

## Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Atmospheric Deposited Dust of Tehran in 2018

### ABSTRACT

**Background and Aim:** Atmospheric dust particles play a significant role in the transfer of chemical elements released from industrial and urban sources. So that the pollutants attached to these particles, can be transported over long distances and are as a function of meteorological conditions, the physical and chemical properties and nature of surface. The aim of this study was to evaluate the metal richness and degree of heavy metal contamination in atmospheric deposited dust in Tehran.

**Materials and Methods:** Atmospheric dust samples were collected from eight locations in Tehran in 2018. Heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Mn and Al) were analyzed in dust using ICP-MS. Metal richness and degree of contamination were determined using Enrichment Factor (EF), Geoaccumulation Index (I<sub>geo</sub>), degree of Contamination (Cd) and modified degree of contamination (mCd). Paired t-test, Pearson correlation and Hierarchical cluster analysis (HCA) were also used for analysis.

**Results:** The mean concentration trend of elements in the warm and cold seasons was similar and the highest concentration was as Al, Zn, Mn, Pb, Cu, and Cr, Ni, respectively. Results of enrichment factor index in atmospheric deposited dust showed that Pb and Zn in warm season and Pb and Cu in cold season were highly enriched. Paired t-test results showed a significant difference between Cu and Cr between seasons. Cluster analysis also showed Al of natural origin and other elements of anthropogenic origin.

**Conclusion:** The results of this study showed that atmospheric deposited dust particles of Tehran contain high levels of pollutants especially in cold season. Therefore, it is necessary to formulate more effective and implementable policies to improve Tehran's air quality.

**Keywords:** Source identification, Enrichment factor, Heavy metals, Atmospheric deposited dust, Tehran.

► **Citation:** Ali-Taleshi MS, Moeinadini M, Feiznia S, Shahbazi R, Squizzato S. Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Atmospheric Deposited Dust of Tehran in 2018. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2020;6 (1):56-69.

#### Mohammad Saleh Ali-Taleshi

PhD Student of Environmental Pollution, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

#### Mazaher Moeinadini

\* Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (Corresponding Author: Email: moeinadini@ut.ac.ir, Tel: 026-32223044)

#### Sadat Feiznia

Professor, Department of Arid Restoration, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

#### Reza Shahbazi

PhD in Natural Resources Applied Research Center, Geological Survey (GSI), Karaj, Iran.

#### Stefania Squizzato

PhD in Environmental Sciences, Institute of Chemical Engineering Sciences, Foundation of Research and Technology – Hellas, Greece.

Received: 2019/11/02

Accepted: 2020/06/04

**Document Type:** Research article

## خصوصیت و منشأیابی آلودگی فلزات سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران در سال ۱۳۹۷

محمدصالح علی طالشی

دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

مظاهر معین‌الدینی

\* استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (نویسنده مسئول):  
moeinaddini@ut.ac.ir

سادات فیض‌نیا

استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رضا شهبازی

دکتری منابع طبیعی، مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، کرج، ایران.

استفانیا اسکوتیزاتو

دکتری علوم محیط زیست، انستیتو علوم مهندسی شیمی، سازمان تحقیقات و تکنولوژی، هالاس، یونان.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

### چکیده

**زمینه و هدف:** ذرات غبار اتمسفری، نقش قابل توجهی در انتقال عناصر شیمیایی رها شده از منابع صنعتی و شهری دارند؛ به طوری که آلاینده‌های متصل به این ذرات می‌توانند طی مسافت‌های طولانی منتقل شده و به‌عنوان تابعی از شرایط هواشناسی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات و طبیعت سطح هستند. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی غنای فلزی و درجه آلودگی فلزات سنگین در غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** نمونه‌های غبار از ۸ نقطه از شهر تهران در سال ۱۳۹۷ برداشت شد. فلزات سنگین (سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم) در این ذرات با استفاده از دستگاه ICP-MS آنالیز شد. غنای فلزات و درجه آلودگی با استفاده از شاخص‌های فاکتور غنی‌شدگی (EF)، انباشت زمینی ( $I_{geo}$ )، درجه آلودگی ( $C_p$ ) و درجه آلودگی اصلاح شده ( $mC_p$ ) تعیین شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون‌های تی جفتی، همبستگی پیرسون و تجزیه خوشه‌ای سلسله مراتبی استفاده شد.

**یافته‌ها:** روند میانگین غلظت عناصر در فصل گرم و سرد مشابه و به‌صورت بیشترین غلظت به ترتیب؛ آلومینیوم، روی، منگنز، سرب، مس، کروم و نیکل بود. نتایج شاخص غنی‌شدگی در نمونه‌های غبار ترسیب شده اتمسفری نشان داد که عناصر سرب و روی در فصل گرم و سرب و مس در فصل سرد دارای غنی‌شدگی شدید بودند. بر اساس نتایج آزمون تی جفتی، تفاوت معنی‌داری بین عناصر مس و کروم بین فصول وجود داشت ( $p=0/017$ ,  $0/048$ ). آزمون تجزیه خوشه‌ای نیز عنصر آلومینیوم را با منشأ طبیعی و بقیه عناصر را با منشأ انسانی نشان داد.

**نتیجه‌گیری:** غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران دارای سطوح بالایی از آلودگی به‌خصوص در فصل سرد است، لذا لزوم تدوین سیاست‌هایی مدون و کاربردی‌تر جهت ارتقای کیفیت هوای شهر تهران ضروری به‌نظر می‌رسد.

**کلید واژه‌ها:** تهران، غبار ترسیب شده اتمسفری، فاکتور غنی‌شدگی، فلزات سنگین، منشأیابی

◀ **استناد:** علی طالشی م ص، معین‌الدینی م، فیض‌نیا س، شهبازی ر، اسکوتیزاتو الف. خصوصیت و منشأیابی آلودگی فلزات سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران در سال ۱۳۹۷. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. بهار ۱۳۹۹؛ ۶(۱): ۵۶-۶۹.

## مقدمه

رشد اقتصادی، صنعتی، شهرنشینی و افزایش تقاضای انرژی، منجر به کاهش کیفیت هوا شده است و برخی از بحران‌های زیست‌محیطی جدی را برانگیخته است (۱). از جمله این بحران‌ها، آلودگی ذرات معلق هوا است که یک مسئله زیست‌محیطی مهم طی سالیان اخیر بوده است. علاوه بر این، ترسیب اتمسفری یک منبع عمده برای اجزای شیمیایی اکوسیستم‌ها است و اجزایشان نیز توسط فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر قرار گرفته است (۲). به طور کلی ترسیب اتمسفری یک مکانیزم مهم کنترل‌کننده سرنوشت آلاینده‌های هوازا و انتقال‌شان از اتمسفر به سطوح طبیعی است (۳) و به صورت فرآیندی که آلاینده‌های اتمسفری به سطوح خشکی و آبی منتقل شده‌اند، تعریف شده است (۴). ترسیب به طور معمول به صورت خشک و تر طبقه‌بندی می‌گردد که ترکیب این دو با هم، ترسیب توده‌ای را تشکیل می‌دهد (۳). ترسیب تر دربرگیرنده حذف با ریزش باران (شستشو) و ترسیب خشک، جمع‌آوری مستقیم گازها و ذرات روی سطوح زمین و آب است (۵). به طور کلی ذرات اتمسفری یک نقش غالب در انتقال عناصر شیمیایی رها شده از منابع صنعتی و شهری دارند؛ به طوری که آلاینده‌های متصل به این ذرات می‌توانند طی مسافت‌های طولانی منتقل شده و به عنوان تابعی از شرایط هواشناسی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات و طبیعت سطح هستند (۶). تفسیر پالاکلیماتیک ثبت رسوب بر اساس این فرضیه استوار است که در صورت انرژی بالای چرخش اتمسفری، ذرات درشت‌تر و مسافت‌های بیشتری منتقل می‌شوند (۷). در طی سالیان اخیر، اقداماتی جهت کسب اطلاعاتی در رابطه با ترکیب آئروسول‌های اتمسفری به عنوان تابعی از اندازه صورت گرفته است؛ به طوری که ثابت شده منابع، خصوصیات و اثرات بهداشتی بالقوه ذرات درشت‌تر و ذرات ریزتر متفاوت هستند (۳). به طور عمده ذرات اتمسفری طبیعی از مواد معدنی مشتق می‌شوند، درحالی‌که ذرات انسانی از فعالیت‌های انسانی، تولید انرژی و وسایل نقلیه مشتق می‌گردند (۱). آئروسول‌های معدنی به خصوص آنهایی

که با طوفان‌های گردوغبار منتقل می‌شوند، می‌توانند به صورت جهانی منتقل شوند و اثرات مهمی بر محیط‌های زیست جهانی و آب و هوا داشته باشند (۸). در این بین ذرات ریز نه تنها به آسانی در شش‌ها نفوذ می‌نمایند، بلکه منجر به افزایش بیماری‌های تنفسی و جهش‌زایی می‌گردند (۹). از آنجایی که عناصر کمیاب توسط سطح ذرات تجمع می‌یابند، به صورت معمول در فرم‌های نامستحکمی هستند که نشانگر این مسئله است که ممکن است بسیار متحرک باشند و به طور بالقوه دسترسی پذیری زیستی داشته باشند (۱). در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده‌ای از سهم بالقوه سمیت فلزات در غبار مشاهده شده است (۱۰). برخی فلزات کمیاب همچون منگنز، مس و روی در مقادیر اندک مضر هستند، اما برخی (به خصوص سرب و کادمیوم) حتی در غلظت‌های بسیار اندک برای انسان‌ها سمی هستند (۱). علاوه بر این، ورودی‌های مازاد فلزات سنگین درون سطوح زیست‌محیطی با ترسیب اتمسفری، می‌تواند به مدت طولانی در چرخه بیوشیمیایی دوام داشته باشد. بنابراین درک غلظت‌ها و منبع فلزات سنگین در ترسیب اتمسفری ضروری است. مطالعات متعددی در رابطه با فلزات سنگین در ترسیب اتمسفری در اروپا، آمریکای شمالی و برخی مناطق آسیا انجام شده است (۱۱-۱۳). مطابق با مطالعات پیشین، ضروری است تا عناصر کمیاب در ترسیب اتمسفری مطالعه شود تا اثرات آن بر اکوسیستم و سلامت انسان درک و ارزیابی گردد. علاوه بر این، همانطوری که در مطالعات پیشین مشاهده شده بود، عناصر کمیاب مختلفی توسط منابع مختلفی حاصل شده‌اند که شامل خاک و غبار پوسته‌ای، فرآیندهای صنعتی مختلف، انتشارهای وسایل نقلیه و احتراق زغال است. با این حال، تغییرات فضایی متعددی در منابع عناصر کمیاب در بین مناطق مورد مطالعه مختلف وجود دارد که عمدتاً به دلیل محیط فیزیکی متفاوت، شرایط آب‌وهوایی، فعالیت‌های اقتصادی و مراحل صنعتی و شهری شدن است. در یک منطقه به شدت شهری، عناصر مشابه ممکن است عمدتاً توسط انتشار وسایل نقلیه حاصل شوند،

نیز اشاره شد، اطلاعات محدودی در رابطه با غلظت و منابع عناصر کمیاب ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری در ایران موجود است. شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین شهر ایران در سالیان اخیر بستر رشد جمعیت گردیده است که این عامل ناشی از وجود امکانات و تأسیسات زیربنایی متعدد بوده است. تجمع روزافزون این عوامل، بستری برای افزایش آلودگی هوا فراهم نموده است. با این حال مطالعات محدودی در رابطه با اجزای تشکیل‌دهنده آلودگی هوا در قالب ذرات ترسیب شده اتمسفری صورت گرفته است. از این رو مطالعه حاضر با هدف سنجش غلظت برخی از فلزات سنگین (شامل سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم) در ذرات ترسیب شده اتمسفری جهت بررسی غنای فلزی و درجه آلودگی با فلزات صورت گرفت. نتایج این مطالعه امکان شناسایی منابع ورود فلزات به ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری را فراهم ساخته و پیشنهادهای مؤثری جهت جلوگیری از مخاطرات زیست‌محیطی بر ساکنین فراهم می‌نماید.

## روش کار

### منطقه مورد مطالعه

تهران یکی از قدیمی‌ترین شهرهای ایران است که در پای کوه البرز و جنوب دریای خزر واقع شده است. میانگین سالانه دمای روزانه  $18/5$  درجه سانتی‌گراد است که حداکثر آن  $40$  درجه سانتی‌گراد در تابستان و حداقل آن  $10-$  درجه سانتی‌گراد در زمستان است. متوسط بارندگی سالانه  $150$  میلی‌متر است که حداکثر آن در زمستان به میزان  $40$  میلی‌متر و حداقل آن در تابستان به میزان صفر میلی‌متر است. هوا به‌طور معمول آفتابی با متوسط سالانه  $2800$  ساعت آفتاب و میانگین پوشش ابر  $30$  درصدی است. وزش بادهای رایج از غرب و شمال است. ارتفاع متوسط  $1200$  متر بالای سطح دریا و سطح شهر منطقه بزرگی حدود  $730$  کیلومتر مربع را دربرمی‌گیرد و بزرگ‌ترین شهر ایران و یکی از بزرگ‌ترین شهرهای خاورمیانه به‌شمار می‌رود. جمعیت استان تهران بر اساس آمار، تا

اما در یک منطقه صنعتی عمدتاً از فرآیندهای صنعتی حاصل می‌شوند. درحالی‌که غبار ناشی از خاک سطحی ممکن است منبع بسیار مهم در منطقه روستایی باشد (۱). دوابی و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی آلودگی فلزات سنگین در غبار اتمسفری شهر کرمانشاه پرداختند و سه عامل اصلی شناخته شده مؤثر بر سطوح فلزات سنگین در نمونه‌های غبار را به ترافیک، صنعت و هوازدگی به‌خصوص غبار خیابانی و خیابان نسبت دادند (۱۴). محققین دیگری نیز در مطالعات خود در سراسر جهان نشان داده‌اند که عناصر سرب، روی، مس، کادمیوم و کروم به میزان زیادی در غبارهای کنار جاده‌ای غنی شده‌اند (۱۵). تورپه و هریسون نیز منبع آهن، مس، سرب و روی را به لنت‌های ترمز نسبت داده‌اند؛ به‌طوری‌که انتشارات سایش ترمز ممکن است نمایانگر منبع قابل توجه سرب هوازاد باشد (۱۶). فوسر در مطالعه‌ای عنصر روی موجود در ذرات اتمسفری را به‌عنوان مارکری برای پوشش تایر در نظر گرفت که به‌صورت اکسید روی به تایر افزوده می‌شود (۱۷). شاور و همکاران عناصر سرب و روی را به‌عنوان عناصر ردیاب غبارهای خیابانی و آلودگی خاک اطراف خیابان معرفی نمودند (۱۸). مک‌کنزی و همکاران نیز در مطالعه‌ای عناصر کروم و نیکل را به پوشش تایر و سایش ترمز و آسفالت نسبت دادند (۱۹). به عبارتی این عناصر را با منشأ انسانی معرفی نمودند. از جهتی گوپه و همکاران در مطالعه‌ای به ردیابی منبع، توزیع و ریسک بهداشتی عناصر بالقوه مضر پرداختند و عناصر آلومینیوم و منگنز در غبار شهری را به پوشش تایرها و سایش حاصل از ترمز وسایل نقلیه نسبت دادند و برخی محققین نیز این دو عنصر را از منابع خاکی دانسته‌اند (۲۰، ۲۱) که نشانگر تفاوت منابع انتشار در مکان‌های خاص است. بنابراین، برای ارزیابی و کنترل اثر عناصر کمیاب موجود در ترسیب اتمسفری بر اکوسیستم و بهداشت انسان در سطح محلی یا منطقه‌ای، در گام اول، مطالعه غلظت‌ها و منابع عناصر کمیاب ذرات برای یک مکان خاص بسیار مهم است. در حالی‌که مطالعات متعددی به بررسی ذرات ترسیب شده اتمسفری در سراسر جهان پرداخته‌اند که پیش از این

شهر ری، شهرداری منطقه ۱۵، قرار داده شدند (شکل ۱). به عبارتی زمان ماند ظروف برای هر بار نمونه برداری ۹۰ روز بود. نمونه برداری در دو بازه ۹۰ روزه برای دو فصل گرم و سرد صورت گرفت. فصل گرم شامل ماه‌های فصل تابستان (تیر، مرداد و شهریور) و فصل سرد شامل ماه‌های فصل پاییز (مهر، آبان و آذر) سال ۱۳۹۷ بود. سپس نمونه‌های جمع‌آوری شده از تله‌های گردوغبار گیر با شستشوی دقیق رسوب از تیلها و دیواره و کف ظرف با آب مقطر به داخل بطری‌های پلاستیکی منتقل شدند (۲۵). پیش از آنالیز، نظر به اینکه مطالعات گذشته نشان داده‌اند که به‌طور کلی ذرات ریزتر گردوغبار، خطر زیست‌محیطی و ریسک بهداشتی جدی‌تری نسبت به ذرات درشت‌تر دارند و آلاینده‌های مضر بیشتری را جذب می‌نمایند (۲۶)، لذا در این مطالعه پس از جمع‌آوری نمونه‌های ذرات ترسیب شده، در گام اول، این ذرات در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند و سپس به آون منتقل شده و در دمای ۷۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت رطوبت همراه با این ذرات به‌طور کامل حذف گردید. سپس نمونه‌ها با الک نایلونی ۲۳۰ مش (سایز دهانه: ۶۳ میکرون) غربال شدند و در نهایت نمونه‌ها با استفاده از ترازوی با دقت چهار صفر توزین شدند و به کیسه‌های پلاستیکی غیرقابل نفوذ توسط هوا منتقل گردیدند. نمونه‌های آماده شده برای آنالیز شیمیایی تا زمان آنالیز در یخچالی در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند (۲۶).

آبان ماه سال ۱۳۹۵ معادل ۱۳ میلیون نفر بود (۲۲، ۲۳).

### روش نمونه برداری و آنالیز شیمیایی

در این مطالعه از نمونه بردار مناسب ترسیب استفاده شد. نمونه برداری ترسیب غبار USGS<sup>۱</sup> (سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده) برای اولین بار توسط گوزنس و آفر ارائه شد (۲۴) و کالیبراسیون این نمونه بردار توسط آزمایش تونل باد و کارایی آن مورد تأیید قرار گرفت. به‌طور خلاصه این نمونه بردار از دو بخش ظرف نمونه بردار و تله‌های جمع‌آوری ترسیب تشکیل شده است. در این مطالعه از ظروف فلزونی استفاده شد؛ به‌طوری‌که قطر بالا، پایین و ارتفاع ظرف به ترتیب ۳۰، ۲۲ و ۹ سانتی‌متر بود. تله‌های جمع‌آوری ترسیب در این مطالعه، تله‌های رسوب‌گیر تیله‌ای از جنس شیشه بود که به‌صورت یک یا دو لایه تیله شیشه‌ای در ظروف پلاستیکی قرار داده شد. این ظروف در ارتفاع ۱۰-۲۰ متری ساختمان‌های مدنظر در نقاط نمونه برداری قرار داده شد. هم‌جنس ظرف و هم‌جنس تیله‌ها با آنالیز فلزات سنگین متناسب بود. فرآیندهای پیش‌شرطی جهت آماده‌سازی نمونه بردارها صورت گرفت؛ به‌طوری‌که نمونه بردارها پیش از نمونه برداری با آب مقطر دو بار تقطیر شده شستشو شد. ظروف حاوی تیله‌ها به مدت یک فصل در نقاط نمونه برداری منتخب شامل: شهرداری منطقه ۲۲، شهرداری منطقه ۲۱، سازمان زمین‌شناسی، شهدای هفتم تیر، شهرداری باقرشهر، سرخه‌حصار، فرمانداری



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری غبار ترسیب شده اتمسفری

1. United States Geological Survey

آلودگی از شاخص‌های فاکتور غنی‌شدگی، زمین انباشت، درجه آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده استفاده شد که به اختصار شرح داده شده است.

#### فاکتور غنی‌شدگی (EF) <sup>۷</sup>

اساس این روش، مقایسه غلظت فلز مورد نظر در نمونه‌ها با غلظت همان فلزات در ناحیه غیرآلوده است (۲۹). در این مطالعه عنصر آلومینیوم به عنوان غلظت عنصر مرجع استفاده شد. مطالعات متعددی این عنصر را به عنوان نرمال‌ساز مناسب غلظت عناصر پیشنهاد نمودند و مورد استفاده قرار دادند (۲۶). معادله ۱ چگونگی محاسبه شاخص غنی‌سازی را نشان می‌دهد.

$$EF = \frac{(C_m / C_s)_x}{(C_m / C_s)_c} \quad \text{معادله ۱}$$

در این معادله،  $C_m$  غلظت فلز سنگین مورد نظر (میلی گرم بر کیلوگرم)،  $C_s$  غلظت عنصر مرجع زمینی (میلی گرم بر کیلوگرم) در پوسته زمین،  $C$  و  $X$  به ترتیب غلظت‌های مورد اشاره در پوسته زمین و نمونه هستند. هاگانسون درجه‌بندی سطوح آلودگی را بر مبنای این شاخص انجام داد (۳۰). مطابق این طبقه‌بندی  $EF < 1$  فاقد غنی‌شدگی،  $1 \leq EF < 3$  دارای غنی‌شدگی اندک،  $3 \leq EF < 5$  غنی‌شدگی متوسط،  $5 \leq EF < 10$  غنی‌شدگی شدیداً متوسط،  $10 \leq EF < 25$  غنی‌شدگی شدید و  $25 \leq EF < 50$  بسیار غنی‌شدگی هستند.

#### شاخص زمین انباشت ( $I_{geo}$ ) <sup>۸</sup>

روش متداول دیگر برای ارزیابی آلودگی ذرات غبار خیابانی با فلزات سنگین، مقایسه غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز سنگین در نمونه با غلظت پس‌زمینه ژئوشیمیایی آن با استفاده از شاخص  $I_{geo}$  است که توسط مولر پیشنهاد شده است (۳۱).

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_n) \quad \text{معادله ۲}$$

در این معادله  $I_{geo}$  شاخص زمین انباشت،  $C_n$  غلظت فلز

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق روش USEPA <sup>۱</sup> (آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده) هضم اسیدی صورت گرفت (۲۷). در این روش، ۰/۵-۰/۱ گرم وزن خشک نمونه با چهار اسید HCl، HF، HNO<sub>3</sub> و HClO<sub>4</sub> به نسبت‌های معین در روش USEPA به وسیله هات پلیت <sup>۲</sup> هضم شد. غلظت فلزات سنگین شامل سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم به وسیله دستگاه Agilent (ICP-MS) مدل CX۷۵۰۰ ساخت ایالات متحده) اندازه‌گیری شد. در کنار نمونه‌ها، تمام مراحل آنالیز برای نمونه شاهد نیز انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ورژن ۲۵ انجام شد. به دلیل عدم وجود استانداردهای زمینه خاصی برای ارزیابی درجه آلودگی در ایران، از میانگین غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین به عنوان غلظت زمینه استفاده شد (۲۸). مقادیر میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین برای عناصر سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم به ترتیب ۲۰، ۷۱، ۲۵، ۲۰، ۳۵، ۶۰۰ و ۸۰۴۰۰ بود. در این مطالعه عنصر آلومینیوم به عنوان عنصر مرجع استفاده شد. جهت انجام آنالیزهای آماری ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف اسمیرنوف <sup>۳</sup> و شاپیروویلیک <sup>۴</sup> تست شد و سپس با توجه به نرمال بودن یا نبودن داده‌ها از آماری مناسب در این مطالعه استفاده شد. در این مطالعه برای بررسی وجود تفاوت معنی‌دار غلظت فلزات سنگین بین دو فصل از آزمون تی جفتی، جهت بررسی همبستگی بین عناصر از آزمون همبستگی پیرسون <sup>۵</sup> و برای گروه‌بندی متغیرهای مشابه از آزمون آماری تجزیه خوشه‌ای سلسله مراتبی <sup>۶</sup> استفاده شد. در این مطالعه از روش Ward که بر اساس میانگین‌های متغیرها در درون هر یک از خوشه‌ها است و تعیین مربع فاصله اقلیدسی میانگین خوشه‌ها برای خوشه‌بندی مشاهدات استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی

1. United States Environmental Protection Agency
2. Hot Plate
3. Kolmogrov-Smirnov
4. Shapiro-Wilk
5. Pearson Correlation
6. Hierarchical Cluster Analysis

7. Enrichment Factor
8. Geoaccumulation Index

درجه بندی آلودگی غبار با این شاخص به صورت  $C_p < m$  (آلودگی با شدت پایین)،  $m \leq C_p < 2m$  (آلودگی با شدت متوسط)،  $2m \leq C_p < 4m$  (آلودگی با شدت بسیار بالا) است.

آبراهیم معادله شاخص درجه کلی آلودگی را به صورت زیر اصلاح نمودند (۳۴):

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n C_f^i}{n} \quad \text{معادله ۵:}$$

در این معادله  $C_f$ ، فاکتور آلودگی برای هر آلاینده منفرد؛  $n$ ، تعداد آلاینده‌های مورد بررسی و  $mC_p$ ، میانگین فاکتورهای آلودگی محاسبه شده همه آلاینده‌ها است. درجه بندی سطوح آلودگی با استفاده از این شاخص به صورت  $1/5 < mC_p < 2$  (سطوح بسیار پایین آلودگی)،  $2 \leq mC_p < 4$  (سطوح متوسط آلودگی)،  $4 \leq mC_p < 8$  (سطوح بالای آلودگی)،  $8 \leq mC_p < 16$  (سطوح بسیار بالای آلودگی) و  $mC_p \geq 32$  (سطوح بی نهایت شدید آلودگی) تعریف شده است.

### یافته‌ها

آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری برای دو فصل گرم و سرد به صورت حداقل، حداکثر، میانگین، میانه، انحراف استاندارد، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی در جدول ۱ خلاصه شده است.

با توجه به جدول ۱، میانگین غلظت‌های ۷ فلز سنگین مطالعه شده سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم در فصل گرم به صورت روند کاهشی آلومینیوم ( $\bar{X} = 58582/46$ )، روی ( $\bar{X} = 1046/91$ )، منگنز ( $\bar{X} = 937/09$ )، سرب ( $\bar{X} = 165/96$ )، مس ( $\bar{X} = 144/87$ )، کروم ( $\bar{X} = 94/97$ ) و نیکل ( $\bar{X} = 64/00$ ) و در فصل سرد به صورت روند کاهشی آلومینیوم ( $\bar{X} = 58951/01$ )، روی ( $\bar{X} = 1544/86$ )، منگنز ( $\bar{X} = 899/45$ )، سرب ( $\bar{X} = 190/48$ )، مس ( $\bar{X} = 188/36$ )، کروم ( $\bar{X} = 106/53$ ) و نیکل ( $\bar{X} = 65/71$ ) بوده؛ به عبارتی میانگین غلظت عناصر در هر دو فصل گرم و سرد روند کاهشی

سنگین در غبار خیابانی و  $B_n$  غلظت پس‌زمینه فلز سنگین در پوسته زمین است. ضریب ثابت  $1/5$  به منظور به حداقل رساندن اثر تغییرات احتمالی در غلظت‌های پس‌زمینه است که معمولاً این اختلافات به دلیل تغییرات سنگ‌شناسی است. درجه بندی سطح آلودگی خاک‌ها بر اساس این شاخص به وسیله هلینگ و همکاران انجام شد و به صورت  $0 \leq I_{geo} \leq 1$  (نسبتاً غیر آلوده)،  $1 < I_{geo} < 2$  (غیر آلوده تا آلودگی متوسط)،  $2 \leq I_{geo} < 3$  (آلودگی متوسط تا شدید)،  $3 \leq I_{geo} < 4$  (آلودگی شدید)،  $4 \leq I_{geo} < 5$  (آلودگی شدید تا بسیار شدید) و  $I_{geo} > 5$  (آلودگی بسیار شدید) مشخص شد (۳۲).

### شاخص‌های درجه آلودگی ( $C_p$ ) و درجه آلودگی اصلاح شده ( $mC_p$ )<sup>۲</sup>

شاخص درجه آلودگی در سال ۱۹۸۰ توسط هاگانسون به عنوان روشی برای محاسبه فاکتور کلی آلودگی بر مبنای ۷ فلز سنگین (سرب، جیوه، آرسنیک، کروم، روی، مس، کادمیوم) و یک آلاینده آلی (PCBS)<sup>۳</sup> معرفی شد (۳۰). برای محاسبه پارامترهای انفرادی آلودگی ( $C_f$ ) به عنوان جزء اصلی معادله شاخص درجه آلودگی، غلظت میانگین فلز در نمونه‌ها با سطح پس‌زمینه در پوسته زمین مطابق با معادله زیر مقایسه می‌گردد:

$$C_f = \frac{C_m}{C_s} \quad \text{معادله ۳:}$$

در این معادله،  $C_m$  و  $C_s$  به ترتیب میانگین غلظت فلز در غبار خیابانی و پوسته زمین هستند. از آنجایی که در مطالعات متعدد همچون این مطالعه تمامی این ۸ آلاینده ممکن است محاسبه نگردد، کینگی و جون طبقه بندی خاصی را برای توصیف شاخص استفاده کردند (۳۳).

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i \quad \text{معادله ۴:}$$

1. Degree of Contamination
2. Modified Degree of Contamination
3. Polychlorinated biphenyls

جدول ۱. آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین در غبار ترسیب شده منطقه مورد مطالعه

عنصر	%CV	کشیدگی	چولگی	میانگین ± انحراف استاندارد	حداکثر mg/kg	حداقل mg/kg
فصل گرم	سرب	۵/۱۹	۲/۰۸	۱۴۱/۴۲ ± ۱۶۵/۹۶	۳۷۴/۷۵	۷۳/۹۲
	روی	-۰/۶۴	۰/۶۲	۱۰۰۸/۶۸ ± ۱۰۴۶/۹۱	۱۷۷۴/۳۹	۴۵۶/۰۷
	مس	۰/۵۰	۰/۸۵	۱۳۵/۴۶ ± ۱۴۴/۸۷	۲۵۷/۰۱	۷۳/۱۵
	نیکل	۴/۷۸	-۱/۸۷	۶۶/۱۰ ± ۶۴/۰۰	۷۸/۲۸	۳۵/۸۴
	کروم	-۰/۳۴	-۱/۰۰	۱۰۱/۹۰ ± ۹۴/۹۷	۱۱۵/۲۳	۶۰/۲۸
	منگنز	۰/۶۱	-۰/۲۵	۹۶۲/۰۴ ± ۹۷۳/۰۹	۱۲۰۳/۵۱	۷۱۲/۵۴
	آلومینیوم	۰/۳۴	-۰/۷۵	۵۹۳۸۷/۰۴ ± ۵۸۵۸۲/۴۶	۶۶۵۵۵/۱۷	۴۷۰۸۶/۷۸
فصل سرد	سرب	۳/۷۳	۱/۴۶	۱۸۸/۸۲ ± ۱۹۰/۴۸	۳۱۸/۶۳	۱۱۴/۱۷
	روی	۵/۳۸	۲/۱۹	۱۲۳۳/۹۴ ± ۱۵۴۴/۸۶	۳۹۴۰/۰۰	۷۳۹/۵۵
	مس	۰/۶۹	۰/۸۱	۱۷۶/۳۴ ± ۱۸۸/۳۶	۲۸۳/۹۸	۱۲۷/۴۸
	نیکل	۰/۳۹	-۱/۲۴	۶۸/۴۱ ± ۶۵/۷۱	۷۱/۶۶	۵۳/۶۵
	کروم	-۰/۳۹	۰/۱۴	۱۰۴/۱۸ ± ۱۰۶/۵۳	۱۲۲/۶۲	۸۹/۳۷
	منگنز	۲/۲۳	-۱/۴۱	۹۵۴/۸۲ ± ۸۹۹/۴۵	۱۰۸۷/۱۵	۵۴۵/۶۶
	آلومینیوم	۰/۴۵	-۱/۳۵	۶۱۲۴۶/۳۶ ± ۵۸۹۵۱/۰۱	۶۴۷۹۶/۸۰	۴۶۵۷۹/۰۰

فصل گرم با روند آلومینیوم، روی، منگنز، سرب، مس، کروم و نیکل و در فصل سرد با روند آلومینیوم، روی، منگنز، سرب، مس، کروم و نیکل کاهش یافت. مقادیر زیاد انحراف استاندارد، نشان‌دهنده گستره تغییراتی وسیع غلظت‌های فلزی در ذرات غبار در منطقه مورد مطالعه است که این موضوع برای عناصر آلومینیوم و روی در این مطالعه مشاهده شد. میزان چولگی فلزات سرب، روی و مس در فصل گرم و فلزات سرب، مس، روی و کروم در فصل سرد مثبت بود که نمایانگر این است که این فلزات چولگی مثبتی به سمت غلظت‌های پایین‌تر دارند. میزان کشیدگی فلزات سرب، مس، نیکل، منگنز و آلومینیوم در فصل گرم و فلزات سرب، روی، مس، نیکل، منگنز و آلومینیوم مثبت بود که نشان‌دهنده شیب بیشتر نمودار توزیع این عناصر نسبت به منحنی توزیع نرمال است.

مشابهی داشت. ضریب تغییرات (CV)، درجه تغییرپذیری غلظت‌های یک فلز را در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری نشان می‌دهد. ضرایب تغییرات غلظت فلزات در غبار ترسیب شده اتمسفری منطقه مورد مطالعه در فصل گرم به ترتیب بیشترین به صورت؛ سرب، روی، مس، کروم، نیکل، منگنز و آلومینیوم و در فصل سرد به ترتیب بیشترین؛ روی، سرب، مس، منگنز، آلومینیوم، کروم و نیکل کاهش یافت. مقادیر بالای ضرایب تغییرات برای فلز سرب و روی در فصول گرم و سرد نشان‌دهنده این است که غلظت این فلزات به‌طور قابل توجهی در مکان‌های مختلف نمونه‌برداری متفاوت است و همچنین نمایانگر توزیع ناهمگن آن به دلیل فعالیت‌های انسانی است. انحراف استاندارد غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های غبار ترسیب شده اتمسفری منطقه مورد مطالعه در

1. Coefficient of Variance



جدول ۲. آماره‌های توصیفی شاخص‌های EF، I<sub>geo</sub> و C<sub>f</sub>

فصل سرد			فصل گرم			عنصر
EF	I <sub>geo</sub>	C <sub>f</sub>	EF	I <sub>geo</sub>	C <sub>f</sub>	
۱۳/۱۹±۵/۰۶	-۰/۷۹±۰/۱۳	۹/۵۲±۲/۹۵	۱۱/۳۵±۵/۹۱	-۰/۷۰±۰/۲۰	۸/۳۰±۴/۵۳	سرب
۲۹/۸۳±۱۸/۷۶	۱/۱۰±۰/۲۳	۲۱/۷۶±۱۴/۵۱	۱۹/۹۲±۷/۹۸	-۰/۹۵±۰/۲۰	۱۴/۷۵±۶/۵۲	روی
۱۰/۶۳±۴/۱۰	-۰/۶۹±۰/۱۱	۷/۵۳±۲/۰۳	۷/۸۹±۳/۱۱	-۰/۵۵±۰/۱۸	۵/۷۹±۲/۴۱	مس
۴/۵۶±۰/۸۶	-۰/۳۴±۰/۰۴	۳/۲۹±۰/۳۲	۴/۴۴±۱/۱۰	-۰/۳۳±۰/۱۰	۳/۲۰±۰/۶۲	نیکل
۴/۲۴±۰/۹۷	-۰/۳۱±۰/۰۵	۳/۰۴±۰/۳۲	۳/۷۱±۰/۶۲	-۰/۲۵±۰/۱۰	۲/۷۱±۰/۵۸	کروم
۲/۰۳±۰/۲۲	-۰/۰۱±۰/۰۹	۱/۵۰±۰/۲۸	۲/۲۲±۰/۲۲	-۰/۰۳±۰/۰۷	۱/۶۲±۰/۲۵	منگنز
	-۰/۳۱±۰/۰۵	-۰/۷۳±۰/۰۸		-۰/۳۲±۰/۰۵	-۰/۷۳±۰/۰۸	آلومینیوم

سرب و مس در فصل سرد دارای غنی‌شدگی شدید بودند. همچنین عنصر روی در نمونه‌های غبار ترسیب شده اتمسفری در فصل سرد دارای غنی‌شدگی بسیار شدید بود. عنصر مس در فصل گرم دارای غنی‌شدگی نسبتاً شدید و عناصر کروم و نیکل نیز در هر دو فصل سرد و گرم دارای غنی‌شدگی متوسط بودند. عنصر منگنز نیز در هر دو فصل دارای غنی‌شدگی اندک بود. نتایج شاخص I<sub>geo</sub> نیز نشان داد که عنصر روی در فصل سرد سبب آلودگی متوسط در ذرات غبار است. در مورد سایر عناصر، این شاخص درجه فاقد

با در نظر گرفتن عنصر آلومینیوم به عنوان عنصر مرجع و با توجه به جدول ۲، محدوده EF عناصر سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری به صورت روند کاهشی؛ روی، سرب، مس، نیکل، کروم و منگنز در فصل گرم و روی، سرب، مس، نیکل، کروم و منگنز در فصل سرد بود. محدوده I<sub>geo</sub> نیز در فصول گرم و سرد به صورت روند کاهشی؛ روی، سرب، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم متغیر بود. نتایج شاخص EF در نمونه‌های غبار ترسیب شده اتمسفری نشان داد که عناصر سرب و روی در فصل گرم و

جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر کمیاب غبار ترسیب شده اتمسفری

عنصر	سرب	روی	مس	نیکل	کروم	منگنز	آلومینیوم
فصل گرم	سرب	۱					
	روی	۰/۲۶۹	۱				
	مس	۰/۸۶۱**	۰/۵۵۲	۱			
	نیکل	-۰/۱۷۸	-۰/۴۱۱	-۰/۵۰۷	۱		
	کروم	۰/۷۶۴*	۰/۶۸۳	۰/۸۳۸**	-۰/۶۱۷	۱	
	منگنز	۰/۵۶۲	۰/۴۷۳	۰/۷۸۰*	-۰/۷۳۰	۰/۷۰۵	۱
	آلومینیوم	۰/۲۹۴	۰/۵۸۳	۰/۴۰۶	-۰/۵۸۴	۰/۷۰۸*	۰/۷۴۷*
فصل سرد	سرب	۱					
	روی	-۰/۴۱۴	۱				
	مس	۰/۴۵۵	۰/۵۳۹	۱			
	نیکل	۰/۳۵۷	-۰/۲۶۰	۰/۱۴۸	۱		
	کروم	۰/۴۲۳	۰/۰۷۰	۰/۶۲۹	۰/۷۸۹*	۱	
	منگنز	۰/۱۳۰	-۰/۳۱۲	-۰/۴۸۵	-۰/۲۳۱	-۰/۶۳۳	۱
	آلومینیوم	-۰/۴۹۵	۰/۳۹۸	۰/۳۲۰	-۰/۰۸۱	-۰/۳۱۶	۰/۶۹۴

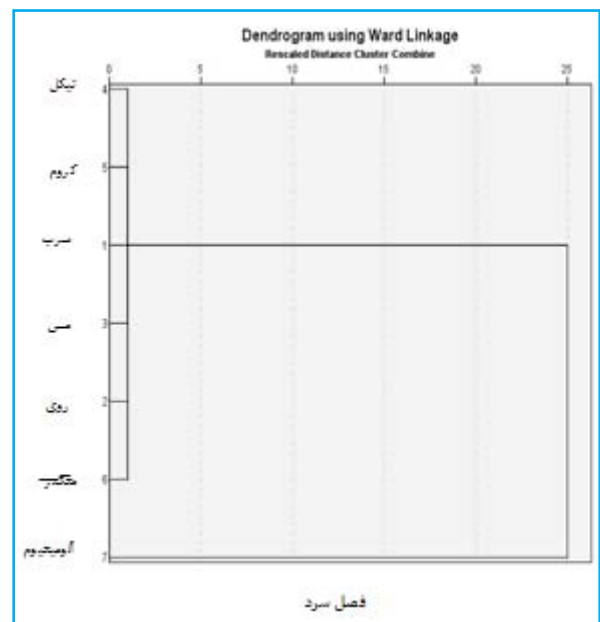
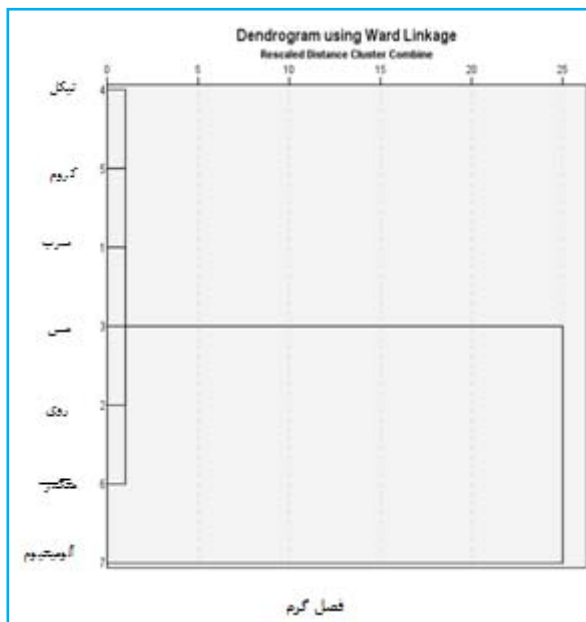
\*\* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ (دو طرفه)؛ \* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ (دو طرفه)

نتایج این آزمون نشان داد که همبستگی معنی داری در سطح ۱٪ بین عناصر مس با سرب و کروم در فصل گرم وجود دارد. همچنین همبستگی معنی داری در سطح ۵٪ بین عناصر کروم با سرب و آلومینیوم و منگنز با مس و آلومینیوم در این فصل مشاهده شد. علاوه بر این همبستگی معنی داری در سطح ۵٪ بین عنصر نیکل با کروم در فصل سرد مشاهده شد.

در این مطالعه جهت تقسیم متغیرها به گروه‌های متجانس از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده گردید. در این روش متغیرهای هر گروه بیشترین شباهت و متغیرهای گروه‌های مختلف کمترین شباهت را با هم دارند. کمینه متوسط فاصله بین زوج متغیرها (فلزات) در این مطالعه جهت این آزمون مدنظر قرار گرفت. با توجه به شکل ۲، نتایج خوشه‌بندی عناصر سنگین مورد مطالعه در هر دو فصل گرم و سرد مشابه بود؛ به طوری که عناصر سنگین در دو خوشه قرار گرفتند. عناصر نیکل، کروم، سرب، مس، روی و منگنز در خوشه یک و عنصر آلومینیوم در خوشه دو قرار گرفت، لذا می‌توان عنوان نمود که عناصر خوشه اول احتمالاً دارای منشأ انسانی و عنصر خوشه دوم احتمالاً دارای منشأ طبیعی است.

آلودگی تا آلودگی متوسط را نشان داد. میانگین شاخص  $C_f$  نیز برای عناصر مورد مطالعه به ترتیب بیشترین به کمترین به صورت روی، سرب، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم در فصل گرم و به صورت روی، سرب، مس، نیکل، کروم، منگنز و آلومینیوم در فصل سرد تعیین شد. شاخص درجه آلودگی  $C_p$  و  $mc_p$  مربوط به عناصر مورد مطالعه در منطقه به ترتیب  $۳۷/۱۰$  و  $۵/۳۰$  در فصل گرم و  $۴۷/۳۸$  و  $۶/۷۶$  در فصل سرد بود؛ به عبارتی شاخص‌های  $C_p$  و  $mc_p$  به ترتیب درجه آلودگی بسیار بالا و سطوح بالای آلودگی را در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری در شهر تهران نشان دادند.

در این مطالعه جهت بررسی وجود اختلاف معنی دار بین غلظت عناصر سنگین در دو فصل گرم و سرد از آزمون تی جفتی استفاده شد که بر اساس نتایج آن، جز برای عناصر مس ( $p=۰/۰۱۷$ ) و کروم ( $p=۰/۰۴۸$ ) که در سطح ۵٪ اختلاف معنی داری بین دو فصل وجود داشت، برای سایر عناصر اختلاف معنی داری در این سطح بین دو فصل گرم و سرد مشاهده نشد. نتایج همبستگی بین غلظت فلزات سنگین در ذرات غبار خیابانی شهر تهران با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نیز در جدول ۳ خلاصه شده است.



شکل ۲. دندروگرام خوشه‌بندی عناصر سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری

## بحث

میانگین غلظت عناصر سنگین در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران برای عناصر سرب، روی، مس، نیکل، کروم و منگنز بالاتر از میانگین غلظت این فلزات در پوسته زمین بود. بالاتر بودن غلظت این عناصر می‌تواند نقش منشأ انسانی این عناصر را توجیه نماید (۳۵). تنها عنصر آلومینیوم، میانگین غلظتی پایین‌تر از غلظت در پوسته زمین را دارا بود که می‌تواند نقش منشأ طبیعی را در انتشار این عنصر در ذرات غبار نشان دهد. در مطالعات متعددی تفکیک منشأ فلزات به منبع انسانی و طبیعی با همین روش صورت گرفته است؛ به طوری که جایارانه و همکاران نیز در مطالعه‌ای که به ارزیابی ژئوشیمیایی فلزات و توان دسترسی‌پذیری آنها پرداختند، بالاتر بودن غلظت برخی عناصر همچون سرب نسبت به پوسته زمین را به منشأ انسانی نسبت دادند (۳۵). همچنین بررسی آلودگی فلزات سنگین در غبار خیابانی از یک شهر معدنی در چین نشان داد که غلظت عناصری همچون سرب و مس فراتر از مقادیر زمینه است و محققین این عامل را نشانگر منشأ انسانی دانستند (۳۶). مقادیر بالای ضرایب تغییرات برای فلز سرب و روی در فصول گرم و سرد در این مطالعه نشان‌دهنده این است که غلظت این فلزات به طور قابل توجهی در مکان‌های مختلف نمونه‌برداری متفاوت است. به عبارت دیگر این دو عنصر بیش از سایر عناصر مورد مطالعه تحت تأثیر نوع فعالیت‌های انسانی و چگونگی پراکنش فعالیت‌های انسانی قرار دارند. مطالعه گوپه و همکاران نشان داد که در مناطق با شدت بالای ترافیک وسایل نقلیه، احتمال حضور دو عنصر سرب و روی در ذرات غبار شهری محتمل است (۲۰). با این حال برمودز و همکاران نشان دادند که حضور دو عنصر سرب و روی می‌تواند ناشی از انتشار از صنایع سیمان باشد (۳۶) که وجود چنین کارخانه‌ای در جنوب شهر تهران نیز می‌تواند سبب تفاوت غلظت این عنصر در مکان‌های مختلف نمونه‌برداری باشد. در این مطالعه میزان انحراف استاندارد برای عنصر روی نیز نسبت به سایر عناصر بالاتر بود که نشانگر گستره تغییرات وسیع غلظت این عنصر در ذرات غبار در

شهر تهران است. نتایج مشابهی در مطالعه سیستانی و همکاران نیز در رابطه با دو عنصر سرب و روی مشاهده شد که محققین در این مطالعه، تغییر جهت و فاصله از منبع آلودگی را بر افزایش و کاهش غلظت این عناصر مؤثر دانستند (۳۷-۳۹) که با نتایج مطالعه حاضر همسو بود.

در مطالعه حاضر میزان شاخص EF برای عناصر سرب و روی در فصل گرم غنی‌شدگی شدیدی را نشان داد که این شاخص برای عناصر سرب و مس در فصل سرد این گونه بود. مطالعات متعددی غنی‌شدگی بالای عناصر در ذرات غبار را به نقش فعالیت‌های انسانی مرتبط نموده‌اند. علاوه بر منابعی که پیش از این برای این عناصر عنوان شد، گاناواردانا و همکاران نشان دادند که منشأ انتشار ذرات غبار هوازداد غنی‌شده با دو عنصر روی و مس می‌تواند ناشی از سایش لاستیک حین ترمز وسایل نقلیه باشد (۴۰). همچنین محققین دیگری انتشارات وسایل نقلیه، روغن‌های روان‌کاری، سایش ترمز و پوشش لاستیک را در انتشار سرب هوازداد مؤثر دانستند (۴۱، ۴۲)، لذا می‌توان عنوان نمود کیفیت وسایل نقلیه به خصوص نوع تایر مورد استفاده برای اتومبیل‌های سطح شهر تهران می‌تواند عامل مؤثری در میزان غلظت عناصر سرب، روی و مس در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری باشد. علاوه بر این وجود همبستگی معنی‌دار بین عناصر مس با سرب و کروم در فصل گرم نشانگر منشأ مشترک این عناصر است که منابع ترافیکی، محتمل‌ترین منبع برای انتشار این عناصر در سطح شهر تهران است. غنی‌شدگی متوسط عناصر کروم و نیکل و بالاتر بودن غلظت این عناصر نسبت به پوسته زمین نیز می‌تواند نشانگر نقش منابع انسانی در انتشار این عناصر باشد. برخی منابع عناصر کروم و نیکل را به پوشش لاستیک و سایش ترمز و به طور کلی ترافیک وسایل نقلیه نسبت دادند (۴۰). همچنین احتراق سوخت‌هایی همچون گاز طبیعی، چوب و غیره نیز می‌تواند منبعی از انتشار این دو عنصر باشد (۲۰)، لذا این دو عنصر می‌توانند منشأ مشترک صنعتی و ترافیکی داشته باشند. وجود همبستگی

ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری تجمع یابند.

### نتیجه گیری

غلظت عناصر سنگین سرب، روی، مس، نیکل، کروم، منگنز در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری بالاتر از غلظت این عناصر در پوسته زمین است، لذا این عناصر می‌توانند ناشی از منشأ انسانی باشند. همچنین نتایج شاخص‌های غنی‌شدگی و انباشت ژئوشیمیایی نیز منشأ انسانی این عناصر را در این ذرات تأیید نمود. مطالعه حاضر غلظت بالای این فلزات را به منابع ترافیکی و صنعتی نسبت داد، لذا لزوم پایش این منابع ضروری است. وجود برنامه‌های پایش منظم بالطبع می‌تواند سبب ارتقای کیفیت محصولات در فرآیند تولید از طریق سیاست‌های کنترل آلودگی گردد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که آلودگی ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری در شهر تهران در فصل سرد بالاتر از فصل گرم است، لذا با توجه به نتایج این مطالعه لزوم تدوین سیاست‌هایی مدون و کاربردی تر جهت ارتقای کیفیت هوای شهر تهران در این فصل سال ضروری به نظر می‌رسد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از رساله در مقطع دکتری است که با حمایت معنوی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران صورت گرفته است. این رساله همچنین مورد حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران با شماره قرارداد ۱۳۷/۶۲۵۲۲۹ است. بدین‌وسیله از مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران جهت حمایت مالی این رساله تشکر و قدردانی می‌شود.

معنی‌دار بین این دو عنصر در فصل سرد نیز نشانگر منشأ مشترک این دو عنصر است. لازم به ذکر است نیکل عنصری است که به آسانی متحرک می‌شود و به اکسیدهای آهن جو متصل می‌گردد. تحرک زیاد این عنصر می‌تواند حضور این عنصر در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری را بیشتر توجیه نماید. در این مطالعه غلظت عنصر منگنز فراتر از غلظت این عنصر در پوسته زمین بود، با این حال غنی‌شدگی اندکی در ذرات غبار ناشی از این عنصر مشاهده شد. بالاتر بودن غلظت این عنصر می‌تواند نشانگر نقش منابع انسانی همچون صنایع فولاد و منابع ترافیکی همچون لنت ترمز و فرسودگی پوشش تایرها باشد (۴۰). غنی‌شدگی اندک این عنصر در ذرات غبار ترسیب شده اتمسفری شهر تهران می‌تواند به دلیل مسافت طولانی صنایع فولاد از شهر و بالاتر بودن غلظت نسبت به غلظت پوسته زمین می‌تواند ناشی از منشأ محلی این عنصر همچون ترافیک در سطح شهر باشد. در مطالعه حاضر غلظت عنصر آلومینیوم پایین‌تر از غلظت مرجع در پوسته زمین بود که این امر می‌تواند نشانگر منشأ طبیعی این عنصر باشد؛ همچنان که محققینی نیز در مطالعه خود نشان دادند که عنصر آلومینیوم در ذرات غبار منبع خاک به صورت اکسیدهای فلزی وجود داشته (۲۱) که نتایج این مطالعه نیز این موضوع را تأیید می‌نماید. با این حال نتایج آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی نیز در این مطالعه بر طبیعی بودن منشأ این عنصر تأکید می‌نماید. به‌طور کلی نتایج شاخص درجه آلودگی، درجه آلودگی بسیار بالا را در این مطالعه نشان داد. همچنین در مطالعه حاضر اختلاف معنی‌داری بین غلظت عناصر سنگین سرب، مس و کروم بین دو فصل گرم و سرد وجود داشت؛ به عبارتی غلظت این عناصر در فصل سرد به‌طور معنی‌داری بالاتر از غلظت‌شان در فصل گرم بود که مطالعات متعددی نیز نشان داده‌اند که شهر تهران در فصل سرد با مسئله وارونگی هوا مواجه است (۴۳) که منجر به انباشت آلاینده‌های اتمسفری نزدیک سطح زمین می‌گردد (۴۴) که بی‌شک این آلاینده‌ها می‌توانند در سطح

## References

- Huang S, Tu J, Liu H, Hua M, Liao Q, Feng J, et al. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China. *Atmospheric Environment*. 2009; 43:5781-5790.
- Fang GC, Wu YS, Rao JY, Huang SH. Characteristic study of dry deposition, concentration, compositions for particulates mass and ionic species during summer and autumn season at a traffic sampling site. *Environmental monitoring and assessment*. 2006; 122:259-273.
- Chu CC, Fang GC, Chen JC, Yang IL. Dry deposition study by using dry deposition palte and water surface sampler in Shalu, central Taiwan. *Environmental monitoring and assessment*. 2008; 146: 441-451.
- Valigura RA, Winston TL, Artz RS, Hicks BB. Atmospheric nutrient input to coastal areas educing the uncertainties. NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No. 9; 1996.
- Park SU. The effect of dry deposition on the groundlevel concentration. *Journal of Korean Meteorological Society*. 1995; 31: 97-115.
- Connan O, Maro, D, Hebert, D, Rroupsard P, Goujon R, Letellier B, et al. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marias Veinier, France. *Atmospheric Environment*. 2013; 67: 394-403.
- Arimoto R, Ray BJ, Lewis NF, Tomza. Mass-particle size distribution of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean. *Journal of Geophysical research*. 1997; 15: 867-874.
- Shi Z, Shao L, Jones TP, Lu S. Microscopy and mineralogy of airborne collected during severe dust storm episodes in Beijing, China. *Journal of Geophysical research*. 2005; 110:1-10.
- Fang GC, Chang CN, Wu YS, Fu PPC, Yang CJ, Chen CD, et al. Ambient suspended particulate matters and related chemical species study in central Taiwan, Taichung during 1998-2001. *Atmospheric Environment*. 2002; 36: 1921-1928.
- Willers S, Gerhardsson L, Lundh T. Environmental tobacco smoke (ETS) exposure in children with asthma-relation between lead and cadmium, and cotinine concentrations in urine. *Respiratory Medicine*. 2005; 99:1521-1527.
- Amato F, Pandolfi M, Viana M, Querol X, Alastuey A, Moreno T. Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment*. 2009;43:1650-1659.
- Ogulei D, Hopke PK, Zhou L, Pancras JP, Nair N, Ondov JM. Source apportionment of Baltimore aerosol from combined size distribution and chemical composition data. *Atmospheric Environment*. 2006; 40: S396-S410.
- Al-Khashman OA. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric Environment*. 2004. 38: 6803-6812.
- Ahmadi Doabi S, Afyuni M, Karami M. Multivariate statistical analysis of heavy metals contamination in atmospheric dust of Kermanshah province, western Iran, during the spring and summer 2013. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017;180:61-70.
- Ali MU, Liu G, Yousaf B, Abbas Q, Ullah H, Munir MAM, et al. 2017. Pollution characteristics and human health risks of potentially (eco) toxic elements (PTEs) in road dust from metropolitan area of Hefei, China. *Chemosphere*. 2017; 181: 111-121.
- Thorpe A, Harrison RM. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment*. 2008;400:270-282.
- Fausser P. Particulate air pollution with emphasis on traffic generated aerosols. *Riso*, 1999.
- Schauer JJ, Lough GC, Shafer MM, Christensen W, Arndt MF, DeMinter JT, et al. Characterization of metals emitted from motor vehicles. *Health Effects Institute*. 2006; 88.
- McKenzie ER, Money JE, Green PG, Young TM. 2009. Metals associated with stormwater-relevant brake and tire samples. *Science of the Total Environment*. 2009; 407: 5855- 5860.
- Gope M, Ebhin Masto R, George J, Balachandran. Tracing source, distribution and health risk of potentially harmful elements (PHEs) in street dust of Durgapur, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018;154:280-293.
- Pierson WR, Brachaczek WW. Particulate matter associated with vehicles on the road, II. *Aerosol Sci. Technol*. 1993; 4:1-40.
- Amini H, Taghavi-shahri SM, Henderson SB, Naddafi K, Nabizadeh R, Younesian M. Land use regression models to estiate the annual and seasonal spatial variability of sulfure oxide and particulate matter in Tehran, Iran. *Science of the Total Environment*. 2014; 488-489:343-353.
- Mazloomi S, Esmaeili-Sari A, N Bahramifar, Moeinaddini M. Assessment of the metals and metalloids level in street dust of the east and west of Tehran. *Iran J Health & Environ* 2017; 10:281-292 (In Persian).
- Goossens D, & Offer ZY. (2000). Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers. *Atmospheric*

- Environment. 2000; 34(7):1043-1057.
25. Reheis M. Dust deposition and its effect on soils- A progress report. U.S. Geological survey professional paper, 1598.
  26. Shi D, Lu X. Accumulation degree and source apportionment of trace metals in smaller than 63  $\mu\text{m}$  road dust from the areas with different land uses: A case study of Xi'an, China. *Science of the Total Environment*. 2018;636:1211-1218.
  27. APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA, 2005.
  28. Taylor SR, McLennan SM. The Geochemical Evolution of the continental crust. *Review of Geophysics*. 1995; 32:241-265.
  29. Sistani N, Moeinadini M, Ali-Taleshi MS, Khorasani N, Hamidian AH, Azimi Yancheshmeh R. Source identification of heavy metal pollution nearby Kerman steel industries. *Journal of Natural Environment*. 2017; 19:316-327 (In Persian).
  30. Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control, a sediment logical approach. *Water Res*. 1980; 14:975-1001.
  31. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*. 1979; 2:108-18.
  32. Heling D, Rothe P, Förstner U, Stoffers P. *Sediments and Environmental Geochemistry*. Berlin:Springer; 1990.
  33. Qingjie G, Jun D. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*; 2008; 19:230-241.
  34. Abraham GMS. *Holocene Sediment of Tamaki Estuary: characterisation and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand [dissertation]*. Auckland, New Zealand: University of Auckland; 2005.
  35. Jayarathne A, Egodawatta P, Ayoko GA, Goonetilleke A. Assessment of ecological and human health risks of metals in urban road dust based on geochemical fractionation and potential bioavailability. *Science of the Total Environment*. 2018; 635:1609-1619.
  36. Bermudez GMA, Moreno M, Invernizzi R, Plá R, Pignata MM. Heavy metal pollution in topsoils near a cement plant: the role of organic matter and distance to the source to predict total and HCl-extracted heavy metal concentrations. *Chemosphere*. 2010;78: 375-381.
  37. Sistani N, Meinaddini M, Khorasani N, Hamidian AH, Ali-Taleshi MS. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2017; 10(1): 75-86 (In Persian).
  38. Sabouhi M, Nejadkoorki F, Azimzadeh HR, Ali-Taleshi MS. Heavy metal pollution in the floor dust of Yazd battery repairing workshops in 2014. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2017; 9(1): 127-138 (In Persian).
  39. Saboohi M, Azimzadeh HR, Nejadkoorki F, Ali-Taleshi MS. Assessment of heavy metal pollution in floor dust of Yazd mechanical workplaces. *Health and Development Journal*. 2018; 7 (1):10-22 (In Persian).
  40. Gunawardana C, Goonetilleke A, Egodawatta P, Dawes L, Kokot S. Source characterization of road dust based on chemical and mineralogical composition. *Chemosphere*. 2012; 87:163-170.
  41. Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environmental international*. 2004; 30:1009-1017.
  42. Sabouhi M, Ali-Taleshi MS, Bourliva A, Nejadkoorki F, Squizzato S. Insights into the anthropogenic load and occupational health risk of heavy metals in floor dust of selected workplaces in an industrial city of Iran. *Science of the Total Environment*. 2020; 744:140762.
  43. Halek F, Kianpour-rad M, Kavousi A. Characterization and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air (Tehran, Iran). *Environ Chem Lett*. 2010; 8(1):39-44.
  44. Ali-Taleshi MS, Moeinadini M, Feiznia S, Squizzato S. Heavy metal pollution in street dust from Tehran in 2018: Metal richness and degree of contamination assessment. *jehe*. 2020; 7 (2):179-194.