نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد 31 / شماره 1 / 1396
DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijsr.2017.110354

# کاربرد پذیرفتاری مغناطیسی خاک در پایش آلودگی فلزات قابل‌جذب

علیرضا مرجوی، زهرا رضوی[1] و سمیرا بهروش

عضو هیأت علمی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران و دانشجوی دکتری دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **amarjovvi@yahoo.com**

دانشجوی دکتری دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **z.razavidinani@gmail.com**

دانشجوی دکتری دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **s.behravesh87@gmail.com**

دریافت: **94/6/25** و پذیرش: **95/12/2**

## چکیده

**یکی از روش‌های نوین پایش آلودگی خاک به فلزات سنگین، استفاده از مغناطیس سنجی به‌عنوان یک روش ارزان، ساده، مؤثر و سریع الاجرا می‌باشد. در این مطالعه کارایی پذیرفتاری مغناطیسی برای پایش عناصر مغذی گیاه شامل آهن، منگنز، روی و مس در فاز قابل‌جذب خاک، به همراه همبستگی آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک گلخانه‌های دو شهرستان استان اصفهان (دهاقان و شهرضا) بررسی گردید. 40 نمونه از خاک سطحی (عمق 20-0 سانتی‌متری) گلخانه‌های موردنظر در تابستان 1393 برداشت و پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها در دو فرکانس پایین ($\chi_{lf}$) و فرکانس بالا ($\chi_{hf}$) توسط دستگاه Bartington MS2 dual frequency sensor اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان داد در کل منطقه مورد مطالعه بین پذیرفتاری مغناطیسی خاک و عناصر مس، روی و منگنز در فاز قابل‌دسترس همبستگی معنی‌دار آماری وجود ندارد. این امر می‌تواند به دلیل عدم ورود آن‌ها به شبکه ساختمانی کانی‌های فرو مگنتیت باشد. همبستگی منفی میان فلز آهن و پذیرفتاری مغناطیسی خاک نشان می‌دهد که افزایش غلظت این عنصر در فاز قابل‌جذب، لزوماً دلیل بر بالا بودن این عنصر در ساختار کانی‌های مغناطیسی خاک نبوده و تأثیری مثبت بر مغناطیس نخواهد داشت. به‌علاوه، بافت رسی و سیلتی با خاصیت مغناطیسی خاک همبستگی معنی‌دار مثبت و بافت شنی همبستگی معنی‌دار منفی نشان داد. همچنین، میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی در بخش قابل‌جذب ($7/89\times10^{-8}\pm30/30$ مترمکعب بر کیلوگرم) بیانگر اثر غالب سنگ بستر و ویژگی‌های ذاتی خاک بر غلظت فلزات در منطقه می‌باشد. بر اساس این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که به‌منظور پایش فلزات سنگین در بخش‌های قابل‌جذب خاک و همچنین در مناطقی که تحت تأثیر منبع مشخصی از آلودگی نباشد سنجش پذیرفتاری مغناطیسی کارایی بالایی ندارد.**

**واژه‌های کلیدی:** روش مغناطیسی، غلظت قابل‌جذب، فلزات سنگین، شهرضا، دهاقان

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده منابع طبیعی

Archive of SID

www.SID.ir

## مقدمه

عناصر سنگین به‌طور طبیعی به مقدار بسیار کم در اکوسیستم‌ها یافت می‌شوند اما غلظت بالای آن‌ها در خاک سبب بروز آثار مخرب بر موجودات زنده می‌گردد (بابائی، 1384). در بیشتر مطالعات مربوط به برآورد میزان آلودگی خاک، غلظت کل عناصر سنگین در خاک معمولاً از طریق آنالیز شیمیایی و عمدتاً هضم اسیدی نمونه‌های خاک تعیین می‌گردد اما این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه است (دی ایملیو، 2012). همچنین ازآنجایی‌که فلزات سنگین دارای پیوندهای مختلف با ذرات خاک هستند به‌گونه‌ای که برخی از آن‌ها ممکن است توسط لایه‌های رس جذب شوند، برخی با مواد آلی مخلوط گردند و یا با مواد معدنی مانند سیلیکات‌ها پیوند دهند، بنابراین فرم‌های مختلف فلزات در محیط دارای تحرک، دسترسی زیستی و سمیت متفاوتی هستند لذا اندازه‌گیری غلظت کل فلزات به‌تنهایی نمی‌تواند اطلاعات حقیقی از سرنوشت و اثرات آن‌ها در محیط‌زیست فراهم نماید (جین فینگ و همکاران، 2009) و دستیابی به چنین اطلاعاتی از طریق تعیین غلظت قابل‌جذب(در دسترس)[1] عناصر به دست خواهد آمد. امروزه سعی بر آن است روش‌هایی برای اندازه‌گیری آلاینده‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرند که علاوه بر اینکه پیچیدگی و آلودگی روش‌های شیمیایی را نداشته باشد، سریع، مؤثر و ارزان باشند و همچنین قابلیت اجرا برای تعیین غلظت کل و قابل‌جذب عناصر را داشته باشد.

یکی از این روش‌ها مغناطیس‌سنجی[2] به‌ویژه پذیرفتاری مغناطیسی[3] است که به‌آسانی قابل‌اجرا می‌باشد (دیرینگ،1999). باوجود فاکتورهای بسیاری که برای بررسی تغییرات قابلیت مغناطیسی خاک وجود دارد، اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی خاک یک روش قابل‌اطمینان، کارآمد و مؤثر برای مطالعه آلودگی خاک به عناصر کمیاب می‌باشد (جردنووا، 2003؛ دی ایملیو، 2012). پذیرفتاری مغناطیسی درجه‌ای است که ماده، میدان مغناطیسی شناخته‌شده و معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار این تأثیر تابع غلظت و نوع کانی‌های مغناطیسی موجود در نمونه می‌باشد. عامل ایجاد ویژگی‌های مغناطیسی در خاک غالباً کانی‌های مگنتیت و ماگهمیت هستد. غلظت این کانی‌ها در خاک کم است؛ ولی نسبت به سایر کانی‌های آهن‌دار، تأثیر بیشتری در تنظیم شدت پذیرفتاری مغناطیسی خاک دارند (گدو و همکاران، 2004).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه اندازه‌گیری فلزات سنگین و همبستگی آن‌ها با پذیرفتاری مغناطیسی در گردوغبار (هانت و همکاران، 1984 و محمودی و همکاران، 1392)، رسوبات دریاها و دریاچه‌ها (پتروسکی و همکاران، 2000؛ چان و همکاران، 2001) و خاک‌های مناطق مختلف (های و همکاران، 1997؛ هلر و همکاران، 1998؛ دورزا، 1999؛ دسن فانت و همکاران، 2004؛ اولیایی و همکاران، 1388؛ دنکوب و همکاران، 1391؛ جورکش و همکاران، 1393) در ایران و جهان صورت گرفته است. به‌رغم مطالعات مختلفی که در جهان انجام‌شده، مطالعات انجام‌شده در ایران محدود بوده و اکثراً در زمینه آلودگی عناصر سمی و ارتباط میان پذیرفتاری مغناطیسی با غلظت کل فلزات سنگین خاک می‌باشد، ولی تاکنون در کشور ما ارتباط میان پذیرفتاری مغناطیسی خاک و غلظت عناصر ضروری گیاه در فاز قابل‌دسترس (قابل‌جذب) برای گیاهان، مورد بررسی قرار نگرفته است. ازجمله عناصر ضروری گیاه می‌توان آهن، منگنز، روی و مس را نام برد. فراوانی آهن در خاک حدود 3/5% می‌باشد. فلزات منگنز، مس و روی نیز به ترتیب دارای غلظت زمینه 488، 38/9 و 70 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشند. هرچند این عناصر برای بسیاری عملکردهای بیولوژیکی مهم بوده و در ساختار آنزیم‌ها و سایر پروتئین‌ها حضور دارند ولی در دزهای بالا می‌توانند سمیت ایجاد کنند (کاباتا پندایس، 2010؛ سرتاج و همکاران،1384؛ استیفنز،1990؛ هال،2002). ازاین‌رو، این مطالعه با هدف تعیین غلظت عناصر کمیاب و مغذی شامل روی، مس، آهن و منگنز در بخش قابل‌تبادل زیستی در خاک‌های سطحی صورت پذیرفته و توزیع مکانی پذیرفتاری مغناطیسی خاک و همبستگی آن با عناصر قابل‌جذب خاک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وضعیت دوگانه عناصر مورد مطالعه در این تحقیق که از طرفی برای رشد گیاهان ضروری بوده و از سوی دیگر در صورت افزایش می‌توانند آثار مخربی بر محیط‌زیست و به‌ویژه گیاهان داشته باشند، غلظت این عناصر در خاک‌های سطحی گلخانه‌های استان اصفهان در دو شهر دهاقان و شهرضا تعیین و همبستگی آن‌ها باقابلیت مغناطیسی خاک، ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک همچون بافت خاک، کربن آلی، شوری و اسیدیته خاک در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفت.

---

1. Bioavailable
2. Magnetometry
3. Magnetic Susceptibility

Archive of SID

www.SID.ir

## مواد و روش

### مناطق مورد مطالعه

شهرستان شهرضا در 75 کیلومتری جنوب غرب اصفهان، در '51/5°24/5 طول جغرافیایی و '31/5°24 عرض جغرافیایی واقع شده است. این شهرستان دارای آب و هوای نسبتاً گرم و خشک می‌باشد. متوسط بارندگی آن 11/87 میلی‌متر در سال و میانگین دما 15/19 سانتی‌گراد است. شهرستان دهاقان در فاصله 96 کیلومتری جنوب غربی شهر اصفهان، در مرکز فلات ایران و در دامنه شرقی کوه‌های زاگرس واقع شده است. این شهرستان در '39°51 طول جغرافیایی و '56°31 عرض جغرافیایی قرار گرفته و از سمت شرق و غرب به ترتیب با شهرضا و بروجن مجاور می‌باشد. شهرستان دهاقان در منطقه شمال و شرق دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک و در منطقه جنوب و غرب کوهستانی است.

### نمونه‌برداری

در این مطالعه، 40 نمونه از خاک سطحی (عمق 20-0 سانتی‌متری) گلخانه‌های مستقر در شهرستان‌های دهاقان و شهرضا در تابستان 1393 برداشت گردید. فاصله ایستگاه‌های نمونه‌برداری حداقل 2 کیلومتر بوده که موقعیت نقاط با سیستم موقعیت‌یاب جهانی[1] (GPS) (Garmin, 76 CXS) ثبت گردیده است. در شکل 1 مناطق مورد مطالعه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری مشخص گردیده است. نمونه‌ها درون کیسه پلاستیکی ریخته شد و برای آماده‌سازی و تجزیه وتحلیل های بعدی به آزمایشگاه انتقال یافت. به‌منظور تعیین درصد رطوبت خاک، مقداری نمونه خاک به‌طور جداگانه برداشت و درصد رطوبت به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

### مطالعات آزمایشگاهی

در آزمایشگاه ابتدا نمونه‌ها در هوای آزاد و دمای محیط خشک شدند. به‌منظور اندازه‌گیری شکل قابل‌جذب فلزات 20 گرم خاک خشک و الک شده (خاک‌ها از الک 2 میلی‌متری عبور داده شد) را توزین نموده و به آن 40 میلی‌لیتر محلول کلات کننده (1/96 گرم Titriplex V به نام اختصاری DTPA و 1/47 گرم کلرور کلسیم و 13/4 میلی‌لیتر تری اتانل آمین را در 200 میلی‌لیتر آب مقطر حل نموده و pH آن را توسط اسیدکلریدریک یک نرمال به 7/3 رسانده و درنهایت با آب مقطر حجم کل را به یک لیتر می‌رسانیم) اضافه شد. محلول آماده‌شده را به مدت دو ساعت در شیکر قرار داده تا کاملاً مخلوط و یکنواخت گردد، پس‌ازآن عصاره را صاف نموده و با دستگاه جذب اتمی پرکین المر، مدل 6030 غلظت عناصر را قرائت گردید (لیندسای و نورول، 1978) برای تعیین ویژگی‌های خاک شامل درصد رس، سیلت و شن به روش هیدرومتری (دی، 1965)، کربن آلی به روش واکلی-بلک (نلسون و سومرز، 1982) و میزان فسفر به روش اولسن (1954) و پتاسیم به روش عصاره‌گیری توسط استات آمونیم (علی احیایی و بهبهانی زاده، 1372) اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی(EC) نمونه‌ها با دستگاه هدایت الکتریکی سنج (مدل Jenway ) و pH با دستگاه pH متر (مدل Metrohm) اندازه‌گیری گردید.

حضور ذرات مغناطیسی با کمیتی به نام پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس( %χfd) قابل اندازه گیری است (معادله1).

معادله 1 $\%\chi fd = ((\chi lf - \chi hf) / \chi lf) \times 100$

$\chi lf$[2] پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و $\chi hf$[3] پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالاست (دیرینگ، 1999). اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه Bartington MS2 dual-frequency sensor و حسگر Bartington Instruments, Witney, Oxon, MS2B (England) در $\chi lf$ 0/47 کیلوهرتز و $\chi hf$ 4/7 کیلوهرتز انجام شد (ایوبی و همکاران،2014). 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؛ درنهایت میانگین قرائت‌های انجام‌شده به‌عنوان نتیجه‌نهایی پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه گزارش گردید.

### آنالیز آماری

به‌منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنف[4] استفاده شد. در ابتدا ارتباط و همبستگی بین ویژگی‌های خاک و غلظت فلزات قابل‌جذب در کل محدوده مورد مطالعه و به‌صورت مجزا در دو منطقه دهاقان و شهرضا با آنالیز همبستگی پیرسون بررسی گردید. علاوه براین، اثر پذیرفتاری مغناطیسی در نقاط مختلف نمونه‌برداری با عناصر قابل‌جذب و کلیه پارامترهای اندازه‌گیری شده به‌صورت کل و مجزا در مناطق مورد مطالعه آنالیز گردید. به‌منظور مقایسه تفاوت‌های دو منطقه شهرضا و دهاقان در کلیه پارامترهای موردبررسی (خاصیت مغناطیسی، فلزات قابل‌جذب، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک) از آنالیز واریانس

[1] Global Positioning Systems

[2] Low frequencies
[3] High frequencies
[4] Kolmogrov-Smirnov

Archive of SID

www.SID.ir

یک‌طرفه[1] و آزمون توکی[2] استفاده شد. کلیه آنالیزها در نرم‌افزار SPSS 16 انجام گرفت.

## نتایج

### توصیف آماری متغیرها

اطلاعات آماری غلظت فلزات قابل‌جذب و برخی ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه در جدول شماره 1 ارائه شده است. بر پایه اطلاعات این جدول غلظت متوسط مس، روی، منگنز و آهن در کل مناطق مورد مطالعه به ترتیب3/12، 8/31، 16/05 و 7/83 میلی‌گرم بر کیلوگرم است. pH خاک منطقه مورد مطالعه 7/32 و هدایت الکتریکی خاک 11/80 دسی زیمنس بر متر است. میزان کربن آلی و فسفر در مناطق مورد بررسی، به ترتیب 1/96 درصد و 170/91 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. سهم بافت رسی، سیلتی و شنی در این مناطق به ترتیب 23/40، 32/54 و 44/15 درصد است. پذیرفتاری مغناطیسی خاک نیز در این مناطق( χlf، χhf) در محدوده $10^{-8}$×30-29 مترمکعب بر کیلوگرم متغیر است.

علاوه بر این در جدول 1 ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و غلظت فلزات قابل‌جذب در هر دو منطقه شهرضا و دهاقان نیز مقایسه گردید. بر اساس جدول مذکور، pH خاک در دو منطقه تفاوت معنی‌داری نشان می‌دهد($p < 0/05$). بافت خاک نیز ازجمله پارامترهایی است که در دو منطقه تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای دارد، به‌طوری‌که بافت غالب در شهرضا بافت شنی (حدود 50%) و در دهاقان بافت سیلتی شنی است. میزان کربن آلی در منطقه دهاقان و شهرضا به ترتیب 1/16 و 2/76 درصد به دست آمد که تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p = 0/075$). علاوه‌براین تفاوت میزان پتاسیم نیز در دو منطقه مشاهده گردید ($p < 0/01$). از بین فلزات قابل‌جذب تنها فلز منگنز در دو منطقه دارای تفاوت معنی‌دار داشته است($p <0/05$ ). همچنین χlf و χhf در شهرضا و دهاقان تفاوت معنی‌داری در سطح 99 درصد نشان می‌دهد. میزان χlf، χhf در منطقه دهاقان به ترتیب $10^{-8}$× 35/09 و $10^{-8}$×34/10 مترمکعب بر کیلوگرم به دست آمد که مقدار آن‌ها در خاک شهرضا بالاتر بوده است ( میزان χlf، χhf به ترتیب $10^{-8}$× 25/52 و $10^{-8}$× 24/99 مترمکعب بر کیلوگرم).

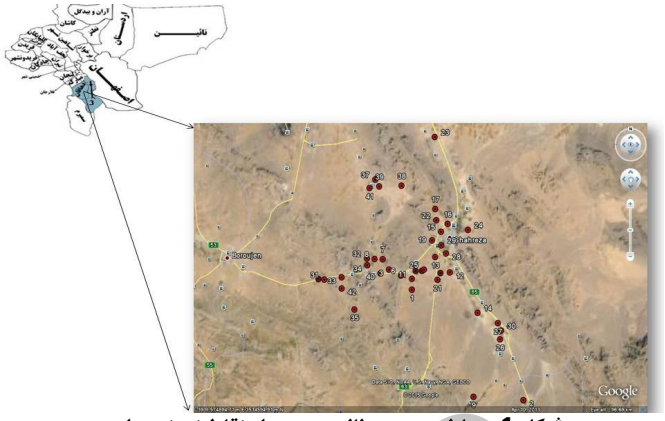
### ارتباط بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک، پذیرفتاری مغناطیسی و عناصر قابل‌جذب

همبستگی میان عناصر و ویژگی‌های خاک مناطق مورد مطالعه در جدول شماره 2 ارائه شده است. با توجه به این جدول بین بافت خاک با هیچ یک از عناصر ارتباط معنی‌داری دیده نمی‌شود. pH و EC خاک همبستگی معنی‌داری با میزان عناصر موردمطالعه نداشته است. همبستگی منفی بسیار کمی میان مس، روی و منگنز با pH وجود دارد، بااین‌وجود این همبستگی معنی‌دار نبوده که می‌تواند به دلیل دامنه محدود تغییرات pH در محدوده خنثی و عدم تأثیر معنی‌دار آن بر غلظت عناصر کمیاب در خاک سطحی باشد. رابطه میان مواد آلی و فلزات مس و منگنز معنی‌دار نشده است. درصد مواد آلی خاک نیز با غلظت آهن در سطح 95 درصد و با میزان روی در سطح 99 درصد دارای همبستگی مثبت متوسطی می‌باشد (به ترتیب $r$ = 0/38 و $r$ =0/45 ). علاوه بر این، طبق نتایج به‌دست‌آمده در جدول شماره 2 به‌استثناء منگنز و آهن میان سایر عناصر همبستگی معنی‌داری دیده می‌شود. همبستگی مس با سه عنصر دیگر و روی با آهن در سطح 99 درصد معنی‌دار شد ولی میان روی و منگنز همبستگی ضعیفی در سطح 95 درصد مشاهده گردید ($r$ = 0/34). همبستگی میان غلظت روی و مس نسبت به سایر عناصر بیشتر بوده است ($r$ = 0/53). پذیرفتاری مغناطیسی χlf و χhf خاک با میزان پتاسیم همبستگی مثبتی در سطح 95 درصد نشان می‌دهد. همچنین از میان فلزات قابل‌جذب تنها فلز آهن همبستگی معنی‌دار منفی با پذیرفتاری مغناطیسی نشان داد که این همبستگی نیز بسیار ضعیف بوده است (در سطح 95 درصد). علاوه براین بافت رسی و سیلتی با خاصیت مغناطیسی خاک همبستگی مثبت معنی‌دار و با بافت شنی همبستگی منفی معنی‌دار داشته است.

[1] Analysis of Variance (ANOVA)-one way
[2] Tukey's HSD test

Archive of SID

www.SID.ir




**شکل 1- مناطق مورد مطالعه به همراه نقاط نمونه‌برداری**

**جدول 1- اطلاعات آماری غلظت فلزات قابل جذب و ویژگی‌های خاک به همراه نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه در دو منطقه شهرضا و دهاقان**

| | دهاقان | | | شهرضا | | | معنی‌داری | کل(دهاقان و شهرضا) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | حداقل | حداکثر | میانگین | حداقل | حداکثر | میانگین | | میانگین |
| میلوگرم | 25/40 | 45/55 | 35/08±6/61 | 16/20 | 35/85 | 25/52±5/98 | 0/01> | 30/30±7/89 |
| میلوگرم | 24/65 | 45/15 | 34/10±6/33 | 16/20 | 35/30 | 24/99±5/74 | 0/01> | 29/55±7/54 |
| | 0/88 | 4/93 | 2/75±1/03 | -0/25 | 4/52 | 1/94±1/33 | 0/04 | 2/34±1/24 |
| | 6/80 | 7/70 | 7/26±0/18 | 7/00 | 7/60 | 7/38±0/17 | 0/03 | 7/32±0/19 |
| | 1/79 | 42/50 | 11/66±8/82 | 2/74 | 44/30 | 11/94±11/16 | 0/93 | 11/80±9/93 |
| | 16/00 | 58/00 | 37/80±11/42 | 36/00 | 64/00 | 50/50±8/96 | 0/01> | 44/15±12 |
| | 24/00 | 54/00 | 36/80±7/03 | 14/00 | 40/00 | 28/10±6/31 | 0/01> | 32/45±7/93 |
| | 40/00 | 10/00 | 25/4±7/26 | 8/00 | 30/00 | 21/40±5/55 | 0/06 | 23/40±6/69 |
| | 0/70 | 3/74 | 2/16±0/75 | 0/82 | 3/04 | 1/76±0/64 | 0/07 | 1/96±0/72 |
| | 31/3 | 265/80 | 169±35/64 | 29/30 | 294/30 | 172±72/65 | 0/91 | 170/91±68/35 |
| | 460/0 | 3312/00 | 1616±837 | 275/00 | 1950/00 | 805±400 | 0/01> | 1210±767 |
| | 1/16 | 17/30 | 3/62±3/41 | 0/80 | 10/08 | 2/82±2/33 | 0/54 | 3/12±3/02 |
| | 3/24 | 13/74 | 8/57±3/15 | 2/34 | 15/40 | 8/04±3/72 | 0/63 | 8/31±3/41 |
| | 9/20 | 29/16 | 19/03±6/61 | 6/66 | 26/88 | 13/07±5/66 | 0/01> | 16/05±6/78 |
| | 2/42 | 15/34 | 5/83±3/48 | 2/16 | 47/80 | 9/83±10/33 | 0/11 | 7/83±7/87 |

Archive of SID

www.SID.ir

**جدول 2- همبستگی غلظت عناصر کمیاب قابل‌جذب و فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی خاک در کل منطقه مورد مطالعه**

| کربن آلی | فسفر | پتاسیم | مس | روی | منگنز | آهن | شن | سیلت | رس | χlf | χhf | χfd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 0/499** | 1 | | | | | | | | | | | |
| 0/382* | 0/116 | 1 | | | | | | | | | | |
| 0/188 | 0/481** | -0/071 | 1 | | | | | | | | | |
| 0/446** | 0/499** | 0/048 | 0/534** | 1 | | | | | | | | |
| 0/188 | 0/320* | 0/381* | 0/432** | 0/337* | 1 | | | | | | | |
| 0/358* | 0/520** | -0/023 | 0/408** | 0/444** | 0/161 | 1 | | | | | | |
| -0/044 | 0/333* | -0/463** | 0/136 | 0/015 | 0/255 | 0/277° | 1 | | | | | |
| 0/200 | -0/260 | 0/534** | -0/185 | -0/020 | 0/193 | -0/169 | -0/852** | 1 | | | | |
| -0/158 | -0/289° | 0/198 | -0/023 | -0/002 | 0/229 | -0/297° | -0/784** | 0/344* | 1 | | | |
| 0/057 | 0/264 | 0/360* | -0/207 | -0/228 | 0/247 | -0/401* | -0/581** | 0/492** | 0/458** | 1 | | |
| 0/057 | -0/259 | 0/352* | -0/202 | -0/229 | 0/247 | -0/403* | -0/572** | 0/487** | 0/450** | 0/999 | 1 | |
| -0/019 | -0/200 | 0/320* | -0/203 | -0/126 | 0/111 | -0/194 | -0/409** | 0/341* | 0/330* | 0/480** | 0/441** | 1 |

Archive of SID

www.SID.ir

علاوه بر این به منظور مقایسه مناطق مورد مطالعه، همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و عناصر موجود در بخش قابل‌جذب آن، در دو منطقه بررسی گردید(جدول شماره 3). در منطقه دهاقان آهن قابل‌جذب با پارامترهای EC (0/53 = r)، بور (0/76 = r)، کربن آلی (0/64 =r)، فسفر (0/53 = r) و پتاسیم (0/57 = r) همبستگی مثبت و با بافت رسی همبستگی منفی ضعیفی (r= -0/46 ) نشان می‌دهد. علاوه بر این، بخش قابل‌جذب فلز مس در خاک شنی و سیلتی به ترتیب دارای همبستگی مثبت (0/47 = r) و منفی (0/48- = r) می‌باشد. سایر فلزات قابل‌جذب در این منطقه همبستگی معنی‌داری با پارامترهای فیزیکوشیمایی خاک ندارند. در شهرضا، فلز آهن تنها با میزان فسفر خاک دارای همبستگی متوسطی می‌باشد (0/50 = r). همچنین فلز روی با کربن آلی و فسفر موجود در خاک همبستگی مثبتی در سطح 99 درصد نشان داده است. منگنز و مس نیز در این منطقه با هیچ یک از پارامترهای خاک دارای همبستگی معنی‌داری نبودند.

**جدول 3 - همبستگی پارامترهای خاک با عناصر قابل‌جذب در مناطق مورد مطالعه**

| پارامتر | منطقه دهاقان | | | | منطقه شهرضا | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | آهن | منگنز | روی | مس | آهن | منگنز | روی | مس |
| EC | 0/53* | 0/26 | 0/17 | 0/04 | -0/31 | 0/27 | -0/17 | -0/25 |
| pH | 0/06 | 0/22 | -0/13 | -0/1 | 0/20 | -0/25 | -0/22 | 0/23 |
| کربن آلی | 0/64** | -0/04 | -0/33 | -0/02 | 0/39° | 0/22 | -0/57** | 0/10 |
| فسفر | 0/53* | 0/33 | -0/30 | 0/39° | 0/50* | 0/41° | 0/66** | 0/35 |
| پتاسیم | 0/57** | 0/31 | -0/25 | -0/15 | 0/01 | -0/09 | -0/42° | -0/32 |
| شن | 0/24 | 0/06 | -0/04 | 0/47* | 0/07 | -0/15 | 0/09 | -0/01 |
| سیلت | 0/08 | -0/17 | -0/03 | -0/48* | -0/06 | 0/06 | -0/13 | -0/05 |
| رس | -0/46* | 0/07 | -0/04 | -0/27 | -0/05 | 0/16 | -0/02 | 0/08 |

**همبستگی در سطح 99 درصد معنی‌دار است.

*همبستگی در سطح 95 درصد معنی‌دار است.

o همبستگی در سطح 90 درصد معنی‌دار است.

در جدول شماره 4 نیز مقایسه اثر همبستگی پذیرفتاری مغناطیسی خاک با پارامترهای خاک و عناصر قابل‌جذب در منطقه شهرضا و دهاقان آمده است. به دلیل همبستگی بالا بین دو مشخصه χhf و χlf (جدول2) یکی از دو مشخصه ( χlf) انتخاب و در ادامه پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. χlf در منطقه دهاقان با بافت شنی همبستگی منفی (0/513- = r) و با رس همبستگی مثبت (0/683 = r) نشان می‌دهد. از بین فلزات نیز مس قابل‌جذب با خاصیت مغناطیسی همبستگی منفی دارد (0/411- = r). میزان منیزیم تبادلی نیز با خاصیت مغناطیسی همبستگی منفی در سطح 95 درصد دارد (0/456- = r). در منطقه شهرضا χlf با هدایت الکتریکی و پتاسیم همبستگی مثبتی در سطح 95 درصد نشان می‌دهد. از بین فلزات قابل‌جذب نیز روی و آهن به ترتیب ضریب همبستگی 0/47- و 0/41- با پذیرفتاری مغناطیسی خاک دارند. منیزیم تبادلی با خاصیت مغناطیسی در شهرضا همبستگی مثبت نشان داده است(0/410 = r).

Archive of SID

www.SID.ir

**جدول 4- همبستگی پذیرفتاری مغناطیسی با پارامترهای خاک و عناصر قابل‌جذب در دو منطقه مورد مطالعه**

| پارامتر | منطقه دهاقان | | | منطقه شهرضا | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | xlf | xhf | xfd | xlf | xhf | xfd |
| EC | -0/21 | -0/21 | -0/04 | 0/56* | 0/57* | 0/03 |
| pH | 0/38° | 0/38° | 0/07 | -0/17 | -0/16 | -0/11 |
| کربن آلی | -0/02 | -0/03 | 0/10 | -0/33 | -0/32 | -0/33 |
| فسفر | -0/37 | -0/37 | -0/26 | -0/27 | -0/26 | -0/16 |
| پتاسیم | -0/16 | -0/17 | 0/21 | 0/52* | 0/53* | 0/19 |
| مس | -0/41° | -0/40° | -0/44° | -0/23 | -0/24 | -0/05 |
| روی | -0/23 | -0/24 | 0/04 | -0/47* | -0/47* | -0/29 |
| منگنز | -0/27 | -0/06 | -0/15 | 0 | 0 | 0/05 |
| آهن | -0/25 | -0/25 | 0/02 | -0/41° | -0/41° | -0/17 |
| شن | -0/51* | -0/50* | -0/32 | -0/19 | -0/18 | -0/29 |
| سیلت | 0/23 | 0/11 | 0/30 | -0/36 | 0/36 | 0/13 |
| رس | 0/68** | 0/68** | 0/21 | -0/10 | -0/12 | 0/32 |

** همبستگی در سطح 99 درصد معنی‌دار است.

* همبستگی در سطح 95 درصد معنی‌دار است.

o همبستگی در سطح 90 درصد معنی‌دار است.

## بحث

کاربرد سنجش پذیرفتاری مغناطیسی خاک به عنوان یک راهکار برای تشخیص آلودگی محیطی بر این حقیقت استوار است که آلودگی فلزات مورد بررسی همراه با انتشار ذرات فرومگنیتیت باشد زیرا حضور مقادیر بالایی از ترکیبات حاوی آهن در محیط طبیعی دور از انتظار نیست (جردانو و همکاران ،2003). در حقیقت بسیاری از فعالیت‌های انسانی همچون حمل و نقل، گسترش صنایع و کارخانه های کوچک و بزرگ می‌تواند موجب انتشار فزاینده ذرات مغناطیسی در محیط گردد که نتیجه آن افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در منطقه خواهد بود. (گدو و همکاران، 2004). همچنین از آنجایی که میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک تحت تأثیر مشخصه هایی مانند نوع کانی، بافت خاک، pH، EC، میزان عناصر موجود در محیط فلزات، ماده آلی و غیره است، تعیین این مشخصه‌ها و بررسی همبستگی آنها با پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند برای منشایابی عناصر در منطقه و ارزیابی سریع در خصوص نحوه انتشار فلزات سنگین استفاده گردد. لذا در این مطالعه قبل از بررسی اثر خاصیت پذیرفتاری مغناطیسی بر فلزات قابل‌جذب همچون آهن، روی، منگنز و مس ابتدا پارامترهای خاک و غلظت عناصر قابل‌جذب در کل منطقه و سپس در دو منطقه دهاقان و شهرضا بررسی گردید تا درک بهتری از تفاوت های منطقه‌ای از لحاظ پارامترهای مورد بررسی حاصل گردد.

حضور مقادیر بالای عناصری مثل فسفر، پتاسیم و برخی فلزات سنگین همچون مس و روی در منطقه احتمالاً به دلیل افزودن بیش از حد انواع کود-های شیمیایی همچون کودهای فسفره به گلخانه‌های شهرستان‌های مورد مطالعه می باشدکه عمدتا حاوی انواع فلزات سنگین می‌باشند.

از بین پارامترهای مؤثر بر غلظت فلزات قابل‌جذب، بافت بستر نقش مهمی در تجمع و انتقال عناصر به عهده داشت. با بررسی همبستگی فلزات قابل‌جذب با بافت خاک مشخص گردید که از بین فلزات تنها فلز مس در منطقه دهاقان با بافت خاک دارای همبستگی معنی‌داری بوده است به طوری که که با خاک شنی همبستگی مثبت و با خاک سیلتی همبستگی منفی نشان داد. با توجه به جذب کمتر عناصر سنگین در خاک-های شنی به دلیل بافت درشت تر و سطح تماس کمتر قابل پیش‌بینی است که عناصر با قدرت کمتری جذب شده و در فاز محلول و قابل‌جذب غلظت بالاتری داشته باشند. تأثیر شدید بافت خاک بر تجمع فلز مس با کمترین و بیشترین غلظت به ترتیب در خاک‌های شنی و لومی مورد تأیید است (کاباتا پندایس، 2010). ارتباط ضعیفی میان درصد رس با عناصر مورد مطالعه در فاز قابل دسترس زیستی به صورت منفی مشاهده می‌شود که هر

Archive of SID

www.SID.ir

چند معنی‌دار نشده است اما گواه بر این مطلب است که با بالا رفتن درصد رس خاک به دلیل بالا بودن سطح تماس و افزایش ظرفیت کاتیونی جذب عناصر توسط ذرات رس بیشتر می‌گردد، میزان عناصر در بخش قابل تبادل کاهش خواهد یافت (حمزه و حسن‌زاده، 1388). علاوه بر این، خاک منطقه با pH خنثی تا قلیایی (7/70-6/8) مانع حلالیت بالای عناصر می‌گردد و در نتیجه با کاهش تحرک‌پذیری عناصر، از قرارگیری آنها در فاز قابل تبادل جلوگیری می‌کند (کریمی و همکاران 2011). همبستگی مثبت و معنی‌دار که میان غلظت عناصر آهن و روی قابل‌جذب با کربن آلی خاک دیده می‌شود بیانگر این است که با افزایش مواد آلی غلظت عناصر کمیاب قابل‌جذب برای گیاه افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. با توجه به اینکه مواد آلی مکانی برای تجمع و انباشت عناصر کمیاب هستند و به جذب بیشتر عناصر ضروری توسط گیاه کمک می‌کنند، این موضوع قابل توجیه است. در مطالعات پیشین نیز این نتیجه بیان شده است (کریمی و همکاران،2011؛ ناجی و همکاران، 2010 و رضایی، 1382). علاوه بر این، از بین فلزات قابل‌جذب مورد بررسی، بین فلزات مس و روی همبستگی معنی‌دار مشاهده شد که این همبستگی بین این دو عنصر در مقایسه با سایر عناصر مورد مطالعه بیشتر بود. بر اساس جدول شماره 2 همبستگی میان عناصر با یکدیگر نشان دهنده ارتباط معنی‌دار مس با سه عنصر آهن، روی و منگنز است. همبستگی مثبت این عنصر با سه فلز دیگر نشان دهنده منشا یکسان چهار عنصر در خاک مناطق مورد بررسی می‌باشد.

همبستگی روی نیز با آهن و منگنز معنی‌دار شده که این نتیجه نیز منشاء یکسان این عناصر را تأیید می‌کند. این نتیجه‌گیری با مطالعه کریمی و همکاران (2011) در خاک‌های سطحی مناطق شهری اصفهان و نان و همکاران (2002) در خاک‌های کشاورزی آلوده به فلزات سنگین مطابقت دارد. همچنین وجود همبستگی مثبت معنی‌دار بین فسفر با عناصر مذکور نیز می‌تواند به دلیل وجود منبع ورودی مشترک آنها به محیط باشد به طوری‌که انتظار می‌رود استفاده از کودهای فسفره در منطقه که عموماً حاوی عناصر سنگین هستند، می تواند یکی از منابع ورود آنها به محیط باشد (بوداغی و همکاران، 1390).

بعد از بررسی نتایج حاصل از پذیرفتاری مغناطیسی مشخص گردید که در مطالعه حاضر اختلاف ناچیزی (در برخی موارد بدون اختلاف) بین پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا و پایین در منطقه مورد مطالعه به صورت کلی ($10^{-8}$ ×30-29 مترمکعب در کیلوگرم) و به صورت مجزا در دو منطقه شهرضا (25/52-24/99 مترمکعب در کیلوگرم) و دهاقان( 35/08- 34/10 مترمکعب در کیلوگرم ) وجود دارد. در مطالعه ایوبی و همکاران (2002) میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های سطحی دست نخورده در شرق اصفهان $40\times10^{-8}$ مترمکعب در کیلوگرم گزارش شده است. لذا از آنجایی که اختلاف ناچیز در پذیرفتاری مغناطیسی در دو فرکانس مشاهده شد و همچنین میزان پذیرفتاری مغناطیسی به دست آمده در مطالعه حاضر در محدوده خاک‌های دست نخورده اصفهان است می‌توان استنباط کرد که عوامل طبیعی (پدوژنی یا لیتوژنی) نقش مؤثری در حضور ترکیبات مغناطیس خاک در منطقه مورد مطالعه دارند بنابراین پذیرفتاری مغناطیسی در خاک منطقه فقط منشا طبیعی دارد (دیرینگ،1999؛ جردنووا، 2003). همچنین متوسط پـذیرفتاری مغناطیسـی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ %) که بیانگرغلظت ذرات سوپرپارامگنتیک[1] (ذرات با اندازه کمتر از 02/0 میکرومتر) است در مطالعه حاضر 2/3% در خاک سطحی به دست آمد که این میزان کمتر از مقدار متوسط گزارش شده 3/93% در مطالعه کریمی و همکاران (2011) برای خاک‌های شهری استان اصفهان (از سمت غرب به سمت جنوب شرقی در طول مسیر رودخانه زاینده رود) و همچنین کمتر از میزان متوسط گزارش شده 4/17% در مطالعه ایوبی و همکاران (2014) برای شهر اصفهان بود. مطالعات نشان داده است که ذرات مغناطیسی تولید شده به وسیله فعالیت‌های صنعتی دارای قطـر بیش از 2 میکرومتر بوده اما ذرات منتشر شده توسط وسـایل نقلیـه نسبتاً ریزتر و در اندازه 5/2 میکرومتر هستند. در حالیکه کانی‌هـای فری مگنتیک که طی فرآیندهای پدوژنیک تولید می‌شوند.

عمدتاً به صـورت سـوپرپارامگنتیک هستند. همچنین اگر$\chi_{fd}$ %کمتر از 4 %باشد بیانگر حضور ذرات درشت مغناطیسی غالباً به صورت چند حـوزه ای[2]( MD) و تک حوزه‌ای پایدار[3](SSD) هستند که این ذرات پذیرفتاری مغناطیسی مشابهی در فرکانس بالا و پایین دارند (هو و همکاران ، 2007) و لذا $\chi_{fd}$ % در مطالعه حاضر میزان منشا طبیعی ذرات مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه را تأیید می کند.

بین پذیرفتاری مغناطیسی خاک و عناصر مس، روی و منگنز در فاز قابل تبادل خاک در کل مناطق مورد مطالعه همبستگی معنی‌داری وجود نداشت. فقط همبستگی بین فلز روی و $\chi_{lf}$ در منطقه شهرضا و فلز مس

1. Super paramagnetic
2. Multi domain
3. Stable single domain

Archive of SID

www.SID.ir

و χlf در منطقه دهاقان دارای همبستگی منفی متوسطی است. محمودی و خادمی نیز عدم همبستگی پذیرفتاری مغناطیسی را در خاک مناطق شهری استان اصفهان با مس و روی در سال 1392 گزارش نمودند. اما دنکوب و همکاران (1391) همبستگی مثبت معنی‌داری میان این غلظت کل عناصر و χlf گزارش نمودند. در مطالعه کریمی و همکاران (2011) بر روی همبستگی فلزات سنگین و خاصیت مغناطیسی در پارک‌ها و فضای سبز شهری، از بین فلزات مورد بررسی (V و As, Cd, Cr, Ba, Cu, Mn, Pb Zn, Sr) تنها فلزات مس، روی، سرب و وانادیوم همبستگی معنی‌داری با پذیرفتاری مغناطیسی نشان دادند. لئو و همکاران نیز در سال 2008 همبستگی بالایی را بین χlf و غلظت فلزات روی و مس گزارش کردند. همبستگی پایین و یا عدم همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و فلزات قابل‌جذب در خاک‌های سطحی بیانگر حضور مقادیر کمی از ذرات سوپرپارامگنتیک و آن هم عمدتاً ناشی از فرایندهای پدوژنی می‌باشد که این نتایج با مطالعه کریمی و همکاران (2011)، نعیمی و ایوبی (2013) و لو و همکاران (2007) سازگار است. به طور کلی ورود عناصر به داخل شبکه ساختمانی کانی‌های فری مگنتیت در زمان شکل‌گیری کانی‌ها در طول زمان، می‌تواند سبب همبستگی میان عنصر مورد نظر و مغناطیس خاک گردد (دنکوب و همکاران، 1391؛ پتروسکی و همکاران،2000). عدم وجود همبستگی میان مس، روی و منگنز موجود در فاز محلول خاک با پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌تواند نشان از عدم تمایل آنها برای ورود آنها به ساختمان کانی-های فری مگنتیت باشد زیرا عناصر اندازه‌گیری شده در این مطالعه در بخش قابل دسترس زیستی خاک حضور دارند، در حالی‌که در مطالعات قبلی همبستگی میان غلظت کل عناصر و مغناطیس خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه دی ایملیو و همکاران (2012) نیز بر روی بررسی اثرخاصیت مغناطیسی بر میزان کل و بخش قابل‌جذب فلزات Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn در منطقه باسیلیکاتا در جنوب ایتالیا مشخص شد که از بین فلزات مورد بررسی تنها فلز روی و مس در بخش قابل‌جذب با خاصیت مغناطیسی همبستگی مثبت نشان دادند که دلیل آن را منابع انسانی مانند بار ترافیکی و انتشار صنایع و کارخانه‌های موجود در منطقه دانستند، لذا عدم همبستگی معنی‌دار میان عناصر قابل‌جذب مطالعه حاضر و پذیرفتاری مغناطیسی خاک نشان دهنده نقش ضعیف منابع انسانی در انتشار این عناصر در خاک مناطق مورد مطالعه می‌باشد که این نتیجه‌گیری با مطالعه دنکوب و همکاران (1391) سازگاری دارد.

همچنین، در منطقه مورد مطالعه همبستگی منفی میان فلز آهن با پذیرفتاری مغناطیسی خاک به خصوص در منطقه شهرضا مشاهده گردید. دنکوب و همکاران (1391)، محمودی و خادمی (1392)، استریشز و ماجریا (1998) همبستگی غلظت کل فلزات مس، روی، آهن و منگنز را با مغناطیس خاک مثبت ارزیابی نمودند. در مطالعه هو و همکاران (2007) در خاک‌های کشاورزی منطقه شانگ‌های چین نیز در بین فلزات مورد بررسی تنها میزان کل فلزات روی و آهن همبستگی مثبت با خاصیت مغناطیسی نشان دادند ولی فلزات منگنز و آهن معنی‌دار نبودند. در مطالعه حاضر، افزایش حضور فلز آهن در بخش قابل‌جذب خاک دلیل بر بالا بودن غلظت آن در ساختار خاک نمی‌باشد. بنابراین لزوماً افزایش غلظت این عنصر در بخش قابل‌جذب خاک، تأثیری مثبت بر مغناطیس نخواهد داشت بلکه می‌تواند تأثیر منفی نیز داشته باشد.

در منطقه مورد مطالعه بین پارامتر بافت خاک و پذیرفتاری مغناطیسی نیز ارتباط معنی‌داری دیده می‌شود. این همبستگی با بافت شنی منفی بوده و با رس و سیلت مثبت گزارش شده است. در شهرضا که بافت غالب خاک شنی است همبستگی میان عناصر با درصد شن، سیلت و رس هیچکدام معنی‌دار نبوده ولی در دهاقان بواسطه ی بافت غالب سیلتی، نتایج کاملاً متفاوتی به دست آمده است. همبستگی میان χlf و درصد شن منفی بوده و با بافت رسی همبستگی مثبت دارد. با توجه به اینکه خاک-های رسی و سیلتی به دلیل داشتن ذرات کوچکتر، سطح تماس و قدرت جذب بیشتری دارند، این امر سبب حفظ عناصر درون بافت خاک و در نتیجه افزایش مغناطیس خاک می‌شود. هانش و اسکولجر نیز در سال 2002 همبستگی χlf و درصد سیلت خاک را مثبت گزارش نمودند. دنکوب و همکاران همبستگی χlf را با درصد شن خاک مثبت گزارش کرده‌اند. به هرحال بافت خاک سهم قابل توجهی در میزان سیگنال مغناطیسی دارد به طوری که حضور ترکیبات مگنتیت در رس و سیلت بیشتر از شن می‌باشد (ماهر،1986). هر چند مطالعات نشان می‌دهد که سایر ویژگی‌های خاک همچون رطوبت، ماده آلی و کربنات ها، pH خاک، هدایت الکتریکی دارای پذیرفتاری مغناطیسی بسیار پایینی هستند (دی جونگ و همکاران،2000) اما تغییرات این پارامترها در سطح خاک می‌تواند میزان پذیرفتاری را از طریق افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی در خاک تغییر دهند (ایوبی و

Archive of SID

www.SID.ir

همکاران،2014). این پارامترها در مطالعه ما اثر قابل ملاحظه‌ای بر خاصیت مغناطیسی خاک نداشت و این موضوع احتمالاً به دلیل عدم تفاوت قابل ملاحظه این پارامترها در مناطق مورد مطالعه بود.

## نتیجه‌گیری

به طور کلی، پژوهش حاضر به منظور بررسی قابلیت روش سنجش پذیرفتاری مغناطیسی خاک در پایش فلزات قابل‌جذب و مورد نیاز گیاه انجام گرفت. از مطالب فوق مشخص گردید که به دلیل پایین بودن میزان پذیرفتاری مغناطیسی در بخش قابل دسترس زیستی خاک های مورد مطالعه نسبت به سایر مناطق طبیعی اصفهان، خاصیت مغناطیسی در مطالعه حاضر تحت تأثیر مواد مادری و ویژگی‌های ذاتی خاک قرار دارد. عدم همبستگی و یا همبستگی منفی بین پذیرفتاری مغناطیسی با فلزات قابل‌جذب بیانگر عدم تأثیر فعالیت‌های انسانی بر روی غلظت فلزات مورد بررسی در منطقه است. بر اساس این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی در بخش های قابل دسترس زیستی خاک و مناطقی که تحت تأثیر منبع مشخصی از آلودگی نباشد کارایی بالایی ندارد.

## فهرست منابع:


1. علی احیایی، م.، و ع. ا. بهبهانی زاده. 1372. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک. نشریه شماره 893 ، چاپ اول، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، 150 ص.
2. اولیائی، ح .ر.، ا. ابراهیم، س. جعفری، م. رجایی و ر. قاسمی فسایی. 1388. توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در ارتباط با ترکیبات آهن در برخی خاک‌های انتخابی استان فارس.مجله پژوهش‌های خاک علوم آب و خاک، جلد 23، شماره2، صفحات 204-191.
3. بابائی، ه.، س. ح. خداپرست و ع. عابدینی.1384. سنجش فلزات سنگین(Cd, Cu, Fe, Pb) در رسوبات سطحی تالاب انزلی. چهارمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، صفحات 946 تا 954.
4. بوداغی، ه.، م. یونسیان، ا. ح. محوی، م. علی محمدی، م. ه. دهقانی، و ش. نظم آرا. 1390. بررسی میزان آرسنیک، کادمیوم و سرب در خاک و آب زیرزمینی و ارتباط آن با کود شیمیایی در خاک شالیزاری. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران. دوره بیست و یکم. ویژه نامه 1، صفحات 28-20.
5. رضائی، غ. ر. 1382. بررسی میزان تجمع فلزات سنگین در رسوبات سطحی خورخوران و محدوده منطقه حفاظت شده حرا. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی -درمانی تهران.
6. جورکش، ش.، م. ح. صالحی، و ع. اسفندیار پور بروجنی. 1393. مقایسه تغییرات مکانی پذیرفتاری مغناطیسی و برخی از عناصر سنگین در خاک های منطقه لنجانات اصفهان. نشریه آب و خاک(علوم و صنایع غذایی)، جلد28، شماره3، صفحات 586-575.
7. حمزه، م. ع.، و ر. حسن زاده. 1388. مطالعهٔ آلودگی خاک‌های محدودهٔ شهر کرمان به وسیلهٔ عناصر کمیاب سمی با استفاده از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی. مجله محیط شناسی، سال سی و پنجم، شماره 49، صفحات 41-52.
8. دنکوب، ز.، ح. خادمی و ش. ا. ایوبی. 1391. پذیرفتاری مغناطیسی و ارتباط آن با غلظت برخی فلزات سنگین و خصوصیات خاک‌های سطحی اطراف اصفهان، مجله محیط شناسی، سال سی و هشتم، شمارهٔ 3، صفحات 26-17.
9. سرتاج، م.، ف. فتح اللهی دهکردی و ی. فیلی زاده. 1384. بررسی روند انتشار و تجمع فلزات سنگین(Pb,Zn,Cd,Cu,Ni,Cr) در رسوبات تالاب انزلی. مجله منابع طبیعی ایران، جلد 58، شماره 3، صفحات 633-623.
10. محمودی، ز.، و ح. خادمی. 1392. استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در پیش بینی آلودگی فلزات سنگین در گرد و غبار اتمسفری اصفهان و شهرهای اطراف. محیط شناسی، سال سی و نهم، شمارهٔ 2، صفحات 132-123.


Archive of SID

www.SID.ir

11. Ayoubi, S., S. Amiri and S. Tajik. 2014. Lithogenic and anthropogenic impacts on soil surface magnetic susceptibility in an arid region of Central Iran. Arch. Agron. Soil Sci. 60(10): 1467–1483.
12. Chan, L.S., S.L. Ng, A.M. Davis, W.W.S. Yim and C.H. Yeung. 2001. Magnetic properties andheavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's bay Hong Kong. Mar. Pollut. Bull. 42 (7): 569–583.
13. Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. Pages 545-566 in C.A. Black, (Eds). Method of Soil Analysis. Part1. ASA, Madison, WI.
14. Dearing. J., K. Hay, S. Baban, A. Huddleston, E. Wellington and P. Loveland. 1996. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. Geophys. J. Int. 127 (3):728-734.
15. D'Emilio, M., M. Macchiato, M. Ragosta and T. Simoniello. 2012. A method for the integration of satellite vegetation activities observations and magnetic susceptibility measurements for monitoring heavy metals in soil. J. hazard. Mater. 241: 118-126.
16. De Jong, E., D.J. Pennock and P.A. Nestor. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada Catena. 40: 291-305.
17. Desenfant , F., E. Petrovský and P. Rochette. 2004. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: case study from South France. Water Air Soil Pollut. 152(1–4):297–312.
18. Durza, O. 1999. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. Phys. Chem. Earth. 24:541–543.
19. Goddu, S. R., E. Appel, D. Jordanova and F. Wehland. 2004. Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India)- relationship to industrial pollution and road traffic. Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C. 29(13):985-995.
20. Hall, J.L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance, J. Exp. Bot. 53(366): 1-11.
21. Hanesch, M., and R. Scholger. 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. Environ. Geol. 42(8): 857-870.
22. Hay, K.L., J.A. Dearing, S.M.J Baban and P.J. Loveland .1997. A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements. Phys. Chem. Earth. 22:207–210.
23. Heller, F., Z. Strzyszcz and T. Magiera.1998. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland J. Geophys. Res. 103(B8):17767–17747.
24. Hu, X-F., Y. Su, R. Ye, X-Q. Li and G-L. Zhang. 2007. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications. Catena 70 (3):428-436.
25. Hunt A., J. Jones and F. Oldfield. 1984. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin. Sci. Total Environ. 33:129–139.
26. Jian-feng, P., S.Yong-hui, Y. Peng, C. Xiao-yu and Q. Guang-lei. 2009. The remediation of heavy metals contaminated sediment. J. Hazard. Mater. 161: 633-640.
27. Jordanova, N.V., D.V. Jordanova, L. Veneva, K. Yorova and E. Petrovsky. 2003. Magnetic Response of Soils and Vegetation to Heavy Metal Pollution A Case Study. Environ. Sci. Technol. 37 (19):4417-4424.
28. Kabata-Pendias, A .2010. Trace elements in soils and plants. CRC press. Taylor and Francis Group. United States.
29. Karimi, R., S. Ayoubi, A. Jalalian, A.R. Sheikh-Hosseini and M. Afyuni. 2011. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. J. Appl. Geophys. 74 (1):1-7.
30. Lindsay, W.L.and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42(3): 421-428.

Archive of SID

www.SID.ir

31. Lu, S., S. Bai and Q. Xue .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 (2):568-580
32. Luo, M., J. LI, W. Cao and M. Wang. 2008. Study of heavy metal speciation in branch sediments of Poyang Lake. J. Environ. Sci. 20: 161–166.
33. .Maher, B. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. Phys. Earth Planet. In. 42 (1):76-92
34. Naimi, S., and S. Ayoubi. 2013. Vertical and horizontal distribution of magnetic susceptibility and metal contents in an industrial district of central Iran. J. Appl. Geophys. 96:55-66.
35. Naji, A., A. Ismail, and A.R. Ismail. 2010. Chemical speciation and contamination assessment of Zn and Cd by sequential extraction in surface sediment of Klang River, Malaysia. Microchem. J. 95: 285-292.
36. Nan, Z., C. Zhao, L. Jijun, F. Chen and W. Sun. 2002. Relation between soil properties and selected heavy metal concentration in spring wheat (Triticum aestivum L.) grown in contaminated soil. Water Air Soil Pollut. 133: 205–213.
37. Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Part 2. Chemical and Microbiological Properties, Methods of Soil Analysis. ASA, Madison, WI, pp. 539–579.
38. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department Of Agriculture; Washington.
39. Petrovský, E., A. Kapička, N. Jordanova, M. Knab and V. Hoffmann. 2000. Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. Environ. Geol. 39 (3-4):312-318.
40. Steffens, J.C. 1990. Heavy metal stress and the phytochelatin response, in Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimations Mechanisms. Wiley–Liss Inc. 377-394.
41. Strzyszcz, Z., and Magiera, T., 1998. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of Southern Poland. Phys. Chem. Earth 23 (9–10): 1127–1131.

Archive of SID

www.SID.ir

# Application of Soil Magnetic Susceptibility for Monitoring Bioavailable Metals Pollution

**A. Marjovvi, Z. Razavi[1], and S. Behravesh**

Scientific Member of Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran and Ph.D Student of Environmental Pollutions, Department of Environment, Isfahan University of Technology; E-mail: amarjovvi@yahoo.com

Ph.D Student of Environmental Pollutions, Department of Environment, Isfahan University of Technology; E-mail: z.razavidinani@gmail.com

Ph.D Student of Environmental Pollutions, Department of Environment, Isfahan University of Technology; E-mail: s.behravesh87@gmail.com

**Received: September, 2015 & Accepted: February, 2017**

**Abstract**

A novel method of monitoring soil pollution by heavy metals is using magnetometry as a cost-effective, simple, efficient, and fast method. In the present study, the potential of the magnetometric method to monitor the plant nutrient elements such as iron, manganese, zinc, and copper in the bioavailable fraction was evaluated. Also, their relationship with the greenhouse soil physicochemical characteristics of two towns of Isfahan Province (Dehaqan and Shahreza) were investigated. A total of 40 topsoil samples were collected (0-20 cm depth) from the study area in summer 2014 and the magnetic susceptibility ($\chi$) of the collected samples was measured at both low and high frequencies ($\chi$lf and $\chi$hf) using the Bartington MS2 dual frequency sensor. The results indicated that there were no significant correlations between the soil magnetic susceptibility and the bioavailable forms of Cu, Zn, and Mn in the whole of the study area. This could be probably due to lack of penetration of these elements into the lattice structure of the ferromagnetic materials. The negative correlations between magnetic susceptibility and Fe showed that the increase of the bioavailable concentration of Fe is not necessity related to its high contents in the soil magnetic structure, so, it would not affect magnetic susceptibility positively. In addition, there was positive significant correlation between the magnetic susceptibility and clay and silt content as well as a negative significant correlation with sand content. Also, the low values of soil magnetic susceptibility in the bioavailable fraction ($30.30 \pm 7.89 \times 10^{-8}$ $m^3$ $kg^{-1}$) reflects the dominant effect of the bedrock and the inherent characteristics of soil on metals concentrations in the region. Based on this study, it can be concluded that in order to monitor the heavy metals in the bioavailable fraction of soils, and also in areas that are not affected by certain sources of pollution, monitoring techniques based on magnetic susceptibility do not have high efficiency.

**Keywords**: Magnetometric method, Bioavailable Concentration, Heavy metals, Shahreza, Dehaqan

[1]. Corresponding author: Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan Iran.

Archive of SID

www.SID.ir