

Original Research Article

Statistical analysis of temperature inversion and its types in Birjand City by the inversion intensity index

Zeynab Dolatshahi ¹, Mehry Akbary ^{2*}, Bohlool Alijani³, Maysam Toulabi Nejad⁴

¹ PhD student of climatology, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran.

² Associate professor of climatology, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran.

³ Professor of climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

⁴ PhD in climatology, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran.



10.22034/GRD.2023.19083.1553.

Received:

October 17, 2022

Accepted:

January 21, 2023

Keywords:

Temperature inversion, Barley thickness, Inversion intensity, Barley pollution, Birjand

Abstract

This study was aimed to examine the types of inversion and their severity at Birjand Station. In this study, Birjand Radio Station data were obtained and used at 00 pm Greenwich (3.5 local) from 2010 to 2020. The results of the analysis showed that 11.1 % of the inversion of Birjand was radiation, 12.4 % was frontal, and 76.5 % was of subsidence. Due to the air session underneath, the share of subsidence inversions is more the than other types of inversion. The long-term average of the inversion coefficient showed that the frontal inversion with a coefficient of 0.044 was the most common, but the highest number of inversions was the radiation type. In terms of intensity, severe inversion with the index 0.7% and poor inversions with a 0.92% index had the lowest and the highest ranks in Birjand. The correlation results also showed that the inversion intensity and the inversion layer temperature were directly associated with the level of 95% and the coefficient of 0.756, the inversion intensity and altitude, the reverse relationship at the level of 95% and the coefficient of 0.790. The relationship between the thickness and intensity of the inversion layer (0.639) showed that, with the increase in the thickness of the inversion layer, the intensity of the inversion in Birjand also increased. The layer temperature was higher as the inversion became more severe. There was also a direct and significant relationship between the intensity and pressure of the inversion layer at the level of 95% with the coefficient of 0.787.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* Corresponding Author: Mehry Akbary

Address: Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Email: mehry.akbari@gmail.com

Extended Abstract

1. Introduction

The ambient air temperature in the troposphere usually decreases with increased altitude (5 to 6 degrees Celsius per 1000 meters), but sometimes with increased air temperature too, which is called temperature 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 the temperature rises to a few hundred meters above the Earth. 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. Combined with the scattered materials in the nightly layer, it causes the scattered materials to return to the surface. As a result, the concentration of pollutants increases sharply, and the phenomenon of fumation is created.

2. Research Methodology

In this study, the daily data of the radio atmosphere above the Synoptic Station in Birjand (Table 1) was used for 00 Greenwich (3.5 local) and 11 km high from Earth over the last 11 years (2010 to 2020). The indicators included thermodynamic indices such as SI, LI, KI and TT and potential temperature. Also, the other data used in this study were radiosvond transmitted information including inversion height from the ground in meters (ZBASE), inversion height from the ground in meters (ZTOP), the base temperature, the inversion layer degree in Celsius (TBASE), the temperature difference between the base and the top of the inversion layer in Celsius (DTINV), the height difference between the base and the apex of inversion in meters (DZINV), the pressure in the base (PBSE), and the inversion layer (PTOP). These were calculated with Equations 1 and 2. First, Equation (1) calculated the potentials of the ceiling and the floor of the inversion layer as follows:

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

Θ: Potential temperature in Kelvin degrees

T: Temperature in Kelvin

P: Air pressure in hectopaskal

After that, the intensity of temperature inversion was calculated on monthly, seasonal and annual time scales using Equation (2) as follows:

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

Δθ: difference of the temperature potential and the base of inversion in Kelvin

Δz: thickness of the layer of inversion in meters

Z: station height in hectometers

3. Results and discussion

The results showed that the average annual temperature inversion phenomenon at Birjand Station was about 90 cases per year, as it may not occur in different heights in some days. About 11.1% of the radiation temperature inversion is frontal and 76.5% is of subsidence. Due to the air settlement underneath, the share of subsidence inversions is more than the other types. The results showed that the highest average inversion layer in Birjand was formed in 2010 and 2015 at 9°C. The highest annual temperature of the inversion is related to the inversion of subsidence, which is due to the subsidence of the subcutaneous air in the upper layers of the atmosphere and the high temperature on the ground. In terms of annual altitude, the highest point of the inversion layer occurred

at 4490 meters in 2019. In terms of thickness, the inversion of the subsidence type was at 207 meters, and the radiation with 145 meters formed the thinnest layer of inversion. The average inversion layer pressure in Birjand in 2014 and 2015 showed that they were formed at about 870 and in 2019 at 592 ml. Among the types of inversion, the most severe one is frontal at 0.044% and then subsidence at 0.030%. In terms of the intensity, inversions at 0.7% and 0.92% were the lowest and the highest in Birjand. In fact, the inversions of the city of Birjand are poor because of their physiographical and geographical properties.

4. Conclusion

The correlation results also showed a direct and significant relationship between the intensity of inversion and the inversion layer temperature at the level of 99%. That is, the higher the temperature of the inversion layer, the greater the inversion, and vice versa. But there is a significant relationship between the inversion intensity and the height of the layer at the 95% probability level. This negative correlation indicates that, whenever the inversion layer occurs at the lower altitude, inversion is increased; But the relationship between the thickness and intensity of the inversion layer showed that an increase in the thickness of the inversion layer gives a rise to inversion in Birjand. Also, the higher the layer temperature is, the more severe the inversion. There is a direct and significant relationship between the intensity and pressure of the inversion layer at 95%; with the increased pressure, the inversion increases too. In general, the city of Birjand is under the tranquility of the tropical climate because of its specific location, namely being exposed to 120-day Sistan winds.

مقاله پژوهشی

تحلیل آماری وارونگی دمایی و انواع آن در شهر بیرجند با استفاده از شاخص شدت وارونگی

زینب دولتشاهی^۱، مه‌ری اکبری^{۲*}، بهلول علیجانی^۳، میثم طولابی نژاد^۴

^۱ دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
^۲ دانشیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
^۳ استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
^۴ دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.



10.22034/GRD.2023.19083.1553

چکیده

بازآفرینی شهری به‌عنوان یک واژه عام که مفاهیم دیگری نظیر بهسازی، نوسازی، بازسازی، توانمندسازی و روان بخشی شهری را در برمی‌گیرد، به کار می‌رود. این پژوهش باهدف سنجش و ارزیابی راهبردی کیفیت حوزه ۲ بافت تاریخی کرمان سعی بر آن دارد که با روش تحقیق توصیفی و تحلیل محتوا (کمی و کیفی) و با بررسی اسناد و بیانیه‌های مربوط به بازآفرینی و پژوهش‌های انجام‌گرفته شده با این رویکرد، دیدی جامع از ابعاد و معیارهای آن داشته باشد. روش تحقیق حاضر از لحاظ هدف کاربردی و دارای ماهیت پیمایشی است و جمع‌آوری داده از طریق بررسی اسنادی و کتابخانه‌ای، پرسش‌نامه (از دیدگاه ۵۰ نفر از مسئولان و ساکنین محدوده) انجام‌شده است. داده‌ها در نرم‌افزار excel وارد و تحلیل‌شده و پس‌از آن با استفاده از مدل راهبردی Qspm مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. اطلاعات به‌دست‌آمده با استفاده از سیستم GIS در قالب شاخص‌های مؤثر بازآفرینی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تکنیک راهبردی Qspm راهبرد و راهکارهای مؤثر بازآفرینی محدوده استخراج گردیده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که حوزه ۲ قابلیت برخورداری از مزایای بازآفرینی را داشته و با توجه به جایگاهی که در شهر کرمان دارد می‌توان شاخص‌ها و مولفه‌های بازآفرینی شهری را در آن پیاده‌سازی کرد. راهبرد مستخرج در این زمینه راهبرد رسوخ در بازار و از نوع Wo در جهت کم کردن ضعف‌ها و استفاده از نقاط قوت است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

وارونگی دمایی، ضخامت جو، شدت وارونگی، آلودگی، شهر بیرجند



*نویسنده مسئول: مه‌ری اکبری

ایمیل: mehry.akbari@gmail.com

آدرس: گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۱ مقدمه

دمای هوای محیط در تروپوسفر معمولاً با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد (به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع ۵ الی ۶ درجه سانتی‌گراد دما کاهش می‌یابد) ولی گاهی با افزایش ارتفاع دمای هوا افزایش یافته که به این وضعیت وارونگی دمایی یا اینورژن می‌گویند (گوش^۱ و همکاران، ۱۹۹۹). وارونگی دما زمانی رخ می‌دهد که لایه‌ای از هوای گرم بالای هوای سرد مجاورت کره زمین قرار می‌گیرد (نودز^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). درچنین شرایطی پایداری هوا ایجاد می‌شود و به‌جای آنکه با افزایش ارتفاع کاهش دما داشته باشیم تا چند صد متر از سطح زمین با افزایش ارتفاع افزایش دما خواهیم داشت (پانکاجاکشان^۳، ۱۹۹۹).

زمانی اهمیت پدیده وارونگی دما دوچندان می‌شود که به بررسی اثرات حاصل از پدیده وارونگی دما پرداخته شود. پدیده وارونگی دما به این دلیل حائز اهمیت است که باعث ایجاد پدیده فیومیگیشن^۴ (وارونگی برگشتی)، می‌شود این پدیده هنگامی روی می‌دهد که برای مدت کوتاهی بعد از طلوع آفتاب، اشعه تابشی آفتاب لایه هوای ناپایدار در مجاورت سطح زمین ایجاد کند سپس این لایه با مواد پراکنده واقع در لایه وارونه شبانه ترکیب یافته و باعث می‌شود مواد پراکنده به سطح زمین برگردند. درنتیجه غلظت مواد آلاینده در مدت کوتاهی به‌شدت افزایش می‌یابد و پدیده فیومیگیشن ایجاد می‌شود (اسمیت، ۱۳۸۶). نقش پارامترهای آب و هوایی از جمله وارونگی دما، بر روی تشدید غلظت آلاینده‌های شهرهای صنعتی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر روی افزایش یا کاهش مرگ‌ومیر و ابتلا به بیماری‌ها و اثرات که بر روی گیاهان و جانوران دارد محسوب می‌شود. می‌توان گفت معیار تشخیص و ارزیابی این پدیده، دو فاکتور ارتفاع و تغییرات دما است که در حالت وقوع پدیده وارونگی، این پدیده‌ها با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند (نودز^۲ و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به گسترش شهرها و افزایش منابع آلاینده‌های هوا، هوای اغلب شهرهای بزرگ و صنعتی آلوده است. درعین حال به جهت خطراتی که این آلودگی برای سلامت افراد ساکن در مناطق آلوده دارد شناخت و آگاهی نسبت به جوانب مختلف این مسئله از اهمیت بسزایی برخوردار است و تنها با آگاهی و شناخت از این مساله امکان جلوگیری یا کاهش خطرات آن وجود دارد (رنجبر، ۱۳۸۵). پایداری هوا یکی از مسائل شهرها به‌ویژه متروپل‌ها در مناطق برون‌حاره در بخشی از فصول سال است. این مسئله در پاره‌ای از مواقع سبب پایداری‌های جوی طولانی مدت شده و این پایداری‌ها به حدی است که غلظت آلودگی‌های شهری را به مرز هشدارهای جدی می‌رساند (کریمی و درخشان، ۱۳۸۴). اگرچه پدیده وارونگی یک خصیصه اقلیمی است، که نمی‌توان مدل وقوع کلی آن را متحول ساخت، ولی احتمال این مطلب که بتوان پایداری آن را در حدی نگه داشت که نتواند موجب افزایش غلظت آلوده‌کننده‌ها به مرز هشدارهای جدی برسد، وجود دارد. این پدیده از بین نخواهد رفت مگر اینکه به هر طریقی اختلاف دما و یا اختلاف فشاری بین لایه‌های مختلف جو ایجاد شود، در صورت عدم وجود چنین عواملی به‌مرور به ضخامت لایه آلودگی‌ها و ذرات غبار معلق در هوا افزوده می‌شود. یکی از این آلودگی‌ها گاز منواکسید کربن است که تنفس این گاز بی‌رنگ‌وبو باعث سردرد و سرگیجه و در پایان مرگ می‌شود اتفاقی که پاره‌ای در بعضی از کشورها به هنگام بروز این رخداد طبیعی باعث مرگ چندین نفر شده است (درویش محمدی، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به مسائل و مشکلاتی که آلودگی هوا و وارونگی دما برای جانداران خصوصاً زندگی انسان‌ها به وجود می‌آورد و با توجه به اینکه مطالعات محدودی در ایران در زمینه تفکیک انواع وارونگی‌های دمایی، تحلیل زمانی- فضایی رخداد وارونگی دمایی و بررسی ارتباط وارونگی دمایی با توجه به مولفه‌های مختلف آن صورت گرفته است، لذا شناخت دقیق این مؤلفه‌ها و تحلیل زمانی- مکانی وقوع آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

نمونه‌ای از مطالعاتی که تاکنون در سطح جهان و ایران صورت گرفته است به شرح زیر می‌باشند:

کانکانالا^۵ (۲۰۰۶)، به مطالعه وارونگی‌های سطح پایین آلاسکا پرداخت. وی عقیده داشت که پوشش ابر بر روی ساختار وارونگی تأثیر می‌گذارد. بورن^۶ و همکاران (۲۰۰۸)، به مطالعه وارونگی‌های سطح پایین آلاسکا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهایی از قبیل ضخامت، اختلاف دما و فراوانی وارونگی دما دارای روند کاهشی در بلندمدت می‌باشند. بی و همکاران^۷ (۲۰۱۶) تأثیر شرایط همدید بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضگان ونگ بررسی کردند و تغییرات $PM_{2.5}$ را به وارونگی دمای سطح پایین، سرعت باد افقی، سرعت باد عمودی، همگرایی و وقوع شرایط همدیدی نامساعد در طی فصل زمستان مربوط دانستند. همچنین ژنگ و ژانگ^۸ (۲۰۱۷)، با مطالعه تأثیر هواشناسی بر تداوم آلودگی‌های سنگین هوا در منطقه چنگدو چین طی بهار ۲۰۱۴ نشان داد که نه تنها فاکتورهای سطحی هواشناسی، بلکه ساختار لایه‌مرزی و وجود وارونگی‌های دمایی نقش مهمی در انتشار عمودی آلاینده ایفا می‌کند.

¹ Ghosh

² Nodzu

³ Pankajakshan

⁴ Fumigation

⁵ Nodzu

⁶ Kankanala

⁷ Bourne

⁸ Bei

⁹ Zeng & Zhang

ساگر^۱ (۲۰۱۹)، به برآورد اثر آلودگی هوا بر ایمنی جاده‌ها با استفاده از عامل وارونگی دما پرداخته‌اند. این یافته نشان می‌دهد جاده‌هایی که ایمن کمتری داشتند ممکن است هزینه‌های زیادی داشته باشند؛ چراکه آلودگی هوا را نادیده گرفته بودند. فنگ^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، وارونگی دما در لایه مرزی جوی و پایین تروپوسفر بر فراز حوضه سیچوان، چین را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که وارونگی دما در سیچوان یک پدیده رایج و در تمام طول سال است.

در مطالعه‌ای که دراگونوف و یاکوبایلک^۳ (۲۰۲۰)، انجام دادند به تجزیه و تحلیل وارونگی دما در طی دوره‌های نامطلوب آب‌وهوا در کراسنویارسک در دوره زمستان ۲۰۱۹-۲۰۲۰ پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که درجه همبستگی بین این مقادیر، و استفاده داده‌های مدل GFS برای پیش‌بینی وضعیت محیط زیست امکان‌پذیر است. کوشکان^۴ (۲۰۲۰)، وارونگی دما در فصل زمستان در اطراف کارابوک - سافرانبولو، اثرات احتمالی بر محیط طبیعی و انسانی را بررسی کرد. هدف از این پژوهش تعیین تأثیر تغییر دمای زمستان بر مردم و سایر موجودات زنده منطقه با تعیین حد، درجه، زمان و تأثیرات احتمالی بر محیط طبیعی و انسانی بوده است. خالصی^۵ (۲۰۲۰)، با استفاده از داده‌های رادیوسوند به تحلیل زمانی وارونگی دما در لایه مرزی شهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که در طول روزهای وارونگی تشعشعی، از جمله وارونگی‌های شدید در دوره‌های پاییز و زمستان تهران است. کیخسروی و فدوی^۶ (۲۰۲۱)، تأثیر وارونگی و آلودگی هوا بر تعداد بیماران Covid-19 در متروپولیتن تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین افزایش ارتفاع وارونگی تعداد مبتلایان به کرونا در تمام دوره‌ها وجود دارد. به طوری که با کاهش ارتفاع تعداد مبتلایان افزایش می‌یابد، اما با افزایش ارتفاع وارونگی دما و غلظت آلاینده‌ها کمتر شده و در جو پراکنده می‌شوند، بنابراین تعداد بیماران مبتلابه کرونا نیز کاهش می‌یابد.

در ایران نیز محققین زیادی از جمله لشکری (۱۳۸۴)، «تحلیل همدیدی اینورژن‌های شدید شهر تهران»، سلطانی (۱۳۸۵)، «وارونگی دمایی شهر تبریز»، عظیمی (۱۳۸۷)، به «ارزیابی تأثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز»، علیجانی (۱۳۸۸)، بررسی الگوهای همدیدی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی، کریمپور (۱۳۹۵)، به «بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر» طاوسی (۱۳۹۶)، به «ارزیابی شاخص‌های وارونگی دمایی لایه مرزی هوای شهر تهران» حسین‌آبادی (۱۳۹۸)، به «بررسی روند وارونگی‌های دمایی کلان‌شهرهای ایران (تهران، مشهد و تبریز) پرداخته‌اند. عساکره و احدی (۱۳۹۹) رابطه تیپ‌های هوایی تبریز و آلودگی هوا را بررسی کردند. نتایج نشان داد باد غالب جنوب غربی - شمال شرقی با سرعت کم است که حاصل استقرار مرکز پرفشار اروپا و سیبری در شمال غربی و شمال شرقی ایران است، آلودگی صنایع را به مرکز شهر هدایت می‌کند. دولت‌شاهی و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی شدت وارونگی‌های بندرعباس را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ از سطح زمین تا تراز ۵۰۰ مودر بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شدت وارونگی‌های ایستگاه بندرعباس با ضریب ۰/۰۶۲ نشان می‌دهد که شدت وارونگی‌های این شهر اکثراً از نوع بسیار شدید هستند که این رخداد می‌تواند آثار بسیار مخربی هم از نظر محیط‌زیستی و هم سلامت جسمی ساکنین شهر بندرعباس در پی داشته باشد. همچنین همبستگی بین عناصر وارونگی نشان داد که با کاهش ضخامت لایه وارونگی، شدت وارونگی دمایی نیز افزایش می‌یابد. وارونگی دمایی اثرات سوئی بر انسان و سایر موجودات زنده می‌گذارد، به طوری که با افزایش شدت و فراوانی آن اثر آن دوچندان می‌شود و زندگی آن‌ها را با مشکلات زیادی مواجه می‌کند. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی شدت و فراوانی رخداد وارونگی دمایی شهر بیرجند است تا برنامه ریزان شهری و نظام سلامت بتوانند برای پیشگیری از آثار مخرب وارونگی‌ها برنامه‌ریزی دقیقی ارائه دهند. در مجموع اکثر تحقیقات انجام شده در مورد وارونگی به صورت آماری و دوره‌های آماری کمتری بوده است، اما پژوهش حاضر علاوه بر طول آماری بلندمدت (۱۱ ساله) نوع وارونگی را مشخص خواهد نمود و شدت وارونگی‌ها را نیز بررسی و ارتباط آن را با عناصر و عوامل اقلیمی خواهد سنجد.

۲ معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان بیرجند یکی از شهرستان‌های استان خراسان جنوبی در ایران است. مرکز این شهرستان، شهر بیرجند است. وسعت این شهرستان ۳۴۸۹۳ کیلومترمربع است که در محدوده ۵۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و در ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۵ دقیقه عرضیات و در ارتفاع ۱۴۹۱ متری از سطح دریا قرار گرفته است. آب‌وهوای بیرجند، نیمه بیابانی بوده و دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی بیرجند جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. میزان بارش در این شهر با توجه به آب‌وهوای آن، کم بوده و بیشترین میزان آن، از آذر تا اردیبهشت رخ می‌دهد که در فصل زمستان اغلب به صورت بارش برف است. تفاوت نسبتاً زیاد درجه

¹ Sager

² Feng

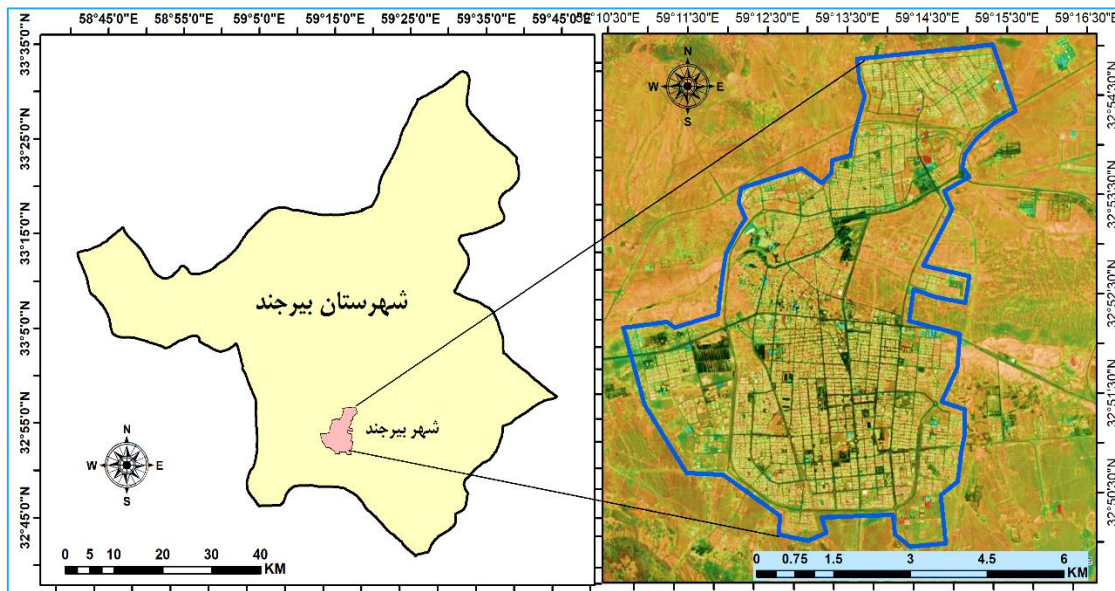
³ Dergunov and. Yakubailik

⁴ Coshkun

⁵ Khalesi

⁶ Keikhosravi, Fadavi

حرارت روز و شب و همچنین اختلاف دمای زمستان و تابستان در این شهرستان به علت نزدیکی آن به مناطق کویری است (اداره کل هواشناسی استان خراسان جنوبی، ۱۳۹۹).

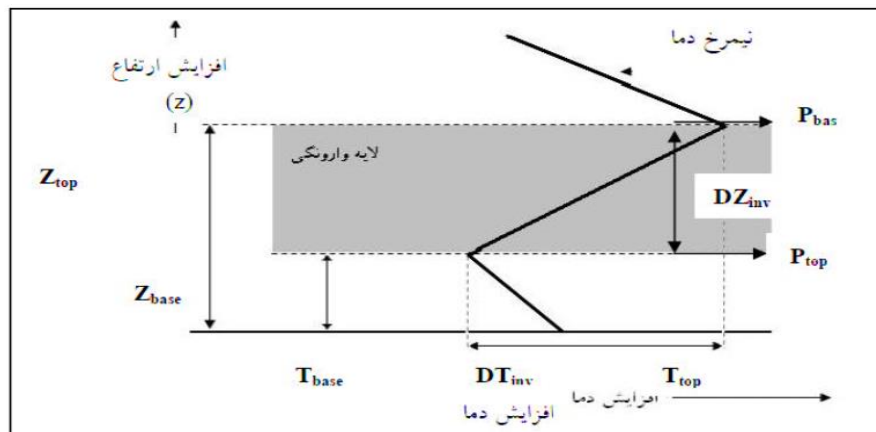


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان/شهر بیرجند

۳ روش تحقیق

در این پژوهش داده‌های روزانه رادیوسوند جو بالای ایستگاه سینوپتیک بیرجند (جدول ۱) برای ساعت ۰۰ گرینویچ (۳/۵ محلی) طی ۱۱ سال اخیر (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (حدود ۵۰۰ متری از سطح زمین) از وبسایت دانشگاه ایومینگ 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 از دیگر داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، اطلاعات مخابره شده رادیوسوند شامل ارتفاع پایه وارونگی از سطح زمین به متر (Zbase)، ارتفاع رأس وارونگی از سطح زمین به متر (Ztop)، مقدار دما در پایه و رأس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (Tbase)، اختلاف دما بین پایه و رأس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (DTinv) اختلاف ارتفاع بین پایه و رأس لایه وارونگی به متر (DZinv) و مقدار فشار در پایه (Pbase) و رأس لایه وارونگی (Ptop) است که از روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود (شکل ۲).

شرایط وارونگی و انواع آن با استفاده از الگوریتم‌ها موجود در نرم‌افزار RAOB و شاخص‌های 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.



شکل ۲- خصوصیات نیمرخ وارونگی دمای هوا

یاکوبلیس و همکاران، ۲۰۰۹

جدول ۱- مشخصات ایستگاه کنترل جو بالای بیرجند (فرستنده رادیوسوند)

ارتفاع	عرض	طول	ایستگاه
۱۴۹۱	۳۲/۵۳	۵۹/۱۳	بیرجند

ابتدا با استفاده از رابطه (۱) دمای پتانسیل سقف و کف لایه وارونگی از رابطه (۱) محاسبه شد (رتالاک، ۱۹۷۳).

$$(1) \quad \theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286}$$

θ: دمای پتانسیل به درجه کلون

T: دما به کلون

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.

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

Δθ اختلاف دمای پتانسیل رأس و پایه وارونگی به درجه کلون

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 (رتالاک، ۱۹۷۳) به نقل از طاووسی و همکاران، (۱۳۹۵). جدول (۲).

جدول ۲- تقسیم بندی شدت وارونگی بر اساس ضریب شدت

انواع شدت وارونگی	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
ضریب شدت وارونگی ^۱ (II)	۰ - ۰/۱۰	۰/۰۱۱ - ۰/۰۲۰	۰/۰۲۱ - ۰/۰۳۰	بالای ۰/۰۳۱

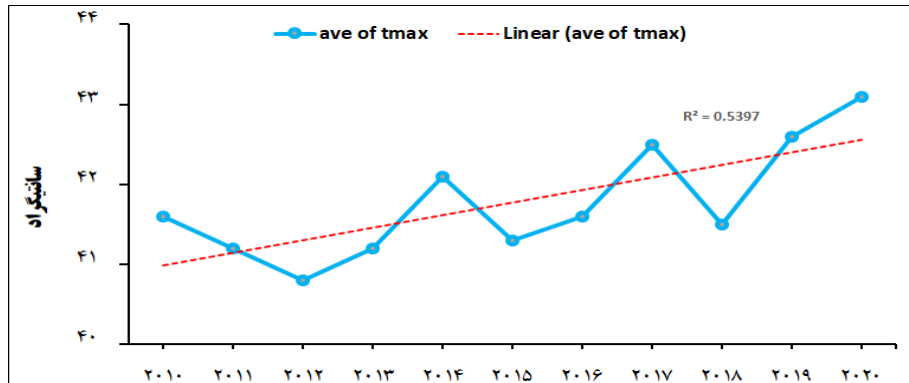
۴ یافته‌ها و بحث

با توجه به ارتباط مستقیم تغییرات دما با وارونگی دما، قبل از هرگونه تحلیل نتایج وارونگی در شهر بیرجند، تغییرات دمای این ایستگاه طی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، روند دمای هوا در شهر بیرجند طی سال‌های مورد مطالعه با ضریب ۰/۵۴ هم‌زمان با افزایش دمای کره زمین و تغییرات آب‌وهوایی در حال افزایش است.

۴,۱ شاخص‌های ترمودینامیک

جدول (۳) مقادیر شاخص‌های ترمودینامیک جو را هم‌زمان با رخداد وارونگی‌های دمایی در شهر بیرجند طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. با توجه به آمار داده‌های ثبت شده در رادیوسوند میانگین ضریب شاخص SI هم‌زمان با رخداد وارونگی در شهر بیرجند طی این دوره ۱۰ بوده است. کمترین مقدار ضریب نیز شاخص KO با ضریب ۰/۳ - داشته است. بیشترین ضریب را نیز شاخص TC با ضریب ۳۳/۹ درصد به خود اختصاص داده است. ضرایب سایر شاخص‌ها در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشند.

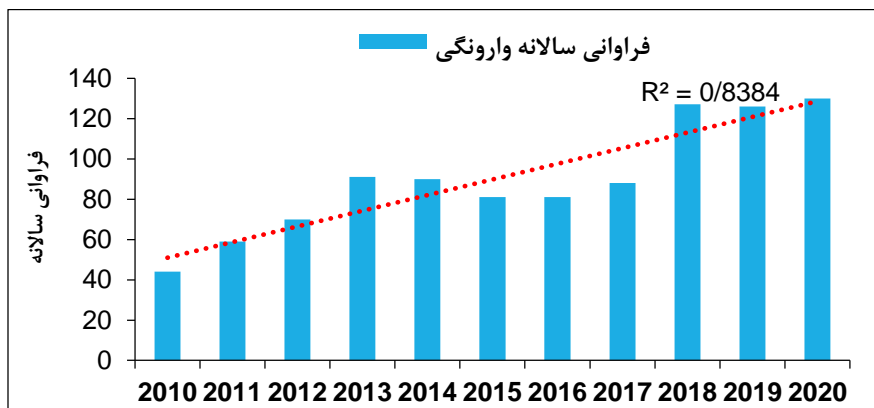
¹ Inversion Intensity



شکل ۳ - حداکثر دمای سالانه ایستگاه بیرجند

جدول ۳- مقادیر شاخص های ترمودینامیک جو هم زمان با رخداد وارونگی دمایی در شهر بیرجند

سال	SI	KO	LI	TT	TC	KI
2010	6.1	0.7	2.3	10.5	36.6	2.7
2011	7.4	0.4	4.0	12.5	30.5	2.2
2012	8.5	1.0	3.8	12.8	32.5	3.0
2013	10.3	0.9	3.4	17.1	31.1	4.0
2014	20.9	-12.4	-1.2	40.9	40.9	12.7
2015	10.2	0.6	6.4	28.8	38.2	2.5
2016	4.0	1.4	3.2	12.2	34.8	-1.6
2017	6.9	2.4	4.0	18.4	30.6	-1.7
2018	13.1	-0.5	3.2	22.5	34.6	5.0
2019	13.5	0.6	2.5	19.2	30.7	6.9
2020	9.4	1.6	3.8	78.1	32.5	1.8
میانگین	10	-0.3	3.2	24.8	33.9	3.4



شکل ۴- فراوانی سالانه وارونگی های دمایی ایستگاه بیرجند

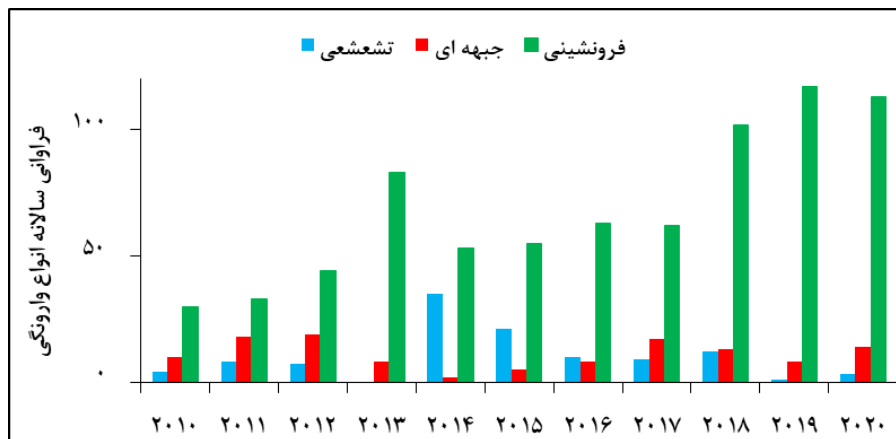
شکل (۴) فراوانی سالانه وارونگی های ایستگاه بیرجند را طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می دهد. در طی این دوره ۱۱ ساله در شهر بیرجند ۹۸۷ مورد انواع وارونگی در ارتفاعات مختلف به وقوع پیوسته است. با توجه به این جدول، می توان گفت که میانگین وقوع پدیده وارونگی دمایی سالانه در ایستگاه بیرجند حدود ۹۰ مورد در سال است چراکه ممکن است در برخی از روزها در ارتفاعات مختلف

وارونگی رخ نداده است. همچنین به طوری که در هرماه ۷/۵ مورد وارونگی در ایستگاه بیرجند تا ارتفاع ۵ کیلومتری ثبت شده است. در طی این دوره بیشترین فراوانی وارونگی مربوط به سال ۲۰۲۰ با ۱۳۰ مورد، و سال ۲۰۱۰ با ۴۴ وارونگی در سال کمترین فراوانی سالانه را دارا می‌باشند. همچنین روند وقوع وارونگی‌های بیرجند با ضریب ۸۳ درصد نشان از سیر صعودی و اما یکنواخت طی چند سال گذشته نسبت به دوره پایه است شکل (۴).

شکل (۵) فراوانی سالانه انواع وارونگی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. با بررسی‌هایی که بر روی این داده‌ها صورت گرفت، مشخص شد که میانگین تعداد رخداد توأم با پدیده وارونگی دما در بیرجند برابر ۹۰ مورد در سال است که حدود ۱۱/۱ درصد آن مربوط به وارونگی نوع تشعشی، جبهه‌ای ۱۲/۴ درصد، و ۷۶/۵ درصد دیگر مربوط به وارونگی دمایی از نوع فرونشینی است. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره، سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی است. چراکه در دوره گرم سال در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استیلای کامل پرفشار دینامیکی جنب حاره، گسترش و تقویت نصف‌النهاری آن موجب تقویت و تداوم پایداری بر فراز جو منطقه می‌شود (خسروی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین همان طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود سال ۲۰۱۹ بیشترین وارونگی از نوع فرونشینی، سال ۲۰۱۴ بیشترین وارونگی از نوع تشعشی و سال ۲۰۱۲ بیشترین وارونگی جبهه‌ای رخ داده است. سال ۲۰۱۰ کمترین وارونگی فرونشینی، سال ۲۰۱۳ کمترین وارونگی تشعشی و سال ۲۰۱۴ کمترین درصد فراوانی وارونگی جبهه‌ای را دارا است.

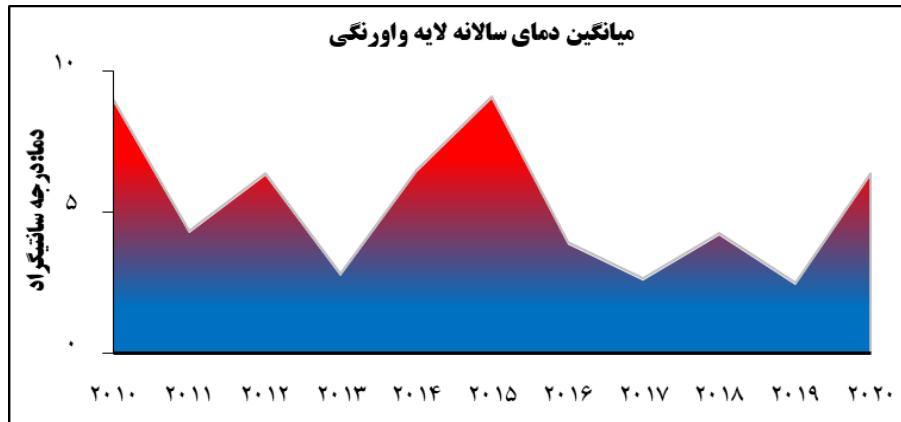
جدول ۴- آمار توصیفی وارونگی و انواع آن در شهر بیرجند

نوع وارونگی	فراوانی	درصد وارونگی
تشعشی	۱۱۰	۱۱/۱
جبهه‌ای	۱۲۲	۱۲/۴
فرونشینی	۷۵۵	۷۶/۵
مجموع	۹۸۷	۱۰۰



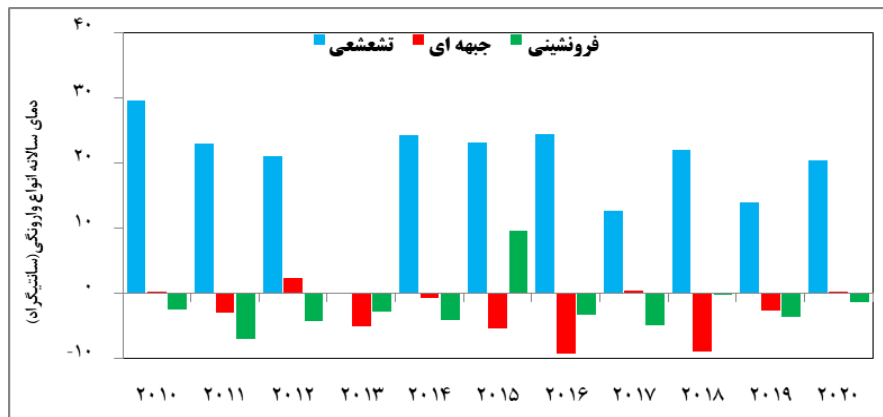
شکل ۵- فراوانی سالانه انواع وارونگی‌های دمایی ایستگاه بیرجند

شکل (۶) مقدار دمای سالانه لایه‌های وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های دما، بیشترین دمای لایه‌های وارونگی در شهر بیرجند در سال ۲۰۱۰ با ۹ درجه سانتی‌گراد است، چراکه سال ۲۰۱۰ یکی از خشک‌ترین و گرم‌ترین سال‌های ایران بوده است (طولایی، ۱۳۹۲). کمترین دمای لایه وارونگی‌های دوره مورد مطالعه با ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۹ به ثبت رسیده است.

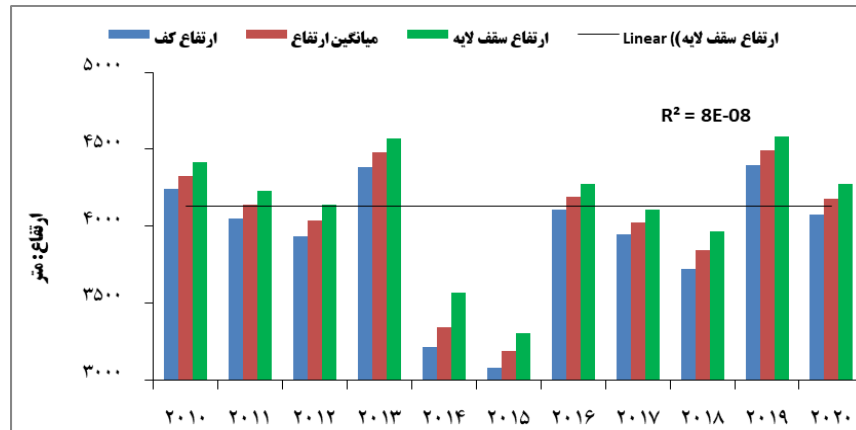


شکل ۶- مقدار دمای سالانه لایه‌های وارونگی دمایی در شهر بیرجند

شکل (۷) مقدار دمای سالانه در لایه انواع وارونگی (اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های دمایی لایه‌های وارونگی شهر بیرجند، بیشترین دمای وارونگی نوع فرونشینی را سال ۲۰۱۵ با دمای $۹/۶$ درجه سانتی‌گراد دارا است. و کمترین دمای لایه وارونگی نوع فرونشینی در سال ۲۰۱۱ با دمای -۷ درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است. دما در لایه وارونگی نوع تشعشعی در سال ۲۰۱۰ با $۲۹/۵$ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و کمترین میزان دما در این نوع وارونگی مربوط به سال ۲۰۱۷ با $۱۲/۶$ درجه سانتی‌گراد است. بیشترین دمای وارونگی نوع جبهه‌ای در بین سال‌های مورد مطالعه در سال ۲۰۱۲ با $۲/۴$ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار دمای لایه در این نوع وارونگی در سال ۲۰۱۶ با $-۹/۴$ درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است.



شکل ۷- مقدار دمای سالانه انواع وارونگی دمایی در شهر بیرجند

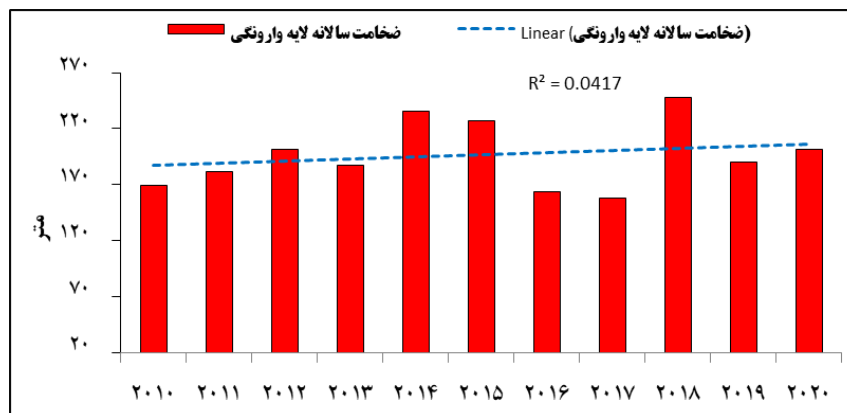


شکل ۸ - میانگین ارتفاع سالانه و ارتفاع لایه های شهر بیرجند

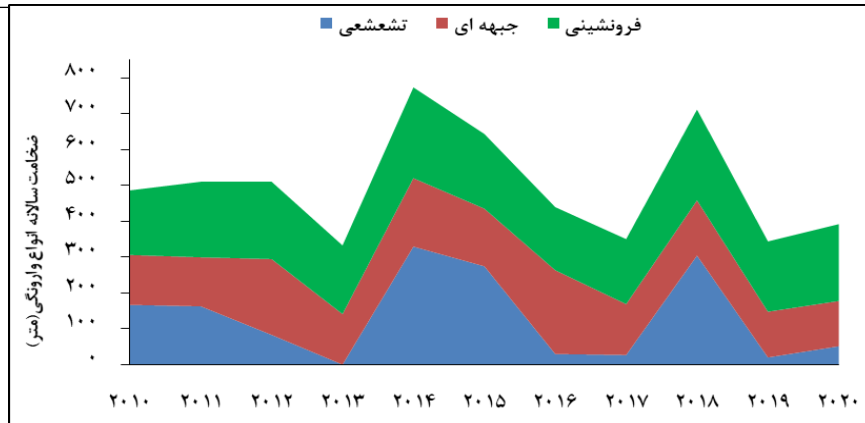
شکل (۸) میانگین ارتفاع سالانه و ارتفاع لایه های شهر بیرجند را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل در سال ۲۰۱۹ و ارتفاع لایه‌ها در بلندمدت با میانگین ارتفاع ۴۴۹۰/۷ متر در بالاترین ارتفاع قرار دارند و سال ۲۰۱۵ و ارتفاع لایه‌ها در میانگین ارتفاع ۳۱۹۲/۷ متر کمترین ارتفاع از سطح زمین شکل گرفته‌اند. با توجه به شکل (۸) از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ ارتفاع شکل‌گیری و ارتفاع لایه‌ها روند کاهشی داشته است، ولی سال ۲۰۱۳ ارتفاع و ارتفاع لایه‌ها روند افزایشی داشته و و ارتفاع لایه‌ها در ارتفاع بالاتری به وقوع پیوسته‌اند، و از سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ ارتفاع شکل‌گیری و ارتفاع لایه‌ها روندی کاهشی پیدا کرده است، و سپس از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ روند افزایشی داشته است. به‌طور کلی روند ارتفاع شکل‌گیری لایه و ارتفاع لایه‌ها در ایستگاه بیرجند طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های قبل از ۲۰۱۴ کاهش یافته است.

شکل (۹) ضخامت سالانه لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلندمدت (۲۰۱۰-۲۰۲۰) به‌طور کلی ضخامت لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف و ارتفاع و ارتفاع لایه‌ها) شهر بیرجند ۱۹۸/۵ متر است. در این میان ضخیم‌ترین لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها در سال ۲۰۱۴ با ۲۵۴/۸ متر است و کمترین میزان ضخامت لایه و ارتفاع لایه‌ها در شهر بیرجند در سال ۲۰۱۷ با ۱۵۷/۹ متر طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. همان‌طور که شکل (۹) نشان می‌دهد. میانگین ضخامت سالانه و دمای سالانه ارتباط بالایی با یکدیگر دارند به‌طوری که با افزایش دما ضخامت لایه و ارتفاع لایه‌ها نیز افزایش داشته است.

شکل (۱۰) ضخامت لایه‌های انواع و ارتفاع لایه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلندمدت (۲۰۱۰-۲۰۲۰) به‌طور کلی ضخامت لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف و ارتفاع و ارتفاع لایه‌ها) شهر بیرجند ۲۰۶/۳ متر است. مقدار ضخامت لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها از نوع فرونشست با ۲۰۷/۳ متر و تشعشعی با ۱۴۵ متر ضخیم‌ترین و نازک‌ترین لایه‌های و ارتفاع لایه‌ها را تشکیل داده‌اند. لایه و ارتفاع لایه‌ها جبهه‌ای نیز در این مدت با میانگین ۱۶۰/۴ متر تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل می‌بینیم و ارتفاع لایه‌ها تشعشعی که در شهر بیرجند رخ می‌دهد اکثراً در ارتفاع اندکی از سطح زمین رخ می‌دهد.

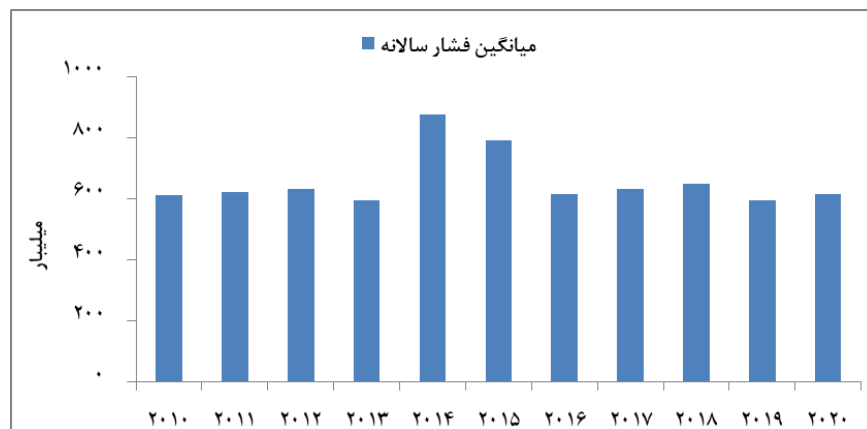


شکل ۹ - ضخامت سالانه لایه و ارتفاع لایه های شهر بیرجند



شکل ۱۰ - ضخامت لایه‌های انواع وارونگی دمایی شهر بیرجند

شکل (۱۱) میانگین فشار سالانه لایه‌های وارونگی را نشان می‌دهد. با توجه به آمار بلندمدت (۲۰۲۰-۲۰۱۰) به‌طور کلی میانگین بلندمدت فشار لایه‌های وارونگی (فشار لایه یعنی میانگین فشار کف و سقف وارونگی) شهر بیرجند ۶۵۶/۳ میلی‌بار است. در این میان بیشترین فشار در لایه‌های وارونگی در سال ۲۰۱۴ با ۸۷۶/۴ میلی‌بار و کمترین میزان فشار لایه وارونگی در سال ۲۰۱۹ با ۵۹۲/۳ میلی‌بار طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. همان‌طور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد. میانگین فشار سالانه، ضخامت و دمای سالانه ارتباط بالایی با یکدیگر دارند به‌طوری‌که با افزایش دما ضخامت و فشار لایه وارونگی نیز افزایش داشته است.



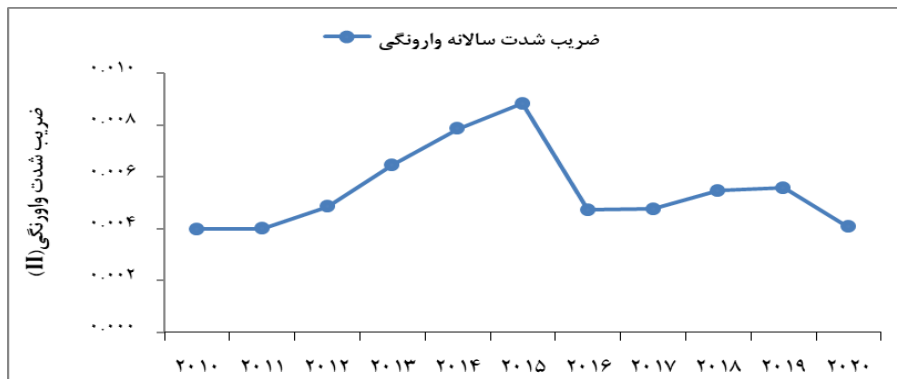
شکل ۱۱ - میانگین فشار سالانه لایه‌های وارونگی دمایی شهر بیرجند

۴,۲ شدت وارونگی

جدول (۵) فراوانی رتبه شدت انواع وارونگی را نشان می‌دهد. بر اساس جدول (۵) از مجموع کل وارونگی‌های (۹۸۷ مورد) شکل گرفته در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه بیرجند، ۹۱۴ مورد (۹۲/۶ درصد) و میانگین ضریب ۰/۰۸۰ از وارونگی‌ها ضعیف بوده‌اند و کمترین میزان نیز با ۷ مورد (۰/۷ درصد) میانگین ضریب ۰/۰۲۳ به صورت شدید رخ داده‌اند. در این میان شدیدترین وارونگی‌ها از نوع جبهه‌ای با ۱۲۲ مورد و ضعیف‌ترین وارونگی‌ها نیز با ۱۱۰ مورد و از نوع تشعشعی بوده است.

جدول ۵- فراوانی رتبه شدت انواع وارونگی دمایی شهر بیرجند

رتبه وارونگی	تشعشعی		جبهه‌ای		فرونشینی		مجموع فراوانی	میانگین کلی ضریب شدت
	ضریب شدت	فراوانی	ضریب شدت	فراوانی	ضریب شدت	فراوانی		
بسیار شدید	0.051	9	0.113	1	0.076	6	16	0.080
شدید	0.023	4	-	-	0.024	3	7	0.023
ضعیف	0.004	83	0.003	117	0.004	714	914	0.004
متوسط	0.014	14	0.015	4	0.015	32	50	0.015
مجموع/میانگین	0.023	110	0.044	122	0.030	755	987	0.030



شکل ۱۲- مقادیر میانگین سالانه ضرایب شدت وارونگی دما در شهر بیرجند

بر اساس جدول (۶) و شکل (۱۲) شدیدترین وارونگی‌ها با ۵ مورد و ضریب 0.009 در سال ۲۰۱۵ رخ داده است و ضعیف‌ترین وارونگی‌ها نیز با ۱۲۶ مورد و ضریب 0.004 در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به وقوع پیوسته است. با توجه به شکل (۱۲)، هرچه به سال‌های اخیر نزدیک شده‌ایم از شدت وارونگی‌ها کاسته شده و تعداد وارونگی‌های از نوع ضعیف بیشتر شده است؛ و اما نکته دیگر این است که در سال‌های دورتر تعداد وارونگی‌های از نوع شدید و بسیار شدید کمتر از حال حاضر بوده است که با توجه به شکل (۲) و تحقیقات انجام‌شده‌ای نظیر مطالعه ناصرزاده و طولابی‌نژاد (۱۳۹۲)، عابدی و همکاران (۱۳۹۷) و علیجانی و همکاران (۱۳۹۸) نقش تغییرات اقلیم و افزایش دمای کره زمین و در نتیجه افزایش حداکثر دمای ایستگاه بیرجند در این تغییرات بی‌تأثیر نبوده است.

جدول ۶- فراوانی رتبه شدت سالانه وارونگی دمایی شهر بیرجند

سال	بسیار شدید	شدید	ضعیف	متوسط	ضریب شدت
2010	-	-	42	2	0.004
2011	-	-	59	-	0.004
2012	-	1	65	4	0.005
2013	1		85	5	0.006
2014	4	3	69	14	0.008
2015	5	1	68	7	0.009
2016	1	1	75	4	0.005
2017	2	-	85	1	0.005
2018	1	-	119	7	0.005
2019	2	1	121	2	0.006
2020	-	-	126	4	0.004
مجموع وقوع	16	7	914	50	0.006

۴،۳ ارتباط مولفه‌های ترمودینامیکی لایه وارونگی دما

جدول (۷) مقادیر همبستگی بین شاخص‌های لایه وارونگی دمایی در شهر بیرجند را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۷) بین شدت وارونگی با دمای لایه وارونگی ارتباط مستقیم و معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد با ضرایب 0.756 وجود دارد. بدین معنا که هر قدر دمای لایه وارونگی بالاتر بوده است، شدت وارونگی نیز بیشتر شده است و بالعکس. اما بین شدت وارونگی و ارتفاع لایه رابطه معکوس معناداری با ضریب -0.790 در سطح احتمال ۹۵ درصد برقرار است. این رابطه معکوس نشان می‌دهد که هر زمان لایه وارونگی در ارتفاع پایین‌تر رخ داده است، شدت وارونگی نیز بیشتر شده است؛ ولی ارتباط بین ضخامت و شدت لایه وارونگی با ضریب 0.639 نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه وارونگی، شدت وارونگی‌ها در بیرجند نیز بیشتر شده است چراکه دمای لایه نیز بیشتر بوده در نتیجه وارونگی شدیدتر شده است. همچنین بین شدت و فشار لایه وارونگی ارتباط مستقیمی با ضریب 0.787 برقرار است که در سطح ۹۵ درصد معنادار است به طوری که با افزایش فشار، بر شدت وارونگی‌ها افزوده خواهد شد.

همچنین نتایج همبستگی بین سایر شاخص نشان می‌دهد که بین ضخامت و ارتفاع لایه وارونگی ارتباط معکوس و معنادار است، بدین معنا که در ارتفاع بالاتر، لایه وارونگی از ضخامت کمتری برخوردار بوده‌اند و در نتیجه شدت وارونگی نیز بیشتر بوده است و بالعکس؛ اما بین میانگین دمای لایه‌ها و فشار رابطه مستقیم و معناداری حاکم است که نشان می‌دهد هر زمان که دمای لایه وارونگی افزایش یابد، فشار لایه نیز افزایش خواهد داشت؛ در نتیجه شدت لایه وارونگی نیز افزایش می‌یابد. بین ضخامت و فشار لایه وارونگی‌ها نیز رابطه مستقیم و معنادار با ضریب 0.717 وجود دارد، بدین ترتیب با افزایش ضخامت لایه، فشار نیز بیشتر می‌شود چراکه دمای لایه

وارونگی در این لایه بیشتر بوده است و ضخامت هوا افزایش یافته است در نتیجه شدت وارونگی در بیرجند نیز به دلیل فرونشست هوا زیر پرفشار جنب حاره افزایش خواهد یافت و آلودگی در سطح شهر بیشتر می‌گردد.

جدول ۷- همبستگی بین مؤلفه‌های وارونگی دمایی شهر بیرجند

شدت	فشار	ضخامت	ارتفاع	دما
				1
			1	-0.983
		1		0.710
	1			0.985
1	0.787	0.639	-0.790	0.756

۵ بحث

امروزه رشد بی‌رویه جمعیت و به‌تبع آن گسترش کارخانه‌ها و وسایل نقلیه سبب ایجاد آلودگی هوا شده است؛ این موضوع در کلان‌شهرها باعث ایجاد معضلاتی مثل پدیده وارونگی دما شده است. گرادیان عمودی دما در تروپوسفر باعث می‌شود که هوای آلوده در مجاورت زمین باقی‌ماند 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 آلاینده‌ها به این هوا، پتانسیل آلودگی در هوای شهر افزایش پیدا می‌کند (بطیار و رسولیان، ۱۴۰۰). 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 اینورژن می‌گویند (پانکاجکشان و همکاران، ۱۹۹۹). می‌توان گفت معیار تشخیص ارزیابی این پدیده، دو فاکتور ارتفاع و تغییرات دما هست که در حالت وقوع پدیده وارونگی دمایی این پدیده‌ها با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند (نودز^۲ و همکاران، ۲۰۰۶).

این مقاله به دنبال بررسی آماری و زمانی پدیده وارونگی دما و انواع آن بر شهر بیرجند است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که وضعیت توپوگرافی شهر بیرجند، 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 در کوه‌ها در اطراف این شهر، جهت وزش بادهای غالب و فرآیندهای جوی از عوامل مؤثر بر وارونگی دمای شهر بیرجند هستند. از سویی وارونگی تشعشی 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 بیرجند در اکثر ماه‌های سال دارای وارونگی دمایی است.

۶ نتیجه‌گیری

ازجمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، می‌توان به پدیده وارونگی دما به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در محیط‌های شهری نام برد، بنابراین این تحقیق باهدف بررسی انواع وارونگی و شدت آن‌ها با استفاده از شاخص‌های ترمودینامیکی جو در ایستگاه بیرجند برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰ به رشته تحریر درآمده است.

به دلیل اهمیت این موضوع در شهر بیرجند، وارونگی‌های دمای این شهر در مقیاس سالانه مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی‌هایی که بر روی این داده‌ها صورت گرفت، در طی این دوره ۱۱ ساله در شهر بیرجند ۹۸۷ مورد انواع وارونگی در ارتفاعات مختلف به وقوع پیوسته است. نتایج نشان داد که میانگین وقوع پدیده وارونگی دمایی سالانه در ایستگاه بیرجند حدود ۹۰ مورد در سال است چراکه ممکن است در برخی از روزها در ارتفاعات مختلف وارونگی رخ نداده است که حدود ۱۱/۱ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشی، جبهه‌ای ۱۲/۴ درصد، و ۷۶/۵ درصد دیگر مربوط به وارونگی دمای از نوع فرونشینی است. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب‌حاره، سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی است.

نتایج نشان داد که بیشترین میانگین لایه وارونگی در شهر بیرجند در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ با ۹ درجه سانتی‌گراد شکل گرفته است. بیشترین مقدار دمای سالانه انواع وارونگی مربوط به وارونگی فرونشینی بوده است که دلیل آن نیز فرونشست هوا زیر پرفشار جنب حاره در لایه‌های بالای جو و دمای بالا در سطح زمین است. از نظر ارتفاع سالانه بیشترین ارتفاع شکل‌گیری لایه وارونگی در سال ۲۰۱۹ با ۴۴۹۰ متر رخ داده است.

¹ Pankajakshan

² Nods

از نظر ضخامت انواع وارونگی‌ها، وارونگی نوع فرونشست با ۲۰۷ و تشعشعی با ۱۴۵ متر ضخیم‌ترین و نازک‌ترین لایه وارونگی را شکل داده‌اند. نتایج میانگین فشار لایه‌های وارونگی در شهر بیرجند نشان داده است که سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ با حدود ۸۷۰ میلی‌بار بیشترین و سال ۲۰۱۹ با ۵۹۲ میلی‌بار کمترین فشار را داشته‌اند. از میان انواع وارونگی‌ها شدیدترین وارونگی‌ها از نوع جبهه‌ای ۰/۴۴ و سپس فرونشینی با ۰/۳۰ بوده است. از نظر رتبه شدت وارونگی‌های شدید با ۰/۷ و وارونگی‌های ضعیف با ۰/۹۲ دارای کمترین و بیشترین فراوانی در شهر بیرجند بوده‌اند. در واقع وارونگی‌های شهر بیرجند به دلیل خاصیت فیزیوگرافیک و جغرافیایی از نوع ضعیف می‌باشند.

همچنین نتایج همبستگی نشان داد که بین شدت وارونگی با دمای لایه وارونگی ارتباط مستقیم و معناداری در سطح و اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. بدین معنا که هر قدر دمای لایه وارونگی بالاتر بوده است، شدت وارونگی نیز بیشتر شده است و بالعکس. اما بین شدت وارونگی و ارتفاع لایه رابطه معکوس معناداری در سطح احتمال ۹۵ درصد برقرار است. این رابطه معکوس نشان می‌دهد که هر زمان لایه وارونگی در ارتفاع پایین‌تر رخ داده است، شدت وارونگی نیز بیشتر شده است؛ ولی ارتباط بین ضخامت و شدت لایه وارونگی نشان داد که با افزایش ضخامت لایه وارونگی، شدت وارونگی‌ها در بیرجند نیز بیشتر شده است چراکه دمای لایه نیز بیشتر بوده در نتیجه وارونگی شدیدتر شده است. همچنین بین شدت و فشار لایه وارونگی ارتباط مستقیم و معناداری در سطح ۹۵ درصد برقرار است به طوری که با افزایش فشار، بر شدت وارونگی‌ها افزوده خواهد شد. به طور کلی شهر بیرجند به دلیل موقعیت خاص مکانی خود تحت استیلای پرفشار جنب حاره است که آب و هوای بیابانی دارد و بر سر راه بادهای ۱۲۰ روزه سیستان نیز قرار دارد در نتیجه اگر وارونگی نیز رخ دهد از نوع ضعیف خواهد بود.

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 بین‌المللی 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 است. در شهر بیرجند تا به حال به مطالعه موردی پدیده وارونگی دما پرداخته نشده است، این مطالعه گامی در جهت بررسی علل و عوامل ماندگاری و تقویت وارونگی دما برداشته است. مطمئناً 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 خصوصاً زندگی انسان‌ها به وجود می‌آورد، شناخت دقیق نوع وارونگی و شدت وقوع آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

References

- Abedi, F., Rahimi, D., Masoodian, S.A., Keikhosravi Kiany, M.S., (2018). Climatology Analysis of Blocking System in Northern Hemisphere on Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(4), 655-667. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.247237.1007151>. [In Persian]
- Aghlmand, F., (2014). Investigating the Impact of Atmospheric Stability on Tabriz Air Pollution Power. Masters. Tabriz University. September 93. [In Persian]
- Alijani, B., Najafi Nik, Z., (2009). Investigating Invarzen Synoptic Patterns in Mashhad Using Factor Analysis. *Journal of Geography and Regional Development*, 12: 12-1. [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]
- 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]
- 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., & 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*, 0: 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.

- Coshkun, M., Coshkun, S., Gozalan, S., (2020). Temperature Inversion Winter Seasonal in Karabuk-Safranbolu Basin: Possible Effects on Natural and Human Environment (Turkey), International Balkan University Sponsored by IBU, eISSN: 1308-2140.
- 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 of Conferences 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 Ranges. Ready to release. [In Persian]
- Dravish Mohammadi, M., (2012). Topoclima and Inversion Phenomenon (Case Study: Isfahan-1389). Master's Degree in Natural Geography Geomorphology. Isfahan University, October 3911. [In Persian]
- Feng, X., Wei, S., Wang, Sh., (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, Volume 726, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138579>.
- Ghosh, A., (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. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Hossein Abadi, N., Tavossi, 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]
- 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, California Energy Commission, pp. 1- 74.
- 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-lineat: http://www.uaf.edu/asp/Students/theses/Pavan_thesis.pdf.
- Karampour, M., salighe, M., toulabi Nejad, M., & Zarei Choghabalaki, Z., (2016). Investigation of Tehran's air pollution by the critical inversion method. Journal of Spatial Analysis of Environmental Ranges, 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]
- Keikhosravi, Gh., Fadavi, F., (2021). Impact of the inversion and air pollution on the number of patients with Covid-19 in the metropolitan city of Tehran, Urban Climate, Volume 37, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100867>.
- Khalesi, B., Mansouri Daneshvar, M.R., (2020). Comprehensive temporal analysis of temperature inversions across urban atmospheric boundary layer of Tehran within 2014–2018, Modeling Earth Systems and Environment, <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00732-x>
- Khosravi, M., Alijani, B., Almasi, F., (2014). Contemporary Analysis of Climate Systems in Khuzestan Province, Climatic Research, 17, 57-77.. [In Persian]
- LashKari, H., Hedayat, P., (2006). Synoptic pattern analysis of severe inorgies of Tehran. Journal of Geographical Research, 56, 82-65. [In Persian]

- NasserZadeh M. H., Toulabi Nejad, M., (2015). The Role of Greenhouse Gases in the Kashkan River's Discharge Fluctuation. *Hydro geomorphology*, 2(2), 117-135. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.7.6>. [In Persian]
- Lutz, S., (2019). Estimating the effect of air pollution on road safety using atmospheric temperature inversions, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 98, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102250>
- Nodzu, M.I., Ogino, S.Y., Yamanaka, M., (2006). Climatological description of seasonal variations in lower tropospheric temperature inversion layers over the Indochina Peninsula, *Journal of Climate*, 24, 3211-3223
- 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
- Ranjbar, A., Shakeri, M., (2006). Using Geographic Information System capabilities (GIS) in Tabriz Air Pollution Management, *Geomatic Conference 85*. Tehran. National mapping agency. [In Persian]
- Retallack, B.J., (1973). *Compendium of meteorology*, WMO, PART 2, Physical Meteorology, 1(340), 20-36.
- Smith, K., (2007). *Principles of Applied Climate*. Translated by Mohammad Ali Khorshid Dost. Second edition. Yavarian Publications, Tehran. [In Persian]
- Soltani, M., (2006). Inversion of temperature (inorgan) in Tabriz. Meteorological Office, East Azarbaijan Province. [In Persian]
- Tawasi, T., Hossein Abadi, N., (2017). Evaluation of Inversion Indicators of Tehran Border Layer. *Journal of Geographical Research*, 2, 13-1. [In Persian]
- Toulabi Nejad, M., (2013). Investigating the Effect of Greenhouse Gas on Iranian Rain. Master's Degree. Tehran. Iran. [In Persian]
- Zeng, S., Zhang, Y., (2017). The Effect of Meteorological Elements on Continuing Heavy Air Pollution, A Case Study in the Chengdu Area during the 2014 Spring Festival, *Atmosphere*, 8, 85-94.
- Meteorological Office of South Khorasan Province (2020). [In Persian]