مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق)/ دورهٔ ۸، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۰/ ص ۳۳۵-۳۲۱
DOI: 10.22059/jhsci.2021.329792.673

عوامل موثردر ایجاد غلظت فلزات سنگین در گردوغبار هوای کلانشهر تهران و مخاطرات آن

فاطمه ارسلانی
دکتری مخاطرات آب و هوا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
بهلول علیجانی*
استاد گروه اقلیم شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۶/۹ – تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۹/۱۳)

چکیده

فلزات سنگین موجود در گرد و غبار هوا، جزء خطرناک‌ترین آلاینده‌هایی است که سلامتی انسان و محیط را مورد تهدید جدی قرار می‌دهد. هدف پژوهش حاضر شناسایی عوامل افزایش غلظت فلزات سنگین (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Si, V, Zn) موجود در گردوغبار ریزشی هوای کلانشهر تهران و بررسی وضعیت آلودگی و پراکندگی آن روی ایستگاه‌های مورد مطالعه است. بدین منظور ۲۸ نمونه غبار ریزشی در زمستان ۱۳۹۶ از مناطق مختلف تهران جمع‌آوری شد. آنالیز XRF غلظت عناصر سنگین موجود در آن را مشخص کرد. با روش تجزیه مؤلفه اصلی(PCA)، ۱۵ عنصر سنگین مورد مطالعه، در سه عامل خلاصه شد. سپس عامل‌های استخراج شده، با روش آماری تجزیه خوشه‌ای (CA) و با استفاده از روش ادغام وارد گروهبندی شد. جهت تعیین پراکندگی فضایی هر عامل در منطقه‌ی مورد مطالعه، از روش درون‌یابی کریجینگ در GIS استفاده شد. نتایج وجود سه عامل طبیعی، انسانی و ترکیبی از عامل‌های طبیعی و انسانی را در افزایش غلظت فلزات سنگین در غبار ریزشی کلانشهر تهران نشان داد. عوامل طبیعی در شمال تهران، عوامل انسانی در شرق تهران و ترکیبی از عامل‌های طبیعی و انسانی در جنوب تهران در آلودگی غبار ریزشی به فلزات سنگین نقش بیشتری داشت. تحلیل نتایج نشان داد تراکم جمعیت، ترافیک و حجم تردد، بخصوص تردد خودروهای سنگین و دیزلی، صنایع و معادن، الگوی توپوگرافی، الگوی پوشش گیاهی، الگوی باد غالب و وضعیت پایداری هوا در غلظت عناصر سنگین موجود در غبار ریزشی تهران نقش دارد. بنابراین برای مدیریت و کنترل آلودگی، گسترش و بهینه‌سازی حمل و نقل عمومی و گسترش فرهنگ استفاده از آن (بخصوص مترو) مخصوصاً در نیمه‌ی شرقی تهران و ایجاد پوشش گیاهی بیشتر و مرتفع‌تر در مناطق حاشیه غربی و جنوبی شهر تهران پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عاملی، تجزیه خوشه‌ای، تهران، فلزات سنگین، غبار ریزشی، GIS ، مخاطرات.

* نویسندهٔ مسئول
Email: bralijani@gmail.com

مقدمه

آلودگی هوا از مهمترین مخاطرات زیست محیطی کلانشهرهاست که گذشته از ضررهای چبران ناپذیر برای سلامت شهروندان، تاثیرات اجتماعی و اقتصادی فراوانی بر شهر تحمیل میکند[۲ و ۱۱]. گردوغبار ریزشی جزء ذرات مهم اتمسفر محسوب می‌شود. این ذرات به دلیل نیروی جاذبه از جو به سطح زمین رسوب می‌کند[۲۱]. تحقیقاتی پیرامون به خطر افتادن سلامتی انسان‌ها بر اثر استنشاق و خوردن گردوغبار موجود در هوا ارائه شده است[۲۸]. در شهرهای بزرگ و صنعتی هزاران ذره حاوی فلزات سنگین در محیط آزاد می‌شود[۱۴]. این ذرات با اتصال به ذرات گرد و غبار قادرند در مقیاس وسیع منتشر شود[۲۶]. فلزات سنگین به دلیل سمیت و ماندگاری در محیط زیست، جزء خطرناک‌ترین آلاینده‌های ساخته شده توسط انسان[۲۴]، و به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و اثرات فیزیولوژیکی بر انسان و سایر موجودات زنده در غلظت‌های کم نیز حائز اهمیت است[۱۵]. تأثیرات زیان بار فلزات سنگین بر سلامتی انسان از جهات مختلف به اثبات رسیده است. مواجهه با این دسته از آلاینده‌ها موجب مسمومیت‌های حاد و مزمن و بیماری‌های بسیاری از جمله اختلالات عصبی، فقر موادغذایی، برهم خوردن تعادل هورمون‌ها، چاقی، سقط جنین، اختلالات تنفسی و قلبی، آسیبهای کبدی و کلیوی، آلرژی و آسم، عفونت‌های ویروسی مزمن، کاهش آستانه تحمل بدن، ناباروری، کم‌خونی و خستگی، تضعیف سیستم ایمنی بدن، تخریب ژن‌ها، پیری زودرس، کاهش حافظه، پوکی استخوان، ریزش مو، بی‌خوابی، انواع سرطان و مرگ می‌شود[۱۷]. از این رو مطالعه فلزات سنگین موجود در گردوغبار ریزشی به دلیل اثرات سوء بر سلامت انسان بسیار مهم است[۳۱ و ۳۶]. منابع مختلف طبیعی و مصنوعی برای فلزات سنگین در محیط زیست وجود دارد. علاوه بر منابع طبیعی و سنگ بستر، فعالیت‌های انسانی[۲۴] چون ترافیک، فرسایش لاستیک و لنت ترمز[۲۲] احتراق سوخت‌های فسیلی، خروجی وسایل نقلیه موتوری [۲۱ و ۳۳] و ذرات آلاینده منتشر شده از صنایع [۱۴] منجر به افزایش آلودگی فلزات سنگین در گرد و غبار می‌شود.

برای بررسی فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی اتمسفر، باید ابتدا از غبار ریزشی اتمسفر نمونه‌گیری کرد. بدین منظور از تله‌رسوبگیر برای جمع‌آوری غبارهای افقی و عمودی استفاده می‌شود. مهمترین ویژگی تله رسوبگیر کارامدی آن است. تله رسوب‌گیر تیله‌ای [MDCO: Marble Dust Collector] برای جمع‌آوری غبار ریزشی بیشترین راندمان را دارد[۲۷]. اندازه-گیری غبار ریزشی با تله رسوبگیر تیله‌ای به منظور انجام مطالعاتی چون تهیه نقشه‌های پهنه-بندی زمانی و مکانی گرد و غبار، بررسی ترکیب فیزیکی، تجزیه شیمیایی و تعیین عناصر مضر آن انجام می‌گیرد [۲۹، ۱۹، ۱۸، ۱].

در سال‌های اخیر مطالعاتی پیرامون آلودگی گردوغبار به فلزات سنگین با روش‌های گوناگون انجام شده‌است. در این میان مطالعاتی پیرامون بررسی منابع انتشار فلزات سنگین در غبارهای خیابانی با استفاده از تجزیه خوشه‌ای [CA: Cluster Analysis] و تجزیه مؤلفه اصلی [PCA: Principle Component Analysis]صورت گرفته است. از جمله بررسی ۱۱ عنصر سنگین موجود در غبار شهر مکزیک نشان داد فلزات سنگین Cu, Cr, Pb, Zn دارای منشا انسانی (تردد وسایل نقلیه، سایش ترمز، مواد افزودنی به روغن موتور) هستند. فلزات Fe, Mn, V, Alمنشا طبیعی یا ترکیبی از منشا طبیعی و انسانی دارد[۱۴]. همچنین بررسی ۹ عنصر سنگین در غبار شهر تیانشوی چین با این روش نشان داد که Zn، Pb و As به طور عمده از سیستم حمل و نقل ناشی می‌شود. V از مواد اصلی خاک تشکیل می شود. Mn, Ni, Cu و Co از منبع ترکیبی انسانی و طبیعی ناشی می‌شود [۳۵].

تهران به عنوان پایتخت کشور در زمره یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان قرار دارد[۳]. در سالهای اخیر مطالعات گوناگونی در زمینه ی آلودگی هوای این کلانشهر انجام شده است. ولی مطالعات چندانی در زمینه بررسی عوامل افزایش غلظت فلزات سنگین موجود در گردوغبار صورت نگرفته است. بنابراین هدف پژوهش حاضر شناسایی عوامل افزایش غلظت فلزات سنگین (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Si, V, Zn) موجود در گردوغبار ریزشی هوای کلانشهر تهران با کمک تجزیه مؤلفه‌های اصلی و ارزیابی و تحلیل وضعیت آلودگی و پراکندگی آن روی ایستگاه‌های مورد مطالعه با کمک تجزیه خوشه‌ای و درونیابی است. زیرا فلزات سنگین جز مهمی از آلودگی‌های محیط زیست شهری است. شناسایی آن به طراحی اقدامات کارآمد، برای کنترل آلودگی و مدیریت مخاطرات ناشی از آن کمک می‌کند. همچنین برای مدیریت توسعه پایدار و ایجاد محیط زیستی سالم‌تر برای انبوه جمعیت حاضر، در دست داشتن چنین اطلاعاتی ضروری است.

روش تحقیق و تحلیل

کلانشهر تهران وسعتی بالغ بر ۷۳۳ کیلومتر مربع و جمعیتی برابر با ۸۶۹۳۷۰۶ نفر، دارد[۱۲]. بادهای غالب تهران غربی است. بیشتر صنایع در غرب تهران هستند. کوههای البرز در شمال و کوه‌های بی‌بی‌شهربانو در شرق سبب می‌شود آلاینده‌هایی که توسط بادهای غربی به داخل فضای شهر آورده می‌شود در سطح شهر باقی بماند، و هوای شهر اغلب آلوده باشد. وجود شرایط وارونگی فراوان و استقرار مداوم سیستم‌های پرفشار در طول سال نیز در این آلودگی

نقش دارد. عوامل انسانی مانند جمعیت زیاد و استقرار کارخانه‌ها در سطح شهر میـزان آلـودگی را دو چندان می‌کند[۷].

در ایـن پـژوهش برای جمـع‌آوری غبار ریزشی از روش آزمایشـگاهی جمـع‌آوری غبـار بـا استفاده از تله رسوبگیرMDCO استفاده شد. این تله‌رسوبگیر یکی از نمونه‌بردارهایی اسـت کـه پتانسیل بیشتری نسبت به سایرین برای جذب گرد و غبار نشان داده اسـت[۲۹]. بـرای توزیـع مناسب تله‌های رسوب‌گیر در سطح شهر، در هر منطقه یک تله رسوب‌گیـر نصـب گردیـد و در مناطق وسیع‌تر دو تله نصب گردید. نمونه‌گیری در زمستان ۱۳۹۶ انجام شـد و در مجمـوع ۲۸ نمونه غبار ریزشی از مناطق مختلف شهر جمع‌آوری شد. غبارهـای بـه دام افتـاده در تلـه‌هـای رسوب‌گیر با دقت تمام جمع‌آوری شد. پس از آماده سازی اولیه برای انجام آزمایش‌های مربوطه به آزمایشگاه شیمی دانشگاه تهران منتقل شد. برای شناسایی و تعیین غلظـت عناصـر سـنگین موجـود در گردوغبـار ریزشـی جمـع‌آوری شـده از آنـالیز [XRF: Xray Fluorescence spectroscopy] استفاده شد. پس از استخراج غلظت عناصر سنگین (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Si, V, Zn) موجود در غبار ریزشی بر حسب میلی‌گرم بـر کیلـوگرم (mg/kg) جهت بررسی داده‌ها، میانگین و انحـراف معیـار هـر یـک از عناصـر محاسـبه گردیـد. همچنین میانگین غلظت این عناصر در پوسته زمـین بـرای مقایسـه اسـتخراج گردیـد. جهـت شناسایی منابع تولید کننده آلاینده‌ها از فاکتور غنی‌شدگی (Enrichment Factor) استفاده شد. منشا منابع ممکن است انسانی یا طبیعی باشد. فلزات با ضریب غنی‌شدگی بیشتر از ۱۰ ممکـن است ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد [۳۷]. این شاخص از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EF = \frac{(C_X/C_{ref})\text{sample}}{(C_X/C_{ref})\text{background}}$$

که در آن (CX/Cref) sample نسبت غلظت فلز مورد نظر به فلز مبنا در نمونه مـورد مطالعـه و (CX/Cref) background نسبت غلظـت فلـز مـورد نظـر بـه فلـز مبنـا بـه عنـوان فلـز زمینـه است.گروه‌های مختلف تغییرات ضریب غنی شدگی در جدول ۱ ارائه شده است[۳۲].

جدول ۱. طبقه بندی سطح آلودگی بر اساس فاکتور غنی شدگی[۳۲]

کلاس	۱	۲	۳	۴	۵
فاکتور غنی‌شدگی	EF < 2	2 < EF < 5	5 < EF < 20	20 < EF < 40	EF > 40
درجه غنی‌شدگی	غنی شدگی کم	غنی‌شدگی متوسط	غنی‌شدگی زیاد	غنی‌شدگی خیلی زیاد	غنی‌شدگی بشدت زیاد

جهت کاهش تعداد متغیرها با روش تجزیه مؤلفه اصلی۱۵ عنصر سنگین (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Si, V, Zn) موجود در غبار ریزشی به ۳ عامل خلاصه شد. این ۳ عامل ۷۸,۵۷٪ از کل واریانس کل را توجیه می‌کند. روش تجزیه مؤلفه اصلی یک روش آماری برای کاهش تعداد متغیرها است. امتیاز این روش این است که ضمن اینکه تعداد متغیرها را کاهش می‌دهد، مقدار اولیه پراش موجود در داده‌های اصلی را حفظ می‌کند[۸]. هر قدر مقدار همبستگی داخلی بین متغیرها نزدیک‌تر باشد، تعداد عامل‌های پدید آمده کمتر خواهد بود. برای بررسی اینکه تعداد داده‌های موجود برای تحلیل عاملی مناسب هستند یا خیر از آزمون بارتلت و KMO استفاده شد[۵].

جهت بررسی پراکندگی فضایی هر عامل در منطقه‌ی مورد مطالعه، از روش درون‌یابی کریجینگ در GIS استفاده شد. زیرا از نظر متخصصین زمین‌آمار درونیابی باید براساس ساختار پراکندگی، یعنی هر دو رفتار منطقه‌ای و محلی انجام شود. در شرایط فعلی دقت روش درونیابی کریجینگ از سایر روش‌ها بیشتر است[۹]. بررسی آماری داده‌ها نشان داد که داده‌ها دارای رفتار منطقه‌ای (روند) هستند. بنابراین از کریجینگ رونددار(Universal) استفاده شد.

در مرحله‌ی بعد عامل‌های استخراج شده، براساس نمرات عاملی (Factor score)، با روش آماری تجزیه خوشه‌ای و با استفاده از روش ادغام وارد گروهبندی شد. به عبارتی تحلیل خوشه‌ای روی ایستگاه‌های منطقه انجام گرفت. تجزیه خوشه‌ای ابزار میانبر تحلیل داده‌ها است. هدف آن نظم دادن به اشیاء مختلف است. در روش خوشه‌بندی گروهبندی مشاهدات براساس فاصله بین آنها انجام می‌گیرد. هدف اصلی روش خوشه‌بندی، ایجاد گروه‌ها و طبقاتی است که تنوع و تفرق درون‌گروهی آنها کمتر از تفرق و پراکنش بین گروهی باشد[۸]. روش وارد این مزیت را دارد که هر ایستگاه را در گروهی جای می‌دهد که مجموع مربعات انحرافات درون گروهی به حداقل برسد. ایستگاه‌هایی که به این روش در یک خوشه جای می‌گیرند از نظر مکانی بر روی نقشه در همسایگی یکدیگر واقع می‌شود[۱۳].

بحث و نتایج

آمار توصیفی غلظت فلزات در گردوغبار ریزشی در دوره آماری مورد مطالعه در جدول۲ ارائه شده‌است. بیشترین انحراف استاندارد (Std. Deviation) مربوط به سیلیسیم، آلومینیوم و روی بود، که نشان دهنده‌ی تغییرات زیاد این عناصر در گردوغبار ریزشی است. مقایسه‌ی میانگین غلظت فلزات سنگین در غبار ریزشی با میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین نشان داد که آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، سرب، سلنیوم و روی غلظتی بالاتر از میانگین غلظت فلزات در

پوسته‌ی زمین داشت(جدول۲). بنابراین عوامل انسانی می‌تواند در افزایش آن در گردوغبار نقش داشته باشد. پایین بودن میانگین غلظت آلومینیوم، کبالت، آهن، منیزیم، منگنز، نیکل، سیلیسیم و وانادیوم نسبت به میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین(جدول۲) می‌تواند نشان از طبیعی بودن منشأ این فلزات در گردوغبار باشد. ضریب غنی‌شدگی آرسنیک، کادمیوم، سرب، روی و سلنیوم بیشتر از ۱۰ بود (جدول ۲). بنابراین عوامل انسانی در افزایش غلظت این فلزات در گردوغبار ریزشی شهر تهران نقش دارد. نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران نشان داد که غلظت فلزات سنگین موجود در گرد و غبار شهری مانند کادمیوم، مس، روی و سرب از اجزای اتومبیل، اصطحکاک تایر، گریس و مواد روغنی، خروجی کارخانه‌های صنعتی(دود) کوره‌ها[۳۴]، ترافیک، تعداد دفعات استفاده از ترمز و سرعت خودروها منشأ می‌یابد[۲۶]. از منابع انتشار سلنیوم می‌توان به مصرف سوخت‌های فسیلی اشاره کرد[۱۶]. آرسنیک نیز از احتراق سوخت فسیلی و دیگر فعالیت‌های صنعتی و انسانی انتشار می‌یابد[۲۳].

جدول ۲. آمار توصیفی فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی، میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین و مقادیر شاخص غنی‌شدگی(EF)

فلزات سنگین	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین[۲۰]	مقادیر محاسبه شده ی شاخص غنی شدگی	درجه غنی شدگی
Al	۵۰۵۱۳,۷	۲۶۴۹۰,۶	۸۲۰۰۰	۰,۷	کم
As	۱۶,۰۶	۷,۱	۱,۵	۱۴,۱	زیاد
Cd	۳,۹	۲,۷	۰,۱۱	۴۵,۷	بشدت زیاد
Co	۷,۰۶	۴,۳	۲۰	۰,۴	کم
Cr	۱۰۴,۹	۳۱,۸	۱۰۰	۱,۳	کم
Cu	۲۰۱,۸	۶۸,۷	۵۰	۵,۲	زیاد
Fe	۳۲۵۶۸,۷	۸۲۷۸,۷	۴۱۰۰۰	-	-
Mg	۱۳۶۶۶,۸	۳۲۶۶,۵	۲۳۰۰۰	۰,۷	کم
Mn	۸۰۴,۱	۲۰۲,۶	۹۵۰	۱	کم
Ni	۶۱,۶	۲۰,۷	۸۰	۰,۹	کم
Pb	۱۹۶	۶۹,۶	۱۴	۱۷,۸	زیاد
Se	۱,۰۸	۰,۹	۰,۰۵	۲۸,۴	خیلی زیاد
Si	۱۳۱۴۱۱,۲	۳۱۶۹۱,۱	۲۷۷۱۰۰	۰,۵	کم
V	۱۱۰,۵	۲۷,۲	۱۶۰	۰,۸	کم
Zn	۱۶۲۸۲,۴	۲۵۸۵۲	۷۵	۳۲۸,۳	بشدت زیاد

(-) مقادیر شاخص غنی‌شدگی بالاتر از ۱۰ و میانگین فلزات سنگین بالاتر از میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین

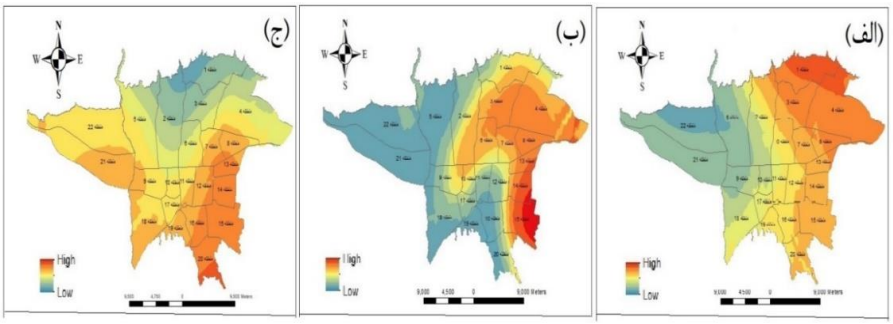
بر اساس نتایج آزمون بارتلت و KMO، سطح معناداری آزمون ۰,۰۰۰ بود. بنابراین فرض صفر رد شد، و بین متغیرها ارتباط معناداری وجود داشت. روش تجزیه مؤلفه اصلی با استفاده از چرخش واریماکس برای مشخص کردن منابع ورود فلزات سنگین در غبار ریزشی به کار برده شد. سه عامل اصلی از تحلیل مؤلفه‌ی اصلی بدست آمد، که در ادامه توضیح داده شد. این ۳ عامل ۷۸,۵۷٪ درصد پراش فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی تهران را نشان داد.

عامل ۱: آلومینیوم، کروم، آهن، منیزیوم، منگنز، نیکل، سیلیسیم و وانادیوم منشأ انتشار یکسان داشت. با توجه به جدول ۲، میانگین این عناصر از میانگین غلظت فلزات در پوسته زمین کمتر بود. احتمالا نشان از طبیعی بودن منشأ این عناصر است. بر طبق نتایج شاخص غنی‌شدگی، این دسته عوامل از فعالیت‌های انسانی تأثیر نمی‌پذیرد و منشأ طبیعی دارد. لذا این دسته، عامل طبیعی نامیده شد.

عامل ۲: آرسنیک، کادمیوم، مس، سرب و سلنیوم منشأ انتشار یکسان داشت. مقایسه‌ی این عناصر با میانگین غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین و نتایج شاخص غنی‌شدگی نشان داد که احتمالاً عوامل انسانی در افزایش این عناصر در غبار ریزشی نقش داشته است. لذا این دسته، عامل انسانی نامیده شد. عامل ۳: کبالت و روی منشأ انتشار یکسان داشت. میانگین غلظت کبالت در غبار ریزشی نیز نسبت به میانگین غلظت کبالت در پوسته‌ی زمین کمتر بود. میانگین روی در غبار ریزشی از میانگین روی در پوسته زمین بیشتر بود. ولی هر دو در یک گروه قرار گرفت. با توجه به نتایج شاخص غنی‌شدگی، این عامل ترکیبی از هر دوی عوامل طبیعی و انسانی بود. حسینی نژاد و همکاران حجم و ترافیک خودروها را عامل افزایش غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل و وانادیوم در غبار تهران دانستند[۴]. همچنین علی طالشی و همکاران میزان عناصر کادمیوم، سرب، روی و کروم را در غبار خیابانی به منابع انسانی و علی الخصوص ترافیک جاده ای نسبت دادند[۱۰].

الگوی منطقه‌ای عناصر سنگین موجود در گردوغبار بر اساس عامل طبیعی از تابع درجه دوم تبعیت کرد. روند غرب به شرق مقدار عناصر سنگین موجود در غبار ریزشی افزایشی بود. الگوی منطقه‌ای به سمت مناطق شمالی و جنوبی نیز افزایشی بود. بر اساس عوامل طبیعی، بیشترین عناصر سنگین موجود در گردوغبار در منطقه‌ی ۱ و منطقه ۴ بود (شکل۱، الف). تهران از شمال به کوه‌های البرز محدود شده است. این مناطق از گسترش صنایع و کارخانه‌ها و آلودگی‌های ناشی از آن به دور مانده است. اما کوه‌ها و مناطق جنگلی شمال تهران احتمالا در افزایش غلظت فلزات سنگین با منشا طبیعی در غبار ریزشی این مناطق نقش دارند. الگوی منطقه‌ای عناصر سنگین براساس عامل انسانی نیز از تابع درجه دوم تبعیت کرد. این الگو

ازغرب به شرق افزایشی بود. به سمت شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه از مقدار آن کاسته شد. بیشترین مقدار را در مناطق ۱۴ و ۱۵ داشت (شکل۱، ب). گسترش صنایع و کارخانه‌ها در شرق تهران باعث شده نسیم کوه آلودگی کارخانه‌های واقع در شرق تهران را وارد این بخش از شهر کند. علاوه بر آن کوه‌های واقع در شرق تهران مانع خروج آلاینده‌هایی می‌شود که توسط بادهای غربی به این سمت شهر هدایت شده است. همچنین بر غلظت فلزات سنگین با منشا انسانی در این مناطق می‌افزاید. الگوی منطقه‌ای بر اساس عامل سوم که ترکیبی از عامل‌های انسانی و طبیعی است، از تابع درجه اول تبعیت کرد. این الگو از غرب به شرق با شیب ملایمی و از شمال به جنوب با شیب تندی افزایشی بود (شکل۱، ج). تمرکز صنایع و کارخانه‌ها در جنوب تهران و همچنین وجود مناطق خشک و کویری که در مسیر ورود بادهای جنوبی به تهران قرار دارد، باعث شده است فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی این مناطق دارای هر دو منشا طبیعی و انسانی باشد. مطالعات دیگر پژوهشگران در مناطق مختلف نیز نشان داد غلظت‌های بالاتر فلزات سنگین موجود در گرد و غبار در نزدیکی مناطق صنعتی و پرترافیک و غلظت پایین‌تر در مناطق مسکونی و پارکها است[۳۰].



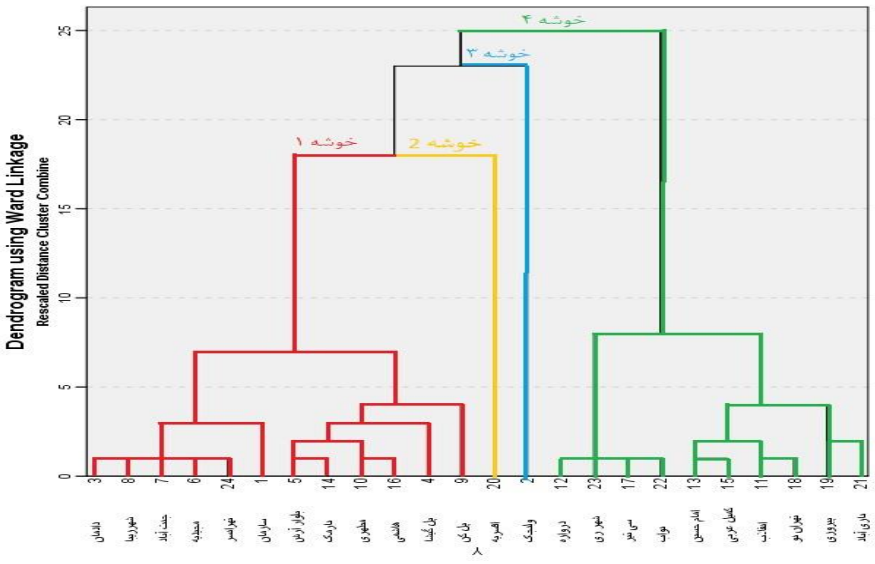
شکل ۱ . نقشه پهنه‌بندی تهران بر اساس الف: عامل طبیعی ب: عامل انسانی ج: ترکیبی از عامل‌های انسانی و طبیعی موثر در افزایش فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی کلانشهر تهران

بر اساس عامل‌های استخراج شده و با استفاده از روش خوشه‌بندی به روش ادغام وارد، ایستگاه‌های شهر تهران به چهار خوشه (شکل۲) به شرح زیر طبقه‌بندی شد.

گروه اول: سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، بلوار دادمان، پل‌گیشا، بلوار آرش، مجیدیه شمالی، جنت‌آباد، شهرزیبا، پل‌کن، مطهری، نارمک، هاشمی، تهرانسر. این ایستگاه‌ها در مناطق شمالی و غربی تهران قرار دارند. آلودگی غبار ریزشی به فلزات سنگین با منشأ انسانی در این

مناطق کمتر از سایر مناطق کلانشهر تهران بود. کوه‌های البرز در شمال شهر تهران باعث محدودیت استقرار کارخانه‌ها و صنایع در شمال این شهر شدند. این مسئله باعث تردد کمتر وسایل نقلیه‌ی سنگین و دیزلی می‌شود. لذا گرد و غباری که از سمت شمال وارد می‌شود، آلودگی کمتری به فلزات سنگین با منشا انسانی دارد. پایین‌تر بودن تراکم جمعیت و استفاده از خودروهای جدیدتر با آلایندگی کمتر در این مسئله نقش دارد. همچنین نمی‌توان از نقش فضای سبز در این مناطق چشم‌پوشی کرد. زیرا همبستگی منفی بین گردوغبار و پوشش گیاهی وجود دارد[۱]. مطالعات دیگر پژوهشگران نیز نشان داد، به علت غربی بودن بادهای غالب تهران و استقرار بخش مهمی از صنایع در غرب شهر، بیشتر آلودگی های صنایع از غرب به شرق رانده می شود[۶]. گروه دوم: ایستگاه افسریه در جنوب شرقی تهران، در منطقه‌ی ۱۵ شهرداری تهران قرار دارد. این ایستگاه بالاترین آلودگی غبار ریزشی به فلزات سنگین را در بین چهار گروه داشت. نقش عوامل انسانی در آلودگی غبار ریزشی این خوشه به فلزات سنگین از سایر خوشه‌ها بیشتر بود. ترافیک و حجم تردد، بخصوص تردد خودروهای سنگین و دیزلی در این منطقه بسیار بالاست. همچنین سکون هوا مانع خروج آلاینده‌ها می‌شود و باعث بالا رفتن غلظت فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی با منشا انسانی در این مناطق می‌شود. دهقانی و همکاران نیز منابع انسان‌زاد نظیر ساییدگی تایر و ترمز و وسایل نقلیه، سایش جاده و احتراق سوخت‌های فسیلی را در افزایش غلظت فلزات سنگین در گردوغبار تهران دخیل می‌دانند[۲۵]. گروه سوم: ایستگاه ولنجک، واقع در منطقه‌ی یک شهرداری تهران است. این ایستگاه در نزدیکی کوه توچال انتخاب شد. هر چند این ایستگاه به دلیل پایین بودن تراکم جمعیت، بالا بودن سرانه‌ی فضای سبز، عدم تردد وسایل نقلیه‌ی سنگین، نبود ترمینال اتوبوس‌رانی و دوری از مسیر رفت و آمد برون شهری، غلظت فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی با منشا انسانی در آن کم بود، ولی غلظت فلزات سنگین با منشا طبیعی در غبار ریزشی آن از سایر گروه‌ها بیشتر بود. احتمالا این فلزات از کوه توچال منشا می‌گیرد. تقوی و همکاران معتقدند ترافیک گسترده و استفاده از وسایل نقلیه موتوری، نیروگاه‌ها و صنایع در افزایش غلظت فلزات سنگین در گردوغبار تهران نقش دارد[۳۳]. گروه چهارم: ایستگاه‌های انقلاب، دروازه دولت، میدان امام-حسین، نواب، سی‌تیر، کمیل غربی، تهران‌نو، پیروزی، نازی‌آباد، شهرری، در این خوشه قرار گرفت. این ایستگاه‌ها در مناطق مرکزی، شرقی و جنوبی تهران قرار دارند. غلظت فلزات سنگین در غبار ریزشی آن زیاد بود. عوامل انسانی در آلودگی هوای این منطقه به فلزات سنگین نقش بیشتری نسبت به خوشه‌ی اول و سوم داشت. وجود جزیره‌ی حرارتی باعث می‌شود هوا از اطراف به سمت مرکز شهر کشیده شود. لذا هوای مرکز شهر پتانسیل آلودگی بالایی دارد[۷].

این منطقه‌ی شهر به خاطر مرکز شهر بودن حجم بالای تردد و تراکم جمعیت بالایی دارد. تراکم بالای جمعیت، حجم بالای ترافیک، وجود صنایع بسیار، بافت فرسوده، کم بودن فضای سبز در مناطق شرقی و جنوبی شهر بر این آلودگی‌ها افزوده است. وجود ترمینال‌های مسافربری در منطقه‌ی ۱۳(شرق) و ۱۶(جنوب) شهرداری تهران، تردد بالا و ترافیک گسترده را در پی دارد. وجود راه‌آهن تهران-تبریز، تهران-اهواز و بزرگراه آیت‌الله سعیدی در منطقه‌ی ۱۷(جنوب) باعث شده این منطقه تبدیل به پرتراکم‌ترین منطقه‌ی تهران شود، و با حجم بالای ترافیک و تردد خودروهای سنگین و دیزلی مواجه باشد. محدوده ی رودخانه کن درمنطقه‌ی ۱۸ (جنوب) محل برداشت شن و ماسه است. وجود کارخانه‌ی آسفالت و همچنین وجود کانون زباله سوزی تهران در این منطقه بر افزایش غلظت فلزات سنگین موجود در غبار ریزشی افزوده است. بافت قدیمی منطقه ۱۹ و احاطه شدن توسط اتوبان‌های جوانه، آزادگان، نواب و آیت الله سعیدی، وجود صنایع بسیار در منطقه‌ی ۲۰ از جمله پالایشگاه تهران، کارخانه‌ی سیمان شهر ری و عدم وجود جنگل طبیعی در این مناطق مزید بر علت شده است.



شکل۲. دندوگرام تجزیه و تحلیل خوشه‌ای در محدوده کلانشهر تهران بر اساس عامل‌های استخراج شده

نتیجه‌گیری

عناصر سنگین موجود در گردوغبار جز مهمی از آلودگی‌های محیط زیست شهری هستند. امروزه تاثیرات زیان بار این عناصر سنگین بر سلامتی انسان از جهات مختلف به اثبات رسیده است. با توجه به جمعیت میلیونی کلانشهر تهران، نتایج این تحقیق جهت تدوین رویکرد مدیریت مخاطرات برای ایجاد محیط زیست سالم‌تر اهمیت بسیار دارد. نتایج مطالعه‌ی حاضر وجود سه عامل طبیعی، انسانی و ترکیبی از عامل‌های طبیعی و انسانی را در افزایش غلظت فلزات سنگین در غبار ریزشی کلانشهر تهران تأیید کرد. عوامل طبیعی در شمال تهران، عوامل انسانی در شرق تهران و ترکیبی از عامل‌های طبیعی و انسانی در جنوب تهران در آلودگی غبار ریزشی به فلزات سنگین نقش بیشتری داشت. همچنین آلودگی غبار ریزشی به فلزات سنگین با منشأ انسانی در مناطق شمالی و غربی تهران، کمتر از سایر مناطق و در جنوب شرقی تهران بیشتر از سایر مناطق است. تراکم جمعیت، ترافیک و حجم تردد، بخصوص تردد خودروهای سنگین و دیزلی، صنایع و معادن، الگوی توپوگرافی، الگوی پوشش گیاهی، الگوی باد غالب و وضعیت پایداری هوا در غلظت عناصر سنگین موجود در غبار ریزشی تهران نقش دارد. با توجه به نتایج این مطالعه گسترش و بهینه‌سازی حمل و نقل عمومی و گسترش فرهنگ استفاده از آن (بخصوص مترو) برای کاهش ورود آلاینده‌ها به اتمسفر، مخصوصاً در نیمه‌ی شرقی تهران که بخاطر شکل توپوگرافی شهر و الگوی باد، غلظت عناصر سنگین بیشتری دارد، ضرورت دارد. همچنین ایجاد پوشش گیاهی بیشتر و مرتفع‌تر در مناطق حاشیه غربی و جنوبی شهر تهران برای فیلتر بادهایی که با خود گرد و غبار را از مناطق اطراف وارد شهر تهران می‌کنند، پیشنهاد می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت معنوی گروه جغرافیای دانشگاه خوارزمی تهیه شده ، که از آنها تشکر می شود.

منابع

[۱]. ارسلانی، فاطمه (۱۳۹۸). «آنالیز غبار ریزشی شهر تهران و بررسی منشأ آن»، رساله دکتری مخاطرات آب و هوا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

[۲]. بازگیر،سعید؛ قدیری معصوم، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ سیدی سرنجیانه، شیوا (۱۳۹۴).« تحلیل رابطه آلودگی هوای تهران با ترافیک و شرایط جو برای کاهش مخاطرات»، دانش مخاطرات، دوره ۲، شماره ۱، ص ۴۹-۳۵.

[۳]. ثنایی، مریم؛ خانمحمدی، مجید؛ محمدی، حسین(۱۳۹۴). «تحلیل اثر سینوپتیکی رخداد مخاطره‌آمیز موج گرمای تابستان ۱۳۹۲ و فوت ناشی از آلودگی شهر تهران»، دانش مخاطرات، دوره ۲، شماره ۱، ص ۸۳-۶۷.

[۴]. حسینی‌نژاد، فریناز؛ بهبهانی‌نیا، آزیتا؛ و منصوری، نبی‌اله (۱۳۹۸). «تعیین غلظت فلزات سنگین(وانادیوم، سرب، نیکل، کادمیوم) در گردوغبار و مقایسه با شاخص آلودگی و زمین-انباشت(مطالعه موردی: مرکز شهر تهران»، مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۴، شماره ۴، ص ۱۹۴۳-۱۹۴۸.

[۵]. رضایی، محمد؛ احمدی، امینه؛ و باقری، مهدی (۱۳۹۹). «شناسایی مولفه های مدارس هوشمند بر اساس رویکرد سازنده گرایی »، توسعه ی آموزش جندی شاپور، دوره ۱۱، ص ۱۱۵-۱۲۷.

[۶]. سامانی، مریم؛ گلچین، احمد؛ علیخانی، حسینعلی؛ بایبوردی، احمد (۱۳۹۹).«ارزیابی خطر سلامت سرب در گردوغبارهای اتمسفری شهر تهران در فصل‌های مختلف»، مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، دوره ۱۸، شماره۳، ص ۳۰۶-۲۸۹.

[۷]. صفوی، سید یحیی؛ و علیجانی، بهلول (۱۳۸۵).« بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران»، *پژوهش‌های جغرافیایی*، دورهٔ ۳۸، شمارهٔ ۵۸، ص ۱۱۲-۹۹.

[۸]. علیجانی، بهلول (۱۳۸۱). *اقلیم شناسی سینوپتیک*، انتشارات سمت.

[۹]. علیجانی، بهلول (۱۳۹۴).«تحلیل فضایی»،تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۲، شماره ۳، ص ۱۴-۱.

[۱۰]. علی طالشی، محمدصالح؛ معین الدین، مظاهر؛ فیض‌نیا، سادات؛ و اسکوئیزاتو، استفانیا (۱۳۹۸).« آلودگی فلزات سنگین در ذرات غبار خیابانی شهر تهران در سال ۱۳۹۷: ارزیابی غنای فلزی و درجه آلودگی»، مجله مهندسی بهداشت محیط، سال ۷، شماره ۲، ص ۱۹۴-۱۷۹.

[۱۱]. کرمانی، آذر؛ اکبری، مهری؛ علیجانی، بهلول، مفاخری، امید(۱۳۹۴). «تحلیل آماری-همدیدی غلظت آلاینده مونواکسیدکربن براساس سمت و سرعت باد و مخاطره آن در شهر تهران»، دانش مخاطرات، دوره۲، شماره ۴، ص۴۵۰-۴۳۹.

[۱۲]. مرکز آمار ایران (۱۳۹۵). گزیده نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن.

[۱۳]. مسعودیان، ابوالفضل (۱۳۸۸). «نواحی بارشی ایران»، *جغرافیا و توسعه*، دورهٔ ۷، شمارهٔ ۱۳، ص ۷۹-۹۱.

[14]. Aguilera, A.; Armendariz, C.; Quintana, P.; Garcia-Oliva.; Bautista, F.; (2019). "Influence of land use and road type on the elemental composition of urban dust in a Mexican metropolitan area", Polish Journal of Environmental Studies, V. *28*(3): 1535–1547. DOI: 10.15244/pjoes/90358

[15]. Ali, H.; Khan, E.; & Ilah, I.; (2019) . Contamination Evaluation and Source Identification of Heavy Metals in the Sediments from the Lishui River Watershed, Southern China Journal of Chemistry ;4:1-14. DOI:10.1155/2019/6730305

[16]. Al-Khashman, O. A. (2007). "The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba city, Jordan", *Environmental Geochemistry Health*, V. 29, pp: 197–207. DOI 10.1007/s10653-006-9065-x

[17]. Alloway, B.J; (1995). "Soil Pollution and Land Contamination, in Pollution causes, Effects and Controlled", R. M, Harrison. Cambridge: The Royal Society of Chemistry (1995), pp.318.

[18]. Azimzadeh, H.R.; Fallahzadeh, R.A.; Ghaneian, M.T.; Almodaresi, S.A.; Eslami, H.; & Taghavi, M. (2017). "Investigation of chemical characteristics and spatiotemporal quantitative changes of dust fall using GIS and RS technologies; a case study, Yazd city, central plateau of Iran", *Environmental Health Engineering and Management Journal*, V. 4, pp: 45–53**.** doi 10.15171/EHEM.2017.07.

[19]. Baghaie, A.H.; & Ahmadi, A. (2019). "Assessment of Pb, Cd, and Zn in Isfahan's air dust during 2015-2017 (A case study: North, West, and East Stations of Isfahan)", *Advances in Environmental Health Research*, V. 7, pp:18-24. DOI: 10.22102/JAEHR.2019.151151.1106

[20]. Barbalace, K. (2007). "Periodic Table of Elements", Environmental Chemistry.com. Retrieved 2007-04-14

[21]. Berivan, H. M. (2021). "Measurement of Fall Rate and Analysis of Atmospheric Falling Dust in Duhok Governorate of Iraq by Using Atomic Absorption Spectrometry and X-ray Diffraction", Journal of Physics: Conference Series; 2nd Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS) 2020. doi:10.1088/1742-6596/1829/1/012001.

[22]. Budai, P.; Clement, A.; (2018). "Spatial distribution patterns of four traffic-emitted heavy metals in urban road dust and the resuspension of brake-emitted particles: findings of a field study". Transportation Research Part D: Transport and Environment. V. 62, pp: 179–185. https://doi.org/10.1016/j. trd.2018.02.014

[23]. Chirenje, T.; MA, L. Q.; Chen, M.; & Zillioux, E. (2003). "Comparison between background concentrations of arsenic in urban and non-urban areas of Florida", *Advances in Environmental Research*, V.8, pp:137-146. DOI:10.1016/S1093-0191(02)00138-7

[24]. Csavina, J.; Field, J.; Taylor, M. P.; Gao, S.; Landazuri, A.; Betterton, E.A.; & Saez, A.E. (2012). "A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations", *Science of the Total Environment*. V. 433, pp: 58–73. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013

[25]. Dehghani, S.; Moore, F.; Keshavarzi, B.; & Beverley, A.H. (2017). "Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, V.136, pp:92-103.

[26]. Duong, T.T.; & Lee, B.K. (2011). "Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics", *Environmental Management*, V. 92, pp: 554-562. doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.010

[27]. Goossen, D.; & Offer, Z. (2000). "Wind tunnel and field calibrathon of six eolian dust samplers", *Atmospheric Environemt*, V. 34, pp: 1043-1057. doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00376-3

[28]. Hu, X.; Zhang, Y.; Lou, J ; Wang, T. ; Lian, H. ; & Ding, Z.(2011). "Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China", *Environmental Pollution*, V.159(5), pp.1215-122.

[29]. Jia, Q.; & Hung, Y. (2008). "Coarse dust around mining areas-A study of available dust collectors and their efficiency", Lulea University of Technology, department of Civil and Environmental Engineering, Division of soil Mechanics and Foundation Engineering.

[30]. Jiries, A. (2003). "Vehicular Contamination of Dust in Amman, Jordan*",* The Environmentalist, V. 23, pp: 205-210. doi.org/10.1023/B:ENVR.0000017390.93161.99

[31]. Kumari, Sh.; Jain, M.K .; S. P, Elumalai, S.P.; (2021). "Assessment of Pollution and Health Risks of Heavy Metals in Particulate Matter and Road Dust Along the Road Network of Dhanbad, India", Health and Pollution , V. 11(29), pp: 4-12. doi: 10.5696/2156-9614-11.29.210305

[32]. Sutherland, R.A. (2000). "Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii"., *Environmental Geology*, V.39, pp: 611–627.

[33]. Taghavi,S.N., Kamani ,H., Dehghani,M.H., Nabizadeh,R., Afshari, N., Mahvi, A.H. (2019). "Assessment of HeavyMetals in Street Dusts of Tehran Using Enrichment Factor and Geo-Accumulation Index", *Health Scope*, V. 8, pp:1-10.

[34]. Tamrakar, C.S .; & Shakya, P.R.; (2011). "Assessment of Heavy Metals in Street Dust in Kathmandu Metropolitan City and their Possible Impacts on the Environment", *Analytical and Environmental Chemistry*, V. 12, pp: 32-41.

[35]. Tan, B**.;** Wang, H**.;** Wang, X**.;** Ma, C**.;** Jing Zhou, J**.;** & Dai, X.; (2021). **"**Health Risks and Source Analysis of Heavy Metal Pollution from Dust in Tianshui, China**",**Mineral, V.11(5), pp: 1-19. DOI:10.3390/min11050502

[36]. Yang, Sh. ; Liu, J. ; Bi, X. ; Ning, Y. ; Qiao, Sh.; Q, Yu, Q.; & Zhang, J.; (2020). "Risks related to heavy metal pollution in urban construction dust fall of fast-developing Chinese cities", Ecotoxicology and Environmental Safety, V. 197(40), pp: 1-14. DOI:10.1016/j.ecoenv.2020.110628

[37]. Yongming, H.; Peixuana, D.; Junjib, C. E.; & Posmentier, S. (2006). "Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China", *Science of the Total Environment*, V. 355, pp: 176– 186.