

## تحلیل وارونگی دمایی شهر بندرعباس با استفاده از شاخص شدت وارونگی

زینب دولتشاهی؛ دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
مهری اکبری<sup>۱</sup>؛ دانشیار اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
بهلول علیجانی؛ استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
داریوش یاراحمدی؛ دانشیار اقلیم شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.  
میثم طولابی نژاد؛ دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۹

### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی انواع وارونگی و شدت آن‌ها با استفاده از شاخص‌های ترمودینامیکی جو از قبیل شاخص  $KI, LI, SI$  و  $TT$  در ایستگاه بندرعباس برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰ به رشته تحریر در آمده است. در این پژوهش داده‌های رادیوسوند جو بالای ایستگاه همدید بندرعباس برای ساعت ۰۰ گرینویچ (۳/۵ محلی) طی ۱۱ سال اخیر (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) از دانشگاه وایومینگ اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که میانگین تعداد رخداد پدیده وارونگی در بندرعباس برابر ۵۰۱ مورد در سال می‌باشد چرا که در برخی روزها چند نوع وارونگی در ارتفاع متفاوت مشاهده شد. از این تعداد وارونگی، حدود ۳۱/۶ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشعی، ۴/۳ درصد جبهه‌ای، و ۶۴/۱ درصد دیگر مربوط به وارونگی از نوع فرونشینی می‌باشد. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب‌حاره، سهم وارونگی‌های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می‌باشد. در این میان شدیدترین وارونگی‌ها از نوع فرونشست با ۱۳۵۴ مورد و ضعیف‌ترین وارونگی‌ها نیز با ۲۹ مورد و از نوع جبهه‌ای بوده است. بطور کلی میانگین بلندمدت ضریب 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 محیط زیستی 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 می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: وارونگی دمایی، ضخامت جو، شدت وارونگی، آلودگی جو، بندرعباس.

## مقدمه

دمای هوای محیط در تروپوسفر معمولا با افزایش ارتفاع کاهش می یابد (به ازاء هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع ۵ الی ۶ درجه سانتیگراد دما کاهش می یابد) ولی گاهی با افزایش ارتفاع دمای هوا افزایش یافته که به این وضعیت وارونگی دمایی یا اینورژن می گویند (Ghosh A.K. et al, ۱۹۹۹). وارونگی دما زمانی رخ می دهد که لایه ای از هوای گرم بالای هوای سرد مجاورت کره زمین قرار می گیرد. (Nodz et al, ۲۰۰۶). درچنین شرایطی پایداری هوا ایجاد می شود و به جای آنکه با افزایش ارتفاع کاهش دما داشته باشیم تا چند صد متر از سطح زمین با افزایش ارتفاع افزایش دما خواهیم داشت Pankajakshan (et al, ۱۹۹۹). می توان گفت معیار تشخیص و ارزیابی این پدیده، دو فاکتور ارتفاع و تغییرات دما می باشد که در حالت وقوع پدیده وارونگی، این پدیده ها با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند (Ogino S.Y. et al, ۲۰۰۶).

وارونگی دما با توجه به نحوه شکل گیری به ۴ نوع تقسیم می شود.

۱- وارونگی تشعشعی یا سطحی این نوع وارونگی در نزدیکی سطح زمین رخ می دهد و نقش مهمی در کیفیت هوا دارد (ویتمن ۱۹۸۱). این نوع وارونگی در اثر زمینتاب در شب و سرد شدن هوای سطح زمین نسبت به جو بالا ایجاد می شود و معمولا در شبهای بدون ابر و همراه باد ضعیف پدید می آید (Yasuda I. ۲۰۰۵)؛

۲- وارونگی فرونشینی که در اثر فرونشینی هوا به دلیل همگرایی هوا در سطح فوقانی و واگرایی همزمان هوا در سطح زمین رخ می دهد (Brandt, R. et al, ۲۰۰۵)؛

۳- وارونگی تلاطمی که قدرت باد و تربولانس ایجاد شده در یک حد معین سبب ایجاد وارونگی عمیق تربولانسی در سطح زمین و گاهی در سطوح فوقانی می گردد (Lehmacher G.A. et al, ۲۰۰۶)؛

۴- وارونگی جبهه ای در هنگام عبور یک توده هوای سرد از زیر یک توده هوای گرم به وجود می آید، در این صورت توده هوای گرم به وسیله توده هوای سرد به سطوح بالاتر جو رانده می شود، این نوع وارونگی زودگذر است و از عمر کوتاهی برخوردار بوده و علاوه بر این وقوع وارونگی جبهه ای اغلب با بارندگی همراه است و از این لحاظ باعث پاک شدن هوا از مواد آلاینده می گردد. علاوه بر وارونگیهای اشاره شده در بالا، وارونگی موضعی یا منطقه ای نیز در برخی مناطق خاص به وقوع می پیوندد. برای مثال هنگامی که یک توده هوای متحرک گرم از بالای سطح آبهای سرد می گذرد نوعی وارونگی موضعی اتفاق می افتد، این مسئله هنگام شب در کوهستان با لغزش هوای سرد کوهستان به زیر هوای گرم دره ها نیز مشاهده می شود (کریمی و درخشان، ۱۳۸۴).

زمانی اهمیت پدیده وارونگی دما دو چندان می شود 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 (Fumigation) می شود. این پدیده هنگامی روی می دهد 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 می شود مواد پراکنده به سطح زمین برگردند. در نتیجه غلظت مواد آلاینده در مدت کوتاهی به شدت افزایش می یابد و پدیده فیومیگیشن ایجاد می شود (اسمیت، ۱۳۸۶). نقش پارامترهای آب و هوایی از جمله وارونگی دما، بر روی تشدید غلظت آلاینده های شهرهای صنعتی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی افزایش یا کاهش مرگ و میر و ابتلا به بیماریها و اثرات که بر روی گیاهان و جانوران دارد محسوب می شود.

با توجه به گسترش شهرها و افزایش منابع آلاینده های هوا، هوای اغلب شهرهای بزرگ و صنعتی آلوده می باشد. در عین 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 می باشد و تنها با آگاهی و شناخت از این مساله امکان جلوگیری یا کاهش خطرات آن وجود دارد (رنجبر، ۱۳۸۵). گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها به همراه افزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت های صنعتی با مصرف بی رویه سوخت های فسیلی، به شدت آلودگی ها را افزایش داده، که عواقب آن در درجه اول بصورت انواع امراض و بیماری های تنفسی، تشدید بیماری های قلبی و ریوی، متوجه ساکنان شهرها می شود (درویش محمدی، ۱۳۹۱). باتوجه به اثراتی که آلودگی هوا بر روی آب، خاک، هوا، اقلیم، موجودات زنده و از جمله تاثیری که بر سلامت انسان دارد، بررسی شرایط به وجود آورنده و تشدید کننده ی غلظت آلودگی هوا الزامی می باشد، که پایداری هوا یکی از عوامل افزایش دهنده میزان و شدت آلاینده هاست (عقلمند، ۱۳۹۳). پایداری هوا یکی از مسائل شهرها بویژه متروپل ها در مناطق برون حاره در بخشی از فصول سال است. این مسئله در پاره ای از مواقع سبب پایداری های جوی طولانی مدت شده و این پایداری ها به حدی است که غلظت آلودگی های شهری را به مرز هشدار های جدی می رساند (کریمی و درخشان، ۱۳۸۴). اگرچه پدیده وارونگی یک خصیصه اقلیمی است، که نمی توان مدل وقوع کلی آنرا متحول ساخت، ولی احتمال این مطلب که بتوان پایداری آنرا در حدی نگه داشت که نتواند موجب افزایش غلظت آلوده کننده ها 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 لایه های مختلف جو ایجاد بشود، در صورت عدم وجود چنین عواملی به مرور به ضخامت لایه آلودگی ها و ذرات غبار معلق در هوا افزوده می شود. یکی از این آلودگی ها گاز منواکسید کربن است که تنفس این گاز بی رنگ و بو باعث سردرد و سرگیجه و در پایان مرگ می شود اتفاقی که بارها 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 خصوصا زندگی انسانها بوجود می آورد و با توجه به اینکه مطالعات محدودی در ایران در زمینه ی تفکیک انواع وارونگی های دمایی، تحلیل زمانی- فضایی رخداد وارونگی دمایی و بررسی ارتباط وارونگی دمایی با توجه به مولفه های مختلف آن صورت گرفته است، لذا شناخت دقیق این مولفه ها و تحلیل زمانی- مکانی وقوع آنها ضروری به نظر می رسد.

نمونه ای از مطالعاتی که تاکنون در سطح جهان و ایران صورت گرفته است ب شرح زیر می باشند:

(Donald, G.B. et al, ۱۹۹۶)، از اولین پژوهشگرانی است که به بررسی فراوانی، زمان شروع، تداوم و شدت وارونگی های دما و تاثیر آن روی آلودگی کلانشهر پائول، در طی دوره زمانی ۸ ساله از (ماه ژوئن ۱۹۶۱ تا ماه ژوئیه ۱۹۶۸) پرداخت. وی به این نتیجه رسید که اکثر وارونگی های شدید در ماه اکتبر روی داده، به طوری که ۴۸ درصد از وارونگی های این ماه بیش از ۱۰ ساعت طول کشیده که میانگین آنها ۸ ساعت بوده است. همچنین در مقایسه با شاخص وارونگی، پایین ترین میزان آلودگی مربوط به ماه های آوریل، مارس و مه بوده است. همچنین Thadathil.P, (۱۹۹۹)، در بررسی «وارونگی دمای لایه سطحی جنوب شرق دریای عرب در زمستان» از داده های ۱۱۳۲ ایستگاه استفاده کردند. نتایج نشان داد که وارونگی یکی از ویژگی های فصلی پایدار زمستان است و این وارونگی به آب های ساحلی محدود شده است. لایه وارونگی در این محدوده ضخامتی حدود ۱۰ تا ۸۰ متر دارد و گرادیان از صفر تا ۱ و ۲ درجه است. علت ایجاد این وارونگی فرا رفت هوای سرد خلیج بنگال بر روی آب گرم دریای عرب در امتداد

سواحل غرب هند است. همچنین براساس مطالعه ی (Kankanala, P, ۲۰۰۷)، به مطالعه وارونگی های سطح پایین آلاسکا پرداخت. وی عقیده داشت که پوشش ابر بر روی ساختار وارونگی تاثیر می گذارد و (Bourne, S.M. et al, ۲۰۰۸)، به مطالعه وارونگی های سطح پایین آلاسکا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهایی از قبیل ضخامت، اختلاف دما و فراوانی وارونگی دما دارای روند کاهشی بلند مدت می باشند. تجزیه و تحلیل داده ها ۷ ساله توسط (Brümmer, B, Schultze, M, ۲۰۱۵)، صورت گرفت، وارونگی دما اندازه گیری شده در ارتفاع ۲۸۰ متری در ایستگاه هواشناسی هامبورک نشان داد که واگرایی جریان تابشی فرایند بسیار مهمی برای تشکیل و انحلال لایه وارونگی دما هست. سپس (Bei, N. et al, ۲۰۱۶)، تاثیر شرایط همدید بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضه گان ونگ چین با استفاده از مدل شش مدل برای شش روز از سال ۲۰۱۳ 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 (Zeng, S., Zhang, Y, ۲۰۱۷)، با مطالعه تاثیر هواشناسی بر تداوم آلودگی های سنگین هوا در منطقه چنگدو چین طی بهار ۲۰۱۴ نشان داد که نه تنها فاکتورهای سطحی هواشناس، بلکه ساختار لایه مرزی و وجود وارونگی های دمایی نقش مهمی در انتشار عمودی آلاینده ایفا می کند. در مطالعه ای که (Dergunov, A. et al, ۲۰۲۰)، در پژوهشی به بررسی و تجزیه و تحلیل وارونگی دما در طول دوره های شرایط نامساعد جوی در کراسنویارسک در دوره زمستانی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ پرداخته اند. در این پژوهش به جستجوی روابط بین آلودگی جو کراسنویارسک توسط ذرات معلق و وارونگی دما - افزایش دما با ارتفاع در سطح لایه جو پرداخته اند. این تحقیق بر اساس داده های تحلیل مجدد بوده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش به این صورت است که درجه بالایی از همبستگی بین این مقادیر و وارونگی دمایی وجود دارد و این امکان وجود دارد که از داده های مدل GFS برای پیش بینی وضعیت محیطی استفاده شود.

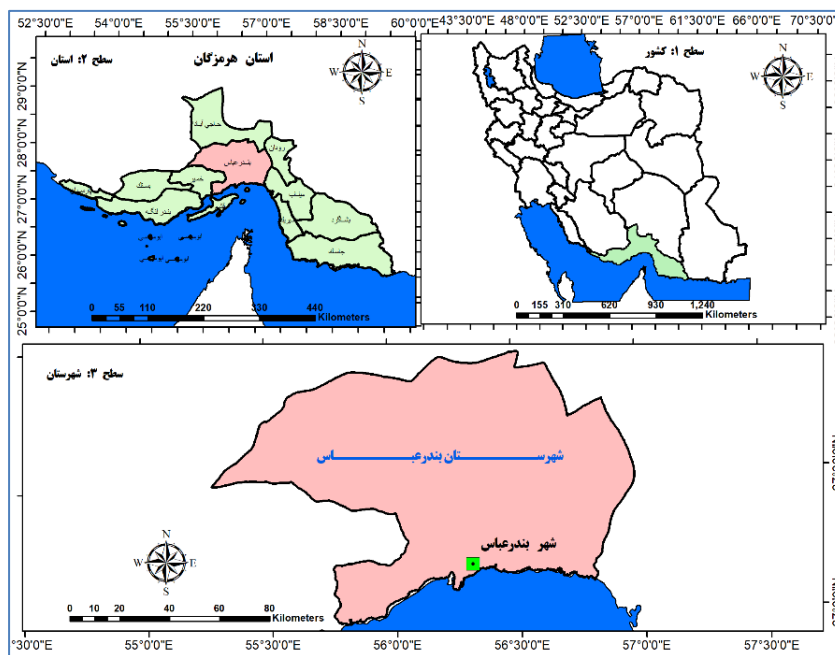
سپس (Coshkun, M. et al, ۲۰۲۰)، وارونگی دما در فصل زمستان در اطراف کارابوک - سافرانبولو، اثرات احتمالی بر محیط طبیعی و انسانی را بررسی کردند. هدف از این پژوهش تعیین تاثیر تغییر دمای زمستان بر مردم و سایر موجودات زنده منطقه با تعیین حد، درجه، زمان و تأثیرات احتمالی بر محیط طبیعی و انسانی بوده است. (Khalesi, B. et al, ۲۰۲۰)، تحلیل زمانی وارونگی دما در لایه مرزی جوی شهر تهران طی سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ را مورد بررسی قرار داده اند. در این پژوهش با استفاده از داده های صوتی هوای فوقانی در مقیاس های زمانی مختلف طی سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷، ویژگی های وارونگی مبتنی بر سطح را در شهر تهران، پایتخت ایران، ارزیابی کرده اند. در این تحقیق برخی ویژگی ها از جمله ارتفاع و دمای لایه های وارونگی علاوه بر میزان لغزش محیطی و شاخص شدت وارونگی مورد بررسی قرار داده اند. نتایج این تحقیق به این صورت بود که در طول روزهای وارونگی تشعشعی، از جمله وارونگی های شدید در دوره های پاییز و زمستان، متغیرهای اقلیمی تابش موج بلند رو به بالا، دمای سطح زمین، شار حرارتی محسوس سطحی و حرکت عمودی توده هوا در سطح حداقلی در سراسر لایه مرزی اتمسفر بودند، در حالی که غلظت دی اکسید نیتروژن به طور معنی داری در بالاترین مقدار بود. در ایران نیز محققین زیادی از جمله لشکری (۱۳۸۴)، «تحلیل همدیدی اینورژن های شدید شهر تهران»، سلطانی (۱۳۸۵)، «وارونگی دمایی شهر تبریز»، عظیمی (۱۳۸۷)، به «ارزیابی تاثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز»، علیجانی (۱۳۸۸)، بررسی الگوهای همدیدی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی، کرمپور (۱۳۹۵)، به «بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر» طاوسی (۱۳۹۶)، به «ارزیابی شاخص های وارونگی دمای لایه مرزی هوای شهر تهران» حسین آبادی (۱۳۹۸)، به «بررسی روند وارونگی های دمایی کاتن شهرهای ایران (تهران، مشهد و تبریز) پرداخته اند. 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. شهر بندر عباس از دیدگاه تجاری، صنعتی و تاریخی یکی از مهمترین شهرهای ایران می‌باشد که در دهه های اخیر توسعه زیادی داشته است. رشد صنایع، ازدیاد وسائط نقلیه، مهاجرپذیر بودن و از طرفی وجود عوامل تشدید کننده آلودگی هوا مانند وضعیت خاص جغرافیایی و شرایط آب و هوایی از لحاظ اقلیم حاکم بر منطقه پتانسیل بروز آلودگی هوا در شهر بندرعباس را افزایش می دهد (Breed CA et al, ۲۰۰۲). در سطح حوزه بندرعباس آلودگی هوا ناشی از حوادث طبیعی و سایر عوامل انسان ساخت را می توان ب اختصار شرح داد: ۱- آلودگی ناشی از حرکت ماسه های روان و پخش گرد و غبار ناشی از طوفان و بادهای شدید. ۲- آلودگی ناشی از پخش گازهای آلاینده از مناطق باتلاقی و ساحلی و یا آلودگی و مکلات ناشی از امواج گرما در مناطق ساحلی ۳- آلودگی وای ناشی از فعالیت صنایع بزرگ استان نظیر آلومینیوم، روی، فولاد، نیروگاهها، پالایشگاه نفت، گاز و غیره ۴- آلودگی ناشی از جابه جایی مواد فله ای معدنی توسط اسکله ی منطقه ی ویژه اقتصادی خلیج فارس ۵- آلودگی هوای ناشی از فعالیت واحد نیروگاه توانیر بندر عباس که در حال حاضر ۷۰ تا ۸۰ درصد آلودگی هوای شهر بندر عباس و پیرامون آن مربوط به این نیروگاه است ۶- آلودگی هوای ناشی از حوادث غیر مترقبه طبیعی از جمله مخازن سوخت و سایر مواد نفتی صنایع منطقه و جایگاه های تخلیه و بارگیری دپوی مواد فله ای آلاینده در منطقه و .... (بیگلری و عامری سیاهویی، ۱۳۹۴). از آنجایی که همزمان با پیشرفت صنعت، احتمال ورود آلاینده های هوا به اتمسفر نیز بیشتر می شود، در نتیجه این آلودگی هوا، محیط زندگی ساکنین بخصوص بیماران قلبی عروقی شهر بندرعباس با چالش های عدیده ای مواجه خواهد شد، لذا بررسی آلودگی شهر بندر عباس ضروری می نماید.

## داده ها و روش کار

### الف) قلمرو جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

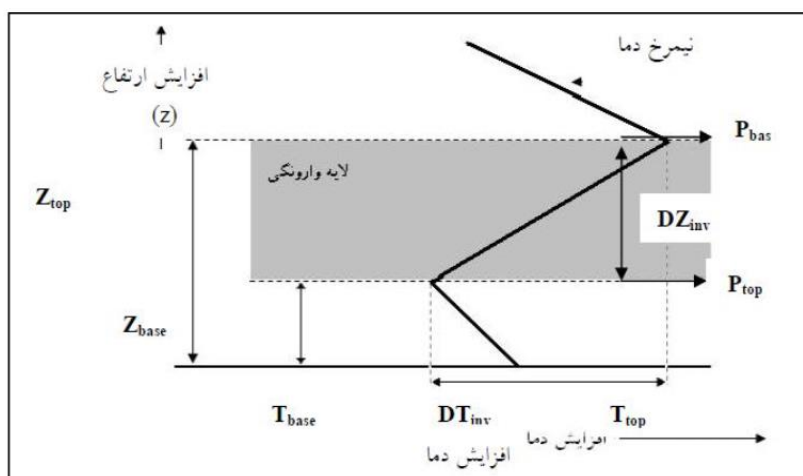
شهرستان بندرعباس با پهنه ای حدود ۱۳۲۵۵/۱ کیلومتر مربع، در شمال تنگه هرمز، در ۲۷ درجه و ۱۱ دقیقه ی پهنای شمالی و ۵۶ درجه و ۱۷ دقیقه ی خاوری نسبت به نیم روز گرینویچ قرار گرفته و بلندی آن از سطح دریا ۶ متر است. آب و هوای شهرستان بندرعباس به دلیل شرایط ویژه خود، گوناگون بوده و از آنجا که پارامترهای بارش، دما و رطوبت نسبی پارامترهای وابسته به یکدیگر محسوب می شوند و تغییرات آنها تاثیر بسزایی بر نوع اقلیم این منطقه دارد. وزش بادهای شمالی در این شهرستان همراه با گردو غبار بوده و گاهی با رطوبت زیاد دریا همراه است و هوای بسیار گرم مرطوبی را به وجود می آورد. دمای هوای شهر بندرعباس در گرم ترین روزها به ۴۵ درجه سانتیگراد نیز رسیده است. میانگین بارش بندرعباس در حدود ۲۰۰ میلیمتر است.



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

**ب) داده ها**

در این پژوهش داده های رادیوسوند جو بالای ایستگاه همدید بندرعباس (جدول ۱) طی ۱۱ سال اخیر (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) در ساعت ۰۰ به وقت گرینویچ (۳/۵ به وقت محلی) از دانشگاه وایومینگ به آدرس <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> اخذ و مورد استفاده قرار گرفت. شاخص های مورد استفاده شامل شاخص های ترمودینامیکی از قبیل شاخص SI، LI، KI و TT و دمای پتانسیل هستند. همچنین از دیگر داده های مورد استفاده در این پژوهش، اطلاعات مخابره شده رادیوسوند شامل ارتفاع پایه وارونگی از سطح زمین به متر (Zbase)، ارتفاع راس وارونگی از سطح زمین به متر (Ztop)، مقدار دما در پایه و راس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (Tbase)، اختلاف دما بین پایه و راس لایه وارونگی به درجه سلسیوس (DZinv) و مقدار فشار در پایه (Pbase) و راس لایه وارونگی (Ptop) است که از روابط (۱ و ۲) محاسبه می شود. (شکل ۲).



شکل (۲). خصوصیات نیمرخ وارونگی دمای هوا (باکوبلیس و همکاران، ۲۰۰۹)

## ج) روش شناسی

برای انجام این تحقیق ابتدا با استفاده از داده های اسکیوتی روزهای دارای شرایط پایداری (وارونگی) به کمک نرم افزار RAOB استخراج شدند، سپس فراوانی روزهای وارونگی و نوع آنها در ایستگاه بندرعباس در مقیاس ماه، فصل و سال محاسبه شد. در مرحله بعد مولفه های وارونگی ها شامل نوع، ارتفاع، ضخامت، دمای پتانسیل لایه و شدت وارونگی ها مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. روش تشخیص انواع وارونگی بر اساس الگوریتم های موجود در نرم افزار RAOB و شاخص های پایداری و روابط (۱ و ۲) در روش تحقیق می باشد.

جدول (۱). مشخصات ایستگاه کنترل جو بالای بندرعباس (فرستنده رادیوسوند) (کمیجانی و همکاران، ۱۳۹۳)

| ارتفاع | عرض   | طول   | ایستگاه  |
|--------|-------|-------|----------|
| ۹/۸    | ۲۷/۱۳ | ۵۶/۲۲ | بندرعباس |

ابتدا با استفاده از رابطه (۱) دمای پتانسیل سقف و کف لایه وارونگی از رابطه (۱) محاسبه شد (Retallack, B.J. ۱۹۷۳).

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

⊖: 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 نموده ایم.

رابطه (۲):

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

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

$\Delta z$  ضخامت لایه وارونگی به متر

Z ارتفاع ایستگاه به هکتومتر

شدت وارونگی ها به ۴ گروه تقسیم می شوند (Retallack, B.J. ۱۹۷۳) به نقل از طاووسی و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول (۲).

جدول (۲). تقسیم بندی شاخص شدت وارونگی<sup>۲</sup> بر اساس ضریب شدت

| شدت وارونگی | ضعیف      | متوسط         | شدید          | بسیار شدید  |
|-------------|-----------|---------------|---------------|-------------|
| ضریب شدت    | ۰ - ۰/۰۱۰ | ۰/۰۱۱ - ۰/۰۲۰ | ۰/۰۲۱ - ۰/۰۳۰ | بالای ۰/۰۳۱ |

<sup>۲</sup>.inversion intensity index

• شاخص های ترمودینامیک

- شاخص بالارونده (LI)

یکی از مهمترین شاخص های شناسایی تفران های تندری است که برای ارزیابی ناپایداری بسته هوا در سطوح زیرین تروپوسفر (نزدیک سطح زمین) مورد استفاده قرار میگیرد. این شاخص را می توان به کمک رابطه (۳) تعریف کرد:

$$LI = T_{p0.0} - T_{p0.0} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه  $LI(C)$  معرف شاخص ناپایداری  $T_{p0.0}(C)$  دمای محیط در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و  $T_{p0.0}(C)$  دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می باشد که به صورت بی درو خشک از سطح زمین تا تراز LCL (تراز بالابری میعان) و سپس به صورت بی درو مرطوب تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال صعود کرده است. احتمال وقوع توفان بر اساس این شاخص را میتوان به کمک جدول زیر تخمین زد. مقادیر منفی LI نشان دهنده لایه مرزی ناپایدار می باشد و افزایش آن موجب افزایش شنواری منفی شده و به این ترتیب بسته هوا از لایه مرزی صعود میکند.

- شاخص شلوواتر (SI)

این ارزیابی براساس ارزیابی شرایط پایداری یا ناپایداری بسته هوا در تراز ۸۵۰ میلی باری تعریف میشود و به کمک رابطه (۴) محاسبه میشود:

$$SI = T_{p0.0} - T_{p0.0} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه شلوواتر  $T_{p0.0}$  معرف دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ میلی بار میباشد که از تراز ۸۵۰ میلی بار صعود نموده است. مقادیر منفی این شاخص نشان میدهد بخش های بالایی لایه مرزی تا تروپوسفر میانی ناپایدار است. در چنین شرایطی همرفت رخ میدهد. با منفی تر شدن SI ناپایداری تروپوسفر بیشتر می شود و شتاب شنواری بسته هوا را از بخش های بالایی لایه مرزی صعود میدهد. شاخص SI مشابه شاخص LI می باشد اما صعود از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال انجام می شود. این شاخص زمانی کاربردی است که استفاده از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال معرف بهتری برای ناپایداری جو نسبت به LI در سطح زمین است. (در هوای سرد سطح زمین).

- شاخص K(KI)

از این شاخص برای شناسایی و پیش بینی توفان هایی استفاده می شود که منشاء وقوع آنها توده هوا می باشد. همچنین می توان از آن برای توفان هایی که سازو کارهای دینامیکی ندارند نیز استفاده کرد.

KI معرف احتمال وقوع توفان به صورت تابعی بر حسب آهنگ کاهش قائم دما بین تراز های ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال  $(T_{850} - T_{500})$ ، محتوی رطوبت بر حسب دمای نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال  $(T_{d850})$  و عمق لایه مرطوب در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال  $(T_{d700} - T_{v700})$  می باشد که در رابطه نشان داده شده است. مقادیر کوچک جمله سوم این شاخص نشان از همرفت عمیق در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال است. چنان چه رطوبت قابل ملاحظه ای در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال وجود نداشته باشد و محیط در این تراز خشک باشد، بسته هوا از تراز های زیرین به سمت بالا با شدت بیشتری حرکت نماید (بلو اشتاین، ۱۹۹۳). مقادیر عددی بزرگ این شاخص بر فعالیت شدید توده هوا دلالت دارد که شدیداً به رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال وابسته است. رابطه (۵).

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{d500} - T_{d700}) \quad \text{رابطه (۵):}$$

#### - شاخص مجموع مجموع ها (TTI)

شاخصی است که از دیگر شاخص ها، به علت ترکیب ۲ شاخص مجموع دیگر، قابل اعتمادتر می باشد. این شاخص به رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بسیار وابسته است. چنانچه ناپایداری در اثر هوای سرد سطوح بالای جو باشد و در سطح زیرین جو رطوبت کافی موجود باشد، شاخص مجموع مجموع ها بیشتر از دیگر شاخص ها قابل اعتماد است. این شاخص به صورت رابطه (۶) است.

$$TT = VT + CT \quad \text{رابطه (۶):}$$

در این رابطه VT مجموع قائم و CT مجموع تقاطع ها می باشد. مجموع تقاطع ها معرف چگونگی شناوری بسته هوا در تراز های زیرین جو می باشد. مجموع قائم ها و مجموع تقاطع ها به صورت رابطه (۷) است.

$$VT = T_{850} - T_{500}, CT = T_{d850} - T_{500} \quad \text{رابطه (۷):}$$

در رابطه (۷)  $T_{850}$  دمای هوا در تراز ۸۵۰،  $T_{500}$  دمای هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می باشد.  $T_{d850}$  نیز معرف دمای نطقه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال است.

#### - شاخص (KO)

ناپایداری پتانسیلی به دین معناست که تنها در حرکت های فراسو، بی ثباتی جو و به دنبال آن همرفت رخ میدهد. از جمله شاخص هایی که میتوان ناپایداری جو را به کمک میدانهای پیش بینی عددی وضع هوا نشان دهد، شاخص KO می باشد. در محاسبه این شاخص دمای پتانسیل هم ارز در تراز های ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰، ۱۰۰۰ هکتوپاسکال پیش بینی شدت همرفت استفاده می شود. شاخص KO به صورت رابطه (۸) است.

رابطه (۸):

$$KO = \frac{(\theta_{500} + \theta_{700}) - (\theta_{850} + \theta_{1000})}{2}$$

که  $(\theta_{\alpha})$  معرف دما بعد از میعان تمامی مقادیر بخار آب می باشد بدون این که تغییر در فشار یک تراز مشخص ایجاد شود. به این ترتیب بسته هوا تمامی انرژی ایجاد شده توسط میعان را دریافت می کند و تا تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال حرکت می کند. در هوای پایدار مقادیر عددی  $(\theta_{\alpha})$  با ارتفاع افزایش یابد. رابطه (۸) نشان می دهد که مقادیر منفی این پارامتر با کاهش  $(\theta_{\alpha})$  بین ارتفاعات میانی و زیرین جو مرتبط می باشد.

#### شرح و تفسیر نتایج

##### • شاخص های ترمودینامیک

جدول (۳) مقادیر شاخص های ترمودینامیک جو را همزمان با رخداد وارونگی های دمایی در شهر بندر عباس طی سال - های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می دهد. با توجه به آمار داده های ثبت شده در رادیوسوند میانگین ضریب شاخص SI همزمان با رخداد وارونگی در شهر بندر عباس طی این دوره ۱۸/۳ بوده است. کمترین مقدار ضریب نیز شاخص KO با

ضریب ۸/۴- داشته است. بیشترین ضریب را نیز شاخص TC با ضریب ۳۹/۶ درصد به خود اختصاص داده است. ضرایب سایر شاخص ها در جدول (۲) قابل مشاهده می باشند.

جدول (۳). مقادیر سالانه شاخص های ترمودینامیک جو همزمان با رخداد وارونگی دمایی در شهر بندر عباس

| سال     | SI   | KO   | LI  | TT   | KI   | TC   |
|---------|------|------|-----|------|------|------|
| ۲۰۱۰    | ۱۷.۳ | -۸   | ۳.۱ | ۳۸.۵ | ۷.۴  | ۳۸.۷ |
| ۲۰۱۱    | ۱۵.۲ | -۷.۱ | ۲.۷ | ۳۶.۸ | ۶.۵  | ۴۱.۷ |
| ۲۰۱۲    | ۲۵.۹ | -۷.۳ | ۲   | ۳۸.۶ | ۱۱.۹ | ۳۹   |
| ۲۰۱۳    | ۲۰.۷ | -۱۰  | ۰.۷ | ۴۱   | ۱۱.۵ | ۴۰.۸ |
| ۲۰۱۴    | ۱۷.۴ | -۹.۱ | ۱.۱ | ۳۹.۷ | ۸.۵  | ۴۰.۴ |
| ۲۰۱۵    | ۱۱.۴ | -۴.۶ | ۴.۵ | ۳۸.۶ | ۴.۵  | ۴۱.۷ |
| ۲۰۱۶    | ۱۴.۴ | -۹.۷ | ۱   | ۳۹.۱ | ۶.۲  | ۳۸.۸ |
| ۲۰۱۷    | ۱۳.۷ | -۹.۱ | ۱.۹ | ۳۶.۳ | ۵.۶  | ۴۰.۲ |
| ۲۰۱۸    | ۱۸   | -۸.۶ | ۱   | ۳۷.۸ | ۸.۴  | ۳۹.۳ |
| ۲۰۱۹    | ۲۱.۱ | -۸.۷ | ۱   | ۳۹.۷ | ۱۰.۸ | ۳۸.۴ |
| ۲۰۲۰    | ۲۲.۷ | -۹.۳ | ۰.۷ | ۴۰.۴ | ۱۲.۹ | ۳۷.۸ |
| میانگین | ۱۸.۳ | -۸.۴ | ۱.۷ | ۳۸.۹ | ۸.۸  | ۳۹.۶ |

جدول (۴) میانگین ماهانه مقادیر شاخص های ترمودینامیک جو را همزمان با رخداد وارونگی های دمایی در شهر بندرعباس طی سال های ۲۰۲۰-۲۰۱۰ را نشان می دهد. با توجه به آمار داده های ثبت شده در رادیوسوند میانگین ضریب شاخص SI همزمان با رخداد وارونگی در شهر بندر عباس طی این دوره در ماه جولای ۲۷/۶ درصد که بیشترین مقدار این ضریب در بین سال های مورد مطالعه بوده است. کمترین مقدار ضریب نیز شاخص KO با ضریب ۲۲/۹- در ماه جولای دیده شده است. بیشترین ضریب را نیز شاخص TC با ضریب ۴۸/۷ درصد مربوط به ماه جولای می باشد. ضرایب سایر شاخص ها در جدول (۴) قابل مشاهده می باشند.

جدول (۴). مقادیر ماهانه شاخص های ترمودینامیک جو همزمان با رخداد وارونگی دمایی در شهر بندر عباس

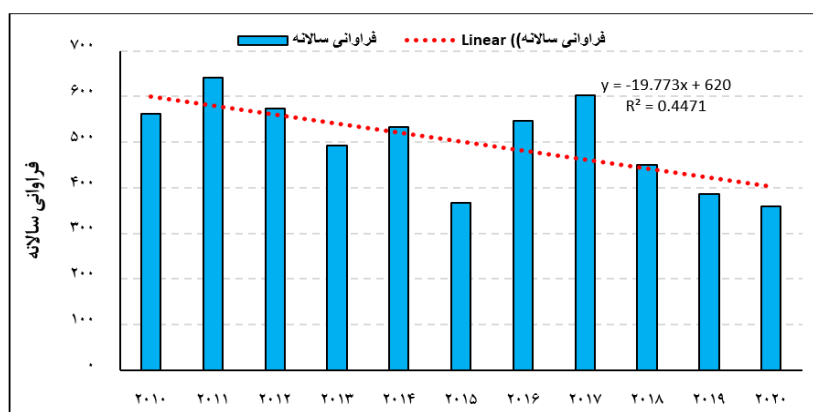
| ماه     | SI   | KO    | LI   | TT   | KI   | TC   |
|---------|------|-------|------|------|------|------|
| Jan     | ۸    | ۲.۷   | ۱۱.۲ | ۳۴.۹ | -۴.۱ | ۳۳.۲ |
| Feb     | ۱۹   | -۰.۷  | ۶    | ۳۷.۳ | ۶.۸  | ۳۲.۹ |
| Mar     | ۱۴.۲ | -۴.۲  | ۳.۶  | ۳۷.۱ | ۳.۲  | ۳۷.۳ |
| Apr     | ۲۴.۱ | -۷.۶  | -۰.۹ | ۴۲.۱ | ۱۲.۹ | ۴۰   |
| May     | ۲۳   | -۱۱.۹ | -۳.۲ | ۴۱.۵ | ۱۴.۴ | ۴۴.۴ |
| Jun     | ۱۶.۹ | -۱۵.۶ | -۴.۶ | ۴۰.۴ | ۱۱.۸ | ۴۸.۶ |
| Jul     | ۲۷.۶ | -۲۲.۹ | -۸.۸ | ۴۳   | ۲۱.۱ | ۴۸.۷ |
| Aug     | ۲۵.۵ | -۲۲.۷ | -۶.۶ | ۴۳.۴ | ۲۱.۸ | ۴۵.۹ |
| Sep     | ۱۹.۴ | -۱۹   | -۴.۸ | ۳۸.۱ | ۱۵.۳ | ۴۴.۷ |
| Oct     | ۲۳.۸ | -۱۵.۸ | -۲.۲ | ۴۰.۲ | ۱۴.۵ | ۴۰.۸ |
| Nov     | ۱۶.۵ | -۸.۴  | ۳.۵  | ۳۸.۷ | ۶.۹  | ۳۶.۹ |
| Dec     | ۱۰.۱ | ۲.۶   | ۱۱.۹ | ۳۴.۹ | -۱.۹ | ۳۵.۹ |
| میانگین | ۱۸.۳ | -۸.۴  | ۱.۷  | ۳۸.۹ | ۸.۸  | ۳۹.۶ |

جدول (۵) میانگین فصلی مقادیر شاخص‌های ترمودینامیک جو را همزمان با رخداد وارونگی‌های دمایی در شهر بندر عباس طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. با توجه به آمار داده‌های ثبت شده در رادیوسوند میانگین ضریب شاخص SI همزمان با رخداد وارونگی در شهر بندر عباس در فصل تابستان ۲۲/۳ درصد که بیشترین مقدار این ضریب در بین فصول مورد مطالعه بوده است. کمترین مقدار ضریب نیز شاخص KO با ضریب ۲۱/۳- در فصل تابستان دیده شده است. بیشترین ضریب را نیز شاخص TC با ضریب ۴۶/۴ درصد مربوط به فصل تابستان می‌باشد. ضرایب سایر شاخص‌ها در جدول (۵) قابل مشاهده می‌باشند.

جدول (۵). مقادیر فصلی شاخص‌های ترمودینامیک جو همزمان با رخداد وارونگی دمایی در شهر بندر عباس

| فصل     | SI   | KO    | LI   | TT   | KI   | TC   |
|---------|------|-------|------|------|------|------|
| بهار    | ۲۲.۳ | -۱۰.۸ | -۲.۶ | ۴۱.۵ | ۱۳.۳ | ۴۳.۴ |
| تابستان | ۲۳.۹ | -۲۱.۳ | -۶.۷ | ۴۱.۲ | ۱۹   | ۴۶.۴ |
| پاییز   | ۱۶.۹ | -۷.۳  | ۴.۳  | ۳۷.۹ | ۶۶   | ۳۷.۹ |
| زمستان  | ۱۳   | -۰.۲  | ۷.۵  | ۳۶.۲ | ۱.۳  | ۳۴.۲ |
| میانگین | ۱۸.۳ | -۸.۴  | ۱.۷  | ۳۸.۹ | ۸.۸  | ۳۹.۶ |

شکل (۳) فراوانی سالانه وارونگی‌های ایستگاه بندرعباس را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. در طی این دوره ۱۱ ساله در شهر بندرعباس ۵۵۱۵ مورد انواع وارونگی در ارتفاعات مختلف به وقوع پیوسته است. با توجه به این جدول، می‌توان گفت که میانگین وقوع پدیده وارونگی دمایی سالانه در ایستگاه بندرعباس حدود ۵۰۱ مورد در سال می‌باشد چرا که ممکن است در روز در ارتفاع مختلف چند نوع وارونگی رخ داده باشد. همچنین به طور کلی در هر ماه ۴۲ مورد و هر روز حدود ۱/۴ مورد وقوع وارونگی را تا ارتفاع ۵ کیلومتری تجربه کرده است. در طی این دوره بیشترین فراوانی وارونگی مربوط به سال ۲۰۱۱ با ۶۴۱ مورد، و سال ۲۰۲۰ با ۳۵۹ وارونگی در سال کمترین فراوانی سالانه را دارا می‌باشند. همچنین خط روند وقوع وارونگی‌های بندر عباس با ضریب ۴۴ درصد نشان از سیر نزولی و اما یکنواخت طی چند سال گذشته نسبت به دوره پایه می‌باشد. شکل (۳).



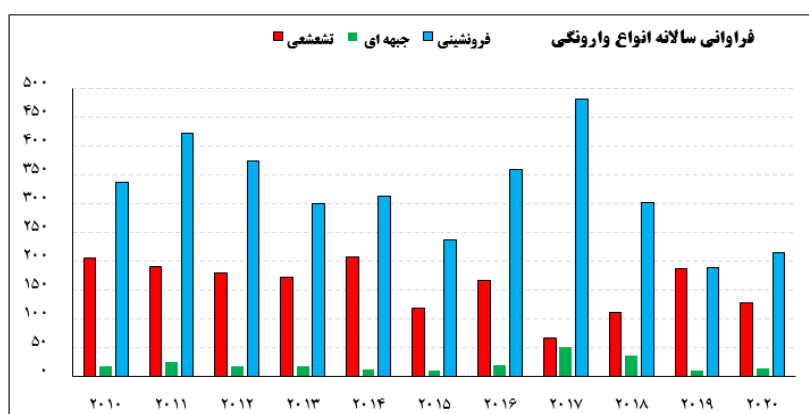
شکل (۳). فراوانی سالانه وارونگی‌های دمایی ایستگاه بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰

شکل (۴) فراوانی سالانه انواع وارونگی بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می دهد. با بررسی هایی که بر روی این داده ها صورت گرفت، مشخص شد که میانگین تعداد رخداد توأم با پدیده وارونگی دما در بندرعباس برابر ۵۰۱ مورد در سال می باشد که حدود ۳۱/۶ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشی، جبهه ای ۴/۳ درصد، و ۶۴/۱ درصد دیگر مربوط به وارونگی دمای از نوع فرونشینی می باشد. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره، سهم وارونگی های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می باشد. پدیده شرحی بخصوص در فصول گرم نیز وقوع این پدیده را در شهر بندرعباس تشدید می کند. چرا که در دوره گرم سال در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استیلای کامل پرفشار دینامیکی جنب حاره، گسترش و تقویت نصف النهاری آن موجب تقویت و تداوم پایداری بر فراز جو منطقه می شود (خسروی و همکاران، ۱۳۹۳).

همچنین همان طوری که در شکل (۴) مشاهده می شود سال ۲۰۱۷ بیشترین وارونگی از نوع فرونشینی و جبهه ای و سال ۲۰۱۴ بیشترین وارونگی از نوع تشعشی رخ داده است. سال ۲۰۱۹ کمترین وارونگی فرونشینی، سال ۲۰۱۷ کمترین وارونگی تشعشی و سال ۲۰۱۹ و ۲۰۱۵ کمترین درصد فراوانی وارونگی جبهه ای را دارا می باشد.

جدول (۶). فراوانی و درصد فراوانی سالانه انواع وارونگی دمایی در شهر بندرعباس

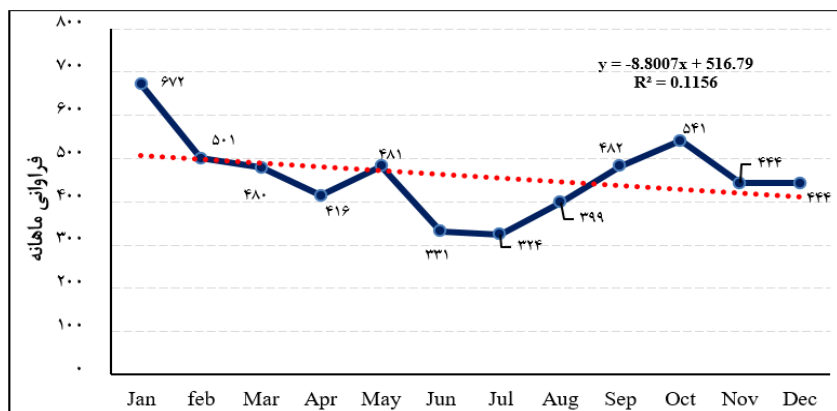
| درصد فراوانی | مجموع | نوع وارونگی |
|--------------|-------|-------------|
| ۳۱.۶         | ۱۷۴۳  | تشعشی       |
| ۴.۳          | ۲۳۷   | جبهه ای     |
| ۶۴.۱         | ۳۵۳۵  | فرونشینی    |
| ۱۰۰          | ۵۵۱۵  | مجموع       |



شکل (۴). فراوانی سالانه انواع وارونگی دما در شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ – ۲۰۲۰

شکل (۵) فراوانی ماهانه وارونگی ها را نشان می دهد. با توجه به شکل بیشترین درصد فراوانی روزهای دارای وارونگی ماهانه طی سال های مورد مطالعه مربوط به ماه ژانویه ۶۷۲ وارونگی و کمترین درصد فراوانی روزهای دارای وارونگی ماهانه در طی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مربوط به ماه جولای با ۳۲۴ وارونگی می باشد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می کنید فراوانی ماهانه روزهای همراه با وارونگی در نیمه سرد سال بیشتر از ماه های گرم می باشند؛ بنابراین می توان گفت که اکثر وارونگی های ایستگاه بندرعباس از نوع فرونشست بوده است. دلیل آلودگی هوای شهر بندرعباس علاوه بر سوخت فسیلی ناشی از وسایل نقلیه، می تواند به علل سوختن گازهای حاصل از فعالیت سکوها و میدا های

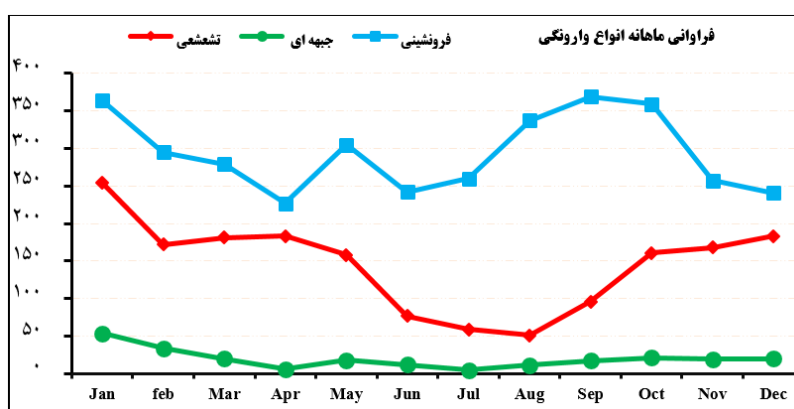
نفی نزدیک شهر نسبت داد. اما در فصول گرم سال به علت فعالیت پرفشار جنب حاره در این منطقه، لایه‌ای از هوای گرم به سطح زمین نشست کرده و اجازه صعود هوا را نمی‌دهد در نتیجه وارونگی‌های دمایی در این شهر تشدید می‌شود.



شکل (۵). فراوانی ماهانه وارونگی‌های دمایی در شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰

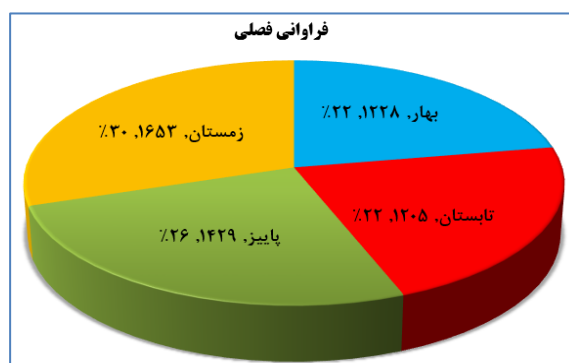
شکل (۶) فراوانی ماهانه انواع وارونگی‌ها را در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) وارونگی فرونشینی با ۳۱۹۶ مورد بیشترین فراوانی و وارونگی جبهه‌ای با ۴۶۴ مورد کمترین نوع وارونگی را در ایستگاه بندرعباس به خود اختصاص داده است. وارونگی تشعشعی نیز با ۱۴۷۷ مورد طی دوره مورد مطالعه در این ایستگاه به وقوع پیوسته است.

بیشترین فراوانی آن در ماه ژانویه با ۳۸۲ مورد و کمترین فراوانی وارونگی فرونشینی را ماه اکتبر با ۲۰۵ وارونگی به خود اختصاص داده‌اند. وارونگی نوع تشعشعی در مرتبه دوم بیشترین فراوانی را دارد. برای این نوع از وارونگی؛ ماه‌های سرد ژانویه، مارس و آوریل هر کدام با فراوانی ۱۴۶ مورد دارای بیشترین و ماه جولای با ۸۹ مورد وارونگی دارای کمترین فراوانی می‌باشد. بیشترین فراوانی از نوع جبهه‌ای مربوط به ماه ژانویه با ۷۳ مورد و ماه سپتامبر با ۱۸ مورد کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. با توجه به شکل (۶)، در تمامی ماه‌ها حداکثر فراوانی با وارونگی نوع فرونشست می‌باشد.



شکل (۶). فراوانی ماهانه انواع وارونگی‌های دمایی در شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰

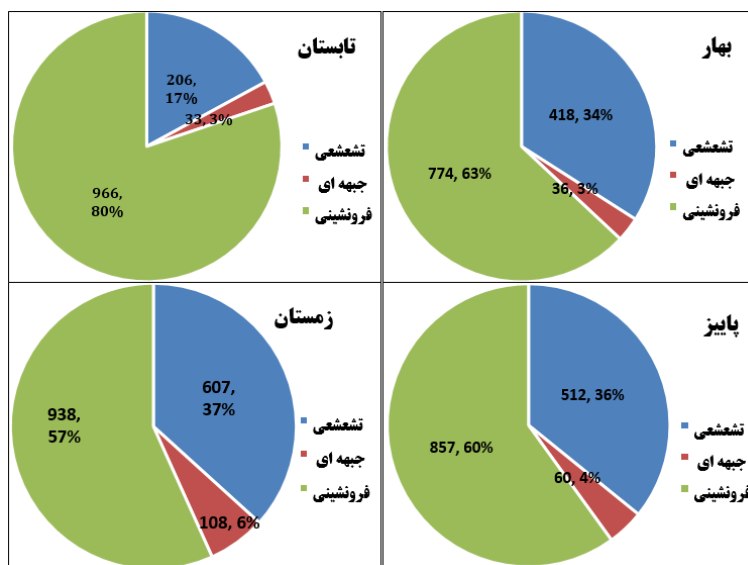
شکل (۷) مجموع فراوانی فصلی وارونگی های شهر بندرعباس را نشان می دهد. با توجه به داده ها، پدیده وارونگی دما در تمام فصول در شهر بندرعباس طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ قابل مشاهده است. در فصل زمستان تعداد روزهایی که پدیده وارونگی دما رخ می دهد ۳۰ درصد از کل وارونگی ها را به خود اختصاص داده است که علت آن می تواند وجود هوای سرد و سنگین در لایه های بالاتر و هوای گرم در اثر صنایع مختلف در سطوح نزدیک به سطح شهر باشد که اجازه صعود این هوای گرم به لایه های بالاتر داده نمی شود. فصل تابستان تعداد وارونگی نسبت به فصول دیگر کم تر و به ۲۱/۸ درصد می رسد. به علت وجود پرفشار جنب حاره در فصل پاییز تعداد روزهای وارونگی دما، به دلیل ادامه وجود هوای سرد سنگین در جو وارونگی ها در این فصل نسبت به بهار بیشتر است.



شکل (۷). مجموع فراوانی فصلی وارونگی های دمایی شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰

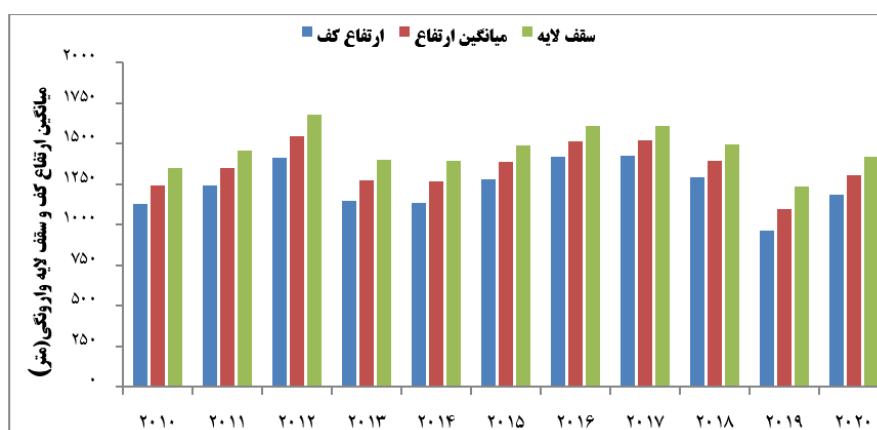
باتوجه به شکل (۸ الف) در فصل بهار سهم وارونگی های از نوع فرونشینی همانند سایر فصول با ۶۳ درصد کل وارونگی ها در این فصل بیشتر است و وارونگی جبهه ای نیز با ۳ درصد کمترین سهم را بخود اختصاص داده است. با توجه به شکل (۸ ب) طی فصل تابستان همانند فصل بهار سهم وارونگی فرونشست با ۸۰ درصد بیشتر از سایر وارونگی هاست. در این فصل سهم وارونگی فرونشست بیشتر از فصل بهار شده است و وارونگی جبهه ای بدلیل گرمای هوا و یکنواخت شدن جو کاهش محسوس پیدا کرده است. با توجه به شکل (۸ ج) طی فصل پاییز از نظر فراوانی و درصد همانند فصل بهار فرونشینی در رتبه نخست است و جبهه ای کمترین درصد را دارا می باشد. با توجه به شکل (۸ د) طی فصل زمستان به دلیل عبور سامانه ای مختلف سهم وارونگی جبهه های از سایر فصول بیشتر بوده است و به ۶ درصد رسیده است که نسبت به سایر فصول بیشتر به وقوع پیوسته است. در این فصل همانند فصول دیگر سهم وارونگی های فرونشینی با ۵۷ درصد بیشتر است و تشعشی نیر با ۳۷ درصد در رتبه دوم قرار دارد.

بطور کلی می توان گفت که در شهر بندرعباس سهم وارونگی های نوع فرونشست بدلیل نزول هوا زیر پرفشار جنب حاره در فصل تابستان بیشتر از فصول دیگر است، کمترین وارونگی فرونشست نیز هم در فصل زمستان (۵۷ درصد) مورد مشاهده شده است. در دوره مورد مطالعه فصل زمستان دارای بیشترین سهم وارونگی جبهه ای است و کمترین این نوع از وارونگی در فصل بهار و تابستان مشاهده شده است. بیشترین فراوانی وارونگی تشعشی در فصل زمستان با ۶۰۷ مورد و کمترین آن با ۱۷ درصد و ۲۰۶ مورد در فصل تابستان بوقوع پیوسته است.



شکل (۸). مجموع و درصد فراوانی فصلی انواع وارونگی دمایی در شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۲۰ - ۲۰۱۰

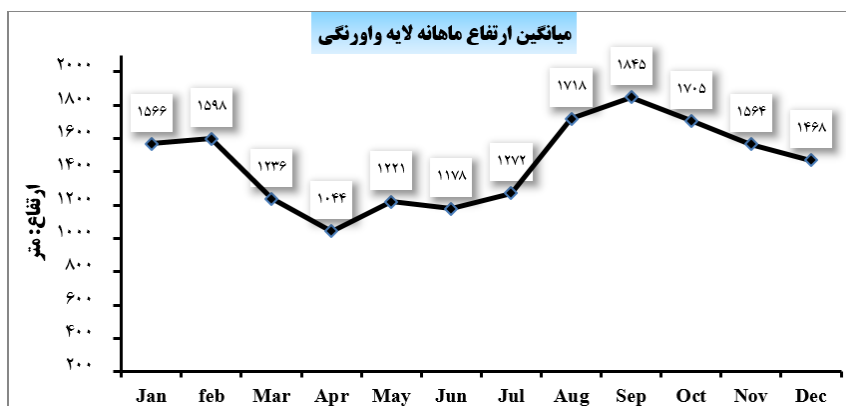
شکل (۹) میانگین ارتفاع سالانه وارونگی ها را طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می دهد. با توجه به شکل در سال ۲۰۱۲ وارونگی ها در بلندمدت با میانگین ارتفاع ۱۵۴۵ متر در بالاترین ارتفاع قرار دارند و سال ۲۰۱۹ وارونگی ها در میانگین ارتفاع ۱۰۹۸ متر کمترین ارتفاع از سطح زمین شکل گرفته اند. با توجه به شکل (۹) از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ ارتفاع شکل گیری وارونگی ها روند افزایشی داشته است ولی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ ارتفاع وارونگی روند کاهشی داشته و وارونگی ها در ارتفاع پایین تری به وقوع پیوسته اند و دوباره از سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ ارتفاع شکل گیری وارونگی ها روندی افزایش پیدا کرده است، و سپس از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ روند کاهشی داشته است. بطور کلی روند ارتفاع نشان می دهد که وارونگی ها در ایستگاه بندرعباس با اندکی افزایش در سقف لایه مواجه شده اند. علت این امر می تواند ناشی از تغییر اقلیم و تقویت پرفشار جنب حاره و نوسانات مونسون در فصل گرم باشد.



شکل (۹) میانگین ارتفاع سالانه وارونگی های شهر بندر عباس طی سالهای ۲۰۲۰ - ۲۰۱۰

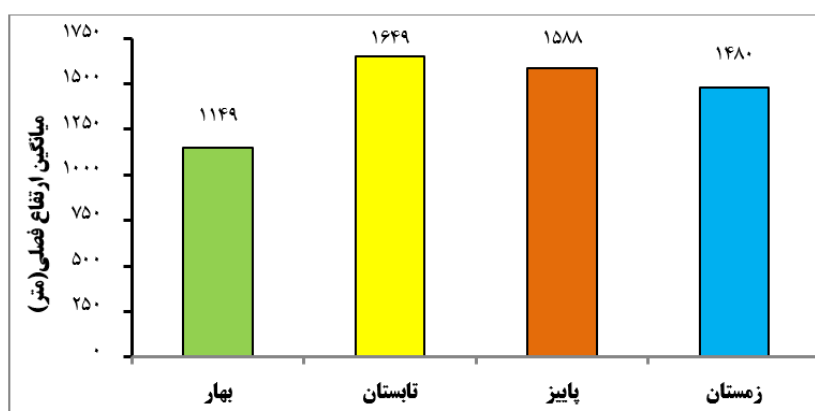
شکل (۱۰) میانگین ارتفاع ماهانه وارونگی های شهر بندر عباس را در سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می دهد. حداکثر میانگین ماهانه ارتفاع شکل گیری وارونگی در بین سال های مورد مطالعه مربوط به ماه سپتامبر با ارتفاع

۱۸۴۵ متر می‌باشد و حداقل میانگین ارتفاع ماهانه شکل‌گیری وارونگی‌های بندرعباس به ماه آوریل با ارتفاع ۱۰۴۴ متر اختصاص دارد. ارتفاع شکل‌گیری وارونگی در سایر ماه‌ها تقریباً اختلاف بسیار ناچیزی دارد و سطح شکل‌گیری لایه وارونگی در کلیه ماه‌ها بسیار نزدیک به هم می‌باشد که ناشی از اخذ وارونگی‌های تا ارتفاع ۵ کیلومتری از سطح زمین می‌باشد. همانطور که خط روند ارتفاع ماهانه نشان می‌دهد، میانگین ارتفاع تشکیل لایه وارونگی‌های بندرعباس از فصل زمستان به بهار روند کاهشی و از بهار به تابستان روند افزایشی و از تابستان به پاییز در حال کاهش می‌باشد. طبق داده‌ها حداکثر ارتفاع در اوایل پاییز به اوج می‌رسد.



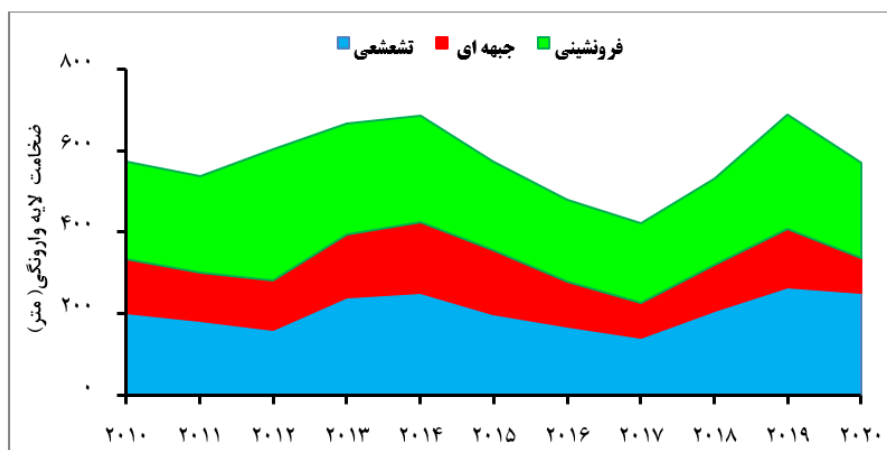
شکل (۱۰). میانگین ارتفاع ماهانه وارونگی‌های دمایی شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ - ۲۰۲۰

شکل (۱۱) میانگین ارتفاع فصلی شکل‌گیری لایه وارونگی را بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) لایه وارونگی در فصل تابستان با ارتفاع ۱۶۴۹ متر در ارتفاع بیشتری نسبت به سایر فصول شکل گرفته است. این امر نشان‌دهنده شکل‌گیری وارونگی‌ها با توجه به فرونشست هوا در لایه‌های بالاتر جو دارد. حداقل ارتفاع شکل‌گیری لایه وارونگی نیز در فصل بهار با میانگین ارتفاع ۱۱۴۹ متر به وقوع پیوسته‌اند که نشان‌دهنده وقوع بیشتر وارونگی از نوع تشعشعی در این فصل دارد. در فصل زمستان نیز لایه وارونگی در ارتفاع ۱۴۸۰ متری از سطح زمین شکل گرفته است. میانگین ارتفاع شکل‌گیری لایه وارونگی در فصل پاییز در طول سال‌های مورد مطالعه نیز ۱۵۸۸ متر بوده است. که بعد از فصل تابستان در رتبه دوم قرار دارد.



شکل (۱۱). میانگین ارتفاع فصلی شکل‌گیری لایه وارونگی دمایی شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

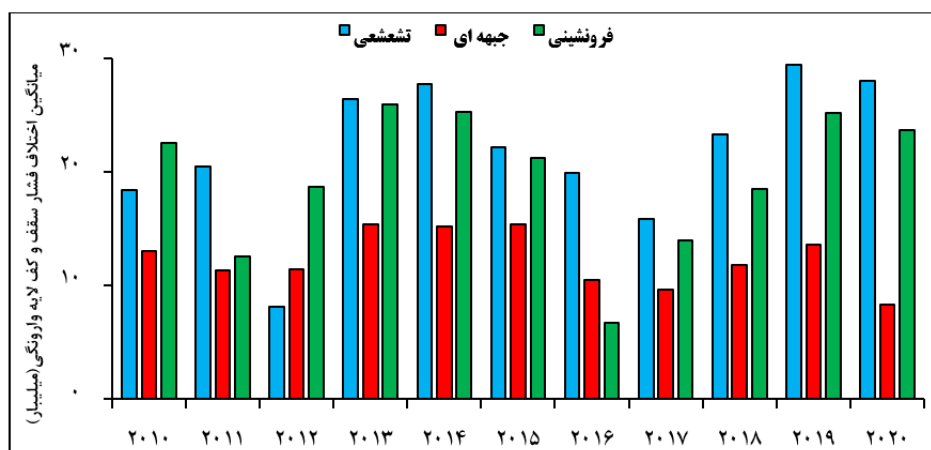
شکل (۱۲) ضخامت لایه های انواع وارونگی را نشان می دهد. با توجه به آمار بلند مدت (۲۰۱۰-۲۰۲۰) بطور کلی ضخامت لایه های وارونگی (ضخامت لایه یعنی اختلاف ارتفاع کف وارونگی از سقف وارونگی) شهر بندرعباس ۱۹۲ متر می باشد. در این میان ضخیم ترین لایه های وارونگی در سال ۲۰۱۹ با ۲۲۹/۵ متر می باشد و کمترین میزان ضخامت لایه وارونگی در شهر بندرعباس در سال ۲۰۱۷ با ۱۴۰ متر طی دوره مورد مطالعه به ثبت رسیده است. مقدار ضخامت لایه های وارونگی از نوع فرونشست با ۲۴۳ متر و جبهه ای با ۱۲۷ متر ضخیم ترین و نازک ترین لایه های وارونگی را تشکیل داده اند. لایه وارونگی تشعشعی نیز در این مدت با میانگین ۲۰۶ متر تشکیل شده است.



شکل (۱۲) ضخامت لایه های انواع وارونگی دمایی شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

شکل (۱۳) مقدار فشار لایه های وارونگی (اختلاف فشار بین کف و سقف هر لایه وارونگی) را نشان می دهد. بر اساس داده های فشار، فشار لایه های وارونگی در شهر بندرعباس در بلند مدت ۱۸ میلیبار می باشد. بیشترین فشار لایه وارونگی های دوره مورد مطالعه با ۲۳ میلی بار در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۱۴ و کمترین فشار لایه وارونگی ها با ۱۲ میلی بار در سال ۲۰۱۶ به ثبت رسیده است.

از نظر میانگین فشار در انواع وارونگی ها می توان گفت که بیشترین فشار با ۲۲ میلی بار در نوع تشعشعی ثبت شده است. کمترین فشار نیز در نوع جبهه ای با ۱۲ میلی بار در بلند مدت تشکیل شده است. همچنین نتایج میانگین فشار لایه وارونگی نشان داد که بیشترین میانگین فشار ثبت شده طی دوره مطالعه (۲۰۱۰-۲۰۲۰) در نوع تشعشعی با ۲۹ میلی بار در سال ۲۰۱۹ و کمترین فشار طی همین دوره نیز با ۸ میلی بار در سال ۲۰۱۲ به ثبت رسیده است. اما طی همین دوره میانگین فشار در نوع جبهه ای با ۱۵/۵ میلی بار در سال ۲۰۱۵ و کمترین میانگین فشار نیز با ۸ میلی بار در سال ۲۰۲۰ ثبت شده است. همچنین بیشترین میانگین فشار در لایه های وارونگی از نوع فرونشست در شهر بندرعباس به مقدار ۲۶ میلیبار در سال ۲۰۱۳ و کمترین آن نیز در سال ۲۰۱۶ با ۷ میلی بار رخ داده است.



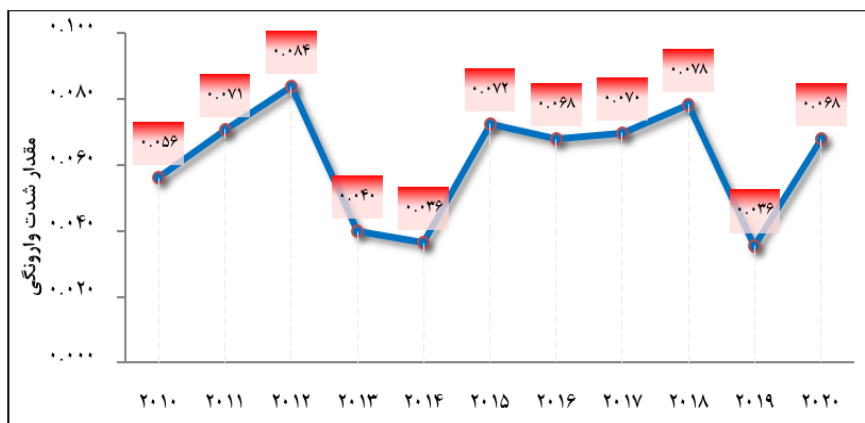
شکل (۱۳) فشار لایه های وارونگی دمایی شهر بندرعباس طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

جدول (۷) فراوانی رتبه شدت انواع وارونگی را نشان می دهد. براساس جدول (۷) از مجموع کل وارونگی های شکل گرفته در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه بندرعباس، ۲۶۱۲ مورد (۴۷/۴ درصد) و میانگین ضریب ۰/۰۸۳ از وارونگی ها بسیار شدید بوده اند و کمترین میزان نیز با ۷۶۲ مورد (۱۳/۸ درصد) میانگین ضریب ۰/۰۲۲ به صورت شدید رخ داده اند. در این میان شدیدترین وارونگی ها از نوع فرونشست با ۱۳۵۴ مورد و ضعیف ترین وارونگی ها نیز با ۲۹ مورد و از نوع جبهه ای بوده است.

جدول (۷). فراوانی رتبه شدت انواع وارونگی دمایی شهر بندرعباس

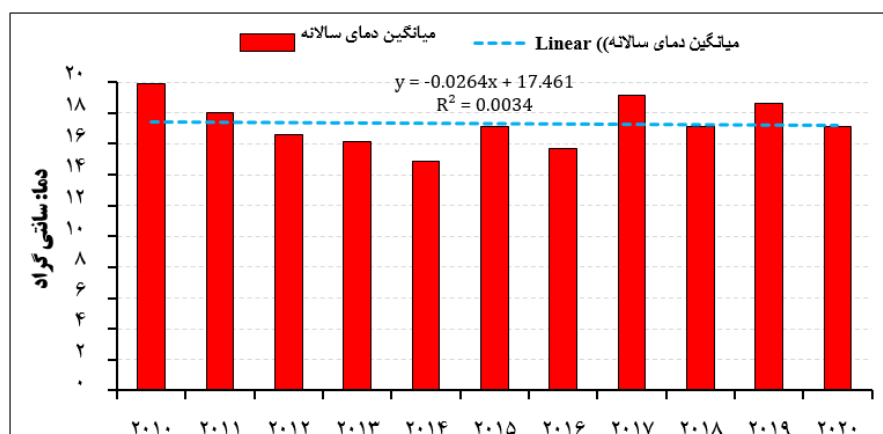
| نوع وارونگی           | بسیار شدید | شدید | ضعیف | متوسط | مجموع فراوانی | ضریب شدت |
|-----------------------|------------|------|------|-------|---------------|----------|
| تشعشی                 | ۱۲۰۹       | ۱۸۴  | ۱۶۵  | ۱۸۵   | ۱۷۴۳          | ۰/۰۷۹    |
| جبهه ای               | ۴۹         | ۲۹   | ۹۶   | ۶۳    | ۲۳۷           | ۰/۰۲۲    |
| فروشنینی              | ۱۳۵۴       | ۵۴۹  | ۷۳۳  | ۸۹۹   | ۳۵۳۵          | ۰/۰۸۳    |
| مجموع فراوانی         | ۲۶۱۲       | ۷۶۲  | ۹۹۴  | ۱۱۴۷  | ۵۵۱۵          | -        |
| میانگین /درصد فراوانی | ۴۷/۴       | ۱۳/۸ | ۱۸   | ۲۰/۸  | ۱۰۰           | ۰/۰۶۲    |

شکل (۱۴) مقادیر ضرایب شدت وارونگی را نشان می دهد. با توجه به داده ها شدیدترین وارونگی ها طی سال ۲۰۱۲ با میانگین ضریب ۰/۰۸۴ و ضعیفترین وارونگی ها در سال ۲۰۱۴ با میانگین ۰/۰۳۶ رخ داده اند. ولی بطور کلی میانگین بلندمدت ضریب شدت وارونگی های ایستگاه بندرعباس با ۰/۰۶۲ نشان می دهد که وارونگی های این شهر اکثرا از نوع بسیار شدید هستند که این رخداد می تواند آثار بسیار مخربی هم از نظر محیط زیستی و هم سلامت جسمی ساکنین شهر بندرعباس در پی داشته باشد.



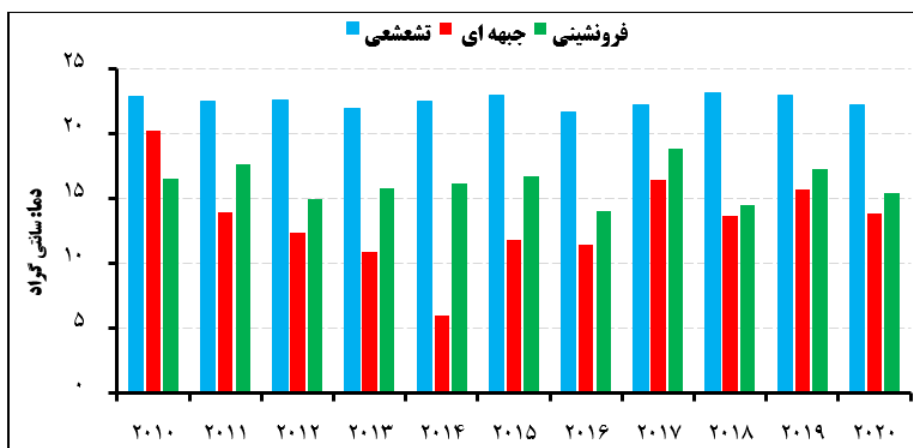
شکل (۱۴). مقادیر میانگین ضرایب شدت و آرونگی دما در شهر بندرعباس طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰

شکل (۱۵). مقدار دمای سالانه لایه های آرونگی ( اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه آرونگی) را نشان می دهد. بر اساس داده های دما، بیشترین دمای لایه های آرونگی در شهر بندرعباس در سال ۲۰۱۰ با ۱۹/۹ درجه سانتی گراد می باشد. کمترین دمای لایه آرونگی های دوره مورد مطالعه با ۱۴/۹ درجه سانتی گراد در سال ۲۰۱۴ به ثبت رسیده است.



شکل (۱۵). دمای سالانه لایه های آرونگی دمایی در شهر بندرعباس طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰

شکل (۱۶). مقدار دمای سالانه در لایه انواع آرونگی ( اختلاف دما بین کف و سقف هر لایه آرونگی) را نشان می دهد. بر اساس داده های دمایی لایه های آرونگی شهر بندرعباس، بیشترین دمای آرونگی نوع فرونشینی را سال ۲۰۱۷ با دمای ۱۸/۸ درجه سانتی گراد دارا می باشد. و کمترین دمای لایه آرونگی نوع فرونشینی در سال ۲۰۱۶ با دمای ۱۴ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است. دما در لایه آرونگی نوع تشعشعی در سال ۲۰۱۸ با ۲۳/۲ درجه سانتی گراد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است و کمترین میزان دما در این نوع آرونگی مربوط به سال ۲۰۱۶ با ۲۱/۷ درجه سانتی گراد می باشد. بیشترین دمای آرونگی نوع جبهه ای در بین سال های مورد مطالعه در سال ۲۰۱۰ با ۲۰/۲ درجه سانتی گراد و کمترین مقدار دمای لایه در این نوع آرونگی در سال ۲۰۱۴ با ۵/۹ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است.



شکل (۱۶) دمای سالانه انواع وارونگی دمایی در شهر بندرعباس طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰

#### • ارتباط شاخص‌های ترمودینامیکی لایه وارونگی دما

جدول (۸) مقادیر همبستگی بین شاخص‌های لایه وارونگی دمایی در بندرعباس را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۸) بین شدت وارونگی با ارتفاع لایه وارونگی ارتباط مستقیم و معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد با ضرایب ۰/۷۹ وجود دارد. بدین معنا که هر قدر ارتفاع لایه وارونگی بیشتر باشد، شدت وارونگی نیز بیشتر می‌شود و بالعکس. اما بین شدت وارونگی و ضخامت رابطه معکوس معناداری با ضریب ۰/۷۱- در سطح احتمال ۹۹ درصد برقرار است. این رابطه معکوس نشان می‌دهد که هر زمان ضخامت لایه وارونگی کمتر باشد، شدت وارونگی بیشتر خواهد بود و بالعکس با افزایش ضخامت لایه، از شدت وارونگی‌ها در بندرعباس کاسته می‌شود. همچنین بین شدت و فشار لایه وارونگی ارتباط مستقیم با ضریب ۰/۴۶ برقرار است هر چند معنا دار نیست ولی می‌توان از مقدار ارتباط نیز چشم‌پوشی نمود به طوری که با افزایش فشار، بر شدت وارونگی‌ها افزوده خواهد شد.

همچنین نتایج همبستگی بین سایر شاخص‌ها 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 معکوس و معنا دار با ضریب ۰/۵۹- وجود دارد، بدین ترتیب با افزایش ضخامت لایه، فشار کاسته می‌شود در نتیجه شدت وارونگی نیز کاهش خواهد یافت.

جدول (۸). همبستگی بین شاخص‌های دینامیکی لایه وارونگی دما

| مؤلفه       | ارتفاع لایه | دمای لایه | ضخامت لایه | فشار لایه | ضریب شدت |
|-------------|-------------|-----------|------------|-----------|----------|
| ارتفاع لایه | ۱           |           |            |           |          |
| دمای لایه   | -۰.۲۰۱      | ۱         |            |           |          |
| ضخامت لایه  | -۰.۷۲۱**    | -۰.۳۲۱    | ۱          |           |          |
| فشار لایه   | ۰.۱۵۳       | ۰.۶۰۶*    | -۰.۵۹۲*    | ۱         |          |
| ضریب شدت    | ۰.۷۹۲**     | ۰.۱۰۶     | -۰.۷۱۳**   | ۰.۴۶۲     | ۱        |

## نتیجه گیری

از جمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، میتوان به پدیده وارونگی دما به عنوان مهمترین عامل تأثیرگذار در محیط های شهری نام برد، بنابراین این تحقیق با هدف بررسی انواع وارونگی و شدت آن ها با استفاده از شاخص های ترمودینامیکی جو در ایستگاه بندرعباس برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰ به رشته تحریر در آمده است.

به دلیل اهمیت این موضوع در شهر بندرعباس، وارونگی های دمای این شهر در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی هایی که بر روی این داده ها صورت گرفت، مشخص شد که میانگین تعداد رخداد توأم با پدیده وارونگی دما در بندر عباس برابر ۵۰۱ مورد در سال می باشد که حدود ۳۱/۶ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تشعشعی، جبهه ای ای ۴/۳ درصد، و ۶۴/۱ درصد دیگر مربوط به وارونگی دمای از نوع فرونشینی می باشد. به دلیل نشست هوا در زیر پرفشار جنب حاره، سهم وارونگی های فرونشست بیشتر از انواع دیگر وارونگی می باشد. پدیده شرعی بخصوص در فصول گرم نیز در وقوع این پدیده در شهر بندرعباس بی تاثیر نمی باشد. در این میان شدیدترین وارونگی ها از نوع فرونشست با ۱۳۵۴ مورد و ضعیف ترین وارونگی ها نیز با ۲۹ مورد و از نوع جبهه ای بوده است.

با بررسی های صورت گرفته می توان گفت که سهم وارونگی های فرونشست در فصل تابستان با ۹۹۶ روز ( ۸۰ درصد) بیشتر از فصول دیگر است، کمترین درصد وارونگی فرونشست نیز هم در فصل زمستان (۵۷ درصد) مشاهده شده است. در دوره مورد مطالعه فصل زمستان دارای بیشترین سهم وارونگی جبهه ای است و کمترین این نوع از وارونگی در فصل تابستان مشاهده شده است. بیشترین فراوانی وارونگی تشعشعی در فصل زمستان با ۶۰۷ مورد و کمترین آن با ۱۷ درصد در فصل تابستان بوقوع پیوسته است.

همچنین نتایج تحلیل ها نشان داد، بیشترین درصد فراوانی روزهای دارای وارونگی ماهانه در طی سال های مورد مطالعه مربوط به ماه ژانویه ۶۷۲ وارونگی و کمترین درصد فراوانی روزهای دارای وارونگی ماهانه در طی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مربوط به ماه جولای با ۳۲۴ وارونگی می باشد. فراوانی ماهانه روزهای همراه با وارونگی در نیمه سرد سال بیشتر از ماه های گرم می باشند. بخصوص در فصول گرم سال که پرفشار جنب حاره در شهر بندرعباس اثر بیشتری دارد. در واقع کف فرونشست به سطح زمین در این منطقه نسبت به دیگر مناطق کشور نزدیکتر می باشد. بنابراین فرونشست در این ایستگاه فراوانی بیشتری داشته است، اما با توجه به بررسی حاصل از شاخص شدت وارونگی، شدیدترین وارونگی از نوع تشعشعی بوده است. چرا که لایه وارونگی هم فشار بیشتری را دارا بوده است و هم دمای بیشتر و هم ضخامت کمتری را، این سه عامل خود ناشی از تقویت پرفشار جنب حاره است باعث شده است این نوع وارونگی نسبت به وارونگی های دیگر شدیدتر رخ دهد؛ چرا که در این نوع وارونگی دمای سطح زمین بیشتر است. بنابراین سقف لایه وارونگی به سطح زمین نزدیکتر می باشد. اما وارونگی جبهه ای در این ایستگاه هم بطور محدود رخ داده است و هم از لحاظ شدت ضعیف تر از سایر وارونگی ها می باشد؛ زیرا این نوع وارونگی در برخی از ترازهای بالاتر رخ داده است که اختلاف چندان بین دمای کف و سقف وارونگی وجود نداشته است.

نتایج ضریب شدت نشان داد که هر زمان ضخامت لایه کمتر دمای بیشتر و ارتفاع وقوع کمتر و فشار لایه بیشتر باشد و وارونگی در مجاورت سطح زمین رخ دهد ضریب شدت بیشتر می شود و بالعکس که نتایج مخربی برای سلامت انسان و محیط زیست به همراه خواهد داشت. ارتباط بین شدت وارونگی با پارامترهای دما، فشار و ارتفاع نشان داد که بین مقادیر شدت وارونگی با ضخامت و ارتفاع معکوس بوده است، بطوری که هر قدر ارتفاع و ضخامت لایه کمتر باشد

وارونگی شدت بیشتری داشته است اما ارتباط بین ضریب شدت و دمای لایه مستقیم و معنی دار است بصورتی که هر چقدر که دمای لایه بالاتر بوده است وارونگی شدید تر رخ داده است و بلعکس. با مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق طاووسی و همکاران (۱۳۹۸) می توان گفت وارونگی ها روند افزایشی پیدا کرده اند، و بیشتر از نوع فرونشست بودند. در سطح بین المللی درگونوف و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که درجه بالایی از همبستگی بین مقادیر عناصر اقلیمی و ارتفاع با وارونگی دمایی وجود دارد که با نتایج این تحقیق در یک راستا می باشد.

## منابع

- اسمیت، کیت. ۱۳۸۶. *مبانی اقلیم شناسی کاربردی*. ترجمه محمدعلی خورشید دوست. چاپ دوم. انتشارات یاوریان، تهران.
- بیگلری، اسماء؛ حمیدرضا عامری سیاهویی. ۱۳۹۴. شناخت منابع آلاینده هوای شهر بندرعباس. *کنفرانس سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار*. آذر ماه ۱۳۹۴.
- حسین آبادی، نسرين؛ تقی طاووسی، عباس مفیدی و محمود خسروی. ۱۳۹۸. بررسی روند وارونگی های دمایی کاتن شهرهای ایران (تهران، مشهد و تبریز). *مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۱: ۷۱۳-۶۹۳.
- خسروی، محمود؛ علیجانی، بهلول؛ الماسی، فائقه. ۱۳۹۳. تحلیل همدیدی سامانه های شرجی در استان خوزستان، *پژوهش های اقلیم شناسی*، ۱۷: ۵۷-۷۷.
- رویش محمدی، مرضیه. ۱۳۹۱. توپوکلیم و پدیده وارونگی (مطالعه موردی: شهر اصفهان-۱۳۸۹). پایان نامه کارشناسی ارشد رشته جغرافیای طبیعی گرایش ژئومورفولوژی. دانشگاه اصفهان، مهر ۳۹۱۱.
- رنجبر، ابوالفضل؛ مسعود شاکری. ۱۳۸۵. استفاده از قابلیت های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مدیریت آلودگی هوای شهر تبریز، *همایش ژئوماتیک ۸۵*. تهران. سازمان نقشه برداری کشور.
- سلطانی، مجید. ۱۳۸۵. *پدیده وارونگی دما (اینورژن) در شهر تبریز*. اداره کل هواشناسی، استان آذربایجان شرقی.
- طاووسی، تقی؛ نسرين حسین آبادی. ۱۳۹۶. ارزیابی شاخص های وارونگی دمای لایه مرزی هوای شهر تهران. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲: ۱۳-۱.
- عظیمی، فریده. ۱۳۸۷. ارزیابی تاثیر وارونگی دما بر روند آلودگی هوای شهر اهواز. *مجله جغرافیای سرزمین*، ۱۹: ۱۱۲.
- عقلمند، فریبا. ۱۳۹۳. بررسی تاثیر پایداری های جوی بر پتانسیل آلودگی هوای شهر تبریز. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز. شهریور ۹۳.
- علیجانی، بهلول؛ زهرا نجفی نیک. ۱۳۸۸. بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی. *مجله جغرافیا و توسعه ی ناحیه ای*، ۱۲: ۱-۱۲.
- کریمپور، مصطفی؛ محمد سلیقه، میثم طولابی نژاد و زهرا زارعی چغابلی. ۱۳۹۵. بررسی آلودگی هوای شهر تهران به روش وارونگی بحرانی هافتر. *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱: ۶۴-۵۱.
- کریمی، محسن؛ حسین درخشان. ۱۳۸۴. بررسی وارونگی دمایی (اینورژن) در شهر اصفهان. *مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، ۶-۱.
- کميجانی، فرشته، علی نصراللهی، نرگس نظری، شهرزاد ناهید. ۱۳۹۴. تحلیل رژیم باد خلیج فارس با استفاده از داده های ایستگاه های هواشناسی همدیدی، *مجله علمی ترویجی نیوار*، ۸۴: ۳۵-۶۳.
- لشکری، حسن؛ پریسا هدایت. ۱۳۸۵. تحلیل الگوی سینوپتیکی اینورژن های شدید شهر تهران. *مجله پژوهش های جغرافیایی*، ۵۶: ۶۵-۸۲.

- Bei, N. Li, G. Huang, R. Cao, J. Meng, N. Feng, T. Liu, S. Zhang, T. Zhang, Q. Molina, L.T. ۲۰۱۶. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, ۱۶(۱۱), ۷۳۷۳-۷۳۸۷. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7373-2016>
- Bourne, S.M. Bhatt, US. Zhang, J. Thoman, R. ۲۰۰۹. Surface-based temperature inversions in Alaska from a climate perspective. *Atmospheric Research*, ۹۵(۲-۳), ۳۵۳-۳۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.09.013>
- Hudson, S. R. Brandt, R. E. ۲۰۰۵. A Look at the Surface-Based Temperature Inversion on the Antarctic Plateau. *J. Climate*, ۱۸, ۱۶۷۳-۱۶۹۶, <https://doi.org/10.1175/JCLI1336.1>.
- Breed, C.A. Arocena, J.M, Sutherland, D. ۲۰۰۲. Possible sources of PM<sub>۱۰</sub> in Prince George (Canada) as revealed by morphology and in situ chemical composition of particulate, *Atmospheric Environment*, ۳۶(۱۰), ۱۷۲۱-۱۷۳۱, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00000-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00000-3)
- Brümmer, B. Schultze, M. ۲۰۱۵. Analysis of a ۷-year low-level temperature inversion data set measured at the ۲۸۰ m high Hamburg weather mast, *Meteorologische Zeitschrift*, ۲۴(۵), ۴۸۱-۴۹۴. <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0669>
- Coshkun, M. Coshkun, S. Gozalan, S. ۲۰۲۰. Temperature Inversion Winter Seasonal in Karabuk-Safranbolu Basin: Possible Effects on Natural and Human Environment (Turkey), *Turkish Studies*, ۱۵(۱), ۷۱-۸۲. <http://dx.doi.org/10.29228/TurkishStudies.4320>
- Dergunov, A. Yakubailik, O. ۲۰۲۰. Analysis of temperature inversions during periods of adverse weather conditions in Krasnoyarsk in the winter period of ۲۰۱۹-۲۰۲۰, *E3S Web of Conferences* 223, ۰۳۰۲۱, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303021>
- Donald, G. John, W.E, Harold, J.P. ۱۹۶۹. Frequency, duration, commencement time and intensity of temperature inversions at St. Pauminneapolis, *Journal of Applied Meteorology*, ۸(۵), ۷۴۷-۷۵۳.
- Thadathil, P. Ghosh, A. K. Pattanaik, J. Ratnakaran, L. ۱۹۹۹. 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*, ۱۶, ۹۸۰-۹۸۲, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0980:AQCPFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0980:AQCPFS>2.0.CO;2).
- Kankanala, P. ۲۰۰۷. 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, ۷۴ pp. available on line at, [http://www.uaf.edu/asp/Students/theses/Pavan\\_thesis.pdf](http://www.uaf.edu/asp/Students/theses/Pavan_thesis.pdf)
- Khalesi, B., Mansouri Daneshvar, M. Comprehensive temporal analysis of temperature inversions across urban atmospheric boundary layer of Tehran within ۲۰۱۴-۲۰۱۸. *Model. Earth Syst. Environ.* ۶, ۹۶۷-۹۸۲ (۲۰۲۰). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00732-x>
- Lehmacher, G. A. Croskey, C. L. Mitchell, J. D. Friedrich, M. Lübken, F.J. Rapp, M. Kudeki, E. Fritts, D. C. ۲۰۰۶. Intense Turbulence Observed above a Mesospheric Temperature Inversion at Equatorial Latitude, *Geophysical Research Letters*. ۳۳, L۰۸۸۰۸, <https://doi.org/10.1029/2005GL024345>
- Nodz, M.I. Ogino, S.Y. Tachibana, Y. Yamanaka, M. ۲۰۰۶. Climatological description of seasonal variations in lower-tropospheric temperature inversion layers over the Indochina Peninsula, *Journal of Climate*, ۱۹(۱۳), ۳۳۰۷-۳۳۱۹. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI13799.1>
- Retallack, B.J. ۱۹۷۳. Compendium of meteorology, WMO, PART ۲, *Physical Meteorology*, ۱(۳۴۰), ۲۰-۳۶.
- Thadathil, P. Gosh, A. K. ۱۹۹۲. Surface Layer Temperature Inversion in the Arabian Sea during winter. *Journal of Oceanography*, ۴۸, ۲۹۳-۳۰۴. <https://doi.org/10.1007/BF02233989>

- Yasuda, I. Ueno, H. ۲۰۰۵. Temperature Inversions in the Subarctic North Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, ۳۵, ۲۴۴۴-۲۴۵۶, <https://doi.org/10.1175/JPO2829.1>.
- Zeng, S. Zhang, Y. ۲۰۱۷. The Effect of Meteorological Elements on Continuing Heavy Air Pollution: A Case Study in the Chengdu Area during the ۲۰۱۴ Spring Festival. *Atmosphere*, ۸(۴):۷۱. <https://doi.org/10.3390/atmos8040071>