

محیط شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۳، پاییز ۹۱، صفحه ۱۷-۲۶

پذیرفتاری مغناطیسی و ارتباط آن با غلظت برخی فلزات سنگین و خصوصیات خاکهای سطحی اطراف اصفهان

زهرا دنکوب^۱، حسین خادمی^{۲*}، شمس اله ایوبی^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان z.dankoub@ag.iut.ac.ir

۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان ayoubi@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۲۳

چکیده

به منظور بررسی پذیرفتاری مغناطیسی خاک و ارتباط آن با غلظت برخی فلزات سنگین و خصوصیات خاکهای سطحی منطقه اصفهان تعداد ۱۵۸ نمونه مرکب خاک از عمق ۰ تا ۵ سانتیمتری از منطقه‌ای به وسعت ۷۰۰ کیلومتر مربع برداشته شد و موقعیت نقاط با دستگاه GPS تعیین شد. پذیرفتاری مغناطیسی درجای خاک با استفاده از حسگر MS2F در صحرا در همه نقاط اندازه‌گیری شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس 0.46 kHz (χ_{lf}) نیز اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت کل برخی فلزات سنگین و ویژگی‌های خاک شامل pH، هدایت الکتریکی، بافت، سنگریزه، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و گچ در نمونه‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد که غلظت فلزات مس، روی، سرب، آهن و منگنز همبستگی مثبت و معنی‌داری با پذیرفتاری مغناطیسی دارند که می‌تواند به دلیل انتشار آلودگی‌های حاصل از ترافیک و فعالیت‌های صنعتی در منطقه مطالعاتی باشد. نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه با روش گام‌به‌گام نشان داد که فلزات Pb، Cr، Zn و Fe و درصد شن، گچ و ماده آلی تقریباً ۷۶ درصد از کل تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین را توجیه می‌کنند. معادله رگرسیونی به دست آمده بین پذیرفتاری مغناطیسی درجا با خصوصیات خاک و غلظت عناصر سنگین نشان داد که ۷۱ درصد از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی درجا با فلزات Pb و Mn و درصد شن، سنگریزه، گچ و ماده آلی در خاکهای منطقه توجیه می‌شوند. بنابراین، بر اساس اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی می‌توان میزان آلودگی خاک به برخی فلزات سنگین را پیش‌بینی کرد.

کلید واژه

پذیرفتاری مغناطیسی، فلزات سنگین، آلودگی خاک، دیامغناطیس

سر آغاز

مغناطیسی و به ترتیب نزولی شامل فرومغناطیس (مانند آهن خالص با حداکثر میزان پذیرفتاری مغناطیسی)، فری مغناطیس (مانند مگنتیت و ماگهمیت)، آنتی فرومغناطیس (مانند هماتیت و گئوتیت)، پارامغناطیس^۶ (مانند بیوتیت^۷ و پیریت^۸) و دیامغناطیس^۹ (مانند کوارتز، آهک، گچ و ماده آلی) هستند (Mullins, 1977).

اگر پذیرفتاری مغناطیسی مثبت باشد، ماده را پارامغناطیس می‌گویند، و میدان مغناطیسی در اثر حضور ماده تقویت می‌شود. اگر پذیرفتاری مغناطیسی منفی باشد، جسم را دیامغناطیس می‌نامند و میدان مغناطیسی در حضور چنین ماده‌ای تضعیف می‌شود. فرومغناطیس‌ها رده‌ای از مواد مغناطیسی را تشکیل می‌دهند که وجه مشخصه آنها این است که می‌توانند مغناطیس دائم داشته و عموماً وجودشان تأثیر زیادی در میدان مغناطیسی دارد (صمیمی و

پذیرفتاری مغناطیسی^۱ درجه‌ای است که ماده، میدان مغناطیسی شناخته شده و معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار این تأثیر تابع غلظت و نوع کانی‌های مغناطیسی است که در نمونه وجود دارد. در پاره‌ای مواد متبلور نظیر کانی‌های آهن‌دار آثار متقابل بین ممان‌های^۲ مغناطیسی میلیون‌ها اتم، ایجاد آهن‌ربایی کوچک و ذره‌ای می‌کند، به این خاصیت فرومغناطیس^۳ گفته می‌شود.

عامل ایجاد ویژگی مغناطیسی در خاک بیشتر کانی‌های مگنتیت^۴ و ماگهمیت^۵ هستند. غلظت این کانی‌ها در خاک کم است؛ ولی نسبت به دیگر کانی‌های آهن‌دار، شدت پذیرفتاری مغناطیسی خاک را تنظیم می‌کنند (Mullins, 1977). رفتارهای مغناطیسی در اجسام به پنج دسته تقسیم می‌شوند که بر حسب میزان پذیرفتاری

همکاران، ۱۳۸۴). بخشی از مواد فری مغناطیسی در خاک از مواد مادری (منشا لیتوژنیک) به ارث می‌رسد (Mullins, 1977). پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌تواند با فرایندهایی نظیر فرایندهای بیوشیمیایی و جابه‌جایی افزایش، یا کاهش یابد (de Jong, et al., 2000).

آب، ماده‌آلی و کربنات‌ها پذیرفتاری مغناطیسی بسیار پایینی دارند (de Jong, et al., 2000). آبشویی کربنات‌ها و گچ و همچنین تجمع ماده آلی در سطح خاک و یا سایر تغییرات شدید در توده خاک، می‌تواند میزان پذیرفتاری در یک افق را نسبت به سایر افق‌ها تغییر دهد که این موضوع مربوط به افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی در خاک است.

Marwick (2005) در مطالعه خود در غرب استرالیا نشان داد که افزایش گچ که ماده‌ای دیامغناطیس است باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌شود. افزایش مغناطیس خاک می‌تواند به دلیل منابع انسانی^۱ مانند گرد و غبارهای صنعتی و شهری باشد که حاوی ذرات مغناطیسی هستند (Lu, et al., 2008; Petrovsky, et al., 2000). ذرات مغناطیسی از منابع مربوط به وسایل نقلیه مانند رنگ، افزودنی‌های سوخت، تایلر اتومبیل‌ها و گرد و غبار حاصل از ترمز وسایل نقلیه (Blundell, et al., 2009)، همراه با فلزات سنگین، بویژه مس، روی، کادمیم و سرب (Lu, et al., 2008)، آزاد و باعث افزایش این فلزات در خاک می‌شوند؛ سپس این آلاینده‌ها در اتمسفر حمل می‌شوند و سرانجام بر روی زمین رسوب می‌کنند (Boyko, et al., 2004). در برخی موارد، ورودی عناصر سنگین در اثر فعالیت‌های انسان به داخل خاک، بسیار بیشتر از ورودی آنها در حالت طبیعی است. مواد مادری یکی از منابع مهم ورود عناصر سنگین به داخل خاک به شمار می‌رود (Facchinelli, et al., 2001).

Mico و همکاران (2006) نیز مطالعاتی را در زمینه منبع ورود عناصر سنگین به خاک انجام دادند. Kukier و همکاران (2003) همبستگی بالای بین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات مس و روی را به دلیل وارد شدن این فلزات به شبکه کریستالی کانی‌های فری‌مگنتیک دانستند.

مواد و روش بررسی

منطقه مورد مطالعه

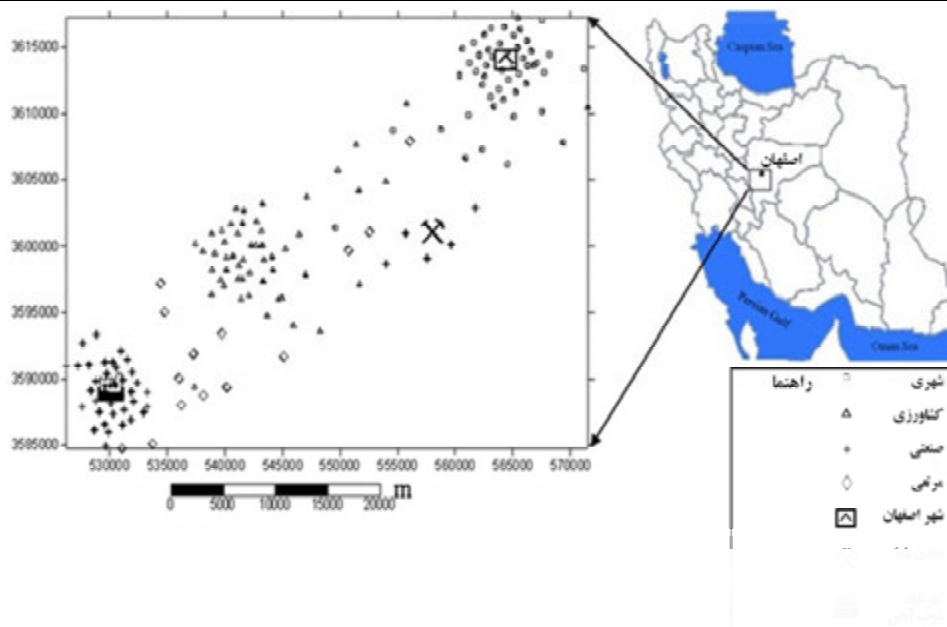
منطقه مورد مطالعه با وسعت ۷۰۰ کیلومتر مربع شامل شهرستان اصفهان و حومه آن است. این منطقه بین طول جغرافیایی ۱۵° ۱۵' تا ۱۵° ۴۷' شرقی و عرض جغرافیایی ۲۲° ۳۲' تا ۳۲° ۴۴' شمالی واقع شده است.

متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۵۵۰ متر، میانگین دمای سالانه ۱۶/۲ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی در منطقه ۱۱۰ میلیمتر در سال است.

تشکیلات زمین‌شناختی غالب منطقه از رسوبات اخیر، رسوبات دوران کواترنری، نهشته‌های قدیم زاینده رود، سنگ آهک دوران کرتاسه، کنگلومرات و ماسه سنگ کرتاسه پایینی و شیل‌های ژوراسیک تشکیل شده است.

نمونه‌برداری از ۴ نوع کاربری مرتع، کشاورزی، صنعتی و مناطق شهری صورت گرفت. شکل شماره (۱) موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده را به تفکیک نوع کاربری نشان می‌دهد.

در مطالعات مختلفی، همبستگی معنی‌داری بین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات سنگین در خاک گزارش شده است (Lecoanet, et al., 2000; Xie, et al., 2001; Lu, Bai, 2006; Lu, et al., 2010; Morton-Bermea, et al., 2009; Karimi, et al.,



شکل شماره (۱): موقعیت نقاط نمونه برداری شده در منطقه مطالعاتی به تفکیک نوع کاربری

اندازه گیری شد و میانگین رطوبت این ۴ نقطه به عنوان رطوبت آن نمونه خاک گزارش گردید.

مطالعات آزمایشگاهی

ابتدا نمونه‌ها هواخشک شدند و بعد از کوبیدن کامل خاک، درصد سنگریزه اندازه گیری شد. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه Bartington MS2 dual frequency sensor و حسگر MS2B در فرکانس پایین 14 kHz (χf) اندازه گیری شد. از هر نمونه سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت و برای هر تکرار سه قرائت انجام شد، تا مقدار خطای آزمایشگاهی قرائت به حداقل برسد. میانگین قرائت‌ها به عنوان نتیجه نهایی پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه گزارش شد.

مقدار کل عناصر روی، مس، منگنز، سرب، نیکل، کروم و کبالت (قابل عصاره‌گیری با اسید نیتریک ۵ نرمال) (Ajayi and Kamson, 1983) با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل پرقین المر ۳۰۳۰ تعیین شد. به منظور کنترل کیفیت نتایج تجزیه فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، یک نمونه استاندارد مؤسسه ملی فناوری امریکا^{۱۵} (NST) به نام San Joaquin # 2709 تهیه شد و غلظت عناصر مورد بررسی در آن اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های خاک شامل درصد رس، سیلت و شن به روش پیپت (Day, 1965)، ماده آلی به روش والکی-بلک (Nelson and Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون معکوس (Smith, 1991)، گچ به روش کاهش وزن (Nelson, et al.,

برای نمونه‌برداری، کل منطقه به شبکه‌های 3×3 کیلومتر تقسیم‌بندی شد. به منظور مطالعه دقیق‌تر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی، فواصل نمونه‌برداری در مناطقی با کاربری شهری، کشاورزی و صنعتی که فعالیت‌های انسانی تمرکز بیشتری داشتند شبکه 1×1 کیلومتر طراحی شد. موقعیت نقاط با GPS^{۱۱} تعیین و با استفاده از یک بیلچه غیر فلزی، نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۵ سانتیمتری سطح خاک انجام شد و کاربری نقاط نیز ثبت شد.

نمونه‌برداری به روش تصادفی داخل بلوک‌ها^{۱۲} به صورت ترکیبی انجام شد. به این ترتیب که از داخل هر شبکه یک نمونه مرکب، شامل مخلوطی از ۴ نمونه به فاصله ۵ متر برداشته شد. نمونه‌ها درون کیسه پلاستیکی ریخته شد و برای آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شد.

قبل از نمونه‌برداری از نقطه مورد نظر (در هر ۴ نقطه داخل هر شبکه) مقدار پذیرفتاری مغناطیسی با حسگر MS2F به صورت درجا قرائت و ثبت شد.

بدین منظور مواد زائد سطح خاک مانند سنگریزه، بقایای گیاهی، اجسام و زباله‌های موجود بر روی سطح خاک (قوطی، فلزات و...) کنار زده شد و سپس قرائت صورت گرفت. میانگین پذیرفتاری مغناطیسی این ۴ نقطه به عنوان پذیرفتاری مغناطیسی درجا^{۱۳}، در آن نمونه خاک در نظر گرفته شد. از هر ۴ نقطه به طور جداگانه مقداری نمونه خاک جهت تعیین درصد رطوبت برداشته شد و بی‌درنگ بعد از اتمام نمونه‌برداری درصد رطوبت نمونه‌ها به روش وزنی

(1978) و توانایی هدایت الکتریکی و pH (در عصاره ۱ به ۲ خاک به آب) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^{۱۶} مورد استفاده قرار گرفت (Davis, 1986). بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری پذیرفتاری مغناطیسی، ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین مورد مطالعه با نرم‌افزار SPSS 16 انجام شد. به منظور مشخص کردن ویژگی‌های خاک و فلزات سنگینی که تأثیر معنی‌داری بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های منطقه مطالعاتی دارند از رگرسیون خطی چندگانه^{۱۷} با روش گام‌به‌گام^{۱۸} استفاده شد.

مدل رگرسیونی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Y = b_0 + b_1 F_1 + b_2 F_2 + \dots + b_n F_n + \varepsilon(1)$$

که در این معادله Y نشان‌دهنده مشخصه مغناطیسی تخمین زده شده، b_0 تا b_n نشان‌دهنده ضرایب، F_1 تا F_n مبین غلظت فلزات سنگین و ویژگی‌های خاک و ε مبین خطا هستند.

نتایج

توصیف آماری متغیرها

توصیف آماری مشخصه‌های مغناطیسی، فلزات سنگین و برخی از ویژگی‌های خاک در جدول شماره (۱) ارائه شده است. میانگین غلظت فلزات سرب، روی، مس، منگنز، آهن، نیکل، کروم و کبالت، به ترتیب ۱۳۹/۳، ۱۱۸/۷، ۴۵/۱، ۵۱۴/۴، ۵۱۷۹۸۱، ۵۳/۰، ۶۸/۲ و ۱۳/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. غلظت فلزات سنگین، ضریب تغییرات زیادی را نشان دادند که به دلیل غیریکنواختی آنها در منطقه مطالعاتی است. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز این مطلب را تأیید کرد و نشان داد که همه فلزات به جز سرب، نیکل و کروم دارای توزیع غیرنرمال هستند. ویژگی‌های خاک به جز هدایت الکتریکی خاک دارای توزیع نرمال (طبق آزمون کولموگروف-اسمیرنوف) بودند (جدول شماره ۱). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه نشان داد که این خاک‌ها خنثی تا قلیایی هستند. هدایت الکتریکی خاک از ۰/۱ تا ۲۳/۱ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است. خاک ناحیه مطالعاتی غالباً لومی با میانگین ۲۲/۱ درصد رس است.

جدول شماره (۱): خلاصه‌ای از وضعیت آماری متغیرهای مورد مطالعه

متغیر	واحد	آمار توصیفی					ضریب تغییرات (%)
		مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	چولگی	
χ^2	$10^{-8} m^3 kg^{-1}$	۱۴/۵	۲۵۴۴	۱۵۸/۵	۳۳۸/۶	۵/۱	۲۱۳/۶
MS2F	$10^{-5} SI$	۶/۵	۳۲۶۷/۲	۱۲۸/۵	۳۸۸/۸	۶/۴	۳۰۲/۵
Zn	$mg kg^{-1}$	۲۰/۰	۴۳۷/۵	۱۱۸/۷	۷۶/۱	۱/۵	۶۴/۱
Cu	$mg kg^{-1}$	۱۶/۹	۱۳۳/۸	۴۵/۱	۲۸	۱/۶	۶۲
Pb	$mg kg^{-1}$	۴۲/۵	۲۸۹/۹	۱۳۹/۳	۵۶/۳	۰/۶	۴۰/۴
Mn	$mg kg^{-1}$	۲۰۰/۰	۱۱۴۱/۳	۵۱۴/۴	۱۳۲/۷	۲/۱	۲۵/۷
Fe	$mg kg^{-1}$	۱۱۱۰۰	۳۶۶۰۰	۱۷۹۱	۳۹۴۳/۵	۱/۹	۲۲۰/۱
Ni	$mg kg^{-1}$	۲۳/۸	۱۰۰	۵۳	۱۲/۴	۰/۳	۲۳/۳
Cr	$mg kg^{-1}$	۲۵	۹۶/۳	۶۸/۳	۱۱/۳	-۰/۴	۱۶/۵
Co	$mg kg^{-1}$	۱/۳	۲۷/۵	۱۳/۵	۵/۷	-۰/۱	۴۲/۲
SOM	%	۰/۲	۵/۸	۲/۱	۱۴۶/۳	۰/۷	۶۹۶۶/۶
CCE	%	۸/۳	۴۷/۵	۴۵/۹	۱۱۲/۳	۰/۳	۲۴۴/۶
Gypsum	%	۰/۸	۷/۶	۳/۳	۱/۴	۰/۳	۴۲/۴
EC	$dS m^{-1}$	۰/۱	۲۳/۲	۱/۸	۲/۷	۴/۶	۱۵۰
pH	-	۷/۰	۸/۷	۸/۰	-۰/۳	-۱/۲	۳/۷
Sand	%	۱	۸۸	۳۷/۴	۱۸	-۰/۷	۴۸/۱
Silt	%	۱/۶	۸۴	۴۰/۶	۱۶	۰/۲	۳۹/۴
Clay	%	۰/۸	۷۸/۴	۲۲/۱	۱۴/۳	۰/۷	۶۴/۷
Moisture	%	۰/۰۵	۲۹/۴	۸/۱	۸/۳	۰/۸	۱۰۲/۴
Gravel	%	۰	۶۰	۳۲/۱	۱/۳	۰/۱	۴

χ^2 : پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین، MS2F: پذیرفتاری مغناطیسی درجه، SOM: ماده آلی خاک، CCE: کربنات کلسیم معادل، Gypsum: گچ،

EC: هدایت الکتریکی، pH: اسیدیته خاک.

مغناطیسی در فرکانس پایین مربوط خاک مناطق شهری است. غلظت روی و مس در کاربری شهری بالاتر از سه کاربری دیگر است که می‌تواند در نتیجه انباشت تدریجی از منابع مختلف آلودگی در طول زمان، از جمله آگزوز خودروها و ذرات اتمسفری باشد. افزایش سرب نواحی شهری و صنعتی را می‌توان به احتراق بنزین و فعالیت‌های صنعتی در خاک منطقه مورد مطالعه نسبت داد.

Lu و Bai (2006) گزارش دادند که پذیرفتاری مغناطیسی در خاکهای شهری هانگزو در چین به ترتیب در نواحی صنعتی < خاکهای کنار جاده‌ای < محل‌های مسکونی \approx فضای باز (محوطه کالج) < پارک‌های عمومی افزایش یافته و این افزایش را مربوط به فعالیت‌های صنعتی، دود ناشی از آگزوز اتومبیل‌ها و رسوبات اتمسفری دانستند.

Lu و همکاران (2008) میانگین بالای روی و مس و همچنین پذیرفتاری مغناطیسی را در خاکهای کنار جاده‌ای در چین گزارش دادند. آنها میانگین روی و مس در خاکهای کنار جاده‌ای را دو برابر میانگین این فلزات در خاکهای چین گزارش دادند.

بالاترین مقادیر آهن و منگنز در خاکهای مناطق صنعتی مشاهده شد. غلظت‌های بالای منگنز و آهن در مناطق صنعتی به شدت تحت تأثیر منابع مربوط به استخراج و ذوب فلزات از جمله ذوب آهن و فعالیت‌های استخراج معادن در منطقه مورد مطالعه است.

Mico و همکاران (2006) گزارش دادند که عناصر کادمیم، مس، سرب و روی در در ناحیه مدیرانه‌ای اروپا بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارند. Xie و همکاران (2001) گزارش دادند که سرب و روی غالباً تحت تأثیر منابع غیرطبیعی قرار دارند، در حالی که آهن عنصری است که هر دو منشا منابع خاکی و انسانی دارد. از منابع اصلی آهن می‌توان منابع خاکی، موتور وسایل نقلیه، خوردگی فلزات و سیمان را نام برد. غلظت‌های بالاتر نیکل، کبالت، و کروم در خاک سطحی کاربری مرتعی و کشاورزی در مقایسه با دو کاربری دیگر نشان داد که این فلزات کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در این نواحی قرار گرفته‌اند و مقادیر پایین آنها در منطقه مورد مطالعه، منبع طبیعی (زمین شناسی) را برای این فلزات در ناحیه مورد مطالعه پیشنهاد می‌کند. Facchinelli و همکاران (2001)، در ایتالیا نشان دادند که نیکل، کروم و کبالت تحت تأثیر عاملی مشترک قرار دارند و توزیع آنها تحت تأثیر شرایط لیتولوژیک منطقه قرار می‌گیرد.

میانگین درصد ماده آلی ۲/۰۵ درصد است. تغییرات ماده آلی در منطقه بیشتر به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از کود، لجن، فاضلاب و کمپوست به عنوان اصلاح کننده به خاک است. درصد کربنات کلسیم معادل در ناحیه مورد مطالعه بالا و میانگین آن ۴۵/۹ درصد است.

میانگین درصد گچ در منطقه ۳/۲ درصد است. پذیرفتاری مغناطیسی خاک (χ_{lf})، از $14/47 \times 10^{-8}$ تا $2544/03 \times 10^{-8}$ متر مکعب بر کیلوگرم متغیر بوده و میانگین آن در خاکهای منطقه 10^{-8} متر مکعب بر کیلوگرم است. Ayoubi و همکاران (2002)، میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در خاکهای سطحی دست‌نخورده در شرق اصفهان را 40×10^{-8} متر مکعب بر کیلوگرم گزارش دادند.

پذیرفتاری مغناطیسی درجا در خاکهای منطقه، دارای میانگین ۱۲۸/۵، با حداقل مقدار ۶/۵ و حداکثر مقدار $3267/2$ (10^{-5} SI) بدست آمد. افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌تواند به دلیل دود حاصل از آگزوز وسایل نقلیه و فعالیت‌های صنعتی باشد (Lu, et al., 2008). وضعیت پراکنش مشخصه‌های مغناطیسی در منطقه از تابع نرمال پیروی نکرده و چولگی این مشخصه‌ها و آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف هم این مطلب را تأیید کرد. برای انجام محاسبات بعدی، داده‌های غیرنرمال با استفاده از لگاریتم طبیعی به داده‌های نرمال تبدیل شد.

نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی نشان داد بین پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و پذیرفتاری درجا همبستگی مثبت بالا با ضریب تبیین ۰/۹۶ وجود دارد. مطالعات Kapicka و همکاران (1997) نشان داد که بین دو مشخصه پذیرفتاری مغناطیسی درجا و پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (χ) در پراگ واقع در جمهوری چک همبستگی خطی و بالایی ($r^2 = 0/77$) مشاهده شد.

تأثیر کاربری اراضی بر میانگین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات سنگین

تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری ($P < 0/05$) بین میانگین فلزات سنگین خاک و پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری‌های مختلف وجود دارد. مقایسه میانگین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات سنگین در کاربری‌های مختلف در جدول شماره (۲) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بالاترین مقادیر روی، مس و سرب و پذیرفتاری

جدول شماره (۲): مقایسه میانگین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات سنگین در کاربری‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه

کشاورزی	مرتعی	شهری	صنعتی	واحد	متغیر
۴/۲ ^c	۴/۵ ^b	۵/۰ ^a	۴/۶ ^b	mg kg ⁻¹	Zn
۳/۴ ^b	۳/۲ ^b	۴/۱ ^a	۳/۴ ^b	mg kg ⁻¹	Cu
۱۰۳/۶ ^b	۱۱۰/۸ ^b	۱۶۴/۴ ^a	۱۶۵/۴ ^a	mg kg ⁻¹	Pb
۹/۷ ^b	۹/۶ ^b	۹/۷ ^b	۹/۸ ^a	mg kg ⁻¹	Mn
۶/۱ ^b	۶/۲ ^b	۶/۱ ^b	۶/۳ ^a	mg kg ⁻¹	Fe
۵۹/۸ ^a	۴۸/۳ ^b	۵۰/۸ ^b	۴۷/۷ ^b	mg kg ⁻¹	Ni
۷۵/۳ ^a	۶۵/۳ ^b	۶۸/۱ ^b	۶۰/۱ ^c	mg kg ⁻¹	Cr
۱۴/۸ ^{bc}	۱۶/۵ ^b	۱۲/۵ ^b	۱۱/۸ ^b	mg kg ⁻¹	Co
۳/۳ ^c	۴/۱ ^{bc}	۴/۴ ^b	۵/۳ ^a	10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	χlf

اعداد با حروف مشترک برای هر یک از متغیرها اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) در کاربری‌های مختلف ندارند.

جدول شماره (۳): همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و برخی از خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

Silt	Clay	Sand	SOM	CCE	Gypsum	EC	pH	Lnχlf (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
-۰/۳۴ ^{**}	-۰/۲۸ ^{**}	۰/۵۳ ^{**}	-۰/۰۵	۰/۰۰۳	-۰/۴۰ ^{**۱}	-۰/۴۸ ^{**۱}	-۰/۱۰ ^۱	

^۱ ضریب همبستگی اسپیرمن ^{**} در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

مس با مشخصه‌های مغناطیسی مشاهده شد. Lu و همکاران (2008) همبستگی بالایی را بین χlf و غلظت فلزات روی و مس گزارش دادند. Morton-Bermea و همکاران (2009) همبستگی معنی‌داری ($P < 0.001$) را بین پذیرفتاری مغناطیسی و آهن ($r = 0.508$)، روی ($r = 0.360$) و مس ($r = 0.305$) در ناحیه شهری مکزیکو گزارش داد. Canbay و همکاران (2010) همبستگی مثبت و بالایی را بین χlf و مس، سرب و نیکل و همبستگی منفی و بالایی را بین χlf و کروم در خاک سطحی ناحیه ساحلی خلیج ایزمیت و ایزایتاس ترکیه گزارش دادند.

جدول شماره (۴): همبستگی بین مشخصه‌های مغناطیسی و**فلزات مورد مطالعه**

Ln MS2F	Ln χlf	
۰/۵۹ ^{**}	۰/۶۸ ^{**}	Pb
۰/۴۶ ^{**}	۰/۴۵ ^{**}	Ln Mn
۰/۳۲ ^{**}	۰/۳۵ ^{**}	Ln Fe
۰/۱۴	۰/۳ ^{**}	Ln Cu
۰/۳۹ ^{**}	۰/۵۱ ^{**}	Ln Zn
-۰/۲۹ ^{**}	-۰/۳۱ [*]	Ni
-۰/۴۴ ^{**}	-۰/۴۱ ^{**}	Cr
-۰/۱۴	-۰/۱۵	Co

^{**} در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و مس، روی و سرب می‌تواند به دلیل وارد شدن این فلزات به داخل شبکه ساختمانی کانی‌های فری‌مگنتیک، طی فرایندهای مربوط به تشکیل کانی‌های

میانگین پذیرفتاری مغناطیسی افزایش معنی‌داری ($P < 0.05$) در خاک‌های شهری و صنعتی در مقایسه با کاربری مرتعی و کشاورزی نشان داد و بین کاربری مرتعی و صنعتی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

ارتباط بین ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین با پذیرفتاری مغناطیسی

به منظور بررسی اثر ویژگی‌های خاک بر مشخصه‌های مغناطیسی، ضرایب همبستگی برخی از خصوصیات خاک با مشخصه‌های مغناطیسی تعیین شد (جدول شماره ۳). درصد گچ خاک، همبستگی منفی و معنی‌داری ($P < 0.01$) را با پذیرفتاری مغناطیسی ($r = -0.40$) نشان داد که دلیل آن را می‌توان این گونه ذکر کرد که وجود گچ در خاک که ماده دیامغناطیس است، پذیرفتاری مغناطیسی خاک را با اثر رقت برکاتی‌های مغناطیسی کاهش می‌دهد (Marwick, 2005). هدایت الکتریکی همبستگی منفی و معنی‌داری را با پذیرفتاری مغناطیسی ($P < 0.01$) و ($r = -0.48$) نشان داد. به نظرمی‌رسد این همبستگی منفی با پذیرفتاری مغناطیسی به این دلیل باشد که افزایش نمک‌های محلول در خاک باعث رقیق شدن کانی‌های مغناطیسی در خاک می‌شوند.

همبستگی بین مشخصه‌های مغناطیسی و فلزات سنگین

ضرایب همبستگی پیرسون بین مشخصه‌های مغناطیسی و عناصر سنگین مورد مطالعه در جدول شماره (۴) ارائه شده است. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین سرب، منگنز، آهن، روی و

مقادیر پایین میانگین خطای تخمین (ME)^{۱۶} و مجذور میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE)^{۲۰} مدل‌ها مبین دقت قابل قبول تخمین است. معادله رگرسیونی به دست آمده بین پذیرفتاری مغناطیسی و خصوصیات خاک و غلظت عناصر سنگین، ۷۶ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کند که نشان‌دهنده این مطلب است که قسمت عمده تغییرپذیری پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند با رگرسیون خطی توجیه شود. ضریب تبیین بالا نشان می‌دهد که فلزات Zn, Cr, Pb و Fe درصد شن، گچ و ماده آلی قسمت عمده‌ای از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی را در خاکهای منطقه توجیه می‌کنند

جدول شماره (۵): مدل رگرسیونی مؤلفه‌های پذیرفتاری مغناطیسی در خاکهای منطقه مورد بررسی

مدل رگرسیون	R ²	نسبی ME	نسبی RMSE
$\ln \chi_{lf} = -5/439 + 0/07 (Pb) + 0/832 (\ln Fe) + 0/311 (\ln Zn) - 0/011 (Cr) + 0/12 (\text{Sand}) - 0/1 (\text{Gypsum}) - 0/11 (\text{SOM})$	0/76	0/011	0/085

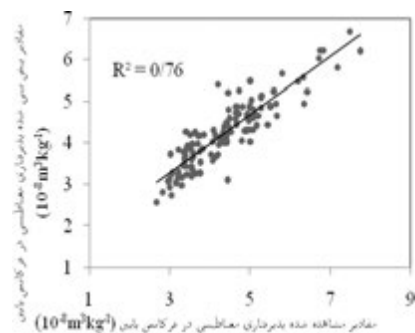
به منظور بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی درجا، همبستگی بین این مشخصه و برخی خصوصیات خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که همبستگی منفی و معنی‌داری بین پذیرفتاری مغناطیسی درجا و درصد رطوبت (***)^{۵۱} و سنگریزه (***)^{۳۰} در خاکهای منطقه مورد بررسی وجود دارد. وجود رطوبت ($10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)^{۰۹} که ماده‌ای دیامغناطیس است (Dearing, 1999) سبب کاهش پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌شود. باتوجه به نقشه زمین‌شناسی، منطقه سنگ‌های غالب در منطقه سنگ‌های آهکی است و باتوجه به دیامگنتیک بودن آهک ($10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)^{۴۸} (Dearing, 1999) وجود سنگریزه باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی در خاکهای مورد مطالعه می‌شود. Lecoanet و همکاران (2003) در دشت کرا در جنوب فرانسه گزارش دادند که پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های پروفیل خاک با افزایش رطوبت، کربن، کربنات کلسیم و سیلیس به دلیل دیامگنتیک بودن این مواد کاهش پیدا کرد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های خاک و فلزات سنگینی که تأثیر معنی‌داری بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی درجا در خاکهای منطقه مطالعاتی دارند از رگرسیون خطی چندگانه با روش گام به گام استفاده شد. پذیرفتاری مغناطیسی درجا (MS2F) به عنوان متغیر وابسته و خصوصیات خاک و فلزات سنگین مورد بررسی (جدول شماره ۱) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. معادله به‌دست آمده و نتایج اعتبار سنجی در جدول شماره (۶) ارائه شده است. مقادیر پایین ME و RMSE مدل‌ها نشان‌دهنده دقت

فری‌مگنتیک و خروج دود از آگروز اتومبیل‌ها، و یا جذب این فلزات بر روی سطح کانی‌های فری‌مگنتیک باشد که طی گذشت زمان وارد محیط می‌شوند (Petrovsky, et al., 2000; Kukier, et al., 2003).

بررسی رابطه رگرسیونی بین پذیرفتاری مغناطیسی با برخی خصوصیات خاک و فلزات مورد بررسی

پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{lf}) به عنوان متغیر وابسته و خصوصیات خاک و فلزات سنگین مورد بررسی (جدول شماره ۱) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. معادله به‌دست آمده و نتایج اعتبار سنجی در جدول شماره (۵) ارائه شده است.

مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی پیش‌بینی شده با استفاده از خصوصیات خاک و غلظت فلزات سنگین با روش رگرسیون چندگانه در مقابل مقادیر مشاهده شده (اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) در شکل شماره (۲) نشان داده شده است. ضرایب منفی درصد گچ و ماده آلی در معادله را می‌توان به دلیل پذیرفتاری مغناطیسی منفی این مواد و اثر رقت آنها بر کانی‌های مغناطیسی در خاک دانست (Marwick, 2005). Karimi و همکاران (2011) در منطقه مورد مطالعه خود در اصفهان گزارش دادند که فلزات سرب، وانادیوم و مس، ۵۴ درصد از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی را در خاکهای مورد مطالعه توجیه می‌کنند.



شکل شماره (۲): مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از فلزات سنگین و خصوصیات خاک در خاکهای مورد بررسی

ضریب تبیین بالا نشان می‌دهد که فلزات Pb و Mn و درصد شن، سنگریزه، گچ و ماده آلی قسمت عمده‌ای از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی درجا را در خاکهای منطقه توجیه می‌کنند.

جدول شماره (۶): مدل رگرسیونی مؤلفه‌های پذیرفتاری مغناطیسی درجا در خاکهای منطقه مورد بررسی

مدل رگرسیون	R ²	نسبی ME	نسبی RMSE
$\text{Ln MS2F} = -۳/۰۲۴ + ۰/۰۰۸ (\text{Pb}) + ۰/۹۱۹ (\text{Ln Mn}) + ۰/۰۱۳ (\text{Sand}) - ۰/۱۸ (\text{Gypsum}) - ۰/۱۳۹ (\text{SOM}) - ۰/۰۱۱ (\text{Gravel})$	۰/۷۱	۰/۱۰۴	۰/۲۰

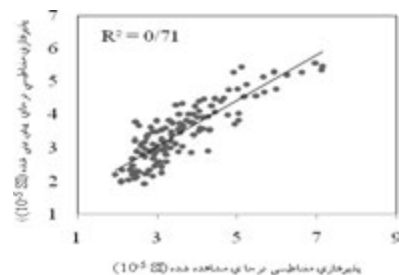
(دود حاصل از اکزوز وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنعتی و انتشارات اتمسفری) در ناحیه مورد مطالعه باشد. بین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات مس، روی، سرب، آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری مشاهده شد که می‌تواند به دلیل منبع مشترک خروج این فلزات و کانی‌های مغناطیسی باشد. بررسی تجزیه و تحلیل رگرسیونی چندگانه به روش گام به گام نشان داد که فلزات Cr, Pb, Zn و Fe و درصد شن، گچ و ماده آلی قسمت عمده‌ای از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و فلزات Mn و Pb و درصد شن، سنگریزه، گچ و ماده آلی قسمت عمده‌ای از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی درجا را در خاکهای منطقه توجیه می‌کنند. ضرایب منفی درصد گچ، رطوبت و ماده آلی در معادلات را می‌توان به دلیل دیامگنتیک بودن این مواد و اثر رقت آنها بر کانی‌های مغناطیسی در خاک دانست.

یادداشت‌ها

- 1- Magnetic susceptibility
- 2- Momentum
- 3- Ferromagnetism
- 4- Magnetite
- 5- Maghemite
- 6- Paramagnetism
- 7- Biotite
- 8- Pyrite
- 9- Diamagnetism
- 10- Anthropogenic activity
- 11- Global Positioning System
- 12- Random sampling within blocks
- 13- In situ magnetic susceptibility
- 14 - Low frequency
- 15-National Institute of Standard and Technology, USA
- 16 - Kolmogrov-Smirnov test
- 17- Multiple regressions
- 18 -Stepwise
- 19 - Mean Estimation Error
- 20 - Root Mean Squared Error

قابل قبول تخمین است. معادله رگرسیونی به دست آمده بین پذیرفتاری مغناطیسی درجا و خصوصیات خاک و غلظت عناصر سنگین ۷۱ درصد از کل تغییرات این مشخصه را توجیه می‌کند.

ضرایب منفی درصد رطوبت، گچ و ماده آلی در مدل رگرسیون را می‌توان به دلیل دیامگنتیک بودن این مواد و اثر رقت آنها بر کانی‌های مغناطیسی در خاک دانست. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی درجا پیش‌بینی شده با استفاده از خصوصیات خاک و غلظت فلزات سنگین با روش رگرسیون چندگانه در مقابل مقادیر مشاهده شده (اندازه‌گیری شده در صحرا) ترسیم شده است که در شکل شماره (۳) نشان داده شده است.



شکل شماره (۳): مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده

پذیرفتاری مغناطیسی درجا با استفاده از فلزات سنگین و

خصوصیات خاک در خاکهای مورد بررسی

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بین پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) و پذیرفتاری مغناطیسی درجا (اندازه‌گیری شده در صحرا) همبستگی بالایی مشاهده شد. بنابراین در مطالعات اجمالی و در سطح وسیع می‌توان از اندازه‌گیری پذیرفتاری درجا به منظور تعیین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد. مقایسه میانگین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری‌های مختلف نشان داد که کاربری صنعتی و شهری دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالاتری نسبت به کاربری‌های مرتعی و کشاورزی هستند که می‌توان این افزایش را در نتیجه منشأ انسانی پذیرفتاری مغناطیسی در این کاربری‌ها دانست. افزون بر این افزایش غلظت فلزات روی، مس و سرب نیز در کاربری شهری و صنعتی می‌تواند به دلیل فعالیت‌های انسانی

منابع مورد استفاده

صمیمی، ج. و همکاران. ۱۳۸۴. مبانی نظریه الکترومغناطیس. مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

Ajayi, A., O.F., Kamson. 1983. Determination of lead in roadside dust in Lagos City by atomic absorption spectrophotometry. *Environ. Int.* 9: 397-400.

Ayoubi, S., et al. 2002. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two Aridisols from Isfahan, central Iran. In: Angel Faz, R. Ortiz and A. R. Metmut (Eds), *International Conference of SUMASS*. Spain, 49-50.

Bityukova, L., et al. 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soil in Tallinn. *Phys. Chem. Earth (A)*. 24: 829-835.

Blundell, A., et al. 2009. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth-Science Reviews*. 95: 158-188.

Boyko, T., et al. 2004. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. *J. Appl. Geophys.* 55: 249-259.

Canbay, M., et al. 2010. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey). *J. Appl. Geophys.* 70: 46-57.

Davis, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, NY.

Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. Pages 545-566 in C.A. Black, (Eds). *Method of Soil Analysis*. Part 1. ASA, Madison, WI.

De Jong, E., et al. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada *Catena*. 40: 291-305.

Dearing, J.A. 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, England. 54 p.

Facchinelli, A., et al. 2001. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environ. Pollut.* 114: 313-324.

Kapicka, A., et al. 1997. Comparison of *in situ* field measurements of soil magnetic susceptibility with laboratory data. *Stud. Geophys. Geod.* 41: 391-396.

Karimi, R., et al. 2011. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *J. Appl. Geophys.* 74: 1-7.

Kukier, U., et al. 2003. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. *Environ. Pollut.* 123: 255-266.

Lecoanet,H., et al. 2003. Combination of magnetic parameters, an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France). *Environ. Pollut.* 122: 229-234.

Lu,S.G., et al. 2008. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedospher* 18: 479-485.

Marwick,B. 2005. Element concentrations and magnetic susceptibility of Anthrosols: indicators of prehistoric human occupation in the inland Pilbara, Western Australia. *J. Archaeol. Sci.* 32 1357-1368.

Mico,C., et al. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65: 863-872

Morton-Bermea,O., et al. 2009. Mexico City topsoils: heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*. 151: 121-125.

Mullins,C.E. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. *J. Soil Sci.* 28: 223-246.

Nelson,D.W., L.E.,Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy, Madison, WI. 539-579.

Nelson,R.E., et al. 1978. Determining soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:659-661.

Petrovsky,E., et al. 2000. Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environ. Geol.* 39: 312-318.

Smith,K.A. 1991. *Soil Analysis*, (2nd ed), Marcel Decker, New York. 659 p.

Xie,S.,J.A. et al . 2001. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications. *J. Appl. Geophys.* 48(2): 83-92.