journal of Future Cities vision

Autumn 2025. Vol 6. Issue 23

ISSN (Print): 2783-0780- ISSN (Online): 2783-0780
Journal Homepage: https://www.jvfc.ir/

Forecasting the intensity of temperature inversion in Isfahan city in the next decade

Zeynab Dolatshahi, Meysam Toulabi Nejad [*2],

1. Department of climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2. PhD in Climatology, Iran Water Resources Management Company, Iran Water Data and Information Office, Modeling and Innovation Department, Tehran, Iran.

ARTICLEINFO

Research Paper

Article history:

Received: 2025/07/15

Accepted: 2025/09/27

Published online: 2025/11/15

Keywords: *Forecasting, temperature inversion, inversion intensity, air pollution, Isfahan*

Abstract

This study was conducted to investigate and forecasting the types of inversions and their intensity in Isfahan city. In this study, radiosonde data from Isfahan station for 00:00 GMT (3.5 local time) during the years 2010 to 2020 were used. The results showed that 46% of Isfahan inversions are radiative, 7% are frontal, and 47% are subsidence. Due to the subsidence of air under the zonal high pressure, the share of subsidence inversions is higher. The average intensity of inversions showed that the most severe inversion with a coefficient of 0.023 is radiative. In terms of intensity rank, moderate inversions with 7% and severe inversions with 64% have the lowest and highest frequency in Isfahan city. The correlation results showed that there is a positive correlation between the intensity of inversion with temperature, pressure and layer thickness with coefficients of 0.910, 0.968 and 0.591, and a negative correlation between the intensity of inversion and height with coefficient -0.967. In fact, with the increase in the temperature of the inversion layer, the thickness of the inversion layer has increased, and as a result, the intensity of inversions in Isfahan has also increased; The results of the regression models showed that the main pattern for the frequency of inversions in Isfahan will continue. According to this analysis, the strong seasonal pattern of inversions in Isfahan will continue at least until 2030. Also, stability in the number is not expected, but the total number of inversions per year will increase or decrease significantly. The fluctuations will be around a constant average (about 110 events per year). The results showed that the winter season will remain critical in terms of inversion frequency. The months of January and February will continue to be the most critical period in terms of the number and intensity of inversions, which has a direct impact on Isfahan air pollution.

Citation: Dolatshahi. Z, Toulabi Nejad. M. (2025). **Forecasting the intensity of temperature inversion in Isfahan city in the next decade.** *Journal of Future Cities vision*, 6(23), 95-115.

© The Author(s). Publisher: Iranian Geographical Association

*. **Corresponding author:** Meysam Toulabi Nejad, **Email:** Meysam.Toulabi@gmail.com

journal of Future Cities vision
Autumn 2025. Vol 6. Issue 23
ISSN (Print): 2783-0780- ISSN (Online): 2783-0780
Journal Homepage: https://www.jvfc.ir/

$$\theta = T\left(\frac{1000}{P}\right)^{0.286}$$

Θ: Potential temperature to Kelvin
T: Temperature to Kelvin
P: Air pressure to hectopascal
After calculating the potential temperature of the ceiling and floor of the inversion layer using the relationship (1), we have calculated the intensity of temperature inversion using relationship (2) on a monthly, seasonal and annual time scale. Relationship (2):

$$I = \frac{(\Delta\theta)^2}{3+Z(\Delta z)}$$

Δθ Difference of the temperature potential and the base of inversion to the grade of Kelvin
Δz layer thick of inversion to meter
Z station height to hectometer

Results and discussion

This study seeks statistical and temporal phenomenon of temperature inversion and intensity and varieties in Isfahan. Studies show that Isfahan's topography, located on the outskirts of desert and high temperature differences, the effect of high -end tropical sovereignty in the hot seasons in this city, lack of rainfall, especially in the cold seasons, which cause sustainable air in the space. The city is located in the Zagros Mountains, for the sake of dominant winds and other atmospheric processes, are factors affecting the temperature inversion of Isfahan. On the one hand, the inversion of the inversion that plays a greater role in increasing the concentration of pollutants in the air. Also, the inversion of the type of subsidence, which is longer than other types of inversion, is also the dominant types of temperature inversion in the city. As a result, the city of Isfahan has a temperature inversion in most months of the year.

The results of the study showed that in Isfahan station during the 11 years, 3026 types of inversion of the rise were on average 275 per year. The process of inversion in the city has also been rising. In the meantime, September (376 cases) have the highest inversion and June have the lowest inversion. Also, the abundance of inversion of Isfahan station shows that the most inversion of this station was subsidence (47 %). But seasonally, the highest frequency of inversion was formed in winter (31 %) and the

Extended Abstract

Introduction

The ambient air temperature in the troposphere usually decreases with increased altitude (per 1000 meters increases the height of 5 to 6 degrees Celsius), but sometimes with increased air temperature, which is called temperature or inversion inversion. Temperature inversion occurs when a layer of hot air is above cold air adjacent to the Earth. In this case, air stability is created and instead of increasing temperature height to a few hundred meters above Earth with increased height. We will increase temperature. The importance of temperature inversion phenomenon is doubled when examining the effects of temperature inversion phenomenon. The phenomenon of temperature inversion is important because it causes fumation. This phenomenon occurs when the sun's radiation is unstable in the vicinity of the surface for a short time after sunrise, then combined with the scattered material in the nightly layer, causing the scattered material to return to the surface. . As a result, the concentration of pollutants increases sharply and the phenomenon of fiomia is created.

Materials (Data) and methods

In this study, the daily data of the radio atmosphere above the Isfahan Synoptic Station for 00 GMT (3.5 local) over the last 11 years (2010 to 2020) to 11 km high from Earth from Wyoming University He got. Indicators used include thermodynamic indices such as SI, LI, KI and TT and potential temperature. Also of other data used in this study, radio sound transmitted information including inversion height from ground to meter (ZBASE), inversion height from ground to meter (ZTOP), base temperature in base and inversion layer to degree santigerad (TBASE), the temperature difference between the base and the top of the inversion layer to the grade of santigerad (DTINV) is the height difference between the base and the apex of inversion to meter (DZINV) and the pressure in the base (PBSE) and the inversion layer (PTOP) from Relationships (1 and 2) are calculated First calculated using the relationship (1) the potential of the ceiling and the floor of the inversion layer of the relationship (1)

journal of Future Cities vision
Autumn 2025. Vol 6. Issue 23
ISSN (Print): 2783-0780- ISSN (Online): 2783-0780
Journal Homepage: https://www.jvfc.ir/

subsidence. Due to the high -pressure air condition, the share of subsidence inversion is greater. The average intensity of inversion showed that the most severe inversion with a coefficient of 0.023 is radiation. In terms of intensity rank, moderate inversion with 7 % and severe inversion with 64 % had the lowest and the highest in Isfahan. The correlation results showed that the inversion intensity with the temperature, pressure and thickness of the layer was directly related to the coefficients of 0.968, 0.968 and 0.591 and between the inversion and height intensity, the reverse relationship with the coefficient of 0.967. In fact, as the inversion layer temperature increases, the inversion layer thickness has increased, resulting in the inversion of inversion in Isfahan; the results of the regression models showed that the main pattern for the frequency of inversions in Isfahan will continue. According to this analysis, the strong seasonal pattern of inversions in Isfahan will continue at least until 2030. Also, stability in the number is not expected, but the total number of inversions per year will increase or decrease significantly. The fluctuations will be around a constant average (about 110 events per year). The results showed that the winter season will remain critical in terms of inversion frequency. The months of January and February will continue to be the most critical period in terms of the number and intensity of inversions, which has a direct impact on Isfahan air pollution.

lowest inversion in summer (20 %). The fall and winter season accounts for the highest percentage of inversion due to the presence of cold and heavy air in the higher layers and its exacerbation due to desert conditions in Isfahan and preventing hot air from fossil fuel combustion (fossil fuels. Vehicles and heat -generations) that are not allowed to climb hot air to higher layers. The hot seasons of summer and spring have decreased the number of inversion, which is due to the air subsidence below the tropical pressure. The inversion layer temperature trend has increased with the intensification of climate change and the height of the formation of inversion, with the long -term average inversion in Isfahan, especially the inversion that occurred in the cold seasons. . And that inversions occurred at higher altitude, but in recent years the inversions have been formed near the surface of the Earth. The results showed that there was a significant and direct relationship between inversion and atmospheric gases. That is, with the increase in the amounts of these gases, the inversion of inversion in Isfahan has increased. There was a significant and significant connection between the intensity of inversion and the gas CO gas, as well as the intensity of the inversion layer and the SO2 gas, which indicates the interaction and exacerbation of these gases and the inversion layer .

Conclusion

The results showed that 46 % of Isfahan's inversion was radiation, 7 % and 47 % of

Reference

Alizadeh, A; Kamali Gh A, Mousavi F, Mousavi M. (2000). **Weather and climatology**. *First Edition. Ferdowsi University Publications*, Mashhad.(in Persian)

Asakereh, H., Ahadi, L. (2020). **Study the relationship between air types and air pollution in Tabriz city.** *Physical Geography Research Quarterly*, *52*(3), 375-394.(in Persian).

Azimi, F., (2008**). Evaluation of the Impact of Inversion of Temperature on the Policy Trendy of Ahvaz.** *Journal of Geography of Land*, 19: 112.(in Persian).

Barkley, M. P., González Abad, G., Kurosu, T. P., Spurr, R., Torbatian, S., Lerot, C. (2017). **OMI air-quality monitoring over the**

Alijani, B., Najafi Nik, Z. (2009). A**ssessment of synoptical pattern of inversion in Mashhad using factor**. *Journal of Geography and Regional Development*, *7*(12), 1-12. https://doi.org/10.22067/geography.v7i12.8924(in Persian)

Alijani, B., Toulabi Nejad, M., Karbalaie Darei, A., (2019**) Investigating the Effects of Global Warming on Subtropical High Pressure.** *Physical Geography Research Quarterly*, *51*(1), 33-50. https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.258677.1007223.(in Persian)

journal of Future Cities vision
Autumn 2025. Vol 6. Issue 23
ISSN (Print): 2783-0780- ISSN (Online): 2783-0780
Journal Homepage: https://www.jvfc.ir/

inversion in Ahwaz city. Arab J Geosci **15**, 1737 (2022). https://doi.org/10.1007/s12517-022-11022-4

Donald, G.Baker. John, W.Enz. Harold, J.Paulus. (1969), **Frequency, duration, commencement time and intensity of temperature inversions at st. Paul-minneapolis**, Journal of Applied Meteorology, 8: 747-753.

Feng X, Shimin Wei, Shigong Wang (2020). **Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution,** *Science of The Total Environment*, 726, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138579.

Hossein Abadi, N., Tavousi, T., Mofidi, A., & Khosravi, M., (2019**). Review the process of temperature inversion of Katen Cities of Iran (Tehran, Mashhad and Tabriz).** *Journal of Natural Geography Research*, 51,713-693.(in Persian)

http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

Iacobellis, S.F., Norris, J.R., Kanamitsu, M., Tyree, M., Cayan, D.C. (2009). **Climate Variability and California Low-level Temperature Inversions,** California Climate Change Center, pp. 1- 47.

Kankanala, P., (2007). **Doppler Sodar observations of the winds and structure in the lower atmosphere over Fairbanks,Alaska**, M.S. Thesis, Department of Atmospheric Sciences, University of Alaska Fairbanks, 74 pp available on-line at:http://www.uaf.edu/asp/Students/theses/Pavan_thesis.pdf.

Karampour, M., salighe, M., toulabi Nejad, M., Zarei Cheghabalaki, Z., (2016**). Investigation of Tehran's air pollution by the critical inversion method.** *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 3(1): 64-51.(in Persian)

Karimi, M., Derakhshan, H., (2005). **Investigating Temperature Inversion (Inorge) in Isfahan**. *Proceedings of the 12th Iranian Geophysical Conference*, 1-6. (in Persian)

Middle East. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(7), 4687-4709.

Batyar, Z., Rasulian, N., (2021). **Inversion of temperature and its impact on Iran's metropolises**. *The first National Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Planning, Environment and Related Sciences*.Kerman. https://civilica.com/doc/1259597. (in Persian).

Bei, N.; Li, G.; Huang, R.; Cao, J.; Meng, N.; Feng, T.; Liu, S.; Zhang, T.; Zhang, Q. and Molina, L.T. (2016). **Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China**, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, 1: 1-34.

Bourne, S.M., Bhatt, U.S., Zhang, J., Thoman, R., (2009). **Surface-based temperature inversions in Alaska from a climate perspective.** *Atmospheric Research*, 20, 353-366.

Cheraghi, M, (2020). **The Impact of Inversion on Tehran's Air Pollution**, *Journal of Environmental Studies, Natural Resources and Sustainable Developmen*t, 3 (10), 1-8. (in Persian)

Derasthale, A; Willen. U, Karlsson. K-G, Jones .C.G. (2010). **Quantifying the Clear – Sky Temperature Inversions Frequency and Strength over the Arctic Ocean during summer and Winter Seasons from Airs Profiles.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 5565-5572.

Dergunov,A., Yakubailik, O, (2020). **Analysis of temperature inversions during periods of adverse weather conditions in Krasnoyarsk in the winter period of 2019-2020**, *E3S Web Conf*., 223 : 03021, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303021.

Dolatshahi, Z., Akbari, M., Alijani, B., Yarahmadi, D., Toulabi nejad, M., (2022**). Bandar Abbas City temperature inversion analysis using inversion intensity index.** *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*. Ready to release. (in Persian)

Dolatshahi, Z., Akbary, M., Alijani, B. Toulabi Nejad, M. (2022). **Analysis of temperature**

journal of Future Cities vision
Autumn 2025. Vol 6. Issue 23
ISSN (Print): 2783-0780- ISSN (Online): 2783-0780
Journal Homepage: https://www.jvfc.ir/

Retallack, B.J., (1973). **Compendium of meteorology**, WMO, PART 2, Phisical Meteorology, 1(34), 20-36.

Sager, L., (2019). **Estimating the effect of air pollution on road safety using atmospheric temperature inversions,** *Journal of Environmental Economics and Management*, 98, https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102250.

Schneider, P., Lahoz, W. A., van der A, R. (2015). **Recent satellite-based trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(3), 1205-1220

Smith, K., (2007). **Principles of Applied Climate**. *Translated by Mohammad Ali Khorshid Dost. Second edition. Yavarian Publications*, Tehran.(in Persian)

Tavousi, T., Hossein Abadi, N., (2017). **Evaluation of Inversion Indicators of Tehran Border Layer Layer.** Journal of Geographical Research, 32(2), 120-132. (in Persian)

Zeljko,M., Tais M., Voloder M., Zulum D.,(2007). **The correlation between air pollution and temperature inversion in sarajevo valley.***18th International conference on Carpathian meteorology, belgrad* (mountain influence on wather).

LashKari, H., Hedayat, P., (2006**). Synoptic pattern analysis of severe inorgies of Tehran**. *Journal of Geographical Research*, 56, 82-65. (in Persian)

Meteorological Office of Isfahan Province (2020). (in Persian).

Naghizadeh, H., Khorshiddoust, A., Saeidabadi, R., najafi, M. (2020). **Circulation patterns of the temperature inversion in Tabriz city using PCA.** *Geography and Planning*, 24(72), 205-224. https://doi: 10.22034/gp.2020.10890 (in Persian).

Nodzu, M.I., Ogino, S.Y., Yamanaka, M., (2006). **Climatological description of seasonal variations in lowertropospheric temperature inversion layers over the Indochina Peninsula**, *Journal of Climate*, 24, 3211-.3223 .

Nowruzian, M. (2015). **Investigation of temperature inversion structure in Tehran metropolis**, *Master's thesis. Mashhad Ferdowsi University*. September 2015.

Pankajakshan, T., Ghosh, A.K. Pattanaik, J., Ratnakaran, L., (1999**). A Quality-control Procedure for Surface Temperature and Surface Layer Inversion in the XBT data Archive from the Indian Ocean,** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 980-.289

نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه چشم انداز شهرهای آینده
www.jvfc.ir
دوره ششم، شماره سوم، پیاپی (۲۳)، پاییز ۱۴۰۴
صص ۱۱۵–۹۵

پیش بینی شدت وارونگی دما در شهر اصفهان در یک دهه‌ی آینده

زینب دولتشاهی : دکتری اقلیم شناسی، گروه اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

میثم طولابی نژاد: دکتری اقلیم شناسی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر اطلاعات و داده های آب ایران، گروه مدلسازی و نوآوری، تهران، ایران [۱].

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی و پیش بینی انواع وارونگی و شدت آن‌ها در شهر اصفهان به رشته تحریر درآمده است. در این پژوهش داده‌های رادیوسوند ایستگاه اصفهان برای ساعت ۰۰ گرینویچ (۳/۵ محلی) طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که ۴۶ درصد از وارونگی‌های اصفهان از نوع تابشی، ۷ درصد جبهه‌ای و ۴۷ درصد فرونشینی می‌باشد. به دلیل نشست هوا زیر پرفشار جنب‌حاره، سهم وارونگی فرونشست بیشتر است. میانگین شدت وارونگی‌ها نشان داد که شدیدترین وارونگی با ضریب ۰/۰۲۳ از نوع تابشی است. از نظر رتبه شدت، وارونگی‌های متوسط با ۷ درصد و وارونگی‌های شدید با ۶۴ درصد دارای کمترین و بیشترین فراوانی در شهر اصفهان بوده‌اند. نتایج همبستگی نشان داد که بین شدت وارونگی با دما، فشار و ضخامت لایه همبستگی مثبت با ضرایب ۰/۹۱۰ ، ۰/۹۶۸ و ۰/۵۹۱ و بین شدت وارونگی و ارتفاع، همبستگی منفی با ضریب ۰/۹۶۷- برقرار است. در واقع با افزایش دمای لایه وارونگی، ضخامت لایه وارونگی بیشتر شده، در نتیجه شدت وارونگی‌ها در شهر اصفهان نیز بیشتر شده است؛ نتایج پیش بینی حاصل از مدل های رگرسیونی نشان داد که الگوی اصلی برای فراوانی وارونگی ها در شهر اصفهان هنچنان ادامه خواهد داشت. بر اساس این تحلیل، الگوی فصلی قوی وارونگی‌ها در اصفهان حداقل تا سال ۲۰۳۰ ادامه خواهد داشت. همچنین ثبات در تعداد انتظار نمی‌رود بلکه تعداد کل وارونگی‌ها در سال به طور چشمگیری افزایش یا کاهش یابد. نوسانات حول یک میانگین ثابت (حدود۱۱۰ رویداد در سال) خواهد بود. نتایج نشان داد فصل زمستان از نظر فراوانی وارونگی همچنان بحرانی باقی می‌ماند. ماه‌های دی و بهمن کماکان بحرانی‌ترین دوره از نظر تعداد و شدت وارونگی‌ها خواهند بود که پیامد مستقیمی بر آلودگی هوای اصفهان دارد.

کلید واژگان: پیش بینی، وارونگی دمایی، شدت وارونگی، آلودگی هوا، اصفهان

---

۱. نویسنده مسئول: Meysam.Toulabi@gmail.com

مقدمه

باتوجه به ترکیب جو در لایه‌های مختلف و فعل انفعالات درون آن، گرادیان قائم دما در تمام لایه‌های جو یکسان نیست، در تروپوسفر پایینی که نزدیک ترین لایه به سطح زمین است در حالت طبیعی دما از سطح زمین با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد(طاوسی،۱۳۹۶: ۱۲۱). گاهی اوقات دمای هوا با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد، یعنی هوای گرم در بالای هوای سرد قرار می‌گیرد(نوروزیان، ۱۳۹۴: ۶۶). دما در لایه سرد با ارتفاع کاهش نشان می‌دهد، اما به محض رسیدن به لایه گرمتر بطور ناگهانی افزایش دما مشاهده می‌شود به این شرایط که در آن به جای کاهش دما با افزایش ارتفاع، افزایش ناگهانی در دمای هوا مشاهده می‌شود، وارونگی گفته می‌شود(علیزاده و همکاران، ۱۳۷۹: ۱۳۶). وارونگی شاید شدیدترین حالت پراکندگی قائم آلاینده ها را نشان می‌دهد، زیرا تلاطم متوقف می‌شود و حرکات قائم جوی از بین می‌روند. تا زمانی که منحنی تغییر دما نسبت به ارتفاع رسم نشده است، نمی‌توان در مورد چگونگی کاهش دما یا وارونگی اظهار نظر کرد. تنها پس ازرسم این منحنی است که آهنگ کاهش دما نسبت به ارتفاع یا افتاهنگ تعریف و تفسیر می‌شود(نقی زاده و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۰۷). وارونگی گاهی از سطح زمین به طرف بالا دیده می‌شود که آن را وارونگی سطح زمین می‌گویند و گاه هم در لایه‌های میانی جو دیده می‌شود که آن را وارونگی فوقانی می‌خوانند(اسمیت، ۱۳۸۶: ۱۰۱). بین آلودگی هوا و وارونگی همبستگی بالایی وجود دارد کاهش آلودگی هوا، کاهش مناسب تعداد روزهای با وارونگی را به دنبال دارد(Zeljko et al, 2007: 3). در واقع پایداری جوی ناشی از وارونگی یکی از مهمترین علل افزایش پتانسیل آلودگی هوا بخصوص در کالان شهرها است (چراغی، ۱۳۹۹: ۳). وارونگی یکی از ویژگیهای مهم جو قطبی است و با کنترل انتقال جرم و رطوبت از طریق تروپوسفر تحتانی ، نقش مهمی در فرآیندهای مختلف ایفا می‌کند(Derasthale et al, 2010: 5566).

دربحث آلودگی هوا در هر منطقه، علاوه بر مطالعه و بررسی آلاینده‌های هوا، منابع انتشار آنها در جو و موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی و ناهمواری‌های آن منطقه، بررسی و مطالعه شرایط آب و هوایی و عوامل جوی مؤثر برآلودگی هوای آن منطقه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. عوامل جوی به نوبه خود می‌توانند باعث افزایش یاکاهش پتانسیل آلودگی هوا و تغییر غلظت آلاینده ها در شهرهای بزرگ باشند. مهمترین پارامترهـای هواشناسی که بر آلودگی هوا اثر گذارند عبارتند از:سمت و سرعت باد، دمای سطح زمین، دمای پروفیل قـائم جـو، پایـداری جـوی، ارتفـاع لایـه آمیختگی، رطوبت، مقدار انرژی تابشی خورشیدی، بارش های جوی و وارونگی می باشند.

بحث وارنگی دما امروزه به یکی از مهم مهمترین موضوعات در دنیا تبدیل شده است؛ چرا که به طور مستقیم با سلامتی انسان و محیط زیست مرتبط است. در ادامه به چند نمونه از مطالعاتی که به بررسی وارونگی دما در سطح جهان و ایران پرداخته اند اشاره می شود.

دونالد [1](۱۹۶۹: ۷۴۷)، از اولین پژوهشگرانی است که به بررسی فراوانی، زمان شروع، تداوم و شدت وارونگی‌های دما و تاثیر آن روی آلودگی خیابان پال مینیاپولیس در شهر مینه‌سوتا در ایالات متحده آمریکا، در طی دوره زمانی ۸ ساله از (ماه ژوئن ۱۹۶۱ تا ماه ژوئیه ۱۹۶۸) پرداخت. کانکانلا[2](۲۰۰۷: ۷۴)، به مطالعه وارونگی‌های سطح پایین آلاسکا پرداخت. وی عقیده داشت که پوشش ابر بر روی ساختار وارونگی تاثیر می‌گذارد. بورن[3] و همکاران (۲۰۰۸: ۳۵۳)، به مطالعه وارونگی‌های سطح پایین آلاسکا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهایی از قبیل ضخامت، اختلاف دما بین کف و سقف لایه وارونگی و فراوانی وارونگی دما دارای روند کاهشی در بلندمدت می‌باشند. اشنایدر[4] و همکاران(۲۰۱۵: ۱۲۰۵) با استفاده از داده‌های SCIAMACHY روند تغییرات دی‌اکسید نیتروژن را برای شهرهای بزرگ جهان در بازه زمانی آگوست ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در اروپا، آمریکای شمالی و برخی نقاط در شرق آسیا دی‌اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد در حالی‌که در آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی افزایش یافته است. بی و همکارن[5] (۲۰۱۶: ۱) تاثیر شرایط همدید بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضه گان ونگ بررسی کردند و تغییرات PM ۲,۵ را به وارونگی دمای سطح پایین، سرعت باد افقی، سرعت باد عمودی، همگرایی و وقوع شرایط همدیدی نامساعد در طی فصل زمستان مربوط دانستند. بارکلی[6] و همکاران(۲۰۱۷: ۴۶۸۷) کیفیت هوا در خاورمیانه را با استفاده از داده‌های سنجنده OMI در طی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه در ابتدا قابلیت سنجنده OMI را برای نظارت بلند مدت هوا در سطح محلی نشان داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار NO2 در مکان‌های شهری بیشترین مقدار است و بیشترین مقدار در شهرهای بحرین، کویت و امارات متحده عربی دیده شده است. ساگر[7] (۲۰۱۹: ۱۰۲)، به برآورد اثر آلودگی هوا بر ایمنی جاده‌ها با استفاده از عامل وارونگی دما پرداخته‌اند. یافته های ایشان نشان داد جاده‌هایی که ایمن کمتری داشتند ممکن است هزینه‌های

1 Donald
2 Kankanala
3 Bourne
4 Schneider
5 Bei
6 Barkley
7 Sager

زیادی داشته باشند؛ چرا که آلودگی هوا را نادیده گرفته بودند. فنگ[1] و همکاران (۲۰۲۰: ۱۳۸)، وارونگی دما در لایه مرزی جوی و پایین تروپوسفر بر فراز حوضه سیچوان ، چین را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وارونگی دما در سیچوان یک پدیده رایج در تمام طول سال است. در مطالعه‌ای دیگر درگونوف و یاکوبیالیک[2] (۲۰۲۰: ۶)، به تجزیه و تحلیل وارونگی دما در طی دوره های نامطلوب آب و هوا در کراسنویارسک در دوره زمستان ۲۰۱۹–۲۰۲۰ پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داده است که درجه همبستگی بین این مقادیر، و استفاده داده‌های مدل GFS برای پیش بینی وضعیت محیط زیست امکان پذیر می‌باشد. دولتشاهی[3] و همکاران (۲۰۲۲: ۱) در تحقیقی شدت وارونگی‌های اهواز را با استفاده از شاخص های ترمودینامیکی جو برای دوره ۲۰۱۰ –۲۰۲۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین تعداد رخداد توأم با پدیده وارونگی دما در اهواز برابر ۴۶۷ مورد در سال می‌باشد که حدود ۲۸,۸ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشعی، جبهه‌ای ای ۹ درصد، و ۶۲,۲ درصد دیگر مربوط به وارونگی دمای از نوع فرونشینی می‌باشد. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره، سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می‌باشد. اما از نظر شدت شدیترین وارونگی از نوع تشعشعی بوده است. نتایج ضریب شدت نشان داد که هر زمان ضخامت لایه کمتر، مقدار دمای هوا بیشتر، ارتفاع وقوع کمتر و فشار لایه بیشتر باشد و وارونگی در مجاورت سطح زمین رخ دهد شدت وارونگی نیز بیشتر می شود.

در ایران نیز محققین زیادی از جمله لشکری و هدایت (۱۳۸۵: ۸۲)، به تحلیل همدیدی وارونگی‌های شدید شهر تهران، سلطانی(۱۳۸۵)، به بررسی وارونگی دمایی شهر تبریز، عظیمی(۱۳۸۷: ۱۰۵)، به ارزیابی تاثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز، علیجانی (۱۳۸۸: ۱)، بررسی الگوهای همدیدی مساعد برای رخداد وارونگی در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی، کرمپور(۱۳۹۵: ۶۴)، به بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر، طاوسی(۱۳۹۶: ۱۲۰)، به ارزیابی شاخص‌های وارونگی دمای لایه مرزی هوای شهر تهران، حسین آبادی (۱۳۹۸: ۷۱۳)، به بررسی روند وارونگی‌های دمایی کلان شهرهای ایران (تهران، مشهد و تبریز) پرداخته‌اند. عساکره و احدی (۱۳۹۹: ۳۷۵)، رابطهٔ تیپ‌های هوایی تبریز و آلودگی هوا را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد باد غالب جنوب غربی– شمال شرقی با سرعت که حاصل استقرار مرکز پُرفشار اروپا و سیبری در شمال غربی و شمال شرقی ایران است، آلودگی صنایع را به مرکز شهر هدایت می‌کند. دولتشاهی و همکاران (۱۴۰۱: ۱)، شدت وارونگی‌های بندرعباس را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ از سطح زمین تا تراز ۵۰۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حدود ۳۱/۶ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشعی، ۴/۳ درصد جبهه ای، و ۶۴/۱ درصد دیگر مربوط به وارونگی از نوع فرونشینی می‌باشد. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب‌حاره، سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می‌باشد. پدیده شرجی بخصوص در فصول گرم نیز در وقوع این پدیده در شهر بندرعباس بی تاثیر نمی باشد.

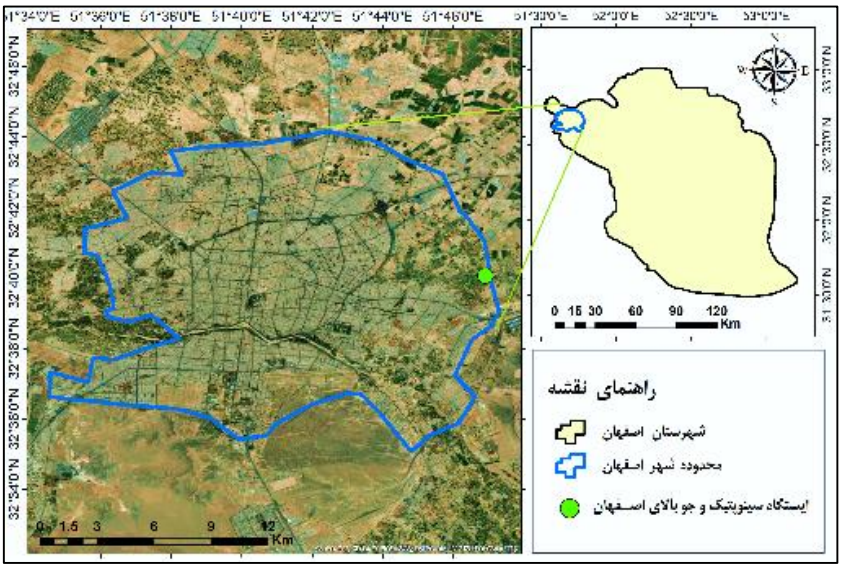
در سال ۱۳۹۹ کلانشهر اصفهان از میان شهرهای ایران، رتبه اول آلودگی هوا بین هشت کلان‌شهر ایران را دارا بود، چرا که استان اصفهان به لحاظ توپوگرافی (پستی و بلندی) و نیز اقلیمی در شرایط خوبی قرار ندارد و از شمال و شرق مورد تهدید بادهای فرسایشی است. زیرا در ماه‌های سرد سال پدیده وارونگی هوا که با هوای ساکن همراه است به آلودگی هوا کمک می‌کند و شرایط زیست اقلیمی را به خطر می‌اندازد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی شدت و فراوانی رخداد وارونگی دمایی شهر اصفهان بدلیل ویژگی‌های ناهمواری این شهرمی‌باشد تا برنامه‌ریزان شهری و مجریان نظام سلامت بتوانند برای پیشگیری از آثار مخرب وارونگی‌ها برنامه‌ریزی دقیقی ارائه دهند. در مجموع بیشتر پژوهش‌های انجام شده در مورد وارونگی بصورت آماری و برای دوره های آماری کوتاه مدت بوده است، اما پژوهش حاضر علاوه بر طول آماری بلندمدت (۱۱ ساله) انوع وارونگی را مشخص خواهد نمود و شدت وارونگی‌ها را نیز بررسی و ارتباط آن را با عناصر و عوامل اقلیمی و دو گاز آلاینده شهری مونواکسیدکربن و دی اکسیدگوگرد خواهد سنجید.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شهر اصفهان در دامنه شرقی کوه های زاگرس بر روی آبرفت زاینده رود بنا شده و طول و عرض جغرافیایی آن به ترتیب ۵۱/۴ و ۳۸/۳۲ و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۷۵ متر است. آب وهوای شهر اصفهان نیمه خشک معتدل است، به طوری که متوسط درجه حرارت سالانه این شهر ۱۶ درجه سانتیگراد می باشد. در حالی که حداکثر مطلق درجه حرارت تا ۴۱ درجه سانتیگراد و حداقل مطلق ۱۶– درجه سانتیگراد گزارش شده است. متوسط بارندگی سالانه شهر اصفهان در حدود ۱۱۵ میلیمتر و معدل تعداد روزهای یخبندان در طول سال حدود ۶۸ روز است. شهر اصفهان بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم فراخشک سرد است که در طول سال تحت حاکمیت پرفشار جنب حاره قرار دارد (اداره کل هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۹۹). شکل(۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

1 Feng
2 Dergunov and. Yakubailik
3 Dolatshahi

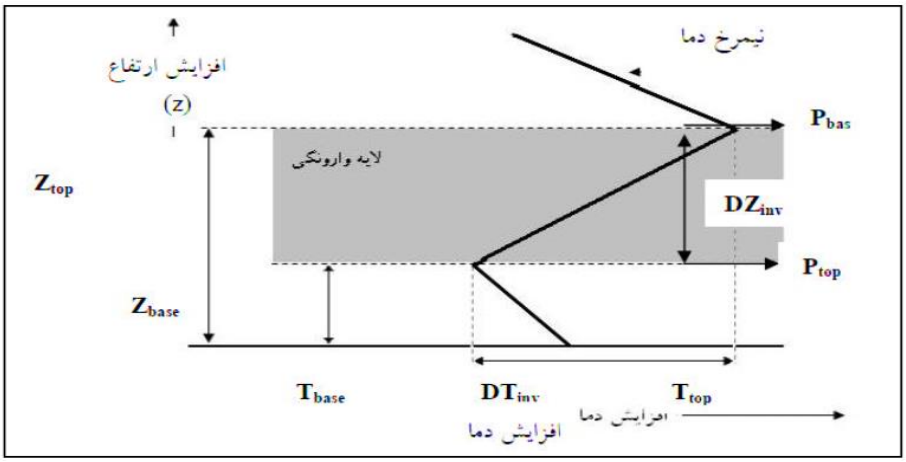


شکل(۱). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش کار

در این پژوهش داده‌های روزانه رادیوسوند جو بالای ایستگاه سینوپتیک اصفهان (جدول ۱) برای ساعت ۰۰ گرینویچ (۳/۵ محلی) طی ۱۱ سال اخیر (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (حدود ۵۰۰۰ متری از سطح زمین) از وبسایت دانشگاه وایومینگ[1] اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های مورد استفاده شامل شاخص‌های ترمودینامیکی از قبیل شاخص SI، LI، KI و TT و دمای پتانسیل هستند. همچنین داده گازهای شهری مونواکسیدکربن و دی اکسیدگوگرد از وسایت جیووانی[2] دریافت شد.

از دیگر داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های رادیوسوند شامل ارتفاع پایه وارونگی از سطح زمین به متر(Zbase)، ارتفاع راس وارونگی از سطح زمین به متر (Ztop)، مقدار دما در پایه و راس لایه وارونگی به درجه سلیسیوس(Tbase)، اختلاف دما بین پایه و راس لایه وارونگی به درجه سیلیسیوس(DTinv) اختلاف ارتفاع بین پایه و راس لایه وارونگی به متر(DZinv) و مقدار فشار در پایه(Pbase) و راس لایه وارونگی(Ptop) است که از روابط (۱ و ۲) محاسبه می شود شکل(۲).



شکل(۲). خصوصیات نیمرخ وارونگی دمای هوا

(یاکوبلیس و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۵)

1 http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
2 https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

شرایط وارونگی و انواع آن با استفاده از الگوریتم ها موجود در نرم افزار RAOB و شاخص های ترمودینامیک جو در مقیاس سالانه استخراج گردید. سپس مولفه‌های وارونگی‌ها شامل نوع، ارتفاع، ضخامت، فشار لایه، دمای پتانسیل لایه و شدت وارونگی‌ها مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت.

جدول (۱). مشخصات ایستگاه کنترل جو بالای اصفهان (فرستنده رادیوسوند)

ارتفاع	عرض	طول	ایستگاه
۱۵۷۵	۳۸/۳۲	۵۱/۴	اصفهان

ابتدا با استفاده از رابطه (۱) دمای پتانسیل سقف و کف لایه وارونگی از رابطه(۱) محاسبه شد (Retallack, 1973: 25).

$$\theta = T\left(\frac{1000}{P}\right)^{0.286}$$

رابطه(۱):

Θ : دمای پتانسیل به درجه کلوین

T : دما به کلوین

P : فشار هوا به هکتوپاسکال

پس از محاسبه دمای پتانسیل سقف و کف لایه وارونگی با استفاده از رابطه (۱) ، اقدام به محاسبه شدت وارونگی دما با استفاده از رابطه (۲) در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه نموده‌ایم.

رابطه (۲):

$$I = \frac{(\Delta\theta)^2}{3+Z(\Delta z)}$$

$\Delta\theta$ اختلاف دمای پتانسیل راس و پایه وارونگی به درجه کلوین

Δz ضخامت لایه وارونگی به متر

Z ارتفاع ایستگاه به هکتومتر

شدت وارونگی‌ها با توجه به ضرایب به دست آمده از روابط (۱ و ۲) به ۴ دسته تقسیم می‌شوند(Retallack, 1973: 26) به نقل از طاووسی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۲۶). جدول(۲).

جدول(۲). تقسیم بندی شدت وارونگی بر اساس ضریب شدت

انواع شدت وارونگی	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
ضریب شدت وارونگی(II)[1]	۰ – ۰/۰۱۰	۰/۰۱۱–۰/۰۲۰	۰/۰۲۱–۰/۰۳۰	بالای ۰/۰۳۱

روش پیش بینی

از آنجایی که داده‌های مورد استفاده سری زمانی (سال، ماه، روز) هستند، از تکنیک‌های پیش‌بینی سری‌های زمانی (Time Series Forecasting) و مدل SARIMA برای پیش بینی فصلی استفاده شد. مراحل اصلی به این صورت است:

۱. تمیز کردن داده‌ها :(Data Cleaning) بررسی مقادیر گمشده یا پرت.
۲. تحلیل روند :(Trend Analysis) بررسی اینکه آیا روند افزایشی یا کاهشی در تعداد یا شدت وارونگی‌ها وجود دارد.
۳. تحلیل فصلی :(Seasonality Analysis) شناسایی الگوهای تکراری فصلی (مثلاً وارونگی‌های شدید در زمستان).
۴. مدل‌سازی :(Modeling) استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مانند SARIMA (که هم روند و هم فصلی بودن را در نظر می‌گیرد)
۵. اعتبارسنجی و پیش‌بینی :(Validation & Forecasting) اجرای مدل روی داده‌های تاریخی و پیش‌بینی برای سال‌های آینده.

پیش‌بینی سری‌های زمانی (Time Series Forecasting)

پیش‌بینی سری‌های زمانی (Time Series Forecasting) به فرآیند استفاده از داده‌های گذشته و حال برای پیش‌بینی مقادیر آتی یک متغیر در طول زمان اطلاق می‌شود. در این نوع داده‌ها، مشاهدات به‌صورت متوالی و در فواصل زمانی منظم (روزانه، هفتگی، ماهانه، فصلی و ...)

1. Inversion Intensity

ثبت می‌شوند و همبستگی بین مشاهدات متوالی وجود دارد. هدف اصلی پیش‌بینی سری زمانی، شناسایی الگوهای پنهان در داده‌های تاریخی و استفاده از آن‌ها برای تخمین رفتار آینده سیستم است .

سری زمانی را می‌توان به‌صورت y_t تعریف کرد که در آن $t=1,2,...,T$ نشان‌دهنده زمان و y_t مقدار متغیر مورد مطالعه در لحظه t است.

مدل SARIMA

در حوزه پیش‌بینی سری‌های زمانی، مدل‌های مختلفی برای مواجهه با روندها، نوسانات و الگوهای فصلی توسعه یافته‌اند. یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین این مدل‌ها، SARIMA(Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) است که به‌طور خاص برای مدل‌سازی داده‌های دارای الگوی فصلی منظم طراحی شده است. این مدل تعمیمی از مدل ARIMA است که قادر به در نظر گرفتن همزمان مؤلفه‌های غیرفصلی و فصلی سری زمانی می‌باشد.

مدل SARIMA با نماد استاندارد زیر نمایش داده می‌شود :

SARIMA (p,d,q)(P,D,Q)m

که در آن :

p درجه مؤلفه خودرگرسیونی (AR) – تعداد وقفه‌های غیرفصلی که بر مقدار جاری تأثیر می‌گذارند .

d درجه تفاضل‌گیری غیرفصلی - تعداد دفعاتی که سری زمانی تفاضل گرفته می‌شود تا ساکن شود .

q درجه مؤلفه میانگین متحرک (MA) – تعداد وقفه‌های خطای پیش‌بینی غیرفصلی مؤثر بر مقدار جاری .

P درجه مؤلفه خودرگرسیونی فصلی - تعداد وقفه‌های فصلی (مثلاً مقادیر ۱۲ دوره قبل در داده‌های ماهانه) .

D درجه تفاضل‌گیری فصلی - تعداد دفعات تفاضل فصلی برای حذف مؤلفه فصلی غیرساکن .

Q درجه مؤلفه میانگین متحرک فصلی - تأثیر خطاهای پیش‌بینی در دوره‌های فصلی گذشته .

M طول دوره فصلی (مثلاً $m=12$ برای داده‌های ماهانه، $m=4$ برای فصلی، $m=7$ برای هفتگی)

فرم کلی مدل SARIMA را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\Phi P(B^m)\phi p(B)(1-B)^d(1-B^m)^D y_t=\Theta Q(B^m)\theta q(B)\varepsilon_t$$

- B عملگر تأخیر (Backshift) است: $By_t=y_{t-1}$
- $\phi p(B)=1-\phi_1 B-\phi_2 B^2-\cdots-\phi_p B^p$ چندجمله‌ای AR غیرفصلی
- $\theta q(B)=1+\theta_1 B+\theta_2 B^2+\cdots+\theta_q B^q$ چندجمله‌ای MA غیرفصلی
- $\Phi P(B^m)=1-\Phi_1 B^m-\Phi_2 B^{2m}-\cdots-\Phi_P B^{Pm}$ چندجمله‌ای AR فصلی
- $\Theta Q(B^m)=1+\Theta_1 B^m+\Theta_2 B^{2m}+\cdots+\Theta_Q B^{Qm}$ چندجمله‌ای MA فصلی
- $\varepsilon_t \sim WN(0,\sigma^2)$

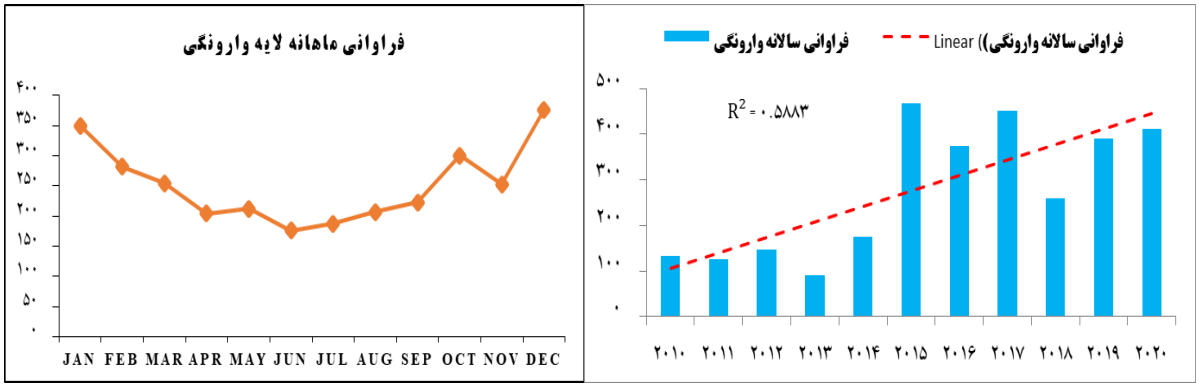
نتایج

تحلیل فراوانی لایه وارونگی

شکل(۳ الف) فراوانی سالانه وارونگی‌های ایستگاه اصفهان را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. در طی این دوره ۱۱ ساله در شهر اصفهان ۳۰۲۶ مورد انواع وارونگی در ارتفاعات مختلف به وقوع پیوسته است. با توجه به شکل(۱۱)، می‌توان گفت که میانگین وقوع پدیده وارونگی دمایی سالانه در ایستگاه اصفهان حدود ۲۷۵ مورد در سال است چرا که ممکن است در برخی از روزها در ارتفاعات مختلف وارونگی رخ نداده باشد. همچنین به طور کلی در هر ماه ۲۱ مورد وارونگی در شهر اصفهان تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی به ثبت رسیده است. در طی این دوره بیشترین فراوانی وارونگی مربوط به سال ۲۰۱۵ با ۴۶۷ مورد، و سال ۲۰۱۳ با ۹۰ وارونگی در سال کمترین فراوانی سالانه را دارا می باشند. همچنین خط روند وقوع وارونگی‌های شهر اصفهان با ضریب ۵۹ نشان از سیرصعودی شدید از سال ۲۰۱۴ به بعد نسبت به سال پایه داشته است.

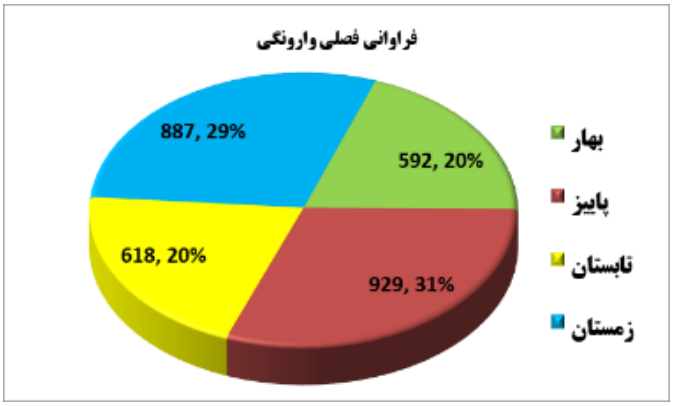
شکل(۳ب) فراوانی ماهانه وارونگی‌ها شهر اصفهان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) بیشترین فراوانی وقوع وارونگی ماهانه در شهر اصفهان مربوط به ماه سپتامبر با ۳۷۶ مورد و کمترین فراوانی نیز مربوط به ماه ژوئن با ۱۷۶ مورد وارونگی می‌باشد. همانطور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود، فراوانی ماهانه روزهای همراه با وارونگی در نیمه سرد سال بیشتر از ماهای گرم می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت که اکثر

وارونگی‌های شهر اصفهان از نوع فرونشست بوده است. دلیل وارونگی‌های شهر اصفهان در ماه‌های گرم سال نزول پرفشار جنب حاره می‌باشد. اما در ماه‌های سرد سال بدلیل بیابانی بودن اقلیم شهر اصفهان هوای سرد و سنگین در نزدیک سطح زمین تشکیل شده و مانع از صعود هوای گرم سطح شهر می‌شود و وارونگی‌ها شکل می‌گیرند. همچنین صنعتی بودن این شهر آلودگی‌ها را تشدید می‌کند. البته شرایط بادپناهی شهر اصفهان و نزول هوا در شرق کوه‌های زاگرس خود نیز شرایط منابسب وقوع وارونگی را تشدید می‌کند. همانطور که داده‌ها نشان می دهند، بیشترین تعداد وارونگی‌ها در ماه‌های سرد سال از جمله نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه و آوریل به وقوع می‌پیوندد، چرا که در این ماه‌ها ارتفاع سطح زمین تا سقف وارونگی به حداقل خود می‌رسد و از طرفی فاصله غروب تا طلوع خورشید افزایش یافته و انرژی خورشید توانایی کمتری جهت محو وارونگی خواهد داشت(کریمی و درخشان،۱۳۸۴: ۲).



شکل(۳). فراوانی سالانه و ماهانه وارونگی‌های ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شکل (۴) مجموع فراوانی فصلی وارونگی‌های شهراصفهان را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌ها، پدیده وارونگی دما در تمام فصول در شهر اصفهان طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ قابل مشاهده است. در فصل پاییز و زمستان تعداد روزهایی که پدیده وارونگی دما رخ می‌دهد به ترتیب ۳۱ و ۲۹ درصد از کل وارونگی‌ها را به خود اختصاص داده است، که علت آن می‌تواند وجود هوای سرد و سنگین در لایه‌های بالاتر و تشدید آن به علت شرایط بیابانی شهر اصفهان و جلوگیری از صعود هوای گرم ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی (وسایل نقلیه و وسایل گرما زا) است که اجازه صعود هوای گرم را به لایه های بالاتر نمی‌دهد. طی فصول گرم تابستان و بهار تعداد وارونگی نسبت کمتر شده است و به۲۰ درصد می‌رسد که علت آن فرونشست هوا زیر پرفشار جنب حاره می‌باشد. علت اینکه در فصول سرد تعداد وارونگی ها افزایش می یابد این است که در این فصول طول شب طولانی تر از مواقع دیگر است در نتیجه وارونگی توقف زیادی داشته و اثرات آن بر تشدید آلودگی بیشتر خواهد شد.



شکل(۴). فراوانی فصلی وارونگی‌های ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

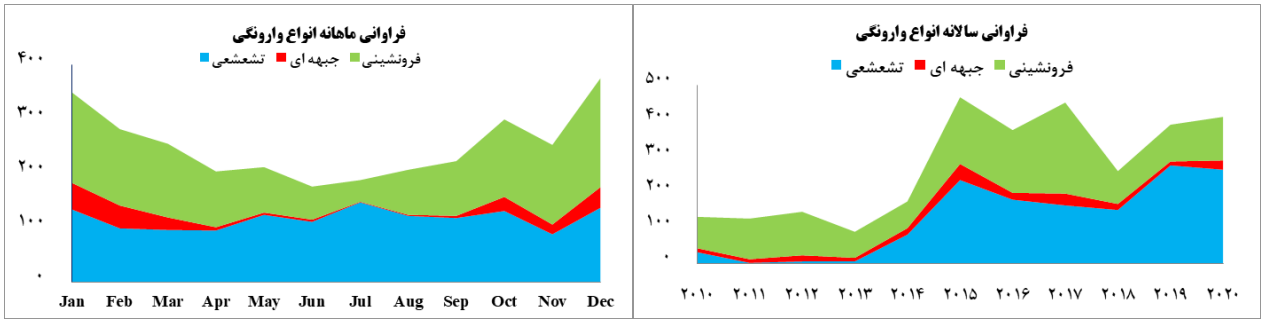
جدول (۳) فراوانی و درصد انواع وارونگی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. بررسی داده ها نشان می دهد که میانگین تعداد وقوع پدیده وارونگی دما در اصفهان برابر ۲۷۵ مورد در سال می‌باشد که حدود ۴۶ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تابشی، جبهه‌ای ۷ درصد، و ۴۷ درصد دیگر مربوط به وارونگی از نوع فرونشینی می‌باشد.

جدول(۳). نوع وارونگی، فراوانی و درصد فراوانی وارونگی‌ها در ایستگاه اصفهان

نوع وارونگی	فراوانی	درصد فراوانی
تابشی	۱۴۰۲	۴۶
جبهه ای	۲۱۷	۷
فرونشینی	۱۴۰۷	۴۷
مجموع	۳۰۲۶	۱۰۰

همچنین همان‌طوری که در شکل(۵ الف) مشاهده می‌شود سال ۲۰۱۷ با ۲۵۵ مورد بیشترین وارونگی از نوع فرونشینی، سال ۲۰۱۹ با ۲۷۶ مورد بیشترین وارونگی از نوع تابشی و سال ۲۰۱۵ با ۴۵ مورد بیشترین وارونگی جبهه‌ای رخ داده است. سال ۲۰۱۳ با ۷۳ مورد کمترین وارونگی فرونشینی، سال ۲۰۱۱ با ۳ مورد کمترین وارونگی تابشی و سال های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ با ۱۰ مورد کمترین درصد فراوانی وارونگی جبهه‌ای را دارا می‌باشند. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب‌حاره، در فصول گرم و فرونشست هوا گرم در بخش شرقی زاگرس در دامنه‌های بادپناهی که شهر اصفهان نیز در این قسمت واقع شده است در فصول سرد نیز سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می‌باشد. به تبع صنعتی بودن شهر اصفهان نیز وارونگی‌های دیگر نیز تشدید شده‌اند.

شکل(۵ ب) فراوانی ماهانه انواع وارونگی‌ها را در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل(۷) وارونگی فرونشینی با ۱۴۰۷ مورد بیشترین فراوانی و وارونگی جبهه ای با ۲۱۷ مورد کمترین نوع وارونگی را در ایستگاه اصفهان به خود اختصاص داده است. وارونگی تابشی نیز با ۱۴۰۲ مورد طی دوره مورد مطالعه در این ایستگاه به وقوع پیوسته است. بیشترین فراوانی آن در ماه اگوست با ۲۰۱ مورد و کمترین فراوانی وارونگی فرونشینی را ماه جولای با ۴۰ وارونگی به خود اختصاص داده‌اند. وارونگی نوع تابشی در مرتبه دوم بیشترین فراوانی را دارد. برای این نوع از وارونگی؛ ماه جولای با فراوانی ۱۴۷ مورد دارای بیشترین و ماه اگوست و نوامبر ۸۸ مورد وارونگی دارای کمترین فراوانی می‌باشد. بیشترین فراوانی از نوع جبهه‌ای مربوط به ماه ژانویه با ۴۹ مورد و ماه جولای با ۱ مورد کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. با توجه به شکل(۷)، در تمامی ماه‌ها حداکثر فراوانی با وارونگی نوع فرونشست می‌باشد. بطور کلی ماهای سرد تعداد وارونگی‌های فرونشست در اکثر ماه‌ها بیشتر از سایر وارونگی‌ها می‌باشد،که این مهم به توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی قرارگیری اصفهان ، و چگونگی ورود سیستم های سینوپتیک به این شهر برمی‌گردد. هوای سرد و سنگین در فصول سرد مانع از صعود هوای گرم و آلوده می‌شود.



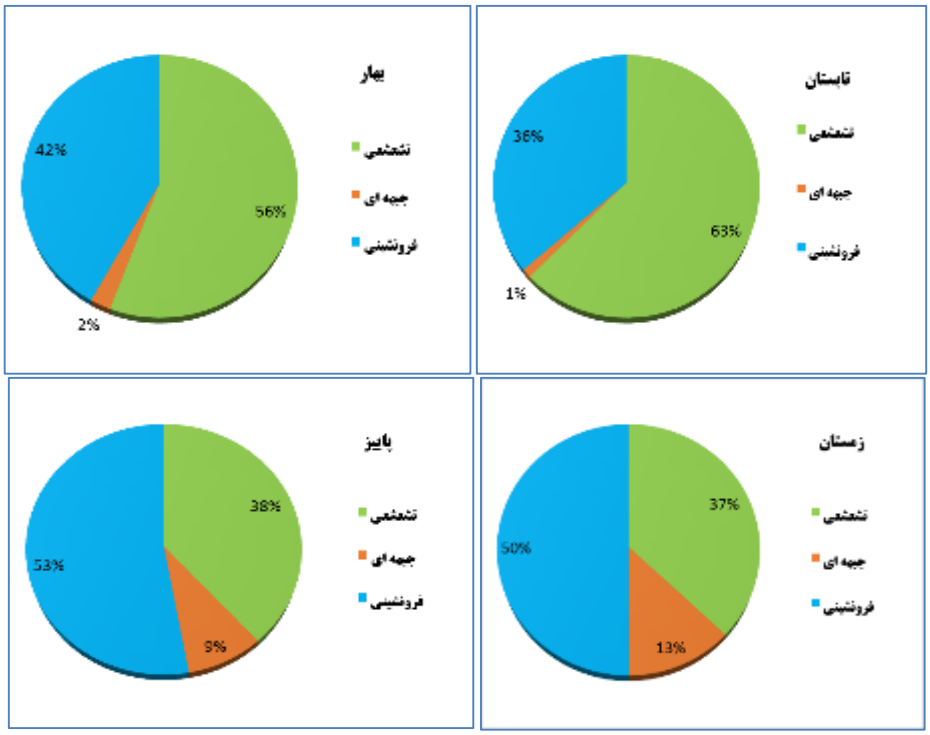
شکل(۵). فراوانی سالانه و ماهانه انواع وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

باتوجه به شکل(۶ الف) در فصل بهار سهم وارونگی از نوع فرونشینی همانند سایر فصول با ۵۶ درصد کل وارونگی‌ها در این فصل بیشتر است و وارونگی جبهه‌ای نیز با ۲ درصد کمترین سهم را بخود اختصاص داده است. با توجه به شکل (۶ ب) طی فصل تابستان همانند فصل بهار سهم وارونگی فرونشست با ۶۳ درصد بیشتر از سایر وارونگی‌هاست. در این فصل سهم وارونگی فرونشت بیشتر از فصل بهار شده است و وارونگی جبهه‌ای بدلیل گرمای هوا و یکنواخت شدن شرایط دمایی جو کاهش محسوس پیدا کرده است. با توجه به شکل(۶ج) طی فصل پاییز از نظر فراوانی و درصد همانند فصل بهار فرونشینی در رتبه نخست است و وارونگی جبهه‌ای کمترین درصد را دارا می‌باشد. با توجه به شکل (۶د) طی فصل زمستان به دلیل عبور سامانه‌ای مختلف سهم وارونگی جبهه‌ای از سایر فصول بیشتر بوده است و به ۱۳ درصد رسیده است که نسبت به سایر فصول بیشتر به وقوع پیوسته است. در این فصل همانند فصول دیگر سهم وارونگی‌های فرونشینی با ۵۰ درصد بیشتر است و تشعشعی نیر با ۳۷ درصد در رتبه بعدی قرار دارد. جدول(۴).

بطور کلی می توان گفت که در شهر اصفهان در فصول گرم سال سهم وارونگی‌های نوع تابشی بدلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره و افزایش دمای سطح زمین بیشتر از دیگر وارونگی هاست. در فصول سرد سال فرونشست هوای سرد سنگین و هم به علت فرونشست هوای گرم دامنه های بادپناه زاگرس سهم وارونگی های فرونشست را افزایش می‌دهد.

جدول(۴). مجموع فصلی انواع وارونگی در ایستگاه اصفهان

فصل	تابشی	جبهه ای	فرونشینی
بهار	۳۳۰	۱۴	۲۴۸
تابستان	۳۸۷	۷	۲۲۴
پاییز	۳۵۶	۸۲	۴۹۱
زمستان	۳۲۹	۱۱۴	۴۴۴
مجموع	۱۴۰۲	۲۱۷	۱۴۰۷



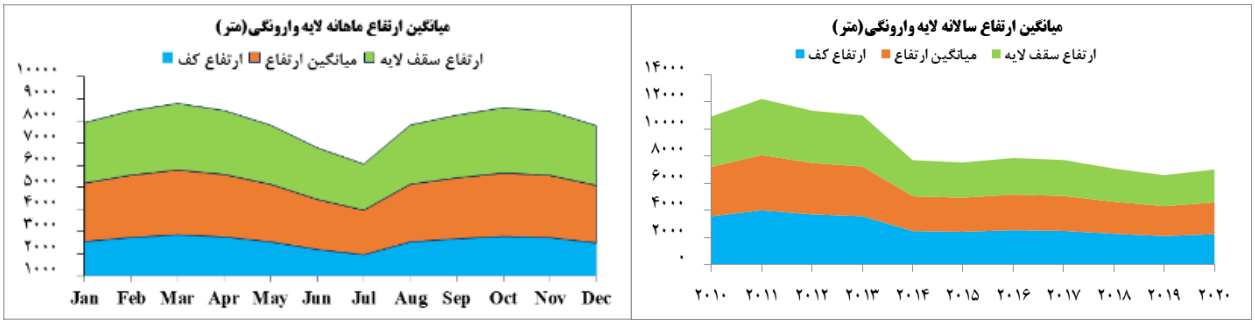
شکل(۶). فراوانی فصلی انواع وارونگی‌ها ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

ارتفاع لایه وارونگی

شکل(۷الف) میانگین ارتفاع سالانه وارونگی‌ها را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل در سال ۲۰۱۱ وارونگی‌ها در بلندمدت با میانگین ارتفاع ۴۰۶۷ متر در بالاترین ارتفاع قرار دارند و سال ۲۰۱۹ وارونگی‌ها در میانگین ارتفاع ۲۱۹۶/۹ متر کمترین ارتفاع از سطح زمین شکل گرفته‌اند. با توجه به شکل(۷الف) از سال ۲۰۱۱ ارتفاع شکل‌گیری وارونگی‌ها روند کاهشی داشته است،که این روند از سال ۲۰۱۳ به بعد شدیدتر شده است و وارونگی‌ها در ارتفاع پایین‌تری به وقوع پیوسته اند. چرا که با وقوع تغییر اقلیم مراکز فرونشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره نیز قوی‌تر شده و در ارتفاع کمتری از سطح زمین شکل گرفته‌اند، در نتیجه وارونگی در اصفهان نیز در ارتفاع کمتری شکل گرفته است. این علت باعث می‌شود که وارونگی‌ها شدیدتر شده و بر کیفیت هوای شهر اصفهان تاثیر منفی بگذارد.

شکل(۷ب) میانگین ارتفاع ماهانه وارونگی های شهر اصفهان را در سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. حداکثر میانگین ماهانه ارتفاع شکل‌گیری وارونگی در بین سال‌های مورد مطالعه مربوط به ماه مارس با ارتفاع ۲۹۳۱/۷ متر می‌باشد و حداقل میانگین ارتفاع ماهانه شکل‌گیری وارونگی‌های اصفهان به جولای با ارتفاع ۲۰۱۸ متر اختصاص دارد. بجز ماه جولای، ارتفاع شکل‌گیری وارونگی در سایر ماه‌ها تقریبا اختلاف بسیار ناچیزی دارد و سطح شکل‌گیری لایه وارونگی در کلیه‌ی ماه‌ها نزدیک به هم می‌باشد. روند ارتفاع ماهانه نشان می‌دهد، میانگین ارتفاع تشکیل لایه وارونگی‌های اصفهان از ماه مارس تا جولای روند کاهشی داشته، و از اواخر جولای روند افزایشی پیدا می‌کند و

این افزایش تا پایان ماه مارس ادامه دارد. طبق داده‌ها در اواسط پاییز پرفشار جنب حاره به عرض های پایینتر عقب نشینی کرده و کف آن به ارتفاعات بالاتر نقل مکان می‌کند. بنابراین در فصول سرد ارتفاع و تشکیل وارونگی‌ها بالاتر از سطح زمین است. در فصول پاییز و زمستان استیلای پرفشار جنب حاره به پایان می‌رسد و کف آن به ارتفاعات بالاتر منتقل می‌شود و بیشتر وارونگی‌های این فصول از نوع فرونشینی می‌باشد زیرا این وارونگی در ارتفاع بالاتری از سطح زمین شکل می‌گیرد. اما حداقل ارتفاع شکل‌گیری لایه وارونگی نیز در فصل تابستان با میانگین ارتفاع ۲۴۸۱/۳ متر به وقوع پیوسته اند که نشان دهنده استیلای پرفشار جنب حاره در فصول گرم و افزایش نوع وارونگی تشعشعی است.

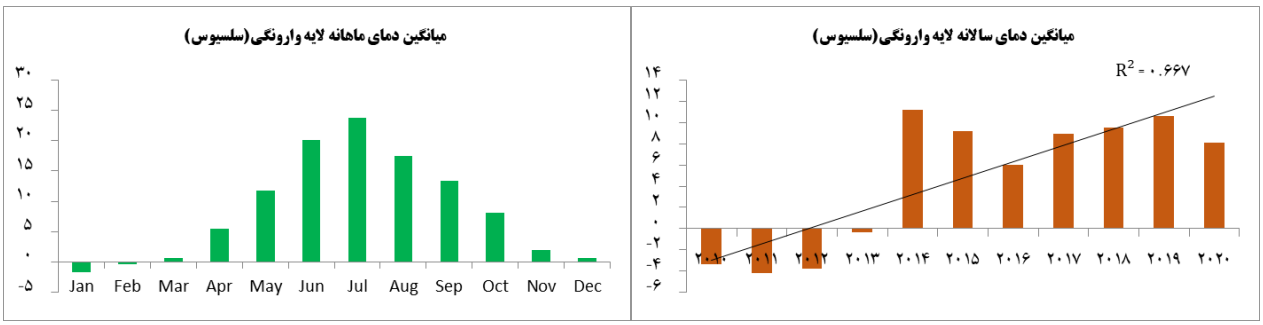


شکل(۷). میانگین ارتفاع سالانه و ماهانه وارونگی‌ها ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

دمای لایه وارونگی

شکل(۸الف) میانگین دمای سالانه لایه‌های وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. براساس داده‌های دما، بیشترین دمای لایه‌های وارونگی در شهر اصفهان با ۱۱/۲ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۴ ثبت شده است. کمترین دمای لایه وارونگی‌های دوره مورد مطالعه با ۴/۲- درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۱ به ثبت رسیده است. روند دمای لایه وارونگی با شدت گرفتن تغییرات اقلیمی و کاهش ارتفاع تشکیل وارونگی ها افزایش پیدا کرده است، بطوری که تا سال ۲۰۱۳ میانگین بلندمدت وارونگی‌ها در شهر اصفهان بخصوص وارونگی‌هایی که در فصول سرد رخ داده است زیر صفر می‌باشد و وارونگی‌ها در ارتفاع بالاتر رخ می‌دادند، ولی در سال‌های اخیر وارونگی‌ها در نزدیک سطح زمین بیشتر شکل گرفته‌اند.

شکل(۸ب) میانگین دمای ماهانه لایه‌های وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. براساس داده‌های دما، میانگین بلندمدت دمای ماهانه لایه‌های وارونگی در شهر اصفهان در ماه‌های گرم بیشتر از ماه های سرد سال است چرا که این قضیه ناشی از ارتباط مستقیم دما وکاهش ارتفاع تشکیل لایه وارونگی و در ماه‌های گرم سال می‌باشد، همچنین در ماه‌های گرم سال بیشتر وارونگی‌ها از نوع تابشی می‌باشند، که در نزدیک سطح زمین شکل گرفته و به منبع گرمای خود نزدیک‌تر می‌باشند. اما در فصل سرد بیشتر از نوع فرونشینی و در ارتفاع بالاتر تشکیل شده‌اند. در شکل(۸ب) ماه‌های جولای دمای لایه وارونگی با ۲۳/۸ درجه سانتی گراد بیشترین مقدار و ماه ژانویه با ۱/۶- درجه کمترین دما را به خود اختصاص داده اند. در ماه های سرد وارونگی‌ها شدت چندانی نداشته‌اند.

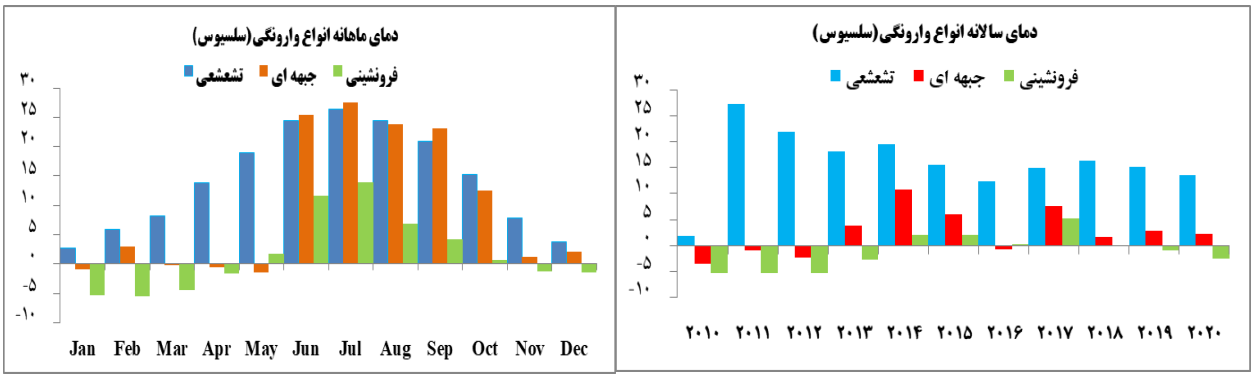


شکل(۸). میانگین دمای سالانه و ماهانه لایه‌های وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شکل(۹الف) میانگین دمای سالانه انواع وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. براساس داده‌های دمایی لایه‌های وارونگی شهر اصفهان، بیشترین دمای وارونگی نوع فرونشینی را سال ۲۰۱۷ با دمای ۵/۲ درجه سانتی‌گراد دارا می‌باشد. کمترین دمای لایه وارونگی نوع فرونشینی نیز در سال ۲۰۱۲ به مقدار ۵/۴- درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است. دما در لایه وارونگی نوع تابشی در سال ۲۰۱۱ با ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و کمترین میزان دما در این نوع وارونگی مربوط به

سال ۲۰۱۰ با ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین دمای وارونگی نوع جبهه‌ای در بین سال‌های مورد مطالعه در سال ۲۰۱۴ با ۱۰/۸ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار دمای لایه در این نوع وارونگی در سال ۲۰۱۰ با۳/۵- درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است. در کل وارونگی نوع تابشی بدلیل اینکه نزدیک سطح زمین رخ می‌دهند دارای دمای بیشتری از سایر وارونگی‌ها می باشند.

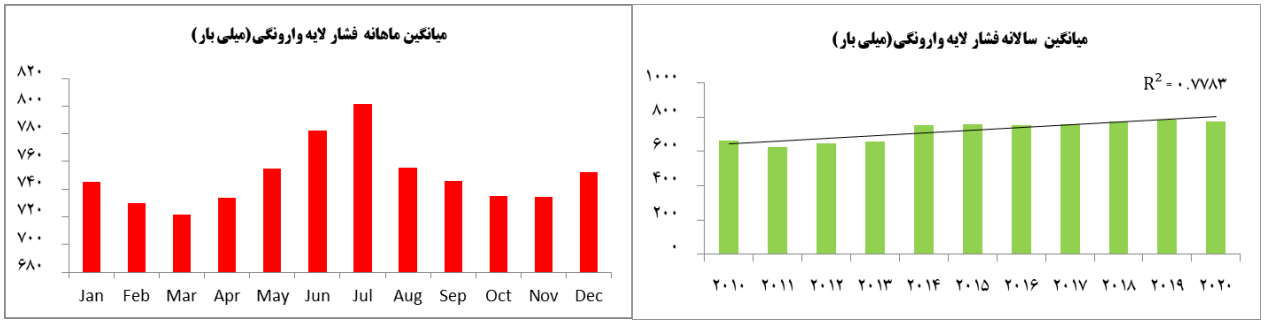
شکل(۹ ب) میانگین دمای ماهانه در لایه انواع وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در ماه‌های گرم سال دمای لایه وارونگی به تبع افزایش دما افزایش یافته است. با این تفاوت که دمای لایه وارونگی تابشی در تمام ماه‌ها مثبت بوده است که دلیل تشکیل آن در نزدیکی به سطح زمین و دریافت انرژی از سطح زمین می‌باشد.لایه وارونگی فرونشست و جبهه‌ای بدلیل تشکیل در ارتفاعات بالاتر از سطح زمین در برخی از ماه های سرد دمای زیر صفر را نیز تجربه کرده‌اند.



شکل(۹). میانگین دمای سالانه و ماهانه انواع وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

فشار لایه وارونگی

شکل(۱۰الف) میانگین فشار سالانه لایه‌های وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلند مدت(۲۰۱۰-۲۰۲۰) بطور کلی میانگین بلندمدت فشار لایه‌های وارونگی (فشار لایه یعنی میانگین فشار کف و سقف وارونگی) شهر اصفهان۷۲۳/۸ میلی‌بار می‌باشد. در این میان بیشترین فشار در لایه‌های وارونگی در سال ۲۰۱۹ با ۷۸۶/۸ میلی‌بار و کمترین میزان فشار لایه وارونگی در سال ۲۰۱۱ با ۶۲۷ میلی‌بار طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. همانطور که شکل(۱۰الف) نشان می‌دهد، میانگین فشار و دمای سالانه ارتباط مثبت بالایی با یکدیگر دارند بطوری که با افزایش دما، فشار لایه وارونگی نیز افزایش داشته است. همچنین با توجه به کاهش ارتفاع تشکیل لایه وارونگی و نزدیک شدن به سطح زمین بر دما و فشار افزوده شده است. علیجانی و همکاران(۱۳۹۸: ۳۵) در مطالعه‌ای دریافتند که طی سالهای اخیر در اثر تغییرات اقلیمی، پرفشار جنب حاره از نظر شدت و گستردگی رشد داشته است، بنابراین می توان علت افزایش فشار در لایه واورنگی را ناشی از افزایش دمای کره زمین دانست. شکل(۱۰ب) میانگین بلندمدت فشار ماهانه لایه‌های وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌ها (۲۰۱۰-۲۰۲۰) بطورکلی میانگین بلندمدت فشار ماهانه لایه‌های وارونگی (فشار لایه یعنی میانگین فشار کف و سقف وارونگی) شهر اصفهان ۷۴۹/۴ میلی‌بار می‌باشد. در این میان بیشترین فشار در لایه‌های وارونگی در ماه جولای با ۸۰۱/۶ میلی‌بار و کمترین میزان فشار لایه وارونگی در ماه مارس با ۷۲۱/۴ میلی‌بار طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. در ماه‌های گرم سال فشار لایه‌های وارونگی به دلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره بیشتر از ماه‌های سرد سال می‌باشد.

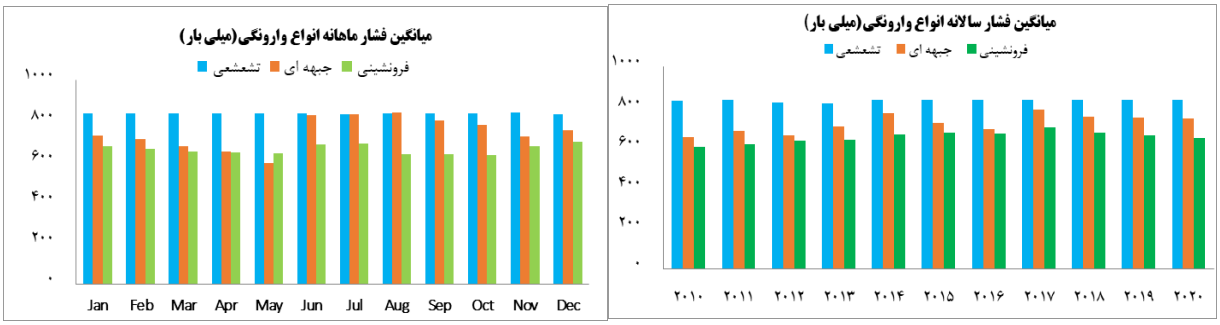


شکل(۱۰). میانگین فشار سالانه و ماهانه لایه‌های وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شکل(۱۱ الف) میانگین بلندمدت فشار سالانه انواع وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی داده‌ها بطور کلی میانگین بلندمدت فشار سالانه انواع وارونگی (فشار لایه یعنی میانگین فشار کف و سقف وارونگی) شهر اصفهان۱ /۷۲۳ میلی‌بار می‌باشد. در این میان بیشترین فشار در

لایه‌های وارونگی در وارونگی نوع تابشی با ۸۳۳/۳ میلی‌بار و کمترین میزان فشار لایه وارونگی در وارونگی نوع فرونشینی با میانگین با ۶۵۳/۸ میلی‌بار طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. سال ۲۰۱۱ با فشار ۸۳۷/۷ میلی‌بار بیشترین فشار مربوط به وارونگی نوع تابشی و سال ۲۰۱۳ با فشار ۸۱۹ میلی‌بار کمترین فشار را دارا می‌باشد. سال ۲۰۱۷ با فشار ۷۹۰/۷ میلی‌بار بیشترین و سال ۲۰۱۰ با فشار ۶۵۲ میلی‌بار کمترین میزان فشار مربوط به وارونگی نوع جبهه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ به ترتیب با ۶۰۲/۷ و ۷۰۲ میلی‌بار بیشترین و کمترین فشار وارونگی نوع فرونشینی را دارند.بطور کلی فشار انواع وارونگی با شیب ملایم در حال افزایش می باشد.

شکل(۱۱ب) میانگین بلندمدت فشار ماهانه انواع وارونگی را نشان می‌دهد. بطورکلی میانگین بلندمدت فشار ماهانه انواع وارونگی (فشار لایه یعنی میانگین فشار کف و سقف وارونگی) شهر اصفهان۴ /۷۴۹ میلی‌بار می‌باشد. در این میان بیشترین فشار ماهانه در لایه‌های وارونگی در ماه جولای با ۸۰۱/۶ میلی‌بار و کمترین میزان فشار لایه وارونگی در ماه مارس با میانگین با ۷۲۱/۴ میلی‌بار طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. ماه دسامبر و نوامبر با فشار۸۳۹ میلی‌بار بیشترین فشار مربوط به وارونگی نوع تشعشعی و ماه جولای با فشار ۸۳۲/۲ میلی‌بار کمترین فشار را دارا می‌باشد. ماه آگوست با ۸۳۹ میلی‌بار دارای بیشترین مقدار فشار و ماه مارس با ۵۹۴ میلی‌بار کمترین میزان فشار مربوط به وارونگی نوع جبهه‌ای را به خود اختصاص داده اند. ماه دسامبر با فشار ۶۹۶ و ماه اکتبر با ۶۳۱/۷ بیشترین و کمترین فشار وارونگی نوع فرونشینی را دارند. روند فشار ماهانه لایه وارونگی با یک شیب ملایم همانند فشار سالانه در حال افزایش می‌باشد.

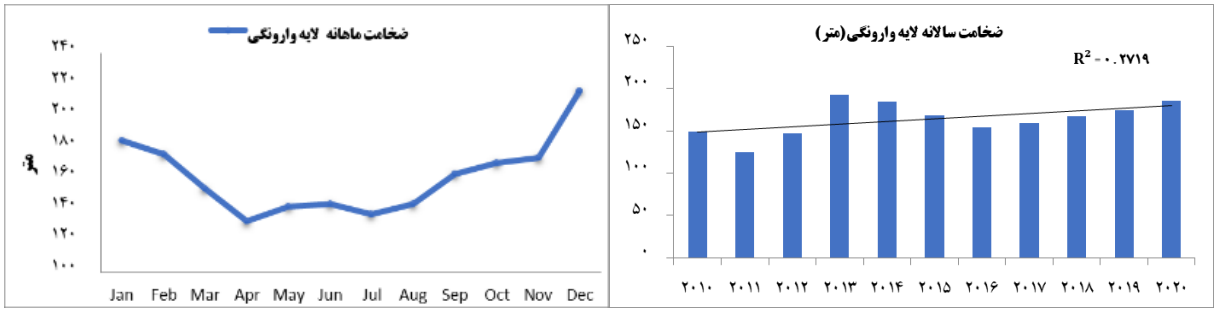


شکل(۱۱). میانگین فشار سالانه و ماهانه انواع وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

ضخامت لایه وارونگی

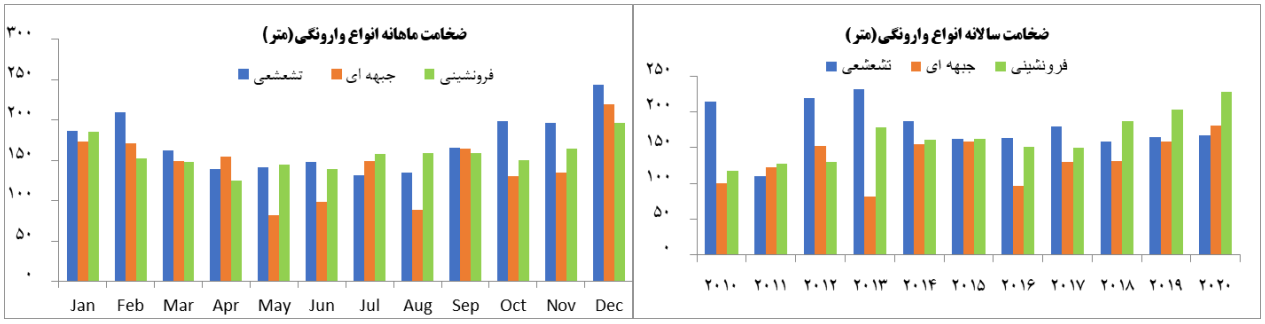
شکل(۱۲الف) میانگین ضخامت سالانه لایه‌های وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلند مدت(۲۰۱۰–۲۰۲۰) ضخامت لایه‌های وارونگی (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف وارونگی از سقف وارونگی) شهر اصفهان ۱۶۴/۴ متر می‌باشد. در این میان ضخیم‌ترین لایه‌های وارونگی در سال ۲۰۱۳ با ۱۹۲/۷متر ، و کمترین میزان ضخامت لایه وارونگی در شهر اصفهان در سال ۲۰۱۱ با ۱۲۵ متر طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. همانطور که روند داده‌ها نشان می‌دهد، با توجه به ارتباط بالای دما با فشار و ضخامت، طی سال‌های اخیر با افزایش دمای هوا، ضخامت لایه وارونگی نیز افزایش داشته است. چرا که با افزایش دما، ضخامت لایه وارونگی فضای بیشتری از جو نزدیک به زمین را اشغال می‌کند و آلودگی‌ها فضای عمودی بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

شکل(۱۲ب) میانگین ضخامت ماهانه لایه‌های وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلندمدت (۲۰۱۰–۲۰۲۰) ضخامت ماهانه لایه‌های وارونگی شهر اصفهان ۱۶۱/۲ متر می‌باشد. در این میان ضخیم‌ترین لایه‌های وارونگی در ماه دسامبر با ۲۱۶ متر و کمترین میزان ضخامت لایه وارونگی در شهر اصفهان در ماه آوریل با ۱۳۲/۶ متر طی دوره مورد مطالعه شکل گرفته است. از ماه آوریل تا آخر دسامبر به تدریج بر ضخامت لایه وارونگی افزده می‌شود ولی از اواخر پاییز روند کاهش ضخامت سرعت می‌گیرد. همانطوری که شکل (۱۲ب) نشان می‌دهد در ماه‌های گرم سال ضخامت لایه وارونگی تقریبا نزدیک به هم می‌باشد و بر عکس میانگین سالانه در این ماه‌ها ضخامت با ارتفاع ماهانه ارتباط چندانی ندارد. این امر نشان می‌دهد که عوامل ریز اقلیم تاثیر زیادی بر ضخامت وارونگی‌ها بصورت ماهانه دارند. ضخامت لایه وارونگی در ماه‌های گرم کمتر از ماه‌های سرد بوده است، چرا که در ماه‌های گرم، دما و فشار بدلیل حاکمیت پرفشار جنب‌حاره بیشتر از ماه‌های سرد است و کف پرفشار به سطح زمین نزدیک است در نتیجه بیشتر وارونگی‌ها نیز از نوع تابشی شکل می گیرند.



شکل(۱۲). ضخامت سالانه و ماهانه لایه‌های وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شکل(الف۱۳) میانگین ضخامت سالانه انواع وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلندمدت(۲۰۱۰–۲۰۲۰) میانگین ضخامت لایه‌های وارونگی (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف وارونگی از سقف وارونگی) در شهر اصفهان ۱۶۴ متر می‌باشد. مقدار ضخامت لایه‌های وارونگی از نوع تشعشعی با ۱۷۸/۱ متر و جبهه ای با ۱۳۳/۶ متر ضخیم‌ترین و نازک‌ترین لایه‌های وارونگی در شهر اصفهان را شکل داده‌اند. لایه وارونگی فرونشینی نیز در این مدت با میانگین ۱۶۳/۲ متر تشکیل شده است. همانطور که در شکل(۱۳ب) مشاهده می‌شود، وارونگی تابشی که در شهر اصفهان رخ می‌دهد اکثراً در ارتفاع کمی از سطح زمین رخ می‌دهد اما بیشترین ضخامت را هم دارند. شکل(۱۳ب) میانگین ضخامت ماهانه انواع وارونگی را نشان می‌دهد. بطور کلی میانگین ضخامت ماهانه لایه‌های وارونگی (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف وارونگی از سقف وارونگی) شهر اصفهان ۱۶۱/۲ متر می‌باشد. مقدار ضخامت لایه‌های وارونگی از نوع تشعشعی با ۱۷۸/۱ متر و جبهه ای با ۱۳۳/۶ متر ضخیم‌ترین و نازک‌ترین لایه‌های وارونگی را تشکیل داده‌اند. لایه وارونگی فرونشینی نیز در این مدت با میانگین ۱۶۳/۲ متر تشکیل شده است. همانطور که در شکل (۱۳ب) مشاهده می‌شود، وارونگی تابشی که در شهر اصفهان رخ می‌دهد اکثرا درارتفاع کمی از سطح زمین رخ می‌دهد ولی بیشترین ضخامت را هم دارند. در هر ۳ نوع وارونگی در ماه‌های گرم سال ضخامت کمتر از ماه‌های سرد سال است. در نتیجه آلودگی بیشتری با شدت و غلظت بیشتری در فضای کمتری منتشر می‌شود و سلامتی انسان‌ها و سایر جانداران را به مخاطره می اندازد. اما وارونگی‌ها ماه‌های سرد در ارتفاع بالاتری شکل می‌گیرند، در نتیجه دمای این لایه‌ها کمتر، فشار کمتر و ضخامت آنها بیشتر است و نتیجتاً غلظت آلودگی کمتر است. اما وارونگی‌هایی که در فصل سرد در ارتفاع پایین‌تر شکل می‌گیرند غلظت بالایی دارند.



شکل(۱۳). ضخامت سالانه و ماهانه انواع وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شدت لایه وارونگی

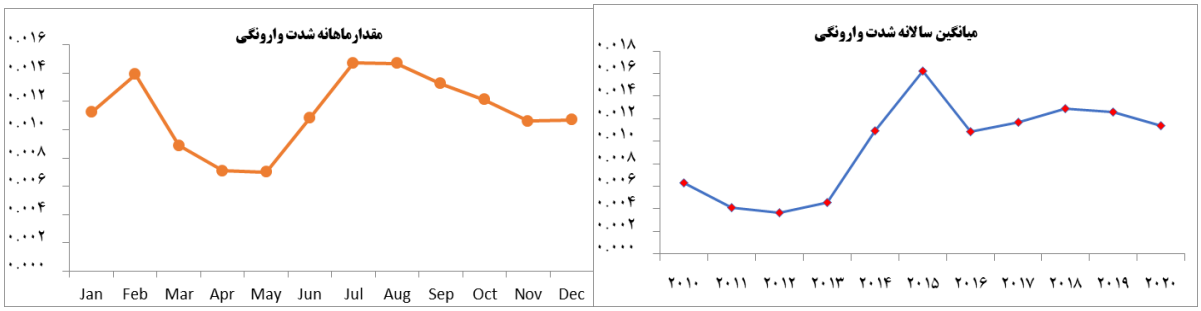
جدول (۵) فراوانی رتبه شدت انواع وارونگی را نشان می‌دهد. براساس جدول(۷) از مجموع کل وارونگی‌های(۳۰۲۶مورد) شکل گرفته در طول دوره مورد مطالعه در شهر اصفهان، ۱۹۳۷ مورد(۶۴ درصد) و میانگین ضریب ۰/۰۰۴ از وارونگی‌ها ضعیف بوده‌اند و کمترین میزان نیز با ۲۲۳مورد (۰/۷ درصد) با میانگین ضریب ۰/۰۲۵ به صورت شدید رخ داده‌اند. در این میان شدیدترین وارونگی‌ها از نوع تابشی با ۱۴۰۲ مورد و میانگین ضریب ۰/۰۲۳ و ضعیف‌ترین وارونگی‌ها نیز با ۱۴۰۷ مورد و از نوع جبهه‌ای با میانگین ضریب ۰/۰۱۹ بوده است.

جدول(۵). ضریب شدت و فراوانی انواع وارونگی ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

ضریب شدت	فراوانی	فرونشینی		جبهه ای		تابشی		رتبه
		ضریب شدت	فراوانی	ضریب شدت	فراوانی	ضریب شدت	فراوانی	
۰.۰۴۶	۲۴۳	۰.۰۳۵	۳۱	۰.۰۳۵	۳۰	۰.۰۴۵	۱۸۲	بسیار شدید
۰.۰۲۵	۲۲۳	۰.۰۲۵	۴۸	۰.۰۲۶	۱۳	۰.۰۲۵	۱۶۲	شدید
۰.۰۰۴	۱۹۳۷	۰.۰۰۳	۱۲۱۹	۰.۰۰۳	۱۴۳	۰.۰۰۶	۵۷۵	ضعیف
۰.۰۱۵	۶۲۳	۰.۰۱۵	۱۰۹	۰.۰۱۵	۳۱	۰.۰۱۵	۴۸۳	متوسط
۰.۰۲۳	۳۰۲۶	۰.۰۲۰	۱۴۰۷	۰.۰۱۹	۲۱۷	۰.۰۲۳	۱۴۰۲	مجموع/میانگین

شکل(۱۴ب) میانگین سالانه شدت وارونگی‌ها را در ایستگاه اصفهان نشان می‌دهد. با توجه به شکل(۲۳) بیشترین مقدار ضریب شدت وارونگی مربوط به سال ۲۰۱۵ با ضریب شدت ۰/۰۱۶ و کمترین شدت را سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با ضریب شدت ۰/۰۰۴ به وقوع پیوسته است. با توجه به شکل روند شدت از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ نسبت به سال پایه کاهش پیدا کرده است اما از سال ۲۰۱۴ این روند سیر صعودی شدیدی پیدا می‌کند بطوری که در سال ۲۰۱۵ به اوج خود می‌رسد. از سال ۲۰۱۵ به بعد روند شدت وارونگی ها نزولی می‌شود و این روند تا سال ۲۰۲۰ ادامه دارد. در سال‌های اخیر با افزایش دمای هوا و تغییر اقلیم شدت نیز افزایش داشته است. شدت وارونگی نیز تابعی از دما و ضخامت می‌باشد. بنابراین طی سال‌های اخیر با افزایش دما، فشار و ضخامت مقادیر شدت نیز افزایش یافته است.

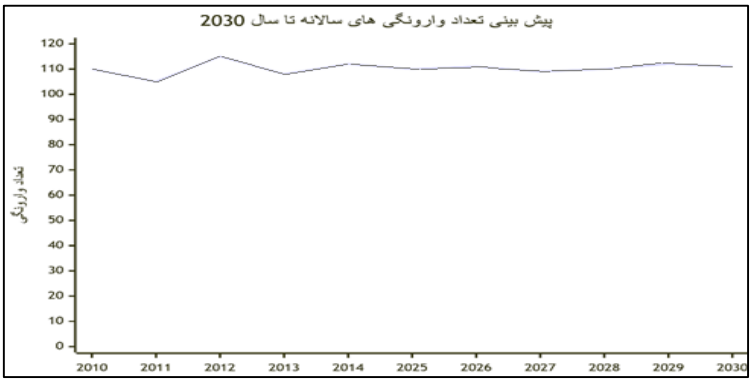
شکل(۱۴ب) میانگین ماهانه شدت وارونگی‌ها را در ایستگاه اصفهان نشان می‌دهد. با توجه به شکل شدیدترین وارونگی‌ها در ماه‌های گرم سال در شهر اصفهان رخ داده است بطوری که از ماه می تا اکتبر روند رشد شدت سریعتر بوده است از اکتبر تا آوریل روند شدت منفی بوده است که این امر نتیجه همبستگی بالای بین شدت وارونگی با عناصر دما ضخامت و فشار لایه وارونگی می‌باشد. چرا که وارونگی‌های شکل گرفته در ماه‌های سرد دارای ارتفاع بالاتر، غلظت کمتر، فشار کمتر و دمای کمتر می‌باشد در نتیجه شدت آنها کمتر می‌باشد.



شکل(۱۴). میانگین سالانه و ماهانه شدت وارونگی‌ها ایستگاه اصفهان طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

پیش بینی وارونگی ها

نتایج حاصل از مدل های رگرسیونی شکل(۱۵) و جدول (۶) نشان داد که الگوی اصلی برای فراوانی وارونگی ها در شهر اصفهان هنچنان ادامه خواهد داشت. بر اساس این تحلیل، الگوی فصلی قوی وارونگی‌ها در اصفهان حداقل تا سال ۲۰۳۰ ادامه خواهد داشت. همچنین ثبات در تعداد انتظار نمی‌رود بلکه تعداد کل وارونگی‌ها در سال به طور چشمگیری افزایش یا کاهش یابد. نوسانات حول یک میانگین ثابت (حدود۱۱۰ رویداد در سال) خواهد بود. نتایج نشان داد فصل زمستان از نظر فراوانی وارونگی همچنان بحرانی باقی می‌ماند. ماه‌های دی و بهمن کماکان بحرانی‌ترین دوره از نظر تعداد و شدت وارونگی‌ها خواهند بود که پیامد مستقیمی بر آلودگی هوای اصفهان دارد.



شکل(۱۵).پیش‌بینی روند فراوانی سالانه وارونگی تا سال ۲۰۳۰

جدول(۶).پیش‌بینی درصد فراوانی فصلی وارونگی تا سال ۲۰۳۰

فصل	درصد تقریبی از کل وارونگی‌های سالانه	توضیح
زمستان	~45%	کماکان اوج وارونگی‌ها خواهد بود.
پاییز	~30%	فصل شروع و افزایش قابل توجه.
بهار	~20%	فصل کاهش تدریجی.
تابستان	~5%	کمترین احتمال وقوع.

همچنی در ادامه **تعداد رویدادهای بسیار شدید** در سال را پیش‌بینی شد. که نتایج آن به شرح جدول(۷) و شکل(۱۶) است:

ثبات نسبی: مانند تعداد، **میانگین شدت** وارونگی‌ها نیز روند افزایشی یا کاهشی چشمگیری **نخواهد داشت** و حول یک مقدار ثابت نوسان می‌کند.

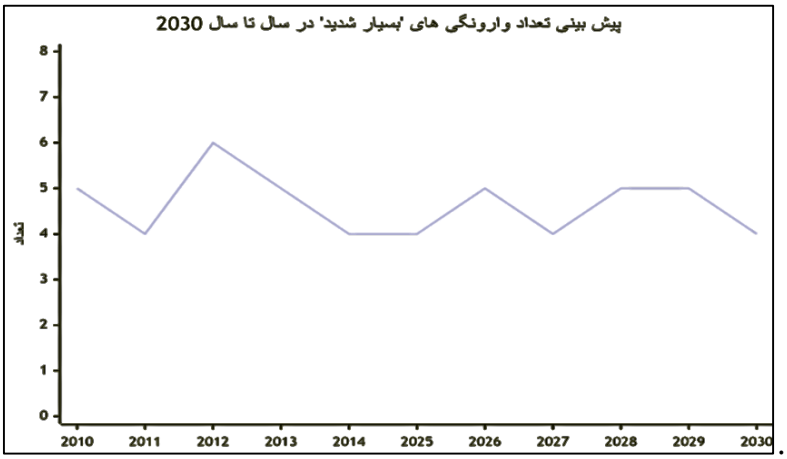
تداوم خطر رویدادهای شدید: مهم‌ترین نتیجه این است که **تعداد وارونگی‌های "بسیار شدید" کماکان پایدار و قابل توجه پیش‌بینی می‌شود** (حدود ۴ تا ۶ رویداد در سال).

پیامد برای آلودگی هوا: این بدان معناست که **پتانسیل ایجاد روزهای بسیار آلوده**، به ویژه در **زمستان**، حداقل تا سال ۲۰۳۰ به قوت خود باقی خواهد ماند. این وارونگی‌های بسیار شدید مانند یک "درپوش" عمل می‌کنند و اجازه خروج آلاینده‌ها را نمی‌دهند.

نیاز به برنامه‌ریزی: این پیش‌بینی‌ها هشدار واضحی برای ادامه و حتی تقویت **برنامه‌های کاهش آلودگی هوا** (مثل محدودیت ترافیک، کنترل صنایع، توسعه فضای سبز) در روزهای پیش‌بینی‌شده وقوع وارونگی‌های شدید است.

جدول(۷).پیش‌بینی سالانه تعداد وارونگی "بسیار شدید تا سال ۲۰۳۰

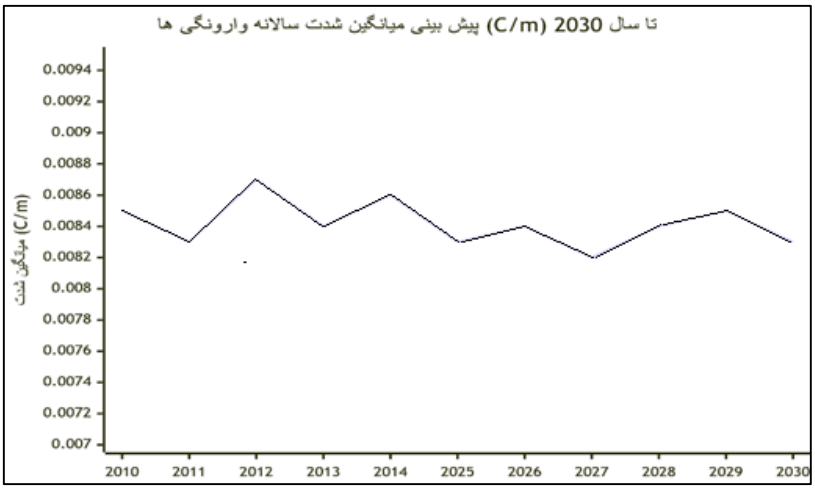
وضعیت	پیش‌بینی تعداد وارونگی "بسیار شدید"	سال
ثبات	۴	**۲۰۲۵**
ثبات	۵	**۲۰۲۶**
ثبات	۴	**۲۰۲۷**
ثبات	۵	**۲۰۲۸**
ثبات	۴	**۲۰۲۹**
ثبات	**۴**	**۲۰۳۰**



شکل(۱۶).پیش‌بینی روند فراوانی سالانه وارونگی های بسیارشدید تا سال ۲۰۳۰

پیش‌بینی روند شدت وارونگی تا سال ۲۰۳۰

در (شکل(۱۷) ، پیش‌بینی میانگین شدت سالانه وارونگی‌ها را تا سال ۲۰۳۰ مشاهده می‌کنید. این مدل میانگین مقادیر شدت وارونگی را برای هر سال پیش‌بینی کرده است. با توجه به این شکل میانگین شدت با روند نسبتا نزولی همراه خواهد بود.



شکل(۱۷).نمودار میانگین پیش‌بینی شده شدت سالانه

پیش‌بینی توزیع فراوانی سالانه هر دسته تا سال ۲۰۳۰

در جدول (۸)، پیش‌بینی شد که بطور متوسط در یک سال معمولی چند مورد از هر نوع وارونگی رخ خواهد داد. این اعداد بر اساس مدل‌سازی الگوهای تاریخی محاسبه شده‌اند. بر اساس این جدول بیشترین مورد در آینده نیز از نوع وارونگی ضعیف در حدود ۷۸ درصد خواهد بود و وارونگی های شدید تا بسیار شدید در مجموع حدود ۸ درصد کل واورنگی ها را بخود اختصاص خواهد داد.

جدول(۸). پیش‌بینی میانگین سالانه هر دسته از وارونگی‌ها تا سال ۲۰۳۰

دسته شدت	پیش‌بینی تعداد در سال	درصد از کل	رنگ (نمادین)
ضعیف	مورد ۹۰ - ۸۵	~۷۸%	●
متوسط	مورد ۱۸ - ۱۵	~۱۴%	●
شدید	مورد ۷ - ۵	~۵%	●
بسیار شدید	مورد ۵ - ۴	~۳%	●

پیش‌بینی الگوی فصلی هر دسته از شدت وارونگی

اینکه چه زمانی هر نوع وارونگی رخ می‌دهد، برای برنامه‌ریزی بسیار مهم است. بنابراین اقدام به پیش بینی الگوی هر دسته از شدت وارونگی فصلی گردید که نتایج آن به شرح جدول(۹) است:

پیش‌بینی مدل بر اساس داده‌های وارونگی(۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۰ تغییر محسوسی در الگوی شدت وارونگی‌های اصفهان رخ نخواهد داد.

خطر همیشگی: سالانه حدود **۹ تا ۱۲ مورد** وارونگی **شدید و بسیار شدید** (دسته‌های نارنجی و قرمز) پیش‌بینی می‌شود که عمدتاً در **فصل زمستان** متمرکز خواهند بود.

لزوم برنامه‌ریزی: این پیش‌بینی به این معنی است که مسئولان و شهروندان باید هوشمندانه برای **مدیریت آلودگی هوا در روزهای سرد و آرام زمستان** برنامه‌ریزی کنند، چرا که این الگو دست کم تا ۶ سال آینده پابرجاست.

نقش نوع وارونگی: به خاطر داشته باشید که وارونگی‌های **تشعشعی** (در شب‌های سرد و آرام) معمولاً **شدیدتر** اما **کوتاه‌مدت‌تر** هستند. در مقابل، وارونگی‌های **فرونشینی** (مانند آنتی سیکلون) می‌توانند **ضعیف‌تر** اما **پایدارتر** (چندین روزه) باشند.

جدول(۹). پیش‌بینی میانگین سالانه هر دسته از وارونگی‌ها تا سال ۲۰۳۰

فصل	وارونگی‌های غالب	پیش‌بینی الگو
زمستان (آذر–بهمن)	همه دسته‌ها، به ویژه "بسیار شدید" و "شدید"	اوج بحران .بیشترین احتمال وقوع وارونگی‌های بحرانی (دسته قرمز و نارنجی) در این فصل است.
پاییز (مهر–آبان)	ضعیف، متوسط و گاهی شدید	فصل آغازگر .تعداد وارونگی‌ها افزایش می‌یابد، اما هنوز به قدرت زمستان نیستند.
بهار (فروردین–خرداد)	عمدتاً ضعیف	فصل افول .تعداد و قدرت وارونگی‌ها به تدریج کاهش می‌یابد.
تابستان (تیر–شهریور)	انحصاراً ضعیف	فصل آرام .به ندرت وارونگی قابل توجهی رخ می‌دهد و اگر هم رخ دهد از نوع ضعیف است.

بحث

امروزه رشد بی رویه ی جمعیت و به تبع آن گسترش کارخانجات و وسایل نقلیه سبب ایجاد آلودگی هوا شده است؛ این موضوع در کلان شهرها باعث ایجاد معضلاتی مثل پدیده وارونگی دما شده است. گرادیان عمودی دما در تروپوسفر باعث می‌شود که هوای آلوده در مجاورت زمین باقی نماند و با صعود به لایه‌های فوقانی هوای پاکیزه را جایگزین آن می‌سازد، اما در وارونگی دما هوای سرد و سنگین تمایلی به جابجایی نداشته و با پیوستن آلاینده ها به این هوا ، پتانسیل آلودگی در هوای شهر افزایش پیدا می‌کند(بطیار و رسولیان، ۱۴۰۰: ۳). دمای هوای محیط در تروپوسفر معمولاً با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد (به ازای هر ۱۳۳۳ متر افزایش ارتفاع بین ۲ تا ۶ درجه سلسیوس دما کاهش می‌یابد) ولی گاهی با افزایش ارتفاع، دمای هوا افزایش یافته که به این وضعیت وارونگی دمایی یا وارونگی می‌گویند(Pankajakshan et al, 1999: 982). می‌توان گفت معیار تشخیص ارزیابی این پدید، دو فاکتور ارتفاع و تغییرات دما هست که در حالت وقوع پدیده وارونگی دمایی این پدیده‌ها با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند(Nodzu et al, 2006: 3213).

این تحقیق به دنبال بررسی آماری و زمانی پدیده وارونگی دما، شدت واورنگی و انواع آن در شهر اصفهان می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که وضعیت توپوگرافی شهر اصفهان، قرارگیری در حاشیه بیابان و تفاوت زیاد دمای شب و روز، اثر حاکمیت پرفشار جنب حاره در فصول گرم سال در این شهر، کمبود بارش بخصوص در فصول سرد سال که باعث ماندگاری هوای پایدار در فضای این شهر می‌شود، قرارگیری این شهر در بادپناه کوه‌هاهای زاگرس، جهت وزش بادهای غالب و دیگر فرآیندهای جوی از عوامل موثر بر وارونگی دمای شهر اصفهان هستند. از سویی وارونگی تابشی که در افزایش غلظت آلاینده‌ها در هوا نقش بیشتری را ایفا می‌کند و همچنین وارونگی نوع فرونشینی که عمر طولانی‌تری نسبت به دیگر انواع وارونگی‌ها دارد نیز از انواع غالب وارونگی‌های دما در این شهر هستند. در نتیجه شهر اصفهان در اکثر ماه‌های سال دارای وارونگی دمایی می‌باشد.

نتیجه گیری

این تحقیق با هدف تجزیه و تحلیل وارونگی و شدت آن ها با استفاده از داده های رادیوسوند جو بالا در شهر اصفهان نگاشته شد. نتایج تحقیق نشان داد که در شهر اصفهان در طول ۱۱ سال ۳۰۲۶ مورد انواع وارونگی بوقوع پیوسته است که به طور میانگین در هر سال ۲۷۵ مورد می‌باشد. روند وارونگی‌ها در این شهر نیز صعودی بوده است. در این بین ماه سپتامبر(۳۷۶ مورد) بیشترین وارونگی و ماه ژوئن نیز کمترین وارونگی را داشته‌اند. همچنین فراوانی انواع وارونگی‌های شهر اصفهان نشان می دهد که بیشترین وارونگی‌های این ایستگاه از نوع فرونشست (۴۷ درصد) بوده است. اما از نظر فصلی بیشترین فراوانی وارونگی‌ها در فصل زمستان(۳۱ درصد) و کمترین فراوانی وارونگی‌ها در فصل تابستان(۲۰ درصد) شکل گرفته است. فصل پاییز و زمستان بیشترین درصد وارونگی ها را به خود اختصاص داده است که علت آن می تواند وجود هوای سرد و سنگین در لایه های بالاتر و تشدید آن به علت شرایط بیابانی شهر اصفهان و جلوگیری از صعود هوای گرم ناشی از احتراق سوخت های فسیلی (وسایل نقلیه و وسایل گرما زا) که اجازه صعود هوای گرم به لایه‌های بالاتر داده نمی‌شود. فصول گرم تابستان و بهار تعداد وارونگی نسبت کمتر شده است که علت آن فرونشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره می باشد. روند دمای لایه وارونگی با شدت گرفتن تغییرات اقلیمی و کاهش ارتفاع تشکیل وارونگی‌ها افزایش پیدا کرده است، بطوری که تا سال ۲۰۱۳ میانگین بلند مدت وارونگی‌ها شهر اصفهان بخصوص وارونگی‌های که در فصول سرد رخ داده است زیر صفر می‌باشد. و اینکه وارونگی‌ها در ارتفاع بالاتر رخ می‌دادند، ولی در سال‌های اخیر وارونگی‌ها در نزدیک سطح زمین بیشتر شکل گرفته‌اند.

بطورکلی می‌توان گفت که در شهر اصفهان در فصول گرم سال سهم وارونگی‌های نوع تشعشعی بدلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره و افزایش دمای سطح زمین بیشتر از دیگر وارونگی هاست. در فصول سرد سال فرونشست هوای سرد سنگین و هم به علت فرونشست هوای گرم دامنه های بادپناه زاگرس سهم وارونگی های فرونشست را افزایش می‌دهد. با توجه به ارتباط بالای دما با فشار و ضخامت طی سال‌های اخیر با افزایش دمای هوا، ضخامت لایه وارونگی نیز افزایش داشته است. چرا که با افزایش دما، ضخامت لایه وارونگی فضای بیشتری از جو نزدیک به زمین را اشغال می‌کند و آلودگی‌ها فضای عمودی بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در هر ۳ نوع وارونگی در ماه‌های گرم سال ضخامت کمتر از ماه‌های سرد سال است. در نتیجه آلودگی بیشتری با شدت و غلظت بیشتری در فضای کمتری منتشر می‌شود و سلامتی انسان‌ها و سایر جانداران به مخاطره میفتد. اما وارونگی‌ها ماه‌های سرد در ارتفاع بالاتری شکل می‌گیرند، در نتیجه دمای این لایه‌ها کمتر فشار کمتر و ضخامت آنها بیشتر است و در نتیجه غلظت آلودگی کمتر است. اما وارونگی‌هایی که در فصل سرد در ارتفاع پایین‌تر شکل می‌گیرند غلظت بالایی دارند. در سال‌های اخیر با افزایش دمای هوا و تغییر اقلیم شدت نیز افزایش داشته است، شدت تابعی از دما و ضخامت می‌باشد. طی سال‌های اخیر با افزایش دما، فشار و ضخامت مقادیر شدت نیز افزایش یافته است. همچنین نتایج ارتباط بین شدت لایه وارونگی با پارامترهای اقلیمی آن در شهر اصفهان، نشان داد که بین شدت وارونگی با دما، فشار و ضخامت رابطه مثبت و معنی دار اما با ارتفاع این رابطه منفی و معنی دار می باشد. بطوری که با افزایش دما و ضخامت و کاهش ارتفاع لایه وارونگی بر شدت لایه وارونگی افزوده می شود.

نتایج پیش بینی حاصل از مدل های رگرسیونی نشان داد که الگوی اصلی برای فراوانی وارونگی ها در شهر اصفهان هنچنان ادامه خواهد داشت. بر اساس این تحلیل، الگوی فصلی قوی وارونگی‌ها در اصفهان حداقل تا سال ۲۰۳۰ ادامه خواهد داشت. همچنین ثبات در تعداد انتظار نمی‌رود بلکه تعداد کل وارونگی‌ها در سال به طور چشمگیری افزایش یا کاهش یابد. نوسانات حول یک میانگین ثابت (حدود۱۱۰ رویداد در سال) خواهد بود. نتایج نشان داد فصل زمستان از نظر فراوانی وارونگی همچنان بحرانی باقی می‌ماند. ماه‌های دی و بهمن کماکان بحرانی‌ترین دوره از نظر تعداد و شدت وارونگی‌ها خواهند بود که پیامد مستقیمی بر آلودگی هوای اصفهان دارد.

با مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق طاووسی و همکاران(۱۳۹۶) می‌توان گفت وارونگی‌ها روند افزایشی پیدا کرده‌اند و بیشتر از نوع فرونشست بودند. در سطح بین المللی درگونوف و همکاران(۲۰۲۰) دریافتند که درجه بالایی از همبستگی بین مقادیر عناصر اقلیمی و ارتفاع با وارونگی دمایی وجود دارد که با نتایج این تحقیق در یک راستا می‌باشد. تا کنون مطالعه ای در با موضوع "شدت وارونگی دما و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی و گازهای آلاینده شهری" در مورد شهر اصفهان پرداخته نشده است، این مطالعه گامی در جهت بررسی علل و عوامل ماندگاری و تقویت وارونگی دما برداشته است. مطمئنا نتایج این مطالعه، راه را برای پیش‌بینی دقیق‌تر علل و زمان وقوع این پدیده باز خواهد کرد. بنابراین با توجه به مسائل و مشکلاتی که وارونگی دما برای جانداران خصوصا زندگی انسانها بوجود می‌آورد، شناخت دقیق نوع وارونگی و شدت وقوع آنها ضروری به نظر می‌رسد.

منابع فارسی

اداره کل هواشناسی استان اصفهان (۱۳۹۹).

اسمیت، کیت. (۱۳۸۶). **مبانی اقلیم شناسی کاربردی**. ترجمه محمدعلی خورشید دوست. چاپ دوم. انتشارات یاوریان، تهران.

چراغی، میترا ، (۱۳۹۹). **بررسی تاثیر وارونگی بر آلودگی هوای شهر تهران**، نشریه مطالعات محیط زیست، منابع طبیعی و توسعه پایدار، ۳(۱۰)، ۱-۸.

حسین آبادی، نسرین؛ تقی طاوسی، عباس مفیدی و محمود خسروی. (۱۳۹۸) .**بررسی روند وارونگی های دمایی کاتن شهرهای ایران(تهران، مشهد و تبریز).** *مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۱: ۷۱۳-۶۹۳.

دولتشاهی، زینب؛ اکبری، مهری؛ علیجانی، بهلول؛ یاراحمدی، داریوش و طولابی نژاد، میثم. (۱۴۰۱)، **تحلیل وارونگی دمایی شهر بندرعباس با استفاده از شاخص شدت وارونگی**، *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۰(۳). ۱۳۹-۱۶۲.

دولتشاهی، زینب؛ اکبری، مهری؛ علیجانی، بهلول و طولابی نژاد، میثم. (۱۴۰۲)، **تحلیل آماری وارونگی دمایی و انواع آن در شهر بیرجند با استفاده از شاخص شدت وارونگی**، *نشریه کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۱(۱۱): ۱۸-۳۵.

طاوسی، تقی؛ نسرین حسین آبادی. (۱۳۹۶). **ارزیابی شاخص های وارونگی لایه مرزی هوای شهر تهران**. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۲(۲): ۱۲۰-۱۳۲.

عساکره، حسین؛ احدی، لیلا. (۱۳۹۹). **بررسی رابطهٔ تیپ‌های هوایی تبریز و آلودگی هوا**، *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۲(۳): ۳۷۵-۳۹۴.

عظیمی، فریده. (۱۳۸۷). **ارزیابی تاثیر وارونگی دما بر روندآلودگی هوای شهر اهواز**. مجله جغرافیای سرزمین، ۱۹: ۱۱۲-۱۰۵.

علیجانی, بهلول, طولابی نژاد, میثم, کربلائی درئی, علیرضا. (۱۳۹۸). **رفتارسنجی اثر گرمایش جهانی بر پُرفشار جنب حاره.** *پژوهش های جغرافیای طبیعی*،۵۱(۱):۵۰-۳۳.

علیجانی, بهلول؛ نجفی نیک، نجفی نیک. (۱۳۸۸). **بررسی الگوهای سینوپتیکی وارونگی در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی**، *جغرافیاوتوسعه ناحیه ای*، ۷(۱۲) ۱-۱۲.

علیزاده، امین؛ غلامعلی کمالی، فرهاد موسوی و محمد موسوی بایگی. (۱۳۷۹). **هوا و اقلیم شناسی**. چاپ اول. انتشارات دانشگاه فردوسی،مشهد.

کرمپور، مصطفی؛ محمد سلیقه، میثم طولابی نژاد و زهرا زارعی چغابلکی .(۱۳۹۵). **بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر**. *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۳(۱): ۶۴-۵۱.

کریمی، محسن؛ حسین درخشان. (۱۳۸۴). **بررسی وارونگی دمایی(وارونگی) در شهر اصفهان**. مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۶-۱.

لشکری، حسن؛ پریسا هدایت. (۱۳۸۵). **تحلیل الگوی سینوپتیکی وارونگی های شدید شهر تهران**. مجله پژوهش های جغرافیایی، ۵۶: ۸۲-۶۵.

نقی زاده, حبیبه, خورشید دوست, علی محمد, سعیدآبادی, رشید, نجفی ,محمدسعید. (۱۳۹۹). **بررسی الگوهای همدیدی وارونگی دما در شهرستان تبریز با استفاده از تحلیل مولفه های اصلی** .*نشریه علمی جغرافیا و برنامه ریزی*، ۲۴(۷۲): ۲۰۵- ۲۲۴.

نوروزیان، مرضیه. (۱۳۹۴). **بررسی ساختار وارونگی دما در کلان شهر تهران**، پایانامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد. شهریور ۹۴.

منابع انگلیسی

Alijani, B., Najafi Nik, Z. (2009). A**ssessment of synoptical pattern of inversion in Mashhad using factor**. *Journal of Geography and Regional Development*, *7*(12), 1-12. https://doi.org/10.22067/geography.v7i12.8924(in Persian)

Alijani, B., Toulabi Nejad, M., Karbalaie Darei, A., (2019**) Investigating the Effects of Global Warming on Subtropical High Pressure.** *Physical Geography Research Quarterly*, *51*(1), 33-50. https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.258677.1007223.(in Persian)

Alizadeh, A; Kamali Gh A, Mousavi F, Mousavi M. (2000). **Weather and climatology**. *First Edition. Ferdowsi University Publications*, Mashhad.(in Persian)

Asakereh, H., Ahadi, L. (2020). **Study the relationship between air types and air pollution in Tabriz city.** *Physical Geography Research Quarterly*, *52*(3), 375-394.(in Persian).

Azimi, F., (2008**). Evaluation of the Impact of Inversion of Temperature on the Policy Trendy of Ahvaz.** *Journal of Geography of Land*, 19: 112.(in Persian).

Barkley, M. P., González Abad, G., Kurosu, T. P., Spurr, R., Torbatian, S., Lerot, C. (2017). **OMI air-quality monitoring over the Middle East**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(7), 4687-4709.

Batyar, Z., Rasulian, N., (2021). **Inversion of temperature and its impact on Iran's metropolises**. *The first National Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Planning, Environment and Related Sciences*.Kerman. https://civilica.com/doc/1259597. (in Persian).

Bei, N.; Li, G.; Huang, R.; Cao, J.; Meng, N.; Feng, T.; Liu, S.; Zhang, T.; Zhang, Q. and Molina, L.T. (2016). **Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China**, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, 1: 1-34.

Bourne, S.M., Bhatt, U.S., Zhang, J., Thoman, R., (2009). **Surface-based temperature inversions in Alaska from a climate perspective.** *Atmospheric Research*, 20, 353-366.

Cheraghi, M, (2020). **The Impact of Inversion on Tehran's Air Pollution**, *Journal of Environmental Studies, Natural Resources and Sustainable Developmen*t, 3 (10), 1-8.(in Persian)

Derasthale, A; Willen. U, Karlsson. K-G, Jones .C.G. (2010). **Quantifying the Clear – Sky Temperature Inversions Frequency and Strength over the Arctic Ocean during summer and Winter Seasons from Airs Profiles.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 5565-5572.

Dergunov,A., Yakubailik, O, (2020). **Analysis of temperature inversions during periods of adverse weather conditions in Krasnoyarsk in the winter period of 2019-2020**, *E3S Web Conf*., 223 : 03021, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303021.

Dolatshahi, Z., Akbari, M., Alijani, B., Yarahmadi, D., Toulabi nejad, M., (2022**). Bandar Abbas City temperature inversion analysis using inversion intensity index.** *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards.* Ready to release. (in Persian)

Dolatshahi Zeynab, Mehry Akbary, Bohlool Alijani, Meysam Toulabi Nejad, (2023). Statistical analysis of temperature inversion and its types in Birjand city using by inversion intensity index, *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 11(1), 18-35. Magiran.com/p2593822

Dolatshahi, Z., Akbary, M., Alijani, B. Toulabi Nejad, M. (2022). **Analysis of temperature inversion in Ahwaz city.** Arab J Geosci **15**, 1737 (2022). https://doi.org/10.1007/s12517-022-11022-4

Donald, G.Baker. John, W.Enz. Harold, J.Paulus. (1969), **Frequency, duration, commencement time and intensity of temperature inversions at st. Paul-minneapolis**, Journal of Applied Meteorology, 8: 747-753.

Feng X, Shimin Wei, Shigong Wang (2020). **Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution,** *Science of The Total Environment*, 726, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138579.

Hossein Abadi, N., Tavousi, T., Mofidi, A., & Khosravi, M., (2019**). Review the process of temperature inversion of Katen Cities of Iran (Tehran, Mashhad and Tabriz).** *Journal of Natural Geography Research*, 51,713-693.(in Persian)

http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

Iacobellis, S.F., Norris, J.R., Kanamitsu, M., Tyree, M., Cayan, D.C. (2009). **Climate Variability and California Low-level Temperature Inversions,** California Climate Change Center, pp. 1- 47.

Kankanala, P., (2007). **Doppler Sodar observations of the winds and structure in the lower atmosphere over Fairbanks,Alaska**, M.S. Thesis, Department of Atmospheric Sciences, University of Alaska Fairbanks, 74 pp available on-line at:http://www.uaf.edu/asp/Students/theses/Pavan_thesis.pdf.

Karampour, M., salighe, M., toulabi Nejad, M., Zarei Cheghabalaki, Z., (2016**). Investigation of Tehran's air pollution by the critical inversion method.** *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards,* 3(1): 64-51.(in Persian)

Karimi, M., Derakhshan, H., (2005). **Investigating Temperature Inversion (Inorge) in Isfahan**. *Proceedings of the 12th Iranian Geophysical Conference*, 1-6. (in Persian)

LashKari, H., Hedayat, P., (2006**). Synoptic pattern analysis of severe inorgies of Tehran**. *Journal of Geographical Research*, 56, 82-65. (in Persian)

Meteorological Office of Isfahan Province (2020). (in Persian).

Naghizadeh, H., Khorshiddoust, A., Saeidabadi, R., najafi, M. (2020). **Circulation patterns of the temperature inversion in Tabriz city using PCA.** *Geography and Planning*, 24(72), 205-224. https://doi: 10.22034/gp.2020.10890 (in Persian).

Nodzu, M.I., Ogino, S.Y., Yamanaka, M., (2006). **Climatological description of seasonal variations in lowertropospheric temperature inversion layers over the Indochina Peninsula**, *Journal of Climate,* 24, 3211-.3223 .

Nowruzian, M. (2015). **Investigation of temperature inversion structure in Tehran metropolis**, *Master's thesis. Mashhad Ferdowsi University*. September 2015.

Pankajakshan, T., Ghosh, A.K. Pattanaik, J., Ratnakaran, L., (1999**). A Quality-control Procedure for Surface Temperature and Surface Layer Inversion in the XBT data Archive from the Indian Ocean,** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 980-.289

Retallack, B.J., (1973). **Compendium of meteorology**, WMO, PART 2, Phisical Meteorology, 1(34), 20-36.

Sager, L., (2019). **Estimating the effect of air pollution on road safety using atmospheric temperature inversions,** *Journal of Environmental Economics and Management*, 98, https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102250.

Schneider, P., Lahoz, W. A., van der A, R. (2015). **Recent satellite-based trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(3), 1205-1220

Smith, K., (2007). **Principles of Applied Climate**. *Translated by Mohammad Ali Khorshid Dost. Second edition. Yavarian Publications*, Tehran.(in Persian)

Tavousi, T., Hossein Abadi, N., (2017). **Evaluation of Inversion Indicators of Tehran Border Layer Layer.** Journal of Geographical Research, 32(2), 120-132. (in Persian)

Zeljko,M., Tais M., Voloder M., Zulum D.,(2007). **The correlation between air pollution and temperature inversion in sarajevo valley.***18th International conference on Carpathian meteorology, belgrad* (mountain influence on wather).