



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۶۲-۴۷

"مقاله پژوهشی"

بررسی غلظت، منشأ و روابط فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان: رویکردی نوین با استفاده از تحلیل‌های آماری

سیدمحمدصادق طبیب لقمانی^۱، محمدرضا رضایی کهخا^{۲*}، احمد شرافتی^۱، امین‌رضا نشاط^۳

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

۳. گروه GIS/RS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezaei@zsbmu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰)

چکیده

این مطالعه به بررسی غلظت و منشأ فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان، واقع در جنوب شرقی ایران، پرداخته است. نمونه‌برداری از ۱۴ ایستگاه در مناطق شهری، روستایی، صنعتی و کشاورزی به مدت یک سال انجام شد. غلظت ۱۴ فلز سنگین با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده القایی (ICP) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که منگنز با میانگین $463/01 \text{ mg/kg}$ بیش‌ترین غلظت را داشت، در حالی که مولیبدن با $1/79 \text{ mg/kg}$ کم‌ترین مقدار را نشان داد. تغییرات فصلی قابل توجهی مشاهده شد، که بیش‌ترین مقدار آن‌ها در فصل تابستان بدست آمد. فاکتور غنی‌شدگی (EF) برای آرسنیک، کروم و وانادیم به ترتیب $2/8$ ، $2/3$ و $2/1$ محاسبه شد که نشان‌دهنده غنی‌شدگی متوسط است. شاخص آلودگی (PI) برای این عناصر نیز آلودگی کم را نشان داد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که دو مؤلفه اول $94/8\%$ از تغییرپذیری داده‌ها را توضیح می‌دهند. بررسی روابط بین عناصر نشان داد که در اکثر موارد، مدل‌های غیرخطی با R^2 بالا و MSE کم، توصیف بهتری از روابط ارائه می‌دهند. آنالیز واریانس (ANOVA) نشان داد که ۷ عنصر از ۱۴ عنصر تغییرات معناداری در طول ماه‌های مختلف سال دارند ($p > 0/001$). این مطالعه با ارائه یک رویکرد جامع و نوآورانه، درک عمیق‌تری از وضعیت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان فراهم کرده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتر برای کاهش آلودگی و حفاظت از سلامت عمومی در منطقه کمک کند.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، گرد و غبار، سیستان، آلودگی، محیط زیست

مقدمه

آلودگی هوا یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهانی است که سلامت انسان و اکوسیستم‌ها را به طور جدی تهدید می‌کند. بر اساس آمار سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۲۰۱۶ حدود ۹۱ درصد از جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که آلودگی هوا بیش از حد مجاز بود. این آمار نشان‌دهنده گستردگی و شدت مشکل آلودگی هوا در سراسر جهان است. سالانه میلیون‌ها نفر به دلیل مواجهه با آلاینده‌های مختلف موجود در هوا جان خود را از دست می‌دهند، که این آمار در سال ۲۰۱۹ حدود ۱۲ درصد از کل مرگ‌ومیرها را شامل می‌شود (۱). از میان آلاینده‌های هوا، فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین گروه‌ها شناخته می‌شوند. این فلزات شامل کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب، آرسنیک و سایر عناصر مشابه هستند که به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاص خود، غیرقابل تجزیه بوده و می‌توانند در محیط زیست و بدن انسان تجمع یابند (۲).

فلزات سنگین به دلیل پایداری طولانی مدت در محیط زیست، قابلیت انتقال در زنجیره غذایی و اثرات سمی بر موجودات زنده، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات زیست‌محیطی برخوردار هستند (۳). با توجه به افزایش شهرنشینی و توسعه صنعتی، میزان فلزات سنگین در محیط‌های شهری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این فلزات از منابع مختلفی مانند فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری، فعالیت‌های معدنی، استفاده از کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی در کشاورزی، و حتی منابع طبیعی مانند آتشفشان‌ها به محیط وارد می‌شوند (۴). این آلاینده‌ها از طریق

استنشاق، تماس پوستی و یا بلع وارد بدن انسان شده و می‌توانند باعث بروز بیماری‌های حاد و مزمن نظیر اختلالات قلبی عروقی، بیماری‌های ژنتیکی، اختلالات عصبی و حتی سرطان شوند (۵). منطقه سیستان، واقع در جنوب شرقی ایران، با توجه به شرایط اقلیمی خاص خود، یکی از مناطقی است که به‌شدت تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین قرار دارد. این منطقه به دلیل وجود طوفان‌های گرد و غبار و بادهای شدید، به یکی از مهم‌ترین مناطق با آلودگی‌های گرد و غبار آلوده به فلزات سنگین تبدیل شده است (۵). سیستان با مساحتی حدود ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع، در محدوده جغرافیایی بین ۳۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (۶). اقلیم خشک و نیمه‌خشک سیستان، همراه با بادهای ۱۲۰ روزه که از اواخر بهار تا اوایل پاییز می‌وزند، شرایط مساعدی را برای ایجاد و انتشار گرد و غبار فراهم می‌کند. این گرد و غبارها می‌توانند حاوی مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین باشند که منشأ آن‌ها می‌تواند طبیعی (مانند فرسایش خاک) یا انسانی (مانند فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی) باشد (۷). تالاب بین‌المللی هامون، به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین در فلات ایران، نقش مهمی در اکوسیستم منطقه سیستان ایفا می‌کند. این تالاب با مساحتی حدود ۵۷۰۰ کیلومتر مربع، در مواقع پرآبی نقش مهمی در تعدیل اقلیم منطقه و جلوگیری از گسترش بیابان‌زایی دارد (۸).

اما در سال‌های اخیر، به دلیل خشکسالی‌های متوالی و کاهش ورودی آب از رودخانه هیرمند، بخش وسیعی از این تالاب خشک شده است. این خشک

ذراتی مضر برای سلامت انسان هستند که به مشکلات تنفسی در منطقه دامن می‌زنند. این مطالعه توصیه می‌کند که برای کاهش اثرات نامطلوب این ذرات بر کیفیت هوا و سلامت عمومی، شناخت منبع و ترکیب این ذرات ضروری است.

فلزات سنگین موجود در گرد و غبار می‌توانند از منابع مختلفی سرچشمه بگیرند. برخی از این منابع عبارتند از: فرسایش طبیعی خاک (۱۱)، فعالیت‌های کشاورزی (۱۲)، فعالیت‌های صنعتی (۱۳)، ترافیک جاده‌ای (۱۴) و انتقال از مناطق دور دست (۱۵).

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه، تعیین منابع آلودگی و تحلیل تغییرات فصلی و ماهانه در غلظت این فلزات با استفاده از روش‌های آماری است. برای تعیین منشأ فلزات سنگین، از روش‌های آماری چند متغیره همچون تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) و تحلیل خوشه‌ای^۲ (CA) استفاده شد. این روش‌ها امکان شناسایی الگوهای مشترک در داده‌ها و گروه‌بندی فلزات با منشأ مشابه را فراهم می‌کنند (۱۶). همچنین، از شاخص‌های ژئوشیمیایی مانند فاکتور غنی‌شدگی^۳ (EF) و شاخص آلودگی^۴ (PI) برای ارزیابی میزان آلودگی و تعیین سهم منابع انسانی در انتشار فلزات سنگین استفاده شد (۱۷). این مطالعه به بررسی ارتباط بین تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های اخیر و غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان می‌پردازد. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق، ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت آلودگی فلزات سنگین در منطقه، به

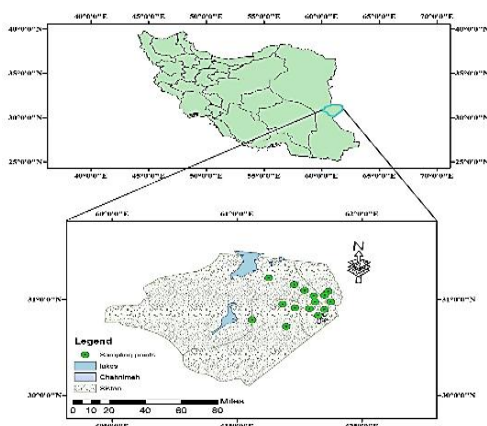
شدن نه تنها باعث از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی شده، بلکه به منبعی برای تولید گرد و غبار تبدیل شده است. صاحب‌زاده و همکاران (۹) با بررسی خطرات بهداشتی ناشی از رسوبات بادی هوابرد در سیستان، با تمرکز بر تأثیرات آن بر سلامت تنفسی و چشمی پرداختند. به دلیل بادهای قوی و مداوم، منطقه سیستان طوفان‌های گرد و غبار مکرری را تجربه می‌کند که عمدتاً از بسترهای خشک دریاچه هامون منشأ می‌گیرند. این مطالعه داده‌هایی از ۲۴۵۵ نفر که در دوره‌های بالای گرد و غبار در سال ۲۰۱۷ به دلیل مشکلات تنفسی و چشمی به مراکز درمانی مراجعه کرده‌اند، جمع‌آوری کرده بود. نتایج نشان داد که مناطقی نزدیک به مرز ایران و افغانستان، مانند دوست‌محمد و بزی‌الری، بالاترین خطرات بهداشتی را دارند. این مطالعه بر نیاز به مداخلات بهداشتی و مدیریت محیطی برای کاهش میزان قرارگیری در معرض گرد و غبار و کاهش اثرات بهداشتی در این مناطق پرخطر تأکید کرد. راشکی و همکاران (۱۰) ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی گرد و غبار هوابرد در سیستان، جنوب شرقی ایران را برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی آن بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که از دیدگاه کانی‌شناسی، این گرد و غبار عمدتاً از کوارتز، کلسیت و مسکویت تشکیل شده و دارای غلظت‌های بالای CaO ، SiO_2 و Al_2O_3 است. آن‌ها نشان دادند که طوفان‌های گرد و غبار که عمدتاً از بسترهای خشک دریاچه هامون منشأ می‌گیرند، توسط فرسایش بادی تشدید شده و شامل

¹ Principal Component Analysis

² Cluster Analysis

³ Enrichment Factor

⁴ Pollution Index



شکل (۱): موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

نمونه‌برداری به صورت ماهانه و در هر ایستگاه انجام شد. برای اطمینان از یکنواختی شرایط نمونه‌برداری، تمامی نمونه‌ها در ساعات مشابهی از روز (بین ساعت ۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر) و در شرایط جوی مشابه جمع‌آوری شدند. در مجموع، ۱۶۸ نمونه (۱۴ ایستگاه × ۱۲ ماه) در طول دوره مطالعه جمع‌آوری شد. برای جمع‌آوری نمونه‌های گرد و غبار، از دستگاه‌های پمپ نمونه‌بردار هوا استفاده شد. نمونه‌برداری در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و با رعایت فاصله حداقل ۲۰ متری از موانع بزرگ (مانند ساختمان‌ها یا درختان) انجام شد. زمان نمونه‌برداری برای هر نمونه ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که حجم کافی از گرد و غبار برای آنالیزهای بعدی جمع‌آوری می‌شود. فیلترهای مورد استفاده برای جمع‌آوری نمونه‌ها از جنس فایبرگلاس با قطر ۴۷ میلی‌متر و اندازه منافذ ۰/۸ میکرومتر بودند. قبل از نمونه‌برداری، فیلترها به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور نگهداری شدند و سپس وزن آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. پس از نمونه‌برداری، فیلترها مجدداً در دسیکاتور

تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی این آلاینده‌ها کمک کند. این یافته‌ها می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی‌های شهری و منطقه‌ای، و اقدامات حفاظتی در سیستان و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

بخش تجربی

این پژوهش با هدف بررسی جامع غلظت و منشأ فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان انجام شد. مطالعه حاضر از یک رویکرد چند مرحله‌ای شامل نمونه‌برداری میدانی، آنالیز آزمایشگاهی، و تحلیل‌های آماری بهره می‌برد.

- طرح مطالعه و نمونه‌برداری

این مطالعه در طول یک دوره یک‌ساله از ژانویه تا دسامبر ۲۰۲۳ در منطقه سیستان انجام شد. منطقه سیستان، واقع در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان، به دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، از جمله وجود بادهای ۱۲۰ روزه و خشکسالی‌های مکرر، مستعد تولید و انباشت گرد و غبار است. برای اطمینان از پوشش جامع منطقه، ۱۴ ایستگاه نمونه‌برداری انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها شامل مناطق شهری (۵ ایستگاه)، روستایی (۵ ایستگاه)، صنعتی (۲ ایستگاه) و کشاورزی (۲ ایستگاه) بودند. موقعیت دقیق هر ایستگاه با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شد. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس معیارهایی چون تراکم جمعیت، نوع کاربری زمین، جهت باد غالب و دسترسی به منطقه صورت گرفت که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

اسپکترو اکروس مدل ۷۶۰۰ ساخت کشور آلمان استفاده شد. هر اندازه گیری سه بار تکرار گردید.

- تحلیل‌های آماری و شاخص‌های آلودگی

پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین، تحلیل‌های آماری گسترده‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۶ و R نسخه ۴,۱,۰ انجام شد. ابتدا، آمار توصیفی شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، حداقل و حداکثر برای هر فلز محاسبه شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد و در صورت لزوم، از تبدیل لگاریتمی برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. برای بررسی تفاوت‌های فصلی و مکانی در غلظت فلزات سنگین، از آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون تعقیبی Tukey استفاده شد. همبستگی بین غلظت فلزات مختلف با استفاده از ضریب همبستگی Pearson محاسبه شد. برای شناسایی منابع احتمالی فلزات سنگین، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) استفاده شد. PCA برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای اصلی در توزیع فلزات سنگین به کار رفت، در حالی که HCA برای گروه‌بندی فلزات با منشأ مشابه استفاده شد.

علاوه بر این، دو شاخص مهم آلودگی یعنی فاکتور غنی‌شدگی (EF) و شاخص آلودگی (PI) به ترتیب مطابق با معادلات (۱) و (۲) محاسبه شدند:

$$EF = Sc/Rc \quad (1)$$

در معادله (۱)، Sc غلظت فلز مورد نظر و Rc غلظت عنصر در ماده مرجع است. نسبت این مقادیر در نمونه‌های گرد و غبار و پوسته زمین، میزان غنی‌شدگی

قرار داده شدند و وزن آن‌ها دوباره اندازه‌گیری شد. اختلاف وزن قبل و بعد از نمونه‌برداری، وزن گرد و غبار جمع‌آوری شده را مشخص می‌کند.

- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و مراحل آماده‌سازی برای آنالیز شیمیایی آغاز شد. ابتدا، فیلترهای حاوی نمونه‌های گرد و غبار در دمای ۱۰۵ سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به طور کامل از بین برود. سپس، نمونه‌ها با استفاده از هاون به صورت یکنواخت پودر شدند تا برای مرحله هضم اسیدی آماده شوند. برای هضم اسیدی نمونه‌ها، ۰/۵ گرم از هر نمونه پودر شده به یک بشر تفلونی ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۶۵ درصد و ۵ میلی‌لیتر کلریدریک اسید ۳۷ درصد به نمونه اضافه شد. مخلوط حاصل روی هات پلیت در دمای ۹۵ سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. در طول این مدت، بشرها با شیشه ساعت پوشانده شدند تا از تبخیر بیش از حد اسیدها جلوگیری شود (۱۸). پس از اتمام فرآیند هضم، نمونه‌ها از طریق کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ فیلتر شدند و با آب دیونیزه به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شدند. محلول‌های حاصل در ظروف پلی‌اتیلنی در دمای ۴ سانتی‌گراد تا زمان آنالیز با پلاسما جفت شده القایی نگهداری شدند.

- اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

برای اندازه‌گیری غلظت ۱۴ فلز سنگین مورد مطالعه (آرسنیک، سرب، کبالت، کروم، مس، لانتانیم، لیتیوم، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، توریم، وانادیوم و روی) از دستگاه پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES)

در این معادله n تعداد مشاهدات، P_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و O_i مقدار مشاهده شده است.

ضریب تعیین (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

در این معادله \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و R^2 نشان‌دهنده درصدی از تغییرات در متغیر وابسته است که توسط مدل توضیح داده می‌شود. مقدار R^2 بین ۰ و ۱ متغیر است و مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده برازش بهتر مدل است (۲۰). این شاخص‌های آماری برای هر یک از مدل‌های رگرسیون غیرخطی محاسبه شدند تا عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی غلظت فلزات سنگین بر اساس پارامترهای محیطی ارزیابی شود. مدل‌هایی با $MABE^3$ و $RMSE^4$ کم‌تر و R^2 بالاتر به عنوان مدل‌های بهینه در نظر گرفته شدند. استفاده از این شاخص‌های آماری امکان مقایسه عینی بین مدل‌های مختلف را فراهم می‌کند و به انتخاب بهترین مدل برای هر فلز سنگین کمک می‌کند. این ارزیابی‌ها همچنین می‌توانند برای شناسایی محدودیت‌های مدل‌ها و پیشنهاد بهبودهای آینده مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج و بحث

جدول (۱) غلظت بدست آمده فلزات سنگین مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. این نتایج برای درک وضعیت زیست‌محیطی و زمین‌شناختی منطقه بسیار ارزشمند است. همانطور که از نتایج موجود در جدول (۱) بر می‌آید، منگنز (Mn) با میانگین $63/01$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیش‌ترین مقدار را در میان عناصر

فلز را نشان می‌دهد. مقادیر EF به پنج دسته تقسیم شدند: $EF < 2$ (غنی‌شدگی کم)، $2 < EF < 5$ (غنی‌شدگی متوسط)، $5 < EF < 20$ (غنی‌شدگی قابل توجه)، $20 < EF < 40$ (غنی‌شدگی بسیار بالا) و $EF > 40$ (غنی‌شدگی شدید) (۱۹).

$$PI = \frac{C_m}{C_{standard}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، C_m غلظت فلز در نمونه و $C_{standard}$ مقدار استاندارد فلز در محیط است. برای $C_{standard}$ از استانداردهای کیفیت خاک استفاده شده است. مقادیر PI به چهار دسته تقسیم شدند: $PI < 1$ (غیر آلوده)، $1 < PI < 3$ (آلودگی کم)، $3 < PI < 2$ (آلودگی متوسط) و $PI > 3$ (آلودگی شدید) (۱۹).

- مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی

برای بررسی ارتباط بین غلظت فلزات سنگین و پارامترهای محیطی (دما و سرعت باد)، از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده شد. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار R و MATLAB توسعه داده شدند. دو مدل اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

- ارزیابی آماری مدل‌ها

۱. معیار اطلاعات آکائیکه (AIC^1):

$$AIC = 2K - 2\ln(L) \quad (3)$$

در این معادله K تعداد پارامترها در مدل و L برآورد حداکثر درست‌نمایی برای مدل است.

۲. میانگین مربعات خطا $(MSE)^2$:

$$MSE = \left(\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n} \right) \quad (4)$$

³ Mean Absolute Bias Error

⁴ Root Mean Square Error

¹Akaike Information Criterion

² Mean Squared Error

طور طبیعی در مقادیر کم و با توزیع نسبتاً یکنواخت در محیط وجود دارند.

آرسنیک (As) با میانگین ۵/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ضریب تغییرات بالا (۰/۵۷)، تغییرپذیری قابل توجهی را نشان می‌دهد. این تغییرپذیری می‌تواند نشان‌دهنده منابع نقطه‌ای آلودگی یا تغییرات طبیعی در ژئوشیمی منطقه باشد. با توجه به سمیت آرسنیک، مناطق با غلظت‌های بالاتر باید با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند.

کبالت (Co) و مس (Cu) با میانگین‌های به ترتیب ۱۰/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۴/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقادیر متوسطی را نشان می‌دهند. این عناصر برای بسیاری از موجودات زنده ضروری هستند، اما در غلظت‌های بالا می‌توانند سمی باشند. توزیع نسبتاً یکنواخت آن‌ها (با ضرایب تغییرات ۰/۱۷ و ۰/۱۹) نشان می‌دهد که احتمالاً این ترکیبات منشأ طبیعی دارند و از آلودگی‌های نقطه‌ای ناشی نمی‌شوند.

لیتیم (Li) با میانگین ۲۶/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و چولگی مثبت (۰/۸۵)، توزیعی با دنباله به سمت راست را نشان می‌دهد. این می‌تواند نشان‌دهنده وجود برخی نقاط با غلظت‌های بالاتر لیتیم در منطقه باشد که ممکن است از نظر اقتصادی مهم باشند، به ویژه با توجه به افزایش تقاضایی که برای لیتیم در صنعت باتری‌سازی وجود دارد.

مولیبدن (Mo) با کم‌ترین میانگین (۱/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضریب تغییرات نسبتاً بالا (۰/۳۶)، نشان می‌دهد که این عنصر به طور کلی در مقادیر کم وجود دارد اما توزیع آن در منطقه متغیر است. مولیبدن یک عنصر کمیاب است که در برخی سیستم‌های بیولوژیکی نقش مهمی ایفا می‌کند.

مورد بررسی دارد. این عنصر نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی ایفا می‌کند و حضور آن در مقادیر بالا می‌تواند نشان‌دهنده خاک‌های غنی از مواد آلی یا سنگ‌های مادر غنی از منگنز باشد. با این حال، ضریب تغییرات پایین (۰/۰۳) نشان می‌دهد که توزیع منگنز در منطقه نسبتاً یکنواخت است.

میانگین غلظت کروم (Cr)، ۸۱/۸۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. انحراف معیار ۱۴/۷۴ بدست آمده برای فلز کروم، نشان از تغییرپذیری قابل توجهی دارد. این تغییرپذیری می‌تواند ناشی از منابع طبیعی متنوع یا آلودگی‌های انسانی باشد. کروم در صنایع مختلف استفاده می‌شود و مقادیر بالای آن می‌تواند نگران‌کننده باشد، زیرا برخی از اشکال آن سمی هستند. وانادیم (V) و روی (Zn) با میانگین‌های نزدیک به هم (به ترتیب ۶۲/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۶۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضرایب تغییرات پایین، توزیع نسبتاً یکنواختی را نشان می‌دهند. این می‌تواند نشان‌دهنده منشأ زمین‌شناختی مشترک یا شرایط محیطی یکسان برای این دو عنصر باشد. نیکل (Ni) با میانگین ۴۹/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، چولگی منفی قابل توجه (۱/۸۳-) و کشیدگی بالا (۷/۸۵) را نشان می‌دهد. این آمار نشان می‌دهد که توزیع نیکل غیرعادی است و نشان‌دهنده نقاط آلودگی موضعی یا تغییرات زمین‌شناختی قابل توجه در منطقه باشد.

سریم (Ce) و لانتانیم (La)، که هر دو از عناصر خاکی کمیاب هستند، الگوهای مشابهی را نشان می‌دهند. میانگین‌های نسبتاً پایین (به ترتیب ۳۷/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضرایب تغییرات کم نشان می‌دهد که این عناصر به

سرب (Pb) با میانگین ۱۶/۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم و چولگی منفی اندک (۰/۲۸)، توزیعی نسبتاً متقارن را نشان می‌دهد. با توجه به اثرات سمی سرب، حتی در غلظت‌های پایین، مناطق با غلظت‌های بالاتر باید از نظر منابع احتمالی آلودگی مورد بررسی قرار گیرند. توریم (Th) با میانگین ۹/۸۱ میلی گرم بر کیلوگرم و کشیدگی منفی (۰/۴۰-)، توزیعی نسبتاً پهن را نشان می‌دهد. این عنصر رادیواکتیو به طور طبیعی در بسیاری از سنگ‌ها و خاک‌ها یافت می‌شود و می‌تواند شاخصی برای فعالیت‌های زمین‌شناختی خاص باشد. در مجموع، این داده‌ها تصویر جامعی از توزیع عناصر

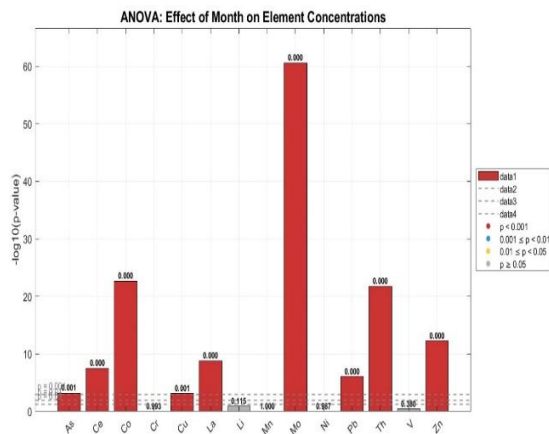
سنگین در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند. الگوهای مشاهده شده می‌توانند برای شناسایی مناطق با پتانسیل آلودگی، ارزیابی خطرات زیست‌محیطی و درک بهتر زمین‌شناسی منطقه مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، این اطلاعات می‌توانند برای طراحی برنامه‌های نظارتی و مدیریتی در آینده مفید باشند. با این حال، برای درک کامل‌تر وضعیت، بررسی‌های بیش‌تر از جمله مطالعه توزیع مکانی این عناصر، بررسی منابع احتمالی (طبیعی و انسانی) و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی آنها ضروری است.

جدول (۱): مقادیر آماری سالانه غلظت فلزات سنگین گرد و غبار منطقه سیستان (میلی گرم بر کیلوگرم)

عنصر	Mean	Std Dev	C.V.	Min	Max	Skewness	Kurtosis
As	۵/۶۸	۳/۲۴	۰/۵۷	۰/۰۰	۱۲/۹۰	۰/۶۲	-۰/۶۱
Ce	۳۷/۴۹	۲/۶۲	۰/۰۷	۳۲/۱۰	۴۴/۸۰	۰/۵۵	۰/۱۷
Co	۱۰/۸۹	۱/۸۶	۰/۱۷	۵/۷۰	۱۵/۰۰	-۰/۲۳	-۰/۲۵
Cr	۸۱/۲۷	۱۴/۷۴	۰/۱۸	۵۲/۹۹	۱۰۰/۹۰	-۰/۳۶	-۱/۲۷
Cu	۲۴/۰۳	۴/۴۵	۰/۱۹	۱۴/۲۴	۳۲/۸۰	-۰/۰۶	-۰/۷۷
La	۲۰/۵۶	۲/۲۰	۰/۱۱	۱۶/۵۰	۲۶/۳۰	۰/۴۴	-۰/۲۱
Li	۲۶/۸۱	۲/۸۰	۰/۱۰	۲۱/۵۰	۳۳/۷۲	۰/۸۵	۰/۰۲
Mn	۴۶۳/۰۱	۱۲/۲۹	۰/۰۳	۴۴۸/۵۰	۴۸۶/۳۲	۰/۵۵	-۱/۳۶
Mo	۱/۷۹	۰/۶۴	۰/۳۶	۰/۷۰	۳/۵۲	۰/۴۸	-۰/۲۸
Ni	۴۹/۳۱	۱۱/۰۱	۰/۲۲	۱/۵۲	۶۷/۳۲	-۱/۸۳	۷/۸۵
Pb	۱۶/۵۴	۳/۰۴	۰/۱۸	۹/۹۰	۲۳/۶۲	-۰/۲۸	-۰/۶۰
Th	۹/۸۱	۱/۳۸	۰/۱۴	۶/۴۹	۱۳/۳۰	۰/۰۶	-۰/۴۰
V	۶۲/۸۶	۳/۶۷	۰/۰۶	۵۴/۹۰	۷۱/۸۰	-۰/۳۹	-۰/۳۶
Zn	۶۰/۰۷	۳/۰۹	۰/۰۵	۵۳/۴۹	۶۹/۳۵	۰/۴۵	۰/۳۰

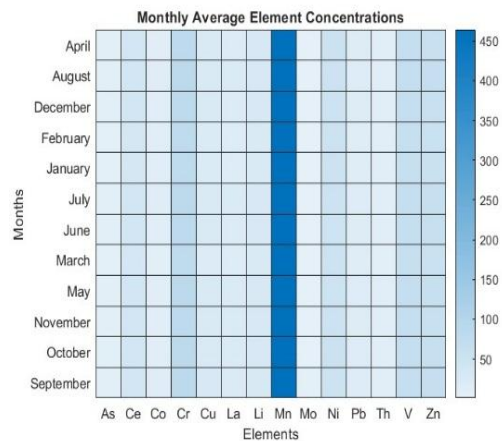
همچنین اثر ماه نمونه‌برداری بر غلظت عناصر نیکل، وانادیوم، کروم، لیتیم و منگنز معنادار نمی‌باشد (۰/۰۵ > p). بطور کلی بیش از نیمی از عناصر (۹ از ۱۴) تغییرات معناداری در طول ماه‌ها نشان می‌دهند، که نشان می‌دهد عوامل فصلی به شدت بر غلظت آن‌ها تأثیر می‌گذارند. کم‌تر از نیمی از عناصر (۵ از ۱۴) تغییرات ماهانه معناداری نشان نمی‌دهند، که نشان می‌دهد غلظت آن‌ها در طول سال نسبتاً ثابت می‌ماند یا تغییرات آن‌ها از نظر آماری معنادار نیست.

این نتایج نشان می‌دهد که عوامل محیطی که با فصول تغییر می‌کنند (مانند دما، بارندگی یا فعالیت‌های بیولوژیکی) تأثیر قابل توجهی بر غلظت برخی از عناصر مورد مطالعه دارند، در حالی که برخی دیگر به نظر می‌رسد کم‌تر تحت تأثیر این تغییرات فصلی قرار می‌گیرند.



شکل (۳): نمودار تغییرات p-value تأثیر ماه بر غلظت فلزات سنگین گرد و غبار

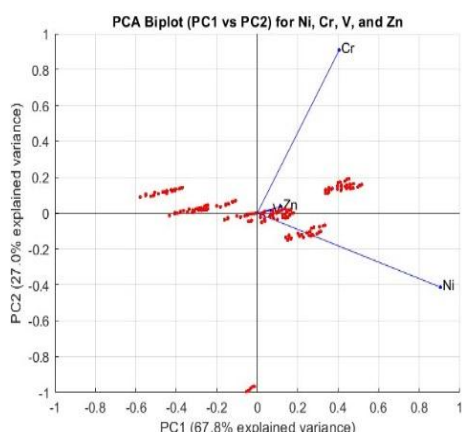
شکل (۴) تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) الگوهای توزیع و همبستگی عناصر نیکل (Ni)، کروم (Cr)، وانادیم (V) و روی (Zn) را نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی اول (PC1)، ۶۷٪ و مؤلفه دوم (PC2)، ۲۷٪ از



شکل (۲): میانگین ماهانه غلظت عناصر در طول سال

شکل (۲) تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در فصل بهار، غلظت‌ها از سطح نسبتاً پایین شروع به افزایش می‌کنند. در فصل تابستان غلظت اکثر فلزات به بالاترین مقدار می‌رسد. در فصل پاییز، روند کاهشی غلظت فلزات سنگین آغاز می‌شود، بطوریکه در زمستان کم‌ترین غلظت‌ها بدست می‌آید. این الگو نشان‌دهنده ارتباط بین شرایط آب و هوایی و غلظت فلزات سنگین است. به دلیل افزایش فعالیت‌های گرد و غباری و فرسایش بادی در فصول گرم، افزایش غلظت فلزات سنگین در تابستان دیده شد. این تحلیل می‌تواند برای درک بهتر منابع و مکانیسم‌های انتشار فلزات سنگین و تدوین استراتژی‌های مدیریتی مناسب در فصول مختلف مفید باشد.

شکل (۳) نمودار ANOVA برای بررسی تأثیر ماه نمونه‌برداری بر غلظت فلزات سنگین موجود در گرد و غبار را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل بر می‌آید، اثر ماه نمونه‌برداری بر غلظت عناصر آرسنیک، کبالت، مس، مولیبدن، سرب، سربیم، لانتانوم، توریم و روی معنادار است (p < ۰/۰۰۱).



شکل (۴): تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) الگوهای توزیع و همبستگی عناصر فلزی نیکل (Ni)، کروم (Cr)، وانادیم (V) و روی (Zn) در نمونه‌های محیطی

- فاکتور غنی‌شدگی (EF)

فاکتور غنی‌شدگی برای تعیین منابع احتمالی طبیعی یا انسانی فلزات در گرد و غبار استفاده می‌شود. در این مطالعه، از عنصر لیتیم (Li) به عنوان عنصر مرجع استفاده شده است، زیرا تغییرات کم‌تری در محیط دارد و کم‌تر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد. نتایج محاسبات EF برای فلزات مختلف نشان می‌دهد که غیر از وانادیوم، کروم و آرسنیک که فاکتور غنی‌شدگی متوسط دارند، بقیه فلزات بررسی شده دارای فاکتور غنی‌شدگی کم هستند (جدول (۲)).

واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند، که مجموعاً ۹۴/۸٪ از تغییرپذیری داده‌ها را پوشش می‌دهند. کروم و نیکل بیش‌ترین تأثیر را بر PC1 دارند، اما در جهات مخالف، که نشان‌دهنده همبستگی منفی قوی بین آنهاست. وانادیم و روی تأثیر کم‌تری بر PC1 دارند و بیش‌تر با PC2 مرتبط هستند. پراکندگی نقاط قرمز که نمونه‌های فردی را نشان می‌دهند، حاکی از تنوع زیاد در داده‌هاست، که بیش‌تر تمرکز در مقادیر مثبت PC1 و PC2 است. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده منابع مختلف این عناصر یا شرایط محیطی متفاوت در نمونه‌برداری باشد. برای درک کامل‌تر، بررسی اطلاعات زمینه‌ای مانند موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی نمونه‌برداری ضروری است.

میری و همکاران (۲۱) عوامل اقلیمی و زمینی مؤثر بر طوفان‌های گرد و غبار در منطقه سیستان ایران را طی ۲۳ سال (۱۹۹۷-۲۰۱۹) بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که طوفان‌های گرد و غبار در تابستان به دلیل بادهای شدید، بارندگی کم و پوشش گیاهی اندک، بیش‌ترین شدت را دارند. بسترهای خشک دریاچه هامون، به‌ویژه هامون صابری، به عنوان منابع اصلی گرد و غبار عمل می‌کنند که به دلیل کاهش جریان آب از رودخانه‌های افغانستان تشدید شده‌اند. بیش‌ترین فعالیت گرد و غبار بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ رخ داده است که با خشکسالی شدید هم‌زمان بوده است. توصیه‌های کلیدی شامل مدیریت پایدار منابع آبی و احیای پوشش گیاهی در منطقه هامون برای کاهش تأثیرات طوفان‌های گرد و غبار است.

در مناطق شهری ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد که دارای ریسک اکولوژیک متوسط هستند.

- شاخص آلودگی (PI)

شاخص آلودگی برای هر فلز به صورت جداگانه محاسبه شده و نتایج در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): شاخص آلودگی عناصر موجود در گرد و غبار سیستان

عنصر	شاخص آلودگی (PI)	شدت آلودگی
As	۱/۶	(آلودگی کم)
Ce	۱	(آلودگی کم)
Co	۰/۷	(غیر آلوده)
Cr	۱/۴	(آلودگی کم)
Cu	۱/۱	(آلودگی کم)
La	۰/۵	(غیر آلوده)
Li	۱/۰	(غیر آلوده)
Mn	۰/۸	(غیر آلوده)
Mo	۰/۷	(غیر آلوده)
Ni	۰/۹	(غیر آلوده)
Pb	۰/۷	(غیر آلوده)
Th	۰/۵	(غیر آلوده)
V	۱/۳	(آلودگی کم)
Zn	۱/۱	(آلودگی کم)

بر اساس نتایج شاخص آلودگی، می‌توان گفت که اکثر فلزات مورد بررسی غیر آلوده هستند. با این حال، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، مس (Cu)، و انادیوم (V) و روی (Zn) دارای آلودگی کم هستند که نیاز به توجه بیش‌تری دارند. دهقانی و همکاران (۲۴) با بررسی گرد و غبار تهران نتیجه گرفتند که آلودگی سه عنصر مس، سرب و روی در گرد و غبار ناشی از منابع انسان‌ساز ماند فرسودگی لاستیک خودروها، ساییدگی ترمزها و احتراق سوخت‌های فسیلی است.

جدول (۲): فاکتور غنی‌شدگی عناصر موجود در گرد و غبار

عنصر	فاکتور غنی‌شدگی (EF)	شدت
As	۲/۸	(غنی‌شدگی متوسط)
Ce	۱/۲	(غنی‌شدگی کم)
Co	۰/۹	(غنی‌شدگی کم)
Cr	۲/۳	(غنی‌شدگی متوسط)
Cu	۱/۸	(غنی‌شدگی کم)
La	۰/۷	(غنی‌شدگی کم)
Mn	۱/۴	(غنی‌شدگی کم)
Mo	۱/۱	(غنی‌شدگی کم)
Ni	۱/۵	(غنی‌شدگی کم)
Pb	۱/۲	(غنی‌شدگی کم)
Th	۰/۸	(غنی‌شدگی کم)
V	۲/۱	(غنی‌شدگی متوسط)
Zn	۱/۹	(غنی‌شدگی کم)

بر اساس جدول (۲)، می‌توان گفت که اکثر فلزات مورد بررسی دارای غنی‌شدگی حداقل هستند، که نشان‌دهنده منشأ عمدتاً طبیعی آن‌ها در گرد و غبار است. با این حال، آرسنیک (As)، کروم (Cr) و وانادیوم (V) دارای غنی‌شدگی متوسط هستند که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر نسبی فعالیت‌های انسانی بر غلظت این فلزات در گرد و غبار باشد. مطالعات مشابه در نقاط دیگر نتایج مشابه و متفاوتی از این یافته‌ها را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، قنوتی و همکاران (۲۲) با بررسی گرد و غبار آبادان به این نتیجه رسیدند که فلزات سنگین روی و کروم دارای ریسک اکولوژیکی پایینی هستند در حالیکه ریسک اکولوژیک آرسنیک متوسط و ریسک اکولوژیک سرب بالا می‌باشد. دیاز ریزو و همکاران (۲۳) با بررسی گرد و غبار هاوانا در کوبا به این نتیجه رسیدند که غلظت زیاد سرب و روی

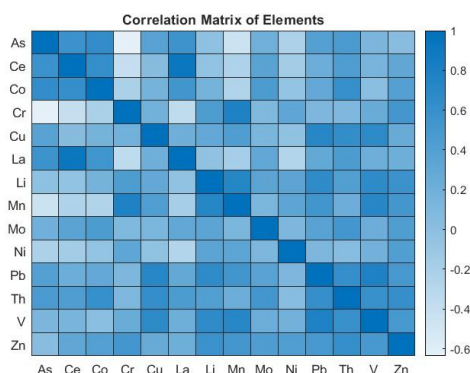
- روابط خطی و غیرخطی بین عناصر

برای یافتن مناسب‌ترین روابط خطی و غیرخطی بین عناصر، ابتدا باید ماتریس همبستگی بین عناصر مختلف بدست آورده شود. سپس برای چهار عنصری که بیش‌ترین همبستگی را با سایر عناصر دارند، روابط خطی و غیرخطی پیشنهاد می‌شود.

روابط خطی و غیرخطی پیشنهادی بین عناصر در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): روابط خطی و غیرخطی بین غلظت فلزات سنگین موجود در گرد و غبار

عنصر	معادله خطی	معادله غیرخطی
Ni	$Ni = -18.2515 + 0.356 \times Cu - 0.609 \times Cr + 0.8707 \times V$	$Ni = -3.6010 + 0.0023 \times Cu^2 - 13.2412 \times \ln(Cr) + 42.8951 \times e^{(V/100)}$
Cr	$Cr = -389.56 + 1.2982 \times Ni + 0.2564 \times V - 2.2802 \times Mn$	$Cr = -6907458 + 54.2400 \times Ni^{0.5} + 17.1699 \times \ln(V) - 133.5185 \times Mn^{0.3}$
V	$V = 29.6193 - 0.0219 \times Ni + 0.067 \times Cr + 0.5225 \times Zn$	$V = 11.3282 - 2.4548 \times \log(Ni) + 0.9682 \times Cr^{0.5} + 30.3684 \times e^{(Zn/100)}$
Zn	$Zn = 38.9342 - 0.1793 \times Cu + 0.3942 \times Pb + 0.3011 \times V$	$Zn = 33.7287 - 0.355 \times Cu^{0.8} + 4.1694 \times \ln(Pb) + 0.1336 \times V^{1.2}$



شکل (۵): ماتریس همبستگی عناصر در نمونه‌های محیطی

بر اساس بررسی اولیه داده‌ها از شکل (۵)، به نظر می‌رسد عناصر نیکل، کروم، وانادیوم و روی همبستگی نسبتاً خوبی با سایر عناصر دارند.

همچنین آنالیزهای آماری مربوط به روابط خطی و غیرخطی عناصر در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): آنالیز آماری مربوط به روابط خطی و غیرخطی عناصر موجود در گرد و غبار

عنصر	AIC_خطی	AIC_غیرخطی	R ² _خطی	R ² _غیرخطی	MSE_خطی	MSE_غیرخطی
Ni	۴۸۸/۵۹	۴۸۴/۹۶	۰/۶۷	۰/۶۸	۱۷/۴۷	۱۷/۱۰
Cr	۶۴۰/۲۵	۶۳۲/۰۱	۰/۸۰	۰/۸۱	۴۳/۰۹	۴۱/۰۳
V	۳۹۶/۶۵	۳۹۵/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۵	۱۰/۱۱	۱۰/۰۲
Zn	۳۲۷/۰۹	۳۳۲/۵۹	۰/۳۰	۰/۲۷	۶/۶۸	۶/۹۰

معادلات روابط بین عنصر مورد نظر و سایر عناصر را نشان می‌دهند.

برای ارزیابی کارایی این مدل‌ها، در جدول (۵)، سه معیار آماری استفاده شده است: معیار اطلاعات آکائیکه (AIC)، ضریب تعیین (R²) و میانگین مربعات خطا

در جدول (۴)، مقایسه بین مدل‌های خطی و غیرخطی برای چهار عنصر شیمیایی نیکل، کروم، وانادیوم و روی ارائه شده است. هر عنصر با دو معادله توصیف می‌شود: یکی خطی و دیگری غیرخطی. این

و غبار این طوفان‌ها به‌طور قابل توجهی بر کیفیت هوا و سلامت عمومی در مناطق تحت تأثیر اثر می‌گذارد و نقشی در تغییر محیط‌های جوی و دریایی ایفا می‌کند، به طوری که در دوره‌های با فراوانی بالای طوفان‌های گرد و غبار، عمق نوری آتروسول‌ها بر فراز شمال دریای عرب افزایش می‌یابد.

این نتایج نشان می‌دهد که روابط بین این عناصر و متغیرهای پیش‌بینی کننده آن‌ها اغلب پیچیده‌تر از روابط خطی ساده هستند. مدل‌های غیرخطی با در نظر گرفتن این پیچیدگی‌ها، معمولاً قادر به توصیف بهتر این روابط هستند. با این حال، مورد روی یادآور این نکته است که همیشه باید هر دو نوع مدل را بررسی کرد، زیرا گاهی مدل ساده‌تر خطی می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش، تصویر جامعی از وضعیت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان به دست آمد. نتایج نشان داد که غلظت این فلزات دارای تغییرات فصلی قابل توجهی است، به طوری که بیش‌ترین مقادیر در فصل تابستان مشاهده شد. این الگوی فصلی احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت‌های گرد و غباری و فرسایش بادی در فصول گرم است. تحلیل فاکتور غنی‌شدگی (EF) و شاخص آلودگی (PI) نشان داد که اگرچه اکثر فلزات مورد بررسی منشأ طبیعی دارند، برخی عناصر مانند آرسنیک، کروم و وانادیم نشانه‌هایی از تأثیر فعالیت‌های انسانی را نشان می‌دهند که نیاز به مطالعات بیشتر و اقدامات احتمالی برای کاهش انتشار آن‌ها دارند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) امکان شناسایی الگوهای اصلی در توزیع

(MSE). AIC کمتر، R^2 بالاتر و MSE کم‌تر نشان‌دهنده برازش بهتر مدل است.

در مورد نیکل، مدل غیرخطی با AIC ۴۸۴/۹۶ در مقابل ۴۸۸/۵۹ مدل خطی، R^2 ۰/۶۸ در مقابل ۰/۶۷ و MSE ۱۷/۱۰ در مقابل ۱۷/۴۷، عملکرد بهتری نشان می‌دهد. این الگو برای کروم نیز تکرار می‌شود، جایی که مدل غیرخطی با AIC ۶۳۲/۰۱، R^2 ۰/۸۱ و MSE ۴۱/۰۳ در مقابل مقادیر ۶۴۰/۲۵، R^2 ۰/۸۰ و ۴۳/۰۹ برای مدل خطی، برتری دارد.

وانادیم نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد، اگرچه تفاوت‌ها خیلی کم است. مدل غیرخطی با AIC ۳۹۵/۱۶، R^2 ۰/۲۵ و MSE ۱۰/۰۲ در مقابل مقادیر ۳۹۶/۶۵، R^2 ۰/۲۴ و برای مدل خطی، اندکی بهتر عمل می‌کند.

روی تنها استثنا در این مجموعه بود. برای این عنصر، مدل خطی با AIC ۳۲۷/۰۹، R^2 ۰/۳۰ و MSE ۶/۶۸ در مقابل مقادیر ۳۳۲/۵۹، R^2 ۰/۲۷ و ۶/۹۰ برای مدل غیرخطی، عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

راشکی و همکاران (۲۵) با بررسی پویایی‌های فصلی و ویژگی‌های انتقال طوفان‌های گرد و غبار که از منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ منشأ می‌گیرند، نشان دادند که طوفان‌های گرد و غبار در تابستان، به‌ویژه در ماه‌های ژوئن و ژوئیه، به دلیل بادهای شدید فصلی معروف به "باد لوار" یا "باد ۱۲۰ روزه" بیش‌ترین فراوانی را دارند. تحلیل‌های ماهواره‌ای نشان داد که ستون‌های گرد و غبار سیستان مسیری به شکل U را طی می‌کنند، ابتدا به سمت جنوب حرکت کرده و سپس به سمت شرق-شمال‌شرق به سوی دریای عرب منحرف می‌شوند و گاه تا مناطقی در هند تأثیر می‌گذارند. گرد

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., Ali, I., Naz, I., 2022, A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges, *Chemosphere*, 291, 132979.
- [2] Latif, A., Sheng, D., Sun, K., Si, Y., Azeem, M., Abbas, A., Bilal, M., 2020, Remediation of heavy metals polluted environment using Fe-based nanoparticles: Mechanisms, influencing factors, and environmental implications, *Environmental Pollution*, 264, 114728.
- [3] Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T.B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal-Gandara, J., 2022, Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity, *Journal of King Saud University - Science*, 34, 101865.
- [4] Jin, M., Yuan, H., Liu, B., Peng, J., Xu, L., Yang, D., 2020, Review of the distribution and detection methods of heavy metals in the environment, *Analytical Methods*, 12, 5747.
- [5] Dahmardeh Behrooz, R., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Mihalopoulos, N., 2021, Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran, *Chemosphere*, 262, 127835.
- [6] Kiran, Bharti, R., Sharma, R., 2022, Effect of heavy metals: An overview, *Materials Today: Proceedings*, 51, 880.
- [7] Shi, T., Wang, Y., 2021, Heavy metals in indoor dust: Spatial distribution, influencing factors, and potential health risks, *Science of the Total Environment*, 755, 142367.
- [8] Rad, A.M., Kreidler, J., Abatzoglou, J.T., Fallon, K., Roche, K.R., Sadegh, M., 2022, Anthropogenic stressors compound climate impacts on inland lake dynamics: The case of Hamun Lakes, *Science of the Total Environment*, 829, 154419.
- [9] Sahebzadeh, B., Shabani-Goraji, K., Shoaie, Z., Afshari, M., 2019, Statistical study of eolian sediment distribution risk in human ecosystems on the health of respiratory system and the eyes

فلزات سنگین را فراهم کرد و نشان داد که عناصری مانند کروم و نیکل دارای همبستگی منفی قوی هستند، در حالی که وانادیم و روی ارتباط نزدیکتری با یکدیگر دارند. این یافته‌ها می‌تواند به درک بهتر منابع و رفتار این عناصر در محیط کمک کند. همچنین در این مطالعه، روابط خطی و غیرخطی بین عناصر بررسی شد. نتایج نشان داد که در اکثر موارد، مدل‌های غیرخطی توصیف بهتری از روابط بین عناصر ارائه می‌دهند. این یافته نشان‌دهنده پیچیدگی تعاملات بین فلزات سنگین در محیط است و اهمیت استفاده از رویکردهای پیشرفته آماری در مطالعات زیست‌محیطی را برجسته می‌کند. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که بیش از نیمی از عناصر مورد مطالعه تغییرات معناداری در طول ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهند، در حالی که نیمی دیگر نسبتاً ثابت باقی می‌مانند. این یافته اهمیت در نظر گرفتن تغییرات فصلی در مطالعات مربوط به آلودگی هوا و برنامه‌های نظارتی را نشان می‌دهد. متأسفانه به دلیل کمبود بودجه امکان خرید تجهیزات نمونه برداری با حجم بالا برای این تحقیق میسر نبود. ضمناً شرایط بسیار حاد گرمایی و طوفانی در بعضی روزها نمونه برداری را با مشکل روبرو می‌ساخت. این مطالعه با ارائه یک رویکرد جامع و نوآورانه به بررسی فلزات سنگین در گرد و غبار، گامی مهم در جهت درک بهتر وضعیت زیست‌محیطی منطقه سیستان برداشته است. با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و تأثیر آن‌ها بر سلامت انسان و اکوسیستم‌ها، چنین مطالعاتی نقش حیاتی در ارتقای دانش ما و بهبود استراتژی‌های مدیریت محیط زیست ایفا می‌کنند.

- [19] Zhang, H., Zhang, F., Song, J., Tan, M.L., Kung, H., Johnson, V.C., 2021, Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China, *Environmental Research*, 202, 111702.
- [20] Duan, Z., Wang, J., Cai, X., Wu, Y., Xuan, B., 2020, Spatial distribution and human health risk assessment of heavy metals in campus dust: A case study of the university town of Huaxi, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26, 986.
- [21] Miri, A., Maleki, S., Middleton, N., 2021, An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century, *Science of the Total Environment*, 757, 143952.
- [22] Ghanavati, N., Nazarpour, A., Watts, M.J., 2019, Status, source, ecological and health risk assessment of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Abadan, Iran, *Catena*, 177, 246.
- [23] Díaz Rizo, O., Casanova Díaz, A.O., Torres Ramos, A.G., Ramos López, D., 2023, Heavy metals concentration, pollution indexes, and health risk assessment of urban road dust in the historical center of Havana, Cuba, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 349.
- [24] Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B., Hale, B.A., 2017, Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 136, 92.
- [25] Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Francois, P., Kosmopoulos, P.G., Legrand, M., 2015, Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas, *Aeolian Research*, 16, 35.
- of inhabitants of Sistan, East Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 227.
- [10] Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.J.D.W., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., Dykstra, J., 2013, Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran, *Chemosphere*, 90, 227.
- [11] Dahmardeh Behrooz, R., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D.G., 2017, Analysis of the TSP, PM10 concentrations and water-soluble ionic species in airborne samples over Sistan, Iran during the summer dusty period, *Atmospheric Pollution Research*, 8, 403.
- [12] Doabi, S.A., Karami, M., Afyuni, M., Yeganeh, M., 2018, Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 153.
- [13] Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L., Shen, Z., 2018, The impact of seasonal varied human activity on characteristics and sources of heavy metals in metropolitan road dusts, *Science of the Total Environment*, 637, 844.
- [14] Wei, B., Yang, L., 2010, A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China, *Microchemical Journal*, 94, 99.
- [15] Mirzaei Aminiyan, M., Baalousha, M., Mousavi, R., Mirzaei Aminiyan, F., Hosseini, H., Heydariyan, A., 2018, The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: A case study in Rafsanjan, SE Iran, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 13382.
- [16] Kadhum, S.A., 2020, A preliminary study of heavy metals pollution in the sandy dust storms and its human risk assessment from middle and south of Iraq, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8570.
- [17] Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z., 2010, Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China, *Science of the Total Environment*, 408, 726.
- [18] Sadeghdoust, F., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaenejad, T., Watts, M.J., 2020, Hazard, ecological, and human health risk assessment of heavy metals in street dust in Dezful, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 881.

“Research article”

Investigation of heavy metal concentration, origin, and relationships in Sistan region dust: A novel approach with advanced statistical analysis

Seyed Mohammad Sadeq Tabib Loghmani¹, Mohammad Reza Rezaei Kahkha^{2*}, Ahmad Sharafati¹, Amin Reza Neshat³

¹Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

³Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: rezaei@zbmu.ac.ir

(Received: 18 September 2024, Accepted: 30 November 2024)

Abstract

This study investigates the concentrations and origins of heavy metals in dust from the Sistan region in southeastern Iran. Dust samples were collected over a year from 14 stations across urban, rural, industrial, and agricultural areas. The concentrations of 14 heavy metals were determined using atomic absorption spectrometry. The results indicated that manganese had the highest average concentration (463.01 mg/kg), while molybdenum had the lowest (1.79 mg/kg). Significant seasonal variations were observed, with the highest concentrations recorded in summer. Enrichment factors (EF) for arsenic, chromium, and vanadium were calculated as 2.8, 2.3, and 2.1, respectively, signifying moderate enrichment. The pollution index (PI) also reflected moderate pollution for these elements. Principal component analysis (PCA) revealed that the first two components accounted for 94.8% of the data variability. Relationships among elements showed that nonlinear models often provided better fits, with higher R² values (e.g., 0.81 for chromium) and lower mean squared errors (MSE). Analysis of variance (ANOVA) demonstrated significant monthly variations ($p < 0.001$) for 7 of the 14 elements. This comprehensive and innovative study enhances understanding of heavy metal contamination in the Sistan region's dust. Its findings can support the development of more effective pollution management strategies and contribute to protecting public health in the area.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Heavy metals, Dust, Sistan region, Contamination, Environment