

# The Major Air Pollutants and Their Sources in the Erosion of Stone Materials in the Cultural Heritage Sites of the Marvdasht Plain

Hamid Fadaei

Assistant Professor, Research Centre for Conservation of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran- Iran.

## Abstract

Air pollution is one of the major challenges of modern life, exacerbating environmental crises, particularly in developing countries, and posing a serious threat to cultural heritage. Marvdasht, due to its ongoing development, is among the regions facing this issue. The presence of numerous historical sites registered on national and world heritage lists has made the impact of air pollution—especially considering the region's industrial expansion—a significant concern for cultural heritage specialists. This concern is further amplified by the presence of limestone-based stone heritage sites, such as the UNESCO-listed Persepolis and the Naqsh-e Rostam historical complex. These monuments, composed primarily of calcite, are highly susceptible to direct and indirect erosion and degradation caused by acid rain. This research aims to identify the sources of air pollutants in the region and assess their impact on the erosion of cultural heritage and stone monuments. Through a review of theoretical sources, field investigations, and laboratory analyses, the major sources of air pollution in the Marvdasht plain were identified and evaluated. The collected data were analyzed using qualitative and quantitative methods. To measure the impact of air pollution, air samples were collected from Persepolis and Naqsh-e Rostam as key stone heritage sites, as well as from the Marvdasht Petrochemical Complex, the primary pollution source in the area. The concentrations of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and NH<sub>3</sub> in the air samples were measured using ion chromatography and stoichiometric calculations. The findings of this study indicate a high potential for pollutant-induced damage in the region.

**Keywords:** Air pollutants, stone erosion, Persepolis, cultural heritage sites, Marvdasht plain.



**Knowledge of  
Conservation and  
Restoration**

Vol.7, Issue.4,  
Serial\_No.22, 2025

<https://kcr.riict.ir>

Pages: 19 to 45

Corresponding Author

**Hamid Fadaei**

Assistant Professor, Research  
Centre for Conservation  
of Cultural Relics, Research  
Institute of Cultural Heritage  
and Tourism, Tehran- Iran.

Email

[hfadaii@yahoo.com](mailto:hfadaii@yahoo.com)

## Introduction

The Marvdasht Plain, located in Fars Province, is one of the largest and most fertile plains in the region. This area holds significant historical value, containing archaeological remains from the Middle Paleolithic period to the Islamic era, highlighting its importance. The fertility of the plain has contributed to the emergence of civilizations since the fifth millennium BCE, evidence of which is scattered across the landscape in the form of ancient mounds and archaeological sites, creating a unique historical-natural landscape. The preservation of this cultural landscape is of great significance as part of the region's heritage values (UNESCO, 1972). Among the most prominent sites in this area are Persepolis, Naqsh-e Rostam, and Naqsh-e Rajab. Today, industrial development in Marvdasht Plain, particularly in close proximity to these rock-cut monuments, poses a major threat to the cultural heritage of the region. Concerns regarding the gradual erosion of these sites have led to increasing emphasis on reassessing the environmental air pollution monitoring methodologies in these areas (Fadaei et al., 2019). Previously, some studies have explored specific pollution sources in Marvdasht Plain, including petrochemical industries, agricultural pollutants, and road transport emissions, as well as their impact on public health (Air Pollution Research Unit, 1998; Haddad, 2004; Karami et al., 2018). However, assessing the threats posed by these pollutants to the cultural heritage of Marvdasht Plain, which is one of the most visited tourist destinations in the country, remains a high priority.

## Materials and Methods

Due to the functional limitations of the passive sampling method (Fadaei et al., 2019: 103), this study measured only inorganic air pollutants. For this purpose, two specialized gas samplers were

selected to measure sulfur dioxide, nitrogen oxides, ammonia, and ozone. A Swedish IVL Plunger gas sampler was used to collect nitrogen dioxide and sulfur dioxide, while an American Ogawa sampler was employed for ozone and ammonia collection. The required chemical reagents were obtained from Sigma-Aldrich. The prepared standard solutions, including nitrate, nitrite, and sulfate, had concentrations ranging from 1 to 20 ppm. Additionally, solutions used in the filters of both gas samplers were prepared. Triethanolamine and hydrogen peroxide solutions were used to extract nitrite and sulfate ions, respectively, while deionized water was employed to extract nitrate and ammonium ions. Air sampling was conducted in three locations: the outdoor area of Marvdasht Petrochemical Complex, within the World Heritage site of Persepolis, and inside the Naqsh-e Rostam complex. A total of 12 samples (three from each site) were collected. To ensure accuracy and efficiency, a blank air sample free of pollutants was prepared in the laboratory using an air aspirator device. After extracting ions via ion chromatography, the concentrations of nitrite, nitrate, sulfate, and ammonium ions were determined, and pollutant concentrations were calculated using stoichiometric methods.

## Results & Discussion

Among various industries, petrochemical, textile, chemical production, and agriculture-related industries have the highest share of environmental pollution (Cheremisinoff, 2002: 53; Rosenfeld & Feng, 2011: 57). Investigations have identified 189 production facilities, including stone quarries, factories, and industrial centers in the Marvdasht region. Industrial and mining pollutants include gases such as methane, isobutane, hydrogen sulfides, and various polycyclic aromatic

hydrocarbons (PAHs) like naphthalene, anthracene, pyrene, and phenanthrene (Kuna-Gwoździewicz, 2013: 7). Extensive agricultural activities in the Marvdasht Plain, along with the use of various chemical fertilizers and industrial pesticides, release different synthetic compounds and their degradation products into the environment (Kodavanti et al., 2014; Talcott, 2013: 401). Additionally, the number of vehicles and transportation activities significantly contribute to air pollution (Madah & Jafari, 2022: 77). The results of air pollutant concentration measurements in the sampled areas are presented in Table 1. Quantitative measurements indicate alarmingly high pollution levels in the archaeological sites of Persepolis and Naqsh-e Rostam, posing a severe threat to these heritage sites. This serious issue demands urgent attention to mitigate its impact on the region's cultural heritage.

## Conclusions

The results of the study on the major pollution sources in the Marvdasht Plain—including mining and industrial activities, agriculture with extensive use of fertilizers and pesticides, and road transportation—highlight the high potential for environmental damage. These pollutants, combined with moisture, penetrate the surface and pores of historical stones, gradually altering the stone's structure by changing the environmental pH. Air sampling from the historical sites of Persepolis and Naqsh-e Rostam using gas samplers, followed by ion extraction via ion chromatography and concentration measurements, revealed the presence of significant levels of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), ammonia (NH<sub>3</sub>), and ozone (O<sub>3</sub>), along with high concentrations of nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), and ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ions. A comparison of these results with air samples analyzed from the Marvdasht Petrochemical Complex indicates

a significant correlation between pollutant concentrations and the industrial facility. The same pollutants detected at very high concentrations near petrochemical industries were also found—albeit at relatively lower levels—within and around the Persepolis and Naqsh-e Rostam sites.

## Acknowledgment

Gratitude is extended to Dr. Amir Ismailzadeh from the Department of Chemistry at Islamic Azad University, Mashhad Branch, for valuable consultation and collaboration in conducting the experiments. Appreciation is also expressed to Dr. Sayed Mohamadamin Emami, professor at the University of Art, Isfahan, for his invaluable guidance. Special thanks go to Dr. Zohreh Sadat Hosseini, Ms. Zahra Morovatipour, and Mr. Masoud Nakhaei Ashtari, former colleagues at the World Heritage Sites of Parse-Pasargadae, for their support in sample collection for this research.

## Conflict of Interest: None.

Support: This article is the outcome of the author's research project conducted at the Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, titled "Study of the Erosion Process of Rock Art under the Influence of Air Pollutants." The project was carried out between 2020 and 2021 with the moral support of the aforementioned institute. Additionally, a portion of the laboratory costs for this project was funded by the Persepolis-Pasargadae World Heritage Base.

**Data Availability:** The raw data of this study are available to the authors and can be accessed upon request through correspondence.

## مهمترین آلاینده‌های هوا و منابع آن در فرسایش مصالح سنگی در محوطه‌های میراث فرهنگی دشت مرودشت

حمید فدایی

استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

### چکیده

آلودگی هوا یکی از معضلات زندگی مدرن است که نه تنها بحران‌های زیست‌محیطی را به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه تشدید می‌کند، بلکه میراث فرهنگی جوامع را نیز در معرض تهدید و فرسایش قرار می‌دهد. شهر مرودشت، به دلیل روند توسعه‌ای خود، از جمله مناطقی است که با این چالش مواجه است. وجود ده‌ها اثر تاریخی ثبت‌شده در فهرست آثار ملی و جهانی در این منطقه، مسئله تأثیرپذیری این آثار از آلودگی هوا، به‌ویژه با توجه به توسعه صنعتی منطقه را به دغدغه‌ای جدی برای متخصصان میراث فرهنگی تبدیل کرده است. آنچه این نگرانی را دوجندان می‌کند، وجود میراث سنگی با ساختار آهکی، نظیر مجموعه جهانی تخت‌جمشید و محوطه تاریخی نقش‌رستم، در این دشت است. این آثار، به دلیل ترکیب کلسیتی خود، در برابر باران‌های اسیدی مستعد فرسایش و تخریب، به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم، هستند. از این‌رو، این پژوهش با هدف شناسایی منابع آلاینده هوای منطقه و بررسی تأثیر این آلاینده‌ها بر فرسایش میراث فرهنگی و آثار سنگی انجام شده است. در این مطالعه، پس از مرور منابع نظری و انجام بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی، مهم‌ترین منابع آلاینده هوای دشت مرودشت شناسایی و ارزیابی شده‌اند. داده‌های حاصل، از طریق روش‌های کیفی و کمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. به‌منظور سنجش تأثیر آلودگی، نمونه‌برداری از هوای محوطه‌های تخت‌جمشید و نقش‌رستم به‌عنوان شاخص میراث سنگی منطقه و همچنین از پتروشیمی مرودشت به‌عنوان مهم‌ترین منبع آلاینده دشت مرودشت انجام شد. سپس، با استفاده از روش کروماتوگرافی یونی و انجام محاسبات استوکیومتری، غلظت  $\text{NO}_2$ ،  $\text{SO}_2$ ،  $\text{O}_3$  و  $\text{NH}_3$  در نمونه‌های برداشت‌شده از هوا اندازه‌گیری گردید. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل بالای آسیب‌زایی منابع آلاینده در منطقه است.

**واژگان کلیدی:** آلاینده‌های هوا، فرسایش سنگ، تخت‌جمشید، محوطه‌های میراث فرهنگی، دشت مرودشت.



فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۴

شماره پیاپی ۲۲، زمستان ۱۴۰۳

<https://kcr.richt.ir>

صفحات: ۱۷ تا ۴۵

نویسنده مسئول

حمید فدایی

استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار

تاریخی - فرهنگی، پژوهشگاه میراث

فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

رایانامه

[hfadaii@yahoo.com](mailto:hfadaii@yahoo.com)

## مقدمه

جلگه مرودشت، واقع در استان فارس، یکی از وسیع‌ترین و سرسبزترین دشت‌های این منطقه به‌شمار می‌رود. این دشت، از منظر تاریخی، دربرگیرنده آثاری از دوره پارینه‌سنگی میانی تا دوران اسلامی است که اهمیت فوق‌العاده آن را در تحولات فرهنگی و تمدنی ایران نشان می‌دهد. فراوانی نسبی آب، به‌واسطه جریان رودهای کر و سیوند، و همچنین وجود خاک حاصل‌خیز، از عوامل کلیدی در شکل‌گیری استقرارهای متعدد تاریخی در این منطقه بوده‌اند. علاوه‌بر این، جلگه مرودشت میزبان برخی از بزرگ‌ترین و ارزشمندترین آثار دوره هخامنشی و ساسانی، همچون مجموعه‌های جهانی تخت‌جمشید و نقش‌رستم، است. بسیاری از محوطه‌های تاریخی و سنگی این دشت، رابطه‌ای تنگاتنگ با محیط پیرامونی خود دارند و شکل طبیعی و مکان‌گزینی آن‌ها بر صخره‌ها، پیوندی مستقیم و آشکار میان این آثار و بستر طبیعی‌شان برقرار کرده است. از این‌رو، حفاظت از این ارتباط به‌عنوان بخشی از ارزش‌های فرهنگی و تاریخی منطقه، امری ضروری است که باید در فرآیندهای حفاظتی مورد توجه قرار گیرد (UNESCO, 1972).

با این حال، توسعه صنایع در دشت مرودشت و استقرار آن‌ها در نزدیکی محوطه‌های تاریخی، از مهم‌ترین تهدیدهای پیش‌روی میراث فرهنگی منطقه به‌شمار می‌رود. این مسئله، احتمال فرسایش تدریجی آثار سنگی را تقویت کرده و بر ضرورت مطالعه و ارزیابی تهدیدات موجود، به‌عنوان نخستین گام در راستای حفاظت از این میراث ارزشمند، تأکید می‌کند. همچنین، با توجه به جایگاه ویژه مرودشت به‌عنوان یکی از پربازدیدترین مقاصد گردشگری کشور، صیانت از آثار آن، اهمیتی دوچندان می‌یابد. اهمیت این موضوع زمانی آشکارتر می‌شود که بدانیم کاهش آلاینده‌های محیطی، تأثیر مستقیمی بر حفظ و نگهداری آثار تاریخی دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی یافتن پاسخی برای این پرسش‌های اساسی است که انواع آلاینده‌های محیطی چه تأثیری بر سطح آثار سنگی آهکی دارند، منابع آلاینده هوای دشت مرودشت کدام‌اند و این آلاینده‌ها چه نقشی در فرسایش میراث فرهنگی این

منطقه ایفا می‌کنند.

عمده مطالعات انجام‌شده در زمینه آلاینده‌های هوای استان فارس، در بازه زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۳، عمدتاً به شهر شیراز اختصاص داشته و در آن، میزان آلودگی ناشی از صنایع و وسایل نقلیه موتوری، به‌عنوان بزرگ‌ترین منابع آلاینده، مورد بررسی قرار گرفته است (Khosh akhlagh & HassanShahi, 2002). اگرچه گزارش‌های محدودی درباره آلاینده‌های هوای مرودشت نیز در دسترس است، اما مطالعات جامع و گسترده‌ای در این زمینه انجام نشده است. نتایج پژوهشی که در سال ۱۳۸۳ توسط اداره کل محیط زیست فارس و مرکز تحقیقات محیط زیست و توسعه پایدار دانشگاه شیراز، با تمرکز بر آلاینده‌های هوا در شهر مرودشت و صنایع مهمی چون مجتمع صنایع پتروشیمی، انجام شد، نشان داد که غلظت آلاینده‌های متداول هوا، از جمله  $SO_2$ ،  $NO_2$ ،  $CO_2$  و  $CO$  به‌دلیل شرایط جغرافیایی و توپوگرافی خاص منطقه، از جمله وجود رشته‌کوه‌هایی در شمال‌شرقی شهر و وزش بادهای غالب از غرب و جنوب‌غربی، به‌شدت بالا است. همچنین، بخش عمده‌ای از ذرات معلق موجود در هوای منطقه، ناشی از فعالیت‌های صنعتی، به‌ویژه صنایع پتروشیمی، و فرآیندهای گسترده کشاورزی است (Air Pollution Research Unit, 1998; Haddad, 2004). در پژوهشی دیگر، که در سال ۱۳۹۶ پیرامون بررسی آلاینده‌های هوا ناشی از سوزاندن کاه و کلش گندم در شهرستان مرودشت انجام شد، ضمن ارائه آمار ده ساله از میزان تولید کاه و کلش اراضی کشاورزی منطقه، به روش‌ها و دلایل این اقدام پرداخته‌شده و مشکلات زیست‌محیطی آن، به‌ویژه مخاطرات ناشی از گازهای حاصل از سوختن کاه و کلش، مورد بررسی قرار گرفته است (Karami et al., 2018).

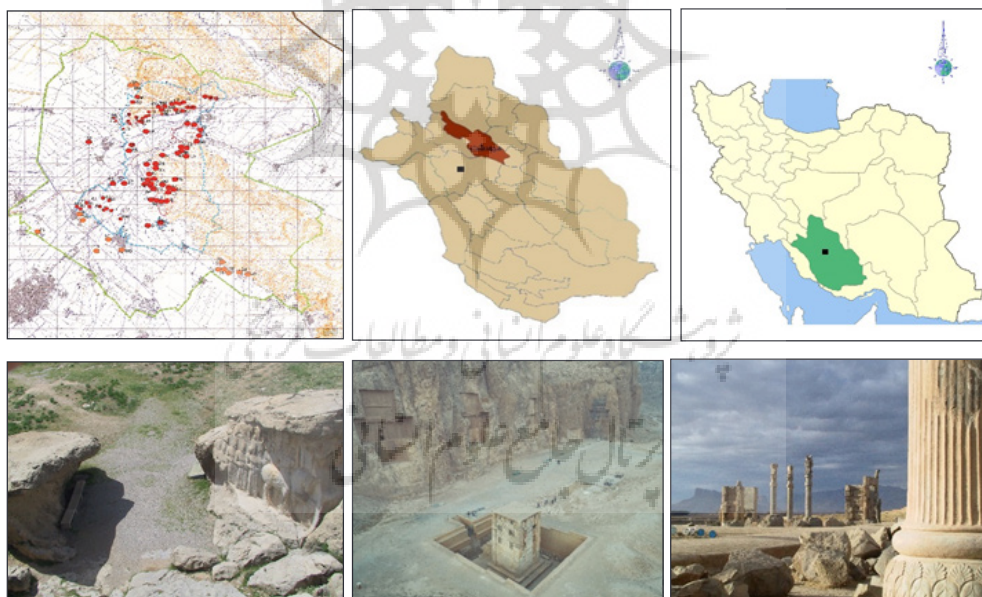
با این حال، در تمامی این پژوهش‌ها، عمدتاً به تبعات زیست‌محیطی آلاینده‌ها پرداخته‌شده و تأثیرات احتمالی آن‌ها بر میراث فرهنگی نادیده گرفته شده است. بنابراین، مطالعه و پایش تأثیرات آلاینده‌های هوا بر محوطه‌های تاریخی منطقه، امری ضروری

نیترات، سولفات و آمونیوم در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین، با انجام محاسبات استوکیومتری، غلظت دی‌اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ )، دی‌اکسید گوگرد ( $\text{SO}_2$ )، ازن ( $\text{O}_3$ ) و آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) در نمونه‌های برداشت‌شده از هوا محاسبه شد.

### روش‌شناسی پژوهش الف) موقعیت جغرافیایی منطقه

دشت مروداشت در شمال غربی استان فارس و در راستای محور شمال غرب - جنوب شرق، در میان رشته‌کوه‌های زاگرس واقع شده است. این دشت که در بخش مرکزی حوضه آبخیز رودخانه‌های کر و سیوند قرار دارد، یکی از وسیع‌ترین و حاصل‌خیزترین دشتهای منطقه و ایران به‌شمار می‌رود (Ansari, Lari & Ansari, 2016). میانگین ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۴۲ متر است و از شمال، غرب و جنوب به

به‌نظر می‌رسد. با توجه به حساسیت ویژه محوطه‌های میراث فرهنگی، در پژوهشی که در سال ۱۳۹۸ انجام شد، لزوم بازنگری در روش‌شناسی پایش محیطی آلودگی هوا در این محوطه‌ها، با تأکید بر مناطق نقش‌رستم و تخت‌جمشید، به‌دلیل مجاورت با صنایع بزرگی همچون مجتمع‌های پتروشیمی، مورد توجه قرار گرفت (Fadaei et al., 2019). در این مقاله، مهم‌ترین انواع آلاینده‌های هوا و فرآیندهای فرسایشی آن‌ها بر میراث سنگی منطقه بر پایه مطالعات نظری و بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی، تحلیل شده است. به‌همین منظور، نمونه‌برداری از هوای محوطه‌های تخت‌جمشید و نقش‌رستم، به‌عنوان شاخص‌های میراث سنگی منطقه، و از پتروشیمی مروداشت، به‌عنوان مهم‌ترین منبع آلودگی دشت مروداشت، انجام شد. سپس، با استفاده از روش کروماتوگرافی یونی، مقدار یون‌های نیتريت،



شکل ۱. بالا: نقشه موقعیت استان فارس (راست) و شهرستان مروداشت (وسط) و نقشه پراکنندگی بخشی از محوطه‌های تاریخی منطقه. در دشت مروداشت (چپ)، پابین: نمایی از محوطه‌های میراث سنگی تخت‌جمشید (راست)، نقش‌رستم (وسط) و نقش‌رجب (چپ) در دشت مروداشت (منبع: مرکز اسناد پایگاه میراث جهانی تخت‌جمشید).

Figure 1. Top: Map showing the location of Fars Province (right), Marvdasht County (center), and the distribution of a selection of historical sites in the Marvdasht Plain (left).

Bottom: Views of the stone heritage sites of Persepolis (right), Naqsh-e Rostam (center), and Naqsh-e Rajab (left) in the Marvdasht Plain (Source: Documentation Center of the Persepolis World Heritage Site).

ترکیبات مورد استفاده در فیلتر نمونه‌گیرهای گازی شامل یدید سدیم، هیدروکسید سدیم و متانول برای نمونه‌گیر  $\text{NO}_2$ ، هیدروکسید پتاسیم، متانول و گلیسرول برای نمونه‌گیر  $\text{SO}_2$ ، نیتريت سدیم، کربنات پتاسیم، گلیسرول و آب مقطر برای نمونه‌گیر ازن و ترکیب اسید سیتریک، گلیسرول، آب مقطر و اتانول برای نمونه‌گیر آمونیاک بودند. علاوه بر این، از محلول‌های تری‌اتانول آمین و پراکسید هیدروژن برای استخراج یون‌های نیتريت و سولفات و از آب یون‌زدایی‌شده برای استخراج یون‌های نیترات و آمونیوم استفاده شد.

نمونه‌برداری در سه منطقه شامل فضای بیرونی پتروشیمی مرودشت، داخل محوطه نقش‌رستم و داخل محوطه میراث جهانی تخت‌جمشیدتخت‌جمشید انجام گرفت و در مجموع ۱۲ نمونه (از هر منطقه ۳ نمونه) جمع‌آوری شد. همچنین، برای بررسی صحت و کارایی آزمایش‌ها، یک نمونه هوای شاهد عاری از آلاینده‌ها در آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه دمش هوا تهیه شد. برای جمع‌آوری آلاینده‌ها، فیلترهای تهیه‌شده درون نمونه‌گیرهای گازی به مدت ۱۰ روز در معرض هوای موردنظر قرار گرفتند و در این مدت، از تأثیر تابش خورشید، باد، گردوغبار و بارش باران محافظت شدند. پس از رسیدن فیلترها به تعادل ترمودینامیکی، یون‌های استخراج‌شده درون محلول‌های استاندارد قرار داده شدند و با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی، غلظت یون‌های نیتريت، نیترات، سولفات و آمونیوم تعیین شد. سپس، از طریق محاسبات استوکیومتری، غلظت آلاینده‌ها اندازه‌گیری شد. بر این اساس، غلظت دی‌اکسید نیتروژن از روی یون نیتريت، غلظت ازن از روی یون نیترات، غلظت آمونیاک از روی یون آمونیوم و غلظت دی‌اکسید گوگرد از روی یون نیترات محاسبه شد.

### آلاینده‌های هوا

آلاینده‌های هوا به موادی با ساختار شیمیایی رهاشده در اکوسیستم اطلاق می‌شود که می‌توانند به‌صورت موقتی یا دائمی موجب ناپاکی محیط شوند (Zhu et al., 2009)، اما مسئله اساسی این است که در چه شرایطی یک ماده ماهیت آلاینده‌ی پیدا

واحدهای کوهستانی محدود می‌شود. شهرستان مرودشت، که در این دشت گسترده قرار گرفته، بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهرستان استان فارس محسوب می‌شود. از مهم‌ترین ارتفاعات این شهرستان، می‌توان به کوه رحمت و کوه حسین اشاره کرد. در دامنه غربی و شمالی کوه رحمت، محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید و محوطه تاریخی نقش‌رجب جای گرفته‌اند. همچنین، در دامنه جنوب‌غربی کوه حسین، محوطه تاریخی نقش‌رستم، با فاصله‌ای اندک از این آثار، قرار دارد. علاوه بر این، آثار و محوطه‌های تاریخی متعددی در سایر بخش‌های کوهستانی منطقه و به‌ویژه در دشت مرودشت پراکنده شده‌اند. حاصل‌خیزی این دشت، یکی از مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری تمدن‌های باستانی در آن بوده است، به‌طوری‌که شواهدی از تمدن‌های هزاره پنجم پیش از میلاد در این منطقه یافت شده است. امروزه، بقایای این تمدن‌ها به‌صورت محوطه‌ها و تپه‌های تاریخی در سطح دشت گسترده‌اند (شکل ۱).

### ب) مواد و روش آزمون

در این پژوهش، به‌دلیل محدودیت‌های روش نمونه‌گیری انفعالی<sup>۲</sup> و لزوم شناسایی و اندازه‌گیری تعداد محدودی از آلاینده‌ها در هر آزمایش (Fadai et al., 2019)، تنها آلاینده‌های غیرآلی هوا مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، از دو نوع نمونه‌گیر گازی ویژه استفاده شد که در اندازه‌گیری دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، آمونیاک و ازن به‌کار رفتند. جهت جمع‌آوری دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد، از نمونه‌گیر گازی (پلانگر IVL ساخت سوئد) استفاده شد که دارای یک فیلتر اشباع‌ساز در دهانه و انتهای لوله نمونه‌برداری بود. همچنین، برای جمع‌آوری ازن و آمونیاک، نمونه‌گیر اوگاوا<sup>۳</sup> ساخت آمریکا به‌کار گرفته شد، که در آن، صافی‌های سلولزی نقش مؤثری در کاهش رطوبت هوای جمع‌آوری‌شده داشتند و از برهم‌کنش مولکول‌های ازن و آمونیاک متراکم‌شده با آب موجود در لوله نمونه‌گیر جلوگیری می‌کردند. مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت سیگما آلدریج<sup>۴</sup> تهیه شدند و محلول‌های استاندارد شامل نیترات، نیتريت و سولفات با غلظت ۱ تا ۲۰ ppm آماده گردید.

و به اکسیدهای پایداری از هترواتمها نظیر اکسیدهای نیتروژن و سولفور تبدیل می‌شوند. اهمیت ورود این ترکیبات به محیطزیست زمانی آشکار می‌شود که غلظت آن‌ها از یک حد مشخص فراتر رفته و به آستانه بحرانی نزدیک شود. در چنین شرایطی، افزایش این ترکیبات در جو می‌تواند آثار مخربی به دنبال داشته باشد. اگرچه بسیاری از این مواد در طول زمان و از طریق فرآیندهای طبیعی حذف می‌شوند، اما برخی دیگر، نظیر گروهی از ترکیبات فنولی، تنها تحت تأثیر فعالیت باکتری‌های تجزیه‌کننده به الکل‌های بی‌ضرر تبدیل می‌شوند. با این حال، اغلب این ترکیبات دارای خاصیت تجمع‌پذیری بوده و امکان حذف آن‌ها از طریق فرآیندهای طبیعی وجود ندارد. این دسته از ترکیبات به آلاینده‌های آلی پایدار معروف هستند (Lorenzo et al., 2018).

آلاینده‌های آلی پایدار به دلیل پایداری بالا برای مدت‌های طولانی در محیط باقی‌مانده و در برابر تجزیه مقاوم هستند. این ترکیبات به راحتی در محیط تجمع یافته و توانایی جابجایی در فواصل وسیع را دارند، به‌ویژه آن دسته از آلاینده‌هایی که در فاز گازی انتشار می‌یابند یا از طریق رودخانه‌ها و سیستم‌های آبی منتقل می‌شوند (Wu et al., 2014: 28). در این راستا، آژانس حفاظت از محیطزیست آمریکا، آلاینده‌های هوا را به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم کرده است. آلاینده‌های اولیه، موادی هستند که مستقیماً از منابع آلاینده وارد جو می‌شوند و شامل ترکیباتی مانند دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون هستند. در مقابل، آلاینده‌های ثانویه در اثر واکنش‌های شیمیایی و فعل و انفعالاتی که در هوای اطراف زمین رخ می‌دهد، شکل می‌گیرند و ازون یکی از مهم‌ترین ترکیبات این گروه محسوب می‌شود (Hamilton et al., 2009: 10).

#### مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub> و CO)

مونوکسید کربن گازی بی‌رنگ، بی‌بو و بی‌طعم است که در زمره فراوان‌ترین آلاینده‌های هوا قرار دارد و در اثر احتراق سوخت‌های کربن‌دار در شرایط نامناسب تولید می‌شود. احتراق ناقص این سوخت‌ها به‌جای

می‌کند. برای نمونه، آمونیاک در شمار آلاینده‌های محیطی قرار می‌گیرد، در حالی که این ترکیب در بسیاری از فرآیندهای طبیعی نیز آزاد می‌شود. بنابراین، آلاینده‌ی یک ماده رابطه مستقیمی با مقدار آن دارد و تا زمانی که میزان تولید و حذف آن در محیط از یک روند طبیعی پیروی کند، نمی‌توان آن را آلاینده تلقی کرد (Speight, 2017: 355). در یکی از تعاریفی که برای تدوین قوانین حقوقی به کار رفته است، آلودگی هوا حضور مواد ناخواسته در هوای آزاد تعریف شده است، به‌گونه‌ای که تأثیرات منفی بر زندگی انسان، گیاهان، حیوانات، اموال و همچنین شرایط اقلیمی داشته باشند، ارائه شده است (Nevers, 2000).

اگرچه این تعریف دیدگاه جامعی از آلودگی هوا ارائه می‌دهد، اما از آنجا که تأکید اصلی آن بر جنبه‌های زیست‌محیطی است، نمی‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب در مباحث مرتبط با میراث فرهنگی در نظر گرفته شود. با این حال، می‌توان با الگوبرداری از آن، تعریفی را برای آلودگی هوای مخاطره‌آمیز برای میراث فرهنگی پیشنهاد کرد. بر این اساس، آلودگی هوا عبارت است از حضور مقادیری از هر نوع ماده یا ترکیب شیمیایی در هوای محیط که یا به‌صورت مصنوعی تولیدشده یا میزان طبیعی آن به‌طور غیر عادی افزایش یافته باشد، به‌نحوی که موجب تضعیف ویژگی‌های زیباشناختی یا کاهش استحکام ساختاری حداقل یکی از انواع آثار هنری و تاریخی موجود در آن محیط شود. بنابراین، آلودگی هوا می‌تواند به‌عنوان عاملی تعریف شود که از طریق افزایش غیرطبیعی یک ماده شیمیایی در محیط، روند فرسایش طبیعی میراث فرهنگی را مختل کرده و فرآیند تخریب آن را تشدید کند (Vahidzadeh, 2009).

در لایه‌های مختلف جو، ترکیبات شیمیایی آلی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: نخست، ترکیباتی که به شکل گاز وجود دارند؛ دوم، ساختارهای ذره‌ای و ریزگردی؛ و سوم، ترکیبات شیمیایی خاصی که بخشی از آن‌ها در فاز گازی حضور دارند. این ترکیبات آلی گازی در جو تحت تأثیر فرآیند نورکافت<sup>۵</sup> و واکنش‌های شیمیایی با رادیکال‌های آزاد نظیر هیدروکسیل و نیترات، همچنین در تماس با ازون، دچار تغییر ماهیت شده





در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، به‌ویژه در مناطق شهری، انتشار این گاز به‌دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی جامد، افزایش چشمگیری داشته و به‌عنوان یکی از نگرانی‌های عمده مطرح است. زغال سنگ و نفت، هر دو حاوی گوگرد در مقادیر مختلف هستند و پس از احتراق هرکدام، دی‌اکسید سولفور تولید می‌کنند. این گاز بر روی آثار و مصالح نشسته و در واکنش با آن‌ها به سولفات تبدیل می‌شود (Watt et al., 2009: 12).

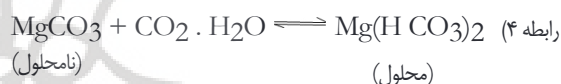
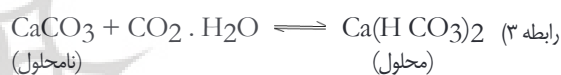


ویژگی منحصربه‌فرد اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک این است که علاوه‌بر حلالیت بسیار بالا در آب، فشار بخار بسیار پایینی دارد و به همین دلیل به‌راحتی و در مدت زمان کوتاهی ریزگرد تشکیل می‌دهد. این اسید در واکنش با آمونیاک، تولید سولفات آمونیوم  $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)$  و آمونیوم بی‌سولفات  $(\text{NH}_4\text{HSO}_4)$  می‌کند که هر دو نمک‌های خورنده هستند و اثرات زیست‌محیطی مخربی ایجاد می‌کنند. این نمک‌ها به‌خوبی در آب حل می‌شوند و در شرایط رطوبت نسبی بالا یا بارش باران، به سطح بازمی‌گردند (Parashar et al., 1987).

### اکسیدهای نیتروژن

اکسیدهای نیتروژن، که در اثر احتراق کامل یا ناقص سوخت‌های فسیلی و با حضور ازن در لایه‌های بالایی جو به اشکال  $\text{NO}_x$  تشکیل می‌شوند، یکی از بحرانی‌ترین آلاینده‌های جوی محسوب می‌شوند. در مجموع، هفت گونه اکسید نیتروژن شناسایی شده است که شامل  $\text{NO}$ ،  $\text{NO}_2$ ،  $\text{NO}_3$ ،  $\text{N}_2\text{O}$ ،  $\text{N}_2\text{O}_2$ ،  $\text{N}_2\text{O}_4$  و  $\text{N}_2\text{O}_5$  می‌باشند. در این بین، اکسیدهای  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  از نظر آلودگی هوا اهمیت بیشتری دارند. سوخت‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی نیتروژن در ساختار مولکولی خود هستند. برای مثال، گاز طبیعی فاقد نیتروژن است، در حالی که ۳ درصد وزن زغال سنگ از نیتروژن تشکیل شده است. هر دو نوع اکسید نیتروژن در آلودگی هوا نقش دارند، اما  $\text{NO}_x$  سوختی سهم بیشتری در این زمینه دارد. تقریباً تمام

دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن ایجاد می‌کند که بیش از ۷۰ درصد آن از طریق وسایل نقلیه و فعالیت‌های حمل‌ونقل وارد جو می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که مونوکسید کربن با غلظت‌های معمول در شهرها و محیط‌های پیرامونی، تأثیر قابل توجهی بر مواد یا گیاهان ندارد، هرچند که همین مقادیر برای سلامت انسان مضر است (Erfan Manesh & Afioni, 2008). این گاز مستقیماً آسیبی به مصالح ساختمانی و سنگ‌های تاریخی وارد نمی‌کند، اما به‌دلیل نقش آن در تولید دی‌اکسید کربن، تأثیر غیرمستقیم دارد. واکنش تولید مونوکسید کربن حدود ۱۰ برابر سریع‌تر از واکنش تولید دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد.



افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو، تعادل واکنش‌های شیمیایی را به سمتی سوق می‌دهد که موجب افزایش تولید بی‌کربنات‌های کلسیم و منیزیم در سنگ‌های آهکی تاریخی می‌شود. از آنجا که میزان حلالیت بی‌کربنات کلسیم حدود ۱۰۰ برابر بیشتر از کربنات کلسیم است، این تغییر می‌تواند در درازمدت به تخریب و فرسایش آثار تاریخی منجر شود.

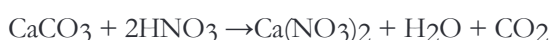
### اکسیدهای گوگرد

تشکیل اکسیدهای گوگرد ( $\text{SO}_x$ ) در چرخه جوی به‌صورت ساده قابل توضیح است؛ در دماهای بالا تشکیل  $\text{SO}_3$  افزایش می‌یابد، در حالی که در دماهای پایین این واکنش به‌طور کندتری پیش می‌رود. (Amoroso & Vasco, 1983):

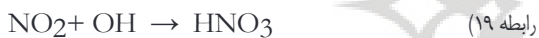
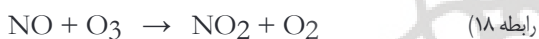


اگر بخار آب به میزان کافی موجود باشد، می‌تواند با  $\text{SO}_3$  ترکیب‌شده و اسید سولفوریک تشکیل دهد:

اکسیدهای نیتروژن موجب اسیدی شدن باران در اکثر مناطق آلوده می‌شوند. سنگ‌های کربناته بیشتر تحت تأثیر اسید نیتریک قرار می‌گیرند زیرا کربنات کلسیم به نترات کلسیم تبدیل شده و وارد محلول می‌شود. (Amoroso & Vasco, 1983):



اسید نیتریک همچنین می‌تواند با مولکول آمونیاک وارد واکنش شده و نمک سفید رنگ نترات آمونیوم (شوره) را ایجاد نماید. این نمک به دلیل داشتن بنیان‌های اسیدی و بازی به صورت هم‌زمان، خطرناک‌تر از خود اسیدنیتریک بوده و اثرات مخرب آن، به‌ویژه بر روی سنگ‌های تاریخی، بسیار شدید است. اگر این فرآیند به صورت یک واکنش ساده شده شیمیایی نمایش داده شود، به شکل موازنه زیر خواهد بود (Krochmal & Kalina, 1997):



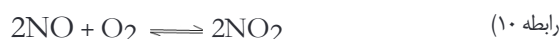
## ازون

ازون یکی از فراوان‌ترین اکسیدکننده‌های فتوشیمیایی است که به دلیل اهمیت زیاد آن، استانداردهای کیفیت هوا بر اساس آن تنظیم شده‌اند.  $\text{NO}_2$  تولید شده در مجاورت نور خورشید فتولیز می‌شود و یک اتم اکسیژن آزاد می‌کند که این اتم اکسیژن در ترکیب با  $\text{O}_3$  در نهایت به تولید  $\text{O}_3$  می‌انجامد. در این فرآیند،  $h\nu$  بیانگر یک فوتون و  $M$  یک مولکول  $\text{O}_2$  یا  $\text{N}_2$  است که برای جذب انرژی اضافی لازم است. ازون تولید شده در این واکنش می‌تواند  $\text{NO}$  را به  $\text{NO}_2$  اکسید کند. این واکنش‌ها به دنبال هم زنجیره‌ای از واکنش‌های فتوشیمیایی را به وجود می‌آورند. ازون موجود در جو، محصول واکنش مواد شیمیایی تولید شده توسط سوزاندن ذغال سنگ، بنزین و سوخت‌های دیگر است. معمولاً میزان اکسیدهای ازت به صورت روزانه دارای تغییراتی هستند (شکل ۲). ازون بر روی برخی پلاستیک‌ها، پارچه‌ها، نقاشی‌ها

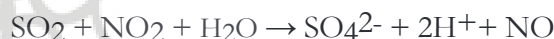
$\text{NO}_x$  که در هوا پراکنده می‌شود، از نوع  $\text{NO}$  است. این گاز، با غلظت‌های موجود در جو، پس از اکسید شدن به  $\text{NO}_2$  و ترکیب با هیدروکربن‌ها در مجاورت نور خورشید، زمینه تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی را فراهم می‌آورد (Erfan Manesh & Afioni, 2008: 189-190).



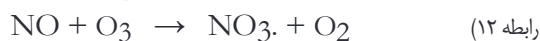
واکنش گرماگیر است لذا با سرد شدن مخلوط احتراق تعادل به سمت چپ متمایل می‌شود)



میزان ته‌نشست  $\text{NO}_2$  بر سطح مصالح و ساختارها کمتر از  $\text{SO}_2$  است، که قطعاً دلیل مشاهده کمتر نترات نسبت به سولفات در محصولات خوردگی مصالح و بخش‌های محافظت‌شده از باران می‌باشد. تأثیر مهم دیگر اکسیدهای نیتروژن، نقش کاتالیزوری آنها در اکسیداسیون  $\text{SO}_2$  است. در واقع، نترات در برخی مصالح به‌عنوان کاتالیزور برای سولفات عمل می‌کند و امکان وقوع واکنش‌های مختلف را فراهم می‌آورد:



مونواکسید نیتروژن ( $\text{NO}$ ) نیز پس از یک مرحله اکسیداسیون به دی‌اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ ) تبدیل می‌شود و در نهایت، در مجاورت رادیکال هیدروکسیل (که منشأ آن مولکول آب است)، به اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ ) تغییر ماهیت می‌دهد. اسید نیتریک یک اسید قوی است که حتی در معرض رطوبت هوای کم تمایل به خوردگی سطوح دارد، و این مسئله برای مناطق با اقلیم گرم و خشک اهمیت زیادی دارد.



نتایج مشابهی در مورد مواد ناخواسته جامد و مایع در قطرات مه مشاهده شده که منجر به تبدیل کامل دی‌اکسید ازت به اسید نیتریک می‌شود:

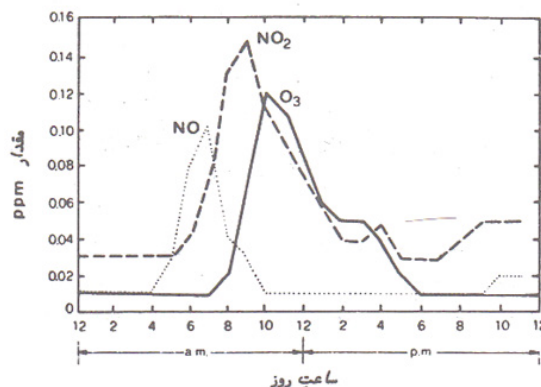


توصیفشان استفاده می‌شود که اغلب به اندازه و حالت ذرات بستگی دارد (Erfan Manesh & Afioni, 2008). از جمله «گرد و غبار» به ذرات جامد معلق در جریان فعالیت‌هایی مانند سایش و پودر کردن مواد گفته می‌شود، «فیوم» به ذرات جامدی اشاره دارد که طی فرآیند سرد کردن و تراکم بخارات فلزی حاصل شده‌اند، «مه» به ذرات مایع پراکنده در فضا اطلاق می‌شود، «دوده» به ذرات کربنی گفته می‌شود که در جریان احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند و «مه دود» به‌طور کلی برای بیان آلودگی هوا به کار می‌رود.

تشکیل ذرات به شکل ریزگرد می‌تواند با ایجاد ساختارهای ثانویه نمکی و تولید الکترولیت‌های خورنده به بافت‌های تاریخی مانند ساختارهای فلزی، چوبی، مصنوعی و سنگی آسیب برساند. اثر خورنده ریزگردهای اسیدی و نقش کاتالیزوری ذرات کربنی در تشکیل اسید نیتریک و اسید سولفوریک بررسی شده است. این ذرات قادرند با دخالت در تعدادی از واکنش‌های شیمیایی، موجب افزایش خوردگی در آثار تاریخی شوند و مهم‌تر از همه اینکه به‌عنوان منبع ماده سیاه و سفیدی عمل می‌کنند که سنگ‌ها را آلوده و کثیف می‌کنند. تأثیر این ذرات در چرک شدن و ایجاد کبره سیاه بر روی سطوح سنگ‌های تاریخی واقع در فضاهای باز بدون پوشش و با پوشش، اثبات شده است (Hackney, 1984: 105; Watt et al., 2009).

### مهمترین منابع آلاینده‌گی

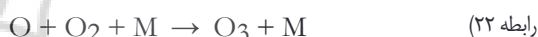
سازمان‌ها و پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف در سراسر جهان وجود دارند که به‌طور علمی و عملی انواع آلاینده‌ها را شناسایی کرده و با تفسیرهای مختلف از جمله صنعتی، شیمیایی، جغرافیایی، محیط زیستی و هواشناسی منابع تولیدکننده این آلاینده‌ها را مشخص می‌کنند. از جمله این سازمان‌ها می‌توان به آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا و سازمان بین‌المللی هوای پاک اشاره کرد که با انجام تحقیقات گسترده و پس از سال‌ها مطالعه و بررسی مستمر، نقش مهمی در شناسایی، اندازه‌گیری و طبقه‌بندی آلاینده‌های زیست‌محیطی ایفا کرده‌اند. بر اساس آمار و داده‌های



شکل ۲. تغییرات شاخص روزانه ازون، اکسید ازت و دی‌اکسید ازت. (Amoroso & Vasco, 1983).

Figure 2. Daily Variations of Ozone, Nitrogen Oxide, and Nitrogen Dioxide Index (Amoroso & Vasco, 1983)

و پوشش‌های سطحی به‌طور مستقیم تأثیر خورنده دارد. ازون، به‌همراه سولفات نیز بر روی سنگ‌های کلسیتی تاریخی تأثیر خورنده دارد که در واکنش آن نشان داده شده است.



باید توجه داشت که ازون در کنار سولفات ( $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$ ) بسیار قوی‌تر از سولفات و نیترات رادیکالی ( $\text{SO}_2$ ) است.

### ریزگردها<sup>۹</sup> (هواویزها)

ریزگردها یا هواویزها ذرات آلاینده معلق یا جامد با ابعاد یک نانومتر تا ۰/۱ میکرومتر هستند که در یک گاز پراکنده‌اند (Kalberer, 2015). با وجود تعاریف مختلفی که در علوم هواشناسی برای ریزگردها وجود دارد، این ذرات به‌عنوان ترکیبات آلی فرار<sup>۹</sup> (VOCs) شناخته می‌شوند و از منابع متنوعی به‌وجود می‌آیند. در طبقه‌بندی این مواد، واژه‌های مختلفی برای

ریزگردها به جو هستند. ساخت مواد اولیه ساختمانی مانند آجر، موزائیک، تیر بتونی، کفپوش سیمانی، بلوک دیواری، آسفالت، شن و ماسه، سقف سبک و سفال در تمامی مراحل قالب‌گیری، پخت و قطعه‌بندی موجب وارد شدن انواع مختلف آلاینده‌ها به جو می‌شود. همچنین در هر مرحله از فرآیندهای کلان راه‌سازی، انواع مختلف سیلیکات‌ها، اکسیدهای فلزاتی چون آهن و مس، ترکیبات آهکی و کربنات‌های یک یا دو ظرفیتی به‌طور گسترده وارد جو می‌شوند و به‌راحتی جابجا می‌شوند این ریزگردها نه تنها خود باعث آسیب‌های متعدد ساختاری می‌شوند، بلکه ایجاد واکنش‌های رادیکالی را در لایه‌های فوقانی جو تسریع و تسهیل می‌کنند (Semeniuk & Dastoor, 2018).

بسیاری از شهرهای استان فارس، از جمله منطقه مرودشت، غنی از معادن مختلف هستند. در شهرستان مرودشت، معادنی مانند معدن مرمیریت، سنگ آهک و لاشه سنگ به وفور یافت می‌شود. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد معادن این منطقه آن است که در هنگام حفاری و استخراج، حجم بسیار زیادی گاز و ذرات معلق به جو منتقل می‌شود. در این راستا، در بیشتر شهرهای مجاور معادن، میزان آلاینده‌های جوی بسیار بالاست و کیفیت هوای این مناطق به‌طور چشمگیری پایین است و غیر استاندارد محسوب می‌شود (Haddad, 2004). از جمله آلاینده‌های مربوط به معادن، گازهای نظیر متان، ایزوبوتان، سولفیدهای چند ظرفیتی هیدروژن و انواع آروماتیک‌های چند حلقه‌ای مانند نفتالن<sup>۱</sup>، آنتراسن<sup>۱</sup>، پایرن<sup>۲</sup>، فنانترن<sup>۳</sup> هستند (Kuna-Gwoździewicz, 2013). این ترکیبات با اندک رطوبت موجود در محیط و همچنین فلزات کاتالیزکننده‌ای چون آرسنیک به سرعت واکنش داده و به الکل‌های آروماتیک چند حلقه‌ای مانند نفتول‌های آروماتیک تبدیل می‌شوند که به دلیل داشتن بنیان‌های الکلی، ماهیت هیدروژن‌دهی (اسیدی) دارند و بسیار فرار هستند. این مواد در ایجاد باران‌های اسیدی نسبت به اکسیدهای سولفور و نیتروژن، قدرت بیشتری دارند (Gurr, 1971). در بررسی‌های صورت گرفته، تعداد ۱۸۹ مرکز تولیدی اعم از معدن سنگ، کارخانه و مرکز صنعتی در منطقه

منتشر شده از این نهادها، مهم‌ترین منابع تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی عبارتند از:

فعالیت معادن و صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، شیمیایی، نساجی، پتروشیمی، نظامی، استخراج فلزات و سایر صنایع است که از نظر مصرف سوخت‌های فسیلی و آزادسازی ترکیبات ناخواسته به محیط زیست حائز اهمیت می‌باشند (Rosenfeld & Feng, 2011: 57).

فرآیندهای حمل و نقل ریلی و جاده‌ای، ترافیک شهری، منابع خانگی مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌های ناشی از جابجایی‌های بزرگ دریایی، به‌ویژه انتقال نفت خام و میعانات گازی (Preston & Chester, 1996: 26).

همچنین کشاورزی گسترده و استفاده از کودهای شیمیایی، سموم و آفت‌کش‌های صنعتی، که موجب آزادسازی ترکیبات سنتزی و محصولات حاصل از تجزیه آن‌ها به محیط زیست می‌شود، به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی شناخته می‌شود (Kland, 1988: 315).

### فعالیت صنایع و معادن در منطقه

صنایع و کارخانجات تولیدی از منابع اصلی آلاینده‌های هوا محسوب می‌شوند و در میان صنایع مختلف، پتروشیمی، نساجی، تولید مواد شیمیایی و صنایع مرتبط با کشاورزی صنعتی بیشترین سهم را در آلودگی محیط زیست دارند (Cheremisinoff, 2002: 53; Rosenfeld & Feng, 2011). سوخت و ترکیبات مصرفی، تولیدات و ضایعات کارخانه‌ها هر کدام به نوبه خود می‌توانند به‌عنوان عامل آلاینده‌ای برای هوا مطرح شوند. به‌طور خاص، هشتاد درصد گاز دی‌اکسید سولفور در جریان احتراق سوخت‌های فسیلی از منابع ثابت آلوده‌کننده تولید می‌شود که در این میان سهم نیروگاه‌های برق از همه بیشتر است. پالایشگاه‌های نفت، کارخانه‌های ذوب مس و کارخانه‌های سیمان نیز از منابع غیر احتراقی تولید اکسیدهای گوگرد به شمار می‌روند (Harrison, 2001: 588; Erfan Manesh & Afioni, 2008: 203). علاوه بر این، بسیاری از محصولات کانی غیر فلزی در معادن و صنایع مرتبط با راه‌سازی و ساختمان‌سازی، مسئول مستقیم وارد کردن

تاریخی مهم تخت‌جمشید و نقش‌رستم قرار دارد، معرفی می‌شود.

### الف) مجتمع پتروشیمی مرودشت (شیراز)

مجتمع پتروشیمی مرودشت (شیراز) به‌عنوان اولین واحد تولیدی صنایع پتروشیمی ایران در سال ۱۳۴۲ خورشیدی به‌منظور تولید کودهای شیمیایی ازته آغاز به فعالیت کرد. این شرکت در فاصله ۴۵ کیلومتری

مرودشت شناسایی شد (جدول ۱). در این فهرست، برخی از مراکز مانند معادن سنگ، کارخانجات بزرگ نظیر کارخانه قند مرودشت، مجتمع‌های تولید مواد شیمیایی و پتروشیمیایی، به‌ویژه مجتمع پتروشیمی مرودشت، به‌دلیل وسعت و ظرفیت تولید، نقش مهمتری در آلودگی هوای منطقه ایفا می‌کنند. بنابراین، مجتمع پتروشیمی مرودشت به‌عنوان مهم‌ترین منبع آلاینده در منطقه، که در فاصله‌ای نزدیک از دو محوطه

جدول ۱. آمار معادن، کارخانه‌ها و مراکز تولیدی و صنعتی منطقه مرودشت.

Table 1. Statistics of Mines, Factories, and Industrial Production Centers in the Marvdasht Region..

| عنوان فعالیت<br>(Activity Title)   | تعداد مراکز<br>Number of<br>(Centers) | محصولات و جزئیات فعالیت مرکز<br>(Products and Activity Details)  |
|--|---------------------------------------|--|
| معادن سنگ<br>(Stone Mining)  | 14                                    | اعم از معادن لاشه سنگ، سنگ آهک و مرمریت<br>(Includes rubble stone, limestone, and marble quarries)   |
| تولید مواد و محصولات شیمیایی و پتروشیمیایی<br>Chemical and Petrochemical<br>(Products) | 10                                    | شامل ساخت محصولات و سموم دفع آفات، ساخت کودها و ترکیبات ازته، ساخت فرآورده‌های نفتی تصفیه شده، تولید الیاف مصنوعی از صابون و پاک‌کننده‌ها و فرآورده‌های تمیزکننده<br>Includes manufacturing pesticides, fertilizers and nitrogen compounds, refined petroleum products, synthetic fibers, (soaps, detergents, and cleaning products)   |
| محصولات غذایی و آشامیدنی<br>(Food and Beverage Products)                               | 60                                    | شامل تولید غذاهای آماده برای حیوانات و طیور، تولید محصولات خبازی، تولید محصولات گوشتی، تولید فرآورده‌های لبنی، تولید محصولات نشاسته‌ای، تولید قند و شکر، بسته‌بندی غلات پوست کنده، کنسروسازی<br>Includes animal and poultry feed production, bakery products, meat products, dairy products, starch-based products, sugar and confectionery production, packaged (grains, and canned food production)                                    |
| محصولات فلزی فابریکی<br>(Fabricated Metal Products)                                    | 11                                    | شامل ساخت ظروف آلومینیومی، محصولات فلزی ساختمانی، صنایع بسته‌بندی، ساخت قالب‌های صنعتی، ساخت قطعات فرپورژه، تولید انواع بشکه‌های فلزی، عملیات صنعتی کوتینگ فلزات، پرس کاری، قالب‌زنی، متالوژی، تراشکاری<br>Includes aluminum containers, metal building materials, packaging industries, industrial mold manufacturing, wrought iron components, metal barrels, industrial metal coating, (pressing, molding, metallurgy, and machining) |

| عنوان فعالیت<br>(Activity Title)  | تعداد مراکز<br>Number of<br>(Centers) | محصولات و جزئیات فعالیت مرکز<br>(Products and Activity Details)   |
|---|---------------------------------------|---|
| محصولات کانی غیر فلزی<br>(Non-Metallic Mineral Products)                | 55                                    | شامل ساخت انواع کالاهای بتونی، سیمانی و گچی، ساخت محصولات سفالی و سرامیکی ساختمانی غیرنسوز، تولید آسفالت، برش و شکل دادن و پرداخت سنگ<br>Includes concrete, cement, and gypsum products, non-refractory ceramic and clay building materials, asphalt (production, stone cutting, shaping, and polishing)  |
| ساخت ماشین آلات و تجهیزات<br>Machinery and Equipment<br>(Manufacturing) | 6                                     | شامل ساخت ماشین آلات کارخانجات شالی کوبی، ساخت ماشین آلات معدنی، ساخت دستگاه بلوک زنی، انواع پمپ و کمپرسور، تجهیزات مکانیکی، ساخت لوله پروفیل<br>Includes rice milling machinery, mining machinery, block-making machines, pumps and compressors, mechanical (equipment, and pipe and profile manufacturing)  |
| وسایل نقلیه موتوری<br>(Motor Vehicles)                                  | 4                                     | اعم از ساخت بدنه، قطعات و ملحقات وسایل نقلیه موتوری (Includes manufacturing vehicle bodies, parts, and accessories)   |
| محصولات لاستیکی و پلاستیکی<br>(Rubber and Plastic Products)             | 18                                    | شامل ساخت انواع ظروف یکبار مصرف، نایلون و نایلکس، بسته بندی آب معدنی، قطعات پلاستیکی تزریقی، انواع جعبه پلاستیکی برای حمل و نقل، نوار آبیاری از پلی اتیلن، لوله پلی اتیلن، بلوک از پلی استایرن، قطعات لاستیکی بادی<br>Includes disposable containers, plastic bags and films, bottled water packaging, injection-molded plastic parts, plastic transport boxes, polyethylene irrigation tape, polyethylene pipes, polystyrene blocks, and blow-molded (rubber components) |
| کک و فرآورده های حاصل از نفت<br>(Coke and Petroleum Products)           | 3                                     | اعم از ساخت فرآورده های نفتی تصفیه شده، قیر صنعتی و پرکردن گاز اکسیژن و کپسول گاز مایع<br>Includes refined petroleum products, industrial bitumen, (and filling oxygen and liquefied gas cylinders)   |
| تولید سایر مصنوعات<br>(Other Manufactured Goods)                        | 8                                     | شامل ساخت کاغذ و محصولات کاغذی، صنایع مبلمان، صنایع چرم، ابزار پزشکی<br>Includes paper and paper products, furniture industries, (leather industries, and medical instruments)  |

شرکت پتروشیمی مرودشت با بهره برداری از چهار واحد تولید آمونیاک، اوره، اسید نیتریک و نیترات آمونیوم آغاز به کار کرد و روند توسعه این مجتمع با راه اندازی واحدهای جدید ادامه یافت. از جمله

از شهر شیراز، در مجاورت رودخانه گُز و نزدیک به مرودشت واقع شده است. مجتمع پتروشیمی مرودشت در جهت جنوب غربی محوطه های تاریخی تخت جمشید و نقش رستم قرار دارد (شکل ۳).



شکل ۳. موقعیت مجتمع پتروشیمی مرو دشت در فاصله ۱۵ کیلومتری میراث جهانی تخت جمشید و ۱۷ کیلومتری محوطه نقش رستم. (Google Earth).

Figure 3. Location of the Marvdasht Petrochemical Complex, 15 km from the Persepolis World Heritage Site and 17 km from the Naqsh-e Rostam Site (Google Earth).

### ب) کشاورزی گسترده در دشت مرو دشت

دشت مرو دشت به دلیل برخورداری از شرایط مساعدی همچون آب فراوان و زمین حاصل خیز، زمینه‌ای مطلوب برای کشاورزی داشته و توسعه این بخش در شهرستان به شکل گسترده‌ای صورت گرفته است (شکل ۴). وجود سد مخزنی درودزن با گنجایش یک میلیارد مترمکعب به همراه چاه‌ها و کاریزهای متعدد، تأمین کننده آب کشاورزی منطقه است. فعالیت‌های کشاورزی در این ناحیه به صورت صنعتی و دستی انجام شده و روش‌های آبیاری نیز به شکل دیمی و آبی، شامل سیستم‌های قطره‌ای، بارانی و غرق آبی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمده‌ترین محصولات زراعی شامل گندم آبی، جو آبی، شلتوک، چغندر قند و ذرت بوده و انواع جالیز بیشترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده است. همچنین محصولاتی مانند گوجه‌فرنگی، خیارسیز، کلم، بادمجان، هویج و زیتون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و واحدها و شرکت‌های متعددی در منطقه مرو دشت در زمینه تولید، تهیه و بسته‌بندی این محصولات فعالیت دارند.

واحدهای به بهره‌برداری رسیده می‌توان به واحد سودااش، واحدهای جدید تولید آمونیاک، اوره، اسید نیتریک و نیترات آمونیوم با ظرفیت معادل ۱۰ برابر واحدهای قدیم و همچنین واحدهای کلر آلکالی، متانول، پرکلرین و آرگون اشاره کرد (جدول ۲). در پی این توسعه، واحدهای قدیمی از چرخه تولید خارج شدند و طرح اوره و آمونیاک سوم پتروشیمی شیراز در سال ۱۳۹۵ به بهره‌برداری رسید. این طرح سالانه ۶۷۷۰۰۰ تن آمونیاک و ۱۰۷۳۰۰۰ تن اوره تولید می‌کند. این مجتمع به طور مداوم در طول سال به تولید مشغول است و ۱۶ نوع محصول مختلف را در مقادیر گوناگون تولید می‌کند (Air Pollution Research Unit, 1998). توده دود و غبار صنعتی یکی از ضایعات این پتروشیمی است که معمولاً با جریان باد تا حاشیه شهرهای مرو دشت، زرقان و بندامیر نیز کشیده می‌شود. آسیب‌های ناشی از این مجتمع صنعتی تهدیدی جدی برای محیط طبیعی و تاریخی منطقه به شمار می‌رود، هرچند که از همان ابتدا برخی از کارشناسان و ناظران به تصمیم‌گیرندگان درباره ساخت این مجتمع در این منطقه تاریخی و طبیعی هشدار داده بودند.

جدول ۲. تولیدات پتروشیمی شیراز (Air Pollution Research Unit, 1998).

Table 2. Shiraz Petrochemical Production (Air Pollution Research Unit, 1998).

| ظرفیت، تن در روز<br>Capacity, tons/<br>(day) | نوع محصول /<br>(Product Type)                                    | سال بهره‌برداری<br>Year of<br>(Operation) | کارخانه /<br>(Factory)                 |
|--|--|---|--|
| 111  | آمونیاک /<br>(Ammonia)   | 1963                                      | کود شیمیایی /<br>(Chemical Fertilizer) |
| 145  | اوره ۴۶ درصد نیتروژن /<br>(Urea 46% Nitrogen)                    |   |  |
| 136  | اسید نیتریک /<br>(Nitric Acid)                                   |   |  |
| 240  | کربنات سدیم /<br>(Sodium Carbonate)                              | 1972                                      | سودااش /<br>(SodaAsh)                  |
| 60   | جوش شیرین /<br>(Sodium Bicarbonate)                              |   |  |
| 1200   | آمونیاک /<br>(Ammonia)   | 1985                                      | طرح گسترش /<br>(Expansion Plan)        |
| 1500   | اوره /<br>(Urea)   |   |  |
| 1034   | اسید نیتریک ۵۸ درصد /<br>(Nitric Acid 58%)                       |   |  |
| 650  | نترات آمونیوم ۳۴/۵ درصد ازت<br>(Ammonium Nitrate 34.5% Nitrogen) |   |  |
| 15   | آرگون /<br>(Argon)   | 1994                                      | کلر الکالی /<br>(Chlor-Alkali)         |
| 61   | کلر مایع /<br>(Liquid Chlorine)                                  | 1988                                      |  |
| 182  | اسید کلریدریک ۳۳ درصد /<br>(Hydrochloric Acid 33%)               |   |  |
| 137  | سود سوزآور /<br>(Caustic Soda)                                   |   |  |
| 30   | آب ژاول /<br>(Sodium Hypochlorite)                               |   |  |
| 15   | هیپوکلریت کلسیم /<br>(Calcium Hypochlorite)                      | 1995                                      | پرکلرین /<br>(Perchlorine)             |
| 255  | الکل متیلیک /<br>(Methanol)                                      | 1990                                      | متانول /<br>(Methanol)                 |

حمل شده و تا زمان برخورد با سطحی مشخص، به صورت معلق در جو باقی می‌مانند. نوع آفات مهاجم تأثیر مستقیمی بر میزان و نوع کودها و سموم مورد استفاده دارد، اما به دلیل غالب بودن شیوه‌های سنتی کشاورزی در این منطقه، کاربرد سموم و آفت‌کش‌ها بدون رعایت اصول علمی و عمدتاً بدون توجه به نوع آفت هدف انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، در کاشت برنج از همان سمی (دیازینون) استفاده می‌شود که برای کشت گوجه‌فرنگی نیز به کار می‌رود (Haddad, 2004). از این‌رو، دسته‌بندی انواع کودها و

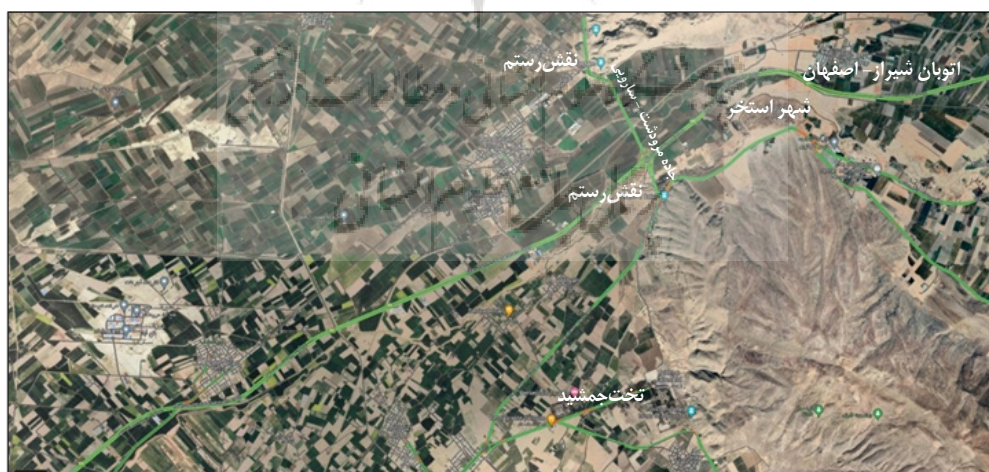
در سال‌های اخیر، به دلیل کاهش حجم برداشت محصول ناشی از کم‌آبی و برداشت بیش از حد از زمین‌های کشاورزی، استفاده از کودها، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌های شیمیایی افزایش یافته است. این امر، علاوه بر بهبود عملکرد محصولات، خطرات زیست‌محیطی را نیز به همراه داشته است. استفاده بیش از حد از این ترکیبات، به‌ویژه کودها و آفت‌کش‌ها، موجب افزایش پدیده بادبردگی می‌شود، زیرا نازل‌های پخش‌کننده، این ترکیبات را به ذرات بسیار ریزی تبدیل کرده که به آسانی توسط باد



علاوه بر آلودگی‌های ناشی از استفاده از کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها، مشکل به آتش کشیدن بقایای محصولات چوبی چون جو و گندم در زمین‌های کشاورزی نیز وجود دارد که سطح آلاینده‌های هوای منطقه مرو دشت را به شدت افزایش می‌دهد. متأسفانه سوزاندن کاه و کُش در اراضی کشاورزی ایران رایج است و این مسئله زیست‌محیطی از خردادماه آغاز شده و تا اواخر مهر و آغاز بارندگی‌های پاییز ادامه می‌یابد. پیامدهای زیست‌محیطی این اقدام شامل ورود آلاینده‌هایی چون نیتروژن، کربن، گوگرد و همچنین ذرات کربن، پتاسیم و کلر به هوا است که به موازات کاهش ماده خاک در بلندمدت اتفاق می‌افتد (Karami et al., 2018). از آنجا که این آتش‌سوزی‌ها در فرآیندهای احتراق ناقص سوخت گیاهی قرار می‌گیرند، مهم‌ترین آلاینده‌های حاصل از آنها ذرات معلق خاکستر و گاز دی‌اکسید کربن خواهند بود. ذرات معلق خاکستر که توسط سیستم‌های احتراقی یا به واسطه آتش زدن ضایعات به جو منتقل می‌شوند، مواد غیرآلی متراکمی تولید می‌کنند که به صورت گویچه‌های کروی کوچکی دیده می‌شوند. سیلیکات‌ها و اکسیدهای آهن از جمله این نوع خاص از ریزگردها هستند (El-Hinnawi & Hashmi, 1987).

سموم مورد استفاده در منطقه به‌طور دقیق امکان‌پذیر نیست؛ اما برخی از علف‌کش‌های رایج شامل تایپیک، پوما سوپر، گالانت، آوانت و سینکر هستند. از آنجا که زمین‌های کشاورزی در نزدیکی محوطه‌های میراث فرهنگی منطقه، همچون تخت جمشید و نقش‌رستم، قرار دارند، احتمال انتقال این ترکیبات به سطح آثار تاریخی از طریق بادبردگی افزایش می‌یابد و می‌تواند در درازمدت موجب آسیب و فرسایش این آثار شود.

کشاورزی‌های گسترده و استفاده از انواع مختلف کودهای شیمیایی، سموم و آفت‌کش‌های صنعتی معمولاً منجر به آزاد شدن ترکیبات سنتزی و محصولات حاصل از تجزیه آنها به محیط می‌شود (Kland, 1988). بسیاری از ترکیبات دیرپای آلی، که اکنون یا در گذشته به واسطه فعالیت‌های گسترده کشاورزی به وجود آمده‌اند، ناشی از استفاده بسیار زیاد از ترکیبات شیمیایی خاص در این صنعت هستند. به‌عنوان مثال قارچ‌کش‌ها<sup>۱۴</sup>، حشره‌کش‌ها<sup>۱۵</sup>، علف‌کش‌ها<sup>۱۶</sup>، گیاه داروها<sup>۱۷</sup>، حلال‌ها، کرم‌کش‌ها<sup>۱۸</sup>، ضد میکروب‌ها<sup>۱۹</sup> و بسیاری از گونه‌های شیمیایی صنعتی پرکاربرد در صنعت کشاورزی در محیط تجمع‌یافته و سهم بزرگی از آلاینده‌های محیطی را به خود اختصاص می‌دهند (Kodavanti et al., 2014; Talcott, 2013).



شکل ۴. گستردگی اراضی کشاورزی و مجاورت آن با محوطه نقش‌رستم و تخت‌جمشید به‌همراه بخشی از شبکه حمل و نقل جاده‌ای در منطقه مرو دشت (Google Earth).

Figure 4. The Extent of Agricultural Lands and Their Proximity to the Naqsh-e Rostam and Persepolis Sites, Along with a Section of the Road Transportation Network in the Marvdasht Region (Google Earth).

### ج) ترابری و حمل و نقل جاده‌ای در منطقه

تعداد وسایل نقلیه و فعالیت‌های حمل و نقل در استان‌های مختلف کشور، به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی و صنعت و معدن، سهم زیادی در ایجاد آلودگی هوا دارند. استفاده از زیرساخت‌های حمل و نقل نیازمند توجه ویژه به آلودگی‌های محیط زیستی و گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های حمل و نقل است (Maddah & Jafari, 2022). رشد و توسعه فیزیکی و افقی شهر مرودشت، همراه با افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش شدید تعداد خودروها، از دلایل اصلی افزایش حجم آلوده‌های شهری است. همچنین، با توسعه صنایع و کشاورزی و افزایش تولیدات مختلف در منطقه، حجم ترابری و حمل و نقل جاده‌ای بیشتر شده و این امر مقدمات آلودگی بیشتر منطقه را فراهم کرده است. در حال حاضر، جاده‌های پر تردد از جمله اتوبان شیراز - اصفهان و شبکه ارتباطی بین شهرها و روستاهای شهرستان مرودشت، مانند جاده مرودشت - سارویی که از نزدیکی بسیاری از محوطه‌های تاریخی عبور می‌کند، مهم‌ترین منابع آلوده‌های هوای ناشی از تردد جاده‌ای منطقه هستند (تصویر ۲) و در گروه منابع خطی<sup>۲۰</sup> انتشار آلوده‌ها قرار می‌گیرند. علاوه بر این، گردشگری منطقه با جاذبه‌های متعدد تاریخی و طبیعی باعث افزایش حمل و نقل به‌ویژه در فصول پیک مانند نوروز می‌شود. به‌گونه‌ای که در این ایام روزانه شاهد تردد هزاران وسیله نقلیه در نزدیکی آثار و محوطه‌های تاریخی شاخصی چون تخت جمشید و نقش‌رستم هستیم، که این امر علاوه بر مداخله منطقی در این محوطه‌ها، بر افزایش آلوده‌های محیطی نیز تأثیرگذار است.

در زمینه حمل و نقل جاده‌ای، تعیین دقیق انواع وسایل نقلیه و آمار هر کدام دشوار است و حتی در صورت امکان شناسایی تعداد آنها، نمی‌توان میزان و درصد آلودگی را به هر یک به‌طور جداگانه نسبت داد. صرف‌نظر از سن و سال ساخت هر خودرو، هر وسیله نقلیه موتوری الگوریتم آلودگی منحصر به فرد خود را ایجاد می‌کند (Malakutian, 1996) و در صورت نمونه‌گیری از لوله‌های خروجی (اگزوز) دسته‌های مختلف وسایل نقلیه، نوع آلوده‌ها قابل شناسایی

است. در فرآیند احتراق ناقص، موادی نظیر اکسیدهای کربن، سولفور و نیتروژن، همچنین ذرات خاکستر یا هیدروکربن‌هایی که به‌طور کامل سوخته نشده‌اند، وارد هوا می‌شوند. بنابراین، ترانزیت و حمل و نقل جاده‌ای در افزایش آلودگی محیط نقش بسزایی دارند و با تولید ریزگردهای اولیه، اثرات زیست‌محیطی مخربی را ایجاد می‌کنند (Bel & Holst, 2018).

### بحث و تحلیل

صنایع و کارخانجات تولیدی، با توجه به نوع فعالیت خود، قادرند گونه‌های مختلفی از آلوده‌ها را به جو یا سیستم‌های آبی و خاکی منتقل کنند. در مناطقی مانند رجاآباد، جاده نقش‌رستم به شول، مرودشت، دوراهی تخت‌جمشید و جاده شیراز - اصفهان، انواع کارخانجات محصولات غذایی و آشامیدنی وجود دارند که محصولات متنوعی تولید می‌کنند. از جمله این محصولات می‌توان به قند و شکر، رب گوجه، ذرت خشک‌کنی، برنج سفید، نمک طعام، ماکارونی، انواع کنسروهای سبزیجات، خیارشور، زیتون و ترشی، همبرگر و کیاب، خوراک دام و طیور و ماهی و لبنیات اشاره کرد. تولید هر کدام از این محصولات به مصرف انرژی نیاز دارد و این مصرف انرژی بالا، سهم قابل توجهی در آلودگی محیط زیست ایجاد می‌کند. علاوه بر این، صنایع تولیدی از ترکیبات شیمیایی مختلفی برای دستیابی به کیفیت نهایی محصول استفاده می‌کنند (Air Pollution Research Unit, 1998)، مانند ترکیبات نگهدارنده شیمیایی و اسانس‌های خوراکی که از مهم‌ترین اجزای محصولات غذایی هستند. این ساختارهای شیمیایی که عمدتاً ترکیبات آلی فلزی و استرهای آروماتیک هستند، در فرآیندهای رادیکالی شرکت می‌کنند و با ایجاد ساختارهای هیدروکسیلی و نیتراتی فرار، شوره‌های نمکی در سطوح مختلف تولید می‌کنند (Kosseva, 2013).

در بسیاری از مناطق شهرستان مرودشت، صنایع تولیدی محصولات فلزی و پلاستیکی فعال هستند که محصولات مختلفی به بازار عرضه می‌کنند (Haddad, 2004)، نظیر ظروف یکبار مصرف سلولزی، آلومینیومی و پلاستیکی، محصولات تراشکاری شده، قطعات فرورژه

در طبقات بالای جو به رادیکال‌های بسیار فعالی تبدیل می‌شوند و در برهم زدن توازن‌های گازی جو نقش بسزایی دارند؛ به طوری که با تخریب ساختار ازون، هم موجب نازک شدن لایه ازون می‌شوند و هم چرخه تولید اکسیدهای نیتروژن و سولفور را تسریع می‌کنند (Gilbert & Patrick, 2017).

در منطقه مرودشت صنایع کوچک تری نیز فعالیت دارند که سهم قابل توجهی در میزان آلاینده‌های منطقه دارند. صنایعی مانند چرم‌سازی، ساخت محصولات کاغذی و صنایع وابسته به چوب، نقش مهمی در آلودگی محیط زیست ایفا می‌کنند. در صنعت چرم‌سازی، مقادیر زیادی از اکسیدهای کروم به جو منتقل می‌شود و مصرف روغن‌های سبک در این صنعت بسیار رایج است (Kanagaraj et al., 2015). این آلاینده‌ها به نوبه خود آسیب‌های جدی به محیط زیست وارد می‌کنند. در صنایع کاغذسازی و وابسته به چوب، همچنین از بسیاری از مواد فعال کننده سطحی<sup>۲۱</sup> صنعتی مانند تگزاپون<sup>۲۲</sup> استفاده می‌شود. این مواد با ایجاد مایسل و ساختارهای دوگانه آب‌دوست - آب‌گریز موجب می‌شوند بسیاری از مواد که در آب قابل انحلال نیستند، به راحتی در آب حل شده و شستشو می‌شوند (Pletnev, 2001). همچنین با ایجاد نمک‌های سنگین طولیل زنجیره (نمک سوربات<sup>۲۳</sup>)، شوره‌های گسترده‌ای بر روی آثار سنگی ایجاد می‌شود (Ying, 2006). از طرف دیگر، صنایع کاغذسازی و وابسته به چوب مقادیر زیادی ریزگرد به محیط وارد می‌کنند که بسیار پایدار بوده و به راحتی از طریق نقل و انتقالات جوی جابه‌جا می‌شوند (Bajpai, 2017).

یکی دیگر از کارخانه‌های صنایع مادر که فعالیت‌های آن در اطراف شهرهای مرودشت، زرقان، ارسنجان و بخش‌هایی نظیر محمدآباد به‌وفور مشاهده می‌شود، صنایع تولید و ساخت محصولات شیمیایی و پتروشیمیایی است که ترکیباتی نظیر آب اکسیژنه، رزین‌های آمینه، قارچ‌کش‌ها و آفت‌کش‌های کشاورزی، کودهای شیمیایی، فرآورده‌های نفتی، لیاف نساجی، صابون‌ها، استرهای سبک و مواد غیربازیافتی یک‌بار مصرف تولید می‌کنند. این صنایع در کنار تولید محصولات اصلی خود، تولیدکننده انواع مواد اولیه خام نیز

فلزی، سینک ظرفشویی، قالب‌های صنعتی، انواع بشکه‌های فلزی، لوازم خانگی و پمپ‌های کشاورزی. بخش عمده‌ای از آلاینده‌های این صنایع شامل فلزات خورنده و اکسیدهای فلزی ناپایدار است که در محیط‌های مرطوب به راحتی واکنش‌های جابجایی را انجام می‌دهند و در برهم‌کنش با ساختارهای سنگی آهنی و کربناتی، به سرعت جایگزین کلسیم، باریوم و منیزیم می‌شوند و باعث تخریب سنگ‌های تاریخی می‌گردند. اکسید بسیاری از این فلزات، نظیر سرب، کادمیم، کبالت و تالیوم، فرار هستند و به راحتی از مکانی به مکان دیگر منتقل می‌شوند. تأسفاور اینجاست که این اکسیدها و نمک‌های فلزات سنگین اثرات به مراتب مخرب‌تری نسبت به باران‌های اسیدی دارند و از عوامل اصلی خوردگی سنگ‌ها به‌شمار می‌روند (Baedecker et al., 1992 Saba et al., 2018).

بسیاری از صنایع دیگر نیز تولیدکننده فلزاتی مانند آلومینیوم و اکسیدهای آن هستند. ویژگی منحصر به فرد اکسید آلومینیوم خاصیت مات‌کنندگی و کدر کردن سطوح است، به طوری که با انباشته شدن لایه‌های متعدد این اکسید بر روی یک سطح، آن سطح به‌طور کامل سیاه شده و دیگر قابل رؤیت نیست. این پدیده در نزدیکی معادن استخراج آلومینیوم رایج و قابل مشاهده است (Grimaud et al., 2017). صنایع تولید ظروف یک‌بار مصرف نیز که در این دسته قرار دارند، در تولید ترکیبات آلاینده بسیار مؤثر هستند و عمده ترکیبات آلاینده‌ای که به محیط وارد می‌کنند، هیدروکسیل‌های استارین هستند که علاوه بر فراریت نسبی خود، زمینه‌ساز ایجاد واکنش‌های رادیکالی می‌شوند و اگر به لایه‌های بالایی جو برسند، با انجام این واکنش‌ها، موجب تولید اکسیدهای ناپایدار از هتروآتم‌ها می‌شوند. کارخانجات ساخت ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی و همچنین صنایع تولید مواد و تجهیزات ساختمانی، دسته‌ای دیگر از صنایع پرکاربرد این منطقه هستند که با فرآیندهای مختلف آبکاری و ریخته‌گری، ترکیبات آلی فرار و نیمه‌فرار زیادی را به جو وارد می‌کنند. از جمله این ترکیبات می‌توان به وینیل‌ایدها اشاره کرد که بسیار سبک بوده و همزمان با آزاد کردن هالوژن‌های خورنده به محیط،

بنزنی جزء آلاینده‌های آروماتیک خاصی هستند که به‌طور مشترک با نام بیتکس<sup>۳۳</sup> در جهان شناخته می‌شوند. این ساختارهای بسیار فرار که به‌شدت فعال هستند، بافتی روغنی دارند و ماهیت حل‌کنندگی آنها از بسیاری از حلال‌های آلی رایج شاخص‌تر است (Mustafa et al., 2018). در هنگام استفاده و انبار کردن این مواد، نشت‌های احتمالی یا حتی استعمال غیرصحیح این ترکیبات و ورود آنها به محیط، آسیب‌های جبران‌ناپذیری ایجاد می‌کند.

نشستن این ترکیبات بر روی بافت‌هایی مانند سطوح سنگی تاریخی باعث زدودن برخی از ساختارهای آلی گیاهی و جانوری می‌شود که در نتیجه قسمت عمده‌ای از بافت سنگی نیز از بین می‌رود (Liu et al., 2018). البته کرزول‌ها نیز همین ویژگی را دارند، اما علاوه بر این ماهیت مخرب، ساختارهای کرزولی پتانسیل بالای هیدروژن‌دهی دارند و با اسیدی کردن محیط با pH حدود ۴/۳ تا ۵/۱، ظرفیت بالایی در تشدید باران‌های اسیدی از خود نشان می‌دهند (Duan et al., 2018). تخریب ناشی از باران‌های اسیدی به‌طور خزنده و آرام انجام می‌شود و شاید در کوتاه‌مدت تأثیر آن بر روی آثار سنگی چندان مشهود نباشد، اما در بلندمدت آسیب‌های بسیار جدی به این آثار وارد می‌شود. لازم به ذکر است که موضوع اسیدی بودن تنها به باران اختصاص ندارد، و در بسیاری از مناطق، مانند مرودشت، که در مواقعی از سال رطوبت نسبی محیط قابل توجه است، بدون بارش باران، آلاینده‌های سطح آثار به واسطه رطوبت و شبنم‌های صبحگاهی فعال می‌شوند.

به‌منظور بررسی میزان آلاینده‌گی هوای مناطق مرودشت، از هر یک از محوطه‌های تخت‌جمشید، نقش‌رستم و پتروشیمی مرودشت سه نمونه برداشت شد و با استفاده از برآوردهای شیمی‌سنجی<sup>۳۳</sup> در الگوی آماری باکس بهنکن<sup>۳۴</sup>، از مجموع سه نمودار به‌دست آمده میانگین‌گیری شد؛ و در نهایت یک نمودار مدرج بر اساس سه تکرار آزمایش به‌عنوان نمودار برآیند از هر منطقه به‌دست آمد. نتایج حاصل از جداسازی‌های کروماتوگرافی و اندازه‌گیری سطوح زیر منحنی‌های کروماتوگرام در شکل ۵ نشان داده شده

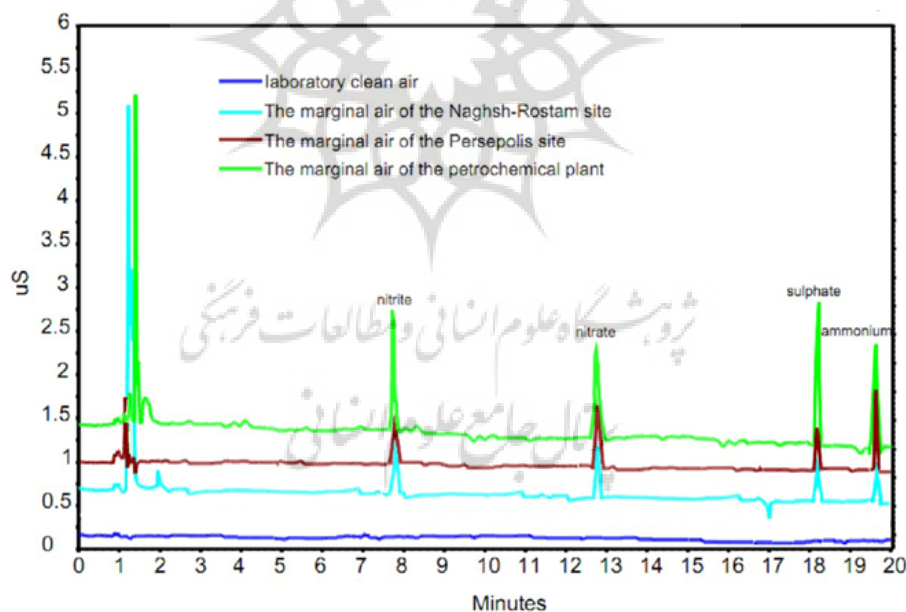
هستند؛ از جمله آمونیاک، اسید نیتریک، اوره، نیترات آمونیوم، الکل‌های سبک (اتانول و متانول)، آرگون، قلیاهای تجاری و بی‌کربنات‌های صنعتی (Mossavar, 1981). همچنین تولید بسیاری از فسفات‌ها، گوگردهای گرانبه‌آلی، مرکاپتان<sup>۳۴</sup>ها، قیر، ایفای مصنوعی و میعانات گازی نیز جزء این شاخص‌ها هستند. این محصولات تولیدی علاوه بر اینکه خود از خطرناک‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند، با مکانیسم‌های شیمیایی ساده یا پیچیده قادرند آلاینده‌های بسیار خطرناک ثانویه‌ای تولید کنند که از اکسیدهای سولفور و نیتروژن نیز مخرب‌ترند (Zangeneh et al., 2011). به‌طور عمده، سوختن نفت و محصولات نفتی مانند بنزین، گازوئیل و سوخت‌های فسیلی و همچنین صنایع وابسته به صنعت نفت و میعانات گازی، مانند صنعت پتروشیمی، سهم بزرگی در انتشار ترکیبات آلی به جو دارند. در اثر سوختن این ترکیبات، علاوه بر دی‌اکسید کربن، مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی فرار نیز در جو انتشار می‌یابد. علاوه بر این، در اثر احتراق نامناسب سوخت‌های هیدروکربنی که به علت فقر اکسیژن در محیط‌های با دمای بالا و کم فشار رخ می‌دهد، بسیاری از ساختارهای آروماتیک چندحلقه‌ای تولید می‌شوند که به‌طور مستقیم به جو وارد شده یا بر اثر بارش‌ها به خاک منتقل می‌شوند (Garcia et al., 1992).

نکته قابل توجه آن است که احتمال اسیدی شدن باران با ترکیبات شیمیایی دیگری به غیر از اکسیدهای گوگرد و نیتروژن نیز وجود دارد. برای مثال، ترکیبات نیترو تولوئنی<sup>۳۵</sup> که در اکثر صنایع کاربرد دارند، به راحتی می‌توانند pH باران را بدون فعل و انفعالات درون جوی و دخالت ازون اسیدی کنند. بسیاری از صنایع دیگر، مانند صنایع تولید وسایل نقلیه موتوری و صنایع تولید محصولات الاستیک و پلاستیک، نیز در زمره صنایع مادر و تولیدکننده طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلاینده هستند. این صنایع مادر در جهت انجام برخی از زدودن<sup>۳۶</sup>ها و سنتزهای مقرون‌به‌صرفه، از ترکیباتی مانند متازایلین<sup>۳۷</sup>، پاراکرزول<sup>۳۸</sup>، اتیل بنزن<sup>۳۹</sup>، تولوئن<sup>۳۰</sup> و بسیاری از نیتروآروماتیک<sup>۳۱</sup>های تک‌حلقه‌ای استفاده می‌کنند. ساختارهای تولوئنی، زایلنی و

می‌شود که نمونه هوای تمیز آزمایشگاهی هیچ‌گونه آلاینده قابل شناسایی نداشته و تغییرات هدایت در کروماتوگرام مربوط به آن در حد  $0.1$  میکروزیمنس است. از طرف دیگر، در نمونه‌هایی که به‌صورت میدانی جمع‌آوری و آنالیز شدند، مشاهده شد که در زمان بازداری هرگونه آلاینده، شمارنده شناسگر از سطح زیر این تغییرات انتگرال‌گیری کرده و تغییرات هدایت الکتریکی شناسگر به‌طور قابل‌توجهی مشاهده می‌شود. هر پیک انتگرال‌گیری‌شده نمایانگر یک منحنی توزیع نرمال برای فراوانی عبوری از درون ستون است که توسط شناسگر تشخیص داده شده است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مقداری هر آلاینده در جدول ۳ گزارش شده است و برای هرگونه مشخص‌شده مقادیر غلظتی آن به‌طور دقیق اعلام شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های کمی و تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده، مشخص می‌شود که مقادیر آلاینده‌های موجود در هوا بسیار

است. در اندازه‌گیری‌های تجزیه‌ای، سه نمونه شاهد نیز به‌عنوان هوای تمیز و عاری از هرگونه آلاینده بررسی شد. این نمونه‌ها به‌عنوان هوای تمیز با استفاده از دمش مصنوعی هواساز مطابق با ترکیب درصد هوای عادی برداشت شدند که بر اساس برآیند حاصل از آنالیز کروماتوگرافی، هیچ‌گونه یونیده‌شده‌ای در آن شناسایی نشد (شکل ۵).

همان‌طور که در نمودار مشخص است، زمان بازداری آنیون نیتريت (مربوط به آلاینده دی‌اکسید نیتروژن)  $7/89$  دقیقه، آنیون نیترات (مربوط به آلاینده ازون)  $12/91$  دقیقه، آنیون سولفات (مربوط به آلاینده دی‌اکسید گوگرد)  $18/37$  دقیقه و زمان بازداری برآیند همه گونه‌های یونی، برای کاتیون آمونیوم (مربوط به گاز آمونیاک)  $19/66$  دقیقه است. این زمان‌ها با در نظر گرفتن آفست ۵ درصدی در دستگاه دو بعدی محاسبه شده‌اند. با توجه به تغییرات هدایت شناسگر استفاده‌شده در دستگاه کروماتوگرافی یونی، مشخص



شکل ۵. نمودار حاصل از جداسازی‌های شیمیایی گونه‌های شناسایی‌شده در تعداد ۱۲ آزمایش. هر کروماتوگرام نماینده سه تجزیه کروماتوگرافی مربوط به یک منطقه است. خط آبی: هوای تمیز تولید شده در آزمایشگاه (نمونه شاهد)، خط فیروزه‌ای: هوای محوطه نقش‌رستم، خط قرمز: هوای محوطه تخت‌جمشید، خط سبز: هوای پتروشیمی مرو دشت.

Figure 5. Graph of Chemical Separation of Identified Species in 12 Experiments. Each Chromatogram Represents Three Chromatographic Analyses for a Specific Region. Blue Line: Laboratory-Generated Clean Air (Control Sample), Turquoise Line: Naqsh-e Rostam Site Air, Red Line: Persepolis Site Air, Green Line: Marvdasht Petrochemical Complex Air.

جدول ۳. مقادیر غلظتی به دست آمده از هر آلاینده در دو فرم گازی و یونی برای نمونه‌های آنالیزی.

Table 3. Concentration values of each pollutant in gaseous and ionic forms for analyzed samples.

| آمونیاک<br>(NH <sub>3</sub> )<br>μg/m <sup>3</sup> | آمونیم<br>(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )<br>μg/mL | دی‌اکسید<br>گوگرد<br>(SO <sub>2</sub> )<br>μg/m <sup>3</sup> | سولفات<br>(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )<br>μg/mL | اوزن<br>(O <sub>3</sub> )<br>μg/m <sup>3</sup> | نیترات<br>(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )<br>μg/mL | دی‌اکسید<br>نیتروژن<br>(NO <sub>2</sub> )<br>μg/m <sup>3</sup> | نیتريت<br>(NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )<br>μg/mL | گونه<br>(Pollutant type)<br><br>منطقه<br>(Region)                             |
|--|--|--|---|--|--|--|--|---|
| -  | -  | -  | -   | -  | -  | -  | -  | نمونه هوای تمیز آزمایشگاهی<br>(Laboratory clean air<br>sample-Control Sample) |
| 72.2   | 0.52   | 130  | 10.8  | 108.3  | 0.94   | 130  | 8.4  | نمونه هوای محوطه تخت جمشید<br>(Persepolis Site Air Sample)                    |
| 65.3   | 0.47   | 133.6  | 11.1  | 109.5  | 0.95   | 136.2  | 8.8  | نمونه هوای محوطه نقش رستم<br>(Naqsh-e Rostam Site Air<br>Sample)              |
| 75   | 0.54   | 291  | 24.2  | 116.4  | 1.01   | 148.6  | 9.6  | نمونه هوای پتروشیمی مرودشت<br>(Marvdasht Petrochemical<br>Complex Air Sample) |

صنایع غذایی، شیمیایی، نساجی، پتروشیمی، نظامی و معادن سنگ و شن و ماسه هستند که هم از نظر مصرف سوخت‌های فسیلی و هم از نظر آزاد کردن ترکیبات ناخواسته مانند ذرات گرد و غبار، دود و مواد شیمیایی به محیط زیست تأثیر گذارند. همچنین، استفاده از کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی برای بهبود کیفیت محصولات، به‌ویژه در شرایط کشاورزی گسترده و گاه بی‌رویه، میزان آلودگی در منطقه را افزایش داده است. عملیات تکمیلی زراعت مانند آتش زدن مزارع پس از برداشت محصول، از دیگر عوامل آلوده کننده هوا است که اثرات منفی بلندمدتی بر منطقه خواهد داشت. علاوه بر این، ترافیک و حمل‌ونقل جاده‌ای نیز به‌عنوان منابع آلودگی در منطقه شناخته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی، مجتمع پتروشیمی مرودشت است. نمونه‌گیری از هوای محوطه‌های تاریخی تخت جمشید و نقش‌رستم با استفاده از نمونه‌گیرهای گازی و استخراج یون‌ها توسط

بالا بوده و این وضعیت هشدار جدی را می‌رساند که باید به آن توجه ویژه‌ای داشت. نتایج تجزیه‌ای نشان می‌دهند که ارتباط معنی‌داری بین غلظت آلاینده‌ها و صنایع پتروشیمی وجود دارد و همان آلاینده‌هایی که در مجاورت این صنایع با غلظت‌های بسیار بالا یافت می‌شوند، در محوطه‌های تخت‌جمشید، نقش‌رستم و محیط اطراف آن، با غلظتی به نسبت کمتر مشاهده می‌گردند.

### نتیجه‌گیری

از دید آلاینده‌های هوا و نزدیک شدن آنها به آستانه غلظت بحرانی می‌تواند آثار مخربی بر محیط زیست و میراث فرهنگی برجای بگذارد. روند صنعتی شدن منطقه مرودشت و حضور و مجاورت صنایع مختلف با محوطه‌های تاریخی، فرضیه فرسایش در این محوطه‌ها را تقویت کرده است. مهم‌ترین منابع تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در دشت مرودشت شامل

**حامیان مادی و معنوی:** این مقاله نتیجه طرح پژوهشی نگارنده در پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری با عنوان "مطالعه فرآیند فرسایش آثار صخره‌ای تحت تأثیر آلاینده‌های هوا" است که در فاصله سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰ با حمایت معنوی پژوهشگاه مذکور انجام شده است. همچنین بخشی از هزینه‌های آزمایشگاهی این طرح توسط پایگاه میراث جهانی پارسه- پاسارگاد تأمین شده است.

**دسترسی به داده‌ها:** داده‌های خام این پژوهش در اختیار نویسندگان است و با مکاتبات قابل دسترسی است.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Stoichiometry
2. Passive sampling methods
3. Ogawa
4. Sigma-aldrich
5. Photolysis
6. Persistent organic pollutants (POPs)
7. US Environmental Protection Agency
8. Aerosols
9. Volatile Organic Compounds (VOCs)
10. Naphthalene
11. Anthracene
12. Pyrene
13. Phenanthrene
14. Fungicides
15. Pesticides
16. Herbicides
17. Agrochemicals / Agrichemicals
18. Nematocides
19. Biocides
20. Line Source
21. Surfactant
22. Texapon

دستگاه کروماتوگرافی یونی و اندازه‌گیری غلظت‌ها نشان‌دهنده حضور فراوان آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ )، دی‌اکسید گوگرد ( $\text{SO}_2$ )، آمونیاک ( $\text{NH}_3$ ) و اوزون ( $\text{O}_3$ ) به همراه مقادیر زیادی یون‌های نیتريت ( $\text{NO}_2^-$ )، نیترات ( $\text{NO}_3^-$ )، سولفات ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) و آمونیوم ( $\text{NH}_4^+$ ) در این محوطه‌ها است. مقایسه این نتایج با نمونه‌های آنالیز شده از هوای مجتمع پتروشیمی مرودشت نشان می‌دهد که ارتباط معناداری بین غلظت آلاینده‌ها و فعالیت‌های این مجتمع وجود دارد و همان آلاینده‌هایی که در مجاورت صنایع پتروشیمی با غلظت‌های بالا شناسایی شده‌اند، در محوطه‌های تخت‌جمشید و نقش‌رستم با غلظت‌های کمتر مشاهده می‌شوند.

این آلاینده‌ها قادرند در مجاورت آثار سنگی منطقه و با جذب اندک رطوبت، به ترکیبات اسیدی خطرناک تبدیل شده و همراه با باران بر روی ساختارهای سنگی فرود آیند و موجب فرسایش و تخریب مورایث فرهنگی منطقه شوند. این ترکیبات به همراه رطوبت در سطح و منافذ سنگ‌های تاریخی نفوذ کرده و می‌توانند با تغییر pH محیط، ساختار بافت سنگ را به تدریج دگرگون کنند. به‌ویژه آثار سنگی آهکی در محوطه‌های تاریخی دشت مرودشت که ترکیب کلسیتی دارند، در برابر محلول‌های ضعیف اسیدی نیز دچار انحلال و تخریب می‌شوند.

#### سپاسگزاری

از دوست گرانقدر، آقای دکتر امیر اسماعیل زاده از گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد به‌خاطر مشاوره و همکاری ارزشمند در انجام آزمایشات، از آقای دکتر سیدمحمد امین‌امامی استاد محترم دانشگاه هنر اصفهان به‌دلیل مشاوره‌های گران‌بها، و همچنین از همکاری‌های صمیمانه سرکار خانم دکتر زهره‌سادات حسینی، خانم مهندس زهرا مروتی‌پور و آقای مسعود نخعی‌اشتری از همکاران سابق پایگاه‌های میراث جهانی پارسه-پاسارگاد در زمینه همکاری در نمونه‌برداری‌های این پژوهش، قدردانی و تشکر ویژه می‌شود.

**تضاد منافع:** ندارد.

23. Sorbate salt
24. Mercaptan
25. Nitrotoluene
26. Rub off
27. Meta-xylene
28. Para-cresol
29. Ethyl benzene
30. Toluene
31. Nitro-aromatics
32. BTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, xylene)
33. Chemometrics
34. Box-Behnken

#### منابع / References

Air Pollution Research Unit. (1998). Investigation of air pollution in Shiraz Petrochemical Complex. Tehran: Oil Industry Research Institute. Unpublished report. [In Persian].

[واحد پژوهش آلودگی هوا. (۱۳۷۷). بررسی آلودگی هوا در مجتمع پتروشیمی شیراز. تهران: پژوهشگاه صنعت نفت.]

Amoroso, G. G., & Vasco, F. (1983). Stone decay and conservation: Atmospheric pollution, cleaning, consolidation, and protection. Elsevier.

Ansari Lari, Ahmad, & Ansari, M.. (2016). Estimate The Amount of Soil Erosion in Marvdasht Plain (Iran, Fars) by Rusle Model. Quantitative Geomorphological Researches, 4(4), 134-149. SID. <https://sid.ir/paper/248999/en>. [In Persian].

[انصاری لاری، احمد؛ و انصاری، مریم. (۱۳۹۵). برآورد میزان فرسایش خاک در دشت مرودشت (استان فارس) با استفاده از مدل تجربی RUSLE. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۴)، ۱۳۴-۱۴۹. SID. <https://sid.ir/paper/248999/fa>.]

Baedecker, P. A., Reddy, M. M., Reimann, K. J., & Sciammarella, C. A. (1992). Effects of acidic deposition on the erosion of carbonate stone: Experimental results from the U.S. National Acid Precipitation Assessment Program (NAPAP). Atmospheric Environment, Part B: Urban Atmosphere, 26(2), 147. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90018-N](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90018-N).

Bajpai, P. (2017). The pulp and paper industry. In Pulp and paper industry (pp. 9). Elsevier.

Bel, G., & Holst, M. (2018). Evaluation of the impact of Bus Rapid Transit on air pollution in Mexico City. Transport Policy, 63, 209. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.001>.

Cheremisinoff, N. P. (2002). Industrial air pollution sources and prevention. In Handbook of air pollution prevention and control (pp. 53). Butterworth-Heinemann.

Duan, W., Meng, F., Cui, H., Lin, Y., Wang, G., & Wu, J. (2018). Ecotoxicity of phenol and cresols to aquatic organisms: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 157, 441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.089>.

El-Hinnawi, E., & Hashmi, M. H. (1987). Air quality and atmospheric issues. In the state of the environment (p. 5). Butterworth-Heinemann.

Erfan Manesh, M., & Afioni, M. (2008). Environmental pollution: Water, soil, and air (1st ed.). Tehran: Arkan Danesh. [In Persian].

[عرفان‌منش، مجید؛ و افیونی، مجید. (۱۳۸۷). آلودگی محیط زیست: آب، خاک و هوا. تهران: ارکان دانش.]

Fadaei, H., Emami, M. A., & Karimi Jashni, A. (2019). A reassessment of the environmental monitoring methodology of air pollution in rock heritage sites. Parseh Journal of Archaeological Studies, 3(9), 93-107. SID. <https://sid.ir/paper/958019/en>. [In Persian].

[فدایی، حمید؛ امامی، سید محمد امین؛ و کریمی



جشنی، ایوب. (۱۳۹۸). بازنگری در روش‌شناسی پایش محیطی آلودگی هوا در محوطه‌های میراث صخره‌ای. مطالعات باستان‌شناسی پارسه، 3(9)، 93-107. SID. <https://sid.ir/paper/958019/fa>.

Garcia, J. P., Beyne-Masclat, S., Mouvier, G., & Masclat, P. (1992). Emissions of volatile organic compounds by coal-fired power stations. *Atmospheric Environment, Part A: General Topics*, 26(9), 1589. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90059-T](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90059-T).

Gilbert, M., & Patrick, S. (2017). Poly vinyl chloride. In *Brydson's plastics materials* (8th ed., p. 329). Butterworth-Heinemann.

Grimaud, G., Perry, N., & Laratte, B. (2017). Aluminium cables recycling process: Environmental impacts identification and reduction. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.010>.

Gurr, E. (1971). Introduction to substituted naphthols. In *Synthetic dyes in biology, medicine and chemistry* (p. 755). Academic Press.

Hackney, S. (1984). The distribution of gaseous air pollution within museums. *Studies in Conservation*, 29(3), 105.

Haddad, K. (2004). A study of air pollution in Marvdasht city. Fars: General Department of Environment of Fars. Unpublished report. [In Persian].

[حداد، کمال. (۱۳۸۳). مطالعه آلودگی هوای شهر مرودشت. فارس: اداره کل حفاظت محیط زیست استان فارس.].

Hamilton, R., Crabbe, H., Fitz, S., & Grøntoft, T. (2009). Monitoring, modelling and mapping. In J. Watt, J. Tidblad, V. Kucera, & R. Hamilton (Eds.), *The effects of air pollution on cultural heritage* (pp. 29-52). Springer.

Harrison, R. M. (2001). *Pollution: Causes, effects and control* (4th ed.). Royal Society of Chemistry.

Kalberer, M. (2015). Aerosols | Aerosol physics and chemistry. In G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (2nd ed., pp. 23). Academic Press.

Kanagaraj, J., Senthilvelan, T., Panda, R. C., & Kavitha, S. (2015). Eco-friendly waste management strategies for greener environment towards sustainable development in the leather industry: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 89, 1. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.013>.

Karami, H., Keshavarz, H., Allahyari, A., & Taghizadeh, M. M. (2017). Investigation of air pollutants caused by burning wheat straw and stubble: A case study of Marvdasht County, Fars Province. Paper presented at the 2nd National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, March 1, 2018. [In Persian].

[کرمی، حمید؛ کشاورز، حبیب؛ الهیاری، اصغر؛ و تقی زاده، محمد مهدی. (۱۳۹۶). بررسی آلاینده‌های هوا ناشی از سوزاندن کاه و کلش گندم، مطالعه موردی: شهرستان مرودشت استان فارس. مقاله ارایه شده در: دومین همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار. دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ۱۰ اسفندماه ۱۳۹۶.].

Khosh Akhlagh, R., & Hassanshahi, M. (2002). Estimation of damages caused to the residents of Shiraz city due to air pollution. *Journal of Economic Research (Tahghighat-E-Eghtesadi)*, 61, 53-75. <https://sid.ir/paper/430452/fa>. [In Persian]

[خوش اخلاق، رحمان؛ و حسن شاهی، مرتضی. (۱۳۸۱). تخمین خسارات وارده به ساکنان شیراز به دلیل آلودگی هوا. تحقیقات اقتصادی، (۶۱)، ۵۳-۷۵. <https://sid.ir/paper/430452/fa>.].

Kland, M. J. (1988). Teratogenicity of pesticides and other environmental pollutants. In V. K. Meyers (Ed.), *Studies in Environmental Science*

(Vol. 31, p. 315). Elsevier.

Kodavanti, P. R. S., Royland, J. E., & Sambasiva Rao, K. R. S. (2014). Toxicology of persistent organic pollutants. Reference Module in Biomedical Sciences. Elsevier.

Kosseva, M. R. (2013). Sources, characterization, and composition of food industry wastes. In Food Industry Wastes (p. 37). Academic Press.

Krochmal, D., & Kalina, A. (1997). A method of nitrogen dioxide and sulphur dioxide determination in ambient air by use of passive samplers and ion chromatography. Atmospheric Environment, 31(20), 3473. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00154-4).

Kuna-Gwoździewicz, P. (2013). Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps. Journal of Sustainable Mining, 12(1), 7.

Liu, A., Hong, N., Zhu, P., & Guan, Y. (2018). Understanding benzene series (BTEX) pollutant load characteristics in the urban environment. Science of The Total Environment, 619-620, 938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.184>.

Lorenzo, M., Campo, J., & Picó, Y. (2018). Analytical challenges to determine emerging persistent organic pollutants in aquatic ecosystems. Trends in Analytical Chemistry, 103, 137. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.04.003>.

Maddah, M., & Jafari, A. (2019). Factors affecting air pollution created in the transportation sector of Iranian provinces. Journal of Environmental Studies, 45(1), 77-86. SID. <https://sid.ir/paper/3218/en>. [In Persian].

[مداح، مجید؛ و جعفری، عبدالنظام. (۱۳۹۸). عوامل موثر بر آلودگی هوای ایجاد شده در بخش حمل و نقل استانهای ایران. محیط شناسی، ۴۵(۱)، ۸۶-۷۷. SID. <https://sid.ir/paper/3218/fa>.

Malakutian, M. (1996). Air pollution (Master's thesis). Tehran: Islamic Azad University. [In Persian].

[ملکوتیان، محمد. (۱۳۷۵). آلودگی هوا. (رساله کارشناسی ارشد). تهران: دانشگاه آزاد اسلامی].

Mossavar Rahmani, B. (1981). Petrochemicals. In Energy Policy in Iran (p. 125). Pergamon.

Mustafa, A., Azim, M. K., Raza, Z., & Kori, J. A. (2018). BTEX removal in a modified free water surface wetland. Chemical Engineering Journal, 333, 451. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.168>.

Nevers, N. de. (2000). Air pollution control engineering (2nd ed.). McGraw-Hill Companies.

Parashar, D. C., Raman, V., & Singh, M. (1987). Spectrophotometric determination of sulfur dioxide. Environmental Pollution, 45(2), 125. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(87\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0269-7491(87)90052-2).

Pletnev, M. Y. (2001). Chemistry of surfactants. In V. B. Fainerman, D. Möbius, & R. Miller (Eds.), Studies in Interface Science (Vol. 13, p. 1). Elsevier.

Preston, M., & Chester, R. (1996). Chemistry and pollution of the marine environment. In Pollution: Causes, effects and control (p. 26).

Rosenfeld, P. E., & Feng, L. G. H. (2011). The petroleum industry: Risks of hazardous wastes. In Boston: William Andrew Publishing (p. 57).

Saba, M., Quiñones-Bolaños, E. E., & Barbosa López, A. L. (2018). A review of the mathematical models used for simulation of calcareous stone deterioration in historical buildings. Atmospheric Environment, 180, 156. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.043>.

Semeniuk, K., & Dastoor, A. (2018). Current state of aerosol nucleation parameterizations for air-quality and climate modeling. Atmospheric Environment, 179, 77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.039>.

Speight, J. G. (2017). Environmental regulations. In *Environmental Organic Chemistry for Engineers* (p. 355). Butterworth-Heinemann.

Talcott, P. A. (2013). Miscellaneous herbicides, fungicides, and nematocides. In *Small Animal Toxicology* (3rd ed., p. 401). W.B. Saunders.

UNESCO. (1972). Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage, adopted by the General Conference at its seventeenth session, Paris, 16 November 1972.

Vahidzadeh, R. (2009). Air pollution in Haft Tappeh and Chogha Zanbil: The role of environmental analysis in the preventive conservation of historical materials in these sites. In *Proceedings of the 7th Conference on Conservation and Restoration of Cultural Relics and Architectural Decorations, 2004* (pp. 9-25). Edited by R. Vatandoost. Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. [In Persian].

[وچیدزاده، رضا. (۱۳۸۸). آلودگی هوا در هفت‌تپه و چغازنبیل: نقش تحلیل‌های زیست‌محیطی در حفاظت پیشگیرانه از مصالح تاریخی موجود در این محوطه‌ها. در: مجموعه مقالات هفتمین همایش حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی و تزیینات وابسته به معماری، ۱۳۸۴، به کوشش رسول وطن‌دوست، صص. ۲۵-۹. تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری].

Watt, J., Tidblad, J., Kucera, V., & Hamilton, R. (Eds.). (2009). *The effects of air pollution on cultural heritage* (Vol. 6). Springer.

Ying, G.-G. (2006). Fate, behavior, and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment International*, 32(3), 417. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.07.004>.

Zangeneh, F. T., Sahebdehfar, S., & Ravanchi, M. T. (2011). Conversion of carbon dioxide to valuable petrochemicals: An approach to clean development mechanism. *Journal of Natural*

*Gas Chemistry*, 20(3), 219–230. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(10\)60191-0](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(10)60191-0).

Zhu, R., Zhu, J., Ge, F., & Yuan, P. (2009). Regeneration of spent organoclays after the sorption of organic pollutants: A review. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3212–3226. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.015>.