

بررسی تأثیر وارونگی‌های دمایی بر آلودگی هوای اکوسیستم‌های بیابانی در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس

سید امیر امیری‌زاد،^۱ احمد نوحه‌گر^{*۲}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

چکیده

پژوهش حاضر در راستای شناسایی وارونگی‌های دمایی، شدت و ارتباط آن با آلاینده‌های جوی در منطقه صنعتی غرب بندرعباس انجام شد. برای دستیابی به این رهیافت، ابتدا گلباد منطقه ترسیم شد؛ سپس با دریافت داده‌های میانی جو از رادیوسوند بندرعباس و ترسیم نمودار اسکیتوی، روزهای وارونگی دمایی استخراج شد. فراوانی و نوع وارونگی‌ها در مقیاس ماهانه و فصلی بررسی شد. برای مدل‌سازی احتمال وقوع وارونگی، رگرسیون لجستیک بر داده‌ها برازش داده شد. شدت وارونگی نیز در مقیاس ماهانه بررسی شد و معادله خطی آن با رگرسیون چندگانه ترسیم شد. میزان پارامترهای جوی در روزهای وارونگی و عدم وارونگی با آزمون تی‌استیودنت بررسی شد و در نهایت ارتباط بین غلظت آلاینده‌های جوی با وارونگی‌ها شناسایی شد. نتایج نشان داد باد غالب در منطقه، جنوب شرقی است که از دریای خلیج فارس به سمت خشکی می‌وزد. در منطقه، ۲۲۳ روز از سال وارونگی اتفاق می‌افتد که ۱۵۷ مورد از آن تابشی و ۶۶ مورد فرونشینی است. وارونگی‌ها در زمستان و بهار بیشتر از تابستان و پاییز است. پایه وارونگی در زمستان در ۱۰ متری است؛ اما در تابستان ریزش دینامیکی هوای گرم باعث تشکیل وارونگی فرونشینی می‌شود و ارتفاع پایه لایه به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد. حدود ۵۱/۲ درصد وارونگی‌ها شدت ضعیف، ۳۷/۹ درصد متوسط، ۷/۷ درصد شدت زیاد و ۳ درصد شدت خیلی زیاد است. وارونگی بیشترین تأثیر را بر ذرات معلق و ازن دارد؛ به طوری که وارونگی باعث شده است که غلظت ذرات معلق سالانه حدود ۵۲ پی‌پی‌ام نسبت به شرایط عدم وارونگی افزایش یابد.

کلیدواژه‌ها: وارونگی دما، رگرسیون لجستیک، آلودگی هوا، ذرات معلق، بندرعباس.

۱. دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

۲. استاد گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، nohegar@ut.ac.ir

مقدمه

(۲۰۰۶). این آلاینده‌های معیار شامل مونوکسیدکربن، ازن، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد، ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ و ۲/۵ میکرون است.

کیفیت هوا در نواحی شهری صنعتی بسته به هواشناسی غالب می‌تواند تحت تأثیر فرایندهای دور، منطقه‌ای یا محلی قرار گیرد. تمرکز ویژه این پژوهش بر روی رویدادهای آلودگی ناشی از انتشارات صنعتی محلی در منطقه صنعتی غرب بندرعباس است که اثرات آن تحت شرایط آب‌وهوایی سینوپتیکی خاص و وارونگی دمایی زمستانه تشدید می‌شود. در شرایط آب‌وهوایی آنتی‌سیکلونی، به دلیل فرونشست در مقیاس منطقه‌ای همراه با بادهای نسبتاً آرام و آسمان صاف، شرایط برای تغلیظ آلاینده‌های جوی هموار می‌شود (ترین^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). در تابستان، شرایط آنتی‌سیکلونی می‌تواند منجر به رویدادهای آلودگی در طول روز شود که آلاینده‌های ثانویه سریعاً تشکیل شده و با از دست رفتن انرژی سطحی در شب، وارونگی سطحی و کم‌عمق ایجاد شده و موجب تشدید آلودگی می‌شود. چنین رویدادهای آلودگی، معمولاً هر روز صبح بلافاصله پس از شروع اختلاط همرفتی حاصل از نور خورشید بر روی سطوح خشک، به‌طور ناگهانی پایان می‌یابد (وو^۵ و همکاران، ۲۰۱۴). در چنین مواردی، غلظت نزدیک به سطح انتشار اولیه تا نیمه صبح از مقادیر اوج حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و در اوایل بعدازظهر که لایه مرزی جو عمیق و به‌طور یکنواخت مخلوط می‌شود، به حداقل خود می‌رسد (لارگرون و استاکوئت^۶، ۲۰۱۶). با این حال، در زمستان، طول روز کوتاه‌تر، زاویه خورشید کمتر و سطوح مرطوب و یا خیس است. در مناطقی که سرعت باد و طول روز کاهش شدیدی می‌یابد و جریان‌های کاتاباتیک به سمت پایین جریان یافته و منجر به تجمع هوای سرد می‌شود، فرونشست و وارونگی دما در مقیاس بزرگ مرتبط با سیستم‌های آنتی‌سیکلون با حرکت آهسته یا راکد می‌تواند مانع از اختلاط هوا در طول روز شود. این پدیده منجر به رویدادهای آلودگی هوا می‌شود که می‌تواند برای روزها تا هفته‌ها ادامه داشته باشد. در نواحی ساحلی با توپوگرافی پیچیده و مضرس،

آلودگی هوا در نواحی صنعتی شهری، به‌ویژه ذرات معلق از دیرباز به‌عنوان تهدیدی برای سلامت اکوسیستم شناخته شده است (آه^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). آلودگی هوا به دلیل شهرنشینی سریع و رشد صنعتی در ایران، به‌ویژه شهر بندرعباس در سواحل شمالی خلیج فارس یک مشکل جدی است. علاوه‌بر این، یک ارتباط همه‌گیری بین قرار گرفتن در معرض ذرات معلق و افزایش بیماری‌های سرطانی، قلبی و عروقی و حتی مرگ‌ومیر توسط مطالعات اخیر نشان داده شده است (کمانی^۲ و همکاران، ۲۰۱۵)؛ اما هنوز روابط بین این اثرات نامطلوب سلامتی و آلودگی هوا شناسایی نشده است. یک فرضیه وجود دارد که آسیب اکسیداتیو به دی‌ان‌ای پلاسمید ناشی از ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون با فلزات روی سطوح ذرات معلق مرتبط است که موجب وقوع بیماری‌های سرطانی می‌شود (گرینول^۳ و همکاران، ۲۰۰۲). آلودگی هوای نواحی متراکم شهری صنعتی یکی از خطرات اصلی بهداشت محیطی در ایران است که از ذرات معلق و گازهای سمی در هوا ناشی می‌شود که منشأ طبیعی (طوفان گردوغبار، آتش‌سوزی، انتشار نمک دریا) و انسانی (سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای انرژی، حمل‌ونقل و صنعت) دارد. اثرات سلامت عمومی می‌تواند ماهیت حاد یا مزمن داشته باشد و شامل بیماری‌های تنفسی، اختلالات قلبی عروقی، ورم ملتحمه، تحریکات پوستی، مننژیت مننکوکی، تب دره و حتی مرگ‌ومیر است. با در نظر گرفتن سلامت عمومی، سازمان جهانی بهداشت، «آلاینده‌های معیاری» متعددی را شناسایی کرد که دستورالعمل‌هایی را برای غلظت و مدت‌زمان آن توصیه کرده است (دستورالعمل کیفیت هوا؛ EEA، ۲۰۱۷). رویداد آلودگی هوا زمانی رخ می‌دهد که غلظت یک یا چند مورد از آلاینده‌های معیار برای مدت طولانی‌تر از آستانه مدت‌زمان مشخص شده از مقدار دستورالعمل فراتر رود. چنین رویدادهای آلودگی می‌تواند مدت کوتاهی باشد (۱ تا ۱۲ ساعت، روز یا شب) یا تحت شرایط خاص، می‌تواند برای روزها تا هفته‌ها ادامه داشته باشد (سازمان بهداشت جهانی،

4. Trinh

5. Wu

6. Largeron & Staquet

1. Oh

2. Kamani

3. Greenwell

نشان می‌دهد بادهای شدید قاره‌ای به‌ویژه بادهای کوهستان آلپ موجب پاکیزگی هوای شهر رُم می‌شود؛ اما در زمستان با تشدید وارونگی دما غلظت ذرات معلق افزایش می‌یابد و با ورود گردوغبارهای صحرائی که از آفریقا آمده و با عبور از مدیترانه به ایتالیا می‌رسد، غلظت آلودگی هوا بیشتر می‌شود (دی‌برناردینو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). وارونگی دمای لایهٔ مرزی و ارتفاع اختلاط پارامترهای مهم در درک پراکندگی آلودگی هوا هستند. وارونگی‌های سطحی و مرتفع در لایهٔ مرزی سیاره‌ای بر فراز کویت، یک شهر ساحلی که در آب‌وهوای گرم و خشک قرار دارد، تجزیه و تحلیل شد. وارونگی دما با به دام انداختن مه دود ساطع‌شده از منابع آلودگی یک خطر طبیعی است. وارونگی دما با استفاده از یک رادیومتر مایکروویو روبشی در طول یک سال کامل (۲۰۱۳) توسط نسخهٔ پروفایلگر دمای هواشناسی (MTP-5H) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های پیوسته از راه دور (فاصلهٔ ۴ دقیقه) پروفایل‌های دما جمع‌آوری شد. تغییرات وارونگی دمای روز و شبانه ارائه شد. اثرات پنج پارامتر جوی، یعنی دمای محیط، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی و بارش بر سطح و وارونگی بالا ارائه شد. به‌طور کلی، بین وارونگی سطحی و مرتفع با چهار پارامتر هواشناسی همبستگی معناداری وجود داشت (الحمود^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). منطقهٔ پکن-تیانجین-هبی در پاییز و زمستان بارها آلودگی مه شدید را تجربه می‌کند. آلودگی اغلب توسط شرایط نامطلوب لایهٔ مرزی جو تشدید می‌شود. توپوگرافی در این منطقه بر فرایندهای لایهٔ مرزی جو به روش‌های پیچیده تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات فصلی شرایط حرارتی و الگوهای سینوپتیک به‌طور قابل توجهی فرایندهای لایهٔ مرزی جو را تعدیل می‌کند. در پاییز، با یک نیروی همدیدی نسبتاً ضعیف شمال غربی، گرادیان حرارتی بین کوه‌ها و دشت منجر به گردش نسیم کوهستانی می‌شود. در بعدازظهر، شاخهٔ رو به پایین نسیم، علاوه بر فرارفت گرم شمال غربی، توسعهٔ لایهٔ مرزی جو را در سمت غربی منطقه کاهش می‌دهد. در نواحی ساحلی شرقی، گردش نسیم دریا در اواخر صبح ایجاد شده و در بعدازظهر تشدید می‌شود. در بهار و زمستان، با بادهای همدیدی شدید

فرونشست‌های زمستانه باعث کاهش سرعت باد و تغلیظ آلاینده‌های صنعتی می‌شود که حتی تا نیمهٔ صبح نیز تغییری نمی‌کند، تا اینکه با عمیق‌تر شدن لایهٔ مرزی و اوج‌گیری گرمای خورشیدی در بعدازظهر، اختلاط همرفتی صورت گرفته و با شکستن فرونشست، آلاینده‌ها در ارتفاع بالاتر پراکنده شده و از غلظت آن‌ها در سطوح نزدیک به زمین کاسته می‌شود (لو و تورکو^۱، ۱۹۹۴).

پژوهشگران از نگاه‌های مختلفی به پدیدهٔ وارونگی دما و نقش آن در آلودگی هوا پرداخته‌اند. شهر تبریز در دشت دامنه‌ای کوهستان سهند قرار دارد که دارای اقلیم سرد و خشکی است. در زمستان با تشدید وارونگی دما، غلظت آلاینده‌های شهری آن افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که آلوده‌ترین رویدادها در روزهایی است که ارتفاع پایهٔ لایهٔ وارونگی چسبیده به سطح زمین است و غلظت ذرات معلق در این روزها به حداکثر خود می‌رسد (خورشیددوست و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای دیگر، علت رویدادهای وارونگی دمایی شهر تبریز با بهره‌گیری از علم آب‌وهواشناسی سینوپتیک بررسی شد که نتایج آن نشان داد سیستم‌های پرفشار آنتی‌سیکلونی شامل پرفشار سبیری، پرفشار شبه‌جزیرهٔ عربستان و ریزش هوای سرد مدیترانه، سامانه‌های اصلی وقوع وارونگی دما در تبریز هستند (جهانبخش اصل و روشنی، ۲۰۱۲). کلان‌شهر تهران سالانه بیش از ۲۰۰ روز وارونگی دمایی دارد که طی سال‌های اخیر توجه رسانه‌ها، مدیران و مردم را به خود جلب کرده است. اگرچه می‌توان با داده‌های رادیوسوند، وارونگی را در یک نقطه از اتمسفر بررسی کرد، با داده‌های ماهوارهٔ مودیس می‌توان برای یک پهنهٔ جغرافیایی، پراکنش وارونگی را تخمین زد که در تهران این روش اجرا شد و نتایج الگوریتم ژنتیک در حل معادلهٔ ریاضی داده‌های مودیس و شناسایی عمق و شدت وارونگی قابل اعتماد است (کاجار و همکاران، ۲۰۱۳). اگرچه شدت و ضخامت وارونگی‌های کلان‌شهر تهران در زمستان بیشتر از سایر فصل‌ها است، فراوانی وارونگی‌ها در تابستان بیشتر از زمستان و دیگر فصل‌هاست (طاووسی و حسین‌آبادی، ۲۰۱۷).

در شهر رُم ایتالیا، ارتباط آلودگی هوا با وارونگی دما و سامانه‌های جوی در مقیاس سینوپتیک بررسی شد که نتایج

2. Di Bernardino
3. Al-Hemoud

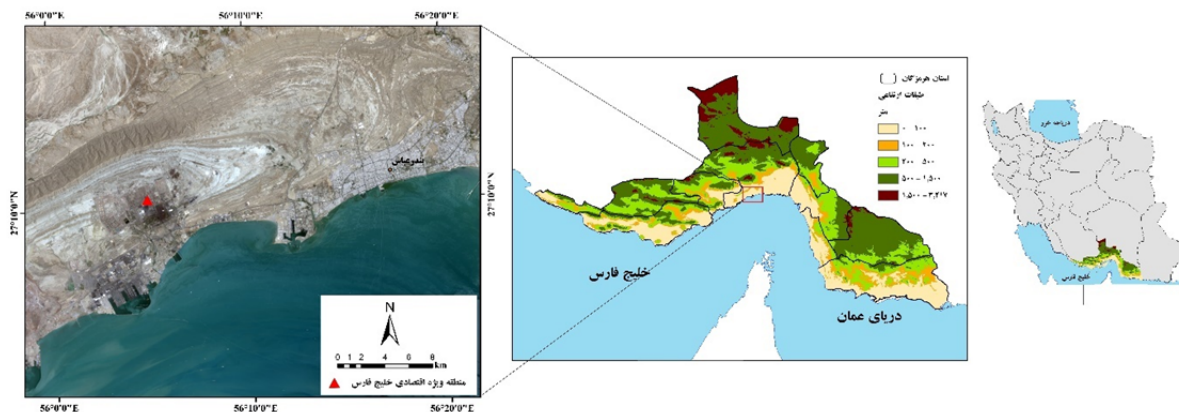
1. Lu & Turco

مواد و روش

منطقه ویژه اقتصادی صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس در ۱۳ کیلومتر بزرگراه شهید رجایی در غرب بندرعباس در استان هرمزگان - سواحل شمالی خلیج فارس - واقع شده است. وسعت این منطقه صنعتی ۴۵۰۰ هکتار است. فاصله آن تا ساحل کمتر از دو کیلومتر است و در دامنه ارتفاعی صفر تا ۳۴ متر از سطح دریا گسترده شده است. مهم‌ترین صنایع مستقر در منطقه ویژه شامل پالایشگاه نفت بندرعباس، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس، آلومینیوم المهدی، مجتمع فولاد هرمزگان، فولاد کاوه جنوب کیش، شرکت تولید روی بندرعباس، صبا فولاد خلیج فارس، شرکت مادکوش و صنایع وابسته در مقیاس کوچک و انبارهای نفتی و معدنی است. منطقه ویژه از شمال به ارتفاعات آهکی و صخره‌ای ۴۹۵ متری محدود است؛ در جنوب آن اسکله شهید رجایی است و از بین آن‌ها، بزرگراه بندرعباس-بندرخمیر عبور می‌کند. شرق منطقه اراضی بایر است و در ۱۳ کیلومتر به شهر بندرعباس می‌رسد؛ نواحی غربی منطقه نیز بایر بوده و در ۸ کیلومتر به گنبد نمکی گچین می‌رسد (شکل).

شمال غربی، گردش نسیم دریا در منطقه ساحلی محدود می‌شود. ارتفاع لایه مرزی جو در زمستان به دلیل پایداری قوی نزدیک به سطح کم است؛ در حالی که ارتفاعات لایه مرزی جو در بهار به دلیل نیروی مکانیکی قوی زیاد است. ارتفاع نسبتاً کم لایه مرزی جو در پاییز و زمستان ممکن است آلودگی هوا را تشدید کرده باشد؛ در نتیجه به رویدادهای مه شدید مکرر در منطقه کمک می‌کند (میانو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).

با توجه به موارد فوق، توانایی شناسایی قابل اعتماد رویدادهای وارونگی دما و نقش آن در آلودگی هوا در ناحیه صنعتی - شهری بندرعباس و تعیین کمیت بزرگی آن برای درک بهتر تغییرپذیری غلظت آلاینده، ارزیابی اثرات بالقوه سلامت بر ساکنان و توسعه اقدامات کاهشی جدید برای آلودگی هوا در چنین منطقه توپوگرافی پیچیده ساحلی مهم است. تا به امروز، فقدان مطالعات وارونگی دما و آلودگی هوا در این ناحیه وجود دارد. این مطالعه با استفاده از داده‌های رصدشده رادیو سوند بندرعباس و داده‌های ضبط شده پارامترهای هواشناسی و آلودگی هوا در سایت منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس، سعی در بررسی وارونگی دما و نقش آن در تغلیظ آلودگی هوای منطقه دارد و هدف اصلی نیز شناساندن ویژگی‌های وارونگی دما و تأثیر آن بر پراکنش آلاینده‌های صنعتی است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در غرب بندرعباس - استان هرمزگان

Figure (1): The geographical location of the special economic zone of the Persian Gulf in the west of Bandar Abbas-Hormozgan province

داده‌های مربوط به پارامترهای هواشناسی و آلودگی هوا

از مرکز کنترل آلودگی هوا در سایت منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ استفاده گردید. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی و وضعیت سمت و سرعت بادهای منطقه و ترسیم گلباد، از نرم‌افزار

به منظور بررسی ویژگی‌های وارونگی دما در منطقه و ارتباط آن با غلظت آلاینده‌های هوا، از داده‌های رادیو سوند و نمودار اسکویوتی بندرعباس استفاده شد. پس از دانلود داده‌ها، با نرم‌افزار *RAOB* نمودار اسکویوتی برای بندرعباس ترسیم شد.

$$\theta = T \left\langle \frac{1000}{P} \right\rangle^{0.286} \quad (۲)$$

در رابطه فوق، θ دمای پتانسیل به درجه کلوین، T دما به درجه کلوین و P فشار هوا به هکتوپاسکال است. با این رابطه، شدت وارونگی دما در ناحیه صنعتی به صورت روزانه محاسبه شد.

برای معادله‌سازی شدت وارونگی و تأثیر متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های لایه دمایی، ارتفاعی و فشاری بر شدت آن از رگرسیون خطی چندگانه به روش گام‌به‌گام استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل ۱۴ پارامتر ارتفاع پایه و رأس و ضخامت ارتفاعی لایه وارونگی، دمای پایه و رأس و ضخامت دمایی لایه وارونگی، فشار پایه و رأس و ضخامت فشاری لایه وارونگی، دما، فشار، رطوبت نسبی، سمت و سرعت باد سطح زمین است و از مهم‌ترین متغیر تا کم‌اهمیت‌ترین متغیر به صورت مرحله‌ای وارد مدل شده و در پایان، هر متغیری که معناداری کمتری از سطح تعیین شده داشت، وارد معادله نشد. در این مدل ابتدا متغیر وابسته، شدت وارونگی وارد مدل شد و سپس متغیرهای مستقل به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده به مدل اضافه شدند. برای شدت وارونگی، تعداد متغیرهای مستقلی که بیشترین سطح معناداری را با متغیر وابسته داشتند در مدل باقی مانده و متغیرهای کم‌اهمیت که سطح معناداری کمتری داشتند یا اصلاً همبستگی آن‌ها معنادار نبود، از مدل حذف شدند. در نهایت، معادله خطی چندگانه، شدت وارونگی را مدل‌سازی کرده و دارای پیش‌بینی‌کننده‌هایی شد که نقش مهمی در وارونگی دارند.

در گام دوم این پژوهش، غلظت آلاینده‌های معیار هوا شامل ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون (PM_{10})، گازهای مونوکسیدکربن، ازن، دی‌اکسیدگوگرد و دی‌اکسیدنیتروژن از مرکز کنترل آلودگی در سایت منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در مقیاس روزانه به دست آمد. پس از بررسی آلاینده‌ها، غلظت آن‌ها در روزهای وارونگی و عدم وارونگی مقایسه شد و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های جوی و مشخصات وارونگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

ویژگی‌های وارونگی دما از روی آن به دست آمد. در روزهایی که دما با ارتفاع افزایش می‌یابد، این شرایط اتمسفری در سطح زمین، به‌عنوان وارونگی هوا در نظر گرفته شد (فرح^۱ و همکاران، ۱۹۹۵). نقطه شروع افزایش دما به‌عنوان «پایه لایه اینورژن» و نقطه پایان افزایش دما با ارتفاع در جو، به‌عنوان «رأس لایه اینورژن» در نظر گرفته شد. وارونگی‌هایی که از سطح زمین شروع شده و تا ارتفاع ۱۰۰ متری ادامه داشتند، به‌عنوان «وارونگی تابشی» و وارونگی‌هایی که پایه آن‌ها از ارتفاع ۵۰ متری شروع شده و تا ارتفاع بالاتر ادامه یافته بود، به‌عنوان «وارونگی فرونشینی» در نظر گرفته شد. همچنین اختلاف پارامترهای جوی در روزهای وارونگی و عدم وارونگی، با آزمون تی‌استیودنت بررسی شد.

به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی احتمال وقوع وارونگی دما، از برازش مدل رگرسیون لجستیک استفاده شد (کوتیکوت^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) و با عضویت پارامترهای فشار هوا، رطوبت نسبی، سمت و سرعت باد، سطح پوشش گیاهی منطقه، ستون ازن اتمسفری، شاخص پرتوی فرابنفش و شار گرمای محسوس به‌عنوان متغیرهای پیشگو، احتمال وارونگی در منطقه پیش‌بینی شد.

وارونگی‌های دمایی برحسب شدت در چهار گروه مجزا شامل طبقه ضعیف (۰/۱۰-۰/۰۰۰)، متوسط (۰/۲۰-۰/۱۱۰)، شدید (۰/۳۰-۰/۲۱) و بسیار شدید (بالای ۰/۳۱) تقسیم‌بندی شد. در منابع مختلف، از پارامتر ضخامت لایه برای طبقه‌بندی شدت وارونگی استفاده شده است، اما در این پژوهش از معادله (۱) که هم ضخامت و عمق وارونگی و هم اختلاف دما را در نظر می‌گیرد، برای محاسبه شدت وارونگی استفاده شد.

$$I = \frac{(\Delta\theta)^2}{3+Z(\Delta Z)} \quad (۱)$$

که I شدت وارونگی، $\Delta\theta$ اختلاف دمای پتانسیل رأس و پایه لایه وارونگی به درجه کلوین، ΔZ ضخامت لایه به متر و Z ارتفاع ایستگاه به هکتومتر است. در این رابطه، برای محاسبه دمای پتانسیل از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

نتایج

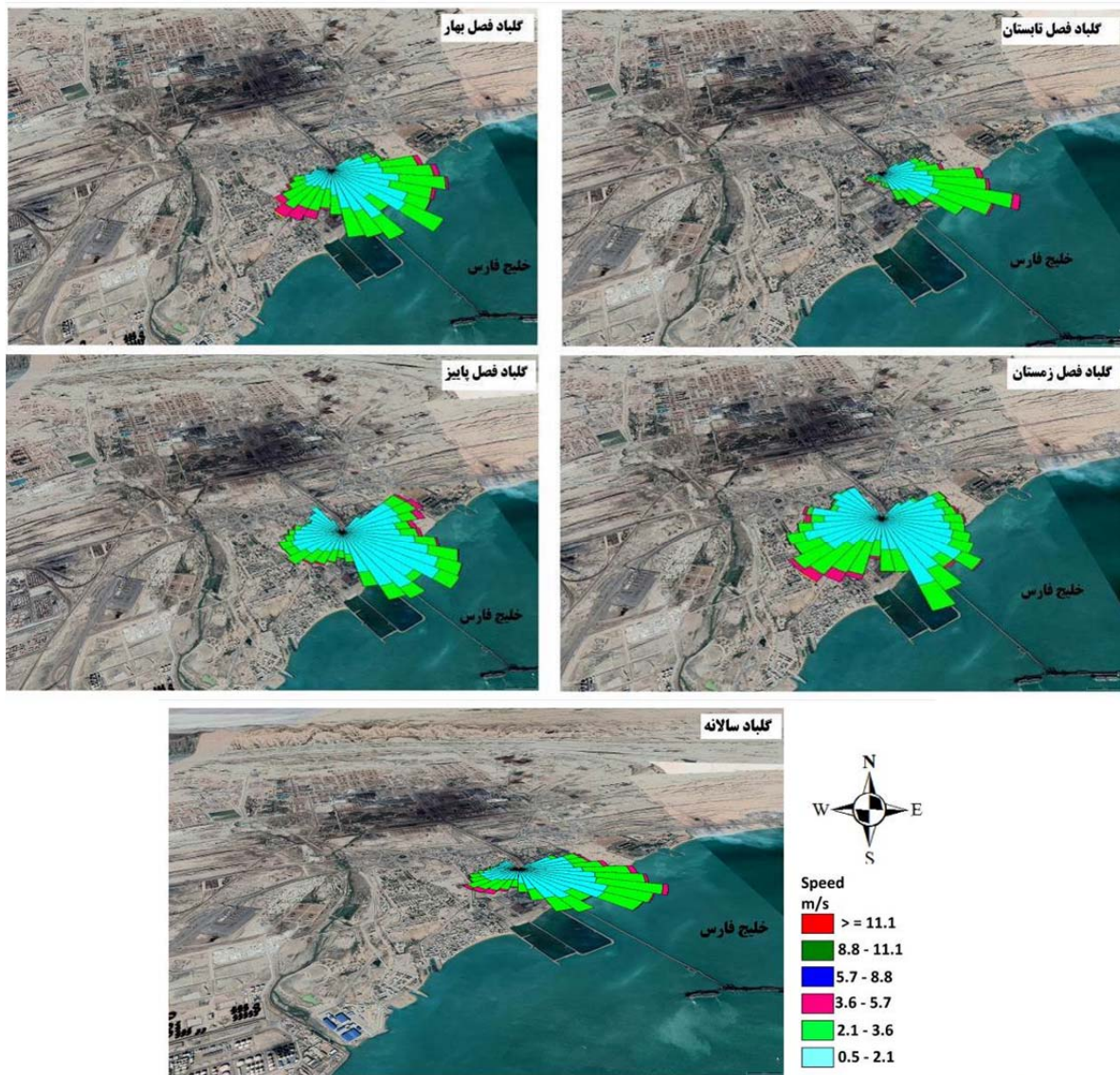
فصل‌های سرد سال است (جدول ۱). بنابراین در نیمه گرم سال، سرعت باد بیشتر از نیمه سرد سال است.

گلبادها و طبقات سرعت باد منطقه در مقیاس فصلی تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که در فصل‌های چهارگانه و سالانه، بادهای جنوبی و جنوب شرقی، بادهای غالب در منطقه هستند که به نسیم دریا معروف است (شکل ۲). در طول سال، بیشترین بادهای آرام (سرعت کمتر از یک متر در ثانیه) در پاییز است، اما در بهار فراوانی آن کاهش می‌یابد. بیشترین فراوانی سرعت باد در طول سال مربوط به بادهایی با سرعت ۰/۵ تا ۱/۲ متر در ثانیه است. در بهار و تابستان سرعت باد افزایش می‌یابد و طبقه سرعت ۳/۶ تا ۵/۷ متر در ثانیه در این فصل‌ها بیشتر از

جدول (۱): طبقات سرعت باد در منطقه

Table (1): Wind speed classes in the region

طبقات سرعت باد (متر در ثانیه)				زمان
۳/۶-۵/۷	۱/۲-۳/۶	۰/۵-۱/۲	باد آرام	
درصد (%)				
۲/۸	۲۴/۵	۵۸/۵	۱۱/۶	سال
۳/۹	۲۹/۶	۵۳/۷	۱۰/۲	بهار
۲/۹	۳۲/۷	۴۹/۵	۱۱/۱	تابستان
۱/۸	۱۵/۳	۶۷/۱	۱۳/۶	پاییز
۲/۴	۱۹/۴	۶۵/۴	۱۱	زمستان



شکل (۲): گلبادهای فصلی و سالانه منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در غرب بندرعباس، سواحل شمالی خلیج فارس

Figure (2): Seasonal and annual wind rose plot of Persian Gulf Special Economic Zone in the west of Bandar Abbas, the northern coast of the Persian Gulf

در نزدیکی سطح زمین است، اما در ماه‌های گرم، پایه این لایه افزایش یافته و به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد که بالاتر از ارتفاع دودکش‌های صنایع است. ارتفاع رأس لایه وارونگی در ماه‌های سرد کمتر از ماه‌های گرم است که بیانگر وارونگی تابشی در این ماه‌هاست. ضخامت لایه وارونگی در ماه‌های گرم بیشتر از ماه‌های سرد است و ارتفاع آن نیز بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت که لایه وارونگی در پاییز و زمستان با ضخامت کم در نزدیکی سطح زمین قرار دارد؛ اما در ماه‌های گرم بهار و تابستان، ارتفاع و ضخامت افزایش می‌یابد و تا ارتفاعات ۶۶۰ متری صعود می‌کند (جدول ۲).

نتایج استخراج روزهای همراه با وارونگی دما در منطقه صنعتی نشان داد که بیشترین وارونگی‌ها در خرداد و اردیبهشت است؛ همچنین دی، بهمن و فروردین در یک طبقه در رده سوم قرار دارند. در تیر، مرداد و شهریور از تعداد وارونگی‌ها کاسته می‌شود و مجدداً در پاییز اوج می‌گیرد. وارونگی‌های فرونشینی که در مقیاس سینوپتیک جوی، حاصل از پُرفشار جنب‌حاره است، عمدتاً در ماه‌های گرم سال اتفاق می‌افتد؛ اما وارونگی تابشی ناشی از هوای سرد صبحگاهی در ماه‌های سرد زمستانه افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در وارونگی تابشی در زمستان خیلی کم اتفاق می‌افتد؛ بلکه بیشتر آن وارونگی تابشی است. ارتفاع پایه لایه وارونگی در دی و بهمن

جدول (۲): مشخصات لایه وارونگی‌ها در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس

Table (2): Characteristics of the inversion layer in the special economic zone of the Persian Gulf

ماه	مجموع وارونگی (روز)	وارونگی فرونشینی (روز)	وارونگی تابشی (روز)	متوسط ارتفاع پایه (متر)	متوسط ارتفاع رأس (متر)	متوسط ضخامت (متر)
فروردین	۲۱	۱۶	۲۳	۱۱۲	۳۸۰	۱۶۶
اردیبهشت	۲۳	۱۲	۱۷	۱۹۴	۵۸۰	۳۸۵
خرداد	۲۷	۲۱	۱۵	۲۳۶	۵۲۸	۲۹۲
تیر	۱۵	۱۰	۵	۳۱۹	۶۶۱	۳۴۲
مرداد	۱۱	۷	۴	۳۵۰	۵۵۶	۲۰۵
شهریور	۱۷	۱۱	۷	۴۰۸	۶۴۱	۲۳۲
مهر	۱۹	۵	۱۴	۱۶۴	۳۸۲	۲۱۷
آبان	۱۶	۱	۱۵	۳۷	۲۰۵	۱۶۷
آذر	۱۳	۳	۱۰	۱۳۸	۳۵۲	۲۱۳
دی	۲۱	۰	۲۱	۱۰	۱۴۶	۱۳۶
بهمن	۲۱	۰	۲۱	۱۳	۲۰۰	۱۸۷
اسفند	۱۶	۲	۲۳	۴۵	۲۳۷	۱۹۱
سالانه	۲۲۳	۶۶	۱۵۷	۱۶۲	۴۰۵	۲۴۳

جدول (۳): تفاوت پارامترهای جوی در وقوع وارونگی‌ها

Table (3): The difference of atmospheric parameters in the inversion events

p-value	میانگین	شرایط	پارامتر
۰/۰۸۱	۸۳/۲ ۶۷/۴	اینورژن عدم اینورژن	رطوبت نسبی
۰/۹۳۱	۱۰۰/۱۷ ۱۰۰۰/۷	اینورژن عدم اینورژن	فشار
۰/۰۳*	۰/۹۸۵ ۱/۳۰	اینورژن عدم اینورژن	سرعت باد
۰/۰۰۲**	۲۴/۲ ۲۵/۴	اینورژن عدم اینورژن	دما

نتایج مقایسه میانگین آزمون تی استیودنت نشان داد که از بین پارامترهای هواشناسی، دما و سرعت باد در روزهای پایدار (وارونگی دمایی) با روزهای ناپایدار (عدم وارونگی) اختلاف معناداری دارند؛ اما رطوبت نسبی، فشار هوا و سمت باد اگرچه در دو نوع شرایط وارونگی تغییرات اندکی دارند، اختلاف آن‌ها معنادار نیست (جدول ۳).

معادله خطی در پیش‌بینی وارونگی

نتایج رگرسیون لجستیک نشان می‌دهد با اطمینان ۶۷ درصد با استفاده از متغیرهای مستقل می‌توان متغیر وابسته وارونگی دما را تبیین کرد (جدول ۴). همچنین نتایج آزمون اوم نیوس، ارزیابی کل مدل رگرسیونی لجستیک را نشان می‌دهد. این آزمون به بررسی این موضوع می‌پردازد که مدل تا چه اندازه قدرت تبیین و کارایی دارد. با توجه به سطح معناداری مدل، برازش مدل قابل قبول بوده و در سطح خطای کمتر از ۰/۰۵ معنادار است.

جدول (۴): میزان درصد اطمینان از مدل‌سازی رگرسیون لجستیک

Table (4): Confidence percentage of logistic regression model

مشاهده	پیش‌بینی		
	وارونگی	عدم وارونگی	
شرایط	۱۰۸	۰	عدم وارونگی
شرایط	۲۳۳	۰	وارونگی
درصد	-	-	-

ضرایب جدول (۵) تقریب‌های ضریب تعیین (R^2) در رگرسیون خطی هستند که در اینجا در رگرسیون لجستیک استفاده شد. ضرایب‌های تقریبی R^2 کاکس و اسنل، ناگلکرکز و مک‌فادنز برای مدل نهایی برازش‌یافته در جدول محاسبه شده‌اند. نتایج نشان داد که قدرت مدل در تبیین واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل متوسط است. مقادیر دو آماره R^2 کاکس-اسنل و ناگلکرکز-مک‌فادنز بدین معناست که متغیرهای مستقل توانسته‌اند بین ۱۳ تا ۱۸ درصد از تغییرات متغیر وابسته (وارونگی) را تبیین کنند.

جدول (۵): ضرایب R^2 و برازش مدل بهینه رگرسیون لجستیکTable (5): R^2 coefficients and the fit of the optimal logistic regression model

-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
۳۹۳	۰/۱۳۱	۰/۱۸۲

برای تبیین قدرت مدل در تفکیک وقوع وارونگی در طبقات متغیر وابسته، از نتایج جدول (۶) استفاده شد که از نتایج آن می‌توان به میزان صحت و درستی در طبقه‌بندی وارونگی‌ها پی برد. دقت کل طبقه‌بندی روزهای وارونگی ۶۷/۳ درصد بود. این دقت در روزهای وارونگی ۸۸/۹ درصد است که نشان می‌دهد ۲۰۸ روز از روزهای وارونگی درست و ۲۶ روز اشتباه تفکیک شده‌اند. همچنین دقت طبقه‌بندی در

روزهای عدم وارونگی ۲۳/۵ درصد است که در این طبقه، ۸۸ روز به درستی و ۲۷ روز نیز به اشتباه تفکیک شده‌اند. بنابراین این مدل رگرسیونی لجستیک در روزهای وارونگی قدرت تبیین بیشتری نسبت به روزهای عدم وارونگی دارد.

جدول (۶): قدرت تبیین مدل رگرسیونی لجستیک

Table (6): The explanatory power of the logistic regression model

مشاهده	پیش‌بینی		
	وارونگی	عدم وارونگی	
شرایط	۸۸	۲۷	عدم وارونگی
شرایط	۲۰۸	۲۶	وارونگی
درصد	-	-	-

جدول برآورد پارامترهای مدل (جدول ۷)، تأثیر هر متغیر مستقل در مدل را نشان می‌دهد. اگر سطح معناداری آماره والد کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد، پارامتر از صفر فاصله دارد. با توجه به ضرایب متغیرها، فشار سطح زمین، سرعت باد و جریان گرمای محسوس با توجه به معناداری ضریب آن‌ها، در مدل مانده و متغیرهای دیگر به دلیل معنادار نبودن آماره والد که بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است، از مدل حذف می‌شوند. بنابراین مدل نهایی با متغیرهای فشار سطح زمین، سرعت باد و جریان گرمای محسوس مطابق معادله (۳) ترسیم می‌شود.

جدول (۷): برآورد پارامترهای مدل رگرسیونی

Table (7): Estimation of regression model parameters

پارامتر	B	Wald	Sig.	EXP (B)
دما	۰/۰۳۷	۲/۲	۰/۱۳	۱/۰۳
رطوبت نسبی	۰/۰۰۱	۰/۳۴	۰/۵۵	۱
فشار	۰/۰۱۱	۱۰	۰/۰۰۱	۱
سمت باد	۰/۰۰۱	۰/۱۸	۰/۶۶	۱
سرعت باد	-۰/۰۶	۱۰/۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴
انتشار از ابرها	۰	۳	۰/۰۷	۱
ازن اتمسفری	۰	۱/۳	۰/۲۴	۱
پوشش گیاهی	۱۳/۶	۰/۴۷	۰/۴۸	۸
فرابنفش	۰	۰/۱۴	۰/۷	۱
گرمای محسوس	۰/۰۴۹	۹/۹	۰/۰۰۲	۱
Constant	-۴/۲	۲/۱۹	۰/۱۳۸	۰/۰۱۴

$$y = -4.285 + 0.011 x_1 - 0.600 x_2 + 0.049 x_3 \quad (3)$$

که x_1 فشار هوا، x_2 سرعت باد و x_3 شار گرمای محسوس است. با استفاده از معادله به دست آمده، می‌توان احتمال وقوع وارونگی دمایی را در منطقه تخمین زد.

شدت وارونگی دمایی

درصد فراوانی وقوع وارونگی‌های دما از لحاظ شدت وارونگی‌ها در جدول (۸) ارائه شده است. وارونگی‌های ضعیف بیشترین فراوانی را دارند. حدود ۵۱/۲ درصد وارونگی‌ها دارای شدت ضعیف، ۳۷/۹ درصد دارای شدت متوسط، حدود ۷/۷ درصد دارای شدت زیاد و فقط حدود ۳ درصد دارای شدت خیلی زیاد هستند. به لحاظ مقیاس ماهانه نیز بیشترین درصد فراوانی وارونگی‌های ضعیف در تیرماه (۷۳ درصد) و کمترین آن در اسفندماه (۳۰ درصد) بود؛ اما وارونگی‌های بسیار شدید در دی‌ماه بیشترین درصد فراوانی (۱۱ درصد) و در نیمه گرم سال بدون داشتن وارونگی‌های بسیار شدید است. متوسط سالانه شدت وارونگی در منطقه، متوسط (۰/۰۱۷) است، اما در نیمه گرم سال (بهار و تابستان) شدت وارونگی‌ها ضعیف و در نیمه سرد سال (پاییز و زمستان) متوسط است و میانگین شدیدترین وارونگی‌ها در اسفندماه اتفاق افتاده است. اگرچه بیشترین فراوانی وارونگی‌های بسیار شدید در دی‌ماه بیشتر از اسفندماه است، میانگین شدت آن در اسفندماه بیشتر از دی‌ماه است که دلیل آن بیشتر بودن وارونگی شدید در اسفندماه است. ولی در دی‌ماه وارونگی‌های ضعیف زیاد اتفاق افتاده است. بنابراین میانگین ماهانه آن‌ها نشان می‌دهد شدیدترین وارونگی‌ها در اسفندماه است.

معادله خطی شدت اینورژن

از آنجاکه ضریب همبستگی ۰/۳۸۸ و ضریب تعیین ۰/۱۵۱ و همچنین ضریب تعیین اصلاح شده ۰/۱۳۹ محاسبه شده، به نظر می‌رسد که مدل رگرسیونی مناسب است. مدل رگرسیونی توانسته درصد بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را تحت پوشش قرار دهد یا بیان کند. آماره واتسون مقدار ۱/۳۹۲ را نشان می‌دهد که اگر مقدار آن نزدیک به ۱/۵ تا ۲ باشد، نشان از مستقل بودن باقی مانده‌ها دارد. تحلیل مربوط به واریانس برای مدل رگرسیونی نشان می‌دهد که با توجه به بزرگ بودن F و معناداری آماره نتیجه می‌گیریم که مدل رگرسیونی مناسب است؛ زیرا تغییرات متغیر وابسته (شدت وارونگی) در مدل رگرسیونی دیده شده است؛ به این معنا که سهم مدل مرحله سوم در تغییرات کل که در سطر آخر ستون (Sum of Squares) دیده می‌شود (۰/۱۴۵)، به نسبت سهم خطا یا باقی مانده‌ها (۰/۱۲۳) بیشتر است.

جدول (۹): جدول تجزیه واریانس رگرسیون خطی چندمتغیره

Table (9): Multivariate linear regression variance analysis

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F
رگرسیون	۰/۰۲۲	۳	۰۰۷	۱۳/۵
باقی مانده‌ها	۰/۱۲۳	۲۲۹	۰/۰۰۱	-
مجموع	۰/۱۴۵	۲۳۲	-	-

جدول (۸): درصد فراوانی شدت وارونگی‌های منطقه

Table (8): The frequency percentage of the intensity of inversions in the region

ماه	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید	میزان شدت
فروردین	۳۳	۴۹	۱۳	۵	متوسط
اردیبهشت	۶۱	۳۶	۳	۰	متوسط
خرداد	۶۹	۲۸	۳	۰	ضعیف
تیر	۷۳	۲۷	۰	۰	ضعیف
مرداد	۶۸	۳۰	۲	۰	ضعیف
شهریور	۶۶	۲۹	۵	۰	متوسط
مهر	۶۴	۲۶	۸	۲	متوسط
آبان	۳۹	۵۱	۷	۳	متوسط
آذر	۳۵	۴۸	۱۱	۶	متوسط
دی	۳۹	۴۱	۹	۱۱	متوسط
بهمن	۳۸	۴۶	۱۴	۲	متوسط
اسفند	۳۰	۴۴	۱۸	۸	شدید
درصد فراوانی	۵۱/۲	۳۷/۹	۷/۷	۳	-

در جدول Coefficients، برآورد ضرایب و خصوصیات مربوط به آزمون آن‌ها دیده می‌شود. در جدول (۱۰) مقدار ثابت Constant در مدل با مقدار ۰/۰۲۸ ظاهر شده است. با توجه به کوچک‌تر بودن مقدار sig هر متغیر از مقدار ۰/۰۵ فرض صفر بودنشان رد می‌شود. این دلیلی بر مناسب بودن مدل رگرسیونی است. متغیر دمای پایه وارونگی با بتای ۰/۴۲۶-، بهترین متغیر برای پیشگویی متغیر وابسته (شدت وارونگی) است. در ادامه، متغیر ارتفاع پایه وارونگی با بتای ۰/۳۲۴- و در نهایت متغیر دمای سطح زمین با بتای ۰/۳۱۷- متغیرهای بعدی برای پیش‌بینی شدت وارونگی هستند.

جدول (۱۲): توزیع باقی مانده‌های مدل رگرسیونی شدت وارونگی

Table (12): Distribution of the residuals of the inversion intensity regression model

انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
۰/۰۰۹	۰/۰۱۶	۰/۰۴	-۰/۰۱	ارزش پیش‌بینی شده
۱	۰	۲/۳۹	-۲/۷۷	انحراف معیار پیش‌بینی شده
۰/۰۲	۰	۰/۲	-۰/۰۲	باقی مانده‌ها
۰/۹۹	۰	۸/۹۸	-۰/۹۱	انحراف معیار باقی مانده‌ها

غلظت آلاینده‌های هوا

اختلاف غلظت استاندارد شده آلاینده‌های SO_2 , O_3 , CO , PM_{10} و NO_2 تحت شرایط پایدار (وارونگی) و ناپایدار (عدم وارونگی) اتمسفری بررسی شد و نتایج آزمون تی-استیودنت نشان داد اختلاف متوسط غلظت PM_{10} , CO , O_3 در شرایط وارونگی و عدم وارونگی در سطح ۰/۰۱ معنادار بود؛ اما اختلافی در غلظت SO_2 و NO_2 مشاهده نشد. غلظت همه آلاینده‌ها نیز در زمان وارونگی بیشتر از شرایط عدم وارونگی بود. بنابراین وارونگی نقش مهمی در تغلیظ آلاینده‌های اتمسفری در منطقه دارد. وارونگی باعث افزایش ۵۶ میکروگرم بر مترمکعب غلظت PM_{10} نسبت به شرایط عدم وارونگی شد. غلظت CO نیز تحت تأثیر وارونگی ۰/۴۶ پی‌پی‌ام افزایش یافت. وارونگی و پایداری هوا بیشترین اثر را بر ازن (O_3) دارد که حدود ۶۱/۵ پی‌پی‌بی افزایش یافت. همچنین دی‌اکسید گوگرد حدود ۰/۱۱ پی‌پی‌بی و دی‌اکسید نیتروژن نیز ۲/۶ پی‌پی‌بی در روزهای وارونگی نسبت به روزهای عدم وارونگی افزایش یافت (جدول ۱۳).

جدول (۱۳): مقایسه میانگین آلاینده‌های هوا

Table (13): Comparison of average air pollutants

p-value	میانگین	شرایط	پارامتر
۰/۰۰۰ **	۱۵۵/۲	اینورژن	ذرات معلق
	۹۹/۲	عدم اینورژن	
۰/۰۰۱ **	۲/۴۵	اینورژن	مونوکسید کربن
	۱/۹۹	عدم اینورژن	
۰/۰۰۰ **	۱۰۷/۵	اینورژن	ازن
	۴۶	عدم اینورژن	
۰/۱۵۳	۲/۹۶	اینورژن	دی‌اکسید گوگرد
	۲/۸۵	عدم اینورژن	
۰/۲۲۰	۲۹/۶	اینورژن	دی‌اکسید نیتروژن
	۲۷	عدم اینورژن	

جدول (۱۰): سطح معناداری و ضرایب متغیرهای پیشگو در مدل

رگرسیونی شدت وارونگی

Table (10): Significance level and coefficients of predictor variables in regression model of inversion intensity

sig	T	ضریب غیر استاندارد		مدل
		Beta	Std.Error	
۰/۰۰۰	۳/۸۸	-	۰/۰۰۷	Constant
۰/۰۰۰	-۴/۸	-۰/۳۱	۰	ارتفاع پایه
۰/۰۰۵	-۲/۸	-۰/۴۲	۰/۰۰۱	دمای پایه
۰/۰۳۵	۲/۱۲	۰/۳۲	۰/۰۰۱	دما

با توجه به این ضرایب، مدل رگرسیونی به صورت معادله (۴) ارائه شده است که براساس آن می‌توان شدت وارونگی در منطقه را با توجه به متغیرهای دما و ارتفاع پایه لایه وارونگی و همچنین دما برآورد کرد.

$$y = 0.028 - 0.317 x_1 - 0.426 x_2 + 0.324 x_3 \quad (4)$$

که x_1 ارتفاع پایه لایه وارونگی، x_2 دمای پایه لایه وارونگی و x_3 دمای سطح زمین است. بنابراین با ورود ۱۴ متغیر اقلیمی و ویژگی‌های وارونگی، سه متغیر در مدل رگرسیونی باقی ماندند و ۱۱ متغیر از مدل حذف شدند و برآورد شدت وارونگی با سه متغیر انجام شد.

در جدول بررسی هم‌خطی (۱۱)، سهم هر یک از متغیرها در هر بُعد برای بیان پراکندگی متغیر پاسخ مشخص شده است. با توجه به این موضوع، متغیر دما اولین متغیری است که بیشترین سهم را در بیان تغییرات متغیر وابسته (شدت وارونگی) دارد که سهم آن ۹۸ درصد است. سپس متغیر دمای پایه وارونگی با سهم ۹۱ درصد و در نهایت متغیر ارتفاع پایه وارونگی با سهم ۸۹ درصد است که روی شدت وارونگی تأثیرگذار است. در نهایت به منظور بررسی توزیع باقی مانده‌ها از جدول (۱۲) استفاده شد. با توجه به شرایط رگرسیونی OLS، باید باقی مانده‌ها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک باشند که در جدول زیر وجود چنین شرطی مشاهده می‌شود.

جدول (۱۱): بررسی هم‌خطی بودن معادله خطی شدت وارونگی

Table (11): Investigating the collinearity of the linear equation of inversion intensity

تقسیمات	Constant	ارتفاع پایه	دمای پایه	دما
۱	۰	۰/۰۳	۰	۰
۲	۰/۰۱	۰/۸۹	۰	۰
۳	۰/۸۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۲
۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۹۱	۰/۹۸

ضریب همبستگی ویژگی‌های لایه وارونگی با گاز ازن مثبت بوده و به این معناست که هر قدر دمای پایه و رأس لایه وارونگی کمتر باشد، غلظت گاز ازن نیز کاهش می‌یابد و برعکس. همبستگی بین ضخامت ارتفاعی لایه وارونگی با غلظت گاز ازن ۰/۲۵۶ است که نشان می‌دهد هر چه قدر ضخامت ارتفاعی لایه وارونگی بیشتر باشد، غلظت گاز ازن نیز افزایش می‌یابد.

در بین پارامترهای جوی، فقط ضخامت دمایی لایه وارونگی همبستگی معناداری را با گاز دی‌اکسید نیتروژن ندارد، اما دیگر پارامترهای همبستگی معناداری ایجاد کرده‌اند. ضریب همبستگی ویژگی‌های لایه وارونگی به همراه دما و فشار هوا با گاز دی‌اکسید نیتروژن در اکثر مواقع منفی است. با کاهش دما و فشار در سطح زمین، غلظت این گاز افزایش می‌یابد. هر چه قدر لایه وارونگی به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، غلظت گاز دی‌اکسید نیتروژن افزایش می‌یابد. ضخامت کمتر لایه وارونگی نیز منجر به افزایش غلظت این آلاینده در اتمسفر می‌شود.

جدول (۱۴): همبستگی آلاینده‌های هوا با پارامترهای لایه وارونگی

دمایی

Table (14): Correlation of air pollutants with temperature inversion layer parameters

متغیرها	PM ₁₀	CO	O ₃	NO ₂
ارتفاع پایه	-۰/۲۶۲**	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	-۰/۳۳۰**
ارتفاع رأس	-۰/۲۵۹**	۰/۰۰۱۹۷	۰/۰۰۱۹۷	-۰/۳۸۳**
ضخامت ارتفاعی	-۰/۱۱۸	۰/۲۵۶**	۰/۲۵۶**	-۰/۲۵۲**
دمای پایه	-۰/۰۸۱	۰/۲۰۴*	۰/۲۰۴*	-۰/۵۴۰**
دمای رأس	۰/۰۶۴	۰/۱۹۸*	۰/۱۹۸*	-۰/۵۳۶**
ضخامت دمایی	۰/۴۰۲**	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶
فشار پایه	۰/۲۳۵**	-۰/۱۳۰	-۰/۱۳۰	۰/۳۹۳**
فشار رأس	۰/۲۴۱**	-۰/۲۲۷**	-۰/۲۲۷**	۰/۴۲۵**
ضخامت فشار	-۰/۱۱۰	۰/۲۵۰**	۰/۲۵۰**	-۰/۲۲۸**
رطوبت نسبی	-۰/۲۴۹**	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۲۷۳**
فشار	۰/۱۲۹	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	-۰/۲۲۴**
سمت باد	۰/۴۴۱**	-۰/۰۳۹	-۰/۰۳۹	۰/۱۷۸*
سرعت باد	-۰/۳۲۲*	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۱۶۷*
دما	-۰/۰۳۰	۰/۱۸۶*	۰/۱۸۶*	-۰/۵۲۱**
شدت وارونگی	۰/۴۱۳**	۰/۲۹۸*	۰/۲۹۸*	۰/۱۲۳*

به منظور بررسی ارتباط بین غلظت آلاینده‌های CO، PM₁₀، O₃ و NO₂ با ویژگی‌های لایه وارونگی هوا از قبیل ارتفاع پایه، رأس و ضخامت ارتفاعی لایه وارونگی، دمای پایه، رأس و ضخامت دمایی لایه وارونگی، فشار پایه، رأس و ضخامت فشاری لایه وارونگی به همراه پارامترهای سمت و سرعت باد، دما و رطوبت نسبی در ساعت ۳:۳۰ دقیقه صبح (۰۰ گرینویچ) در روزهایی که وارونگی اتفاق افتاده بود، به تحلیل نتایج همبستگی پیرسون پرداخته شد (جدول ۱۴).

در بین پارامترهای اقلیمی، ارتفاع پایه لایه وارونگی، ارتفاع رأس لایه، ضخامت دمایی، فشار پایه و رأس لایه، رطوبت نسبی، سمت و سرعت باد بیشترین همبستگی را با ذرات معلق PM₁₀ دارند. ضریب همبستگی سرعت باد با ذرات معلق به میزان ۰/۳۲۲- به این معناست که هر قدر سرعت باد بیشتر باشد، غلظت ذرات معلق (کوچک‌تر از ۱۰ میکرون) تا حد زیادی کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی ارتفاع پایه وارونگی با ذرات معلق به میزان ۰/۲۶۲- به این معناست که هر قدر ارتفاع پایه لایه وارونگی کمتر باشد و به سطح زمین نزدیک باشد، غلظت ذرات معلق (کوچک‌تر از ۱۰ میکرون) افزایش می‌یابد. در بین ویژگی‌های لایه وارونگی، ذرات معلق با ضخامت دمای لایه، فشار پایه و رأس لایه همبستگی مثبت و معناداری داشت و بیانگر این است که با افزایش این ویژگی‌ها، غلظت ذرات معلق نیز افزایش می‌یابد.

آلاینده مونوکسیدکربن با پارامترهای ارتفاع پایه وارونگی، دمای پایه، فشار پایه و دمای هوا ارتباط معناداری دارد. همبستگی این آلاینده با فشار پایه لایه منفی است که نشان می‌دهد با کاهش فشار در سطح زمین، میزان غلظت این آلاینده افزایش می‌یابد؛ اما ارتباط آن با ارتفاع پایه وارونگی مثبت است که نشان می‌دهد هر چه لایه وارونگی به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، غلظت گاز مونوکسیدکربن نیز افزایش می‌یابد.

ضریب همبستگی دما با گاز ازن به میزان ۰/۱۸۶- به این معناست که هر قدر دما افزایش یابد، غلظت گاز ازن نیز افزایش می‌یابد. شروع فصل گرما و افزایش انرژی خورشیدی، طولانی شدن طول روز به همراه انتشار اکسیدهای نیتروژن از کارخانه‌ها در منطقه صنعتی، باعث افزایش غلظت گاز ازن سطحی می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی وضعیت باد در منطقه صنعتی غرب بندرعباس بیانگر این است که باد غالب جنوبی و جنوب شرقی است و پس از آن جهات جنوب-جنوب غربی بادهای درجه اول هستند. سرعت بیشتر از ۱۲ متر در ثانیه فقط در جهت جنوب و با فراوانی ناچیز وجود دارد. در بیشتر جهات سرعت باد کمتر از ۶ متر در ثانیه است که با نتایج کمیجانی و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت داشت؛ به طوری که آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فراوانی باد با سرعت بالا از غرب به سمت شرق خلیج فارس کاهش می‌یابد و در بندرعباس و شرق خلیج فارس، فراوانی و قدرت بادهای جنوبی نسبت به غرب سواحل خلیج فارس افزایش می‌یابد که دلیل عمده آن تشکیل کم‌فشار در فصل تابستان در دریای عمان است که این کم‌فشار بیشتر در سواحل شرقی خلیج فارس جابه‌جا می‌شود که سبب افزایش فراوانی باد جنوبی به خصوص در سواحل بندرعباس و قشم می‌شود.

نتایج این پژوهش بیانگر این بود که دو هسته بیشینه وقوع وارونگی در بندرعباس وجود دارد که یکی در بهار و دیگری در زمستان است و با نتایج عظیمی (۲۰۰۸) در اهواز متفاوت بود؛ زیرا نشان داد در استان خوزستان و شهر اهواز بیشترین وارونگی‌ها در نیمه گرم سال و به‌ویژه فصل تابستان اتفاق می‌افتد که دلیل اصلی آن را استقرار سیستم پرفشار جنب‌حاره‌ای در تراز بالاتر اتمسفر می‌داند، چون ریزش دینامیکی توده هوا از لایه تروپوپاز به سطح زمین مانع صعود هوای گرم سطوح زیرین اتمسفر شده و منجر به تشکیل هوای پایدار در سطح شهر اهواز می‌شود. همچنین کاهش سرعت باد در فصل تابستان همراه با پایداری هوا باعث تشکیل وارونگی در نیمه گرم سال می‌شود؛ اما نتایج جهانبخش اصل و روشنی (۲۰۱۲) با نتایج عظیمی (۲۰۰۸) متفاوت بود و نشان دادند در شهر تبریز به دلیل تابش زمین تاب در شب‌های سرد زمستانی و هدررفت انرژی نور خورشید با انعکاس از سطح برف با آلبدوی بالا، منجر به سرد شدن هوای سطح زمین شده و باعث وقوع وارونگی تابشی در سطح زمین می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد فعالیت سیستم کم‌فشار حرارتی در دریای عمان و تنگه هرمز

طی فصل تابستان باعث تشدید فراوانی و سرعت باد جنوبی در بندرعباس می‌شود و با انتقال رطوبت سطحی دریا به سمت سواحل بندرعباس باعث ناپایداری سطوح زیرین اتمسفر خلیج فارس می‌شود که با ورود به خشکی جنوب ایران، به صورت طوفان‌های رعدوبرقی و بارش‌های موسمی، انرژی خود را تخلیه می‌کند؛ بنابراین افزایش سرعت باد ناشی از کم‌فشار حرارتی خلیج فارس در فصل تابستان باعث کاهش پایداری هوا و تشکیل پدیده وارونگی در بندرعباس شده است.

در زمستان بادهای غربی نظام‌مند که جهت آن‌ها در تبعیت از خط ساحلی و کوه‌های همسو با آن تبدیل به بادهای جنوب غربی شده و به واسطه اثر کوه‌ها تضعیف می‌شوند. همچنین سیستم کم‌فشار حرارتی از شرق خطوط ساحلی خلیج فارس دور می‌شود. این شرایط به همراه سردی هوا ناشی از ریزش هوای سرد و خشک از پرفشار سبیری به سمت جنوب ایران و سواحل دریا موجب پایداری هوا شده و همراه با رطوبت دریای خلیج فارس باعث تشکیل وارونگی با مه صبحگاهی می‌شود که انتشار آلاینده‌های جوی ناشی از صنایع در منطقه و تردد وسایل نقلیه، باعث تشکیل مه‌دود شیمیایی در اتمسفر سطح زمین می‌شود. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد در زمستان ارتفاع وارونگی در سطح زمین و ارتفاع ۱۰ متری قرار دارد که هوای سرد و پایدار در سطح زمین و کاهش سرعت باد به دلیل وجود کوه‌ها در نوار ساحلی خلیج فارس و شهر بندرعباس و همچنین خروج سیستم کم‌فشار حرارتی از سواحل شرقی خلیج فارس، باعث وقوع وارونگی در سطح زمین می‌شود. تابش زمین تاب از غروب آفتاب تا اوایل صبح باعث سردی هوا در اوایل صبح می‌شود؛ از طرف دیگر انرژی خورشید طی فصل زمستان توسط آب دریا دریافت شده و به دلیل بالا بودن ظرفیت ویژه آب، هوای سرد و جو پایداری در بندرعباس تشکیل می‌شود که منجر به وقوع وارونگی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین می‌شود؛ اما در تابستان سیستم کم‌فشار حرارتی خلیج فارس و همچنین سردی دریا نسبت به خشکی و وزش نسیم دریا به خشکی، باعث ناپایداری سطوح زیرین اتمسفر و افزایش سرعت باد در فصل تابستان می‌شود که این

وارونگی دارند؛ به طوری که افزایش سرعت باد منجر به تلاطم و انتقال انرژی شده و لایه‌های دمایی را از بین برده و شرایط اتمسفر را از حالت سکون خارج می‌کند. بنابراین هرچه سرعت باد کمتر باشد، شدت وارونگی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش سرعت باد در سطح زمین شدت وارونگی کاهش یافته و حتی لایه وارونگی از بین می‌رود (نجف‌پور و همکاران، ۲۰۱۵). در زمستان به دلیل کاهش سرعت باد، عمق لایه و شدت وارونگی افزایش یافت و برعکس در تابستان با افزایش سرعت باد، شدت وارونگی کاهش یافت. در شهرهای شمالی ایران از جمله تهران، مشهد و تبریز، وارونگی بیشتر در زمستان و از نوع تابشی بوده که تشعشع انرژی خورشید طی غروب آفتاب تا اوایل صبح، دلیل اصلی پایداری هوا و تشکیل وارونگی است؛ اما در مطالعات مربوط به تهران، مشهد و تبریز (شمسی‌پور و همکاران، ۲۰۱۳؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۴؛ یآوری و سلیقه، ۲۰۱۱) به نقش سرعت باد و رطوبت نسبی اشاره چندانی نشده است؛ اما نتایج پژوهش حاضر بیانگر این است که سرعت باد و رطوبت نسبی در سطح زمین همبستگی معناداری را با شدت وارونگی دارند.

از جمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، می‌توان به پدیده وارونگی دما به عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در محیط‌زیست نام برد. به دلیل اهمیت این موضوع و استقرار منطقه ویژه اقتصادی معدنی و فلزی خلیج فارس در بندرعباس که کارخانه‌های تولید فولاد، آهن، روی، آلومینیوم در آن باعث انتشار گازهای آلاینده و مواد معلق می‌شوند، وارونگی‌های دمای این شهر از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ در مقیاس ماهانه و فصلی مورد مطالعه قرار گرفت. وضعیت باد در ناحیه صنعتی به گونه‌ای است که باد غالب جنوبی و جنوب شرقی است و پس از آن جهات جنوبی-جنوب غربی، دارای بیشترین فراوانی باد هستند. سرعت بیشتر از ۱۲ متر در ثانیه فقط در جهت جنوب و با فراوانی ناچیز وجود دارد. در بیشتر جهات سرعت باد کمتر از ۶ متر در ثانیه است. سرعت باد در فصل تابستان بیشتر از زمستان است که دلیل عمده آن تشکیل کم‌فشار در فصل تابستان در شرق خلیج فارس است که این کم‌فشار بیشتر در سواحل شرقی خلیج فارس جابه‌جا می‌شود که سبب افزایش فراوانی و شدت

شرایط باعث از بین رفتن شرایط پایدار در اوایل صبح می‌شود و وارونگی تابشی در سطح زمین از بین می‌رود؛ اما در فصل تابستان، وارونگی‌ها از نوع فرونشینی است که ریزش دینامیکی هوا از لایه تروپوپاز به وسیله سیستم پرفشار جنب حاره باعث پایداری هوا در ارتفاعات بیشتر از ۱۰۰ متر از سطح زمین می‌شود. به همین دلیل وارونگی‌ها در فصل تابستان از نوع فرونشینی است که با نتایج عظیمی (۲۰۰۸) همسو بود. در وارونگی‌های تابشی به نقش دریا در آسکا اشاره کرده و نشان داده شد که دریافت انرژی خورشید به وسیله آب دریا و اقیانوس باعث سرمایش اتمسفر مناطق ساحلی می‌شود که در نهایت منجر به پایداری هوا و تشکیل وارونگی تابشی در سطح زمین می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نیز بیانگر همین موضوع است که دریای خلیج فارس نقش مهمی در تشکیل وارونگی سطحی در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس دارد (جانانان^۱، ۱۹۸۹). فورتلی^۲ و همکاران (۲۰۱۶) نیز به نقش ریزش دینامیکی هوای گرم ناشی از پرفشارهای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در وارونگی‌های فرونشینی طی فصل تابستان اشاره کردند که با نتایج پژوهش حاضر همسو بود؛ که به نقش پرفشار جنب حاره در وارونگی‌های فرونشینی اشاره می‌کند.

در این پژوهش، شدت وارونگی با پارامترهای اقلیمی بررسی شده و براساس همبستگی بین آن‌ها و با استفاده از رگرسیون خطی، شدت آن مدل‌سازی شد که در بین پارامترهای اقلیمی، سرعت باد و رطوبت نسبی بیشترین همبستگی را با شدت وارونگی داشتند. سرعت باد یکی از پارامترهای مهم در وقوع وارونگی و افزایش غلظت آلاینده‌های جوی است. غلظت آلاینده‌های این پژوهش با سرعت باد رابطه معکوس داشتند؛ به گونه‌ای که افزایش سرعت باد باعث کاهش غلظت آلاینده‌ها شد و با نتایج دیگر محققان همسو بود (جهانبخش اصل و روشنی، ۲۰۱۲؛ کریستین^۳ و همکاران، ۲۰۰۸)؛ اما اگر سرعت باد افزایش یابد، گاز و ذرات معلق آلاینده توسط باد به مکان‌های دیگر انتقال می‌یابد که در نتیجه باعث کاهش غلظت آلاینده‌های جوی می‌شود. همچنین سرعت باد نقش مهمی در

1. Jonathan
2. Fortelli
3. Christian

وقوع وارونگی در ارتفاع ۱۰ متری و حداکثر تا ۵۰ متری سطح زمین شود؛ اما در تابستان ریزش دینامیکی هوای گرم از لایه تروپوپاز به واسطه سیستم پرفشار جنب حاره باعث تشکیل وارونگی فرونشینی می‌شود. افزایش سرعت باد و ناپایداری حرارتی سطح زمین طی فصل تابستان، باعث برهم زدن پایداری هوا و وارونگی در اتمسفر نزدیک به سطح زمین می‌شود و به همین دلیل وارونگی تابشی در تابستان از بین می‌رود. این شرایط جوی باعث شده تا ارتفاع پایه لایه وارونگی در فصل گرما به بیش از ۱۰۰ متر برسد. همچنین ضخامت اینورژن در زمستان کمتر از تابستان است، چون ضخامت وارونگی تابشی کمتر از فرونشینی است. حدود ۵۱/۲ درصد وارونگی‌ها دارای شدت ضعیف، ۳۷/۹ درصد دارای شدت متوسط، حدود ۷/۷ درصد دارای شدت زیاد و فقط حدود ۳ درصد دارای شدت خیلی زیاد هستند. به لحاظ مقیاس ماهانه نیز بیشترین درصد فراوانی وارونگی‌های ضعیف در تیرماه (۷۳ درصد) و کمترین آن در اسفندماه (۳۰ درصد) بود. اما وارونگی‌های بسیار شدید در دی‌ماه بیشترین درصد فراوانی (۱۱ درصد) و در نیمه گرم سال بدون داشتن وارونگی‌های بسیار شدید است. پدیده وارونگی بیشترین تأثیر را بر ذرات معلق PM_{10} و گاز ازن (O_3) داشته است؛ به طوری که وارونگی باعث شده که غلظت ذرات معلق به طور سالانه حدود ۵۲ پی‌پی‌ام نسبت به شرایط عدم وارونگی افزایش یابد. البته اثرات آن بر NO_2 و SO_2 نیز قابل ملاحظه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با شناسایی روزهای وارونگی دما و ارتباط آن با غلظت آلاینده‌های جوی، می‌توان برنامه‌ای برای مدیریت آلودگی هوا و کاهش خطرات اکوسیستمی آن تدوین نمود.

باد جنوبی به خصوص در سواحل بندرعباس می‌شود؛ اما در زمستان بادهای غربی نظام‌مند که جهت آن‌ها در تبعیت از خط ساحلی و کوه‌های همسو با آن در سواحل خلیج فارس تبدیل به بادهای جنوب غربی شده و به واسطه اثر کوه‌ها تضعیف می‌شوند. همچنین سیستم کم‌فشار حرارتی از شرق خطوط ساحلی خلیج فارس دور می‌شود. در زمستان ریزش هوای سرد سیبری باعث فراوانی بادهای شمال شرقی در بندرعباس می‌شود که در برخورد با کوه‌های شمالی بندرعباس و حاجی‌آباد تضعیف می‌شود. بنابراین کوه‌های شمال بندرعباس در زمستان به دو صورت از سرعت بادهای می‌کاهد؛ اما این کوه‌ها در تابستان نقشی در تضعیف سرعت بادهای در بندرعباس ندارد، چون در تابستان به دلیل فعالیت کم‌فشار حرارتی در شرق خلیج فارس، بادهای مرطوب از سمت جنوب و جنوب شرقی از روی دریای به سمت منطقه حرکت می‌کند و مانعی بر سر راه این بادهای وجود ندارد و پس از عبور از ساحل به کوه‌های شمالی برخورد کرده و از سرعت آن کاسته می‌شود. همچنین در تابستان به دلیل ظرفیت بالای آب دریا و جذب انرژی خورشید، نسیم دریا به خشکی می‌وزد و بادهای ناشی از کم‌فشار حرارتی خلیج فارس با نسیم دریا همسو شده و باعث افزایش سرعت باد در فصل تابستان می‌شود.

در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس حدود ۲۲۳ روز از سال، وارونگی دما اتفاق می‌افتد که ۱۵۷ مورد از آن تابشی و ۶۶ مورد آن فرونشینی است. تعداد وقوع وارونگی‌ها در فصل زمستان و بهار بیشتر از تابستان و پاییز، و اوج آن در زمستان است. سردی هوا به دلیل افزایش تابش زمین‌تاب و جذب انرژی خورشید به وسیله دریای خلیج فارس، به همراه کاهش سرعت باد باعث وقوع وارونگی تابشی در زمستان می‌شود که در نهایت منجر به

منابع

1. Al-Hemoud, A., Al-Sudairawi, M., Al-Rashidi, M., Behbehani, W., & Al-Khayat, A. (2019). Temperature inversion and mixing height: Critical indicators for air pollution in hot arid climate. *Natural Hazards*, 97, 139-155.
2. Azimi, F. (2008). Evaluation temperature inversion on the Ahvaz air pollution process. *Territory*, 5(19), 105-112.
3. Christian, R. A., Lad, R. K., Deshpande, A. W., & Desai, N. G. (2008). Fuzzy MCDM approach for addressing composite index of water and air pollution potential of industries. *International Journal of Digital Content Technology and its Application*, 2(2).
4. Di Bernardino, A., Iannarelli, A. M., Casadio, S., Perrino, C., Barnaba, F., Tofful, L., ... & Cacciani, M. (2021). Impact of synoptic meteorological conditions on air quality in three different case studies in Rome, Italy. *Atmospheric Pollution Research*, 12(4), 76-88.

5. Farah, M. J., Tanaka, J. W., & Drain, H. M. (1995). What causes the face inversion effect? *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 21(3), 628.
6. Fortelli, A., Scafetta, N., & Mazzarella, A., (2016), Influence of synoptic and local atmospheric patterns on PM10 air pollution levels: A model application to Naples (Italy), *Atmospheric Environment*, S1352-2310(16)30643-4.
7. Greenwell, L. L., Moreno, T., Jones, T. P., & Richards, R. J. (2002). Particle-induced oxidative damage is ameliorated by pulmonary antioxidants. *Free Radical Biology and Medicine*, 32(9), 898-905.
8. Jahanbakhsh Asal, S., & Roshni, R. (2012). Investigating the status and severity of low-level inversions in Tabriz city during the period from 2004 to 2008. *Geographical Research*, 28(4 (111)), 45-54.
9. Jonathan D. Kahl, (1989), "Characteristics of the Low-level Temperature Inversion along the Alaskan Arctic Coast", Digital Object Identifier.
10. Kachar, H., Mubasheri, M.R., Abkar, A.A., & Rahimzadegan, M. (2011). Extracting temperature inversion parameters from MODIS images in cloudless sky using genetic algorithm. *Climatology Research*, 1391 (11), 113-123.
11. Kamani, H., Ashrafi, S. D., Isazadeh, S., Jaafari, J., Hoseini, M., Mostafapour, F. K., ... & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 94, 382-386.
12. Khurshidoost, A.M., Naghizadeh, H., Saeedabadi, R., & Najafi, M.S. (2019). Investigating synoptic patterns of temperature inversion in Tabriz using principal component analysis. *Geography and Planning*, 24(72), 205-224.
13. komijane, F., nasallahe, A., nazari, N., & naheid, S. (2014). The Persian Gulf wind analysis using meteorological synoptic stations data. *Nivar*, 38(85-84), 27-44.
14. Kotikot, S. M., Flores, A., Griffin, R. E., Nyaga, J., Case, J. L., Mugo, R., ... & Irwin, D. E. (2020). Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101971.
15. LARGERON, Y., & STAQUET, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 135, 92-108.
16. Lu, R., & Turco, R. P. (1994). Air pollutant transport in a coastal environment. Part I: Two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(15), 2285-2308.
17. Miao, Y., Hu, X. M., Liu, S., Qian, T., Xue, M., Zheng, Y., & Wang, S. (2015). Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(4), 1602-1626.
18. Najafpour A. A., Junidi Jafari A., & Dosti S. (2016). Analysis of changes in the concentration of five air quality index pollutants. *Health Quarterly in the Arena*, 3 (2), 17-26.
19. Oh, I., Lee, J., Ahn, K., Kim, J., Kim, Y. M., Sim, C. S., & Kim, Y. (2018). Association between particulate matter concentration and symptoms of atopic dermatitis in children living in an industrial urban area of South Korea. *Environmental Research*, 160, 462-468.
20. Sadeghi, S., Mofidi, A., Jahanshiri, M., & Dostan, R. (2014). The role of regional scale atmospheric circulation patterns on the occurrence of highly polluted days in Mashhad. *Geography and Environmental Hazards*, 3(2), 1-36.
21. Shamsipour, A.A., Najibzadeh, F., & Hosseinpour, Z. (2011). Simulation of air pollution distribution pattern of Tehran metropolis under wind conditions. *Geography and Environmental Hazards*, 1(4), 19-36.
22. Tavousi, T., & Hossein Abadi, N. (2017). Evaluation of Temperature Inversion Indicators in Boundary Layer (Case Study: Tehran, Iran). *GeoRes* 2017; 32(2):120-132.
23. Trinh, T. T., Trinh, T. T., Le, T. T., Nguyen, T. D. H., & Tu, B. M. (2019). Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam. *Environmental geochemistry and health*, 41, 929-937.
24. World Health Organization. (2006). Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. World Health Organization.
25. Wu, W., Zha, Y., Zhang, J., Gao, J., & He, J. (2014). A temperature inversion-induced air pollution process as analyzed from Mie LiDAR data. *Science of the Total Environment*, 479, 102-108.
26. Yaori, H., & Saze, M, (2011). Levels of inversion in the pollution of Tehran city. The title of the publication. 1390; 11(20): 89-105.
27. <http://ec.europa.eu/environment/air/ambient.htm>

Investigating the Effect of Inversions on the Air Pollution of Desert Ecosystems in the Special Economic Zone of the Persian Gulf

Seyed Amir Amirizad,¹ Ahmad Nohegar^{2*}

Received: 14/10/2023

Accepted: 20/04/2024

Extend Abstract

Introduction: This study tries to investigate the temperature inversion and its role in the concentration of air pollution in the region by using the data observed by Bandar Abbas Radio Sound and the recorded data of meteorological parameters and air pollution in the site of the Persian Gulf Special Economic Zone and to know the characteristics of temperature inversion and its effect on the distribution of industrial pollutants.

Materials and methods: The Special Economic Zone of the Persian Gulf Industries is located in the 13 km of Shahid Rajaei Highway, west of Bandar Abbas in Hormozgan Province - the northern shores of the Persian Gulf. In order to analyze anemometer data and state of the direction and speed of winds in the region, Wind rose Plot software was used. In order to investigate the characteristics of temperature inversion in the region and its relationship with the concentration of air pollutants, radiosonde data and the Bandar Abbas Skew-T diagram were used. After downloading the data, using the RAOB software, Skew-T diagram was drawn for Bandar Abbas and the temperature inversion characteristics were obtained from it. In order to model and predict the possibility of temperature inversion, logistic regression model fitting was used. Temperature inversions according to intensity in four separate groups including: weak (0.000-0.010), medium (0.011-0.20), severe (0.021-0.030) and very severe (high 0.031) was divided. In order to equate the intensity of inversion and the effect of climatic variables and characteristics of the temperature, altitude and pressure layer on its intensity, multiple linear regression was used in a step-by-step method. The concentration of standard air pollutants, including PM₁₀, CO, O₃, NO₂ and SO₂ were obtained from the pollution control center at the site of the Persian Gulf Special Economic Zone on a daily basis. After examining the pollutants, their concentration was compared on days of inversion and non-inversion, and their relationship with atmospheric characteristics and characteristics of inversions was investigated.

Result: The winds speed classes of the region were prepared on a seasonal scale. The results show that the south and southeast winds are the dominant winds in the region, which is known as the sea breeze. The results of extracting days with temperature inversion in the industrial area showed that the most inversions are in June and May; Also, Feb and Apr are on the same floor in the third row. In July, August and September, the number of inversions decreases and peaks again in autumn. The results of comparing the mean of Student's t-test showed that among meteorological parameters, temperature and wind speed in inversion days and unstable days (no inversion) have significant differences, but relative humidity, air pressure and wind direction, although in two types There are few changes in the inversion conditions, but their differences are not significant. The logistic regression results show that the dependent variable of temperature inversion can be explained with 67% confidence using independent variables. Therefore, the final model is drawn with the variables of ground pressure, wind speed and sensible heat flow according to the equation. Weak inversions are the most frequent. About 51.2% of inversions have weak intensity, 37.9% have medium intensity, about 7.7% have high intensity and only about 3% have very high intensity. According to the monthly scale, the highest percentage of the frequency of weak weather was in July (73%) and the lowest in March (30%). But extreme inversions are the

1. PhD student in environmental planning, Department of Planning, Kish International Campus, University of Tehran, Kish. Iran

2. Professor of the Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran. Tehran Iran. Corresponding author; nohegar@ut.ac.ir

most frequent in January (11%) and in the warm half of the year there are no extreme inversions. The annual average intensity of inversion in the region is average (0.017), but in the hot half of the year (spring and summer), the intensity of inversions is weak and in the cold half of the year (autumn and winter), and the average of the strongest inversions is in March. It happened. The standardized concentration difference of PM₁₀, CO, O₃, SO₂ and NO₂ pollutants was investigated under stable (inversion) and unstable (non-inversion) atmospheric conditions, and the results of the Student's t-test showed that the average concentration difference of PM₁₀, CO, O₃ in inversion conditions and The lack of inversion was significant at the 0.01 level; However, no difference was observed in the concentration of SO₂ and NO₂. The concentration of all pollutants was also higher during inversion than in non-inversion conditions. Therefore, inversion plays an important role in the concentration of atmospheric pollutants in the region. Inversion increased the concentration of PM₁₀ by 56 µg/m³ compared to non-inversion conditions. CO concentration also increased by 0.46 ppm under the influence of inversion. Air inversion and stability have the greatest effect on ozone (O₃), which increased by 61.5 ppb. Also, sulfur dioxide increased by 0.11 ppb and nitrogen dioxide by 2.6 ppb on inversion days compared to non-inversion days.

Discussion and Conclusion: The results of the investigation of the wind situation in the industrial area west of Bandar Abbas show that the dominant wind is south and south-east, and then the south-southwest directions are the first-order winds. Velocity greater than 12 meters per second exists only in the south direction and with negligible frequency. In most directions, the wind speed is less than 6 meters per second, which was consistent with the results of Kamijani et al. (2014); So that they came to the conclusion that the frequency of high-speed wind decreases from the west to the east of the Persian Gulf, and in Bandar Abbas and the east of the Persian Gulf, the frequency and strength of southerly winds increases compared to the west coast of the Persian Gulf, which is the main reason for the formation of low pressure. In the summer season, this low pressure moves to the eastern coast of the Persian Gulf in the Oman Sea, which increases the frequency of southerly winds, especially on the coasts of Bandar Abbas and Qeshm. In winter, due to the decrease in wind speed, the depth of the layer and the intensity of the inversion increased, and on the contrary, in the summer, the intensity of the inversion decreased with the increase of the wind speed. In the northern cities of Iran, including Tehran, Mashhad and Tabriz, the inversion is more in winter and is of the radiation type, which is the main reason for the stability of the air and the formation of the inversion; However, in the studies related to Tehran, Mashhad and Tabriz (Shamsipour et al., 2013; Sadeghi et al., 2014; Yaori and Saseh, 2011), the role of wind speed and relative humidity has not been mentioned much; However, the results of the current research show that wind speed and relative humidity on the ground have a significant correlation with the intensity of the inversion.

Keywords: Inversion, Logistic Regression, Air Pollution, PM₁₀, Bandar Abbas.