



The effect of traffic on the production of polluting aerosols: a case study of pollution in Mashhad, Iran

Mehdi Reza Poursoltani*¹, Ahmad Parvin²

1- Assoc. Prof., Dept. of Petroleum Engineering and Geology, Ma.C, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

2- M.Sc. Dept. of Petroleum Engineering and Geology, Ma.C, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Original Research

Article history:

Received: 2024 November 24

Accepted: 2025 March 16

Keywords:

Air pollution

Heavy metals

Aerosol

Traffic dust

Mashhad

ABSTRACT

Chemical compounds or elements resulting from human and non-human activities may be released into the atmosphere as air pollutants and can harm living things. Traffic dust contains high levels of heavy metals that can affect human health and the environment. Mashhad, as a religious city, hosts millions of pilgrims and travelers every year, resulting in congestion and increased air pollution, especially in the city center and near the holy shrine. Various factors are effective in increasing the amount of air pollutants and increasing the city's dust. By measuring the concentration of heavy metals in samples from urban areas with high traffic volume, the level of pollution was studied and sources of production were investigated. Pollutants and dust were collected from the air filters of public vehicles and the samples were analyzed for a range of elements using methods that included ICP-MS, atomic absorption, XRD and spot analysis from BSE. The results show that copper, nickel, lead and zinc are prominent air pollutants in Mashhad, and the most likely sources of pollution are related to vehicle traffic and to factories and mines around the city.

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30189.1646>

Corresponding author: Mehdi Reza Poursoltani, E-mail: poursoltani@iau.ac.ir

Cite this article: Mehdi Reza Poursoltani, Ahmad Parvin (2026). The effect of traffic on the production of polluting aerosols: a case study of pollution in Mashhad, Iran, New Findings of Applied Geology, Vol. 20, No. 39, pp: 127-140.



Journal of New Findings of Applied Geology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC BY-NC 4.0

Web Site: <https://nfag.basu.ac.ir> E-mail: nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Today, air pollution is one of the most important unforeseen events in the world, and a large number of people worldwide are involved in related problems every year. The most important cause of air pollution in large cities is related to traffic and transportation of motor vehicles, so that more than 80 percent of the carbon monoxide in the air is estimated to be related to motor vehicle traffic.

Since the amount of pollution produced by vehicles is directly related to the number of vehicles and the volume of traffic, the presence of a high level of pollutants in the air can be directly related to the high volume of passing traffic, which can lead to increased air pollution. Among the air pollutants, compounds such as nitrogen oxides, sulfur dioxide, carbon monoxide, hydrocarbons and suspended particles play a more important role than other pollutants. Among the various air polluting sectors, transportation and industry are the most important air polluting sectors, respectively.

Methods and Materials

In this research, 11 urban routes were selected for sample collection. Each sample was analyzed using ICP-MS for 33 elements, with one sample analyzed using XRD, 10 samples using BSE, and six samples using atomic absorption.

Discussion and Results

Copper (Cu): Some researchers have shown that the concentration of copper in traffic dust is mainly the result of frequent use of car brakes (e.g. Nagendra et al., 2016; Fallah-Shorshani et al., 2017). In samples taken in the city, the minimum concentration of copper, between the Holy Shrine and Tabarsi Street, was 53.3 ppm. The maximum concentration, near the city Train Station, was 278.3 ppm. The average was 113.8 ppm. High concentrations may reflect braking on uneven road surfaces, whereas low concentrations may reflect smooth traffic and the reduced use of brakes on the road leading to the Holy Shrine.

Nickel (Ni): Analysis of minimum and maximum concentrations of nickel along

different routes suggests that high nickel values reflect various types of cars and brake wear, corrosion of vehicles, and car oil pumps, which are the main nickel sources. The sample from the Holy Shrine Terminal has a high nickel concentration. The average concentration of nickel in the samples is 311.7 ppm, which is above the permissible limit compared to the standards.

Lead: (Pb) The average concentration of lead in the samples is 502.7 ppm. The highest amount of lead is in sample G with a concentration of 578.4 ppm, near the city Train Station and probably caused by heavy traffic (e.g., Lu, et al., 2009; Fallah-Shorshani et al. al., 2017).

Zinc (Zn): The average concentration of zinc is 399.4 ppm. Factors such as the wear of car tires release a large amount of zinc into the environment. The zinc concentration is high compared to some high-traffic cities elsewhere in the world.

Iron (Fe): The average concentration of iron is 1.613 ppm, which is low compared to other elements, and iron is not considered as a polluting element. The source may be attributed to soil dust, poor management of transportation, construction, and iron production units (e.g., Dehghani et al., 2017). Compared to other cities, especially cities in industrialized countries, the concentrations of lead, zinc and nickel in Mashhad are significantly higher.

Conclusion

According to this research, copper, nickel, lead and zinc elements are considered as some of the air pollutants in Mashhad city. Among them, the most polluting element is nickel, which shows a higher percentage than some of the most trafficked cities in the world. The main polluting sources in Mashhad are mainly related to the traffic of vehicles and factories and mines around Mashhad, which can be the most effective source of urban traffic.



تأثیر ترافیک در تولید آئروسول‌های آلوده کننده: مطالعه موردی آلودگی شهرستان مشهد، ایران

مهدی‌رضا پورسلطانی^{۱*} و احمد پروین^۲

- ۱- دانشیار گروه مهندسی نفت و زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی نفت و زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ترکیبات یا عناصر شیمیایی ناشی از فعالیت‌های انسانی و غیرانسانی ممکن است به‌عنوان آلاینده هوا در جو منتشر شده و به موجودات زنده آسیب برسانند. گردوغبار ترافیکی دارای میزان بالایی از فلزات سنگین است که می‌تواند سلامت انسان و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد. مشهد به‌عنوان شهری مذهبی سالانه میزبان میلیون‌ها زائر و مسافر است که نتیجه آن شلوغی و افزایش آلودگی هوا به‌ویژه در مرکز شهر و نزدیک حرم مطهر است. عوامل مختلفی در افزایش میزان آلاینده‌های هوا و افزایش ریزگردها در شهر مؤثر هستند. با اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های مناطق شهری با حجم ترافیک بالا، میزان آلودگی بررسی شده و منابع تولید آن‌ها شناسایی شده است. آلاینده‌ها و گردوغبار از فیلترهای هوای خودروهای عمومی جمع‌آوری شده و با استفاده از روش‌های مختلف، شامل JCP-MS، جذب اتمی، XRD و تجزیه نقطه‌ای به روش BSE مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مس، نیکل، سرب و روی از آلاینده‌های شاخص هوای مشهد هستند و محتمل‌ترین منابع آلودگی مربوط به تردد وسایل نقلیه و کارخانه‌ها و معادن اطراف شهر است.
تاریخچه مقاله:	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶	
کلیدواژه‌ها:	
آلودگی هوا	
فلزات سنگین	
آئروسول	
غبارهای ترافیکی	
مشهد	

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30189.1646>

* نویسنده مسئول: مهدی‌رضا پورسلطانی، poursoltani@iau.ac.ir

استناد: مهدی‌رضا پورسلطانی و احمد پروین (۱۴۰۵). تأثیر ترافیک در تولید آئروسول‌های آلوده کننده: مطالعه موردی آلودگی شهرستان مشهد، ایران، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۲۰، شماره ۳۹، صفحه ۱۲۷ تا ۱۴۰.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را براساس لایسنس کرییتیو کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.



آدرس وبسایت نشریه: <https://nfag.basu.ac.ir> ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

امروزه آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در جهان محسوب می‌شود و سالانه تعداد زیادی از مردم در سراسر جهان با پیامدهای ناشی از آن مواجه هستند. آلاینده‌های هوا را می‌توان براساس منبع انتشار آن‌ها به آلاینده‌های با منشأ طبیعی، (خارج از حیطه دخالت بشر) و آلاینده‌های با منشأ مصنوعی (ناشی از فعالیت‌های انسانی) تقسیم کرد. وسایل نقلیه‌ای که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند در میان منابع مصنوعی آلاینده هوا، سهم قابل‌توجهی در تولید آلاینده‌ها (به‌ویژه در مناطق شهری) داشته و از مهم‌ترین عوامل انتشار دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. مهم‌ترین علت آلودگی هوا در کلان‌شهرها مربوط به ترافیک و حمل و نقل وسایل نقلیه موتوری؛ به‌طوری‌که بیش از ۸۰ درصد از منواکسیدکربن موجود در هوا مربوط به تردد وسایل نقلیه موتوری برآورد شده است (بریگز و همکاران، ۱۹۹۶؛ چارلزورث و همکاران، ۲۰۰۳؛ ایسو و هافورد، ۲۰۱۱؛ الشیدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ دهمرده و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجا که میزان آلودگی تولید شده به‌وسیله وسایل نقلیه ارتباط مستقیمی با تعداد وسایل و حجم ترافیک موجود دارد براین اساس وجود میزان زیاد آلاینده در هوا می‌تواند ارتباط مستقیمی با حجم بالای ترافیک عبوری داشته باشد که می‌تواند منجر به افزایش آلودگی هوا شود. از بین آلاینده‌های هوا، ترکیباتی نظیر اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد، منوکسیدکربن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق از میان سایر آلاینده‌ها نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند. در بخش‌های مختلف آلوده‌کننده هوا، بخش‌های حمل و نقل و صنعت به ترتیب مهم‌ترین بخش‌های آلوده کننده هوا هستند (دازگارن-آیدین و همکاران، ۲۰۰۶).

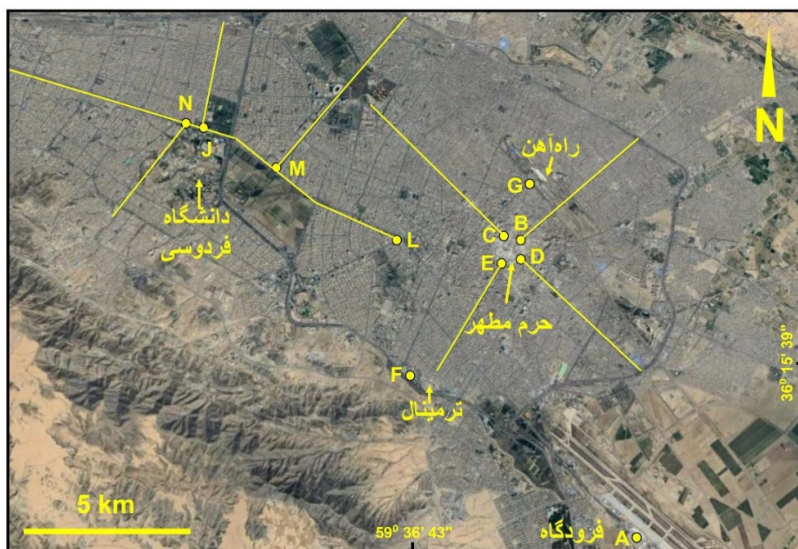
گرد و غبارهای شهری اغلب به‌عنوان شاخص آلودگی فلزات سنگین در محیط محسوب می‌شوند (هانگ و همکاران، ۲۰۲۲). وسایل نقلیه شهری و جاده‌ای نیز مقادیر قابل‌توجهی از فلزات سنگین را در هوا، آب و خاک آزاد می‌کنند. بنابراین انتشار فلزات سنگین حاصل از حجم بالای ترافیک یکی از منابع اصلی آلودگی در محیط‌های شهری است (مظلومی و همکاران، ۲۰۱۷). فلزات سنگین تولید شده در اثر احتراق سوخت در خودروها و سایش تایر اتومبیل‌ها و

استفاده از ترمز می‌تواند در گرد و غبارها و خاک‌های شهری نهشته شوند (تراپ و هریسون، ۲۰۰۸). هدف از انجام این تحقیق، بررسی وجود فلزات سنگین Cr, Cu, Ni, Zn, Mn, Pb, Fe و مکان‌های آلوده به آلاینده‌های موجود در هوای سطح کلان‌شهر مشهد و ارتباط آن با ترافیک شهری است، به همین منظور ارتباط آن با شرایط اقلیمی و موقعیت زمین‌شناسی منطقه نیز تا حدی مورد بحث قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا مسیرهای قابل تردد که سطح شهر پوشش حداکثری داشته باشد مشخص شده‌اند. بدین منظور، ۱۱ منطقه مختلف شهری جهت نمونه‌گیری انتخاب گردید. موقعیت مسیرهای نمونه‌برداری به‌وسیله GPS مشخص و بر روی نقشه Google Earth مشخص شدند (جدول ۱، شکل ۱). در این راستا، تعداد ۱۱۰ فیلتر هوا از خودروهای سواری عمومی شهری که در مسیرهای تعیین شده در ساعات مختلف تردد داشتند جمع‌آوری شد و غلظت آلاینده‌های موجود در فیلترهای هر مسیر مورد آزمایش قرار گرفت (۱۰ نمونه برای هر مسیر). در نهایت آلودگی و گردغبار نمونه‌های هر مسیر یکجا جمع‌آوری شد و آن‌هایی که از لحاظ حجمی قابلیت آزمایش داشتند به روش‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این رابطه، یک نمونه (نمونه G)، که حاصل جمع‌آوری آلاینده‌ها از کلیه مسیرها بود، تحت آزمایش ICP-MS ۳۳ عنصری در آزمایشگاه زرآما با دستگاه Varian735، جهت تعیین عناصر موجود قرار گرفت. همچنین تعداد یک نمونه با دستگاه XRD، مدل Explorer و با ولتاژ شتاب‌دهنده ۴۰ کیلووات و طول موج ۰.۳۰ nm مورد آزمایش قرار گرفته و عناصر دارای بیشترین نمود مشخص شده‌اند. به‌منظور رؤیت و تعیین نوع ذرات معلق، تعداد ۱۰ نمونه به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی منتقل شد. نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی مدل LEO 1450 VP، تحت تصویر-برداری SEM قرار گرفتند و سپس تجزیه زمین‌شیمیایی نقطه‌ای به روش BSE بر روی آن‌ها انجام شد. علاوه بر این، تعداد ۶ نمونه که قابلیت آزمایش داشتند نیز در آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد با دستگاه جذب اتمی^۱ مدل E52 مورد آزمایش قرار گرفتند و عناصر اصلی مؤثر در آلودگی هوا شناسایی شده‌اند.

^۱ Absorbion Atomic



شکل ۱. موقعیت مکانی نمونه‌های برداشته شده: A: فرودگاه - شهر؛ B: حرم مطهر - طبرسی؛ C: حرم مطهر - خیابان شیرازی؛ D: حرم مطهر - نواب صفوی؛ E: حرم مطهر - ترمینال؛ F: ترمینال - سطح شهر؛ G: راه آهن - سطح شهر؛ J: امامت - بزرگراه امام علی؛ L: میدان شریعتی - بلوار وکیل آباد؛ M: میدان سپاه - بلوار خیام؛ N: کوثر - آزادگان

Fig. 1. The location of sampling sites: A: airport - city; B: Holy Shrine - Tabarsi; C: Holy Shrine - Shirazi Street; D: Holy Shrine - Nawab Safavi; E: Holy Shrine - Terminal; F: Terminal - city; G: Train Station - city; J: Imamate Street - Imam Ali Highway; L: Shariati Square - Vakil-Abad Boulevard; M: Sepah Square - Khayyam Boulevard; N: Kosar-Azadegan

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی مناطق جمع‌آوری نمونه

Table 1. Geographical location of sample collection areas

کد منطقه	مسیر نمونه‌گیری	عرض جغرافیایی (Y)	طول جغرافیایی (X)
A	فرودگاه - سطح شهر	36° 13' 37"	59° 33' 24"
B	حرم مطهر - خیابان طبرسی	36° 17' 25"	59° 37' 09"
C	حرم مطهر - میدان فردوسی	36° 17' 28"	59° 36' 48"
D	حرم مطهر - پنج راه	36° 17' 07"	59° 37' 08"
E	حرم مطهر - ترمینال مسافری	36° 17' 03"	59° 36' 43"
F	ترمینال - سطح شهر	36° 15' 39"	59° 35' 29"
G	راه آهن - سطح شهر	36° 18' 13"	59° 37' 25"
L	میدان شریعتی (تقی‌آباد) - انتهای بلوار وکیل آباد	36° 17' 30"	59° 35' 08"
J	امامت (پارک ملت - بلوار آموزگار)	36° 19' 07"	59° 31' 57"
M	سه راه خیام - میدان سپاه	36° 18' 30"	59° 33' 12"
N	کوثر - آزادگان	36° 19' 08"	59° 31' 27"

سالانه در مشهد حدود ۲۵۳ میلی‌متر در سال می‌باشد (داودی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴- زمین‌شناسی منطقه

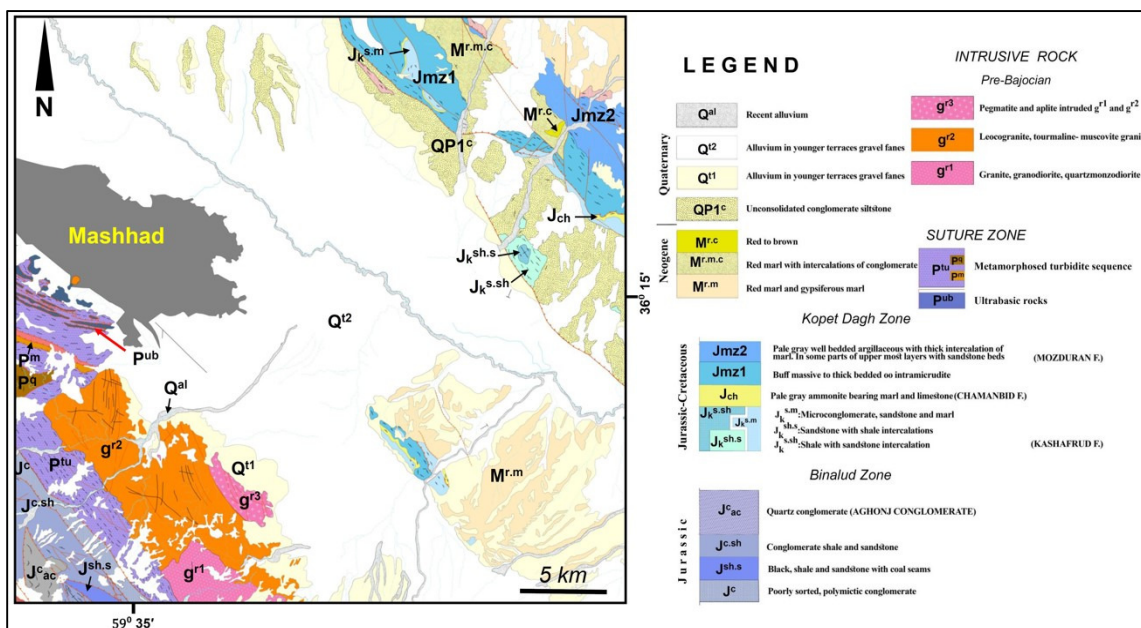
دشت مشهد در حد فاصل دو حوضه رسوبی با دو سیستم جداگانه کپه‌داغ (تریاس-عهد حاضر) در شمال با تاقدیس‌ها و ناودیس‌های نسبتاً متقارن، و بینالود (پالئوزوئیک-عهد حاضر) در جنوب با سری سنگ‌های رسوبی به همراه

۳- موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی مشهد

شهر مشهد با مساحت حدود ۳۲۸ کیلومترمربع، با مختصات جغرافیایی $35^{\circ} E$ تا $45^{\circ} E$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ} N$ تا $38^{\circ} N$ در شمال شرقی ایران واقع شده است. مشهد به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و همچنین تداخل جبهه‌های مختلف آب و هوایی، دارای آب و هوایی متغیر، اما معتدل و متمایل به سرد و خشک است. میزان بارندگی متغیر بوده، به‌طوری‌که میانگین بارندگی

جنوب رخنمون دارند. رسوبات دوران چهارم که بطور عمده از آبرفت‌ها تشکیل شده است، مخروطه‌افکنه‌ها، رسوبات سیلابی و تراس‌ها را می‌سازد (شکل ۲). مجموعه آذرین و دگرگونی این زون که به‌ویژه در جنوب و غرب مشهد گسترش دارند، شامل سه فاز دگرگونی ناحیه‌ای و دو مرحله گرانیته‌زایی و لایه‌های اولترابازیک می‌باشند. شواهد زمین‌شناسی و تعیین سن مطلق نشان داده است که فازهای دگرگونی و گرانیته‌زایی اولیه به فاز کوهزایی هرسینین است. که در تریاس میانی تحت تاثیر دگرگونی‌های کیمبرین پیشین قرار گرفته‌اند. بخش‌هایی از سنگ‌های رسوبی و آذرین منطقه مشهد در شکل ۲ نشان داده شده است.

سنگ‌های آذرین و دگرگونی با ساختمانی پیچیده واقع است (آقاباتی، ۱۳۸۳). قدیمی‌ترین لیتولوژی‌های زمین‌شناسی مربوط به پرکامبرین، از سنگ‌های دگرگونی تشکیل شده است. سازندهای دوران اول زمین‌شناسی به‌صورت آهک دولومیتی، شیل، سنگ‌های آذرین و دگرگونی در ارتفاعات بینالود به‌طور محدود دیده می‌شوند. سازندهای دوران دوم شامل سنگ‌های رسوبی از نوع آهک، ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ و شیل در ارتفاعات شمالی دشت مشهد (حوضه رسوبی کپه‌داغ) وجود دارد. سازندهای دوران سوم زمین‌شناسی از کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آگلومرا، توف و سنگ‌های آذرین از نوع آندزیت تشکیل شده است، که در نقاط مختلف حوضه به‌ویژه در شمال‌شرق و جنوب‌شرق تا



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی مشهد (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد، قائمی، ۱۹۹۴).

Fig. 2. Geological map of Mashhad (modified from map of Mashhad (1:100,000 scale) (Ghaemi, 1994).

نیکل (Ni): کمترین غلظت نیکل در مسیر حرم-خیابان طبرسی (نمونه B) است که ۲۱۹/۷ پی‌پی‌ام به دست آمده است. بالاترین غلظت نیکل مربوط به نمونه G با غلظت ۳۷۵/۹ پی‌پی‌ام است که مربوط به مسیر سطح شهر- راه- آهن است. میانگین غلظت نیکل در نمونه‌ها ۳۱۱/۷ پی‌پی‌ام محاسبه شده است.

سرب (Pb): کمترین غلظت سرب مربوط به مسیر کوثر آزادگان (نمونه N) به میزان ۱۰۰ پی‌پی‌ام است که به دلیل حجم ترافیکی نسبتاً پایینی است که تنها در روزها

۵- نتایج

۵-۱- آزمایشات جذب اتمی

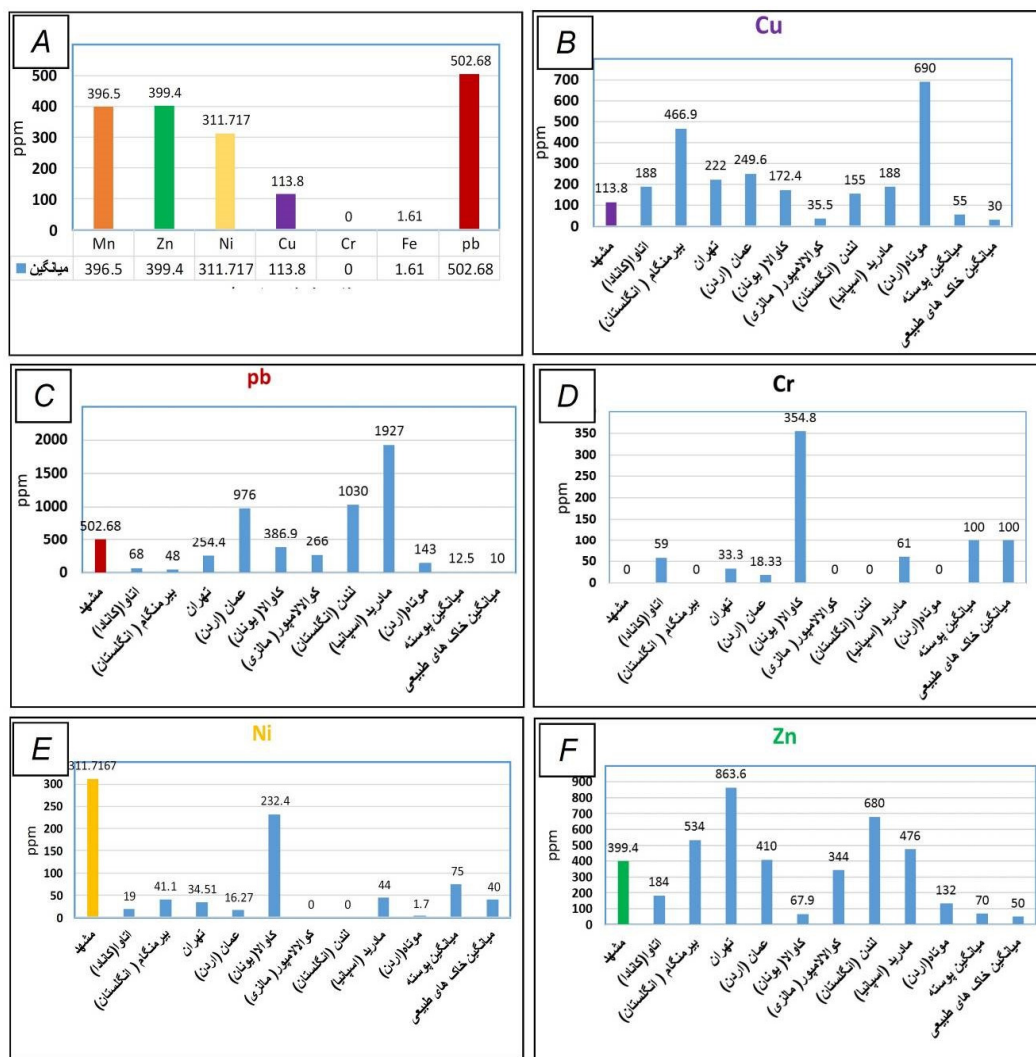
با توجه به نتایج تجزیه جذب اتمی بر روی ۶ نمونه مورد مطالعه، نتایج زیر حاصل گردیده است (جدول ۲؛ شکل ۳). **مس (Cu):** با توجه به شکل ۱، کمترین غلظت مس در سطح شهر، حفاصل حرم تا پنج راه (نمونه D) با ۵۳/۳ پی‌پی‌ام و بیشترین میزان غلظت در مسیر راه-آهن-سطح شهر (نمونه G) با ۲۷۸/۳ پی‌پی‌ام است. میانگین غلظت مس در نمونه‌های مطالعه شده ۱۱۳/۸ پی‌پی‌ام است.

که غلظت آن ۶۷۲/۷ پی‌پی‌ام است. میانگین غلظت روی در نمونه‌ها ۳۹۹/۴ پی‌پی‌ام است.

کروم (Cr): در همه نمونه‌ها غلظت کروم نسبت به عناصر دیگر پایین است. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده کروم موجود در غبار هوا و تاثیر و مقایسه آن با پوسته و خاک‌های طبیعی، میزان پایینی را نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند بیانگر این باشد که کروم در گردوغبارهای ترافیکی نقش مهمی ندارد.

و ساعات معدودی از روز و روزهای خاصی از هفته ایجاد می‌شود. بیشترین مقدار سرب مربوط به مسیر راه‌آهن- سطح شهر (نمونه G) با غلظت ۵۷۸/۴ پی‌پی‌ام است. میانگین غلظت سرب در نمونه‌ها ۵۰۲/۶۸ پی‌پی‌ام محاسبه شده است.

روی (Zn): کمترین غلظت روی در محدوده حرم- خیابان طبرسی (نمونه B) به میزان ۲۴۶/۲ پی‌پی‌ام است. بیشترین مقدار روی مربوط به (نمونه G) سطح شهر- راه‌آهن است



شکل ۳. A) میانگین غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه‌های برداشت شده که به روش جذب اتمی تجزیه شده‌اند: بیشترین فراوانی را عنصر سرب دارد. B-F) مقایسه برخی از عناصر در شهر مشهد و برخی از شهرهای پرتراffیک: از میان عناصر مقایسه شده، عنصر نیکل در شهر مشهد نسبت به شهرهای مورد مقایسه فراوان تر است.

Fig. 3. A) The average concentration of heavy metals in the samples taken by atomic absorption method: The most frequent element is lead. B-F) Comparison of some elements in Mashhad and some high-traffic cities: Among the compared elements, nickel element is more abundant in Mashhad than in the compared cities.

بیومس اختصاص می‌یابد (سلمان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲؛ مرادی و میرزایی، ۲۰۱۵). در نمونه‌های مورد آزمایش، میزان آهن با میانگین ۱/۶ پی‌پی‌ام، مقدار نسبتاً پایینی دارد که تأثیر زیادی در آلودگی هوا ندارد.

آهن (Fe): تاکنون اطلاعات اندکی در ارتباط با خواص فیزیکوشیمیایی ذرات معلق حاوی آهن و نیز توزیع زمانی و مکانی آن به دست آمده است. بیشتر بخش آهن موجود در هوا در آئروسول‌های معدنی یافت می‌شود و سهم باقیمانده آن به صنعت، سوخت‌های زیستی و سوزاندن

جدول ۲. میانگین و درصد غلظت فلزات سنگین موجود در غبارهای خیابانی مشهد (ppm)
Table 2. Average and percentage concentration of heavy metals in street dust (ppm)

کد	مسیر	Mn	Zn	Ni	Cu	Cr	Fe	pb
B	حرم مطهر - خیابان طبرسی	233.2	246.2	219.7	71.2	<50	1.52	397.7
D	حرم مطهر - پنج‌راه	263.1	355.5	258.2	53.3	<50	1.45	411.7
E	حرم مطهر - ترمینال مسافری	343.2	381	363.4	114.9	<50	1.83	556.8
G	راه آهن - سطح شهر	374.1	672.7	375.9	278.3	<50	1.97	578.4
J	امامت (پارک ملت - بلوار آموزگار)	244.6	284.4	356.3	76.9	<50	1.49	568.8
N	کوثر - آزادگان	320.8	456.6	296.8	88.2	<50	1.42	<100
	میانگین	296.5	399.4	311.717	113.8	----	1.613	502.68
	درصد کل عنصر	19.23%	25.90%	20.22%	7.38%	0.00%	0.10%	27.17%

و کانی‌های رسی است که با نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای BSE و SEM مطابقت دارد. بنابر نتیجه حاصل از آنالیز، ترکیب کانی‌شناسی شامل سیلیس (۵۴/۹٪)، کربنات کلسیم (۱۷/۳٪)، کانی‌های رسی (۱۹٪) و آل بیت (۸/۵٪) است.

۶- بحث

۶-۱- منشأ احتمالی برخی عناصر در هوای مشهد

مس (Cu): برخی محققین نشان داده‌اند که تمرکز عنصر مس در غبارهای ترافیکی به‌طور عمده حاصل استفاده مکرر از ترمز اتومبیل است (نژندرا و همکاران، ۲۰۱۶؛ فلاح شورشانی و همکاران، ۲۰۱۷). کمترین غلظت مس در سطح شهر، حد فاصل حرم تا خیابان طبرسی با ۵۳/۳ پی‌پی‌ام و بیشترین میزان غلظت در مسیر سطح شهر - راه - آهن با ۲۷۸/۳ پی‌پی‌ام است. میانگین این عنصر ۱۱۳/۸ پی‌پی‌ام می‌باشد. دلیل این غلظت می‌تواند نتیجه ساخت تقاطع غیرهمسطح باشد که سبب روان شدن ترافیک در مسیر منتهی به حرم مطهر و کاهش استفاده از ترمز در این مکان و در نهایت منجر به کاهش چشمگیر غلظت مس شده است. در مسیر راه آهن نیز به دلیل وجود حجم بالای ترافیک و نیز وجود چندین چهارراه و استفاده مکرر از ترمز غلظت مس بالا رفته است (جدول ۲).

۵-۲- آزمایشات SEM

بر اساس مطالعات حاصل از آنالیزهای SEM-BSE، عمده ذرات دارای ترکیبات سیلیس، کربنات کلسیم، و ترکیبات آهن‌دار است، اما عناصر فرعی دیگری که شامل منیزیم، اکسیژن، کربن، آلومینیوم، پتاسیم و گوگرد هستند نیز این ذرات را تشکیل داده‌اند (شکل‌های ۴، ۵، ۶).

۵-۳- آزمایشات ICP-MS

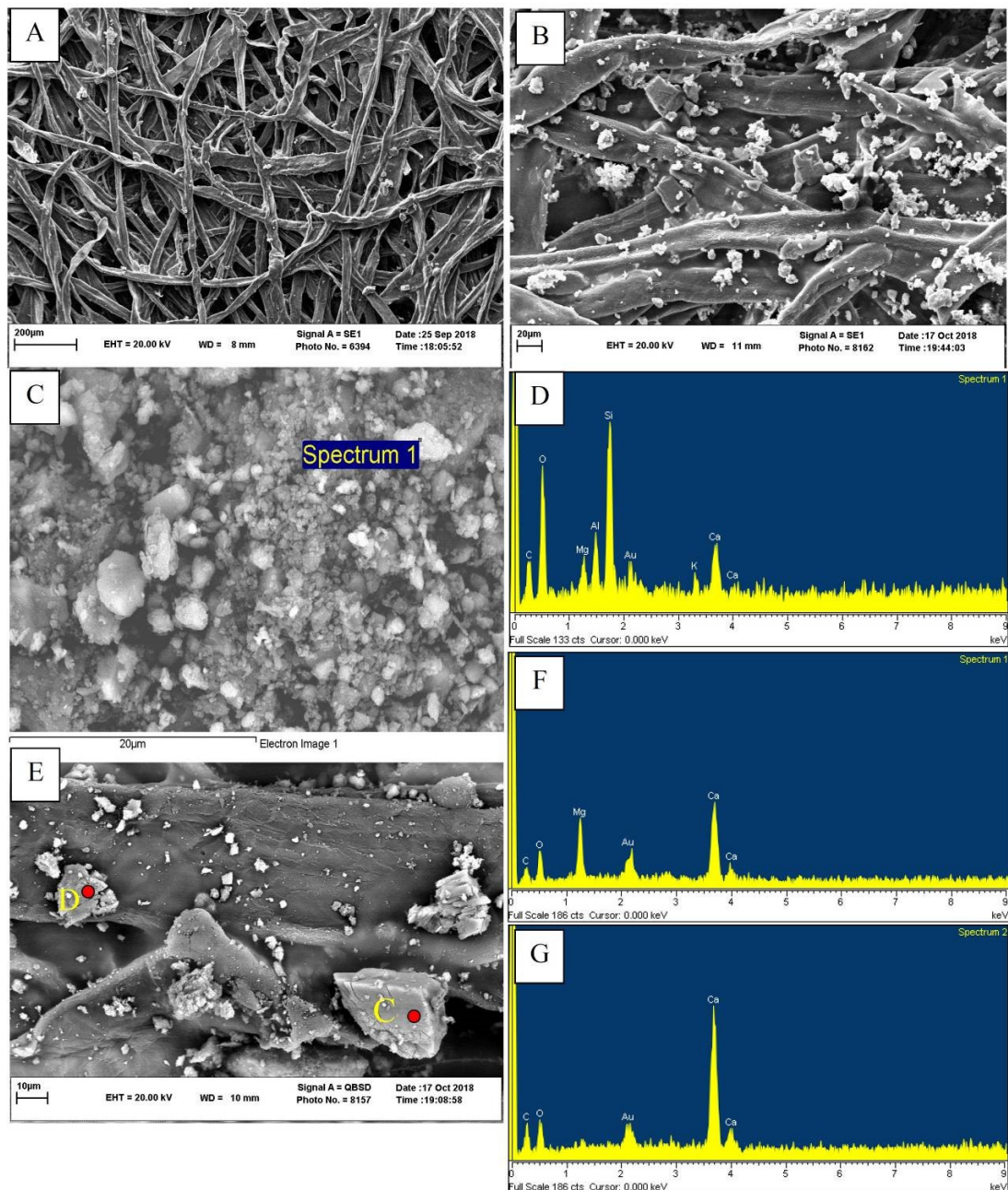
بر روی یک نمونه (G) که مربوط به راه آهن-سطح شهر است و بیشترین و متنوع‌ترین ترکیبات را دارا می‌باشد، مورد آزمایش ICP-MS قرار گرفته است (جدول ۳، شکل ۷). از میان عناصر موجود، بیشترین فراوانی مربوط به عنصر کلسیم (۹۵۰۰۰۰ ~ پی‌پی‌ام) که مربوط به کربنات کلسیم است و سپس آلومینیوم (۳۵۰۰۰ ~ پی‌پی‌ام) که احتمالاً مربوط به وجود کانی‌های رسی پراکنده در هوا است (زو و همکاران، ۲۰۰۸؛ کریستوفوردیس و استماتی، ۲۰۰۹).

۵-۴- آزمایشات XRD

با توجه به شکل ۸، نمودار XRD، بر روی نمونه A (مسیر فرودگاه - سطح شهر) ترکیبات سیلیس، آلومینیوم، کلسیم، سدیم، پتاسیم، منیزیم و ترکیبات آهن که مؤید وجود فلدسپات‌ها از نوع ارتوکلاز و پلاژیوکلازها و همچنین کوآرتز

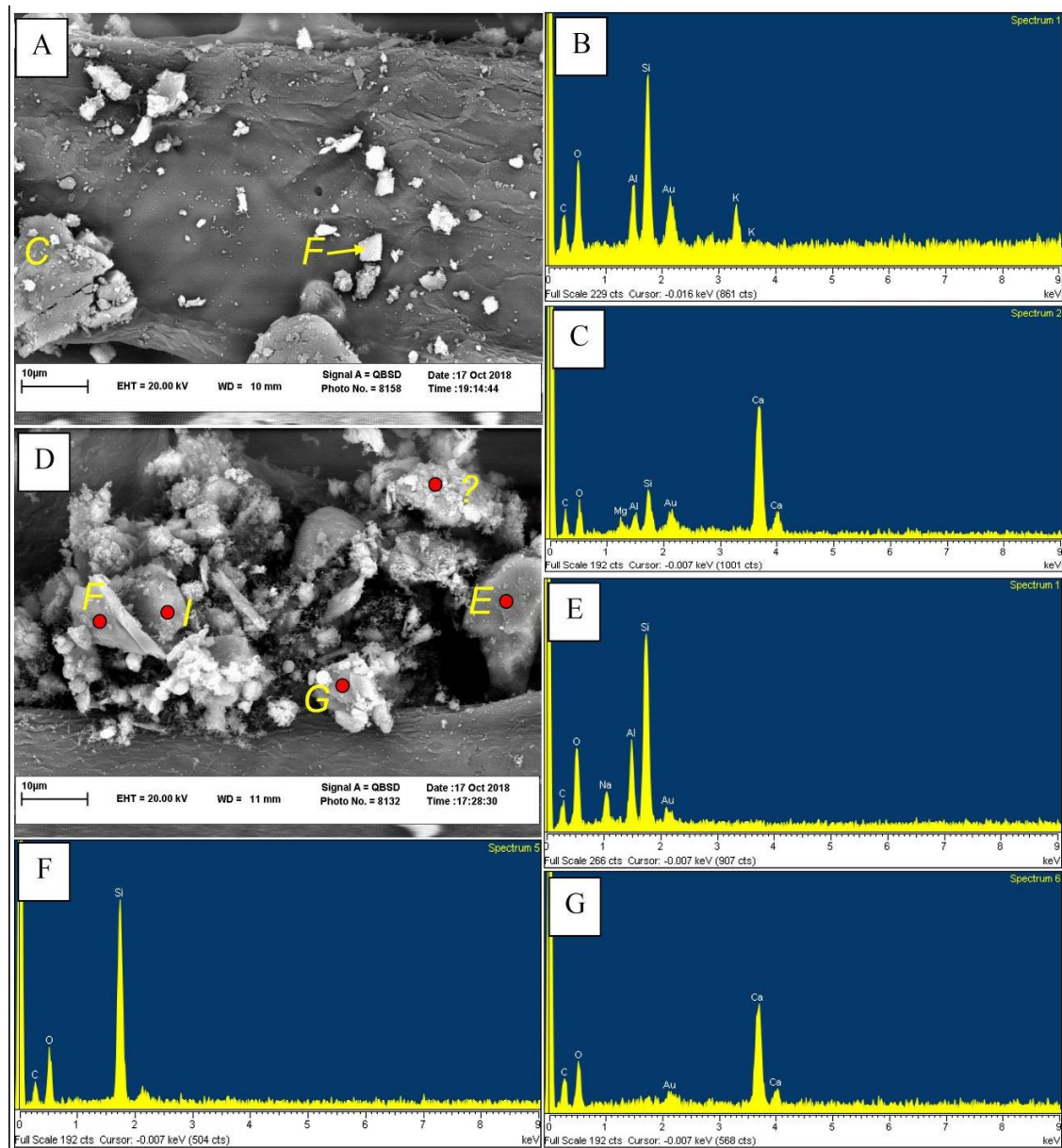
روغن خودرو که از منابع اصلی ورود نیکل به هوا هستند، باشد. همچنین نمونه برداشته شده از مسیر حرم- ترمینال دارای مقدار بالای عنصر نیکل است. میانگین غلظت نیکل در نمونه‌ها ۳۱۱/۷ پی‌پی‌ام است که در مقایسه با استانداردهای جهانی بیشتر از حد مجاز است.

نیکل (Ni): با توجه به حداقل و حداکثر غلظت عنصر نیکل در مسیرهای مختلف می‌توان این‌گونه اظهار نمود که بنا به اظهارات دانگ و لی (۲۰۱۱) و همچنین لو و همکاران (۲۰۰۹)، وجود درصد بالای نیکل می‌تواند به دلیل وجود انواع خودروها و سایش ترمز، خوردگی وسایل نقلیه و پمپ



شکل ۴. (A) نمایش فیلتر تمیز؛ (B) فیلتر آلوده به گرد و غبار؛ (C, D) نمایش غبار و آلودگی جمع‌آوری شده از فیلترهای هوا، حضور ذرات کربنات بطور عمده در این نمونه (نمونه N6)؛ (E, F, G) نمایش بلورهای با ترکیب کربنات (کلسیت C و دولومیت D) در نمونه J1 (تصاویر بروش SEM تهیه شده‌اند).

Fig. 4. A) showing the clean filter; B) filter contaminated with dust; C, D) showing dust and pollution collected from air filters. The presence of carbonate particles mainly in this sample (sample N6); E, F, G) Representation of crystals with carbonate composition (calcite C and dolomite D) in sample J1 (using SEM imaging).



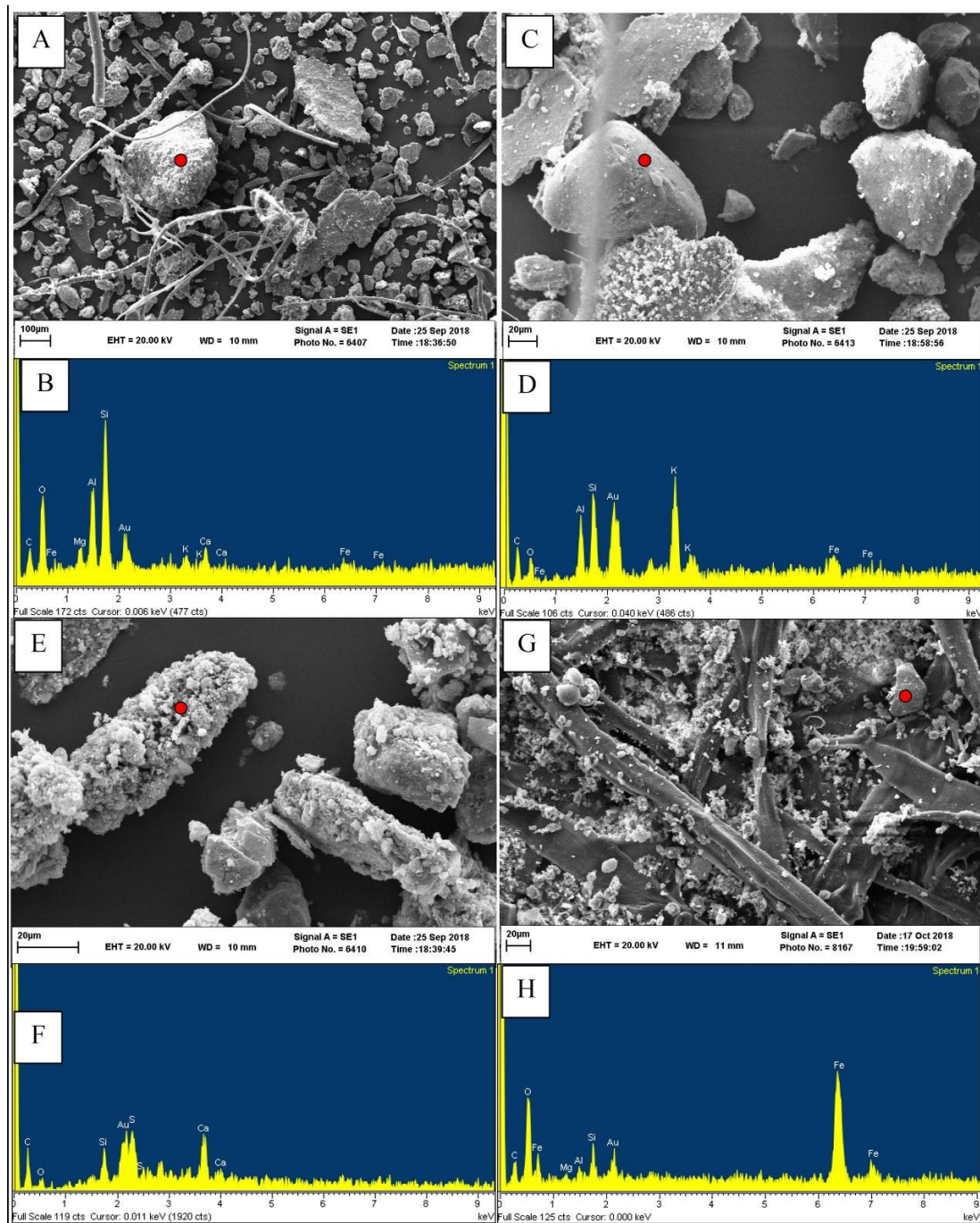
شکل ۵. A, B, C) وجود بلورهای شکل‌دار فلدسپات F و کربنات C در سطح رشته‌های فیلتر (نمونه F9): D) تجمع ذرات موجود در نمونه J1: E: فلدسپات، F: کوارتز، C: کلسیت (تصاویر به روش SEM تهیه شده‌اند).

Fig. 5. A, B, C) the presence of euhedral crystals of feldspar (F) and carbonate (C) on the surface of the filter filaments (sample F9); D) Accumulation of particles in sample J1: E: feldspar, F: quartz, C: calcite (using SEM imaging).

جدول ۳. نتیجه تجزیه ICP-MS نمونه G (ppm)

Table 3. The results of ICP-MS analysis of sample G (ppm)

عنصر	Al	Ba	Ca	Co	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
نمونه G5	36426	509	96667	9.8	54	9.8	153	171	24988	14819	16
عنصر	Mg	Mn	Na	P	Pb	S	Sb	Ni	Ti	Zn	Zr
نمونه G5	19400	523	10784	672	121	5706	11.1	96	2510	442	63

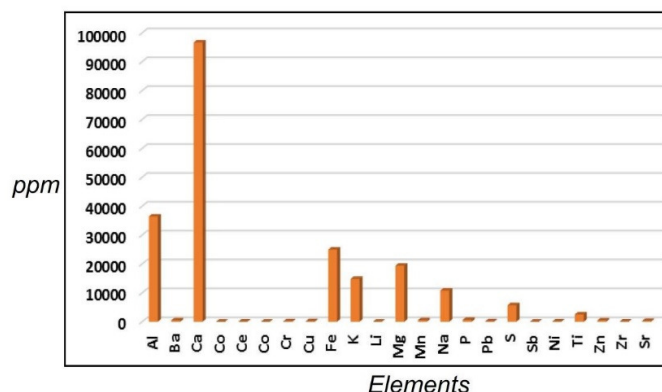


شکل ۶. (A, B) حضور کانی‌های فلدسپات؛ (C, D) ارتوکلاز؛ (E, F) تجمع ترکیبات مختلف؛ (G, H) وجود ترکیبات اکسید آهن در نمونه (تصاویر به روش SEM تهیه شده‌اند).

Fig. 6. A, B) presence feldspar; C, D) orthoclase; E, F) accumulation of different compounds; G, H) the presence of iron oxide compounds in the sample (using SEM imaging).

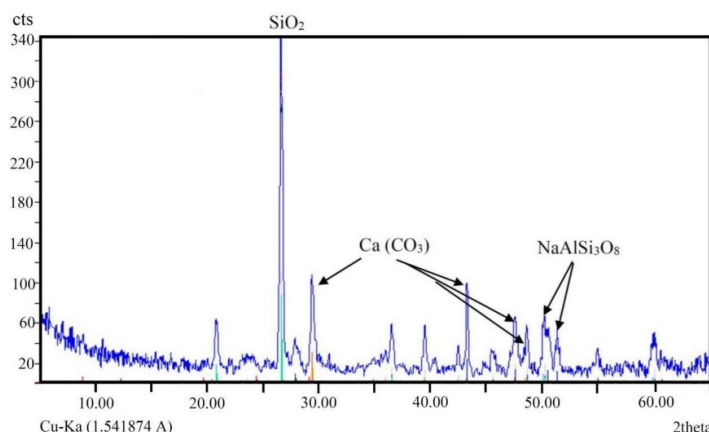
سرب مربوط به نمونه G با غلظت $578/4$ پی‌پی‌ام است، که مربوط به مسیر سطح شهر-راه آهن است و می‌تواند ناشی از تردد زیاد وسائط نقلیه باشد (لو و همکاران، ۲۰۰۹؛ فلاح-شورشانی و همکاران، ۲۰۱۷).

سرب (Pb): میانگین غلظت سرب در نمونه‌ها $502/6$ پی‌پی‌ام است. علاوه بر تاثیر سرب بر آلودگی هوا، افزایش غلظت این عنصر بر خاک نیز تأثیرگذار بوده است که در مقایسه با میانگین غلظت عناصر در پوسته، ناهنجاری بسیار بالایی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار



شکل ۷. غلظت عناصر مختلف حاصل از تجزیه ICP-MS بر روی نمونه G: کلسیم و آلومینیم بیشترین فراوانی را دارند.

Fig. 7. Concentration of different elements resulting from ICP-MS analysis on sample G: calcium and aluminum are the most abundant.



شکل ۸. آنالیز نمونه A به روش XRD: سیلیس (۵۴/۹٪)، کربنات کلسیم (۱۷/۳٪)، کانی‌های رسی (۱۹٪) و آلبیت (۸/۵٪) است (برخی عناصر بطور تقریبی بر روی نمودار مشخص شده‌اند).

Fig. 8. Analysis of sample A by XRD: silica (54.9%), calcium carbonate (17.3%), clay minerals (19%) and albite (8.5%). (Some elements are roughly marked on the diagram).

بالا بودن کروم را ترافیک شهری دانست. از طرفی وجود کاتالیست‌های فرسوده با عمر بیش از ۲ سال که در وسائط نقلیه استفاده می‌شود از دیگر منابع انتشار عنصر کروم در محیط محسوب می‌شود (دانگ و لی، ۲۰۱۱؛ اسکرتویچ و گالاس-اسپک، ۲۰۱۸؛ هانگ و همکاران، ۲۰۲۲). منشأ عنصر کروم در هوای شهر مشهد را علاوه بر سوختن سوخت‌های فسیلی به‌وسیله ماشین‌ها و وسایل نقلیه سنگین می‌توان متأثر از واحدهای صنعتی همچون صنعت آبکاری فلزات و چرم‌سازی در جنوب شرقی شهرستان مشهد دانست. با توجه به جهت وزش باد از شرق به غرب، بنابراین وزش باد تأثیری زیادی در انتقال این عنصر به شهر مشهد دارد. البته کمبود عنصر کروم می‌تواند بیانگر این باشد که کروم در گرد و غبارهای ترافیکی شهرستان مشهد نقش مهمی ندارد.

روی (Zn): عنصر روی محدوده حرم-خیابان طبرسی کمترین میزان (نمونه B) و سطح شهر-راه‌آهن بیشترین میزان را دارد (نمونه G) دارد. از آنجایی که سایش لاستیک خودروها مقدار زیادی روی وارد محیط می‌کند، به دلیل وجود توقف‌های زیاد در چهارراه‌ها و حجم ترافیک بالا درمسیرهای سطح شهر-راه‌آهن سبب سایش لاستیک خودروها گردیده که در افزایش میزان روی در هوا کمک می‌نماید. وجود میزان روی (میانگین غلظت ۳۹۹/۴ پی‌پی‌ام) در مقایسه با برخی از شهرهای پرتراфик دنیا میزان بالایی را نشان می‌دهد (جدول ۴).

کروم (Cr): غلظت فلز کروم در منطقه ترافیکی و مسکونی در مقایسه با حدود استاندارد پایین‌تر از حد مجاز است. منشأ اصلی انتشار کروم در محیط‌های شهری حاصل سوزاندن سوخت‌های فسیلی است. لذا، می‌توان یکی از علل

نمی‌توان نسبت به میزان انتشار این فلز در هوا اظهار نظر دقیقی نمود. گرچه میزان وجود آهن بسیار پایین است. در مقایسه با سایر شهرها، به‌ویژه شهرهای متعلق به کشورهای توسعه‌یافته، غلظت فلزات سرب، روی و نیکل در سطح شهر مشهد افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. همچنین به جز کروم، سایر عناصر به میزان چشمگیری غلظت بیشتری از میانگین موجود در پوسته زمین دارند (جدول ۵). با توجه به این‌که ایران در مقایسه با کشورهای چون انگلیس و اسپانیا کمتر صنعتی است، اما با توجه به جدول (۴)، میزان بالای برخی از آلاینده‌ها مانند سرب، روی، مس و نیکل در شهر مشهد بیش از حد معمول می‌باشد که بخش عمده آن حاصل آلودگی‌های ترافیکی است.

آهن (Fe): تاکنون اطلاعات اندکی در ارتباط با خواص فیزیکوشیمیایی ذرات معلق حاوی آهن و نیز توزیع زمانی و مکانی آن به دست آمده است. بیشتر بخش آهن موجود در هوا، در آئروسول‌های معدنی یافت می‌شود و سهم باقیمانده آن به صنعت، سوخت‌های زیستی و سوزاندن بیومس اختصاص می‌یابد (دانگ و لی، ۲۰۱۱؛ اسکرتویچ و گالاس-اسپک، ۲۰۱۸؛ هانگ و همکاران، ۲۰۲۲). منشأ عنصر آهن در هوا ممکن است به واسطه گردوغبار خاک، مدیریت ضعیف حمل‌ونقل، ساخت‌وساز و نیز واحدهای تولید آهن و فولاد نسبت داده شود (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۷). در خصوص فلز سنگین آهن، استاندارد ملی و یا بین‌المللی انتشار در هوای محیط، تعیین نشده است و لذا

جدول ۴. مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین موجود در غبارهای ترافیکی مشهد و برخی از شهرهای بزرگ دنیا (ppm)

Table 4. Comparison of the average concentration of heavy metals in the traffic dust of Mashhad and some major cities of the world (ppm)

فلزات سنگین					شهر
کروم	نیکل	روی	سرب	مس	
-----	311.7	399.4	502.6	113.8	مشهد (این مطالعه)
59	19	184	68	188	اتاوا (کانادا)
-----	41.1	534	48	466.9	بیرمنگام (انگلستان)
33.3	34.5	863.6	254.4	222	تهران
18.33	16.27	410	976	249.6	عمان (اردن)
354.8	232.4	67.9	386.9	172.4	کاوالا (یونان)
-----	-----	344	266	35.5	کوالالمپور (مالزی)
-----	-----	680	1030	155	لندن (انگلستان)
61	44	476	1927	188	مادرید (اسپانیا)
-----	1.7	132	143	690	مونه (اردن)
100	75	70	12.5	55	میانگین پوسته
100	40	50	10	30	میانگین خاک‌های طبیعی

جدول ۵. فراوانی برخی عناصر در پوسته قاره‌ای (تیلور، ۱۹۶۴) (برحسب میلی‌گرم در لیتر)

Table 5. Abundance of some elements in the continental crust (Taylor, 1964) (in milligrams).

Metal	Natural Soils	Crust
Cu (mg/l)	30	55
Ni (mg/l)	40	75
Pb (mg/l)	10	12.5
Zn (mg/l)	50	70
Cr (mg/l)	100	100

مقایسه با برخی از شهرهای پرتراфик جهان، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. در مقابل، عنصر کروم کمترین غلظت را دارا است. محتمل‌ترین منشأهای آلودگی در شهر مشهد، عمدتاً شامل تردد وسایل نقلیه، فعالیت کارخانه‌ها و معادن اطراف شهر است که در این میان، ترافیک شهری می‌تواند مهم‌ترین منبع انتشار آلاینده‌ها باشد.

۷- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه انجام شده، عناصر مس (میانگین غلظت ۱۱۳/۸ پی‌پی‌ام)، نیکل (میانگین غلظت ۳۱۱/۷ پی‌پی‌ام)، سرب (میانگین غلظت ۵۰۲/۶ پی‌پی‌ام) و روی (میانگین غلظت ۳۹۹/۴ پی‌پی‌ام) جزء آلاینده‌های هوای شهر مشهد محسوب می‌شوند. از این میان، نیکل به‌عنوان آلوده‌کننده‌ترین عنصر شناسایی شد که غلظت آن در

- Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 109(2): 323-331.
- Lu, X., Wang, L., Lei, K., Huang, J., Zhai, Y. (2009) Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NWChina. *Journal of Hazardous Materials*, 161: 1058-1062.
- Mazloomi, S., Esmacilisari, A., Bahramifar, N., Moenoldini, M. (2017) Evaluation of the presence of metals and quasi-metals in the street dust of East Tehran. *Health and Environment Journal, Scientific Research Quarterly of Iranian Environmental Health Scientific Association*, 10(2): 281-292 (in Persian).
- Moradi, Gh., Mirzaee, R. (2015) Investigating spatial changes of heavy metals in street dust of Kashan city. *Journal of Health and Environment, Scientific Research Quarterly of the Iranian Environmental Health Scientific Association*, 9(4): 456-443 (in Persian).
- Nagendra, S. S., Diya, M., Chithra, V., Menon, J. S., Peter, A. E. (2016) Characteristics of air pollutants at near and far field regions of a national highway located at an industrial complex. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48: 1-13.
- Salmanzadeh, M., Saeedi, M., Nabi Bidhani, Gh. (2012) Heavy metal contamination in street dust of Tehran city and their ecological risk assessment. *Environmental Magazine*, 38(61): 9-18 (in Persian).
- Skrętownicz, M., Galas-Szpak, A. (2018) Analysis of the impact of motor vehicles on the air quality on the example of Legionow Square in Wroclaw. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 421(4).
- Taylor, S. R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 28(8): 1273-1285.
- Thorpe, A., Harrison, R. M. (2008) Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic. *A review Science Total Environmental*, 400(1-3): 270-282.
- Zhu, W. B., Bian, B. L. (2008) Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China *Environmental Monitoring. Assess*, 147: 171-18.

۸- تشکر و قدردانی

نویسنده‌گان از داوران محترم که با پیشنهادات ارزشمند خود باعث بهبود این نوشتار گردیده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌گردد. همچنین از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد و آزمایشگاه زراژما تشکر می‌گردد.

References

- Aghanabati, A. (2004) *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, p 558.
- Al-Shidi, H. K., Sulaiman, H., Al-Reasi, A., Jamil, F., Aslam, M. (2021) Human and ecological risk assessment of heavy metals in different particle sizes of road dust in Muscat, Oman. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26): 33980-33993.
- Charlesworth, S., Everett, M., McCarthy, R., Ordonez, A., De Miguel, E. (2003) A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK. *Environment International*, 29(5): 563-573.
- Dahmardeh Behrooz, R., Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Mihalopoulos, N. (2021) Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. *Chemosphere*, 262: 127835 (in Persian).
- Davoodi, M., Mohammadi, H., Bay, N. (2010) Analysis and prediction of some climatic elements of Mashhad, *Journal of Newar*, 70-71: 35-46.
- Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B., Hale, B. A. (2017) Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 136: 92-103.
- Duong, T. T. T., Lee, B. K. (2011) Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics *Journal of Environmental Management*, 92(3): 554-562.
- Duzgoren-Aydin, N., Wong, C., Aydin, A., Song, Z., You, M., Li, X. (2006) Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China. *Environmental geochemistry and health*, 28: 375-391.
- Fallah-Shorshani, M., Shekarzifard, M., Hatzopoulou, M. (2017) Evaluation of regional and local atmospheric dispersion models for the analysis of traffic-related air pollution in urban areas. *Atmospheric Environment*, 167: 270-282.
- Ghaemi, F. (1994) *Geological Map of Mashhad* (1:100000).
- Huang, F., Liu, B., Yu, Y., Lv, L., Luo, X., Yin, F. (2022) Heavy metals in road dust across China: Occurrence, sources and health risk assessment.