



**Journal of Environmental Studies**  
Vol. 48, No. 2, Summer 2022

Journal Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)  
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

**Predicting The Concentration of Pollutants Chimney Outlet of Western Industries of Bandar Abbas in the Inversion Conditions**

**Document Type**  
Research Paper

**Received**  
Desember 31, 2021

**Accepted**  
June 18, 2022

**Reza Modarres<sup>1</sup>, Ahmad Nohegar<sup>2\*</sup>**

1 Department of Environmental Planning, Management and Education, Kish International Campus, University of Tehran, Kish Island. Iran

2 Department of Environmental Planning, Management and Education, Faculty of Environment, University of Tehran. Tehran, Iran

DOI: 10.22059/jes.2022.333187.1008245

**Abstract**

In the present study, to investigate the air pollution of the Persian Gulf Special Economic Zone in the west of Bandar Abbas, at first inversions which occurred between 2010 and 2020 were extracted using radio sound. Next, using the AERMOD model, the concentration of PM<sub>2.5-10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and O<sub>3</sub> emissions from 60 chimneys for inversion days in a radius of 20 km was predicted. The results showed that the highest inversion was in January and February with 28 and 26 days per month and the lowest with 11 and 13 days in August and July, respectively. The lowest base of the inversion layer was related to January and February with 10 and 13 m, respectively, and the highest with 408 m was in September. The average annual inversions were 250.8 days per year, which 157.4 were radiation and 93.4 were subsidence. The AERMOD model showed that the concentrations of PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> were higher than standard, but PM<sub>10</sub> and CO were lower than standard. Southeast winds are the most important parameter in the distribution of pollutants, which causes the smoke column move to the northwest. Predicting the distribution of pollutants can be useful in formulating strategic management in environmental protection and sustainable development.

**Keywords:** Inversion, Smoke column, Suspended particles, AERMOD model, Industrial area.

---

\* Corresponding Author:

Email: [nohegar@ut.ac.ir](mailto:nohegar@ut.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

Distribution of gases and particulate matter from industrial chimneys to factors such as physio-chemical nature of emitted materials, chimney location, nature and surface features of the ground downstream of the chimney, chimney location in relation to preventing air movement and finally to the characteristics Climate depends on the environment. Chimney emissions can include gases or a mixture of gases and particles. To achieve maximum dispersion, these gases must leave the chimney with sufficient buoyancy and kinetic force so that the smoke column continues to rise as it exits the chimney. The high-temperature smoke column is ascended by the buoyancy force caused by the high temperature of the gas. The buoyancy of the smoke column, depending on the stability of the surrounding atmosphere, causes the smoke column to disperse; But when the air is stable, this turbulence and dispersion decreases and the smoke in the stagnant air remains stationary in the environment. Stable air is an atmospheric condition in which not much mixing or vertical movement occurs. As a result, pollutants released near the earth's surface tend to remain there. The condition in which the rate of reduction of the environment is less than the rate of reduction of the adiabatic (higher temperature gradient) is called the following adiabatic conditions. The atmosphere is stable below the adiabatic state, which means that any small package of air that suddenly moves in a vertical direction tends to return to its original position. Therefore, in the following adiabatic conditions where the air is stable and the reduction rate is negative, temperature inversion occurs. The effect of inversion is to reduce the vertical distribution of pollutants and therefore increase the concentration of the site. In the industrial zone west of Bandar Abbas, where there are several industrial units including the Persian Gulf Special Economic Zone, Shahid Rajaei Wharf, Shahid Bahonar Wharf and a lot of traffic, the risk of pollution of these industries on the environment of the region is quite obvious; The emission of air pollution from chimneys, bulk mineral-metal storage, thermal power plant and pollution from car traffic in the west of Bandar Abbas is visible and its biohazard for the residents of the region, especially those working in the region. Industrial and the city of Bandar Abbas is very much. Sedimentation of suspended particles on the surface affects weak and desert ecosystems in the region. Of course, these industries also damage the soil and marine environment of the region by producing wastewater. Although these industries have an important role in advancing the country's economic goals, but the lack of attention and environmental planning to control the pollutants of these industries can prevent the achievement of sustainable development in the region. In calculating and identifying the concentration of ambient air pollution, experts and pollution monitoring companies have been able to measure the concentration of pollutants at the chimney outlet, but cannot in a wide range of radius 10, 20 and Measure concentrations at 50 km. Using the physical characteristics of chimneys, land use, meteorological data of surface and high atmosphere, topography of the location and number of chimneys, AERMOD model, the concentration of each of the pollutants leaving the industrial chimney up to a radius of 50 km to predict. For this reason, the present study tries to predict the distribution of pollutants emitted from the chimneys of industries located in the Persian Gulf Special Economic Zone. Air pollution in the region, in the days of inversion, the concentration of air pollution was done within a radius of 20 km from the industries west of Bandar Abbas.

### Materials and Methods

At First, the statistical and thermodynamic study of inversion in the lower atmosphere of the Persian Gulf Special Economic Zone in the west of Bandar Abbas during the period 2010 to 2020 and its relationship with the distribution of pollutants emitted from industrial chimneys was investigated. In this study, the thickness and depth of the inversion and the temperature difference were used to calculate the intensity of the inversion. In order to control air pollution in the western industries of Bandar Abbas and formulate management programs in advancing the goals of sustainable development, the prediction of pollutants can be useful. The concentration of pollutants emitted from the chimney of industries located in the Persian Gulf Special Economic Zone during the days of temperature inversion was predicted by the AERMOD model.

### Results and Discussion

The annual wind rose plot indicates the predominance of east and southeast winds that cross the Oman Sea and the Persian Gulf, causing hot and humid winds in Bandar Abbas. Examination of temperature inversion conditions on a monthly scale showed that the highest occurrence of inversion occurs in the cold months of the year in winter, with a maximum of 28 days on average in December, followed by

February and May. The base height of the inversion layer, which plays an important role in air stability and intensification of surface air pollution in the region, is minimized in winter, especially in December, and is on average 10 meters above the ground; However, with the warming of the region's atmosphere in early April, the base of the inversion layer separates from the earth's surface and climbs to altitudes of more than 100 meters. Due to the fact that the height of industrial chimneys in the west of Bandar Abbas is between 40 to 100 meters, temperature inversion until April also has a negative effect on the emission of pollutants leaving the industrial chimney. With the intense warming of the air in June, which continues until September, the height of the base of the inversion layer has reached more than 200 meters and cannot play a major role in the accumulation of pollutants released from industrial chimneys in environmental pollution. Again, with the cooling of the air and the descent of the air temperature, the base of the inversion layer also descends and settles at a height of less than 200 meters. Therefore, in the cold months of the year, the base of the inversion layer is less than 200 meters above the ground and plays an important role in intensifying air pollution and the distribution of pollutants. The height of the top of the inversion layer also plays a role in the distribution of air pollutants, which in the cold months, especially in the winter of Bandar Abbas, its height reaches less than 250 meters. Prevents air mixing and causes the accumulation of air pollutants. As the air temperature rises and the region's atmosphere heats up, the height of the boundary layer also increases to more than 500 meters. The difference between the height of the base and the top of the inversion layer indicates the thickness of the boundary layer, which in cold months reaches a thickness of less than 200 meters, and pollutants accumulate in this air package and their mixing rate is reduced to a minimum. Find. In general, the percentage of temperature inversion phenomenon in January and February reaches more than 90% of the days of these months, which indicates that due to weather conditions in these months and the establishment of the inversion layer on the earth's surface. The possibility of increasing the concentration of air pollutants in the atmosphere close to the Earth's surface is very high. The elevation, temperature and compressive characteristics of the temperature inversion layer were also examined on an annual scale. The results of this study showed that on average, about 250 temperature inversion phenomena occur in the west of Bandar Abbas per year, of which 157.4% are radiation and 93.4% are subsidence. Different types of inversion have different roles in air pollution in the region, so that radiation inversion due to its low altitude and proximity to the ground, has a great impact on the accumulation of air pollutants on the ground, but in subsidence inversion Which is mainly due to the establishment of high pressure systems in the middle levels of the atmosphere and dynamic subsidence of air and in the closed ground warm air causes the rise of surface air, an inversion layer is formed at a height of more than 200 meters and plays a major role in impact Air pollution will not affect the environment. The results of predicting the concentration of particulate matter from 60 chimneys of western industries of Bandar Abbas in a radius of 20 km showed that the suspended particles are affected by prevailing winds and local topography. The concentration range of particles less than 2.5 microns is between 10 and 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , the maximum of which is around the chimneys and the atmosphere above the industrial area, where the 24-hour concentration reaches more than 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The highest area is 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which covers a large part of the area and exceeds the standard. The prevailing southeast wind direction caused the suspended particles to flow out of the industrial chimney to the northwest, but after a distance of about 10 km, the northern heights of the region caused the accumulation of suspended particles in the foothills and then the concentration of particles. Suspends less than 2.5 microns reach less than the standard (34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The city of Bandar Abbas is located at 13 km in the eastern part of the Persian Gulf Special Economic Zone, in the concentration range of 30 to 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , there is a possibility of increasing particulate matter less than 2.5 microns in the urban atmosphere of Bandar Abbas.  $\text{SO}_2$  is the result of combustion and is released into the atmosphere from the chimneys of industrial furnaces and, in combination with water vapor, causes the formation of sulfuric acid, which poses a great environmental risk. The standard one-hour limit of this gas is 196  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which if it exceeds the threshold in the concentration zones, it can harm the environment of the host region. The forecast results of this gas in a radius of 20 km from the western industries of Bandar Abbas indicate that its concentration in the air adjacent to the chimneys was above the standard and was predicted between 200 and 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . With distance from industries, the concentration of this gas decreases to less than 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . More than 60% of the study area is in the range of 100 to 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which is stretched to the northwest, north and northeast under the influence of prevailing winds and topography. Therefore, due to the large number of chimneys, the atmosphere of the Persian Gulf Special Economic Zone has a high concentration of sulfur dioxide gas, which in combination with other pollutants can endanger the ecosystem of the region.  $\text{O}_3$  is produced by

photochemical reactions between hydrocarbons leaving the industry and nitrogen oxides in the atmosphere and stimulates the eyes, throat and lungs. This pollutant is not primarily released into the environment by a source, but is produced by reactions between atmospheric pollutants and is therefore called a secondary pollutant. The primary pollutants involved in the formation of ozone are nitrogen oxides and the total amount of hydrocarbons. AERMOD model has the ability to simulate and predict O<sub>3</sub> gas. In this study, its 8-hour concentration in a radius of 20 km from the western industries of Bandar Abbas was calculated. The standard 8-hour concentration limit is 148  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , but the concentration of this gas in the study range was predicted to be between 30 and 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Areas where the concentration of O<sub>3</sub> gas is above the threshold are located in the chimney areas of the industry, which with the distance from the industry, the concentration of this gas reaches less than 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The maximum area is related to the concentration of 30 to  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which are located outside the industrial area and the prevailing wind direction.

### Conclusion

In the direction of sustainable development approach, exploitation of natural resources and job creation for the people of the region can be achieved through environmental protection and conservation of natural resources. Industries located in the Persian Gulf Special Economic Zone have a positive effect on the economic situation of Bandar Abbas and Hormozgan province and even the economy of Iran and provide the country with metal-mineral goods and energy, but damage to the region's environment and active ecosystems. One of the ways to destroy the environment is the release of pollutants that enter the environment through industrial chimneys. Measurement of air pollutants emitted by industrial chimneys can only be done by measuring the flue outlet, but within a certain radius that air pollutants affect the environment. Measurement is not costly and cannot be done. The AERMOD model has the ability to simulate and predict the concentration of each air pollutant up to a maximum radius of 50 km. The Persian Gulf Special Economic Zone up to a radius of 20 km was used for days of temperature inversion in the cold half of the year. The results indicate that the prevailing wind direction of the region, which is south and southeast, has the greatest role in the distribution of pollutants emitted from industrial chimneys. The concentration of PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> was higher than their global standard. Exceeding the standard level of pollutants was mainly in the industrial area and radially up to 10 km to the north, 15 km to the northwest and in some cases up to 20 km to the east and west. In general, the concentration of air pollutants in the west of Bandar Abbas is higher than the standard and the risk of its ecosystems cannot be controlled with these conditions. However, in this study, the concentrations of the main pollutants emitted from the chimneys of industrial industries west of Bandar Abbas were simulated and predicted in a radius of 20 km with the Plum-Gaussian model of AERMOD. But so far, the air quality index has not been defined for all released pollutants and includes only the main pollutants. On the other hand, the AERMOD model is capable of modeling pollutants such as NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> and lead; If chimney pollutants are process sources including phthalic anhydride, maleic anhydride, toluene diisocyanate, ethylene oxide, ethylbenzene, styrene, aromatic compounds, paraffin, acetone and other contaminants are not predictable in the AERMOD model. While these pollutants have severe effects on the environment of the region, especially society and human health, various plant and animal ecologies. The combination of these pollutants in the ambient air of the region causes the formation of several secondary pollutants and on the other hand, the deposition of solid and liquid pollutants on the ground surfaces causes various diseases in the active ecosystems of the region. It becomes. Therefore, in planning and managing operational arrangements and strategies, although the results of the present study can identify the distribution of major air pollutants in the region and be effective in planning the regions of Bandar Abbas and environmental decisions. However, in order to make a decision on a long-term and comprehensive time scale, it is necessary to evaluate and monitor secondary pollutants and other pollutants emitted from industrial chimneys. Also, in order to formulate spatial and regional planning in environmental protection, assessing the impact of pollutants from industrial chimneys on land and marine ecologies, especially their growth and development can be very Be useful.

## پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع غرب بندرعباس در شرایط وارونگی دمایی

رضا مدرس<sup>۱</sup>، احمد نوحه‌گر<sup>۲\*</sup>

۱ گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، جزیره کیش، ایران  
۲ گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۴

### چکیده

در پژوهش حاضر به منظور بررسی آلودگی هوای منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در غرب بندرعباس، نخست وارونگی‌های دمایی اتفاق افتاده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های رادیو سوند استخراج گردید. سپس با استفاده از مدل ایرمود (۱) غلظت ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub> - 10)، گازهای دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ازن خروجی از ۶۰ دودکش برای روزهای وارونگی در شعاع ۲۰ کیلومتری پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد بیشترین وارونگی در دی و بهمن به ترتیب با ۲۸ و ۲۶ روز در ماه و کمترین وارونگی با ۱۱ و ۱۳ روز در مرداد و تیر بود. کمترین ارتفاع پایه لایه وارونگی نیز مربوط به دی و بهمن به ترتیب با ۱۰ و ۱۳ متر و بیشترین ارتفاع با ۴۰۸ متر در شهریور بود. میانگین سالانه وارونگی‌ها ۲۵۰/۸ روز در سال بوده که ۱۵۷/۴ مورد از نوع تابشی و ۹۳/۴ مورد فرونشینی بوده است. مدل ایرمود نشان داد غلظت ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub>)، دی‌اکسید گوگرد و ازن بیشتر از استاندارد بود، اما ذرات معلق (PM<sub>10</sub>) و مونوکسید کربن کمتر از حد استاندارد بود. داده‌های جنوب شرقی مهم‌ترین پارامتر در پراکنش آلاینده‌ها بوده که باعث شده ستون دود بادبزی به سمت شمال غربی انتقال یابد. پیش‌بینی پراکنش آلاینده‌ها می‌تواند در تدوین مدیریت راهبردی در حفاظت محیط‌زیست و توسعه پایدار مفید واقع گردد.

**کلید واژه‌ها:** اینورژن، ستون دود، ذرات معلق، مدل ایرمود، ناحیه صنعتی

### سراغاز

آلاینده‌های جوی دارند. گازها و ذرات معلق خروجی از دودکش صنایع باعث افزایش غلظت فیزیکوشیمیایی آلودگی هوا شده و در ترکیب با دیگر مواد تشکیل دهنده‌ی اتمسفر موجب ایجاد آلاینده‌های ثانویه می‌گردد (Sitaras and Siskos, 2008); به‌گونه‌ای که دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن در ترکیب با بخار آب و هسته‌های تراکم باعث تشکیل اسید سولفوریک و اسید نیتریک می‌شود که در نهایت منجر به اسیدی شدن قطرات مه و باران شده و بر

آلودگی هوا از مهم‌ترین مشکلات محیطی در مناطق پُرتراפیک صنعتی- شهری است که این پدیده ناشی از استفاده‌ی روزافزون از سوخت‌های فسیلی، مولدهای حرارتی و فعالیت پالایشگاه‌ها و صنایع می‌باشد (Contardo et al., 2020). پالایشگاه‌ها و صنایع فلزی- معدنی با سوزاندن سوخت‌های فسیلی به‌منظور تولید انرژی و مواد مورد استفاده در صنعت کشور نقش به‌سزایی در انتشار

هوایی محیط بستگی دارد (Alloway and Ayres, 1997). مواد منتشره از دودکش می‌تواند شامل گازها یا مخلوطی از گازها و ذرات باشد. این گازها برای رسیدن به حداکثر پراکندگی، باید با نیروی شناوری و جنبشی کافی، دودکش را ترک نمایند تا ستون دود هنگام خروج از دودکش به صعود ادامه دهد. ستون دود با دمای بالا توسط نیروی شناوری ناشی از دمای بالای گاز، صعود می‌کند. شناوری ستون دود بسته به پایداری اتمسفر اطراف، باعث پراکندگی ستون دود می‌شود؛ اما در زمان پایداری هوا این تلاطم و پراکندگی کاهش یافته و دود در هوای راکد به شکل ساکن در محیط معلق می‌ماند (Perry et al., 2005). هوای پایدار، شرایط جوی است که اختلاط یا حرکت عمودی زیادی در آن رخ نمی‌دهد. در نتیجه آلاینده‌های منتشرشده در نزدیک سطح زمین تمایل دارند همان‌جا باقی بمانند. به حالتی که در آن نرخ کاهش محیط کمتر از نرخ کاهش آدیاباتیکی باشد (گرادیان دمای بالاتر)، شرایط زیر آدیاباتیکی گفته می‌شود. اتمسفر در حالت زیر آدیاباتیکی، پایدار است و این بدان معناست که هر بسته کوچک هوایی که به‌صورت ناگهانی در جهت قائم جابه‌جا شود، تمایل دارد به موقعیت اولیه‌اش بازگردد (Rzeszutek and Szulecka, 2021). بنابراین در شرایط زیر آدیاباتیکی که هوا پایدار است و نرخ کاهش نیز منفی است، وارونگی دمایی اتفاق می‌افتد. اثر وارونگی به‌صورت کاهش پخش عمودی آلاینده‌ها و لذا افزایش غلظت محل است (Abbassi et al., 2020).

یک مدل ریاضی پخش اتمسفری باید رفتار ستون دود منتشره از منابع سطح زمین و دودکش‌هایی که در ارتفاع قرار دارند را شبیه‌سازی نماید. در منابع نقطه‌ای نظیر یک دودکش، گرچه ستون دود در بالای دودکش ظاهر می‌شود، ولی می‌تواند تا ارتفاع اضافی صعود نماید که به دلیل نیروی شناوری گازهای داغ و نیروی جنبشی گازهای خروجی با سرعت عمودی است. در نتیجه ستون دودی که از دودکش خارج می‌شود در ارتفاع معادل یا موثر دودکش پخش می‌شود (Ninic and Nizetic, 2009). یکی از روش‌های

چشم‌اندازهای محیطی سطح زمین تأثیر مخربی می‌گذارد (Pérez-Díaz et al., 2017). از طرف دیگر، نفوذ گازهای سمی همچون دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، ازن و ذرات معلق به سیستم تنفسی موجودات زنده، سلامت آنها را به‌خطر می‌اندازد (Tsegaw and Alemayehu, 2019). برای مقابله با این خطر زیست‌محیطی، کنترل منابع آلودگی و تدوین راهبردهای محیط‌زیستی در به‌حداقل رساندن انتشار آلاینده‌ها، مدیران و کارشناسان سعی در شناسایی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های انتشار یافته از منابع آلودگی و نحوه پخش و پراکنش آلاینده‌ها در محدوده‌ی تعیین شده دارند. مدل‌های نرم‌افزاری که در قرن بیستم جامعه‌ی علمی را فرا گرفته است، توانایی شبیه‌سازی و نحوه پراکنش آلاینده‌های هوا را دارند که با پیش‌بینی کیفیت و پراکنش آلودگی در اطراف یک واحد صنعتی می‌تواند در راستای کنترل و ایجاد محدودیت برای منابع آلاینده، حائز اهمیت باشد. بنابراین مدل‌سازی پخش و پراکنش آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع می‌تواند به‌عنوان اولین گام در تدوین راهبردهای مدیریتی - حفاظتی در پیشبرد اهداف زیست‌محیطی و کنترل آلودگی شناخته شود (Asolekar and Gopichandran, 2005). باتوجه به انتشار آلاینده‌های گازی و ذرات معلق از دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس و نقش آن در تخریب محیط‌زیست و اکولوژی‌های مناطق مجاور آن، کنترل آلودگی آن در اولویت برنامه‌ریزی‌های محیطی منطقه قرار دارد که برای دستیابی به این رهیافت، شبیه‌سازی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها و نحوه پخش و پراکنش آنها در شعاع ۲۰ کیلومتری می‌تواند مفید واقع گردد.

پراکنش گازها و ذرات خروجی از دودکش صنایع به فاکتورهایی از قبیل طبیعت فیزیکی - شیمیایی مواد منتشره، محل دودکش، طبیعت و عوارض سطحی زمین در پایین‌دست باد از دودکش، محل دودکش در رابطه با جلوگیری از حرکت هوا و درنهایت به خصوصیات آب و

منطقه و سمت و سرعت باد در جنوب تهران، اغلب تا شعاع ۱ تا ۵ کیلومتری انتشار می‌یابد (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴)؛ اما در ایلام به دلیل عوارض سطحی و سمت باد متفاوت نسبت به تهران، بیشینه غلظت ذرات معلق در شعاع ۸۹۰۰ متری در راستای شرقی و ۵۳۰۰ متری در راستای شمالی مشاهده می‌شود (نورپور و کاظمی شهابی، ۱۳۹۴). در کشور مالزی، به‌منظور برنامه‌ریزی جهت تولید انرژی و برق که از منابع ذغال‌سنگ و سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود، مدیران محیط‌زیستی از مدل ایرمود برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های جوی ناشی از صنایع در شعاع ۱۰ کیلومتری در سطح زمین استفاده نموده و نتایج آنها بیان‌گر صحت اطلاعات حاصل از مدل‌سازی می‌باشد (Mokhtar et al., 2014). در کشور تایلند به‌منظور ارزیابی آلودگی دی‌اکسیدنیترژن خروجی از صنعت سیمان از مدل ایرمود در ماه‌های خشک و مرطوب استفاده شد و نتایج آن نشان داد که بیشینه‌ی غلظت در شعاع یک تا پنج کیلومتری از دودکش کارخانه‌های سیمان بوده، اما غلظت آن کمتر از حد استاندارد می‌باشد؛ همچنین در فصل خشک، غلظت آن کمتر از ماه‌های مرطوب است که علت آن ته‌نشینی آلاینده در طی فرآیند تشکیل اسید سولفوریک می‌باشد (Seangkiatiyuth, 2011). مدل ایرمود برای پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در محیط‌های شهری، قابل اعتماد نبوده و اغلب برای مدل‌سازی انتشار از دودکش‌ها کاربرد دارد که در منطقه‌ی پونای هند، پژوهشگران حتی برای تهیه‌ی داده‌های هواشناسی در سطح زمین از مدل وورف (۲) استفاده نموده و نتایج آن را به مدل ایرمود وارد نمودند، اما باز هم مدل قادر به پیش‌بینی آلودگی هوای شهری به‌ویژه ذرات معلق نبود (Kesarkar et al., 2007). در شهر سیبته در کلمبیا، بوی هیدروژن سولفید موجب نارضایتی شهروندان شده و پژوهشگران با مدل ایرمود غلظت این گاز را از مخزن موگا مدل‌سازی نموده و نشان دادند که غلظت این آلاینده حدود ۱۸۸۶ میکروگرم بر دقیقه است که بادهای غالب موجب انتقال این آلاینده به سمت جنوب شهر شده و شهرداری عامل اصلی وقوع این

پژکاربرد در مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌های منتشره از دودکش‌ها، مدل ایرمود است که یک مدل پلوم گوسی برای حالت پایدار و برای موارد نزدیک به سایت است که بر مبنای ساختار و مفاهیم تلاطم لایه مرزی سیاره‌ای استوار است. این مدل قادر به شبیه‌سازی منابع چندگانه آلاینده از انواع مختلف نقطه‌ای، سطحی و حجمی می‌باشد. ایرمود برای شبیه‌سازی پراکنش ذره‌ای و گازها طراحی شده است. در یک مطالعه‌ی فاز گازی، توانایی این مدل در شبیه‌سازی پراکنش یک ردیاب خنثی در یک محیط شهری بررسی شده است (Kesarkar et al., 2007). از مدل ایرمود برای مقایسه غلظت آلاینده‌های منتشره از منابع با استاندارد جهانی نیز استفاده می‌شود که در نیروگاه رامین اهواز نتایج حاصل از این مدل نشان داد که میزان غلظت دی‌اکسید گوگرد کمتر از حد استاندارد جهانی محیط زیست است (مومنی و همکاران، ۱۳۹۰)؛ اما در پالایشگاه ۴ گازی پارس جنوبی، حداکثر غلظت یک‌ساعته و هشت‌ساعته مونوکسیدکربن بیشتر از حد استاندارد جهانی بود (عتابی و همکاران، ۱۳۹۳). وارونگی دما یکی از پارامترهای مهم در پایداری هوا و سکون دود ناشی از دودکش منابع است که این پدیده منجر به افزایش غلظت ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون، گاز مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدگوگرد در تبریز شده است. در این روزهای سرد و خشک که با وارونگی دمایی در ارتفاع ۹ تا ۱۷۶۹ متر همراه بود، در ۶۴ درصد مواقع سرعت باد کمتر از ۵ متر در ثانیه و در ۹۱ درصد روزها فشار سطح دریا بیشتر از ۱۰۱۵ هکتوپاسکال بود (جهانبخش اصل و روشنی، ۱۳۹۲). در اهواز بیشینه‌ی وارونگی دما در فصل گرم سال است که منجر به تجمع آلاینده‌های هوا در سطح زمین می‌شود (عظیمی، ۱۳۸۷). نحوه‌ی استفاده از سوخت‌های فسیلی، گنجایش و ظرفیت تولید محصولات در واحدهای صنعتی، تعداد دودکش‌ها و همچنین خصوصیات آب و هوایی و عوارض سطحی زمین از عوامل تعیین‌کننده‌ی غلظت آلاینده‌ها و پراکنش آن‌ها در محیط است. ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون که از صنایع منتشر می‌شود باتوجه به توپوگرافی

کارخانه فعال بوده و انتشار آلودگی از این منابع موجب افزایش تراکم و غلظت آلاینده‌ها می‌شود که در یک نمونه‌ی موردی در شهرک صنعتی پاسیر گودانگ در منطقه‌ی جوهور مالزی، غلظت دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسیدگوگرد و ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون پس از مشاهدات میدانی، با مدل ایرمود شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد مدل ایرمود توانایی پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها را دارد و غلظت این آلاینده‌ها به ترتیب ۳۶/۲، ۸/۵۹ و ۵/۴ میکروگرم بر مترمکعب بود (Afzali et al., 2017). در مدل‌سازی و پیش‌بینی غلظت دی‌اکسیدنیترژن و دی‌اکسیدگوگرد خروجی از دودکش پالایشگاه نفت، مدل ایرمود و کالپوف (۳) با هم مقایسه شدند که آزمون تی‌استیودنت نشان داد مدل ایرمود قابلیت مدل‌سازی بهتری دارد (Amoatey et al., 2019).

در ناحیه‌ی صنعتی غرب بندرعباس که چندین واحد صنعتی شامل منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس، اسکله شهیدرجایی، اسکله شهید باهنر و ترافیک خوردوری زیادی وجود دارد، خطر آلودگی این صنایع بر محیط‌زیست منطقه کاملاً مشهود است؛ به‌گونه‌ای که انتشار آلودگی هوا از دودکش‌ها، انبار فله مواد معدنی- فلزی، نیروگاه حرارتی برق و آلودگی ناشی از تردد خودروها در غرب بندرعباس قابل مشاهده بوده و خطر زیستی آن برای ساکنان منطقه به‌ویژه افراد شاغل در منطقه صنعتی و شهر بندرعباس بسیار زیاد است. رسوب ذرات معلق بر سطح زمین، اکوسیستم‌های ضعیف و بیابانی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته این صنایع با تولید فاضلاب، بر محیط‌زیست خاکی و دریایی منطقه نیز آسیب می‌زنند. اگرچه این صنایع نقش مهمی در پیشبرد اهداف اقتصادی کشور دارد، اما عدم توجه و برنامه‌ریزی محیطی برای کنترل آلاینده‌های این صنایع می‌تواند مانع دستیابی به توسعه پایدار در منطقه شود. در محاسبه و شناسایی غلظت آلودگی هوای محیطی کارشناسان و شرکت‌های پایش آلودگی قادر بوده تا در دهانه خروجی دودکش، غلظت آلاینده‌ها را اندازه‌گیری کنند، اما نمی‌توانند در پهنه‌ی وسیعی به شعاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ کیلومتری،

آلودگی شناخته شد (Moreno-Silva et al., 2020). مدل ایرمود برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های ناشی از تردد خودروها در خیابان نیز کاربرد دارد که در خیابان تانکردو نوس در شهر آراکاجوی برزیل از این مدل برای پیش‌بینی آلودگی استفاده گردید که خیابان به‌عنوان منبع خطی آلودگی در نظر گرفته شد و در آن غلظت ذرات معلق ناشی از خودروهای سبک و موتورسیکلت بوده و از حد استاندارد پایین‌تر است، اما غلظت مونوکسیدرکبن و دی‌اکسیدنیترژن به دلیل انتشار زیاد از خودروها، از حد استاندارد جهانی بیشتر بوده که توپوگرافی محلی و هوای سطحی نیز نقش مهمی در تراکم این آلاینده‌ها دارد (Macêdo and Ramos, 2020). صنایع معدنی و فلزی به‌ویژه فولاد، آلومینیوم و روی در انتشار آلاینده‌های جوی و تخریب محیط‌زیست سهم زیادی دارد که برای کنترل آن نیاز به پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های منتشر شده از آن دارد که در صنعت فولاد سپید فاراب کویر، غلظت دی‌اکسیدنیترژن و دی‌اکسیدگوگرد در شعاع ۳۰ کیلومتری با مدل ایرمود مدل‌سازی شد و نتایج آن بیان‌گر این بود که غلظت این آلاینده‌ها به‌ویژه در مقیاس زمانی یک‌ساعته، بیشتر از حد استاندارد می‌باشد که غلظت ساعتی دی‌اکسیدگوگرد حدود ۳۲۴ میکروگرم در مترمکعب بود (Arani et al., 2021). در پالایشگاه‌ها که از سوخت‌های فسیلی در کوره‌ها استفاده می‌شود، غلظت گازهای محیطی بالا بوده و در صورت انتقال آن به سمت مناطق سکونتگاهی، احتمال به‌خطرافتادن سلامت اکوسیستم میزبان وجود دارد که در پالایشگاه گاز مارون در حومه‌ی شهر اهواز، از مدل ایرمود برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های گازی در مساحت ۲۵۰۰ کیلومترمربع استفاده شد که در آن غلظت دی‌اکسید گوگرد و مونوکسیدکربن از حد استاندارد بیشتر بوده و در فصل زمستان غلظت این آلاینده‌ها افزایش می‌یابد، همچنین وزش بادهای غالب شمال‌غربی، موجب انتقال آلاینده‌ها به سمت محل سکونت کارکنان پالایشگاه شده که سطح خطر ابتلا به بیماری را بالا می‌برد (Mousavi et al., 2021). در شهرک‌های صنعتی و مناطق ویژه که چندین واحد صنعتی و

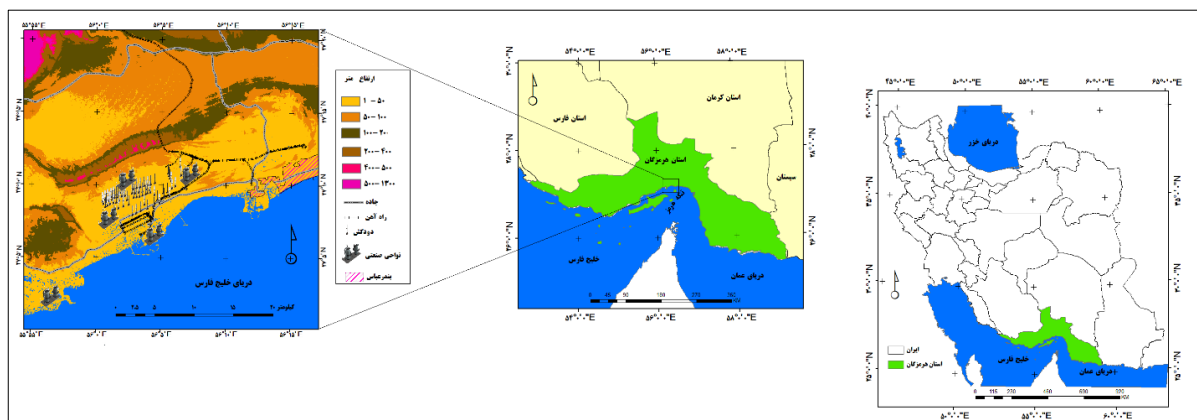


زیرساخت‌ها است. منطقه در اراضی ساحلی - بیابانی گسترده شده است که از لحاظ توپوگرافی و جغرافیایی، از شمال به ارتفاعات ۴۵۰ متری، از جنوب به اسکله شهیدرجایی و نیروگاه حرارتی در ساحل خلیج فارس، از شرق به بندرعباس و از غرب نیز به کوه نمک محدود است. در این ناحیه صنعتی، مجتمع‌های صنعتی متعددی وجود دارد که مهم‌ترین آنها کارخانه آلومینیوم المهدی، مجتمع فولاد هرمزگان، فولاد کاوه جنوب کیش، صبا فولاد خلیج فارس، مادکوش، مباشر نور دریا، سیه‌فام، شرکت تولید روی بندرعباس، پالایشگاه نفت بندرعباس، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس، نیروگاه حرارتی و اسکله شهیدرجایی می‌باشد (شکل ۱). منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس و شهر بندرعباس به دلیل هم‌جواری با دریای خلیج فارس، دارای آب‌وهوای گرم و مرطوب است و میانگین سالانه دما ۲۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای حداکثر آن ۴۵ درجه سانتی‌گراد است که همراه با میانگین رطوبت نسبی سالانه حدود ۶۵ درصد، بیان‌گر اقلیمی گرم و مرطوب است که دوره گرم حدود ۹ ماه به طول می‌انجامد.

غلظت‌ها را اندازه‌گیری کنند. مدل ایرمود با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی دودکش‌ها، کاربری اراضی، داده‌های هواشناسی سطح زمین و جو بالا، توپوگرافی محل و تعداد دودکش‌ها، غلظت هر یک از آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع را تا شعاع ۵۰ کیلومتری پیش‌بینی نماید. به‌همین دلیل پژوهش حاضر سعی در پیش‌بینی پراکنش آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس دارد که مسیر دستیابی به این رهیافت، استفاده از مدل پلوم گوسی ایرمود بوده که با توجه به نقش وارونگی دمایی در تشدید آلودگی هوای منطقه، در روزهای اینورژنی غلظت آلودگی هوا در شعاع ۲۰ کیلومتری از صنایع غرب بندرعباس انجام شد.

### مواد و روش بررسی

منطقه ویژه اقتصادی صنایع معدنی و فلزی خلیج فارس در ۱۳ بزرگراه شهید رجایی در غرب بندرعباس واقع شده است. وسعت این سایت ۴۵۰۰ هکتار بوده که ۲۰۰۰ هکتار آن عملیاتی و ۲۵۰۰ هکتار دیگر در حال آماده‌سازی



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس

این هدف، داده‌های جو بالا از رادیوسوند ایستگاه بندرعباس برای دوره زمانی فوق از سایت دانشگاه ایومینگ آمریکا استخراج شد. سپس فراسنج‌های جوی برای هر روز جداگانه وارد نرم‌افزار راثوب (۴) شده و نمودار اسکیتی برای هر روز ترسیم و از روی نمودار، وارونگی دمایی روزانه استخراج گردید. به‌منظور شناسایی روزهای وارونگی،

### محاسبه وارونگی دما

اولین گام در پژوهش حاضر، بررسی آماری و ترمودینامیکی وارونگی دما (اینورژن) در سطوح زیرین اتمسفر منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در غرب بندرعباس طی دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ و ارتباط آن با پراکنش آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع است. در دستیابی به

سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نیز محاسبه گردید.

### مدل‌سازی آلودگی هوا

به‌منظور کنترل آلودگی هوای صنایع غرب بندرعباس و تدوین برنامه‌های مدیریتی در پیشبرد اهداف توسعه پایدار، پیش‌بینی آلاینده‌ها می‌تواند مفید واقع گردد که این پژوهش نیز در مسیر دستیابی به این رهیافت، نحوه‌ی پخش و پراکنش غلظت آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس را طی روزهای وارونگی دمایی با مدل ایرمود پیش‌بینی نمود. در این راستا، ابتدا داده‌های ورودی به مدل تهیه گردید. مدل ایرمود دارای دو ماژول (پیش‌پردازنده) است که ماژول ایرمت (۵) مربوط به تهیه فایل هواشناسی است. این فایل شامل سمت و سرعت باد، میزان ابرناکی، رطوبت نسبی و دمای هوای سطحی (ارتفاع ۲ متری از سطح زمین) است که از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک بندرعباس در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ به‌دست آمد. ماژول ایرمت برای انجام محاسبات به ۳ پارامتر سطحی از منطقه یعنی نسبت بوان (انتقال حرارت)، ضریب سپیدایی (بازتاب نور از سطح زمین) و طول زبری سطح (توپولوژی سطحی) احتیاج دارد (جدول ۱) که بر نحوه‌ی پخش و پراکنش آلاینده‌ها در سطح زمین اثر می‌گذارند. برای تهیه‌ی این پارامترها، نوع کاربری اراضی منطقه در چهار جهت ۹۰ درجه‌ای وارد مدل گردیده و ضریب پارامترها محاسبه گردید (جدول ۲).

جدول (۱) ضریب سپیدایی، نسبت بوان و زبری انواع پوشش‌های سطحی

سطح	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	
بیابانی	۰/۳	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۴۵	ضریب سپیدایی
زراعی	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۶	
شهری	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۳۵	
بیابانی	۱	۱/۵	۲	۲	نسبت بوان
زراعی	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	
شهری	۰/۵	۱	۱	۰/۵	
بیابانی	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۱۵	زبری سطح
زراعی	۰/۰۳	۰/۲	۰/۰۵	۰/۰۱	
شهری	۱	۱	۱	۱	

داده‌های دما در پروفیل ارتفاعی اتمسفر از داده‌های رادیوسوند جدا شده و روزی‌که در آن دما از سطح زمین تا ارتفاع بالاتر روند افزایشی داشته است، به‌عنوان روز پایدار یا وارونگی دمایی نام‌گذاری شد. در این روز به‌جای کاهش دما با افزایش ارتفاع، به‌دلیل شرایط جوی حاکم بر منطقه و پایداری اتمسفر، دما با افزایش ارتفاع، سیر صعودی می‌یابد. نقطه شروع افزایش دما به‌عنوان پایه‌ی لایه وارونگی و نقطه پایان افزایش دما به‌عنوان رأس لایه وارونگی در نظر گرفته شد. برحسب اهمیت وارونگی‌های سطح زمین در آلودگی هوا، وارونگی‌ها به دو نوع تابشی و فرونشینی تقسیم شدند؛ وارونگی‌هایی را که از سطح زمین شروع شده و تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین ادامه داشت، به‌عنوان وارونگی تابشی و وارونگی‌هایی که پایه آن‌ها از ارتفاع ۵۰ متری شروع شده و تا ارتفاع بالاتر ادامه یافته، به‌عنوان وارونگی فرونشینی در نظر گرفته شد.

وارونگی‌ها برحسب شدت در چهار گروه مجزا که شامل طبقه ضعیف (۰/۱۰ - ۰/۰۰۰)، متوسط (۰/۲۰ - ۰/۰۱۱)، شدید (۰/۳۰ - ۰/۰۲۱) و بسیار شدید (بالای ۰/۳۱) می‌باشند، تقسیم‌بندی می‌شود. در منابع مختلف از پارامتر اختلاف (ضخامت) دمای لایه وارونگی برای طبقه‌بندی شدت وارونگی استفاده می‌کنند. در این مطالعه از رابطه (۱) که هم ضخامت و عمق وارونگی و هم اختلاف دما را در نظر می‌گیرد، برای محاسبه شدت وارونگی، استفاده شد (هدایت و لشکری، ۱۳۸۵).

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

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

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

که در آن،  $\theta$  دمای پتانسیل به درجه کلون،  $T$  دما به درجه کلون و  $P$  فشار هوا به هکتوپاسکال است. با این رابطه، شدت وارونگی بندرعباس به‌صورت روزانه طی

همچنین اطلاعات مربوط به توپوگرافی منطقه وارد مدل گردید. در گام نهایی داده‌های تهیه شده در ماژول‌ها، وارد مدل ایرمود شده و نحوه‌ی پخش و پراکنش آلاینده‌های خروجی از دودکش محاسبه گردید. مدل ایرمود مدل پراکنش حالت دائم است که برای تعیین غلظت آلاینده‌های مختلف، در مناطق شهری و حومه‌ای، صاف و ناهموار، انتشار سطح و در ارتفاع از منابع نقطه‌ای، حجم و انواع مختلف منابع سطح قابل استفاده است که برای شبیه‌سازی پراکنش آلاینده‌ها در محدوده‌های حداکثر تا ۵۰ کیلومتر پیشنهاد می‌شود (Dresser and Huizer, 2011). در پژوهش حاضر از این مدل برای شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌ها استفاده گردید و در آن غلظت و پراکنش آلاینده‌های گازی و ذرات معلق از ۶۰ دودکش صنایع فعال در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس تحت تأثیر توپوگرافی، بادهای غالب، میزان ابرناکی و لایه‌ی مرزی هوا، مشخصات دودکش و کاربری اراضی پیش‌بینی گردید.

جدول (۲) ضریب سییدایی، نسبت بوان و زبری

پوشش سطحی منطقه مورد مطالعه				
درجه	سطح	ضریب سییدایی	نسبت بوان	زبری سطح
۱	۰ - ۹۰	۰/۲	۱/۵	۱
۲	۹۰ - ۱۸۰	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۰۰۰۱
۳	۱۸۰ - ۲۷۰	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۰۰۰۱
۴	۲۷۰ - ۳۶۰	۰/۳۲	۷/۴	۰/۲۶

ماژول دوم، ایرمپ (۶) است که با ورود داده‌های مربوط به هر دودکش (۶۰ دودکش) با نرخ انتشار با واحد گرم بر ثانیه به‌وسیله‌ی محاسبه دبی با مقیاس میکروگرم بر ثانیه و ضرب مقادیر آن برای هر یک از غلظت گازهای آلاینده و ذرات خروجی از دودکش با مقیاس میکروگرم بر مترمکعب، نحوه پراکنش آلاینده‌های گازی و ذرات معلق استاندارد شده بر اساس استاندارد هوای پاک انجام شد (جدول ۳). در این مدل، برای محاسبه نرخ انتشار، از ویژگی‌های دودکش همچون ارتفاع دودکش، قطر دودکش، سرعت و دمای گاز خروجی دودکش استفاده می‌شود.

جدول (۳): مشخصات دودکش‌های صنایع در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس

ردیف	کارخانه	تعداد دودکش	ارتفاع دودکش (m)	دمای گاز خروجی (c)	قطر دودکش (cm)	سرعت گاز خروجی (m/s)
۱	فولاد هرمزگان	۴	۳۰ تا ۴۰	۲۷۷	۲۵۰	۹
۲	فولاد کاوه جنوب کیش	۲	۳۷ تا ۴۱	۳۲۰	۲۳۵ تا ۴۵۰	-
۳	صبا فولاد خلیج فارس	۱	۴۵	۱۶۱	۴۸۵	۰/۷
۴	روی بندرعباس	۱	۱۲	۵۵/۵	۸۰	۳/۲۸
۵	شرکت نفت ستاره خلیج فارس	۲۷	۵۲	۲۱ تا ۴۹۰	-	-
۶	پالایشگاه نفت بندرعباس	۲۴	۴۰ تا ۷۶	۲۳۶	۱۵۰ تا ۴۱۲	۲۰/۵ تا ۵/۷۸
۷	فومن شیمی گستر	۱	۳۰	۲۵۵	۲۵۰	۳/۵

## نتایج

خاورمیانه همچون ربع‌الخالی و صحرای سوریه و اردن به دریای خلیج فارس می‌رسد و با تزریق رطوبت به این بادهای خشک به سمت سواحل شمالی خلیج فارس جریان یافته که در برخورد با رشته‌کوه‌های زاگرس که موازی با نوار ساحلی خلیج فارس است، از سرعت آن کاسته شده و آرام می‌شود. به‌همین دلیل بادهای غربی و جنوب غربی، درصد کمتری از بادهای بندرعباس را شامل می‌شود.

بررسی شرایط و آرونگی‌های دمایی در مقیاس ماهانه

گلباد سالانه شهر بندرعباس بیان‌گر غالب بودن بادهای شرقی و جنوب شرقی است که با عبور از دریای عمان و خلیج فارس، باعث وزش بادهای گرم و مرطوب در بندرعباس می‌شود (شکل ۲). فعالیت سیستم کم‌فشار حرارتی در دریای عمان و اقیانوس هند طی دوره گرم سال، باعث تشکیل بادهای جنوب شرقی در بندرعباس می‌شود. در زمستان، بادهای نظام‌مند غربی با عبور از بیابان‌های



شکل (۲): گلباد سالانه منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس - بندرعباس

در این لایه مرزی، اتمسفر حرکت ایستا و سکونی داشته که از اختلاط هوا جلوگیری نموده و موجب تجمع آلاینده‌های هوا می‌شود (جدول ۴). با اوج گرفتن دمای هوا و گرمایش اتمسفر منطقه، ارتفاع لایه مرزی نیز بیشتر شده و به بیش از ۵۰۰ متر می‌رسد. اختلاف ارتفاع پایه و رأس لایه وارونگی نشان دهنده ضخامت لایه مرزی است که در ماه‌های سرد، ضخامت آن به کمتر از ۲۰۰ متر می‌رسد و آلاینده‌ها در این بسته هوا تجمع یافته و میزان اختلاط آنها به حداقل کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، درصد وقوع پدیده وارونگی دمایی در دی و بهمن‌ماه به بیش از ۹۰ درصد روزهای این ماه‌ها می‌رسد که نشان می‌دهد به‌دلیل شرایط جوی در این ماه‌ها و استقرار لایه وارونگی در سطح زمین، امکان بالا رفتن غلظت آلاینده‌های هوا در اتمسفر نزدیک به سطح زمین بسیار زیاد است.

مشخصات ارتفاعی، دمایی و فشاری لایه وارونگی دمایی در مقیاس سالانه نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در سال به‌طور میانگین حدود ۲۵۰ پدیده وارونگی دمایی در غرب بندرعباس اتفاق می‌افتد که ۱۵۷/۴ پدیده آن از نوع تابشی و ۹۳/۴ مورد آن نیز فرونشینی می‌باشد. انواع مختلف وارونگی نقش‌های متفاوتی در آلودگی هوای منطقه دارند، به‌گونه‌ای که وارونگی تابشی به‌دلیل ارتفاع پایین آن و نزدیکی به سطح زمین، تأثیر زیادی در تجمع آلاینده‌های هوا در سطح زمین دارد، اما در وارونگی فرونشینی که عمدتاً ناشی از استقرار سیستم‌های پرفشار در

نشان داد که بیشترین وقوع وارونگی در ماه‌های سرد سال در زمستان اتفاق می‌افتد که بیشینه‌ی آن با میانگین ۲۸ روز در دی‌ماه بوده و پس از آن بهمن‌ماه و اردیبهشت‌ماه در رتبه‌های بعدی قرار دارند. ارتفاع پایه‌ی لایه وارونگی که نقش مهمی در پایداری هوا و تشدید آلودگی هوای سطحی منطقه دارد، در زمستان به‌ویژه دی‌ماه به حداقل رسیده و به‌طور میانگین در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد؛ اما با گرم‌شدن اتمسفر منطقه در اوایل فروردین‌ماه، پایه‌ی لایه وارونگی از سطح زمین جدا شده و به ارتفاعات بیش از ۱۰۰ متر صعود می‌کند. با توجه به این‌که ارتفاع دودکش صنایع در غرب بندرعباس بین ۴۰ تا ۱۰۰ متر است، وارونگی دمایی تا فروردین‌ماه نیز تأثیر منفی بر پخش آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع دارد. با گرمایش شدید هوا در خردادماه که تا شهریورماه ادامه دارد، ارتفاع پایه لایه وارونگی به بیش از ۲۰۰ متر رسیده و نمی‌تواند نقش زیادی در تجمع آلاینده‌های منتشره از دودکش صنایع در آلودگی محیط‌زیست داشته باشد. مجدداً با سرمایه‌های هوا و سیر نزولی دمای هوا، پایه لایه وارونگی نیز نزول نموده و در ارتفاع کمتر از ۲۰۰ متر مستقر می‌شود. بنابراین در ماه‌های سرد سال، پایه لایه وارونگی در ارتفاع کمتر از ۲۰۰ متر از سطح زمین بوده و در تشدید آلودگی هوا و نحوه‌ی پراکنش غلظت آلاینده‌ها نقش به‌سزایی دارد. ارتفاع رأس لایه وارونگی نیز در پراکنش آلاینده‌های هوا نقش دارد که در ماه‌های سرد به‌ویژه در زمستان بندرعباس، ارتفاع آن به کمتر از ۲۵۰ متر می‌رسد و

شده و نقش زیادی در تأثیر آلودگی هوا بر محیط‌زیست نخواهد داشت (جدول ۵).

سطوح میانی جو و فرونشینی دینامیکی هوا می‌باشد و در سطح زمین بسته هوای گرم موجب صعود هوای سطحی می‌شود، لایه وارونگی در ارتفاع بیش از ۲۰۰ متر تشکیل

جدول (۴): ویژگی ساختاری لایه وارونگی دمایی در بندرعباس در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

ماه	میانگین در ماه (روز)	متوسط ارتفاع پایه (متر)	متوسط ارتفاع رأس (متر)	متوسط ضخامت (متر)	وقوع روزهای اینورژنی (درصد)
Jan	دی	۲۸	۱۰	۱۴۶	۹۳
Feb	بهمن	۲۶	۱۳	۲۰۰	۹۱
Mar	اسفند	۱۶	۴۵	۲۳۷	۵۳
Apr	فروردین	۲۲	۱۱۲	۳۸۰	۷۳
May	اردیبهشت	۲۳	۱۹۴	۵۸۰	۷۶
Jun	خرداد	۲۱	۲۳۶	۵۲۸	۷۰
Jul	تیر	۱۳	۳۱۹	۶۶۱	۴۴
Aug	مرداد	۱۱	۳۵۰	۵۵۶	۳۷
Sep	شهریور	۱۷	۴۰۸	۶۴۱	۵۷
Oct	مهر	۱۹	۱۶۴	۳۸۲	۶۴
Nov	آبان	۱۶	۳۷	۲۰۵	۵۴
Dec	آذر	۱۵	۱۳۸	۳۵۲	۵۰

جدول (۵): مشخصات آماری لایه وارونگی دمایی در بندرعباس در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

مشخصات	مقیاس	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	واریانس	ضریب تغییرات
مجموع وارونگی	تعداد وارونگی	۲۵۰/۸	۲۹۷	۲۰۰	۳۳/۳	۱۹۱	۱۳/۳
وارونگی تابشی	تعداد وارونگی	۱۵۷/۴	۱۸۴	۱۲۲	۲۰/۲	۵۱۱	۱۲/۸
وارونگی فرونشینی	تعداد وارونگی	۹۳/۴	۱۷۵	۴۵	۴۷	۲۷۷۰	۵۰/۴
ارتفاع پایه وارونگی	متر	۱۵۶/۶	۱۸۵	۱۲۷	۲۱/۹	۶۰۴	۱۴
ارتفاع رأس وارونگی	متر	۴۱۹/۸	۴۷۱	۳۸۵	۳۰	۱۱۲۹	۷
ضخامت ارتفاعی وارونگی	متر	۲۶۲/۸	۲۸۶	۲۳۱	۲۰/۷	۵۳۵	۷/۸
دمای پایه وارونگی	سانتی‌گراد	۲۳/۲	۳۳/۳	۶/۷	۶/۱	۳۵	۲۶/۳
دمای رأس وارونگی	سانتی‌گراد	۲۷/۸	۳۷/۶	۱۲/۸	۶	۳۷	۲۱/۹
ضخامت دمایی وارونگی	سانتی‌گراد	۴/۶	۱۲/۲	۱	۲/۲	۴/۶	۴۶/۸
فشار پایه وارونگی	میلی‌بار	۹۸۸	۱۰۲۳	۸۸۲	۳۱	۹۷۶	۳
فشار رأس وارونگی	میلی‌بار	۹۶۳	۱۰۱۹	۸۳۰	۳۹	۱۵۳۵	۴
ضخامت فشاری وارونگی	میلی‌بار	۲۵	۹۱	۲	۱۹	۳۷۱	۷۷

ماه‌های سرد سال نسبت به ماه‌های گرم بیشتر است؛ به‌گونه‌ای که میانگین وارونگی‌های دمایی اسفندماه در طبقه‌ی شدید قرار دارد. در دیگر ماه‌های سرد نیز شدت وارونگی اغلب متوسط بوده و نسبت به ماه‌های گرم، فراوانی آن بیشتر است (جداول ۶ و ۷).

درصد فراوانی شدت وارونگی‌های دما در مقیاس ماهانه بررسی شده که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین درصد فراوانی مربوط به وارونگی‌های ضعیف است که اغلب در نیمه‌ی گرم سال بوده است. وارونگی‌های شدید و بسیار شدید اگرچه کمترین درصد فراوانی را داشته است، اما فراوانی آنها در

جدول (۶): درصد فراوانی شدت وارونگی‌های بندرعباس در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

طبقه شدت	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	میانگین درصد فراوانی
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	
ضعیف	۳۳	۶۱	۶۹	۷۳	۶۸	۶۶	۶۴	۳۹	۳۵	۳۹	۳۸	۳۰	۵۱/۲
متوسط	۴۹	۳۶	۲۸	۲۷	۳۰	۲۹	۲۶	۵۱	۴۸	۴۱	۴۶	۴۴	۳۷/۹
شدید	۱۳	۳	۳	۰	۲	۵	۸	۷	۱۱	۹	۱۴	۱۸	۷/۷
بسیار شدید	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۳	۶	۱۱	۲	۸	۳

جدول (۷): میانگین ماهانه شدت وارونگی‌های بندرعباس در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سال
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	
شدت	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۷	۰/۰۲۳	۰/۰۱۷
اینورژن	متوسط	متوسط	ضعیف	ضعیف	ضعیف	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	شدید	متوسط

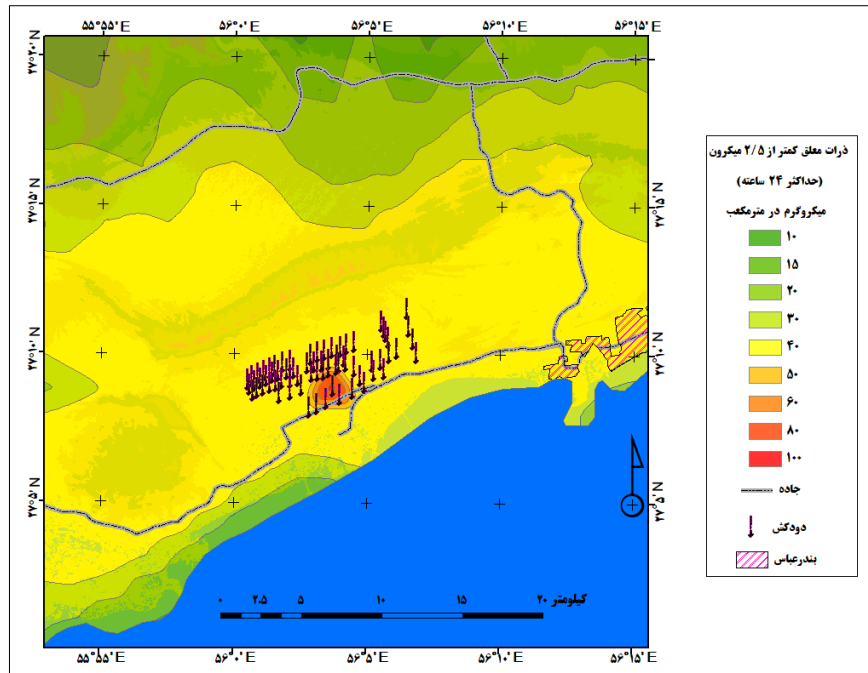
### پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع ذرات معلق

ذرات معلق حاصل از دودکش صنایع، تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی دودکش صنایع، دما و سرعت گاز خروجی، شرایط جوی و توپوگرافی محل بوده که پس از مدت زمانی بسته به شرایط جوی، بر سطح زمین رسوب می‌نماید. این ذرات که اغلب از کربن سوخته تشکیل شده‌اند، بسیار سمی بوده و با فعل و انفعال با ترکیبات شیمیایی و فیزیکی اتمسفر، باعث تشکیل آلاینده‌های دیگری نیز می‌شود. غلظت استاندارد هوای پاک ایران برای ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون، حداکثر ۲۴ ساعته حدود ۳۴ میکروگرم در مترمکعب است که اگر از این آستانه فراتر رود، خطر زیستی آن بالا رفته و بر محیط میزبان اثر منفی خواهد گذاشت. نتایج پیش‌بینی غلظت ذرات خروجی از ۶۰ دودکش صنایع غرب بندرعباس در شعاع ۲۰ کیلومتری نشان داد که ذرات معلق تحت تأثیر بادهای غالب و توپوگرافی محل می‌باشد. دامنه‌ی غلظت ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکروگرم در مترمکعب است که بیشینه‌ی آن در

اطراف دودکش‌ها و اتمسفر بالای ناحیه صنعتی بوده که غلظت ۲۴ ساعته آن به بیش از ۶۰ میکروگرم در مترمکعب می‌رسد. بیشترین پهنه مربوط به غلظت ۴۰ میکروگرم در مترمکعب است که بخش وسیعی از منطقه را در بر گرفته است و از حد استاندارد نیز فراتر رفته است. مسیر بادهای غالب جنوب شرقی باعث شده تا ذرات معلق خروجی از دودکش صنایع به سمت شمال غربی جریان یابد، اما پس از طی مسافتی حدود ۱۰ کیلومتر، ارتفاعات شمالی منطقه باعث تجمع ذرات معلق در نواحی پایکوهی شده و پس از آن غلظت ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون به کمتر از حد استاندارد (۳۴ میکروگرم در مترمکعب) می‌رسد (شکل ۳). شهر بندرعباس در کیلومتر ۱۳ بخش شرقی منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس، در دامنه غلظت ۳۰ تا ۴۰ میکروگرم در مترمکعب قرار دارد و با توجه به انتشار ذرات معلق خروجی از آگزوز خودروهای شهری و جاده‌ای و اضافه شدن آن به ذرات خروجی از دودکش صنایع، امکان بیشتر شدن ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون در اتمسفری شهری بندرعباس وجود دارد. از طرف دیگر، نتایج سرشماری آمار

جانی آنها در خطر ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون قرار دارد که سرعت ته‌نشینی بسیار بالایی در سیستم تنفسی انسان و سایر موجودات زنده دارد.

نفوس و مسکن نشان داده که حدود ۱۰۰ هزار نفر در روستاهای نزدیک سایت منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس سکونت دارند که نتایج این مدل‌سازی نشان داد که سلامت



شکل (۳): پراکنش ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس

غلظت ۴۰ میکروگرم در مترمکعب است که کل منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس و شهر بندرعباس را در بر گرفته است. مسیر بادهای جنوب‌شرقی باعث شده تا ذرات معلق به سمت نواحی شمال‌غربی انتقال یابند.

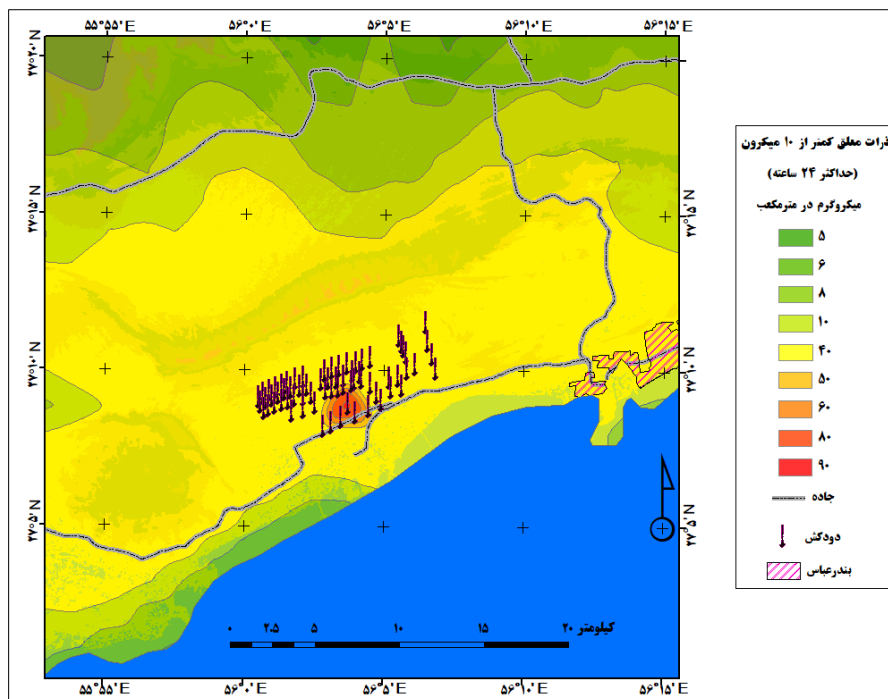
### گاز مونوکسیدکربن

گازهای مختلفی از دودکش صنایع انتشار می‌یابد که یکی از این گازها، مونوکسیدکربن است. گازی بی‌بو و بی‌رنگی است که از سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی تولید شده و در جو منتشر می‌شود. استاندارد غلظت حداکثر یک‌ساعته این گاز، ۴۰ هزار میکروگرم در مترمکعب است، اما نتایج پیش‌بینی غلظت این گاز با مدل ایرمود در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس بیان‌گر این است که غلظت آن کمتر از ۲ هزار میکروگرم در مترمکعب است که بسیار پایین‌تر از حد استاندارد آن می‌باشد. در نحوه‌ی پراکنش گاز

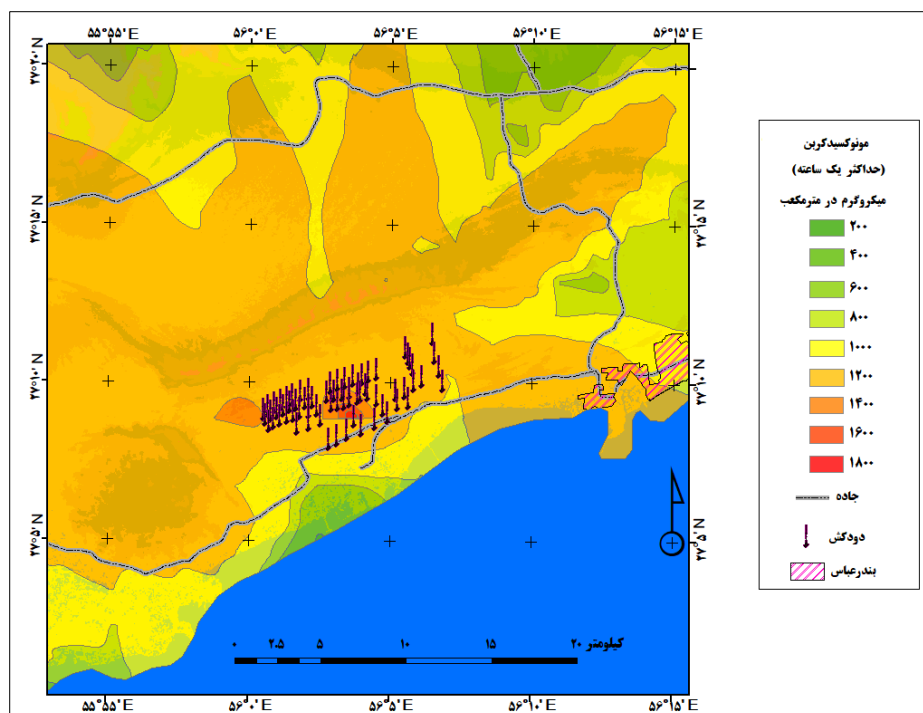
ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون اگرچه تأثیر کمتری نسبت به ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون بر سلامت محیط‌زیست دارد، اما نباید نادیده گرفت که این ذرات از سرعت رسوبی بیشتری برخوردار بوده که در ترکیب با قطرات مه سطحی ناشی از وارونگی دمایی می‌تواند اکوسیستم‌های ضعیف منطقه را تحت تأثیر قرار دهد. حد استاندارد غلظت ذرات کمتر از ۱۰ میکرون در مقیاس حداکثر ۲۴ ساعته حدود ۱۵۰ میکروگرم در مترمکعب است، اما نتایج مدل‌سازی این ذرات در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس بیان‌گر غلظت پایین آن است و دامنه‌ی آن بین ۵ تا ۹۰ میکروگرم در مترمکعب است (شکل ۴). حد بیشینه‌ی آن در مجاورت دودکش‌ها بوده و کمترین حد غلظت پیش‌بینی شده ذرات نیز در نواحی کوهستانی شمال محدوده مورد مطالعه در شعاع ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری از دودکش‌ها می‌باشد. بیشترین پهنه مربوط به

سمت نواحی شمالی شده است (شکل ۵). بیشترین پهنه مربوط به غلظت ۱۲۰۰ میکروگرم در مترمکعب است که به سوی بندرعباس در شرق ناحیه نیز کشیده شده است.

مونوکسیدکربن مسیر بادهای غالب نقش مهمی داشته و باعث شده تا گاز خروجی از دودکش صنایع به سمت شمال انتشار یابد، اما نوار کوهستان شمالی نقش زیادی در پراکنش این گاز دارد و منجر به شعاعی شدن گاز مونوکسیدکربن به



شکل (۴): پراکنش ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس



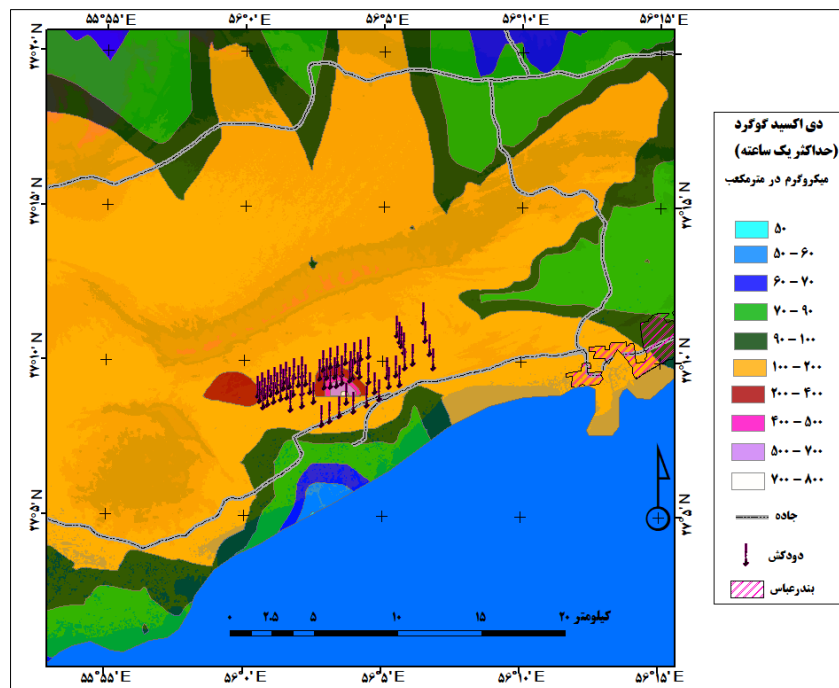
شکل (۵): پراکنش گاز مونوکسیدکربن در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس



این گاز در شعاع ۲۰ کیلومتری از صنایع غرب بندرعباس بیان‌گر این است که غلظت آن در هوای مجاور دودکش‌ها فراتر از حد استاندارد بوده و بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ میکروگرم در مترمکعب پیش‌بینی گردید. با فاصله از صنایع، غلظت این گاز کاهش یافته و به کمتر از ۲۰۰ میکروگرم در مترمکعب می‌رسد. بیش از ۶۰ درصد از محدوده مورد مطالعه در گستره‌ی ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروگرم در مترمکعب قرار دارد که تحت تأثیر بادهای غالب و توپوگرافی محل، به سمت شمال‌غربی، شمالی و شمال‌شرقی کشیده شده است (شکل ۶). بنابراین، اتمسفر منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس به دلیل تعداد زیاد دودکش‌ها، غلظت بالای گاز دی‌اکسیدگوگرد را دارد که این گاز در ترکیب با دیگر آلاینده‌ها می‌تواند اکوسیستم منطقه را با خطر آلودگی مواجه سازد.

## گاز دی‌اکسیدگوگرد

دی‌اکسید گوگرد، گازی بی‌رنگ، غیرآتش‌زا و بی‌بو است که در غلظت‌های پایین در اتمسفر دیده می‌شود. افزایش غلظت این آلاینده بر حس چشایی اثر گذاشته و بوی بدی انتشار می‌دهد. احتراق سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی یکی از راه‌های انتشار این آلاینده است که در مجتمع صنایع نیز پس از احتراق در کارخانه‌ها و موتور خودروها، از دودکش صنایع انتشار می‌یابد. دی‌اکسیدگوگرد حاصل از احتراق بوده و از دودکش کوره‌های صنایع به اتمسفر انتشار یافته و در ترکیب با بخار آب باعث تشکیل اسیدسولفوریک شده که خطر زیست‌محیطی زیادی دارد. حد استاندارد یک‌ساعته این گاز ۱۹۶ میکروگرم در مترمکعب است که اگر در منطقه‌ای غلظت آن از حد آستانه فراتر رود، می‌تواند بر محیط‌زیست منطقه میزبان آسیب وارد کند. نتایج پیش‌بینی



شکل (۶): پراکنش گاز دی‌اکسیدگوگرد در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس

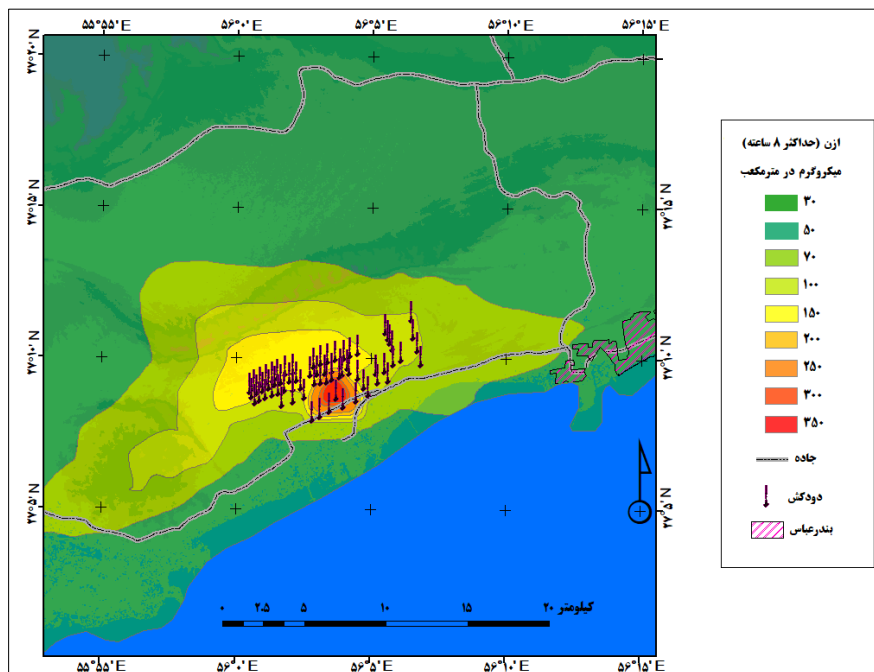
توسط منبعی به محیط منتشر نمی‌شود، بلکه به وسیله واکنش‌های موجود بین آلاینده‌های اتمسفر تولید می‌شود و به همین علت، این آلاینده را از نوع ثانویه می‌نامند. آلاینده‌های اولیه‌ای که در شکل‌گیری ازن شرکت دارند،

## گاز ازن

ازن در اثر واکنش‌های فتوشیمیایی بین هیدروکربن‌های خروجی از صنایع و اکسیدهای نیتروژن در اتمسفر به وجود می‌آید و محرک چشم، گلو و ریه است. این آلاینده اساساً

بیش از حد آستانه می‌باشد، در نواحی دودکش صنایع قرار دارند که با فاصله از صنایع، غلظت این گاز به کمتر از ۱۵۰ میکروگرم در مترمکعب می‌رسد. بیشترین پهنه مربوط به غلظت ۳۰ تا میکروگرم در مترمکعب است که این نواحی در خارج از ناحیه صنعتی و مسیر بادهای غالب قرار دارد (شکل ۷).

اکسیدهای نیتروژن و مجموع هیدروکربن‌ها می‌باشند. مدل ایرمود قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی گاز ازن را دارد که در این پژوهش غلظت ۸ ساعته آن در شعاع ۲۰ کیلومتری از صنایع غرب بندرعباس محاسبه گردید. حد استاندارد غلظت ۸ ساعته آن ۱۴۸ میکروگرم در مترمکعب است، اما غلظت این گاز در محدوده مورد مطالعه بین ۳۰ تا ۳۵۰ میکروگرم در مترمکعب پیش‌بینی شد. مناطقی که غلظت گاز ازن در آن



شکل (۷): پراکنش گاز ازن در شعاع ۲۰ کیلومتری از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس

خورشید به وسیله دریای خلیج فارس، به همراه کاهش سرعت باد باعث وقوع وارونگی تابشی در زمستان شده که پایه‌ی لایه وارونگی در نزدیکی سطح زمین قرار می‌گیرد (امیری و طباطبایی، ۱۳۹۹)؛ اما در تابستان، فرونشست دینامیکی هوای گرم از لایه تروپوپاز به واسطه سیستم پُرفشار جنب‌حاره باعث تشکیل وارونگی فرونشینی در بندرعباس می‌شود. افزایش سرعت باد و ناپایداری حرارتی سطح زمین در فصل تابستان، باعث برهم زدن پایداری هوا در اتمسفر نزدیک به سطح زمین شده و لایه وارونگی تابشی در تابستان را از بین می‌برد. این شرایط جوی باعث شده تا ارتفاع پایه لایه وارونگی در فصل گرما به ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر برسد. در

## بحث و نتیجه‌گیری

بررسی شرایط هواشناسی سطح زمین و فراسنج‌های جوی در تراز میانی اتمسفر بندرعباس طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بیان‌گر این است که در بندرعباس حدود ۲۵۰ روز از سال، وارونگی دمایی اتفاق می‌افتد که حدود ۶۳ درصد آن وارونگی تابشی و ۱۷ درصد از نوع فرونشینی می‌باشد. تفکیک وارونگی فرونشینی و تابشی نیز بر مبنای تفاوت ارتفاع پایه‌ی لایه وارونگی محاسبه گردید (Lee, 1989). تعداد وارونگی‌های دمایی در فصل زمستان و بهار بیشتر از تابستان و پاییز است و اوج آن در زمستان اتفاق افتاده است. سردی هوا به دلیل افزایش تابش زمینتاب و جذب انرژی

بالا می‌باشد (Kim et al., 2020). ارتفاع دودکش صنایع تا ۱۰۰ متر می‌رسد و خروج آلاینده‌ها از دودکش تا ارتفاع ۲۰ متری از دهانه‌ی دودکش نیز می‌رسد که جمعاً ۱۲۰ متر می‌شود و در این ارتفاع، دود خروجی از دودکش تحت تأثیر شرایط جوی و فعل‌وانفعالات دینامیکی بسته‌ی هوا قرار می‌گیرد (Jain, 2013). در نیمه‌ی سرد سال که لایه مرزی وارونگی در بازه‌ی ارتفاعی ۱۰ تا ۲۵۰ متر از سطح زمین قرار دارد، می‌تواند در کنش‌ها و دینامیک جریان دود اثر مستقیمی داشته باشد (Clochard et al., 2010). در این دوره‌ی سرد، عمق اختلاط و میزان اختلاط همرفتی و تلاطم به‌دلیل ایستا بودن لایه زیرین جو بسیار پایین است که موجب تجمع دود در نزدیکی سطح زمین می‌شود (Murchek, 2021). به‌طورکلی، خروج دود از دودکش تحت تأثیر شرایط اتمسفری و توپولوژی سطحی قرار دارد که جهت و مسیر دود را باد غالب تعیین می‌کند، اما پراکنش آن تحت تأثیر وارونگی‌های دمایی قرار دارد. خطرناک‌ترین نوع خروج دود از دودکش‌ها، ستون دود بادبزی است که در آن نرخ‌های کاهش به شدت منفی بوده و یک لایه وارونگی قوی در اطراف دهانه دودکش شکل می‌گیرد. اتمسفر به‌شدت پایدار و تلاطم مکانیکی متوقف شده و عمق اختلاط به حداقل کاهش می‌یابد (Filband and Riahi, 2021). با توجه به این‌که دودکش‌های موجود در ناحیه صنعتی غرب بندرعباس در ارتفاع کمتر از ۱۰۰ متر هستند، وارونگی‌های تابشی سرد سال که در ارتفاع ۱۰ تا ۲۵۰ متر قرار دارد، موجب تشکیل ستون دود بادبزی می‌شود که در آن دود به سمت زمین و اتمسفر پایین‌تر از دهانه دودکش جریان می‌یابد و در این شرایط محیط‌زیست با خطر آلودگی مواجه می‌شود. در ماه‌های گرم سال که لایه وارونگی بسیار بالاتر از دهانه دودکش‌های ناحیه صنعتی غرب بندرعباس بوده و در سطح زمین نیز تلاطم و حداکثر عمق اختلاط به‌وجود می‌آید، ستون دود بالارونده و ستون دود حلقه‌ای تشکیل می‌شود که باعث رقیق شدن اتمسفر سطح زمین از دوده‌های خروجی از دودکش صنایع می‌شود و این شرایط نمی‌تواند تأثیر جدی بر

دشت خوزستان نیز وارونگی‌های فرونشینی در تابستان ناشی از پُرفشار جنب حاره آזור و وارونگی‌های تابشی در زمستان اتفاق می‌افتد که ناشی از بازتابش حرارتی سطح زمین در شب و تشکیل لایه وارونگی در سطح زمین می‌باشد (عظیمی، ۱۳۸۷). این فرآیند در دشت مشهد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۳) و تهران (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴) نیز اتفاق می‌افتد که وارونگی‌های دمایی تحت تأثیر پایداری و ناپایداری هوای سطحی و تراز میانی جو می‌باشد. در شب‌های سرد سال، هوای خشک و بیابانی منطقه بندرعباس که خالی از پوشش گیاهی می‌باشد، موجب بازتاب انرژی حرارتی شده که در ساعات گرم روز کسب نموده است و در سطح زمین هوای سرد ساکن می‌شود. گرمای بازتاب یافته به ارتفاعات بالاتر صعود می‌نماید و از طرف دیگر نسیم گرم دریای خلیج فارس با حرکت به سمت خشکی بندرعباس، با لایه‌ی سرد زیرین برخورد نموده و به ارتفاعات بالاتر رانده می‌شود. رطوبت دریا در برخورد با هوای سرد سطحی، به مرحله‌ی اشباع و میعان رسیده و موجب تشکیل قطرات مه زمینی در نزدیکی سطح زمین می‌شود که این شرایط در اوایل صبحگاه ناحیه صنعتی غرب بندرعباس به‌وضوح آشکار است. لایه‌ی وارونگی در سطح زمین تا ارتفاع ۲۰۰ متر، موجب پایداری و سکون هوا شده و در بالاتر از این ارتفاع، هوای گرم به صعود خود ادامه می‌دهد که نقشی در پراکنش و رقیق‌سازی هوای آلوده‌ی ناحیه صنعتی ندارد؛ اما لایه وارونگی با قطرات مه صبحگاهی موجب تغلیظ آلودگی هوای سطحی منطقه شده که ترکیب آلاینده‌های منتشر شده از صنایع در ترکیب با قطرات مه، باعث تشکیل اسیدهای نیتریک و سولفوریک و دیگر آلاینده‌های ثانویه می‌شود (Saxena and Sonwani, 2019). در نیمه‌ی گرم سال، اگرچه لایه وارونگی دمایی در اتمسفر منطقه به‌وجود می‌آید، اما ارتفاع پایه این لایه به بیش از ۳۰۰ متر می‌رسد و تا ۷۰۰ متری از سطح زمین ادامه می‌یابد که دلیل اصلی فاصله گرفتن پایه لایه وارونگی نیز سیستم کم‌فشار حرارتی سطح زمین و صعود هوای گرم به ارتفاعات

(شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). آلاینده‌های خروجی از ۶۰ دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس تحت تأثیر بادهای جنوب‌شرقی بوده که از سمت دریا می‌وزد. این هوای مرطوب تحت شرایط وارونگی تابشی و پایداری هوا توان شناوری و افزایش میزان عمق اختلاط از نوع تلاطم و همرفت را ندارد. بنابراین به ناچار بادهای مرطوب شرقی، ستون دود خروجی از دودکش‌ها را در جهت افقی به صورت بادبزنی به سمت شمال‌غربی و شمال منطقه انتقال می‌دهد. پس از جریان یافتن ستون دود به سمت شمال و شمال‌غربی در ۵ کیلومتر از منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس، به ارتفاعات ۴۵۰ متری برخورد نموده و در این ناحیه تجمع می‌یابد. اما این بدان معنی نیست که دود از ناحیه صنعتی خارج شده است، بلکه حداکثر غلظت آلاینده‌ها در حوالی دودکش و سایت ناحیه صنعتی قرار دارد. شهر بندرعباس در بخش شرقی منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس قرار دارد و مسیر بادهای جنوب‌شرقی و جنوبی باعث شده تا دودهای غلیظ به سمت سکونتگاه شهری بندرعباس حرکت نکنند؛ اما به دلیل شرایط پُرتراپیک بزرگراه شهیدرجایی و تجمع صنایع و همچنین وجود روستاهای متعدد در مجاور ناحیه صنعتی، نمی‌توان به مسیر باد اکتفا نمود و از آلودگی تردد خودروها و انبار فله‌ی مواد فلزی- معدنی چشم‌پوشی کرد.

پیش‌بینی غلظت گازها و ذرات معلق خروجی از دودکش صنایع نشان داد که غلظت حداکثر ۲۴ ساعته ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون، حداکثر یک‌ساعته گاز دی‌اکسیدگوگرد و حداکثر هشت‌ساعته گاز ازن در منطقه مورد مطالعه بیشتر از حد استاندارد آن می‌باشد. ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون تا شعاع ۲۰ کیلومتر به سمت شرق و غرب و ۱۵ کیلومتر به سمت شمال از دودکش‌ها، بیشتر از حد استاندارد بوده که با توجه به رسوب آن در سیستم تنفسی موجودات زنده، محیط‌زیست را با خطر جدی مواجه می‌سازد. در کارخانه سیمان جنوب تهران، ذرات معلق حداکثر تا شعاع ۵ کیلومتری انتشار یافته، اما غلظت آن کمتر

محیط‌زیست منطقه وارد نماید (Dvorak et al., 2018). شدت وارونگی‌های دمایی که تحت تأثیر ضخامت، عمق و اختلاف دمایی پایه و رأس لایه وارونگی می‌باشد، نقش به‌سزایی در شدت آلودگی هوای محیطی دارد و نحوه‌ی پراکنش گازها و ذرات خروجی از دودکش صنایع دارد. در این مطالعه نشان داده شد که در ماه‌های سرد سال به‌ویژه در دی‌ماه تا اسفندماه، شدت وارونگی افزایش یافته و نقش آن در آلودگی هوای منطقه حائز اهمیت است. در دشت تبریز نیز شدت وارونگی‌های دمایی در زمستان بیشتر از تابستان بوده (جهانبخش اصل و روشنی، ۱۳۹۲) و به‌طورکلی با سردی اتمسفر منطقه، شدت وارونگی‌های دمایی نیز افزایش می‌یابد (Ali et al., 2018). با توجه به این‌که وارونگی تابشی و شدت آن در نیمه‌ی سرد سال در تغلیظ آلودگی هوای محیطی و نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌ها و ستون دود خروجی از دودکش صنایع غرب بندرعباس بسیار بیشتر و خطرناک‌تر از وارونگی‌های فرونشینی و ضعیف دوره‌ی گرم سال می‌باشد، در مطالعه حاضر به پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در غرب بندرعباس پرداخته شد.

نتایج بررسی مدل ایرمود در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا در شعاع ۲۰ کیلومتری نشان داد که لایه‌ی مرزی جو، حداکثر عمق اختلاط، وارونگی دمایی، سمت بادهای غالب و توپوگرافی محل، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در پیش‌بینی پراکنش آلودگی هوا می‌باشند (Jiang et al., 2021). مدل ایرمود یکی از مدل‌های گوسی بوده که با الگوریتم‌ها و توابع ریاضی، از پارامترهای محیطی به‌همراه مشخصات دودکش صنایع، برای پیش‌بینی آلاینده‌ها استفاده می‌نماید (ul Haq et al., 2019). نتایج این مدل در آلودگی هوای ناحیه صنعتی غرب بندرعباس بیان‌گر این بود که بادهای غالب و توپوگرافی محل، بیشترین تأثیر را در نحوه‌ی پخش و پراکنش آلاینده‌ها دارند؛ در کارخانه سیمان ایلام (نورپور و کاظمی شهابی، ۱۳۹۴) و جنوب تهران نیز بادهای غالب مهم‌ترین عامل در نحوه‌ی پراکنش ذرات معلق می‌باشد

برای پیش‌بینی آلاینده‌های خروجی از ۶۰ دودکش صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس تا شعاع ۲۰ کیلومتری برای روزهای وارونگی دمایی در نیمه‌ی سرد سال استفاده گردید. نتایج حاکی از این است که مسیر بادهای غالب منطقه که جنوبی و جنوب‌شرقی است، بیشترین نقش را در پراکنش آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع دارد. غلظت ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون، دی‌اکسید گوگرد و ازن بیشتر از حد استاندارد جهانی آنها بود. تجاوز غلظت آلاینده‌ها از حد استاندارد عمدتاً در ناحیه صنعتی و به‌صورت شعاعی تا ۱۰ کیلومتر به سمت شمال، ۱۵ کیلومتر به سمت شمال‌غربی و در مواقع محدودی تا ۲۰ کیلومتر به سمت شرق و غرب کشیده شده بود. به‌طور کلی، غلظت آلاینده‌های جوی در غرب بندرعباس از حد استاندارد آن بیشتر است و ریسک خطرپذیری اکوسیستم‌های آن با این شرایط قابل کنترل نیست.

اگرچه در این مطالعه، غلظت آلاینده‌های اصلی که از دودکش‌های صنایع غرب بندرعباس منتشر می‌شود، در شعاع ۲۰ کیلومتری با مدل پلوم گوسی ایرمود شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردید و مبتنی بر شاخص کیفیت هوا، آلودگی منطقه بررسی گردید؛ اما تاکنون شاخص کیفیت هوا برای تمام آلاینده‌های منتشره تعریف نشده است و تنها آلاینده‌های اصلی را در بر می‌گیرد. از طرف دیگر، مدل ایرمود قادر به مدل‌سازی آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن، ذرات معلق ازن و سرب می‌باشد؛ در صورتی که آلاینده‌های دودکش منابع فرآیندی شامل فتالیک انیدرید، مالئک انیدرید، تولوئن دی‌ایزو سیانات، اتیلن اکساید، اتیل بنزن، استایرن، ترکیبات آروماتیک، پارافین، استن و دیگر آلاینده‌ها در مدل ایرمود قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. درحالی که این آلاینده‌ها اثرات شدیدی بر محیط‌زیست منطقه به‌ویژه جامعه و سلامت انسان، اکولوژی‌های مختلف گیاهی و جانوری می‌گذارد. ترکیب این آلاینده‌ها در هوای محیطی منطقه، موجب تشکیل آلاینده‌های ثانویه متعددی می‌شود و از طرف دیگر، ته‌نشینی

از حد استاندارد آن می‌باشد (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴)، در ایلام به‌واسطه‌ی توپوگرافی محل و بادهای غالب منطقه، بیشینه غلظت ذرات معلق در شعاع ۹ کیلومتری شرقی و ۵ کیلومتری شمالی مشاهده می‌شود (نورپور و کاظمی شهابی، ۱۳۹۴). گاز دی‌اکسید گوگرد یکی دیگر از گازهای سمی خروجی از دودکش صنایع می‌باشد که تحت شرایط وارونگی تابشی و وجود قطرات مه صبحگاهی، موجب تشکیل اسید سولفوریک می‌شود. غلظت این گاز در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس بیشتر از حد استاندارد آن بوده که بیشینه‌ی آن در مجاورت دودکش صنایع مشاهده گردید و به‌صورت شعاعی به سمت شمال، شرقی و غرب نیز غلظت بیش از حد استاندارد آن کشیده شده است و بندرعباس نیز از این گاز سمی مصون نیست و غلظت این گاز در بندرعباس ناشی از دودکش صنایع از حد آستانه فراتر رفته است که در داراب نیز به‌واسطه‌ی صنعت فولاد سپید فاراب کویر، غلظت آن بیشتر از حد استاندارد گزارش شد (Arani et al., 2021). در مسیر رهیافت توسعه پایدار، بهره‌برداری از منابع طبیعی و ایجاد اشتغال برای مردم منطقه از طریق حفاظت از محیط‌زیست و صیانت از منابع طبیعی قابل دستیابی است. صنایع مستقر در منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس بر وضعیت اقتصادی بندرعباس و استان هرمزگان و حتی اقتصاد کشور ایران تأثیر مثبتی داشته و کالاهای فلزی- معدنی و انرژی کشور را تأمین می‌نماید، اما بر محیط‌زیست منطقه و اکوسیستم‌های فعال آن آسیب می‌زند. یکی از راه‌های تخریب محیط‌زیست، انتشار آلاینده‌ها بوده که از طریق دودکش صنایع وارد محیط می‌شود. سنجش آلاینده‌های جوی که از طریق دودکش صنایع انتشار می‌یابد، فقط از طریق اندازه‌گیری در خروجی دودکش قابل انجام است، اما در یک شعاع مشخصی که آلاینده‌های جوی، محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اندازه‌گیری به‌صرفه نبوده و قابل انجام نیست. مدل ایرمود این توانایی را دارد که غلظت هر یک از آلاینده‌های جوی را تا شعاع حداکثر ۵۰ کیلومتر شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید و در پژوهش حاضر از این مدل

فضایی و ناحیه‌ای در حفاظت محیط‌زیست، ارزیابی تأثیر آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع بر اکولوژی‌های خشکی و دریایی به‌ویژه رشد و توسعه‌ی آنها می‌تواند بسیار مفید واقع گردد.

### یادداشت

- 1- AERMOD
- 2- WRF
- 3- CALPUFF
- 4- RAOB
- 5- AERMET
- 6- AERMAP

آلاینده‌های جامد و مایع بر سطوح زمینی، موجب بروز بیماری‌های مختلفی در اکوسیستم‌های فعال منطقه می‌شود. بنابراین در برنامه‌ریزی و مدیریت تمهیدات و راهبردهای عملیاتی، اگرچه نتایج پژوهش حاضر می‌تواند پراکنش آلاینده‌های اصلی هوا در منطقه را شناسایی نموده و در برنامه‌ریزی منطقه‌ای بندرعباس و تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی موثر واقع شود، اما برای تصمیم‌گیری در مقیاس زمانی بلندمدت و جامع، نیاز به ارزیابی و پایش آلاینده‌های ثانویه و دیگر آلاینده‌های خروجی از دودکش صنایع ضروری می‌باشد. همچنین به‌منظور تدوین برنامه‌ریزی‌های

### فهرست منابع

- Abbassi, Y., Ahmadikia, H., and Baniasadi, E. (2020). Prediction of pollution dispersion under urban heat island circulation for different atmospheric stratification. *Building and Environment*, 168, 106374.
- Afzali, A., Rashid, M., Afzali, M., and Younesi, V. (2017). Prediction of air pollutants concentrations from multiple sources using AERMOD coupled with WRF prognostic model. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1216-1225.
- Ali, A., Alves, T. M., Saad, F. A., Ullah, M., Toqeer, M., and Hussain, M. (2018). Resource potential of gas reservoirs in South Pakistan and adjacent Indian subcontinent revealed by post-stack inversion techniques. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 49, 41-55.
- Alloway, B., and Ayres, D. C. (1997). *Chemical principles of environmental pollution*. CRC press.
- Amiri, F., Tabatabaie, T. (2020). *The influence of green spaces on land surface temperature and humidity of the surrounding environment in Bushehr city*. *Environmental Sciences*, 18(3), 184-205. [In Persian]
- Amoatey, P., Omidvarborna, H., Affum, H. A., and Baawain, M. (2019). Performance of AERMOD and CALPUFF models on SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emissions for future health risk assessment in Tema Metropolis. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(3), 772-786.
- Arani, M. H., Jaafarzadeh, N., Moslemzadeh, M., Ghalhari, M. R., Arani, S. B., and Mohammadzadeh, M. (2021). Dispersion of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> pollutants in the rolling industry with AERMOD model: a case study to assess human health risk. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1-12.
- Asolekar, S. R., and Gopichandran, R. (2005). *Preventive Environmental Management*. Foundation Books.
- Atabi F, Jafarigol F, Momeni M, Salimian M, Bahmannia G. (2014). *Dispersion Modeling of CO with AERMOD in South Pars fourth Gas Refinery*. *jehe*. 1 (4) :281-292. [In Persian]
- Azimi, F. (2008). *Evaluation temperature inversion on the Ahvaz air pollution process*. *Territory*, 5(19), 105-112. [In Persian]
- Clochard, V., Delépine, N., Labat, K., and Ricarte, P. (2010). CO<sub>2</sub> plume imaging using 3D pre-stack stratigraphic inversion: A case study on the Sleipner field. *First Break*, 28(1).

- Contardo, T., Vannini, A., Sharma, K., Giordani, P., and Loppi, S. (2020). Disentangling sources of trace element air pollution in complex urban areas by lichen biomonitoring. A case study in Milan (Italy). *Chemosphere*, 256, 127155.
- Dresser, A. L., and Huizer, R. D. (2011). CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(6), 647-659.
- Dvorak, I., MacBeth, C., and Amini, H. (2018, June). Evaluating 4D Overburden Velocity Perturbation for the Shearwater Field via Pre-Stack Time-Shift Inversion. In *80th EAGE Conference and Exhibition 2018* (Vol. 2018, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Filband, A. J., and Riahi, M. (2021). Integrating the pre-stack seismic data inversion and seismic attributes to estimate the porosity of Asmari Formation. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 62(1).
- Jahanbakhsh Asl, S., and Roshani, R. (2013). Investigation of the status and severity of low level inversions in the city of Tabriz during the period 2004 to 2008. *Geographical Research*, 28 (4 (111 consecutive)), 45-54. [In Persian]
- Jain, C. (2013). Effect of seismic wavelet phase on post stack inversion. In *10th Biennial Int. Conf. & Exposition, Kochi* (p. 410).
- Jiang, Y., Xin, J., Wang, Y., Tang, G., Zhao, Y., Jia, D., and Wu, F. (2021). The thermodynamic structures of the planetary boundary layer dominated by synoptic circulations and the regular effect on air pollution in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(8), 6111-6128.
- Kesarkar, A. P., Dalvi, M., Kagainalkar, A., and Ojha, A. (2007). Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India. *Atmospheric Environment*, 41(9), 1976-1988.
- Kim, S. H., Choi, B. K., and Kim, E. (2020). Study on the Behavior of the Water Temperature Inversion Layer in the Northern East China Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 157.
- Lashkari, H., and Hedayat, p. (2006). Analysis of synoptic pattern of severe inversions in Tehran. *Geographical Research*, 38 (56), 65-82. [In Persian]
- Lee, J. L. (1989). Dispersive microwave fading and lower atmospheric structure: An observational study. *Radio Science*, 24(2), 133-146.
- Momeni, I., Danehkar, A., Karimi, S., Khorasani, N. (2011). Dispersion modelling of SO<sub>2</sub> pollution Emitted from Ramin Ahwaz power plant using AERMOD model. *Human & Environment*, 9(3), 3-8. [In Persian]
- Moreno-Silva, C., Calvo, D. C., Torres, N., Ayala, L., Gaitán, M., González, L., and Susa, M. R. (2020). Hydrogen sulphide emissions and dispersion modelling from a wastewater reservoir using flux chamber measurements and AERMOD® simulations. *Atmospheric Environment*, 224, 117263.
- Mousavi, S. S., Goudarzi, G., Sabzalipour, S., Rouzbahani, M. M., and Hassan, E. M. (2021). An evaluation of CO, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> emissions during continuous and non-continuous operation in a gas refinery using the AERMOD. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13.
- Murchek, J. T. (2021). *Pre-Stack Seismic Inversion and Amplitude Variation with Offset (AVO) Attributes as Hydrocarbon Indicators in Carbonate Rocks: A Case Study from the Illinois Basin* (Doctoral dissertation, Wright State University).
- Ninic, N., and Nizetic, S. (2009). Elementary theory of stationary vortex columns for solar chimney power plants. *Solar Energy*, 83(4), 462-476.
- Noorpoor, A., Kazemi Shahabi, N. (2014). Dispersion Modeling of Air Pollutants from the Ilam Cement Factory Stack. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44.1(74), 107-116. [In Persian]

- Pérez-Díaz, J. L., Ivanov, O., Peshev, Z., Álvarez-Valenzuela, M. A., Valiente-Blanco, I., Evgenieva, T., and Vaseashta, A. (2017). Fogs: Physical basis, characteristic properties, and impacts on the environment and human health. *Water*, 9(10), 807.
- Perry, S. G., Cimorelli, A. J., Paine, R. J., Brode, R. W., Weil, J. C., Venkatram, A., and Peters, W. D. (2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases. *Journal of applied meteorology*, 44(5), 694-708.
- Rzeszutek, M., and Szulecka, A. (2021). Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 642, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Sadeghia, S., Mofidi, A., Jahanshiri, M., Doostan, R. (2014). *The Role of Regional Scale Atmospheric Circulation on the Occurrence of Critical Air Pollution Episodes in Mashhad, Iran*. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(2), 1-36. [In Persian]
- Saxena, P., and Sonwani, S. (2019). Primary criteria air pollutants: environmental health effects. In *Criteria Air Pollutants and their Impact on Environmental Health* (pp. 49-82). Springer, Singapore.
- Seangkiatiyuth, K., Surapipith, V., Tantrakarnapa, K., and Lothongkum, A. W. (2011). Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO<sub>2</sub> emissions from a cement complex. *Journal of Environmental Sciences*, 23(6), 931-940.
- Shamsipoor, Ali Akbar, Ashrafi, Elham, Alikhah Asl, Marzieh, Ashrafi, Khosrow. (2015). *Modeling of suspended particle dispersion pattern in the south of Tehran (Case study: Tehran Cement Factory) with AERMOD model*. *Environmental Science*, 41 (4), 799-814. [In Persian]
- Sitaras, I. E., and Siskos, P. A. (2008). The role of primary and secondary air pollutants in atmospheric pollution: Athens urban area as a case study. *Environmental Chemistry Letters*, 6(2), 59-69.
- Tsegaw, G. T., and Alemayehu, Y. A. (2019). Principal air pollutants and their effects on athletes health and performance: A critical review. *Scientific Research and Essays*, 14(7), 44-52.
- Ul Haq, A., Nadeem, Q., Farooq, A., Irfan, N., Ahmad, M., and Ali, M. R. (2019). Assessment of AERMOD modeling system for application in complex terrain in Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), 1492-1497.