

*Research Article***An observational study of radiation and subsidence temperature inversions in Bandar Abbas (2005-2024)****Mohammad Moradi^{1*} , Zahra Ghassabi¹, Parviz Rezazadeh²**

1-Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

2-IRIMet Organization weather forecast consultant, Tehran, Iran

Received: 30 Nov 2024 Accepted: 02 May 2025

Extended Abstract**Introduction**

Under normal conditions, the temperature usually decreases with increase in altitude in the troposphere at a rate of 6.5 degree centigrade in one Kilometer. Sometimes the normal temperature lapse rate reverses and it increases with height rather than decreasing. The temperature inversion is characterized by the increase in temperature with height which is usually associated with air pollution. In rural and industrial areas, the temperature inversion plays an important role in events within the atmospheric boundary layer particularly in surface radiation balance and vertical mixing depth. This phenomenon intensifies the stable air layer close to the Earth's surface, traps the pollutants and impedes the dispersion into the free atmosphere. Temperature inversion is classified as Upper and lower inversions on the basis of the height from the earth's surface and the type of air circulation. Upper air inversion is a thermal or mechanical one. Thermal upper inversion is caused by the presence of ozone layer over the tropopause in the stratosphere. The mechanical inversion happens at higher levels of the atmosphere due to air subsidence, turbulence and convective mechanism. Lower air inversion is a radiation and also due to advection (Frontal, Valley and Surface Inversion). Radiation inversion is caused by excessive nocturnal cooling of the ground surface due to rapid heat loss from the ground through the outgoing long-wave radiation. The radiation inversions is marked by a stable atmospheric conditions, clear sky and low wind speeds which results in the accumulation of pollutants near the surface. The temperature inversion studies in warm and humid climate are scarce, and the relationship between temperature inversions and the meteorological variables are still not well understood. Because of the geographical location and special weather conditions in Bandar Abbas station, little is known about the relationship between temperature inversions and meteorological variables in this station, which has a warm and humid climate. The objective of this study is to analyze the frequency, depth and intensity of the radiation and subsidence inversions observed in the Bandar Abbas station in southern part of Iran.

Materials and Methods

Bandar Abbas station (56.37 °E, 27.22 °N) is a coastal station situated approximately 2.5 km from the seashore and at 10m elevation. Due to its location, Bandar Abbas has a warm and humid climate with frequent Mist and fog throughout the year. Summer in Bandar Abbas is long and warm with prevailing northerly wind at night and southerly wind during the day time. Highest maximum temperature of this station at in season is 43-48 °C, and lasts for 7 months from April to October. Cold season in this station is short (5 months from November to March) with moderate temperatures (17 to 24 °C).

Citation: Moradi, M. et al, 2025. An observational study of radiation and subsidence temperature inversions, *Res. Earth. Sci.* 16(2), (90-111) DOI: 10.48308/esrj.2025.237747.1241

* Corresponding author E-mail address: mmoradi@rimas.ac.ir



The lowest minimum temperature of this season is less than 10 °C. The lowest temperature is 2.0°C which is recorded in 27 December 1972 and the highest temperatures is 48.0°C which is recorded on 28th of June 1976 (30 July 1978). The mean annual precipitation of this station is 170.7 mm and the highest 24hrs rainfall is 211.0 mm which is recorded in 24 January 1979. In this study, the nocturnal temperature inversions (radiation inversion and subsidence inversion) are identified by the analysis of Bandar Abbas upper-air station radiosonde data at 00Z from 17 October 2005 to 08 July 2024 and then analyzed. The radiosonde measurements provide high resolution vertical atmospheric temperature which is very appropriate to study the temperature inversions. Temperature inversion detection was done by RAOB application. The analysis includes frequency, depth, and strength of the inversions on a monthly and annual basis. After detecting the radiative inversion layer, first of all the best curve was fitted to the revealed data and then based on the values of 5, 25, 50, 75 and 95% of the fitted curve, the depth and intensity values of radiative inversion. Base on the Delta-Z and Delta-T, the radiation inversion depth and intensity were classified and their annual and monthly occurrence frequencies are analyzed. The very weak, weak, moderate, strong and very strong inversions are characterized by the Delta-T which is less than 1.8, 3.3, 5.2, 8.8 and greater than 8.8 °C respectively. Furthermore, the very shallow, shallow, moderate, deep and very deep inversions are characterized by the Delta-Z, which is less than 74, 128, 232, 668 and greater than 668 meter respectively.

Results and Discussion

The analysis of the nighttime temperature inversions in Bandar Abbas station reveals that at least in half of the summer days (June, July, August, September), radiation inversion was not developed and a uniform monthly frequency distribution was observed. Occurrence of radiation inversion at 85% of the days in October, November, December, January, February and March, was detected. The longer winter nights and the southerly radiation inversion wind of the sea breeze toward the land during the daytime and the northerly wind of the land breeze to the sea at night can provide suitable conditions for creating the radiation inversion of Bandar Abbas. In this station, the frequency of days without subsidence inversion in hot months, is less than in cold months of the year. This condition is due to the establishment of subtropical highs in the region. The frequency of deep and very deep radiative inversion in Bandar Abbas station is higher in the warm months of the year than in other months but the frequency of radiative inversion with moderate depth in the months of January, February, November and December are more than other months. The reason for this difference is the combination of the advection inversion created by the return branch of the sea breeze to land in the warm season with the nighttime radiation inversion. The results of the analysis of radiation inversion intensity showed that the frequency of very strong radiation inversion in the months of November, December, and January is higher than the intense and moderate inversions. The classification of the radiation inversions according to the magnitude of depth (Delta-Z) indicates the prevalence of very shallow (20.5%), shallow (27.5%) and moderate (23.7) inversions in Bandar Abbas. Also, frequency of deep and very deep inversions was estimated 15.9% and 8.5% respectively. The analysis of the frequencies base on the intensity (Delta-T), indicated that the frequency of very weak, weak and moderate radiation inversions in Bandar Abbas is 20.5%, 21.2% and 25.2% respectively. The frequency of strong and very strong inversions was estimated 21.3% and 4.2% respectively. The results showed that the upper levels inversion frequency at Bandar Abbas station was about 83.2% that 11.1% that is of the thermal inversion, 47.9% that is of subsidence inversion and 24.2% that is of the advection inversion.

Conclusion


The aim of this work is to analyze and classification characteristics of traditional inversion in Bandar Abbas station. Temperature inversion refers to the increase of air temperature with height along the vertical atmospheric column. For this purpose, the nighttime radiation inversion and subsidence inversion are identified from the analysis of Bandar Abbas upper-air station radiosonde data at 00Z from 17 October 2005 to 08 July 2024 and then analyzed. Detection of temperature inversion was done with RAOB application. The analysis includes frequency, depth, and strength of inversions on a monthly and annual basis. Based on the study results, it is found that the height of radiation inversion in Bandar Abbas has not exceeded 1500 meters in this statistical period. In the months of July and August, the highest frequency of radiation inversion is in the high of 501-700 meters but in the rest of

the months and in the whole period, the highest frequency is estimated in the high of 51-150 meters. Also, In the statistical period of 2005-2024, the maximum height of the radiation inversion ceiling of Bandar Abbas station is 1420 meters in May, 1428 meters in June, and 1413 meters in July. The results in Bandar Abbas station reveals that at least in half of the summer days (June, July, August, September) a radiation inversion was not developed. In addition, at in 85% of the days October, November, December, January, February and March a radiation inversion was detected. In winter the long length of winter nights and the southerly wind of the sea breeze to the land during the day and the northerly wind of the land breeze to the sea at night can provide suitable conditions for creating the radiation inversion in Bandar Abbas. In this station, the frequency of days without subsidence inversion in hot months, is less than in cold months of the year. This condition is due to the establishment of subtropical highs in the region. In addition, the frequency of deep and very deep radiative inversion in Bandar Abbas station is higher in the warm months of the year than in other months but the frequency of radiative inversion with moderate depth in the months of January, February, November and December are more than other months. The reason for this difference is the combination of the advection inversion created by the return branch of the sea breeze to land in the warm season with the nighttime radiation inversion. The results of the analysis of radiation inversion intensity showed that the frequency of very strong radiation inversion in November, December, and January is higher than the strong and moderate inversions.

Keywords: Radiation Inversion, Subsidence Inversion, Inversion intensity, Inversion depth, Bandar Abbas.



مطالعه وارونگی تابشی و فرونشینی مشاهداتی در بندرعباس طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۵

محمد مرادی^{۱*} , زهرا قصابی^۱، پرویز رضازاده^۲

۱- پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲- مشاور سازمان هواشناسی در امور پیش‌بینی، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲

چکیده گسترده

مقدمه

وارونگی دما که با افزایش دما با ارتفاع تعریف می‌شود (Feng et al, 2020)، از مبانی اصلی مطالعات آلودگی هوا است که عامل اصلی افزایش چگالی آلاینده‌های جوی در کلان‌شهرها و مناطق صنعتی می‌باشد (Li et al, 2022). این پدیده که اغلب در وردسپهر پایین عرض‌های جغرافیایی میانی و بالا رخ می‌دهد، می‌تواند انتقال جرم، گرما و رطوبت از لایه‌های زیرین جو به بالا را مهار کند (Li et al, 2019) و مانند یک درپوش، مانع خروج آلاینده‌ها از وردسپهر پایین شود (Xu et al, 2021). وارونگی دما ممکن است به دلایل گوناگون، با شدت‌های متفاوت و در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین، ایجاد شود. بر اساس نحوه شکل‌گیری، وارونگی دما به چهار گونه تابشی، فرونشینی، جبهه‌ای و همرفتی دسته‌بندی می‌شوند (Zeng et al, 2022). وارونگی دما بر اساس ارتفاع از سطح زمین نیز به وارونگی زمین پایه و سطوح بالاتر تفکیک شده‌اند. وارونگی تابشی و وارونگی فرارفتی یا دینامیکی (شامل جبهه‌ای، سطحی و کوه‌دشت) در دسته وارونگی زمین پایه قرار دارند. وارونگی حرارتی و وارونگی مکانیکی (شامل انواع وارونگی که با فرونشینی هوا، تلاطم و همرفت تشکیل می‌شود) نیز در دسته وارونگی زیرین جای داده شده‌اند. وارونگی حرارتی در ارتفاع ۱۵ تا ۳۵ کیلومتری در پوشش سپهر در اثر جذب پرتوهای فرابنفش خورشیدی توسط لایه ازن پوشش سپهری و افزایش دمای لایه فوقانی ایجاد می‌شود (Joly and Richard, 2022). وارونگی فرونشینی در ارتفاع ۲ تا ۴ کیلومتری از سطح زمین ایجاد شده و با فرونشینی هوا در نیمه شمالی سلول هادلی ایجاد می‌شود. واچرخندها عامل نوع دیگر وارونگی فرونشینی است که در ارتفاع ۱ تا ۲ کیلومتری تشکیل می‌شود (Lagmiri and Dahech, 2024). وارونگی تابشی زمانی رخ می‌دهد که سطح زمین گرمای جذب شده را در طول شب با فرایند تابش گرمایی مطابق قانون استفان-بولتزمن، با طول موج بلند به فضا منتشر می‌کند و سرد می‌شود ولی هوای بالای سطح هنوز گرمای خود را از دست نداده است (Xu et al, 2021). شب‌های طولانی، آسمان صاف و باد آرام، شرایط مناسب برای رخداد وارونگی تابشی است. وارونگی تابشی شدید ویژگی شب‌های پاییز و زمستان با آسمان صاف و بی‌ابر با باد آرام می‌باشد. در این تحقیق فراوانی رخداد، عمق و شدت وارونگی دما در ماه‌های مختلف ایستگاه کاوش جو بندرعباس بررسی می‌شود که برای برآورد ارتفاع لایه آمیخته و تحلیل آلودگی هوا برای طراحی سازه‌های بزرگ در این شهر، کاربرد زیادی دارد. تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های مشابه، استفاده از روش‌های آماری مناسب برای دسته‌بندی عمق و شدت وارونگی است که تاکنون در ایران از آن استفاده نشده است. استفاده از این روش سبب شده است تا نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین متفاوت شود.

استناد: مرادی، م. و همکاران، ۱۴۰۴. مطالعه وارونگی تابشی و فرونشینی مشاهداتی در بندرعباس، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۲)،

DOI: 10.48308/esrj.2025.237747.1241، (۹۰-۱۱۱)

E-mail: mmoradi@rimas.ac.ir

* نویسنده مسئول:



مواد و روش‌ها

برای بررسی وارونگی دما در بندرعباس، از داده‌های روزانه کاوش جو ایستگاه بندرعباس در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ استفاده شد. این داده‌ها که در برخی روزها دارای ناپیوستگی است، از ۱۷ اکتبر ۲۰۰۵ تا ۰۸ ژولای ۲۰۲۴ در دسترس است و به صورت گزارش تمپ از سازمان هواشناسی کشور گرفته شد. در این پژوهش به کمک نرم‌افزار RAOB، ابتدا انواع وارونگی دما در روزهای مختلف ماه‌های سال طی دوره آماری انتخابی، آشکار و سپس فراوانی، ضخامت و شدت آنها بر اساس اختلاف ارتفاع و اختلاف دمای بین کف و بام وارونگی محاسبه شد. برای دسته‌بندی ضخامت وارونگی تابشی و شدت آن بر اساس آزمون اندرسن-دارلینگ، از برازش بهترین تابع احتمال بر تغییرات ارتفاع و تغییرات دمای کف و بام لایه وارونگی استفاده شد و بر اساس مقادیر ۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد منحنی برازش شده، دسته‌بندی انجام شد. آستانه ۵ و ۹۵ درصد منحنی برازش شده برای برآورد مقادیر حدی کمترین و بیشترین (کمتر از ۵ درصد و بیش از ۹۵ درصد) به ترتیب برای دسته‌های کم اهمیت و خیلی شدید استفاده شد. آستانه‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای انتخاب چارک‌ها در نظر گرفته شد. مقادیر ۵ و ۲۵ درصد برای دسته خیلی ضعیف، ۲۵ و ۵۰ درصد برای ضعیف، ۵۰ و ۷۵ درصد برای متوسط و مقادیر ۷۵ و ۹۵ درصد به دسته شدید مربوط شد.

نتایج و بحث

ایستگاه ساحلی بندرعباس در شمال تنگه هرمز در موقعیتی است که تحت تاثیر نسیم دریا به خشکی و نسیم خشکی به دریا قرار دارد و شرایط دائمی متفاوتی در نزدیک سطح زمین برای ایجاد وارونگی یا برهم زدن آن را فراهم می‌کند. در طول روز نسیم دریا به خشکی، هوای خنک و مرطوب را به مناطق خشکی و در طول شب نسیم خشکی به دریا، هوای خنک و خشک را به مناطق ساحلی منتقل می‌کند. این شرایط که در غیاب سامانه‌های همدیدی بر منطقه حاکم است، در فصل‌های مختلف بندرعباس، سبب تغییرات دما با ارتفاع می‌شود و فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی را در ماه‌های مختلف دستخوش تغییر می‌کند. در ماه‌های گرم سال فراوانی روزهای بی‌وارونگی (با وارونگی) تابشی بیشتر (کمتر) از ماه‌های سرد سال است به طوری که در دو ماه ژوئیه و اوت ۷۴/۵ درصد روزهای دوره آماری انتخابی بی‌وارونگی تابشی (۲۵/۵ درصد با وارونگی تابشی) است در حالیکه فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه به کمتر از ۱۱ درصد کاهش یافته است (فراوانی روزهای با وارونگی تابشی به بیشتر از ۸۹ درصد رسیده است). یکی از علت‌های این اختلاف را می‌توان به بلند (کوتاه) بودن طول شب‌های زمستانی (تابستانی) منطقه نسبت داد. در شب‌های طولانی زمستان، مدت تابش شبانه زمین با طول موج بلند بیشتر از شب‌های دیگر سال است و در نتیجه کاهش دمای سطح زمین زیاد و اختلاف دمای سطح و ارتفاعات نزدیک سطح زمین بیشتر می‌شود. از این رو شرایط برای ایجاد وارونگی تابشی دما قوی‌تر در فصول سرد بندرعباس بهتر فراهم می‌شود. به همین دلیل در ماه‌های سرد سال، شدت وارونگی تابشی در بندرعباس بیش از ماه‌های گرم سال است. کاهش دمای هوا بر روی خشکی در شب‌های زمستان بیش از تابستان است، بنابراین جریان‌های شمالی نسیم خشکی به دریا در شب‌های طولانی فصول سرد، هوای سردتری را به سوی ساحل و آب‌های ساحلی و ایستگاه کاوش جو بندرعباس که در خشکی قرار دارد، منتقل می‌کند و سبب افزایش اختلاف دمای سطح ایستگاه و لایه‌های زیرین جو می‌شود. این سازوکار یکی از عوامل تشدید وارونگی تابشی بندرعباس در فصول سرد است. در تابستان با شب‌های کوتاه، کاهش دمای خشکی کم و شدت و طول مدت نسیم خشکی به دریا کوتاه است. این فرایند شرایط همرفت را در مناطق ساحلی فراهم می‌کند که طی آن دما در لایه‌های مختلف جو، تعدیل می‌شود. از این رو تابش شبانه زمین با طول موج بلند نیز نمی‌تواند عامل ایجاد وارونگی تابشی شدید در بندرعباس شود. این سازوکار عامل کاهش فراوانی روزهای با وارونگی تابشی شدید در بندرعباس است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق وارونگی شدید و خیلی شدید به وارونگی گفته می‌شود که اختلاف دمای بین کف و بام آن از ۵/۲ درجه سلسیوس بیشتر باشد. وارونگی عمیق و ژرف نیز نوعی از وارونگی است که اختلاف ارتفاع کف و سقف وارونگی بیشتر از ۲۳۲ متر برآورد شده باشد. این تعاریف بر اساس برازش بهترین تابع احتمال بر تغییرات ارتفاع و تغییرات دمای کف و بام لایه وارونگی بدست آمده است. بررسی‌ها نشان داد که فراوانی روزهای بدون وارونگی تابشی (با وارونگی تابشی) ایستگاه بندرعباس در ماه‌های گرم (سرد) بیش از ماه‌های سرد (گرم) سال است. به طوری که ۷۴/۵ درصد روزهای دوره آماری انتخابی طی ژوئیه و اوت، بدون

وارونگی تابشی (۲۵/۵ درصد با وارونگی تابشی) است در حالی که در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه روزهای بدون وارونگی تابشی کمتر از ۱۱ (با وارونگی تابشی، بیشتر از ۸۹) درصد است. طولانی بودن شب‌های زمستان که عامل افزایش مدت تابش شبانه زمین است و جریان‌های جنوبی نسیم دریا به خشکی در روز و جریان‌های شمالی نسیم خشکی به دریا در شب که از طریق فرارفت هوای سرد یا گرم عامل افزایش اختلاف دما در لایه‌های نزدیک سطح زمین هستند، می‌توانند شرایط مناسبی را برای بود و یا نبود وارونگی تابشی بندرعباس فراهم کنند. فراوانی روزهای بی‌وارونگی فرونشینی در این ایستگاه، طی ماه‌های گرم برخلاف وارونگی تابشی، کمتر از ماه‌های سرد سال است. این شرایط به سبب استقرار پر ارتفاع جنب حاره تابستانه در منطقه است که به سبب فرونشینی هوا در گستره شمالی سلول هادلی، فراوانی روزهای بی‌وارونگی فرونشینی را افزایش داده است. همچنین دیده شد که فراوانی وارونگی تابشی عمیق و ژرف در ماه‌های گرم سال در بندرعباس بیش از سایر ماه‌ها است در حالی که وارونگی تابشی با عمق متوسط در ماه‌های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر فراوان‌تر از بقیه ماه‌ها می‌باشد. علت این تفاوت، ترکیب وارونگی فرارفتی ایجاد شده توسط شاخه برگشت نسیم دریا به خشکی در فصل گرم با وارونگی تابشی شبانه می‌باشد. به علاوه ضخامت لایه وارونگی تابشی بندرعباس در ۷۲ درصد موارد کمتر یا مساوی ۲۳۲ متر است و در ۲۴ درصد موارد ضخامت آن بیش از ۲۳۲ متر می‌باشد. همچنین تحلیل شدت وارونگی تابشی نشان داد که فراوانی وارونگی تابشی خیلی شدید در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه بیش از دسته‌های شدید و متوسط است. افزون بر آن، مقدار فراوانی وارونگی تابشی شدید، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف در کل دوره آماری تفاوت چندانی ندارند و مقدار آنها بین ۲۰ تا ۲۵ درصد برآورد شده است. مقادیر فراوانی شدت وارونگی بر اساس گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متری نیز نتایج مشابهی را بدست داد. از بررسی ارتفاع سقف وارونگی فرونشینی در ایستگاه بندرعباس، دیده شد که از ۸۳/۲ درصد فراوانی برآورد شده برای وارونگی فرونشینی، ۲۴/۲ درصد برای وارونگی سطوح زیرین (وارونگی فرارفتی و بازمانده از لایه آمیخته) و ۵۹/۰ درصد برای وارونگی سطوح زیرین [۱۱/۱ درصد برای وارونگی گرمایی و ۴۷/۹ درصد برای وارونگی مکانیکی (۳۲/۵ درصد برای وارونگی ناشی از فعالیت واچرخند جنب‌حاره و ۱۵/۴ درصد برای وارونگی موثر از واچرخندهای عبوری، همرفت و تلاطم)] برآورد شده است.

واژگان کلیدی: وارونگی تابشی، وارونگی فرونشینی، شدت وارونگی، عمق وارونگی، بندرعباس.

مقدمه

متفاوت و در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین، ایجاد شود. بر اساس نحوه شکل‌گیری، وارونگی دما به چهار گونه تابشی، فرونشینی، جبهه‌ای و همرفتی دسته‌بندی می‌شوند (Zeng et al, 2022). وارونگی دما بر اساس ارتفاع از سطح زمین نیز به وارونگی زمین‌پایه و سطوح بالاتر تفکیک شده‌اند. وارونگی تابشی و وارونگی فرارفتی یا دینامیکی (شامل جبهه‌ای، سطحی و کوهدشت) در دسته وارونگی زمین‌پایه قرار دارند. وارونگی گرمایی و وارونگی مکانیکی (شامل انواع وارونگی که با فرونشینی هوا، تلاطم و همرفت تشکیل می‌شود) نیز در دسته وارونگی زیرین جای داده شده‌اند (Joly and Richard, 2019). وارونگی گرمایی در ارتفاع ۱۵ تا ۳۵ کیلومتری در پوشش سپهر در اثر جذب پرتوهای فرابنفش خورشیدی توسط لایه ازن پوشش سپهری و افزایش دمای لایه فوقانی ایجاد می‌شود (Joly and Richard, 2022). وارونگی فرونشینی در ارتفاع ۲ تا ۴

تغییرات قائم برخی کمیت‌های جوی مانند دما و باد عامل برخی رخداد‌های هواشناسی در لایه مرزی سیاره‌ای مثل تابش سطحی می‌باشد که سبب تغییر عمق لایه آمیخته می‌شود (Yavuz, 2024). وارونگی دمای سطح پایین که با افزایش دما با ارتفاع تعریف می‌شود (Feng et al, 2020)، از مبانی اصلی مطالعات آلودگی هوا است که عامل اصلی افزایش چگالی آلاینده‌های جوی در کلان‌شهرها و مناطق صنعتی می‌باشد (Li et al, 2022). این پدیده که اغلب در وردسپهر پایین عرض‌های جغرافیایی میانی و بالا رخ می‌دهد، می‌تواند انتقال جرم، گرما و رطوبت از لایه‌های زیرین جو به بالا را مهار کند (Li et al, 2019) و مانند یک درپوش، مانع خروج آلاینده‌ها از وردسپهر پایین شود و با توقف همرفت، جو را پایدارتر می‌کند (Xu et al, 2021). وارونگی دما ممکن است به دلایل گوناگون، با شدت‌های

وارونگی تابشی است. وارونگی تابشی شدید ویژگی شب‌های پاییز و زمستان با آسمان صاف و بی‌ابر با باد آرام می‌باشد. عمق و شدت وارونگی دما بر اساس به ترتیب ضخامت و دمای کف و بام وارونگی دسته‌بندی می‌شوند. عمق وارونگی در دسته‌های کم عمق، متوسط، عمیق و ژرف (Iyear and Nagar, 2011) و شدت وارونگی در دسته‌های ضعیف، متوسط، شدید و خیلی شدید (Stameulis et al, 2015) قرار می‌گیرند. نحوه دسته‌بندی این پژوهشگران در جدول ۱ نشان داده شده است. برخی پژوهشگران برای تعیین عمق وارونگی از گرادیان قائم دما در ضخامت ۱۰۰ متری (Nidzwids et al, 2021) استفاده کرده‌اند.

کیلومتری از سطح زمین ایجاد شده و با فرونشینی هوا در نیمه شمالی سلول هادلی ایجاد می‌شود. واچرخندها عامل نوع دیگر وارونگی فرونشینی است که در ارتفاع ۱ تا ۲ کیلومتری تشکیل می‌شود (Lagmiri and Dahech, 2024). انرژی طول موج کوتاه خورشید با امواج الکترومغناطیسی به زمین منتقل می‌شود و زمین گرمای آنرا را جذب می‌کند. وارونگی تابشی زمانی رخ می‌دهد که سطح زمین گرمای جذب شده را در طول شب با فرایند تابش گرمایی مطابق قانون استفان-بولتزمن، با طول موج بلند به فضا منتشر می‌کند و سرد می‌شود ولی هوای بالای سطح هنوز گرمای خود را از دست نداده است (Xu et al, 2021). شب‌های طولانی، آسمان صاف و باد آرام، شرایط مناسب برای رخداد

جدول ۱: دسته‌بندی پژوهشگران برای عمق و شدت وارونگی دما

Table 1: The inversion classification respect to the depth and intensity according to the researchers

Reference	Depth(m)		Intensity(°C)	
Iyear and Nagar, 2011	Shallow	0-200	Weak	0-2
	Moderate	201-400	Moderate	2-6
	Deep	401-600	Strong	6-10
	Very Deep	>600	Very Strong	>10
Stameulis et al, 2015	Shallow	0-50	Weak	0-2
	Moderate	50-100	Moderate	2-4
	Deep	100-150	Strong	4-6
	Very Deep	>150	Very Strong	>6
Nidzwids et al, 2021	Intensity base on vertical temperature gradients (°C/100m)			
	<0.5		Without Inversion	
	0.5-0.0		Weak Inversion	
	1.0-5.0		Moderate Inversion	
	≥ 5.0		Strong Inversion	

اختصار به چند نمونه اشاره می‌شود. لارگون و استاکوتی (Largeron and Staquet, 2016)، با داده‌های ساعتی غلظت PM10 و دمای ارتفاعات مختلف مربوط به دره گرنویل در منطقه آلپ فرانسه که از نوامبر ۲۰۰۶ تا مارس ۲۰۰۷ در دسترس بود، وارونگی دما و ارتباط آن با آلودگی ناشی از ذرات PM10 را بررسی کردند. آنها با تعریف وارونگی مداوم به عنوان وارونگی با تداوم بیش از سه روز، مشخص کردند که فراوانی وارونگی مداوم از نوامبر ۲۰۰۶ تا فوریه ۲۰۰۷ بیش از ۳۵ درصد است و در این مدت غلظت ذرات PM10 با افزایش پایداری لایه مرزی و توسعه وارونگی، افزایش یافته است. زنگ و همکاران (Zhang et al, 2020)، با استفاده از داده‌های رادیوسوند سایت ARM-SGP در شمال اوکلاهما با موقعیت ۹۷/۴۷ درجه طول جغرافیایی غربی و ۳۶/۱۶ درجه عرض جغرافیایی شمالی در یک دوره آماری ۱۷ ساله از ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۱۷، وارونگی دما در بالای ابرهای و ارتباط آن با

وارونگی دما و شرایط حاکم بر لایه مرزی جو شهری یکی از عوامل تعیین کننده آلودگی هوا در کلان‌شهرها است، از این رو پژوهشگران بسیاری وارونگی دما و لایه آمیخته را در مکان‌های مختلف بررسی کرده‌اند. دسته‌ای از پژوهشگران ویژگی‌های لایه وارونگی تابشی و نقش آن در افزایش آلودگی هوا و نیز ارتباط آن با عمق لایه مرزی در کلان‌شهرها تحلیل کرده‌اند (Largeron and Staquet, 2016). برخی ویژگی‌های لایه وارونگی دما در بالای قله ابر را برای تعیین رابطه وارونگی با سرمای تابشی در قله ابر را بررسی کرده‌اند (Zhang, 2020; Zhang et al, 2020). برخی نیز به بررسی ویژگی‌های وارونگی دمای زمین پایه با دیدگاه‌های دیگر پرداخته‌اند (Zeng et al, 2022) و برخی وارونگی دما در وردسپهر بالا را در فصل مونسون (Newton and Randel, 2020) بررسی کرده‌اند. برخی پژوهشگران نیز اثر وارونگی دما به تغییرات آب و هوایی منطقه زیر لایه وارونگی را تحلیل کرده‌اند (Swathi et al, 2018). در زیر به

۲۰۱۳ به سبب کمتر بودن فراوانی وارونگی گرمائی با ضخامت ۲۰۰-۱۰۰ متر در ارتفاع کمتر از سه کیلومتری، شرایط برای بارش‌های موسمی بیشتر فراهم بوده است در حالی که در سال ۲۰۰۹، وارونگی گرمایی که از طریق برهمکنش توده هوای گرم و خشک شمال دریای عرب با توده هوای خنک و مرطوب بالای جت سطح پایین آن دریا ایجاد شده و با جریان‌های جنوب غربی به منطقه گوا می‌رسد، بیشتر بوده است. این سازوکار با افزایش پایداری و سرکوب همرفت سبب کاهش بارش همرفتی در این فصل از سال شده است. تحلیل وارونگی دما برای ایستگاه‌های کاوش جو در ایران نیز مطالعات زیادی انجام شده است که روش کار برخی از آنها با روش پژوهش دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b)، مطابقت دارد و تفاوت آنها در انتخاب ایستگاه کاوش جو است (Tavousi and Hossein Abadi, 2017; Jahanbakhsh Asl and Ravshani, 2014; Dolatshahi et al, 2023a; Dolatshahi et al, 2022; Tulabi Nejad et al, 2023). همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) با استفاده از داده‌های رادیوسوند ایستگاه کاوش جو بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ و تحلیل شاخص‌های ناپایداری، انواع وارونگی و شدت آنها را در این ایستگاه بررسی کردند و نشان دادند که در ۳۱/۶ درصد موارد، وارونگی تابشی رخ داده است و بیشتر آنها از نوع بسیار شدید دسته‌بندی شده‌اند. در این پژوهش‌ها توضیح مناسب برای دسته‌بندی شدت وارونگی ارائه نشده است. هدف از این تحقیق بررسی فراوانی رخداد، عمق و شدت وارونگی دما در ماه‌های مختلف ایستگاه کاوش جو بندرعباس است که می‌تواند برای برآورد ارتفاع لایه آمیخته و تحلیل آلودگی هوا برای طراحی سازه‌های بزرگ در این شهر، کاربرد داشته باشد. تفاوت این پژوهش با سایرین، استفاده از روش‌های آماری مناسب برای دسته‌بندی عمق و شدت وارونگی است که تاکنون در ایران از آن استفاده نشده و ممکن است نتایج بدست آمده از پژوهش‌های پیشین را دگرگون سازد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی وارونگی دما در بندرعباس (۳۷/۵۶ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۲۲/۲۷ درجه عرض جغرافیایی شمالی)، از داده‌های کاوش جو ایستگاه بندرعباس در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ استفاده شد. این داده‌ها با برخی ناپیوستگی روزانه

سرمایش تابشی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی دما در بالای ابرهای تک لایه، به شدت کاهش یافته است و هنگامی که یک لایه ابر دیگر در بالای آن قرار گیرد، عمق وارونگی کم‌تر و شدت آن ضعیف‌تر می‌شود. آنها افزایش جذب تابش خورشیدی و گرمایش در قله ابر بالا و کاهش تابش خورشیدی و سرمایش در زیر ابر بالا را عامل این تغییرات دانسته‌اند. زینگ و همکاران (Zeng et al, 2022)، با استفاده از داده‌های ۴۹۳ رادیوسوند ایستگاه کاوش جو، تغییرات وارونگی دمای نزدیک سطح زمین دو نیمکره شمالی و جنوبی در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۸۹ را بررسی کردند و نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی دمای نزدیک سطح زمین در نیمکره شمالی بیش از نیمکره جنوبی است و عمق و شدت لایه وارونگی نزدیک سطح زمین در این دوره آماری افزایش داشته در حالی که افت و خیز تغییرات شدت و عمق آن کاهش یافته است. این پژوهشگران همچنین مشخص کردند که در پانزده سال منتهی به ۲۰۱۹، فراوانی رخداد وارونگی سطح زمین بر روی اقیانوس‌ها نسبت به خشکی‌ها بیشتر شده است و شدت این نوع وارونگی بر روی خشکی‌ها، تقریباً دو برابر آن در روی اقیانوس‌ها می‌باشد. نیوتن و راندال (Newton and Randel, 2020)، با استفاده از داده‌های GPS در دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۱، وارونگی دما در وردسپهر بالا بر روی اقیانوس هند حاره‌ای در فصل مونسون را بررسی کردند و نشان دادند که ارتفاع سالانه حدود سی درصد از این نوع وارونگی از سطح زمین به حدود ۱۵ کیلومتر می‌رسد و بیشترین ارتفاع این نوع وارونگی مربوط به ژوئیه تا سپتامبر می‌باشد. اسواتی و همکاران (Swathi et al, 2018)، با استفاده از داده‌های رادیوسوند ایستگاه گوا با موقعیت ۷۴ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۱۵/۵ درجه عرض جغرافیایی شمالی در سواحل غربی هند، ضخامت وارونگی سطحی را در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر در دو سال ۲۰۰۹ (به عنوان سال خشک) و ۲۰۱۳ (به عنوان سال تر) از دیدگاه آماری بررسی کردند و نشان دادند که این نوع وارونگی در ایجاد شرایط جوی سطح زیرین نقش مهمی به عهده دارد. این پژوهشگران ابتدا ضخامت وارونگی گرمایی را به پنج دسته در ارتفاع‌های مختلف وردسپهر تقسیم کردند و سپس فراوانی هر دسته را در هر ارتفاع برآورد کردند. آنها نشان دادند که در دوره مونسون سال

دریافتی، برای تحلیل لایه وارونگی، از نرم افزار ROAB نسخه ۵/۶ استفاده شد. با این نرم افزار، نیمرخ قائم دما و دمای نقطه شبنم رسم شد و ترازهای ارتفاعی مربوط به انواع وارونگی بدست آمد. در برخی روزها وارونگی تابشی آشکار نشد و در برخی دیگر وارونگی تابشی، فرونشینی و جبهه‌ای به طور همزمان آشکار شد که هر یک به تفکیک تحلیل شدند.

از ۱۷ اکتبر ۲۰۰۵ تا ۰۸ ژوئیه ۲۰۲۴ در دسترس هستند و به صورت گزارش تمپ از سازمان هواشناسی کشور گرفته شد. در این دوره آماری، ۳۳۰۸ گزارش بررسی شد. تعداد روزهای ممکن، تعداد گزارش‌های در دسترس و درصد گزارش‌های استفاده شده در ماه‌های مختلف دوره آماری در جدول ۲ نشان داده شده است. در طول دوره آماری انتخابی تنها ۴۸/۴ درصد گزارش‌های ایستگاه کاوش جو بندرعباس در دسترس بوده‌اند. پس از اطمینان از درستی گزارش‌های

جدول ۲: تعداد گزارش‌های تمپ ایستگاه کاوش جو بندرعباس از ۱۷ اکتبر ۲۰۰۵ تا ۸ ژوئیه ۲۰۲۴

Table 2: Number of the available temp reports in Bandar Abbas station from 17 October 2005 to 08 July 2024

Month	Number of day	Number of available temp	Available temp(%)	Month	Number of day	Number of available temp	Available temp(%)
January	589	315	53.5	July	566	228	40.3
February	537	266	49.5	August	558	231	41.4
March	589	302	51.3	September	540	246	45.6
April	570	243	42.6	October	571	282	49.4
May	589	327	55.5	November	570	285	50.0
June	570	275	48.2	December	589	308	52.3
Total					6838	3308	48.4

ضعیف، ۵۰ و ۷۵ درصد برای متوسط و مقادیر ۷۵ و ۹۵ درصد به شدید مربوط شد. در ادامه با استفاده از گرادیان دما در عمق صد متر مشابه پژوهش یاووز (Yavuz, 2024)، شدت وارونگی تابشی نیز برآورد و با نتایج قبل مقایسه شد. شکل ۱ برازش بهترین تابع توزیع احتمال بر توزیع تجمعی داده‌های عمق وارونگی تابشی با استفاده از اختلاف ارتفاع، اختلاف دما و گرادیان قائم دمای وارونگی تابشی را نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر برآورد شده، ضخامت و شدت لایه وارونگی تابشی مطابق جدول‌های ۳ و ۴ دسته‌بندی شد و فراوانی دسته‌های مختلف برآورد، محاسبه و تحلیل شدند.

برای دسته‌بندی ضخامت وارونگی تابشی و شدت آن بر اساس آزمون اندرسن-دارلینگ، از برازش بهترین تابع احتمال بر تغییرات ارتفاع و تغییرات دمای کف و بام لایه وارونگی استفاده شد و بر اساس مقادیر ۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد منحنی برازش شده، دسته‌بندی انجام شد. آستانه ۵ و ۹۵ درصد منحنی برازش شده برای برآورد مقادیر حدی کمترین و بیشترین (کمتر از ۵ درصد و بیش از ۹۵ درصد) منحنی برازش شده به ترتیب برای دسته‌های کم اهمیت و خیلی شدید استفاده شد. آستانه‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای انتخاب چارک‌ها در نظر گرفته شد. مقادیر از ۵ و ۲۵ درصد برای دسته خیلی ضعیف، ۲۵ و ۵۰ درصد برای

جدول ۳: دسته‌بندی ضخامت وارونگی تابشی ایستگاه بندرعباس، بر اساس تغییرات ارتفاع لایه وارونگی.

Table 3: The depth of radiation inversion classification in Bandar Abbas station base on thickness of inversion

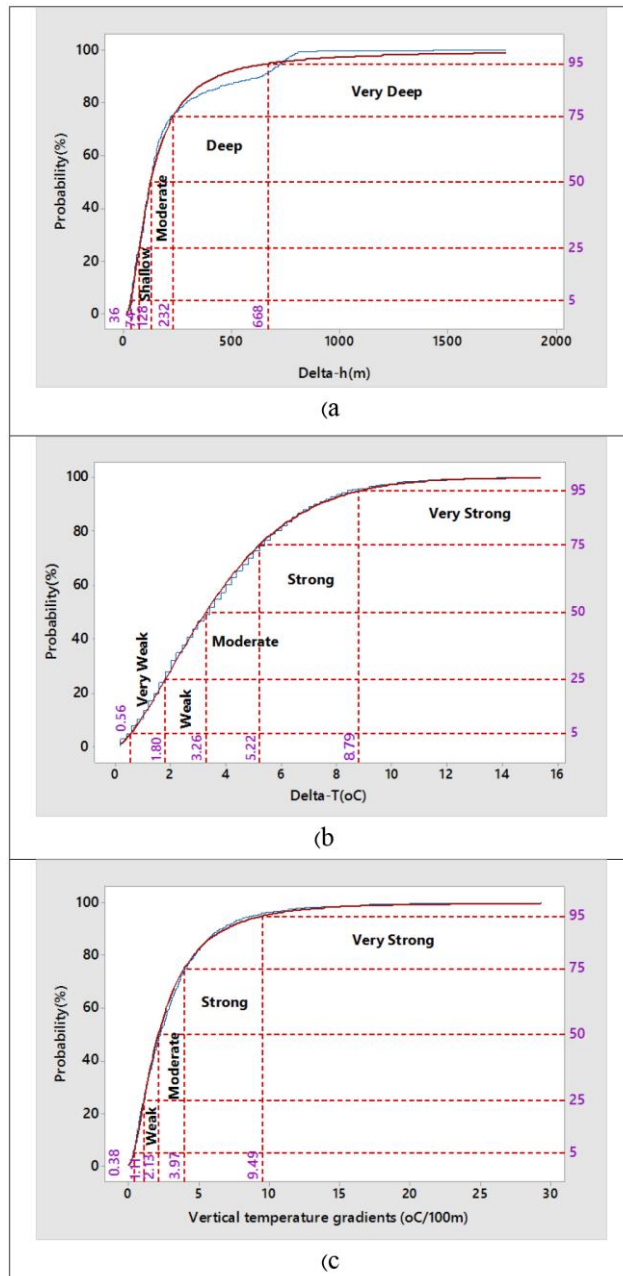
Depth	Delta-h(m)
Negligible	< 36
Very Shallow	36-74
Shallow	75-128
Moderate	129-232
Deep	233-668
Very Deep	>668

Delta-h is the height of the top of the inversion from the bottom

جدول ۴: دسته‌بندی شدت وارونگی تابشی ایستگاه بندرعباس، بر اساس تغییرات دما و گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متر.

Table 4: The intensity of radiation inversion classifies in Bandar Abbas station base on Delta-T(°C) and vertical temperature gradients (°C/100m)

Intensity	Delta-T(°C)	Base on vertical temperature gradients (°C/100m)
Negligible	<6	<0.4
Very Weak	0.7-1.8	0.4-1.1
Weak	1.9-3.3	1.2-2.1
Moderate	3.4-5.2	2.2-4.0
Strong	5.3-8.8	4.1-9.5
Very Strong	>8.8	>9.5



شکل ۱: برازش بهترین تابع توزیع احتمال بر توزیع تجمعی عمق وارونگی تابشی بر حسب: (a) اختلاف ارتفاع، (b) اختلاف دمای کف و

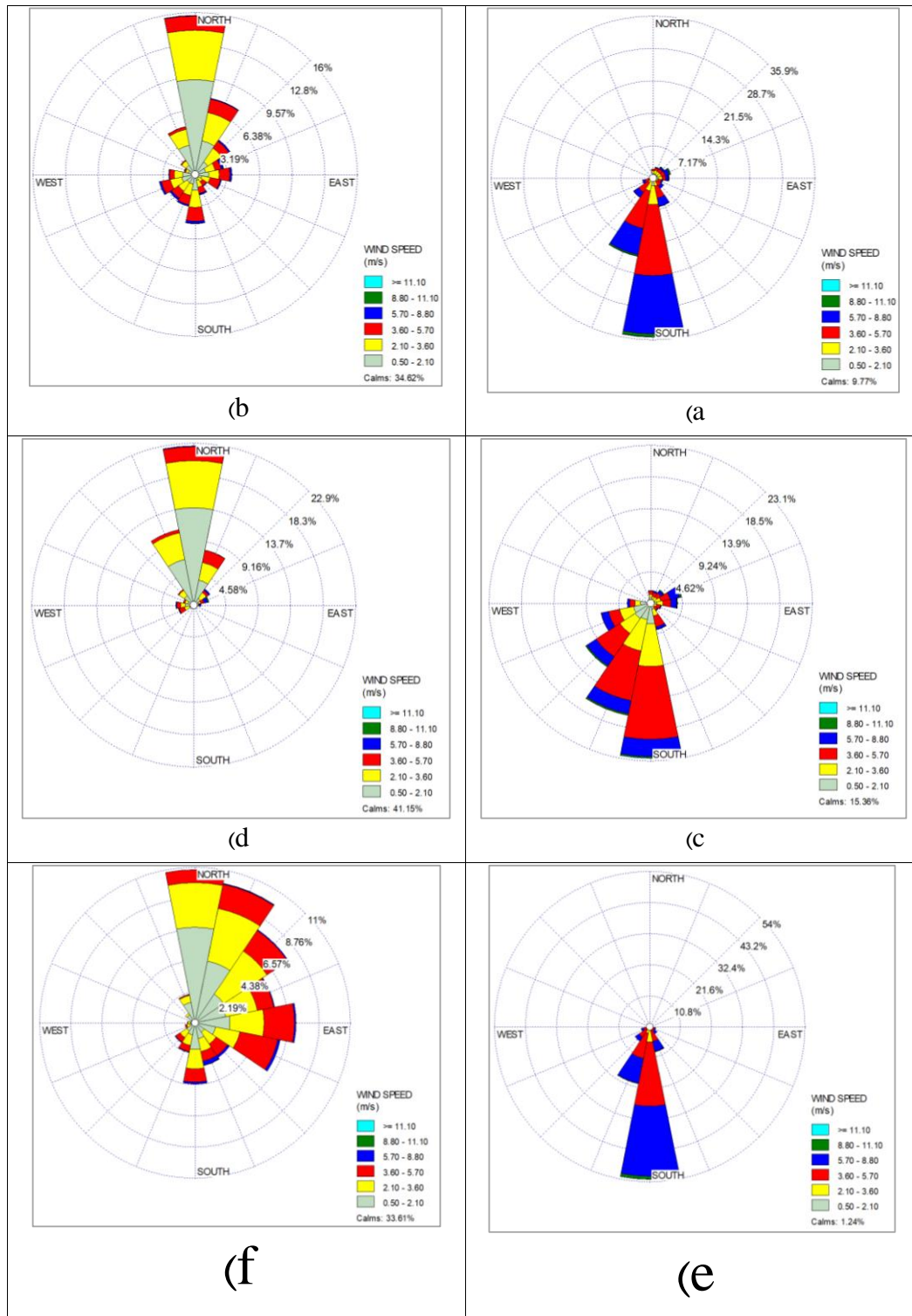
سقف لایه وارونگی و (c) گرادیان قائم دما در ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴

Fig. 1: Fitting the best probability distribution function to the cumulative distribution of depth of radiation inversion, a: Delta-h (m), b: Delta-T(°C) and c: Vertical temperature gradients (°C/100m) in Bandar Abbas station (2005-2024).

نتایج

ایستگاه ساحلی بندرعباس در شمال تنگه هرمز در موقعیتی قرار دارد که تحت تاثیر نسیم دریا به خشکی و نسیم خشکی به دریا قرار دارد و شرایط دمائی متفاوتی در نزدیک سطح زمین برای ایجاد وارونگی یا برهم زدن آن را فراهم می‌کند. شکل‌های a ۲ و b ۲ الگوی باد سالانه بندرعباس را به ترتیب در طول روز و شب مشخص کرده است. در طول روز نسیم دریا به خشکی، هوای خنک و مرطوب را به مناطق خشکی و در طول شب نسیم خشکی به دریا، هوای خنک و خشک را به مناطق ساحلی منتقل می‌کند. این شرایط که در غیاب سامانه‌های همدیدی بر منطقه حاکم است، در فصل‌های مختلف بندرعباس، سبب تغییرات دما با ارتفاع می‌شود و فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی را در ماه‌های مختلف دستخوش تغییر می‌کند. برای ماه‌های سرد (مثل ماه ژانویه) و گرم (ژوئن، ژوئیه، اوت) نیز الگوی باد غالب ماهانه که در شکل‌های c ۲ تا f ۲ نشان داده شده است، در روز جنوبی، جنوب‌غربی و در شب شمالی، شمال‌شرقی است و با الگوی سالانه مطابقت دارد. شکل ۳ فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی در دوره آماری انتخابی در ماه‌های مختلف ایستگاه بندرعباس را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در ماه‌های گرم (سرد) سال فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی بیشتر (کمتر) است به طوری که در دو ماه ژوئیه و اوت ۷۴/۵ درصد روزهای دوره آماری انتخابی بی‌وارونگی تابشی است در حالی که مقدار آن در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه به کمتر از ۱۱ درصد کاهش یافته است. یکی از علت‌های این اختلاف را می‌توان به بلند(کوتاه) بودن طول شب‌های زمستانی(تابستانی) منطقه نسبت داد. در شب‌های طولانی زمستان، مدت تابش شبانه زمین با طول موج بلند بیشتر است و در نتیجه کاهش دمای سطح زمین زیاد و اختلاف دمای سطح و ارتفاعات نزدیک سطح زمین بیشتر می‌شود. از این رو شرایط برای ایجاد

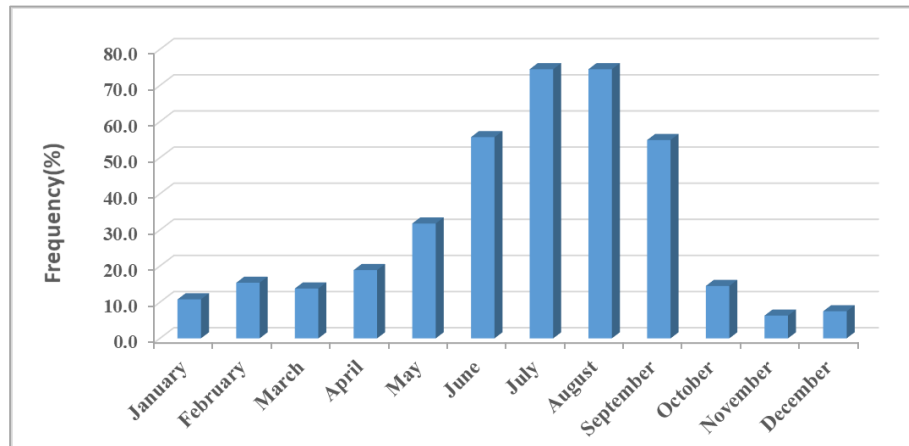
وارونگی تابشی دما قوی‌تر در فصول سرد بندرعباس بهتر فراهم می‌شود. به همین دلیل در ماه‌های سرد سال، شدت وارونگی تابشی در بندرعباس بیش از ماه‌های گرم سال است. نمونه‌ای از وارونگی تابشی در ماه‌های مختلف فصل سرد در شکل ۴ نشان داده شده است. کاهش دمای هوا بر روی خشکی در شب‌های زمستان بیش از تابستان است، بنابراین جریان‌های شمالی نسیم خشکی به دریا در شب-های طولانی فصول سرد، هوای سردتری را به سوی ساحل و آب‌های ساحلی و ایستگاه کاوش جو بندرعباس منتقل می‌کند که سبب افزایش اختلاف دمای سطح و لایه‌های زیرین جو می‌شود. این سازوکار عامل تشدید وارونگی تابشی بندرعباس در فصول سرد می‌شود. در تابستان با شب‌های کوتاه، کاهش دمای خشکی اندک و شدت و طول مدت نسیم خشکی به دریا کوتاه است. این فرایند شرایط همرفت را در مناطق ساحلی فراهم می‌کند که طی آن دما در لایه‌های مختلف جو، تعدیل می‌شود. از این رو تابش شبانه زمین با طول موج بلند نیز نمی‌تواند عامل ایجاد وارونگی تابشی شدید در بندرعباس شود. این سازوکار عامل کاهش فراوانی روزهای با وارونگی تابشی شدید در بندرعباس است. شکل ۵ فراوانی روزهای بی‌وارونگی فرونشینی ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۵ را بر حسب درصد نشان می‌دهد. دیده می‌شود که فراوانی روزهای بی‌وارونگی فرونشینی در ماه‌های گرم سال کمتر از بقیه ماه‌ها است. این شرایط به سبب استقرار پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای تابستانه در منطقه است (شکل ۶) که به سبب فرونشینی هوا در گستره شمالی سلول هادلی، فراوانی روزهای با وارونگی فرونشینی را افزایش داده است. از اواخر ماه ژوئیه که زاویه میل خورشیدی کاهش می‌یابد، پراارتفاع جنب‌حاره نیز هماهنگ با آن به عرض‌های جغرافیایی جنوبی‌تر جابجا می‌شود و در نتیجه فراوانی روزهای با وارونگی فرونشینی در ماه‌های اوت و سپتامبر بیش از ماه‌های آوریل، مه و ژوئن می‌شود.



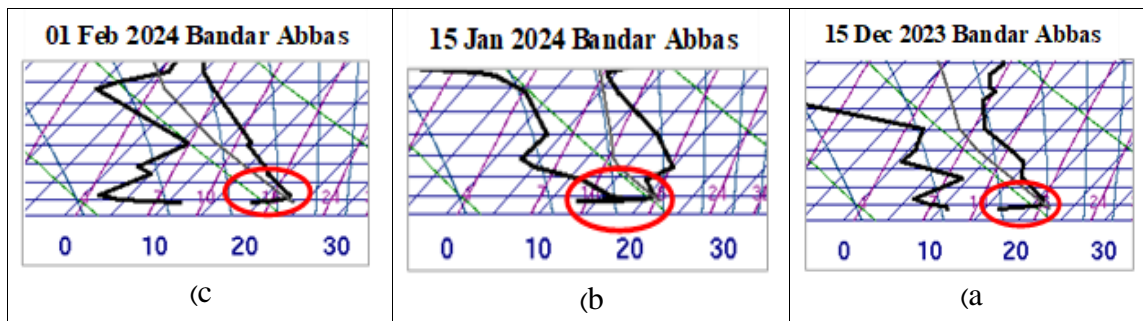
شکل ۲: گلباد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۰ در a: روز، سالانه، b: شب، سالانه، c: روز، ماه ژانویه، d: شب، ماه ژانویه، e:

روز، ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت، f: شب، ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت

Fig. 2: Wind rose diagrams in Bandar Abbas (2005-2024), a: Day-Annual, b: Night-Annual, c: Day-January, d: Night-January, e: Day-June, July, August, f: Night-June, July, August

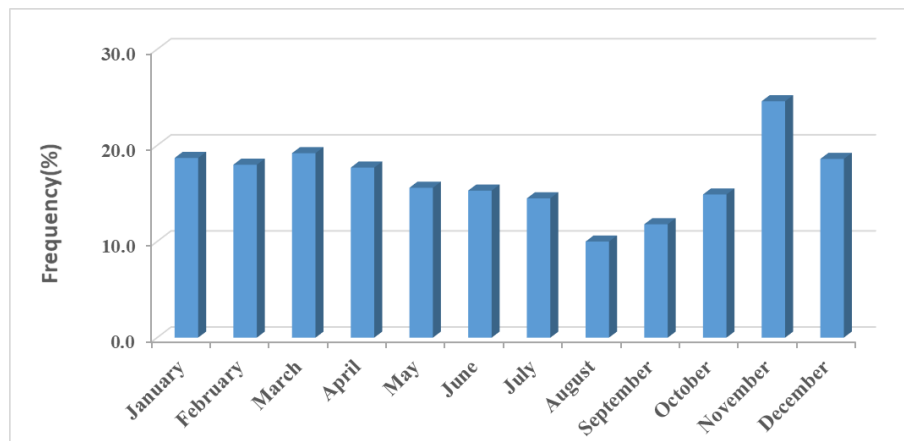


شکل ۳: فراوانی (درصد) روزهای بی‌وارونگی تابشی در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴ ایستگاه بندرعباس در ماه‌های مختلف
 Fig. 3: The monthly frequencies (%) of days without radiation inversion in Bandar Abbas (2005-2024)

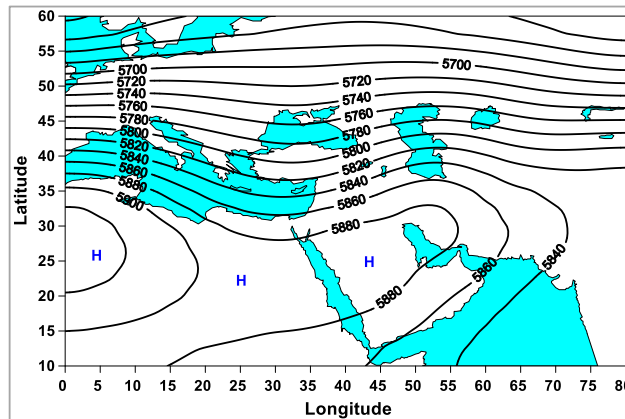


شکل ۴: نیمرخ قائم دما و دمای نقطه شبنم ایستگاه کاوش جو بندرعباس در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ روزهای a: ۱۵ دسامبر ۲۰۲۳، b: ۱۵ ژانویه ۲۰۲۴ و c: ۰۱ فوریه ۲۰۲۴. دایره قرمز جایگاه وارونگی تابشی را نشان می‌دهد.

Fig. 4: Skew-T diagram at 0000Z in Bandar Abbas station in a: 15-Dec-2023, b: 15-Jan-2024 and c: 01-Feb-2024. The red circle indicates the location of the radiation inversion.



شکل ۵: فراوانی (درصد) روزهای بدون وارونگی فرونشینی در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴ ایستگاه بندرعباس در ماه‌های مختلف
 Fig. 5: The monthly frequencies (%) of the days without subsidence inversion in Bandar Abbas (2005-2024)



شکل ۶: الگوی میانگین فصلی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (متر) در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت ۲۰۱۰-۱۹۸۱. محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه هستند.

Fig. 6: Average height(m) at 500 hPa for summer (Jun, July and August) at 1981-2010. The coordinate axes are longitude and latitude in degrees.

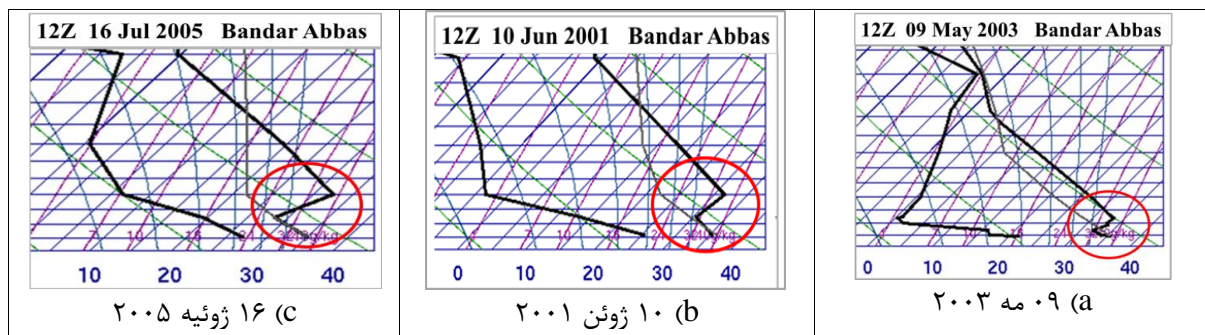
در این دو ماه (ژوئیه و اوت) بیش از ماه‌های دیگر است. شایان ذکر است که فراوانی ارتفاع وارونگی تابشی در دسته ۱۵۰۰-۱۰۰۱ متر در بیشتر ماه‌های سال صفر است ولی این مقدار در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه بزرگتر از صفر برآورد شده است. برای یافتن دلایل این تفاوت، نیمرخ قائم دما و دمای نقطه شبنم ایستگاه بندرعباس در ساعات بعد از ظهر بررسی شد. شکل ۷ نمونه‌ای از نمودار ترمودینامیکی اسکیموتی بندرعباس را در روزهای (a) ۰۹ ماه می سال ۲۰۰۳، (b) ۱۰ ژوئیه سال ۲۰۰۱ و (c) ۱۶ ژوئن سال ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد. در هر سه شکل، یک لایه وارونگی دما که با دایره قرمز مشخص شده است، در نزدیکی سطح زمین با ارتفاع پایه بیش از ۶۰۰ متر و سقف کمتر از ۱۵۰۰ متر آشکار شده‌اند. این لایه وارونگی دما ناشی از فرارفت هوای گرم شاخه برگشتی نسیم دریا به خشکی در روزهای گرم تابستان می‌باشد. در شب کوتاه تابستان در صورت تضعیف نسیم خشکی به دریا، تابش زمین به خوبی انجام می‌شود و وارونگی تابشی ایجاد شده با وارونگی فرارفتی بالاتر ترکیب و یک لایه وارونگی مرتفع‌تر ایجاد کرده است. بنابراین ترکیب وارونگی فرارفتی ناشی از شاخه برگشت نسیم دریا به خشکی در روزهای گرم تابستان با وارونگی تابشی شبانه بندرعباس در این فصل، می‌تواند یکی از عوامل غیر صفر بودن فراوانی ارتفاع وارونگی تابشی در دسته ۱۵۰۰-۱۰۰۱ متر باشد. بیشترین ارتفاع سقف وارونگی تابشی این دوره آماری مربوط به ماه مه (۱۴۲۰ متر)، ژوئن (۱۴۲۸ متر) و برای ماه ژوئیه ۱۴۱۳ متر می‌باشد.

در شب‌های طولانی زمستان که خشکی‌ها سردتر از پهنه‌های آبی هستند، در سطوح پایین هوای سرد و خشک مناطق خشکی با جریان‌های شمالی نسیم خشکی به دریا، به ایستگاه بندرعباس انتقال می‌یابد. در این مدت، در شاخه همرفت نسیم خشکی به دریا با عمق کم یا شاخه برگشت این گردش، هوای گرم و مرطوب با جریان‌های جنوبی به ایستگاه بندرعباس منتقل می‌شود و در اثر اختلاف دمای ایجاد شده، نوعی وارونگی دما در ارتفاع بالای وارونگی تابشی در ایستگاه بندرعباس تشکیل می‌شود که در اثر فرارفت هوای گرم و مرطوب تشکیل شده است. این وارونگی دما از نوع فرارفتی است که به سبب نبود ابزارهای مناسب برای آشکارسازی، با وارونگی فرونشینی اشتباه گرفته می‌شود. ارتفاع پایه این وارونگی در بندرعباس کمتر از یک کیلومتر است، از این رو گاهی بلافاصله بعد از وارونگی تابشی، وارونگی فرونشینی حاکم می‌شود. در جدول ۵ فراوانی وارونگی تابشی بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۵ در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. دیده می‌شود که در این دوره آماری در دسته بیش از ۱۵۰۰ متر، فراوانی این فراسنج صفر برآورد شده است که نشان می‌دهد ارتفاع وارونگی تابشی در بندرعباس در این دوره آماری فراتر از ۱۵۰۰ متر نیستند. در ماه‌های ژوئیه و اوت بیشترین فراوانی وارونگی تابشی در دسته ۷۰۰-۵۰۱ متر قرار گرفته است در حالی که بیشترین فراوانی در بقیه ماه‌ها و نیز در کل دوره، در دسته ۱۵۰-۵۱ متر قرار دارند. یکی از دلایل این تفاوت، این است که فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی

جدول ۵: فراوانی (درصد) لایه وارونگی تابشی در ارتفاع‌های مختلف (متر) ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴

Table 5: Monthly and annual frequencies (%) of the of radiation inversion layers in deferent height (m) in Bandar Abbas station (2005-2024)

Month	Height(m)							
	1-50	51-150	151-300	301-500	501-700	701-1000	1001-1500	>1500
January	9.5	45.7	30.2	2.9	0.6	0.3	0.0	0.0
February	8.3	50.0	18.4	4.5	0.4	3.0	0.0	0.0
March	13.6	48.7	10.3	4.0	3.3	6.3	0.0	0.0
April	16.5	39.1	8.6	4.9	4.2	7.8	0.0	0.0
May	15.6	21.5	6.7	5.8	7.3	11.0	0.3	0.0
June	5.1	15.6	3.6	5.8	12.0	1.1	1.1	0.0
July	1.3	5.3	2.2	1.3	12.3	1.8	1.3	0.0
August	2.6	7.4	2.6	3.5	7.7	1.7	0.0	0.0
September	8.6	15.9	8.9	2.4	2.8	6.5	0.0	0.0
October	9.2	37.6	22.4	6.4	2.8	7.1	0.0	0.0
November	6.7	55.7	23.9	4.2	0.7	2.5	0.0	0.0
December	7.2	43.1	32.7	7.2	1.3	1.0	0.0	0.0
Annual	8.9	33.3	14.9	4.5	4.4	4.2	0.2	0.0



شکل ۷: نیمرخ قائم دما و دمای نقطه شبنم ایستگاه بندرعباس در ساعت ۱۲۰۰ گرینویچ روزهای a: ۰۹ مه ۲۰۰۳، b: ۱۰ ژوئن ۲۰۰۱ و c: ۱۶ ژوئیه ۲۰۰۵. دایره قرمز جایگاه وارونگی فرونشینی را در لایه ۱۵۰۰-۶۰۰ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد.

Fig. 7: Skew-T diagram at 1200Z in Bandar Abbas station in a: 09-May-2003, b: 10-Jun-2001 and c: 16-Jul-2005. The red circle indicates the location of the subsidence inversion.

ماه‌های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر بیشتر از بقیه ماه‌ها می‌باشد. علت این تفاوت، ترکیب وارونگی فرارفتی ناشی از شاخه برگشتی نسیم دریا به خشکی در فصل گرم با وارونگی تابشی شبانه می‌باشد. شکل ۹ فراوانی سالانه ضخامت لایه وارونگی تابشی در طول دوره آماری انتخابی ایستگاه بندرعباس را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که ۷۲ درصد موارد ضخامت لایه وارونگی تابشی بندرعباس کمتر یا مساوی ۲۳۲ متر است و ضخامت آنها در ۲۴ درصد موارد بیش از ۲۳۲ متر بیشتر می‌باشد. در ۴ درصد موارد نیز ضخامت وارونگی تابشی قابل چشم‌پوشی هستند.

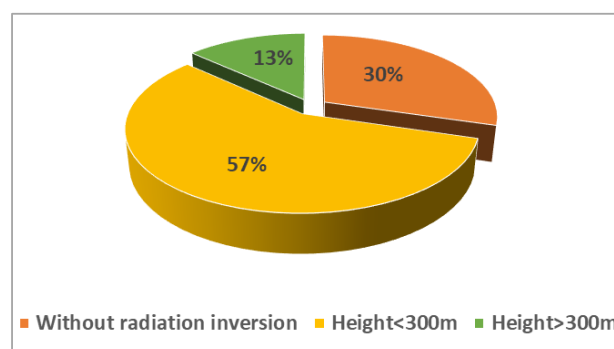
شکل ۸ فراوانی سقف وارونگی تابشی با ارتفاع کمتر و بیشتر از ۳۰۰ متر را در طول دوره آماری انتخابی ایستگاه بندرعباس نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در ۵۷ درصد موارد این ایستگاه، سقف ارتفاع وارونگی تابشی ۳۰۰ متر و یا کمتر از ۳۰۰ متر است و در ۳۰ درصد آن ۳۰۰ متر و بیشتر است. در ۱۳ درصد موارد نیز وارونگی تابشی آشکار نشده است. جدول ۶ فراوانی ماهانه ضخامت وارونگی تابشی در دسته‌های مختلف را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که فراوانی وارونگی عمیق و ژرف در ماه‌های گرم سال بیش از بقیه ماه‌ها است و فراوانی وارونگی با عمق متوسط در

جدول ۶: فراوانی (درصد) ضخامت لایه وارونگی تابشی (متر) در دسته‌های مختلف ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴
 Table 6: Monthly and annual frequencies (%) of the thickness of radiation inversion layers in deferent height (m) in Bandar Abbas station (2005-2024)

Month	Negligible	Very Shallow	Shallow	Moderate	Deep	Very Deep	Number of radiation inversion
	0-35	36-74	75-128	129-232	233-668	>668	
January	2.8	15.7	28.5	43.8	8.9	0.4	281
February	2.2	16.4	40.0	27.6	10.2	3.6	225
March	5.0	25.0	37.7	13.5	11.2	7.7	260
April	6.5	33.8	26.9	6.9	15.3	10.6	216
May	7.6	33.2	10.8	6.7	22.0	19.7	223
June	3.3	21.3	18.9	5.7	28.7	22.1	122
July	0.0	13.8	8.6	8.6	43.1	25.9	58
August	0.0	23.7	15.3	3.4	37.3	20.3	59
September	3.6	30.6	17.1	19.8	11.7	17.1	111
October	2.1	20.3	26.6	26.6	15.8	8.7	241
November	1.9	13.5	36.7	32.2	13.1	2.6	267
December	1.4	11.0	27.6	42.4	16.6	1.1	283
Annual	3.4	20.9	27.5	23.7	15.9	8.5	2346

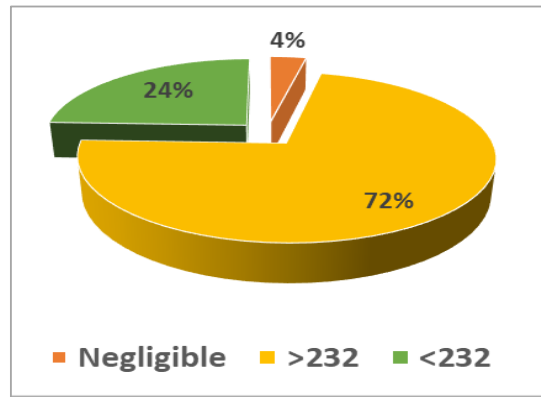
نتایج این بخش از تحقیق با نتایج پژوهش ایر و نگار (Iyear and Stameulis (and Nagar, 2011) و استامولیس و همکاران (Stameulis et al, 2015) مقایسه شد و بی‌توجه به موقعیت ایستگاه مطالعاتی و دوره آماری متفاوت، هماهنگی مناسبی بین این نتایج مشاهده شد. در هر سه پژوهش فراوانی رخداد وارونگی عمیق و ژرف کمتر از فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و با عمق متوسط برآورد شده است. استامولیس و همکاران (Stameulis et al, 2015) وارونگی شبانه ایستگاه هلینیکون در جنوب غرب آتن در کشور یونان (۲۳ درجه و ۴۴ دقیقه طول جغرافیایی شرقی و ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی) را در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۳ بررسی کردند و نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و ضعیف، بیشتر از فراوانی وارونگی عمیق (۶ درصد) و بسیار عمیق (۴ درصد) است. ایر و نگار (Iyear and Nagar, 2011) نیز در بررسی وارونگی زمستانه ایستگاه‌های مختلف کاوش جو شمال هند در دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۱ نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و با عمق متوسط بیشتر از فراوانی رخداد وارونگی عمیق و خیلی عمیق می‌باشد.

نتایج این بخش از تحقیق با نتایج پژوهش ایر و نگار (Iyear and Stameulis (and Nagar, 2011) و استامولیس و همکاران (Stameulis et al, 2015) مقایسه شد و بی‌توجه به موقعیت ایستگاه مطالعاتی و دوره آماری متفاوت، هماهنگی مناسبی بین این نتایج مشاهده شد. در هر سه پژوهش فراوانی رخداد وارونگی عمیق و ژرف کمتر از فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و با عمق متوسط برآورد شده است. استامولیس و همکاران (Stameulis et al, 2015) وارونگی شبانه ایستگاه هلینیکون در جنوب غرب آتن در کشور یونان (۲۳ درجه و ۴۴ دقیقه طول جغرافیایی شرقی و ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی) را در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۳ بررسی کردند و نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و ضعیف، بیشتر از فراوانی وارونگی عمیق (۶ درصد) و بسیار عمیق (۴ درصد) است. ایر و نگار (Iyear and Nagar, 2011) نیز در بررسی وارونگی زمستانه ایستگاه‌های مختلف کاوش جو شمال هند در دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۱ نشان دادند که فراوانی رخداد وارونگی کم عمق و با عمق متوسط بیشتر از فراوانی رخداد وارونگی عمیق و خیلی عمیق می‌باشد.



شکل ۸: فراوانی روزهای بی‌وارونگی تابشی و ارتفاع سقف وارونگی تابشی کمتر و بیشتر از ۳۰۰ متر بندرعباس برحسب درصد در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴.

Fig. 8: The frequency (%) of days without radiation inversion, top of radiation inversion less than and greater than 300m in Bandar Abbas (2005-2024)



شکل ۹: فراوانی (%) ضخامت لایه وارونگی تابشی کمتر و بیشتر از ۲۳۲ متر در بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۵.
 Fig. 9: The frequency (%) of thickness of radiation inversion layers less than and greater than 232m in Bandar Abbas (2005-2024)

آنها از ۲۰ تا ۲۵ درصد برآورد شده است. مقادیر فراوانی شدت وارونگی بر اساس گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متری نیز نتایج مشابهی را بدست می‌دهد (جدول ۸). بررسی مقادیر کلی فراوانی شدت وارونگی بر اساس اختلاف دما و گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متری نشان داد که در بیشتر دسته‌ها، تفاوت چندانی ندارند (شکل ۱۰) به طوری که فراوانی شدید و خیلی شدید در هر دو روش یکسان است و اختلاف آنها در دسته‌های دیگر نیز از نیم تا دو درصد است.

جدول‌های ۷ و ۸ فراوانی ماهانه شدت وارونگی تابشی در دسته‌های مختلف به ترتیب بر اساس اختلاف دما و گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متری در بندرعباس را نشان می‌دهند. جدول ۷ نشان می‌دهد که مقدار فراوانی وارونگی تابشی خیلی شدید در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه بیش از دسته‌های شدید و متوسط است. دیده می‌شود که مقدار فراوانی وارونگی تابشی شدید، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف در کل دوره آماری تفاوت چندانی ندارند و مقدار

جدول ۷: فراوانی (درصد) شدت لایه وارونگی تابشی (درجه سلسیوس) بر اساس اختلاف دمای لایه در دسته‌های مختلف در ایستگاه بندر عباس در دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۵

Table 7: Monthly and annual frequencies (%) of the intensity of radiation inversion layers in deferent temperature ($^{\circ}\text{C}$) in Bandar Abbas station (2005-2024)

Month	Without Inversion 0.0-0.6	Very Weak 0.7-1.8	Weak 1.9-3.3	Moderate 3.4-5.2	Strong 5.3-8.8	Very Strong >8.8	Number of radiation inversion
January	1.8	14.6	12.8	34.9	30.6	5.3	281
February	5.3	15.1	29.8	29.3	18.7	1.8	225
March	7.3	24.6	30.4	22.7	12.7	2.3	260
April	14.8	32.4	19.4	17.1	13.4	2.8	216
May	13.5	23.3	22.4	19.3	20.2	1.3	223
June	9.8	24.6	15.6	18.9	27.0	4.1	122
July	12.1	20.7	31.0	29.3	6.9	0.0	58
August	3.4	28.8	16.9	30.5	20.3	0.0	59
September	15.3	26.1	23.4	25.2	9.9	0.0	111
October	11.2	27.4	22.4	20.3	14.9	3.7	241
November	4.5	18.0	22.5	27.7	21.0	6.4	267
December	1.1	6.4	13.1	27.9	39.6	12.0	283
Annual	7.6	20.5	21.2	25.2	21.3	4.2	2346

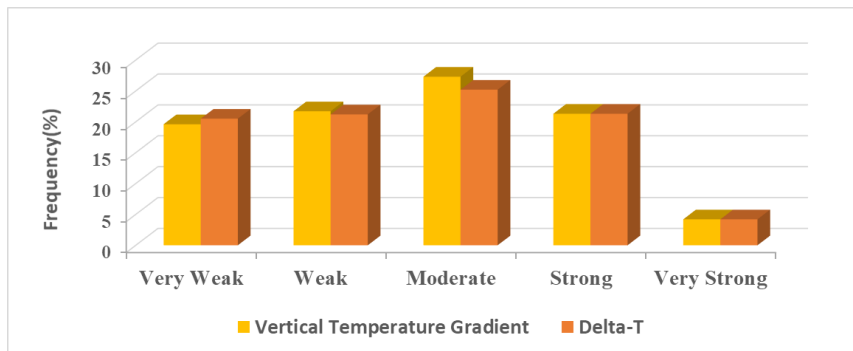
جهانبخش و روشنی (۱۳۹۲) با شیوه دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) وارونگی تابشی ایستگاه تبریز در دوره آماری ۲۰۰۸-۲۰۰۴ را تحلیل کردند و نشان دادند که در تبریز وارونگی تابشی با شدت خیلی زیاد دارای کمترین فراوانی (۴/۰۷ درصد) است و بیشترین فراوانی (۵۵/۵۲ درصد) برای وارونگی ضعیف برآورد شده است. این نتایج بی توجه به موقعیت ایستگاه و انتخاب دوره آماری، با توجه به تعریف وارونگی بسیار شدید و ضعیف، قابل قبول به نظر می‌رسد و با نتایج دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) در مورد بندرعباس نیز اختلاف دارد. از مقایسه نتایج بدست آمده، چنین به نظر می‌رسد که تفاوت‌های ایجاد شده در مورد وارونگی بسیار شدید و ضعیف پژوهش‌های گفته شده به سبب تفاوت در شیوه دسته‌بندی ایجاد نشده است و احتمالاً عوامل دیگری در برآورد شدت وارونگی مورد استفاده دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) دخالت داشته است.

نتایج این بخش از تحقیق با نتایج پژوهش دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) مقایسه شد و اختلاف قابل توجهی بدست آمد. در پژوهش دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023b) که در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰ انجام شده است، از ۱۷۴۳ رخداد وارونگی تابشی آشکار شده در بندرعباس، ۱۲۰۹ مورد وارونگی تابشی بسیار شدید (۶۹/۴ درصد)، ۱۸۴ مورد وارونگی تابشی شدید (۱۰/۶ درصد)، ۱۸۵ مورد وارونگی متوسط (۱۰/۶ درصد) و ۱۶۴ مورد وارونگی ضعیف (۹/۴ درصد) برآورد شده است. این اختلاف نمی‌تواند در اثر تفاوت در دوره آماری انتخابی در دو پژوهش ایجاد شده باشد. بعلاوه دولتشاهی و همکاران (Dolatshahi et al, 2023a) در یک مطالعه دیگر، شدت وارونگی تابشی ایستگاه بیرجند در استان خراسان جنوبی را با شیوه مشابه تحقیق قبلی بررسی کردند و نشان دادند که در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰، در بیرجند فراوانی وارونگی تابشی بسیار شدید ۸/۱ درصد و فراوانی وارونگی تابشی ضعیف ۷۵/۵ درصد است. همچنین

جدول ۸: فراوانی (درصد) شدت لایه وارونگی تابشی بر اساس گرادیان دما (درجه سلسیوس بر ۱۰۰ متر) در دسته‌های مختلف دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴ در ایستگاه بندرعباس

Table 8: Monthly and annual frequencies (%) of the intensity of radiation inversion layers in deferent temperature ($^{\circ}\text{C}$) in Bandar Abbas station (2005-2024) base on vertical temperature gradients ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

Month	Without Inversion	Very Weak	Weak	Moderate	Strong	Very Strong
	0.0-0.4	0.4-1.1	1.2-2.1	2.2-4.0	4.1-9.5	>9.5
January	1.4	8.9	13.1	40.1	28.0	8.5
February	4.9	9.7	22.1	37.2	21.7	4.4
March	4.6	18.4	24.1	26.1	23.4	3.4
April	6.5	24.9	25.8	24.0	16.1	2.8
May	6.7	30.8	25.0	22.8	13.4	1.3
June	8.1	31.7	26.0	20.3	11.4	2.4
July	30.5	37.3	10.2	13.6	6.8	1.7
August	16.7	36.7	13.3	15.0	16.7	1.7
September	8.9	32.1	28.6	13.4	13.4	3.6
October	8.7	28.9	23.6	17.4	17.4	4.1
November	4.1	13.8	25.4	26.5	25.0	5.2
December	0.7	5.6	15.8	36.3	33.1	8.5
Annual	5.9	19.6	21.7	27.3	21.3	4.2



شکل ۱۰: فراوانی (درصد) شدت لایه وارونگی تابشی بر اساس اختلاف دما و گرادیان دما در کل دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴، در ایستگاه بندرعباس در دسته‌های مختلف.

Fig. 10: The frequency (%) of intensity of radiation inversion base on Delta-T and vertical temperature gradient at deferent classify in Bandar Abbas station (2005-2024)

وارونگی می‌شود. به همین دلیل فراوانی سقف ارتفاع وارونگی فرونشینی در دسته‌های پنج تا ده کیلومتر در ماه‌های گرم بیش از ماه‌های سرد است. بخش دیگری از وارونگی فرونشینی ایستگاه بندرعباس که ارتفاع سقف آن بین یک تا سه کیلومتر است و فراوانی رخداد آن $15/4$ درصد برآورد شده است، نوع دیگری از وارونگی مکانیکی است که در اثر فعالیت واچرخندهای عبوری و یا تبادل گرمای ناشی از همرفت و تلاطم ایجاد شده است. بخش دیگری از وارونگی که به سبب نبود ابزار برای آشکارسازی آن، به عنوان وارونگی فرونشینی معرفی شده است، وارونگی فرارفتی و وارونگی آمیخته است. وارونگی فرارفتی در اثر فرارفت هوای گرم به ایستگاه بندرعباس رخ می‌دهد. این سازوکار معمولاً در ماه‌های گرم در شاخه برگشت نسیم دریا به خشکی رخ می‌دهد. در فصل گرم که در روز مناطق خشکی گرمتر از مناطق آبی است، هوای گرم قاره‌ای در اثر همرفت به ارتفاعات بالاتر منتقل می‌شود. در این مدت جریان‌های جنوبی نسیم دریا به خشکی نیز هوای خنک و مرطوب را به مناطق ساحلی منتقل می‌کند. جریان‌های جنوبی شاخه برگشت نسیم دریا به خشکی در این فصل نیز می‌تواند هوای گرم ارتفاعات بالاتر از سطح زمین را به بندرعباس منتقل کند. در شب با خنک شدن هوای سطح زمین و ماندگاری هوای گرم ارتفاعات بالای ایستگاه، یک لایه وارونگی تشکیل می‌شود که به سبب عمق کم نسیم دریا به خشکی، ارتفاع سقف وارونگی به کمتر از یک کیلومتر می‌رسد. در طول روز که لایه آمیخته روی بندرعباس از زمین فاصله می‌گیرد و به تدریج به ارتفاعات بالای سطح زمین می‌رسد، یک لایه با وارونگی دما از لایه

جدول ۹ فراوانی سقف وارونگی فرونشینی ایستگاه بندرعباس در ارتفاع‌های مختلف را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در ارتفاع سقف وارونگی فرونشینی در ارتفاعات بالای ده کیلومتری از سطح زمین، نیز برآورد شده است. این وارونگی، نوعی از وارونگی سطوح زیرین است و به وارونگی گرمایی معروف است. عامل اصلی این نوع وارونگی که معمولاً بالای وردایست در پوشش سپهر پایین و میانی تشکیل می‌شود، آزاد شدن گرما در اثر واکنش‌های فتوشیمیایی بین تابش فرابنفش خورشیدی و اکسیژن می‌باشد. در مجموع از $83/2$ درصد فراوانی مربوط به وارونگی فرونشینی، $11/1$ درصد آن برای این نوع وارونگی برآورد شده است. بخش دیگری از وارونگی فرونشینی ایستگاه بندرعباس که ارتفاع سقف آن از سه تا ده کیلومتر بالای سطح زمین است و فراوانی رخداد آن $32/5$ درصد برآورد شده است، نوع دیگری از وارونگی سطوح زیرین است که به وارونگی مکانیکی معروف است. این نوع وارونگی که خاص نیمه شمالی سلول هادلی است و با نشست هوا در بخش‌های مرکزی سلول هادلی و گرمایش بی‌دررو آن در مناطق جنب حاره تشکیل شده و ارتفاع سقف آن در ماه‌های مختلف سال تغییر می‌کند. در ماه‌های فصل سرد که دمای هوای سطح زیرین کمتر از ماه‌های فصل گرم است، نشست هوا طولانی‌تر است و در نتیجه ارتفاع وارونگی فرونشینی کمتر از ماه‌های فصل گرم می‌باشد. به همین دلیل فراوانی سقف ارتفاع وارونگی فرونشینی در ماه‌های سرد در دسته سه تا پنج کیلومتر بیش از ماه‌های فصل گرم می‌باشد. در فصل گرم شرایط تغییر می‌کند. هوای گرم این فصل سبب کاهش مدت فرونشینی هوا، و افزایش سقف

وارونگی مربوط باشد. در جدول ۱۰ نوع وارونگی فرونشینی بندرعباس و برآورد فراوانی رخداد هر یک به اختصار نشان داده شده‌اند.

آمیخته باز می‌ماند که سقف شبانه آن می‌تواند پایه وارونگی فرونشینی را ایجاد کند. ارتفاع این نوع وارونگی به کمتر از یک کیلومتر می‌رسد. چنین به نظر می‌رسد که ۲۴/۲ درصد وارونگی فرونشینی برآورد شده در بندرعباس به این دو نوع

جدول ۹: فراوانی (درصد) سقف لایه وارونگی فرونشینی در ارتفاع‌های مختلف دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴ در ماه‌های مختلف
Table 9: Monthly and annual frequencies (%) of the top of subsidence inversion layers in deferent height(m) in Bandar Abbas station (2005-2024)

Month	Height(m)								
	1-500	501-1000	1001-3000	3001-5000	5001-7000	7001-10000	10001-13000	13001-16000	>16000
January	5.6	6.1	22.5	14.0	10.0	9.4	3.1	3.6	6.9
February	6.9	9.4	14.3	14.0	7.3	9.4	8.4	3.9	8.3
March	8.8	16.5	12.9	9.9	7.5	10.3	6.4	3.2	5.3
April	9.3	24.7	8.2	6.9	6.6	4.2	6.9	4.6	10.9
May	8.8	28.8	9.0	6.6	11.7	7.0	4.3	2.4	5.8
June	7.3	21.8	14.9	1.4	21.8	10.8	0.5	0.3	5.9
July	4.9	19.8	21.5	1.0	21.1	10.3	0.6	0.0	6.3
August	5.2	19.9	18.3	0.8	27.6	12.6	1.1	0.0	4.5
September	7.4	21.9	13.0	5.3	26.9	8.3	0.7	0.0	4.7
October	6.1	22.9	10.3	21.3	11.2	8.0	0.5	0.2	4.6
November	5.0	12.2	17.5	17.7	8.8	7.9	2.3	1.8	2.3
December	6.6	5.8	22.3	16.7	7.8	9.5	4.3	2.9	5.5
Annual	6.8	17.4	15.4	9.5	14.0	9.0	3.3	1.9	5.9

جدول ۱۰: نوع و فراوانی (درصد) وارونگی فرونشینی بندرعباس در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴
Table 10: Type and frequency (%) of subsidence inversion in Bandar Abbas station (2005-2024)

Inversion	Type of subsidence inversion		Frequencies (%)			
Without Inversion	-		-			16.8
With Inversion	Lower Level	Advection and Mixed	24.2			83.2
	Upper Level	Thermal	11.1			
	Mechanical	Subtropical Anticyclone	32.5	47.9	59.0	
		Anticyclone and convection	15.4			

نتیجه‌گیری

است در حالی که در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه این کمیت کمتر از ۱۱ درصد است. به عبارت دیگر فراوانی روزهای با وارونگی تابشی ایستگاه بندرعباس در ماه‌های سرد بیشتر از ماه‌های ژوئیه و اوت وارونگی تابشی دارند دوره آماری طی ماه‌های ژوئیه و اوت وارونگی تابشی دارند در حالی که در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه این کمیت بیشتر از ۸۹ درصد برآورد شده است. طولانی بودن شب‌های زمستان که عامل افزایش مدت تابش شبانه زمین است و جریان‌های جنوبی نسیم دریا به خشکی در روز و جریان‌های شمالی نسیم خشکی به دریا در شب که از طریق فرارفت هوای سرد یا گرم عامل افزایش اختلاف دما در لایه‌های نزدیک سطح زمین هستند، می‌توانند شرایط

در این تحقیق وارونگی تابشی و فرونشینی با استفاده از داده‌های شبانه ایستگاه کاوش جو بندرعباس در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۲۴، این ایستگاه بررسی شد. بر پایه مطالب گفته شده در بندهای پیش، علاوه بر ارائه روش آماری برای دسته‌بندی عمق و شدت وارونگی تابشی و جدول‌های مربوط به فراوانی رخداد، عمق و شدت وارونگی تابشی ایستگاه بندرعباس، موارد زیر نیز به عنوان نتایج موردی ارائه شد. بررسی‌ها نشان داد که فراوانی روزهای بدون وارونگی تابشی ایستگاه بندرعباس در ماه‌های گرم بیش از ماه‌های سرد سال است به طوری که ۷۴/۵ درصد روزهای دوره آماری انتخابی طی ژوئیه و اوت، بدون وارونگی تابشی

افزون بر آن، مقدار فراوانی وارونگی تابشی شدید، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف در کل دوره آماری تفاوت چندانی ندارند و مقدار آنها بین ۲۰ تا ۲۵ درصد برآورد شده است. مقادیر فراوانی شدت وارونگی بر اساس گرادیان دما در عمق ۱۰۰ متری نیز نتایج مشابهی را بدست داد. از بررسی ارتفاع سقف وارونگی فرونشینی در ایستگاه بندرعباس، دیده شد که از ۸۳/۲ درصد فراوانی برآورد شده برای وارونگی فرونشینی، ۲۴/۲ درصد برای وارونگی سطوح زیرین (وارونگی فرارفتی و بازمانده از لایه آمیخته) و ۵۹/۰ درصد برای وارونگی سطوح زیرین [۱۱/۱] درصد برای وارونگی گرمایی و ۴۷/۹ درصد برای وارونگی مکانیکی (۳۲/۵) درصد برای وارونگی ناشی از فعالیت واچرخند جنب‌حاره و ۱۵/۴ درصد برای وارونگی موثر از واچرخندهای عبوری، همرفت و تلاطم] برآورد شده است.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

References

- Dolatshahi, Z., Akbary, M., Alijani, B. and Toulabi Nejad, M., 2022. Analysis of temperature inversion in Ahwaz city, Arab J. Geosci., v. 15, DOI: 10.1007/s12517-022-11022-4.
- Dolatshahi, Z., Akbary, M., Alijani, B. and Toulabi Nejad, M., 2023a. Statistical analysis of temperature inversion and its types in Birjand city using by inversion intensity index. The Journal of Geographical Research on Desert Areas, v. 11(1), p. 18-35 (In Persian).
- Dolatshahi, Z., Akbari, M., Alijani, B., Yarahmadi, D. and Toulabi Nejad, M., 2023b. Analysis of Temperature Inversion in Bandar Abbas city using by inversion Intensity index. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards 2023; v. 10(3), p. 139-162 (In Persian).
- Feng, X., Wei, S. and Wang, S., 2020. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution, Sci. Total Environ, v. 726, p. 138579.
- Jahanbakhshasl, S. and Roshani, R., 2014. The Study of Condition and the Intensity of Lower Level Temperature Inversion in Tabriz of 2004-2008, Geo.Res., v. 28(4), p. 45-54 (In Persian).
- Iyer, U. and Nagar, S., 2001. Variability in surface inversion characteristics over India in winter during the recent decades, J. Earth Syst. Sci., v. 120(1), p. 73-84.
- Joly, D. and Richard, Y., 2019. Frequency, intensity, and duration of thermal inversions in the Jura Mountains of France, Theoretical and Applied Climatology, v. 138, p. 639-655.
- Joly, D. and Richard, Y., 2022. Temperature inversions in France, Part A, Time Variations. Climatologie, v. 19(4), p. 1-19.
- Lagmiri, S. and Dahech, S., 2024. Temperature Inversion and Particulate Matter Concentration in the Low Troposphere of Cergy-Pontoise (Parisian Region), Atmosphere, v., 15, p. 1-21.
- Largerion, Y. and Staquet, C., 2016. Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. Atmos. Environ., v. 135, p. 92-108.
- Li, J., Chen, H., Li, Z., Wang, P., Fan, X., He, W. and Zhang, J., 2019. Analysis of low-level temperature inversions and their effects on aerosols in the lower atmosphere, Adv. Atmos. Sci., v. 36(11), p. 1235-1250.
- Li, H., Liu, B., Ma, X., Ma, Y., Jin, S., Fan, R., Wang, W., Fang, J., Zhao, Y. and Gong, W., 2022. The Influence of Temperature Inversion on the Vertical Distribution of Aerosols. Remote Sens., v. 14, DOI: 10.3390/rs14184428.
- Newton, R. and Randel, W., 2020. Observations of upper-tropospheric temperature inversions in the

- Indian monsoon and their links to convectively forced quasi-stationary kelvin waves, *Journal of the atmospheric sciences*, v. 77, p. 2835-2846.
- Niedzwiedz, T., Lupikasza, E.B., Malrzewski, L. and Budzik, T., 2021. Surface-based nocturnal air temperature inversions in southern Poland and their influence on PM10 and PM2.5 concentrations in Upper Silesia, *Theoretical and Applied Climatology*, v. 146, p. 897-919.
- Swathi, M.S., Muraleedharan, P.M., Ramaswamy, V., Rameshkumar, M.R. and Aswini, A., 2018. Upper air thermal inversion and their impact on the summer monsoon rainfall over Goa – A case study, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 169, p. 37-44.
- Stamoulis, T., Philippopoulos, K. and Deligiorgi, D., 2015. Winter nighttime temperature inversions and their relationship with the synoptic-scale atmospheric circulation, *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece*, 3-5 September 2015.
- Tavousi, T. and Hossein Abadi, N., 2017. Evaluation of Temperature Inversion Indicators in Boundary Layer (Case Study: Tehran, Iran), *Geo.Res.*, v. 32(2), p. 120-132 (In Persian).
- Toulabi Nejad, M., Jafarpour Ghalehtemouri, K., Talkhabi, H.R. and Dolatshahi, Z., 2023. The relationship between atmospheric temperature inversion and urban air pollution characteristics: a case study of Tehran, Iran, *Discover Environment*, v. 1(17), <https://doi.org/10.1007/s44274-023-00018-w>.
- Xu, T., Liu, B., Zhang, M., Song, Y., Kang, L., Wang, T., Liu, M., Cai, X., Zhang, H. and Zhu, T., 2021. Temperature inversions in China derived from sounding data from 1976 to 2015, *Tellus B, Chemical and Physical Meteorology*, v. 73(1), p. 1-18.
- Yavuz, V., 2024. Unveiling the impact of temperature inversions on air quality: a comprehensive analysis of polluted and severe polluted days in Istanbul, *Acta Geophysica* <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01417-0>.
- Zeng, H., Tian, P., Zhang, M., Cao, X., Liang, J. and Zhang, L., 2022. Rapid Change in Surface-Based Temperature Inversions across the World during the Last Three Decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 61, p. 175-184.
- Zhang, J., 2020. Cloud-top temperature inversion derived from long-term radiosonde measurements at the ARM TWP and NSA sites, *Atmospheric Research*, v. 246, 1015113.
- Zhang, J., Zheng, Y., Li, Z., Xiang, X. and Chen, H., 2020. A 17-year climatology of temperature inversions above clouds over the ARM SGP site: the roles of cloud radiative effects, *Atmos. Res.*, v. 237, 104810.
- Zhang, L., Ding, M., Dou, T., Huang, Y., Lv, J. and Xiao, C., 2021. The Shallowing Surface Temperature Inversions in the Arctic, *Journal of Climate*, v. 34, p. 4159-4168.
- Zhang, Y., Zhang, B. and Yang, N., 2022. Characteristics of Temperature and Humidity Inversions Based on High-Resolution Radiosonde Observations at Three Arctic Stations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 61(4), p. 415-428.