# بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف کارخانه‌های سیمان و ذوب فلزات، جنوب شرق تهران، و ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

**بهروز رفیعی[1*] ، فرهاد آلیانی[1]، معصومه فرشباف[2]**

۱- دانشیار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- کارشناس ارشد آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران

*b_rafiei@basu.ac.ir

**دریافت: ۹۰/۲/۳ پذیرش: ۹۰/۵/۲۳**

**چکیده**

غلظت کلی ۶ فلز سنگین (سرب، مس، روی، نیکل، کروم و کبالت) در خاک‌های محدوده اطراف کارخانه‌های سیمان تهران و ذوب فلزات اندازه‌گیری گردید. نمونه‌ها توسط XRD تحت آنالیز قرار گرفت. فراوانی فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در خاک به این ترتیب کاهش می‌یابد: Pb > Zn > Cr > Cu > Ni >> Co. ارتباط غلظت هر فلز سنگین با عوامل مختلفی مانند اسیدیته خاک، میزان و نوع رس، مقدار مواد آلی، قابلیت تبادل کاتیونی خاک، مقدار کربنات کلسیم و اکسیدهای آهن و آلومینیوم بررسی شده است. هیچ یک از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی به تنهایی بر میزان عناصر سنگین مورد مطالعه تأثیر مشخصی ندارند اما اکسیدهای آلومینیم و آهن، مقدار رس، pH و به نسبت کم‌تر $SiO_2$، درصد ماسه و قابلیت تبادل کاتیونی (CEC) بیش‌ترین تأثیر را بر جذب فلزات سنگین داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های مورد مطالعه نسبت به سرب شدیداً آلوده، به مس و روی غیر آلوده تا با آلودگی متوسط می‌باشند. منشأ این عناصر عوامل انسانی تعیین شده است. این خاک‌ها نسبت به نیکل، کروم و کبالت غیر آلوده می‌باشند. این عناصر منشأ طبیعی دارند.

**واژه‌های کلیدی**: عناصر سنگین، آلودگی خاک، خصوصیات فیزیکوشیمیایی، کارخانه سیمان، تهران

## مقدمه

تهران پایتخت ایران یکی از شهرهای بزرگ آسیا می‌باشد. یکی از مشکلاتی که این شهر در پیش رو دارد مسئله آلودگی هوا و آب و به تبع آن آلودگی خاک است. آلودگی به ویژه آلودگی توسط فلزات سنگین در بسیاری از جوامع شهری امروزی و صنعتی مورد توجه خاص قرار گرفته است[۱۷ و۲۲] و ارتباط بین این گونه آلودگی و مسایل مختلف بهداشتی کاملاً شناخته شده می‌باشد [۷]. خاک معمولاً محل تماس فعالیت‌های بشری و آن بخش از محیط است که باید مورد حفاظت قرار گیرد [۲۰]. فلزات سنگین در خاک‌ها به خصوص خاک‌های شهری ردیاب‌های بسیار خوبی برای نمایش میزان آلودگی محیطی هستند [برای مثال ۴، ۹ و ۱۴]، زیرا که این فلزات وابسته به فعالیت‌های انسانی معمولاً در سطح بالایی خاک نهشته می‌شوند. با این حال خاک‌ها نه تنها به عنوان منشأ عناصر خاصی هستند بلکه می‌توانند به عنوان محلی برای تجمع این عناصر آلاینده باشند [۵]. بدین ترتیب آنالیز عناصر سنگین در خاک روشی ایده‌آل است که توسط آن نه تنها آلودگی خاک بلکه کیفیت محیط پیرامونی را که در خاک منعکس شده، نشان داده می‌شود [۱۰ و ۲۰].

ضمناً خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH، درصد ماسه و رس، مقدار کربنات کلسیم موجود درخاک، مقدار مواد آلی، قابلیت تبادل کاتیونی (CEC)[1]، نوع کانی رسی، درصدهای وزنی اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن تأثیر مشخصی در میزان جذب عناصر سنگین دارد [۱۵].

کارخانه سیمان تهران در شرق تهران یکی از منابع آلاینده محیط می‌باشد. غبار و گازهای خروجی از دودکش‌های این کارخانه حاوی بسیاری از مواد آلاینده به ویژه فلزات سنگین است. ضمناً در مجاورت این محل، کارخانه ذوب فلزات وجود دارد. غبارهای خروجی از کارخانه سیمان و

[1] Cation Exchange Capacity

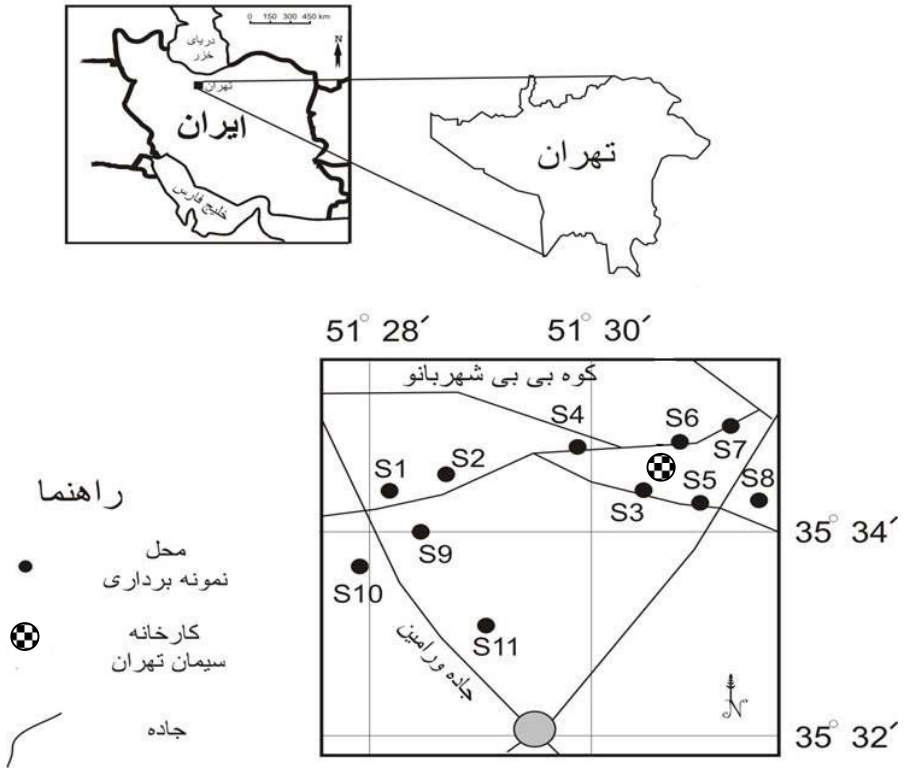
ضایعات ناشی از کارخانه ذوب فلزات (و البته شاید گازهای اطراف این کارخانجات باشد. هدف از این مطالعه، اندازه گیری مقادیر عناصر سنگین مس، روی، سرب، نیکل، کروم و کبالت در خاک‌های اطراف کارخانه‌های سیمان تهران و ذوب فلزات، تعیین شدت آلودگی خاک نسبت به این عناصر، تعیین منشأ این عناصر و تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها می‌باشد. ضمناً سعی شده که ارتباطی بین مقدار عناصر سنگین و آلودگی ناشی از آن‌ها و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک برقرار شود. بدین ترتیب تأثیر هر یک از این ویژگی‌ها در جذب عناصر سنگین مشخص گردید.

## موقعیت جغرافیایی

کارخانه سیمان در جنوب شرقی تهران در مجاورت روستاهای حاجی آباد سفلی و علیا در موقعیت "۳۹ '۳۴ °۳۵ شمالی و "۴۸ '۲۸ °۵۱ شرقی قرار دارد (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه حدود ۱۰۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. این کارخانه در نزدیکی کوه بی‌بی شهربانو واقع شده است. کارخانه ذوب فلزات نیز در مجاورت کارخانه سیمان واقع شده است. این خاک‌ها بر روی رسوبات خروجی از خودروها) می‌توانند عامل آلودگی مناطق آبرفتی تهران با سن پلیستوسن گسترش یافته‌اند که خود حاصل فرسایش کوه‌های البرز و نیز کوه بی‌بی شهربانو در منطقه هستند. رژیم حرارتی خاک در این منطقه ترمیک و رژیم رطوبتی خاک خشک می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

تعداد ۱۱ نمونه خاک (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) به طور تصادفی از اطراف کارخانه سیمان و ذوب فلزات برداشت شده است. نیمی از نمونه‌ها در پیرامون چند صد متری کارخانه سیمان واقع شده و بقیه در جنوب غرب آن متمرکز شده‌اند. خاک‌ها در داخل پاکت‌های پلی‌اتیلن جمع‌آوری شده است و جهت انجام آنالیز به آزمایشگاه منتقل گردید. خاک‌های نمونه‌برداری شده شامل دو دسته هستند: خاک‌های صنعتی که عمدتاً در مجاورت ناحیه صنعتی کارخانه‌های سیمان و ذوب فلزات قرار دارند و خاک‌های کشاورزی که عمدتاً تحت کشت محصولات زراعی و سبزی‌کاری هستند. شایان ذکر است که از مناطق کوهستانی نمونه‌برداری نشده و به همین علت محل‌های نمونه‌برداری اغلب در اطراف کارخانه قرار گرفته‌اند.




شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و محل‌های نمونه‌برداری در محدوده اطراف کارخانه سیمان تهران (کارخانه ذوب فلزات در مجاورت کارخانه سیمان و غرب آن واقع شده است)

در ابتدا نمونه‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه خشک شده و سپس الک شدند. دانه‌سنجی و هیدرومتری جهت تعیین میزان ماسه، سیلت و رس انجام گردید. pH، قابلیت تبادل کاتیونی (CEC)، میزان مواد آلی و کربنات کلسیم موجود در نمونه‌ها تعیین شدند. مقدار pH توسط روش رقیق کردن با آب مقطر و تهیه گل اشباع به نسبت ۱:۲ تعیین شده است [۱]. مقدار CEC نیز از رابطه زیر محاسبه گردیده است [۲]:

CEC = (درصد رس × ۰/۵۷) + (درصد مواد آلی × ۲/۵)

به منظور شناسایی انواع کانی‌های رسی از آنالیز XRD استفاده شده است. بدین منظور ابتدا ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون به روش تعلیق جدا شده و از آن‌ها مقطع جهت یافته تهیه شده است [۱۸]. آنالیز XRD توسط دستگاه Italstructures و Cu Kα و شرایط ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی‌آمپر انجام گردید. مقدار کربنات کلسیم با روش کلاسیک تیتراسیون [۸] اندازه‌گیری شده است. غلظت عناصر اصلی و فرعی توسط دستگاه XRF تعیین شده است. نمونه‌ها پس از پودر شدن و عبور از الک ۸۰ مش توسط دستگاه Philips PW 2400 مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. غلظت عناصر سرب، روی، مس، نیکل، کروم و کبالت مورد بررسی قرار گرفته است.

## نتایج

خاک‌های محدوده مطالعه به رنگ قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره با بافت سیلتی ماسه‌ای و ریز دانه می‌باشد. در زیر به بررسی ویژگی‌های مختلف خاک‌های منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

### ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

ویژگی‌های عمده فیزیکوشیمیایی که برای خاک‌های محدوده کارخانه تعیین شده است عبارتند از: pH خاک‌های مورد مطالعه بین ۷/۵ تا ۹/۵ (قلیایی ضعیف تا متوسط) تغییر می‌کند. مقدار مواد آلی از ۴ تا ۳۵ درصد متغیر است. میانگین این مواد ۱۳/۶ درصد می‌باشد، مقدار CEC بین ۱۸/۳ و ۱۰۱/۲ با میانگین ۴۹/۸ میلی اکی‌والان گرم بر ۱۰۰ گرم تغییر می‌کند. بیش ترین مقدار مربوط به نمونه S3 است که بالاترین مقدار ماده آلی را نیز داراست. مقدار کربنات کلسیم خاک‌های مورد مطالعه از ۲۷/۵ تا ۸۰ درصد متغیر بوده و میانگین آن ۴۸/۸ درصد است. در جدول ۱ نتایج این ویژگی‌ها و نیز نتایج حاصل از دانه‌سنجی نمایش داده شده است.

### میزان و نوع کانی‌های رسی

نتایج آنالیز XRD خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که به ترتیب فراوانی ایلیت، کائولینیت و کلریت از جمله کانی‌های رسی موجود می‌باشند با توجه به باز بودن پایه پیک‌ها، کانی‌های مذکور درجه تبلور پایینی را نشان می‌دهند. بیشترین مقدار رس در نمونه S11 به میزان ۳۴/۱۷ درصد و کمترین مقدار در نمونه S9 به مقدار ۱۹/۳۶ درصد اندازه‌گیری شده است (جدول ۱).

### میزان عناصر سنگین و گسترش آن‌ها در خاک

غلظت عناصر سنگین سرب، روی، مس، نیکل، کروم، کبالت و همچنین اکسیدهای اصلی و درصد LOI[1] در خاک‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ نمایش داده شده است. کم‌ترین غلظت مربوط به کبالت و بیش‌ترین مقدار مربوط به سرب می‌باشد. نمونه S3 دارای بیش‌ترین مقدار عناصر سنگین است. این نمونه به واسطه اختلاف بسیار شدید با سایر نمونه‌ها، در محاسبات آماری در نظر گرفته نشده است. شاید وجود قطعات فلزی ریز به صورت آلیاژ (به واسطه نزدیکی کارخانه ذوب فلزات) دلیل بالا بودن مقدار عناصری فلزی در این نمونه باشد. به ترتیب مقدار متوسط فراوانی عناصر سنگین به این شرح زیر است: Pb > Zn > Cr > Cu > Ni >> Co . با توجه به این که منطقه محدوده اطراف کارخانه سیمان و ذوب فلزات بخشی از خاک‌های شهری می‌باشد به منظور مقایسه آنالیز برخی از خاک‌های شهری مناطق جهان [۱۶] در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که در جدول ۳ مشخص است میزان عناصر سنگین به جز برای مس و سرب از مقادیر استاندارد که برای خاک‌های غیر آلوده و معیارهای اروپا در نظر گرفته شده، کم‌تر است [۱۲]. از طرفی برای ارزیابی آلودگی محیط می‌توان از شاخص آلودگی استفاده نمود.

[1] Loss On Ignition

جدول ۱: خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های محدوده کارخانه سیمان تهران و ذوب فلزات

| شماره نمونه | ماسه ٪ | سیلت٪ | رس ٪ | pH | کربنات کلسیم ٪ | ماده آلی٪ | Meq/100gr CEC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | ۳/۸۵ | ۶۳/۲۴ | ۳۲/۹۱ | ۸/۲۹ | ۵۱/۷۵ | ۲۶/۱ | ۴۸/۳۸ |
| S2 | ۷/۷۵ | ۶۵/۱۵ | ۲۷/۱۰ | ۸/۷۱ | ۵۳/۷۵ | ۲۸/۲ | ۴۵/۶۱ |
| S3 | ۱۸/۶۹ | ۵۴/۲۱ | ۲۷/۱۰ | ۷/۹۳ | ۲۷/۵۰ | ۳۴/۳ | ۴۹/۵۹ |
| S4 | ۱۲/۴۲ | ۵۸/۵۴ | ۲۹/۰۴ | ۹/۰۳ | ۴۵/۰۰ | ۵/۴ | ۴۳/۹۶ |
| S5 | ۱۰/۹۹ | ۶۵/۷۸ | ۲۳/۲۳ | ۹/۴۵ | ۸۰/۰۰ | ۱۰/۱ | ۷۵/۸۲ |
| S6 | ۹/۹۹ | ۶۲/۹۰ | ۲۷/۱۱ | ۹/۰۳ | ۵۲/۰۰ | ۱/۱ | ۳۸/۹۹ |
| S7 | ۱۰/۸۳ | ۶۴/۰۱ | ۲۵/۱۶ | ۸/۵۰ | ۵۰/۰۰ | ۵/۵ | ۴۱/۱۵ |
| S8 | ۲۳/۹۹ | ۵۴/۷۱ | ۲۱/۳۰ | ۹/۱۶ | ۴۵/۷۵ | ۵/۰ | ۴۹/۲۳ |
| S9 | ۸/۹۹ | ۷۱/۶۵ | ۱۹/۳۶ | ۸/۶۰ | ۶۵/۰۰ | ۴/۴ | ۵۶/۲۰ |
| S10 | ۶/۰۱ | ۶۳/۰۲ | ۳۰/۹۷ | ۸/۶۲ | ۳۲/۵۰ | ۴/۸ | ۴۳/۱۵ |
| S11 | ۵/۷۸ | ۶۰/۰۵ | ۳۴/۱۷ | ۸/۳۳ | ۲۷/۵۰ | ۲۶/۲ | ۴۵/۸۵ |

جدول ۲: غلظت اکسیدهای آهن، آلومینیوم و سیلیسیوم، میزان LOI (بر حسب درصد) و عناصر سنگین (بر حسب ppm) در خاک‌های منطقه کارخانه سیمان تهران و ذوب فلزات حاصل از آنالیز XRF

| شماره نمونه | Pb | Cu | Zn | Ni | Co | Cr | LOI | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | ۷۹ | ۱۸ | ۱۶۱ | ۴۶ | ۳ | ۵۵ | ۱۵/۹۶ | ۴۶/۸۸ | ۱۰/۱۳ | ۶/۰۸ |
| S2 | ۸۸ | ۳۱ | ۱۶۵ | ۴۳ | ۹ | ۸۸ | ۱۶/۰۳ | ۴۷/۳۳ | ۹/۸۴ | ۵/۸۴ |
| S3 | ۶۸۵۵۰ | ۱۲۵۰ | ۱۳۴۵ | ۵۴ | ۱۴ | ۱۱۵ | ۱۸/۰۲ | ۴۰/۶۰ | ۸/۴۰ | ۴/۵۰ |
| S4 | ۳۶۶ | ۵۷ | ۱۵۹ | ۳۲ | ۴ | ۴۱ | ۱۴/۷۲ | ۴۹/۷۴ | ۹/۱۴ | ۵/۵۵ |
| S5 | ۱۲۱ | ۹۵ | ۱۸۲ | ۲۹ | ۸ | ۷۹ | ۳۲/۱۰ | ۱۸/۴۸ | ۳/۸۹ | ۳/۰۱ |
| S6 | ۸۸ | ۵۴ | ۱۵۸ | ۴۴ | ۷ | ۵۱ | ۱۲/۷۲ | ۴۹/۳۵ | ۹/۸۶ | ۶/۴۳ |
| S7 | ۱۲۳ | ۱۲۷ | ۱۷۲ | ۴۸ | ۱ | ۶۹ | ۱۴/۲۸ | ۴۸/۱۵ | ۹/۳۲ | ۶/۱۱ |
| S8 | ۹۲۳ | ۱۹۵ | ۳۵۱ | ۲۶ | ۴ | ۳۹ | ۱۹/۲۹ | ۳۸/۴۳ | ۸/۱۵ | ۵/۲۲ |
| S9 | ۱۸۸ | ۴۷ | ۲۵۳ | ۲۵ | ۶ | ۳۲ | ۲۳/۲۶ | ۳۲/۰۴ | ۷/۱۰ | ۴/۱۹ |
| S10 | ۴۹ | ۵ | ۱۱۵ | ۵۰ | ۶ | ۶۶ | ۱۳/۸۳ | ۵۰/۱۰ | ۱۰/۲۵ | ۵/۸۶ |
| S11 | ۴۹ | ۱۷ | ۱۲۷ | ۳۲ | ۵ | ۱۳۰ | ۱۴/۳۸ | ۴۸/۱۱ | ۱۰/۴۲ | ۶/۴۷ |

جدول ۳: غلظت برخی از عناصر سنگین (بر حسب ppm) در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، چند شهر مهم جهان [۱۶] و استانداردهای موجود [۱۲]

| شهر | Pb | Zn | Cu | Cr | Co | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|
| منطقه مورد مطالعه | ۲۰۷/۴ | ۱۸۴ | ۶۴/۶ | ۶۵ | ۵/۳ | ۳۷/۵ |
| هامبورگ | ۲۱۸/۲ | ۵۱۶ | ۱۴۶ | ۹۵/۴ | - | ۶۲/۵ |
| مادرید | ۱۶۱ | ۲۱۰ | ۷۱/۷ | ۷۴/۷ | ۶/۴۲ | ۱۴/۱ |
| بانگکوک | ۴۷/۸ | ۱۱۸ | ۴۱/۷ | ۲۶/۴ | | ۲۴/۸ |
| آبردین | ۹۴/۴ | ۵۸/۴ | ۲۷ | ۲۳/۹ | ۶/۴ | ۱۴/۹ |
| گلاسکو | ۲۱۶ | ۲۰۷ | ۹۷ | - | - | - |
| لندن | ۲۹۴ | ۱۸۳ | ۷۳ | - | - | - |
| مانیل | ۲۱۳/۶ | ۴۴۰ | ۹۸/۷ | ۱۱۴ | - | ۲۰/۹ |
| مقدار استاندارد | ۵۰-۱۰۰ | ۱۰۰-۲۰۰ | ۳۰-۶۰ | ۵۰-۱۰۰ | ۲۰-۵۰ | ۳۰-۶۰ |

بدین منظور از فرمول زیر استفاده می‌شود [۱۹]:

$$I_{geo} = \log_2 \{Cn /(1.5 \times Bn)\}$$

که در فرمول $I_{geo}$ شاخص زمین انباشت[1]، Cn غلظت عنصر اندازه‌گیری شده در رسوبات ریزدانه و Bn مقدار عنصر در رسوبات شیلی است. مقادیر Bn در شیل‌ها اندازه‌گیری شده و به صورت استاندارد ارائه شده است [۳]. فاکتور ۱/۵ به دلیل احتمال اختلاف در غلظت اولیه رسوبات به دلیل تأثیر عوامل زمینی در رابطه فوق گنجانیده شده است. با محاسبه شاخص زمین انباشت و مراجعه به جداول ارائه شده [۱۹] می‌توان شدت آلودگی را تعیین کرد. جدول ۴ نتایج برآورد میانگین شدت آلودگی عناصر سنگین بر اساس شاخص زمین انباشت در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. عنصر سرب از نظر شدت آلودگی در حد متوسط تا شدید، مس و روی در حد غیر آلوده تا متوسط و عناصر نیکل، کروم و کبالت در حد کاملاً غیر آلوده هستند. ارتباط بین عناصر اطلاعات جالبی راجع به منشأ فلزات سنگین ارائه خواهد کرد (جدول ۵). سرب بیش‌ترین تطابق را با روی ($r = ۰/۸۶۱$) و مس ($r = ۰/۷۹۱$) دارا می‌باشد که این امر می‌تواند بیانگر وجود منشأ آلوده کننده مشترک برای این فلزات باشد. تطابق بین نیکل و عناصر سرب، روی، مس و کبالت منفی است و البته بهترین این ارتباط مربوط به فلز روی ($r = -۰/۶۳۱$) می‌باشد. ارتباط کروم با فلزات سرب، مس و روی منفی بوده و بهترین آن با فلز روی ($r = -۰/۵۳۷$) می‌باشد. ارتباط کبالت با سایر فلزات آن چنان معنی‌دار نیست. در مجموع با توجه به مقادیر p سرب، مس و روی بهترین و بیش‌ترین ارتباط را با هم دارند.

## ارتباط بین مقادیر عناصر سنگین و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها

تطابقی بین میزان عناصر سنگین و pH، ماده آلی، CEC، میزان کربنات کلسیم و مقدار رس موجود در نمونه‌ها صورت گرفته است تا بدین ترتیب ارتباط بین متغیرها و تأثیر هر یک از خصوصیات فیزیکوشیمیایی در میزان جذب عناصر سنگین مشخص شود. بدین منظور آنالیزهای رگرسیونی منفرد و چند متغیره صورت گرفته است. در تمام موارد تعداد نمونه‌ها ۱۰ عدد می‌باشد.

ارتباط معنی‌داری بین pH، اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و کربنات کلسیم و مقادیر عناصر سنگین مشاهده نمی‌شود. ارتباط منفی بین مقدار رس و روی ($r^2 = ۰/۵۹$ ،$p = ۰/۰۱۰$) و مس ($r^2 = ۰/۴۳$ ، $p = ۰/۰۳۸$) وجود دارد. کروم تنها با CEC ($r^2 = ۰/۴۵$ ، $p = ۰/۰۳۳$) و مواد آلی ($r^2 = ۰/۴۳$ ، $p = ۰/۰۳۹$) ارتباط مثبت دارد.

ارتباط بین میزان ماسه در نمونه‌ها و مقادیر سرب ($r^2 = ۰/۸۸$ ، $p < ۰/۰۰۰۱$)، روی ($r^2 = ۰/۶۹$ ، $p = ۰/۰۰۳$) و مس ($r^2 = ۰/۸۳$ ، $p < ۰/۰۰۰۱$) مثبت می‌باشد. نیکل دارای ارتباط مثبتی با میزان اکسید سیلیسیوم است ($r^2 = ۰/۴۱$ ، $p = ۰/۰۴۶$).

به دلیل این که هیچ ویژگی منفردی را نمی‌توان به وضوح به میزان عناصر سنگین ارتباط داد از آنالیز رگرسیون چند متغیره و روش Backward در رگرسیون خطی (توسط نرم افزار SPSS ویرایش ۱۳) استفاده شده است (جدول ۶).

## بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه میزان و توزیع عناصر سنگین و عوامل کنترل کننده موثر بر جذب این فلزات را در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان تهران و ذوب فلزات نشان می‌دهد. این خاک‌ها با توجه به شاخص ژئوشیمیایی محاسبه شده در زمره خاک‌های غیر آلوده تا شدیداً آلوده نسبت به فلزات سنگین مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

عناصر Pb، Zn و Cu به ترتیب فراوان‌ترین فلزات سنگین در خاک‌های محدوده مورد مطالعه هستند. عنصر Co نیز کم‌ترین مقدار را داراست. مقایسه مقدار این عناصر و مقادیر استاندارد (جدول ۳) نشان می‌دهد که سرب موجود در این خاک‌ها حداقل بیش از دو برابر تغلیظ شده است. ضمن این که میزان مس کمی از حد استاندارد بالاتر است و مقادیر روی، نیکل، کروم و کبالت در حد مقادیر استاندارد هستند. به عبارت دیگر این خاک‌ها نسبت به سرب و مس آلودگی نشان می‌دهند. به منظور کمّی کردن میزان آلودگی موجود، شدت آلودگی محاسبه شده است. همان‌طوری که انتظار می‌رود خاک‌های محدوده کارخانه‌های سیمان و ذوب فلزات نسبت به

[1] Index of Geoaccumulation

سرب شدت آلودگی متوسط تا شدید دارد (جدول ۴). مطابق این نتایج شدت آلودگی برای روی و مس غیر آلوده تا متوسط و برای نیکل، کروم و کبالت عملاً غیر آلوده است.

تعیین منشأ این آلاینده‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. بدین جهت ضرایب هم‌بستگی این عناصر و اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیم و آهن محاسبه شده و سپس دندوگرام آن‌ها رسم شده است (شکل ۲). همان گونه که در دندوگرام مشاهده می‌شود دو شاخه کاملاً مجزا را می‌توان از هم تفکیک نمود. شاخه A شامل عناصر سرب، روی و مس و شاخه B شامل $SiO_2$، $Al_2O_3$، $Fe_2O_3$، Cr، Co و Ni می‌باشد.

جدول ۴: مقیاس و محاسبه اندیس‌های شدت آلودگی خاک و اندیس زمین انباشت عناصر سنگین در خاک‌های محدوده مورد مطالعه. معیار شدت آلودگی از Müller [۱۹] اقتباس شده است.

| شاخص زمین انباشت | رده شاخص زمین انباشت | معیار شدت آلودگی | عنصر | شاخص زمین انباشت نمونه‌های مورد مطالعه | رده شاخص زمین انباشت نمونه‌ها |
|---|---|---|---|---|---|
| > ۵ | ۶ | بسیار شدید | Pb | ۲/۷۹ | ۳ |
| ۴-۵ | ۵ | شدید تا بسیار شدید | Zn | ۰/۳۴ | ۱ |
| ۳-۴ | ۴ | شدید | Cu | ۰/۲۹۹ | ۱ |
| ۲-۳ | ۳ | متوسط تا شدید | Ni | -۱/۴۴ | ۰ |
| ۱-۲ | ۲ | متوسط | Cr | -۱/۴۷ | ۰ |
| ۰-۱ | ۱ | غیر آلوده تا متوسط | Co | -۲/۷ | ۰ |
| < ۰ | ۰ | غیر آلوده | | | |

جدول ۵: ماتریس تطابق فلزات سنگین در نمونه‌های مورد مطالعه (تعداد ۱۰ نمونه، سطح معنی داری $p < 0.001$ ***، $p < 0.01$ **، $p < 0.1$ *، بدون علامت ارتباط بی معنی است)

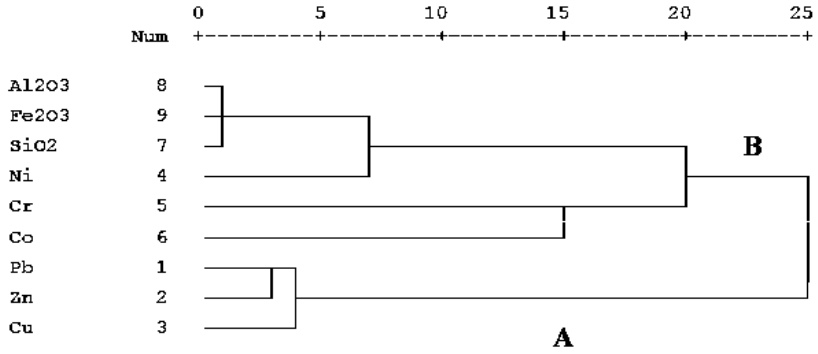
| | Pb | Zn | Cu | Ni | Cr | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pb | ۱ | | | | | |
| Zn | ۰/۸۶۱*** | ۱ | | | | |
| Cu | ۰/۷۹۱** | ۰/۷۸۲** | ۱ | | | |
| Ni | -۰/۵۴۵ | -۰/۶۳۱ | -۰/۳۸۶ | ۱ | | |
| Cr | -۰/۴۷۸ | -۰/۵۳۷ | -۰/۳۴۱ | ۰/۱۴۸ | ۱ | |
| Co | -۰/۲۴۷ | -۰/۱۲۲ | -۰/۳۲۹ | -۰/۱۵۶ | ۰/۲۰۳ | ۱ |

جدول ۶: جدول آنالیز رگرسیون چند متغیره برای فلزات سنگین موجود و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها.

| p | F | $r^2$ | LOI | $Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | کربنات کلسیم | مواد آلی | رس | ماسه | pH | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.003 | 30.62 | 0.975 | - | -235.67 | 109.15 | - | - | - | 15.75 | 62.38 | -171.5 | Pb |
| 0.008 | 32.77 | 0.985 | - | -43.06 | 66.41 | -7.89 | 2.2 | - | - | 14.61 | -69.9 | Zn |
| 0.015 | 65.32 | 0.996 | 89.95 | 208.53 | - | 30.87 | - | -5.05 | -5.77 | 9.58 | -61.87 | Cu |
| 0.046 | 5.56 | 0.410 | - | - | - | 0.595 | - | - | - | - | - | Ni |
| | | | - | - | - | - | - | - | - | - | | Cr |
| 0.009 | 116.52 | 0.998 | - | - | 2.28 | -0.321 | -0.152 | 0.151 | -.746 | -.732 | | Co |

F= آزمون فیشر، p= سطح معنی داری

محاسبات بدون در نظر گرفتن غلظت عناصر سنگین موجود در نمونه S3 می‌باشد که بالاترین میزان فلزات سنگین را نشان می‌دهد.




شکل ۲: آنالیز خوشه‌ای عناصر سنگین و برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه.

اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیم و آهن را به کانی‌های موجود و در واقع عوامل زمین‌شناسی می‌توان نسبت داد. هم‌بستگی بالای این اکسیدها احتمالاً بیانگر منشأ یکسان است. این شاخه به عنوان شاخه زمینی و عوامل زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است. سه عنصر کروم، کبالت و نیکل نیز با ضرایب هم‌بستگی کم‌تر در این شاخه قرار دارند. به همین علت این عناصر را می‌توان ناشی از عوامل زمین‌شناسی دانست و ارتباط کم‌تری با منابع آلاینده انسانی دارند. در شاخه A سه عنصر سرب، روی و مس قرار دارند. این شاخه با ضریب هم‌بستگی بسیار پائین با شاخه B ارتباط دارند بنابراین دارای منشأ متفاوتی از آن است. این شاخه را می‌توان به فعالیت‌های انسانی و آلاینده‌های محیطی نسبت داد. وجود کارخانه‌های مختلف و نیز آلودگی بیش از حد هوای تهران منشأ این فلزات می‌تواند باشد.

مقدار سرب در خاک‌های مورد مطالعه بسیار بالا است و قطعاً حاصل فعالیت‌های انسانی است. به استثنای نمونه S3 که احتمالاً مستقیماً در معرض یک منبع آلاینده قرار دارد، در مورد سایر نمونه‌ها احتمالاً این عنصر از طریق هوا و به همراه گرد و غبار در خاک تجمع یافته است. نزدیکی به کارخانه‌های سیمان و ذوب فلزات و اتوبان‌های منطقه که محل تردد وسایل نقلیه هستند، می‌تواند عامل آلودگی خاک‌ها باشند. وجود روی و مس را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که این عناصر قادرند با کانی‌های رسی پیوند ایجاد کنند [۶]. وجود سایر عناصر در خاک‌های منطقه می‌تواند منشأ لیتوژنیک داشته باشد.

نتایج آنالیز رگرسیون تنوع و پیچیدگی در ارتباط میان ویژگی‌های مختلف و فلزات سنگین موجود در نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. فاصله مکان‌های نمونه‌برداری از منبع آلوده کننده و هم‌چنین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک از جمله pH، درصد مواد آلی، میزان و نوع کانی‌های رسی، مقدار CEC و مقدار کربنات کلسیم بر روی مقدار جذب عناصر سنگین توسط خاک تأثیر می‌گذارد [۲۱]. در بررسی‌های به عمل آمده در خاک‌های منطقه مورد مطالعه غلظت فلزات سنگین را نمی‌توان به تنهایی فقط به یک ویژگی نسبت داد. با این حال اکسیدهای آلومینیم و آهن، مقدار رس، pH و به نسبت کمتر $SiO_2$، درصد ماسه و CEC نقش مهمی در مقدار جذب فلزات سنگین دارند. اهمیت هر یک و نوع تأثیر (مثبت یا منفی) در جدول ۶ ذکر شده است. ارتباط مثبت عنصر سرب با رس و اکسید آلومینیوم بیانگر نقش کانی‌های رسی در جذب و نگهداری این عنصر است. به همین ترتیب ارتباط مثبت مس و LOI نیز نشاندهنده تأثیر مواد آلی در جذب عنصر مس می باشد. مقدار LOI دربرگیرنده مواد آلی و کربنات کلسیم است اما معمولاً ارتباط بین مواد آلی و LOI بسیار خوب است [۱۱].

در مورد نقش نوع کانی‌های رسی در میزان نگهداری عناصر سنگین Hudson و همکاران [۱۳] ترتیب زیر را بیان نموده است:

کائولینیت < کلریت < ایلیت < ورمیکولیت < مونتموریونیت

با توجه به این که ایلیت فراوان‌ترین کانی رسی موجود در خاک‌های منطقه است، می‌توان نقش مقدار رس در جذب فلزات سنگین را مشخص نمود. مقادیر اکسیدهای آلومینیم و آهن را می‌توان به وجود رس نسبت داد [۱۲].

در پایان باید عنوان کرد که آلودگی عناصر سنگین در منطقه دارای چند منشأ است. بیش‌ترین آلودگی ناشی از

صنایع سنگین، کارخانجات (به ویژه کارخانه سیمان و ذوب فلزات) و وسایط نقلیه مختلف می‌باشد. به منظور اثبات کامل اتمسفری بودن منشأ آلاینده‌ها نمونه‌برداری عمقی و مقایسه نمونه‌های زیرین با سطح و نیز در صورت امکان آنالیزهای ایزوتوپی ضروری به نظر می‌رسد.

## منابع


[۱] زرین‌کفش، م (۱۳۷۲) خاک‌شناسی کاربردی (ارزیابی و مورفولوژی). انتشارات دانشگاه تهران.

[۲] ملکوتی، م. ج. و همایی، م (۱۳۷۳) حاصل‌خیزی خاک‌های مناطق خشک، مشکلات و راه حل‌ها. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.

[3] Adriano, D. C (1986) Trace elements in the terrestrial environment. New York: Springer, 867 p.

[4] Albasel, N. and Cottenie, A (1985) Heavy metal contamination near major highways, industrial and urban areas in Belgian Grassland. Water Air Soil Pollut., 24: 103-109.

[5] Alloway, BJ (1995) Heavy metal in soils. Blackie, London, 368 p.

[6] Baize, D. (1997) Tenours totales en èlèments trace mètalliques dans les sols (France). In: Hernandez, L., Probst, A., Probst, J.L. and Ulrich, E (2003) Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. The Science of the total Environment, 312: 195-219.

[7] Barzilay, JI., Weinberg, WG. and Eley, JW (1999) The water we drink: water quality and its effects on health. Rutgers University Press, New Brunswick, 192 p.

[8] Carver, R. E (1971) Procedures in Sedimentary Petrology. John Wiley & Sons Inc, 672 p.

[9] Davis, BE. and Houghton, NJ (1984) Distance-decline pattern in heavy metal contamination of soils and plants in Birmingham, England. Urban Ecol. 8: 285-294.

[10] Denny, P (1987) Monitoring of heavy metals– a proposed strategy for developing countries. In: Huchinson, TC. and Meema, KM (eds) Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the environment. Wiley, New York, 343-347

[11] Håkanson, L. and Jansson, M (1983) Principles of lake sedimentology. New York, Springer-Verlag, 316 p.

[12] Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L. and Ulrich, E (2003) Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. The Science of the total Environment, 312: 195-219.

[13] Hudson, A. K., Schell, CH. and Macklin, G. M (1999) Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, Southwest Spain. Appl. Sedimentol., 14: 1015-1030.

[14] Kelly, J., Thornton, I. and Simpson, PR (1996) Urban geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain. Appl. Geochem., 11: 363-370.

[15] Kralic, M (1999) A rapid procedure for environmental sampling and evaluation of polluted sediments. Appl. Geochem., 14: 807-816.

[16] Manta, D. S., Angelone, M., Bellanca, A., Neri, R. and Sprovieri, M (2002) Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. The Science of the total Environment, 300: 229-243.

[17] Moon, J-W, Moon, H-S, Woo, N-C, Hahn, J-S, Won, J-S, Song, Y., Lin, X. and Zhao, Y (2000) Evaluation of heavy metal contamination and implication of multiple sources from Hunchun basin, north-eastern China. Environ Geol. 39: 1039-1052.

[18] Moore, D. M. and Reynolds, R. C (1989) X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 332 p.

[19] Müller, G (1979) Schwermetalle in den sedimenten des Rheins. In: Heling, D., Rothe, P., Förstner, U. and Stoffers, P. (eds) Sediments and environmental geochemistry., 1990 Springer-Verlag Pub.

[20] Pierzynski, GM., Sims, JT. and Vance, GF (1994) Soils and environmental quality, Lewis, Boca Raton, 313 p.

[21] Wang, H (2003) Heavy metal pollution in air-water-soil-plant system of Zhuzhou City, Hunan Province, China. Water, Air and soil pollution, 147: 79-107.

[22] Zhang, H., Ma, D., Xie, Q. and Chen, X (1999) An approach to studying heavy metal pollution caused by modern city development in Nanjing, China. Environ Geol. 38: 223-228.