP585 و در دوره‌های آینده شبیه‌سازی و با روش‌های آماری مقیاس‌کاهی شد. سپس نمایه‌های حدی دما با ابزار RClimDex محاسبه شد و تغییرات نقاط شکست با آزمون پتیت تحلیل شده و در محیط GIS پهنه‌بندی شد. سپس با استفاده از داده‌های اقلیمی و گیاهی موجود و با بهره‌گیری از مدل ChillR، تغییرات فنولوژیک محصولات باغی (مرکبات، کیوی و هلو) و زراعی (برنج و کلزا) بر اساس سناریوهای SSP245 و SSP585 محاسبه شده و سپس با مراحل فنولوژیک محصولات در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۰) مقایسه شد.

**نتایج:** نتایج نشان داد که در آینده، نمایه‌های مربوط به گرما مانند افزایش روزهای گرم، شب‌های گرم و طول دوره گرما روند افزایشی معنی‌داری خواهند داشت، درحالی‌که نمایه‌های مربوط به سرما مانند روزهای یخبندان و طول دوره سرما کاهش می‌یابند. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن است که افزایش دما موجب جابه‌جایی در فازهای سرمایشی و گرمایشی و در نتیجه تأخیر یا تعجیل در زمان شکوفه‌دهی محصولات مختلف خواهد شد و تغییر اقلیم ممکن است در برخی محصولات مانند کیوی، تأثیر مثبتی بر عملکرد داشته باشد.

**نتیجه‌گیری کلی:** افزایش دما تحت سناریوهای آینده منجر به جابجایی فنولوژی گیاهان، تغییر تناسب زمین‌های زراعی و تأثیر بر سودآوری کشاورزی منطقه می‌شود که به آثار اقلیمی آینده، بر اهمیت تنظیم تقویم کاشت و استفاده از راهبردهای سازگاری اقلیمی در مدیریت پایدار کشاورزی تأکید دارد.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون پتیت، تقویم کاشت، اقلیم، گیاه، مدل‌سازی، نیاز سرمایی.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

**مقدمه**

اندازه‌گیری درست پارامترهای محیطی برای بررسی نمو و بقای گیاه، و همچنین برای زمان‌بندی انتقال رشد، از جمله تغییر از رشد رویشی به رشد زایشی، اساسی است (Vicentini et al., 2023). تاریخ گل‌دهی و مراحل فنولوژیک تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط هوا و اقلیم‌شناسی به‌ویژه عوامل دما و بارش قرار می‌گیرد. طول مدت فنوفازها در گیاهان مختلف با دمای بیشینه همبستگی منفی دارد و مدت زمانِ کوتاه‌تری در پایان فصل کاشت مشاهده می‌شود (Riya et al., 2022). همچنین، نورِ مناسب یک عامل مهم است که می‌تواند بر تاریخِ گل‌دهی محصولات مختلف به‌ویژه برنج تأثیر بگذارد. مدت نوری که گیاه برنج دریافت می‌کند، می‌تواند بر فعالیت‌های زیستی گیاه تأثیر گذاشته و زمان گل‌دهی آن را تغییر دهد. گیاه برنج دارای یک مسیر گل‌دهی فتوپریودی است که در آن طول روز نقش اصلی را ایفا می‌کند، هرچند دما نیز به‌عنوان عامل مؤثر بر زمان‌بندی گل‌دهی عمل می‌کند (Kazemi et al., 2016; Vicentini et al., 2023). دما و بارندگی در مرحله پایانی برنج به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد. دمای مناسب و رطوبت کافی می‌توانند به زمان‌بندی دقیق گل‌دهی برنج کمک کرده و عملکرد محصول را بهبود بخشند. افزایش دما می‌تواند مرحله گل‌دهی را تسریع کند، درحالی‌که کاهش دما ممکن است باعث تأخیر در گل‌دهی شود (Arif et al., 2017). همچنین، بارش‌های فراوان می‌توانند به رشد و گل‌دهی محصولات مختلف کمک کنند اما باید به چگونگی و زمان‌بندی این بارش‌ها در طول فصل رشد توجه شود.

برای نمونه در مورد محصول راهبردی استان مازندارن (برنج)، تاریخ نشاءکاری نیز بر تاریخ گل‌دهی و ویژگی‌های عملکرد آن تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری که نشاءکاری زودتر منجر به گل‌دهی زودتر و عملکرد بیشتر می‌شود (Song et al., 2012). در پژوهشی، Xuan et al. (2019) به بررسی تأثیر عوامل هواشناسی بر عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی به‌ویژه در مرحله پرشدن دانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد دما تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصول در مرحله پرشدن دانه داشته است. نتایج پژوهش Babaeian and Tavasoli (2000) نیز نشان داد که دمای مربوط به ژلاتینه‌شدن محصول راتون در مازندران که تحت تاثیر شرایط آب‌وهوایی است، بیشتر از دمای ژلاتینه‌شدن محصول اصلی است، اما بین غلظت ژل و میزان آمیلوز محصول اصلی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین نتایج پژوهش Shadmehri et al. (2018) نشان داد که دما و طول روز مناسب بر عملکرد کشت توت فرنگی در شهرستان ساری تأثیرگذار است.

شاخص‌های حدی اقلیمی توسعه‌یافته توسط گروه پژوهشی پایش نمایه‌های تغییر اقلیم (ETCCDI[1]) به‌عنوان چارچوب استاندارد جهانی برای پایش تغییرات در رخدادهای حدی دما و بارش شناخته می‌شوند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که شاخص‌هایی مانند دمای بیشینه (TXx)، دمای کمینه (TNn) و طول دوره گرم (WSDI) نسبت به میانگین‌های ساده دمایی، حساسیت بیشتری به تغییر اقلیم داشته و ارتباط قوی‌تری با پاسخ‌های فنولوژیک گیاهان نشان می‌دهند (Zhang et al., 2011). از طرفی نسل جدید مدل‌های اقلیمی در چارچوب گزارش فاز ششم مدل‌های جفت‌شده تغییر اقلیم (CMIP6[2]) با بهبود پارامترسازی فرآیندهای فیزیکی و سناریوهای مبتنی بر مسیرهای اجتماعی–اقتصادی (SSPs)، عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را نسبت به نسل پیشین مدل‌ها کاهش داده‌اند. با این‌حال، بسیاری از پژوهش‌های پیشین در ایران مبتنی بر CMIP5 بوده و تحلیل شاخص‌های حدی دما در چارچوب SSPs جدید هنوز به‌طور جامع انجام نشده است (Eyring et al., 2016). به‌دلیل اهمیت اثر تغییر اقلیم در منطقه، کشف و آشکارسازی آن امری ضروری در برنامه‌ریزیِ بخش کشاورزی استان است. با توجه به شواهد متعدد مبنی بر تغییرات محسوس در الگوهای اقلیمی و پیامدهای آن بر چرخه‌های زیستی گیاهان (Parmesan and Hanley, 2015; Bhattacharya, 2022)، تحلیل دقیق و ارائه آن راهگشاست.

1. Expert Team on Climate Change Detection and Indices

2. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

استان مازندران به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید محصولات زراعی و باغی کشور، به‌ویژه برنج، در دهه‌های اخیر با نوسانات دمایی، تغییر در الگوهای بارش و دگرگونی زمان‌بندی فصل‌های رشد مواجه بوده است (Bannayan et al., 2011). این تغییرات می‌توانند نه‌تنها نیاز سرمایی گیاهان و زمان گل‌دهی را دگرگون کنند، بلکه با ایجاد هم‌پوشانی‌های نامطلوب بین مراحل حساس رشد و رخدادهای حدی اقلیمی (مانند موج‌های گرما)، عملکرد و کیفیت محصول را به‌شدت کاهش دهند. از این‌رو، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر نمایه‌های حدی اقلیمی و مراحل کلیدی فنولوژیک محصولات زراعی و باغی استان مازندران، گامی ضروری در راستای مدیریت درست منابع و سازگاری هوشمندانه کشاورزی منطقه با شرایط اقلیمی آینده است. پژوهش‌های مختلفی، تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی جهانی را مورد بررسی قرار داده است (Habib-ur-Rahman et al., 2022; Guo et al., 2022; Bibi and Rahman, 2023; Rajabalinejad et al., 2023)، اما در ایران، به‌ویژه در استان‌هایی با اهمیت راهبردی مانند مازندران، تحلیل‌های پیشین عمدتاً بر مدل‌های قدیمی‌تر تغییر اقلیم متمرکز بوده‌اند و اغلب به شاخص‌های دمایی ساده اکتفا کرده‌اند (Abshenas et al., 2023; Vafaee et al., 2024; Vahdatifar et al., 2025). ولی پژوهش‌های محلی و منطقه‌ای که بتوانند این تغییرات را با جزئیات اقلیمی و زیست‌شناختی (فنولوژیک) برای یک محصول خاص پیوند دهند، با وجود گسترش پژوهش‌های تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، هنوز چارچوبی یکپارچه برای پیوند کمّی شاخص‌های حدی دما با پویایی مراحل فنولوژیک محصولات در مقیاس منطقه‌ای ایران ارائه نشده و اغلب پژوهش‌های ملی به میانگین‌های گرمایی بسنده کرده‌اند.

این پژوهش با اتکا به خروجی مدل‌های نسل جدید CMIP6 تحت سناریوهای SSP، برای نخستین‌بار تغییرات نمایه‌های حدی دما را به‌صورت سناریو محور با مراحل حساس فنولوژیک محصولات راهبردی مازندران هم‌بسته و کمّی‌سازی می‌کند و از این راه مبنایی تحلیلی برای بازطراحی تقویم زراعی و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی کشاورزی منطقه فراهم می‌آورد. این پژوهش در دو محور کلیدی شامل استفاده از سناریوهای اقلیمی جدید و تلفیق شاخص‌های حدی دما و فنولوژیک تخصصی محصولات متمرکز است که مدل‌سازی هم‌زمان اثر تغییرات در نمایه‌های حدی دما بر مراحل فنولوژیک محصولات شاخص مازندران (مانند نیاز سرمایی و زمان گل‌دهی) را بر اساس سناریوهای اقلیمی آینده مورد بررسی قرار می‌دهد.

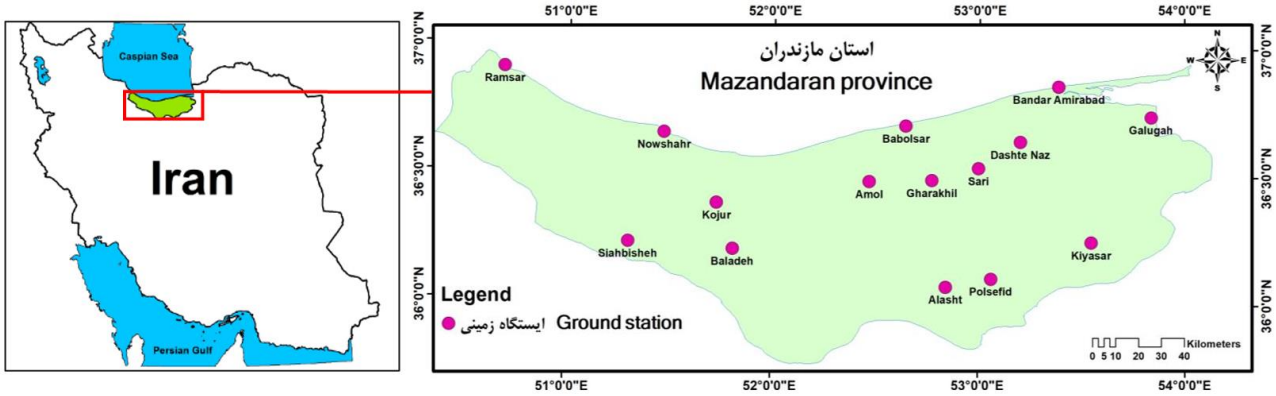
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد بررسی

در پژوهش حاضر، استان مازندران به‌عنوان منطقه مورد بررسی دارای مساحتی تقریباً برابر ۲/۴ میلیون هکتار در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (Omidvar and Kavian, 2011) (شکل ۱). محدوده ارتفاعی این استان از ۲۱- تا ۵۶۷۰ متر از سطح دریاهای آزاد است. مقدار بارش‌های جوی در این استان حدود ۷۱۰ میلی‌متر در سال و میانگین دما حدود ۱۷ درجه سلسیوس است (Norooz-Valashedi et al., 2024). از غرب به‌سمت شرق استان، از مقدار بارش کاسته شده و بر میزان دمای هوا افزوده می‌شود. استان مازندران به لحاظ ویژگی‌های دمایی در گروه اقلیم معتدل و مرطوب گروه‌بندی می‌شود (Taherigorji et al., 2026).

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل داده‌های کمینه و بیشینه دما برای ۱۵ ایستگاه سینوپتیک استان مازندران در یک دوره آماری مشترک (۲۰۲۰-۲۰۰۰) است که از سازمان هواشناسی دریافت شد. همچنین داده‌های سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) برای مدل اقلیمی MRI-ESM2-0 برای ایستگاه‌های مختلف استان استخراج شد؛ بدین منظور، ابتدا داده‌های تاریخی طی دوره پایه و داده‌های سناریو برای دوره آینده (تا سال ۲۱۰۰) برای مدل اقلیمی مورد بررسی از پایگاه




**شکل ۱.** منطقه مورد بررسی و ایستگاه‌های مورد استفاده

**Fig. 1.** Study area and stations used

داده ESGF[1] دریافت شد. سپس با در دست داشتن داده‌های جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی شامل طول و عرض جغرافیایی و کدهای موجود در زبان برنامه‌نویسی R، سری زمانی داده‌های تاریخی و سناریو از مدل برای هر ایستگاه مورد نظر استخراج شد. سپس برای هر موقعیت جغرافیایی، اقدام به مقیاس‌کاهی آماری داده‌ها با روش درون‌یابی دوخطی[2] در سطح ایستگاه‌های مورد نظر شد.

از داده‌های مشاهداتی ایستگاه زمینی برای بررسی تغییرات متغیرهای دمایی در دوره حاضر و نیز مقیاس‌کاهی داده‌های مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی، و از داده‌های مدل اقلیمی به‌منظور بررسی تغییرات متغیرهای دمایی در دوره آینده بر اساس سناریوهای مختلف اقلیمی استفاده شد. بررسی نقطه شکست یا تغییرات ناگهانی در نمایه‌های حدی دمایی در ۱۵ ایستگاه همدیدی استان مازندران در دوره گذشته و نیز بر اساس سه سناریوی تغییر اقلیم خوش‌بینانه SS126، حد متوسط SSP245 و بدبینانه SSP585 و برای دوره زمانی آینده (۲۱۰۰–۲۰۲۰) با استفاده از آزمون همگنی پتیت انجام شد؛ سپس نتایج برای استان مازندران در محیط GIS پهنه‌بندی شد.

## مدل‌های تغییر اقلیم

مدل‌های جفت‌شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6)، جدیدترین گزارش انتشاریافته از سری مدل‌های تغییر اقلیم می‌باشند. مدل مورد استفاده شامل مدل MRI-ESM2-0 از سری مدل‌های SSP است که داده‌های کمینه و بیشینه دما برای این مدل در دسترس بوده است. در این پژوهش از سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 برای دوره آینده (۲۱۰۰–۲۰۲۰) استفاده شد. بدین منظور، ابتدا داده‌های تاریخی طی دوره پایه و داده‌های سناریو برای دوره آینده (تا سال ۲۱۰۰) برای مدل اقلیمی مورد بررسی از پایگاه داده ESGF مربوطه برای کل جهان دریافت شد. سپس با در دست داشتن داده‌های جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی شامل طول و عرض جغرافیایی و کدهای موجود در زبان برنامه‌نویسی R، سری زمانی داده‌های تاریخی و سناریو از مدل برای هر ایستگاه مورد نظر استخراج شد. سپس برای هر موقعیت جغرافیایی، اقدام به مقیاس‌کاهی آماری داده‌ها با روش درون‌یابی دوخطی در سطح ایستگاه‌های مورد نظر شد.

## مقیاس‌کاهی[3] آماری مدل‌های تغییر اقلیم

مدل‌های گردش عمومی جو به‌دلیل مقیاس بزرگ سلول‌های محاسباتی آن نسبت به مکان و زمان منطقه مورد بررسی، نمی‌تواند به‌صورت مستقیم برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی منطقه و یا نقطه مورد نظر استفاده گردد و نیاز به ریزمقیاس‌گردانی

1. Earth System Grid Federation (https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl)

2. Bilinear interpolation
3. Downscaling

یا مقیاس‌کاهی خروجی‌های این مدل‌ها است. مقیاس‌کاهی، روشی برای تولید داده‌های آب‌وهوایی با وضوح زیاد از یک سری مدل‌های گردش عمومی جو با قدرت تفکیک کم است و بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از این روش می‌توان شرایط آب–وهوایی در مقیاس ایستگاهی و محلی را توضیح داد (Sobhani et al., 2017). در این پژوهش، داده‌های تغییر اقلیم با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی در سطح ایستگاه‌های مورد بررسی استخراج شد. در این روش از چهار پیکسل همسایه هر پیکسل استفاده شده و میان آن‌ها درون‌یابی برای یافتن پیکسل مورد نظر انجام می‌گردد. در این روش، ابتدا میان هر دو پیکسل مقابل یک درون‌یابی خطی انجام می‌شود، سپس با استفاده از پیکسل‌های همسایه، مقدار پیکسل مورد نظر محاسبه می‌شود. این الگوریتم برای کاهش مقیاس داده‌های شبکه‌ای است (Wang et al., 2012).

**نمایه‌های حدی دما**

در پژوهش حاضر، از نمایه‌های دمایی که به‌وسیله گروه کارشناسی (CCI WMO[1])، (JCOMM[2]) و (CLIVAR[3]) به‌عنوان نمایه‌های حدی و نمایه‌های تغییرات آب‌وهوایی تعریف شده است، استفاده شد. بنابراین پس از دریافت خروجی مدل‌ها و ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها، داده‌ها در دوره آینده و بر اساس سه سناریوی مورد نظر در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی گروه‌بندی شد. برای استخراج نمایه‌های مبتنی بر کمینه و بیشینه دمای روزانه از نرم‌افزار RClimDex استفاده شد (Zhang and Yang, 2004). تیم کارشناسی آشکارسازی و نمایش تغییر اقلیم و نمایه‌ها (ETCCDI[4]) مجموع ۲۷ نمایه حدی برای دما و بارش در زبان برنامه‌نویسی R در غالب بسته Rclimdex و بر اساس الگوریتم‌های بهبودیافته و کاهش خطای عددی طراحی کرده است (Zhang and Yang, 2004) که از بین این ۲۷ نمایه ۱۱ نمایه مربوط به بارش و ۱۶ نمایه مربوط به دما است (Sillmann and Roeckner, 2008). در این پژوهش ۱۶ نمایه حدی دما برای منطقه مورد بررسی در مقیاس‌های سالانه و ماهانه محاسبه شده و وجود روند و نقطه شکست در این نمایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمایه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

**آزمون ناپارامتری پتیت**

این آزمون بیان‌گر تغییرات سریع در سری‌های زمانی شامل کاهش یا افزایش ناگهانی در ویژگی‌های آماری یک سری زمانی است (Mendes et al., 2020; Mendes et al., 2022; Mersin et al., 2022; Yashas Kumar and Varija, 2023). این روش یک آزمون ناپارامتری بوده که برای یافتن نقاط تغییر در یک سری زمانی استفاده می‌گردد و روشی برای تشخیص تغییرات معنی‌دار در میانگین سری زمانی است. بر اساس این آزمون، در مکانی از سری زمانی که نقطه تغییر وجود داشته باشد، سری مورد نظر در آن مکان به دو جزء سری تقسیم می‌شود. در صورت معنی‌دارشدن نقطه شکست در سری مورد نظر، نسبت مقادیر میانگین اجزاء سری پیش و پس از نقطه تغییر، برای تحلیل بزرگی شکست به‌کار گرفته می‌شود. برای سری‌های زمانی که نقطه شکست معنی‌دار را نشان نمی‌دهد، آزمون روند بر روی کل سری اعمال می‌شود. به‌منظور دستیابی به داده‌های بیشتر در مورد این آزمون و روابط موجود به پژوهش Mersin et al. (2022) مراجعه شود. به‌منظور بررسی تغییرات ناگهانی یا نقطه شکست بر روی سری زمانی نمایه‌های حدی دما و بارش تحت سناریوهای آینده (SSP24 و SSP585)، آزمون ناپارامتری پتیت بر روی سری زمانی داده‌های هر نمایه اعمال شد و سپس نمایه‌های حدی دارای نقطه شکست معنی‌دار انتخاب شدند. در گام بعد میانگین سری زمانی هر نمایه که دارای نقطه شکست، پیش و پس از زمان وقوع تغییر ناگهانی (سال وقوع) برآورد شده و توزیع مکانی تغییرات

1. The Commission for Climatology Weather Meteorology Organization
2. Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology
3. Climate Variability and Predictability Program
4. Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices

**جدول ۱.** تعریف نمایه‌های حدی اقلیمی دما پیشنهادی گروه کارشناسی CLIVAR/CCl

**Table 1.** Definition of recommended temperature climate extreme indices by the CLIVAR/CCl expert group

| نمایه<br>Index | توصیف نمایه<br>Index description | تعریف<br>Definition | مقیاس<br>Scale |
|---|---|---|---|
| FD | تعداد روزهای یخبندان<br>The number of frost days | تعداد روزهایی که دمای کمینه شبانه‌روز کمتر از صفر درجه سلسیوس است<br>The number of days when the minimum day and night temperature is below 0°C | روز<br>day |
| SU25 | تعداد روزهای تابستانی<br>The number of summer days | تعداد روزهایی که دمای بیشینه شبانه‌روز بزرگ‌تر از ۲۵ درجه سلسیوس است<br>The number of days when the maximum day and night temperature is greater than 25°C | روز<br>day |
| ID | روزهای یخی<br>Ice days | تعداد روزهایی که دمای بیشینه روزانه کوچک‌تر از صفر درجه سلسیوس باشد<br>The number of days when the daily maximum temperature is less than 0°C | روز<br>day |
| TR20 | شب‌های حاره‌ای<br>Tropical nights | تعداد روزهایی که دمای کمینه شبانه‌روز بزرگ‌تر از ۲۰ درجه سلسیوس باشد<br>تعداد روزهایی که دمای کمینه شبانه‌روز بزرگ‌تر از ۲۰ درجه سلسیوس باشد<br>The number of days when the minimum day and night temperature is greater than 20°C | روز<br>day |
| GSL | طول دوره رویش<br>The length of the growing season | طول دوره رویش<br>Length of growing season | روز<br>day |
| WSDI | نمایه طول دوره گرما<br>Heat period length index | تعداد روزهای که کمینه شش روز متوالی دمای بیشینه بیشتر از صدک ۹۰ام باشد<br>The number of days when the maximum temperature is higher than the 90th percentile for at least six consecutive days | روز<br>day |
| CSDI | نمایه طول دوره سرما<br>Cold period length index | تعداد روزهای که کمینه شش روز متوالی دمای کمینه کمتر از صدک ۱۰ام باشد<br>The number of days when the temperature is below the 10th percentile for at least six consecutive days | روز<br>day |
| TXx | بیشینه ماهانه دمای بیشینه روزانه<br>The highest monthly value of the maximum daily temperature | مقدار بیشینه ماهانه دمای بیشینه روزانه است<br>The highest monthly value is the maximum daily temperature | °C |
| TNn | کمینه ماهانه دمای کمینه روزانه<br>The lowest monthly value of the minimum daily temperature | مقدار کمینه ماهانه دمای کمینه شبانه‌روز است<br>The lowest monthly value is the minimum day and night temperature | °C |
| TNx | بیشینه ماهانه دمای کمینه روزانه<br>The maximum monthly value of the minimum daily temperature | مقدار بیشینه ماهانه دمای کمینه شبانه‌روز است<br>The highest monthly value is the minimum day and night temperature | °C |
| TXn | کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه<br>The lowest monthly value of the maximum daily temperature | مقدار کمینه ماهانه دمای بیشینه روزانه است<br>The lowest monthly value is the maximum daily temperature | °C |
| TN10P | شب‌های سرد<br>Cold nights | درصد روزهایی که دمای کمینه کمتر از صدک ۱۰ام است<br>The percentage of days when the minimum temperature is less than 10th percentile | ٪ |
| TX10P | روزهای سرد<br>Cold days | درصد روزهایی که دمای بیشینه کمتر از صدک ۱۰ام باشد<br>The percentage of days when the maximum temperature is less than 10th percentile | ٪ |
| TN90P | شب‌های گرم<br>Hot nights | درصد روزهایی که دمای کمینه بیشتر از صدک ۹۰ام است<br>The percentage of days when the minimum temperature is greater than the 90th percentile | ٪ |
| TX90P | روزهای گرم<br>Hot days | درصد روزهایی که دمای بیشینه بیشتر از صدک ۹۰ام باشد<br>The percentage of days when the maximum temperature is higher than the 90th percentile | ٪ |
| DTR | دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما<br>The range of day and night temperature changes | دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما تفاوت بین دمای کمینه و بیشینه روزانه است<br>The range of day and night temperature changes is the difference between the daily minimum and maximum temperature | ٪ |

در پیش و پس از سال وقوع با استفاده از روش‌های درون‌یابی در محیط GIS برای کل استان پهنه‌بندی شد.

## نتایج و بحث

### تغییرات ناگهانی نمایه‌های حدی دما و بارش در دوره آینده

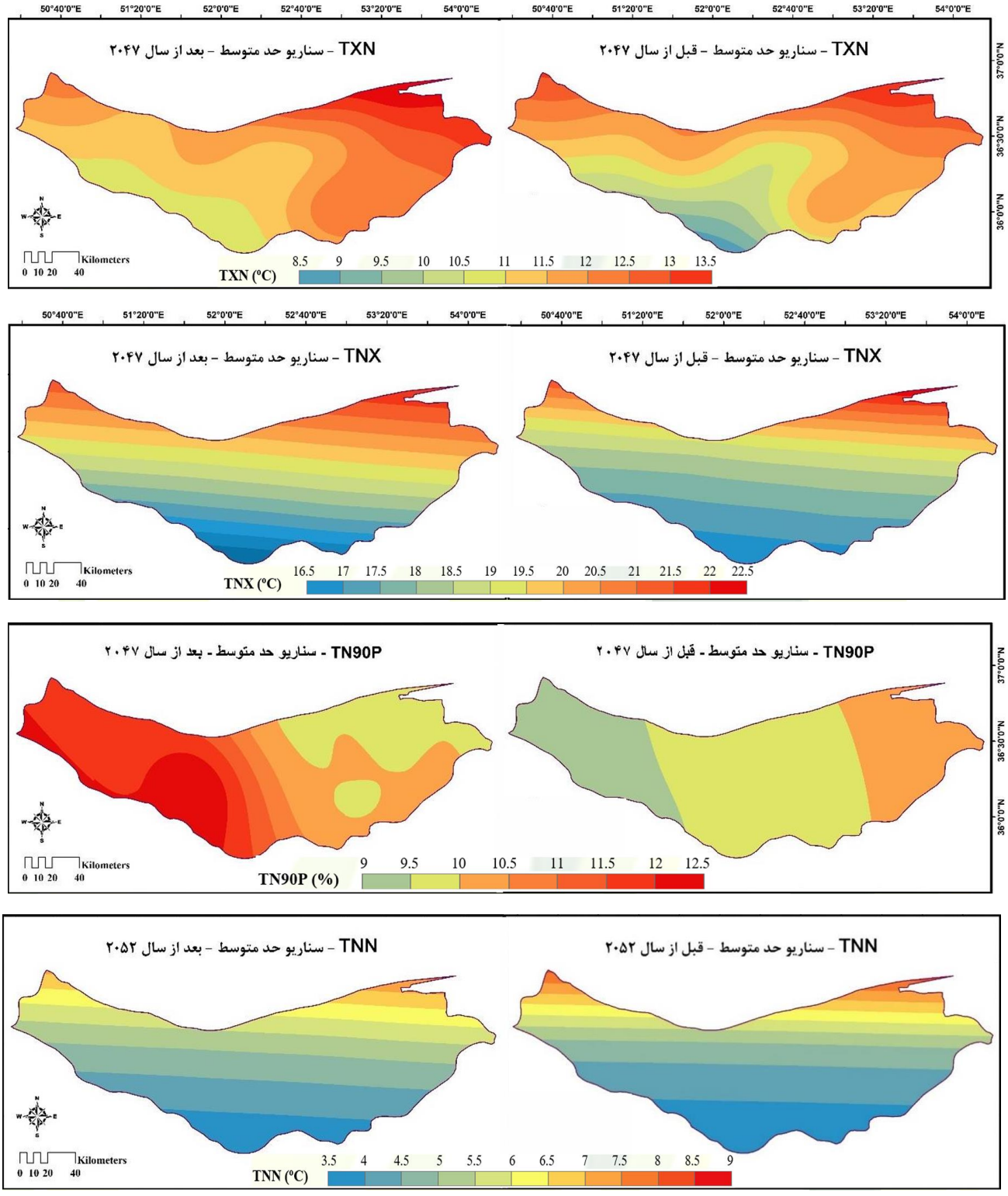
بررسی وقوع نقطه شکست یا تغییرات ناگهانی برای سری زمانی نمایه‌های حدی دما بر اساس سناریوی حد متوسط (شکل ۲) نشان داد که احتمال وقوع تغییرات ناگهانی برای نمایه‌های TXN، TNX، TN90P، TNN، TXX، TX90P و CSDI در دوره آینده وجود خواهد داشت؛ به‌طوری‌که زمان وقوع این تغییر عمدتاً در دهه ۲۰۵۰-۲۰۴۰ خواهد بود. همچنین، مقایسه میانگین این نمایه‌های دمایی در سال‌های پیش و پس از نقطه تغییر نشان می‌دهد که نمایه‌های گرم پس از نقطه شکست افزایش یافته اما نمایه‌های سرد کاهش خواهد یافت به‌طوری‌که می‌توان بیان کرد به‌سمت آینده دور تا سال ۲۱۰۰، شرایط رخداد دماهای زیاد در منطقه افزایش خواهد یافت.

بررسی زمان رخداد تغییرات ناگهانی در نمایه‌های حدی دما بر اساس سناریوی بدبینانه (شکل ۳) نیز بیان‌گر افزایش مقدار نمایه‌های گرم است؛ حال‌آنکه نمایه‌های سرد به‌سمت مقادیر بیشتر (افزایش دما) گرایش دارند. با این‌حال، زمان وقوع این تغییرات عمدتاً در دهه ۲۰۴۰-۲۰۳۰ خواهد بود. این یافته نشان می‌دهد که زمان وقوع تغییر ناگهانی در این نمایه‌ها نسبت به سناریوی حد متوسط زودتر رخ خواهد داد. همچنین مقایسه میانگین نمایه‌های دما در دوره زمانی پیش و پس از زمان وقوع نیز نشان داده است که تفاوت میانگین نسبت به سناریوی حد متوسط بیشتر خواهد بود.

### تأثیر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک (زمان شکوفه‌دهی) محصولات باغی

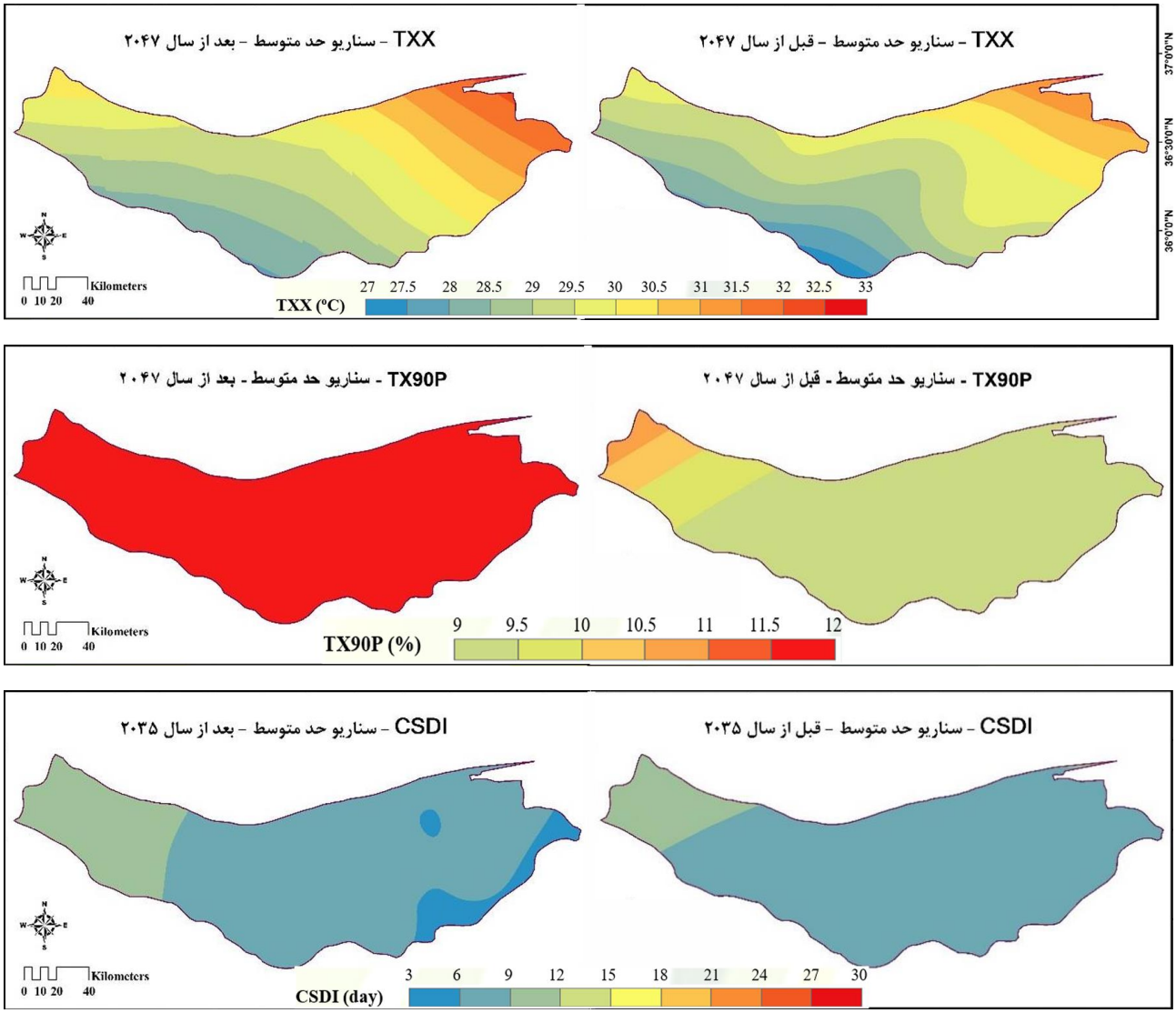
شکل ۴ تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم را بر تغییرات زمان شکوفه‌دهی مرکبات، کیوی و هلو نشان می‌دهد. بررسی تغییرات زمان شکوفه‌دهی مرکبات تحت سناریوهای مختلف آینده و نیز در دوره پایه (شکل ۴ ردیف اول) نشان داد که بر اساس سناریوهای اقلیمی آینده، میانگین دوره‌های سرمایش و گرمایش نسبت به دوره پایه تغییر خواهد کرد و بیانگر دگرگونی در رفتار گرمایی منطقه در مقیاس زمانی آینده است. در دوره پایه یا تاریخی، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۱۵-۹ درجه سلسیوس و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۷-۱۸ درجه سلسیوس بوده است. با این‌حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه است؛ به این دلیل که مدل‌های اقلیمی، تغییر اقلیم آینده را بر اساس میزان گازهای گلخانه‌ای منتشرشده پیش‌یابی کرده‌اند و برای محدوده مورد بررسی با توجه به خروجی نتایج مشمول افزایش قابل توجه دما در شب و روز است. این افزایش، به‌طور خاص بر شرایط فیزیولوژیک مرکبات تأثیر می‌گذارد، زیرا این درختان برای تولید میوه به یک دوره سرمای مشخص نیاز دارند و زمستان‌های گرم‌تر می‌تواند این نیاز سرمایی را برآورده نکند، درحالی‌که تابستان‌های گرم‌تر تنش گرمایی و خشکی را تشدید می‌کند (Norooz Valashedi and Khoshravesh, 2019). به‌طوری‌که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط (SSP245) به‌ترتیب در محدوده ۲۱-۱۴ و ۲۸-۲۲ درجه سلسیوس اما برای سناریو حالت بدبینانه (SSP585) به‌ترتیب ۲۰-۱۵ و ۳۲-۲۱ درجه سلسیوس است. با توجه به شکل ۴، تغییرات دمایی در فاز سرمایشی و گرمایشی با تأثیرگذاری بر برآورده‌شدن نیاز سرمایی و تجمع واحدهای گرمایی، سازوکار اصلی تغییر زمان شکوفه‌دهی مرکبات در سناریوهای مختلف اقلیمی محسوب می‌شود. برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه‌دهی مرکبات (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی[1]) در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت است. میانگین دما در فازهای سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه

1. Julian day




**شکل ۲.** توزیع مکانی نمایه‌های حدی دما دارای نقطه شکست معنی‌دار در دوره آینده قبل و بعد از سال وقوع نقطه شکست (تغییر) تحت سناریو حد متوسط

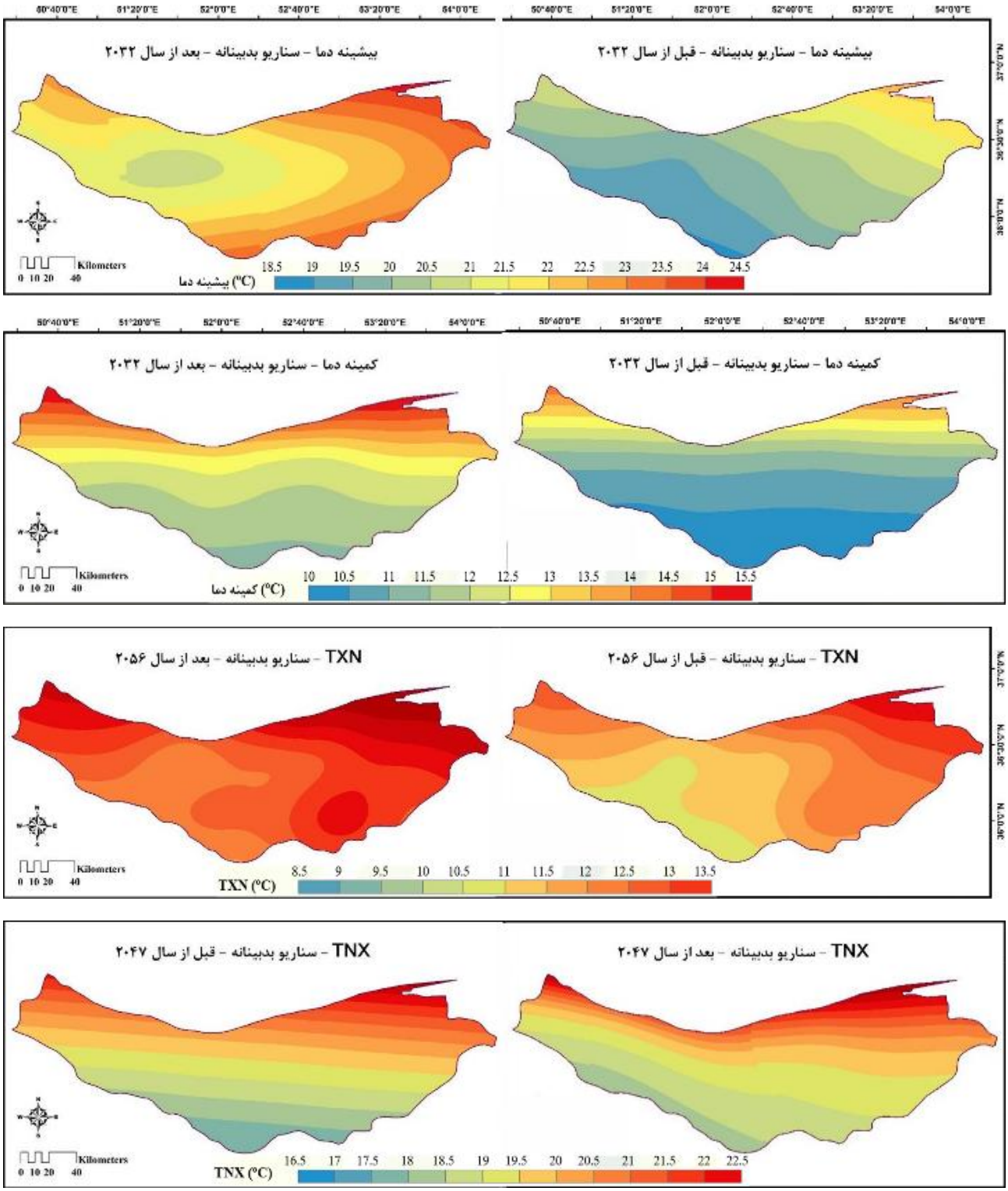
**Fig. 2.** Spatial distribution of temperature extreme indices with significant breakpoints in the future period before and after the year of the breakpoint (change) under the medium-range scenario




**ادامه شکل ۲.**

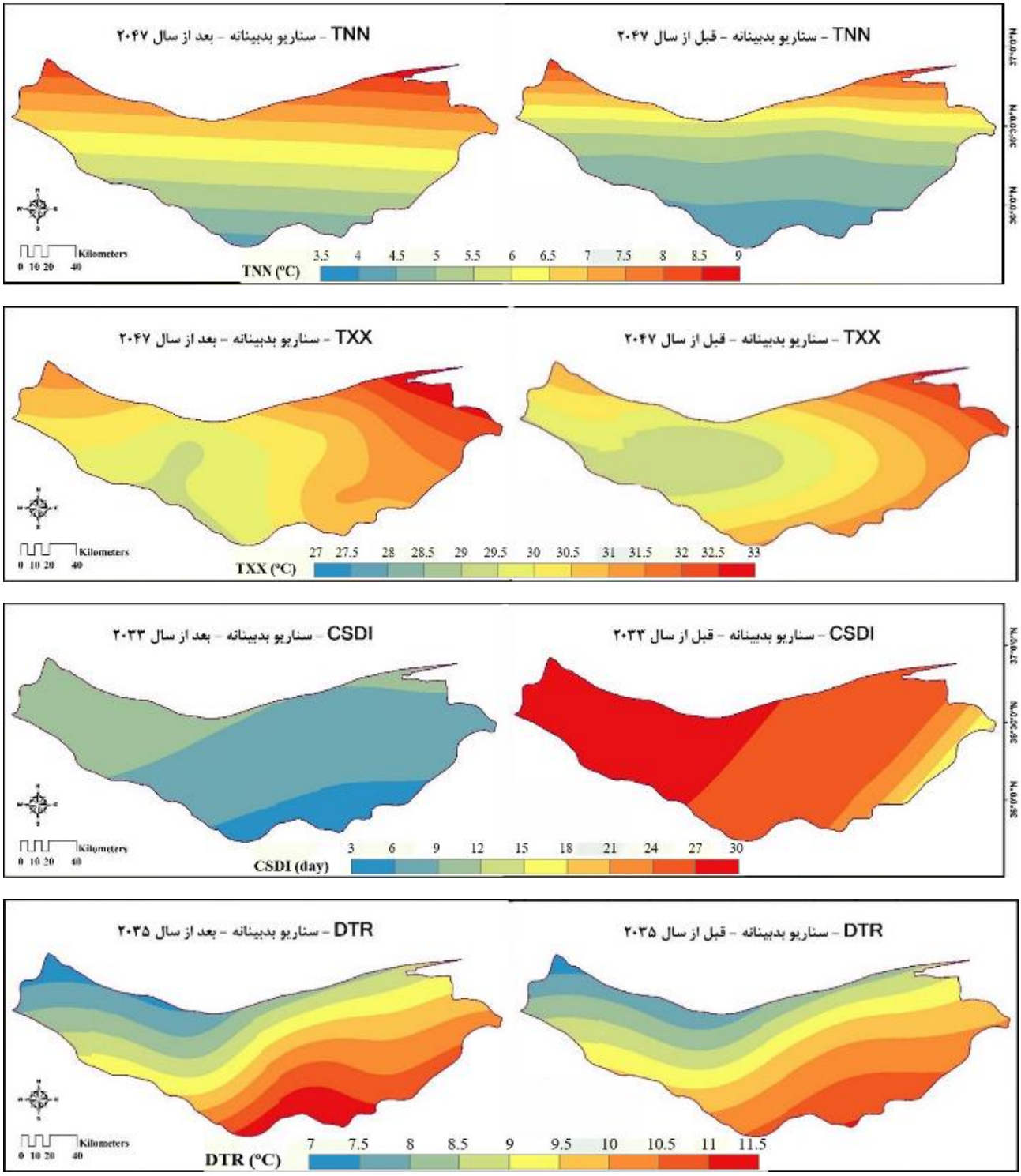
**Fig. 2.** (Continued)

افزایش یافته و موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی مرکبات شده است؛ به‌طوری‌که روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته که بیان‌گر تأخیر در زمان شکوفه‌دهی است. بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی کیوی در دوره پایه و بر اساس سناریوهای مختلف آینده (شکل ۴ ردیف دوم) نشان داده است که برای محصول کیوی نیز میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) با دوره پایه متفاوت خواهد بود. در دوره پایه، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۲۹-۲۳ درجه سلسیوس و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۱/۵-۱۷/۵ درجه سلسیوس بوده است. با این‌حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه است؛ به‌طوری‌که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو متوسط به‌ترتیب در محدوده ۳۱/۵-۲۶ و ۲۸-۱۹ درجه سلسیوس اما برای سناریو بدبینانه (SSP585) به‌ترتیب ۳۱-۳۵ و ۳۲-۲۳ درجه سلسیوس است (شکل ۴). تغییر در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای مختلف، موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی کیوی (بر اساس روز ژولیوسی) خواهد شد.



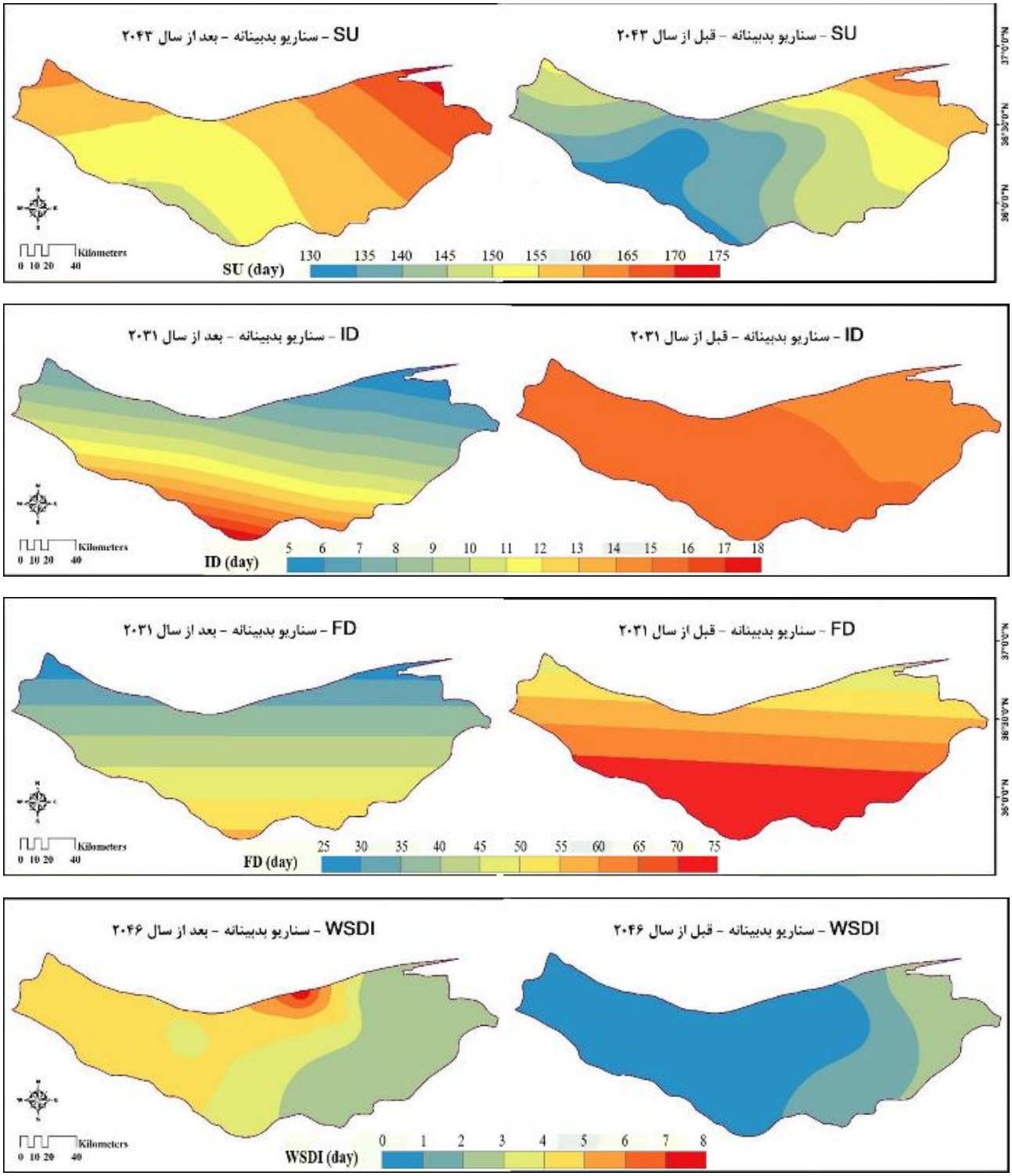

**شکل ۳.** توزیع مکانی نمایه‌های حدی دما دارای نقطه شکست معنی‌دار در دوره آینده قبل و بعد از سال وقوع نقطه شکست (تغییر) تحت سناریو بدبینانه

**Fig. 3.** Spatial distribution of temperature extreme indices with significant breakpoints in the future period before and after the year of the breakpoint (change) under the pessimistic scenario



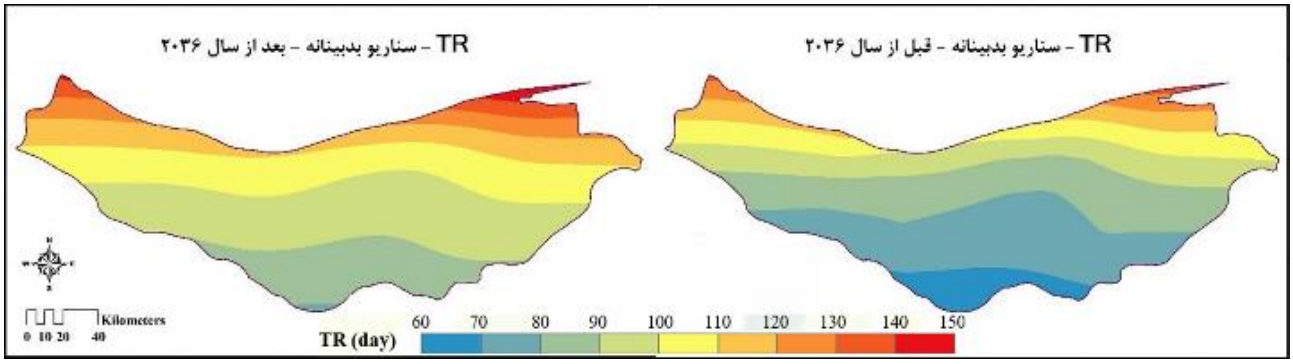

**ادامه شکل ۳.**

**Fig. 3.** (Continued)




ادامه شکل ۳.

**Fig. 3.** (Continued)




**ادامه شکل ۳.**

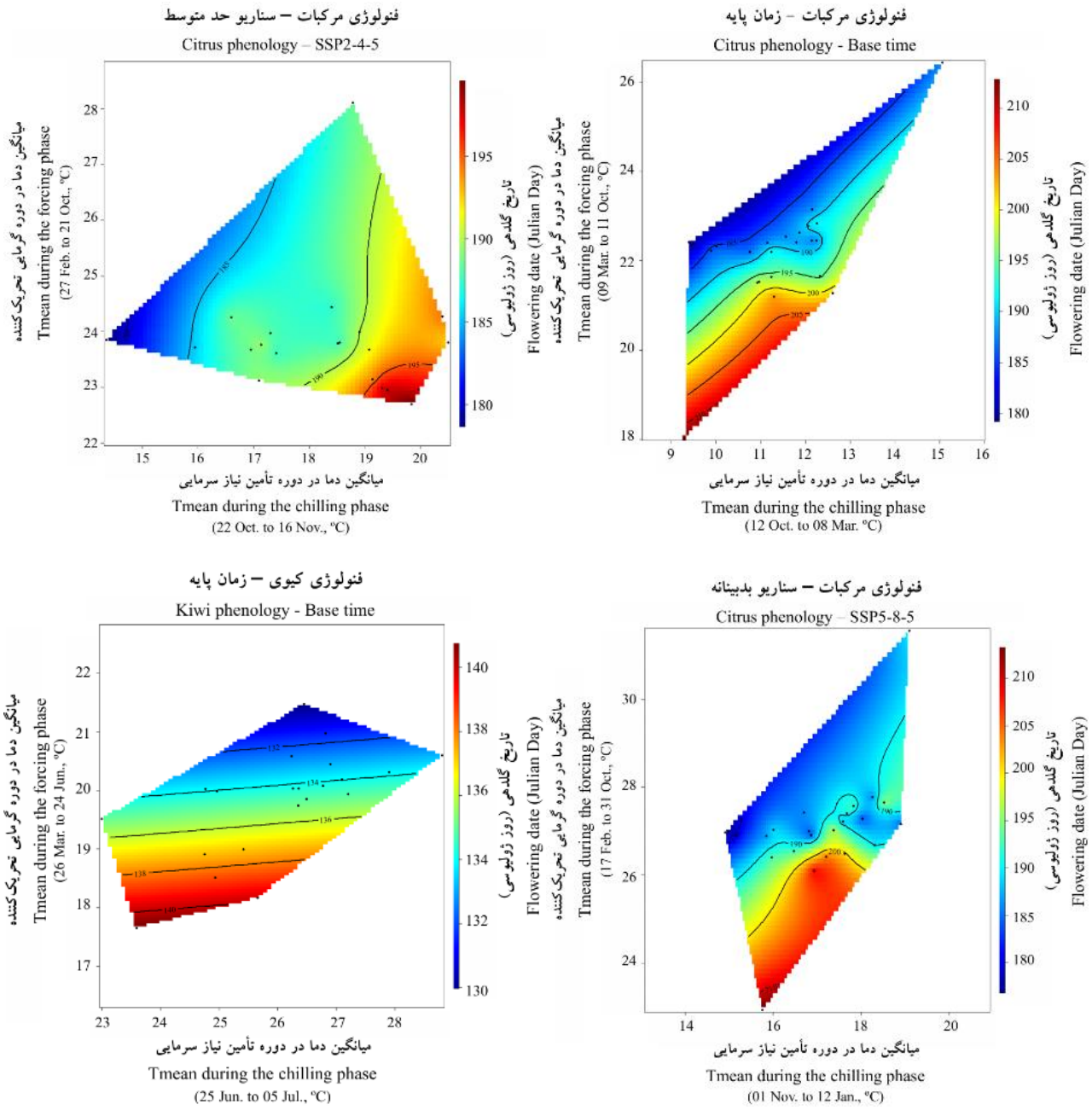
**Fig. 3.** (Continued)

برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه‌دهی محصول کیوی (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی) در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت است. به‌طورکلی، الگوی تغییرات خطوط هم مقدار در زمان شکوفه‌دهی محصول کیوی (خطوط هم‌مقدار در نمودار) برای سناریوهای مورد بررسی نسبت به دوره پایه کاملاً متفاوت است. میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه افزایش یافته و موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی کیوی شده است؛ به‌طوری‌که روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته که بیان‌گر تأخیر در زمان شکوفه‌دهی است.

بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی هلو در دوره پایه و نیز بر اساس سناریوهای مختلف آینده (شکل ۴ ردیف سوم) بیان‌گر تفاوت در میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط و بدبینانه با دوره پایه است. در دوره پایه، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۱۳–۸/۵ درجه سلسیوس و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۶–۱۶ درجه سلسیوس بوده است. با این‌حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه است؛ به‌طوری‌که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط به‌ترتیب در محدوده ۱۵–۱۰/۵ و ۱۸–۲۸ درجه سلسیوس اما برای سناریو حالت بدبینانه به‌ترتیب ۱۳–۱۸ و ۳۱–۲۲ درجه سلسیوس است. تغییر در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای مختلف، موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی محصول هلو (بر اساس روز ژولیوسی) خواهد شد. برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه‌دهی هلو (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی) در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت است. اما به‌طورکلی، الگوی تغییرات خطوط هم مقدار در زمان شکوفه‌دهی محصول هلو (خطوط هم مقدار در نمودار) برای سناریوهای مورد بررسی نسبت به دوره پایه تفاوت کمتری نسبت به دو محصول قبل (کیوی و مرکبات) خواهد داشت. میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه افزایش یافته و موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی شده است؛ به‌طوری‌که روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته که بیان‌گر تأخیر در زمان شکوفه‌دهی است.

## تأثیر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک (زمان شکوفه‌دهی) محصولات زراعی

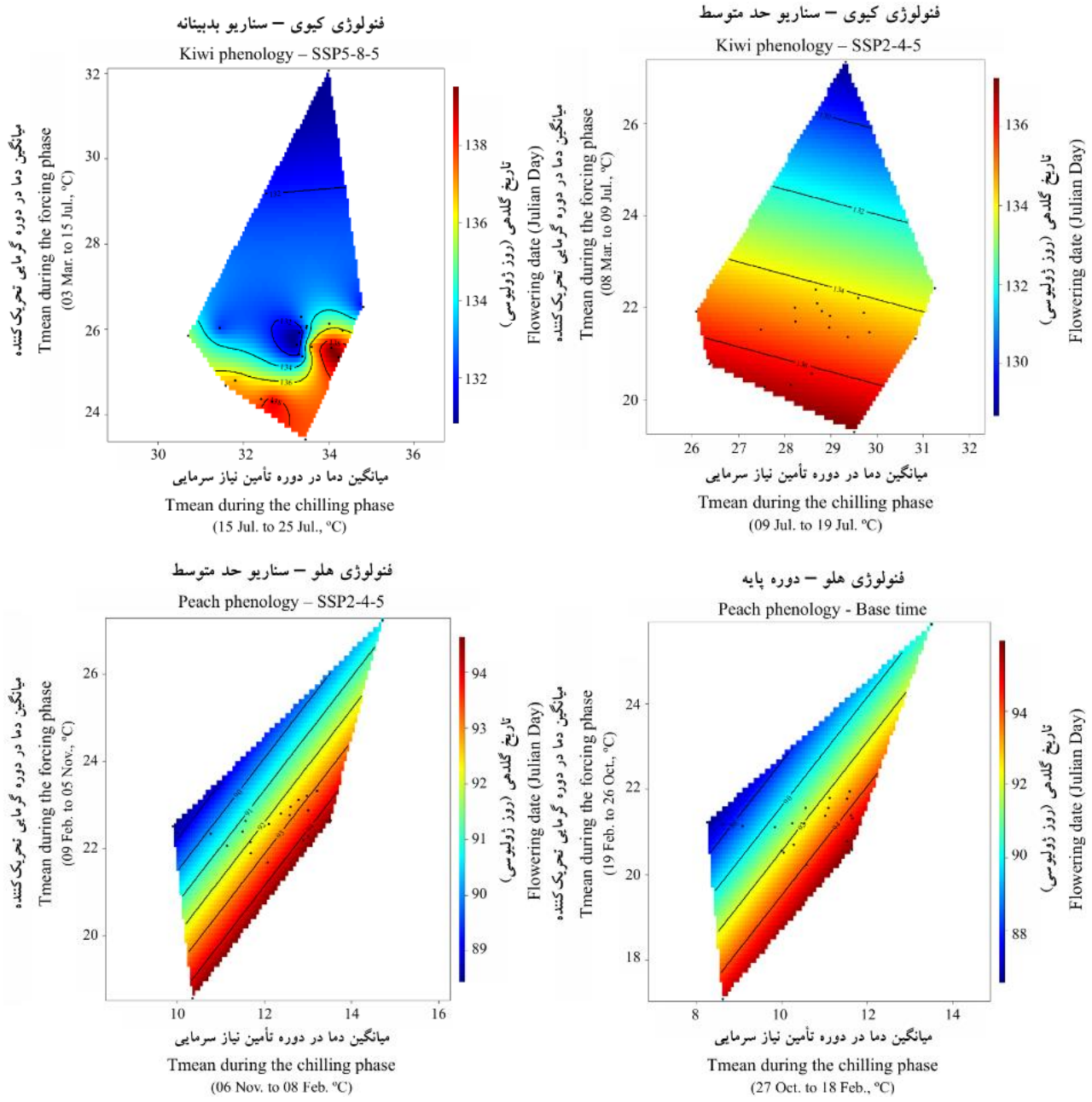
تأثیر تغییر اقلیم بر زمان شکوفه‌دهی محصولات زراعی مانند کلزا و برنج تحت سناریوهای اقلیمی آینده (SSP245 و SSP585) و نیز در دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به تفکیک هر سناریو و هر محصول در شکل ۵ (کلزا) و شکل ۶ (برنج) نشان داده شده است. بررسی مقادیر تغییرِ زمان شکوفه‌دهی محصول کلزا در دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف آینده نشان داده




**شکل ۴**. تغییراتِ زمان شکوفه‌دهی مرکبات، کیوی و هلو در دوره پایه و نیز بر اساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه

**Fig. 4.** Changes in citrus, kiwifruit and peach flowering time in the baseline period and also based on moderate and pessimistic scenarios

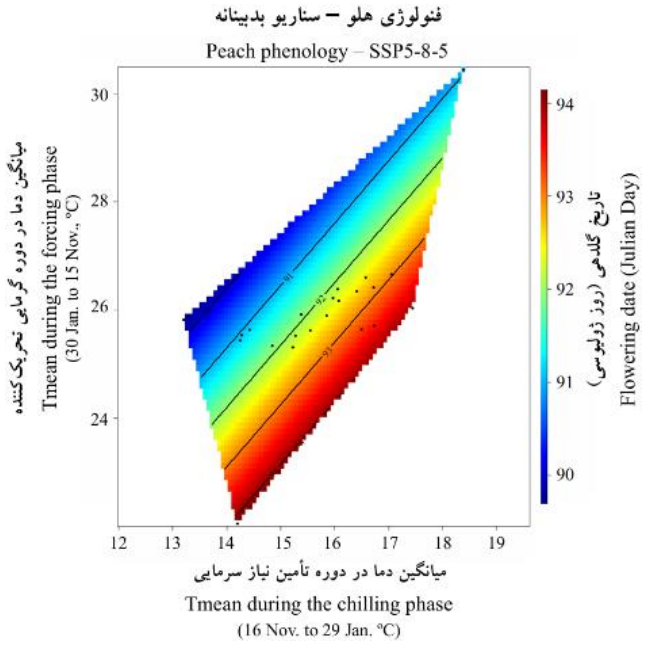
است. میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط و بدبینانه با دوره پایه متفاوت است (شکل ۵). در دوره پایه، میانگین دما در فاز سرمایشی در بازه ۸ تا ۱۳/۵ سلسیوس و در فاز گرمایشی در بازه ۱۷ تا ۲۶ سلسیوس قرار داشت. در سناریوی متوسط (SSP245)، میانگین دما در فاز سرمایشی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در محدوده ۲۷/۵ تا ۳۱/۵ درجه سلسیوس قرار گرفته است. در همین سناریو، فاز گرمایشی نیز دمایی بین ۱۹ تا ۲۹ درجه سلسیوس را نشان




**ادامه شکل ۴.**

**Fig. 4.** (Continued)

می‌دهد. در سناریوی بدبینانه (SSP585)، افزایش دما شدیدتر است؛ به‌طوری‌که میانگین دما در فاز سرمایشی به ۳۰ تا ۳۵/۵ درجه سلسیوس و در فاز گرمایشی به ۲۲ تا ۳۲ درجه سلسیوس می‌رسد. مقایسه دو سناریوی SSP245 و SSP585 نشان می‌دهد که شدت گرمایش در سناریوی بدبینانه بیشتر بوده و این امر می‌تواند موجب کاهش کارایی فاز سرمایشی و تغییر در الگوی تجمع واحدهای گرمایی شود. این تغییرات دمایی، زمان خروج از خواب و در نهایت زمان شکوفه‌دهی کلزا را تحت تأثیر قرار داده و سبب جابه‌جایی روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه می‌شود. نتایج حاضر با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در زمینه



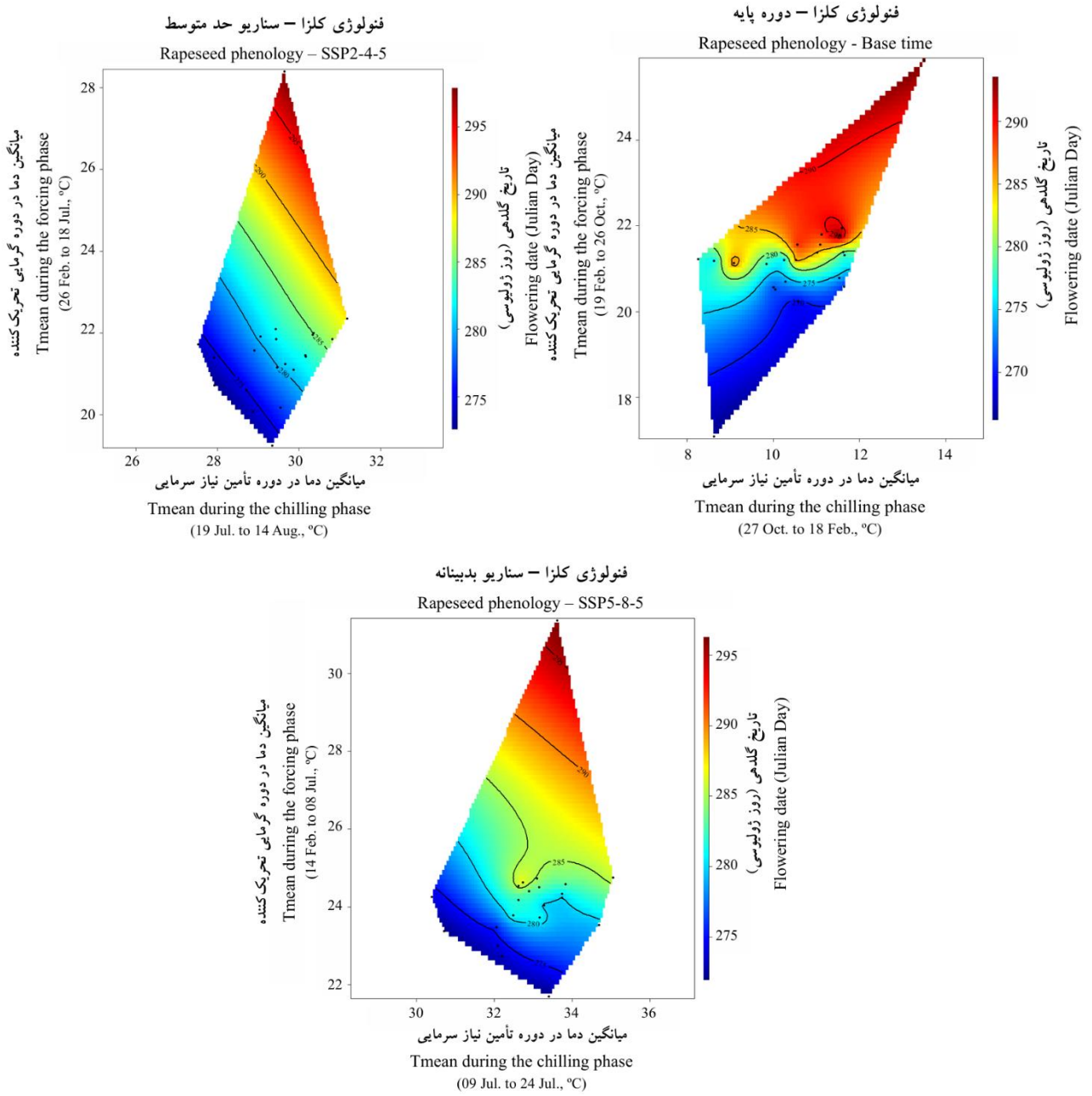

**ادامه شکل ۴.**

**Fig. 4.** (Continued)

تأثیر تغییر اقلیم بر فنولوژی گیاهان زراعی همخوانی دارد. برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه‌دهی کلزا (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی) در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت است. اما به‌طورکلی، الگوی تغییرات خطوط هم مقدار در زمان شکوفه‌دهی کلزا (خطوط هم مقدار در نمودار) بر خلاف الگوی تغییرات در محصولات باغی به‌گونه‌ای است که تاریخ شکوفه‌دهی تحت سناریوهای آینده کمی زودتر از دوره پایه است علی‌رغم اینکه میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی نسبت به دوره پایه متفاوت است. به‌طورکلی متوسط دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه افزایش یافته و موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی شده است.

بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی محصول برنج در دوره پایه و نیز بر اساس سناریوهای مختلف آینده (شکل ۶) نیز نشان می‌دهد که میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط و بدبینانه با دوره پایه متفاوت است. در دوره پایه، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۱۷–۱۰ درجه سلسیوس و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۷–۱۹ درجه سلسیوس بوده است. با این‌حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه است؛ به‌طوری‌که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط به‌ترتیب در محدوده ۲۶–۲۱ و ۲۸/۵–۲۴ درجه سلسیوس اما برای سناریو حالت بدبینانه به‌ترتیب ۲۷/۵–۲۴ و ۳۲/۵–۲۷ درجه سلسیوس است. بر اساس نتایج، زمان شکوفه‌دهی برنج در دوره پایه به‌طور متوسط در روز ژولیوسی ۱۹۰ رخ می‌دهد. این زمان در سناریوی SSP245 به حدود ۱۹۸ منتقل شده و در سناریوی SSP585 با تأخیری در حدود ۷ تا ۱۰روز نسبت به دوره پایه همراه است که بیان‌گر اثر افزایش دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر فنولوژی برنج است.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که دمای بیشینه و کمینه طی سال‌های ۲۱۰۰–۲۰۱۶ برای هر دو سناریوی SSP245 و SSP585 نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است میانگین دمای هوا به‌ترتیب در دو دوره اقلیمی آینده نزدیک و آینده دور در سناریوی اقلیمی SSP245 حدود ۹ درصد

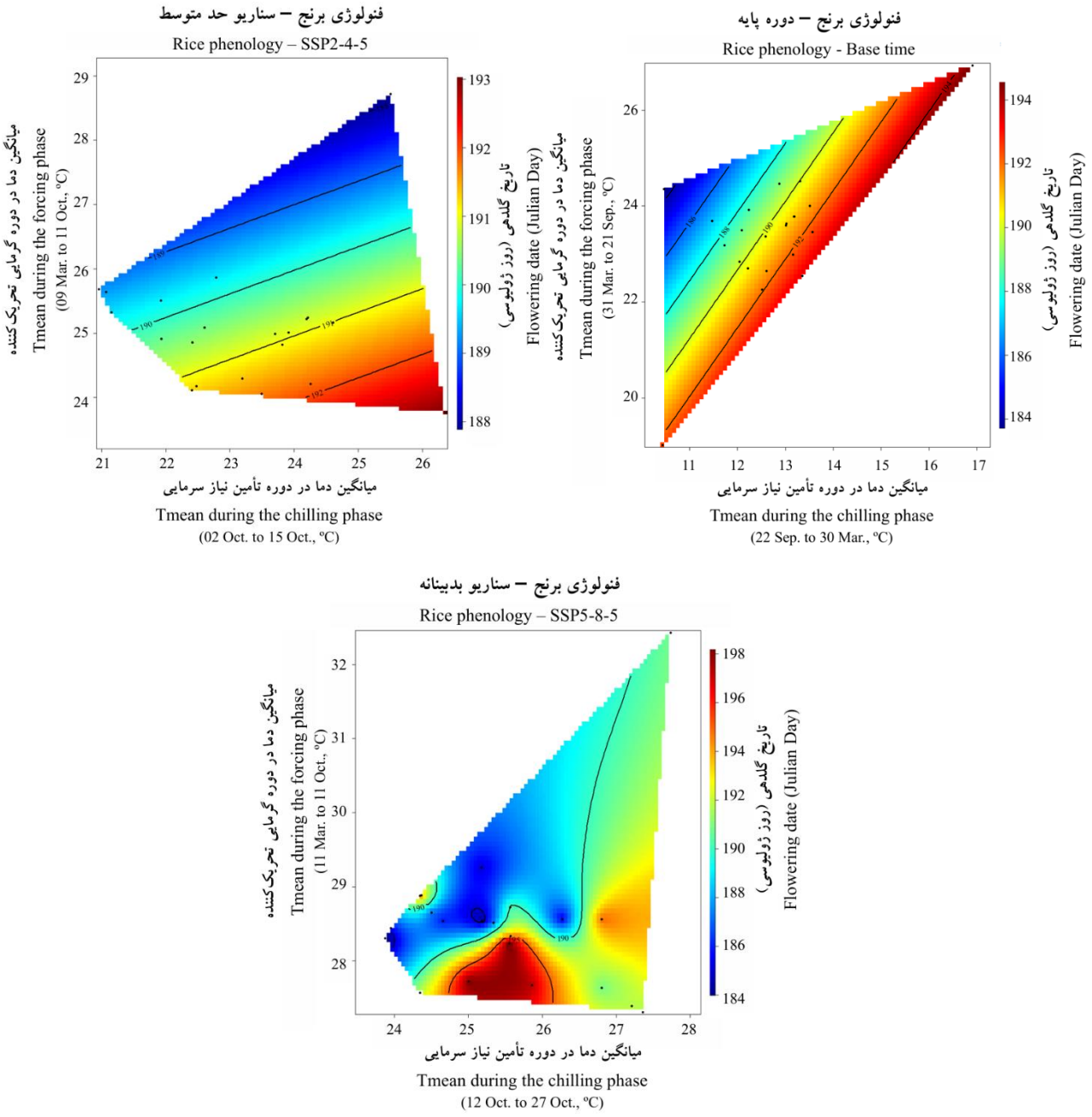



**شکل ۵.** تغییراتِ زمان شکوفه‌دهی کلزا در دوره پایه و نیز بر اساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه

**Fig. 7.** Changes in rapeseed flowering time in the baseline period and also based on moderate and pessimistic scenarios

و ۱۲ درصد نسبت به دوره گذشته افزایش معنی‌داری داشته است. این تغییر در دمای هوا در منطقه مورد بررسی منجر به جابجایی زمانی مرحله شکفتن گیاهان خزان‌کننده به مقدار دو تا سه دهه در دوره آینده خواهد شد. به عبارتی تغییر دما در فازهای سرمایشی و گرمایشی منجر به تغییر زمان وقوع تکمیل مرحله فنولوژیک در گیاه شده است. ماهیت مدل نیاز سرمایی ساده در تعیین تاریخ شکوفه‌دهی گیاهان خزان‌کننده یک تابع تک‌مرحله‌ای هست که با تجمیع ساعات سرمایی در محدوده تعریف‌شده در مدل و تکمیل ساعات گرمایی مورد نیاز در فاز گرمایشی که پس از تأمین سرما برای شکفتن است، تا ظهور مرحله فنولوژیک گیاه، تاریخ مورد نظر را برآورد می‌کند.

افزایش کمینه و بیشینه دما و کاهش یا بدون تغییر بارندگی




**شکل ۶.** تغییراتِ زمان شکوفه‌دهی برنج در دوره پایه و نیز بر اساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه

**Fig. 8.** Changes in rice flowering time in the baseline period and also based on moderate and pessimistic scenarios

تحت سناریوهای آینده موجب افزایش نیاز آبی پتانسیل و نیاز آبی خالص گیاه در طول فصل کشت خواهد شد (Afsharipour et al., 2023). با این وجود، سامان‌دهی زمان کاشت می‌تواند آثار منفی تغییر اقلیم بر کاهش بارندگی فصلی را تعدیل کند، به‌گونه‌ای‌که کشت زودهنگام، امکان بهره‌گیری بیشتری از آب در طول فصل کشت را فراهم آورده و نیاز به مصرف آب آبیاری در کشت محصولات کشاورزی و زراعی به‌ویژه کشت برنج را کاهش می‌دهد. بنابراین تولید محصولات کشاورزی در استان مازندران در دوره‌های آتی مستلزم مدیریت مناسب تقویم کشت آن‌ها است. به‌طورکلی، نتایج بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی

مؤثر در کشاورزی تحت سناریوهای آینده بیان‌گر افزایش قابل توجه در نمایه‌های مربوط به گرما و کاهش نمایه‌های مربوط به سرما از جمله افزایش تعداد روزهای گرم، افزایش تعداد روزهای تابستانی، کاهش تعداد روزهای یخبندان، افزایش طول مدت گرما، کاهش طول مدت سرما و افزایش طول دوره رویش است. همچنین کاهش بارندگی به‌ویژه در فصل خشک در کنار افزایش کمینه و بیشینه دما بر اساس تمامی سناریوهای آینده مورد بررسی می‌تواند آثار قابل‌توجهی بر شرایط کشاورزی پایدار در منطقه داشته باشد. برای سازگاری با افزایش دماهای کمینه و بیشینه و کاهش بارندگی در فصول کشت، باید از راه تغییر تقویم کشت بر اساس آستانه‌های دمایی مراحل مختلف رشد گیاهان، استفاده از ارقام مقاوم بـه تنش‌هـای گرمایی، مدیریت کارآمد آبیاری و کوددهی، طراحی، نصب، مدیریت و نگهداری درست سیستم‌های آبیاری و استفاده از تجهیزات مدرن آبیاری، آثار منفی تغییر اقلیم را کاهش داد. همچنین در صورت افزایش بارندگی شدید در فصول مرطوب، بهبود وضعیت زهکشی در زمین‌های مستعد شرایط غرقابی و ماندابی، می‌تواند از آثار منفی بارندگی‌های شدید در فصول مرطوب بکاهد.

تغییر متغیرهای اقلیمی به‌ویژه دما و بارش در آینده موجب تغییر در تناسب زمین‌های زراعی خواهد شد. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد در یک سناریوی اقلیمی آینده، تناسب زمین‌ها برای کشت محصولات زراعی از جمله کلزا شرایط بهتر و پهنه وسیع‌تری یابد و در سناریوهای دیگر شرایط برای کشت کلزا در زمین‌های مازندران ضعیف‌تر شود. با توجه به اهمیت شرایط اقلیمی و آثار بالقوه تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، بررسی و یافتن تغییرات ناشی از آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی آینده، سودآوری بخش کشاورزی استان مازندران را تغییر خواهد داد و برای حفظ اشتغال پایدار، لازم است الگوی کشت محصولات باغی بازنگری شود. این تغییر در سودآوری، تصمیمات کشاورزان را در تخصیص زمین تحت تأثیر قرار داده و مستلزم تحلیل و اتخاذ راهبردهای مدیریتی مناسب برای بهبود اشتغال‌زایی است. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که افزایش دما و کاهش بارندگی آینده باعث افزایش مرکبات در استان مازندران خواهد شد که موجب ایجاد یک روند مثبت در توسعه اشتغال‌زایی تولید مرکبات طی سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۸۰ خواهد شد (Amani et al., 2023). از طرفی، پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که میانگین دمای ماهانه در فصل پاییز (ماه نوامبر) نیز تأثیر مثبتی را بر عملکرد کیوی خواهد داشت که در واقع با مرحله رشد میوه و رسیدن کامل میوه کیوی متقارن است. همچنین افزایش دمای پاییزه و رطوبت زیاد فصل زمستان نیازهای آب‌وهوایی محصول کیوی را که نیازمند آب‌وهوایی معتدل برای رشد و نمو است فراهم می‌کند. این دو متغیر اقلیمی بیشترین تأثیر را بر عملکرد و بازدهی کیوی نسبت به سایر فاکتورهای هواشناسی دارا بوده و باعث افزایش تناج محصول می‌گردند. همچنین دمای معتدل در اواخر پاییز به همراه هوای مرطوب اواخر زمستان با تأثیر بر فیزیولوژی رشد گیاهی در بازدهی بهتر محصول تأثیر داشته و عملکرد محصول کیوی را افزایش می‌دهد. با شرایط آب وهوایی مرطوب زمستانه و حاکم‌نشدن شرایط آب‌وهوایی خشک و سرد، میزان عملکرد محصول کیوی به مراتب افزایش می‌یابد (Solaimani and Safari Shad, 2011). به‌طورکلی ممکن است اثر تغییر اقلیم بر همه محصولات لزوماً منفی نباشد و ازاین‌رو می‌توان به جنبه‌های مثبت تغییر اقلیم نیز توجه داشت و از آن برای بهره‌برداری بهینه از منابع و امکانات منطقه استفاده کرد. همچنین در بخش برنج استان، سیاست‌های حمایتی از این محصول به گونه‌ای باید صورت گیرد تا کشاورزان کشت برنج را در اولویت و با کارایی بیشتر انجام دهند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در استان مازندران با روندی تدریجی اما پیوسته، منجر به افزایش دما و کاهش بارش‌ها خواهد شد؛ وضعیتی که پیامدهای مستقیم و غیرمستقیمی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی و در نتیجه بر عملکرد و پایداری تولید محصولات کشاورزی بر جای می‌گذارد. این تغییرات می‌توانند موجب اختلال در مراحل حساس فنولوژیک، کاهش کارایی مصرف آب و افزایش بروز تنش‌های گرمایی و آبی شوند. بنابراین، برنامه‌ریزی برای

سازگاری هوشمندانه بخش کشاورزی با شرایط اقلیمی آینده، ضرورتی اساسی در مدیریت پایدار منابع و امنیت غذایی استان است. در این راستا، اتخاذ و اجرای راهبردهای سازگاری مؤثر همچون انتخاب و به‌کارگیری ارقام مقاوم به تنش‌های اقلیمی (گرمایی، خشکی و شوری)، تغییر الگوی کشت و تنوع‌بخشی به محصولات زراعی و باغی، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری و اصلاح روش‌های خاک‌ورزی و مدیریت ماده آلی خاک از جمله اقدامات کلیدی به‌شمار می‌روند. همچنین، توسعه کشت در محیط‌های کنترل‌شده (گلخانه‌ای) و استفاده از سیستم‌های هوشمند پایش اقلیمی می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و کاهش آسیب‌پذیری ایفا کند. برای تحقق اثربخش این راهکارها، لازم است هم‌افزایی سیاستی و نهادی میان برنامه‌های ملی و منطقه‌ای در حوزه مدیریت آب و کشاورزی برقرار شود. در کنار آن، تقویت ظرفیت‌های آموزشی، پژوهشی و اطلاع‌رسانی در بخش کشاورزی، ترویج فناوری‌های نو و توسعه شبکه‌های مشارکت بین کشاورزان، پژوهشگران و سیاست‌گذاران، بستر لازم را برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های تولید و سازگاری پایدار با تغییر اقلیم فراهم خواهد ساخت.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تحت سناریوهای اقلیمی SSP245 و SSP585، استان مازندران در دوره آینده با افزایش معنی‌دار دمای کمینه و بیشینه مواجه خواهد شد که این امر منجر به تشدید نمایه‌های حدی مرتبط با دمای‌هوا در محدوده گرم شامل افزایش تعداد روزها و شب‌های گرم، افزایش طول دوره‌های گرم و کاهش نمایه‌های مرتبط با سرما مانند کاهش تعداد روزهای یخبندان و کوتاه شدن دوره‌های سرد می‌شود. تحلیل تغییرات ناگهانی سری‌های زمانی نمایه‌های حدی دما بیان‌گر وقوع نقاط شکست معنی‌دار عمدتاً در دهه‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ است که تحت سناریوی بدبینانه، زمان وقوع این تغییرات زودتر و شدت آن‌ها بیشتر از سناریوی حد متوسط خواهد بود. افزایش دما و تغییر در فازهای سرمایشی و گرمایشی، به‌عنوان سازوکار اصلی، موجب جابه‌جایی مراحل فنولوژیک و تغییر زمان شکوفه‌دهی محصولات باغی و زراعی مورد بررسی شد. بر این اساس، زمان شکوفه‌دهی مرکبات، کیوی، هلو و برنج در سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه با تأخیر همراه بوده و این تأخیر در سناریوی SSP585 بارزتر است، درحالی‌که در محصول کلزا، علی‌رغم افزایش دما، گرایش به شکوفه‌دهی زودتر نسبت به دوره پایه مشاهده شد. این تغییرات فنولوژیک پیامدهای مستقیمی بر نیاز آبی، مدیریت تقویم کشت، تناسب زمین‌ها و پایداری تولید کشاورزی در منطقه خواهد داشت. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که هم‌زمانی افزایش دما با کاهش یا تغییر الگوی بارش، به‌ویژه در فصول خشک، می‌تواند نیاز آبی پتانسیل و خالص محصولات را افزایش داده و ریسک تنش‌های گرمایی و آبی را تشدید کند؛ ازاین‌رو، سازگاری کشاورزی استان در دوره‌های آتی مستلزم بازنگری در تقویم کشت، انتخاب ارقام متحمل به تنش، بهبود مدیریت آبیاری و بهره‌گیری از راهبردهای سازگاری مبتنی بر شرایط اقلیمی آینده است. این پژوهش برای نخستین‌بار با تلفیق تحلیل نقاط شکست نمایه‌های حدی دما و مدل‌سازی پاسخ فنولوژیک محصولات زراعی و باغی تحت جدیدترین سناریوهای اخیر SSP، زمان و شدت تغییرات ناگهانی اقلیمی و پیامدهای آن بر جابه‌جایی مراحل شکوفه‌دهی و الگوی تولید کشاورزی استان مازندران را به‌صورت مکانی-زمانی آشکار ساخت.

## تشکر و سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره "۱۷-۱۱-۱۴۰۱" انجام شد که به این وسیله از معاونت متبوع تشکر و قدردانی می‌شود.

## تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

## منابع مورد استفاده References


1. Abshenas, M., Kamkar, B., Soltani, A., Kazemi, H., 2023. Predicting the effect of climate change on the suitability of Canola (*Brassica napus* L.) cultivation land using SDSM and LARS-WG models in Mazandaran province. J. Agroecol. 15(4), 843–862. https://doi.org/10.22067/agry.2022.76858.1112. (In Persian with English abstract)
2. Afsharipour, S., Amirinejad, M., Rafiei Sardooi, E., Soleimani, A., 2023. Investigating changes in the water requirement of agricultural crops in the Jiroft plain under climate change impact. Nivar 47(122-123), 1–16. https://doi.org/10.30467/nivar.2023.384228.1237. (In Persian with English abstract)
3. Amani, O., Yaser, F., Norouzi, G., 2023. Exploring the effect of climatic variables of temperature and rainfall on the economy of citrus production in Mazandaran province with the approach of rural employment development. J. Entrep. Strateg. Agric. 10(1), 132–146. https://doi.org/10.61186/jea.10.19.132. (In Persian with English abstract)
4. Arif, A., Harsh, B.P., Harish, K., Surender, K., 2017. Effect of temperature and rainfall different on growth stages and yield of rice (*Oryzae sativa* L.). J. Pharmacogn. Phytochem. 6(1), 331–332.
5. Babaeian, N., Tavasoli, F., 2000. Evaluation of the quantity and quality of ratoon product of Iranian rice varieties. In: Sixth Iranian Congress of Agriculture and Plant Breeding, September, Tehran, Iran.
6. Bannayan, M., Sadeghi Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohamadian, A., Aghaalikhani, M., 2011. Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran. Int. J. Biometeorol. 55(3), 387–401. https://doi.org/10.1007/s00484-010-0348-7.
7. Bhattacharya, A., 2022. Effect of low-temperature stress on germination, growth, and phenology of plants: A review. In: Bhattacharya, A. (Ed.), Physiological Processes in Plants under Low Temperature Stress. Springer Nature, Singapore. pp. 1–106. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9037-2_1.
8. Bibi, F., Rahman, A., 2023. An overview of climate change impacts on agriculture and their mitigation strategies. Agriculture 13(8), 1508. https://doi.org/10.3390/agriculture13081508.
9. 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). Geosci. Model Develop. 9, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016.
10. Guo, H., Xia, Y., Jin, J., Pan, C., 2022. The impact of climate change on the efficiency of agricultural production in the world's main agricultural regions. Environ. Impact Assess. Rev. 97, 106891. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106891.
11. Gupta, V., Singh, V., Jain, M.K., 2020. Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. J. Hydrol. 590, 125422. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422.
12. Habib-ur-Rahman, M., Ahmad, A., Raza, A., Hasnain, M.U., Alharby, H.F., Alzahrani, Y.M., Oyebamiji, O., Danish, S. N., El-Sabagh, A., 2022. Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. Front. Plant Sci. 13, 925548. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925548.
13. Kazemi, S., Eshghizadeh, H.R., Zahedi, M., 2016. Agromorphological response of local and improved Iranian rice genotypes to nutrient solution salinity. J. Soil Plant Interact. 7(1), 153–164. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.7.1.153. (In Persian with English abstract)
14. Mendes, K.R., Campos, S., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Perez-Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., de Lima Vieira, M.M., Oliveira, C.P., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO2 exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. Sci. Rep. 10(1), 9454. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w.
15. Mendes, M.P., Rodriguez-Galiano, V., Aragones, D., 2022. Evaluating the BFAST method to detect and characterize changing trends in water time series: A case study on the impact of droughts on the Mediterranean climate. Sci. Total. Environ. 846, 157428. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157428.
16. Mersin, D., Tayfur, G., Vaheddoost, B., Safari, M.J.S., 2022. Historical trends associated with annual temperature and precipitation in Aegean Turkey, where are we heading? Sustainability 14(20), 13380. https://doi.org/10.3390/su142013380.
17. Norooz Valashedi, R., Khoshravesh, M., 2019. Evaluation of climate change scenarios effect on the chilling requirement for deciduous fruit trees in Kiasar of Sari. Iran. J. Soil Water Res. 50(5), 1085–1093. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.262548.667974. (In Persian with English abstract)
18. Norooz-Valashedi, R., Bararkhanpour ahmadi, S., Bahrami Pichaghchi, H., Mazloom Babanari, S., 2024. Forecasting the changes of temperature extreme indices in the area of Mazandaran Province under CMIP6 scenarios. Watershed Eng. Manag. 16(2), 279–301. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.363859.2036. (In Persian with English abstract)
19. Omidvar, E., Kavian, A., 2011. Landslide volume estimation based on landslide area in a regional scale (case study: Mazandaran province). J. Range Watershed Manag. 63(4), 439–455. https://sid.ir/paper/162619/en. (In Persian with English abstract)
20. Parmesan, C., Hanley, M.E., 2015. Plants and climate change: complexities and surprises. Ann. Bot. 116(6), 849–864. https://doi.org/10.1093/aob/mcv169.

21. Rajabalinejad, A., Nozari, N., Badr, B.R., 2023. The effect of climate change on agricultural production in Iran. Braz. J. Biol. 83, e277383. https://doi.org/10.1590/1519-6984.277383.
22. Riya, K.R., Ajithkumar, B., Lincy, D.P., Laly, J.C., Latha, A., 2022. Impact of dates of planting on rice growth and yield during kharif season. J. Agric. Sci. Technol. 47, 99–103. https://doi.org/10.56228/JART.2022.47119.
23. Shadmehri, F., Chalavi, V., Sadeghi, H., 2018. The effect of planting date on yield and yield components of three strawberry cultivars (*Fragaria×ananassa* Duch) under soilless cultivation under Sari climatic conditions. J. Soil Plant Interact. 9(4), 15–27. http://dx.doi.org/10.29252/ejgcst.9.4.15. (In Persian with English abstract)
24. Sillmann, J., Roeckner, E., 2008. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. Clim. Change. 86(1), 83–104. https://doi.org/10.1007/s10584-007-9308-6.
25. Sobhani, B., Eslahi, M., Babaeian, I., 2017. Comparison of statistical downscaling in climate change models to simulate climate elements in Northwest Iran. Phys. Geogr. Res. 49(2), 301–325. https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.62847. (In Persian with English abstract)
26. Solaimani, K., Safari Shad, M., 2011. The impact of climatic factors on the trend of changes in kiwi crop yield (case study of Mazandaran province). In: First National Conference on Meteorology and Agricultural Water Management, Karaj, https://civilica.com/doc/173223.
27. Song, Y., Gao, Z., Luan, W., 2012. Interaction between temperature and photoperiod in regulation of flowering time in rice. Sci. China Life Sci. 55, 241–249. https://doi.org/10.1007/s11427-012-4300-4.
28. Taherigorji, F., Ebrahimnejad, M.R., Abbasi, N., 2026. Developing effective components in the design of residential apartments in the temperate and humid climate of Iran in order to reduce energy consumption in Mazandaran Province. J. Sustain. Urban Reg. Develop. Stu. e220001.
29. Vafaee, 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). J. Agric. Econ. 16(2), 4. https://doi.org/10.30495/jae.2024.29492.2307. (In Persian with English abstract)
30. Vahdatifar, M., Mousavi, S.F., Farzin, S., Hadiani, M.O., 2025. Comprehensive study of climate change impacts on temperature and precipitation in east and west of Mazandaran province in north of Iran. Water 17(8), 1181. https://doi.org/10.3390/w17081181.
31. Vicentini, G., Biancucci, M., Mineri, L., Chirivì, D., Giaume, F., Miao, Y., Kyozuka, J., Brambilla, V., Betti, C., Fornara, F., 2023. Environmental control of rice flowering time. Plant Commun. 114(5), 1–19. https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100610.
32. Wang, H.J., Sun, J.Q., Chen, H.P., Zhu, Y.L., Zhang, Y., Jiang, D.B., Lang, X.M., Fan, K., Yu, E.T., Yang, S., 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. Meteorol. Z. 21(3), 279. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0330.
33. Xuan, Y., Yi, Y., Liang, H., Wei, S., Jiang, L., Ali, I., Ullah, S., Zhao, Q., 2019. Effects of meteorological factors on the yield and quality of special rice in different periods after anthesis. Agric. Sci. 10(4), 451–475. https://doi.org/10.4236/as.2019.104036.
34. Yashas Kumar, H.K., Varija, K., 2023. Assessing the changing pattern of hydro-climatic variables in the Aghanashini River watershed, India. Acta Geophys. 71(6), 2971–2988. https://doi.org/10.1007/s11600-023-01033-4.
35. Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T., Trewin, B., Zwiers, F., 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Clim. Change. 2(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147.
36. Zhang, X., Yang, F., 2004. RClimDex (1.0) User Manual. Climate Research Branch Environment Canada. 22, 13–14.