



Risk Analysis of the Impacts of Rising Temperature on the Phenological Cycle of Walnut in Western Iran Using CMIP6 Climate Models

Sanam Kohi¹, Mohsen Hamidianpour^{1*}, Mahmood Khosravi¹, Hamzeh Ahmadi²

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 January 2026

Revised: 02 May 2026

Accepted: 04 May 2026

Available Online:

06 May 2026

Keywords:

Climate Change

Walnut Phenological Cycle

CMIP6 Climate Models

SSP Scenarios

Temperature Increase

ABSTRACT

Climate change is one of the most significant challenges facing the agricultural sector, with profound implications for horticultural production. This study aimed to investigate the impacts of climate change on the phenological stages of walnut trees in the major walnut-producing provinces of western Iran. To this end, meteorological data from 35 meteorological stations during the baseline period (1990–2014) and outputs from 15 CMIP6 global climate models under two Shared Socioeconomic Pathway scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) were employed for two future time horizons: the near future (2021–2040) and the far future (2041–2060). To enhance prediction accuracy and reduce uncertainty, a weighted averaging approach using the best-performing models was applied. The findings indicate a significant temperature increase across the study region, with minimum temperatures projected to rise by 1.0 to 3.3°C and maximum temperatures by 0.8 to 2.1°C in future periods. These thermal changes will lead to substantial shifts in the walnut phenological calendar. Budbreak will occur 2 to 14 days earlier and flowering 3 to 15 days earlier compared to the baseline period. The onset of fruit growth will advance by 3 to 11 days in the near future and 8 to 17 days in the far future, while fruit maturation will occur 6 to 17 days and 16 to 29 days earlier, respectively. Consequently, the harvest date will be advanced by 7 to 33 days. In contrast, the winter dormancy period (9 to 29 days) and leaf senescence (8 to 37 days) will be delayed. Spatially, the most pronounced phenological shifts are projected for the cold regions in the north and east, while the smallest changes are expected in the warmer southern and southwestern areas. These uneven and premature alterations pose serious risks, including increased vulnerability to late spring frosts, heat and water stress during critical growth stages, and disruption to the product supply chain. The results underscore the urgent need to develop adaptive strategies, such as utilizing late-flowering cultivars, to mitigate the adverse impacts of climate change on walnut orchards in the region.

* Corresponding author: Mohsen Hamidianpour

E-mail address: m.hamidian355p@gmail.com

How to cite this article: Kohi, S., Hamidianpour, M., Khosravi, M., & Ahmadi H. (2026). Risk Analysis of the Impacts of Rising Temperature on the Phenological Cycle of Walnut in Western Iran Using CMIP6 Climate Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 252-275. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.97532.1643>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Climate change, driven by rising greenhouse gases, poses a significant threat to global ecological balance, with agriculture being particularly vulnerable due to its direct climate dependency. Horticultural and nut crops like walnuts are especially sensitive to thermal fluctuations, which can jeopardize their yield and quality. Consequently, analyzing the impact of climate change on plant phenology is a crucial step for optimizing resource use and mitigating future risks. Existing literature, including regional studies in Iran and globally, underscores this vulnerability, demonstrating that rising temperatures advance key phenological stages—such as flowering and fruit maturation—in various tree species, including walnuts, pistachios, and apples. These shifts can disrupt dormancy cycles, increase exposure to late frosts, and alter water requirements.

However, a research gap exists in conducting a comprehensive, high-resolution assessment of climate change impacts across all major phenological stages of walnut trees specifically in western Iran, utilizing the latest CMIP6 climate models and SSP scenarios. Previous studies have often focused on specific regions, stages, or older model generations. This study aims to address this gap by systematically evaluating the effects of projected climate change on the seven key phenological stages of walnut trees in this vital cultivation area. It seeks to determine the extent and spatial variability of changes in the timing and length of these stages under different future scenarios. The research is guided by two primary questions: 1) Does the selection of different climate models influence the projected outcomes? and 2) What specific effects will climatic changes have on the duration and scheduling of the phenological stages of walnut trees in western Iran? By employing an ensemble of CMIP6 models under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for near- and far-future periods, this study provides a nuanced, forward-looking analysis intended for agricultural planners, policymakers, and environmental researchers to inform adaptive strategies and safeguard walnut production against imminent climatic threats.

Material and Methods

This study employed an integrated observational and simulation-based design to assess the impact of future temperature changes on the phenological stages of walnut trees in five major walnut-producing provinces of western Iran (Kurdistan, Hamadan, Lorestan, Kermanshah, and Ilam). The foundational data consisted of daily minimum and maximum temperature observations from 35 meteorological stations for the 1990–2014 baseline period. For future projections, data from 15 CMIP6 climate models under two scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, were used for two future periods: 2021–2040 and 2041–2060. Following the extraction and spatiotemporal alignment of the model and observational data, the performance of each climate model was evaluated against the baseline observations using multiple statistical indices (CC, RMSE, NRMSE, ANMBD, AARD). Subsequently, the models were weighted by applying normalization, ranking via the Pomeroy-Romero method, and entropy-based weighting to create a weighted multi-model ensemble, thereby reducing projection uncertainty. In the next phase, the daily temperature data (both observed and projected) were converted to Julian dates. By applying established temperature thresholds and growing degree-day requirements for each of the seven walnut phenological stages, the occurrence date for each stage was calculated for all stations and time periods. Finally, the quantitative results of these temporal shifts were spatially analyzed and mapped using a GIS environment.

Results and Discussion

Analysis of walnut tree phenological stages during the baseline period (1990–2014) revealed that the growing season in the region varies from approximately March to November (9 months). Bud break occurs from mid-March in warm, low-altitude areas (e.g., Ilam) to early May in cold, high-altitude regions (e.g., Kurdistan, Hamadan), indicating a 50-day difference in the start of the growing season. Flowering occurs about 10 days after bud break, spanning from late March to mid-May. Other phenological stages also occur later from south to north and from lowlands to highlands; for instance, harvest takes place from

late August in warm areas to mid-October in colder zones. Leaf senescence and the onset of dormancy begin earlier in cold regions (mid-October) and later in warm regions (mid-November).

Following the selection and weighting of the best-performing CMIP6 models for temperature simulation, projections were made under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The results indicate a temperature increase across the entire region, but this warming is markedly more intense in cold, high-altitude areas (e.g., Saqqez, Zarrineh) compared to warm, low-altitude zones (e.g., Dehloran). This asymmetric warming directly impacted the walnut phenological cycle.

After projecting the temperature changes, the changes in the phenological stages of walnut trees in two future periods (2021–2040 and 2041–2060) were investigated, based on the temperature changes obtained under the SSP5-8.5 scenario, which showed relatively greater temperature variations. In the future periods (2021–2040 and 2041–2060), under the SSP5-8.5 scenario, all growth stages are projected to occur earlier. Bud break will advance by 2 to 14 days, flowering by 3 to 15 days, fruit set by 3 to 17 days, and fruit maturation by 6 to 29 days compared to the baseline period. Consequently, the harvest date will also shift earlier by 7 to 33 days. The most significant shifts were observed in the cold, high-altitude areas of the north and east (Kurdistan and Hamadan provinces), while the smallest changes occurred in the warm southwestern parts. Conversely, the stages of leaf senescence (delayed by 8 to 37 days) and dormancy onset (delayed by 9 to 29 days) are projected to occur significantly later. These asynchronous shifts in the agricultural calendar for walnuts entail risks such as increased vulnerability to late spring frosts and disruptions to harvest scheduling and market logistics.

Conclusion

This study assessed climate change impacts on walnut phenology in western Iran. By employing a weighted multi-model ensemble of 15 CMIP6 models under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, the projections indicate that minimum temperatures will increase by 1–3.3°C and maximum temperatures by 0.8–2.1°C by the middle of the 21st century. These changes will significantly advance key phenological stages: bud break by 2–14 days, flowering by 3–15 days, and harvest by 7–33 days, with the most pronounced shifts occurring in colder, higher-altitude northern and eastern regions. Conversely, leaf senescence and dormancy onset will be delayed by 8–37 days. The earlier onset of sensitive stages, particularly flowering, heightens the risk of damage from late spring frosts, while higher growing-season temperatures increase the potential for heat stress and greater irrigation demand. These findings underscore the urgent need for adaptive strategies in orchard management to mitigate future climatic risks to walnut production.



تحلیل مخاطرات ناشی از افزایش دما بر چرخه فنولوژیکی گردو در غرب ایران با استفاده از مدل های اقلیمی CMIP6

صنم کوهی^۱، محسن حمیدیان پور^{۱*}، محمود خسروی^۱، حمزه احمدی^۲

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲ گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	تغییر اقلیم از مهمترین چالش های فراروی بخش کشاورزی است. پژوهش پیش رو با هدف واکاوی اثرات آن بر مراحل فنولوژی درخت گردو در استان های گردوخیز غرب ایران انجام شد. برای این منظور، از داده های ۳۵ ایستگاه هواشناسی در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و خروجی ۱۵ مدل CMIP6 تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دو دوره؛ آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) استفاده گردید. برای افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت، روش میانگین گیری وزنی مدل های برتر به کار گرفته شد. یافته ها حاکی از افزایش معنی دار دما در منطقه است؛ دمای کمینه ۱ تا ۳/۳ درجه و دمای بیشینه ۰/۸ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. این تغییرات منجر به دگرگونی آشکار در تقویم فنولوژیکی گردو می گردد. زمان شکوفه دهی ۲ تا ۱۴ روز و گل دهی ۳ تا ۱۵ روز زودتر رخ خواهد داد. آغاز رشد میوه در آینده نزدیک ۳ تا ۱۱ روز و در آینده دور ۸ تا ۱۷ روز جلوتر افتاده و تکمیل نمو میوه به ترتیب ۶ تا ۱۷ روز و ۱۶ تا ۲۹ روز زودتر رقم خواهد خورد. در نتیجه، تاریخ برداشت محصول بین ۷ تا ۳۳ روز پیشی می گیرد. در مقابل، دوره خواب زمستانه (۹ تا ۲۹ روز) و خزان برگ ها (۸ تا ۳۷ روز) با تأخیر مواجه خواهد شد. از نظر مکانی، بیشترین تغییرات در نواحی سردسیری شمال و شرق و کمترین آن در نواحی گرمسیری جنوب و جنوب غرب رخ می دهد. این تغییرات نامتوازن، مخاطراتی چون افزایش آسیب پذیری در برابر سرمازدگی بهار، تنش های گرمایی و آبی در مراحل حساس رشد و اختلال در زنجیره تأمین محصول را به دنبال دارد. نتایج، ضرورت تدوین راهبردهای سازگاری نظیر استفاده از ارقام دیرگل را برای مقابله با پیامدهای منفی تغییر اقلیم در باغات گردوی منطقه آشکار می سازد.
کلمات کلیدی:	
تغییر اقلیم	
چرخه فنولوژی گردو	
مدل های اقلیمی CMIP6	
سناریوهای SSP	
افزایش دما	

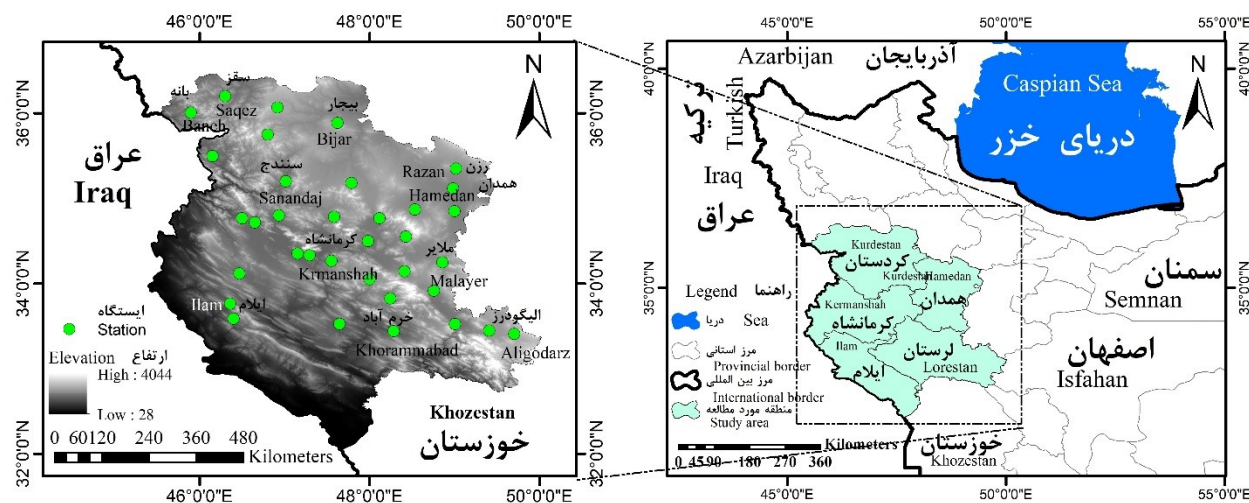
مقدمه

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و متعاقب آن افزایش دمای کره زمین، تعادل سیستم اقلیمی را برهم زده و تغییرات اقلیمی گسترده‌ای را در اغلب نقاط جهان موجب شده است (IPCC, 2021). تغییر اقلیم پیامدهای منفی چشمگیری بر اقتصاد جهانی دارد، به‌ویژه آن‌که در کشورهای در حال توسعه، بخش کشاورزی مهمترین بخش اقتصادی محسوب می‌شود (Falco, 2018; Donzelli & Opler, 2018). بر اساس یافته‌های گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، دمای سطح زمین در دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره ۱۹۰۰-۱۸۵۰ حدود ۱/۰۹ درجه سلسیوس (دامنه اطمینان ۰/۹۵ تا ۱/۲۰ درجه) افزایش یافته است. پیش‌بینی‌ها برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ حاکی از افزایش دمایی بین ۱/۴ درجه سلسیوس (تحت سناریوی انتشار بسیار پایین) تا ۲/۷ درجه سلسیوس (تحت سناریوی انتشار متوسط) و ۴/۴ درجه سلسیوس (تحت سناریوی انتشار بسیار بالا) می‌باشد (IPCC, 2021). افزایش دمای هوا، تغییر در الگوهای بارش و افزایش فراوانی رخداد‌های حدی اقلیمی نظیر خشکسالی و موج‌های گرما، پایداری تولیدات کشاورزی را در بسیاری از مناطق جهان با تهدید جدی مواجه کرده است. این تغییرات می‌توانند از طریق کاهش عملکرد محصولات، اختلال در مراحل فنولوژیک گیاهان و افزایش تنش‌های محیطی، امنیت غذایی و معیشت وابسته به کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهند (Zhao et al., 2025). لذا؛ با توجه به تغییر اقلیم و افزایش گرمایش جهانی، محصولات باغی به شدت آسیب‌پذیر هستند و هر نوع تغییر یا نوسان در پارامترهای اقلیمی، کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی و خصوصاً محصولات آجیلی همچون گردو که به تغییرات دمایی حساس هستند را به خطر می‌اندازد (Cerovic, Golosin, Todorovic & Bijelic, 2010; Vahdati, 2018; Massah Bavani, Khosh-khui, Fakor & Sarikhani Khorami, 2018). از این رو، تحلیل و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر چرخه فنولوژیکی درختان می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در جهت بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی و کاهش مخاطرات و خسارت‌های احتمالی آینده تلقی گردد (Anwar et al., 2015). در همین راستا، کوهی و همکاران (Kohi, Hamidianpour, Khosravi & Ahmadi, 2025) با استفاده از ۱۵ مدل CMIP6 تغییرات دماهای کمینه و بیشینه را در نواحی کوهستانی غرب ایران تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش دما در این مناطق به‌ویژه در ایستگاه‌های مرتفع مانند سقز چشمگیرتر است و در آینده نزدیک و میانه به ترتیب حدود ۱/۴ و ۲/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت؛ یافته‌ای که بر اهمیت موضوع می‌افزاید. در واقع، نوسان در مراحل فنولوژیکی یکی از حساس‌ترین واکنش‌های اکولوژیکی گیاهان به تغییرات اقلیمی می‌باشد. برای شناسایی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی سامانه‌های بیولوژیکی، ضروری است که واکنش‌های فنولوژیکی به تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گیرد (Ahmadi, Fallahghalhari & Baaghideh, 2018). مثلاً، ماریانا و نیکولینا (Mariana & Niculina, 2017) اثرات شرایط اقلیمی بر روی گلدهی درختان گردو در منطقه رومانی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که گلدهی درختان گردو به شدت وابسته به شرایط دمایی است و تغییرات آن در شرایط تغییر اقلیم می‌تواند زمان گلدهی درختان گردو را به جلو بیاندازد. کاسمولوسکو و لونسکو (Cosmulescu & Lonescu, 2018) به بررسی تقویم فنولوژیکی بعضی از ارقام گردو در منطقه رومانی براساس دمای هوا پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش دمای هوای فصل بهار موجب شروع زود هنگام مراحل فنولوژی گردو و افزایش دمای هوا در پاییز و زمستان موجب کاهش نیاز سرمایی و کاهش عملکرد گردو می‌شود. وحدتی و همکاران (Vahdati, Vahdati Massah, 2019; Bavani, Khosh-khui, Fakor & Sarikhani Khorami, 2019) با به کارگیری مدل‌های CMIP5 به ارزیابی مناطق مناسب کشت گردو در واکنش به تغییر اقلیم در ایران پرداختند و نشان دادند که سطح اراضی مناسب برای کشت گردو در ایران از ۵۸۲۸۴۴ کیلومتر مربع در شرایط کنونی به ۵۴۶۷۱۰ کیلومتر مربع در دوره آتی کاهش خواهد یافت که معادل ۶/۱۹ درصد کاهش است. خان و همکاران (Khan, Hussain, Ali, Ali & Nisar, 2020) به بررسی فنوتیپ‌های درخت گردو در ارتباط با عوامل محیطی در رشته کوه‌های هندوکش پاکستان پرداختند. نتایج نشان داد که عوامل محیطی به ویژه شرایط اقلیمی، اثرات عمده‌ای بر درخت گردو می‌گذارد. حمیدیان‌پور و همکاران (Hamidianpour, Shoja & Khashei-Siuki, 2023) اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر- تعرق مرجع،

ضریب گیاه، فنولوژی و نیاز آبی پنبه را با استفاده از پنج مدل اقلیمی CMIP6 بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد افزایش دما و تابش خورشید موجب کوتاه‌تر شدن دوره رشد و افزایش نیاز آبی پنبه تا حدود ۲۶ درصد در آینده خواهد شد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Baaghdeh & Dadashi-Roudbari, 2021) به بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی مناطق کشت پسته در ایران بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP5 پرداختند. نتایج نشان داد که زمان رخداد مرحله فنولوژیکی گلدهی پسته تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۶ و ۶ روز زودتر رخ خواهد داد. رابین و همکاران (Robin et al., 2024) با هدف بهبود پایش فنولوژیک گردوی ایرانی در پاسخ به تغییرات اقلیمی و تسهیل توسعه ارقام سازگار با شرایط گرم‌تر یک مقیاس فنولوژیک استاندارد را ارائه دادند. در این مقیاس، ۵۷ زیرمرحله در ۱۰ مرحله اصلی رشد تعریف شده‌اند که پوشش دهنده کل چرخه حیات گیاه از جوانه‌زنی تا رسیدگی میوه است. مرادجانی (Moradjani, 2016) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پهنه‌بندی کشت گردو در استان لرستان با استفاده از مدل LARS-WG پرداختند. نتایج نشان داد که با توجه به پیش‌نمایی افزایش دما در مناطق جنوبی استان تنش گرمایی رخ می‌دهد اما در نقاط سرد استان تنش دمایی رخ نخواهد داد. سبحانی و همکاران (Sobhani, Ganji & Goldoust, 2017) در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر طول دوره رشد درخت سیب در سمیرم و ارومیه، نتیجه گرفتند که در دوره‌های آینده تأمین زودتر نیاز حرارتی موجب کاهش طول دوره رشد درخت سیب شده است. همچنین افزایش تبخیر و بالا رفتن میزان درجه روزهای رشد باعث افزایش نیاز آبی درخت سیب خواهد شد. سالاری سلاجقه (Salari Salajegheh, 2022) به تحلیل مخاطرات اقلیمی کشت درخت گردو در شهرستان بافت پرداختند. نتایج نشان داد که سرمازدگی و یخبندان جزو مخاطرات اقلیمی عمده درخت گردو محسوب می‌شوند. بنی اسدی و همکاران (Baniasadi, Mazidi, Mozafari & Omidvar, 2023) به بررسی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر شاخص‌های اقلیم کشاورزی درخت پسته در رفسنجان با استفاده از مدل CanESM5 تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پرداختند. نتایج نشان داد که متوسط دمای روزانه در فصل رشد پسته تحت سناریوی SSP2-4.5 طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۷۴ نسبت به دوره پایه (۲۳/۵ درجه سلسیوس) افزایش دارد و به ۲۴/۶ درجه سلسیوس می‌رسد. با توجه به اقلیم در حال تغییر (Hamidianpour, Nazari pour, Khazaie Fizabad, Farzaneh & Firozeh, 2023) و روند فزاینده گرمایش جهانی، محصولات کشاورزی در معرض آسیب‌پذیری جدی قرار دارند. هرگونه تغییر یا نوسان در پارامترهای اقلیمی (Namroodi, Hamidianpour & Poodineh, 2021)، می‌تواند کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی را تهدید کند (Azizzadeh, 2019). از این رو، بررسی پیامدهای تغییر اقلیم در قالب پیش‌نمایی‌های درازمدت، می‌تواند به عنوان نقشه راهی مؤثر برای مدیریت بخش کشاورزی و به ویژه زیربخش باغبانی مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس، پژوهش پیش‌رو به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیکی درخت گردو در نیمه‌غربی ایران طی دوره‌های آینده، با بهره‌گیری از برون‌داد مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای مختلف خط سیر اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP)، می‌پردازد و در نهایت در تلاش است تا به پرسش‌های بنیادین زیر پاسخ دهد: ۱- آیا انتخاب مدل‌های گوناگون در نتایج تغییر اقلیم و پیامدهای آن تأثیر دارد؟ ۲- تغییرات اقلیمی چه اثری بر طول و زمان‌بندی مراحل هفت گانه فنولوژیکی درخت گردو در نیمه‌غربی ایران خواهد داشت؟

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق شامل استان‌های کردستان، همدان، لرستان، کرمانشاه و ایلام است. براساس بررسی‌های انجام شده، استان‌های مورد مطالعه؛ به خصوص لرستان، همدان و کردستان جزو مناطق اصلی کشت و پرورش درخت گردو و محصول گردو محسوب می‌شوند. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه
Fig. 1. Geographical location and the meteorological stations of the study area

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از دو منبع اصلی گردآوری شد. دسته نخست شامل داده‌های مشاهداتی ۳۵ ایستگاه هواشناسی منتخب در نواحی مورد مطالعه است که از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. این داده‌ها دوره زمانی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) را پوشش می‌دهند و به عنوان مبنای ارزیابی وضعیت اقلیمی پایه مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). دسته دوم مربوط به خروجی مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs)^۱ برگرفته از برونداد فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) است^۲ (جدول ۱). این داده‌ها در دو بخش مورد بهره‌برداری قرار گرفتند: نخست داده‌های تاریخی که همزمان با دوره مشاهداتی ایستگاه‌ها بوده و امکان مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها را فراهم می‌سازد؛ دوم داده‌های آینده که بر اساس سناریوهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) در دو حالت خوش‌بینانه و بدبینانه تولید شده‌اند و برای پیش‌نمایی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۲۱-۲۰۴۱) به کار گرفته شدند.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

Table 1- Specifications of CMIP6 models discussed in this study

کشور	موسسه / سازمان	قدرت تفکیک	مدل	ردیف
Country	Institution / Organization	Resolution	Model	Row
استرالیا	سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی کشورهای مشترک المنافع	$1.87^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	ACCESS-CM2	۱
Australia	The organization for scientific and industrial research of common countries			
ایتالیا	مرکز اروپایی - مدیترانه‌ای تغییر اقلیم	$1.3^{\circ} \times 0.9^{\circ}$	CMCC-ESM2	۲
Italy	European - mediterranean center for climate change			
سوئد	مرکز راسبی، موسسه هواشناسی و هیدرولوژی سوئد	$1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$	EC-Earth3	۳
Sweden	The Rossby center, the meteorological institute and the Swedish hydrology institute			
چین	آکادمی علوم چین	$2^{\circ} \times 2.3^{\circ}$	FGOALS-g3	۴
China	Chinese academy of sciences			
ایالات متحده	اداره ملی اقیانوسی و جوی، آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی	$1.3^{\circ} \times 1^{\circ}$	GFDL-ESM4	۵
USA	National oceanic and atmospheric administration, geophysical fluids dynamics laboratory			

1 - Global Climate Models

2 - <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

ایالات متحده USA	موسسه مطالعات فضایی گودارد، اداره ملی هوانوردی و فضا Goddard space studies institute, national aeronautics and space agency	$1.25^{\circ} \times 1^{\circ}$	GISS-E2-2-G	۶
روسیه Russian	موسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه، مسکو Institute of numerical mathematics, the Russian academy of sciences, Moscow	$2^{\circ} \times 1.5^{\circ}$	INM-CM4-8 INM-CM5-0	۷ ۸
ژاپن Japan	آژانس علوم و فناوری دریایی-زمینی ژاپن Japan marine and marine science agency	$1.41^{\circ} \times 1.41^{\circ}$	MIROC6	۹
آلمان Germany	موسسه هواشناسی ماکس پلانک Max Planck institute of meteorology	$0.93^{\circ} \times 0.93^{\circ}$	MPI_ESM1_2_HR MPI-ESM1-2-LR	۱۰ ۱۱
ژاپن Japan	موسسه پژوهش‌های هواشناسی Institute of meteorological research	$1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$	MRI_ESM2_0	۱۲
چین China	دانشگاه علوم و فناوری اطلاعات نانجینگ Nanjing information and sciences university (Nanjing)	$1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$	NESM3	۱۳
نروژ Norway	کنسرسیوم مدل‌سازی اقلیم با مرکز پژوهش‌های بین‌المللی اقلیم و محیط زیست The consortium of climate modeling consists of the international research Centre for climate and environmental research	$0.9^{\circ} \times 1.3^{\circ}$	NorESM2_MM	۱۴
تایوان Taiwan	مرکز پژوهش‌های تغییرات محیطی، آکادمیا سینیکا Environmental change research center, Academia Sinika	$1.25^{\circ} \times 0.95^{\circ}$	TaiESM1	۱۵

سناریوهای مورد بررسی

سناریوهای مربوط به CMIP6 تحت عنوان خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) ارائه شده‌اند. این سناریوها به‌روزترین سناریوهای حال حاضر جهت بررسی تغییرات اقلیمی است که بر اساس مجموعه‌ای از خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک بنانهاده شده‌اند (IPCC, 2021؛ Hamidianpour & Shoja, 2022). در این پژوهش از سناریوی حد متوسط SSP2-4.5 که دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط در نظر می‌گیرد و همچنین سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 که حد بالای سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی را نشان می‌دهد استفاده شد (Riahi et al., 2017; Zhang, Su, Singh & Ayantobo, 2021). سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش یعنی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در جدول ۲ توصیف شده‌اند.

جدول ۲- سناریوهای SSP مورد بررسی در این پژوهش

Table 2 – SSPs scenarios in case study in this research

چالش‌ها Challenges	روایت Narrative	سناریو Scenario
متوسط برای کاهش و انطباق Average to reduce and adapt	میان راه (چالش برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اجتماعی و محیطی) Middle of the road (Challenges for reducing vulnerability to social and environmental changes)	SSP2-4.5
بالا برای کاهش، کم برای سازگاری High to reduce, low for adaptation	توسعه با سوخت فسیلی - در پیش گرفتن بزرگراه (چالش‌های بالا برای کاهش، چالش‌های کم برای سازگاری) Fossil-fueled development - Taking the highway (High challenges for mitigation, low challenges for adaptation)	SSP5-8.5

پس از دریافت داده‌ها، مقادیر پارامترهای مشاهداتی و تاریخی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، با تهیه برنامه در محیط MATLAB با استفاده از نزدیکترین یاخته داده‌های CMIP6 در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) استخراج شدند (Kohi et al., 2025). در ادامه عملکرد مدل‌های مورد استفاده با استفاده از توابع ارزیابی عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت (Karydas, Gitas, Koutsogiannaki, Lydakis; Simantiris & Silleos, 2009; Sreelatha & Raj, 2019). پس از اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل‌های مختلف CMIP6، با استفاده از همادی کردن مدل‌های برتر، تغییرات دما در دوره‌های آینده تحت سناریوهای مختلف پیش‌نمایی شد.

ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی

در این پژوهش جهت ارزیابی دقت و توانایی مدل‌های CMIP6 به مقایسه داده‌های مشاهداتی ایستگاهی و داده‌های تاریخی مدل در دوره (۱۹۹۰-۲۰۱۴) با استفاده از شاخص‌های ^۱CC، ^۲RMSE، ^۳NRMSE، ^۴ANMBD و ^۵AARD پرداخته شد که بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند (Hamidianpour et al., 2023).

$$CC = \left(\sum_{i=1}^T \frac{[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{(T-1)\sigma_x\sigma_y} \right) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}} \quad (3)$$

$$ANMBD = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (y_i - x_i)^2}}{\bar{x}} \quad (4)$$

$$AARD = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T |ARD_i|; \text{ where } ARD_i = \frac{(y_i - x_i)^2}{\bar{x}} \quad (5)$$

علامت‌های y_i مقادیر GCM ها شبیه سازی شده و x_i مقادیر داده‌های مشاهداتی و $\bar{x}$ میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشد. در ادامه در راستای انتخاب شاخص عملکردی بهتر، شاخص‌های عملکرد خطای مدل‌ها بر اساس شاخص پومرال و رومرو (Pomerolm & Romero, 2000) نرمال سازی و رتبه‌بندی گردید.

$$k_{aj} = \frac{k_j(a)}{\sum_{a=1}^T k_j(a)} \quad (6)$$

وزن آنتروپی هر شاخص، ارزش تنوع^۶ و در نهایت وزن نرمال شده شاخص‌های عملکرد محاسبه گردید (معادله ۷ تا ۹)

$$En_j = \frac{1}{\ln(T)} \sum_{a=1}^T k_{aj} \ln(k_{aj}) \text{ for } 1, \dots, J \quad (7)$$

$$Dd_j = 1 - En_j \quad (8)$$

$$r_j = \frac{Dd_j}{\sum_{j=1}^i Dd_j} \quad (9)$$

این وزن در نهایت بیانگر اعتبار و ارزش و قدرت توجیهی هر یک از شاخص‌های ارزیابی عملکرد است (Raju & Nagesh Kumar, 2018). ضمن اینکه می‌توان از این وزن‌های برای رتبه‌بندی مدل‌های مورد استفاده نیز استفاده کرد.

1 - Pearson Correlation Coefficient

2 - Root Mean Square Error

3 - Normalized Root Mean Square Deviation

4 - Absolute Normalized Mean Bias Deviation

5 - Annualized Asymmetric Radiation Dissatisfaction

وزن دهی و همادی کردن

یکی از روش‌های کمی‌سازی میزان عدم قطعیت ناشی از به کارگیری مدل‌های GCM مختلف، استفاده از روش وزن دهی میانگین‌های مشاهداتی متغیرهای مورد بررسی مانند دمای بیشینه و کمینه می‌باشد. وزن مدل‌های مورد بررسی GCM در مورد شبیه سازی دما محاسبه گردید و بر اساس وزن تولید شده برای هر مدل، میانگین وزنی همادی برای دوره پایه و آینده نزدیک و میانه محاسبه گردید (Hamidianpour & shoja, 2022).

$$W_{i,j} = \frac{\frac{1}{|\Delta T_{i,j}|}}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{|\Delta T_{i,j}|} \right)} \quad (10)$$

که $W_{i,j}$ وزن داده شده به هر یک از مدل‌ها در روز مورد نظر، $T_{i,j}$ متغیر مورد بررسی، ΔT اختلاف میانگین متغیر مورد بررسی شبیه سازی شده با مقدار مشاهداتی در دوره پایه، i, j به ترتیب نشان دهنده روز و مدل گردش عمومی جو است.

نحوه استخراج تاریخ رخداد مراحل فنولوژی درخت گردو

فنولوژی علم مطالعه رخدادهای بیولوژیکی دوره‌ای درختان و گیاهان تحت تأثیر شرایط محیطی می‌باشد (Cosmulescu & Lonescu, 2018). یکی از مهم‌ترین این شرایط محیطی، اقلیم و تغییر اقلیمی است که اثرات عمده‌ای بر روی چرخه‌های حیاتی، چرخه سالانه، دوره رشد و تأخیر در مراحل فنولوژی دارد (Charrier, Bonhomme, Lacointe & Ameglio, 2011). بر اساس بررسی‌ها درجه حرارت‌های ماه مارس و آوریل بالاترین اثر را بر روی تاریخ جوانه زنی برگ، گرده افشانی و گلدهی درختان گردو ایفا می‌کند (Soleimani, Rabiei, Hassani & Mozaffari, 2019). بعد از بررسی منابع و نظرات کارشناسان باغبانی و تهیه و استخراج نیازهای دمایی و سنجش آستانه‌های دمایی درخت گردو در مراحل مختلف فنولوژی، زمان رخداد مراحل فنولوژی اصلی درخت گردو در سطح ایستگاههای مورد مطالعه سنجش شد. در این راستا بعد از آماده سازی داده‌های کمینه و بیشینه و میانگین دمای روزانه، تاریخ‌ها به روز شمار ژولیوسی از اول ژانویه تا آخر دسامبر تبدیل گردید. بعد از سنجش مقدار درجه روز و آستانه دمایی هر کدام از مراحل هفت گانه فنولوژیکی درخت گردو، تاریخ‌های زمان رخداد هر مرحله به تفکیک ایستگاه‌ها مشخص شد. این مراحل برای دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و دو دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱) محاسبه شد. در پایان جهت نمایش بهتر تغییرات، تاریخ‌های ژولیوسی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به صورت توزیع مکانی در سطح منطقه مورد مطالعه ارائه گردید.

نتایج و بحث

بررسی مراحل اصلی فنولوژی درخت گردو (هفت مرحله فنولوژیکی) در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره مشاهداتی (۲۰۲۰-۱۹۹۰) نشان داد که فصل رشد درخت گردو در منطقه مورد مطالعه از نیمه دوم اسفند تا اواخر آبان ماه (حدود ۹ ماه) بسته به شرایط ارتفاعی و اقلیمی متغیر است. نتایج نشان داد که مرحله جوانه‌زنی و نمو برگ از نیمه دوم ماه مارس برای مناطق کم ارتفاع و نیمه گرمسیری در استان ایلام تا دهه اول ماه می در نواحی مرتفع و سردسیر در استان‌های کردستان و همدان و لرستان متغیر است و یک اختلاف زمانی ۵۰ روزه برای آغاز جوانه‌زنی درختان گردو در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. مرحله گلدهی گردو نیز به فاصله ۱۰ روز بعد از جوانه زنی رخ می‌دهد. زودترین گلدهی در مناطق استان ایلام از ۲۵ ماه مارس به بعد آغاز شده و تا دهه دوم ماه می در مناطق سردسیر مانند زرینه اوباتو به طول می‌انجامد. عمده زمان گلدهی در منطقه مورد مطالعه در ماه آوریل است. بر اساس نتایج بین عرض‌های پایین و کم ارتفاع منطقه در استان ایلام تا مناطق مرتفع و عرض جغرافیایی بالاتر در استان کردستان حدود یک ماه تأخیر در زمان گلدهی وجود دارد. زمان رخداد مرحله فنولوژیکی آغاز رشد میوه نیز از دهه اول آوریل در مناطق نیمه گرمسیری استان ایلام تا اوایل ماه ژوئن در مناطق سردسیر استان کردستان و همدان متغیر می‌باشد. زمان رخداد مرحله رشد و نمو میوه گردو بعد از یک بازه زمانی ۴ ماهه رخ می‌دهد. این مرحله فنولوژیکی با توجه به شرایط ارتفاعی و اقلیمی منطقه، از اواخر

جولای تا نیمه اول سپتامبر به طول می‌انجامد. زمان مرحله فنولوژیکی رسیدن و برداشت میوه گردو نیز بعد از یک بازه زمانی ۳۵ روزه به طور عمده از اواخر آگوست در مناطق نیمه گرمسیری تا نیمه اول اکتبر در مناطق سردسیر و مرتفع به طول می‌انجامد. رخداد مرحله فنولوژیکی آغاز خزان و ریزش برگ‌ها در مناطق سردسیر زودتر از مناطق کم ارتفاع و نیمه گرمسیر رخ می‌دهد. زمان رخداد این مرحله در درختان گردو از نیمه دوم اکتبر در مناطق مرتفع و سردسیر منطقه آغاز شده و تا نیمه دوم نوامبر در مناطق کم ارتفاع و گرمتر منطقه به تأخیر می‌افتد. همچنین زمان رخداد مرحله دوره خواب و رکود درخت گردو از نیمه اول و دوم نوامبر در مناطق سردسیر شروع و تا اواخر دسامبر در مناطق گرمسیر جنوب منطقه مورد مطالعه طول خواهد کشید (جدول ۳).

سپس به منظور پیش‌نمایی تغییرات دمایی ابتدا ۱۵ مدل CMIP6 مورد ارزیابی قرار گرفت بر اساس نتایج برای دمای کمینه، به ترتیب مدل‌های ACCESS-CM2، EC-Earth3، INM-CM4-8، FGOALS-g3، MRI-ESM2-0 و برای دمای بیشینه، مدل‌های NorESM2، MPI-ESM1-2-LR، MPI-ESM1-2-HR، INM-CM5-0 و INM-CM4-8 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی تغییرات دما در دوره پایه داشته‌اند. سپس مدل‌های منتخب با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی، همادی شدند. بر اساس نتایج حاصل روش مورد بررسی ضمن در نظر گرفتن کاهش عدم قطعیت در پیش‌نمایی‌های اقلیمی از دقت بالایی در شبیه‌سازی متغیرهای مورد مطالعه برخوردار است. پس از همادی کردن مدل‌های منتخب، به پیش‌نمایی تغییرات دمای کمینه و بیشینه در دو دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱) تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که در دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بیشترین تغییرات دمای کمینه نسبت به دوره پایه مربوط به ایستگاه سرپل ذهاب در غرب منطقه مطالعاتی با ۲ درجه سلسیوس افزایش و کمترین تغییرات مربوط به ایستگاه دهلران در جنوب منطقه با ۱/۳ درجه سلسیوس افزایش است. بیشترین تغییرات دمای بیشینه نیز مربوط به ایستگاه زرینه با ۱ درجه سلسیوس افزایش و کمترین تغییرات همچون دمای کمینه مربوط به ایستگاه دهلران در جنوب منطقه مورد مطالعه است (شکل ۲). بر اساس نتایج تغییرات دمای بیشینه در ارتفاعات بیشتر از تغییرات در مناطق پست و کم ارتفاع می‌باشد که این موضوع در مباحث باغبانی و فنولوژی گیاهان بسیار حائز اهمیت است. نتایج حاصل مطالعات قبلی مسگری و همکاران (Mesgari, Hosseini, Houshyar, Kaseri & Safarpour 2023)، حمیدیان پور و همکاران (Hamidianpour et al., 2023) را نسبت به شدت تغییرات دمایی در نواحی سردسیر و کوهپایه‌ای در عرض‌های بالا را نسبت به نواحی گرمسیر و کم ارتفاع در عرض‌های پایین دست و افزایش دمایی را تأیید می‌کند.

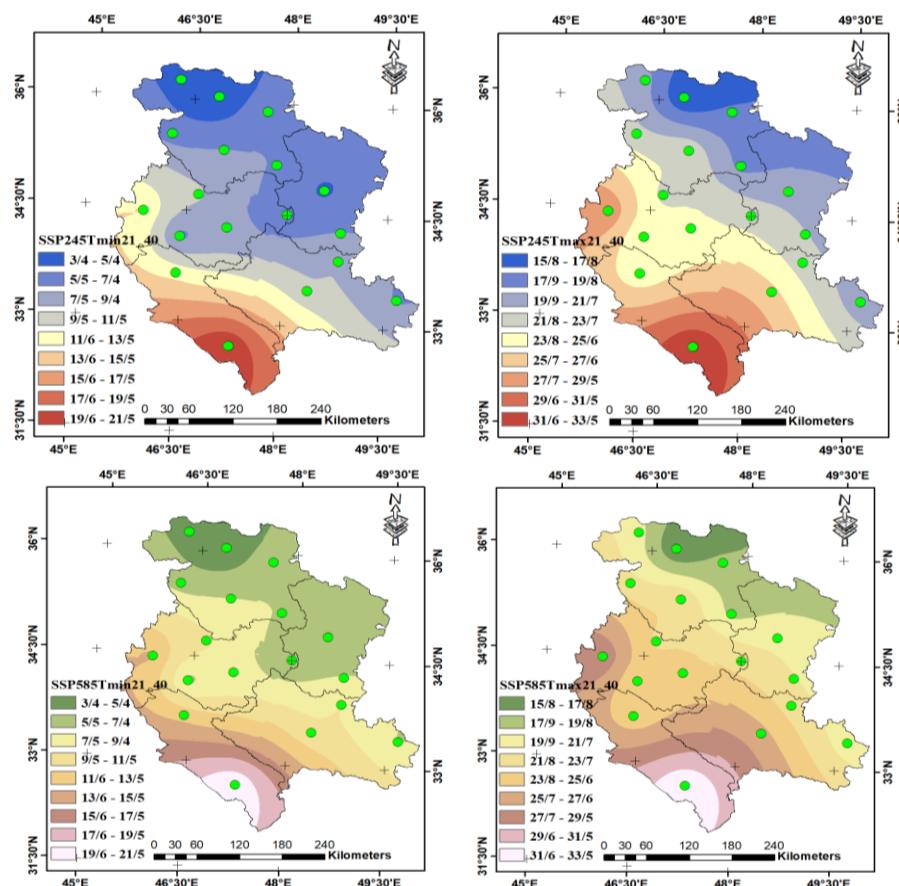
شکل ۳ نتایج مربوط به وضعیت دمای کمینه و بیشینه در دوره آینده دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به طور متوسط سناریوهای مورد بررسی در متغیر دمای کمینه، بیشترین تغییرات مربوط به ایستگاه سقز در شمال منطقه مطالعاتی با ۳/۳ درجه سلسیوس افزایش و کمترین تغییرات مربوط به ایستگاه دهلران در جنوب منطقه با ۲/۴ درجه سلسیوس افزایش است. در دمای بیشینه نیز بیشترین تغییرات مربوط به ایستگاه‌های زرینه و قروه با ۱/۸ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش و کمترین تغییرات مربوط به دهلران در جنوب منطقه با ۵/۴ درصد افزایش می‌باشد (شکل ۳). در مجموع در دوره‌های آینده تغییرات دمایی در مناطق مرتفع و سردسیر بیشتر از سایر مناطق است.

پس از پیش‌نمایی تغییرات دما به بررسی تغییرات مراحل فنولوژی درخت گردو در دو دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱) با توجه به تغییرات دمایی حاصل بر اساس سناریوی SSP5-8.5 که تغییرات دمایی نسبتاً بیشتری را نشان داد پرداخته شد. نتایج حاصل از تغییرات مراحل فنولوژی نشان داد که همچون دوره پایه در هر دو دوره زمانی آینده، زمان رخداد مرحله جوانه زنی از جنوب به شمال به تأخیر می‌افتد و یک اختلاف زمانی حدوداً ۵۰ روزه برای زمان جوانه زنی گردو در پهنه مورد مطالعه وجود دارد.

جدول ۳- تاریخ رخداد مراحل فنولوژی گردو در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره مشاهداتی

Table 3 - Dates of Occurrence of Walnut Phenological Stages at the Studied Stations During the Observational Period

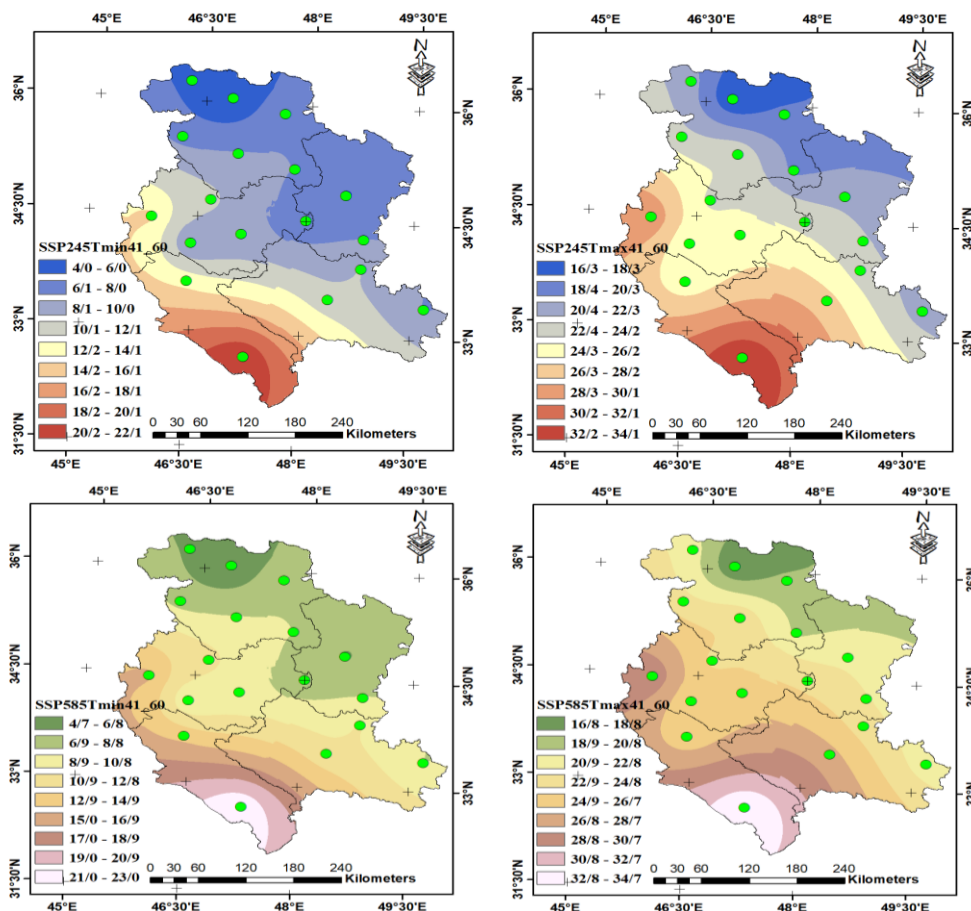
دوره خواب dormancy period	آغاز خزان start of fall	برداشت میوه fruit harvesting	نمو میوه fruit development	رشد میوه fruit rowth	گلدهی flowering	جوانه زنی Germination	ایستگاه Station
8 Nob	14 Oct	6 Oct	7 Sep	25 May	10 May	1 May	الشتر Aleshter
7 Nov	11 Oct	11 Oct	10 Sep	28 May	1 May	5 May	الیگودرز Aligodarz
16 Nov	5 Nov	25 Sep	27 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	اسداباد Asad Abad
8 Nov	18 Oct	10 Oct	9 Sep	27 May	12 May	2May	ازنا Azna
13 Nov	22 Oct	20 Sep	15 Agu	5 Jun	25 Apr	15 Apr	بانه Baneh
14 Nov	19 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	بیجار Bijar
1 Dec	24 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	بروجرد Borojerd
26 Nov	10 Nov	11 Sep	10 Agu	30 Apr	15 Apr	5 Apr	درود Dorod
3 Dec	21 Nov	8 Sep	8 Agu	27 Apr	12 Apr	2 Apr	اسلام آباد Islam Abad
14 Nov	23 Oct	13 Sep	25 Agu	15 May	5 May	25 Apr	همدان Hamedan
3 Nov	10 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	5 May	25 Apr	هزارکتابان
25 Dec	23 Nov	19 Agu	19 Jul	10 Apr	25 Mar	15 Mar	ایلام Ilam
23 Dec	26 Nov	22 Agu	22 Jul	13 Apr	27 Mar	17 Mar	ایوان Ivan
12 Nov	24 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	فامنین Famenain
10 Nov	25 Oct	24 Sep	26 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	قهاوند Ghahavand
3 Dec	23 Nov	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Mar	هرسین Harsin
16 Dec	23 Nov	23 Agu	23 Jul	13 Apr	28 Mar	18 Mar	جوانرود Javanroud
16 Dec	12 Nov	11 Sep	10 Agu	30 Apr	15 Mar	5 Apr	کامیاران Kamyaran
12 Dec	25 Nov	24 Agu	24 Jul	14 Apr	27 Mar	17 Mar	کنگاور Kangavar
22 Dec	26 Oct	8 Sep	8 Agu	27 Apr	12 Apr	2 Apr	کرمانشاه Kermanshah
24 Dec	24 Nov	20 Agu	20 Jul	5 Apr	20 Mar	10 Mar	خرم اباد Khoram
20 Dec	22 Nov	23 Agu	23 Jul	13 Apr	28 Mar	18 Mar	کوهدهشت Kouhdasht
12 Nov	23 Oct	29 Agu	29 Agu	19 May	4 May	24 Apr	ملایر Malayer
26 Nov	14 Nov	16 Sep	19 Agu	5 May	20 Apr	10 Apr	مریوان Marivan
14 Nov	9 Nov	27 Sep	23 Agu	13 May	2 May	22 Apr	نهادوند Nahavand
5 Nov	23 Oct	1 Sep	30 Agu	20 Apr	5 Apr	25 Mar	نورآباد Nour Abad
5 Nov	21 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	قروه Ghorveh
19 Dec	20 Nov	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Mar	روانسر Ravansar
6 Nov	18 Oct	5 Oct	6 Sep	23 May	8 May	28 Apr	رزن Razan
24 Nov	10 Oct	14 Sep	13 Agu	3 May	18 Apr	8 Apr	سنندج Sanandaj
5 Nov	18 Oct	25 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	سقز Saghez
19 Nov	15 Nov	11 Oct	10 Sep	27 May	12 Apr	2 Apr	سارارود Sararoud
8 Dec	15 Nov	16 Sep	15 Agu	5 May	20 Apr	10 Apr	سنقر Songhor
10 Nov	20 Oct	23 Sep	25 Agu	15 May	30 Apr	20 Apr	تویسرکان Tuyserkan
1 Nov	13 Oct	16 Sep	15 Sep	5 Jun	20 May	10 May	زرنه Zarinneh



شکل ۲- توزیع فضایی دمای کمینه (چپ) و بیشینه (راست) در منطقه مورد مطالعه بر اساس سناریوهای مختلف در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

Fig. 2. Spatial distribution of minimum (Left) and maximum (Right) temperature across the study area under different scenarios during the near-future period (2021-2040)

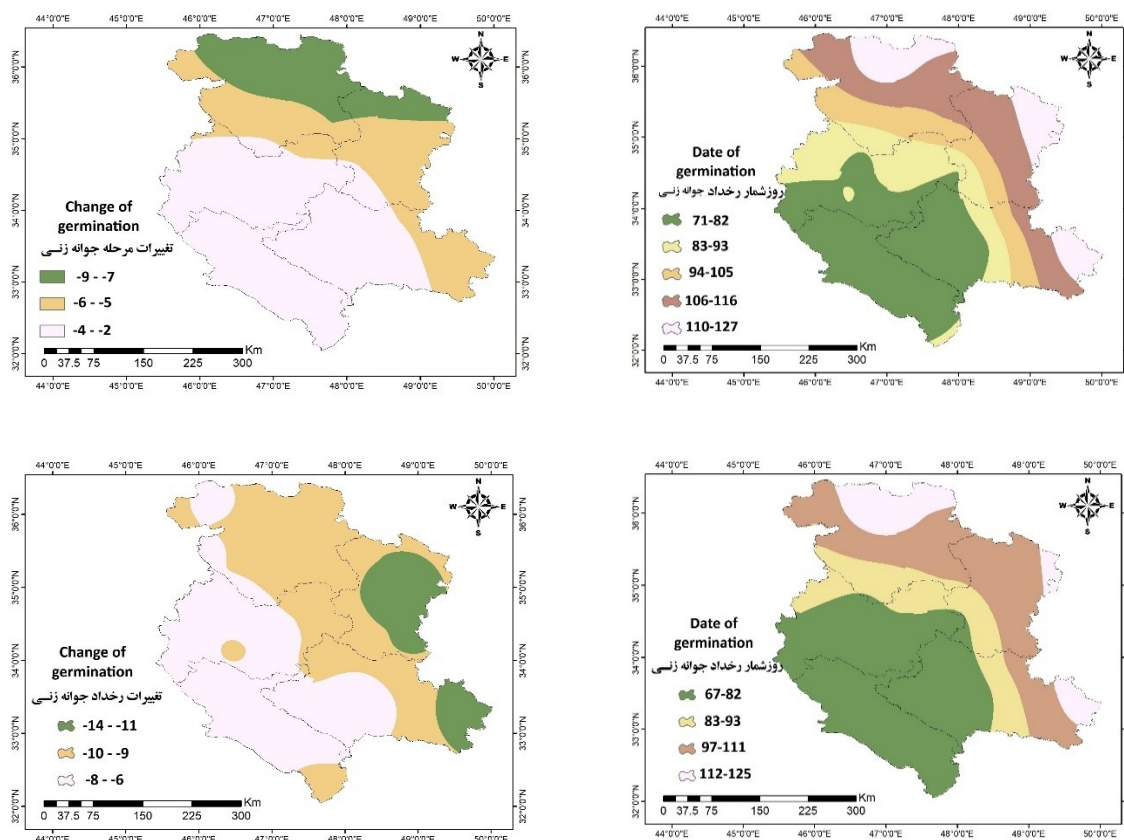
بر اساس نتایج با توجه به تغییرات دمایی پیش‌نمایی شده زمان رخداد مرحله جوانه زنی گردو در دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بین ۲ تا ۹ روز و در دوره آینده دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) بین ۶ تا ۱۴ روز زودتر نسبت به دوره پایه آغاز می‌شود. بیشترین تغییرات نیز در دوره آینده نزدیک مربوط به نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه و در دوره آینده دور مربوط به نواحی شرقی منطقه مورد مطالعه است که هر دو منطقه جزو مناطق سردسیر منطقه در استان‌های کردستان و همدان و تا حدودی لرستان هستند. کمترین میزان تغییرات نیز در هر دو دوره آینده مربوط به نواحی جنوب غربی و گرمسیر منطقه مورد مطالعه است (شکل ۴). در تمامی شکل‌های این بخش دو نقشه موجود در بخش بالا مربوط به توزیع رخداد بر حسب روزشمار ژولیوسی و سپس تغییرات مرحله فنولوژی مورد بررسی در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه و دو نقشه موجود در پایین شکل مربوط به همان متغیرها در دوره آینده دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) است.



شکل ۳- توزیع فضایی دمای کمینه (چپ) و بیشینه (راست) در منطقه مورد مطالعه بر اساس سناریوهای مختلف در دوره آینده دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Fig. 3. Spatial distribution of minimum (left) and maximum (right) temperature across the study area under different scenarios during the distant-future period (2041–2060)

بررسی تغییرات زمان گلدهی نیز در دوره‌های آینده نشان داد که زودترین زمان گلدهی در پهنه مورد مطالعه مربوط به نواحی جنوب غربی و دیرترین زمان مربوط به نواحی شمالی و سپس شرقی منطقه است. بر اساس نتایج در دوره آینده نزدیک گلدهی درخت گردو بین ۳ تا ۱۰ روز و در دوره آینده دور بین ۷ تا ۱۵ روز زودتر نسبت به دوره پایه رخ می‌دهد. بیشترین کمترین تغییرات نیز در دوره‌های آینده به ترتیب مربوط به نواحی شمالی و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۵). در مجموع بر اساس نتایج تغییرات زمان جوان زنی و گلدهی در مناطق سردسیر شمالی و شرقی منطقه که گردو خیز نیز هستند بیشتر از سایر مناطق است و با تغییرات نسبتاً شدیدی نسبت به دوره پایه مواجه خواهند شد. نتایج حاصل از این بخش با مطالعات پژوهش‌های خارجی همچون (Graczyk & Kundzewicz, 2015; Modala, Ale & Goldberg, 2016; Hidalgo, 2017) و پژوهش‌های داخلی مانند سبحانی و همکاران (Sobhani et al., 2017) مبنی بر جلوتر کشیده شده مراحل جوانه‌زنی و گلدهی محصولات باغی مختلف با توجه به افزایش دما مطابقت دارد.

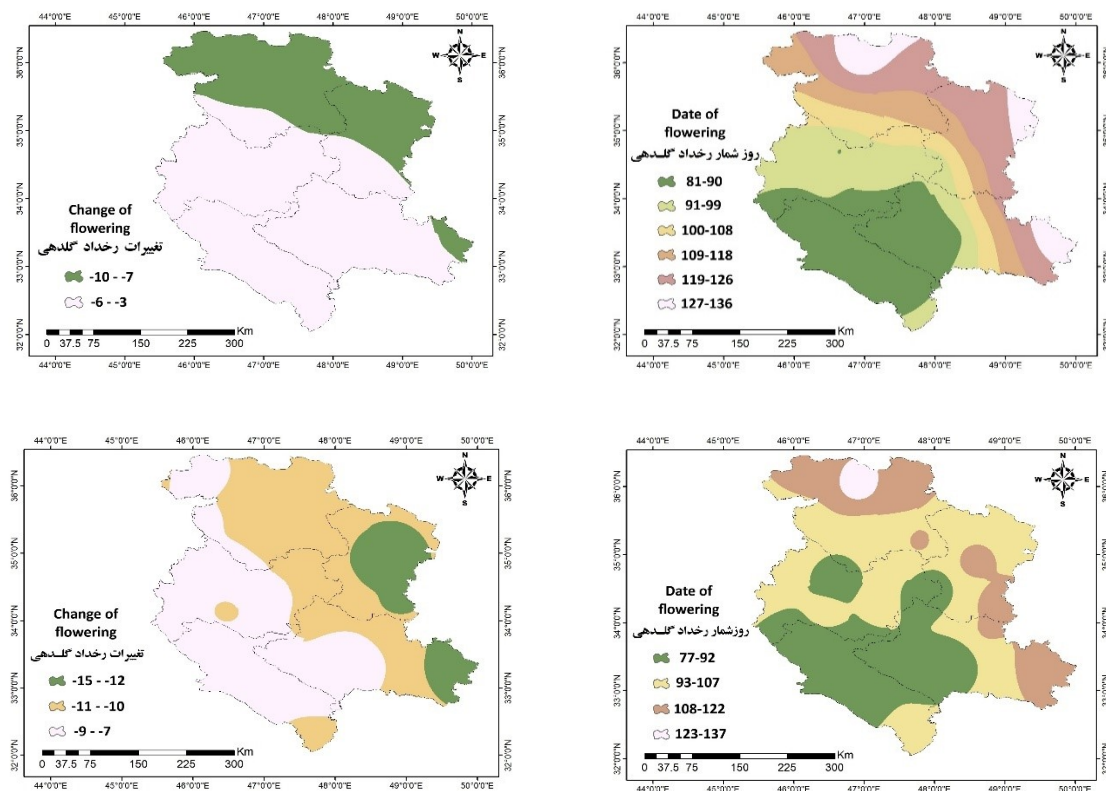


شکل ۴- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله جوانه زنی گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه

Fig. 4. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Walnut Budburst Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period

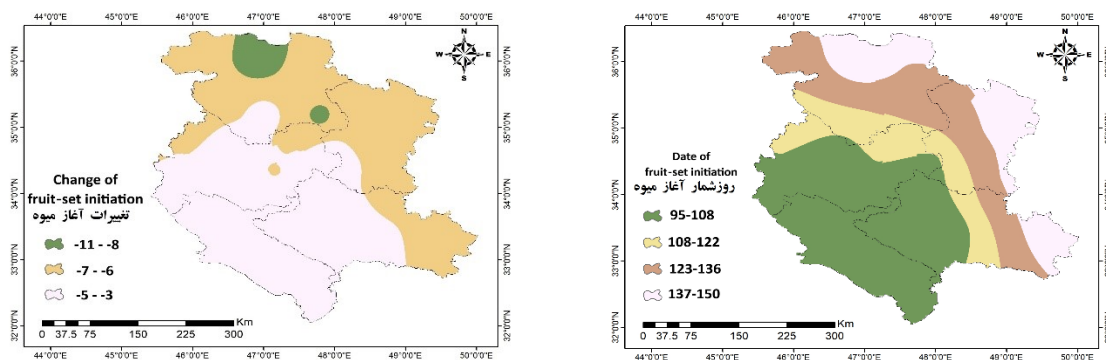
توزیع تغییرات رخداد مرحله فنولوژیکی آغاز رشد میوه گردو نشان داد که در دوره آینده نزدیک مرحله آغاز رشد گردو در پهنه مورد مطالعه بین ۳ تا ۱۱ روز و در دوره آینده دور بین ۸ تا ۱۷ روز زودتر از دوره پایه شروع خواهد شد. بیشترین تغییرات در دوره‌های آینده نیز مربوط به نواحی سردسیر در شمال و شرق منطقه مورد مطالعه و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی گرمسیر در جنوب و جنوب غرب منطقه است. براساس نتایج در دوره‌های آینده، زمان رشد میوه در پهنه مورد مطالعه از اول فروردین تا ۳۰ اردیبهشت در تغییر خواهد بود که از جنوب به شمال منطقه مورد مطالعه، با تبعیت از ارتفاع از سطح دریا به تدریج زمان رخداد رشد میوه با دیرتر آغاز می‌شود (شکل ۶).

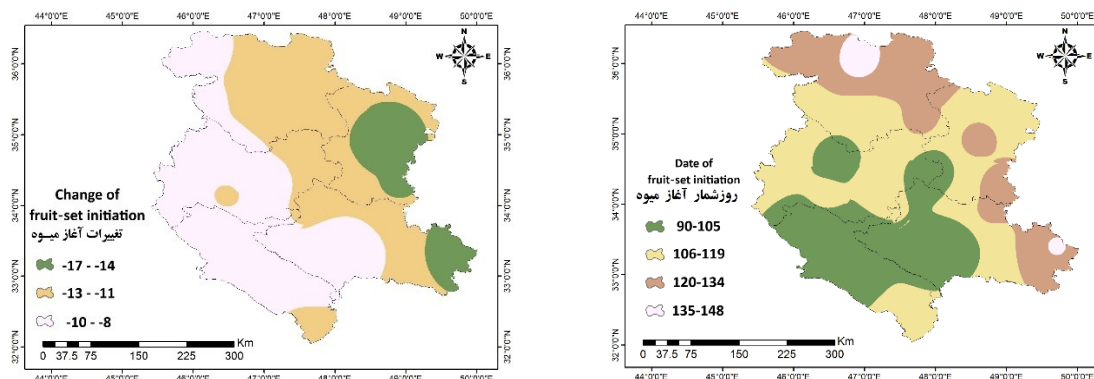
در دو دوره آینده مورد بررسی مرحله تکمیل نمو میوه گردو نیز به تبعیت از تغییرات دمایی و شرایط ارتفاعی زودتر از دوره پایه شروع خواهد شد. به طوری که این میزان برای دوره آینده نزدیک در پهنه مورد مطالعه بین ۶ تا ۱۷ روز و در دوره آینده دور بین ۱۶ تا ۲۹ روز در تغییر خواهد بود. کمترین و بیشترین تغییرات مذکور نیز مربوط به نواحی جنوب غربی و شمالی منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نتایج در مناطق گرمسیری منطقه مورد مطالعه مرحله نمو میوه از اواسط تابستان در دوره پایه به اوایل تابستان و در مناطق سردسیر از اواخر تابستان و اوایل پاییز به اواسط تابستان و شهریورماه در دوره‌های آینده کشیده خواهد شد و مرحله نمو میوه زودتر از دوره پایه شروع خواهد شد (شکل ۷).



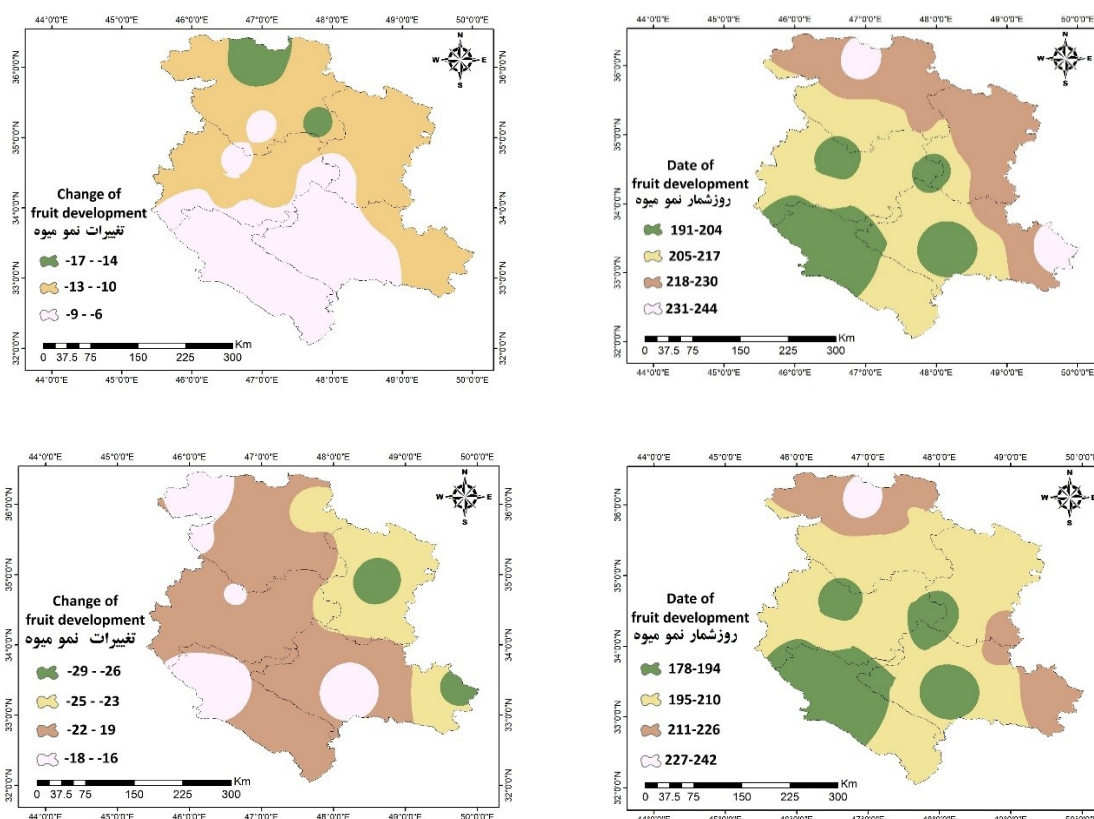
شکل ۵- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله گلدهی درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه

Fig. 5. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Walnut Flowering Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period



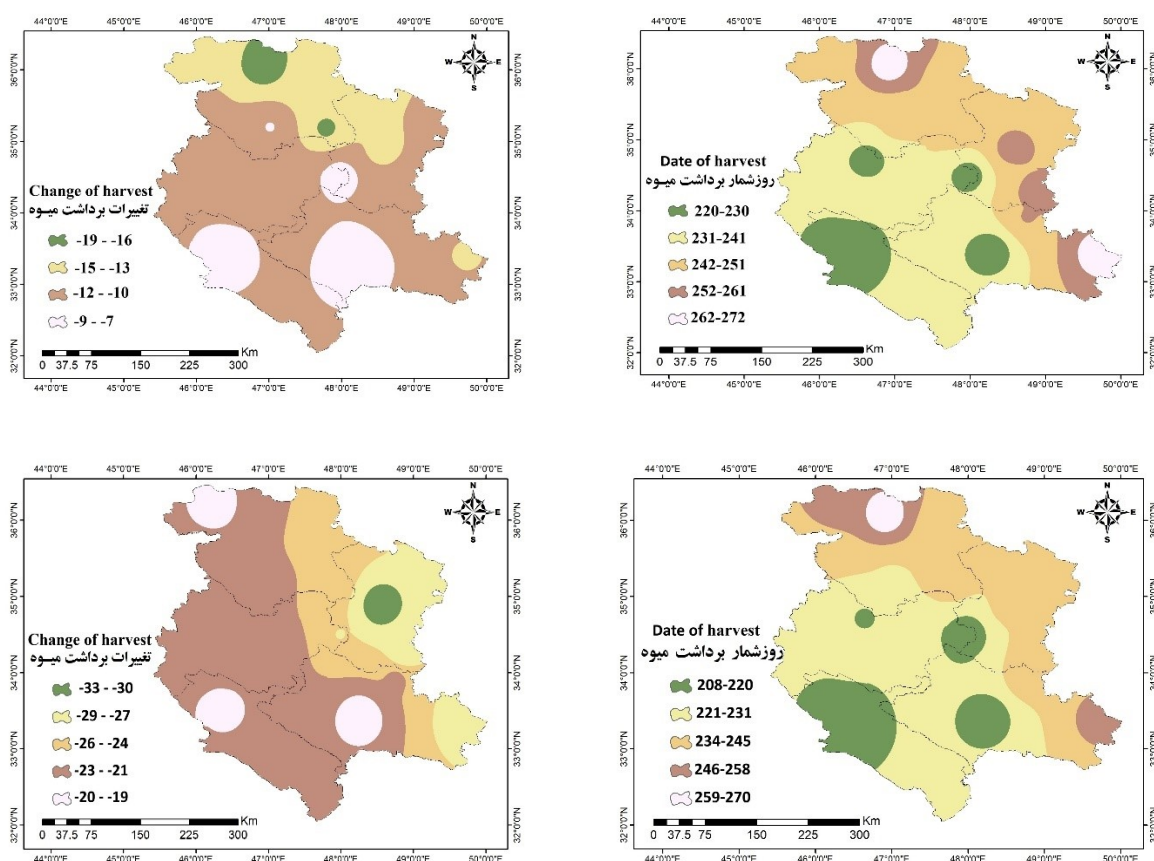


شکل ۶- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله آغاز رشد میوه درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه
Fig. 6. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Onset of Walnut Fruit Growth Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period



شکل ۷- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله نمو میوه درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه
Fig. 7. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Walnut Fruit Development Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period

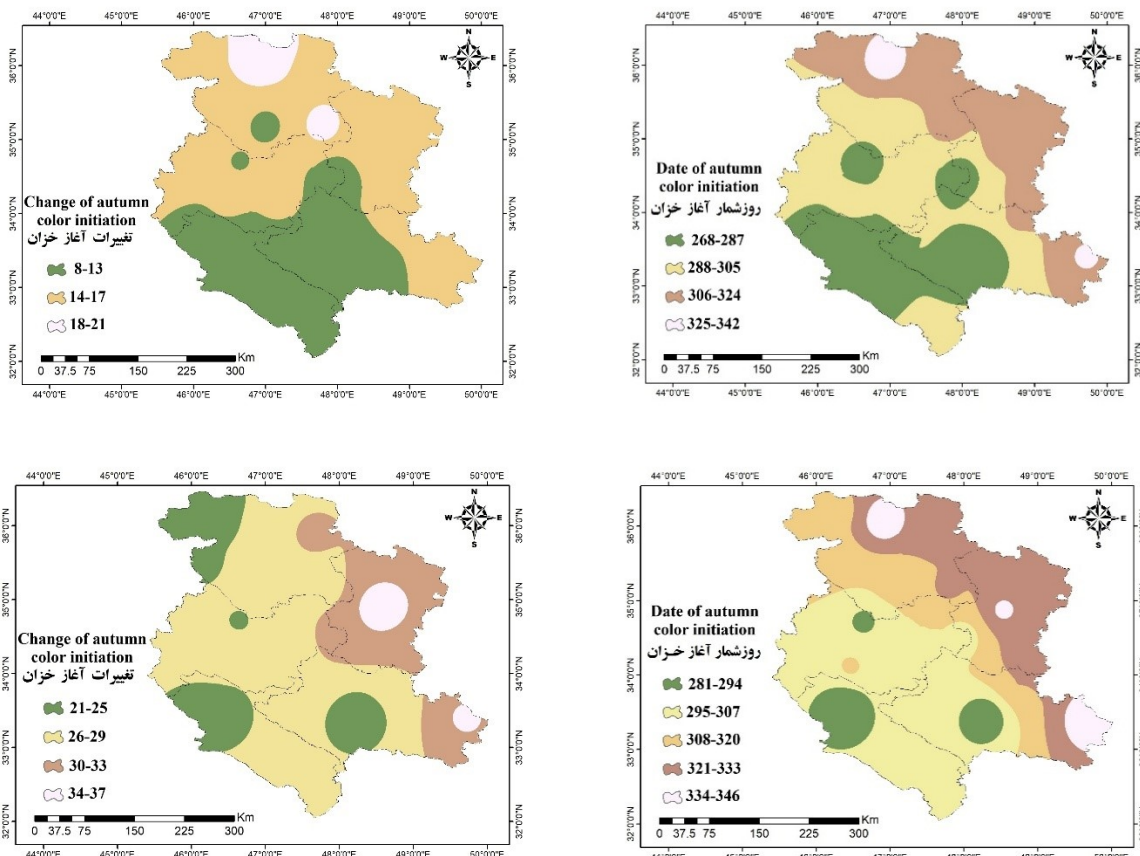
توزیع مکانی زمان رخداد برداشت گردو در دوره‌های آینده و میزان تغییرات زمانی آن نسبت به دوره پایه در شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج مرحله برداشت گردو در مناطق گرمسیری و پست زودتر از مناطق مرتفع و سردسیر شروع می‌شود که با توجه به تغییرات دمایی پیش‌نمایی شده در دوره‌های آینده زمان برداشت نسبت به دوره پایه به جلوتر کشیده خواهد شد به طوری که برداشت گردو در دوره آینده نزدیک بین ۷ تا ۱۹ روز و در دوره آینده دور بین ۱۹ تا ۳۳ روز زودتر نسبت به دوره پایه شروع خواهد شد. نتایج حاصل با مطالعات فلاح قاله‌ری (Falah Ghalhari, 2012) مطابقت دارد.



شکل ۸- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله برداشت درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه

Fig. 8. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Walnut Harvest Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period

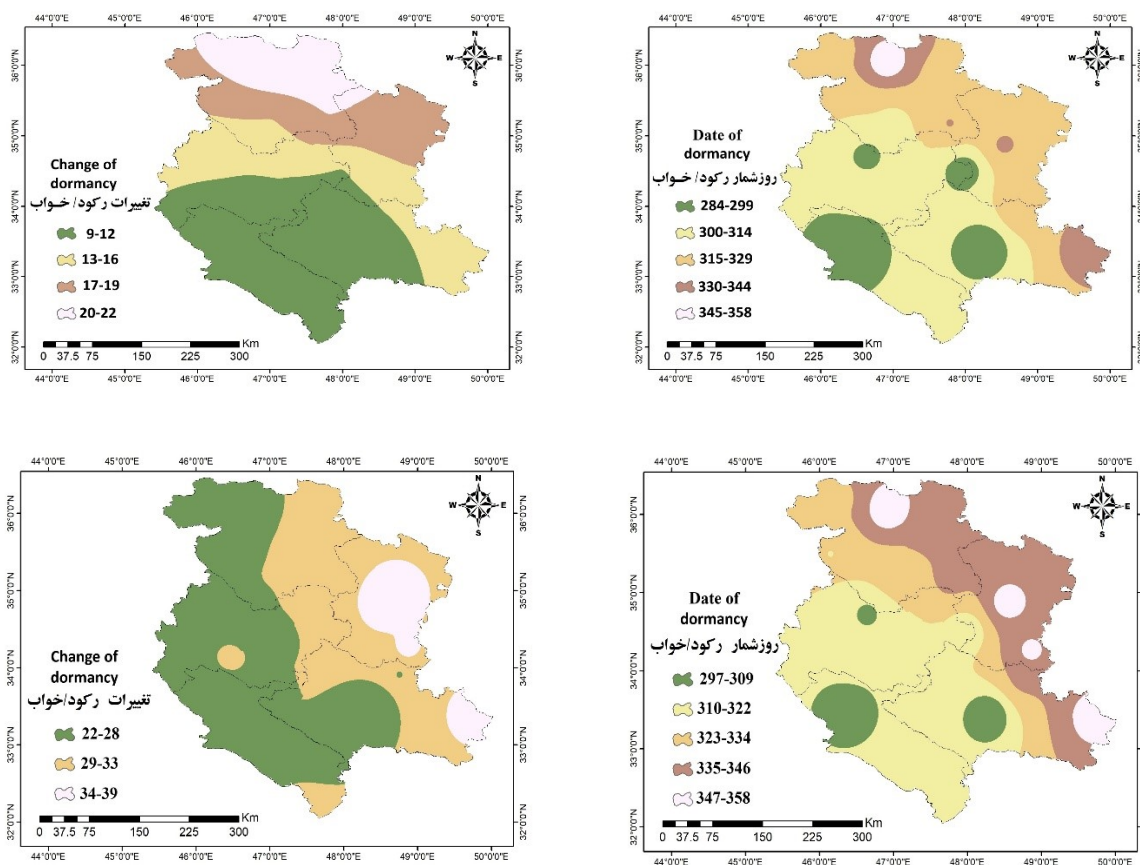
مرحله فنولوژیکی آغاز خزان درخت گردو متفاوت از دیگر مراحل فنولوژیکی است به طوری که در مناطق گرمسیری و عرض‌های پایین‌تر دیرتر از مناطق مرتفع و سردسیر رخ می‌دهد که ناشی از شرایط دمایی است. در مناطق مرتفع دماهای پایین‌تر از رشد درخت درخت گردو زودتر رخ می‌دهد و در نتیجه خزان درخت زودتر آغاز می‌شود. براساس شکل ۹ این مرحله در دوره‌های آینده با توجه به افزایش دما دیرتر از دوره پایه شروع خواهد شد. بر اساس نتایج مرحله خزان درخت گردو در دوره آینده نزدیک در منطقه مورد مطالعه بین ۸ تا ۲۱ روز و در دوره آینده دور بین ۲۱ تا ۳۷ روز دیرتر نسبت به دوره پایه شروع خواهد شد. بیشترین تغییرات مذکور نیز مربوط به نواحی سردسیر در شمال و شرق منطقه مورد مطالعه و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی گرمسیر در جنوب و جنوب غرب منطقه است.



شکل ۹- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله آغاز خزان درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه

Fig. 9. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Onset of Walnut Leaf Senescence Stage in Future Periods Compared with the Baseline Period

توزیع مکانی دوره رکود و خواب درخت گردو نیز در دوره‌های آینده و تغییرات آن نسبت به دوره پایه نشان داد که این مرحله از فنولوژی درخت گردو نیز همچون دوره خزان دیرتر از دوره پایه رخ خواهد داد به طوری که در دوره آینده نزدیک این میزان برابر با ۹ تا ۲۲ روز و در دوره آینده دور بین ۲۲ تا ۲۹ روز خواهد بود. کمترین و بیشترین تغییرات نیز به ترتیب مربوط به نواحی گرمسیر و سردسیر منطقه مورد مطالعه است. در واقع در دوره‌های آینده دوره رکود و خواب درخت گردو با توجه به افزایش دما دیرتر شروع خواهد شد و به اواخر پاییز و اوایل زمستان کشیده می‌شود (شکل ۱۰). نتایج حاصل با پژوهش مرادجانی (Moradjani, 2016) در زمینه کشت گردو در استان لرستان مطابقت دارد. همچنین، همان‌طور که در مقدمه مطالعه پیش رو بیان شد مطابق با مطالعه وحدتی و همکاران (Vahdati et al., 2019) تحت تأثیر تغییر اقلیم سطح اراضی مناسب برای کشت گردو در دوره آتی کاهش خواهد یافت. ضمن اینکه مطالعه پیش رو با تغییر در رویکرد از ارزیابی مکانی به ارزیابی زمانی - فنولوژیک، تفکیک دقیق‌تر مراحل رشدی، پوشش دو دوره آتی، کاهش عدم قطعیت، تحلیل فضایی تغییرات نشان داد که این دو مطالعه مکمل یکدیگر هستند. در واقع، مطالعه وحیدی و همکاران (Vahidi, Vaghari, Najian, Najian & Jafarizadeh-Malmiri, 2019) تصویری کلان از تغییرات مکانی و کاهش اراضی مناسب در سطح کشور ارائه می‌دهد، در حالی که مطالعه حاضر با نگاهی ریزتر و تخصصی‌تر، تغییرات زمانی مراحل فنولوژی را در مناطق اصلی تولید گردو واکاوی کرده است.



شکل ۱۰- تاریخ رخداد و توزیع تغییرات مرحله رکود یا خواب درخت گردو در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه

Fig. 10. Date of Occurrence and Distribution of Changes in the Dormancy Stage of Walnut Trees in Future Periods Compared with the Baseline Period

نتیجه‌گیری

درخت گردو از درختان حساس در مقابل تغییرات دمایی است لذا با توجه به اهمیت تغییرات دمایی در بحث تولید این محصول و همچنین تغییرات اقلیمی احتمالی لازم است افزون بر ضرورت انجام مطالعات پایه‌ای توجه ویژه‌ای به پیش‌نمایی این تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده شود. لذا در این پژوهش به پیش‌نمایی تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر مراحل مختلف فنولوژی درخت گردو پرداخته شد. به این منظور در پژوهش حاضر ضمن ارزیابی ۱۵ مدل CMIP6 و همادی کردن مدل‌های برتر در شبیه‌سازی تغییرات دمای کمینه و بیشینه به پیش‌نمایی آن‌ها تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دو دوره زمانی آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۲۰) پرداخته شد. سپس اثرات و پیامدهای این تغییرات بر مراحل مختلف فنولوژی درخت گردو در غرب ایران بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که دمای کمینه به طور متوسط سناریوهای مورد بررسی در پهنه مورد مطالعه در دوره آینده نزدیک بین ۱ تا ۲ درجه سلسیوس و در دوره آینده دور، بین ۲/۱ تا ۳/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد. دمای بیشینه نیز در دوره آینده نزدیک، بین ۰/۸ تا ۱/۱ درجه سلسیوس و در دوره آینده دور بین ۱/۸ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. توزیع مکانی این تغییرات نیز نشان داد که مناطق شمالی و پر ارتفاع منطقه تغییرات بیشتری نسبت به مناطق جنوبی و کم ارتفاع منطقه دارند.

بر اساس نتایج با توجه به تغییرات دمایی پیش‌نمایی شده زمان رخداد مرحله جوانه‌زنی گردو در دوره‌های آینده مورد بررسی بین ۲ تا ۱۴ روز و گلدهی نیز بین ۳ تا ۱۵ روز زودتر نسبت به دوره پایه رخ می‌دهد. بر این اساس تاریخ‌های جوانه‌زنی و گلدهی نیز در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه به جلوتر کشیده خواهند شد و همچنین فاصله بین جوانه‌زنی و گلدهی نیز کوتاهتر خواهد شد که ناشی از افزایش دما در سطح منطقه مورد مطالعه است. نتایج حاصل از تغییرات سایر مراحل فنولوژی درخت گردو نیز نشان داد که مرحله آغاز رشد گردو در پهنه مورد مطالعه در دوره آینده نزدیک بین ۳ تا ۱۱ روز و در دوره آینده دور بین ۸ تا ۱۷ روز زودتر از دوره پایه شروع خواهد شد. همچنین بررسی مرحله تکمیل نمو میوه گردو نیز به تبعیت از تغییرات دمایی و شرایط ارتفاعی زودتر از دوره پایه شروع خواهد شد. به طوری که این میزان برای دوره آینده نزدیک در پهنه مورد مطالعه بین ۶ تا ۱۷ روز و در دوره آینده دور بین ۱۶ تا ۲۹ روز در تغییر خواهد بود. بر این اساس برداشت گردو نیز در دوره آینده نزدیک بین ۷ تا ۱۹ روز و در دوره آینده دور بین ۱۹ تا ۳۳ روز زودتر نسبت به دوره پایه شروع خواهد شد. بیشترین تغییرات مراحل فنولوژیکی فوق در دوره‌های آینده نیز مربوط به نواحی سردسیر در شمال و شرق منطقه مورد مطالعه و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی گرمسیر در جنوب و جنوب غرب منطقه است. بر اساس نتایج مرحله خزان درخت گردو در دوره آینده نزدیک در منطقه مورد مطالعه بین ۸ تا ۲۱ روز و در دوره آینده دور بین ۲۱ تا ۳۷ روز دیرتر نسبت به دوره پایه شروع خواهد شد. دوره رکود و خواب درخت گردو نیز همچون دوره خزان دیرتر از دوره پایه رخ خواهد داد به طوری که در دوره آینده نزدیک این میزان برابر با ۹ تا ۲۲ روز و در دوره آینده دور، بین ۲۲ تا ۲۹ روز خواهد بود. بیشترین تغییرات شاخص‌های مذکور نیز مربوط به نواحی سردسیر در شمال و شرق منطقه مورد مطالعه و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی گرمسیر در جنوب و جنوب غرب منطقه است.

با توجه به نتایج حاصل از افزایش دمای هوا مراحل فنولوژیکی درخت گردو زودتر آغاز می‌شود و این درختان که نسبتاً زود گلده هستند، بیشتر در معرض خطر سرما و یخبندان قرار خواهند گرفت هر چند که تمام مراحل فنولوژی تحت تأثیر سرما و یخبندان است، اما این شدت برای مراحل تبدیل رویشی به زایشی مخرب‌تر خواهد بود. زیرا فرصتی برای جبران و زایش مجدد را از درختان می‌گیرد. این حساسیت برای درخت گردو از نظر سرما و یخبندان قابل توجه می‌باشد و خسارات آن شدیدتر است. از طرفی دیگر، تغییرات افزایشی دمایی کمینه در انتهای فصل سرد نیز، ظهور زود هنگام مراحل فنولوژی را تسریع می‌بخشد و این شرایط ریسک سرما و یخبندان را در مرحله جوانه‌زنی تا گلدهی درختان را بیشتر می‌کند. همچنین با توجه به افزایش دماهای بهار و هم‌زمانی آن با مرحله فنولوژی نمو میوه، می‌تواند ریسک آسیب گرمایی، کاهش کیفیت میوه و افزایش نیاز آبی درختان را به همراه داشته باشد. بر این اساس با تغییرات دمایی پهنه‌های آبی و اقلیمی موجود نیز دچار تغییر می‌گردند که به دنبال آن شاخص‌های اقلیم کشاورزی و مراحل فنولوژیکی نیز دچار تغییر خواهند شد. بنابراین لازم است مسئولین و برنامه‌ریزان مربوطه در بخش‌های مختلف کشاورزی راهکارهای لازم برای کاهش پیامدها و یا سازگاری با شرایط آب‌وهوایی جدید را اتخاذ نمایند.

References

- Ahmadi, H., Baaghideh, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Climate change impacts on pistachio cultivation areas in Iran: a simulation analysis based on CORDEX-MENA multi-model ensembles. *Theoretical And Applied Climatology*, 145(1), 109-120. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03614-z>
- Ahmadi, H., Fallahghalhari, Gh., & Baaghideh, M. (2018). Impacts of climate change on Apple tree cultivation areas in Iran. *Climate Change Journal*, (1&2), 91-153. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2316-x>
- Anwar, M. R., Li Liu, D., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., ... & Ramilan, T. (2015). Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. *Agricultural Systems*, 132, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.09.010>

- Azizzadeh, J. (2019). *Evaluating the consequences of climate change on trees in Iran's tropical regions (case study: date palm tree)*. [Master's thesis, Hakim Sabzevari University]. Faculty of Geography and Environmental Sciences. [In Persian]
- Baniasadi, A., Mazidi, A., Mozaffari, G. A., & Omidvar, K. (2023). Climate Change and its Effect on Agricultural Climate Indices of Pistachio Tree in Kerman Province A case study of Rafsanjan Station. *The Journal Of Geographical Research On Desert Areas*, 11(1), 179-191. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/grd.2023.20098.1579>
- Cerovic, S., Golosin, J., Todorovic, S., & Bijelic, V. (2010). Walnut (*Juglans regia* L.) selection in Serbia. *Horticulture Science*, 37(1), 1-5.
- Charrier, G., Bonhomme, M., Lacointe, A., & Améglio, T. (2011). Are budburst dates, dormancy and cold acclimation in walnut trees (*Juglans regia* L.) under mainly genotypic or environmental control? *International Journal Of Biometeorology*, 55(6), 763-774. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0470-1>
- Cosmulescu, S., & Lonescu, M. (2018). Phenological calendar in some walnut genotypes grown in Romania and its correlations with air temperature. *International Journal Of Biometeorology*, 62, 2007-2013. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1606-3>
- Falah Ghalhari, G. (2012). *Evaluating the effects of climate change on citrus cultivation areas in Iran*. [Doctoral dissertation, University of Isfahan]. Faculty of Geography, Department of Physical Geography. [In Persian]
- Falco, C., Donzelli, F., & Olper, A. (2018). Climate change, agriculture and migration: a survey. *Sustainability*, 10(5), 1405. https://unimore.unifind.cineca.it/resource/item/307104?language=en_US
- Graczyk, D., & Kundzewicz, Z. W. (2015). Changes of temperature- related agro climatic indices in Poland. *Theoretical And Applied Climatology*, 124, 401-410. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1429-7>
- Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *Introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling*. University of Sistan and Baluchestan press. [In Persian]
- Hamidianpour, M., Nazaripour, H., Khazaie Fizabad, E., Farzane, M., & Firoze, S. (2023). Determining the change point of temperature thresholds of heat and cold waves in Iran during 1966-2018. *Journal Of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 133-150. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.44464.1940>
- Hamidianpour, M., Shoja, F., & Khashei-Siuki, A. (2023). Assessment and projections of climate change impacts on cotton water requirement: A case study. *International Journal Of Global Warming*, 31(3), 242-261. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.133986>
- Hidalgo-Galvez, M. D., García-Mozo, H., Oteros, J., Mestre, A., Botey, R., & Galán, C. (2017). Phenological behaviour of early spring flowering trees in Spain in response to recent climate changes. *Theoretical And Applied Climatology*, 132, 263-273. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88259>
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Karydas, G. C., Gitas, L., Koutsogiannaki, E., Lydakis-Simantiris, N., & Silleos, G. N. (2009). Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping agricultural topsoil properties in crete. *Earsel Eproceedings*, 8, 1. https://eproceedings.uni-oldenburg.de/website/vol08_1/08_1_karydas1.pdf
- Khan, W., Hussain, M., Ali, K., Ali, M., & Nisar, M. (2020). Distribution and phenotypic variation in *Juglans regia* L. growing in Hindu Kush ranges of Pakistan. *Acta Ecologica Sinica*, 40(5), 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2020.02.009>
- Kohi, S., Hamidianpour, M., Khosravi, M., & Ahmadi, H. (2025). Analysis of the performance of CMIP6 models in simulating minimum and maximum temperatures and projecting their changes in the mountainous regions of western Iran. *Geography And Spatial Modeling In The Atmosphere Journal*. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gsma.2025.2053939.1062>

- Majdi, F., Hosseini, S. A., Karbalaee, A., Kaseri, M., & Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical And Applied Climatology*, 147, 1249–1262. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03916-2>
- Mariana, S., & Sina Niculina, C. (2017). Effect of Climatic Conditions on Flowering of Walnut Genotypes in Romania, *Journal Of Nuts*, 8(2), 161-167.
- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Houshyar, M., Kaseri, M., & Safarpour, F. (2023). Future projection of early fall and late spring frosts based on EC-earth models and shared socioeconomic pathways (SSPs) scenarios over Iran plateau. *Natural Hazards*, 119(3), 1421-1435. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06155-y>
- Modala, N. R., Ale, S., Goldberg, D. W., Olivares, M., Munster, C. L., Rajan, N., & Feagin, R. A. (2016). Climate change projections for the Texas High Plains and Rolling Plains. *Theoretical And Applied Climatology*, 129, 263-280. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1773-2>
- Moradjani, S. (2016). *Investigating the impact of climate change on the zoning of walnut tree cultivation in Lorestan province using the LARS model and GIS*. [Master's thesis, University of Lorestan]. Department of Physical Geography. [In Persian]
- Namroodi, M., Hamidianpour, M., & Poodineh, M.R. (2021). Spatio-temporal analysis of changes in heat and cold waves across Iran over the statistical period 1966–2018. *Arabian Journal Of Geosciences*, 14(10), 857. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07161-9>
- Pomerolm J. C., & Romero, S. B. (2000). *Multicriterion decision in management: principles and practice*. Kluwer Academic, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4459-3>
- Raju, K. S., & Nagesh Kumar, D. (2018). *Impact of Climate Change on Water Resources with Modeling Techniques and Case Studies*. Springer Singapore. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6110-3>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., ... & Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 53-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Robin, J., Bernard, A., Albouy, L., Papillon, S., Tranchand, E., Hebrard, M. N., ... & Toillon, J. (2024). Description of Phenological Events of Persian Walnut (*Juglans regia* L.) according to the Extended BBCH Scale and Historical Scales. *Horticulturae*, 10(4), 402. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040402>
- Salari Salajegheh, M. (2022). *Analysis of climatic risks of walnut cultivation in Baft county*. (Master's thesis). Yazd University, Department of Geography. [In Persian]
- Sobhani, B., Ganji, M., & Goldoust, A. (2017). Determination and Investigation about Beginning and End Dates of Early and Late Freezes and Possibility of its Continuity, Intensity and Succession in Ardabil Province. *Physical Geography Research*, 49(1), 39-53. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2017.61578>
- Soleimani, A., Rabiei, V., Hassani, D., & Mozaffari, M. R. (2019). Phenological characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) genotypes under environmental conditions of Karaj in Iran. *Crop Breeding Journal*, 9(1 & 2), 1-22. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1839723/>
- Sreelatha, K., & Raj, A. P. (2019). Ranking of CMIP5-based global climate models using standard performance metrics for Telangana region in the southern part of India. *Ish Journal of Hydraulic Engineering*, 27, 1–10. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1634648>
- Vahdati, K., Massah Bavani, A., Khosh-khui, M., Fakour, P., & Sarikhani Khorami, S. (2018) Land Suitability Classification for Persian Walnut Cultivation in Iran Using Geographic Information System (GIS). *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 19(4), 403-418. <http://journal-irshs.ir/article-1-298-fa.html>
- Vahdati, K., Massah Bavani, A. R., Khosh- Khui, M., Fakour, P., & Sarikhani, S. (2019). Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran. *Plos One*, 14(6), e0218725. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725>

- Vahidi, A., Vaghari, H., Najian, Y., Najian, M. J., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2019). Evaluation of three different green fabrication methods for the synthesis of crystalline ZnO nanoparticles using Pelargonium zonale leaf extract. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 302-308. <http://dx.doi.org/10.1515/gps-2018-0097>
- Zhang, G., Su, X., Singh, V. P., & Ayantobo, O. O. (2021). Appraising standardized moisture anomaly index (SZI) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios. *Journal Of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100898>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., & Huang, Y. (2025). Climate change threatens global crop yields and food security. *Global Change Biology*, 31, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102462>