Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 21-37

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Temporal and Spatial Changes in the Occurrence of Frost in Isfahan Province Using the Models of the Sixth Climate Change Report

E. Mazaheri[1], J. Abedi Koupai[2*], M. Heidarpor[3], M. J. Zareian[4] and S.A. Gohari[5]

1- PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, College of Agricultural , Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2 - Corresponding Author, Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, (koupai@cc.iut.ac.ir).*
3- Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
4 - Assistant Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran.
5 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 11 January 2022
Revised: 14 July 2022
Accepted: 16 July 2022

Keywords:
Emission Scenarios, General Circulation Models, LARS-WG, Minimum Temperature.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mazaheri, E., Abedi Koupai, J., Heidarpour, M., Zareian, M. J., Gohari, S. A. (2025). 'Investigation of Temporal and Spatial Changes in the Occurrence of Frost in Isfahan Province Using the Models of the Sixth Climate Change Report', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 21-37. doi: 10.22055/jise.2022.39312.2005.

Introduction

Extreme climate events and agricultural disasters have increased in the past decades (IPCC, 2012). Frost disaster is one of the extreme events characterized by a short duration of freezing air that is destructive to crop growth and production (Xiao et al., 2018). Every year, early fall and late spring frost, due to the coincidence with the critical stages of plant life, reduces agricultural product yield. Investigation of changes in frost parameters such as the date of the first fall frost (FFF), the date of the last spring frost (LSF), growing season length (GSL), the number of frost days (FD), and the length of the frost period (LF) during the future period, to provide proper planning for planting crops and take the necessary measures to prevent the occurrence of frost with sensitive stages of plant growth is essential(Esmaeili et al., 2011). This study aims to investigate the temporal and spatial changes of the mentioned frost parameters of the future period (2051-2022) based on three emission scenarios, SSP126, SSP245, and SSP585, compared to the future statistical period in Isfahan province.

Methodology

In this study, Isfahan province is considered a study area. The minimum temperature data of the past period and the outputs of 10 *general circulation models were downscaled by LARS-WG* for the future period (2051-2022). In addition, the three emission scenarios SSP126, SSP245, and SSP585 of 13 stations in Isfahan province were used. General circulation models are weighted based on the average deviation of the minimum temperature simulated in the base period from the average of the observed data. Finally, for all stations, by combining the weight obtained for each model and the difference of the data of each scenario from its base value, the micro-scaled output data for each station was obtained using the LARS-WG6 model. To extract the frost parameters, preparing the minimum temperature data of the observation and future periods was started by controlling the minimum

temperature from the first day of September and the first day when the minimum temperature is equal to the desired threshold; less than this threshold is considered the first fall frost (FFF) and the last day of frost (LSF). The dates are set as Julius days. Then the LF, GSL, and FD are calculated, and the spatial changes of the frost parameters in the future period based on all emission scenarios compared to the past period are plotted by the ARC GIS 10.8.

Results and Discussion

Temporal and spatial distribution of changes in the first fall frost and the last spring frost of the future period compared to the past period

On average, Chadegan (Oct 19) and Khour and Biabanak (Dec 6) had the earliest and the latest date of the first fall frost in the past statistical period. The average of the earliest date of the first fall frost at Chadegan station under the SSP585 emission scenario occurs one day later than the past statistical period, and in Khour and Biabank, the average of the latest date of the first fall frost under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur three, five and six days later than the past statistical period, respectively. Zoning the number of changes in the first fall frost in the future period under different emission scenarios compared to the past statistical period shows that the most increasing change in Khour and Biyabank under the SSP585 scenario occurs six days later, and the most decreasing change is related to Isfahan station under SSP126 scenario that it occurs eight days earlier.

For the last spring frost, Chadegan (Apr 21) and Ardestan (Feb 27) had the earliest and the latest date of the last spring frost in the past statistical period. The average of the latest date of the last spring frost at Chadegan station under the SSP126 emission scenario occurs one day later than the past statistical period. At Ardestan, under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585, it happens five, four, and three days later than the past statistical period, respectively. Zoning shows that changes in the date of the last spring frost in the future statistical period compared to the past statistical period in all three scenarios in Khansar, Natanz, and Ardestan stations are increasing, which means the last spring frost occurs later, and the changes in the Semirom, Daran and Fereydun Shahr are decreasing that means the last spring frosts occur earlier.

Temporal and spatial distribution of changes in the frost length period, number of frost days, and growing season length of the future period compared to the past period

The longest frost length period in the past statistical period was observed in Chadegan with 184 days and the shortest in Khour and Biyabank with 81 days. However, the expression of this period in terms of the number of days does not mean that frost occurs every day. In the future statistical period, under all emission scenarios, the length of the frost length period at Chadegan, Khour, and Biabank will decrease. Moreover, some changes in the length of the frost period under all emission scenarios throughout the province are observed. Zoning shows that, in red areas, most changes in the length of the frost period occur decreasingly, and in blue areas, the most changes occur incrementally.

The highest number of frost days is related to Chadegan with 149 days, and the lowest is related to Khour and Biyabank with 25 days. In the future statistical period, the number of frost days at all stations will decrease under all emission scenarios. Zoning shows that Changes in the number of frost days in all selected provincial stations are decreasing.

The most extended growing season length is related to Khour and Biyabank with 146 days, and the lowest is related to Chadegan with 91 days. In the future statistical period, under all emission scenarios, the longest growing season length is associated with Khour and Biabank, and the shortest is related to Chadegan, but the changes in the growing season length are increasing in all stations. Zoning shows that the most changes in the growing season length are related to Chadegan, which increases under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585 for 17, 18, and 21 days, respectively.

The effect of frost changes on the yield of agricultural products in the future

Spring does not start at the same time in different stations of the province, and the growth of some early flowering trees, such as almonds and apricots, starts earlier than the spring season, so it is essential to pay attention to the growth stages of plants that coincide with these frosts. Suppose the date of occurrence of the last spring frost in different stations in the future statistical period under all 3 diffusion scenarios coincides with the critical stages of plant growth (flowering stage). In that case, there is a possibility that spring frosts and agricultural yields will be reduced. Due to changes in the date of the first fall frost and the last spring frost, the length of the growing season varies at different stations; therefore, choosing the proper planting time and cultivars resistant to cold and frost is essential in the production efficiency of agricultural products.

Conclusion

Every year, early fall and late spring frost, due to the coincidence with the critical stages of plant life, reduces agricultural product yield. In the past statistical period, the average date of occurrence of the first fall frost is related to Chadegan, Daran, Fereydunshahr, and Shahreza, and the average of the last spring frost in Khour and Biabank, and Ardestan occur earlier than other stations. In the future statistical period, the date of occurrence of the first fall frost and the last spring frost under all emission scenarios are the same as in the past statistical period. In addition, increasing and decreasing changes were observed in the date of the first fall frost and the last spring frost in the future statistical period compared to the past. The average of the earliest date of the first fall frost at Chadegan station under the SSP585 emission scenario occurs one day later than the past statistical period, and in Khour and Biabank, the average of the latest date of the first fall frost under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur three, five and six days later than the past statistical period, respectively. The average of the latest date of the last spring frost at Chadegan station under the SSP126 emission scenario occurs one day later than the past statistical period. Moreover, in Ardestan, under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur five, four, and three days later than in the past statistical period, respectively. By knowing the date of the last spring frost, it is possible to determine the planting date of many crops, and planting time should be chosen so that the critical stages of plant growth are not exposed to spring frost. Also, changes in frost length period, number of frost days, and growing season length were observed in the future statistical period compared to the past statistical period throughout the Isfahan province. The most prolonged frost length period in the past statistical period was observed in Chadegan with 184 days and the shortest in Khour and Biyabank with 81 days. The highest number of frost days is related to Chadegan with 149 days, and the lowest is related to Khour and Biyabank with 25 days. In the future statistical period, the number of frost days at all stations will decrease under all emission scenarios. The longest growing season is related to Khour and Biyabank with 146 days, and the lowest is related to Chadegan with 91 days. In the future statistical period, under all emission scenarios, the longest growing season length is associated with Khour and Biabank, and the shortest is related to Chadegan, but the changes in the growing season length are increasing in all stations. The most changes in the growing season length are related to Chadegan, which increases under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585 for 17, 18, and 21 days, respectively.

Acknowledgment

The author gratefully thanks the Isfahan University of Technology and the Iran Meteorological Organization for providing the necessary facilities and data for this study.

References

1- Esmaeili, R., Gandomkar, A. and Ghayoor, H. A., 2011. Zoning of climate changes rate base on agriculture approach in future climatic period (case study Khorasan Razavi province). *Journal of Geography and Environmental Planning, 41*(1), pp. 35-52. (In Persian).

2- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *Cambridge University Press, Cambridge*, UK.

3- Xiao, L., Liu, L., Asseng, S., Xia, Y., Tang, L., Liu, B., Cao, W. and Zhu, Y., 2018. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *260*, pp. 154-164.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۳۷-۲۱

بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع یخبندان‌ها در استان اصفهان با استفاده از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم

الهام مظاهری[۱]، جهانگیر عابدی کوپایی[۲*]، منوچهر حیدرپور[۳]، محمد جواد زارعیان[۴] و سید علیرضا گوهری[۵]

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، koupai@cc.iut.ac.ir.

۳ - استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۴ - استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

۵ - دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

چکیده

همه ساله وقوع یخبندان زودرس پاییزه و دیررس بهاره به‌دلیل هم‌زمانی با مراحل حساس زندگی گیاه باعث کاهش بازده محصولات کشاورزی می‌شود. در این تحقیق از داده‌های دمای کمینه دوره گذشته و داده‌های ریز مقیاس شده خروجی مدل‌های گردش عمومی جو توسط نرم‌افزار LARS-WG6 برای دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سه سناریو انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 استان اصفهان استفاده گردید. نتایج نشان داد میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه در ایستگاه‌های اردستان، خور و بیابانک و نطنز در دوره آینده تحت سه سناریو انتشار نسبت به دوره گذشته یک تا شش روز دیرتر اتفاق می‌افتد و میانگین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره در ایستگاه اردستان در دوره آینده تحت سه سناریو انتشار نسبت به دوره گذشته به‌ترتیب پنج، چهار و سه روز دیرتر رخ می‌دهد. با توجه به تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریو SSP585، ۲۱ روز نسبت به دوره گذشته افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات کاهشی طول دوره یخبندان در ایستگاه خور و بیابانک تحت سناریو SSP585 اتفاق می‌افتد و بیشترین تغییرات کاهشی تعداد روزهای یخبندان در ایستگاه چادگان تحت سناریو انتشار SSP585، ۲۶روز می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دمای کمینه، سناریوهای انتشار، مدل‌های گردش عمومی جو، LARS-WG.

مقدمه

حوادث آب و هوایی شدید و بلایای کشاورزی در دهه‌های گذشته افزایش یافته است. یخبندان یکی از وقایع شدید است که با مدت زمان کوتاه یخبندان هوا مشخص می‌شود و برای رشد و تولید محصول مخرب است (Xiao et al., 2018). بررسی تغییرات پارامترهای یخبندان از جمله تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه، آخرین یخبندان بهاره، طول دوره رشد، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان طی دوره آینده به‌منظور ارائه برنامه‌ریزی صحیح برای کاشت محصولات و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای جلوگیری از وقوع یخبندان با مراحل حساس رشد گیاه مورد توجه می‌باشد. امروزه دست‌یابی به این مهم با بسط و توسعه مدل‌های اقلیمی فراهم شده است. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (General circulation models) می‌باشد (Esmaeili et al., 2011). در مورد یخبندان، پژوهش‌های مختلفی در جهان و ایران صورت گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر شماره روز اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره در ایران تحت دو سناریو انتشار A_2 و B_2 برای چشم‌انداز (۲۰۲۰-۲۰۳۹) نشان داد که میانگین شماره روز آخرین یخبندان بهاره در ایستگاه‌های کرمانشاه، گرگان و رشت کاهش و در ایستگاه‌های اصفهان و زاهدان بدون تفاوت و در سایر ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. میانگین شماره روز اولین یخبندان پاییزه در ایستگاه کرمانشاه افزایش، در ایستگاه رشت بدون تفاوت و در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش خواهد یافت (Behyar et al., 2013). در بررسی چشم‌انداز زمان وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره با استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A_2 و B_2 در غرب ایران مشخص شد که تاریخ یخبندان

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

پاییزه دیرتر و تاریخ یخبندان بهاره زودتر از گذشته روی می‌دهد (Agha Shariatmadari et al., 2016). Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند که برای شش ایستگاه انتخابی استان اصفهان در دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ میانگین شماره روز اولین یخبندان پاییزه براساس سناریوهای انتشار A_2، B_1 و A_1B افزایش خواهد یافت و میانگین شماره روز آخرین یخبندان بهاره در تمامی ایستگاه‌ها و همه سناریوها کاهش خواهد یافت. Rezaei Banafsheh Dargh et al. (2019) بیان کردند براساس برونداد مدل HadCM3 تحت سناریوهای A_2 و B_1 در شمال شرق کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی یخبندان‌های زودرس پاییزه یک الی دو هفته دیرتر شروع می‌شوند و یخبندان‌های دیررس بهاره نیز بین نه تا ۱۸ روز زودتر به پایان می‌رسند. Imani pour et al. (2019) با مقایسه نتایج در دوره پایه و آینده براساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه همدید گرگان بیان کردند که تعداد روزهای یخبندان در دوره پایه ۷۵ روز و سناریوهای خوشبینانه، حد واسط و بدبینانه به‌ترتیب ۴۶، ۳۹ و ۳۱ است که کاهش تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره پایه مشهود است. همچنین نتایج این مقایسه حاکی از کاهش طول دوره یخبندان و افزایش طول دوره رشد می‌باشد. Jafar begloo et al. (2018) بیان کردند برای ۲۱ ایستگاه در شمال غرب ایران با استفاده از مدل HadCM3 و تحت سناریوهای A_2 و B_1 طول دوره سرما و یخبندان در ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد که میزان کاهش در ایستگاه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در پژوهشی با بررسی تغییرات شاخص‌های یخبندان دوره‌ی (۱۹۸۰-۲۰۱۰) منطقه دریاچه‌های پنجگانه ایالات متحده، روند منفی آخرین یخبندان بهاره و مثبت اولین یخبندان پاییزه که منجر به افزایش طول دوره رشد می‌گردد مشاهده گردید (Yu et al., 2014). در پژوهشی توسط Qian et al. (2012) مشخص گردید زمان وقوع یخبندان‌های دیررس بهاره و زودرس پاییزه در کانادا در طول قرن بیستم به سمت فصل زمستان جابه‌جا شده‌اند. گزارش Zhang et al. (2014) نشان می‌دهد که تاریخ رخداد نخستین یخبندان پاییزه در فلات تبت در بازه زمانی (۱۹۶۰-۲۰۱۰) ۱/۵ روز در هر دهه به تعویق افتاده است و واپسین یخبندان بهاره ۱/۹ روز در هر دهه زودتر رخ می‌دهد. در پژوهشی توسط Seyyed Nezhad Golkhatmi et al. (2017) با بررسی روزهای یخبندان ایستگاه‌های همدید خراسان رضوی مشخص گردید اولین یخبندان در دوره بازگشت دو ساله در تمام ایستگاه‌ها زودتر از آبان رخ نمی‌دهد و همچنین در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نیز هیچگاه زودتر از اول مهر رخ نمی‌دهد. در پژوهشی در لهستان مشخص شد که تاریخ رخداد یخبندان‌های دیررس بهاره، در اثر گرمایش جهانی در آینده، تغییر یافته و زمان وقوع آن‌ها جلوتر می‌افتد (Graczyk and Kundzewicz, 2016). در پژوهشی توسط Modala et al. (2017) با بررسی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو (GCM) برای دشت‌های منطقه تگزاس، مشخص گردید که تا سال ۲۰۷۰ روزهای یخبندان ۱۷/۹ تا ۳۰ درصد در کل منطقه کاهش می‌یابد. در پژوهش دیگری با پیش‌بینی تغییر اقلیم در اسپانیا، اثر یخبندان-های دیررس بهاره را بر روی فنولوژی گلدهی درختان بررسی کردند که نتایج حاصل، افزایش دمای کمینه در تمام ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه را نسبت به دوره پایه نشان داد (Hidalgo Galvez et al., 2018). در پژوهشی توسط Sobhani et al. (2017) با بررسی تاریخ آغاز و پایان یخبندان‌هادر استان اردبیل در دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ مشخص گردید که در مناطق شمالی استان تاریخ خاتمه یخبندان دیررس در فروردین و در مرکز و جنوب مانند خلخال در ماه اردیبهشت پایان می‌یابد.

استان اصفهان به‌عنوان یکی از مناطق عمده تولید محصولات کشاورزی در سطح کشور، هر ساله خسارات زیادی بر اثر وقوع یخبندان متحمل شده است. بادام از مرحلهٔ تمام گل تا رسیدن میوه شش الی هشت ماه زمان نیاز دارد و رشد آن از اواخر اسفند شروع می‌شود و تا اواسط آبان ماه به طول می‌انجامد. با توجه به اینکه درخت بادام زمانی که میانگین دمای روزانه به بالای ۵ درجهٔ سانتی‌گراد برسد فعالیت خود را شروع می‌کند و بازشدن شکوفه به-طور طبیعی در اوایل فروردین ماه باید انجام پذیرد که این امر موجب می‌شود که محصول از سرماهای اوایل فروردین در امان بماند، اما اگر در طول زمستان هوا گرم باشد، موجب بازشدن زودتر از موعد شکوفه‌های بادام می‌شود و این شرایط موجب تأثیر سرماهای اوایل فروردین ماه در تولید بادام در شهرستان نجف آباد می‌شود (Nasr isfahani and Yazdan panah,2019).

در حوضه زاینده رود در فصل بهار یخبندان ضعیف، متوسط و شدید در حوضه زاینده رود رخ می‌دهد، به‌طوری که یخبندان ضعیف در تمامی ایستگاه‌ها و تا اواخر فروردین اتفاق می‌افتد، اما مناطق مرتفع شمال و شمال‌غرب حوضه در نیمه دوم اردیبهشت نیز یخبندان ضعیف را تجربه می‌کنند (Omidvar and Aslani, 2014). Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند برای دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ میانگین شماره روز وقوع اولین یخبندان پاییزه تحت سناریوهای انتشار A_2، B_1 و A_1B در مقایسه با اقلیم گذشته، در ایستگاه اصفهان دو تا پنج روز افزایش و برای میانگین شماره روز وقوع آخرین یخبندان بهاره، بین دو تا چهار روز کاهش مشاهده می‌شود. همچنین در این ایستگاه طول دوره یخبندان به‌طور میانگین برای ایستگاه اصفهان در مقایسه با اقلیم گذشته تحت سناریوهای انتشار ترتیب به میزان ۱۰، هفت و نه روز کاهش می‌یابد.

با دگرگونی و تحولات کوچک و بزرگ اقلیمی انتظار می‌رود یخبندان‌های دوره آینده نسبت به دوره گذشته دچار تغییراتی شوند. بررسی و شناخت دقیق این یخبندان‌ها در برنامه‌ریزی‌های محیطی به‌دلیل آسیب کمتر به محصولات کشاورزی ضروری است. از آنجایی که تمامی مطالعه‌های انجام شده در مورد تغییر اقلیم و یخبندان‌ها برای مدل‌های گزارش پنجم (Coupled model intercomparioson project 5) و قبل از آن انجام شده است،

با توجه به رفع برخی نواقص مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) در مدل‌های گزارش ششم (Coupled model intercomparioson project 6)، کاربرد مدل‌های این گزارش به منظور بررسی تغییرات یخبندان‌ها در دوره آینده نسبت به دوره گذشته ضروری می‌باشد که از جنبه‌های جدید بودن این مطالعه می‌باشد. مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) با مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) به دلیل نسل جدید مدل‌های آب و هوایی و سال شروع جدید (۲۰۱۵ برای گزارش ششم (CMIP6) در مقابل ۲۰۰۶ برای گزارش پنجم (CMIP5)) برای سناریوهای آینده و همچنین مجموعه جدیدی از مشخصات برای سناریوهای غلظت، انتشار و استفاده از زمین متفاوت است (Almazroui et al., 2020).

بنابراین با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی، رتبه‌بندی و بررسی تغییرات یخبندان‌ها با استفاده از مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) انجام نگرفته است، هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای یخبندان (اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، طول دوره رشد، طول دوره یخبندان و تعداد روزهای یخبندان) دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۱) براساس مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سه سناریو انتشار Shared socio-economic pathway126، SSP245 و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در استان اصفهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق محدوده مطالعاتی استان اصفهان می‌باشد. در این تحقیق داده‌های مورد بررسی به دو دوره آماری گذشته (۲۰۱۷-۱۹۸۸) و داده‌های ریز مقیاس شده ۱۰ مدل از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245و SSP585 برای گزارش ششم تغییر اقلیم تقسیم می‌شوند (Almazroui et al., 2020; Gu et al., 2014). داده های دوره آماری گذشته از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای گزارش ششم از سایت مربوطه (https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6) دریافت گردید. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک و مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو مورد استفاده در این تحقیق به‌ترتیب در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. در گام نخست داده‌های ماهانه دمای کمینه مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای دوره پایه ایستگاه‌ها و دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) جمع‌آوری گردید. از آنجا که فایل‌های دانلود شده مدل‌ها با پسوند nc می‌باشند، به منظور استخراج پارامترهای هواشناسی دمای کمینه لازم است اطلاعات این فایل‌ها استخراج گردند. این کار با برنامه Arc GIS مقدور می‌باشد. به‌منظور تجزیه و تحلیل عدم قطعیت از روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دمای کمینه برای وزن‌دهی به نقاط انجام استفاده گردید. در این روش مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) براساس مقدار انحراف میانگین دمای کمینه شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند. در نهایت برای تمامی ایستگاه‌ها از ترکیب وزن به‌دست آمده برای هر مدل و اختلاف داده‌های هر سناریو از مقدار پایه آن، داده‌های ریز مقیاس شده خروجی برای هر ایستگاه توسط مدل LARS-WG6 به‌دست آمد. با استفاده از رابطه (۱) تا (۴) محاسبات انجام شده است.

LARS-WG یک مدل تصادفی است که از توزیع نیمه تجربی برای تولید داده‌های آب و هوایی به‌وسیله روش‌های ریزمقیاس گردانی آماری استفاده می‌کند و توانایی زیادی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد.

$$TE_m^{G_i} = \left| \left(\overline{T}_m^B\right)_{Gi} - \left(\overline{T}_m^B\right)_O \right| \quad (۱)$$

$$WT_m^{G_i} = \frac{1}{\frac{TE_m^{Gi}}{\sum_{i=1}^{10}(TE_m^{Gi})}} \quad (۲)$$

$$\Delta T_{mS_j} = \left| (\overline{T}_m^B)_{GiSj} - (\overline{T}_m^F)_{GiSj} \right| \quad (۳)$$

$$SSP_{mS_j} = \frac{\Delta T_{mSj} \times WT_m^{G_iS_j}}{WT_m^{G_i}} \quad (۴)$$

در این روابط:

$TE_m^{G_i}$: خطای مطلق مدل‌های GCM پارامتر دما

$\overline{T}$: میانگین دما

اندیس G: مدل‌های GCM

اندیس B: داده‌های مدل‌های GCM دوره پایه

اندیس O: داده‌های دوره گذشته ایستگاه‌ها

اندیس i: شمارنده مدل‌های GCM

اندیس m: ماه سال

$WT_m^{G_i}$: وزن مدل‌ها

اندیس S: سناریوهای انتشار

اندیس j: شمارنده سناریوها

ΔT_{mS_j}: اختلاف مقادیر دما بین دوره پایه و آینده مدل‌های GCM تحت سناریوهای مختلف

SSP_{mS_j}: سناریوهای تولید شده به منظور تولید داده‌های کمینه با LARS-WG

پس از آماده سازی داده‌های دمای کمینه دوره گذشته و آینده، برای استخراج پارامترهای یخبندان به این صورت عمل می‌کنیم که از روز اول شهریور ماه شروع به کنترل دمای کمینه می‌کنیم و اولین روزی که دمای کمینه معادل آستانه مورد نظر باشد به‌عنوان اولین یخبندان در نظر گرفته می‌شود و برای آخرین روز یخبندان نیز به‌همین ترتیب عمل می‌کنیم و سپس تاریخ‌ها به صورت ژولیوسی تنظیم می‌گردند. در این مطالعه بر اساس توصیه سازمان هواشناسی جهانی WMO (2011) دماهای صفر درجه و پایین‌تر مبنای محاسبات قرار گرفت

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

(Rezaei Banafsheh Dargh et al., 2019). طول دوره یخبندان فاصله زمانی بین اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره می‌باشد. طول فصل رشد ، فاصله بین اولین دوره بعد از دهم تیرماه که حداقل شش روز متوالی دمای میانگین روزانه هوا بیشتر از پنج درجه سلسیوس باشد تا اولین دوره شش روز با دمای میانگین روزانه کمتر از پنج درجه سلسیوس است و آن را بر حسب روز نشان می‌دهند. تعداد روزهای یخبندان نیز به‌صورت روزهای یخبندان با دمای صفر درجه سانتی‌گراد و کمتر از آن تعریف می‌شود (Esmaeili et al., 2011). محاسبات مربوط به تعیین پارامتر-های یخبندان در نرم افزار اکسل انجام شده است. نقشه‌های پهنه-بندی تغییرات پارامترهای یخبندان (اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، طول دوره رشد، طول دوره یخبندان و تعداد روزهای یخبندان) با روش وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse distance weighting) در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10.8 ترسیم شده‌اند. مراحل انجام تحقیق به صورت خلاصه در شکل (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Table 1- Details of meteorological stations

Row	Name of station	Longitude	Latitude	Elevation(m)
1	Khour va Biabanak	55°02′	33°47′	845
2	Naein	53°05′	32°51′	1549
3	Isfahan	51°41′	33°01′	1550.4
4	Ardestan	52°23′	33°23′	1252.4
5	Natanz	51°54′	33°32′	1684.9
6	Kashan	51°27′	31°58′	982.3
7	Najafabad	51°22′	32°38′	1641
8	Shahreza	51°50′	31°59′	1845.2
9	Semirom	51°42′	31°09′	2274
10	Chadegan	50°38′	32°46′	2100
11	Daran	50°22′	32°38′	2290
12	Fereydun Shahr	50°06′	32°56′	2490
13	Khansar	50°19′	33°14′	2300

جدول۲- مدل‌های گردش عمومی جو گزارش ششم تغییر اقلیم

Table 2- List of CMIP6 models used in this study

Row	Model	Country	Horizontal Resolution (in degrees)
1	BCC-CSM2-MR	China	1.12° × .12°
2	CESM2	USA	1.25° × 0.94°
3	CNRM-CM6-1	France	1.4° × 1.4°
4	CanESM5	Canada	2.81° × 2.78°
5	MIROC6	Japan	1.4° × 1.4°
6	MRI-EMS2-0	Japan	1.12° × 1.12°
7	IPSL-CM6A-LR	France	2.5° × 1.26°
8	GISS-E2-1-G	USA	2.5° × 2°
9	HadGEM3-GC31-LL	UK	1.88° × 1.25°
10	NESM3	China	1° × 1.3°

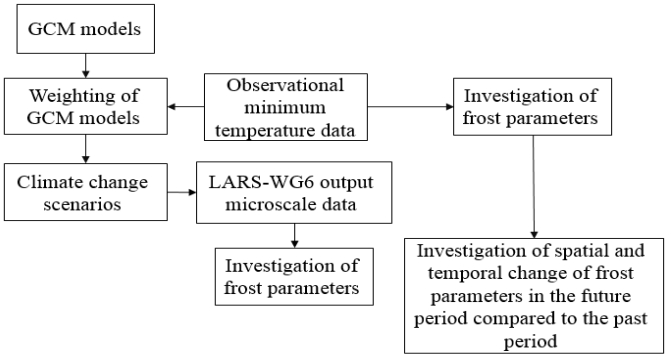


Fig. 1- Flowchart of study

شکل۱- فلوچارت انجام تحقیق

نتایج و بحث

توزیع زمانی و مکانی تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره دوره آینده نسبت به دوره گذشته

نتایج حاصل از تغییرات زمانی اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. باتوجه به جدول (۳) به‌طور میانگین ایستگاه چادگان زودترین (۲۸ مهر) و ایستگاه خور و بیابانک (۱۶ آذر) دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه را در دوره آماری گذشته داشته‌اند. میانگین زودترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه در ایستگاه چادگان تحت سناریو انتشار SSP585، یک روز دیرتر (۲۹ مهر) نسبت به دوره آماری گذشته رخ می‌دهد و در ایستگاه خور و بیابانک میانگین دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب سه، پنج و شش روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهند. اولین یخبندان زودرس پاییزه کم و بیش از وضعیت توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند،

به‌طوری که یخبندان در نواحی غربی استان زودتر آغاز می‌شود و نواحی شرقی استان دیرتر از سایر مناطق اولین یخبندان زودرس پاییزه را تجربه می‌کنند.

پهنه‌بندی میزان تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) تغییرات در ایستگاه‌های مختلف و تحت سناریوهای مختلف متفاوت است به‌طوری که در هر سناریو، بیشترین تغییرات افزایشی در مناطق آبی رنگ و بیشترین تغییرات کاهشی در مناطق قرمز رنگ رخ داده است. بیشترین تغییر افزایشی در ایستگاه خور و بیابانک تحت سناریو SSP585 یعنی شش روز دیرتر اتفاق می‌افتد و بیشترین تغییر کاهشی مربوط به ایستگاه اصفهان تحت سناریو SSP126 می‌باشد یعنی هشت روز زودتر اتفاق می‌افتد.

تغییرات زمانی آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۴)، میانگین تاریخ آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته در ایستگاه اردستان (نهم اسفند) زودتر از بقیه ایستگاه‌ها و دیرترین آن در چادگان (دوم اردیبهشت) رخ داده است. آخرین مناطقی که در آن‌ها یخبندان خاتمه می‌یابد ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی استان می‌باشد که تا دو اردیبهشت ادامه می‌یابد و نواحی شرقی و بخشی از نواحی مرکزی استان نیز اولین مناطقی هستند که یخبندان در آن‌ها خاتمه می‌یابد. در دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سناریو انتشار SSP126، میانگین دیرترین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته در چادگان رخ می‌دهد و در ایستگاه اردستان تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب پنج، چها و سه روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهد.

پهنه‌بندی میزان تغییرات آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۳) تغییرات تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته در هر سه سناریو در ایستگاه‌های خوانسار، نطنز و اردستان افزایشی به این معنا که آخرین یخبندان دیررس بهاره دیرتر اتفاق می‌افتد و در ایستگاه‌های سمیرم، داران و فریدونشهر کاهشی، به این معنا که آخرین یخبندان دیررس بهاره زودتر اتفاق می‌افتد، می‌باشد.

جدول۳- نتایج محاسبات میانگین اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف

Table 3- Results of calculations of the average of the first fall frost (FFF) in the past and future period under different scenarios

Station/ Scenario	Isfahan	Ardestan	Kashan	Shahreza	Chadegan	Khour Biabanak	Fereydun Shahr	Daran	Semirom	Naein	Najafabad	Natanz	Khansar
Past	19 Nov	3 Dec	1 Dec	7 Nov	19 Oct	6 Dec	7 Nov	5 Nov	16 Nov	20 Nov	20 Nov	26 Nov	10 Nov
SSP1-2.6	12 Nov	6 Dec	30 Nov	2 Nov	19 Oct	9 Dec	31 Oct	3 Nov	11 Nov	14 Nov	17 Nov	29 Nov	9 Nov
SSP2-4.5	14 Nov	5Dec	30 Nov	2 Nov	19 Oct	11 Dec	31 Oct	3 Nov	13 Nov	15 Nov	16 Nov	29 Nov	10 Nov
SSP5-8.5	15 Nov	8 Dec	2 Dec	3 Nov	20 Oct	12 Dec	2 Nov	5 Nov	14 Nov	16 Nov	18 Nov	30 Nov	10 Nov

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

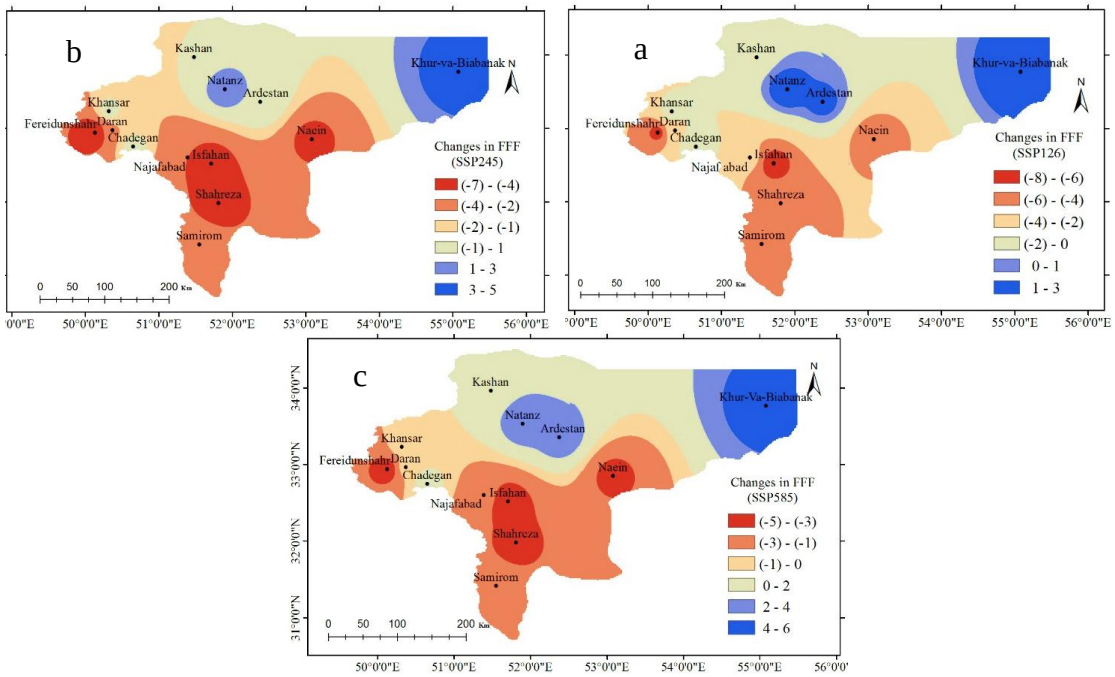


Fig. 2- Zoning of changes in the first fall frost (FFF) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period

شکل۲- پهنه‌بندی میزان تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته

جدول٤- نتایج محاسبات میانگین آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف

Table 4- Results of calculations of the average of the last spring frost (LSF) in the past and future period under different scenarios

Station/ Scenario	Isfahan	Ardestan	Kashan	Shahreza	Chadegan	Khour Biabanak	Fereydun Shahr	Daran	Semirom	Naein	Najafabad	Natanz	Khansar
Past	12 Mar	27 Feb	4 Mar	26 Mar	21 Apr	25 Feb	16 Apr	11 Apr	5 Apr	15 Mar	18 Mar	17 Mar	10 Apr
SSP1-2.6	15 Mar	4 Mar	4 Mar	25 Mar	22 Apr	25 Feb	14 Apr	6 Apr	31 Mar	16 Mar	17 Mar	22 Mar	16 Apr
SSP2-4.5	14 Mar	3 Mar	4 Mar	24 Mar	21 Apr	23 Feb	13 Apr	5 Apr	29 Mar	14 Mar	15 Mar	20 Mar	16 Apr
SSP5-8.5	13 Mar	2 Mar	2 Mar	24 Mar	21 Apr	23 Feb	13 Apr	4 Apr	29 Mar	14 Mar	15 Mar	20 Mar	15 Apr

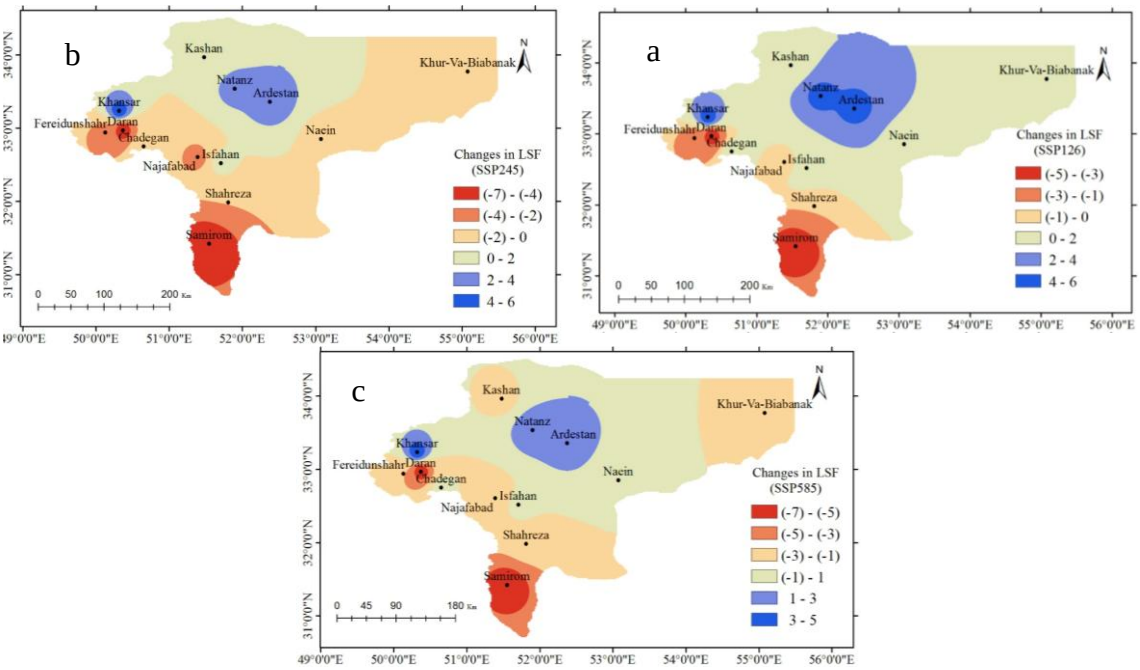


Fig. 3- Zoning of changes in the last spring frost (LSF) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period

شکل۳- پهنه‌بندی میزان تغییرات آخرین یخبندان دیررس بهاره دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته

نتایج مطالعه‌های گذشته نیز تأیید کننده جابه‌جایی زمان وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم است. Rezaei Banafsheh Dargh et al. (2019) بیان کردند در شمال شرق کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی یخبندان‌های زودرس پاییزه یک الی دو هفته دیرتر شروع می‌شوند و یخبندان‌های دیررس بهاره نیز بین نه تا ۱۸ روز زودتر به پایان می‌رسند.

توزیع زمانی و مکانی تغییرات طول دوره یخبندان، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره رشد دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته

تغییرات زمانی طول دوره یخبندان در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۵) ارائه شده است. براساس جدول (۵) طولانی‌ترین دوره یخبندان در دوره آماری گذشته در چادگان با ۱۸۴ روز و کوتاه‌ترین آن در خور و بیابانک با ۸۱ روز مشاهده گردید، البته بیان این دوره بر حسب تعداد روز، به این معنی نیست که یخبندان هر روز اتفاق می افتد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، طول دوره یخبندان در ایستگاه چادگان و خور و بیابانک کاهش می‌یابد. نوسانات طول دوره یخبندان در سراسر استان تحت هر سه سناریو تغییر اقلیم مشاهده می‌شود.

پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره یخبندان در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) در مناطق با رنگ قرمز بیشترین تغییرات طول دوره یخبندان، به صورت کاهشی رخ می‌دهد و در مناطق با رنگ آبی بیشترین تغییرات به صورت افزایشی می‌باشد. همچنین تحت هر سه سناریو ایستگاه خور و بیابانک بیشترین تغییرات کاهشی طول دوره یخبندان و ایستگاه اصفهان بیشترین تغییرات افزایشی طول دوره یخبندان را نشان داد. Jafar begloo et al. (2018) بیان کردند برای ۲۱ ایستگاه در شمال غرب ایران با استفاده از مدل HadCM3 و تحت سناریوهای A2 و B1 طول دوره سرما و یخبندان در ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد که میزان کاهش در ایستگاه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در پژوهشی توسط Ghorbani و Valizadeh (2014) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در کل ایران، طول دوره یخبندان تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده نسبت به دوره آماری گذشته کاهش خواهد یافت. Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند طول دوره یخبندان به‌طور میانگین برای ایستگاه اصفهان در مقایسه با میانگین طول دوره یخبندان برای اقلیم گذشته ایستگاه تحت سناریوهای انتشار A_2، B_1 و A_1B به‌ترتیب به میزان ۱۰ روز، هفت روز و نه روز کاهش می‌یابد.

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

جدول۵- نتایج محاسبات طول دوره یخبندان در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف

Table 5- Results of calculations of the average of the frost length (FL) in the past and future period under different scenarios

Station/ Scenario	Isfahan	Ardestan	Kashan	Shahreza	Chadegan	Khour Biabanak	Fereydun Shahr	Daran	Semirom	Naein	Najafabad	Natanz	Khansar
Past	113	85	93	139	184	81	160	157	140	115	118	111	151
SSP1-2.6	123	88	94	144	185	78	165	155	140	122	120	113	158
SSP2-4.5	120	87	93	142	183	75	164	153	136	118	119	111	157
SSP5-8.5	118	84	90	142	183	73	161	150	135	118	117	110	156

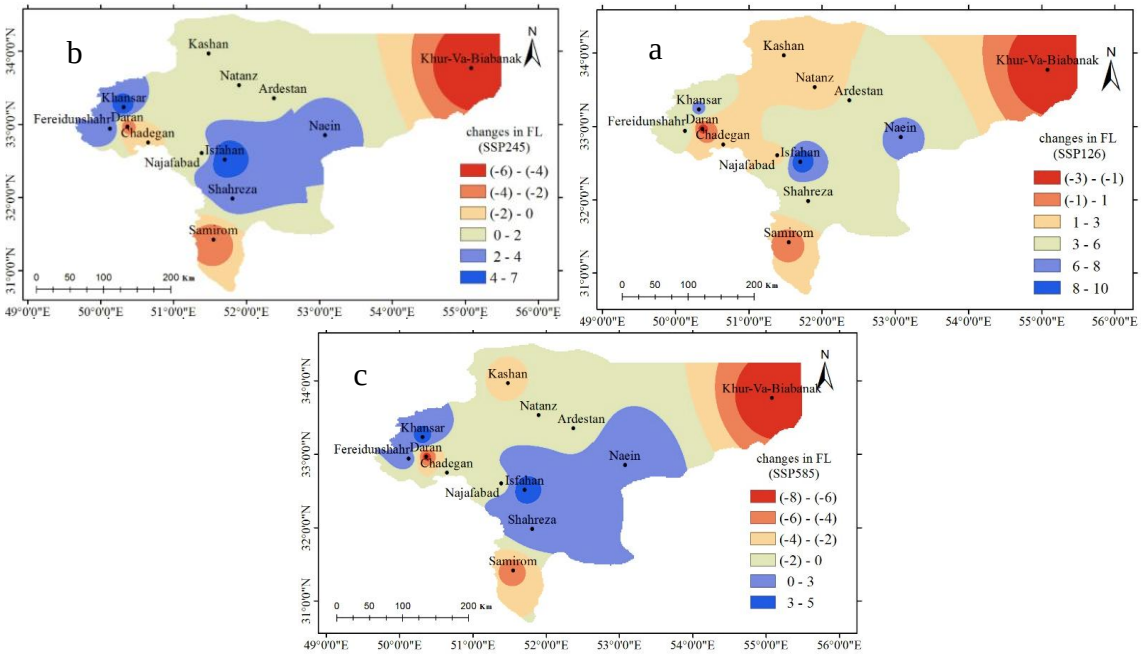


Fig. 4- Zoning of changes in the frost length (FL) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period

شکل٤- پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره یخبندان دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته

با توجه به تغییرات زمانی تعداد روزهای یخبندان در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت سناریوهای انتشار که در جدول (۶) ارائه شده است، بیشترین تعداد روزهای یخبندان مربوط به چادگان با ۱۴۹ روز و کمترین آن مربوط به خور و بیابانک با ۲۵ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. پهنه‌بندی میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده تحت هر سه سناریو انتشار نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) تغییرات تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها در سطح استان کاهشی می‌باشد. بیشترین تغییرات کاهشی مربوط به ایستگاه چادگان که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۲۲، ۲۴ و ۲۶ روز کاهش می‌یابد.

Imani pour et al. (2019) با مقایسه نتایج در دوره پایه و آینده براساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه همدید گرگان بیان کردند که تعداد روزهای یخبندان در دوره پایه ۷۵ روز و سناریوهای خوشبینانه، حد واسط و بدبینانه به‌ترتیب ۴۶، ۳۹ و ۳۱ است که کاهش تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره پایه مشهود است. همچنین نتایج این مقایسه حاکی از کاهش طول دوره یخبندان و افزایش طول دوره رشد می‌باشد.

Esmaeili et al. (2011) بیان کردند میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته در استان خراسان رضوی روندی کاهشی داشته، و به‌طور متوسط ۱۴ روز در سطح استان کاهش خواهد یافت.

جدول٦- نتایج محاسبات میانگین تعداد روزها ی یخبندان در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف

Table 6- Results of calculations of the average number of frost days (FD) in the past and future period under different scenarios

Station/ Scenario	Isfahan	Ardestan	Kashan	Shahreza	Chadegan	Khour Biabanak	Fereydun Shahr	Daran	Semirom	Naein	Najafabad	Natanz	Khansar
Past	68	32	39	85	149	25	128	118	91	60	73	56	104
SSP1-2.6	59	24	26	72	127	15	109	101	77	50	62	41	88
SSP2-4.5	58	25	25	71	125	16	109	101	75	49	60	40	88
SSP5-8.5	56	23	23	69	123	15	105	97	73	46	57	38	86

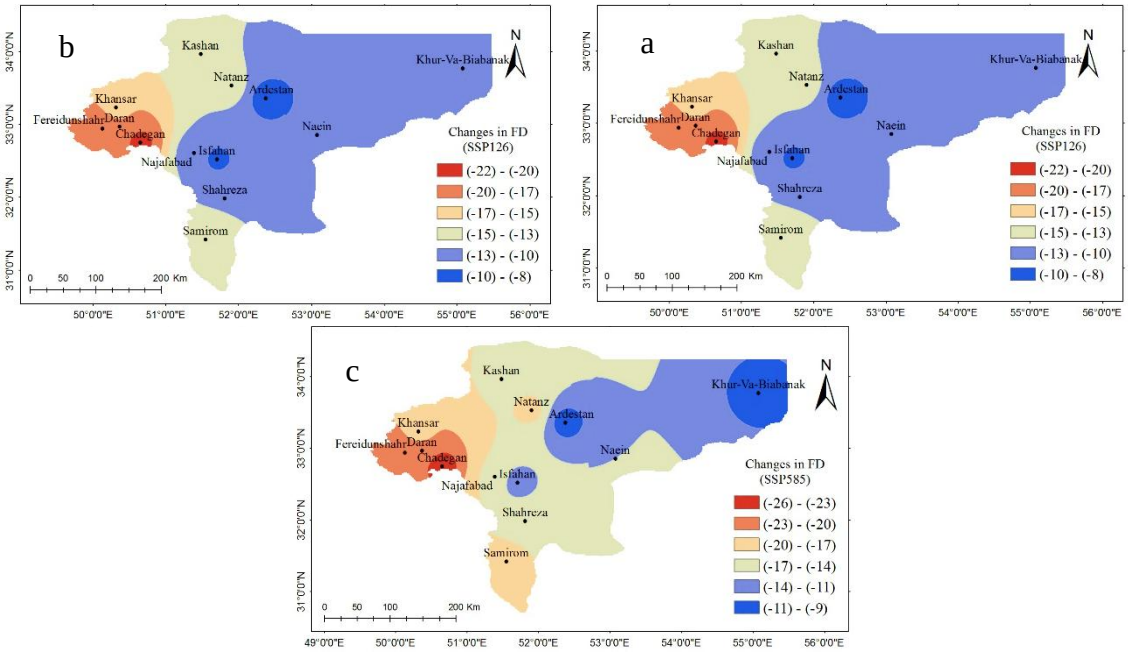


Fig. 5- Zoning of changes in the number of Frost days (FD) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period

شکل۵- پهنه‌بندی میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته

جدول۷- نتایج محاسبات میانگین طول دوره رشد (روز) در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف

Table 7- Results of calculations of the average of growing season length (GSL) in the past and future period under different scenarios

Station/ Scenario	Isfahan	Ardestan	Kashan	Shahreza	Chadegan	Khour Biabanak	Fereydun Shahr	Daran	Semirom	Naein	Najafabad	Natanz	Khansar
Past	128	141	139	116	91	146	108	108	128	132	127	136	118
SSP1-2.6	133	157	150	125	108	159	120	121	130	142	138	155	127
SSP2-4.5	135	156	151	128	109	159	121	122	133	147	138	156	128
SSP5-8.5	137	157	152	128	112	160	122	123	133	148	140	158	128

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

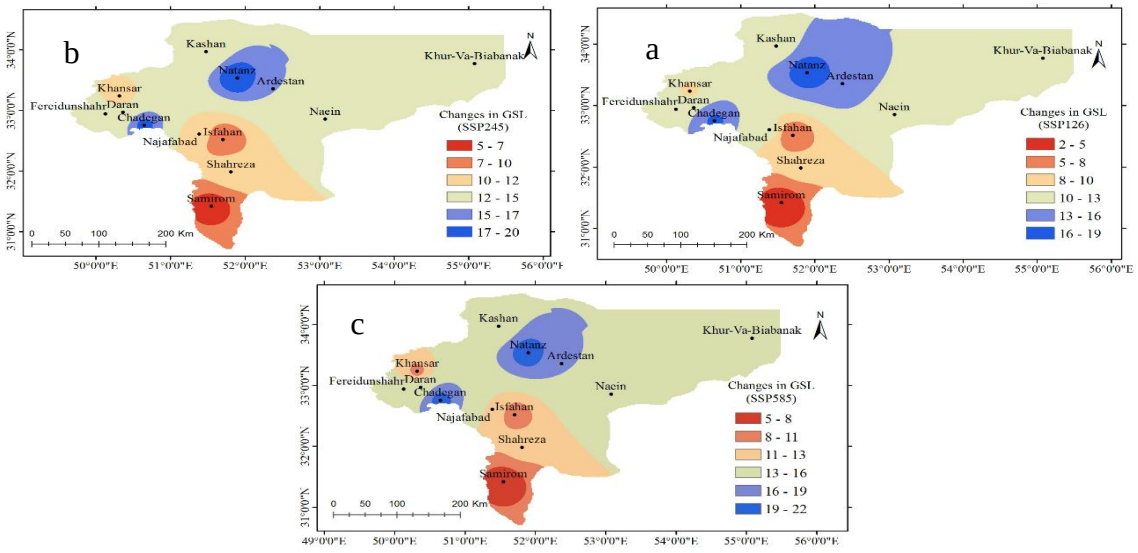


Fig. 6- Zoning of changes in the growing season length (GSL) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period

شکل٦- پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره رشد دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته

با توجه به تغییرات زمانی طول دوره رشد در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی که در جدول (۷) ارائه شده است، بیشترین طول دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک با ۱۴۶ روز و کمترین آن مربوط به ایستگاه چادگان با ۹۱ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده نیز تحت هر سه سناریو طولانی‌ترین دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک و کوتاه‌ترین آن مربوط به چادگان است، اما تغییرات طول فصل رشد در همه ایستگاه‌ها افزایشی می‌باشد . پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره رشد در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245 وSSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل (۶) بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۱۷، ۱۸ و ۲۱ روز افزایش می‌یابد. Kheirandish et al. (2014) بیان کردند طول دوره رشد در دوره آینده نسبت به دوره گذشته در ایستگاه‌های مشهد، تهران، اصفهان، رشت و زاهدان افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش Esmaeili et al. (2011) نشان داد میزان تغییرات طول دوره رشد در دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته در استان خراسان رضوی روندی افزایشی داشته و به‌طور متوسط ۱۷ روز در سطح استان افزایش خواهد یافت.

تأثیر تغییرات یخبندان‌ها بر عملکرد محصولات کشاورزی در دوره آینده

فصل بهار در ایستگاه‌های مختلف استان به‌طور هم‌زمان شروع نمی‌شود و رشد برخی از درختان زودگلده نظیر بادام و زردآلو زودتر از فصل بهار شروع می‌شود، بنابراین توجه به مراحل رشد گیاهان که هم‌زمان با این یخبندان‌ها می‌باشد اهمیت دارد. دماهای بحرانی مراحل مختلف رشد محصولات باغی و تاریخ جوانه زنی و گلدهی آلو، آلبالو، زردآلو، گیلاس و بادام به‌ترتیب در جدول (۸) و جدول (۹) ارائه شده است (Aslani, 2009). با توجه به جدول (۸) و جدول (۹) در صورتی که تاریخ وقوع آخرین یخبندان‌های دیررس بهاره در ایستگاه‌های مختلف، در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، هم‌زمان با مراحل حساس رشد گیاه (مرحله گلدهی) باشد، احتمال وقوع یخبندان بهاره وجود دارد و میزان عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد. با توجه به جدول (۴) در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های اصفهان، اردستان، کاشان، خور و بیابانک، نایین و نجف‌آباد تاریخ وقوع آخرین یخبندان بهاره زودتر از بقیه ایستگاه‌ها می‌باشد و ممکن است باعث آسیب به درختان زودگلده مانند بادام و زردآلو گردد.

با توجه به تغییرات تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته، طول دوره رشد در ایستگاه‌های مختلف تغییر می‌کند، بنابراین انتخاب زمان کشت مناسب و ارقام مقاوم به سرما و یخبندان در بازده تولیدی محصولات کشاورزی اهمیت دارد. در مورد درختان زودگلده در ایستگاه‌هایی که یخبندان دیررس بهاره زودتر اتفاق می‌افتد، بایستی ارقام دیرگلده کاشت گردند. کاهش طول دوره یخبندان می‌تواند آثار مثبتی در جهت افزایش طول دوره رشد و بالا بردن راندمان تولید غلات داشته باشد، از طرف دیگر، این کاهش می‌تواند دارای آثاری منفی شامل عدم تأمین نیاز سرمایی درختان یا عدم کنترل و از بین بردن آفات زراعی نیز باشد. به‌طور کلی افزایش طول دوره رشد، کاهش تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان نتیجه منطقی از گرمایش جهانی است که منطبق بر نتایج به دست آمده از تحقیقاتی مشابه در سراسر دنیا است (Easterling et al., 2000).

جدول۸- مقاومت درختان خزان‌دار در برابر درجه حرارت پایین بر حسب درجه سانتی‌گراد

Table 8- Resistance of trees to low temperatures in °C

growing steps			
Small green fruit	Full bloom	Buds closed but colored	Trees
-1.7	-2 to -4	-3 to -5	Almond
-0.6	-0.6	-1	grape
-1.1	-1.1	-1	Walnut
-1.7	-2.2 to -2.8	-3.5 to -4.5	Apple
-0.6	-2.2	-4	Apricot
-1.1	-2.2	-2.2	Cherries
-1.1	-2.2	-2.5 to -3.3	pear

جدول ۹- جدول اطلاعات مربوط به چند نمونه از محصولات باغی استان

Table 9- Information about some horticultural products in the province

Maximum harvest time	Flower time	Date of bud swelling	City	Product
5 Jul	20 Apr to 20 May	20 Mar to19 Apr	Shahreza	Cherries
30 Jun	24 Apr	8 Apr	Najafabad	
10 Jul	29 Mar	9 Mar	Isfahan	
10 Jul	8 Apr	4 Mar	Najafabad	Plum
5 Aug	4 May	20 Apr	Fereydun Shahr	
30 Jun	20 Mar	14 Mar	Shahreza	
21 Jul	20 Mar	19 Mar	Shahreza	
5 Jul	24 Mar to 29 Mar	23 Feb to 4 Mar	Isfahan	Apricot
22 Aug	20-Apr	20 Mar to 3 Apr	Fereydun Shahr	
21 Jul	8 Apr	4 Mar to 19 Mar	Najafabad	

نتیجه گیری

همه ساله وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره به دلیل هم‌زمانی با مراحل حساس زندگی گیاه باعث ایجاد خسارت و کاهش بازده محصولات زراعی و باغی در مناطق مختلف جهان می‌گردد. در دوره آماری گذشته، میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه مربوط به ایستگاه‌های چادگان، داران، فریدون‌شهر و شهرضا می‌باشد و میانگین آخرین یخبندان دیررس بهاره در ایستگاه‌های خور و بیابانک و اردستان زودتر از بقیه ایستگاه‌ها اتفاق می‌افتد. در دوره آماری آینده نیز تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت هر سه سناریو انتشار مربوط به ایستگاه‌های ذکر شده می‌باشد و تغییرات افزایشی وکاهشی در تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره در سطح استان در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته مشاهده گردید. در ایستگاه چادگان میانگین زودترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریو انتشار SSP585 یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته و در ایستگاه خور و بیابانک میانگین دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب سه، پنج و شش روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهند. در ایستگاه چادگان میانگین دیرترین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت سناریو انتشار SSP126، یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته و در ایستگاه اردستان تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب پنج، چهار و سه روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهد. با دانستن تاریخ آخرین یخبندان دیررس بهاره نیز می‌توان تاریخ کاشت بسیاری از گیاهان زراعی و باغی را تعیین نمود. با توجه به اینکه دمای صفر درجه برای برخی از محصولات کشنده می‌باشد، باید زمان کاشت را طوری انتخاب نمود که مراحل حساس رشد گیاه با یخبندان بهاره مواجه نشود. تغییرات طول دوره یخبندان، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره رشد در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته در سراسر استان مشاهده گردید. طولانی‌ترین دوره یخبندان در دوره آماری گذشته در چادگان با ۱۸۴ روز و کوتاه‌ترین آن در خور و بیابانک با ۸۱ روز مشاهده گردید که در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، طول دوره یخبندان در ایستگاه چادگان و خور و بیابانک کاهش می‌یابد. بیشترین تعداد روزهای یخبندان مربوط به چادگان با ۱۴۹ روز و کمترین آن مربوط به خور و بیابانک با ۲۵ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین طول دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک با ۱۴۶ روز و کمترین آن مربوط به ایستگاه چادگان با ۹۱ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده نیز تحت هر سه سناریو طولانی‌ترین

DOI: 10.22055/jise.2022.39312.2005

دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک و کوتاه‌ترین آن مربوط به چادگان است. بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۱۷، ۱۸ و ۲۱ روز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی افزایش طول دوره رشد، کاهش تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان نتیجه منطقی از گرمایش جهانی است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در زمان کاشت محصولات زراعی و باغی به تاریخ وقوع یخبندان‌ها در هر منطقه توجه شود و ارقام مقاوم به سرما و همچنین دیرگلده در اولویت کشت قرار گیرند تا در مواجه با سرما و یخبندان دچار کاهش بازده محصولات کشاورزی نشوند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه صنعتی اصفهان و سازمان هواشناسی کشور به‌دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1-Abedi-Koupai, J., Rahimi, S. and Eslamian, S. S., 2021, Effects of climate change on the probability of occurrence of the first fall frost and the last spring frost (Case study: Isfahan). *Journal of Water and Soil Science*, *25* (3), pp.31-44. DOI: 10.47176/jwss.25.3.49822. (In Persian).

2- Agha Shariatmadari, Z., Baszrafshan, J. and Safaei, S.E., 2016. Projection of the early fall and late spring frosts under climate change condition with SDSM model in several selected stations in the mid-western Iran. *Journal of Agricultural Meteorology*, *4*(1), pp. 22-31. (In Persian).

3- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M.M. and Ismail, M., 2020. Projections of precipitation and temperature over the south Asia countries in CMIP6. *Earth System and Environment*, *4*, pp. 297–320.

4- Aslani, A., 2009. Analyzing of the Intensive Frosts of Zayandehroud Basin, Thesis, *Yazd University*, Iran. 170p. (in Persian).

5- Behyar, M. B., Kheyrandish, M., Zamanian, M. 2013. 'Investigation of climate change effects on early autumn chilling and late spring chilling in Iran using SDSM', *Journal of Climate Research*, 1392(15), pp. 117-128. (In Persian).

6- Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P., Karl, T., Kunkel, E. and Ambenje, P., 2000. Observed variability and trend in extreme climate events. *Bulletin of the American Meteorological Society*. *81* (3), pp. 417–425. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.

7- Esmaeili, R., Gandomkar, A. and Ghayoor, H. A., 2011. Zoning of climate changes rate base on agriculture approach in future climatic period (case study Khorasan Razavi province). *Journal of Geography and Environmental Planning*, *41*(1), pp. 35-52. (In Persian).

8- Ghorbani, Kh. and Valizadeh, A., 2014. Study of the date of the frosts and effective colds in agriculture affected by climate change (Case study: Mashhad, Tabriz and Qazvin). *Journal of Water and Soil Conservation*, *21*(4), pp. 197-214. DOR: 20.1001.1.23222069.1393.21.4.10.1. (In Persian).

9- Graczyk, D. and Kundzewicz, Z. W., 2016. Changes of temperature- related agro climatic indices in Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, pp. 401-410.

10- Gu, H., Yu, Z., Wang, J., Ju, Q., Yang, Ch. and Fan, Ch., 2014. Climate change hotspots identification in China through the CMIP5 global climate model ensemble. *Advances in Meteorology*, *963196*, pp. 1-10.

11- Hidalgo Galvez, M.D., Garcia Mozo, H., Oteros, J., Mestre, A., Botey, R. and Galan, C., 2018: Phonological behavior of early spring flowering trees in Spain in response to recent climate changes. *Theoretical and Applied Climatology*, *132* (1-2), pp. 263-273.

12- Imani pour, H., Kashki, A. R and Firooz yazdi, M., 2019. Detection of the first frost of autumn and the last frost of spring with the climate change approach at Gorgan synoptic station. *Journal of Agroecology*, *15*(3), pp. 49-58. DOI: 10.22034/AEJ.2019.672649. (In Persian).

13- Jafar begloo, N., Khorshid dust, A.M., Rezaei banafsheh, M., Rostam zadeh, D., 2018. Investigation of changes in the beginning and end of frost and effective colds in agriculture under climate change conditions in northwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, *5*(4), pp. 49–64. (in Persian).

14- Kheirandish, M., Ghahreman, N. and Bazrafshan, J., 2014. A study of the effects of climate change on length of growing season in several climatic regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *44*(2), pp. 143-150. (In Persian).

15- Modala, N.R., Ale, S., Goldberg, D.W., Olivares, M., Munster, C.L., Rajan, N. and Feagin, R.A., 2017. Climate change projections for the Texas high plains and rolling plains. *Theoretical and Applied Climatology*, *129*, pp. 263-280.

16- Nasr Isfahani, M. and Yazdan panah, H., 2019. Prediction of frost in almond orchards in Najafabad region. *Physical Geography Research Quarterly*, *51*(3), pp. 497-512. DOI: 10.22059/jphgr.2019.281346.1007380(In Persian).

17- Omidvar, K. and Aslani, A., 2014. Analyzing of the Intensive Frosts of Zayanderoud Basin. *Geographical Research Quarterly*, *29*(3), pp. 147-164. (In Persian).

18- Qian, B., Gameda, S., Zhang, X. and Jong, R.D., 2012. Changing growing season observed in Canada. *Climate Change*, *112*(2), pp. 339–353.

19- Rezaei Banafsheh Dargh, M., Jahanbakhsh Asl, S., Khorshid Dust, A.M. and Ali Mohammadi, M., 2019. Perspective of temporal and spatial changes in the occurrence of early fall and late spring frosts and colds in the northeast of the country. *Physical Geography Quarterly, 43*, pp.1-14. (In Persian).

20- Seyyed Nezhad Golkhatmi, N., Farzandi, M. and Pazhand, H.R., 2017. The occurrence of early autumn frost frequency analysis case study: Khorasan Razavi's synoptic stations. *Journal of Water and Soil*, *31*(1), pp. 312-320. (In Persian).

21- Sobhani, B., Ganji, M., and Goldust, A., 2017. Determining and evaluating the beginning and end dates of early and late frost and the probability of its duration, intensity and frequency in Ardabil province in the statistical period 1996 to 2010. *Physical Geography Research Quarterly, 1*, pp. 39-53. DOI: 10.22059/jphgr.2017.61578. (In Persian).

22- WMO, 2011. WMO statement on the status of the global climate in 2010. Word meteorological organization, Geneva.

23- Xiao, L., Liu, L., Asseng, S., Xia, Y., Tang, L., Liu, B., Cao, W. and Zhu, Y., 2018. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *260*, pp. 154-164. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.006.

24- Yu, L., Zhong, S., Bian, X., Heilman, W.E. and Andresen, J. A., 2014. Temporal and spatial variability of frost- free seasons in the Great lakes region of the United States. *Climatology*, *34* (13), pp. 3499-3514. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.3923

25- Zhang, D., Xu, W., Li, J., Cai, Z. and An, D., 2014. Frost free season lengthening and its potential cause in the Tibetan Plateau from 1960 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology, 115*, pp. 441-450.