



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۱۵۸-۱۴۱)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.331427.669086>

(مقاله علمی - پژوهشی)

## Soil Evolution Trend of In-situ Soil Developed in a Mountainous Landscape (Case Study: Bandar Village)

MARYAM OSAT<sup>1\*</sup>, AHMAD HEIDARI<sup>2</sup>

1. Soil and Water Research Department, Kordestan Agricultural and Natural Resources and Education Center, Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran
2. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.  
(Received: Sep. 30, 2021- Revised: Jan. 29, 2022- Accepted: Feb. 1, 2022)

### ABSTRACT

Magnetic susceptibility (MS) is one of the indices used in soil development evaluation. The aim of this study was to investigate the efficiency of soil magnetic susceptibility in study of soil evolution in the Bandar mountainous landscape of Mazandaran province. In order to achieve the objectives of this study, soil taxonomic classes and morphological index were determined after field studies and physicochemical analysis of 56 soil profiles. Some chemical and geochemical indices were determined and magnetic susceptibility in low ( $\chi_{lf}$ ) and high ( $\chi_{hf}$ ) frequency were measured by Bartington MS2 dual-frequency sensor on topsoil samples. The correlations between soil magnetic susceptibility and soil taxonomic classes, physicochemical properties, and development indices indicated more efficiency of magnetic susceptibility and morphological index in the representation of soil development in this region. The slope of the study area, as well as the presence of a high amount of carbonates, has caused an inverse relationship between geochemical indices and soil taxonomic classes.

**Keywords:** Geochemical Index, Magnetic Susceptibility, Morphological Index.

## روند تکامل خاک در خاک‌های درجا توسعه یافته در یک زمین‌نمای کوهستان (مطالعه موردی: روستای باندر)

مریم اوساط<sup>۱\*</sup>، احمد حیدری<sup>۲</sup>

۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲)

### چکیده

پذیرفتاری مغناطیسی ( $MS^1$ ) یکی از شاخص‌هایی است که در سنجش تکامل خاک‌رخ مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهش حاضر با هدف کارایی پذیرفتاری مغناطیسی در بررسی وضعیت تکامل خاک در یک زمین‌نمای کوهستانی در منطقه باندر استان مازندران مورد بررسی قرار گرفت. جهت نیل به اهداف مورد بررسی ۵۶ خاک‌رخ حفر شد و پس از انجام مطالعات صحرایی و آنالیزهای فیزیکوشیمیایی، کلاس‌های رده‌بندی خاک و شاخص تکامل مورفولوژیک تعیین گردید. برخی از شاخص‌های تکامل شیمیایی و ژئوشیمیایی و همچنین پذیرفتاری مغناطیسی در دو فرکانس پایین ( $\chi_{lf}$ ) و بالا ( $\chi_{hf}$ ) توسط دستگاه Bartington MS2 dual frequency sensor بر روی نمونه‌های سطحی اندازه‌گیری شدند. همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و کلاس‌های رده‌بندی خاک، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های تکامل، نشان‌دهنده کارایی بیشتر پذیرفتاری مغناطیسی و شاخص تکامل مورفولوژیک در نشان دادن وضعیت تکامل خاک‌های منطقه می‌باشد. شیب‌دار بودن منطقه و همچنین حضور مقادیر بالای کربنات‌ها در منطقه باعث به‌وجود آمدن روابط معکوس بین شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی و کلاس‌های رده‌بندی خاک شده است.

واژه‌های کلیدی: پذیرفتاری مغناطیسی، شاخص ژئوشیمیایی، شاخص مورفولوژیک.

### مقدمه

از آنجایی که خاک یک عامل مهم در تولید محصولات کشاورزی و یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی به شمار می‌رود، بررسی روند و میزان تکامل خاک همواره به‌عنوان یکی از مطالعات پایه و بنیادین مطرح بوده است. پذیرفتاری مغناطیسی یکی از شاخص‌های مورد استفاده در بررسی تکامل خاک (Hälberg *et al.*, 2020)، تعیین سن نسبی مواد مادری، تغییرات اقلیمی (Torrent *et al.*, 2010)، آلودگی خاک (Dankoub *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2016) و همچنین نقشه‌برداری خاک می‌باشد (Ramos *et al.*, 2016). این ویژگی که متأثر از مقدار و نوع اکسیدهای آهن (موروثی یا خاک ساخت) می‌باشد، نشان‌دهنده نحوه تأثیر برخی از فاکتورهای خاک‌سازی (Hu *et al.*, 2020) بوده و بنابراین

میتواند در درک بسیاری از فرآیندهای خاک‌سازی مفید و مؤثر باشد (Torabi & Eghbal, 2003; Sarmast *et al.*, 2017). Magiera *et al.* (2019) نشان داده‌اند که پذیرفتاری مغناطیسی خاک اراضی جنگلی مطالعه شده علاوه بر مواد مادری، تحت تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی نیز قرار دارد. (Blundell *et al.*, 2009) نیز با مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های سطحی انگلیس نشان داده‌اند که ۴۶-۳۶ درصد از تغییرات این ویژگی، تحت تأثیر فاکتورهای خاک ساز به‌ویژه مواد مادری و وضعیت زهکشی قرار دارد. باین‌حال، همواره نظرات ضدونقیضی در زمینه کارایی این شاخص به‌منظور مطالعه تکامل خاک‌ها وجود داشته است (Hälberg *et al.*, 2020). برخی محققان استفاده از این تکنیک را در فهم فرآیندهای خاک‌سازی غیرمفید می‌دانند (Mullins, 1977; Singer & Fine, 1989). در مناطقی که نرخ هوادیدگی و خاک‌سازی پایینی دارند، فرآیندهای خاک‌سازی کنترل‌گرهای عمده بر روی پذیرفتاری مغناطیسی نبوده و سنگ شناسی و نوع مواد مادری نقش عمده را در این زمینه ایفا می‌کنند (César de Mello *et al.*, 2020; Hälberg *et al.*, 2020). در خاک‌های تکامل

\* نویسنده مسئول: Maryam.ousat@gmail.com

مغناطیسی مواد مادری (Blume and Schwertmann, 1969) و زهکشی بوده و در درجه دوم اهمیت اقلیم (متوسط بارندگی سالیانه)، پستی و بلندی (شیب و ارتفاع) و موجودات زنده (کاربری اراضی، کربن آلی و پی‌اچ) قرار دارند (et al., 2009 Blundell). به‌عنوان مثال رابطه مثبت و معنی‌داری بین میانگین بارندگی سالانه و پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها وجود دارد (Oliaei et al., 2009). حداکثر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی معمولاً در افق‌های سطحی مشاهده می‌شود. اکسیدهای آهن ثانویه و هیدروکسیدهای تشکیل‌یافته در طول فرآیندهای خاکسازي و تکامل خاک، نقش مهمی در مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک-های سطحی دارد (Moradinasab et al., 2020). تناوب چرخه-های اکسیداسیون و احیا (De Jong et al., 1999)، آبشویی کربنات‌ها و گچ، مقادیر بیشتر مواد آلی (Torrent et al., 2010) و ریز موجودات هتروتروف (Fine et al., 1989) از مهم‌ترین عوامل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های سطحی نسبت به خاک-های تحت‌الارضی می‌باشند.

در مناطق کوهستانی، پستی و بلندی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تغییر و تحول خاک‌ها به شمار می‌رود. این ویژگی با تأثیر بر چگونگی تابش خورشید، بارش، باد، ایجاد خرد اقلیم‌ها و توزیع ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (مانند درصد رس، مواد آلی، واکنش خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم، کانی‌شناسی، عناصر غذایی و ...) بر تغییر و تکامل خاک‌ها تأثیر می‌گذارد (Schaeztl and Anderson, 2005). در مناطق کوهستانی، فرسایش فرآورده‌های هواپدیدی شیب‌ها را برداشت و در اراضی مسطح پایین‌دست به جا می‌گذارد (Enjavinejad et al., 2017). از اثرات موقعیت ژئومورفیک بر خصوصیات خاک می‌توان به بالا بودن مقادیر رس، پتاسیم قابل تبادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی در اراضی پایین‌دست نسبت به اراضی بالادست اشاره نمود. با توجه به ارتباط تنگاتنگ میان پستی و بلندی و انتقال ذرات خاک و زهکشی، انتظار می‌رود که موقعیت توپوگرافی بر روی میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک تأثیر داشته باشد. بر اساس نتایج Ayoubi and Moazzeni (2020) در اراضی کوهستانی زاگرس مرکزی، کمترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی در اراضی کشاورزی و در رأس و شانه شیب و بیشترین مقادیر آن در جنگل‌ها و در موقعیت پای شیب اندازه‌گیری شده است. میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک معمولاً در پایین شیب به دلیل تحول در ماده مادری و تغییرات

یافته‌تر، خاکسازي باعث افزایش پذیرفتاری مغناطیسی می‌گردد و این در حالی است که فرآیندهایی مثل فرالیتی شدن<sup>۱</sup> و argilluviation اثر کاهشی بر روی این ویژگی دارند (César de Mello et al., 2020). نتایج مطالعات Ayoubi and Adman (2019) بر روی خاک‌های شمال غرب ایران نشان داده است که فرآیندهای خاکسازي به‌طور معنی‌داری پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تکامل یافته بر روی سنگ‌های رسوبی را در نتیجه تشکیل کانی‌های فریمگنتیک افزایش داده است. این در حالی است که در خاک‌های تکامل یافته بر روی سنگ‌های آذرین روند معکوسی مشاهده شده است. به‌طوری که در این خاک‌ها فرآیندهای خاکسازي به دلیل اثر رقت کانی‌های دیامگنتیک مانند هالیت، کلسیت، فیلوسیلیکات‌ها و مواد آلی باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی گردیده است.

پذیرفتاری مغناطیسی یک ماده، بر اساس میزان تأثیرگذاری آن بر یک میدان مغناطیسی معین، تعیین می‌شود (Rochette et al., 1992). مقدار این تأثیر تابع میزان و نوع کانی-های دارای خاصیت مغناطیسی موجود در نمونه است (Abbaszadeh Afshar et al., 2010). مغناطیس‌پذیری در اجسام به ترتیب از فرومگنتیسم<sup>۲</sup> (مانند آهن خالص)، فری‌مگنتیسم<sup>۳</sup> (مانند مگنتیت و مگهمیت)، کنتادانتی فرومگنتیسم<sup>۴</sup> (مانند هماتیت و گوتیت)، پارامگنتیسم<sup>۵</sup> (مانند لپیدوکروسیت) و دیامگنتیسم<sup>۶</sup> (مانند کوارتز، آهک، گچ و مواد آلی) کاهش می‌یابد (Dearing, 1999).

منبع اصلی پذیرفتاری مغناطیسی در اغلب خاک‌ها کانی-های فری‌مگنتیسم مانند مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) و مگهمیت ( $Fe_2O_3$ ) می‌باشند (Jordanova, 2016). مگنتیت به‌صورت کانی اولیه در سنگ‌ها و بخش‌شن و سیلت خاک‌ها و یا به‌صورت کانی‌های خاک ساخت در بخش رس خاک‌ها (Silva Filho et al., 2019; Han et al., 2020) وجود دارد. این در حالی است که مگهمیت بیشتر منشأ خاک‌ساختی داشته و در بخش رس خاک‌ها یافت می‌شود (Costa et al., 2019; Silva Filho et al., 2019). بخشی از مواد فری‌مگنتیسم در خاک، از مواد مادری به ارث می‌رسد (Mullins, 1977). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها اساساً به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری‌مگنتیک می‌باشد (Torrent et al., 2010) که به میزان زیادی به عوامل خاک ساز از جمله ماده مادری، آب‌وهوا، پستی و بلندی و پوشش گیاهی بستگی دارد.

مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر روی پذیرفتاری

4. Countedantiferromagnetism  
5. Paramagnetism  
6. Diamagnetism

1. ferralitization  
2. Ferromagnetism  
3. Ferrimagnetism

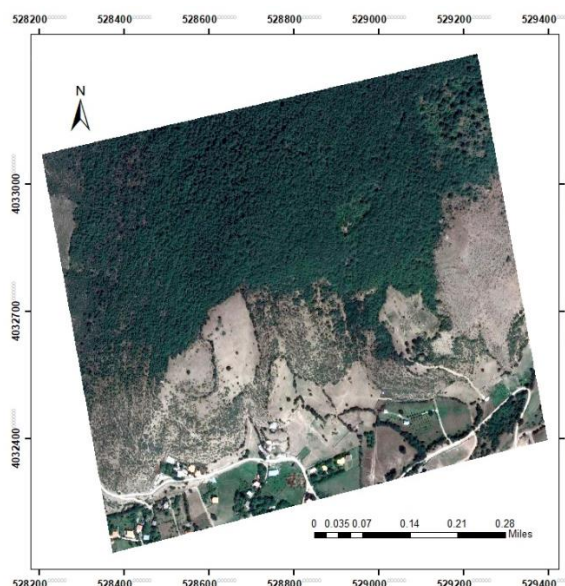
زمینه، چگونگی تغییرات این ویژگی با تغییر فاکتورهای خاکسازی و افزایش میزان تکامل خاکها در مناطق کوهستانی و کارایی واقعی آنها در نشان دادن میزان تکامل خاکها به درستی مشخص نیست. اراضی روستای باندر دارای تنوع زیادی در اشکال توپوگرافی است که این امر باعث شده شرایط متفاوتی از نظر پوشش گیاهی، وضعیت آب خاک و کاربری اراضی پدید آید و به همین دلیل دارای خاکهایی با درجات مختلف تکامل می باشد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی کارایی استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در شناسایی میزان تکامل خاکهای مناطق کوهستانی می باشد.

## مواد و روشها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به مساحت ۱۰۰ هکتار در روستای باندر از توابع بخش کلاردشت شهرستان چالوس در استان مازندران و در محدوده  $26^{\circ} 21' 17''$  تا  $26^{\circ} 40' 51''$  عرض شمالی و  $51^{\circ} 18' 52''/86$  تا  $51^{\circ} 19' 40''/97$  طول شرقی واقع شده است. روستای باندر قسمتی از منطقه حفاظت شده البرز میانی بوده و از پوشش گیاهی و جانوری متنوعی برخوردار است. شکل ۱ نمایی از منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

بخش ریز خاک نسبت به اراضی بالادست افزایش می یابد (De Jong *et al.*, 1998; Ding *et al.*, 2020) این در حالی است که روند معکوسی در مطالعات Quijano *et al.* (2011) گزارش شده است. (Moradinadab *et al.* (2020) با مطالعه تأثیر موقعیت های مختلف شیب بر برخی از شاخص های تکامل خاک نشان دادند که پذیرفتاری مغناطیسی خاکها متأثر از موقعیت شیب و محتوای مواد آلی و کربنات کلسیم آنها قرار دارد. در مطالعه تغییرات مکانی پذیرفتاری مغناطیسی انجام شده توسط Siqueira *et al.* (2015) ارتباط معنی داری میان برخی متغیرها از جمله میزان رس، رنگ خاک و شاخص پوشش گیاهی با پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای مختلف ژئومورفیک گزارش شده است. Hosseini *et al.* (2015) از شاخص های اشکال و نسبت های آهن، پذیرفتاری مغناطیسی، شاخص های رنگ و شاخص هاردن در بررسی میزان تکامل خاک در برش طولی کرمان - بافت به عنوان یک ردیف پستی و بلندی اقلیمی استفاده کرده اند. در این مطالعه اشکال و نسبت های آهن روند تکاملی خاکها را به خوبی نشان داده است. این در حالی است که به دلیل تأثیر زیاد مواد مادری بر روی پذیرفتاری مغناطیسی خاکهای منطقه، این شاخص ارتباط معنی داری با درجه تکامل خاکها نشان نداده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، انتظار می رود که میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک با افزایش میزان تکامل خاکها افزایش یابد. با این حال، با وجود مطالعات صورت گرفته در این



شکل ۱- نمایی از منطقه مورد مطالعه

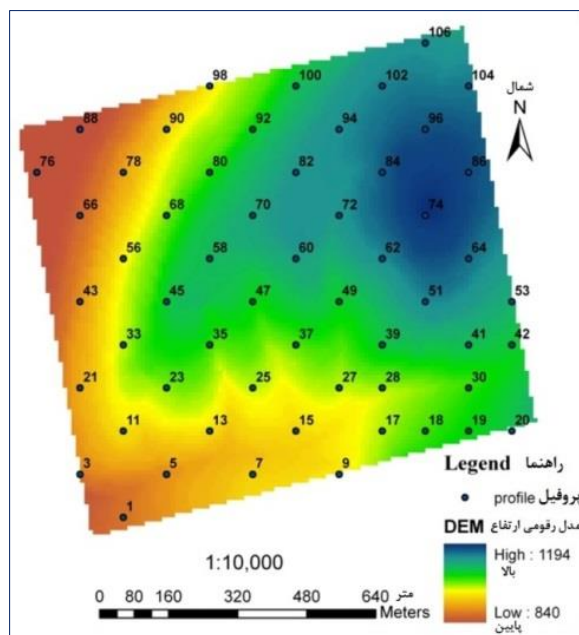
رینه لاهیجان، زردگل، سیابیشه، منجیل، آق قلا و مراوه تپه به دلیل فواصل نزدیک تر و ارتفاعات قابل مقایسه تر انتخاب شدند. روابط همبستگی بین ارتفاع و دما و همچنین ارتفاع و بارش در ماه های مختلف با استفاده از داده های ایستگاه های انتخاب شده

به دلیل عدم وجود ایستگاه هواشناسی در منطقه مورد مطالعه از داده های دما و بارندگی برخی از ایستگاه های هواشناسی استان های مازندران، گیلان و گلستان استفاده شد. از بین ۳۲ ایستگاه موجود در استان های ذکر شده، شش ایستگاه

سنگ و سنگ‌های آتشفشانی تفکیک نشده کرتاسه بالایی به خود اختصاص می‌دهد. همچنین سنگ آهک گلوبوترونکانا و سنگ آهک مارنی در قسمت‌های حاشیه‌ای منطقه و سنگ آهک دولومیتی در قسمت‌های مرکزی منطقه دیده می‌شود (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

نمونه‌برداری از ۵۶ خاک رخ و ۵۰ مته به صورت شبکه‌ای نسبتاً منظم با فواصل ۱۰۰ متر انجام شد. شکل ۲ پراکنندگی خاک رخ‌های حفر شده بر روی مدل رقومی ارتفاع منطقه را نشان می‌دهد. تشریح خاکرخ‌ها بر اساس روش استاندارد (USDA-NRCS, 2012) و طبقه‌بندی خاک‌ها مطابق با سیستم جامع رده‌بندی امریکایی (Soil Survey Staff, 2014) صورت گرفت.

تعیین گردید. با استفاده از این روابط و با در نظر گرفتن ارتفاع متوسط ۹۲۰ متر برای منطقه، اطلاعات دما و بارش در ماه‌های مختلف محاسبه شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار نیوهال<sup>۱</sup> رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه مورد مطالعه به ترتیب زیریک و ترمیک برآورد گردید. میانگین دمای سالیانه منطقه در یک دوره آماری سیزده ساله، ۱۵/۷ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالانه آن ۳۶۰/۷ میلی‌متر می‌باشد. تأثیر جهت شیب در منطقه باعث به وجود آمدن تغییرات مشخص در خرد اقلیم‌ها و پوشش گیاهی گردیده و بنابراین خاک‌های متنوعی در این وسعت کم به چشم می‌خورد. منطقه مورد مطالعه به دلیل ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر نسبت به اراضی پست مجاور و شیب‌های تند (بیش از ۲۵ درصد) در زمین‌نمای کوهستان قرار گرفته است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سطح وسیعی از منطقه را توف‌ها، سیلت



شکل ۲- خاک رخ‌های حفر شده بر روی مدل رقومی ارتفاع

نیز به روش استاندارد در عصاره اشباع خاک‌ها اندازه‌گیری شدند (Sparks et al., 1996). آهن آمورف (Feo) با عصاره‌گیری با استفاده از اکسالات آمونیوم با پی اچ ۳ در تاریکی و آهن دی-تیوناتی با عصاره‌گیری توسط سیترات - بی‌کربنات - دی‌تیونات سدیم (CBD) استخراج گردید. تفاضل این دو مقدار به‌عنوان آهن متبلور خاک در نظر گرفته می‌شود (Sarmast et al., 2017).

#### پذیرفتاری مغناطیسی

از آنجایی که حداکثر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک معمولاً در

#### ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

به منظور انجام مطالعات فیزیکی و شیمیایی، نمونه‌های برداشت شده پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. آزمایش‌های لازم از جمله درصد رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Kunze and Dixon, 1986)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، کربن آلی به روش والکلی - بلاک (Walkey and Black, 1934) و کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (Burt, 2004) انجام گردیدند. اسیدیته، قابلیت هدایت الکتریکی، کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول

می‌شوند. به‌منظور به‌دست‌آوردن شاخص افق، حاصل جمع ویژگی‌های نرمال شده، به تعداد ویژگی‌ها تقسیم می‌شود. در نهایت شاخص هر افق در ضخامت افق مربوطه ضرب شده و مقادیر به‌دست‌آمده برای افق‌های مختلف با هم جمع و شاخص تکامل خاک رخ تعیین می‌گردد.

#### شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی

اندازه‌گیری شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی با استفاده از درصد فرم عنصری و اکسیدی عناصر مختلف صورت گرفت (Price & Velbel., 2003). آنالیز عناصر اصلی و کمیاب در این مطالعه به روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) صورت گرفت. اساس این روش، برانگیختن نمونه توسط اشعه ایکس می‌باشد. اندازه‌گیری طول موج و شدت امواج فلورسانس ساطع شده از اتم‌های مختلف، منجر به شناسایی نوع و میزان عناصر موجود در نمونه می‌گردد. نمونه‌های آماده شده به‌صورت قرص در دستگاه XRF (مدل SPECTRO XEPOS) قرار گرفت و درصد عناصر تعیین گردید. به‌منظور برآورد شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی، از فرمول محاسباتی هر شاخص که در جدول ۱ به آن‌ها اشاره گردیده استفاده شد. در این شاخص‌ها به‌منظور محاسبه  $CaO^*$ ، کلسیم کربناته از کلسیم کل کسر گردید.

#### پارامترهای توپوگرافی

برای استخراج پارامترهای توپوگرافی منطقه از مدل رقومی ارتفاع با درجه وضوح ۱۰ متر استفاده شد. مدل رقومی ارتفاع از نظر وجود فرورفتگی<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفت و فرورفتگی‌های موجود در آن شناسایی و حذف گردید. در این مطالعه پارامترهای ارتفاع<sup>۵</sup> از سطح دریا، درجه شیب، جهت شیب<sup>۶</sup>، انحنای سطح<sup>۷</sup>، انحنای پروفیلی<sup>۸</sup>، شاخص خیسیدگی<sup>۹</sup> و فاکتور  $LS^{10}$  استخراج و مورد بررسی قرار گرفت. از بین این پارامترها، انحنای سطح، انحنای پروفیلی، شاخص خیسیدگی و فاکتور  $LS$  با استفاده از نرم‌افزار SAGA و بقیه پارامترها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS به دست آمد.

#### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و SAS صورت گرفت.

افق‌های سطحی مشاهده می‌شود و باتوجه‌به هدف مطالعه، اندازه-گیری‌ها صرفاً بر روی افق سطحی صورت گرفته است. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های آماده شده در دو فرکانس  $1\text{ (}460\text{ هرتز)}$  و  $2\text{ (}4600\text{ هرتز)}$  توسط دستگاه Bartington MS2 dual frequency sensor اندازه‌گیری گردید (Dearing *et al.*, 1999). به‌منظور انجام این آزمایش، از نمونه‌های خاک عبور کرده از الک ۱۶۰ مش و خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. نمونه خاک‌های پودر شده درون ظروف پلاستیکی کوچک مخصوصی با قطر ۲/۲ و ارتفاع حدود ۲ سانتی‌متر متراکم و توزین گردیدند قرائت‌های شاهد بر روی ظروف خالی در ابتدا و انتهای قرائت نمونه‌های خاک، جهت تصحیح اثرات احتمالی ظرف بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی انجام گرفت.

به‌منظور حذف اثر رقت ترکیبات دیامگنتیک (کربنات‌ها، گچ و مواد آلی) بر روی پذیرفتاری مغناطیسی از پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک استفاده می‌گردد:

$$\chi^{lf}(\text{minero}) = \chi^{lf}(\text{oven dry}) \frac{100}{(100 - (\% \text{Carbonates} + \% \text{Gypsum} + \% \text{OM}))}$$

همچنین درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\chi_{fd}(\%) = \frac{(\chi_{lf} - \chi_{hf})}{\chi_{lf}} \times 100$$

در این رابطه،  $\chi_{fd}$  پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس،  $\chi_{lf}$  پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و  $\chi_{hf}$  پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا می‌باشد.

#### شاخص‌های تکامل خاک

##### شاخص‌های تکامل مورفولوژیکی

مورفولوژی یک خاک می‌تواند نشان‌دهنده مجموعه تغییرات انجام شده بر روی مواد مادری باشد. در این مطالعه از شاخص تکامل پروفیلی<sup>۳</sup> هاردن به‌منظور کمی کردن درجه تکامل خاک‌ها بر اساس خصوصیات مورفولوژیکی استفاده گردید (Harden, 1982). در این شاخص از هشت ویژگی پوسته‌های رسی، بافت به همراه پایداری خیس، روبیفیکیشن (هیو و کرومای رنگ)، ساختمان، پایداری خشک، پایداری مرطوب، ولیوی رنگ و پی‌اچ استفاده می‌گردد. هشت ویژگی نام‌برده شده به داده‌های عددی تبدیل می‌شوند. برای تبدیل ویژگی‌ها به داده‌های عددی، به میزان هر واحد تغییر یک ویژگی معین خاک نسبت به حالت اولیه آن در مواد مادری، ۱۰ امتیاز تعلق گرفته و داده‌ها در مقیاس ۰ تا ۱ نرمال

6- Aspect

7- Plan curvature

8- Profile curvature

9- Wetness index

10- Length-Slope

1 . Low Frequency

2 . High Frequency

3 . Profile development index (PDI)

4- Sink

5- Height

جدول ۱- شاخص‌های هوادیدگی شیمیایی

شاخص هوادیدگی	فرمول	منبع
Sa	$\frac{SiO_2/Al_2O_3}{(Al_2O_3 + K_2O)}$	Ruxton, 1968
V	$\frac{(MgO + CaO + Na_2O)}{(CaO + MgO)/Al_2O_3}$	Vogt, 1927
ba2	$\frac{(K_2O + Na_2O + CaO)/Al_2O_3}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$	Rocha Filho <i>et al.</i> , 1985
Ba	$\frac{(K_2O + Na_2O + CaO)/Al_2O_3}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$	Rocha Filho <i>et al.</i> , 1985
FENG	$\frac{(P_2O_5 + MgO + Na_2O + K_2O)}{(P_2O_5 + MgO + Na_2O + K_2O)} \times 100$	Feng, 1997
WIP	$\left[ \left( \frac{2Na_2O}{0.35} \right) + \left( \frac{MgO}{0.9} \right) + \left( \frac{2K_2O}{0.25} \right) + \left( \frac{CaO}{0.7} \right) \right] \times 100$	Parker, 1970
WR	$\frac{(CaO + MgO + Na_2O)/TiO_2}{Al_2O_3}$	Chittleborough, 1991
CIA	$\frac{(Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)}{(Al_2O_3 - K_2O)} \times 100$	Nesbitt and Young, 1982
PIA	$\frac{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)} \times 100$	Fedo <i>et al.</i> , 1995
CTR	$\frac{CaO}{TiO_2}$	Bétard, 2012

## نتایج و بحث

### طبقه‌بندی خاک‌های منطقه

خاک‌رخ‌های حفر شده در یکی از چهار رده انتی‌سول، اینسپتی-سول، مالی‌سول و آلفی‌سول طبقه‌بندی شدند. از بین خاک‌رخ‌های حفر شده ۱۲ خاک رخ در رده انتی‌سول، پنج خاک رخ در رده آلفی‌سول، ۲۲ خاک رخ در رده اینسپتی‌سول و ۱۸ خاک رخ در رده مالی‌سول قرار گرفتند. چهار تحت رده (Xerolls, Orthents, Xerolls و Xerepts)، هفت گروه بزرگ، ۱۴ زیرگروه و ۲۶ فامیل در منطقه مورد مطالعه شناسایی گردید. تحت رده‌ها بر اساس میزان تکامل از ۱ تا ۱۴ کد گذاری شده‌اند (جدول ۲). به‌عنوان مثال کدهای عددی ۱ و ۱۴ به ترتیب به خاک‌هایی با کمترین (Lithic Xerorthents) و بیشترین (Typic Argixerolls) میزان تکامل اختصاص داده شد. باتوجه به مطالعات Brady and Weil (1999) و Gabler *et al.* (2006)، درجه تکامل خاک‌های آلفی‌سول و مالی‌سول بسیار نزدیک به هم می‌باشد. از بین ۵۶ پروفیل مطالعه شده تنها پنج خاک رخ در رده آلفی‌سول قرار گرفته است. از طرف دیگر برخی از مالی‌سول‌های منطقه دارای شواهد تجمع رس می‌باشند که نشان‌دهنده حالت انتقالی آنها است؛ بنابراین، این خاک‌ها متکامل‌تر در نظر گرفته شده و ارزش عددی بالاتری به آنها تعلق گرفته است.

جدول ۲۲- کدهای عددی زیر گروه‌های خاک

کد	زیر گروه	خاک رخ
۱	Lithic Xerorthents	۵۱-۴۳-۴۱-۳۳-۲۳-۲۱-۱۳-۱۱-۳
۲	Lithic Haploxerepts	۹۶-۷۰-۵۸-۳۷
۳	Typic Haploxerepts	۹۲-۸۴-۷۸-۷۲-۶۸-۵۶-۴۷-۴۵-۲۵

### شاخص تکامل مورفولوژیک

از هشت ویژگی برای محاسبه شاخص تکامل مورفولوژیک استفاده شده است که مقادیر عددی نرمال شده آنها برای خاک‌رخ‌های شماره ۳ و ۷ به‌عنوان نمونه در جدول ۳ آورده شده است. به‌طور کلی با افزایش ضخامت خاک رخ خاک، تیره شدن رنگ خاک در نتیجه افزایش مواد آلی، بهبود ساختمان، افزایش درصد رس و تشکیل افق‌های تجمع رس و کربنات‌ها، مقدار شاخص تکامل مورفولوژیک افزایش می‌یابد. از بین خاک‌رخ‌های بررسی شده، خاک رخ شماره ۷ با ۱۵۰ سانتی‌متر ضخامت، به دلیل داشتن افق سطحی تیره‌رنگ، ساختمان مناسب و وجود افق‌های تجمع رس و کربنات، با ۳/۶۹ بالاترین مقدار عددی شاخص تکامل مورفولوژیک را به خود اختصاص داده است. از طرف دیگر، حداقل مقدار عددی این شاخص (۰/۲۹) به دلیل شیب زیاد، ضخامت کم و عدم حضور پوشش گیاهی به خاک رخ شماره ۳ تعلق دارد. ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌رخ‌های منتخب در جدول ۴ و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر عددی نرمال شده ویژگی‌های مختلف و شاخص‌های تکامل در افق‌ها و خاک‌های منتخب

شاخص پروفیل	افق	زئوشیمی	ملازیمین	پوسته رسی	پایداری خشک	پایداری مرطوب	بافت	ساختار	کربنات‌ها	شاخص افق	شاخص پروفیل
۳/۶۹	A	۰/۳۵	۰/۵۳	۰	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۱۱	۰	۰/۲۹	۳
	Ap	۰/۳۷	۰/۸۳	۰	۰/۸۳	۰/۶۷	۰/۸۶	۰/۷۱	۰	۰/۵۳	۷
	A	۰/۳۷	۰/۸۳	۰	۱	۰/۶۷	۰/۸۶	۰/۸۶	۰	۰/۵۷	
	Bw	۰/۳۷	۰/۸۳	۰	۱	۰/۶۷	۰/۹۰	۰/۷۱	۰	۰/۵۶	
	Bk1	۰/۴۰	۰/۷۸	۰	۱	۰/۶۷	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۵	۰/۶۵	
	Btk1	۰/۴۰	۰/۷۸	۰/۳۶	۱	۰/۶۷	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۶	۰/۷۰	
	Btk2	۰/۴۰	۰/۷۸	۰/۳۶	۱	۰/۵۰	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۶	۰/۶۷	

جدول ۴- ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌های منتخب به همراه طبقه‌بندی آن‌ها تا سطح فامیل

افق	عمق cm	رنگ		ساختار	حفرات	ریشه	مقاومت		چسبندگی	شکل پدیری	پوشش
		خشک	مرطوب				خشک	مرطوب			
Loamy, mixed, subactive, calcareous, thermic Lithic Xerorthents : P-3											
ev	sp	ss	fr	sh	2vf	2vf/f	1 f gr+m	10YR4/3	10YR5/3	۰-۱۸	A
Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Calcixerolls : P-7											
ev	vp	vs	fi	vh	3f	3vf/f	2 m sbk	10YR3/3	10YR4/3	۰-۱۰	Ap
ev	vp	vs	fi	eh	3f+2m	3vf/f	3 m sbk	10YR3/3	10YR4/3	۱۰-۲۵	A
ev	vp	vs	fi	eh	3m	3vf/f	2cabk+sbk	10YR3/3	10YR4/3	۲۵-۵۵	Bw
ev	vp	vs	fi	eh	3c	2f	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	۵۵-۹۰	Bk1
ev	vp	vs	fi	eh	1m	2f	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	۹۰-۱۲۰	Btk
ev	vp	vs	fr	eh	...	...	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	۱۲۰-۱۵۰	Btk

جدول ۵- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منتخب به همراه طبقه‌بندی آن‌ها تا سطح فامیل

افق	BD g/cm <sup>3</sup>	EC ds/m	pH	SAR	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Texture	Gravel	SP	CaCO <sub>3</sub>	OC	OM	Clay	Silt	Sand	
																					%
Loamy, mixed, subactive, calcareous, thermic Lithic Xerorthents : P-3																					
۱/۶۱	۰/۹۷	۸/۱۷	۰/۲۲	۰	۷/۵	۳/۶	۹/۳	۲/۱	۰/۱۲	۰/۵۲	L	۱۲/۸	۴۴/۵	۵/۴	۲/۱۲	۳/۶۶	۲۶/۶	۲۹	۴۴/۳	A	
Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Calcixerolls : P-7																					
۱/۶۰	۰/۷۷	۸/۳۹	۰/۴۶	۰/۶	۶/۴	۱/۲	۶/۹	۱/۸	۰/۳۷	۰/۹۶	C	...	۶۵/۲	۵/۷	۳/۲۶	۵/۶۱	۴۷/۶	۳۸	۱۴/۳	Ap	
۱/۴۳	۱/۰۷	۸/۱۴	۰/۲۸	۰/۶	۱۱	۱/۳	۹/۹	۲/۱	۰/۶	۰/۶۹	C	۱/۵	۷۵/۳	۶/۱	۴/۴۴	۷/۶۵	۴۹/۶	۳۸	۱۴/۳	A	
۱/۷۱	۱/۱۵	۷/۷۷	۰/۳۴	۰	۱۱/۸	۱/۲	۱۱	۲/۵	۰/۱۹	۰/۸۹	C	۱	۷۲/۳	۸/۴	۳/۰۱	۵/۱۹	۴۹/۶	۳۸	۱۲/۳	Bw	
۱/۸۲	۰/۷	۸/۰۷	۰/۳۶	۰	۵	۱	۶/۳	۱/۹	۰/۰۹	۰/۷۲	C	۱/۹	۶۴/۶	۱۱/۳	۰/۷۴	۱/۲۸	۵۳/۶	۳۴	۱۲/۳	Bk1	
۱/۸۳	۰/۷۱	۷/۶۹	۰/۴۴	۰	۳/۱	۱/۲	۵/۳	۱/۹	۰/۰۶	۰/۸۳	C	۸	۶۷/۲	۱۲/۴	۰/۳۹	۰/۶۸	۵۳/۶	۳۴	۱۲/۳	Btk1	
۱/۸۵	۰/۵۴	۸/۱۸	۰/۳۴	۰	۳	۱/۲	۴	۱/۸	۰/۰۶	۰/۵۷	C	۲۰/۹	۶۳/۹	۱۵	۰/۳۵	۰/۶	۴۹/۶	۳۲	۱۸/۳	Btk2	

### شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی

جدول ۶ مقادیر عددی شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی را در خاک‌های منتخب (نماینده کلاس‌های فامیل خاک) نشان می‌دهد. در شاخص Sa (نسبت راکستون) آلومینیوم عنصری غیر متحرک در نظر گرفته شده و بنابراین تغییرات این شاخص نشان‌دهنده تخلیه سیلیسیم در طول فرایند هوازدگی است. در نتیجه انتظار می‌رود که با افزایش درجه هوازدگی، مقدار این

شاخص کاهش پیدا کند. مقدار این شاخص از ۲/۲۳ در خاک‌های شماره ۳۳ و ۵۱ تا ۳/۰۵ در خاک رخ شماره ۹ متغیر است. خاک‌های شماره ۳۳ و ۵۱ بر روی شیب‌های بیش از ۴۰ درصد قرار داشته و مواد مادری آن‌ها از نوع توف است. این در حالی است که خاک رخ شماره ۹ بر روی شیب‌های کمتر از ۱۲ درصد و مواد مادری آهکی قرار دارد. اگرچه خاک رخ شماره ۹ از نظر رده‌بندی خاک متکامل‌تر از خاک‌های ۳۳ و ۵۱ است باین حال



( $r=0/71$ ) و در خاک‌های آهکی (Thiry *et al.*, 2014)؛ و در نتیجه هوادیدگی کربنات‌ها در خاک‌های آهکی مقدم است. نسبت‌های بالاتر Sa در خاک‌های آهکی نسبت به خاک‌های غیر آهکی به دلیل غنی شدن نسبی کانی‌های رسی و در نتیجه Al در خاک‌های غیر آهکی به علت هوادیدگی شدیدتر سیلیکات‌ها در این خاک‌ها می‌باشد.

نسبت راکستن روند معکوسی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی مقدار عددی شاخص‌هایی که بر پایه نسبت سیلیسیوم به عناصر غیر متحرک استوار می‌باشند با افزایش درجه تکامل کاهش می‌یابند. چنین روندی بین این شاخص و کلاس‌های رده‌بندی خاک در منطقه مشاهده نگردید. آنالیز جداگانه خاک‌های آهکی و غیر آهکی نشان داد که بین این شاخص و درجه تکامل خاک در خاک‌های آهکی همبستگی مثبت و در خاک‌های غیر آهکی همبستگی منفی وجود دارد. به‌عنوان مثال همبستگی بین شاخص Sa و کلاس‌های رده‌بندی خاک در خاک‌های غیر آهکی ( $-0/31$ )

جدول ۶- مقادیر عددی شاخص‌های تکامل و همبستگی این شاخص‌ها با کلاس‌های رده‌بندی خاک

خاک رخ	Sa	V	Ba	ba2	FENG	WIP	WR	CIA	PIA	CTR
۳	۲/۷۴	۶/۴۹	۰/۳۱	۰/۳۱	۲۶۳	۲۵۸۶	۳/۶۲	۷۶/۳۶	۸۴/۷۱	۰/۸۰
۹	۳/۰۵	۳/۵۱	۰/۴۳	۰/۶۹	۱۶۲/۳	۲۹۸۸	۸/۶۳	۷۰/۱۲	۷۷/۷۳	۱/۸۹
۱۵	۲/۶۴	۴/۶۰	۰/۴۱	۰/۵۳	۱۶۸/۷	۳۸۴۹	۶/۱۸	۷۱/۰۴	۸۱/۸۲	۱/۰۵
۱۸	۳/۰۴	۲/۴۱	۰/۶۱	۰/۹۸	۱۴۳/۱	۲۹۰۰	۱۰/۶۲	۶۲/۱۸	۶۵/۸۵	۳/۴۳
۲۰	۲/۶۵	۱/۲۴	۰/۹۹	۱/۸۲	۱۰۸/۹	۳۴۲۳	۱۲/۲۰	۵۰/۲۲	۵۰/۲۵	۴/۵۸
۲۷	۲/۴۶	۴/۷۰	۰/۳۶	۰/۵۰	۱۸۵/۷	۳۴۸۹	۵/۹۹	۷۳/۴۰	۸۳/۲۸	۰/۹۸
۳۰	۲/۸۷	۲/۴۸	۰/۵۵	۰/۹۶	۱۴۷/۱	۲۸۳۰	۹/۵۵	۶۴/۵۹	۶۸/۷۳	۲/۸۱
۳۳	۲/۲۳	۹/۴۰	۰/۲۴	۰/۲۴	۳۵۱/۸	۲۶۲۵	۲/۸۹	۸۰/۷۰	۹۰/۰۶	۰/۷۱
۳۵	۲/۲۹	۸/۶۹	۰/۳۷	۰/۲۲	۲۷۶/۳	۳۱۹۲	۳/۰۸	۷۹/۰۴	۸۹/۹۵	۰/۲۵
۳۹	۲/۶۵	۲/۳۶	۰/۸۳	۱	۱۵۴/۵	۳۴۹۸	۱۰/۸۶	۵۴/۶۲	۵۶/۲۶	۵/۲۸
۴۳	۲/۶۵	۸/۰۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۲۸۶/۴	۲۵۱۱	۳/۰۵	۷۹/۸۹	۸۹/۷۷	۰/۴۰
۵۱	۲/۲۳	۶/۲۶	۰/۲۹	۰/۴۲	۲۱۶/۸	۳۳۶۹	۴/۵۲	۷۷/۷۶	۹۰/۳۴	۰/۶۱
۵۸	۲/۴۵	۵/۱۵	۰/۴۳	۰/۴۶	۱۹۵/۲	۳۴۶۱	۵/۸۹	۶۹/۸۴	۷۹/۷۴	۱/۵۳
۶۰	۲/۵۲	۶/۶۲	۰/۲۸	۰/۳۵	۲۱۳/۸	۳۳۳۳	۴/۲۵	۷۷/۹۴	۹۰/۵۴	۰/۱۹
۶۶	۲/۵۲	۶/۶۲	۰/۲۸	۰/۳۵	۲۱۳/۸	۳۳۳۳	۴/۲۵	۷۷/۹۴	۹۰/۵۴	۰/۱۹
۶۸	۲/۴۲	۶/۹۳	۰/۳۰	۰/۳۱	۲۴۱/۸	۳۴۴۲	۴/۰۲	۷۶/۸۰	۸۷/۶۵	۰/۵۵
۸۰	۲/۴۲	۵/۴۳	۰/۳۱	۰/۴۳	۲۱۷/۷	۳۰۹۲	۵/۲۳	۷۶/۲۰	۸۷/۹۸	۰/۸۹
۸۲	۲/۵۶	۵/۹۰	۰/۳۱	۰/۳۹	۲۱۲	۳۱۱۲	۴/۲۵	۷۶/۵۹	۸۷/۶۱	۰/۴۶
۸۴	۲/۴۵	۶	۰/۲۸	۰/۴۱	۲۰۴/۹	۳۳۷۲	۴/۵۸	۷۷/۸۵	۹۰/۲۲	۰/۳۷
۸۶	۲/۷۲	۴/۶۰	۰/۳۷	۰/۴۹	۲۶۱/۸	۲۲۰۹	۶/۱۰	۷۳/۱۹	۷۹/۳۶	۲/۱۱
۹۰	۲/۵۱	۵/۸۷	۰/۲۸	۰/۴۰	۲۲۵/۸	۲۹۲۹	۴/۹۵	۷۸/۲۰	۸۸/۴۳	۰/۶۷
۹۴	۲/۶۱	۵/۰۸	۰/۳۵	۰/۴۶	۱۹۹/۳	۳۱۶۳	۴/۷۱	۷۴/۱۰	۸۴/۱۶	۰/۷۶
۹۸	۲/۵۹	۷/۴۹	۰/۲۴	۰/۲۹	۲۳۰/۴	۳۰۹۴	۳/۵۰	۸۰/۵۹	۹۳/۰۵	۰/۰۸
۱۰۶	۲/۶۴	۴/۴۸	۰/۳۴	۰/۵۴	۲۱۹/۲	۲۴۷۲	۶/۴۵	۷۴/۵۸	۸۲/۰۸	۱/۶۸
R	۰/۵۴**	-۰/۷۶**	۰/۶۸**	۰/۷۱**	-۰/۵۸**	-۰/۱۲	۰/۷۹**	-۰/۶۷**	-۰/۷۰**	۰/۶۱**

R: همبستگی بین کلاس‌های رده‌بندی خاک و شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی

شیمیایی بوده و نشان‌دهنده نسبت کانی‌های اولیه به ثانویه می‌باشد (Nesbitt and Young, 1982; Price and Velbel, 2003; Ozaytekin *et al.*, 2012). بنابراین مقدار این شاخص با افزایش میزان هوادیدگی افزایش می‌یابد. مقدار شاخص PIA در خاک‌ها و رسوبات به‌شدت هوادیده شده ۱۰۰ و در سنگ‌های سطحی هوادیده نشده  $\geq 50$  می‌باشد. بنابراین مقدار این شاخص نیز با افزایش درجه هوادیدگی افزایش می‌یابد. شاخص فنگ به‌منظور ارزیابی وضعیت هوادیدگی رسوبات غنی از کربنات‌ها توسط Feng (1997) ارائه گردید. در این شاخص به‌منظور جلوگیری از انحرافات ایجاد شده توسط کربنات‌ها، کلسیم از فرمول شاخص حذف گردیده و به‌جای آن از منیزیم و فسفر استفاده شده است.

در نتیجه تغییر شکل فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی، کاتیون‌های متحرک کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم آزاد می‌گردند. با استفاده از این اصل، پارکر در سال ۱۹۷۰ شاخص خود را ارائه داد. مقدار شاخص پارکر بین ۰ تا  $\leq 100$  تغییر می‌کند، به‌طوری‌که حداقل هوادیدگی با بزرگ‌ترین مقادیر نشان‌داده‌شده و با افزایش هوادیدگی کاهش می‌یابد (Marsan *et al.*, 1988). شاخص شیمیایی دگرسانی CIA یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها در بررسی روند و شدت هوادیدگی می‌باشد. این شاخص بر پایه حذف تدریجی کاتیون‌های محلول (سدیم، پتاسیم و کلسیم) از کانی‌ها، در طول فرایند هوادیدگی

قسمت‌های کم شیب منطقه (۲۵-۸) عناصر متحرک را از اراضی شیب‌دار بالادست دریافت کرده و بنابراین به دلیل فراوانی بیشتر عناصر متحرک، درجات پایین‌تر هواپدیدی را نشان می‌دهند. بنابراین خاک‌های تکامل‌یافته‌تر در قسمت‌های کم شیب و بر روی مواد مادری آهکی قرار داشته که این امر روابط غیرمنتظره بین کلاس‌های رده‌بندی خاک و برخی از شاخص‌های هواپدیدی ژئوشیمیایی را توجیه می‌نماید.

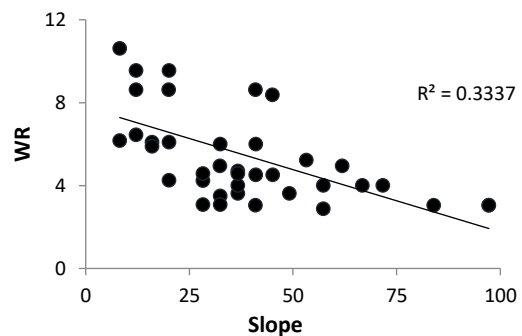
#### پذیرفتاری مغناطیسی

پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین بین ۵۳/۲ در خاک رخ شماره ۳ (انتی‌سول) تا ۱۲۹۷/۲۱ در پروفیل شماره ۲۰ (مالی-سول) متغیر می‌باشد (جدول ۷). با افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین فراوانی کانی‌های فری‌مگنتیک افزایش می‌یابد. به‌طور کلی پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش میزان خاک‌سازی، مواد آلی، متوسط بارندگی و دمای سالانه، زهکشی و پایداری ژئومورفولوژیکی افزایش می‌یابد (Singer and Fine, 1989; Valaee et al., 2016). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده اختلاف نسبتاً ناچیزی ( $\times 10^{-6}$  ۳۸/۸-۱/۵۵) بین پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا و پایین در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. بنابراین عوامل طبیعی (پدوژنی یا لیتوژنی) نقش مؤثری در حضور ترکیبات مغناطیس منطقه دارد. به‌طور کلی پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده بر روی مواد مادری غنی از کانی‌های آهن-دار بیشتر از مواد مادری فقیر از آهن می‌باشد. بنابراین پایین بودن پذیرفتاری مغناطیسی در خاک رخ شماره ۳ مربوط به آهکی بودن ماده مادری و پایین بودن درجه تکامل و میزان رطوبت (درصد بالای شیب) است. با افزایش درصد بالای مواد آلی و رطوبت خاک احتمال احیای آهن افزایش یافته و به دنبال آن اکسیداسیون و تشکیل کانی‌های فری‌مگنتیک صورت می‌گیرد.

پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک در خاک‌های مورد مطالعه بین ۵۸/۵۵-۱۴۰۶/۰۴ تغییر کرده که حداقل و حداکثر مقدار این پارامتر نیز مربوط به خاک‌های شماره ۳ و ۲۰ می‌باشد (جدول ۷). در پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک اثر رقت کربنات‌ها و مواد آلی که جزء ترکیبات دیامگنتیک می‌باشند حذف شده است. Karimi et al. (2011) نشان دادند که تفاوت مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی قبل و بعد از حذف تأثیر مواد دیامگنتیسیم بسیار قابل ملاحظه می‌باشد.

این شاخص در طول تکامل خاک و فرآیندهای هواپدیدی افزایش می‌یابد (Baumann et al., 2014). با توجه به فرمول محاسباتی سایر شاخص‌ها که در جدول ۱ ارائه شده است، انتظار می‌رود مقدار عددی شاخص‌های WR, Ba, ba2 و CTR با افزایش میزان هواپدیدی کاهش و مقدار شاخص V افزایش یابد.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد، بین شاخص‌هایی که در ساختار آن‌ها از کاتیون‌های متحرک قلیایی استفاده شده است (مانند شاخص‌های V, CIA, WR) و کلاس‌های رده‌بندی خاک روند معکوسی وجود دارد. به‌عنوان مثال انتظار می‌رود که با افزایش تکامل خاک مقدار عددی شاخص WR کاهش یابد که در منطقه مطالعاتی مورد نظر این روند افزایشی است. از آنجایی که این شاخص‌ها تنها کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم سیلیکاتی را در نظر می‌گیرند، بنابراین انحراف موجود می‌تواند در نتیجه حضور مقادیر بالای کربنات‌ها در منطقه ایجاد گردد (Baumann et al., 2014). فرآیندهای فرسایش و رسوب نیز می‌توانند از دیگر دلایل این روند به حساب آیند. همچنین همبستگی منفی بین شاخص WR و درجه شیب (شکل ۳) نشان می‌دهد که علی‌رغم تکامل پایین خاک‌های موجود در قسمت‌های پر شیب، مقادیر کمتر کاتیون‌های متحرک در این خاک‌ها در نتیجه آبشویی محصولات هواپدیدی و ورود آن‌ها به خاک‌های موجود در قسمت‌های کم شیب ایجاد گردیده است (Graham and ÓGeen, 2010).



شکل ۳- نمودار پراکنش شاخص تکامل WR در برابر شیب (\*\* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱)

همچنین پراکندگی مالی‌سول‌ها تطابق زیادی با پراکندگی مواد مادری آهکی دارد. از طرف دیگر خاک‌های تشکیل شده در

جدول ۷- پذیرفتاری مغناطیسی افق سطحی خاک‌های منتخب

خاک رخ	HF ( $\times 10^{-6}$ )	LF ( $\times 10^{-6}$ )	$\chi_{fd}$ (%)	$\chi_{lf}$ (minero)( $\times 10^{-6}$ )
۳	۵۱/۶۵	۵۳/۲	۲/۹۱	۵۸/۵۵
۹	۱۲۹/۲۳	۱۳۷/۴۸	۶	۱۵۵/۰۸
۱۵	۱۱۸/۴۳	۱۲۵/۴۷	۵/۶۱	۱۳۳/۲۵
۱۸	۴۱۴/۹	۴۳۸	۵/۲۷	۵۱۶/۵۷

۱۴۰۶/۰۴	۲/۹۹	۱۲۹۷/۲۱	۱۲۵۸/۳۹	۲۰
۶۰/۷۱	۴/۹۶	۵۸/۷۱	۵۵/۸	۲۷
۵۹۷/۴۲	۴/۱۶	۵۲۱/۸۵	۵۰۰/۱۳	۳۰
۸۸/۴۶	۷/۵۸	۸۶/۷۳	۸۰/۱۶	۳۳
۷۵/۸۲	۶/۲۶	۷۲/۷۳	۶۸/۱۸	۳۵
۳۷۸/۱۵	۸/۴۵	۳۱۴/۷۷	۲۸۸/۱۸	۳۹
۱۰۱/۴۸	۶/۷۴	۹۴/۷۷	۸۸/۳۸	۴۳
۶۹/۱۷	۵/۸۵	۶۴/۹۹	۶۱/۱۹	۵۱
۱۱۰/۷۴	۶/۱۷	۹۴/۵۳	۸۸/۷	۵۸
۹۲/۱۵	۳/۹۷	۸۹/۱۵	۸۵/۶۱	۶۰
۱۳۱/۲۷	۴/۷۰	۱۰۵/۹۱	۱۰۰/۹۳	۶۶
۱۳۸/۷۴	۸/۰۴	۱۳۳/۵۹	۱۲۲/۸۵	۶۸
۲۳۸/۶۱	۷/۸۲	۲۲۷/۶۳	۲۰۹/۸۳	۸۰
۱۴۳/۵۱	۷/۵۰	۱۳۳/۴۲	۱۲۳/۴۲	۸۲
۱۴۲/۵۰	۶/۲۹	۱۳۷/۷۴	۱۲۹/۰۸	۸۴
۳۱۰/۱۰	۶/۷۷	۲۷۷/۷۳	۲۵۸/۹۳	۸۶
۱۵۲/۲۱	۷/۱۸	۱۵۳/۵۳	۱۴۲/۵۱	۹۰
۱۸۶/۹۵	۷/۲۹	۱۷۳/۶۴	۱۶۰/۹۸	۹۴
۲۰۰/۷۸	۷/۱۰	۱۹۳/۶۱	۱۷۹/۸۶	۹۸
۱۹۳/۹۰	۶/۷۵	۱۷۵/۹۳	۱۶۴/۰۶	۱۰۶

### پذیرفتاری مغناطیسی و توپوگرافی

توپوگرافی از طریق تأثیر بر روی میزان تکامل خاک و در نتیجه تشعشعات خورشیدی دارد بر روی میزان تکامل خاک و در نتیجه پذیرفتاری مغناطیسی تأثیر می‌گذارد (Feng and Johnson, 1995). تأثیر جهت شیب در منطقه باعث به وجود آمدن تغییرات مشخص در خرد اقلیم‌ها و پوشش گیاهی گردیده و بنابراین خاک‌های متنوعی در این وسعت کم به چشم می‌خورد. بارندگی این منطقه برای تأمین نیاز آبی پوشش جنگلی به خصوص در شیب‌های جنوبی که آفتاب بیش‌تری دریافت می‌کنند، کافی نیست. به همین دلیل است که شیب‌های جنوبی بیشتر حالت مرتعی و بوت‌ه‌زار دارد. در حالی که شیب‌های شمالی معمولاً دارای پوشش جنگلی هستند که بخشی از آب مورد نیاز خود را از طریق مه دریافت می‌کنند.

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس بین ۲/۹۱-۸/۴۵

تغییر کرده که کمترین مقدار مربوط به پروفیل شماره ۳ (انتی-سول) و بیشترین مقدار مربوط به پروفیل شماره ۳۹ (مالی-سول) با پوشش جنگلی می‌باشد (جدول ۵). بالا بودن این مشخصه نشان‌دهنده تشکیل ذرات بسیار ریز مغناطیسی (کوچک‌تر از ۰/۰۳ میکرومتر) است که عمدتاً خاک ساخت می‌باشد. در نمونه‌های حاوی مقادیر نسبتاً زیاد کانی‌های بسیار ریز تفاوت بیشتری بین قرائت‌ها در دو فرکانس مشاهده می‌شود. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس با پیشرفت خاکسازي افزایش می‌یابد و بنابراین پایین بودن این مشخصه مربوط به مناطقی است که تشکیل خاک محدود بوده و ورودی رسوبات بالا است. مطالعات نشان داده‌اند که پیک  $\chi_{fd}$  با افزایش سن افزایش (Fine et al., 1989) و با افزایش عمق، کاهش می‌یابد (Torrent et al., 2010).

جدول ۸- همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و پارامترهای توپوگرافی

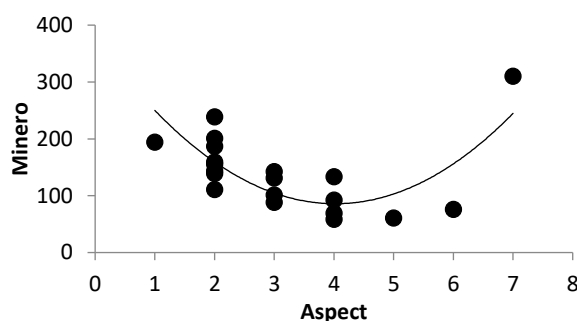
SPI	LS	WI	Prof curv	Plan curv	Aspect	Slope	Height	
۰/۰۸	-۰/۱۸	۰/۳۷	-۰/۰۱	-۰/۰۷	۰/۳۶	-۰/۲۲	۰/۲۰	LF
۰/۰۸	-۰/۱۸	۰/۳۸	-۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۳۵	-۰/۲۳	۰/۱۹	HF
۰/۲۳	۰/۰۰۵	-۰/۳۲	-۰/۳۰	۰/۵۷**	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۳۰	FD
۰/۰۷	-۰/۱۹	۰/۳۷	-۰/۰۱	-۰/۰۶	۰/۳۴	-۰/۲۲	۰/۱۹	minero

و شیب قرار گرفته است، به طوری که بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی در بالادست و کمترین میزان آن در پایین دست شیب مشاهده شده است. افزایش رطوبت علاوه بر افزایش میزان سرعت هواپدگی و آبشویی مواد، موجب آزادسازی بیشتر ترکیبات آهن از ساختار کانی‌ها و افزایش نسبی آن‌ها در نیم‌رخ می‌گردد. به علاوه بیشتر بودن بارندگی موجب افزایش تراکم پوشش گیاهی و

در منطقه مورد مطالعه بین پذیرفتاری مغناطیسی و پارامترهای توپوگرافی همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۸). با این حال جهت شیب با پذیرفتاری مغناطیسی دارای رابطه غیرخطی نسبتاً خوبی است (شکل ۴). با توجه به شکل ۴ بیشترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در شیب‌های شمالی و پایین‌ترین مقادیر آن در شیب‌های جنوبی مشاهده می‌گردد. در مطالعات Quijano et al. (2011) پذیرفتاری مغناطیسی تحت تأثیر ارتفاع

همبستگی معنی‌داری مشاهده نمی‌گردد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس تنها با کلاس رده‌بندی خاک دارای همبستگی مثبت در سطح ۹۹ درصد می‌باشند. سایر پارامترهای پذیرفتاری مغناطیسی با درصد رس و سیلت، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد رطوبت اشباع، کربنات کلسیم معادل، شاخص تکامل مورفولوژیک و کلاس رده‌بندی خاک همبستگی مثبت و با درصد شن و واکنش خاک دارای همبستگی منفی معنی‌دار می‌باشند. تغییرات درصد رطوبت اشباع، کربنات کلسیم معادل و واکنش خاک از طریق افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی، میزان پذیرفتاری مغناطیسی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Ayoubi et al., 2014). بافت خاک سهم قابل توجهی در میزان سیگنال مغناطیسی دارد (Maher, 1986). در منطقه مورد مطالعه بین پارامترهای بافت خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و پذیرفتاری مغناطیسی ارتباط معنی‌داری مشاهده گردید. در خلال فرآیندهای خاکسازي، معمولاً عامل اصلی افزایش پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به بخش رس است (Karimi and Khademi, 2012). از آنجایی که حضور ترکیبات مگنتیت در رس و سیلت بیشتر از شن می‌باشد این همبستگی با شن منفی بوده (César de Mello et al., 2020) و با رس، سیلت و ظرفیت تبادل کاتیونی مثبت می‌باشد. ذرات سیلت و رس به دلیل داشتن اندازه کوچک‌تر و سطح ویژه بالاتر، قدرت جذب بیشتری در حفظ عناصر و در نتیجه مغناطیس پذیری خاک می‌گردد. نتایج مشابهی در مطالعات (Marjovvi, Hanesch and Scholger (2005) و Barbosa et al. (2021) و et al. (2017) مشاهده شده است. مطالعات (Ayoubi et al. (2012) نشان داده است که  $Fe_d$  به همراه سایر ویژگی‌های خاک از جمله مقدار سیلت و رس خاک، ۸۸٪ از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های آهکی غرب ایران را توجیه می‌کند.

از دید فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تشکیل بیشتر کانی‌های فری-مگنتیک و در مجموع افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها می‌گردد (Oliaei et al., 2009). باین حال مطالعات آزمایشگاهی (Maier et al., 2006) نشان داده است که مقادیر مختلف رطوبت تأثیر بسیار ناچیزی بر روی پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده دارد.



شکل ۴- تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک با جهت شیب

پایین بودن پذیرفتاری مغناطیسی در اراضی شیب‌دار در مطالعات (Cao et al., 2021) به هدر رفتن ذرات ریز از خاک‌های این مناطق نسبت داده شده است. در این مطالعه میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های عمیق به طور معنی‌داری بیشتر از پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های کم‌عمق برآورد گردیده است. (De Jong et al., 1998) نشان دادند که پذیرفتاری مغناطیسی در پایین شیب کاهش یافته و نسبت Feo/Fed افزایش می‌یابد. در گودی‌ها رطوبت بالا منجر به انحلال کانی‌های مگنتیک می‌گردد.

#### پذیرفتاری مغناطیسی و تکامل خاک

همبستگی میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، وضعیت تکامل خاک و پذیرفتاری مغناطیسی در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به این جدول بین پذیرفتاری مغناطیسی و درصد سنگ‌ریزه، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی و درصد ماده آلی هیچ‌گونه

جدول ۹- همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

MI	Y	CEC	OM	CaCO <sub>3</sub>	EC	pH	SP	BD	Silt	Sand	Clay	Gravel	
۰/۵۸**	۰/۷۱**	۰/۵۶**	۰/۲۶	۰/۴۱*	۰/۱۳	۰/۴۴*	۰/۵۱*	۰/۰۴	۰/۵۲*	۰/۵۹**	۰/۵۳**	-۰/۳۱	LF
۰/۵۸**	۰/۷۱**	۰/۵۶**	۰/۲۶	۰/۴۱*	۰/۱۳	۰/۴۴*	۰/۵۱*	۰/۰۴	۰/۵۲*	۰/۵۹**	۰/۵۴**	-۰/۳۱	HF
-۰/۲۸	۰/۷۰**	۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۱۰	FD
۰/۵۶**	۰/۷۲**	۰/۵۶**	۰/۲۸	۰/۴۶*	۰/۱۲	۰/۴۲*	۰/۵۲*	۰/۰۳	۰/۵۲**	۰/۵۸**	۰/۵۲*	-۰/۳۰	miner

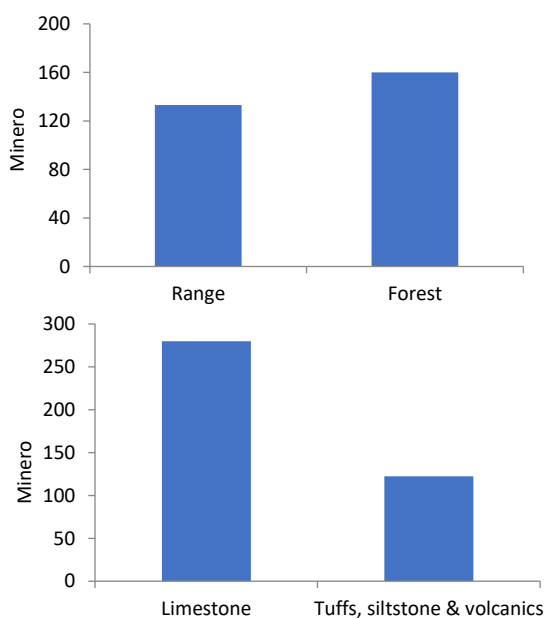
MI: شاخص تکامل کورفولوژیک، Y: کلاس رده‌بندی خاک، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، SP: درصد رطوبت اشباع، BD: جرم مخصوص ظاهری، LF: پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین، HF: پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا، FD: پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، miner: پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک.

با افزایش میزان تکامل کلاس‌های خاک موجود در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل کمترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های انتی‌سول و بیشترین مقدار در خاک‌های آلفی سول و مالی‌سول مشاهده می‌گردد. در

همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پارامترهای پذیرفتاری مغناطیسی، کلاس رده‌بندی خاک و شاخص تکامل مورفولوژیک نشان‌دهنده افزایش مغناطیس‌پذیری خاک با افزایش میزان تکامل است. شکل ۵ نیز افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی را

اسیدی و خنثی گزارش کرده‌اند.

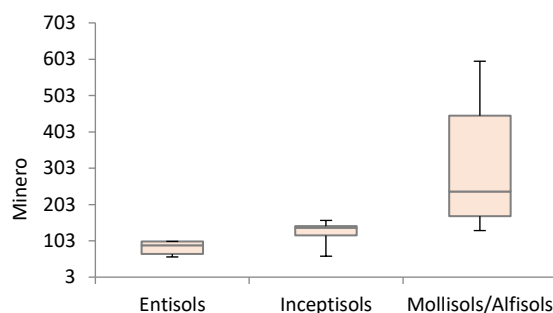
نوع کاربری اراضی از عوامل اصلی تأثیرگذار در میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌باشد. پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تکامل یافته بر روی پوشش جنگلی بیشتر از پوشش مرتعی تخمین زده شد (شکل ۶). مقادیر بالاتر رطوبت خاک و تراکم پوشش گیاهی در مناطق جنگلی سبب بالارفتن فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها، تشکیل بیشتر کانی‌های فرومگنتیک و در نتیجه افزایش در جای پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌گردد. پذیرفتاری مغناطیسی در مناطقی که از پوشش گیاهی طبیعی برخوردارند، بیشتر از اراضی کشاورزی می‌باشد (Bouhsane and Bouhlassa, 2018; Cao *et al.*, 2021). زراعی صورت گرفته در اراضی کشاورزی، فرسایش لایه‌های سطحی و آمیختگی لایه‌های سطحی و زیرسطحی سبب کاهش مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌گردد (Hanesch *et al.*, 2007). بر اساس نتایج Fine *et al.* (1989) مقدار بیشتر مواد آلی و موجودات هتروتروف در نزدیک سطح خاک می‌تواند تشکیل کانی‌های فری‌مگنتیت را افزایش دهد.



شکل ۶- نمودار تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در دو کاربری اصلی منطقه (بالا) و مواد مادری عمده منطقه (پایین)

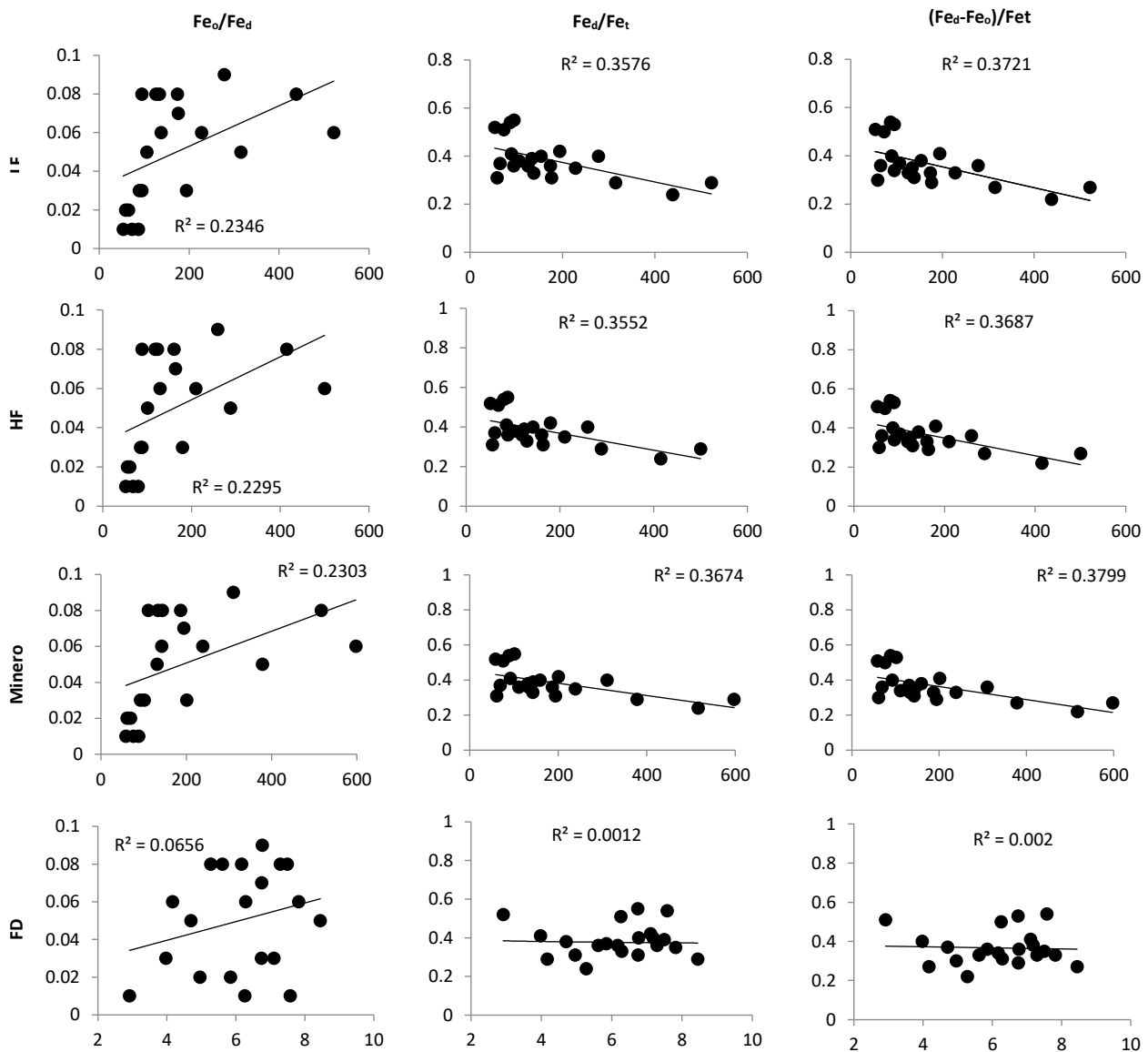
در خاک‌ها نسبت Feo/Fed بیانگر عواملی چون شرایط اکسایش - کاهش، حضور لیگاندهای آلی، درجه هوازدگی و شرایط تکاملی خاک می‌باشد (Lu *et al.*, 2012). با افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی، پارامترهای آهن قابل عصاره‌گیری با سیترات دی‌تیونات، Fed/Fet و Fed-Feo/Fet کاهش و Feo/Fed افزایش می‌یابد (شکل ۷ و جدول ۱۰).

مطالعات Ayoubi and Mirsaidi (2018) نیز کمترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک در دو گروه بزرگ از رده انتی‌سول با حداقل میزان تکامل نسبت سایر خاک‌های منطقه از جمله اریدی‌سول‌ها برآورد گردیده است. از آنجایی که تعداد خاک‌های آلفی‌سول در منطقه محدود بوده است، این خاک‌ها با مالی‌سول‌های منطقه ادغام گردیدند. از آنجایی که خاک‌های مالی‌سول و آلفی‌سول منطقه عمدتاً در شیب‌های شمالی با پوشش جنگلی و مواد مادری آهکی تکامل یافته‌اند بنابراین پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تکامل یافته بر روی مواد مادری آهکی بیشتر برآورد گردیده است (شکل ۶). از طرف دیگر بسیاری از مطالعات بر تأثیر مواد مادری بر ویژگی‌های مغناطیسی خاک تأکید دارند (Nie *et al.*, 2007). تفاوت پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تکامل یافته بر روی مواد مادری مختلف امری کاملاً طبیعی است. شرایط تشکیل، نوع مواد تشکیل دهنده و در نتیجه نوع و مقدار مواد مغناطیسی مواد مادری متفاوت است. به طور کلی خاک‌هایی که دارای مقادیر بالاتری از کانی‌های مغناطیسی هستند، معمولاً از سنگ‌های غنی از آهن تشکیل شده‌اند (Silva Filho *et al.*, 2019). پذیرفتاری سنگ‌ها (توف‌ها و سنگ‌های آتشفشانی) به ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها وابسته بوده و حتی پذیرفتاری یک نوع سنگ بسته به شرایط تشکیل می‌تواند بسیار متفاوت باشد. در خاک‌های آتشفشانی غنی از کانی‌های فری‌مگنتیسم، لیتولوژی نقش فرآیندهای پدوژنیک و انسان ساز را به حاشیه می‌کشاند (Grison *et al.*, 2021). نتایج به دست آمده (شکل ۶) نشان می‌دهد که شرایط تشکیل سنگ‌های آهکی منطقه منحصر به فرد بوده و مواد مغناطیسی یا در آن‌ها تشکیل شده‌اند یا از یک منبع با مواد مغناطیسی قابل توجه تأمین گردیده‌اند.



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در کلاس‌های خاک شناسایی شده در منطقه

نتایج مشابهی نیز در مطالعات Karimi and Khademi (2012) گزارش شده است. Yu and Lu (1991) مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ‌های آذرین بازی را بیشتر از خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ‌های آذرین



شکل ۷- تغییرات فرکشن های آهن با پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (LF)، فرکانس بالا (HF)، پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک (Minero)، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (FD)

جدول ۱۰- همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و اشکال مختلف آهن

(Fe <sub>d</sub> -Fe <sub>o</sub> )/Fe <sub>t</sub>	Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>t</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	
-۰/۶۰**	-۰/۵۹**	۰/۴۶*	-۰/۰۹	-۰/۵۶**	۰/۲۸	LF
-۰/۶۰**	-۰/۵۹**	۰/۴۵*	-۰/۰۹	-۰/۵۶**	۰/۲۸	HF
-۰/۰۴	-۰/۰۰۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۳۴	FD
-۰/۶۱**	-۰/۶۰**	۰/۴۶*	-۰/۱۳	-۰/۵۹**	۰/۲۶	minero

فرومغناطیس می‌باشد. اگرچه تیمار سیترات - بی‌کربنات - دی - تیونات (CBD) قادر به استخراج اکسیدهای آهن آزاد پدوژنیک می‌باشد، اما قادر به استخراج آهن از کانی‌های اکسید آهن با درجه تبلور بالا و کانی‌های اولیه آن نیست (Walker, 1983). از طرف دیگر به دلیل شرایط حاکم بر منطقه کریستال‌های فری مغناطیس که در ابتدا به شکل آمورف هستند، فرصت تبدیل به اشکال کریستاله را ندارند. مقدار و ترکیب مواد آلی مرتبط با

این در حالی است که بسیاری از محققین رابطه مثبت و معنی‌داری میان آهن متبلور و پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها و رابطه منفی معنی‌داری بین اکسید آهن بی‌شکل مشاهده کرده‌اند (Oliaei et al., 2009; Valaee et al., 2016; Sarmast et al., 2017). از آنجایی که قسمت عمده مواد مادری خاک‌های منطقه را توف تشکیل می‌دهد، بنابراین علت این امر احتمالاً غنی بودن مواد مادری خاک‌های منطقه از اکسیدهای آهن اولیه

خاک‌ها در یک وسعت کم گردیده است. پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های منطقه با افزایش درجه تکامل کلاس‌های رده‌بندی خاک افزایش می‌یابد. کمترین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به انتی‌سول‌ها و بیشترین مقادیر این شاخص مربوط به مالی‌سول‌ها و آلفی‌سول‌ها می‌باشد. پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های تکامل یافته بر روی پوشش جنگلی به دلیل مقدار بیشتر رطوبت، مواد آلی و موجودات هتروتروف که تشکیل کانی‌های فری‌مگنتیت را افزایش دهد بیشتر از پوشش مرتعی برآورد گردید. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پذیرفتاری مغناطیسی و رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، کلاس رده‌بندی خاک و شاخص تکامل مورفولوژیک، کارایی این شاخص را در نشان دادن وضعیت تکامل خاک نشان می‌دهد. شیب‌دار بودن منطقه و همچنین حضور مقادیر بالای کربنات‌ها در منطقه باعث به‌وجود آمدن روابط معکوس بین شاخص‌های تکامل ژئوشیمیایی و کلاس‌های رده‌بندی خاک شده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abbaszadeh Afshar, F. Jalalian, A. and Ayoubi, Sh. (2010). Spatial prediction of some physicochemical soil properties and magnetic susceptibility using digital topographic model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17 (2), 89-105. (In Farsi)
- Ayoubi S, Ahmadi MR, Abdi MR, Abbaszadeh Afshar F (2012) Relationships of 137Cs inventory with magnetic measures of calcareous soils of hilly region in Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112:45-51
- Ayoubi Sh. Amiri, S. and Tajik. S. (2014). Lithogenic and antropogenic impacts on soil surface magnetic susceptibility in an arid region of central Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(10): 1467-1483.
- Ayoubi, Sh. and Mirsaidi, A. (2018). magnetic susceptibility of Entisols and Aridisols great groups in southern Iran. *Geoderma Regional*, 15.
- Ayoubi, S. and Adman, V. (2019). Iron Mineralogy and Magnetic Susceptibility of Soils Developed on Various Rocks in Western Iran. *Clays and Clay Minerals*. 67, 217-227. <https://doi.org/10.1007/s42860-019-00020-5>.
- Ayoubi, Sh. and Moazzeni Dehghani, S. (2020). Identifying impacts of land use change on soil redistribution at different slope positions using magnetic susceptibility. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 426.
- Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Teixeira, W. W. R., Motta, A. C. V., Prior, S. A. and Curi, N. (2020). Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 46. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8025-8>.
- Barbosaa, J. Z., Poggere, G. C., Godinho Silva, S. H., Mancini, M., Vargas Motta, A. C., Melo Marques, J. J. G. and Curi, N. (2021). National-scale spatial variations of soil magnetic susceptibility in Brazil. *Jornal of South American Earth Sciences*, 108.
- Baumann, F. Schmidt, K. Dörfer, C. He, J. S. Scholten, T. and Kühn, P. (2014). Pedogenesis, permafrost, substrate and topography: plot and landscape scale interrelations of weathering processes on the central-eastern Tibetan Plateau. *Geoderma*, 226, 300-315.
- Bétard, F. (2012). Spatial variation of soil weathering processes in a tropical mountain environment: The Baturité massif and its pediment (Ceará, NE Brazil). *Catena*, 93, 18-28.
- Blume, H. P. and Schwertmann, U. (1969). Genetic evaluation of profile distribution of Al, Fe and Mn oxides. *Soil Science Society of America*, 33: 438-444.
- Blundell, A. Dearing, J. A. Boyle, J. F. and Hannam, J. A. (2009). Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth-Science Reviews*, 95, 158-188.
- Bouhsane, N., and Bouhlassa, S. (2018). Assessing Magnetic Susceptibility Profiles of Topsoils under Different Occupations. *International Journal of Geophysics*, 2018, 9481405.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. (1999). *The nature and*

پوشش جنگلی و همچنین وضعیت مرطوب‌تر خاک از تبلور آهن آمورف و تبدیل آن به آهن آزاد کریستالی در این مناطق جلوگیری می‌نماید. بنابراین همبستگی مثبت بین Feo/Fed و پذیرفتاری مغناطیسی نشان می‌دهد که اکسیدهای آهن با تبلور پایین قسمت عمده کانی‌های فری مغناطیس را در خود جای داده‌اند. در مطالعه Hu *et al.* (2009) نیز رابطه مثبت و معنی‌داری بین Feo و همچنین Feo/Fed با پذیرفتاری مغناطیسی مشاهده گردیده است. (Rhoto *et al.* (1981) نشان دادند که آهن استخراج شده با اگزالات تنها مربوط به اشکال آمورف آهن نبوده و می‌تواند مقداری از ذرات درشت مغناطیس را نیز استخراج کند. در برخی مطالعات دیگر نیز عدم همبستگی معنی‌دار بین پذیرفتاری مغناطیسی و آهن دی‌تیونات به تفاوت در مواد مادری نسبت داده شده است (De Jong *et al.*, 1999).

## نتیجه‌گیری

تأثیر جهت شیب و توپوگرافی خاص منطقه باعث به‌وجود آمدن تغییرات مشخص در خرد اقلیم‌ها، پوشش گیاهی و همچنین



- properties of soils*. 13th edition, Chapter 1.
- Burt, R. (2004). Soil survey laboratory methods manual. NRCS, USDA, Soil survey investigation report. No: 42, Version 4.0.
- César de Mello, D., Demattê, J.A.M., Silvero, N.E.Q., Di Raimo, L. A.D.L., Poppiel, R.R., Mello, F.A.O., Souza, A.B., Safanelli, J.L., Resende, M.E.B., & Rizzo, R. (2020). Soil magnetic susceptibility and its relationship with naturally occurring processes and soil attributes in pedosphere, in a tropical environment. *Geoderma*, 372, 114364.
- Cao, Z. Zhang, K. Hu, J. Yang, Z. and Zhou, Z. (2021). Linking rocky destrification to soil erosion by investigating changes in soil magnetic susceptibility profiles on karst slopes. *Geoderma*, 389. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114949>.
- Chittleborough, D. J. (1991). Indices of weathering for soils and paleosols formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38, 115-120.
- Costa, E. U. C. D., Araujo, J. K. S., Neves, L. V. D. M. W., Araújo Filho, J. C. D., Sousa, J. E. S. D., Corrêa, M. M., Ribeiro Filho, M. R. and Souza Júnior, V. S. D. (2019). Genesis and classification of Nitisols from volcano-sedimentary lithology in Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 43.
- Dankoub, Z. Ayoubi, S. Khademi, H. and Lu, Sh-G. (2012). Spatial Distribution of Magnetic Properties and Selected Heavy Metals in Calcareous Soils as Affected by Land Use in the Isfahan Region, Central Iran. *Pedosphere*, 22: 33-47.
- Dearing, J.A, Hay, K. L., Baban, S.M.J., Huddleston, A.S., Wellington, E.M.H., and Loveland, P.J. (1996). Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 127(3), 728-734.
- Dearing J.A. 1999. Environmental magnetic susceptibility, using the Bartington MS2 System. Kenilworth, UK: Chi Publ. 54 pp.
- De Jong, E. Nestor, P. A. and Pennock, D. J. (1998). The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution. *Catena*, 32: 23-35.
- De Jong, E. Kozak, L. M. and Rostat, H. P. W. (1999). Effects on parent material and climate on the magnetic susceptibility of Saskatchewan soils. *Journal of the Soil Science*, 80: 135-142.
- Ding, Z., Zhang, Z., Li, Y., Zhang, L. and Zhang, K. (2020). Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil and Tillage Research*, 199.
- Enjavinejad, M., Owliaie, H. R., Adhami, E., 2017. Study of magnetic susceptibility of the soils of a toposequence case study: Beshar plain, Kohgiluyeh Province. *Journal of water and soil*. Vol. 31, No. 2:478-489. (In Farsi)
- Fedo, C. M. Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implication for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921-924.
- Feng, Z. D. and Johnson, W. C. (1995). Factors affecting the magnetic susceptibility of a loess-soil sequence, Barton County, Kansas, USA. *Catena*, 24: 25-37.
- Feng, Z. D. (1997). Geochemical characteristics of a loess-soil sequence in central Kansas. *Soil Science Society of American Journal*, 61: 534-541.
- Fine, P. Singer, M. J. and Southward, R. J. (1989). Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California toposequence. *Geoderma*, 44: 287-306.
- Gabler, R. E. Petersen, J. F. and Trapasso, L. M. (2006). Soils and soil development. *Essentials of physical geography*, 8TH Edition. P: 330-360.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis, in: Klute A. (Eds.), Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 2<sup>nd</sup> ed. *Agronomy*, 9: 383-411.
- Graham, R. C. and O'Geen, A. T. (2010). Soil mineralogy trends in California landscapes. *Geoderma*, 154: 418-437.
- Grison, H. Petrovsky, E. Hanzlikova, H. (2021). Assessing anthropogenic contribution in highly magnetic forest soils developed on basalts using magnetic susceptibility and concentration of elements. *Catena*, 206. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105480>.
- Han, X., Tomaszewski, E. J., Sorwat, J., Pan, Y., Kappler, A. and Byrne, J. M. (2020). Effect of microbial biomass and humic acids on abiotic and biotic magnetite formation. *Environmental Science and Technology*, 54 (7): 4121-4130.
- Harden, J. W., 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in central California. *Geoderma*, 28: 1-28.
- Hanesch, M. and Scholger, R. (2005). The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured through soil profiles. *Geophysical 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(2-3), 351-363.
- Hällberg, L. P. Stevens, T. Almqvist, B. Snowball, I. Wiers, S. Költringer, C. Lu, H. Zhang, H. and Lin, Z. (2020). Magnetic susceptibility parameters as proxies for desert sediment provenance. *Aeolian Research*, 46.
- Hosseini, S. S., Esfandiarpour, B., Farpoor, M. H., Karimi, A. R., 2015. Comparison of different soil development indices along Kerman-Baft transect. *Journal of management and sustainable production*, 5(2). (In Farsi)
- Hu, Z. F. Xu, L. F. Pan, Y. and Shen, M. N. (2009).



- Influence of the aging of Fe oxides on the decline of magnetic susceptibility of the Tertiary red clay in the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, 209: 22-30.
- Hu, P., Heslop, D., Viscarra Rossel, R. A., Roberts, A. P. and Zhao, X. (2020). Continental-scale magnetic properties of surficial Australian soils. *Earth-Science Reviews*, 203, 103028. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103028>.
- Jordanova, N. (2016) Soil Magnetism: Applications in Pedology, Environmental Science and Agriculture, Elsevier, Netherlands, 445 p.
- Karimi, A. and Khademi, H. (2012). Effects of parent materials, gypsum and carbonates on the magnetic susceptibility of soils in southern Mashhad. *Journal of Water and Soil Science*, 16(61): 247-260. (In Farsi)
- Karimi, R. Ayoui, Sh. Jalalian, A. Sheikh-Hosseini, A. R. and Afyuni, M. (2011). Relationship between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 74: 1-7.
- Kunze, G. W. and Dixon, J. B. (1986). *Method of soil analysis*, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. *American Society of Agronomy*.
- Lima, P. L. T., Silva, M. L. N., Quinton, J., Armstrong, A., Inda, A. V., Batista, P. V. G., Poggere, G. C. and Curi, N. (2020). Tracing the origin of reservoir sediments using magnetic properties in Southeastern Brazil. *Semina Ciências Agrarias*, 41: 847-864
- Lu, Sh-G. Zhu, L. and Yu, J-Y. (2012). Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications. *Catena*, 93, 9-17.
- Maher, B. A. (1986). Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42: 76-92.
- Maier, G. Scholger, R. and Schon, J. (2006). The influence of soil moisture on magnetic susceptibility measurements. *Journal of Applied Geophysics*.
- Magiera, T., Lukasik, A., Zawadzki, J., & Rösler, W. (2019). Magnetic susceptibility as indicator of anthropogenic disturbances in forest topsoil: A review of magnetic studies carried out in Central European forests. *Ecological Indicators*, 106, 105518.
- Marjovi, A. Razavi, Z. and Behraves, S. (2017). Application of soil magnetic susceptibility for monitoring bioavailable metals pollution. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(1): 117-130. (In Farsi)
- Marsan, F. A., Bain, D. C., Duthie, D. M. L., 1988. Parent material uniformity and degree of weathering in a soil chronosequence, Northwestern Italy. *Catena*. 15, 507-517.
- Mokhtari Karchegani, P. Ayoubi, S. Lu, Sh-G. and Honarju, N. (2011). Use of magnetic measures to assess soil redistribution following deforestation in hilly region. *Journal of Applied Geophysics*, 75: 227-236.
- Moradi Nasab, V., Hojati, S., Landi, A. and Faz Cano, A. (2020). Comparing soil development in two topo-sequences with different parent materials in part of Karoon 3 Basin, East of Khuzestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1): 143-159. (In Farsi)
- Mullins, C. E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review. *Journal of Soil Science*, 28: 223 – 246.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715-717.
- Nie, J. King, J. W. and Fang, X. (2007). Enhancement mechanisms of magnetic susceptibility in the Chinese red-clay sequence. *Geophysical Research*, 34, L19705. <https://doi.org/10.1029/2007GL031430>.
- Oliaei, H. R. Adhami, E. Jafari, S. Rajaei, M. and Ghasemi Fasaei, R. (2009). Distribution of magnetic susceptibility in relation to iron compounds in some selected soils of Fars province. *Iranian Journal of Soil Research*, 23 (2): 191-204. (In Farsi)
- Ozaytekin, H. H. Mutlu, H. H. and Dedeoglu, M. (2012). Soil formation on a calcic chronosequence of Ancient Lake Konya in Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 76:66-74.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rock. *Geological Magazine*, 10: 501-504.
- Price, J. R. and Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202: 397-416.
- Quijano, L. Gaspar, L. Lopez-Vicente, M. Chaparr, A. E. Machin, J. and Navas, A. (2011). Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue, D10, 1-6. Proceeding Tandil, Argentina.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T. and Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295: 10-21.
- Ramos, P. V., Inda, A. V., Barron, V., Teixeira, D. D. B. and Marques Júnior, J. (2020). Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in southern Brazil. *Soil Science Society of American Journal*. <https://doi.org/10.1002/saj2.20164>.
- Rhoto, F. E. Bigham, J. M. Norton, L. D. and Smeck, N. E. (1981). Contribution of magnetite to oxalate-extractable iron in soils and sediments from the Maumee River Basin of Ohio. *Soil Science Society of American Journal*, 45: 645-649.
- Rocha Filho, P. Antunes, F. S. and Falcao, M. F. G. (1985). Quantitative influence of the weathering upon the mechanical properties of a young gneiss residual soil. *First Int. Conf. Geomech. Trop. Lateritic Saprolitic Soil Brasilia*, 1, 281-294.
- Rochette, P., Jackson, M. and Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of magnetic susceptibility. *Reviews of Geophysics*, 30.



- Ruxton, B. P. (1968). Measure of the degree of chemical weathening of rocks. *Journal of Geology*, 69: 534-571.
- Santoso, N.A., Iqbal, M., Ekawati, G. and Firdaus, R. (2019). Study of pH and Magnetic Susceptibility to Fertility Rate of Agricultural Soil around Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia. IOP Conf. Ser. *Environmental Earth Sciences*, 258, 12001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012001>.
- Sarmast, M., Farpoor, M. H., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2017). Magnetic susceptibility of soils along a lithotoposequence in southeast Iran. *Catena*, 156, 252-262.
- Schaetzl, R. J., & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Silva Filho, L. A., Ker, J. C., Fontes, M. P. F., Camêlo, D. D. L., Corrêa, M. M., Cavalcante, L. C. D. and Guimarães, L. D. M. (2019). Mineralogical evolution of magnetic Rhodic Oxisols under different lithological influences in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43.
- Siqueira D.S., Marques J. Pereirab G.T. Teixeira D.B. and Vasconcelos V. 2015. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena*, 135: 145- 162.
- Singer, M. J. and Fine, P. (1989). Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils. *Soil Science Society of American Journal*, 53: 1119-1127.
- Soil Survey Staff, (2014). *Keys to Soil Taxonomy 12th ed.* US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Sparks, D. L. Page, A. L. Helmke, P. A. Leoppert, R. H. Soltanpour, P. N. Tabatabai, M. A. Johnston, G. T. and Summer, M. E. (1996). Method of soil analysis. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, Wisconsin.
- Torabi, H. and Eghbal, M. K. (2003). Study of soil development using magnetic susceptibility in soils next to Sefidrud River in Gilan province. *Journal of Water and Soil Science*, 16 (2): 205-213. (In Farsi)
- Singer, M. J. Fine, P. (1989). Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1119-1127.
- Thiry M. P. Fernandes, A. Milnes and Raynal, J. P. (2014). Driving forces for the weathering and alteration of silica in the regolith: Implications for studies of prehistoric flint tools. *Earth-Science Reviews*, 136:141-154.
- Torrent, J. Liu, Q. S. and Barron, V. (2010). Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a xeralf chronosequence in northwestern Spain. *European journal of soil science*, 61: 161-173.
- United States Department of Agriculture, 2012. Field book for describing and sampling soils. National Soil Survey Center. *Natural Resource Conservation Service*.
- Yu, J. Y., Lu, S. G., 1991. *Soil Magnetism*. Jingxi Science and Technology Press, Nanchang.
- Valaee, M., S. Ayoubi, F. Khormali, S. G. Lu and H. R. Karimzadeh, 2016. Using magnetic susceptibility to discriminate between soil moisture regimes in selected loess and loess-like soils in northern Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 127: 23-30.
- Vogt, T. (1927). Sulitjelmafeltes geology petrografi. *Norg. Geol. Unders.* 121, 1-560 (in Norwegian, with English abstract).
- Walker, A. L., 1983. The effects of magnetic on oxalate and dithionite extractable iron. *Soil Science Society of America Journal*, 47:1022-1026.
- Walkey, A. and Black, I. A. (1934). An examination of Degtiareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. *Soil Science Society of American Journal*, 79: 459-465.