

توزیع عمودی شاخص‌های مغناطیسی و غلظت آهن معادل کل و ارتباط آنها با سنگ‌شناسی مواد مادری خاک‌ها

علی افشاری^۱، کامران مروج*^۲، پریسا علمداری^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۱۹

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲ و ۳- استادیاران گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kmoravej@znu.ac.ir

چکیده

پذیرفتاری مغناطیسی، شاخصی از ویژگی‌های مغناطیسی یک ماده است که برخی از ذرات معدنی خاک از چنین ویژگی مستثناء نیستند. مطالعه حاضر برای تعیین توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (X)، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) و ارتباط آن با غلظت آهن معادل کل در ۱۵ پروفیل از خاک‌هایی با مواد مادری آذرین، رسوبی و آبرفتی واقع در اراضی بخش مرکزی استان زنجان انجام‌گردید. نتایج تاثیر واضحی از میزان لیتولوژی مواد مادری در برآورد پذیرفتاری مغناطیسی خاک دارد. در خاک‌های تشکیل‌شده بر روی سنگ‌های آذرین و خاک‌های مشتق‌شده از سنگ‌های رسوبی به ترتیب کمینه و بیشینه پذیرفتاری مغناطیسی بین ۲۰۰ تا $1400 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ و ۴۲ تا $158 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ می‌باشد. هرچند فرآیندهای خاک‌سازی روی افزایش پذیرفتاری مغناطیسی تاثیر می‌گذارند، اما در سنگ‌های آذرین با وجود میزان بالای کانی‌های مغناطیسی، تاثیر لیتوژنیک مواد مادری بر فرآیندهای تشکیل خاک بیشتر است. پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مشتق‌شده از سنگ‌های رسوبی، بیشتر از مواد مادری از همان‌نوع است که علت آن خاک-ساختی بودن کانی‌های فرّی مغناطیس در خاک می‌باشد. بین مدل تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل‌شده روی سنگ‌های آذرین با خاک‌های به‌وجودآمده روی سنگ‌های رسوبی تفاوت قابل توجهی وجود دارد. در پروفیل خاک-های آبرفتی توزیع عمودی غلظت آهن معادل کل و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی (10^3 تا $118 \cdot 10^3$ تا $567 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) تابع نوع مواد مادری واحدهای اراضی مجاور، ردیف زمانی و فرآیندهای خاک‌سازی است. غلظت آهن معادل کل از روند مشابهی با توزیع پذیرفتاری مغناطیسی تبعیت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آهن معادل کل، پذیرفتاری مغناطیسی، توزیع عمودی، سنگ‌های آذرین و رسوبی، مواد آبرفتی

Vertical Distribution of Magnetic Parameters and Total Equivalent Iron Concentration and their Relationships with Soil Parent Material Lithology

A Afshari¹, K Moravej^{*2}, P Alamdari³

Received: 2015.09.16

Accepted: 2015.04.08

1- Ph. D Student. Dept. of Soil Science, Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran

2, 3- Assist. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran

* Corresponding Author, Email: kmoravej@znu.ac.ir

Abstract

Magnetic susceptibility is an indicator of material magnetic properties that some of the mineral particles of the soil are not exceptional from this feature. The present study was conducted to determine the vertical distribution of magnetic susceptibility (X), frequency-dependent magnetic susceptibility (X_{fd}) and its correlation with total iron concentration in 15 soil profiles with igneous, sedimentary and alluvial parent materials located in the central of zanjan province. The results showed an obvious effect of the amount of parent material lithology on the magnetic susceptibility of the soils. The maximum and minimum magnetic susceptibility in the soils which formed from igneous rocks and sedimentary rocks were found between $200 - 400 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ and $42 - 158 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, respectively. Although, the soil formation process affected on increasing the magnetic susceptibility of it, but due to high levels of magnetic minerals in samples of igneous rock, the effect of parent material lithogenic on soil formation processes was high. Magnetic susceptibility in soils formed from sedimentary rocks was more than similar their parent materials that was the reason for pedogenic formation of ferromagnetic minerals. There was a considerable difference between magnetic susceptibility variation model in soils derived on igneous rocks with sedimentary rocks. In the profile of alluvial soils, vertical distribution of total equivalent iron concentration and amount of magnetic susceptibility ($118 - 567 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) were related to adjacent land unit parent material, chronosequence and soil forming process. Total equivalent iron concentration was in a same trend of magnetic susceptibility distribution.

Keywords: Alluvial deposits, Igneous and sedimentary rocks, Magnetic susceptibility, Total equivalent iron, Vertical distribution

مقدمه

این است که مغناطیس در دنیای اطراف ما وجود دارد و تمام مواد تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار دارند. به طور مثال فلزات به شدت در میدان مغناطیسی از خود عکس-العمل نشان می دهند. در طی دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی محققان زیادی سعی در تشریح و طبقه بندی مواد موجود در طبیعت از نظر رفتارهای مغناطیسی کردند. به طور کلی، در الکترومغناطیس کلاسیک تعریف

کلیه اشیاء و مواد اطراف ما از طریق یک سری ویژگی ها از جمله رنگ، اندازه یا ویژگی های شیمیایی آنها تشریح می شوند. برخی دیگر نیز از طریق ویژگی های مغناطیسی معرفی می شوند. در دنیای اطراف ما مواد بسیاری وجود دارد که دارای ویژگی مغناطیسی با شدت های مختلف هستند. اما نکته مهم

۵- دیامغناطیس^۸ (مانند کوارتز، آهک، گچ و ماده آلی با کمینه پذیرفتاری مغناطیسی) می‌باشند (مولینس ۱۹۷۷). 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 چنین ماده‌ای آن است که می‌تواند مغناطیس خود را دائم داشته باشد و همچنین حضورش تأثیر زیادی در میدان مغناطیسی دارد (نافه و براسد ۱۹۵۸).

اولیائی و همکاران (۱۳۸۸) با بررسی توزیع پذیرفتاری مغناطیسی و میزان ترکیبات آهن در ۱۴ پروفیل خاک با دامنه گسترده‌ای از شرایط اقلیمی، کاربری و کلاس زهکشی در استان فارس، میزان پذیرفتاری مغناطیسی افق‌های آبشویی شده^۹ را بیشتر از افق‌های آبشویی‌یافته^{۱۰} گزارش کردند. آنها این افزایش را مربوط به آبشویی مواد دیامگنتیک از افق‌های سطحی و تشکیل پدوژنیک فری‌مگنتیت‌ها در سطح خاک نسبت-دادند. نتایج مطالعات ترابی و کریمیان اقبال (۱۳۸۱) در بررسی تکامل خاک با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان نشان داد که فاکتورهایی نظیر مواد مادری، اقلیم و زمان بیشترین تأثیرگذاری را بر توزیع پذیرفتاری مغناطیسی دارند. در این مطالعه بر خلاف نتایج گذشته، با تکامل خاک، افزایشی در میزان پذیرفتاری مغناطیسی مشاهده نمی‌شود. زیرا مواد مادری غنی از اکسیدهای آهن فرومغناطیس اولیه می‌باشد. هندریکس و بروس (۲۰۰۴) منابع مختلف کانی‌های فرومغناطیسی را شامل الف: مواد مادری که خاک روی آن تکامل یافته است، ب: تشکیل درجا به وسیله فرآیندهای پدوژنیک، ج: ته-نشست‌های اتمسفری ذرات گرد و غبار و د: فرآیندهای

میدان مغناطیسی به صورت «میدان حاصل از بار الکتریکی در حال حرکت در اطراف آن» می‌باشد. به بیان ساده‌تر میدان مغناطیسی حاصل تأثیر دو میدان الکتریکی مثبت و منفی بر روی هم است که منجر به درست شدن یک میدان مغناطیسی می‌شود (دیرینگ ۱۹۹۹).

پذیرفتاری مغناطیسی^۱ نیز درجه‌ای است که یک ماده، میدان مغناطیسی شناخته شده و معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار این تأثیر تابع غلظت و نوع کانی-های مغناطیسی موجود در نمونه است (نافه و براسد ۱۹۵۸). عامل ایجاد ویژگی‌های مغناطیسی در خاک عمدتاً کانی‌های مگنتیت^۲ و مگهمیت^۳ هستند. در حالی که کانی‌های آهن‌دار دیگر غیرمغناطیس بوده و حتی برخی ترکیبات موجود در خاک نظیر کربنات‌ها دارای پذیرفتاری مغناطیسی منفی هستند. اگرچه غلظت این کانی‌ها (مگنتیت و مگهمیت) در خاک کم می‌باشد ولی نسبت به دیگر کانی‌های آهن، شدت پذیرفتاری مغناطیسی خاک را تنظیم می‌کنند (مولینس ۱۹۷۷).

محققان مختلفی افزایش پذیرفتاری مغناطیسی را به اشکال مختلفی تفسیر کردند. فرآیندهای خاک‌ساختی، زمین‌ساختی، اقلیمی (تامسون و اولدفیلد ۱۹۸۶) و تغییر شکل ژئوشیمیایی آهن (فاین و همکاران ۱۹۸۹) از جمله فرآیندهای مؤثر گزارش شده است. علاوه بر موارد ذکر شده، تامسون و اولدفیلد (۱۹۸۶) به ارتباط بین افزایش پذیرفتاری مغناطیسی و ترکیب سوخت‌های فسیلی اشاره کردند. رفتارهای مغناطیسی در اجسام به پنج دسته تقسیم می‌شوند که برحسب میزان پذیرفتاری مغناطیسی و به ترتیب نزولی شامل ۱- فرومغناطیس (مانند آهن خالص با بیشینه میزان پذیرفتاری مغناطیسی)، ۲- فری‌مغناطیس (مانند مگنتیت و مگهمیت)، ۳- کنتدانتی فرومغناطیس^۴ (مانند همتیت و گئوتیت)، ۴- پارامغناطیس^۵ (مانند بیوتیت^۶ و پیریت) و

¹Magnetic susceptibility

²Magnetite

³Maghemite

⁴Canted antiferromagnetic

⁵Paramagnetism

⁶Biotite

⁷Pyrite

⁸Diamagnetism

⁹Elluvial

¹ Illuvial

اقدام به حفر ۱۵ پروفیل خاک در مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناختی در اطراف زنجان گردید (جدول ۱).

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی پروفیل‌های حفر شده.

موقعیت جغرافیایی پروفیل		پروفیل
Y (UTM, m, N)	X (UTM, m, E)	
۴۰۳۸۱۹۲	۲۹۹۲۵۲	۱
۴۰۴۲۵۹۷	۲۹۴۱۲۲	۲
۴۰۵۰۶۲۵	۲۹۹۱۲۴	۳
۴۰۵۳۹۵۵	۳۰۳۹۷۵	۴
۴۰۴۷۴۷۰	۲۹۹۰۷۴	۵
۴۰۵۲۵۹۲	۳۱۰۵۷۱	۶
۴۰۳۵۴۵۸	۲۷۶۵۹۰	۷
۴۰۴۵۷۱۰	۲۶۱۰۳۳	۸
۴۰۴۷۵۰۲	۲۶۱۵۳۵	۹
۴۰۵۰۸۷۲	۲۶۱۴۶۳	۱۰
۴۰۵۷۷۵۴	۲۶۱۵۳۵	۱۱
۴۰۵۹۷۶۲	۳۰۳۴۷۴	۱۲
۴۰۶۱۵۵۴	۲۹۷۲۳۶	۱۳
۴۰۴۸۵۰۶	۲۷۵۶۵۸	۱۴
۴۰۴۵۲۸۰	۲۶۷۵۵۷	۱۵

سازندهای موردنظر عبارتند از: سازند لالون، سازند میلا، سازند کهر، سازند سلطانیه و سازند کرج. تعداد پروفیل‌های حفر شده در هر سازند متفاوت و متأثر از وسعت و پراکنش آن بود، اما در برخی کمینه دو پروفیل و در برخی دیگر بیش از دو پروفیل حفر گردید. به غیر از ۴ پروفیل حاوی مواد مادری آبرفتی که دارای کاربری کشاورزی بودند، سایر پروفیل‌ها دور از فعالیت‌های انسانی واقع شده و بکر و دست‌نخورده بودند (شکل ۱).

آنتروپوژنیک مانند خاکسترهای صنعتی معلق در هوا می‌دانند. سنگ‌شناسی مواد مادری بر مقدار و توزیع عمودی مغناطیسی خاک‌ها تأثیر می‌گذارد. تغییرات پارامترهای مغناطیسی با عمق بازتابی از تفاوت قابل توجه در مینرالوژی کانی‌های مغناطیسی از لحاظ غلظت و اندازه ذرات مگمیت و هماتیت می‌باشد (ماجیرا و همکاران ۲۰۰۶). پذیرفتاری مغناطیسی تقریباً غلظت کل کانی‌های فری‌مگنتیک (مگنتیت و مگمیت) را نشان می‌دهد و تابع اندازه ذرات و کانی‌شناسی ذرات مغناطیسی است و همراه با پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های توسعه فرایندهای خاک‌سازی استفاده شوند. البته الگوی ثابتی برای ارتباط بین پذیرفتاری مغناطیسی و توسعه خاک‌سازی خاک وجود ندارد (لو ۲۰۰۰). با توسعه خاک‌سازی، ذرات سوپر پارامگناطیس (SP) و حوزه منفرد پایدار^۲ (SSD) به تدریج تشکیل می‌شوند که باعث افزایش پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) خواهند شد (دیرنینگ و همکاران ۱۹۹۶).

این مطالعه با هدف ارزیابی توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (X)، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) و ارتباط آنها با توزیع آهن کل در طول پروفیل خاک، در خاک‌های تشکیل شده روی مواد مادری مختلف در مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناختی استان زنجان انجام گرفت.

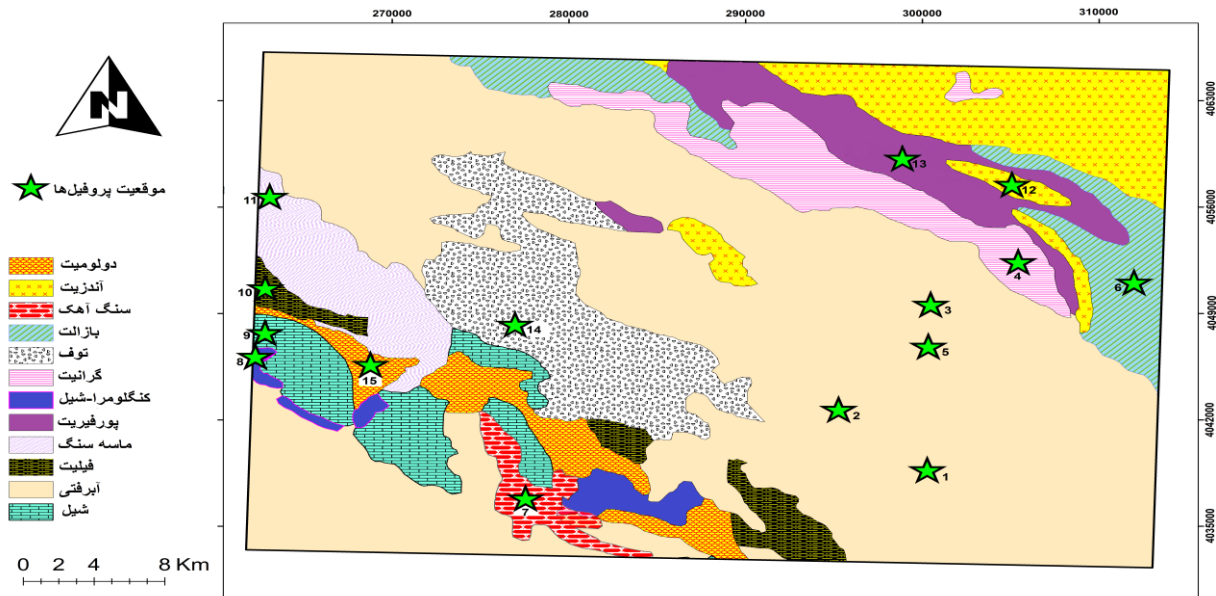
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و نحوه نمونه‌برداری

منطقه مطالعاتی شامل اراضی بخش مرکزی استان زنجان واقع در عرض شمالی ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه و طول شرقی ۴۸ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه می‌باشد. اشکال فیزوگرافی موجود در منطقه شامل تپه، فلات و دشت دامنه‌ای است. برای تعیین روند تغییرات پارامترهای مغناطیسی و تأثیرات مواد مادری مختلف بر توزیع آنها،

^۱Super paramagnetic

^۲Stable single domain



شکل ۱- منطقه مطالعاتی و موقعیت حفر پروفیل‌ها.

رابطه [۱] $X_{fd} = (X_{lf} - X_{hf} / X_{lf}).100$

که در آن X_{fd} درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، X_{lf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین ($0/4\text{kHz}$) و X_{hf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا ($4/6\text{ kHz}$) می‌باشد (دیرنینگ و همکاران ۱۹۹۶). برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی، نمونه‌های خاک در ظروف پلاستیکی کوچکی ریخته شد و سپس توسط حسگر MS2B قرائت‌گردید. از هر نمونه دو تکرار مورد آزمایش قرارگرفت و برای هر تکرار دو قرائت انجام شد تا مقدار خطای آزمایشگاهی به کمینه برسد. میانگین قرائت‌ها به‌عنوان نتیجه نهایی پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه گزارش‌گردید. به‌طورکلی هرچه اختلاف میان پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا و پایین یک خاک، بیشتر باشد، نشان‌دهنده دخالت بیشتر ذرات مغناطیسی کوچکتر از $0/02$ میکرومتر (عمدتاً خاک‌سازی) می‌باشد (دیرنینگ و همکاران ۱۹۹۶؛ تامسون و اولدفیلد ۱۹۸۶).

اگر مقدار X_{fd} کمتر از ۴ درصد باشد، ذرات چند حوزه-ای (MD) و تک‌حوزه‌ای پایدار (SSD) غالب می‌شوند.

بررسی پروفیل‌ها و نمونه‌برداری براساس افق‌ها و لایه‌های ژنتیکی انجام‌گرفت. همچنین از سنگ‌های مادری غیرهوادیده (هرکدام به‌طور متوسط ۵ نمونه سنگ) برای به‌دست‌آوردن مقدار پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌برداری گردید. مواد مادری غالب منطقه شامل سنگ‌های آذرین دوره کامبرین (گرانیت، بازالت، آندزیت، پورفیریت و توف آتشفشانی) و سنگ‌های رسوبی دوره ژوراسیک-کرتاسه (سنگ آهک، شیل، کنگلومرا-شیل، فیلیت، ماسه سنگ و دولومیت) می‌باشد. مواد مادری آبرفتی دوره کواترنری که بخش اعظم منطقه را می‌پوشاند (استوکلین و همکاران ۱۹۶۹) نیز مطالعه‌شد.

تجزیه‌های آزمایشگاهی

پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک با استفاده- از دستگاه سنجنده فرکانس دوگانه بارتینگتون در دو فرکانس بالا $4/6\text{ KHz}$ و پایین $0/4\text{ KHz}$ اندازه‌گیری و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نیز از اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا و پایین براساس رابطه ۱ محاسبه‌گردید (دیرنینگ و همکاران ۱۹۹۶).

¹ Multi domain

² Single sustainable domain

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس بیشتر در ارتباط با ترکیبات سوپراپارامگنتیک^۱ (SP) می‌باشد (دیرنینگ و همکاران ۱۹۹۶). غلظت آهن کل با استفاده از اسید نیتریک ۵ نرمال عصاره‌گیری و توسط دستگاه جذب اتمی مدل پرکین - المر^۲ اندازه‌گیری شد (اسپوزیتو و همکاران ۱۹۸۲).

نتایج

پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل‌شده بر روی سنگ‌های آذرین

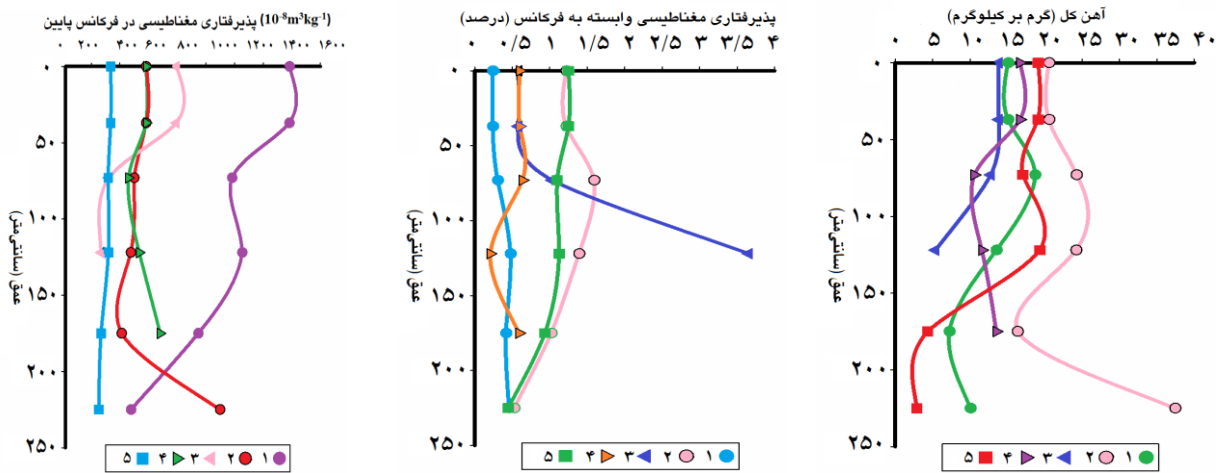
شکل ۲ تغییرات عمودی پارامترهای مغناطیسی (X و X_{fd}) و غلظت آهن معادل کل را در خاک‌های تشکیل‌شده روی مواد مادری آذرین (گرانیت، بازالت، آندزیت، پورفیریت و توف آتشفشانی) نشان می‌دهد. خاک‌های تشکیل‌شده روی سنگ مادری گرانیت مقدار پذیرفتاری مغناطیسی بالایی دارند و بین ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۷۴۶ تا ۱۳۸۲ می‌باشند و از عمق به طرف سطح خاک میزان پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد. زیرا این سنگ مادر غنی از آهن بوده و کانی‌های فری مغناطیس تولیدشده در اثر هوازدگی این سنگ‌ها در افق‌های پایینی مانده و باعث غنی‌شدگی مغناطیسی در افق‌های پایینی می‌شوند. مگنتیت طبیعی کانی خیلی پایداری در خاک است، بنابراین غلظت آن در لایه رسوبی (باقیمانده) گاهی اوقات خیلی زیاد شده و باعث غنی‌شدگی مغناطیسی در افق C می‌شود (ماجیرا و همکاران ۲۰۰۶). مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه سنگ گرانیت در حدود ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۲۷۶/۹۵ است. میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل‌شده روی گرانیت و دیگر سنگ‌های اسیدی و خنثی متوسط و در حدود ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۵۰ تا ۱۲۰ و میزان پذیرفتاری مغناطیسی برای سنگ‌های آذرین اسیدی و خنثی بین ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۱۰۰ تا ۲۵۰ می‌باشد (لو ۲۰۰۰). اونیکو و همکاران (۲۰۰۸) در گرانیت‌های باتولیت (در کشور نیجریه) کانی‌های پارامغناطیسی را کنترل‌کننده عمده

پذیرفتاری مغناطیسی می‌دانند. درحالی‌که مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس بیشتر تابع اندازه ذره، تشکیل شبکه کریستالی دقیق، وجود ناخالصی‌ها و فضاهای خالی بین شبکه است. در این- مطالعه، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در خاک‌های تشکیل‌شده بر روی گرانیت بین ۰/۲۴ تا ۰/۴۸ درصد بدست آمد. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در تمامی افق‌های خاک‌های حاصل از توف آتشفشانی (بین $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۶۸ تا ۱۳۵) بیشتر از مقدار آن در سنگ مادری آن ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۵۲) است. همچنین میزان پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در این خاک‌ها بین ۰/۴۴ تا ۱/۳ درصد متغیر می‌باشد. میزان پذیرفتاری مغناطیسی در افق سطحی خاک‌های تشکیل‌شده از سنگ‌های آذرین به‌طور مشخص کمتر از افق‌های مواد مادری (زیرین) هستند. زیرا در اثر هوازدگی کانی‌های اولیه سنگ‌های آذرین، کانی‌های فری- مغناطیسی حاصل می‌شوند. مواد فری مغناطیس در افق- های بالایی خاک‌های تشکیل‌شده روی سنگ‌های آذرین تحت‌تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی قرار می‌گیرند. اما مواد فری مغناطیس در افق‌های زیرین خاک از کانی‌های فری- مغناطیس سنگ‌ها به‌ارث می‌رسند. بنابراین پذیرفتاری مغناطیسی خاک در اثر فرآیندهای تشکیل، مهاجرت و جدا شدن کانی‌های فری مغناطیس در طول پروفیل تحت‌تأثیر فاکتورهای مختلف تشکیل خاک قرار می‌گیرند. در مورد سنگ‌های آذرین، هوازدگی از دو منظر اهمیت دارد: الف) ذرات مغناطیسی اولیه مقاوم آزاد شده (مگنتیت) و در سطح خاک توسعه می‌یابند. ب) با تشکیل خاک‌ساختی کانی‌های مغناطیسی، کانی‌های آهن‌دار متلاشی‌شده و آهن از آنها آزاد می‌شود و در پذیرفتاری مغناطیسی خاک شرکت می‌کند (لو ۲۰۰۰).

شکل ۲ تغییرات عمودی پارامترهای مغناطیسی (X و X_{fd}) و غلظت آهن معادل کل را در خاک‌های تشکیل‌شده روی مواد مادری آذرین (گرانیت، بازالت، آندزیت، پورفیریت و توف آتشفشانی) نشان می‌دهد. خاک‌های تشکیل‌شده روی سنگ مادری گرانیت مقدار پذیرفتاری مغناطیسی بالایی دارند و بین ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۷۴۶ تا ۱۳۸۲ می‌باشند و از عمق به طرف سطح خاک میزان پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد. زیرا این سنگ مادر غنی از آهن بوده و کانی‌های فری مغناطیس تولیدشده در اثر هوازدگی این سنگ‌ها در افق‌های پایینی مانده و باعث غنی‌شدگی مغناطیسی در افق‌های پایینی می‌شوند. مگنتیت طبیعی کانی خیلی پایداری در خاک است، بنابراین غلظت آن در لایه رسوبی (باقیمانده) گاهی اوقات خیلی زیاد شده و باعث غنی‌شدگی مغناطیسی در افق C می‌شود (ماجیرا و همکاران ۲۰۰۶). مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه سنگ گرانیت در حدود ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۲۷۶/۹۵ است. میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل‌شده روی گرانیت و دیگر سنگ‌های اسیدی و خنثی متوسط و در حدود ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۵۰ تا ۱۲۰ و میزان پذیرفتاری مغناطیسی برای سنگ‌های آذرین اسیدی و خنثی بین ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۱۰۰ تا ۲۵۰ می‌باشد (لو ۲۰۰۰). اونیکو و همکاران (۲۰۰۸) در گرانیت‌های باتولیت (در کشور نیجریه) کانی‌های پارامغناطیسی را کنترل‌کننده عمده

¹ Super paramagnetic

² Perkin-Elmer



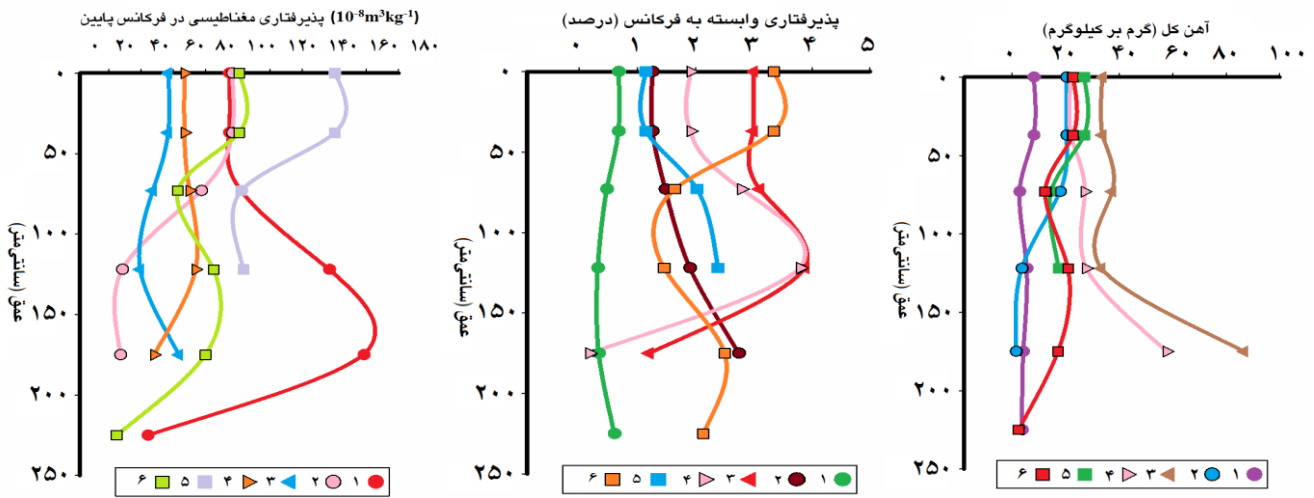
شکل ۲- توزیع عمودی پارامترهای مغناطیسی و غلظت آهن معادل کل در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های آذرین، خاک‌های ۱: گرانی، ۲: بازالتی، ۳: آندزیتی، ۴: پورفیری، ۵: توف.

گرم بر کیلوگرم می‌باشد. تغییرات عمقی پذیرفتاری مغناطیسی و غلظت آهن معادل کل در خاک‌های تشکیل شده روی سنگ‌های آذرین از روند یکسانی تبعیت می‌کند و با افزایش یا کاهش مقدار پذیرفتاری مغناطیسی (X)، مقدار آهن معادل کل هم افزایش یا کاهش می‌یابد. غلظت آهن معادل کل با پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های سطحی مشتق شده از سنگ‌های آذرین ارتباط مثبت ($r^2 = 0/32$) نشان داد، ولی معنی‌دار نبود. اولیائی و همکاران (۱۳۸۸) رابطه مثبت و معنی‌داری ($P < 0/01$) میان آهن پدوژنیک متبلور و پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌ها گزارش کردند. یون آهن در اثر هوادیدگی مواد مادری به خاک آزاد می‌شود. با توجه به شرایط محیطی خاک، آهن ممکن است ترکیب یا اکسید شده و یا رسوب کند. بنابراین آهن آزاد شده سبب تشکیل کانی‌های فری-مغناطیس ثانویه در خاک می‌شود (لو ۲۰۰۰).

پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل شده روی سنگ‌های رسوبی

شکل ۳ توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (X)، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) و غلظت آهن معادل کل را در خاک‌های تشکیل شده روی سنگ‌های رسوبی (سنگ آهک، شیل، کنگلومرا-شیل، فیلیت، ماسه سنگ و دولومیت) نشان می‌دهد.

مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در سنگ مادری بازالت در حدود $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۸۹۸ می‌باشد که بالاترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی را در نمونه سنگ‌های آذرین نشان می‌دهد. لو (۲۰۰۰) گزارش کرد که میزان پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های بازالت و آندزیت بیشتر از $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۱۰۰۰ می‌باشد. پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل شده روی بازالت کمتر از سنگ مادری است و از عمق به سطح کاهش می‌یابد و میزان آن بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۲۱۱ تا ۳۸۱ به دست آمد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در خاک‌های تشکیل شده از بازالت بین ۱ تا ۱/۶ درصد است. پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل شده روی سنگ مادری آندزیت بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۶۸ تا ۵۹۳ متغیر بوده و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) خاک‌های تشکیل شده روی آندزیت بین ۰/۵۸ تا ۳/۶۶ درصد به دست آمد. میزان پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه سنگ پورفیریت در حدود $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۴۸۱ است، اما خاک‌های مشتق شده از آن مقدار پذیرفتاری مغناطیسی کمتری دارند و بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۲۵۹ تا ۳۴۸ می‌باشد. میزان پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در این خاک‌ها بین ۰/۲۱ تا ۰/۶۴ درصد مشاهده شد. غلظت آهن معادل کل در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های آذرین در بازالت بالاترین مقدار را دارد و بین ۱۶ تا ۳۷



شکل ۳- توزیع عمودی پارامترهای مغناطیسی و غلظت آهن کل در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های رسوبی، خاک‌های ۱:سنگ آهک، ۲:کنگومرا-شیل، ۳:شیل، ۴:فیلیت، ۵:ماسه‌سنگ، ۶:دولومیت.

میزان پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در این خاک‌ها بین ۰/۳۲ تا ۰/۶۷ درصد می‌باشد و بالاترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) را در بین تمام خاک‌ها نشان می‌دهند. افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در لایه‌های سطحی خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های رسوبی اشاره به تشکیل خاک‌ساختی کانی-های فری مغناطیس در پروسه‌های تشکیل خاک دارد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های رسوبی بین ۰/۱۸ تا ۳/۸۸ درصد و میانگین ۱/۸۵ درصد می‌باشد. تغییرات عمودی پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در طول پروفیل خاک در سنگ‌های رسوبی تقریباً یکنواخت می‌باشد. در همین راستا، لو (۲۰۰۰) در سنگ‌های رسوبی بین پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) با عمق، ارتباط معنی‌داری گزارش نکرد. در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های رسوبی، هریک از پروفیل‌ها سطوح بالای پذیرفتاری مغناطیسی را در افق سطحی نشان می‌دهند و از عمق به طرف سطح خاک میزان پذیرفتاری مغناطیسی و کانی‌های مغناطیسی حاصل از فرآیند تشکیل خاک به طور یکنواخت افزایش پیدامی‌کند. در پروفیل‌های حاصل از سنگ‌های رسوبی دو ویژگی مهم دیده می‌شود: ۱- غلظت کم کانی‌های مغناطیسی در

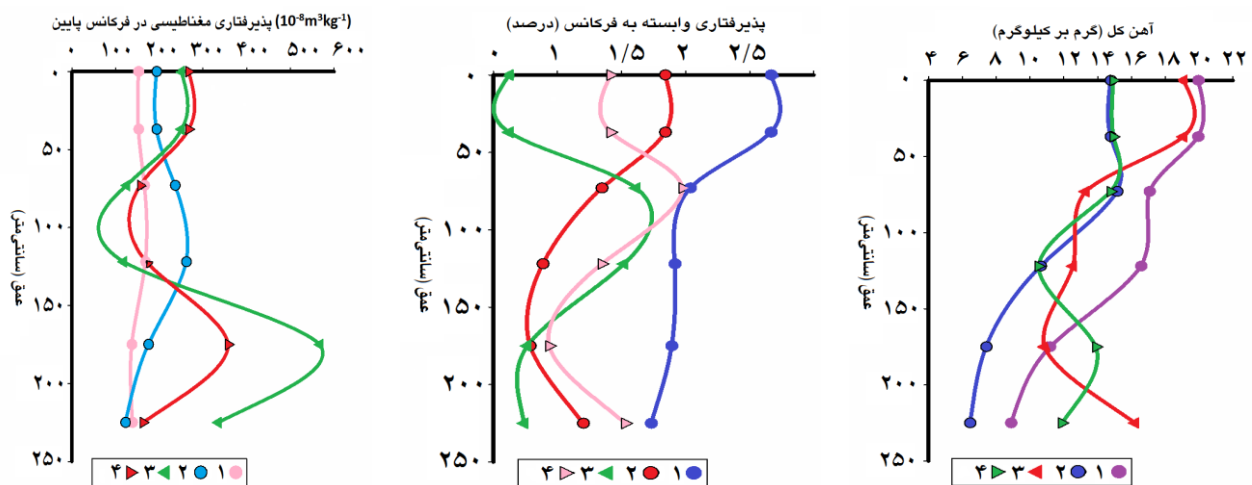
افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در لایه‌های سطحی خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های رسوبی اشاره به تشکیل خاک‌ساختی کانی‌های فری مغناطیس در پروسه‌های تشکیل خاک دارد. داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی حاکی از آن است که خاک‌های تشکیل شده روی دولومیت و فیلیت میزان پذیرفتاری مغناطیسی بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۳۲ تا ۸۰ دارند. هانش و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که پذیرفتاری مغناطیسی سنگ آهک و دولومیت پایین است و مقدار آن در خاک‌های مشتق شده از این سنگ‌ها، بیشتر تابع فاکتورهای خاک‌سازی است تا مواد مادری. سنگ‌های رسوبی به طور قابل ملاحظه‌ای غلظت‌های کمتر اکسید آهن دارند، بنابراین برای تشکیل کانی‌های فری مغناطیس ثانویه مساعد نیستند. پس اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی در طول پروفیل خاک کمتر خواهد بود. خاک‌های تشکیل شده روی سنگ‌های شیل و کنگومرا-شیل میزان پذیرفتاری مغناطیسی در حدود $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۸ تا ۷۶ دارند. میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تشکیل شده روی سنگ آهک و ماسه‌سنگ در بین افق‌های شان بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۸۲ تا ۱۵۸ می‌باشد. لو (۲۰۰۰) میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده روی شیل و سنگ آهک را بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۵۰ تا ۱۵۰ گزارش کرد.

غلظت کل آهن بین ۶ تا ۲۰ گرم بر کیلوگرم می‌باشد. تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) در این خاک‌ها چندان گسترده نیست و بین ۰/۱۲ تا ۲/۱۷ درصد به دست آمد. تغییرات عمودی میزان پذیرفتاری مغناطیسی در پروفیل این خاک‌ها از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند و در طول عمق پروفیل کم‌وزیاد می‌شود. زیرا ناشی از لایه‌های رسوبی منشاء گرفته از مواد مادری مختلف در طول زمان باشد که هرکدام از این لایه‌ها با توجه به منشاء خود (منشاء مواد مادری متفاوت) میزان پذیرفتاری مغناطیسی متفاوتی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه خاک‌های با مواد مادری آبرفتی بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی (از قبیل شهرسازی، صنعتی و کشاورزی) می‌باشند،

افق‌های آن‌ها ۲- تأمین کم کانی‌های مغناطیسی اولیه از سنگ‌های مادری آن‌ها. دی جانگ و همکاران (۱۹۹۹) سرعت تشکیل فری‌مگنتیت‌های خاک‌ساختی را در خاک‌های مرطوب بیشتر دانستند و به‌طور کلی افزایش پذیرفتاری مغناطیسی افق‌های سطحی را به‌خاطر فرآیندهای خاک‌سازی می‌دانند.

توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های آبرفتی

شکل ۴ توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (X) و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (X_{fd}) و غلظت آهن معادل کل در چهار پروفیل حفار شده روی خاک‌های آبرفتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق، تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در این خاک‌ها بسیار بالا بوده و بین $(10^{-8} m^3 kg^{-1})$ ۱۱۸ تا ۵۶۷ متغیر می‌باشد. این تغییرات گسترده شامل غلظت کل آهن نیز می‌شود و



شکل ۴- توزیع عمودی پارامترهای مغناطیسی و غلظت آهن کل در خاک‌های آبرفتی (۱، ۲، ۳، و ۴ پروفیل در موقعیت‌های مختلف خاک‌های آبرفتی است).

پذیرفتاری مغناطیسی در ۳۰ سانتیمتر سطح خاک تقریباً در تمام پروفیل‌های حاصل از مواد مادری آبرفتی ثابت است و چون این پروفیل‌ها در اراضی کشاورزی حفر شده‌اند، می‌توان گفت شخم‌زدن‌های متوالی باعث برهم‌زدن خاک در لایه شخم‌شده و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی تقریباً ثابت شده است. ماجیرا و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که پذیرفتاری مغناطیسی در

بنابراین ذرات فری‌مگناطیس منتشر شده در اثر فعالیت‌های انسانی می‌تواند باعث بالابردن میزان پذیرفتاری مغناطیسی در افق سطحی در این خاک‌ها شود. شخم‌زدن و درهم‌ریختن لایه سطحی خاک، نوع کشت (غرقاب و دیم)، تردد وسایل نقلیه موتوری و به‌طور کلی نوع مدیریت اراضی بر میزان و توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی نقش‌آهن‌داشت. همچنین میزان

به وجود آمده از سنگ‌های رسوبی به علت تشکیل پدوژنز و درجای مواد فرومغناطیس است که تشکیل این مواد در ارتباط با فاکتورهای تشکیل خاک و مواد مادری می‌باشد. آیدین و همکاران (۲۰۰۷) افزایش پذیرفتاری مغناطیسی را به علت نقش سیلیکات‌های بازی مانند بیوتیت و آمفیبول می‌دانند و اهمیت پذیرفتاری مغناطیسی را به فراوانی، طبیعت (مگنتیت در مقابل سیلیکات) و ترکیب شیمیایی (نسبت آهن به منیزیم) نسبت می‌دهند. مولینس (۱۹۷۷) نشان داد که مگمیت به صورت خاک‌سازی، عمدتاً از طریق تکرار چرخه اکسایش و احیا تشکیل می‌شود و این فرآیند به وسیله مواد آلی افزایش می‌یابد و احتمال می‌رود این فرآیند کنترل‌کننده افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در افق سطحی خاک‌هایی با زهکشی خوب باشد. روند تغییرات پروفیلی پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های آبرفتی به طور کامل مشخص نیست. در این خاک‌ها افق سطحی احتمالاً بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در منطقه می‌باشند. در حالیکه افق‌های زیرین تحت تأثیر پروسه‌های خاک‌سازی، مواد مادری واحدهای فیزیوگرافی مجاور، ردیف زمانی و منشأ لایه‌های رسوبی است. سینگر و فاین (۱۹۹۶) گزارش کردند که تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی بر توزیع پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها وابسته به نوع مواد مادری است که ترکیبات مغناطیسی یا غیرمغناطیسی به جامی‌گذار و در مرتبه بعدی اقلیم، زمان و شدت دگرگونی کانی‌ها تعیین‌کننده خواهد بود. اکسیدهای آهن با توسعه پروفیل خاک از هوادیدگی سنگ مادری به ارث می‌رسند. تغییرات عمودی پذیرفتاری مغناطیسی در تمام خاک‌ها (آذرین، رسوبی و آبرفتی) از روند یکسان و مشابهی نسبت به آهن کل تبعیت می‌کند.

پروفیل خاک‌های زراعی تا ۲۰ سانتی‌متر خاک سطحی حالت پایدار داشته و شدت آن زیاد می‌باشند که در طی شخم‌زدن خاک‌های زراعی، کانی‌های فری‌مغناطیس مشتق شده از سنگ‌های مادری به سطح خاک انتقال می‌یابند.

بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی ویژگی‌های مغناطیسی خاک‌ها، بازتابی از تأثیرات متفاوت مینرالوژی آن‌ها است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که سنگ‌شناسی مواد مادری تأثیر آشکاری بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی دارد. مطالعات هانیش و شولگر (۲۰۰۵)؛ هانیش و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان می‌دهد که هم نوع خاک و هم لیتولوژی ماده مادری روی پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها تأثیر می‌گذارد و این دو فاکتور، وابسته به هم هستند و اغلب موارد نمی‌توانند از هم جدا شوند. میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مشتق از مواد مادری آذرین بیشینه ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۲۰۰ تا ۱۴۰۰ می‌باشد که با عمق روند افزایشی دارد. سهم سنگ‌شناسی بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های آذرین خیلی بیشتر است و پذیرفتاری مغناطیسی در این خاک‌ها ارتباط مثبت با شاخص‌های توسعه خاک‌سازی نشان نمی‌دهند. ماهر (۱۹۸۶) گزارش کرد که سنگ‌های آذرین بازی (از قبیل گرانودیوریت، دیوریت و بازالت) غلظت‌های بالای مگنتیت و تیتانومگنتیت (تا بیش از ۱۰ درصد) دارند و خاک‌های مشتق شده از این سنگ‌ها، الگوی پذیرفتاری لیتوژنیکی (افزایش پذیرفتاری با افزایش عمق) را نشان می‌دهند. خاک‌های حاصل از از سنگ‌های رسوبی میزان پذیرفتاری مغناطیسی نسبتاً کمتری دارند ($10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) ۴۲ تا ۱۵۸). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های

منابع مورد استفاده

- Aydin A, Ferre EC and Aslan Z, 2007. The magnetic susceptibility of granitic rocks as a proxy for geochemical composition: example from the saruhan granitoids, NE Turkey. *Tectonophysics* 441: 85-95.
- Dearing JA, Hay KL, Baban SMJ, Huddleston AS, Wellington EMH and Loveland PJ, 1996. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysics Journal International* 127: 728-734.
- Dearing JA, 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*. Second edition. John Wiley and Sons publication. ISBN 0 9523409 0 9.
- De-Jong E, Kozak LM and Rostat HPW, 1999. Effects of parent material and climate on the magnetic susceptibility of Saskatchewan soils. *Journal of the Soil Science* 80: 135-142.
- Fine P, Singer MJ and Southward RJ, 1989. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. *Geoderma* 44: 287-306.
- Hanesch M and Scholger R, 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophysics Journal International* 161: 50-56.
- Hanesch M, Rantitsch G, Hemetsberger S and Scholger R, 2007. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. *Science of the Total Environment* 382: 351-363.
- Hendrickx JMH and Bruse J, 2004. *Magnetic soil properties in Ghana centre for development research (ZEF)*. Bonn University, Germany.
- Lu SG, 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena* 40: 359-373.
- Magiera T, Strzyszc Z, Kapicka A and Petrovsky E, 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in central Europe. *Geoderma* 130: 299-311.
- Maher BA, 1986. Characterization of soil by mineral magnetic measurements. *Physics of the earth and planetary interiors* 42: 76-92.
- Mullins CE, 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – a review. *Journal of the Soil Science* 28: 223-246.
- Nafeh MH and Brussel MK, 1958. *Electricity and Magnetism*. John Wiley & Sons publication. Inc.
- Olayi HR, Adhami E, Jafari S, Rajaei M and Ghasemi Fasaei R, 2009. Distribution of magnetic susceptibility to iron compounds in some selected soils of Fars province. *Journal of Soil and Water Sciences* 23(2): 191-204.
- Oniku SA, Osazuwa IB and Meludum OC, 2008. Preliminary report on magnetic susceptibility measurements on rocks within the Zaria granite batholith, Nigeria. *Geofizika* 25: 203-213.
- Singer MJ and Fine P, 1996. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils. *Soil Science Society American Journal* 53: 1119-1127.
- Sposito G, Lund LJ and Chang AC, 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. *Soil Science Society American Journal* 46: 260-264.
- Stocklin J, Hirayama K, Alavi M, Eftekhari-nezhad J, Haghypour A, Hajian J and Vale N, 1969. Explanatory text of the Zanzan quadrangle map, 1:250000. Geological quadrangle No. D4. Geological Survey of Iran.
- Thompson R and Oldfield F, 1986. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin. Ltd, UK.
- Torabi Golsefeidi H and Karimian Eghbal M, 2002. Study of soil development using magnetic susceptibility at the margin of the Sefidrood River in Guilan. *Soil and Water Sciences* 16 (2): 206-213.