



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University  
Vol. 5, No. 18, Summer 2024



## Projection of the change in the last spring frost and the number of frost days for the pistachio in Kerman province using the CMIP6 climate models

Ameneh Mianabadi<sup>1\*</sup>, Maryam Salajegheh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: amianabadi@kgut.ac.ir; amianabadi@gmail.com

<sup>2</sup> PhD Student in Agrometeorology, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 2024-1-10  
Accepted: 2024-3-13

**Keywords:**  
Chilling  
Pistachio  
Kerman  
Climate Change  
CMIP6

### ABSTRACT

In this study, the CMIP6 climate models were used to predict the change in the date of the last spring chilling and the number of chilling days during the pistachio growing season. For this purpose, 5 climate models including BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CMCC-CM2-SR5, GFDL-ESM4 and MRI-ESM2-0 were selected and the minimum temperature of these models was compared to observed values in 6 stations of Anar, Kerman, Rafsanjan, Shahrabak, Sirjan and Zarand in the pistachio growing areas of Kerman for the base period (1990-2014). The evaluation criteria showed that among the climate models, CNRM-CM6-1 in Anar ( $r=0.74$ ,  $ME=-0.89$ ), Kerman ( $r=0.73$ ,  $ME=-1.19$ ), Rafsanjan ( $r=0.81$ ,  $ME=-1.88$ ), Sirjan ( $r=0.75$ ,  $ME=-0.43$ ) and Zarand ( $r=0.74$ ,  $ME=-2.71$ ) and the GFDL-ESM4 in Shahrabak ( $r=0.75$ ,  $ME=1.42$ ) performed better than the others. After determining the best model for each station, the minimum temperature was used to determine the number of chilling days and the last spring chilling (based on the  $4^{\circ}\text{C}$  threshold) in the base and future periods (near (2050-2026), middle (2075-2051), and far (2100-2076)) and for 4 scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 and to evaluate the changes. The results showed that the last spring chilling will occur earlier in future than the base period and the number of chilling days will also decrease. Based on the compare means test, the change in the last spring chilling at all stations in the middle and far future and for the SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios is statistically significant ( $P_{\text{value}} < 0.05$ ). The change in the number of chilling days is also significant in all stations and all scenarios. Based on the results, the effects of these changes on pistachio phenological stages should be taken into consideration in providing management plans.

**Cite this article:** Mianabadi, A., Salajegheh, M. (2024). Projection of the change in the last spring frost and the number of frost days for the pistachio in Kerman province using the CMIP6 climate models. *Journal of the Climate Change Research*, 5 (18), 67-92.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.435000.1194



## پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته خیز استان کرمان با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6

آمنه میان‌آبادی<sup>۱\*</sup>، مریم سلاجقه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، رایانامه: amianabadi@kgt.ac.ir, amianabadi@gmail.com  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳</p> <p>واژه‌های کلیدی: سرمازدگی پسته کرمان تغییر اقلیم CMIP6</p>	<p>در این مطالعه از خروجی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در طول فصل رشد پسته استفاده شد. به این منظور ابتدا ۵ مدل اقلیمی شامل BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-CM2-SR5, GFDL-CM2-1 و ESM4 و MRI-ESM2-0 انتخاب شده و داده‌های دمای حداقل این مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی در ۶ ایستگاه انار، کرمان، رفسنجان، شهربابک، سیرجان و زرنند در مناطق پسته‌خیز کرمان و برای دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مقایسه گردید. معیارهای خطاسنجی نشان داد که از بین مدل‌های اقلیمی مدل CNRM-CM6-1 در ایستگاه‌های انار (<math>ME=-0.89</math>, <math>\sigma=0.74</math>)، کرمان (<math>ME=-1.19</math>, <math>\sigma=0.73</math>)، رفسنجان (<math>ME=-1.88</math>, <math>\sigma=0.81</math>)، سیرجان (<math>ME=-0.43</math>, <math>\sigma=0.75</math>) و زرنند (<math>ME=-2.71</math>, <math>\sigma=0.74</math>) و مدل GFDL-ESM4 در ایستگاه شهربابک (<math>ME=1.42</math>, <math>\sigma=0.75</math>) بهتر از بقیه مدل‌ها دمای حداقل را تخمین می‌زنند. پس از تعیین بهترین مدل برای هر ایستگاه، از خروجی آن برای تعیین تعداد روزهای سرمازدگی و آخرین سرمازدگی بهاره (بر مبنای آستانه ۴ درجه) در دوره پایه و آینده (نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)) و برای ۴ سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 و SSP5-8.5 و ارزیابی تغییرات رخ داده استفاده شد. نتایج نشان داد که آخرین سرمازدگی بهاره در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه زودتر اتفاق خواهد افتاد و تعداد روزهای سرمازدگی نیز کاهش خواهد یافت. بر اساس آزمون مقایسه میانگین، تغییر در تاریخ وقوع آخرین سرمازدگی بهاره در تمام ایستگاه‌ها در دوره‌های آینده میانی و دور و در سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 از نظر آماری معنی‌دار است (<math>P\_value &lt; 0.05</math>). تغییر در تعداد روزهای سرمازدگی نیز در تمام ایستگاه‌ها و تمام سناریوها معنی‌دار است. بر این اساس باید اثرات این تغییرات بر مراحل فنولوژی پسته را در ارائه برنامه‌های مدیریتی مورد توجه قرار داد.</p>

استناد: میان‌آبادی، آمنه؛ سلاجقه، مریم. (۱۴۰۳). پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته‌خیز استان کرمان با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۸)، ۶۷-۹۲.



## مقدمه

یخبندان و سرمازدگی یکی از پرهزینه‌ترین بلاهای طبیعی اقلیمی است (Guan et al., 2015). که تبعاتی را برای تولید محصولات زراعی و باغی به همراه دارد (Chmielewski et al., 2018; Xiao et al., 2018). وقوع این پدیده در فصل بهار می‌تواند برای محصولات کشاورزی به ویژه محصولات باغی مخرب‌تر باشد. چرا که اغلب محصولات باغی در این زمان در مرحله حساس جوانه‌زنی یا گلدهی هستند و وقوع یخبندان و سرمازدگی می‌تواند خسارات زیادی به آنها وارد کند (Helali et al., 2022). بنابراین پیش‌بینی وقوع این پدیده برای ارائه برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی مناسب اهمیت بسیاری دارد. کشاورزان و باغداران با دانستن تابع توزیع احتمال وقوع یخبندان و سرمازدگی می‌توانند تاریخ وقوع این پدیده را تخمین زده و تصمیمات مناسبی جهت حفظ محصولات خود از خسارات احتمالی اتخاذ کنند.

مطالعات نشان داده است که تغییر اقلیم می‌تواند باعث تغییر در مقدار و توزیع مکانی-زمانی متغیرهای اقلیمی از جمله بارش و دما شده (Ragno et al., 2018; Mukherjee et al., 2018; Papalexiou and Montanari, 2019; Guo et al., 2020) و افزایش وقوع رخداد‌های حدی دمایی مانند تنش‌های گرمایی و سرمایی (سرمازدگی و یخبندان) را به دنبال داشته باشد. در اثر تغییر اقلیم، شروع، پایان، شدت، مدت و تعداد روزهای یخبندان و سرمازدگی در طول فصل رشد تغییر کرده و احتمال این که مراحل حساس فنولوژیکی گیاه متقارن با این تغییرات شود، وجود خواهد داشت. بنابراین با تغییر شاخص‌های اگرواکولوژی تولید محصولات کشاورزی در آینده با چالش‌هایی روبه‌رو خواهد شد (Alidoost et al., 2019). از این رو برای مدیریت صحیح این پدیده و ارائه راهکارهای مناسب، مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات آن در اقلیم آینده ضرورت دارد.

بررسی اثر تغییر اقلیم بر یخبندان و سرمازدگی توسط (Kramer 1994)، (Zinoni et al., 2002)، (Alexander et al., 2006)، (Eccel et al., 2009)، (Qian et al., 2010)، (Kartschall et al., 2015)

(Chamberlain et al., 2021) و (Kamyar et al., 2020) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات آنها نشان داده است که در اثر تغییر اقلیم تاریخ وقوع و شدت یخبندان و سرمازدگی به ویژه در فصل بهار تغییر می‌کند. همچنین برخی مطالعات نشان داده‌اند که به دلیل تغییر در مراحل فنولوژی گیاهان در اثر تغییر اقلیم، احتمال تقارن مراحل فنولوژیکی با یخبندان و سرمازدگی دیررس بهاره افزایش خواهد یافت (Rochette et al. 2004; Menzel et al. 2006; Poling 2008; Kaukoranta et al. 2010; Augspurger 2013; Chmielewski et al. 2018). روند تغییرات خصوصیات یخبندان و سرمازدگی نیز در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات (Lou et al., 2013)، (Zhang et al., 2014)، (Scheifinger et al., 2003)، (Alvares et al., 2018)، (Biazar and Ferdosi, 2020)، (Bal et al., 2021)، (Hosseini et al., 2021) و (Masaki, 2022) اشاره کرد. در اغلب این مطالعات نتایج نشان داده است که تاریخ وقوع آخرین یخبندان و سرمازدگی بهاره روند مثبتی دارد، یعنی نسبت به گذشته زودتر اتفاق خواهد افتاد. بی‌آزار و فردوسی (۲۰۲۰) در شمال ایران نشان دادند که آخرین یخبندان و سرمازدگی بهاره در استان‌های غربی زودتر و در استان‌های شرقی دیرتر از گذشته رخ می‌دهد (Biazar and Ferdosi, 2020).

برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر خصوصیات یخبندان و سرمازدگی از داده‌های دمای حداقل به دست آمده از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود. متغیرهای اقلیمی توسط مدل‌های اقلیمی جهانی شبیه‌سازی می‌شود. این مدل‌ها در فازهای مختلف توسعه یافته و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. پیش از این کاربران خروجی مدل‌های ارائه شده در گزارشات سوم و پنجم (CMIP3 و CMIP5) را استفاده و ارزیابی نموده‌اند (Maxino et al. 2008; Rana et al., 2014; Bozkurt et al., 2018; Cai et al., 2018; Almagro et al., 2020). هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در گزارش ششم خود مدل‌های اقلیمی فاز ششم (CMIP6) را ارائه داده است (Eyring et al. 2016) که

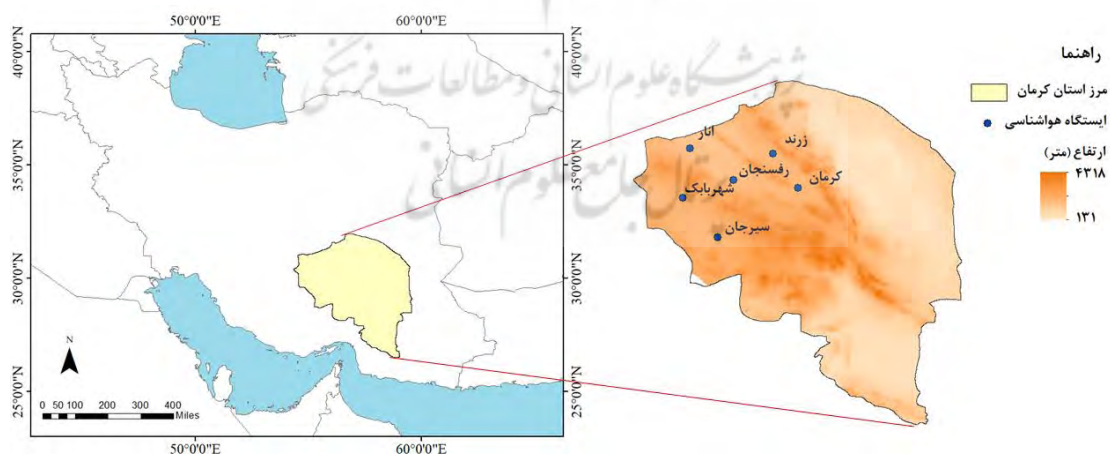
دوره‌های سرمایه‌ی و پایان سرمایه‌دگی (تاریخ وقوع آخرین سرمایه‌دگی بهاره) اهمیت ویژه‌ای دارد. به ویژه در شرایطی که کمبود منابع آب در کرمان اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی دارد، ارائه برنامه‌های مدیریتی لازم برای جلوگیری از سایر تنش‌های محیطی از جمله تنش سرمایه‌ی اهمیت بیشتری می‌یابد. بنابر آنچه ذکر شد، هدف این مطالعه استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییر تاریخ وقوع آخرین سرمایه‌دگی بهاره و تعداد روزهای سرمایه‌دگی در فصل رشد پسته در مناطق پسته خیز کرمان است.

### مواد و روش‌ها

**ایستگاه‌های مورد مطالعه:** ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس مناطق پسته‌خیز کرمان انتخاب شدند. بر این اساس اثر تغییر اقلیم بر آخرین سرمایه‌دگی بهاره و تعداد روزهای سرمایه‌دگی در ۶ ایستگاه انار، کرمان، رفسنجان، شهربابک، سیرجان و زرنند مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

بررسی‌ها نشان داده است که مدل‌های این فاز نسبت به فازهای قبلی بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است (Gusain et al. 2020; Rivera and Arnould 2020). بنابراین در این مطالعه برای بررسی تغییرات سرمایه‌دگی در فصل رشد پسته در کرمان از مدل‌های فاز ششم استفاده شد.

استان کرمان یکی از مناطق مهم پسته‌کاری ایران است. اگرچه پسته در ۲۰ استان کشور کشت و تولید می‌شود، اما حدود ۷۰ درصد این محصول در استان کرمان به عمل می‌آید (زاده‌پاریزی و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به اینکه همزمانی آخرین سرمایه‌دگی بهاره در این استان با مراحل جوانه‌زنی و گلدهی پسته آسیب‌های فراوانی را برای این محصول به دنبال دارد، بررسی تغییرات دوره‌های سرمایه‌دگی و به ویژه تعیین تاریخ وقوع آخرین سرمایه‌دگی‌های بهاره اهمیت زیادی دارد. همچنین از آنجا که پسته برای رشد مناسب در فصل گرم، باید نیاز سرمایه‌ی خود را در دوران خفتگی تامین کند، افزایش دما تا حدی که این نیاز تامین نشود، می‌تواند از رشد و نمو آن پس از خفتگی جلوگیری کند. بنابراین افزایش دما نه تنها تاریخ وقوع سرمایه‌دگی را تغییر می‌دهد، بلکه با عدم تامین نیاز سرمایه‌ی گیاه موجب عدم رشد کامل و مناسب آن نیز می‌شود. از این رو بررسی تغییرات احتمالی در



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی در استان کرمان

ایران نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده‌اند (Dunne et al. 2013; Hamed et al. 2022; Usta et al. 2022; Ghazi and Jeihouni 2022; Ahmadi et al. 2023; Modaresi and Araghi 2023; Pegahfar 2023). برای مطالعه حاضر داده‌های دمای حداقل پیش‌نگری و پس‌نگری شده مدل‌ها برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 و در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴)، آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) استفاده شد.

اغلب مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs)، توان تفکیک پایینی دارند و این مسئله دقت این مدل‌ها برای تخمین متغیرهای اقلیمی را کاهش می‌دهد. بنابراین برای افزایش دقت مدل‌ها، ابتدا باید خروجی آنها ریزمقیاس شده و سپس از آنها در مطالعات مختلف استفاده شود. سازمان فضایی آمریکا (NASA) اغلب مدل‌های اقلیمی را به مقیاس  $0.25 \times 0.25$  درجه ریزمقیاس نموده (Thrasher et al., 2022) که خروجی ریزمقیاس نمایی شده در سایتهای <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6> در دسترس می‌باشد.

**داده‌ها:** در مطالعه حاضر و برای ارزیابی مدل‌های اقلیمی از داده‌های روزانه دمای حداقل در ۶ ایستگاه انتخابی استفاده شد. این داده‌ها برای ایستگاه‌های انار، کرمان، شهر بابک و سیرجان از سال ۱۹۸۷، برای ایستگاه رفسنجان از سال ۲۰۱۱ و برای ایستگاه زرنند از ۲۰۰۳ در دسترس قرار داشت. برای تعیین آخرین سرمازدگی بهاره از داده‌های دمای حداقل از تاریخ ۲۱ فوریه (معادل اول اسفند) تا ۲۱ ژوئن (معادل آخر خرداد) و به مدت ۴ ماه در هر سال استفاده شد. تعداد روزهای سرمازدگی نیز در همین دوره تعیین شد. لازم به ذکر است که شروع فصل رشد پسته از اواخر اسفندماه است، اما با توجه به تغییرات تاریخ سرمازدگی، جهت اطمینان دوره آماری از اول اسفند در نظر گرفته شد.

**مدل‌های اقلیمی:** مدل‌های اقلیمی انتخاب شده در این مطالعه شامل BCC-CSM2-MR، CNRM-CM6-1، CMCC-CM2-SR5، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 هستند (جدول ۱). بر اساس مطالعات انجام شده، این مدل‌ها نسبت به نسخه‌های قدیمی‌تر بهبود یافته (Dunne et al. 2013; Wu et al. 2019; Voldoire et al. 2019; Kataoka et al. 2020) و در

جدول ۱- مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده شده در مطالعه حاضر

مدل	مرکز توسعه دهنده مدل	کشور	توان تفکیک افقی (عرض جغرافیایی / درجه)	توان تفکیک افقی (طول جغرافیایی / درجه)
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	چین	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵
CNRM-CM6-1	National Center of Meteorological Research	فرانسه	۱/۴	۱/۴
CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	ایتالیا	۱	۱
GFDL-ESM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	ایالات متحده آمریکا	۱	۱/۲۵
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute	ژاپن	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵

(ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب همبستگی (r) استفاده شد.

**معیارهای خطاسنجی:** برای بررسی دقت مدل‌های اقلیمی از معیارهای خطاسنجی شامل میانگین خطاها

کندال استفاده می‌شود (Mann 1945; Kendall 1975). آزمون من-کندال با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

در این رابطه  $S$  و  $V(S)$  به ترتیب با معادلات ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (۵)$$

$$V(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \quad (۶)$$

در این معادلات،  $V(S)$  واریانس  $S$ ،  $n$  تعداد جفت داده‌ها،  $t_i$  تعداد پیوندها برای مقدار  $i$  ام،  $m$  تعداد گروه پیوندها و  $x_j$  و  $x_k$  مقادیر داده‌های متوالی می‌باشند. مقادیر مثبت  $z_{MK}$  نشان‌دهنده روند افزایشی سری زمانی و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی است.

**مقایسه میانگین‌ها:** برای مقایسه بین آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی دوره پایه و آینده از آزمون آماری مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. به این ترتیب برای مقایسه میانگین بین دو سری نرمال از آزمون T-Test و برای مقایسه میانگین بین دو سری غیرنرمال و یا یک سری نرمال با یک سری غیرنرمال از آزمون ناپارامتریک Mann-Whitney استفاده شد. بنابراین برای انتخاب آزمون مناسب، ابتدا نرمال بودن یا نبودن سری‌ها با استفاده از آماره کولموگروف-اسمیرنوف و در سطح اطمینان ۹۵٪ آزمون شد. این آزمون‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

### نتایج و بحث

**ارزیابی مدل‌های اقلیمی:** شکل ۲ تا ۷ مقایسه دمای حداقل روزانه تخمین زده شده با مدل‌های اقلیمی و دمای حداقل ثبت شده در ایستگاه‌ها را نشان

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{im} - x_{ig})}{n} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{im} - x_{ig})^2}{n}} \quad (۲)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{im} - \bar{x}_m)(x_{ig} - \bar{x}_g)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{im} - \bar{x}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ig} - \bar{x}_g)^2}} \quad (۳)$$

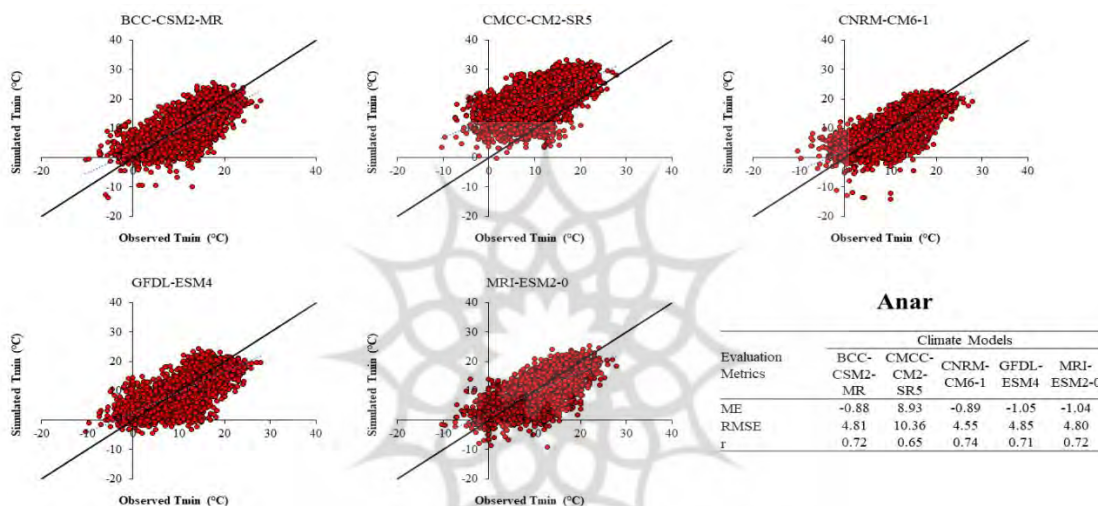
در این معادلات  $x_{im}$  و  $x_{ig}$  به ترتیب مقادیر متغیر تخمین زده شده توسط مدل در دوره پایه و اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های منتخب در زمان  $i$ ،  $\bar{x}_g$  و  $\bar{x}_m$  میانگین متغیر تخمین زده شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در دوره زمانی موردنظر و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. ارزیابی مدل‌ها در ایستگاه‌های انار، کرمان، شهرابک و سیرجان برای دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) انجام شد، اما در ایستگاه رفسنجان و زرنند با توجه به دوره آماری موجود، دقت مدل‌ها به ترتیب برای ۲۰۱۱-۲۰۱۴ و ۲۰۰۳-۲۰۱۴ بررسی شد.

**آستانه سرمازدگی:** دماهای بحرانی برای هر گیاهی در مراحل مختلف رشدی متفاوت است. بر اساس مطالعه جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴) و افشاری و همکاران (۱۳۸۸) دماهای بحرانی خسارت یخبندان و سرمازدگی برای ارقام مختلف پسته در زمان گلدهی و جوانه‌زنی ۴-، ۲-، صفر، ۲ و ۴ درجه می‌باشد که در هریک از این دماها میزان تحمل گیاه به سرما و یخبندان متفاوت است. در این مطالعه دمای ۴ درجه برای آستانه سرمازدگی پسته انتخاب شد. بر این اساس در هر سال آخرین روزی که دمای ۴ درجه در دوره مورد بررسی مشاهده شد، به عنوان تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره بر اساس روز ژولیوسی در نظر گرفته شد. همچنین تعداد روزهایی که در طول فصل رشد پسته دمای هوا کمتر از ۴ درجه شده بود، شمارش شده و به عنوان تعداد روزهای سرمازدگی تعیین شد.

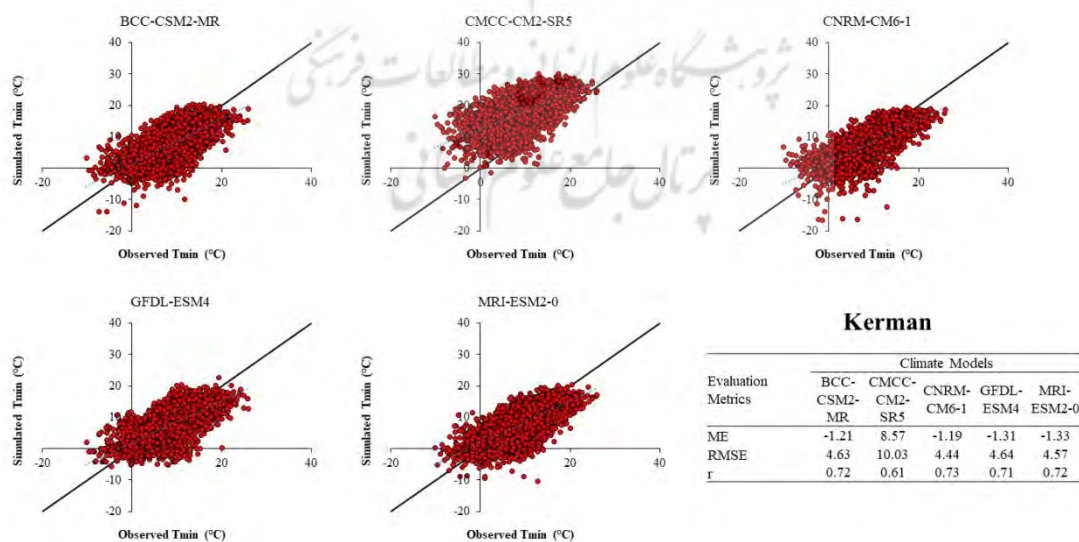
**بررسی روند:** برای بررسی روند تغییرات زمانی متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژی از آزمون من-

مدل‌های اقلیمی مدل CNRM-CM6-1 در ایستگاه‌های انار ( $ME=-0.89$   $r=0.74$ )، کرمان ( $ME=-1.19$   $r=0.73$ )، رفسنجان ( $ME=-0.43$   $r=0.81$ ) و زرنند ( $ME=-2.71$   $r=0.74$ ) و مدل GFDL-ESM4 در ایستگاه شهربابک ( $ME=1.42$   $r=0.75$ ) بهتر از بقیه مدل‌ها دمای حداقل را تخمین می‌زنند. بنابراین برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر سرمازدگی پسته برای ایستگاه‌های انار، کرمان، رفسنجان، سیرجان و زرنند از مدل CNRM-CM6-1 و برای ایستگاه شهربابک از مدل GFDL-ESM4 استفاده شد.

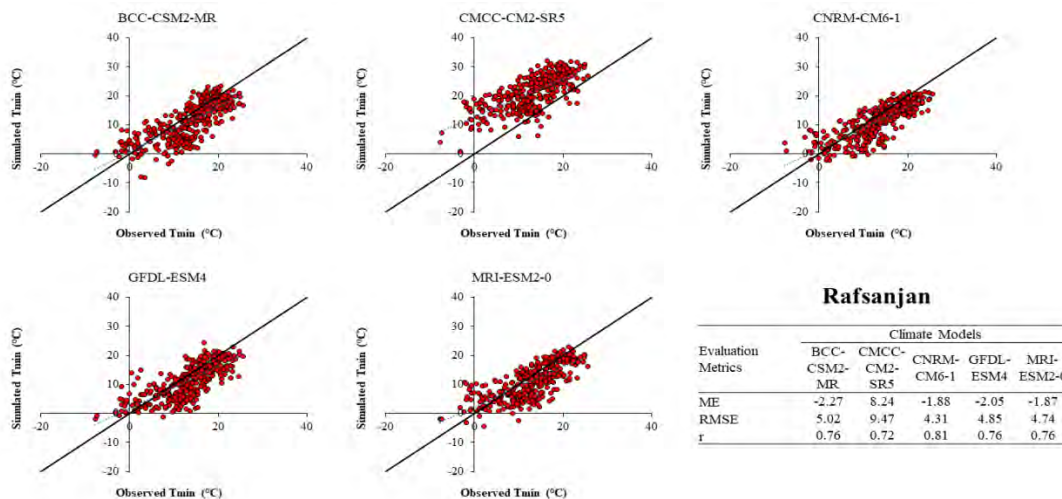
می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی در ایستگاه‌های انار و سیرجان دقت مدل‌های اقلیمی در تخمین دمای حداقل بیشتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. در همه ایستگاه‌ها مدل اقلیمی CMCC-CM2-SR5 دقت مناسبی در تخمین دمای حداقل ندارد (ME بین ۸ تا ۱۱ درجه سلسیوس، RMSE بین ۹ تا ۱۲ درجه سلسیوس) و مقدار دما را بیشتر از مقدار مشاهداتی تخمین می‌زند ( $ME>0$ ). سایر مدل‌ها دمای حداقل را با دقت بیشتری تخمین می‌زنند که در شهربابک بیش‌برآورد ( $ME>0$ ) و در سایر ایستگاه‌ها کم‌برآورد ( $ME<0$ ) دارند. از بین



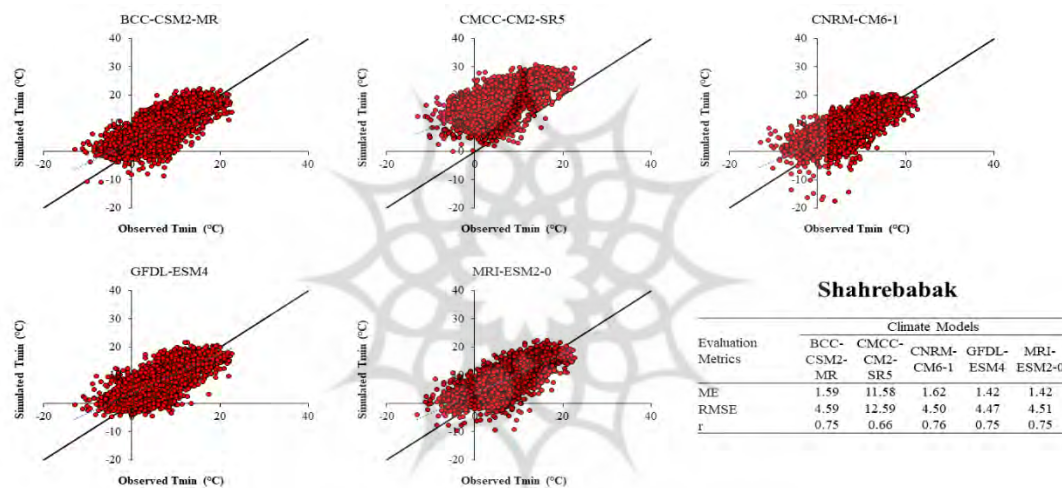
شکل ۲- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه انار



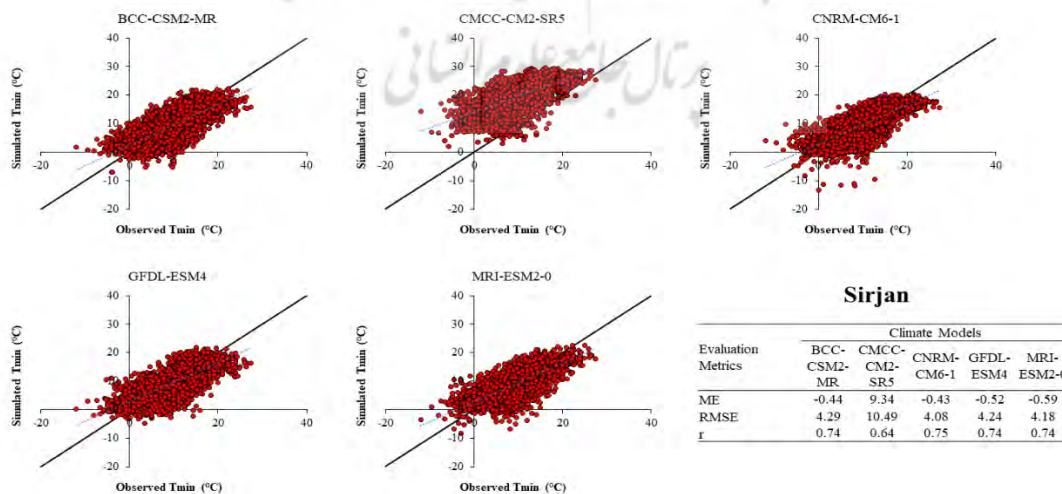
شکل ۳- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه کرمان



شکل ۴- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه رفسنجان

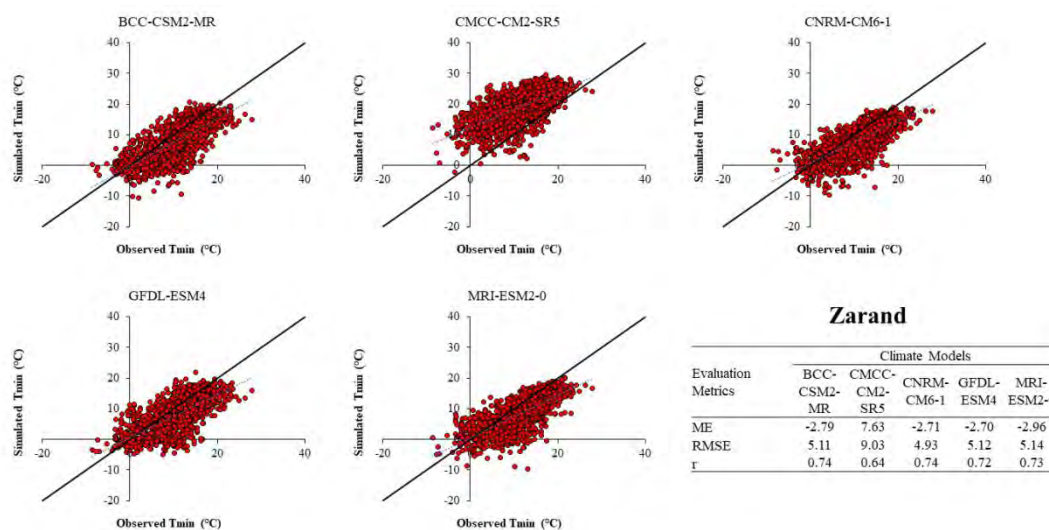


شکل ۵- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه شهراباک



شکل ۶- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه سیرجان

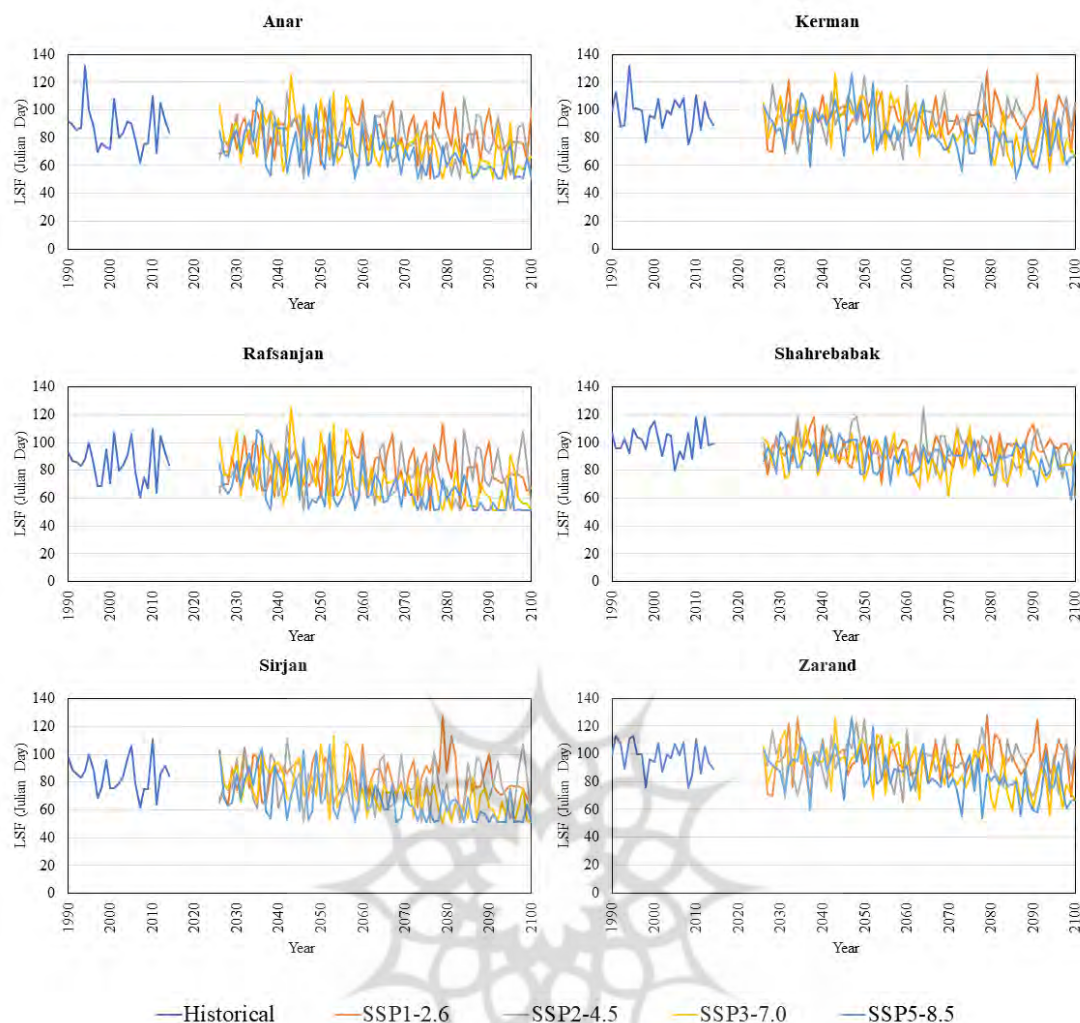




شکل ۷- ارزیابی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه زرنند

Hosseini et al., (Bal et al., 2021), (Ferdosi, 2020) نیز نشان داده است که در برخی از مناطق آخرین سرمازدگی بهاره زودتر رخ خواهد داد. شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که تعداد روزهای سرمازدگی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد و حتی در ایستگاه‌های انار، رفسنجان و سیرجان در آینده دور در فصل رشد پسته تعداد روزهای سرمازدگی به صفر خواهد رسید. مطالعه (Anandhi et al., 2013) و (Biazar and Ferdosi, 2020) نیز نشان داده است که در برخی مناطق به دلیل افزایش دما تعداد روزهای سرمازدگی کاهش پیدا خواهد کرد. به این ترتیب اگرچه به نظر می‌رسد پسته در دوره آینده در فصل بهار دچار سرمازدگی بهاره نخواهد شد، اما با توجه به افزایش قابل ملاحظه دما در آینده، احتمال تغییر مراحل فنولوژی پسته وجود داشته و لذا با توجه به این تغییرات باید برنامه‌ریزی‌ها برای مقابله با سرمازدگی را به اواخر فصل زمستان موکول نمود.

بررسی سری زمانی آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی: شکل ۸ و ۹ به ترتیب روند تغییرات آخرین سرمازدگی بهاره (بر اساس روز ژولینوسی) و تعداد روزهای سرمازدگی را در دوره رشد پسته نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، آخرین سرمازدگی بهاره در دوره آینده و برای همه سناریوهای اقلیمی زودتر از دوره پایه اتفاق می‌افتد و حتی در برخی موارد به قبل از اسفند هم می‌رسد. لازم به ذکر است که چون برای بررسی سرمازدگی دوره آماری از اول اسفند (۲۱ فوریه، روز ژولینوسی ۵۲) در نظر گرفته شده بود، برای مواردی که آخرین سرمازدگی بهاره در دوره‌های آینده به قبل از روز اول اسفند رسیده بود، روز ۳۰ بهمن (۲۰ فوریه، روز ژولینوسی ۵۱) به عنوان آخرین سرمازدگی بهاره در نظر گرفته شد. بنابراین در تمام ایستگاه‌ها تاریخ وقوع آخرین سرمازدگی بهاره به قبل از آغاز فصل بهار جابه‌جا شده و در آینده دور حتی به قبل از اسفند نیز می‌رسد (ایستگاه‌های انار، رفسنجان و سیرجان). مطالعات (Alvares et al., 2018), (Biazar and



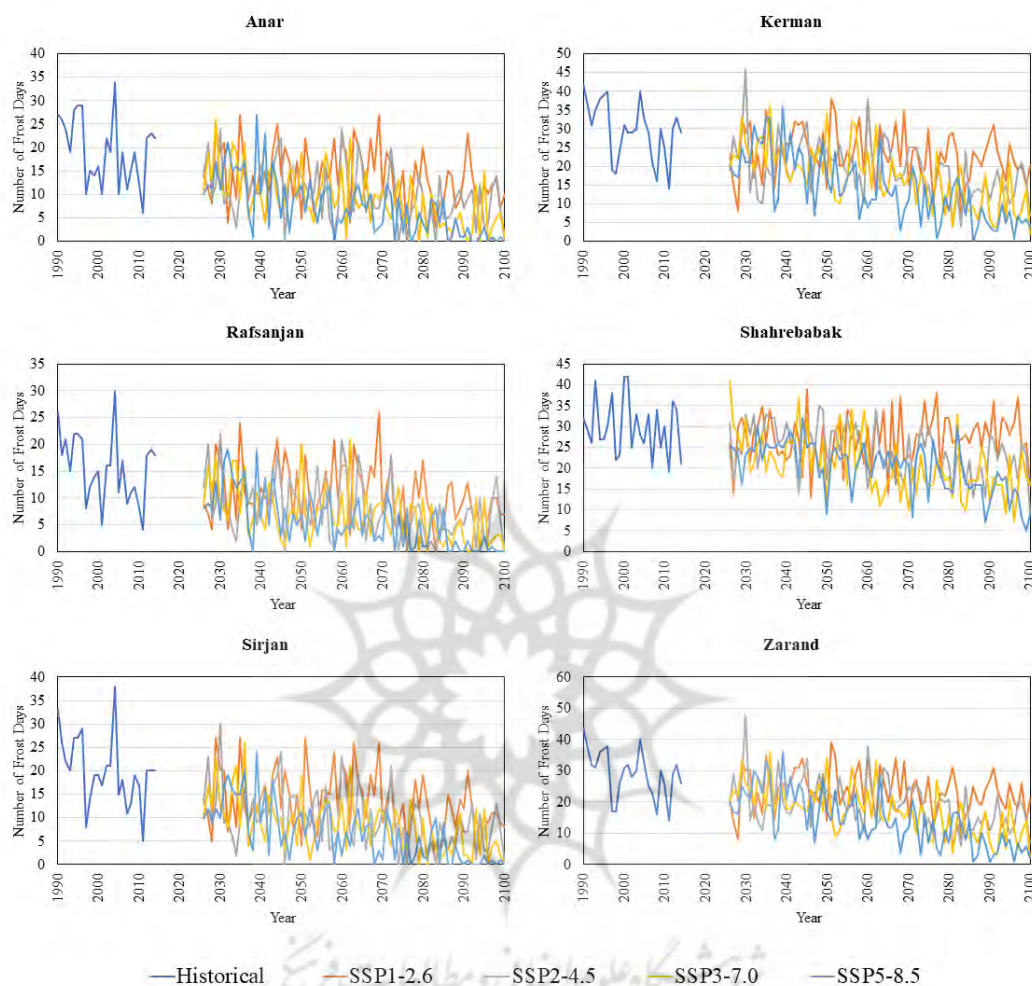
شکل ۸- روند تغییرات آخرین سرمازدگی بهاره (روز ژولیوسی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

در آینده نزدیک در ایستگاه کرمان، SSP5-8.5 در آینده میانی و دور در ایستگاه رفسنجان و SSP5-8.5 در آینده دور در ایستگاه سیرجان می‌باشند (مقادیر پرننگ در جدول ۲). سری‌های تعداد روزهای سرمازدگی دارای توزیع غیر نرمال شامل SSP5-8.5 در آینده دور در ایستگاه انار، دوره پایه و SSP3-7.0 در آینده میانی و دور در ایستگاه کرمان، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در آینده دور در ایستگاه رفسنجان، SSP5-8.5 در آینده نزدیک و میانی در ایستگاه شهراباک، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در آینده دور در ایستگاه سیرجان و SSP3-7.0 در آینده نزدیک و میانی در ایستگاه زرنند می‌باشند (مقادیر پرننگ در جدول ۳).

بررسی تغییرات تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی با احتمالات مختلف: برای تعیین تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی با احتمالات مختلف با استفاده از توزیع نرمال، ابتدا باید برازش تابع توزیع نرمال بر داده‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. از نظر آماری، در صورتی که مقدار  $P\_value$  از ۰/۰۵ کمتر باشد، سری مربوطه از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند. بنابراین بر اساس اطلاعات جدول ۲ و ۳ اغلب سری‌های مورد بررسی دارای توزیع نرمال می‌باشند. سری‌های آخرین سرمازدگی بهاره دارای توزیع غیر نرمال شامل SSP3-7.0 در آینده میانی و دور در ایستگاه انار، SSP2-2.6

و تعداد روزهای سرمازدگی برای احتمال ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از توزیع نرمال برای همه سری داده‌ها استفاده شد.

بنابراین با توجه به اینکه اغلب سری‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و با اغماض از نرمال نبودن سری‌های ذکر شده، برای محاسبه تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره



شکل ۹- روند تغییرات تعداد روزهای سرمازدگی در فصل رشد پسته در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

در ایستگاه کرمان و با احتمال ۷۵ درصد، ۳، ۱۵ و ۲۲ روز خواهد بود. تعداد روزهای سرمازدگی نیز برای ایستگاه انار با احتمال ۲۵ درصد از ۱۴ روز در دوره پایه به ۸، ۴ و ۱ روز در دوره‌های آینده در سناریوی SSP5-8.5 کاهش خواهد یافت. این متغیر در ایستگاه کرمان و با احتمال ۷۵ درصد از ۳۵ روز به ۲۷، ۱۷ و ۱۰ روز کاهش خواهد یافت. این تغییرات را در سایر ایستگاه‌ها و احتمالات نیز می‌توان ملاحظه نمود. بیشترین تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره پایه در

جداول ۴ و ۵ به ترتیب تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی را برای احتمال ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده، به عنوان مثال در ایستگاه انار آخرین سرمازدگی بهاره با احتمال ۲۵ درصد در دوره پایه در روز ۷۷ ژوئیه‌ی به وقوع می‌پیوندد که در سناریوی SSP5-8.5 در آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور به ترتیب ۱۰ روز، ۱۷ روز و ۲۳ روز زودتر رخ خواهد داد (به ترتیب روز ۶۷، ۶۰ و ۵۳ ژوئیه‌ی). این تغییر

7.0 و SSP5-8.5 در آینده میانی، در ایستگاه رفسنجان برای سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور، در ایستگاه سیرجان برای سناریوی SSP1-2.6 در آینده دور و در ایستگاه زرنند برای سناریوی SSP3-7.0 در آینده میانی کاهش و معنی‌دار است. تعداد روزهای سرمازدگی نیز در ایستگاه‌های کرمان و زرنند در دوره پایه و در سایر ایستگاه‌ها برای سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور دارای روند کاهشی معنی‌دار است. البته باید در نظر داشت که آزمون روند برای هر دوره ۲۵ ساله (پایه، آینده نزدیک، میانی و دور) به طور جداگانه انجام شده است و در حالی که در هر دوره روند تغییرات معنی‌دار نیست، اما باید تغییرات قابل ملاحظه رخ داده در دوره‌های آینده نسبت به پایه را در نظر گرفت. بر اساس جدول ۸ تغییر میانگین تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره در دوره‌های آینده میانی و دور و برای سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه از نظر آماری معنی‌دار است. این معنی‌داری در برخی از ایستگاه‌ها برای سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 نیز دیده می‌شود. تغییر میانگین تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره در ایستگاه شهراباک در آینده نزدیک و برای سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نیز معنی‌دار است. جدول ۹ معنی‌داری مقایسه میانگین تعداد روزهای سرمازدگی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. در این جدول نیز مشاهده می‌شود که تعداد روزهای سرمازدگی در دوره‌های آینده در اغلب ایستگاه‌ها و سناریوها تفاوت معنی‌داری نسبت به دوره پایه دارد. بر این اساس باید افزایش دما در آینده و اثرات آن بر مراحل فنولوژی پسته و تغییرات قابل ملاحظه در تاریخ وقوع آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی را در ارائه برنامه‌های مدیریتی مورد توجه قرار داد.

ایستگاه‌های کرمان و سیرجان دیده می‌شود. بر اساس نتایج جداول ۴ و ۵ سناریوی SSP3-7.0 بیشترین تغییر را در آینده نسبت به دوره پایه در تمام ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.

مقایسه بین ایستگاه‌ها در دوره پایه نشان می‌دهد که با احتمالات مختلف آخرین سرمازدگی بهاره در شهراباک دیرتر از بقیه ایستگاه‌ها رخ می‌دهد (روز ۹۴، ۱۰۱ و ۱۰۷ ژولیوسی با احتمالات ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪). بعد از ایستگاه شهراباک، ایستگاه‌های کرمان و زرنند در رتبه بعدی قرار دارند. ایستگاه‌های انار، رفسنجان و سیرجان زودتر از بقیه ایستگاه‌ها و تقریباً همزمان با آخرین سرمازدگی بهاره مواجه می‌شوند. این ترتیب در دوره‌های آینده و برای سناریوهای مختلف نیز مشاهده می‌شود. تعداد روزهای سرمازدگی نیز در شهراباک، کرمان و زرنند بیشتر از ایستگاه‌های دیگر است.

**بررسی روند تغییرات و مقایسه میانگین‌ها:** نتایج آزمون من-کنندال در بررسی روند تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. بر اساس این دو جدول در اغلب سری‌های زمانی، اگرچه مقدار  $Z_{MK}$  منفی بوده و نشان‌دهنده روند کاهشی است، اما این روند تغییرات در اغلب موارد از نظر آماری معنی‌دار نبوده است ( $P\_value$  بیشتر از ۰/۰۵). حسینی و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که بر اساس داده‌های مشاهداتی در اغلب ایستگاه‌های ایران روند آخرین سرمازدگی بهاره معنی‌دار نبوده است و این تغییرات را ناشی از نوسانات اقلیمی کوتاه مدت دانسته‌اند (Hosseini et al. 2021). نتایج مطالعه (Lou et al. 2013) نیز نشان داد که روند معنی‌داری در تغییر تاریخ وقوع سرمازدگی دیده نمی‌شود. روند تغییرات تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره در ایستگاه کرمان و برای سناریوی SSP3-7.0 در آینده نزدیک و SSP3-

جدول ۲- نتایج آزمون نرمال بودن توزیع آخرین سرمازدگی بهاره (روز ژولینوسی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

ایستگاه	آینده دور (۲۰۲۶-۲۱۰۰)				آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)				آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)				دوره پایه -۱۹۹۰ (۲۰۱۴)	آماره	Statistic
	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6			
انار	0.16	0.18	0.08	0.11	0.14	0.18	0.09	0.10	0.13	0.09	0.10	0.17	0.17	0.06	0.17
کرمان	0.11	0.11	0.20	0.20	0.20	0.04	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.07	0.18	0.09	0.07
رفسنجان	0.12	0.11	0.11	0.12	0.16	0.13	0.12	0.09	0.15	0.12	0.14	0.16	0.08	0.08	0.18
شهرابک	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.20	0.20	0.20	0.18	0.20	0.19	0.03	0.20	0.20	0.20
سیرجان	0.30	0.16	0.12	0.11	0.19	0.17	0.11	0.11	0.15	0.08	0.10	0.16	0.08	0.08	0.08
زرنند	0.00	0.11	0.20	0.20	0.02	0.07	0.20	0.20	0.15	0.20	0.20	0.08	0.20	0.20	0.20
	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.06	0.13	0.11	0.17	0.11	0.10	0.12	0.12	0.09	0.09
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.07	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	0.23	0.12	0.11	0.16	0.14	0.17	0.12	0.11	0.13	0.09	0.08	0.15	0.15	0.09	0.09
	0.00	0.20	0.20	0.09	0.20	0.05	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.14	0.14	0.20	0.20
	0.09	0.09	0.10	0.12	0.15	0.14	0.17	0.10	0.15	0.15	0.14	0.13	0.13	0.11	0.11
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.15	0.20	0.05	0.20	0.16	0.14	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20



جدول ۴- آخرین سرمازدگی بهاره (روز ژولوس) متناظر با احتمال وقوع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

ایستگاه	دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴)				آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)													
	احتمال	SSP1- ۲.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)
ایستگاه	25	74	73	76	67	76	70	67	60	71	89	74	60	76	66	56	66	71
انار	50	82	82	86	78	85	79	77	70	81	98	70	70	85	76	64	76	81
	75	89	91	96	89	94	89	86	79	90	86	79	79	94	86	71	86	90
کرمان	25	86	86	91	84	87	85	79	74	89	89	74	60	76	66	55	66	89
	50	95	95	98	94	94	93	89	82	98	82	82	70	85	77	62	76	98
	75	103	105	105	103	101	101	98	91	106	106	91	79	94	88	69	86	106
رفسنجان	25	70	70	72	65	74	66	64	57	68	68	57	60	74	65	52	65	74
	50	79	79	83	76	84	76	74	66	78	78	66	70	84	77	58	77	84
	75	87	88	95	88	93	86	85	75	88	88	75	79	93	88	64	88	94
شهربابک	25	89	92	84	86	87	89	79	82	93	79	82	64	74	64	79	81	93
	50	96	99	91	93	93	96	88	88	97	88	88	75	88	88	85	88	97
	75	103	106	99	99	99	102	97	94	101	97	94	85	101	96	90	96	101
سیرجان	25	75	71	76	65	74	65	64	58	71	81	64	58	71	64	56	64	81
	50	83	81	84	77	83	75	75	67	82	81	75	67	82	75	63	75	83
	75	92	91	92	88	91	85	85	76	93	85	76	76	93	86	69	86	93
ززد	25	86	87	91	85	89	85	81	77	90	81	77	77	90	82	67	82	91
	50	95	97	98	94	95	93	91	86	98	91	86	86	98	91	78	91	98
	75	105	107	106	104	102	101	100	94	107	100	94	94	107	100	84	100	105

جدول ۵- تعداد رزوه‌های سرمایه‌گذاری در فصل رشد پسته متناظر با احتمال وقوع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

SSP5- 8.5	آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)					آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)					آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)					دوره پایه (۱۹۹۰- ۲۰۱۴)	احتمال	ایستگاه
	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6			
1	2	4	8	4	6	6	12	8	9	9	9	9	9	9	11	14	25	اتار
3	5	7	11	7	10	10	16	12	13	13	13	13	13	15	19	50		
5	8	10	14	10	13	15	19	17	17	17	17	17	17	19	24	75		
4	6	11	17	9	14	16	20	17	19	19	17	17	19	19	25	25	کرمان	
7	11	14	21	13	18	21	25	22	23	23	22	22	24	24	30	50		
10	15	18	25	17	22	25	30	27	27	27	27	27	29	29	35	75		
0	1	3	5	3	4	5	9	6	6	6	6	6	7	8	11	25	رفسنجان	
2	4	5	8	5	7	8	12	9	9	9	9	10	10	12	16	50		
4	6	7	11	8	10	12	16	13	13	13	14	14	15	15	20	75		
12	14	17	25	18	15	21	22	21	21	21	21	21	23	22	25	25	شهرابک	
16	17	21	29	21	20	25	27	24	25	25	27	27	27	26	30	50		
19	21	24	32	24	25	28	31	27	29	29	31	31	30	30	34	75		
0	2	4	7	4	6	6	12	8	8	8	8	8	8	10	15	25	سیرجان	
2	5	6	10	6	9	10	16	11	12	12	13	13	14	14	20	50		
4	7	9	13	9	12	14	20	15	16	16	17	17	18	18	25	75		
4	7	11	18	10	14	17	21	17	19	19	17	17	17	19	24	25	زرند	
7	11	15	21	14	17	21	26	22	23	23	22	22	24	24	29	50		
10	15	18	25	18	21	25	30	27	26	26	28	28	29	29	34	75		



جدول ۶- نتایج آزمون روند من-کندال برای آخرین سرمازدگی بهاره (روز ژولینوسی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی

ایستگاه	دوره پایه																	
	آینده دور (۲۰۷۶-۲۰۵۰)						آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)						آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)					
	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6	SSP5- 8.5	SSP3- 7.0	SSP2- 4.5	SSP1- 2.6		
ایار	-1.61	-0.47	-0.63	-0.96	-1.36	-0.40	-0.02	-0.35	-0.35	-0.35	0.96	0.98	0.37	-0.72	ZMK			
	0.11	0.64	0.53	0.34	0.17	0.69	0.98	0.73	0.73	0.73	0.34	0.33	0.71	0.47	P_value			
کرمان	-1.50	-0.96	-0.56	-0.05	-1.99	-2.38	0.56	-1.94	0.68	2.32	1.05	0.47	-0.56	ZMK				
	0.13	0.34	0.57	0.96	0.05	0.02	0.57	0.05	0.50	0.02	0.29	0.64	0.57	P_value				
رفسنجان	-2.34	-0.94	-0.14	-1.43	-0.87	-0.47	0.00	0.00	-1.01	0.00	0.70	-0.21	-0.54	ZMK				
	0.02	0.35	0.89	0.15	0.39	0.64	1.00	1.00	0.31	1.00	0.48	0.83	0.59	P_value				
شهربابک	-1.31	0.40	-0.16	0.00	1.31	-0.87	1.01	0.02	0.82	-0.49	0.65	0.30	-0.07	ZMK				
	0.19	0.69	0.87	1.00	0.19	0.39	0.31	0.98	0.41	0.62	0.51	0.76	0.94	P_value				
سیرجان	-1.47	-0.92	0.54	-2.88	-1.88	-0.42	0.23	0.00	-0.82	0.21	0.28	1.38	-0.94	ZMK				
	0.14	0.36	0.59	0.00	0.06	0.67	0.81	1.00	0.41	0.83	0.78	0.17	0.35	P_value				
ززد	-1.33	-1.75	-0.75	-0.09	-1.05	-2.10	0.63	-1.40	0.61	1.33	1.52	0.56	-1.45	ZMK				
	0.18	0.08	0.45	0.93	0.29	0.04	0.53	0.16	0.54	0.18	0.13	0.57	0.15	P_value				



جدول ۸- نتایج آزمون مقایسه میانگین تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره در دوره پایه نسبت به دوره‌های آینده برای ۴ سناریوی مختلف اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه. برای مقایسه میانگین سری‌های نرمال از آزمون T-Test و برای سری‌های غیر نرمال (هابلایت شده) از آزمون Mann-Whitney استفاده شده است. مقادیر پررنگ شده نشان‌دهنده معنی‌داری اختلاف میانگین‌هاست.

ایستگاه	آماره	آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)					آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)					آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)				
		SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	آماره	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	آماره	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	آماره
انار	آماره	1.34	1.09	0.19	1.85	1.80	0.45	1.85	1.85	1.85	1.80	0.45	1.85	1.85	1.85	1.34
	P_value	0.19	0.28	0.85	0.07	0.08	0.65	0.07	0.07	0.08	0.65	0.07	0.07	0.07	0.19	
کرمان	آماره	270.50	0.66	0.01	1.11	1.43	1.14	1.11	1.11	1.43	1.14	1.11	1.11	1.11	270.50	
	P_value	0.42	0.51	0.99	0.27	0.16	0.26	0.27	0.27	0.16	0.26	0.27	0.27	0.42		
رفسنجان	آماره	1.67	1.62	0.39	1.98	2.16	0.38	1.98	1.98	2.16	0.38	1.98	1.98	1.67		
	P_value	0.10	0.11	0.70	0.05	0.04	0.71	0.05	0.05	0.04	0.71	0.05	0.05	0.10		
شهربابک	آماره	1.58	0.71	3.23	2.90	1.88	2.91	2.90	2.90	1.88	2.91	2.90	2.90	1.58		
	P_value	0.12	0.48	0.00	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	0.12		
سیرجان	آماره	0.36	1.05	0.26	1.94	2.46	0.60	1.94	1.94	2.46	0.60	1.94	1.94	0.36		
	P_value	0.72	0.30	0.79	0.06	0.02	0.55	0.06	0.06	0.02	0.55	0.06	0.06	0.72		
زرنند	آماره	0.80	0.23	-0.10	1.05	1.64	0.84	1.05	1.05	1.64	0.84	1.05	1.05	0.80		
	P_value	0.43	0.82	0.92	0.30	0.11	0.40	0.30	0.30	0.11	0.40	0.30	0.30	0.43		



ماه اسفند وجود خواهد داشت. بر این اساس باید افزایش دما در آینده و اثرات آن بر مراحل فنولوژی پسته و تغییرات قابل ملاحظه در تاریخ وقوع آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی را در ارائه برنامه‌های مدیریتی مورد توجه قرار داد. همچنین یکی از نکاتی که باید در زمینه بررسی یخبندان و سرمازدگی در نظر داشت، اختلاف دما در محل ایستگاه با دما در محل باغات است که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده این اختلاف در تعیین شاخص‌های یخبندان و سرمازدگی در نظر گرفته شود.

### سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۷/ص/۰۲/۱۰۱۰ با استفاده از اعتبارات پژوهشی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران انجام شده است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه از خروجی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای تعیین اثر تغییر اقلیم بر تاریخ وقوع آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در فصل رشد پسته در استان کرمان استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به افزایش دما در آینده، آخرین سرمازدگی‌های بهاره در ایستگاه‌های مورد بررسی زودتر از دوره پایه اتفاق خواهد افتاد و حتی ممکن است تا اوایل اسفند نیز برسد. تعداد روزهای سرمازدگی نیز در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه کاهش معنی‌داری در تمام ایستگاه‌ها و برای تمام سناریوهای اقلیمی نشان می‌دهد. بر این اساس احتمال وقوع سرمازدگی‌های بهاره در فصل بهار که فصل رشد پسته است کاهش یافته و ریسک سرمازدگی برای این محصول کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت که افزایش دما در آینده می‌تواند سبب تغییر در مراحل فنولوژیکی پسته شده و بنابراین احتمال تداخل مراحل حساس پسته با سرمازدگی در

### منابع

- افشاری، ح.، حکم‌آبادی، ح.، عبادی، ع.، عرب، ح.، قربانیان، ع.، ۱۳۸۸، بررسی مقاومت به سرمای بهاره برخی ارقام تجاری پسته منطقه دامغان، فصلنامه علمی پژوهشی گیاه و زیست بوم، شماره ۱۸، ۶۰-۷۶.
- زاده پاریزی، ر.، تاج‌آبادی پور، ع.، ۱۳۹۷، بررسی وضعیت سطح زیرکشت ارقام پسته در استان کرمان، دومین همایش ملی پسته ایران، رفسنجان، ۲۱ و ۲۲ شهریور ۱۳۹۷.
- میان‌آبادی، آ.، موسوی بایگی، م.، ثنایی‌نژاد، ح.، نظامی، ا.، ۱۳۸۸، بررسی و پهنه‌بندی یخبندان‌های زودهنگام پاییزه، دیرهنگام بهاره و زمستانه با استفاده از GIS در استان خراسان رضوی، مجله آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۱، ۷۹-۹۰.
- Ahmadi H, Rostami N, Dadashi-Roudbari A (2023) The impact of climate change on snowfall in Iran Basins using the satellite-derived snow products and CMIP6 Bias Corrected model. *Theor Appl Climatol* 151:603–
618. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04302-2>
- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., et al (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res* 111:1–22. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Alidoost F, Su Z, Stein A (2019) Evaluating the effects of climate extremes on crop yield, production and price using multivariate distributions: A new copula application. *Weather Clim Extrem* 26:100227. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100227>
- Almagro A, Oliveira PTS, Rosolem R, et al (2020) Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmos Res* 244:105053. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105053>
- Alvares CA, Sentelhas PC, Stape JL

- (2021) Climate change reshapes the drivers of false spring risk across European trees. *New Phytol* 229:323–334. <https://doi.org/10.1111/nph.16851>
16. Chmielewski F-M, Götz K-P, Weber KC, Moryson S (2018) Climate change and spring frost damages for sweet cherries in Germany. *Int J Biometeorol* 62:217–228. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1443-9>
17. Dunne JP, John JG, Shevliakova E, et al (2013) GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics\*. *J Clim* 26:2247–2267. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00150.1>
18. Eccel E, Rea R, Caffarra A, Crisci A (2009) Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: The role of phenological acclimation. *Int J Biometeorol* 53:273–286. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0213-8>
19. Eyring V, Bony S, Meehl GA, et al (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9:1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
20. Ghazi B, Jeihouni E (2022) Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arab J Geosci* 15:621. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
21. Guan Y, Zheng F, Zhang P, Qin C (2015) Spatial and temporal changes of meteorological disasters in China during 1950–2013. *Nat Hazards* 75:2607–2623. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1446-3>
22. Guo J, Yan Y, Chen D, et al (2020) The response of warm-season precipitation extremes in China to global warming: an observational perspective from radiosonde measurements. *Clim Dyn* 54:3977–3989. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-2267-6>
- (2018) Modeling monthly meteorological and agronomic frost days, based on minimum air temperature, in Center-Southern Brazil. *Theor Appl Climatol* 134:177–191. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2267-6>
9. Anandhi A, Perumal S, Gowda PH, et al (2013) Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. *Clim Change* 120:169–181. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0794-4>
10. Augspurger CK (2013) Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology* 94:41–50. <https://doi.org/10.1890/12-0200.1>
11. Bal SK, Dhakar R, Kumar PV, et al (2021) Temporal trends in frost occurrence and their prediction models using multivariate statistical techniques for two diverse locations of Northern India. *Theor Appl Climatol* 146:1097–1110. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03786-8>
12. Biazar SM, Ferdosi FB (2020) An investigation on spatial and temporal trends in frost indices in Northern Iran. *Theor Appl Climatol* 141:907–920. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03248-7>
13. Bozkurt D, Rojas M, Boisier JP, Valdivieso J. (2018) Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Clim Change* 150:131–147. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>
14. Cai L, Alexeev VA, Walsh JE, Bhatt US (2018) Patterns, Impacts, and Future Projections of Summer Variability in the Arctic from CMIP5 Models. *J Clim* 31:9815–9833. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0119.1>
15. Chamberlain CJ, Cook BI, Morales Castilla I, Wolkovich EM

- apple growing by 2040. *Agric Food Sci* 19:144–159.  
<https://doi.org/10.2137/145960610791542352>
31. Kendall MG (1975) *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London, UK
32. Kramer K (1994) A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell Environ* 17:367–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1994.tb00305.x>
33. Lou W, Sun K, Sun S, et al (2013) Changes in pick beginning date and frost damage risk of tea tree in Longjing tea-producing area. *Theor Appl Climatol* 114:115–123.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0825-5>
34. Mann HB (1945) Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13:245–259
35. Masaki Y (2021) First and last frost date determinations based on meteorological observations in Japan: trend analysis and estimation scheme construction. *Theor Appl Climatol* 145:411–426.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03637-6>
36. Masaki Y (2022) Future frost risks in the Tohoku region of Japan under a warming climate—interpretation of regional diversity in terms of seasonal warming. *Theor Appl Climatol* 147:473–485. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03834-3>
37. Maxino CC, McAvaney BJ, Pitman AJ, Perkins SE (2008) Ranking the AR4 climate models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation. *Int J Climatol* 28:1097–1112. <https://doi.org/10.1002/joc.1612>
38. Menzel A, Sparks TH, Estrella N, et al (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Chang Biol* 12:1969–1976.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-05216-3>
23. Gusain A, Ghosh S, Karmakar S (2020) Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmos Res* 232:104680.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104680>
24. Hamed MM, Nashwan MS, Shahid S, et al (2022) Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmos Res* 265:105927.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105927>
25. Helali J, Oskouei EA, Hosseini SA, et al (2022) Projection of changes in late spring frost based on CMIP6 models and SSP scenarios over cold regions of Iran. *Theor Appl Climatol* 149:1405–1418.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04124-2>
26. Hosseini SM, Karbalaee A, Hosseini SA (2021) Spatiotemporal changes of early fall and late spring frost and its trend based on daily minimum temperature in Iran. *Arab J Geosci* 14:..  
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06608-3>
27. Kamyar A, Yazdanpanah H, Movahedi S, Morimoto D (2020) Assessment of the impacts of climate change on agro-climatic indices in Iran. *Theor Appl Climatol* 142:1359–1367.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03385-z>
28. Kartschall T, Wodinski M, von Bloh W, et al (2015) Changes in phenology and frost risks of *Vitis vinifera* (cv Riesling). *Meteorol Zeitschrift* 24:189–200.  
<https://doi.org/10.1127/metz/2015/0534>
29. Kataoka T, Tatebe H, Koyama H, et al (2020) Seasonal to Decadal Predictions With MIROC6: Description and Basic Evaluation. *J Adv Model Earth Syst* 12:..  
<https://doi.org/10.1029/2019MS002035>
30. Kaukoranta T, Tahvonen R, Ylämäki A (2010) Climatic potential and risks for

- climate models (RCMs) in determining precipitation characteristics for Gothenburg, Sweden. *Hydrol Res* 45:703–714.  
<https://doi.org/10.2166/nh.2013.160>
47. Rivera JA, Arnould G (2020) Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmos Res* 241:104953.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>
48. Rochette P, Bélanger G, Castonguay Y, et al (2004) Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Can J Plant Sci* 84:1113–1125.  
<https://doi.org/10.4141/P03-177>
49. Scheifinger H, Menzel A, Koch E, Peter C (2003) Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theor Appl Climatol* 74:41–51.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-002-0704-6>
50. Thrasher B, Wang W, Michaelis A, et al (2022) NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* 9:262.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
51. Usta DFB, Teymouri M, Chatterjee U (2022) Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arab J Geosci* 15:416.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9>
52. Voldoire A, Saint Martin D, Sénési S, et al (2019) Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM CM6.1. *J Adv Model Earth Syst* 11:2177–2213.  
<https://doi.org/10.1029/2019MS001683>
53. Wu T, Lu Y, Fang Y, et al (2019) The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geosci Model Dev* 12:1573–1600.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-12-1573-2019>
- 2486.2006.01193.x
39. Modaresi F, Araghi A (2023) Projecting future reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theor Appl Climatol* 153:101–112.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04465-6>
40. Mukherjee S, Aadhar S, Stone D, Mishra V (2018) Increase in extreme precipitation events under anthropogenic warming in India. *Weather Clim Extrem* 20:45–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.03.005>
41. Papalexioiu SM, Montanari A (2019) Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming. *Water Resour Res* 55:4901–4914.  
<https://doi.org/10.1029/2018WR024067>
42. Pegahfar N (2023) Future precipitation and near surface air-temperature projection using CMIP6 models based on TOPSIS method: case study, Sistan-and-Baluchestan Province of Iran. *Environ Monit Assess* 195:1548.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-12084-x>
43. Poling EB (2008) Spring cold injury to winegrapes and protection strategies and methods. *HortScience* 43:1652–1662.  
<https://doi.org/10.21273/hortsci.43.6.1652>
44. Qian B, Zhang X, Chen K, et al (2010) Observed long-term trends for agroclimatic conditions in Canada. *J Appl Meteorol Climatol* 49:604–618.  
<https://doi.org/10.1175/2009JAMC2275.1>
45. Ragno E, AghaKouchak A, Love CA, et al (2018) Quantifying Changes in Future Intensity Duration Frequency Curves Using Multimodel Ensemble Simulations. *Water Resour Res* 54:1751–1764.  
<https://doi.org/10.1002/2017WR021975>
46. Rana A, Madan S, Bengtsson L (2014) Performance evaluation of regional



- to 2010. *Theor Appl Climatol* 115:441–450. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0898-9>
56. Zinoni F, Antolini G, Campisi T, et al (2002) Characterisation of Emilia-Romagna region in relation with late frost risk. *Phys Chem Earth* 27:1091–1101. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00145-6](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00145-6)
54. Xiao L, Liu L, Asseng S, et al (2018) Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agric For Meteorol* 260–261:154–164. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.006>
55. Zhang D, Xu W, Li J, et al (2014) Frost-free season lengthening and its potential cause in the Tibetan Plateau from 1960





پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی