

ترکیب پارامترهای مغناطیسی: راهی مؤثر در تشخیص منابع آلودگی خاک (مطالعه موردی: خاک‌های اطراف شهر زنجان)

علی افشاری^{۱*}

a.afshari66@yahoo.com

حسین خادمی^۲

چکیده

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک‌های اطراف زنجان با استفاده از تکنیک پذیرفتاری مغناطیسی می‌باشد. برای این منظور از منطقه‌ای به وسعت ۲۰۰۰ کیلومتر تعداد ۲۴۱ نمونه به صورت شبکه‌بندی انتخاب گردید. در نمونه‌های خاک پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از دستگاه بارتینگتون مدل MS2 قرائت گردید. برای تعیین ارتباط بین فلزات سنگین، خصوصیات فیزیکوشیمیایی و پارامترهای مغناطیسی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آنالیز خوشه‌ای (CA) صورت پذیرفت.

نتایج نشان داد که میانگین پذیرفتاری مغناطیسی (χ/f) در کاربری کشت دیم، کشت آبی، باغ، مرتع و شهری به ترتیب ۳۱۴/۰، ۲۶۵/۴، ۳۲۱/۵، ۴۵۵/۶ و ۵۱۹/۲ ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) بدست آمد. میانگین پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ/f_d) در کاربری‌های اراضی فوق به ترتیب ۱/۵، ۲/۰، ۱/۸، ۱/۲ و ۱/۱ درصد مشاهده شد. در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) پنج مؤلفه اول شناسایی شده، که مؤلفه‌های اول تا پنجم به ترتیب ۲۰/۵، ۱۸/۱، ۱۶/۲، ۹/۶۵ و ۸/۵۰ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کردند. در آنالیز خوشه‌ای دو فاکتور شناسایی شد: فاکتور اول شامل پذیرفتاری مغناطیسی، شن، ماده آلی، EC، کادمیم، مس، روی و سرب، فاکتور دوم شامل پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، آهک، pH، CEC، سیلت، رس، کروم، نیکل، کبالت و منگنز قرار گرفتند. گروه اول جزء پارامترهایی هستند که بیش‌تر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند و گروه دوم، بیش‌تر متأثر از ماده مادری می‌باشند. نتایج حاصل از توزیع مکانی پذیرفتاری مغناطیسی کاملاً منطبق بر نتایج آماری پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری‌های اراضی مختلف می‌باشد. بیش‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه سنگ‌های آذرینی (بازالت، پورفیریت، گرانیت) مشاهده شد.

کلمات کلیدی: خاک، پارامترهای مغناطیسی، آلودگی‌های انسانی، فلزات سنگین.

۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران* (مسئول مکاتبات).

۲- استاد مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

مقدمه

پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic susceptibility) درجه‌ای است که یک ماده، میدان مغناطیسی شناخته شده و معینی را تحت تأثیر قرار داده و مقدار این تأثیر تابع غلظت و نوع کانی‌های مغناطیسی است که در نمونه وجود دارد (۱).

در خاک‌ها به صورت طبیعی ذرات فری مغناطیسی و که از مواد مادری‌شان به ارث می‌رسد و از طرفی ذرات فری-مغناطیسی در شبکه ساختاری خود دارای فلزات سنگین هستند، در نتیجه می‌توان از این خاصیت در برآورد آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها کمک گرفت (۲). استفاده از تکنیک اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی آسان، سریع، غیرمخرب و حساس است که با هزینه کم و زمان اندک در دامنه وسیع و زیاد انجام می‌شود و در سال‌های اخیر استفاده از آن روز به روز در حال افزایش بوده است. خصوصیات مغناطیسی خاک، شاخص مهمی برای مطالعات محیطی می‌باشد و می‌تواند برای جدا کردن منابع مختلف آلودگی استفاده شود (۳ و ۱). عموماً در بررسی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از روش‌های شیمیایی استفاده می‌شود، اما اندازه‌گیری مغناطیسی خاک‌ها اطلاعات زیادی را با هزینه کم و در زمان کوتاه‌تری به ما می‌دهد، که روشی سریع و غیرمخرب است (۴).

مطالعات مختلف صورت گرفته در دنیا نشان داده است که پذیرفتاری مغناطیسی دارای پتانسیل بالایی جهت ردیابی و برآورد آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین می‌باشد (۵). مبنای استفاده از این روش بر این اصل استوار است که بسیاری از اثرات انسانی در ایجاد آلودگی روی محیط، به وسیله رهاسازی ذراتی است که به شدت مغناطیسی هستند و این امر باعث افزایش مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌گردد (۶ و ۵).

پذیرفتاری مغناطیسی همراه با افزایش غلظت برخی عناصر افزایش پیدا می‌کند (۷). در چندین مطالعه ارتباط معنی‌دار بین پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت عناصر سنگین در خاک‌ها گزارش شده است (۲، ۳، ۵، ۷ و ۸). وانگ (Wang) و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه آلودگی فلزات سنگین و ارتباط آن‌ها با

پذیرفتاری مغناطیسی در گرد و غبار خیابانی شهر لانگ‌ژو (Lanzhou) (چین)، گزارش کردند که بیش‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات سنگین در مناطق صنعتی دیده می‌شود و بالاترین ارتباط بین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات مس، منگنز، نیکل، سرب، روی و آهن وجود دارد (۹). لو و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که بیش‌ترین مقادیر فلزات سنگین و پذیرفتاری مغناطیسی در داخل شهر هانگ‌ژو (چین) مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله از شهر از غلظت آن‌ها کاسته می‌شود (۱۰). دنکوب و همکاران (۲۰۱۲) در خاک‌های سطحی اصفهان ارتباط مثبت و معنی‌داری بین غلظت کل فلزات سنگین سرب، منگنز، روی، آهن و مس با پذیرفتاری مغناطیسی گزارش کردند. در حالی‌که عناصر نیکل، کروم و کبالت ارتباط منفی و معنی‌دار با پذیرفتاری مغناطیسی داشتند. ایشان عناصر گروه اول را متأثر از فعالیت‌های انسانی در منطقه نسبت دادند و گروه دوم را تحت کنترل مواد مادری دانستند (۳). کریمی و همکاران (۲۰۱۱) در خاک‌های شهری اصفهان، بین پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت عناصر سرب، روی، مس و باریم ارتباط مثبت مشاهده کردند و بیان داشتند که غلظت این فلزات را می‌توان با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی پیش‌بینی کرد (۲).

با توجه به نکات اشاره شده در رابطه با استفاده از تکنیک پذیرفتاری مغناطیسی در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها از قبیل سرعت بالا، هزینه مقرون به صرفه در اندازه‌گیری، دقت نسبتاً قابل قبول و ارتباط قوی بین پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت کل فلزات سنگین، می‌توان از این تکنیک به عنوان یک ابزار مستقل در برآورد و مکان‌یابی مناطق آلوده به فلزات سنگین استفاده کرد. لذا این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی تکنیک پذیرفتاری مغناطیسی در برآورد آلودگی فلزات سنگین در خاک‌هایی با کاربری‌های اراضی مختلف در اراضی مرکزی استان زنجان انجام گرفت.

روش بررسی

منطقه مطالعاتی و نحوه نمونه برداری

منطقه مورد مطالعه با مساحتی بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومتر مربع بخشی از اراضی مرکزی استان زنجان می باشد که بین مدارهای ۲۰' ۳۶° تا ۴۱' ۳۶° عرض شمالی و ۱۹' ۴۸° تا ۵۳' ۴۸° طول شرقی قرار گرفته است. نمونه برداری بر اساس روش شبکه بندی و کاملاً تصادفی انجام گرفت. اراضی شهری که دارای فعالیت های انسانی بالایی هستند و تغییرات مکانی شدیدی دارند، در شبکه های ۱/۵ × ۱/۵ کیلومتر مربع، اراضی کشاورزی و مراتع در شبکه های ۳ × ۳ کیلومتر مربع انتخاب شد. در کل تعداد ۲۴۱ نمونه مرکب خاک سطحی (عمق ۱۰-۰ سانتی متر)، که شامل کاربری اراضی کشت دیم، کشت آبی، باغ، مرتع و شهری به ترتیب ۹۶، ۲۴، ۱۷، ۷۷ و ۲۷ نمونه بود برداشت گردید. همچنین از سنگ های مادری غیرهوا دیده (هر کدام به طور متوسط ۵ نمونه سنگ) برای تهیه مقدار پذیرفتاری مغناطیسی نمونه برداری انجام گرفت (شکل ۱).

اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی

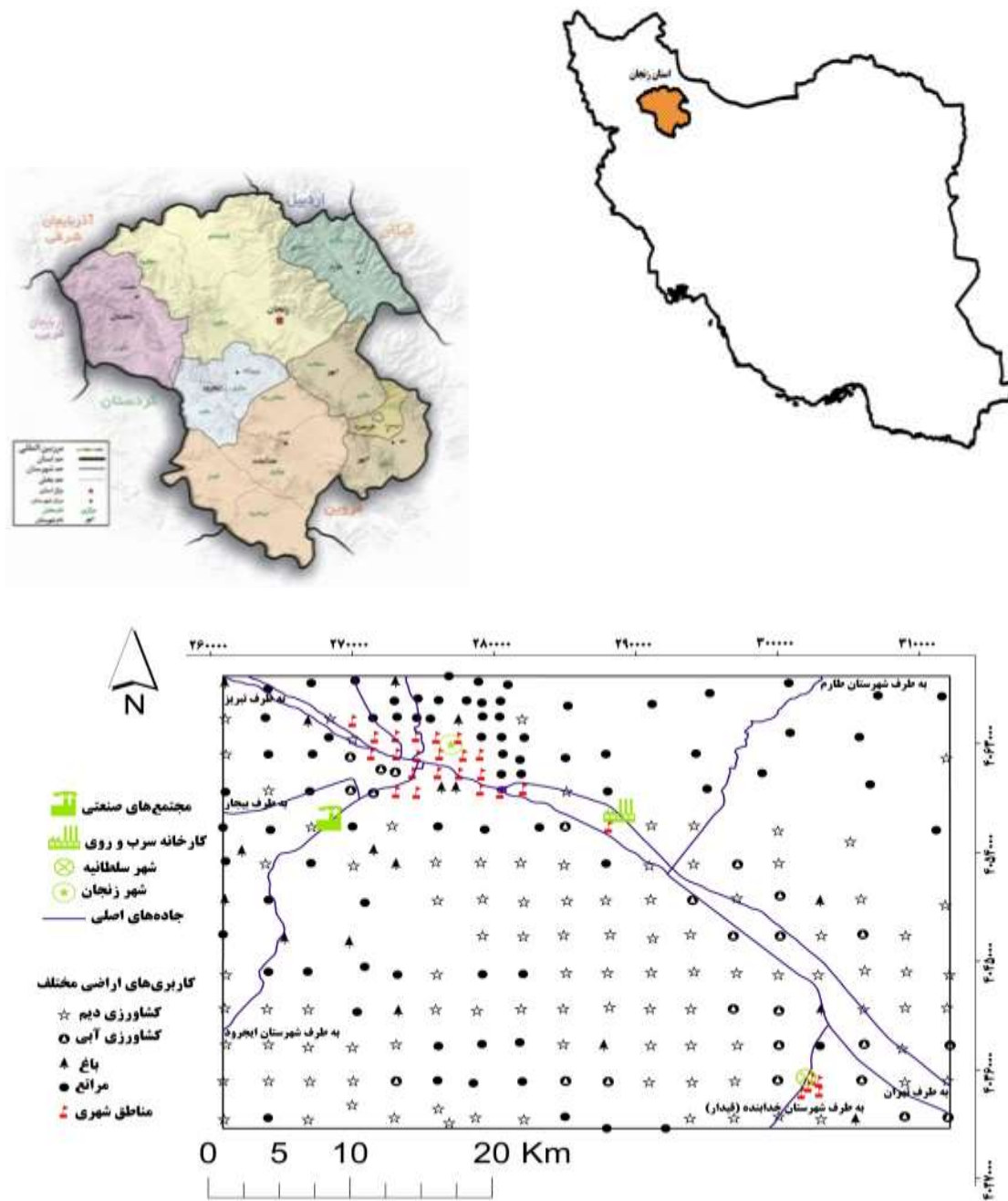
اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی (χ) در فرکانس پایین (χ_{lf} ; 0.47 kHz) و فرکانس بالا (χ_{hf} ; 4.7 kHz)، با دستگاه Bartington MS2 dual frequency sensor انجام گرفت. برای این منظور نمونه های خاک در ظروف پلاستیکی کوچک (Plastic Pots) ریخته شد و سپس توسط حسگر MS2B (MS2B Sensor) قرائت گردید. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس با رابطه ۱ محاسبه گردید (۱).

$$\chi_{fd} = \frac{\chi_{lf} - \chi_{hf}}{\chi_{lf}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA) و آنالیز خوشه های (CA)

به منظور تعیین ارتباط بین عناصر سنگین، پارامترهای مغناطیسی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین تشخیص عامل های انسانی و طبیعی کنترل کننده تغییرات هر

یک از پارامترهای مورد مطالعه تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA) به کار گرفته شد. برای داشتن یک ساختار ساده و تفسیر بهتر نتایج تجزیه، چرخش داده ها از نوع واریماکس صورت گرفت. در تجزیه و تحلیل خوشه های، هدف دست یافتن به ملاکی برای طبقه بندی هر چه مناسب تر متغیرها و یا نمونه ها بر اساس تشابه هر چه بیش تر درون گروهی و اختلاف بیش تر بین گروهی است. برای انجام تجزیه و تحلیل خوشه های، ابتدا داده ها استاندارد شدند. زیرا تغییرات بزرگ در یک متغیر ممکن است به اندازه تغییرات کوچک مقیاس متغیر دیگر مهم باشد و همچنین نمی توان فاصله داده هایی با واحدهای مختلف را سنجید. در این مطالعه از روش الگوریتم وارد (Ward) و فاصله اقلیدوسی برای تحلیل خوشه های و رسم دندروگرام استفاده شد (۱۱).



شکل ۱ - موقعیت محل‌های نمونه‌برداری، کاربری‌های اراضی و محدوده مورد مطالعه در منطقه زنجان

محاسبات آماری

$10^{-8}m^3kg^{-1}$ ، در کاربری کشت آبی بین ۷۰/۳ تا ۶۸۵/۶ و میانگین $265/4$ ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) و در کاربری باغ بین ۳۰/۸ تا ۱۴۱۰/۱ و میانگین $321/5$ ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) می‌باشد. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری مرتع بین ۲۱/۲ تا ۱۷۴۰/۹ و میانگین $455/6$ ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) و در کاربری شهری بین ۱۱۶/۰ تا ۱۳۴۷/۶ و میانگین $519/2$ ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) بدست آمد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی به ترتیب مربوط به کاربری‌های شهری و کشت آبی می‌باشد که دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به سایر کاربری‌هاست.

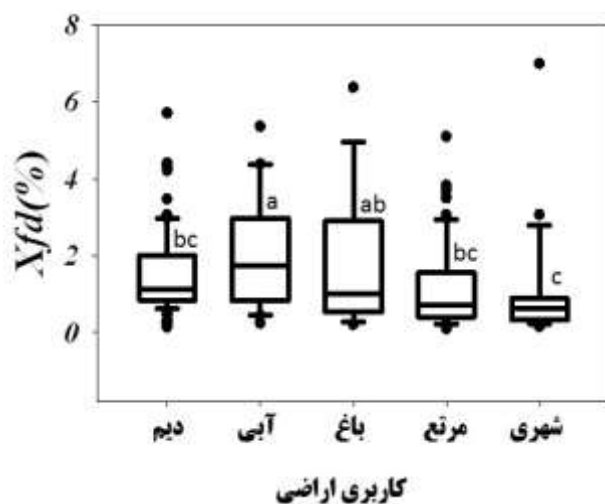
فعالیت‌های انسانی باعث افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک سطحی می‌شود (۷). ذرات مغناطیس با منشاء آنتروپوژنیک احتمالاً از منابع زیر منشاء می‌گیرند: (۱) انتشار ناشی از پروسه سوختن سوخت‌های فسیلی (۲) انتشار از وسایل نقلیه موتوری (اگزوز وسایل نقلیه، سائیدگی لاستیک‌ها و غیره) (۳) پسماندهای صنعتی و گرد و غبار حاصل از ذوب فلز و دیگر صنایع. این سه منبع نقش به‌سزایی در افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها به خصوص در مناطق شهری دارند (۸) (۱۲).

آمار توصیفی شامل شاخص‌های پراکندگی میانگین، حداقل، حداکثر، میانه، انحراف معیار، ضریب تغییرات، دامنه، چولگی و کشیدگی تعیین شد. برای تعیین نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولیموگروف (KolmogrovSmirnovTest) کمک گرفته شد. مقایسه میانگین پارامترهای مغناطیسی در کاربری‌های اراضی مختلف از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه و دانکن استفاده شده است. کلیه محاسبات آماری با کمک نرم‌افزار آماری SPSS 16.0 صورت پذیرفت و نقشه توزیع پذیرفتاری مغناطیسی با نرم‌افزار ArcGIS 9.3 ترسیم گردید.

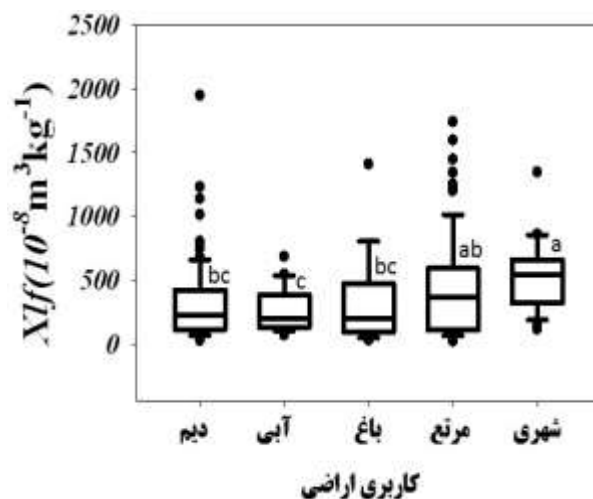
یافته‌ها

غلظت پارامترهای مغناطیسی در کاربری‌های اراضی مختلف

شکل ۲ نمودار جعبه‌ای حاصل از پارامترهای مغناطیسی (پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (Xf) و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به a در پنج کاربری اراضی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری کشت دیم بین ۲۷/۸ تا ۱۹۴۷/۸ و میانگین ۳۱۴/۰



ب



الف

شکل ۲ - نمودار جعبه‌ای پذیرفتاری مغناطیسی (الف) و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (ب) در کاربری‌های اراضی مختلف ($N=241$). (میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند)

منطقه مورد مطالعه، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام گرفت (جدول ۱). برای بهتر نشان دادن مؤلفه‌های اصلی (Principal components) از چرخش واریمکس (Varimax Rotation) استفاده گردید. بر طبق نتایج جدول ۱، ۵ مؤلفه اول ۷۳ درصد از تغییرات کل واریانس را توجیه می‌کند. فاکتور اول حدود ۲۰/۵ درصد از کل تغییرات واریانس را توجیه می‌کند و کادمیم، مس، روی، سرب، ماده آلی و هدایت الکتریکی خاک (EC) در این گروه قرار گرفتند. اضافه کردن لجن فاضلاب و کودهای حیوانی در اراضی کشاورزی و فضای سبز شهری که دارای آلودگی به عناصر سنگین هستند باعث شده همبستگی مثبتی بین میزان ماده آلی و مقدار عناصر سرب، روی، مس و کادمیم ایجاد شود و دارای منبع مشترک باشند (۱۶).

فاکتور دوم شامل کروم، کبالت، منگنز، نیکل، جزء سیلت و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χfd) می‌باشد و حدود ۱۸/۱ درصد از کل تغییرپذیری را توجیه می‌کند. این گروه بیش‌تر تحت تأثیر مواد مادری در منطقه می‌باشند. لو و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که غلظت عناصری مانند منگنز در خاک‌های سطحی شهری تغییرات چندانی ندارد و این عنصر بیش‌تر تحت تأثیر مواد مادری می‌باشد (۱۱). فاکتور سوم نیز ۱۶/۲ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کند و پذیرفتاری مغناطیسی (χlf و χhf) به همراه جزء شن در این فاکتور قرار گرفته است. بردارهای ویژه برای پذیرفتاری در فرکانس بالا و پایین (۰/۹۵) و برای جزء شن (۰/۴۰) می‌باشد. همبستگی بسیار قوی پذیرفتاری مغناطیسی با جزء شن نشان می‌دهد که ذرات فری مغناطیس در اندازه‌های درشت بیش‌تر هستند و همچنین جزء شن میزان کانی‌های مغناطیسی بالاتری دارد. عامل پذیرفتاری مغناطیسی در خاک سطحی شهری و مناطق صنعتی تحت تأثیر آلودگی با منشاء انسانی قرار می‌گیرد بنابراین می‌توان گفت که ضریب همبستگی بالا بین اندازه پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت عناصر سنگین می‌تواند به عنوان شاخص آلودگی تعبیر شود (۱۷). فاکتور چهارم شامل جزء رس و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌باشد که در کل حدود

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χfd) نماینده ذرات فری مغناطیس پدوژنیکی است (۱ و ۱۳). همچنین برای تمیز و جدا سازی آلودگی منابع طبیعی از منابع غیرمتعارف با منشاء انسانی می‌توان از پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χfd) استفاده کرد (۱۴). میانگین پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χfd) در کاربری‌های کشت دیم، کشت آبی، باغ، مرتع و شهری به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۱۸، ۱/۲ و ۱/۱ درصد بدست آمد. کاربری‌های اراضی کشت آبی و شهری به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس را نشان می‌دهد که دارای اختلاف معنی‌دار نسبت به سایر کاربری‌های اراضی است.

ضریب تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی (χlf) به ترتیب کاهشی در کاربری‌های اراضی باغ (۰/۱۰۶)، کشت دیم (۰/۹۴)، مرتع (۰/۸۷)، کشت آبی (۰/۶۵) و شهری (۰/۵۱) مشاهده شد. به صورت موردی در برخی از نقاط نمونه‌برداری شده از کاربری‌های باغ، مرتع و کشاورزی (دیم و آبی) میزان پذیرفتاری مغناطیسی به صورت غیرعادی بالاست، این نقاط مربوط به مناطق با فعالیت کارخانجات صنعتی و یا جاده‌هایی با ترافیک بالاست. مگرا و همکاران (۲۰۰۶) اشاره داشتند که در مناطق صنعتی میزان فرونشست گرد و غبار سالیانه در حدود بیش از ۱۰۰ گرم بر متر مربع می‌باشد. آن‌ها ارتباط معنی‌داری بین پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت برخی فلزات سنگین در این مناطق گزارش کردند (۷). کاپیکا و همکاران (۲۰۰۳) میزان ذرات فری-مغناطیس را در نزدیکی نیروگاه برق بالا گزارش کردند که بیش‌ترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی در افق سطحی (آلی) مشاهده شد (۱۵). یکی از دلایل عمده ضریب تغییرات بالا در کاربری اراضی مختلف می‌تواند ناشی از تحت تأثیر قرار گرفتن بعضی از نقاط نمونه‌برداری در کاربری اراضی مختلف به فعالیت‌های انسانی در منطقه باشد.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آنالیز

خوشه‌ای (CA)

برای تشخیص بیش‌تر و دسته‌بندی کردن پارامترهای مغناطیسی و عوامل تأثیرگذار بر آن در نمونه‌های خاک سطحی

۹/۶۵ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیه می‌کند. فاکتور پنجم ۸/۵۰ درصد از واریانس را توجیه می‌کند و شامل درصد کربنات کلسیم و pH خاک می‌باشد. با توجه به ضرایب همبستگی و درصد توجیه‌پذیری هر فاکتور (جدول ۱) به نظر می‌رسد سه فاکتور اول مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای مغناطیسی باشند.

جدول ۱ - مقادیر ویژه داده‌های متغیرهای مورد بررسی (پارامترهای مغناطیسی، فلزات سنگین

و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک) در منطقه مطالعاتی

| تجزیه به مؤلفه‌های اصلی | | | | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | |
| ۱/۶۱۶ | ۱/۸۳۴ | ۳/۰۷۱ | ۳/۴۳۴ | ۳/۸۹۶ | مقدار ویژه |
| ۸/۵۰۳ | ۹/۶۵۲ | ۱۶/۱۶۲ | ۱۸/۰۷۱ | ۲۰/۵۰۵ | درصد واریانس (%) |
| | | | | | محتوی |
| -۰/۰۴۶ | -۰/۰۹۹ | ۰/۹۴۵ | -۰/۲۲۲ | ۰/۰۸۲ | χ_{lf} |
| -۰/۰۴۵ | -۰/۱۰۰ | ۰/۹۴۶ | -۰/۲۲۴ | ۰/۰۷۹ | χ_{hf} |
| -۰/۰۵۴ | ۰/۲۶۱ | -۰/۶۱۶ | ۰/۳۲۵ | ۰/۱۰۸ | χ_{fd} |
| ۰/۱۷۷ | -۰/۲۳۵ | ۰/۱۵۲ | -۰/۲۰۳ | ۰/۷۴۴ | کادمیم |
| ۰/۰۹۶ | -۰/۱۰۷ | -۰/۱۶۱ | -۰/۱۰۰ | ۰/۷۴۲ | مس |
| ۰/۰۲۴ | -۰/۲۲۸ | ۰/۳۲۶ | ۰/۰۷۲ | ۰/۶۵۱ | روی |
| -۰/۰۰۴ | -۰/۵۶۷ | ۰/۲۷۹ | ۰/۰۴۰ | ۰/۴۱۱ | سرب |
| -۰/۱۱۰ | ۰/۰۱۶ | -۰/۳۷۷ | ۰/۷۴۵ | -۰/۰۸۴ | کروم |
| -۰/۰۵۵ | -۰/۱۴۸ | ۰/۰۱۷ | ۰/۸۱۵ | -۰/۲۹۳ | کیالت |
| -۰/۷۳۱ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۱۹ | ۰/۳۳۳ | -۰/۰۴۱ | منگنز |
| ۰/۰۴۸ | ۰/۱۲۷ | -۰/۳۵۰ | ۰/۶۶۸ | -۰/۱۵۹ | نیکل |
| ۰/۱۸۶۷ | ۰/۰۶۹ | -۰/۰۵۵ | ۰/۲۱۸ | ۰/۱۲۵ | کربنات کلسیم |
| ۰/۴۲۴ | ۰/۰۶۷ | ۰/۱۶۶ | ۰/۲۳۱ | -۰/۶۸۳ | pH |
| ۰/۲۴۲ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۰۴ | -۰/۰۰۲ | ۰/۸۸۲ | EC |
| ۰/۰۳۶ | ۰/۶۹۸ | -۰/۲۴۹ | ۰/۰۹۲ | -۰/۲۱۱ | Clay |
| -۰/۰۳۱ | -۰/۴۷۲ | ۰/۴۰۲ | -۰/۶۸۰ | -۰/۰۴۷ | Sand |
| ۰/۰۹۸ | ۰/۳۱۱ | -۰/۳۲۴ | ۰/۶۷۳ | ۰/۱۴۱ | Silt |
| -۰/۰۳۳ | ۰/۶۶۷ | ۰/۱۸۴ | ۰/۶۰۷ | ۰/۰۷۷ | CEC |
| -۰/۱۱۰ | ۰/۰۵۷ | -۰/۰۳۸ | ۰/۰۱۱ | ۰/۸۴۹ | ماده آلی |

در فرکانس بالا (χ_{hf}) و پایین (χ_{lf})، درصد شن، ماده آلی، هدایت الکتریکی خاک (EC)، کادمیم، مس، روی و سرب قرار دارند. در گروه دوم از تجزیه خوشه‌ای پارامترهای مختلف

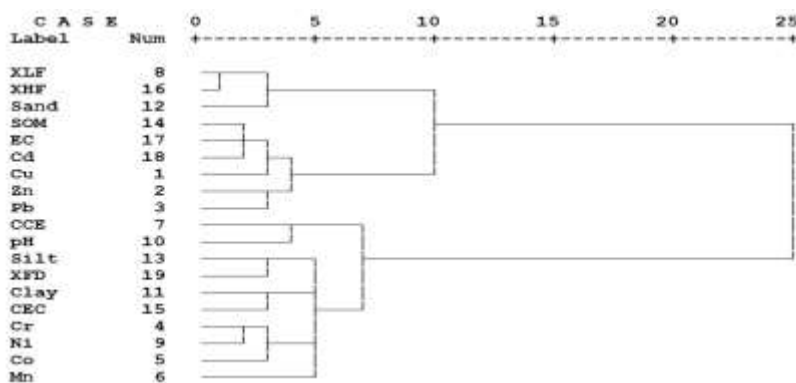
نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای (CA) همانند نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) است و آن را تأیید می‌کند (شکل ۳). در گروه اول تجزیه خوشه‌ای پارامترهای پذیرفتاری مغناطیسی

ورودی تأثیرگذار هستند. مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی که در منطقه صورت می‌گیرد شامل فعالیت کارخانه سرب و روی و سایر کارخانجات صنعتی مربوط به آن، سوخت‌های فسیلی و شهرسازی (عمران، ساختمان، جاده‌سازی و ...) است که این سه منبع به صورت مشترک باعث افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک سطحی شهری می‌شوند. منبع مشترک یا هم‌زیستی بین عناصر سنگین و میزان پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند غنی‌شدگی عناصر سنگین و پذیرفتاری مغناطیسی را در خاک سطحی توجیح کند (۱۲).

از قبیل پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd})، کربنات کلسیم معادل (CCE)، pH، سیلت، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، کروم، نیکل، کبالت و منگنز قرار گرفته‌اند. گروه اول جزء پارامترهایی هستند که بیش‌تر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند و گروه دوم، بیش‌تر متأثر از ماده مادری و فاکتورهای خاک‌سازی می‌باشد.

در مطالعات مختلف نتایج مشابهی ارائه شده است. ارتباط مثبت بین پذیرفتاری مغناطیسی و برخی فلزات سنگین (Pb، Zn، Cd و Cu) نشان‌دهنده وجود منشاء مشترک این دو عامل می‌باشد. هوفمن و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند که کانی‌های مغناطیسی و آلاینده‌ها به طور هم‌زمان از آگزوز ماشین‌ها خارج می‌شوند (۶). پذیرفتاری مغناطیسی به طور بالقوه به عنوان نماینده مقدار آلودگی فلزات سنگین در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲ و ۳).

با توجه به وجود پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) پایین و غلظت بالای پذیرفتاری مغناطیسی در منطقه‌ی - شهری می‌توان گفت که ذرات آنتروپوژنیکی مهم‌ترین منابع



شکل ۳ - دندوگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای پارامترهای مغناطیسی،

فلزات سنگین و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در خاک‌های سطحی

منطقه مطالعاتی (N=۲۴۱)

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، Clay: درصد رس، Silt: درصد سیلت،

EC: هدایت الکتریکی، SOM: مواد آلی خاک، Sand: درصد شن

شکل ۴ (الف) پراکنش مکانی پذیرفتاری مغناطیسی

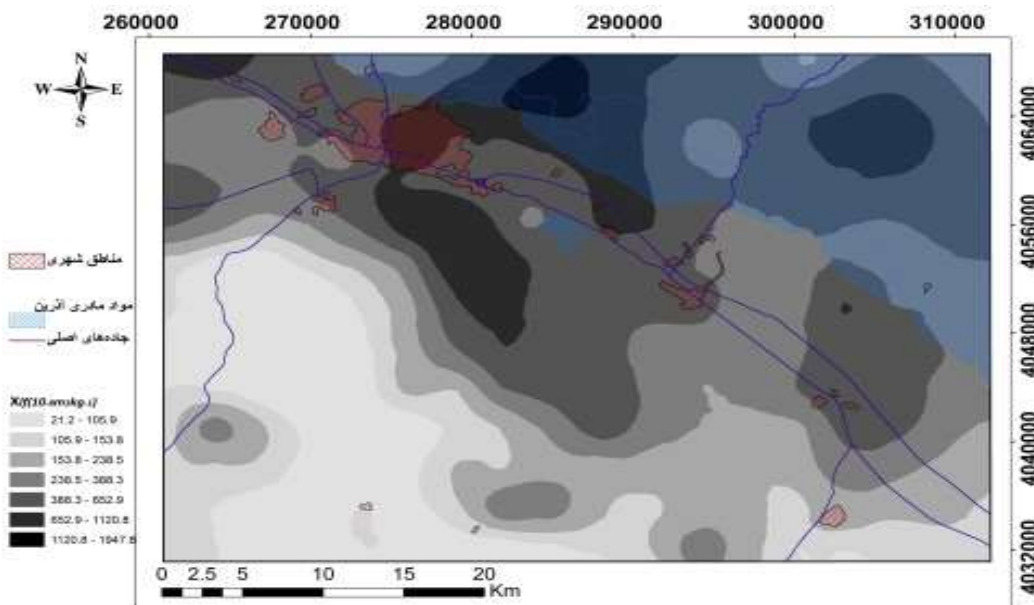
و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) که از

پراکنش جغرافیایی پارامترهای مغناطیسی در منطقه

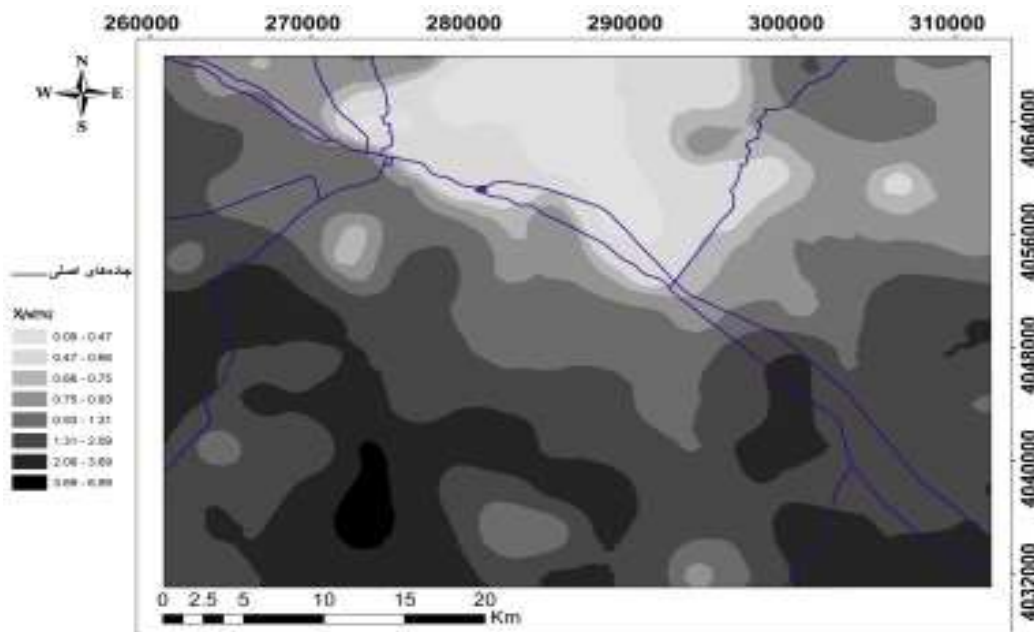
مطالعاتی

تحت تأثیر عوامل و ویژگی‌های مختلف و غیریکنواختی می‌باشند (شکل ۴ الف و ب). گسترش روزافزون شهرنشینی و تردد وسایل نقلیه، فعالیت کارخانه‌های بزرگ صنعتی و از طرف دیگر وجود مواد مادری متنوع با میزان پذیرفتاری مغناطیسی متفاوت از عوامل دخیل بر ضریب تغییرات بالای پارامترهای مغناطیسی می‌باشند.

کریجینگ معمولی حاصل شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ (الف)، غلظت‌های بالای پذیرفتاری مغناطیسی در قسمت شمال تا شمال شرقی کشیده شده است. وجود ساختارهای زمین‌شناختی از نوع مواد مادری آذرین (از قبیل گرانیت، بازالت، آندزیت و ...) در منطقه مورد نظر، که دارای پذیرفتاری مغناطیسی نسبتاً بالایی هستند (۱۸ و ۷)، می‌تواند در بالا بردن پذیرفتاری مغناطیسی در این قسمت نقش داشته باشد. افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های طبیعی بیش‌تر به علت تشکیل پدوژنز و درجای مواد فرومغناطیس است که تشکیل این مواد در ارتباط با فاکتورهای تشکیل خاک، مواد مادری، اقلیم، توپوگرافی و زمان هستند (۲۰). پروسه‌های پدوژنیکی در افق سطحی خاک‌ها بالا گزارش شده است (۱۹). همچنین در طی شخم زدن خاک‌های زراعی، کانی‌های فری-مغناطیس مشتق شده از سنگ‌های مادری به سطح خاک انتقال می‌یابند (۷). فاین و همکاران (۱۹۹۸) وجود مقدار بالای مواد آلی و میکرواورگانسیم‌های هتروتروف در نزدیکی سطح خاک را از عوامل عمده تشکیل کانی‌های فری‌مگنتیک در خاک‌های طبیعی می‌دانند (۲۰). از طرف دیگر افزایش غلظت پذیرفتاری مغناطیسی در قسمت مرکزی منطقه مطالعاتی دیده می‌شود که دارای کاربری اراضی شهری است و همچنین مراکز صنعتی مختلفی در این بخش فعالیت دارند (به خصوص کارخانه سرب و روی زنجان). فعالیت‌های انسانی از قبیل شهری و صنعتی، از مهم‌ترین عوامل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های سطحی گزارش شده است (۲، ۳، ۷، ۱۲ و ۱۷). شکل ۴ (ب) توزیع مکانی پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) را نشان می‌دهد. پراکنش مکانی پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس کاملاً عکس پراکنش مکانی پذیرفتاری در منطقه می‌باشد. هر کجا که پذیرفتاری مغناطیسی بالا باشد، مقدار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) در آن منطقه پایین خواهد بود (۱). به صورت کلی این نشان‌دهنده این است که ذرات فری‌مغناطیسی ناشی از فعالیت‌های انسانی در منطقه بیش‌تر است. ضریب تغییرات بالای پارامترهای پذیرفتاری مغناطیسی نشان می‌دهد که این پارامترها در منطقه



الف



ب

شکل ۴ - پراکنش مکانی حاصل از کریجینگ معمولی (الف) پذیرفتاری مغناطیسی و (ب)

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس

نمونه سنگ‌های بازالت، پوفیریت و گرانیت به ترتیب ۸۹۸/۱، ۴۸۱/۲ و ۲۷۷/۰ ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) بیش‌ترین مقدار را دارد. سنگ‌های رسوبی کم‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی را نشان می‌دهند که در سنگ‌های کنگلومرا- شیل و دولومیت به

جدول ۲، پذیرفتاری مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در نمونه سنگ‌های مادری جمع‌آوری شده از منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر پذیرفتاری- مغناطیسی در سنگ‌های آذرینی مشاهده می‌شود و

گزارش کردند (۱۸). مگیرو و همکاران (۲۰۰۶) اشاره کردند که خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های بازی، پذیرفتاری مغناطیسی بالایی دارند (۷).

ترتیب ۷/۱ و ۴/۹ ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) کم‌ترین مقادیر را دارند. به صورت کلی پذیرفتاری مغناطیسی در رسوبات آبرفتی بیش‌تر از سنگ‌های رسوبی و کم‌تر از سنگ‌های آذرینی است. لو (۲۰۰۰) سهم جزء مغناطیسی مواد مادری در افزایش مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل شده از بازالت را در مقایسه با دیگر خاک‌های تشکیل شده از سنگ‌های رسوبی خیلی بالا

جدول ۲ - غلظت پارامترهای پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه سنگ‌های جمع‌آوری شده از مواد مادری

منطقه مطالعاتی

| پذیرفتاری وابسته به فرکانس (χ_{fd}) | پذیرفتاری مغناطیسی (χ/f) | |
|--|---------------------------------|----------------------------|
| ۰/۴۶ | ۲۷۷/۰ | گرانیت |
| ۰/۵۳ | ۸۹۸/۱ | بازالت |
| ۳/۶۶ | ۶۸/۱ | آندزیت |
| ۰/۵۹ | ۴۸۱/۲ | پورفیریت |
| ۰/۴۵ | ۵۲/۴ | توف سبز آتشفشانی |
| ۰/۶۰ | ۲۴/۱ | سنگ آهک |
| ۲/۷۴ | ۷/۱ | کنگومرا-شیل |
| ۱/۲۰ | ۴۳/۶ | شیل |
| ۰/۱۸ | ۲۸/۱ | فیلیت |
| ۲/۳۹ | ۸۳/۷ | ماسه سنگ |
| ۲/۱۳ | ۴/۹ | دولومیت |
| بین ۰/۷۰ تا ۰/۹۴ | بین ۲۱۱/۶ تا ۲۱۲/۵ | رسوبات آبرفتی ^۱ |

^۱ میانگین پارامترهای مغناطیسی در رسوبات آبرفتی بین تمام افق‌های ژنتیکی و افق C که در عمق ۱۸۰ تا ۲۵۰ سانتی‌متری بود، محاسبه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

پراکنش مکانی پذیرفتاری مغناطیسی کاملاً منطبق بر نتایج مربوط به کاربری‌های اراضی مختلف بود و بیش‌ترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری شهری و اطراف مراکز صنعتی مشاهده شد. نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و آنالیز خوشه‌ای دو منبع اصلی تأثیرگذار بر پارامترهای مغناطیسی را نشان داد. گروه اول شامل عناصر با آلودگی انسانی (سرب، روی، مس، کادمیم) و پذیرفتاری مغناطیسی است و گروه دوم شامل

نتایج نشان داد که بالاترین میزان پذیرفتاری-مغناطیسی در مناطقی با فعالیت انسانی بالا مشاهده شد. در کاربری اراضی شهری میانگین پذیرفتاری مغناطیسی بیش‌تر از سایر کاربری‌های اراضی بدست آمد. جمع ذرات فرومغناطیس با منشاء انسانی بیش‌تر در جریان سوخت سوخت‌های فسیلی و فعالیت کارخانه‌های صنعتی به خصوص کارخانه سرب و روی و مجتمع‌های صنعتی در منطقه اتفاق می‌افتد. نتیجه حاصل از

- susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 130: 299-311.
- 8- Sharma, A.P., and Tripathi, B.D. 2008. Magnetic mapping of fly-ash pollution and heavy metals from soil samples around a point source in a dry tropical environment. *Environmental Monitoring Assessing*, 138: 31-39.
- 9- Wang, G., Oldfield, F., Xia, D., Chen, F., Liu, X., and Zhang, W. 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.
- 10- Lu, S., Wang, H., and Bai, S. 2009. Heavy metal contents and magnetic susceptibility of soils along an urban-rural gradient in rapidly growing city of eastern China. *Environmental Monitoring Assessing*, 155: 91-101.
- 11- Johnson, D.E., 1998. *Applied Multivariate Methods for Data Analysis*, Duxbury Press, Pacific Grove, California, USA.
- 12- Lu, S.G., Bai, S.Q., and Xue, Q.F. 2007. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China. *Geophys. J. Int*, 171: 568-580.
- 13- Maher, B.A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42: 76-92.
- 14- Hanesch, M., Scholger, R. 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ. Geol*, 42: 857-870.
- 15- Kapicka, A., Jordanova, N., Petrovsky, E., and Podrazsky, V. 2003. Magnetic susceptibility in Central Europe. *Environ. Geol*, 42: 857-870.
- عناصر با منشأ طبیعی (آهن، منگنز، کروم، کبالت، نیکل) و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس است. به صورت کلی می‌توان گفت که روش پذیرفتاری مغناطیسی، تکنیکی با قابلیت بالا جهت برآورد آلودگی محیط و جدا کردن منابع انسانی از طبیعی می‌باشد.
- #### منابع
- 1- Dearing, J.A., 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, Kenilworth, England.
- 2- Karimi, R., Ayoubi, S., Jalalian, A., Sheikh-Hosseini, A.R., and Afyuni, M. 2011. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 74: 1-7.
- 3- Dankoub, Z., Ayoubi, S., Khademi, H., and Sheng-Gao, L.U. 2012. Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use. *Pedosphere*, 22: 33-47.
- 4- Wang, X.S., and Qin, Y. 2006. Comparison of magnetic parameters with vehicular Br levels in urban roadside. *Environ. Geol*, 50: 787-791.
- 5- Lu, S.G., Bai, S.Q., and Fu, L.X. 2008. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedospher*, 18: 479-485.
- 6- Hoffmann, V., Knab, M., and Apple, E. 1999. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *J. Geochem. Explor*, 66: 3131-326.
- 7- Magiera, T., Strzyszc, Z., Kapicka, A., Petrovsky, E. 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic

- subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena*, 40: 359-373.
- 19- Jelenska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kadzialko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K., and Matviishina, Z.H. 2007. Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland. *Stud. Geophys. Geod*, 52: 255-270.
- 20- Fine, P., Singer, M.J., and Southward, R.J. 1989. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequence. *Geoderma*, 44: 287-306.
- study of weakly contaminated forest soils. *Water Air Soil Pollution*, 148: 31-44.
- 16- Amini, M., Afyuni, M., Khademi, H., Abbaspour, K.C., and Schulin, R. 2005. Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of Central Iran. *Science of the Total Environment*, 347: 64-77.
- 17- Canbay, M., Aydin, A., and Kurtulus, C. 2010. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 70: 46-57.
- 18- Lu, S.G. 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of