

Synoptic Analysis of Atmospheric Circulation Patterns Influencing Late Spring Frost Events in Apple Orchards of Semirom Township, Iran

Mohammad Reza Namdari¹, Kamal Omidvar^{2*}, Rahele Kheirrolomour³

1.M.Sc. Graduate, Department of Geography, Faculty of Humanities, Yazd University, Yazd, Iran.

2.Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, Yazd University, Yazd, Iran.

3.Ph.D. Student, Department of Geography (Climatology), Faculty of Humanities, Yazd University, Yazd, Iran.

ARTICLE INFO

Research Paper

Article history:

Received: 22 April 2026

Accepted: 29 August 2026

Published online:

September 2026 01

Keywords: *Apple orchards; atmospheric circulation patterns; late spring frost; reanalysis data; Semirom Township.*



<https://www.srds.ir/?adsc=4192>

Abstract

Background and Objective: Late spring frost is one of the major compound climate-phenological hazards affecting apple orchards in the mountainous regions of Iran. Its damage primarily results from the coincidence of temperature decline with sensitive phenological stages, particularly flowering, and is not necessarily directly proportional to the absolute minimum temperature recorded at a weather station. Semirom Township, one of Iran's major apple-producing regions, is particularly susceptible to this phenomenon due to its elevation, topography, and spring temperature regime. This study aimed to analyze the synoptic atmospheric circulation patterns associated with late spring frost and to examine the events of 2002, 2006, and 2013 within the statistical framework of the 20-year period from 2002 to 2021.

Methodology: Daily minimum temperature data from the Semirom synoptic station were analyzed for the critical phenological window for apple trees, from 4 April to 27 April, during 2002–2021. To characterize the near-surface conditions during the three selected events (2002, 2006, and 2013), daily minimum, maximum, and mean temperatures, 24-hour precipitation, mean relative humidity, and mean wind speed were extracted from the same station for the synoptic window of 1–20 April. Synoptic analysis of the three events was conducted using NCEP/NCAR reanalysis data and GrADS version 2.1.

Results and Findings: Of the 480 days within the study window, 473 had valid observations. During this period, 62 days were classified as weak and 31 days as moderate frost events, while no days met the criteria for severe frost; thus, a total of 93 days experienced frost conditions. The lowest recorded temperature was -1.5°C , and no day with $T_{\min} \leq -2^{\circ}\text{C}$ was observed. The minimum temperatures during the 2002, 2006, and 2013 events were -1.0 , -0.4 , and -0.6°C , respectively; consequently, all three events were classified as moderate frost events. Nevertheless, the greater damage reported in 2013 was associated with the coincidence of cold conditions and flowering, which increased phenological vulnerability. Synoptic analysis of all three events indicated the intrusion of cold air from higher latitudes and the establishment of a mid-tropospheric trough. Moreover, the occurrence of precipitation concurrently with the coldest conditions in 2006 and 2013 was inconsistent with purely radiative cooling. The results indicate that frost damage severity in Semirom is not directly determined by station-based minimum temperature alone, but is influenced by the interaction between atmospheric conditions and crop phenological stage. Therefore, integrating long-term statistical assessment with synoptic analysis of representative frost events can provide a more appropriate basis for characterizing frost risk and developing early-warning systems for apple orchards in Semirom.

Citation. Namdari, M. R., Omidvar, K. and Kheirrolomour, R. (2027). Synoptic Analysis of Atmospheric Circulation Patterns Influencing Late Spring Frost Events in Apple Orchards of Semirom Township, Iran. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(4), 1-16.

URL: https://www.srds.ir/article_252104.html?lang=en



© The Author(s). Publisher: Private.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Late spring frost is a major climate–phenological hazard in cold and high-elevation horticultural regions, causing substantial economic losses, particularly in apple orchards (Karimi et al., 2021; Rai et al., 2015). Apple trees are especially vulnerable during bud swelling, flowering, and fruit set, and shifts in phenological timing can increase the overlap between sensitive stages and late spring cold events (Rodrigo, 2000). Therefore, frost damage is not necessarily proportional to the absolute minimum temperature but depends strongly on the coincidence between temperature decline and phenological sensitivity.

Recent warming has advanced spring phenology and increased the potential overlap between flowering and late spring frosts (Vitasse et al., 2018; Zhang et al., 2022). Semirom Township, a major apple-producing region of Iran, is particularly exposed because of its high elevation, mountainous topography, and spring temperature regime. Previous Iranian studies have mainly examined frost risk at national or regional scales, leaving limited information on the climatological characteristics and synoptic mechanisms of damaging frost events in Semirom. In particular, the relationship between atmospheric circulation, local meteorological conditions, and phenological vulnerability remains insufficiently characterized.

This study addresses this gap through a two-layer framework. First, daily minimum temperatures at the Semirom synoptic station were evaluated during the critical apple phenological window from 4 to 27 April over 2002–2021 and classified into weak, moderate, and severe frost categories. Second, three damaging events in 2002, 2006, and 2013, selected based on documented crop losses exceeding 30%, were analyzed using NCEP/NCAR reanalysis data. The analysis focused on sea-level pressure, 850- and 500-hPa geopotential height, temperature, vertical motion, and

surface meteorological conditions. The study particularly examined whether differences in damage were associated with synoptic forcing and phenological timing rather than simply lower station-recorded temperatures.

From a synoptic perspective, advective frost is generally associated with cold-air intrusion from higher latitudes and mid-tropospheric trough development, whereas radiative frost develops mainly under clear, calm, and stable conditions (Pfleiderer et al., 2019; Tomczyk et al., 2020). In mountainous regions, these mechanisms may interact with local topography and phenological conditions. Recent studies further indicate that warming does not necessarily eliminate frost risk because earlier flowering may increase exposure to the final spring frosts (Caspersen et al., 2025; Vitasse et al., 2018). Accordingly, distinguishing the atmospheric mechanisms underlying damaging events is essential for improving frost-risk assessment and early-warning systems in Semirom.

Methodology

This applied–analytical study used an event-based synoptic climatology approach to quantify frost intensity and distinguish the relative contributions of cold-air advection and radiative cooling during three damaging frost events in Semirom apple orchards (2002, 2006, and 2013). Thirty years of observations from the Semirom synoptic station were analyzed, with six neighboring stations used to assess the spatial extent and simultaneity of cold events. The station analysis focused on the apple flowering period (4–27 April).

NCEP/NCAR reanalysis data, including sea-level pressure, 850- and 500-hPa geopotential height, temperature, vertical velocity, and surface temperature, were analyzed for the peak day and two preceding days. Key indicators included T_{min} , ΔT_{24} , ΔT_{48} , 850-hPa temperature advection ($AdvT = -V_{850} \cdot \nabla T_{850}$), ω_{850} , ω_{500} , 10-m wind speed, and cloud

cover. Frost events were classified as advective when persistent cold-air advection and wind speeds $\geq 3 \text{ m s}^{-1}$ occurred beyond nighttime, radiative when weak advection, wind speeds $< 2 \text{ m s}^{-1}$, relatively clear skies, and nocturnal cooling dominated, and mixed when both mechanisms were evident. Synoptic fields were analyzed using GrADS 2.1. Yasuj radiosonde data were used only to assess free-atmosphere thermodynamic structure and upper-level winds, not as a direct representation of orchard conditions in Semirom.

Results and Discussion

The three selected late spring frost events (2002, 2006, and 2013) caused substantial production losses in Semirom apple orchards, with reported damage of 40%, 35%, and 70%, respectively. Because orchard area increased from 25,000 to 36,000 ha during the study period, total losses cannot be interpreted as a measure of damage intensity per unit area. Frost damage depends primarily on the interaction among minimum temperature, the duration of exposure below critical thresholds, and phenological sensitivity (Proebsting & Mills, 1978; Snyder & de Melo-Abreu, 2005). During the critical flowering window (4–27 April), the minimum temperatures recorded at Semirom were $-1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in 2002, $-0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in 2006, and $-0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in 2013. Thus, the greater damage in 2013 cannot be explained by a lower station-recorded minimum temperature alone.

The 2002 event was characterized by a rapid multi-day temperature decline. Minimum temperature decreased from $6.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ on 12 April to $-1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ on 15 April, while maximum temperature declined from 17.6 to $6.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The simultaneous reduction in both temperature components indicates a change in air mass rather than isolated nocturnal radiative cooling. At 500 hPa, a relatively deep trough extended across the Middle East and western Asia, with a closed low-pressure center over northern Iran and Central Asia. The resulting meridional flow favored cold-air advection toward Iran. The pronounced geopotential-height gradient further

supported enhanced geostrophic flow and transport of cold air from higher latitudes. Following the passage of the trough, reduced cloud cover and weaker winds likely enhanced nocturnal radiative cooling near the surface. Therefore, the 2002 event is best interpreted as a mixed advective–radiative frost, in which synoptic-scale cold-air advection established the cold background state and subsequent nighttime cooling intensified surface temperatures.

The 2006 event occurred on 19 April, when minimum temperature reached $-0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ following a short but pronounced temperature decline. A deep 500-hPa trough extended from the eastern Mediterranean toward the Middle East, supporting northerly flow and cold-air transport toward Iran and the Zagros Mountains. Positive omega over central areas indicated subsidence, which favored atmospheric stabilization and reduced cloudiness. The combination of upper-level cold-air intrusion, surface cooling, and relatively clear nighttime conditions suggests that the event involved both advective and radiative processes, with a predominantly advective component. The occurrence of precipitation around the broader event period also indicates that the cooling cannot be attributed exclusively to radiative processes.

The 2013 event was characterized by a rapid decline in temperature between 14 and 17 April. Maximum temperature decreased from 16.4 to $6.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, while minimum temperature reached $-0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, followed by rapid warming to approximately $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ by 20 April. Synoptically, the event was associated with the development of a mid-tropospheric trough and cold-air advection from higher latitudes, followed by increasing atmospheric stability and relatively clear skies. This sequence favored strong nocturnal surface cooling after the passage of the synoptic system. Accordingly, the event can be interpreted as a mixed advective–radiative frost, rather than a purely advective event. The relatively high reported damage (70%) was therefore more plausibly related to the coincidence of the cold event with the sensitive flowering stage than to an

exceptionally low absolute minimum temperature.

Overall, all three events were associated with the intrusion of cold air from higher latitudes and the passage or development of a mid-tropospheric trough, but the relative contribution of advection and nocturnal radiative cooling differed among events. A key finding is that the presence of a 500-hPa trough alone does not constitute evidence of surface frost; rather, cold-air advection behind the trough lowers the thermal background, while post-frontal subsidence, decreasing cloud cover, weaker winds, and reduced turbulent mixing can subsequently intensify nocturnal surface cooling. In Semirom's complex mountainous terrain, cold-air drainage toward valleys may further strengthen near-surface inversions and maintain low temperatures during critical flowering hours.

These findings demonstrate that frost damage in Semirom cannot be interpreted as a simple function of station-based minimum temperature. Instead, damage reflects the interaction of synoptic forcing, nocturnal surface cooling, local topography, and phenological timing. This interpretation is consistent with evidence that climate warming may maintain or increase spring frost risk by advancing phenological development and increasing the overlap between flowering and late frosts (Caspersen et al., 2025; Vitasse et al., 2018; Zhang et al., 2022). However, because surface energy balance and microscale turbulence were not explicitly modeled, the present results should be interpreted as a synoptic–surface diagnosis rather than a quantitative partitioning of energy fluxes.

Conclusion

In mountainous regions such as Semirom, late spring frost risk is greatest when cold-air advection is followed by atmospheric stabilization and clear-sky conditions after the passage of a mid-tropospheric trough. Weakening winds can suppress turbulent mixing, while enhanced nocturnal longwave radiative loss promotes near-surface cooling

and temperature inversion. The findings indicate that frost damage cannot be adequately explained by ranking events according to minimum temperature alone. Instead, the coincidence of temperature decline with the flowering stage provides a more consistent explanation of orchard vulnerability.

The identified synoptic patterns—including mid-tropospheric troughs, northerly cold-air advection, and post-frontal subsidence—may serve as qualitative precursors for early-warning systems, rather than as fixed quantitative thresholds. Several limitations should be considered. The coarse spatial resolution of NCEP/NCAR reanalysis cannot adequately resolve the complex valley and slope microclimates of Semirom, while radiosonde profiles, when available, do not fully represent the atmospheric column over individual orchards. Moreover, the 20-year record is relatively short for robust analysis of extreme events, and no significant trend in frost frequency during the flowering window was detected. Finally, because surface energy balance, heat fluxes, and horizontal temperature transport were not explicitly calculated, the relative contributions of advection and radiation cannot be expressed numerically and remain qualitative.

Declarations

Funding: There is no funding support.

Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

1. Abedini, M. and Pasban, A. (2026). 3. Assessment of Climatic and Geomorphological Factors in Military Base Site Selection Using Remote Sensing and

GIS: (Case Study of the Moghan Plain, Ardabil Province). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 28-43. (In Persian) https://www.srds.ir/article_219193.html?lang=en

2. Afshari, A. (2013). Geography of Semirom Township: The land of a thousand springs, the roof of Iran. Isfahan, Iran: Moazzami Publications. (In Persian)

3. Arekhi, S., Emadodin, S. and Roshun, S. H. (2026). Assessing the impact of climate change on surface water resources (Case study: Babolrood watershed). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(2), 1-14. (In Persian) https://www.srds.ir/article_234548.html?lang=en

4. Azizi, G., Hanafi, A., Soltani, M., & Aghajani, M. (2011). Synoptic analysis of the severe, late, and widespread frost of April 2009. *Geography and Environmental Planning*, 22(1), 1-14. (In Persian)

5. Barati, G. (1999). Systemic relationships between migratory high-pressure systems and spring frosts in Iran. *Geographical Research*, 14(1-2), 132-150. (In Persian)

6. Caspersen, L., Schiffers, K., Milyaev, A., Neuwald, D., & Luedeling, E. (2025). Spring phenology projections for apples in southwestern Germany indicate persistent frost risk levels. *Agricultural and Forest Meteorology*, 374, 110824.

7. Charalampopoulos, I., & Droulia, F. (2022). Frost conditions due to climate change in South-Eastern Europe via a high-spatiotemporal-resolution dataset. *Atmosphere*, 13(9), Article 1407. <https://doi.org/10.3390/atmos13091407>

8. Dai, L., Lu, M., Cui, H., Xiao, H., Zhang, L., Song, Y., & Deng, W. (2024). The rise of AI for Earth science: A call for deeper scientific deliberation—Insights from the Climate, Weather, and Water Forum 2024. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(11), E2144-E2151.

9. Darand, M., & Masoudian, S. A. (2015). Waiting time for frost occurrence in Iran. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 30(1), 81-94. (In Persian)

10. Duan, J., Zhang, Q. B., Lv, L., et al. (2012). Regional-scale winter-spring

temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China. *Climate Dynamics*, 39(3-4), 919-928.

<https://doi.org/10.1007/s00382-011-1232-9>

11. EbnE Hejazi, S. M., Yazdanpanah, H., Movahedi, S., Nasr Esfahani, M. A., & Moradizadeh, M. (2022). Early warning of spring frost in apple orchards using the WRF model. *Journal of Water and Soil*, 36(1), 127-144. (In Persian)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73254.1107>

12. Gholizadeh, M. H., Gheisavandi, M., & Moradi, M. (2026). Time-spatial estimation of frosting of apricot trees in Kurdistan province for the purpose of regional sustainable development. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies*, 7(1), 503-517. (In Persian)

13. Gholizadeh, M. H., Gheisavandi, M. and Moradi, M. (2026). Time-spatial estimation of frosting of apricot trees in Kurdistan province for the purpose of regional sustainable development. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 503-517. (In Persian)

https://www.srds.ir/article_212609.html?lang=en

14. Hassanzadeh, A., Ataei, H., Parvin, N., & Gandamkar, A. (2019). Synoptic patterns governing spring frosts in Kermanshah Province. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(1), 139-158. (In Persian)

15. Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077)

16. Kanzi Hagh, A. and Salahi, B. (2026). Tracking and Synoptic Analysis of the Hyperthermia of July 13, 2024 in Khuzestan Province. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 415-428. (In Persian)

https://www.srds.ir/article_218991.html?lang=en

17.Karimi, M., Sharifi, L., & Torkman, M. (2021). Assessment of the economic impacts of climate change on the agricultural sector of Fars Province. *Geography and Environmental Planning*, 32(1), 119–136. (In Persian)

<https://doi.org/10.22108/gep.2021.122484.1290>

18.Khaledi, S., Farahmand, G., & Alibakhshi, A. (2021). Vulnerability analysis and zoning of natural geomorphological hazards (Flood and earthquake) of Kermanshah province. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies*, 2(1), 17-36. (In Persian)

https://www.srds.ir/article_132471_en.html

19.Khaledi, S., Mohammadi, A., & Karami, M. (2008). Climatic site selection for apple cultivation in Semirom Township using AHP, Boolean, and fuzzy modeling methods in a GIS environment. *Applied Research in Geographical Sciences*, 8(11). (In Persian)

20.Mahmoudi, P., Khosravi, M., Masoudian, S. A., & Alijani, B. (2013). Climatological atlas of the statistical characteristics of frost in Iran. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 28(4), 55–66. (In Persian)

21.Masaki, Y. (2020). Future risk of frost on apple trees in Japan. *Climatic Change*, 159(3–4), 407–422.

<https://doi.org/10.1007/s10584-019-02610-7>

22.Masoudian, S. A., & Darand, M. (2012). Analysis of sea-level pressure anomalies during days associated with extreme cold events in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 23(1), 1–14. (In Persian)

23.Namdari, M. R. (2014). Statistical and synoptic analysis of severe spring frost in apple orchards of Semirom (Master's thesis). Yazd University, Yazd, Iran. (In Persian)

24.National Oceanic and Atmospheric Administration Physical Sciences Laboratory. (n.d.). NCEP/NCAR reanalysis data overview and access. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

25.Omidvar, K., & Dehghan Banadaki, Z. (2012). Investigation and analysis of severe

spring frost in pistachio orchards of Yazd Province. *Geography and Regional Development*, 10(2). (In Persian)

<https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23258>

26.Parvin, N. (2011). Circulation patterns affecting the occurrence of late spring frosts in Kurdistan Province. *Geographical Research*, 26(101), 219–238. (In Persian)

27.Pfleiderer, P., Menke, I., & Schleussner, C. F. (2019). Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change*, 157(3–4), 515–525.

<https://doi.org/10.1007/s10584-019-02570-y>

28.Qiu, G., Li, S., Shi, Y., Fang, X., & Cai, W. (2024). Development and validation of a numerical model for frost growth based on nucleation theory. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221, 125137.

29.Rahimi, M., Farajzadeh, M., & Kamali, G. (2011). Modeling the risk of spring frost damage to fruit trees: A case study of apple orchards in the Mashhad Plain. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 9(2), 273–284. [In Persian].

<https://doi.org/10.22067/gsc.v9i2.11003>

30.Rai, R., Joshi, S., Roy, S., Singh, O., Samir, M., & Chandra, A. (2015). Implications of changing climate on productivity of temperate fruit crops with special reference to apple. *Journal of Horticulture*, 2, Article 135.

<https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000135>

31.Ribeiro, A. C., de Melo-Abreu, J. P., & Snyder, R. L. (2006). Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2–4), 71–81.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.019>

32.Rigby, J. R., & Porporato, A. (2008). Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 35(10), L10703.

<https://doi.org/10.1029/2008GL033955>

33.Rodrigo, J. (2000). Spring frosts in deciduous fruit trees: Morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, 85(2), 155–173.

[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00150-8)

34. Sabouhi, R., Barani, H., Khodagholi, M., Abedi Sarvestani, A., & Tahmasbi, A. (2019). Analysis of past trends and prediction of climatic variables in the Semirom region. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 112–128. (In Persian)

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109857.1282>

35. Snyder, R. L., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection: Fundamentals, practice, and economics (Vol. 1). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

36. Tadić, V., Gligorević, K., Mileusnić, Z., Miodragović, R., Hajmiller, M., & Radočaj, D. (2023). Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations. *AgriEngineering*, 5(4), 2079–2111.

<https://doi.org/10.3390/agriengineering5040128>

37. Tomczyk, A. M., Szyga-Pluta, K., & Bednorz, E. (2020). Occurrence and synoptic background of strong and very strong frost in spring and autumn in Central Europe. *International Journal of Biometeorology*, 64(1), 59–70.

<https://doi.org/10.1007/s00484-019-01793-z>

38. Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>

39. Wang, J., Hua, H., Guo, J., et al. (2025). Late spring frost delays tree spring phenology by reducing photosynthetic productivity. *Nature Climate Change*, 15, 201–209.

<https://doi.org/10.1038/s41558-024-02205-w>

40. Yarmoradi, Z., Nasiri, B., & Karampour, M. (2016). Synoptic analysis of hazardous cold waves in northeastern Iran and the role of sea-level pressure and 500 hPa patterns in their occurrence. *Journal of Applied Meteorology*, 3(1). (In Persian)

<https://doi.org/10.22108/jac.2018.79407.0>

41. Zhang, X., Fu, Y., Han, Z., et al. (2022). Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: Comparisons, causes, and future implications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4), 553–565.

<https://doi.org/10.1007/s00376-021-1229-1>



نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای

https://www.srds.ir/article_252104.html?lang=fa

دوره هفتم، شماره چهارم، پیاپی (۲۶)، زمستان ۱۴۰۵

صص ۱۶-۱

تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر سرمازدگی‌های دیررس بهاره در باغات سیب شهرستان

سمیرم

محمدرضا نامداری: دانش آموخته کارشناسی ارشد، جغرافیای طبیعی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

کمال امیدوار*: استاد، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

راحله خیرالامور: دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

چکیده

زمینه و هدف: سرمازدگی دیررس بهاره از مهم‌ترین مخاطرات مرکب اقلیمی-فئولوژیک در باغ‌های سیب مناطق کوهستانی ایران است که خسارت آن عمدتاً از هم‌زمانی افت دما با مراحل حساس فئولوژیک، به‌ویژه گل‌دهی، ناشی می‌شود و لزوماً با مقدار مطلق دمای کمینه ایستگاه تناسب مستقیم ندارد. شهرستان سمیرم، به‌عنوان یکی از قطب‌های تولید سیب کشور، به‌دلیل ارتفاع، توپوگرافی و رژیم دمایی بهاره، مستعد این پدیده است. هدف این پژوهش، تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر سرمازدگی دیررس بهاره و بررسی رخدادهای ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ در چارچوب آماری دوره ۲۰ساله ۱۳۸۱-۱۴۰۰ است.

روش شناسی: دمای کمینه روزانه ایستگاه همدیدی سمیرم در دوره ۱۳۸۱-۱۴۰۰، در پنجره فئولوژیک حساس سیب از ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت بررسی شد. برای توصیف زمینه سطحی سه رخداد موردی ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲، علاوه بر دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای میانگین، بارش ۲۴ساعته، رطوبت نسبی میانگین و سرعت باد میانگین نیز از همان ایستگاه و در پنجره همدیدی ۱۲ تا ۳۱ فروردین استخراج شد. تحلیل همدیدی همان سه رخداد با داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و در نرم‌افزار GrADS نسخه ۲/۱ انجام شد.

یافته‌ها و نتایج: از ۴۸۰ روز پنجره مورد بررسی، ۴۷۳ روز دارای داده معتبر بود. در این دوره، ۶۲ روز در طبقه ضعیف، ۳۱ روز (در طبقه متوسط و هیچ روزی در طبقه شدید قرار گرفت؛ در مجموع، ۹۳ روز دارای شرایط سرمازدگی بودند. کمینه دمای ثبت‌شده ۱/۵- درجه سلسیوس بود و هیچ روزی با $T_{min} \leq -2$ درجه سلسیوس مشاهده نشد. دمای کمینه در رخدادهای ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ به‌ترتیب ۰/۱-، ۰/۴- و ۰/۶- درجه سلسیوس بود؛ بنابراین، هر سه رخداد در طبقه متوسط قرار گرفتند. با وجود این، خسارت بیشتر در سال ۱۳۹۲ با هم‌زمانی سرما و گل‌دهی و افزایش آسیب‌پذیری فئولوژیک مرتبط بود. تحلیل همدیدی هر سه رخداد، نفوذ هوای سرد از عرض‌های بالاتر و استقرار ناوه در تراز میانی جو را نشان داد. همچنین، وقوع بارش هم‌زمان با اوج سرما در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ با سرمایش صرفاً تابشی سازگار نبود. نتایج نشان می‌دهد شدت خسارت سرمازدگی در سمیرم تابع مستقیم دمای کمینه ایستگاه نیست، بلکه از برهم‌کنش شرایط جوی و مرحله فئولوژیک محصول تأثیر می‌پذیرد. از این‌رو، ترکیب ارزیابی آماری بلندمدت با تحلیل همدیدی رخدادهای شاخص می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای تبیین خطر سرمازدگی و توسعه سامانه‌های هشدار پیش‌هنگام در باغ‌های سیب سمیرم فراهم کند.

واژگان کلیدی: سرمازدگی دیررس بهاره، الگوهای گردش جوی، باغات سیب، داده‌های بازتحلیل، شهرستان سمیرم.

* مسئول مکاتبات: komidvar@yazd.ac.ir

ارجاع به این مقاله: نامداری، محمدرضا، امیدوار، کمال و خیرالامور، راحله. (۱۴۰۵). تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر سرمازدگی‌های دیررس بهاره در باغات سیب شهرستان سمیرم. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۷(۴)، ۱-۱۶.

مقدمه و بیان مسأله

سرمازدگی دیررس بهاره از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی-فناولوژیک در سامانه‌های باغداری مناطق سردسیر و مرتفع است و سالانه زیان اقتصادی چشمگیری، به‌ویژه در باغ‌های سیب، پدید می‌آورد (Rai et al., 2015; Karimi et al., 2021). آسیب‌پذیری درخت سیب در مراحل حساس فناولوژیک تورم جوانه، گل‌دهی و تشکیل میوه به‌گونه‌ای است که هرگونه جابه‌جایی در زمان‌بندی این مراحل، پنجره برخورد سرما با بافت حساس را تغییر می‌دهد (Rodrigo, 2000). ازاین‌رو شدت زیان الزاماً تابع خطی مقدار مطلق دمای کمینه ایستگاه نیست؛ خسارت عمدتاً زمانی پدید می‌آید که افت کمینه دما با مرحله گل‌دهی هم‌زمان گردد. در دهه‌های اخیر، گرمایش جهانی با افزایش رخداد «بهار کاذب» و جلو افتادن شکوفه‌دهی، احتمال هم‌پوشانی مراحل حساس فناولوژیک با امواج سرمای دیررس را افزایش داده است (Vitasse et al., 2018; Rigby & Porporato, 2008; Zhang et al., 2022).

شهرستان سمیرم به‌سبب ارتفاع زیاد، توپوگرافی کوهستانی، رژیم دمایی بهاره و تمرکز باغ‌های سیب، یکی از پهنه‌های حساس ایران نسبت به این هم‌زمانی است. باوجوداین، بخش عمده مطالعات داخلی یا بر روندهای ملی و پهنه‌بندی خطر یخبندان در مقیاس گسترده متمرکز بوده‌اند (Mahmoudi et al., 2013; Hassanzadeh et al., 2019) یا رویدادهای فراگیر را در مقیاس کشور تحلیل کرده‌اند (Azizi et al., 2009; Omidvar & Ebrahimi, 2012; Yarmoradi et al., 2016).

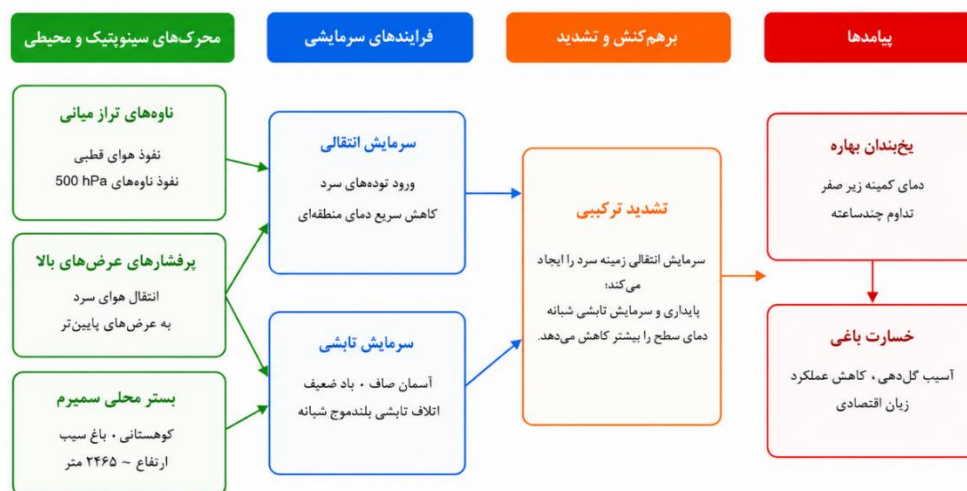
اگرچه این مطالعات تصویر کلی خطر یخبندان را روشن می‌کنند، اما بررسی‌های منطقه‌ای نشان‌دهنده روند تغییرات متفاوت هستند؛ برای نمونه، نتایج پژوهشی در استان کردستان (Gholizadeh et al., 2026) نشان داد که اگرچه ایستگاه‌های مرتفع و شمالی همچنان بیشترین تداوم سرمازدگی را تجربه می‌کنند، اما افزایش تدریجی دمای کمینه در دهه‌های اخیر منجر به کاهش کلی شدت و تکرار این پدیده، به‌ویژه در ایستگاه‌های شرقی استان شده است. با وجود چنین شواهدی از تغییرات اقلیمی، همچنان سه خلأ مشخص برای منطقه مطالعاتی سمیرم باقی است: نخست، فراوانی، شدت و روند سرمازدگی دیررس بهاره در پنجره فناولوژیک حساس سیب، بر پایه دمای ایستگاه و در یک سری ۲۰ ساله، به‌صورت نظام‌مند گزارش نشده است؛ دوم، رخداد‌های پرخسارت محلی معمولاً بیرون از این چارچوب آماری و به‌صورت موردی منفرد بررسی شده‌اند، بدون آن‌که جایگاه اقلیمی آن‌ها از نظر کلاس دمایی و روند دوره معلوم شود؛ سوم، پیوند عینی تحول همدیدی با سوابق خسارت میدانی باغ، در مقیاس شهرستان، هنوز تبیین کمی-کیفی منسجمی ندارد. شناسایی الگوهای گردش جوی همراه با این رخدادها می‌تواند مبنای علمی هشدار پیش‌هنگام، زمان‌بندی اقدامات حفاظتی (آبیاری و دوددهی حفاظتی، بخاری باغی) و سازگاری با تغییر اقلیم باشد (Ribeiro et al., 2006; Tadić et al., 2023; Charalampopoulos & Droulia, 2022). این کاربرد، جایگزین توصیف آماری دوره نمی‌شود و آن را پیش‌فرض می‌گیرد.

پژوهش حاضر این خلأ را با یک طراحی دولایه پر می‌کند. لایه اول، توصیف آماری کل دوره ۱۳۸۱-۱۴۰۰ است: دمای کمینه روزانه ایستگاه همدیدی سمیرم در پنجره ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت با آستانه‌های بدون هم‌پوشانی به کلاس‌های ضعیف، متوسط و شدید تقسیم می‌شود. لایه دوم، تحلیل همدیدی کیفی سه رخداد شاخص در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ است. این سه سال جایگزین سری ۲۰ ساله نیستند و بر اساس دوره بازگشت یا کمینه دمایی ایستگاه نیز انتخاب نشده‌اند. معیار گزینش آن‌ها، خسارت مستندشده بیش از ۳۰ درصد تولید محصول برای تحلیل موردی منتخب است. بنابراین سؤال پژوهش این است که الگوهای گردش جوی همراه با رخداد‌های پرخسارت، در چه بستری از فراوانی و شدت ۲۰ ساله ظاهر شده‌اند و خسارت بیشتر به‌ویژه در سال ۱۳۹۲ چگونه با هم‌زمانی سرما و گل‌دهی تبیین می‌شود، نه با شدیدتر بودن دمای ایستگاه. بر این اساس، تحلیل همدیدی با داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR (فشار تراز متوسط دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، امگا و دمای سطح) به‌صورت کیفی انجام می‌شود. هدف، تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر سرمازدگی دیررس بهاره در باغ‌های سیب شهرستان سمیرم و جای‌دادن رخداد‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ در چارچوب آماری ۲۰ ساله است.

مبانی نظری پژوهش

مخاطرات طبیعی، حوادثی هستند که به صورت ناگهانی به وقوع پیوسته و اثرات ویرانگری را به دنبال دارند که خسارت های جانی و مالی فراوانی را از طریق تغییرات شرایط زیست محیطی برای جوامع بشری به وجود می آورند که امروزه بیشتر شهرهای جهان با آن رو به رو بوده و از طرفی تغییرات اقلیمی نیز بر شدت وقوع آنها افزوده است (khaledi et al., 2021). از دیدگاه اقلیم شناسی همدیدی، سرمازدگی های کشاورزی حاصل تعامل مقیاس های سینوپتیکی و محلی جو هستند. در سرمازدگی فرارفتی، نفوذ توده هوای سرد از عرض های بالاتر همراه با تغییر الگوهای فشار و ارتفاع ژئوپتانسیل (تغییر موقعیت جت استریم، تقویت پرفشارهای عرض های بالا و الگوهای بلوکینگ) موجب افت سریع دما می شود (Pfleiderer et al., 2019; Tomczyk et al., 2020; Wang et al., 2025). در مقابل، سرمازدگی تشعشعی عمدتاً در شب های صاف و آرام با کاهش پوشش ابر، افزایش پایداری جو و شکل گیری وارونگی دمایی نزدیک سطح رخ می دهد (Duan et al., 2012; Dai et al., 2024). در رخدادهای شاخص سمیرم، فرارفت سرد زمینه ایجاد می کند و شرایط پایدار جو پس از گذر سامانه، سرمایش شبانه را تشدید می نماید. با این حال، سهم کمی این دو سازوکار محاسبه نشده و تفکیک بر اساس شواهد همدیدی و سطحی، کیفی و تفسیری است.

تغییر اقلیم با جلو افتادن مراحل فنولوژیک (جوانه زنی و گل دهی) زمان هم پوشانی با آخرین یخبندان های بهاره را تغییر می دهد. گرمایش جهانی الزاماً ریسک سرمازدگی را حذف نمی کند؛ زیرا کاهش یخبندان های بسیار زودهنگام ممکن است همزمان با حفظ یا افزایش خطر یخبندان در مرحله گل دهی رخ دهد (Vitasse et al., 2018; Zhang et al., 2022; Caspersen et al., 2025; Chen et al., 2024; Qiu et al., 2024; مانند سمیرم، توپوگرافی، شدت افت دما را تعدیل می کند. برای نشان دادن تعامل عوامل مورد نظر، مدل مفهومی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. مدل مفهومی سرمازدگی دیررس بهاره در باغات سیب شهرستان سمیرم (بر اساس شواهد همدیدی و فیزیکی).

Figure 1. Conceptual model of late spring frost in apple orchards of Semirom Township, Iran, based on synoptic and physical evidence.

پیشینه پژوهش

مرور پیشینه نشان می دهد که بررسی نشدن سهم نسبی سازوکارهای فرارفتی و تابشی در سرمازدگی بهاره سمیرم ناشی از فقدان مطلق داده نیست، بلکه حاصل ناهم مقیاسی منطقه، ترکیب داده و روش است. از نظر منطقه، مطالعات داخلی عمدتاً پهنه بندی ملی یا ناحیه ای خطر یخبندان (Mahmoudi et al., 2013; Hassanzadeh et al., 2019) یا تحلیل رویدادهای فراگیر در مقیاس کشور از جمله یخبندان گسترده دی ماه ۱۳۸۶ را محور قرار داده اند (Azizi et al., 2024).

2009؛ Omidvar and Ebrahimi, 2012؛ Yarmoradi et al., 2016؛ Masoudian and Darand, 2012؛ Darand, 2015). در این مقیاس، سمیرم صرفاً یک نقطه در شبکه ملی محسوب می‌شود و از این رو، تفکیک تفاوت‌های الگوی همیدی میان چند رخداد مخرب در یک شهرستان باغدار امکان‌پذیر نیست. افزون بر این، رویداد شاخص گزارش‌شده توسط امیدوار و ابراهیمی (۲۰۱۲) مربوط به یخبندان زمستانه و فراگیر است و با سرمازدگی دیررس بهاره در مرحله گل‌دهی سیب تفاوت اساسی دارد. از نظر داده‌ای نیز، حتی در مطالعاتی که دمای حداقل روزانه یا نقشه‌های فشار را در اختیار داشته‌اند، ترکیب همزمان سری دمایی ایستگاه همیدی سمیرم با میدان‌های بازتحلیل ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، فرارفت و امگا در ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، آن هم برای ساعات وقوع سرما، به‌ندرت انجام شده است. همچنین، استفاده از داده‌های NCEP/NCAR عمدتاً در ارزیابی ریسک و سناریوهای اقلیمی بوده و کمتر برای تفکیک سازوکار همیدی یک رخداد سرمای محلی به کار رفته است (Kalnay et al., 1996؛ Rigby & Porporato, 2008؛ Masaki, 2020).

از نظر روش، تحلیل همیدی توصیفی (نقش ناوه، سردچال، پرفشار سیبری و بلوکینگ) و پهنه‌بندی آماری-مکانی (Rahimi et al., 2011) شدت و گستره را نشان می‌دهند، اما سهم کمی فرارفت در برابر تابش را بر حسب ساعت سرما اندازه نمی‌گیرند؛ حتی رهیافت‌های جدیدتر WRF-فنولوژی نیز با هدف پیش‌آگاهی طراحی شده‌اند، نه طبقه‌بندی کمی سازوکار در چند رویداد تاریخی یک کانون باغی (Ebne Hejazi and Yazdanpanah, 2006؛ Ribeiro et al., 2006). مطالعات بین‌المللی اخیر نیز گرچه ریسک سرمازدگی سیب را به تقدم فنولوژیک و بهار کاذب پیوند داده‌اند (Vitasse et al., 2018؛ Zhang et al., 2022؛ Pfleiderer et al., 2019)، بر باغات اروپا یا مقیاس کلان استوارند و سازوکار همیدی-محلی حوضه کوهستانی سمیرم را کمی نمی‌کنند. در نتیجه، شکاف دانش این است که تاکنون چارچوب چندمعیاره‌ای سهم نسبی فرارفت و تابش را برای چند رویداد مخرب بهاره در یک کانون مشخص باغ سیب ایران مشخصاً سمیرم به‌صورت کمی و در پیوند با مرحله فنولوژیک و سابقه خسارت میدانی محاسبه نکرده است. پژوهش حاضر همین شکاف را هدف می‌گیرد:

سه رخداد شاخص ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ را در مقیاس محلی، با داده ایستگاه همیدی سمیرم و بازتحلیل NCEP/NCAR، طبقه‌بندی همیدی می‌کند و تفکیک نسبی سازوکارها را از توصیف کیفی به اندازه‌گیری کمی تبدیل می‌نماید. مطالعات پیشین سرمازدگی بهاره را عمدتاً در سه مسیر جدا از هم پیش برده‌اند و همین جدایی، نه فقدان مطلق داده، علت اصلی بررسی‌نشدن سهم نسبی سازوکارها در مقیاس محلی بوده است. نخست، پژوهش‌های ایرانی غالباً در مقیاس ملی یا ناحیه‌ای به پهنه‌بندی یخبندان یا تحلیل یک رویداد فراگیر پرداخته‌اند؛ در این مقیاس، ایستگاه سمیرم حداکثر به‌صورت یک نقطه در میان شبکه‌ای گسترده دیده می‌شود و تفاوت الگوی همیدی میان رخدادهای مخرب همان شهرستان قابل جداسازی نیست.

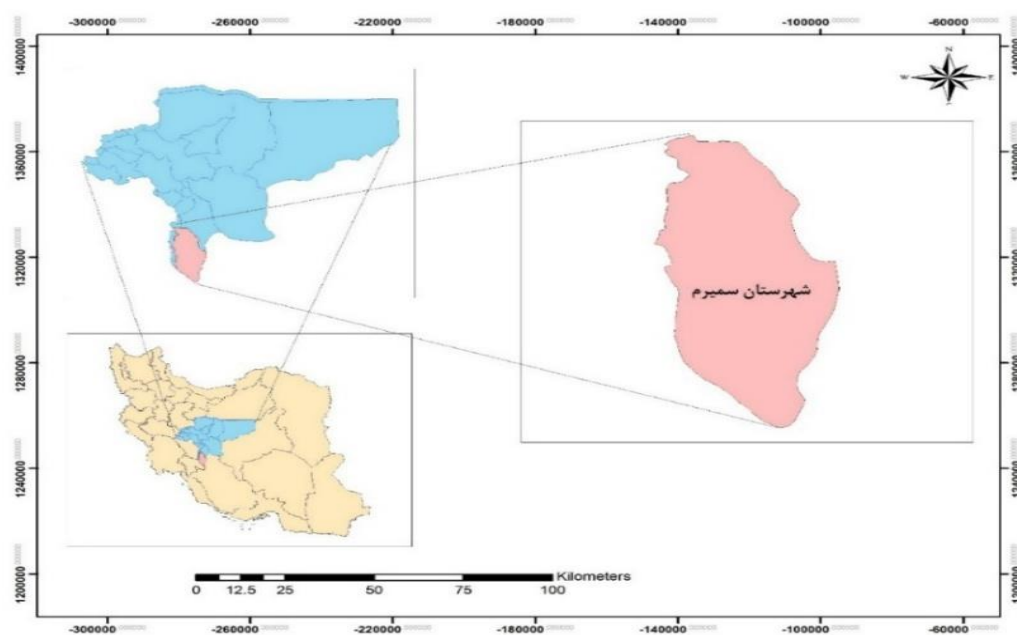
دوم، همان مطالعاتی که داده ایستگاهی در اختیار داشته‌اند، عمدتاً به کمینه دما، تعداد روز یخبندان یا تفسیر کیفی نقشه‌های فشار بسنده کرده‌اند؛ زیرا تفکیک کمی سرمازدگی فرارفتی از تابشی به سری همزمان دما، سرعت باد و ابرناکی در ساعات شب، به‌همراه میدان‌های بازتحلیل (ارتفاع، دما، فرارفت و امگا در ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال) نیاز دارد و این ترکیب در چارچوب روشی آن‌ها تعریف نشده بود.

سوم، مطالعات بین‌المللی جدید (۲۰۲۳-۲۰۲۶) اگرچه ریسک سرمازدگی سیب را به تقدم فنولوژیک پیوند داده‌اند، بر باغات اروپا و چین استوارند و سازوکار همیدی-محلی کانون‌های باغداری ایران را اندازه نمی‌گیرند. در نتیجه، تاکنون هیچ چارچوب چندمعیاره‌ای سهم نسبی فرارفت و تابش را برای چند رویداد مخرب بهاره در یک کانون مشخص باغ سیب ایران مشخصاً سمیرم به‌صورت کمی و در پیوند با مرحله فنولوژیک محاسبه نکرده است. پژوهش حاضر دقیقاً این شکاف را پر می‌کند: سه رویداد منتخب (۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲) را در مقیاس محلی، با داده ایستگاه همیدی سمیرم و بازتحلیل NCEP/NCAR، بر اساس آستانه باد و ابرناکی طبقه‌بندی می‌کند و سهم نسبی سازوکارها را از توصیف کیفی به اندازه‌گیری کمی تبدیل می‌نماید.

محدوده مورد مطالعه

شهرستان سمیرم در دامنه‌های زاگرس و در جنوب غرب استان اصفهان، در ارتفاع متوسط حدود ۲۴۶۵ متر از سطح دریا و در محدوده عرض جغرافیایی $31^{\circ} 24' 54/49''$ شمالی و طول جغرافیایی $51^{\circ} 34' 5/98''$ شرقی قرار دارد (شکل ۲). مجاورت با ارتفاعات دنا اقلیمی سرد تا معتدل سرد پدید آورده است (Khaledi et al., 2008). وسعت باغات شهرستان ۲۲۰۰۰ هکتار و سطح سیب درختی ۱۸۵۰۰ هکتار است؛ یعنی حدود ۸۴٪ باغات شهرستان به سیب اختصاص دارد و سمیرم کانون اصلی باغداری استان اصفهان به‌شمار می‌رود (مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، پایگاه تحقیقات باغبانی سمیرم). بیش از ۹۰٪ سطح سیب استان نیز در همین شهرستان گزارش شده است. توپوگرافی کوهستانی، وارونگی دما و زهکشی هوای سرد، باغات دشتی و پایین‌دست را در برابر سرماهای شبانه آسیب‌پذیر می‌کند. گلدهی سیب معمولاً از اواخر فروردین تا نیمه اردیبهشت رخ می‌دهد و حساس‌ترین مرحله، گل کامل تا تشکیل میوه اولیه است. همین پنجره با رخدادهای سرمازدگی دیررس بهاره هم‌پوشان است و مبنای انتخاب رخدادهای ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ قرار گرفته است.

از نظر فنولوژی، درخت سیب در سمیرم معمولاً از اواخر فروردین تا نیمه اردیبهشت به گل می‌رود. حساس‌ترین مرحله به سرمازدگی دیررس، گل کامل تا تشکیل میوه اولیه است؛ در این مرحله بافت گل و میوه تازه تشکیل‌شده کمترین تحمل را به دمای صفر و زیر صفر دارد و چند ساعت سرما می‌تواند به ریزش گل و کاهش تشکیل میوه بینجامد. همین پنجره مبنای بازه همدیدی پژوهش ۲۱ فروردین تا ۲۱ اردیبهشت قرار گرفت. روند دمای کمینه در بیشتر فصول افزایشی است و در قرن حاضر نیز ادامه خواهد داشت (Sabouhi et al., 2019). باوجوداین، تقدم فنولوژیک می‌تواند مواجهه گل با سرماهای دیررس بهاره را حفظ کند.



شکل ۲: موقعیت شهرستان سمیرم در کشور و استان اصفهان

Figure 2. Location of Semirom Township within Iran and Isfahan Province

روش پژوهش

این پژوهش کاربردی-تحلیلی است و با رویکرد اقلیم‌شناسی همدیدی مبتنی بر رخداد انجام شده است. هدف، اندازه‌گیری شدت و تفکیک سهم فرارفت سرما در برابر سرمایش تابشی در سه رخداد خسارت‌زای باغ سیب سمیرم در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ است. داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه همدید سمیرم (حداقل دما، و در ساعات رخداد در

صورت وجود باد و پوشش ابر) جهت کمی‌سازی شدت محلی به‌کار رفت. شش ایستگاه هم‌جوار (آباد، بروجن، اقلید، لردگان، شهرضا و یاسوج) تنها برای آزمون هم‌زمانی یا محلی‌بودن همان موج سرما استفاده شد (جدول ۱). تاریخ‌ها به‌سبب تقویم فنولوژیک سیب به شمسی تبدیل شد و تحلیل ایستگاهی بر پنجره ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت، هم‌زمان با گل‌دهی، متمرکز گردید. میدان‌های فشار سطح زمین، ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، امگا و دمای سطح از بازتحلیل NCEP/NCAR برای ساعات اوج همان رخدادها گرفته شد تا سازوکار همدیدی از توصیف کیفی به مقایسه کمی تبدیل شود.

جدول ۱. ویژگی‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید مورد استفاده در مطالعه و میانگین بارش سالانه آن‌ها (۱۳۸۱-۱۳۹۲)

Table 1. Characteristics of Synoptic Meteorological Stations Used in the Study and Their Mean Annual Precipitation (2002-2013)

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول (شرقی)	عرض جغرافیایی (شمالی)	ارتفاع (متر)	متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) (۱۳۸۱-۱۳۹۲)
۱	آباد	سینوپتیک	۵۲° ۶۵' ۰۵"	۳۱° ۱۶' ۰۸"	۲۰۳۰	۹۰/۶۶
۲	بروجن	سینوپتیک	۵۱° ۲۸' ۷۲"	۳۱° ۹۶' ۵۲"	۲۱۹۷	۲۵۱/۶
۳	اقلید	سینوپتیک	۵۲° ۶۸' ۶۶"	۳۰° ۸۹' ۸۸"	۲۳۰۰	۲۸۶/۶
۴	لردگان	سینوپتیک	۵۰° ۸۲' ۹۴"	۳۱° ۵۱' ۰۲"	۱۵۸۰	۵۳۷/۶
۵	سمیرم	سینوپتیک	۵۱° ۵۶' ۹۴"	۳۱° ۴۱' ۴۱"	۲۲۷۴	۴۶۷/۱۳
۶	شهرضا	سینوپتیک	۵۱° ۸۶' ۶۶"	۳۲° ۰۰' ۸۸"	۱۸۴۵	۱۴۰/۹۸
۷	یاسوج	سینوپتیک	۵۱° ۵۸' ۷۵"	۳۰° ۶۶' ۸۳"	۱۸۳۱	۷۱۱/۱۸

تحلیل همدیدی

رخداد‌های مورد مطالعه بر اساس هم‌زمانی گزارش خسارت در باغ‌های سیب، کاهش دمای کمینه به زیر آستانه صفر درجه سلسیوس و افت محسوس دما نسبت به ۲۴ تا ۴۸ ساعت پیش از رخداد شناسایی شدند. برای هر رخداد، نقشه‌های مربوط به روز اوج و دو روز پیش از آن تهیه و شاخص‌های کمینه دما (T_{min})، تغییر دمای ۲۴ ساعته (ΔT_{24})، تغییر دمای ۴۸ ساعته (ΔT_{48})، فرارفت دما ($Adv_T = -V_{850} \cdot \nabla T_{850}$)، سرعت قائم هوا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (ω_{850}) و سرعت قائم هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ω_{500}) ضخامت جو، سرعت باد ۱۰ متری و پوشش ابر استخراج شد. رخداد به‌عنوان فرارفتی طبقه‌بندی شد، مشروط بر آنکه فرارفت هوای سرد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال از تداوم زمانی برخوردار بوده، سرعت باد سطحی حداقل ۳ متر بر ثانیه باشد و کاهش دما صرفاً به ساعات شب محدود نشود. در مقابل، رخداد تابشی با ضعف فرارفت در ترازهای بالاتر، سرعت باد کمتر از ۲ متر بر ثانیه، آسمان نسبتاً صاف و غلبه سرمایش در طول شب مشخص شد. مواردی که معیارهای دو سازوکار را به‌طور هم‌زمان نشان دادند، در گروه رخداد‌های ترکیبی قرار گرفتند. نقشه‌های همدیدی و میدان‌های جوی با استفاده از نرم‌افزار GrADS نسخه ۱,۲ ترسیم و تحلیل شدند. از آنجاکه در ایستگاه سمیرم داده‌های رادیوسوند در دسترس نبود، داده‌های رادیوسوند یاسوج صرفاً برای بررسی ساختار ترمودینامیکی جو آزاد، شامل شناسایی وارونگی دما و ارزیابی باد در ترازهای بالاتر، مورد استفاده قرار گرفت و به‌عنوان نماینده مستقیم دمای باغ‌های سمیرم در نظر گرفته نشد.

نتایج

به منظور جلوگیری از تفسیر رخدادها صرفاً بر اساس مقدار کمینه دما، مقادیر روزانه کمینه و بیشینه دما، مجموع بارش ۲۴ ساعته، مجموع بارش دو روز قبل، درصد رطوبت نسبی میانگین و سرعت باد در روزهای رخداد سرمازدگی فروردین ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲، از ایستگاه سمیرم استخراج شد (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات سطحی روز اوج سه رخداد سرمازدگی بهاره در ایستگاه سینوپتیک سمیرم

Table 2. Surface conditions on the peak day of three spring frost events at the Semirom synoptic station

تاریخ سرمازدگی	رخداد	کمینه دما (°C)	بیشینه دما (°C)	بارش ۲۴ ساعته روز رخداد (میلیمتر)	مجموع بارش روز قبل از رخداد (میلیمتر)	دو رطوبت نسبی میانگین (%)	سرعت باد میانگین (ms^{-1})
۱۵ فروردین ۱۳۸۱	-۱/۰	۶/۶	۰	۵۰	۴۷/۸	۳	
۱۹ فروردین ۱۳۸۵	-۰/۴	۱۲/۶	۳	۲۱	۵۳/۲	۴/۲	
۱۷ فروردین ۱۳۹۲	-۰/۶	۶/۶	۲۳	۰/۵	۷۸	۲/۴	

در پی وقوع سرمازدگی‌های دیررس بهاره، باغات سیب سمیرم در سه رخداد شاخص ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ دچار کاهش تولید و زیان اقتصادی شدند (جدول ۳). افزایش سطح باغ از ۲۵'۰۰۰ به ۳۶'۰۰۰ هکتار، خسارت کل را بزرگ می‌کند و شدت خسارت در واحد سطح را توضیح نمی‌دهد. درصد خسارت گزارش شده در این سه رخداد به ترتیب ۴۰٪، ۳۵٪ و ۷۰٪ است. بر اساس ادبیات حفاظت در برابر سرما، زیان باغی از هم‌زمانی سه عامل تعیین می‌شود: شدت سرما (T_{min})، دوام دما زیر آستانه بحرانی، و مرحله فنولوژیک بافت آسیب‌پذیر (Snyder, Proebsting & Mills, 1978; de Melo-Abreu, 2005). آستانه صفر درجه شرط یخبندان هواشناسی است؛ حساس‌ترین مرحله در سمیرم گل کامل تا تشکیل میوه اولیه است که با پنجره ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت هم‌خوان است.

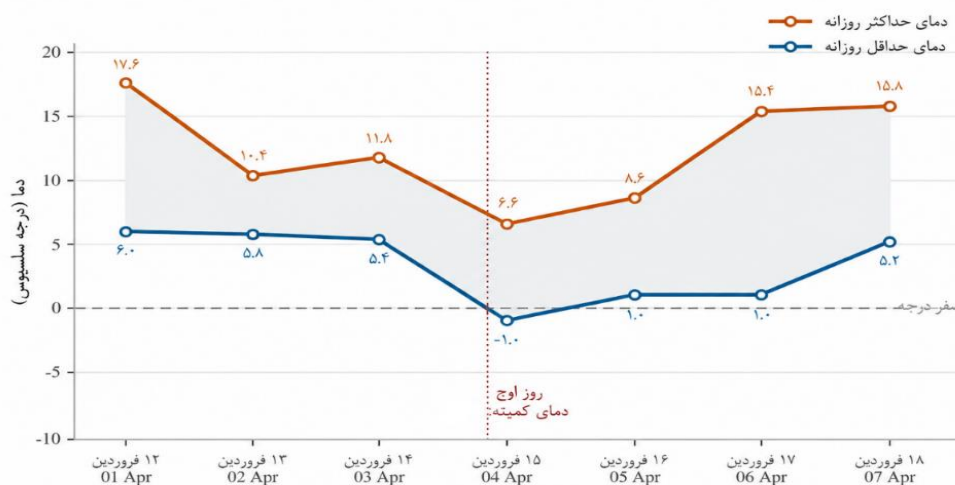
جدول ۳. سطح زیرکشت، میزان تولید، عملکرد و خسارات ناشی از سرمازدگی بهاره در باغات سیب شهرستان سمیرم (سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲)

Table 3. Cultivated Area, Production, Yield, and Economic Losses Caused by Spring Frost Events in Apple Orchards of Semirom Township during 2002, 2006, and 2013

سال (شمسی)	میانگین سطح زیر کشت (هکتار)	کل تولید (تن)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	محصول برداشت شده (%)	خسارت سرمازدگی (%)	خسارت اقتصادی (میلیون/میلیار ریال)	منبع
۱۳۸۱	۲۵,۰۰۰	۲۵۰۰	۱۰,۰۰۰	۶۰	۴۰	۵۵,۷۵۰ ریال	سازمان کشاورزی سمیرم، ۱۳۸۱
۱۳۸۵	۲۸,۰۰۰	۲۴۷۰	۱۴,۰۰۰	۶۵	۳۵	۶۲,۴۵۰ ریال	سازمان کشاورزی سمیرم، ۱۳۹۲
۱۳۹۲	۳۶,۰۰۰	۴۰۰۰	۱۱,۰۰۰	۳۰	۷۰	۴۰۰ میلیارد ریال	سازمان کشاورزی سمیرم، ۱۳۹۲

تحلیل همیدی رخداد سرمازدگی بهاره فروردین ۱۳۸۱

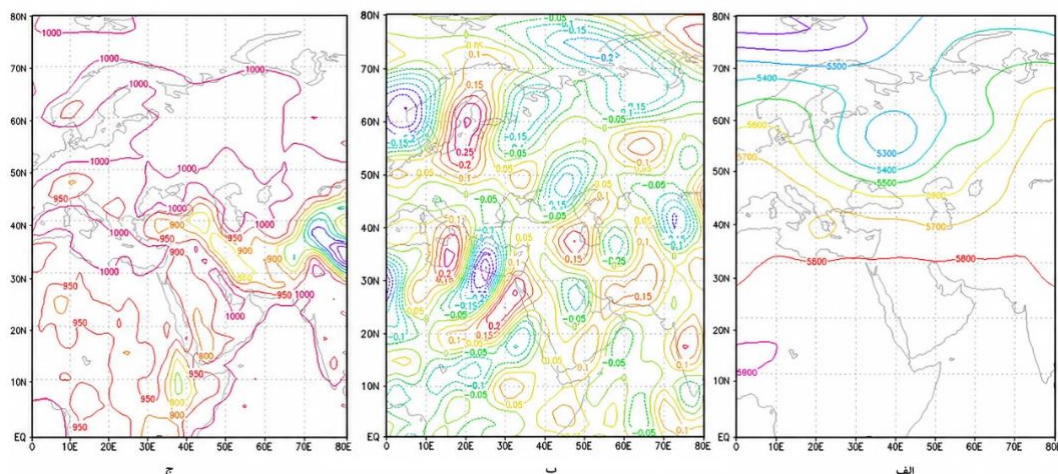
روند دمایی ایستگاه سینوپتیک سمیرم نشان می‌دهد که رخداد ۱۵ فروردین ۱۳۸۱ در پی یک افت دمایی سریع و نسبتاً شدید در مقیاس چندروزه شکل گرفته است (شکل ۳). کمینه دما از ۶/۰ درجه سلسیوس در ۱۲ فروردین به ۵/۸، ۵/۴ و در نهایت ۱/۰- درجه سلسیوس در روزهای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ فروردین کاهش یافت؛ بنابراین، کمینه دما در فاصله ۱۲ تا ۱۵ فروردین ۷/۰ درجه سلسیوس افت کرد. هم‌زمان، بیشینه دما از ۱۷/۶ به ۶/۶ درجه سلسیوس رسید که معادل کاهش ۱۱ درجه سلسیوس است. کاهش هم‌زمان و محسوس کمینه و بیشینه دما نشان می‌دهد که این رخداد صرفاً ناشی از سرمای شبانه و شرایط محلی نبوده، بلکه در وهله نخست با تغییر توده هوا و استقرار یک الگوی همید سرد در منطقه مرتبط بوده است. اهمیت این افت دما از آن جهت بیشتر است که وقوع آن دقیقاً با آغاز پنجره حساس فنولوژیک گل‌دهی سیب در سمیرم، یعنی از ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت، هم‌زمان شده است.



شکل ۳. تغییرات دما طی روزهای سرمازدگی (۱۲ تا ۱۸ فروردین ۱۳۸۱) ایستگاه سمیرم

Figure 3. Temperature variations during frost days (1–7 April 2002) at Semirom Station.

در شکل ۴، تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل بیانگر شکل‌گیری یک ناوه نسبتاً عمیق در بخش وسیعی از خاورمیانه و آسیای غربی است. در بخش شمالی این الگو، یک هسته کم‌ارتفاع بسته با مقادیر حدود ۵۳۰۰ متر در محدوده شمال ایران-آسیای مرکزی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده استقرار هوای سرد و ناپایداری دینامیکی در نیمه شمالی منطقه است. امتداد جنوبی این ناوه به سمت آناتولی، شرق مدیترانه و ایران موجب شمالی‌تر شدن جریان در لایه میانی جو روی ایران شده است. در چنین شرایطی، ایران در بخش شرقی یا جنوب‌شرقی ناوه قرار گرفته و با گردش نسبتاً نصف‌النهاری، زمینه برای فرارفت هوای سرد از عرض‌های بالاتر به سمت فلات ایران فراهم شده است. بنابراین، افت شدید دمای سطحی سمیرم را می‌توان تا حد زیادی پیامد انتقال هوای سرد در پشت جبهه یا بخش سرد سامانه ناوهای دانست، نه یک ناهنجاری صرفاً محلی.



شکل ۴. الف - نقشه ارتفاع ژئو پتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب - نقشه امگا ۵۰۰ هکتوپاسکال و ج - نقشه حداقل دمای سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روز (۱۵ فروردین ۱۳۸۱)

Figure 4. (a) Geopotential height map at 500 hPa, (b) omega field at 500 hPa, and (c) minimum surface air temperature at 1000 hPa on 4 April 2002

یکی از ویژگی‌های مهم الگوی ۵۰۰ هکتوپاسکال، تفاوت ارتفاع ژئوپتانسیل میان عرض‌های شمالی و منطقه ایران است. شیب قابل ملاحظه خطوط ارتفاعی در غرب و شمال غرب ایران نشان‌دهنده افزایش گرادیان افقی فشار در لایه میانی و در نتیجه تقویت باد ژئوستروفیک است. این وضعیت می‌تواند انتقال هوای سرد از نواحی شمالی و شمال شرقی به سمت ایران را تسهیل کند. به بیان دیگر، ناه مستقر بر آسیای غربی نه تنها هوای سرد را بر روی منطقه مستقر کرده، بلکه با تقویت جریان نصف‌النهاری، شرایط لازم برای فرارفت سرد را نیز فراهم ساخته است. از این منظر، رخداد ۱۵ فروردین را می‌توان یک سرمازدگی با مؤلفه غالب «فرارفت سرد مقیاس همدید» در نظر گرفت که سرمایش نزدیک سطح در ادامه آن تشدید شده است.

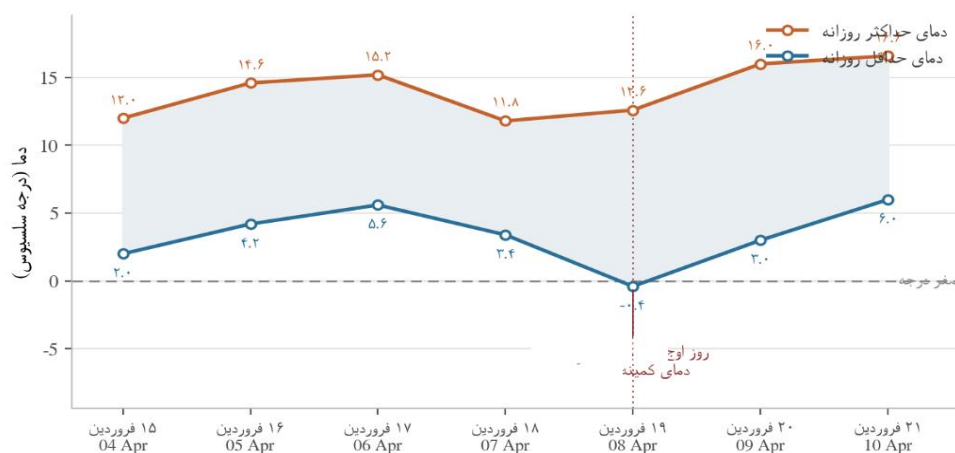
میدان امگا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز نشان‌دهنده وجود نواحی صعود و فرونشینی متناوب در محدوده سامانه است. مقادیر منفی امگا که متناظر با حرکت صعودی هوا هستند، عمدتاً در بخش‌هایی از غرب و شمال غرب منطقه تحت بررسی دیده می‌شوند، در حالی که در برخی نواحی مجاور، مقادیر مثبت امگا بیانگر حرکت نزولی هواست. این آرایش عمودی نشان می‌دهد که سامانه در ۱۵ فروردین از یک ساختار کاملاً پایدار و ساکن برخوردار نبوده و دینامیک قابل ملاحظه‌ای در لایه میانی جو وجود داشته است. صعود در بخش‌های جلویی و پیرامون محور ناه می‌تواند با افزایش اختلاط و انتقال ممنتوم سرد از لایه‌های بالاتر همراه شود، در حالی که فرونشینی در پشت سامانه، با خشک‌تر شدن جو و کاهش پوشش ابر، می‌تواند زمینه را برای افت شدید دمای شبانه فراهم کند. از این رو، میدان امگا نقش مهمی در توضیح گذار از سرمایش همدید به سرمایش سطحی دارد.

در تراز نزدیک سطح نیز الگوی مشاهده‌شده مؤید استقرار یک توده هوای سرد بر روی ایران است. کاهش سریع دمای بیشینه در کنار کاهش کمینه تا ۱/۰- درجه سلسیوس، نشان می‌دهد که سرمای واردشده تنها در ساعات شب فعال نبوده و در طول روز نیز توانسته دمای سطح را به شکل چشمگیری پایین نگه دارد. این ویژگی برای تشخیص نوع سرمازدگی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا در سرمازدگی تابشی، معمولاً کاهش دما عمدتاً در طول شب رخ می‌دهد و دمای روز به‌طور محسوسی کاهش نمی‌یابد. بنابراین، ساختار دمایی رخداد ۱۵ فروردین با یک «سرمازدگی انتقالی-تابشی» سازگار است که در آن ابتدا فرارفت هوای سرد در مقیاس منطقه‌ای دمای پایه را کاهش داده و سپس سرمایش شبانه در شرایط سطحی مناسب، دما را تا زیر صفر رسانده است. برای سمیرم، ارتفاع زیاد، ناهمواری پیچیده و استقرار باغ‌ها

در دره‌ها و فرورفتگی‌های توپوگرافی می‌تواند این اثر همدید را تشدید کرده باشد. پس از ورود هوای سرد، در صورت کاهش باد و کاهش ابر در ساعات شب، سرمای نزدیک سطح به صورت موضعی تجمع یافته و وارونگی دمایی کم‌ارتفاع تشکیل می‌شود. در چنین شرایطی، حتی اگر حداقل دمای ترازهای بالاتر به اندازه کافی پایین نباشد، دمای هوای مجاور سطح می‌تواند به کمتر از صفر درجه سلسیوس برسد. بنابراین، مقدار $-1,0$ درجه سلسیوس ثبت شده در سمیرم را می‌توان حاصل برهم‌کنش یک عامل منطقه‌ای، یعنی فرارفت هوای سرد، با عوامل محلی شامل ارتفاع، توپوگرافی، کاهش اختلاط شبانه و سرمایش تابشی دانست.

تحلیل آماری و همدیدی رخداد سرمازدگی بهاره فروردین ۱۳۸۵

شکل ۵ نشان می‌دهد که در بازه ۱۵ تا ۲۱ فروردین، دمای روزانه و کمینه دما در سمیرم نوسان محسوسی داشته است؛ در حالی که دمای کمینه از ۲ درجه سلسیوس در ۱۵ فروردین به $۵/۶$ درجه در ۱۷ فروردین افزایش یافت، در ۱۹ فروردین با یک افت ناگهانی به $-۴/۰$ درجه سلسیوس رسید که پایین‌ترین مقدار دوره را نشان می‌دهد. هم‌زمان، دمای بیشینه نیز از $۱۵,۲$ درجه در ۱۷ فروردین به حدود $۱۱/۸$ درجه در ۱۸ فروردین کاهش یافت و سپس در روز اوج سرمازدگی به حدود $۱۲/۷$ درجه رسید؛ بنابراین، رخداد ۱۹ فروردین با کاهش شدید کمینه دما نسبت به روزهای قبل و عبور آن از آستانه صفر درجه مشخص می‌شود. پس از این رخداد، هر دو مؤلفه دمایی روند افزایشی نشان داده‌اند و کمینه دما در ۲۱ فروردین به حدود ۶ درجه سلسیوس رسیده است. این الگو بیانگر وقوع یک افت دمایی کوتاه‌مدت اما شدید در میانه یک دوره نسبتاً گرم بهاری است که، با توجه به هم‌زمانی آن با مرحله حساس گل‌دهی سیب، می‌تواند به عنوان عامل مستقیم ایجاد تنش و خسارت سرمازدگی در باغ‌های سمیرم تفسیر شود.

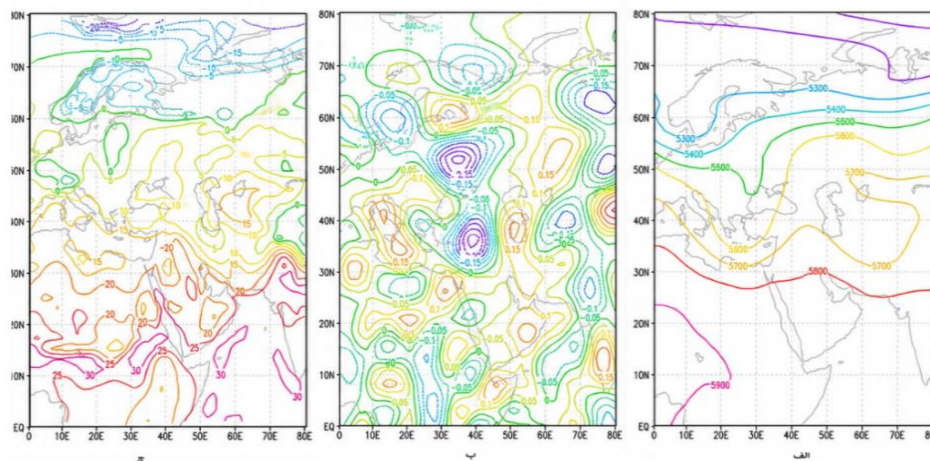


شکل ۵. تغییرات دما طی روزهای سرمازدگی (۱۵ تا ۲۱ فروردین ۱۳۸۵) ایستگاه سمیرم

Figure 5. Temperature variations during frost days (4–10 April 2006) at Semirom Station.

در روز ۱۹ فروردین ۱۳۸۵، نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال حضور یک ناوه عمیق در شرق مدیترانه و خاورمیانه را نشان می‌دهد (شکل ۷ الف). محور این ناوه به سمت جنوب شرق امتداد یافته و ارتفاع ژئوپتانسیل را از حدود ۵۹۰۰ متر در عرض‌های جنوبی به کمتر از ۵۴۰۰ متر در عرض‌های شمالی‌تر کاهش داده است، که این الگو مسیر هدایت هوای سرد عرض‌های بالا به سمت ایران و زاگرس را فراهم کرده است. میدان امگا در همین تراز مقادیر مثبت (فرونشست) را بر بخش‌های مرکزی منطقه نشان می‌دهد؛ این فرونشست هوای خشک، ضمن تقویت پایداری جوی، شرایط آسمان صاف شبانه را فراهم آورده که شرط اصلی وقوع یخبندان تابشی است (شکل ۷ ب). نقشه حداقل دمای سطح در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز هسته‌های سرد مشخصی را در غرب ایران و رشته‌کوه زاگرس، در حدود عرض ۳۰ درجه شمالی، آشکار می‌سازد که با افت شدید دمای کمینه سطحی در این دوره انطباق کامل دارد (شکل ۷

ج). در مجموع، ترکیب همدید ناوه عمیق تراز میانی، فرونشست هوای سرد در ترازهای پایین و آسمان صاف ناشی از پایداری جوی، سازوکار اصلی ایجاد سرمای دیررس بهاره در این رخداد را تشکیل می‌دهد.



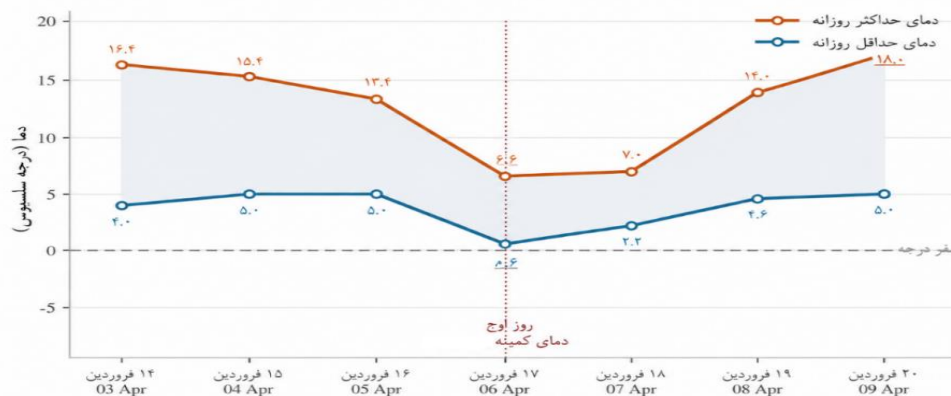
شکل ۷. الف - نقشه ارتفاع ژئو پتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب - نقشه امگا ۵۰۰ هکتوپاسکال و ج - نقشه حداقل

دمای سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۹ فروردین ۱۳۸۵

Figure 6. (a) Geopotential height map at 500 hPa, (b) omega field at 500 hPa, and (c) minimum surface air temperature at 1000 hPa on 8 April 2006.

تحلیل آماری و همدیدی رخداد سرمازدگی بهاره فروردین ۱۳۹۲

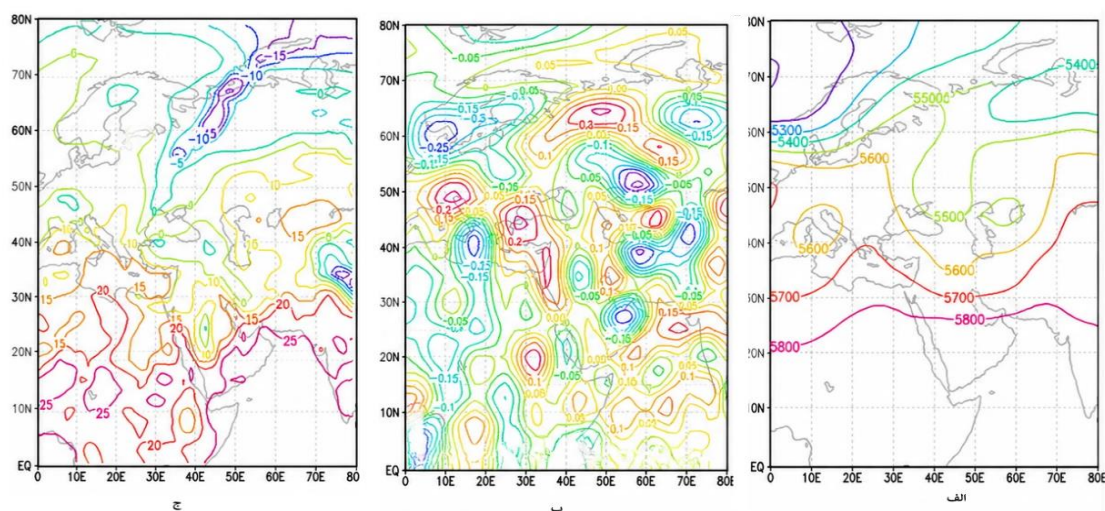
روند تغییرات دمای کمینه و بیشینه روزانه طی دوره ۱۴ تا ۲۰ فروردین سال ۱۳۹۲ در شکل ۸، به‌روشنی بیانگر وقوع یک رخداد سرمای دیررس بهاره است. دمای بیشینه از حدود ۱۶/۴ درجه سلسیوس در ۱۴ فروردین روندی کاهشی را آغاز کرده و در روز اوج سرما، یعنی ۱۷ فروردین، به ۶/۶ درجه سلسیوس کاهش یافته است؛ هم‌زمان، دمای کمینه نیز با کاهش محسوس به ۰/۶ درجه سلسیوس رسیده و در آستانه یخبندان قرار گرفته است. پس از این افت دمایی، هر دو مؤلفه دما در روزهای بعد افزایش قابل توجهی نشان داده‌اند، به‌گونه‌ای که دمای بیشینه در ۲۰ فروردین به حدود ۱۸ درجه سلسیوس رسیده است. این کاهش کوتاه‌مدت و محسوس دما و سپس بازیابی سریع آن، بیانگر ماهیت گذرا و شدید رخداد سرمای است.



شکل ۸. تغییرات دما طی روزهای سرمازدگی (۱۵ تا ۱۸ فروردین ۱۳۹۲) ایستگاه سمیرم

Figure 8. Temperature variations during frost days (15–18 April 2013) at Semirom Station

از دیدگاه همدیدی، در روز اوج سرمازدگی (۱۷ فروردین)، باوجود تضعیف تدریجی ناپایداری‌ها، استقرار هوای سرد، آسمان صاف تا کمی ابری و کاهش شدید تابش شبانه موجب تشدید سرمای سطح زمین شده است. نقشه ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و امگا، غلبه جریانات مداری و پایداری نسبی پس از عبور ناوه را نشان می‌دهد (شکل‌های ۹ الف و ۹ ب). هم‌زمان، نقشه حداقل دما افت دما تا مقادیر زیر صفر در غرب و جنوب غرب کشور و دمای کمینه ۰/۶- در ایستگاه سمیرم را نشان می‌دهد (شکل ۱۱ ج). در مجموع، الگوی همدیدی حاکم بر رخداد سرمازدگی فروردین ۱۳۹۲ شامل تعمیق ناوه تراز میانی، فرارفت شدید هوای سرد عرض‌های بالا و به دنبال آن استقرار شرایط پایدار و آسمان صاف بوده است. این شرایط منجر به افت ناگهانی و شدید دمای شبانه و بروز سرمازدگی بهاره بسیار شدید از نوع فرارفتی در باغات سیب شهرستان سمیرم شده است.



شکل ۹. الف - نقشه ارتفاع ژئو پتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب - نقشه امگا ۵۰۰ هکتوپاسکال و ج - نقشه حداقل

دمای سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۷ فروردین ۱۳۹۲

Figure 9. (a) Geopotential height map at 500 hPa, (b) omega field at 500 hPa, and (c) minimum surface air temperature at 1000 hPa on 6 April 2013.

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خسارت سرمازدگی دیررس در باغ‌های سیب سمیرم را نمی‌توان به‌صورت تابعی خطی از کمینه دمای ایستگاه تبیین کرد. سه رخداد ۱۳۸۱، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ نه به‌منزله سردترین روزهای سری، بلکه به‌عنوان مطالعات موردی منتخب در پنجره فنولوژیک ۱۵ فروردین تا ۷ اردیبهشت و بر اساس خسارت مستند بیش از ۳۰٪ تولید انتخاب شدند. در سری مشاهداتی ایستگاه، این رخدادها در رده دمایی متوسط جای می‌گیرند و کمینه مطلق بیست‌ساله نیز در سال ۱۳۹۸ ثبت شده است. بنابراین شدت خسارت باید از برهم‌کنش سه عامل تفسیر شود: (الف) هم‌زمانی افت دما با مرحله گل‌دهی؛ (ب) ماندگاری شب‌های سرد؛ و (ج) آرایش همدیدی پس از عبور ناوه. این چارچوب با شواهد بین‌المللی سازگار است که نشان می‌دهند ریسک یخبندان بهاره، حتی در اقلیم گرم‌شونده، می‌تواند به‌دلیل جلو افتادن فنولوژی باقی بماند یا افزایش یابد (Caspersen et al., 2025; Chen et al., 2024). Vitasse et al (۲۰۱۸) نیز آسیب بهار کاذب را تابع هم‌پوشانی مرحله زایشی با موج سرد دانسته‌اند، نه لزوماً تابع کمینه مطلق. تفسیر رخداد ۱۳۹۲ در همین راستاست: این رخداد از نظر کمینه دما ایستگاه سردتر از دو رخداد دیگر نیست، اما به‌سبب هم‌زمانی با گل‌دهی خسارت خیزتر گزارش شده است. Qiu و همکاران (2024) پیامدهای پس از یخبندان را تا

تاخیر فنولوژی و کاهش بهره‌وری فتوسنتزی سال بعد دنبال کرده‌اند؛ پژوهش حاضر آن پیامدها را کمی نکرده و تحلیل را به خسارت همان فصل محدود ساخته است.

از منظر دینامیک جو، هر سه رخداد با نفوذ هوای سرد عرض‌های بالاتر و عبور ناوه میان‌تراز همراه‌اند، اما نسبت تفسیرپذیر فرارفت و سرمایش شبانه یکسان نیست. این الگو با مطالعات سرماهای فرارفتی-تشنه‌شی عرض‌های میانی سازگار است که ناوه عمیق یا بندال، فرارفت سرد را آغاز می‌کند و پایداری پس از عبور سامانه سرمایش تابشی را تقویت می‌نماید (Pfleiderer et al., 2019; Tomczyk et al., 2020; Zhang et al., 2022). در مقیاس باغ، Dai و همکاران (2024) نقش وارونگی و اختلاط مکانیکی را در یخبندان تشنه‌شی نشان داده‌اند. چون بودجه انرژی سطحی و مدل تلاطم ریزمقیاس در این مطالعه محاسبه نشده، آن سهم‌ها تکرار نمی‌شود و تفسیر صرفاً بر شواهد نقشه‌ای و رفتار دمای سطح استوار است. وجود ناوه در تراز 500 hPa به‌تنهایی علت افت دما نیست. در جناح پشتی ناوه، انحنای چرخندی با فرارفت افقی دمای منفی همراه است. جایگزینی هوای سرد، ضخامت ستون $1000-500 \text{ hPa}$ را کاهش می‌دهد و دمای لایه زیرین افت می‌کند. جریان شمالی-شمال‌غربی پشت ناوه، توده سرد را به دامنه‌های زاگرس می‌رساند و عبور جبهه همراه، افت دما را در سطح تکمیل می‌کند. امگای مثبت به معنای نزول است، نه سرمایش تابشی. نزول جو را پایدار و نسبتاً خشک می‌کند و ابر را می‌زداید. در شب، با کاهش پوشش ابر، اتلاف تابش موج‌بلند سطح افزایش می‌یابد و لایه نزدیک زمین سرد می‌شود. پس از عبور محور ناوه، تضعیف باد، ماندگاری توده سرد و غلبه آسمان صاف، اختلاط آشفته را محدود می‌کند. در شب غالباً صاف، اتلاف تابش موج‌بلند سطح با شارهای آشفته گرمای محسوس و نهان جبران نمی‌شود؛ بنابراین سرمایش شبانه تشدید و وارونگی نزدیک سطح تسهیل می‌گردد. در توپوگرافی سمیرم، زهکشی ثقیلی هوای سرد به کف دره‌ها این وارونگی را پایدارتر می‌سازد و دمای پایین را در ساعات بحرانی گل‌دهی نگه می‌دارد؛ حتی اگر کمینه ایستگاه در رده شدید نباشد.

در این چارچوب تفسیری، سه رخداد به‌منزله ترکیب‌های متفاوتی از فرارفت سرد و سرمایش شبانه خوانده می‌شوند، نه به‌صورت رتبه‌بندی شدت حرارتی. رخداد ۱۳۸۱ با نفوذ زبانه پرفشار سرد و استقرار بعدی آرامش نسبی جو مشخص می‌شود؛ از این رو به‌صورت ترکیبی فرارفتی-تشنه‌شی تفسیر می‌گردد. رخداد ۱۳۸۵ با ناوه میان‌تراز عمیق‌تر و تداوم جریان شمالی، از نظر همدیدی غالب فرارفتی است. با این حال، غلبه آسمان صاف و پایداری پس از عبور سامانه می‌تواند مؤلفه تشنه‌شی را نیز تقویت کند؛ بنابراین اطلاق «فرارفت خالص» به این رخداد از نظر فیزیکی موجه نیست. رخداد ۱۳۹۲ نیز با فرارفت اولیه آغاز می‌شود، اما گذار سریع‌تر سامانه و استقرار پایداری شبانه، سهم تفسیرپذیر سرمایش تشنه‌شی را افزایش می‌دهد. تفاوت خسارت این سه سال را نمی‌توان صرفاً با رتبه‌بندی کمینه دما تبیین کرد. هم‌زمانی افت دما با مرحله گل‌دهی، به‌منزله حساس‌ترین فاز فنولوژیک، توضیح منسجم‌تری برای شدت خسارت فراهم می‌کند. در ادبیات داخلی، تأکید غالب بر روند ملی یا پهنه‌بندی خطر یخبندان بوده است و پیوند رخداد پرخسارت، پنجره گل‌دهی سیب و گردش جو در مقیاس شهرستان کمتر به‌صورت مطالعات موردی منتخب بررسی شده است. پژوهش حاضر این شکاف را در سطح شواهد همدیدی-سطحی پر می‌کند، اما نمایندگی خرداقلیم تاج درخت را ادعا نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

در مناطق کوهستانی مانند سمیرم، بیشینه خطر سرمازدگی دیررس هنگامی پدید می‌آید که فرارفت سرد با پایداری جو و غلبه آسمان صاف پس از عبور ناوه هم‌زمان شود. در این وضعیت، تضعیف باد اختلاط آشفته را محدود می‌کند و اتلاف تابش موج‌بلند سطح در شب جبران نمی‌شود؛ بنابراین سرمایش نزدیک سطح و وارونگی تسهیل می‌گردد. شدت خسارت را نمی‌توان صرفاً با رتبه‌بندی کمینه دما تبیین کرد. هم‌زمانی افت دما با مرحله گل‌دهی، به‌منزله حساس‌ترین فاز فنولوژیک، توضیح منسجم‌تری برای آسیب‌پذیری باغ فراهم می‌کند. بر این اساس، الگوهای شناسایی‌شده ناوه میان‌تراز، فرارفت شمالی، و نزول پس از عبور سامانه تنها به‌عنوان پیش‌نشانگرهای کیفی هشدار پیش‌هنگام قابل

استفاده‌اند، نه به‌مثابه آستانه‌های کمی از پیش‌ثابت. این استنباط با محدودیت‌های روش‌شناختی همراه است. تفکیک افقی بازتخلیل NCEP/NCAR برای دره‌ها و شیب‌های سمیرم درشت است و خرداقلیم تاج درخت را بازسازی نمی‌کند. نیمرخ جو، از جمله رادیوسوند یاسوج در صورت استفاده، نماینده کامل ستون هوای روی باغ نیست. دوره ۲۰ ساله برای تحلیل فرین‌ها کوتاه است و در همین سری، روند معناداری در فراوانی سرمازدگی پنجره گل‌دهی مشاهده نشد. درنهایت، چون بودجه انرژی، شار گرمایی و انتقال افقی دما محاسبه نشده‌اند، سهم عددی فرارفت و تابش قابل گزارش نیست و تفسیر سازوکارها به صورت کیفی باقی می‌ماند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند، سپاسگزاری می‌کنیم.

References:

1. Abedini, M. and Pasban, A. (2026). 3. Assessment of Climatic and Geomorphological Factors in Military Base Site Selection Using Remote Sensing and GIS: (Case Study of the Moghan Plain, Ardabil Province). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 28-43. (In Persian) https://www.srds.ir/article_219193.html?lang=en
2. Afshari, A. (2013). *Geography of Semirom Township: The land of a thousand springs, the roof of Iran*. Isfahan, Iran: Moazzami Publications. (In Persian)
3. Arekhi, S., Emadodin, S. and Roshun, S. H. (2026). Assessing the impact of climate change on surface water resources (Case study: Babolrood watershed). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(2), 1-14. (In Persian) https://www.srds.ir/article_234548.html?lang=en
4. Azizi, G., Hanafi, A., Soltani, M., & Aghajani, M. (2011). Synoptic analysis of the severe, late, and widespread frost of April 2009. *Geography and Environmental Planning*, 22(1), 1-14. (In Persian)
5. Barati, G. (1999). Systemic relationships between migratory high-pressure systems and spring frosts in Iran. *Geographical Research*, 14(1-2), 132-150. (In Persian)
6. Caspersen, L., Schiffers, K., Milyaev, A., Neuwald, D., & Luedeling, E. (2025). Spring phenology projections for apples in southwestern Germany indicate persistent frost risk levels. *Agricultural and Forest Meteorology*, 374, 110824.

- 7.Charalampopoulos, I., & Droulia, F. (2022). Frost conditions due to climate change in South-Eastern Europe via a high-spatiotemporal-resolution dataset. *Atmosphere*, 13(9), Article 1407. <https://doi.org/10.3390/atmos13091407>
- 8.Dai, L., Lu, M., Cui, H., Xiao, H., Zhang, L., Song, Y., & Deng, W. (2024). The rise of AI for Earth science: A call for deeper scientific deliberation—Insights from the Climate, Weather, and Water Forum 2024. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(11), E2144–E2151.
- 9.Darand, M., & Masoudian, S. A. (2015). Waiting time for frost occurrence in Iran. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 30(1), 81–94. (In Persian)
- 10.Duan, J., Zhang, Q. B., Lv, L., et al. (2012). Regional-scale winter–spring temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China. *Climate Dynamics*, 39(3–4), 919–928. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1232-9>
- 11.EbnE Hejazi, S. M., Yazdanpanah, H., Movahedi, S., Nasr Esfahani, M. A., & Moradzadeh, M. (2022). Early warning of spring frost in apple orchards using the WRF model. *Journal of Water and Soil*, 36(1), 127–144. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73254.1107>
- 12.Gholizadeh, M. H., Gheisavandi, M., & Moradi, M. (2026). Time-spatial estimation of frosting of apricot trees in Kurdistan province for the purpose of regional sustainable development. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies*, 7(1), 503-517. (In Persian)
- 13.Gholizadeh, M H , Gheisavandi, M and Moradi, M . (2026). Time-spatial estimation of frosting of apricot trees in Kurdistan province for the purpose of regional sustainable development. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 503-517. (In Persian) https://www.srds.ir/article_212609.html?lang=en
- 14.Hassanzadeh, A., Ataei, H., Parvin, N., & Gandamkar, A. (2019). Synoptic patterns governing spring frosts in Kermanshah Province. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(1), 139–158. (In Persian)
- 15.Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077)
- 16.Kanzi Hagh,A and Salahi,B . (2026). Tracking and Synoptic Analysis of the Hyperthermia of July 13, 2024 in Khuzestan Province. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(1), 415-428. (In Persian) https://www.srds.ir/article_218991.html?lang=en
- 17.Karimi, M., Sharifi, L., & Torkman, M. (2021). Assessment of the economic impacts of climate change on the agricultural sector of Fars Province. *Geography and Environmental Planning*, 32(1), 119–136. (In Persian) <https://doi.org/10.22108/gep.2021.122484.1290>
- 18.Khaledi, S., Farahmand, G., & Alibakhshi, A. (2021). Vulnerability analysis and zoning of natural geomorphological hazards (Flood and earthquake) of Kermanshah province. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies*, 2(1), 17-36. (In Persian) https://www.srds.ir/article_132471_en.html

19. Khaledi, S., Mohammadi, A., & Karami, M. (2008). Climatic site selection for apple cultivation in Semirom Township using AHP, Boolean, and fuzzy modeling methods in a GIS environment. *Applied Research in Geographical Sciences*, 8(11). (In Persian)
20. Mahmoudi, P., Khosravi, M., Masoudian, S. A., & Alijani, B. (2013). Climatological atlas of the statistical characteristics of frost in Iran. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 28(4), 55–66. (In Persian)
21. Masaki, Y. (2020). Future risk of frost on apple trees in Japan. *Climatic Change*, 159(3–4), 407–422. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02610-7>
22. Masoudian, S. A., & Darand, M. (2012). Analysis of sea-level pressure anomalies during days associated with extreme cold events in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 23(1), 1–14. (In Persian)
23. Namdari, M. R. (2014). Statistical and synoptic analysis of severe spring frost in apple orchards of Semirom (Master's thesis). Yazd University, Yazd, Iran. (In Persian)
24. National Oceanic and Atmospheric Administration Physical Sciences Laboratory. (n.d.). NCEP/NCAR reanalysis data overview and access. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
25. Omidvar, K., & Dehghan Banadaki, Z. (2012). Investigation and analysis of severe spring frost in pistachio orchards of Yazd Province. *Geography and Regional Development*, 10(2). (In Persian) <https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23258>
26. Parvin, N. (2011). Circulation patterns affecting the occurrence of late spring frosts in Kurdistan Province. *Geographical Research*, 26(101), 219–238. (In Persian)
27. Pfleiderer, P., Menke, I., & Schleussner, C. F. (2019). Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change*, 157(3–4), 515–525. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02570-y>
28. Qiu, G., Li, S., Shi, Y., Fang, X., & Cai, W. (2024). Development and validation of a numerical model for frost growth based on nucleation theory. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221, 125137.
29. Rahimi, M., Farajzadeh, M., & Kamali, G. (2011). Modeling the risk of spring frost damage to fruit trees: A case study of apple orchards in the Mashhad Plain. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 9(2), 273–284. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/gsc.v9i2.11003>
30. Rai, R., Joshi, S., Roy, S., Singh, O., Samir, M., & Chandra, A. (2015). Implications of changing climate on productivity of temperate fruit crops with special reference to apple. *Journal of Horticulture*, 2, Article 135. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000135>
31. Ribeiro, A. C., de Melo-Abreu, J. P., & Snyder, R. L. (2006). Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2–4), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.019>
32. Rigby, J. R., & Porporato, A. (2008). Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 35(10), L10703. <https://doi.org/10.1029/2008GL033955>
33. Rodrigo, J. (2000). Spring frosts in deciduous fruit trees: Morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, 85(2), 155–173. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00150-8)
34. Sabouhi, R., Barani, H., Khodaghohi, M., Abedi Sarvestani, A., & Tahmasbi, A. (2019). Analysis of past trends and prediction of climatic variables in the Semirom

- region. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 112–128. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109857.1282>
35. Snyder, R. L., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection: Fundamentals, practice, and economics (Vol. 1). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
36. Tadić, V., Gligorević, K., Mileusnić, Z., Miodragović, R., Hajmiller, M., & Radočaj, D. (2023). Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations. *AgriEngineering*, 5(4), 2079–2111. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040128>
37. Tomczyk, A. M., Szyga-Pluta, K., & Bednorz, E. (2020). Occurrence and synoptic background of strong and very strong frost in spring and autumn in Central Europe. *International Journal of Biometeorology*, 64(1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01793-z>
38. Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>
39. Wang, J., Hua, H., Guo, J., et al. (2025). Late spring frost delays tree spring phenology by reducing photosynthetic productivity. *Nature Climate Change*, 15, 201–209. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02205-w>
40. Yarmoradi, Z., Nasiri, B., & Karampour, M. (2016). Synoptic analysis of hazardous cold waves in northeastern Iran and the role of sea-level pressure and 500 hPa patterns in their occurrence. *Journal of Applied Meteorology*, 3(1). (In Persian) <https://doi.org/10.22108/jac.2018.79407.0>
41. Zhang, X., Fu, Y., Han, Z., et al. (2022). Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: Comparisons, causes, and future implications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4), 553–565. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1229-1>



COPYRIGHTS



© The Author(s). This is an open access article under the CC BY-NC license:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
 Private. Publisher: