

## تغییرات فصلی و مکانی پذیرفتاری مغناطیسی گردوغبار خیابانی در چند شهرستان اصفهان و ارتباط آن‌ها با غلظت برخی فلزات سنگین

بهروز اکبری و حسین خادمی<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۴)

### چکیده

گردوغبار خیابانی ذراتی کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر است که وارد محیط‌های شهری می‌شود. ویژگی‌های مغناطیسی این ذرات و ارتباط آن‌ها با غلظت فلزات سنگین، کمتر مورد توجه پژوهشگران در ایران قرار گرفته است. اهداف این مطالعه شامل بررسی تغییرات مکانی و فصلی پذیرفتاری مغناطیسی و همچنین تعیین ارتباط آن با غلظت فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی در چند شهرستان اصفهان است. نمونه‌برداری در نیمه اول ماه دوم هر فصل، به تعداد ۲۰ نمونه از شهر اصفهان و ۱۰ نمونه از هر یک از ۵ شهر دیگر استان انجام شد. اندازه‌گیری غلظت برخی عناصر سنگین با استفاده از دستگاه جذب اتمی و همچنین اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای مغناطیسی روی نمونه‌های گردوغبار خیابانی انجام شد. نتایج نشان داد، زیاد بودن مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در شهر نطنز می‌تواند به دلیل مواد مادری حاوی کانی‌های فرومیزیم و در سایر شهرها به خصوص اصفهان، فعالیت‌های انسانی باشد. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، همبستگی زیاد مؤلفه اول با پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت عناصر روی، مس و کروم و همبستگی زیاد مؤلفه دوم با پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس و غلظت عناصر نیکل و کبالت را نشان داد که می‌تواند به احتمال زیاد، نشان دهنده وابستگی و جذب این عناصر به ذرات نزدیک به فوق‌پارامغناطیس و به ذرات درشت چند وجهی باشد. وجود همبستگی‌های زیاد میان پارامترهای مغناطیسی با غلظت عناصر مس و روی و همبستگی‌های کم یا منفی غلظت عناصر سرب، نیکل، کروم و کبالت با پذیرفتاری مغناطیسی به ترتیب منشأ انسان‌زاد و طبیعی آن‌ها را تایید کرد. مقدار بزرگتر پارامترهای مغناطیسی گردوغبار خیابانی در فصل بهار، منعکس‌کننده غلظت چشمگیر کانی‌های مغناطیسی در این فصل در مقایسه با فصل‌های پاییز و زمستان و افزایش سهم فعالیت‌های انسانی است.

واژه‌های کلیدی: محیط‌زیست شهری، آلودگی اتمسفری، منابع انسان‌زاد، منابع طبیعی، آلاینده‌های فلزات سنگین

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khademi@cc.iut.ac.ir

## مقدمه

گردوغبار خیابانی محصول برهمکنش ذرات معلق، مواد مایع و گازی شکل موجود در اتمسفر است که از منابع مختلف منشأ می‌گیرد. منابع طبیعی گردوغبار خیابانی به‌طور عمده شامل رسوب‌گذاری خشک و مرطوب از جو، تعلیق مجدد آن‌ها و محصولات هوازدگی خاک‌ها است. از طرف دیگر، فعالیت‌های انسانی مختلف به‌ویژه آلودگی‌های صنعتی و ترافیکی و ساخت‌وساز شهری نیز منجر به تولید گردوغبار خیابانی می‌شوند (۴۲). به‌طور کلی، ذرات خاک با اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرومتر در گردوغبار خیابان‌ها، خطرات زیست‌محیطی و خطرات بهداشتی جدی‌تری نسبت به ذرات خاک با اندازه بزرگتر دارند. گردوغبار یا ذرات خاک با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر حاوی آلاینده‌های مضر بیشتری هستند. بیشترین نگرانی از حضور آلاینده‌ها در گردوغبار خیابانی، حضور فلزات سنگین، به دلیل غلظت زیاد، ظرفیت غنی‌سازی بیولوژیکی و اثرات سمی آن‌ها بر روی موجودات زنده است (۱)؛ بنابراین، فلزات سنگینی که با گردوغبار خیابانی همراه هستند، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و به‌طور خاص برای سلامت انسان، به‌ویژه کودکان هستند (۴۳).

مطالعه‌های انجام‌شده روی گردوغبار خیابانی و فلزات سنگین به روش‌های گوناگونی انجام شده است و نتایج به‌دست آمده با معیارها و روش‌های متعددی مورد تحلیل قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها، استفاده از خواص مغناطیسی نمونه‌های گردوغبار است. فراوانی آلاینده‌های مغناطیسی ارتباط مستقیمی با پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهری دارد. همچنین آلاینده‌های مغناطیسی در گردوغبار خیابان‌های شهری می‌توانند از عوامل مختلف انسانی منشأ بگیرند و انتشارات حاصل از وسایل نقلیه، می‌تواند علت اصلی ایجاد این آلاینده‌ها باشد (۳۱).

پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic Susceptibility) به‌طور گسترده به‌عنوان معیار غلظت کانی‌های (فری) مغناطیسی در خاک، رسوبات و گردوغبار استفاده می‌شود. در خاک، این

کانی‌ها منشأ مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان آلودگی‌های اتمسفری، سنگ‌های مادری یا ذرات خاکساز را نام برد. فعالیت‌های انسانی باعث تغییرات متفاوتی در محتوای کانی‌های مغناطیسی و همچنین توزیع مکانی و عمقی آن‌ها در نیم‌رخ خاک می‌شود. از خصوصیت کانی‌های مغناطیسی، میل به جذب سایر عناصر موجود در خاک است که از جمله این عناصر می‌توان به فلزات سنگین اشاره کرد (۴۰). رفتارهای مغناطیسی در اجسام به پنج دسته تقسیم می‌شوند که برحسب میزان پذیرفتاری مغناطیسی و به ترتیب نزولی شامل فرومغناطیس (Ferromagnetism) (مانند آهن خالص با بیشینه میزان پذیرفتاری مغناطیسی)، فری مغناطیس (Ferrimagnetism) (مانند مگنتیت و ماگهمیت)، آنتی فرومغناطیس (Antiferromagnetism) (مانند هماتیت و گنوتیت)، پارامغناطیس (Paramagnetism) (مانند بیوتیت و پیریت) و دیامغناطیس (Diamagnetism) (مانند کوارتز، آهک، گچ و ماده آلی) هستند (۲).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند، بین ذرات مغناطیسی انسان‌زاد و فلزات سنگین ارتباط معنی‌داری وجود دارد که امکان استفاده از پارامترهای مغناطیسی وابسته به غلظت، به‌ویژه پذیرفتاری مغناطیسی و مغناطش اشباعی (Saturation Magnetization) را به‌عنوان عوامل مؤثر در ارزیابی سطح آلودگی ذرات معلق در هوا و توزیع زمانی و مکانی آن‌ها فراهم می‌کند (۷ و ۴۴). اکسیدهای آهن فری مغناطیس (مگنتیت و مگهمیت) که حاصل هر دو منبع طبیعی و انسان‌زاد در محیط‌های شهری هستند، می‌توانند بر روی خواص مغناطیسی ذرات گردوغبار خیابانی تأثیرات زیادی بگذارند. چندین پژوهشگر ثابت کرده‌اند، فعالیت‌های انسانی و آلودگی حاصل این فعالیت‌ها (مانند تعلیق مجدد خاک، احتراق سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های صنعتی، ترافیک وسایل نقلیه، سایش لاستیک‌ها و فعالیت‌های ساخت‌وساز و تخریب) می‌توانند مقادیر چشمگیری از فلزات سنگین و کانی‌های مغناطیسی را تولید کنند (۴۳).

توسط باران در تابستان تأثیر مستقیم بیشتری روی غلظت عناصر نسبت به زمستان در گردوغبار سطحی داشته باشد؛ بنابراین غلظت عناصر سنگین در زمستان و تابستان بسیار متفاوت است. با تغییر فصل‌ها، شیوه‌های زندگی و تولیدات انسان‌زاد بسیار تغییر کرده است که این موارد می‌توانند از دلایل مهم تغییرات فصلی در مقادیر و خصوصیات عناصر سنگین در گردوغبار خیابان‌های شهری باشد (۱۵).

بررسی‌های انجام شده روی گردوغبار خیابان‌های سئول کره جنوبی براساس داده‌های ترمومغناطیسی (Thermomagnetic) و میکروسکوپ الکترونی، اغلب اکسیدهای آهن حاوی کربن که حاصل احتراق سوخت‌های فسیلی هستند را نشان داد و اعلام شد، این فرایند نشان‌دهنده حضور غلظت بیشتری از ذرات انسان‌زاد است. در این مطالعه بررسی‌های مکانی و فصلی نشان داد، ذرات مغناطیسی بیشتری مقدار را در مناطق صنعتی و کمترین مقدار را در پارک‌ها و بیشترین مقادیر را در زمستان و کمترین آن را در تابستان دارند. این پژوهشگران تأکید کردند، صنایع در جنوب غربی سئول منبع اصلی آلودگی هستند و علاوه بر این، وزش بادهای غالب غربی به احتمال آلوده‌ها را به مناطق پایین‌تر توپوگرافی در سئول منتقل می‌کند (۲۵).

رفتار مغناطیسی بلورهای فوق پارامغناطیس (SP) (Superparamagnetic) که کوچکتر از  $0.3 \mu\text{m}$  میکرومتر هستند، در طول زمان به سرعت تغییر می‌کند. هنگامی که این ذرات در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و این میدان مغناطیسی حذف می‌شود، مغناطیس القایی دریافت شده را در مدت‌زمان بسیار کوتاهی (حدود  $1/10000$  ثانیه) از دست می‌دهند. دلیل این حالت وجود انرژی حرارتی طبیعی به اندازه کافی قوی در بلورهای بسیار ریز است که بر انرژی ناشی از میدان مغناطیسی غلبه می‌کند. ذرات فری مغناطیسی به مناطق یا سلول‌های مغناطیسی مختلفی تقسیم می‌شوند که به نام دامنه‌ها (Domains) شناخته می‌شوند. در ذرات کوچک کمتر از  $0.2 \mu\text{m}$  میکرومتر، حجم محدود اجازه می‌دهد تنها یک دامنه تشکیل شود که به این ذرات، ذرات تک دامنه (SD) (Single Domain) می‌گویند (۹).

اندازه‌گیری خواص مغناطیسی سریع، ارزان و به‌طور معمول غیرمخرب هستند (۱۴) و مطالعه‌های متعددی همبستگی چشمگیری را بین پارامترهای مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های مختلف محیطی (۴۳)، مانند گردوغبار خیابانی (۲۴)، ۳۱ و ۴۱)، خاک (۸، ۲۱، ۲۷، ۳۸ و ۳۹)، رسوبات (۲۲ و ۲۹)، برگ درختان (۶)، ذرات معلق اتمسفری (۳۳ و ۳۵) و محیط‌های دریایی (۱۹) نشان داده‌اند. گردوغبار خیابانی اغلب به یک حامل برای آلاینده‌های صنعتی و تولید شده توسط وسایل نقلیه تبدیل شده است و به‌طور معمول در مناطق شهری، هم فلزات سنگین سمی (مانند سرب) و هم کانی‌های مغناطیسی در ذرات گردوغبار خیابانی حضور فعال دارند (۴۱). علاوه بر این، چندین مطالعه نشان می‌دهد که فلزات سنگین در رسوبات گرد و غباری شهرها می‌توانند دارای خواص مغناطیسی متمایز باشند (۵).

فلزات سنگین تولیدشده توسط منابع انسان‌زاد به دلیل حضور فراوان آهن در مواد طبیعی و انسان‌زاد، اغلب با ذرات فرومغناطیس همراه هستند. در همین حال، ذرات مغناطیسی می‌توانند فلزات سنگین را جذب سطحی کرده و/یا در ساختار کریستالی خود تثبیت کنند (۱۴). همچنین مطالعه‌های مشابه در شهر پکن نشان داد، ذرات گردوغبار شهری منشأ پیچیده‌ای دارند (۴۵). همچنین پژوهشگران در مطالعه‌ای دیگر، بیشترین مقادیر عناصر سنگین و پذیرفتاری مغناطیسی را در بخش مرکزی شهر هانگژو چین دیدند و اعلام کردند، با افزایش فاصله از شهر از غلظت آن‌ها کاسته می‌شود (۲۸). پژوهشگران با بررسی آلودگی عناصر سنگین و ارتباط آن‌ها با پذیرفتاری مغناطیسی در گردوغبار خیابانی شهر لانگژو چین نشان دادند، بیشترین ارتباط بین پذیرفتاری مغناطیسی و عناصر مس، منگنز، نیکل، سرب، روی و آهن وجود دارد (۴۱).

مطالعه پژوهشگران روی عناصر سنگین در گردوغبارهای خیابانی و رسوبات رودخانه‌ای حوزه رودخانه دونگلو واقع در جی‌نان چین نشان داد، مقادیر غلظت جیوه و آرسنیک در تابستان و زمستان از مقادیر پس‌زمینه کمتر است. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد، ممکن است شستشو و فرسایش

بهار، تابستان، پاییز و زمستان سال ۱۳۹۸ به تعداد ۲۰ نمونه در هر فصل برای شهر اصفهان و ۱۰ نمونه در هر فصل برای هر یک از شهرهای خمینی شهر، شهرضا، نجف‌آباد، فلاورجان و نطنز شامل ۷۰ نمونه در هر فصل و در مجموع ۲۸۰ نمونه برداشت شد. محل‌های نمونه‌برداری برای هر شهر در شکل ۱ نشان داده شده است. وزن تقریبی هر نمونه حدود ۳۰۰ گرم بود و نحوه‌ی برداشت به این صورت بود که گردوغبار ته‌نشست‌شده در کف پیاده‌روهای سطح شهر در محل هر نمونه با استفاده از جاروی کوچک مخصوص و تمیز پلاستیکی برداشت و به درون پاکت‌های پلاستیکی تمیز از جنس پلی‌اتیلن منتقل شد. نمونه‌ها بعد از عبور از الک ۲ میلی‌متری در قوطی‌های کوچک بسته‌بندی شده و برای تجزیه به آزمایشگاه منتقل شدند.

میزان پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های گردوغبار خیابانی بعد از انتقال به ظروف پلاستیکی مخصوص، توسط حسگر MS2B در دو فرکانس متفاوت شامل پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس پایین ( $\chi_{fd}$ ) (Low Frequency) و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا ( $\chi_{fd}$ ) (High Frequency) اندازه‌گیری شد. به‌علاوه میزان پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (۱۳ و ۳۰):

$$\chi_{fd} \% = ((\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}) \times 100 \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین، ۵/۰ گرم از هر نمونه وزن شده و در یک بوتله چینی ۵۰ میلی‌لیتری قرار داده شد و بعد از هضم ۲۴ ساعته با اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ ) ۶ نرمال در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ دقیقه گرم شد، سپس بعد از سرد شدن نمونه‌ها از صافی عبور داده شد و عصاره مربوطه برای اندازه‌گیری دستگاهی آماده شد. میزان عناصر سنگین (Zn, Pb, Ni, Co, Cr, Cu) موجود در عصاره حاصله با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrometry) اندازه‌گیری شد (۲۰ و ۲۳).

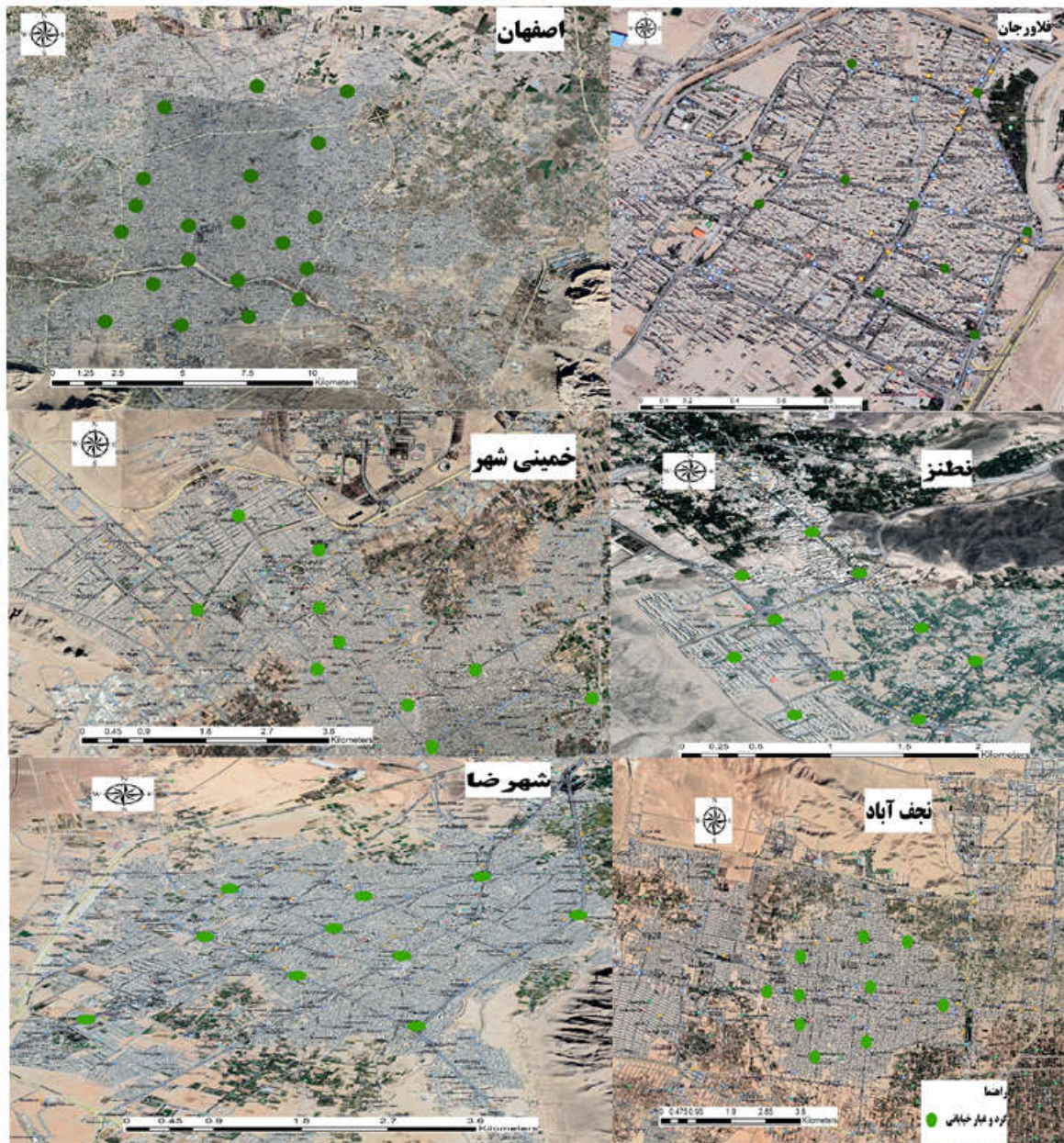
تفسیر نتایج پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول،  $\chi_{fd}$  کم‌عدم وجود ذرات SP،  $\chi_{fd}$  متوسط و زیاد آن نمایانگر وجود ذرات SP و  $\chi_{fd}$

بلورهای SP نزدیک به مرز با ذرات تک دامنه پایدار (SSD) (Stable SD) در اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس کم (۴۶/۰ کیلوهرتز) به‌طور کامل به مقادیر پذیرفتاری کمک می‌کنند، درحالی‌که این ذرات در اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد (۴/۶ کیلوهرتز) تأثیری ندارند. پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد باعث تغییر مرز دامنه بین بلورهای SP و SSD به‌اندازه بلورهای کوچکتر می‌شود؛ بنابراین کریستال‌های SP نزدیک به مرز رفتاری مانند ذرات SSD ولی با مقدار پذیرفتاری کمتر نشان خواهند داد. تفاوت در مقادیر دو اندازه‌گیری در فرکانس‌های مختلف که با پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) (Frequency dependent magnetic susceptibility) نشان داده می‌شود (۹). درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ )، یک ابزار تشخیصی برای دانستن نسبت ذرات فوق پارامغناطیس در رسوبات است (۳۴). توضیحات کامل‌تر در ارتباط با محاسبه پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس و انواع روش‌های آن در سایر مطالعات به تفصیل بیان شده است (۱۳، ۲۶ و ۳۴).

در مطالعه‌های سال‌های اخیر از پذیرفتاری مغناطیسی برای پیش‌بینی میزان آلودگی خاک‌ها (۱۱ و ۱۲) و گردوغبار اتمسفری (۳۰ و ۳۲) استفاده شده است، ولی ارتباط میزان پذیرفتاری مغناطیسی و سطح آلودگی فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی که می‌تواند به منشأیابی عناصر سنگین کمک فراوانی کند (۱۷)، بررسی نشده است؛ بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی تغییرات مکانی و فصلی پذیرفتاری مغناطیسی گردوغبار خیابانی شهرهای اصفهان، فلاورجان، نجف‌آباد، خمینی شهر، شهرضا و نطنز و همچنین بررسی میزان ارتباط بین پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت برخی از فلزات سنگین در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهرهای یادشده است.

## مواد و روش‌ها

نمونه‌های گردوغبار خیابانی در نیمه اول و ماه دوم فصل‌های



شکل ۱. محل نمونه برداری گردوغبار خیابانی در شهرهای مورد مطالعه

جدول ۱. تفسیر مقادیر پذیرفتاری وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) (۱۳)

سطوح	مقادیر	تفسیر نتایج پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس
کم $\chi_{fd}$ %	$< 2/0$	تقریباً فاقد ذرات SP (کمتر از ۱۰٪)
متوسط $\chi_{fd}$ %	$2/0 - 10/0$	مخلوطی از ذرات SP و ذرات درشت غیر SP یا ذرات SP کوچکتر از ۰/۰۰۵ میکرومتر
زیاد $\chi_{fd}$ %	$10/0 - 14/0$	تقریباً درصد ذرات SP بسیار زیاد (بیش از ۷۵٪)
خیلی زیاد $\chi_{fd}$ %	$> 14/0$	مقادیر نادر، اندازه گیری اشتباه، وجود ناهمسان گردی، نمونه برداری اشتباه یا دارای آلودگی

SP: بلورهای فوق پارامغناطیسی

چندوجهی درشت (MD) به جای ذرات فوق پارامغناطیسی (SP) است (۱۳ و ۳۴).

مطالعه روی خصوصیات مغناطیسی، ژئوشیمیایی و گرانولومتری (Magnetic, Geochemical and Granulometric Properties) گردوغبار خیابانی شهر ورشو (لهستان) نشان داد، مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی به انتشارات حاصل از خودروها ارتباط دارد. همچنین مقادیر کم پذیرفتاری مغناطیسی به کاهش تردد اتومبیل‌ها و همچنین وجود درختان در کنار جاده‌ها ارتباط داده شده است که جابه‌جایی ذرات و رسوب آن‌ها را در مسیره‌های پارک اتومبیل‌ها محدود کرده است (۱۶). مطالعه دیگری نشان داد، سهم پارامترهای مغناطیسی در مشخص کردن انسان‌زاد بودن آلاینده‌های فلزی به‌خصوص فلزات سنگین چشمگیر است. نتایج این مطالعه شدت تغییرات فصلی را در فصل تابستان برای پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس کم نسبت به فصول دیگر، بیشتر نشان داد. علاوه بر این، تغییرات در پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس کم مکان‌های شهری و صنعتی بارزتر بود (۸).

### همبستگی اسپیرمن پارامترهای مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین در شهرهای مورد مطالعه

در جدول ۳ ماتریس همبستگی اسپیرمن بین ویژگی‌های مورد بررسی نشان داد، برای نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر اصفهان موارد زیر همبستگی معنی‌داری را نشان می‌دهند:  $\chi_{1f}$  و  $\chi_{fd}$  با مس، روی و سرب و  $\chi_{fd}$  با سرب و کبالت دارای روابط مثبت؛ و  $\chi_{fd}$  با سرب، روی و کروم دارای روابط منفی هستند. برای نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر فلاورجان روابط معنی‌دار همبستگی به‌صورت زیر است: ارتباط مثبت مابین  $\chi_{1f}$  با مس، روی و نیکل،  $\chi_{hf}$  با مس، روی و نیکل و  $\chi_{fd}$  با کبالت و کروم و ارتباط منفی  $\chi_{1f}$  و  $\chi_{hf}$  با کبالت و کروم و  $\chi_{fd}$  با سرب، مس و نیکل.

برای نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر خمینی‌شهر روابط معنی‌دار همبستگی نشان داد، ارتباطی مثبت میان مس، روی و نیکل با  $\chi_{1f}$ ،  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{fd}$ ؛  $\chi_{fd}$  با سرب و کبالت وجود

بسیار زیاد نمایانگر خطای آزمایش، نمونه‌برداری اشتباه یا مقادیر نادر است (۱۳). تجزیه و تحلیل‌های روابط میان پذیرفتاری مغناطیسی با فلزات سنگین به دو روش همبستگی اسپیرمن و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis, PCA) با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R انجام شد.

## نتایج و بحث

### تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات مغناطیسی در گردوغبار خیابانی

نتایج غلظت عناصر سنگین و مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در گردوغبار خیابانی شهرهای مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. بر اساس این جدول به نظر می‌رسد، زیادبودن میزان پذیرفتاری مغناطیسی در گردوغبار خیابانی شهر نطنز به دلیل وجود کانی‌های فرومنیزیم موجود در سازندهای زمین‌شناسی غالب این منطقه بوده است که از نوع آذرین هستند (۱۰). این موضوع در مطالعه روی خاک‌های اطراف اصفهان (۱۲) و همچنین مطالعه روی گردوغبار اتمسفری نیز گزارش شده است (۳۰). در مقابل، مطالعه وجود مقادیر به نسبت زیاد پذیرفتاری مغناطیسی در گردوغبار خیابانی شهرهای دیگر (غیر از نطنز) می‌تواند اثرات فعالیت‌های انسان‌زاد باشد. این موضوع در مطالعه شهر هانگژو چین نشان داد، بیشترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی بخش مرکزی شهر دیده شده است و با افزایش فاصله از شهر از غلظت آن‌ها کاسته می‌شود (۲۸).

مقادیر محاسبه شده برای پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) نمونه‌های گردوغبار خیابانی در تمامی فصول و در تمام شهرها زیر ۲ درصد است (جدول ۲) که نشان می‌دهد، سهم ذرات فوق پارامغناطیس در بخش مغناطیسی کلی این نمونه‌ها بسیار کم است. باتوجه به جدول ۱، نمونه‌های گردوغبار خیابانی در بخش  $\chi_{fd}$  کم قرار گرفته است که بیانگر عدم وجود ذرات فوق پارامغناطیس است. مقدار کم پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نشان می‌دهد، خواص مغناطیسی نمونه‌های گردوغبار خیابانی بیشتر تحت تأثیر ذرات

جدول ۲. آمار توصیفی ویژگی‌های مورد بررسی در گردوغبار خیابانی شهرهای مختلف

پذیرفتاری مغناطیسی			عناصر سنگین						مشخصه‌ها	شهرها	
$\chi_{fd}$ (%)	$\chi_{hf}$	$\chi_{lf}$ (*10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /kg)	Cr	Co	Ni	Pb	Zn	Cu (mg/kg)	شاخصه‌های آماری		
۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	تعداد	اصفهان	
۰/۹	۳۹۲	۳۹۵/۲	۲۲/۴	۱۷/۹	۴۴/۸	۱۹۳/۷	۲۴۰/۱	۳۲۸/۵	میانگین		
۳۶/۱	۵۰/۳	۵۰/۱	۷۰/۳	۱۵/۵	۲۳	۷۶	۶۰/۴	۲۲۵/۶	ضریب تغییرات (%)		
۰/۸	۳۲۷	۳۳۱/۲	۲۲/۱	۱۷/۵	۴۴/۶	۱۳۶/۴	۲۰۱/۳	۱۰۷/۷	میانه		
۰/۲	۱۰۲/۶	۱۰۳/۷	۲/۵	۱۲/۹	۲۱/۷	۲۰/۳	۶۰/۵	۳۶	حداقل		
۱/۸	۱۲۸۶/۴	۱۲۹۲/۶	۱۰۸/۳	۲۶	۸۰/۹	۶۱۰/۶	۱۰۰۹/۵	۳۵۴۵	حداکثر		
۱/۶	۱۱۸۳/۷	۱۱۸۸/۹	۱۰۵/۸	۱۳/۱	۵۹/۲	۵۹۰/۳	۹۴۹	۳۵۰۹	مد		
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد		
۰/۸	۳۱۱/۸	۳۱۴/۵	۲۸/۶	۱۷/۸	۴۴/۰	۱۲۴/۹	۲۶۸/۶	۲۰۳/۴	میانگین		فلاورجان
۴۰/۲	۹۸/۴	۹۹/۲	۶۴/۹	۱۸/۲	۲۲/۸	۷۴/۱	۱۱۶/۵	۲۹۵/۹	ضریب تغییرات (%)		
۰/۷	۲۳۶/۵	۲۳۸/۷	۲۶/۱	۱۶/۳	۴۳/۴	۹۶/۹	۲۰۴	۵۹/۵	میانه		
۰/۳	۱۱۴	۱۱۵/۱	۱/۱	۱۴/۳	۲۷/۵	۱۷	۸۶	۲۱/۲	حداقل		
۱/۸	۱۹۷۹/۲	۲۰۱۶	۸۴/۶	۲۴/۵	۸۰/۵	۳۶۰/۲	۲۱۱۰	۳۷۵۵	حداکثر		
۱/۶	۱۸۶۵/۱	۱۹۰۰/۹	۸۳/۵	۱۰/۳	۵۳	۳۴۳/۲	۲۰۲۴	۳۷۳۳/۸	مد		
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد		
۱	۳۱۶/۸	۳۱۹/۶	۱۴/۶	۱۸/۱	۴۲/۳	۱۵۹/۸	۱۶۵/۳	۲۱۱/۲	میانگین		
۳۴/۵	۴۸/۵	۴۸/۳	۶۰/۲	۱۹/۴	۱۵/۶	۱۰۰	۸۰/۷	۳۰۲/۸	ضریب تغییرات (%)	جمینی شهر	
۱	۲۷۹/۵	۲۸۲	۱۴/۲	۱۸	۴۱/۵	۹۵	۱۲۴/۳	۷۵	میانه		
۰/۴	۱۲۱/۳	۱۲۲/۶	۱/۳	۱۱/۵	۲۷	۱۷	۵۸/۵	۲۲/۲	حداقل		
۱/۶	۶۱۳/۸	۶۱۸	۳۴/۱	۲۴	۵۷/۲	۶۹۰/۷	۸۰۵/۵	۴۰۳۵	حداکثر		
۱/۲	۴۹۲/۴	۴۹۵/۴	۳۲/۸	۱۲/۵	۳۰/۲	۶۷۳/۷	۷۴۷	۴۰۱۲/۹	مد		
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد		
۰/۸	۲۳۲/۶	۲۳۴/۴	۲۵/۳	۱۸	۶۸/۳	۲۲۹/۱	۱۷۸/۱	۲۰۶/۸	میانگین		
۳۰	۵۴/۰	۵۳/۸	۹۹/۱	۲۰/۷	۲۸۳	۱۷۱/۷	۸۳/۱	۲۵۹/۷	ضریب تغییرات (%)		
۰/۹	۲۰۱/۶	۲۰۳/۴	۲۳/۳	۱۶/۶	۳۸/۷	۱۰۰/۱	۱۲۹	۵۷/۹	میانه		نخجف آباد
۰/۴	۷۶/۷	۷۷	۲/۲	۱۳/۶	۲۰/۵	۱۵/۳	۴۶/۵	۲۳/۸	حداقل		
۱/۵	۵۶۸/۱	۵۷۰/۶	۱۶۲/۲	۲۶/۵	۱۲۶۰	۱۹۳۵/۵	۷۹۰	۳۲۴۰	حداکثر		
۱/۱	۴۹۱/۴	۴۹۳/۶	۱۶۰	۱۲/۹	۱۲۳۹/۵	۱۹۲۰/۲	۷۴۳/۵	۳۲۱۶/۲	مد		

جدول ۲. آمار توصیفی ویژگی‌های مورد بررسی در گردوغبار خیابانی شهرهای مختلف (ادامه)

شهرها	مشخصه‌ها									شاخصه‌های آماری
	عناصر سنگین									
	$\chi_{fd}$	$\chi_{hf}$	$\chi_{lf}$	Cr	Co	Ni	Pb	Zn	Cu	
	(%)	(*10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /kg)			(mg/kg)					
شهر تهران	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد
	۱	۲۴۶/۸	۲۴۹	۲۶/۸	۱۹/۴	۴۰/۹	۱۷۵/۹	۱۴۵/۲	۲۰۴/۲	میانگین
	۳۰/۷	۶۸/۲	۶۸/۱	۱۲۱/۷	۱۹	۴۶/۹	۱۶۶/۹	۷۹/۲	۲۶۰	ضریب تغییرات (%)
	۱	۱۹۶/۷	۱۹۸/۷	۲۱/۷	۱۸/۷	۴۱/۲	۵۹/۹	۱۰۸	۶۳/۱	میان
	۰/۵	۶۰/۸	۶۱/۷	۰/۱	۱۴/۹	۱۱/۵	۹/۲	۳۷	۱۴	حداقل
	۱/۷	۸۸۰/۸	۸۸۸/۸	۱۸۸/۸	۲۹/۵	۱۲۸	۱۴۵۶/۶	۵۶۰	۲۹۶۵	حداکثر
	۱/۲	۸۲۰	۸۲۷/۱	۱۸۸/۷	۱۴/۷	۱۱۶/۶	۱۴۴۷/۵	۵۲۳	۲۹۵۱	مد
شهر مشهد	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد
	۰/۶	۴۷۲/۸	۴۷۵/۵	۱۳/۱	۱۳/۴	۲۷/۵	۶۱/۸	۹۲/۶	۴۱/۲	میانگین
	۳۳/۸	۲۸/۵	۲۸/۴	۵۶/۸	۱۸/۴	۲۵/۵	۹۱/۸	۵۵/۴	۴۷/۶	ضریب تغییرات (%)
	۰/۶	۴۶۱/۲	۴۶۵/۱	۱۲/۹	۱۳/۵	۲۷	۴۰/۵	۷۹	۳۶/۵	میان
	۰/۲	۲۶۳/۳	۲۶۴/۸	۰/۹	۸/۴	۸/۷	۰/۵	۳۵/۵	۱۷/۸	حداقل
	۱	۷۹۳/۹	۷۹۶/۳	۲۹/۹	۱۹/۵	۵۰/۳	۲۵۸/۸	۳۲۴	۱۱۲/۳	حداکثر
	۰/۹	۵۳۰/۶	۵۳۱/۶	۲۹	۱۱/۱	۴۱/۶	۲۵۸/۲	۲۸۸/۵	۹۴/۵	مد

$\chi_{lf}$ : پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس کوتاه؛  $\chi_{hf}$ : پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس بلند؛  $\chi_{fd}$ : پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس.

با نیکل وجود دارد و همبستگی منفی  $\chi_{fd}$  با مس، کبالت، کروم،  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  و کبالت و نیکل با  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  دیده می‌شود. مقادیر دیگر همبستگی اسپیرمن یا معنی‌دار نبوده است و یا کمتر از ۰/۵ هستند؛ بنابراین بدون همبستگی یا دارای همبستگی خیلی ضعیف هستند. همبستگی‌های ضعیف میان فلزات سنگین و پارامترهای مغناطیسی در گردوغبار خیابانی نشان می‌دهند، منابع ایجاد عناصر سنگین و پارامترهای مغناطیسی طیف گسترده‌ای از منابع را پوشش داده و مربوط به یک منبع خاص نمی‌باشند. همبستگی‌های بیشتر از ۰/۵ نشان می‌دهند، منابع ایجاد این پارامترها می‌تواند یکسان یا نزدیک به هم باشند.

وجود همبستگی‌های زیاد میان پارامترهای مغناطیسی با برخی عناصر، منشأ انسان‌زاد آن‌ها را تأیید می‌کند. ولی سایر عناصر با

دارد. درحالی‌که بین مس با  $\chi_{fd}$  و سرب، کروم و کبالت با  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  همبستگی منفی وجود دارد.

برای نمونه‌های گرد و غبار خیابانی شهر نجف‌آباد، همبستگی‌های بدست آمده شامل همبستگی مثبت بین مس، نیکل، روی، کبالت و کروم با  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  و  $\chi_{fd}$  و همبستگی‌های منفی بین  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  با مس، روی، سرب، کبالت و سرب است. برای نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر شهرضا همبستگی‌های ایجاد شده نشان‌دهنده وجود همبستگی‌های مثبت میان مس، نیکل، روی، سرب و کبالت با  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  و همبستگی‌های منفی میان  $\chi_{fd}$ ،  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  با مس، نیکل، روی، سرب، کبالت و کروم است. برای نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر نطنز روابط همبستگی نشان داد، همبستگی خیلی قوی مثبت مس و روی با  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  و  $\chi_{fd}$ .



جدول ۳. ماتریس همبستگی اسپیرمن در نمونه‌های گرد و غبار خیابانی شهرهای مورد مطالعه

Zn <sub>gr</sub>	ویژگی‌ها						ویژگی‌ها						همبستگی اسپیرمن	تفسیر		
	Zn <sub>gr</sub>	Cr	Co	Ni	Pb	Zn	Cu	Xir	Xir	Cr	Co	Ni			Ph	Zn
							۰/۴ (**)									ضرب همبستگی
							۰/۰									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۰									ضرب همبستگی
							۰/۹									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							-۰/۲									معنی دار
							۰/۱									تعداد
							۰/۵									ضرب همبستگی
							۲۰									معنی دار
							-۰/۴ (**)									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							-۰/۳ (**)									ضرب همبستگی
							۰/۱									معنی دار
							۰/۳									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد
							۰/۱									ضرب همبستگی
							۰/۵									معنی دار
							۲۰									تعداد

جدول ۳. ماتریس همبستگی اسپرین در نمونه‌های گرد و غبار خیابانی شهرهای مورد مطالعه (ادامه)

ویژگی‌ها	ویژگی‌ها							ویژگی‌ها						
	Zn	Pb	Ni	Co	Cr	Xur	Xur	Zn	Pb	Ni	Co	Cr	Xur	Xur
Zn	۰/۵ (**)							۰/۳						
Pb	۰/۰	۰/۰						۰/۱						
Ni	۴۰	۴۰	۰/۲					۴۰						
Co	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۲	۰/۴ (**)				۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)				
Cr	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱			۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹			
Xur	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۰/۱		۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۰/۱		
Zn	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Pb	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Ni	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Co	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Cr	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Xur	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Zn	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)
Pb	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Ni	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Co	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Cr	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Xur	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Zn	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)
Pb	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Ni	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Co	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Cr	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Xur	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Zn	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)
Pb	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Ni	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Co	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Cr	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Xur	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Zn	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)	۰/۵ (**)
Pb	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Ni	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Co	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)	۰/۴ (**)
Cr	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Xur	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲

\*\* همبستگی در سطح ۰/۱۰ (۲ دنباله) معنی دار است.

\* همبستگی در سطح ۰/۵ (۲ دنباله) معنی دار است.



بای پلات شکل ۳- ب را شامل می‌شود. به علاوه، شکل ۲- ج حاکی از آن است که دو مؤلفه اول، میزان ۳۸/۶۷ درصد را به خود اختصاص داده است. این موضوع بیانگر سهم به نسبت مناسبی از تغییرات و روابط میان متغیرهای مورد بررسی در این نمودارها است.

شکل ۳- الف به دو بخش تقسیم می‌شود، بخش سمت راست، همبستگی زیاد (منفی و مثبت) با مؤلفه اول است که شامل خصوصیات مغناطیسی در چهار فصل (فصل زمستان همبستگی منفی با مؤلفه دوم و مثبت با مؤلفه اول) و غلظت عنصر کروم در فصل بهار (همبستگی مثبت با هر دو مؤلفه) است. در سمت چپ نمودار، غلظت‌های عنصر کروم در سه فصل پاییز و زمستان، عنصر کبالت در چهار فصل و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس دارای همبستگی منفی با مؤلفه اول و همبستگی مثبت با مؤلفه دوم است و همچنین عنصر کروم در تابستان همبستگی به نسبت قوی منفی با هر دو مؤلفه داراست.

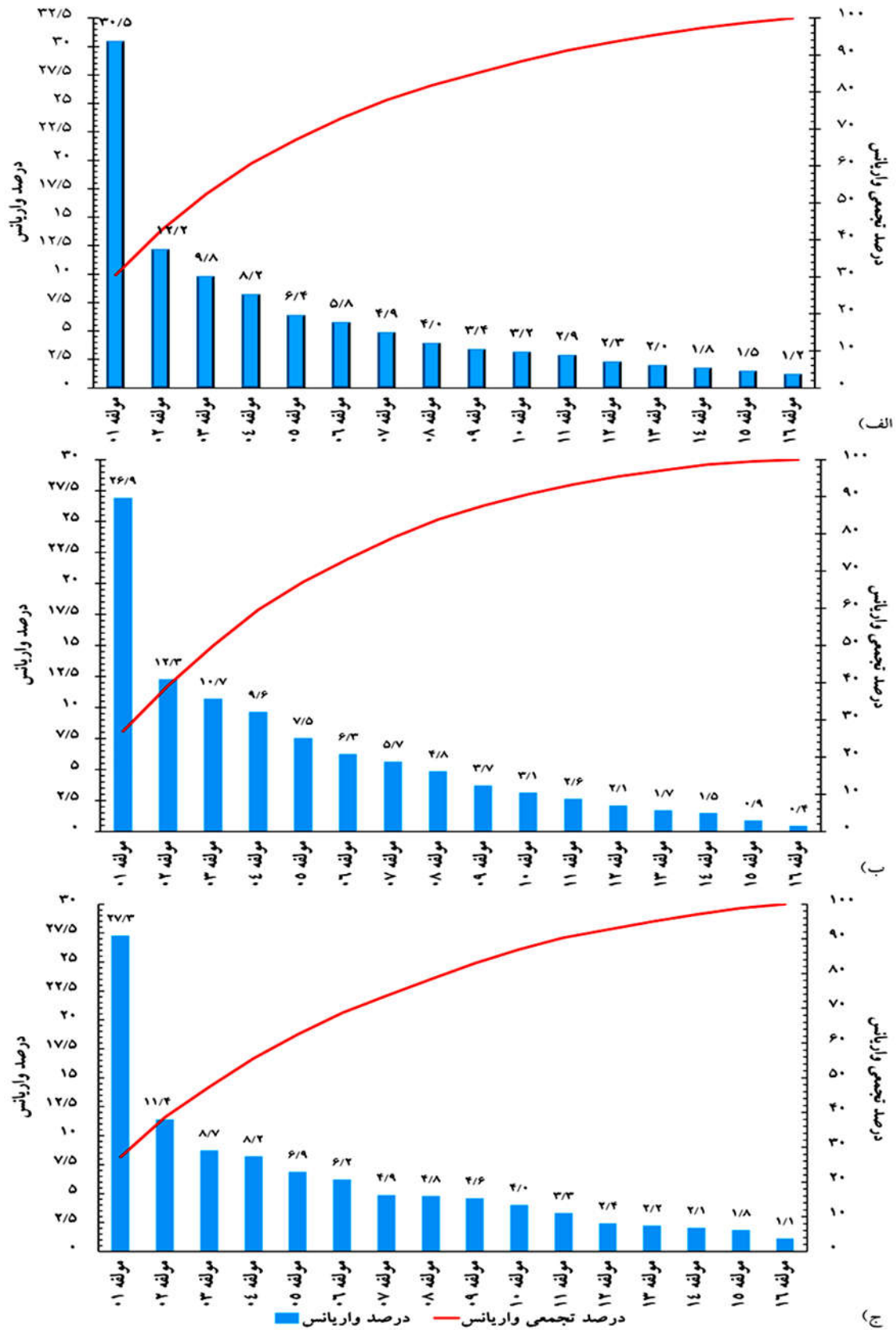
این نمودار در بسیاری از پارامترهای مورد بررسی خود دارای همبستگی ضعیف تا متوسط ولی از نوع منفی با مؤلفه اول است که نمایانگر عدم وجود منابع انفرادی و مشترک در ایجاد پارامترهای مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین است. همچنین در شکل ۳- الف، شهرهای اصفهان و فلاورجان و تاحدی شهرضا دارای دامنه تغییرات بزرگتری نسبت به سایر شهرها هستند. این دامنه تغییرات نمایانگر گستردگی منابع تولید و محصولات حاصل از ساختارهای شهری و انسان‌زاد نسبت به شهرهای دیگر است.

شکل ۳- ب همبستگی زیاد و منفی با مؤلفه دوم و همبستگی قوی و مثبت با مؤلفه اول مابین پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم در سه فصل تابستان، پاییز و زمستان را نشان می‌دهد. همبستگی زیاد و مثبت با هر دو مؤلفه برای پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم در فصل بهار و غلظت عنصر مس در تابستان و غلظت روی در بهار است. همچنین مقادیر عنصر مس و روی در پاییز و روی در زمستان دارای همبستگی

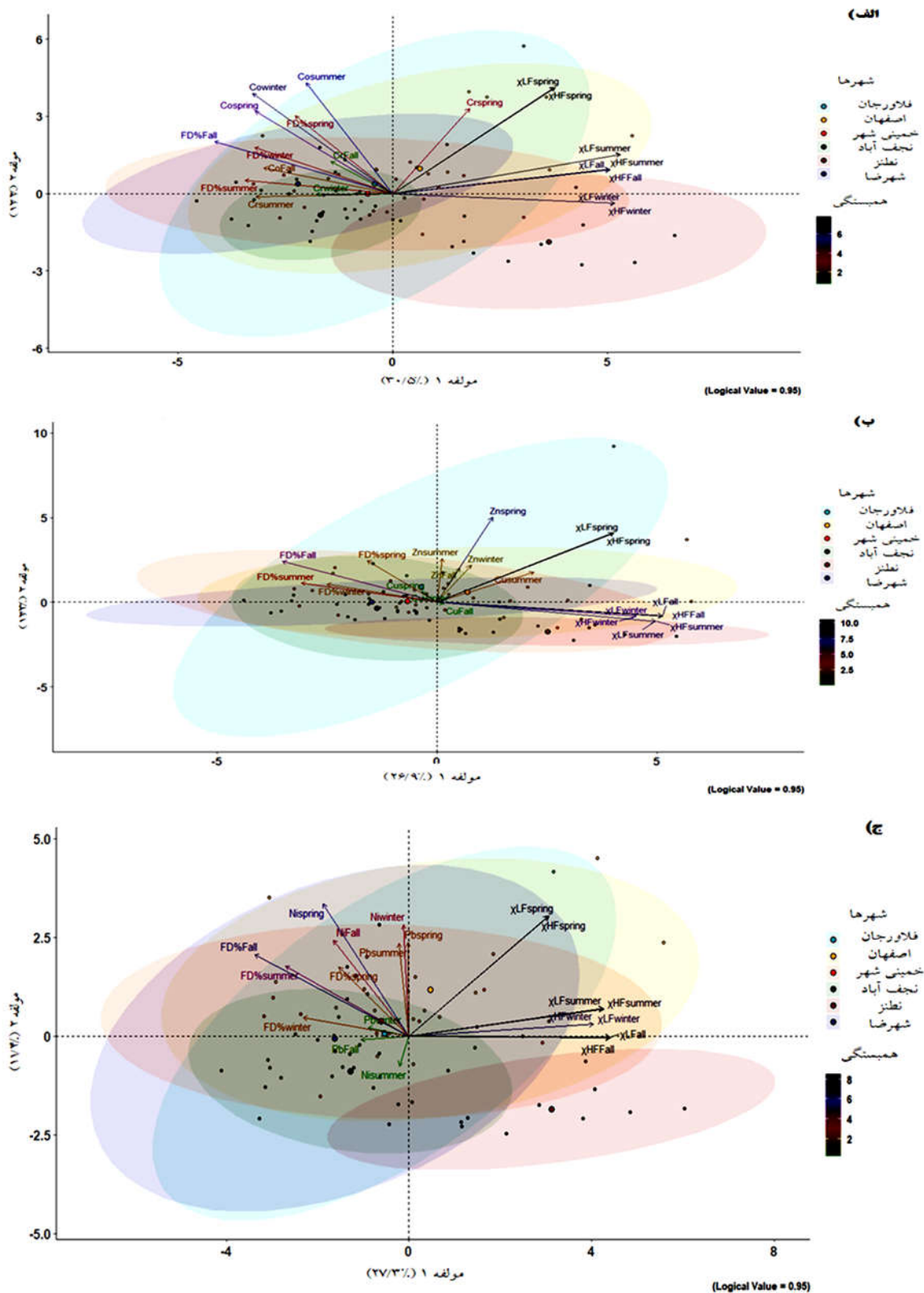
همبستگی‌های کم یا منفی، می‌تواند منشأ طبیعی (غیر انسان‌زاد) و/یا رسوبات حاصل از انتشارات ذرات گردوغبار اتمسفری با منشأ طبیعی را تأیید کند. با بررسی مطالعه‌های متعدد می‌توان دریافت، همبستگی معقول بین روی، مس و سرب از این ایده که فعالیت‌های وسایل نقلیه، ترافیک و فعالیت‌های صنعتی منبع عناصر سنگین در این منطقه هستند، پشتیبانی می‌کند (۳). بررسی روی گردوغبار اطراف جاده‌ها نشان داد، ضرایب همبستگی زیاد میان کروم، روی و سرب یافت شده است که از منابع مشابه ساطع می‌شوند. همچنین نیکل، جیوه و آرسنیک به شدت دارای همبستگی بودند که منبع مشترک دیگری را پیشنهاد می‌کنند (۴). در مطالعه‌های گورکا (۱۸)، ژانگ و همکاران (۴۴) و دلتو و همکاران (۱۶)، همبستگی مقادیر زیاد پذیرفتاری مغناطیسی با غلظت عناصر سنگین مورد ارزیابی قرار گرفته است که وجود همبستگی‌های قوی، نمایانگر سهم زیاد منابع انسان‌زاد در تأمین مقادیر عناصر سنگین است. همبستگی‌های ضعیف گزارش شده در مطالعه‌های یادشده منشأ طبیعی بودن این عناصر را نشان می‌دهد. همچنین در مطالعه فان و همکاران (۲۰۲۲)، همبستگی مثبت چشمگیر بین فلزات سنگین نشان می‌دهد، عناصر زوج رفتارهای مشابه، وابستگی‌های متقابل و منشأ مشابه را نشان می‌دهند (۱۷).

### تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مکانی و زمانی پارامترهای مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین

برای بهتر نمایش‌دادن روابط میان ویژگی‌های مورد بررسی از طریق روش آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، از سه نمودار بای پلات استفاده شده است (شکل‌های ۲ و ۳). این نمودارها مبنای بررسی روابط مابین خصوصیات مغناطیسی با سایر متغیرهای مورد مطالعه هستند. شکل ۲- الف نشان می‌دهد، میزان تغییرات دو مؤلفه اول، ۴۲/۷ درصد از سهم مؤلفه‌های نمودار بای پلات شکل ۳- الف را شامل شده است. براساس شکل ۲- ب، میزان تغییرات دو مؤلفه اول، ۳۹/۲۱ درصد از سهم مؤلفه‌های نمودار



شکل ۲. روابط بین مؤلفه‌های اصلی سه نمودار بای پلات ترسیمی ویژگی‌های مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی



شکل ۳. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های مغناطیسی و غلظت فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی شهرهای مورد مطالعه

همبستگی منفی با مؤلفه اول دارند. مقدار سرب در فصل زمستان و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در فصل‌های بهار و زمستان، همبستگی به نسبت ضعیف تا ضعیف مثبت با مؤلفه دوم و همبستگی منفی با مؤلفه اول را نشان می‌دهند.

بر اساس مطالعه موردی در شهر شیان کشور چین، سه منبع اصلی مطابق با تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شناسایی شدند. عناصر کبالت، منگنز، نیکل و وانادیوم به‌طور عمده از منابع طبیعی (خاک محلی) منشأ می‌گیرند. عناصر کروم، سرب، باریوم، مس و روی به‌طور عمده از منابع ترافیکی به‌دست آمد، درحالی‌که هافنیوم و زیرکونیوم به‌طور عمده از منبع ساخت‌وساز بودند. این مطالعه نشان داد، انتشار ترافیک و گردوغبار ساختمانی، عوامل اصلی تأثیر مقادیر زیاد فلزات کمیاب در گردوغبار خیابانی ریزتر (ذرات کمتر از ۶۳ میکرومتر) شهر شیان بودند (۳۶)؛ بنابراین با توجه به نتایج مطالعه حاضر می‌توان گفت، همبستگی زیاد مؤلفه دوم با پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس و عناصر نیکل و کبالت، نشان‌دهنده یکسان بودن منشأ آن‌ها است که به‌احتمال زیاد مربوط به جذب عناصر مغناطیسی و فلزات سنگین به ذرات درشت چندوجهی است که بعد از رسوب‌گذاری مجدد ذرات گردوغبار خیابانی در کف خیابان‌ها باقی‌مانده است. همچنین همبستگی زیاد مؤلفه اول با پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم عناصر روی، مس و کروم (بیشتر در فصل بهار)، به‌احتمال زیاد نشان‌دهنده وابستگی و جذب این عناصر به ذرات نزدیک به SP است.

مطالعه‌های مشابهی روی منابع فلزات (شبه فلزات) بالقوه سمی در گردوغبار دوباره معلق شده خیابان‌های کلان‌شهر شیجیازوانگ (Shijiazhuang) در چین انجام شده است. پژوهشگران در این مطالعه گزارش کرده‌اند، کیفیت زیست‌محیطی این کلان‌شهر به نسبت ضعیف است. همچنین براساس این مطالعه، درحالی‌که تخلیه‌های صنعتی مرتبط با زغال‌سنگ و انتشارات ترافیکی، منابع اصلی آلودگی در چنین شهرهایی گزارش شده است، ادعا شده است که عامل افزایش بیش از اندازه مقادیر فلزات سنگین عوامل انسانی با مدیریت بهینه

ضعیف تا متوسط با مؤلفه اول و دوم هستند. در میانه شکل ۳-ب، غلظت عنصر روی در فصل تابستان با همبستگی متوسط مثبت با مؤلفه دوم و کمترین میزان همبستگی با مؤلفه اول را نشان می‌دهد که می‌تواند احتمال منابع و محصولات حاصل از مؤلفه دوم باشد. در سمت چپ نمودار، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در هر چهار فصل به همراه مقادیر مس در بهار و زمستان با همبستگی به نسبت زیاد تا متوسط مثبت با مؤلفه دوم و همبستگی منفی با مؤلفه اول قرار گرفته‌اند. مقایسه ویژگی‌های هر بخش نمودار می‌تواند نمایانگر عدم تفاوت معنی‌دار در منابع و تولیدات متغیرهای موجود در سمت مورد نظر باشد. همچنین در شکل ۳-ب، شهر اصفهان دارای دامنه تغییرات بزرگتری نسبت به سایر شهرها است. این دامنه تغییرات نمایانگر گستردگی منابع تولید و محصولات حاصل از ساختارهای شهری و انسان‌زاد نسبت به شهرهای دیگر است. سایر شهرها (فلاورجان، شهرضا، خمینی‌شهر، نجف‌آباد و نظنز) بیشترین دامنه تغییرات را با مؤلفه اول دارند و کمتر تحت تأثیر مؤلفه دوم هستند. سمت راست نمودار در شکل ۳-ج نشان می‌دهد، مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم در فصل پاییز، دارای همبستگی قوی مثبت با مؤلفه اول بوده و فاقد همبستگی با مؤلفه دوم است. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم در فصل تابستان و زمستان، همبستگی قوی مثبت با مؤلفه اول و همبستگی به نسبت مثبت قوی با مؤلفه دوم دارد. همچنین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس زیاد و کم در فصل بهار، همبستگی قوی مثبت با هر دو مؤلفه اول را نشان می‌دهند. غلظت عنصر نیکل در زمستان، سرب در فصل بهار و تابستان بیشترین همبستگی مثبت را با مؤلفه دوم و کمترین مقدار همبستگی با میل به سمت بخش منفی را با مؤلفه اول نشان دادند. غلظت عنصر نیکل در تابستان و سرب در پاییز با همبستگی خیلی ضعیف منفی با هر دو مؤلفه دارند. مقدار غلظت نیکل در بهار و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در فصل پاییز، هر دو همبستگی به نسبت قوی مثبت با مؤلفه دوم و همبستگی منفی با مؤلفه اول دارند. غلظت نیکل در فصل پاییز و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در فصل تابستان، همبستگی متوسط مثبت با مؤلفه دوم و

جمعیت بیشتر و در نتیجه تراکم ماشین‌آلات، وجود ساخت‌وسازهای بیشتر و بزرگتر در شهرهای بزرگ (به‌خصوص کلان‌شهر اصفهان)، عبور و رفت‌وآمدهای ترانزیتی وسایل در همه شهرها به‌غیراز نطنز، وجود طوفان‌های گردوغباری اتمسفری شدیدتر در مناطق مرکزی استان اصفهان، خشکسالی و نبود باران کافی و وارونگی‌های دمایی متعدد در زمستان اشاره کرد. همچنین از جمله دلایل دیگر افزایش غلظت عناصر در گردوغبار خیابانی بیشتر شهرها، می‌توان به تغییرات شدید مکانی فرونشست گردوغبار و حمل عناصر سنگین که مقادیر متفاوتی را به دلایل گوناگون همچون بار ترافیکی، فرسودگی وسایل نقلیه موتوری، سوخت نامناسب به همراه بدسوزی آن، وجود زون‌های زمین‌شناسی حاوی کانی‌های حامل عناصر سنگین زیاد در مناطق اطراف برخی شهرها، کمبود باران و کاهش شستشوی این عناصر از معابر، عدم نظافت کافی در سطح معابر عمومی به‌خصوص در شهرهای کوچک و وجود مواد رنگی حاوی عناصر سنگین اشاره کرد.

نتایج نشان داد، تغییرات فصلی در پارامترهای مغناطیسی منعکس‌کننده غلظت کانی‌های مغناطیسی است که به صورت چشمگیری از فصل بهار در مقایسه با فصل‌های پاییز و زمستان بیشتر است. این پدیده نشان‌دهنده افزایش سهم فعالیت‌های انسانی است که حاوی مواد مغناطیسی هستند و آن را در محیط‌های شهری آزاد می‌کند. این موضوع تأیید می‌کند، افزایش میزان عناصر سنگین حاصل منابع انسان‌زاد است. مقادیر زیاد پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌های گردوغبار خیابانی اثرات انسان‌زاد، انتشار عناصر مغناطیسی را نشان می‌دهد. همچنین باتوجه به مقادیر  $\chi_{fd}$  کمتر از ۲ درصد نمونه‌ها گردوغبار خیابانی، سهم ذرات SP در مقایسه با ذرات چندوجهی درشت را کمتر نشان می‌دهد.

### سپاسگزاری

از دانشگاه صنعتی اصفهان که هزینه‌های انجام این پژوهش را تأمین کرده است، قدردانی می‌شود.

قابل کنترل و قابل‌کاهش هستند (۱۷). همچنین مطالعه انجام شده در شهر نووی‌ساد در صربستان روی گردوغبار خیابانی نشان داد، عوامل ترافیکی و انسان‌زاد عامل اصلی افزایش مقادیر آلودگی هستند و این موضوع در این شهر و در فصول مختلف سال (به‌خصوص در تابستان) متفاوت گزارش شده است (۳۷).

### نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده روی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد، در تجزیه و تفکیک مؤلفه‌ها برای ویژگی‌های مغناطیسی کروم، کبالت، روی، مس، سرب و نیکل، مؤلفه اول و دوم کمتر از ۵۰ درصد داده‌ها را پوشش می‌دهند. این موضوع بیانگر گستردگی منابع و تولیدات حاصل از فعالیت‌های طبیعی و انسانی است. تفاوت معنی‌دار در برخی روابط تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌تواند تفاوت در منشأ و نیز تفاوت در فرایندهای فیزیکوشیمیایی محیط‌های تولید و تبادل ذرات حامل فلزات سنگین و ذرات مغناطیسی موجود در گردوغبار خیابانی باشد. همچنین از نتایج حاصل شده در این مطالعه و مقایسه با سایر مطالعه‌ها می‌توان گفت، روابط همبستگی موجود بین فلزات سنگین و پارامترهای مغناطیسی تا حدی به نسبت قابل قبولی می‌تواند به توصیف منابع ایجادکننده و همچنین اشتراک این منابع برای هر کدام از پارامترها مورد استفاده قرار گیرد. این امر نیازمند بررسی‌های بسیار دقیق‌تر و پیچیده‌تر است.

وجود همبستگی متوسط تا قوی مابین فلزات سنگین (مس و روی) با پذیرفتاری مغناطیسی در شهرهای اصفهان، فلاورجان و شهرضا می‌تواند به نزدیک بودن منابع تولید این عناصر که به‌طور عمده انسان‌زاد هستند، نسبت داد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس گردوغبار خیابانی در بیشتر موارد با فلزات سنگین همبستگی مثبت نشان داده است، درحالی‌که این عناصر با سایر پارامترهای مغناطیسی رابطه کاملاً منفی داشته‌اند. این امر نشان‌دهنده تفاوت در منابع ایجاد این عناصر است. از دلایل افزایش مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی و به دنبال آن افزایش آلودگی‌های فلزات سنگین، می‌توان به وجود ترافیک بالاتر،



## منابع مورد استفاده

1. Aelion, C. M., H. T. Davis, S. McDermott and A. B. Lawson. 2008. Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina: Potential for human health impact. *Science of The Total Environment*. 402: 149-156.
2. Ahmed, F. and H. Ishiga. 2006. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*. 40: 3835-3844.
3. Al-Khashman, O. A. 2004. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak industrial estate, Jordan. *Atmospheric Environment*. 38: 6803-6812.
4. Al-Taani, A. A., Y. Nazzal and F. M. Howari. 2019. Assessment of heavy metals in roadside dust along the Abu Dhabi-Al Ain national highway, UAE. *Environmental Earth Sciences*. 78: 1-13.
5. Amato, F. 2018. Non-Exhaust Emissions: An Urban Air Quality Problem For Public Health; Impact And Mitigation Measures. Academic Press. Cambridge.
6. Amato, F., P. Zandveld, M. Keuken, S. Jonkers, X. Querol, C. Reche, H. A. D. van der Gon and M. Schaap. 2016. Improving the modeling of road dust levels for Barcelona at urban scale and street level. *Atmospheric Environment*. 125: 231-242.
7. Bourliva, A., N. Kantiranis, L. Papadopoulou, E. Aidona, C. Christophoridis, P. Kollias, M. Evgenakis and K. Fytianos. 2018. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: a one-year monitoring period. *Science of The Total Environment*. 639: 417-427.
8. Cao, L., E. Appel, S. Hu, G. Yin, H. Lin and W. Rösler. 2015. Magnetic response to air pollution recorded by soil and dust-loaded leaves in a changing industrial environment. *Atmospheric Environment*. 119: 304-313.
9. Charlesworth, S. M. J. A. and J. Lees. 2001. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterising fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. *Journal of Applied Geophysics*. 48: 113-125.
10. Chudaničová, M., S. M. Hutchinson, J. Hradecký and J. Sedláček. 2016. Environmental magnetism as a dating proxy for recent overbank sediments of (peri-)industrial regions in the Czech Republic and UK. *Catena*. 142: 21-35.
11. Dankob, Z. 2009. Spatial correlation of magnetic susceptibility with total concentration of heavy metals in surface soils of Isfahan region. Master's Thesis of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. Isfahan. Iran (In Farsi).
12. Dankob, Z. H. Khademi and S. Ayoubi. 2012. Magnetic susceptibility and its relationship with the concentration of selected heavy metals and soil properties in surface soils of the Isfahan region. *Journal of Environmental Studies*. 3: 17-26.
13. Day, J., M. Hart and M. Robinson. 1975. Lead in urban street dust. *Nature*. 253: 343-345.
14. Denby, B. R., K. J. Kupiainen and M. Gustafsson. 2018. Review of road dust emissions. PP. 183-203. In: F. Amato, (Eds.), Non-Exhaust Emissions. Academic Press. United States.
15. Duan, T., S. Liu, D. Wang, J. Feng, N. Song, Y. Yu and Y. Li. 2020. Seasonal variation and sources of heavy metals in urban street dusts and river sediments of Dongluo river watershed in Ji'nan city, China. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 24: 1400-1410.
16. Dytłow, S., A. Winkler, B. Górka-Kostrubiec and L. Sagnotti. 2019. Magnetic, geochemical and granulometric properties of street dust from Warsaw (Poland). *Journal of Applied Geophysics*. 169: 58-73.
17. Fan, P., X. Lu, B. Yu, X. Fan, L. Wang, K. Lei, Y. Yang, L. Zuo and J. Rinklebe. 2022. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid)s in resuspended megacity street dust. *Environment International*. 160: 107073.
18. Górka-Kostrubiec, B., R. Świetlik, T. Szumiata, S. Dytłow and M. Trojanowska. 2023. Integration of chemical fractionation, Mössbauer spectrometry, and magnetic methods for identification of Fe phases bonding heavy metals in street dust. *Journal of Environmental Sciences*. 124: 875-891.
19. Hafeez, S., M. S. Wong, S. Abbas, C. Y. Kwok, J. Nichol, K. H. Lee, D. Tang and L. Pun. 2018. Detection and monitoring of marine pollution using remote sensing technologies. In: H. B. Fouzia (Eds.), Monitoring of Marine Pollution. IntechOpen. London, United Kingdom.
20. Han, X., X. Lu, Q. Zhang, Q. Wuyuntana, Hai and H. Pan. 2016. Grain-size distribution and contamination characteristics of heavy metal in street dust of Baotou, China. *Environmental Earth Sciences*. 75: e-468.
21. Jaffar, S. T. A., L. Z. Chen, H. Younas and N. Ahmad. 2017. Heavy metals pollution assessment in correlation with magnetic susceptibility in topsoils of Shanghai. *Environmental Earth Sciences*. 76: 1-18.

22. Karei, M. T. 2015. The geological and mining situation of Isfahan province. PP. 95-152. In: M. T. Karei (Ed.), Road map of geosciences and mining of Isfahan province (preliminary edition). Organization of Geology and Mineral Explorations of the Country. Ministry of Industry, Mine and Trade. Tehran. Iran (In Farsi).
23. Khademi, H., M. Gabarrón, A. Abbaspour, S. Martínez-Martínez, A. Faz and J. A. Acosta. 2019. Environmental impact assessment of industrial activities on heavy metals distribution in street dust and soil. *Chemosphere*. 217: 695-705.
24. Khademi, H., M. Gabarrón, A. Abbaspour, S. Martínez-Martínez, A. Faz and J. Acosta. 2020. Distribution of metal(loid)s in particle size fraction in urban soil and street dust: influence of population density. *Environmental Geochemistry and Health*. 42: 4341-4354.
25. Kim, W., S. J. Doh and Y. Yu. 2009. Anthropogenic contribution of magnetic particulates in urban roadside dust. *Atmospheric Environment*. 43: 3137-3144.
26. Li, H., X. Qian, H. Wei, R. Zhang, Y. Yang, Z. Liu, W. Hu, H. Gao and Y. Wang. 2014. Magnetic properties as proxies for the evaluation of heavy metal contamination in urban street dusts of Nanjing, southeast China. *Geophysical Journal International*. 199: 1354-1366.
27. Lourenço, A. M., E. Sequeira, H. Sant'Ovaia and C. R. Gomes. 2014. Magnetic, geochemical and pedological characterisation of soil profiles from different environments and geological backgrounds near Coimbra, Portugal. *Geoderma*. 213: 408-418
28. Lu, S., H. Wang and S. Bai. 2009. Heavy metal contents and magnetic susceptibility of soils along an urban-rural gradient in rapidly growing city of eastern China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 155: 91-101.
29. Ma, M., S. Hu, L. Cao, E. Appel and L. Wang. 2015. Atmospheric pollution history at Linfen (China) uncovered by magnetic and chemical parameters of sediments from a water reservoir. *Environmental Pollution*. 204: 161-172.
30. Mahmoudi, Z. 2011. Investigating the geochemical and mineralogical characteristics of atmospheric dust in Isfahan. Master's Thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (In Farsi).
31. Mondal, S., S. Chatterjee, R. Maity, D. Gain and D. Mazumdar. 2023. Imprints of vehicular pollution in roadside dust from Kolkata, India: insights from magnetic susceptibility, geo-statistical and SEM studies. *Current Science*, 124(1): 56-62.
32. Norouzi, S. 2014. Spatial and temporal changes of dust characteristics in Isfahan region and possibility of using plane tree leaves for biomonitoring atmospheric pollution. PhD Dissertation in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (In Farsi).
33. Qian, P., L. M. Zhou, X. M. Zheng, Y. Dong and Y. J. Wang. 2014. Magnetic properties of airborne particulate matter in Shanghai during dust storm events and the implications for heavy metal contaminant sources. *Environmental Earth Sciences*. 72: 4167-4178.
34. Ravisankar, R., N. Harikrishnan, A. Chandrasekaran, M. S. Gandhi and R. Alagarsamy. 2018. Data on heavy metal and magnetic relationships in coastal sediments from south east coast of Tamilnadu, India. *Data in Brief*. 16: 392-400.
35. Revuelta, M. A., G. McIntosh, J. Pey, N. Pérez, X. Querol and A. Alastuey. 2014. Partitioning of magnetic particles in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> aerosols in the urban atmosphere of Barcelona (Spain). *Environmental Pollution*. 188: 109-117.
36. Shi, D. and X. Lu. 2018. Accumulation degree and source apportionment of trace metals in smaller than 63 μm road dust from the areas with different land uses: a case study of Xi'an, China. *Science of the Total Environment*. 636: 1211-1218.
37. Škrbić, B., N. Đurišić-Mladenović, J. Živančev and Đ. Tadić. 2019. Seasonal occurrence and cancer risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from the Novi Sad city. Serbia. *Science of the Total Environment*. 647: pp.191-203.
38. Tsatskin, A. and T. S. Gendler. 2016. Identification of "red ochre" in soil at Kfar HaHoresh Neolithic site, Israel: Magnetic measurements coupled with materials characterization. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 6: 284-292.
39. Wang, G., J. Chen, W. Zhang, Y. Chen, F. Ren, A. Fang and L. Ma. 2019a. Relationship between magnetic properties and heavy metal contamination of street dust samples from Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 26: 8958-8970.
40. Wang, G., J. Chen, W. Zhang, F. Ren, Y. Chen, A. Fang and L. Ma. 2019b. Magnetic properties of street dust in Shanghai, China and its relationship to anthropogenic activities. *Environmental Pollution*. 255: p.113214.
41. Wang, G., Y. Liu, J. Chen, F. F. Ren, Y. Y. Chen, F. Z. Ye and W. G. Zhang. 2018. Magnetic evidence for heavy metal pollution of topsoil in Shanghai, China. *Frontiers of Earth Science*. 12: 125-133.

42. Wang, G., F. Oldfield, D. Xia, F. Chen, X. Liu and W. Zhang. 2012. Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: a case study from the city of Lanzhou, China. *Atmospheric Environment*. 46: 289-298.
43. Wang, G., F. F. Ren, J. Chen, Y. Liu, F. Z. Ye, F. Oldfield, W. G. Zhang and X. D. Zhang. 2017. Magnetic evidence of anthropogenic dust deposition in urban soils of Shanghai, China. *Geochemistry*. 77: 421-428.
44. Yang, T., Q. Liu, H. Li, Q. Zeng and L. Chan. 2010. Anthropogenic magnetic particles and heavy metals in the road dust: magnetic identification and its implications. *Atmospheric Environment*. 44: 1175-1185.
45. Zhang, C., Q. Qiao, E. Appel and B. Huang. 2012. Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 119: 60-75.

## Seasonal and Spatial Variations of Magnetic Susceptibility of Street Dust in Several Cities of Isfahan Province and their Relationship with the Concentration of Selected Heavy Metals

B. Akbari and H. Khademi<sup>1\*</sup>

(Received: June 18-2023 ; Accepted: October 16-2023)

### Abstract

Street dust enters the urban environments due to the resuspension of particles smaller than 100 micrometers. The magnetic properties of street dust and their relationship with the concentration of heavy metals have received less attention from researchers worldwide, and not much study has been performed on this issue in Iran. The objectives of this study were: (i) to investigate the spatial and seasonal changes in street dust, and (ii) to determine their relationships with the concentration of selected heavy metals in several cities in the Isfahan province. Sampling was carried out in the first half of the second month of each season including 20 samples from Isfahan city and 10 samples from Natanz, Shahreza, Falavarjan, Khomeinishahr, and Najafabad. The concentration of selected heavy metals was measured using an atomic absorption spectrometer. Also, the magnetic susceptibility values of the samples at low and high frequencies were determined and frequency-dependent magnetic susceptibility was calculated. The results showed that the presence of ferromagnesian minerals in the parent materials could be the reason for the high values of magnetic receptivity in Natanz City. However, the high level of this characteristic in the street dust of other cities could be due to human activities, especially in Isfahan city. Based on the results of principal component analysis, the high correlation of the first component with magnetic susceptibility and the concentration of zinc, copper, and chromium elements most likely indicates the absorption of these elements by particles close to superparamagnetic (SP). The high correlation of the second component with frequency-dependent magnetic susceptibility and concentration of nickel and cobalt is most likely related to the adsorption of magnetic elements and heavy metals into coarse polyhedral particles that remained on the street floor after the re-deposition of street dust particles. Also, the high correlations between magnetic parameters and the concentration of copper and zinc confirm their anthropogenic origin. On the other hand, low or negative correlations of Pb, Ni, Cr, and Co concentrations with magnetic susceptibility might confirm their natural or non-anthropogenic origin. The higher values of magnetic parameters of street dust in the spring season reflect the significant contribution of magnetic minerals in this season, compared to autumn and winter, and indicate the higher influence of human activities.

**Keywords:** Urban environment, Atmospheric pollution, Anthropogenic sources, Natural sources, Heavy metal pollution

---

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: hkhademi@iut.ac.ir