

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

Reza Norooz-Valashedi^{1*}, Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi² 

Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

* Corresponding author, Email: r.norooz@sanru.ac.ir

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 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, Peach) and field (Rice, 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.

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

رضا نوروز ولاشدی* و صدیقه برارخان‌پور احمدی

هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: r.norooz@sanru.ac.ir

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: حساسیت محصولات کشاورزی به نوسانات اقلیمی در مطالعات مختلفی تأیید شده است؛ با این حال، بررسی تأثیر مدل‌های اقلیمی آینده بر مراحل فنولوژی 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 و در محیط GIS پهنه‌بندی شد. سپس با استفاده از داده‌های اقلیمی و گیاهی موجود و با بهره‌گیری از مدل ChillIR، تغییرات فنولوژیکی محصولات باغی (مرکبات، کیوی، هلو) و زراعی (برنج، کلزا) براساس سناریوهای SSP245 و SSP585 محاسبه و سپس با مراحل فنولوژی محصولات در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۵۰) مقایسه شد.

نتایج: نتایج نشان داد که در آینده، نمایه‌های مربوط به گرما نظیر 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 نظیر کیوی، تأثیر مثبتی بر عملکرد داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی: افزایش دما تحت سناریوهای آینده منجر به جابجایی فنولوژی گیاهان، تغییر تناسب اراضی زراعی و تأثیر بر سودآوری کشاورزی منطقه می‌شود که به تأثیرات 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.

اندازه‌گیری صحیح پارامترهای محیطی برای تناسب اندام و بقای گیاه، و همچنین برای زمان‌بندی انتقال رشد، از جمله تغییر از رویشی به رشد زایشی، اساسی است (Vicentini et al., 2023). تاریخ گلدهی و مراحل فنولوژی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط هوا و اقلیم‌شناسی به‌ویژه عامل دما و بارش قرار می‌گیرد. طول مدت فنوفازها در گیاهان مختلف با دمای بیشینه همبستگی منفی دارد و مدت زمان کوتاه‌تری در پایان فصل کاشت مشاهده می‌شود (Riya et al., 2022). همچنین، نور مناسب یک عامل مهم است که می‌تواند بر تاریخ 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. دماهای مناسب و رطوبت کافی می‌توانند به زمان‌بندی دقیق گلدهی برنج کمک کرده و عملکرد محصول را بهبود بخشند. افزایش دما می‌تواند فرآیند 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 نحوه و زمان‌بندی این بارش‌ها در طول فصل رشد توجه شود. برای مثال برای محصول راهبردی استان مازندران، تاریخ نشاء برنج نیز بر تاریخ گلدهی و ویژگی‌های عملکرد آن تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری که نشاء زودتر منجر به گلدهی زودتر و عملکرد بالاتر می‌شود (Song et al., 2012). در مطالعه‌ای، (Xuan et al., 2019) به بررسی تأثیر عوامل هواشناسی بر عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی به‌ویژه در مرحله پر شدن دانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، دما تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد محصول در مرحله پر

شدن دانه داشته است. نتایج مطالعه Babaeian and Tavasoli (2000) نیز نشان داد که دمای مربوط به ژلاتینه شدن محصول راتون در مازندران که تحت اثرات آب و هوایی است، بیشتر از درجه حرارت ژلاتینه شدن محصول اصلی است، اما بین غلظت ژل و میزان آمیلوز محصول اصلی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین نتایج مطالعه (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 (ETCCDI¹) به‌عنوان چارچوب استاندارد جهانی برای پایش تغییرات در رخداد‌های حدی دما و بارش شناخته می‌شوند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که شاخص‌هایی نظیر TXx، TNn و WSDI نسبت به میانگین‌های ساده دمایی، حساسیت بیشتری نسبت به تغییر اقلیم دارند و ارتباط قوی‌تری با پاسخ‌های فنولوژیکی گیاهان نشان می‌دهند (Zhang et al., 2011). از طرفی نسل جدید مدل‌های اقلیمی در چارچوب (CMIP6²) با بهبود پارامترسازی فرآیندهای فیزیکی و شرایطی مبتنی بر مسیرهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs)، عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را نسبت به نسل قبلی مدل‌ها کاهش داده‌اند. با این حال، بسیاری از مطالعات پیشین در ایران مبتنی بر CMIP5 بوده و تحلیل شاخص‌های حدی دما در چارچوب SSP‌های جدید هنوز به‌طور جامع انجام نشده است (Eyring et al., 2016). به دلیل اهمیت اثر تغییر اقلیم در منطقه، مطالعه کشف و آشکارسازی آن امری ضروری در برنامه‌ریزی بخش کشاورزی استان می‌باشد. 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. 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 نه تنها نیاز

فنونلژیکی محصولات شاخص مازندران (مانند نیاز سرمایی و زمان گلدهی) را بر اساس سناریوهای اقلیمی آینده مورد مطالعه قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

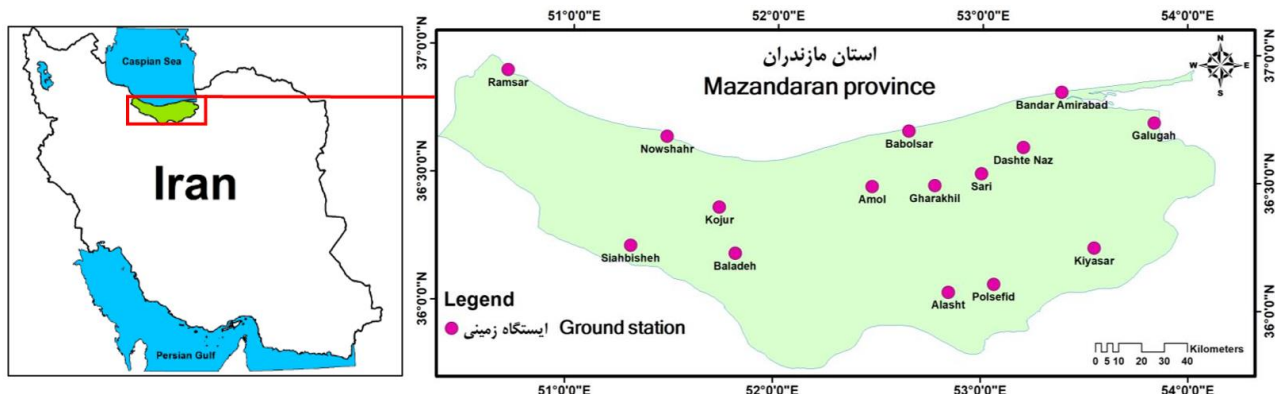
در مطالعه حاضر، استان مازندران به‌عنوان منطقه مطالعاتی دارای مساحتی بالغ بر ۲۳۸۳۳ کیلومتر مربع (تقریباً معادل ۲/۴ میلیون هکتار) در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (Omidvar and Kavian, 2011) (شکل ۱). محدوده ارتفاعی این استان از ۲۱- تا ۵۶۷۰ متر از سطح دریاهای آزاد است. مقدار نزولات جوی در این استان حدود ۷۱۰ میلی‌متر در سال و میانگین دما حدود ۱۷ درجه سانتی‌گراد است (Norooz-Valashedi et al., 2024). با حرکت از نواحی غربی به سمت نواحی شرقی استان، از مقدار بارش کاسته شده و بر میزان دمای هوا افزوده می‌شود. استان مازندران به لحاظ ویژگی‌های دمایی در طبقه اقلیم معتدل و مرطوب طبقه‌بندی می‌گردد (Taherigorji et al., 2026).

داده مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر شامل داده‌های کمینه و بیشینه دما برای ۱۵ ایستگاه سینوپتیک استان مازندران در یک دوره آماری مشترک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) است که از سازمان هواشناسی مازندران استخراج شد. همچنین داده‌های سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) برای مدل اقلیمی MRI-ESM2-0 برای ایستگاه‌های مختلف استان استخراج شد؛ بدین منظور، ابتدا داده تاریخی طی دوره پایه و داده‌های سناریو برای دوره آینده (تا سال ۲۱۰۰) برای مدل اقلیمی مورد مطالعه از پایگاه داده ESGF³ دریافت شد. سپس با در دست داشتن

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 به شدت کاهش دهند. از این‌رو، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر نمایه‌های حدی اقلیمی و مراحل کلیدی فنونلژی محصولات زراعی و باغی استان مازندران، گامی ضروری در جهت مدیریت درست منابع و سازگاری هوشمندانه کشاورزی منطقه با شرایط اقلیمی آینده است. مطالعات مختلفی، تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی جهانی را مورد مطالعه 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; Vafaei et al., 2024; Vahdatifar et al., 2025). در حالی که، تحقیقات محلی و منطقه‌ای که بتوانند این تغییرات را با جزئیات اقلیمی و زیست‌شناختی (فنونلژیکی) برای یک محصول خاص پیوند دهند، با وجود گسترش مطالعات تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، هنوز چارچوبی یکپارچه برای پیوند کمی شاخص‌های حدی دما با دینامیک مراحل فنونلژیکی محصولات در مقیاس منطقه‌ای ایران ارائه نشده و اغلب پژوهش‌های داخلی به میانگین‌های حرارتی بسنده کرده‌اند. این پژوهش با اتکا به خروجی مدل‌های نسل جدید CMIP6 تحت سناریوهای SSP، برای نخستین‌بار تغییرات نمایه‌های حدی دما را به صورت سناریو محور با مراحل حساس فنونلژیکی محصولات راهبردی مازندران هم‌بسته و کمی‌سازی می‌کند و از این طریق 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 فنونلژی تخصصی محصولات متمرکز است که مدل‌سازی همزمان اثر تغییرات در نمایه‌های حدی دما بر مراحل

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



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده

Fig. 1. Study area and stations used

(CMIP6)، جدیدترین گزارش انتشار یافته 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 (۲۰۲۰-۲۱۰۰) استفاده شد. بدین منظور، ابتدا داده تاریخی طی دوره پایه و داده‌های سناریو برای دوره آینده (تا سال ۲۱۰۰) برای مدل اقلیمی مورد مطالعه از پایگاه داده ESGF^۶ مربوطه برای کل جهان دریافت شد. سپس با در دست داشتن اطلاعات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه 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 bilinear در سطح ایستگاه‌های مورد نظر شد.

مقیاس‌کاهی^۷ آماری مدل‌های تغییر اقلیم

مدل‌های گردش عمومی جو به دلیل بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن نسبت به مکان و زمان منطقه مورد مطالعه، نمی‌تواند به صورت مستقیم برای پیش‌بینی پارامترهای

اطلاعات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه 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^۴ 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 مطالعه اما از داده‌های مدل اقلیمی به منظور 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 (۲۰۲۰-۲۱۰۰) با استفاده از آزمون همگنی پتیت انجام شد؛ سپس نتایج برای استان مازندران در محیط GIS پهنه‌بندی شد.

مدل‌های تغییر اقلیم

مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم^۵

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

7. Downscaling

4. Biliner interpolation

5. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

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 مطالعه در مقیاس‌های سالانه و ماهانه محاسبه و وجود روند و نقطه شکست در این نمایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمایه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

آزمون ناپارامتری پتیت

این آزمون بیانگر تغییرات سریع در سری‌های زمانی شامل کاهش یا افزایش ناگهانی در خصوصیات آماری یک سری زمانی است (Mendes et al., 2020; Mendes et al., 2022; Mersin et al., 2023; Yashas Kumar and Varija, 2022). این روش یک آزمون ناپارامتری بوده که برای پیدا کردن نقاط تغییر در یک سری زمانی استفاده می‌گردد و روشی جهت تشخیص تغییرات معنی‌دار در میانگین سری زمانی است. بر اساس این آزمون، در مکانی از سری زمانی که نقطه تغییر وجود داشته باشد، سری موردنظر در آن مکان به دو جزء سری تقسیم می‌شود. در صورت معنی‌دار شدن نقطه شکست در سری موردنظر، نسبت مقادیر میانگین اجزاء سری قبل و بعد از نقطه تغییر، برای تحلیل بزرگی شکست به کار گرفته می‌شود. برای سری‌های زمانی که نقطه شکست معنی‌دار را نشان نمی‌دهد، آزمون روند بر روی کل سری اعمال می‌شود. به منظور دستیابی به اطلاعات بیشتر در مورد این آزمون و روابط موجود به مطالعه (Mersin et al., 2022) مراجعه شود. به منظور 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 حاوی نقطه شکست معنی‌دار انتخاب شدند. در گام بعد میانگین سری زمانی هر نمایه که حاوی نقطه شکست، قبل و بعد از زمان وقوع تغییر ناگهانی (سال وقوع) برآورد شده و توزیع مکانی تغییرات در قبل و بعد از سال وقوع با استفاده از روش‌های

اقلیمی منطقه و یا نقطه مورد نظر استفاده گردد و نیاز به ریزمقیاس گردانی یا مقیاس‌کاهی خروجی‌های این مدل‌ها است. مقیاس کاهی، روشی برای تولید داده‌های آب و هوایی با وضوح بالا از یک سری مدل‌های گردش عمومی جو با قدرت تفکیک پایین است و براساس اطلاعات به دست آمده از این روش می‌توان شرایط آب و هوایی در مقیاس ایستگاهی و محلی را توضیح داد (Sobhani et al., 2017). در این پژوهش، داده‌های تغییر اقلیم با استفاده از روش درون‌یابی دو خطی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه 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 به وسیله گروه کارشناسی (CCI WMO⁸)، (JCOMM⁹) و (CLIVAR¹⁰) به عنوان نمایه‌های حدی و نمایه‌های تغییرات آب و هوایی 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 مطالعه گروه‌بندی شد. برای استخراج نمایه‌های مبتنی بر کمینه و بیشینه دمای روزانه از نرم افزار RCLimDex استفاده شد (Zhang and Yang, 2004). تیم کارشناسی آشکارسازی و نمایش تغییر اقلیم و نمایه‌ها (ETCCDI¹¹) مجموع ۲۷ نمایه حدی برای دما و بارش در زبان برنامه‌نویسی R در قالب بسته RelimDex و بر اساس الگوریتم‌های بهبودیافته و کاهش خطای عددی طراحی کرده است (Zhang and Yang, 2004) که از بین این ۲۷ نمایه ۱۱

4. Climate Variability and Predictability Program
4. Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices

8 Commission for Climatology
3. Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology

جدول ۱. تعریف نمایه‌های حدی اقلیمی دما توصیه شده به‌وسیله گروه کارشناسی CLIVAR/CCI

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

نمایه	توصیف نمایه	تعریف	مقیاس
Index	Index description	Definition	Scale
FD	تعداد روزهای یخبندان	تعداد روزهایی که دمای حداقل شبانه روز کمتر از صفر درجه سلسیوس است.	روز day
SU25	تعداد روزهای تابستانی	تعداد روزهایی که دمای حداکثر شبانه روز بزرگتر از 25 درجه سلسیوس است.	روز day
ID	روزهای یخی	تعداد روزهایی که دمای حداکثر روزانه کوچکتر از صفر درجه سلسیوس باشد.	روز day
TR20	شب‌های حارهای	تعداد روزهایی که دمای حداقل شبانه روز بزرگتر از 20 درجه سلسیوس باشد	روز day
GSL	طول دوره رویش	طول دوره رویش	روز day
WSDI	نمایه طول دوره گرما	تعداد روزهای که حداقل شش روز متوالی دمای حداکثر بیشتر از صدک 90 ام باشد.	روز day
CSDI	نمایه طول دوره سرما	تعداد روزهای که حداقل شش روز متوالی دمای حداقل کمتر از صدک 10 ام باشد.	روز day
TXx	بیشینه ماهانه دمای حداکثر روزانه	مقدار بیشینه ماهانه دمای حداکثر روزانه است.	°C
TNn	کمینه ماهانه دمای حداقل روزانه	مقدار کمینه ماهانه دمای حداقل شبانه روز است.	°C
TNx	بیشینه ماهانه دمای حداقل روزانه	مقدار بیشینه ماهانه دمای حداقل شبانه روز است.	°C
TXn	کمینه ماهانه دمای حداکثر روزانه	مقدار کمینه ماهانه دمای حداکثر روزانه است.	°C
TN10P	شب‌های سرد	درصد روزهایی که دمای حداقل کمتر از صدک دهم است	%
TX10P	روزهای سرد	درصد روزهایی که دمای حداکثر کمتر از صدک دهم باشد	%
TN90P	شب‌های گرم	درصد روزهایی که دمای حداقل بیشتر از صدک 90 ام است	%
TX90P	روزهای گرم	درصد روزهایی که دمای حداکثر بیشتر از صدک 90 ام باشد	%
DTR	دامنه تغییرات شبانه روزی دما	دامنه تغییرات شبانه روزی دما تفاوت بین دمای حداقل و حداکثر روزانه است	%

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 داده است 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 ۲۰۴۰-۲۰۵۰ خواهد بود. همچنین، مقایسه میانگین این نمایه‌های دمایی در سال‌های قبل و بعد از نقطه تغییر نشان می‌دهد که نمایه‌های گرم بعد از نقطه شکست افزایش اما نمایه‌های سرد کاهش خواهد یافت به‌طوری‌که می‌توان بیان کرد به‌سمت آینده دور تا سال ۲۱۰۰، شرایط گرما در منطقه افزایش خواهد یافت.

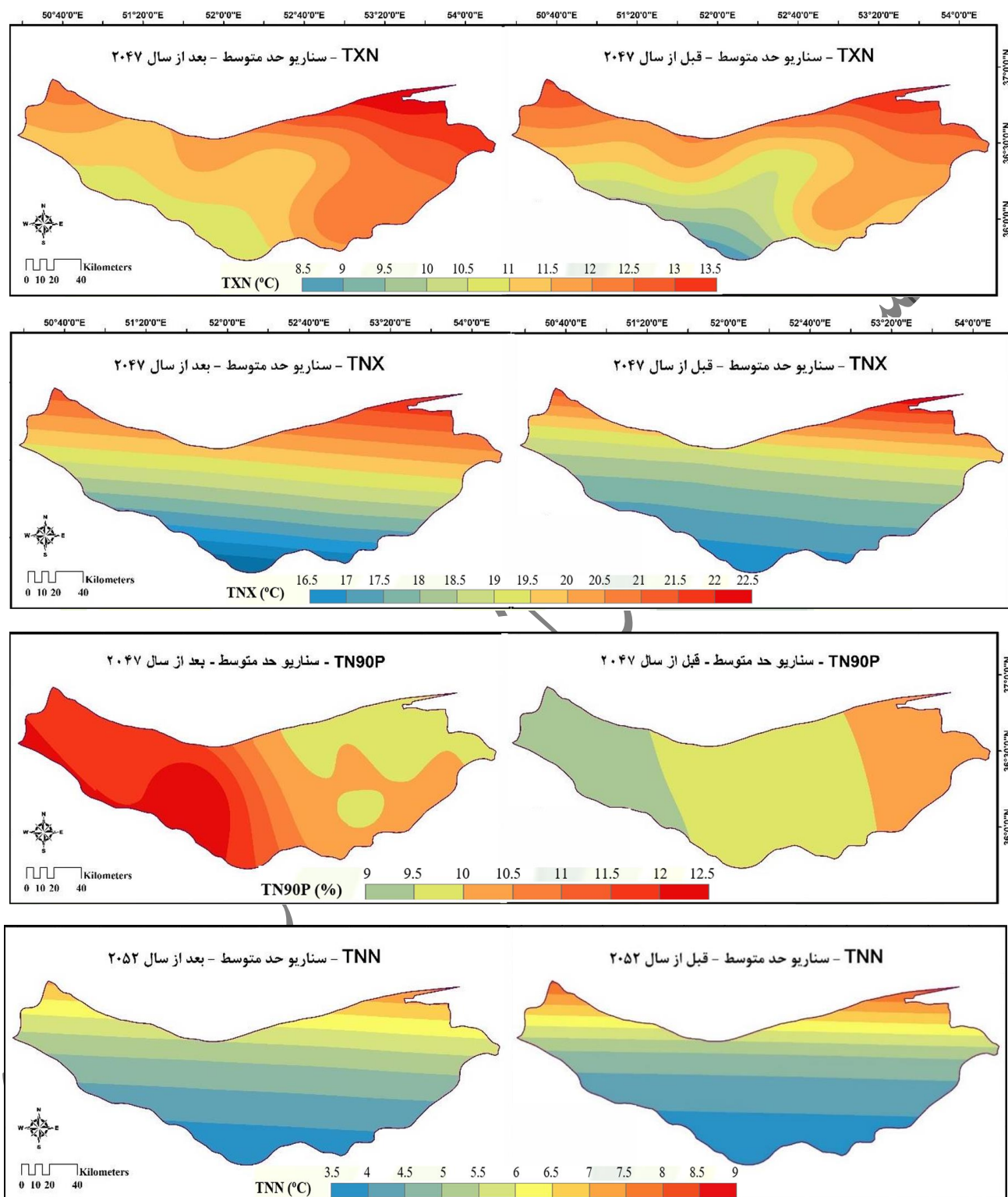
بررسی زمان رخداد تغییرات ناگهانی در نمایه‌های حدی دما بر اساس سناریوی بدبینانه (شکل ۳) نیز بیانگر افزایش مقدار نمایه‌های گرم می‌باشد؛ حال‌آنکه نمایه‌های سرد به‌سمت گرم شدن گرایش دارند. با این حال، زمان وقوع این تغییرات عمدتاً در دهه ۲۰۳۰-۲۰۴۰ خواهد بود. این امر نشان می‌دهد که زمان وقوع تغییر ناگهانی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

تأثیر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژی (زمان شکوفه‌دهی)

محصولات باغی

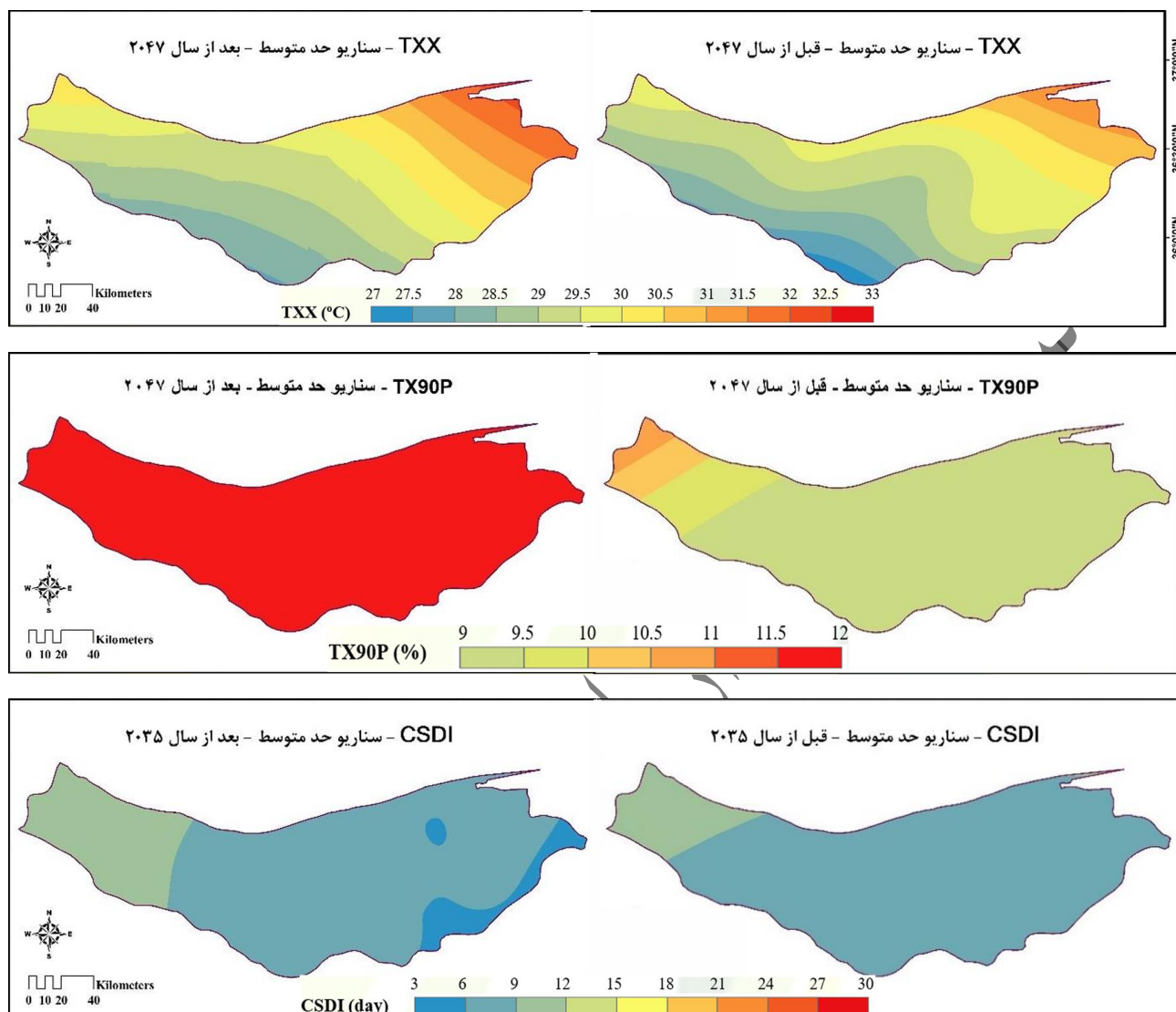
شکل ۴ تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم را بر تغییرات زمان شکوفه‌دهی مرکبات، کیوی و هلو نشان می‌دهد. بررسی تغییرات زمان شکوفه‌دهی مرکبات تحت سناریوهای مختلف آینده و نیز

در دوره پایه (شکل ۴ ردیف اول) نشان داده است که بر اساس سناریوهای اقلیمی آینده، میانگین دوره‌های سرمایش و گرمایش نسبت به دوره پایه تغییر خواهد کرد و بیانگر دگرگونی در رفتار حرارتی منطقه در مقیاس زمانی آینده است. در دوره پایه یا تاریخی، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۹-۱۵ درجه سانتی‌گراد و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۱۸-۲۷ درجه سانتی‌گراد بوده است. با این حال، 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 منتشر شده پیش‌یابی کرده‌اند و این مهم برای استان مازندران با توجه به نتایج این پژوهش شامل افزایش دما (کمینه و بیشینه دما) است. این افزایش، به‌طور خاص بر شرایط فیزیولوژیکی مرکبات تأثیر می‌گذارد، زیرا این درختان برای تولید میوه به یک دوره سرمایش مشخص نیاز دارند و زمستان‌های گرم‌تر (فاز سرمایشی بالاتر) می‌تواند این نیاز را برآورده نکند، درحالی‌که تابستان‌های گرم‌تر (فاز گرمایشی بالاتر) استرس گرمایی و خشکی را تشدید می‌کند (Norooz Valashedi and Khoshnavesh, 2019). به‌طوری‌که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط (SSP245) به‌ترتیب در محدوده ۲۱-۱۴ و ۲۲-۲۸ درجه سانتی‌گراد اما برای سناریو حالت بدبینانه (SSP585) به‌ترتیب ۲۰-۱۵ و ۳۲-۲۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به شکل ۴، تغییرات دمایی در فاز سرمایشی و گرمایشی با تأثیرگذاری بر برآورده شدن نیاز سرمایی و تجمع واحدهای حرارتی، 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 ژوئیه‌سی^{۱۲} در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت می‌باشد. متوسط دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه افزایش یافته و موجب تغییر



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

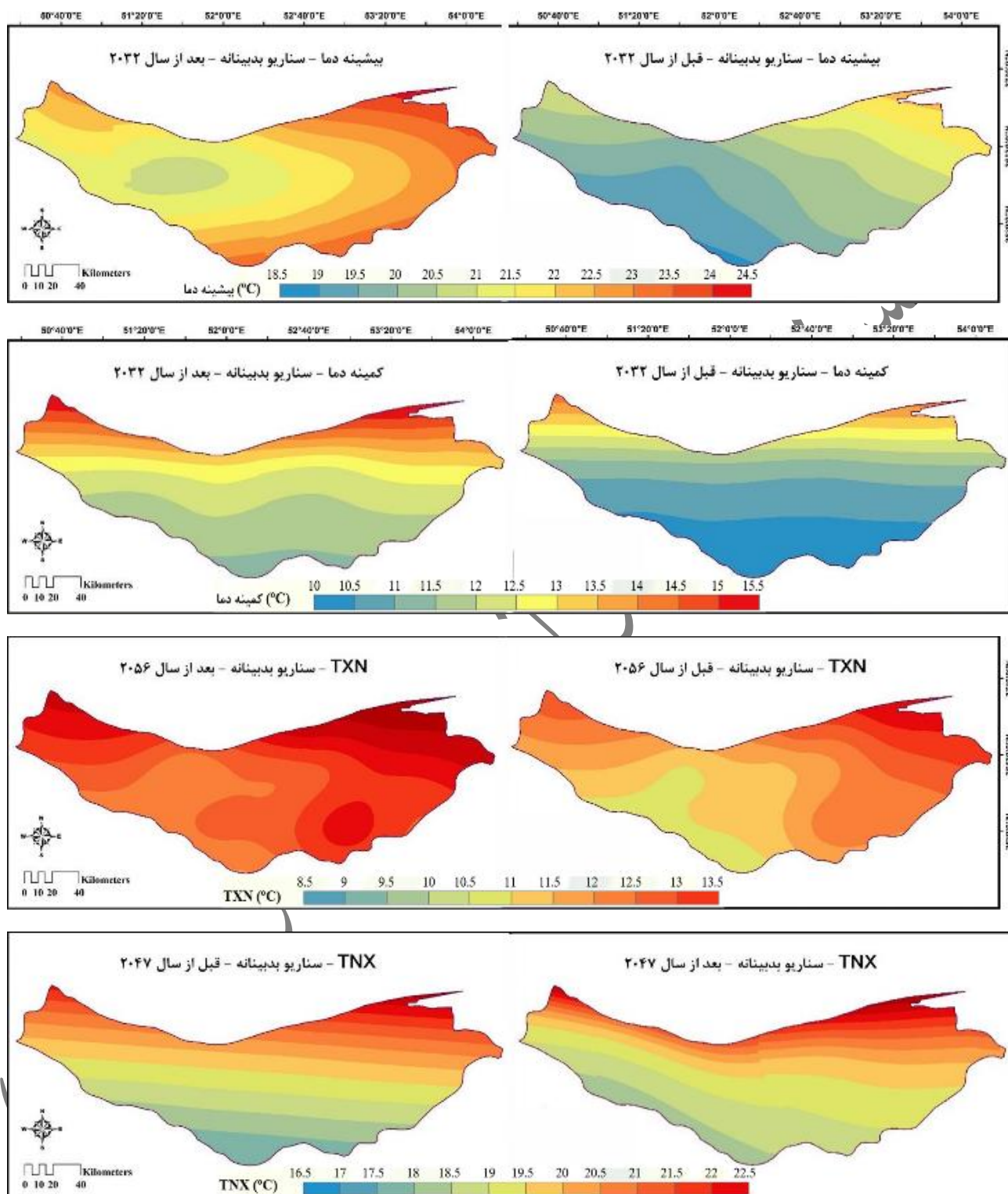


ادامه شکل ۲.
Fig. 2. (Continued)

سانتی گراد و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۱۷/۵-۲۱/۵ درجه سانتی گراد بوده است. با این حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه می باشد؛ به طوری که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط به ترتیب در محدوده ۲۶-۳۱/۵ و ۱۹-۲۸ درجه سانتی گراد اما برای سناریو حالت بدبینانه (SSP585) به ترتیب ۳۱-۳۵ و ۲۳-۳۲ درجه سانتی گراد می باشد همان گونه که در نمودارها نشان داده شده است. تغییر در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای

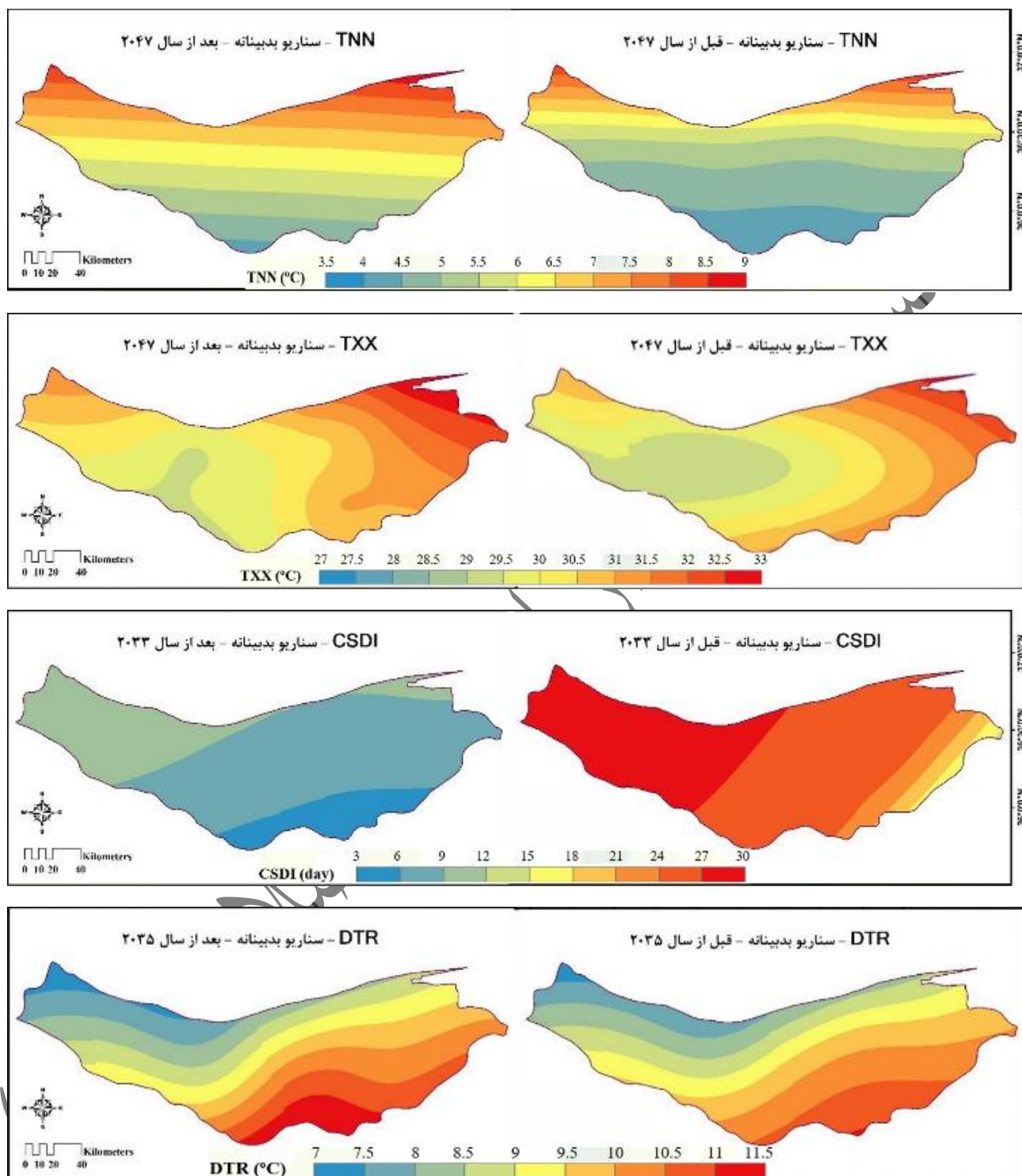
در زمان شکوفه دهی مرکبات شده است؛ به طوری که روز ژولایی شکوفه دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است که بیانگر تأخیر در زمان شکوفه دهی می باشد.

بررسی تغییرات در زمان شکوفه دهی گیوی در دوره پایه و نیز براساس سناریوهای مختلف آینده (شکل ۴ ردیف دوم) نشان داده است که برای محصول گیوی نیز میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) با دوره پایه متفاوت خواهد بود. در دوره پایه یا تاریخی، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۲۳-۲۹ درجه



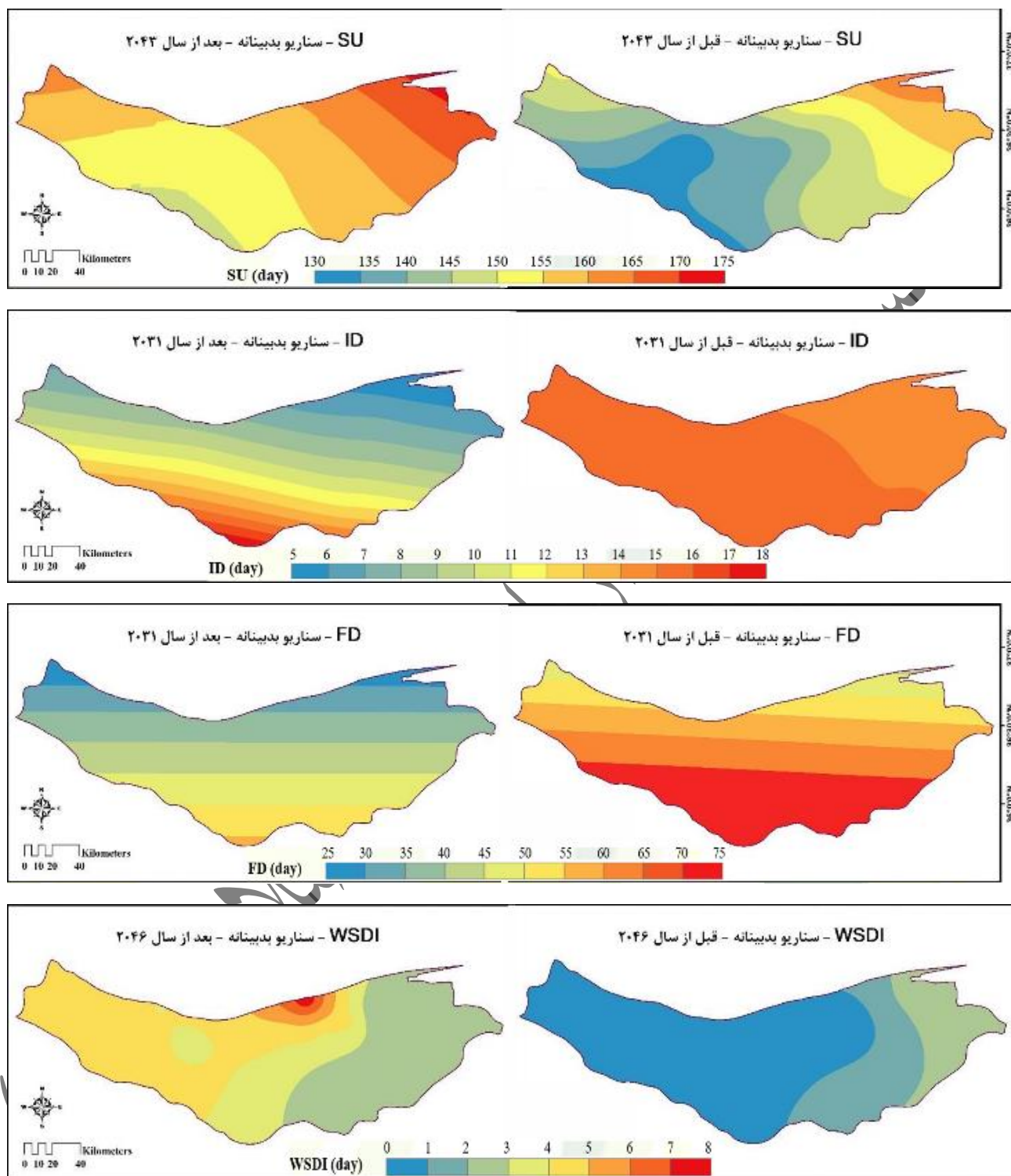
شکل ۳. توزیع مکانی نمایه‌های حدی دما دارای نقطه شکست معنی‌دار در دوره آینده قبل و بعد از سال وقوع نقطه شکست (تغییر) تحت سناریو بدبینانه

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



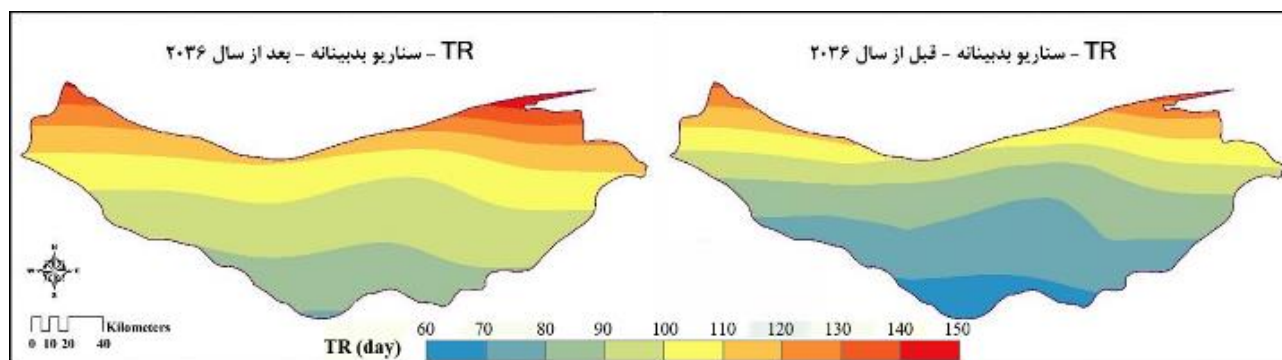
ادامه شکل ۳.

Fig. 3. (Continued)



ادامه شکل ۳.

Fig. 3. (Continued)



ادامه شکل ۳.

Fig. 3. (Continued)

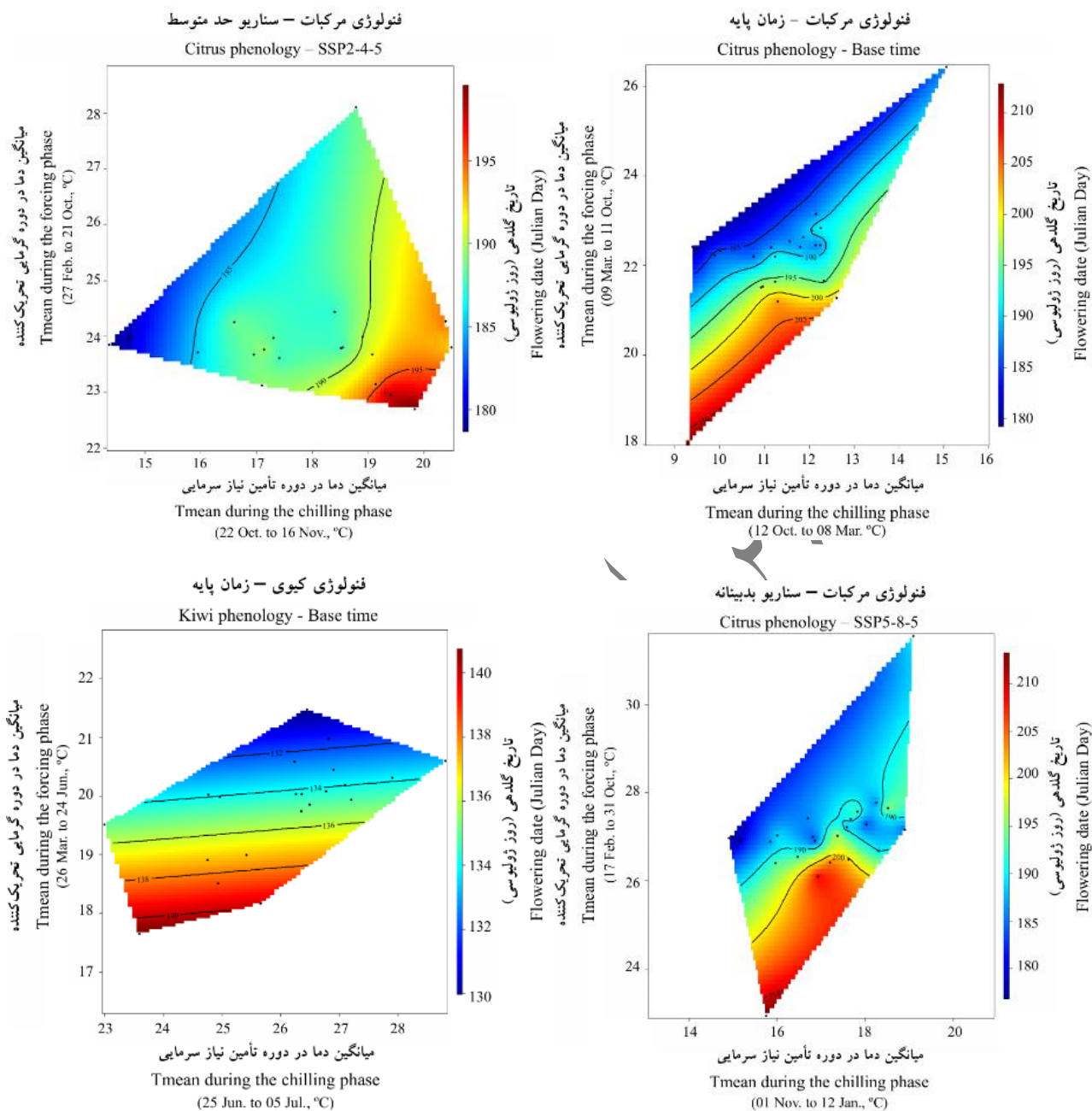
محدوده ۱۵-۱۰/۵ و ۲۸-۱۸ درجه سانتی‌گراد اما برای سناریو حالت بدبینانه به ترتیب ۱۸-۱۳ و ۳۱-۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تغییر در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای مختلف، موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی محصول هلو (بر اساس روز ژولیوسی) خواهد شد. برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه‌دهی محصول هلو (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی در دوره پایه و به طور سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت می‌باشد. اما به طور کلی، 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. 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؛ به طوری که روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است که بیانگر تأخیر در زمان شکوفه‌دهی می‌باشد.

تأثیر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژی (زمان شکوفه‌دهی) محصولات زراعی

تأثیر تغییر اقلیم بر زمان شکوفه‌دهی محصولات زراعی نظیر کلازا و برنج تحت سناریوهای اقلیمی آینده (SSP245 و SSP585) و نیز در دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به تفکیک هر

مختلف، موجب تغییر در زمان شکوفه‌دهی کیوی (بر اساس روز ژولیوسی) خواهد شد. 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 به طور سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت می‌باشد و به طور کلی، الگوی تغییرات خطوط هم مقدار در زمان شکوفه‌دهی محصول کیوی (خطوط هم مقدار در نمودار) برای سناریوهای مورد بررسی نسبت به دوره پایه کاملاً متفاوت می‌باشد. متوسط 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؛ به طوری که روز ژولیوسی شکوفه‌دهی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است که بیانگر تأخیر در زمان شکوفه‌دهی می‌باشد.

بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی هلو در دوره پایه و نیز براساس 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 می‌باشد. در دوره پایه، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۱۳-۸/۵ درجه سانتی‌گراد و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۶-۱۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. با این حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه می‌باشد؛ به طوری که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط به ترتیب در

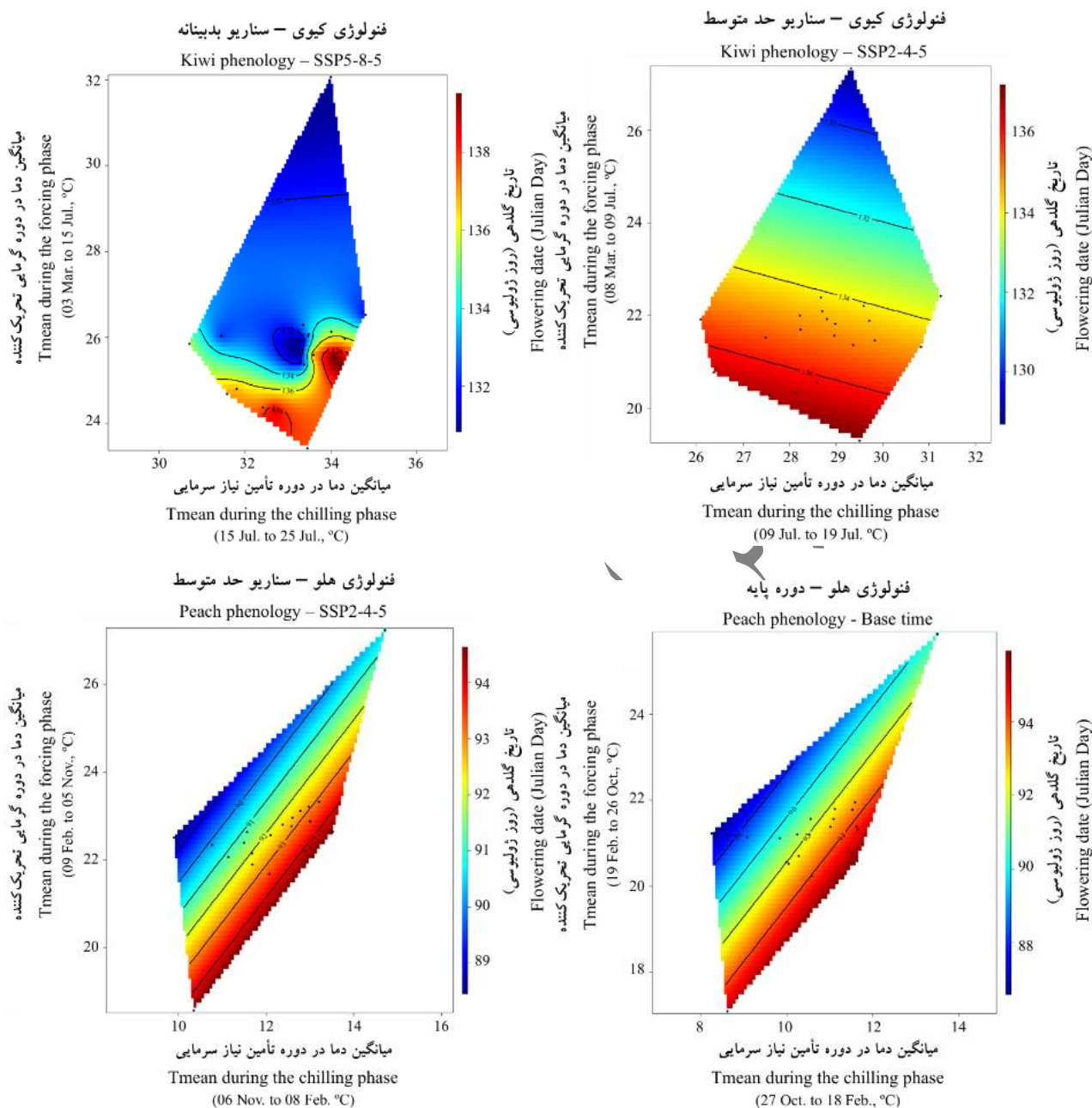


شکل ۴. نتایج بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی مرکبات، کیوی و هلو در دوره پایه و نیز براساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه

Fig. 4. Results of the study of changes in citrus, Kiwifruit and peach flowering time in the baseline period and also based on moderate and pessimistic scenarios

سناریو و هر محصول در شکل‌های زیر نشان داده شده است. بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی محصول کلزا در دوره پایه و نیز براساس سناریوهای مختلف آینده نشان داده است میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوی حالت متوسط (SSP245)، میانگین دما در فاز

بدبینانه با دوره پایه متفاوت می‌باشد (شکل ۵). در دوره پایه، میانگین دما در فاز سرمایشی در بازه ۸ تا ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و در فاز گرمایشی در بازه ۱۷ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد قرار داشته است. در سناریوی حالت متوسط (SSP245)، میانگین دما در فاز

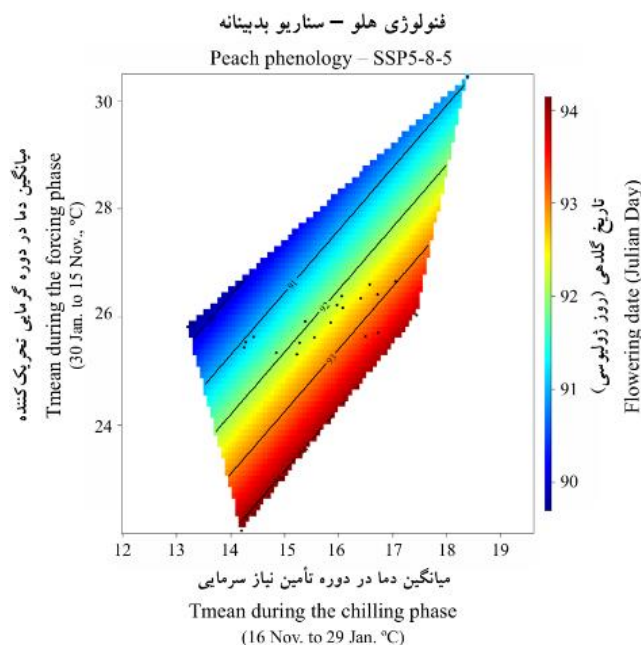


ادامه شکل ۴.

Fig. 4. (Continued)

درجه سانتی‌گراد و در فاز گرمایشی به ۲۲ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد 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 حرارتی شود. این تغییرات دمایی، زمان خروج

سرمایشی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در محدوده ۲۷/۵ تا ۳۱/۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. در همین سناریو، فاز گرمایشی نیز دمایی بین ۱۹ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در سناریوی بدبینانه (SSP585)، افزایش دما شدیدتر است؛ به‌طوری‌که میانگین دما در فاز سرمایشی به ۳۰ تا ۳۵/۵

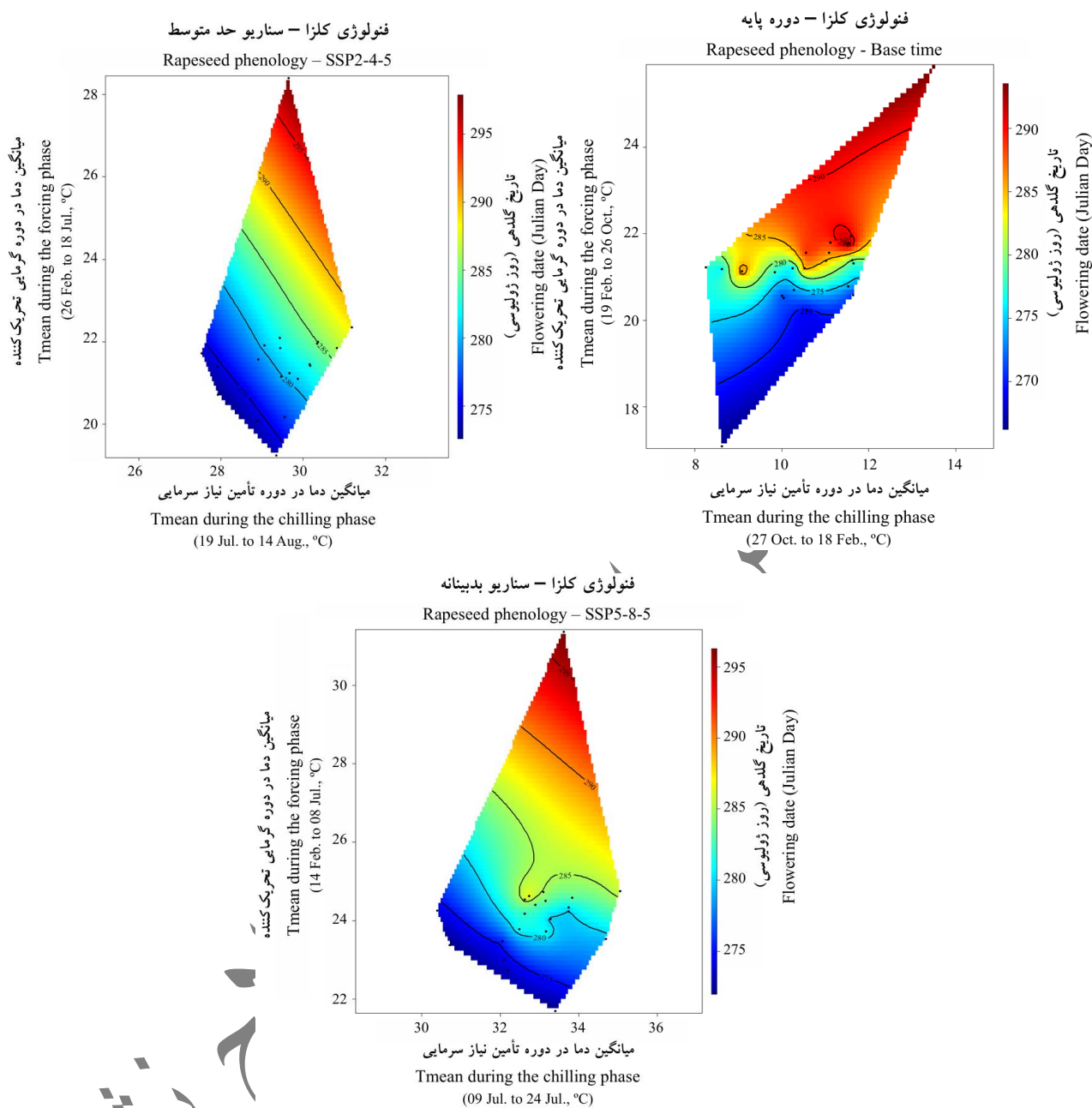


ادامه شکل ۴.

Fig. 4. (Continued)

و نیز براساس سناریوهای مختلف آینده (شکل ۶) نیز نشان داده است که میانگین فاز سرمایشی و گرمایشی در سناریوهای آینده حالت متوسط و بدبینانه با دوره پایه متفاوت می باشد. در دوره پایه، محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی ۱۷-۱۰ درجه سانتی گراد و محدوده میانگین دما در فاز گرمایشی ۲۷-۱۹ درجه سانتی گراد بوده است. با این حال، این محدوده دمایی از فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریوهای آینده مورد بررسی کاملاً متفاوت با دوره پایه می باشد؛ به طوری که محدوده میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی برای سناریو حالت متوسط به ترتیب در محدوده ۲۶-۲۱ و ۲۸/۵-۲۴ درجه سانتی گراد اما برای سناریو حالت بدبینانه به ترتیب ۲۷/۵-۲۴ و ۳۲/۵-۲۷ درجه سانتی گراد می باشد. بر اساس نتایج، زمان شکوفه دهی برنج در دوره پایه به طور متوسط در روز ژولیوسی ۱۹۰ رخ می دهد. این زمان در سناریوی SSP245 به حدود ۱۹۸ منتقل شده و در سناریوی SSP585 با تأخیری در حدود ۷ تا ۱۰ روز نسبت به دوره پایه همراه است که بیانگر اثر افزایش دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر فنولوژی برنج می باشد.

از خواب و در نهایت زمان شکوفه دهی کلزا را تحت تأثیر قرار داده و سبب جابه جایی روز ژولیوسی شکوفه دهی نسبت به دوره پایه می شود. نتایج حاضر با یافته های مطالعات مشابه در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر فنولوژی گیاهان زراعی همخوانی دارد. برای یک دمای مشخص در فاز سرمایشی و گرمایشی، زمان شکوفه دهی کلزا (نواحی رنگی در نمودار و بر اساس روز ژولیوسی) در دوره پایه و بر اساس سناریوهای حالت متوسط و بدبینانه متفاوت می باشد. اما به طور کلی، الگوی تغییرات خطوط هم مقدار در زمان شکوفه دهی کلزا (خطوط هم مقدار در نمودار) بر خلاف الگوی تغییرات در محصولات باغی به گونه ای است که تاریخ شکوفه دهی تحت سناریوهای آینده کمی زودتر از دوره پایه می باشد علی رغم اینکه میانگین دما در فاز سرمایشی و گرمایشی نسبت به دوره پایه متفاوت است. به طور کلی متوسط دما در فاز سرمایشی و گرمایشی بر اساس سناریوهای آینده نسبت به دوره پایه افزایش یافته و موجب تغییر در زمان شکوفه دهی شده است. بررسی تغییرات در زمان شکوفه دهی محصول برنج در دوره پایه

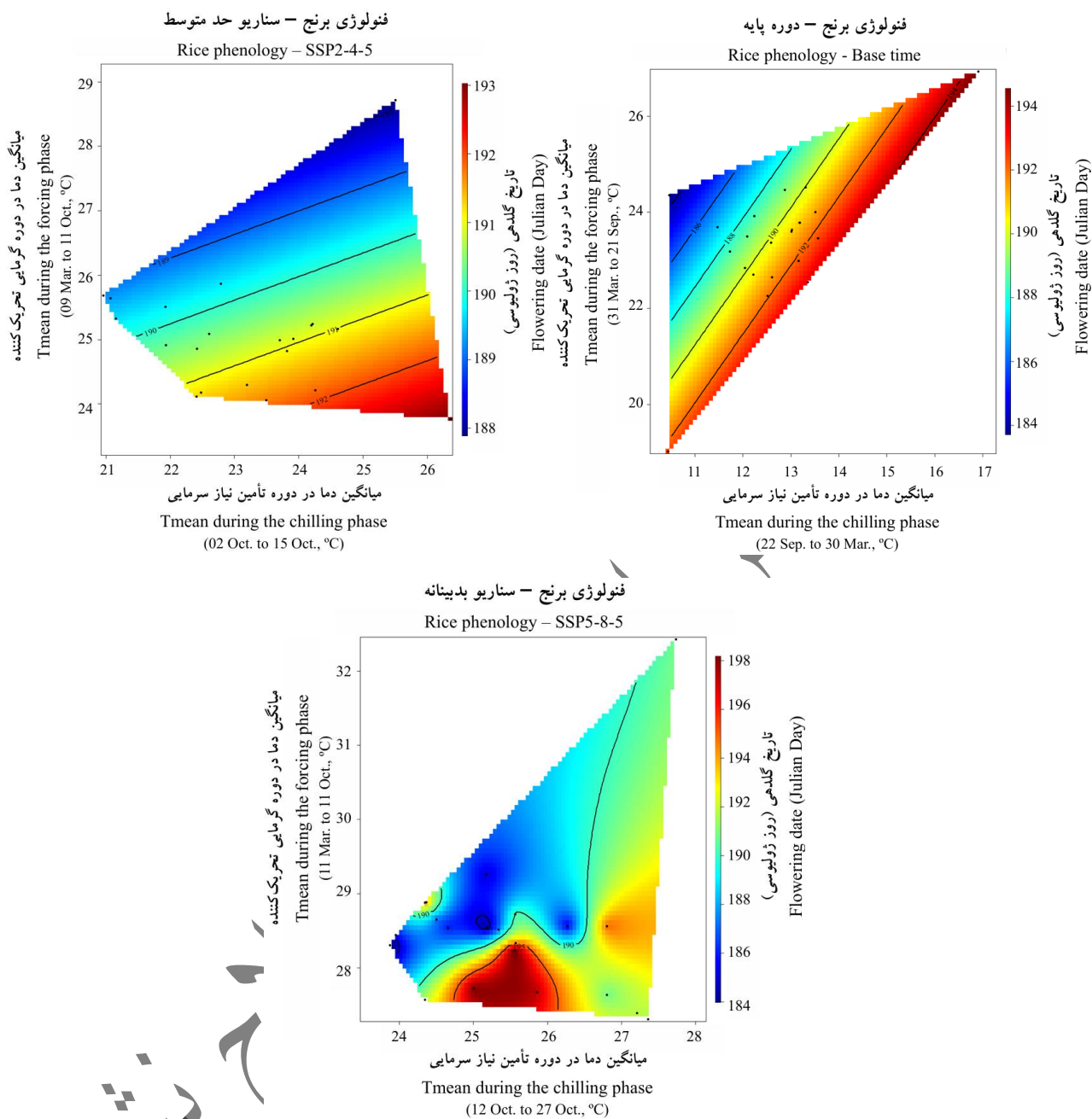


شکل ۵. نتایج بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی کلزا در دوره پایه و نیز براساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه

Fig. 7. Results of the study of 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 سطحی هوا در منطقه مورد مطالعه منجر به جابجایی مرحله شکفتن گیاهان خزان‌دار 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

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



شکل ۶. نتایج بررسی تغییرات در زمان شکوفه‌دهی برنج در دوره پایه و نیز براساس سناریوهای حد متوسط و بدبینانه
Fig 8. Results of the study of changes in rice flowering time in the baseline period and also based on moderate and pessimistic scenarios

از تأمین سرما برای شکفتن است، تا ظهور مرحله فنولوژیکی گیاه، تاریخ مورد نظر را برآورد می‌کند. افزایش کمینه و بیشینه دما و کاهش یا عدم تغییر بارندگی تحت سناریوهای آینده موجب افزایش نیاز آبی پتانسیل و نیاز

فنولوژی در گیاه شده است. ماهیت مدل نیاز سرمایی ساده در تعیین تاریخ شکوفه‌دهی گیاهان خزان دار یک تابع تک مرحله‌ای هست که با تجمیع ساعات سرمایی در محدوده تعریف شده در مدل و تکمیل ساعات حرارتی مورد نیاز در فاز گرمایشی که پس

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 کاهش دهد، به گونه‌ای که کشت زود هنگام، امکان بهره‌گیری بیشتری از آب در طول فصل کشت را فراهم آورده و نیاز به مصرف آب آبیاری در کشت محصولات کشاورزی و زراعی خصوصاً کشت برنج را کاهش می‌دهد. لذا تولید محصولات کشاورزی در استان مازندران در دوره‌های آبی مستلزم مدیریت مناسب تقویم کشت آن‌ها می‌باشد. به طور کلی، 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 می‌باشد. همچنین کاهش بارندگی خصوصاً در فصل خشک در کنار افزایش کمینه و بیشینه دما بر اساس تمامی سناریوهای آینده مورد مطالعه می‌تواند اثرات قابل توجهی بر شرایط کشاورزی پایدار در منطقه داشته باشد. برای تطابق با افزایش دماهای حداقل و حداکثر و کاهش بارندگی در فصول کشت، باید از طریق تغییر تقویم کشت بر اساس آستانه‌های دمایی مراحل مختلف رشد گیاهان، استفاده از ارقام مقاوم به تنش‌های حرارتی، مدیریت کارآمد آبیاری و کوددهی، طراحی، نصب، مدیریت و نگهداری صحیح سیستم‌های آبیاری و استفاده از تجهیزات مدرن آبیاری، اثرات منفی تغییر اقلیم را کاهش داد. همچنین در صورت افزایش بارندگی شدید در فصول مرطوب، بهبود وضعیت زهکشی در اراضی مستعد شرایط غرقابی و ماندابی، می‌تواند از اثرات منفی بارندگی‌های شدید در فصول مرطوب بکاهد.

تغییر متغیرهای اقلیمی خصوصاً دما و بارش در آینده موجب تغییر در تناسب اراضی زراعی خواهد شد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد در یک سناریوی اقلیمی آینده، تناسب اراضی برای کشت محصولات زراعی از جمله کلزا شرایط بهتر و پهنه وسیع‌تری باید و در سناریوهای دیگر شرایط برای کشت کلزا در اراضی

مازندران ضعیف‌تر شود. با توجه به اهمیت شرایط اقلیمی و اثرات بالقوه تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، مطالعه و یافتن تغییرات ناشی از آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. این مطالعه 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. مطالعات انجام شده 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 و ۲۰۸۰ خواهد شد (Amani et al., 2023). از طرفی، مطالعات انجام شده نشان داده است که میانگین دمای ماهانه در فصل پاییز (ماه نوامبر) نیز تأثیر مثبتی را روی عملکرد کیوی خواهد داشت که در واقع با مرحله رشد میوه و رسیدن کامل میوه کیوی متقارن می‌باشد. همچنین افزایش دمای پاییزه و رطوبت بالای فصل زمستان نیازهای آب و هوایی محصول کیوی را که نیازمند آب و هوایی 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 بالا رفتن 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 بالا می‌برد. با شرایط آب و هوایی مرطوب زمستانه و حاکم نشدن شرایط آب و هوایی خشک و سرد، میزان عملکرد محصول کیوی به مراتب افزایش می‌یابد (Solaimani and Safari Shad, 2011). به طور کلی ممکن است اثر تغییر اقلیم بر همه محصولات الزاماً منفی نباشد و لذا می‌توان به جنبه‌های مثبت تغییر اقلیم نیز توجه داشت و از آن در جهت 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 فنولوژیکی، کاهش کارایی مصرف آب و افزایش بروز تنش‌های حرارتی 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 تطبیقی مؤثر همچون انتخاب و به‌کارگیری ارقام مقاوم به تنش‌های اقلیمی (حرارتی، خشکی و شوری)، تغییر الگوی کشت و تنوع‌بخشی به محصولات زراعی و باغی، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری و اصلاح روش‌های خاک‌ورزی و مدیریت مواد 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 انطباق 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 دمای هوا در محدوده گرم شامل افزایش

تعداد روزها و شب‌های گرم، افزایش طول دوره‌های گرم و کاهش نمایه‌های مرتبط با سرما نظیر 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 فنولوژیکی و تغییر زمان شکوفه‌دهی محصولات باغی و زراعی مورد مطالعه 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 فنولوژیکی پیامدهای مستقیمی بر نیاز آبی، مدیریت تقویم کشت، تناسب اراضی و پایداری تولید کشاورزی در منطقه خواهد داشت. یافته‌ها همچنین 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 حرارتی 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 تطبیقی مبتنی بر شرایط اقلیمی آینده است. این پژوهش برای نخستین‌بار با تلفیق تحلیل نقاط شکست نمایه‌های حدی دما و مدل‌سازی پاسخ فنولوژیکی 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

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره تاریخ "۱۴۰۱-۱۱-۱۷" انجام شد که به این وسیله از معاونت متبوع تشکر و قدردانی می شود.

References

منابع مورد استفاده

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. (In Persian)
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. <http://jea.sanru.ac.ir/article-1-354-fa.html>.
4. Arif, A., Harsh, B.P., Harish, K., Surender, K., 2017. Effect of temperature and rainfall different on growth stages and yield of rice (*Oryza 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. Sixth Iranian Congress of Agriculture and Plant Breeding. September 2000.
6. Bannayan, M., Sadeghi Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohamadian, A., Aghaalkhani, 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. *Physiological Processes in Plants Under Low Temperature Stress*, 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). *Geoscientific Model Development*, 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., ... 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 Relat.* 7(1), 153-164. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.7.1.153>. (In Persian)
14. Mendes, K.R., Campos, S., Da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., ... Santos e Silva, C.M., 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., Vaheddooost, 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., Khoshnavesh, 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.* 439-455. SID. <https://sid.ir/paper/162619/en>. (In Persian)
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 Relat.* 9(4), 15-27. <http://dx.doi.org/10.29252/ejgcest.9.4.15>. (In Persian)
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)
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), 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. (e220001). *J. Sustain. Urban Reg. Develop. Stu.* e220001.
29. Vafae, 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., ... Fornara, F., 2023. Environmental control of rice flowering time. *Plant Commun.* 4(5).
32. Wang, H.J., Sun, J.Q., Chen, H.P., Zhu, Y.L., Zhang, Y., Jiang, D.B., ... Yang, S., 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteorol. Z.* 21(3), 279.
33. Xuan, Y., Yi, Y., Liang, H., Wei, S., Jiang, L., Ali, I., ... 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.
34. Yashas Kumar, H.K., Varija, K., 2023. Assessing the changing pattern of hydro-climatic variables in the Aghanashini River watershed, India. *Acta Geophys.* 1-18. <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. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate 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, 2004. 22, 13-14.