

## ارزیابی منشاء پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از تیمار CBD و تصاویر میکروکت اسکن در برخی از خاک‌های استان فارس

حمیدرضا اولیائی<sup>۱\*</sup>، ابراهیم ادهمی<sup>۱</sup>، محمدرضا چاکر حسینی<sup>۲</sup>، مجید رجائی<sup>۳</sup> و علی کسرائیان<sup>۴</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۴/۱)

### چکیده

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ( $\chi$ ) به طور گسترده‌ای جهت ارزیابی تکامل نیمرخ خاک به کار رفته است. ۱۴ نیمرخ خاک در دامنه نسبتاً گسترده‌ای از شرایط اقلیمی در استان فارس مورد مطالعه قرار گرفتند. عصاره‌گیر سبترات - بی کربنات - دی تیونات (CBD) و تصاویر میکروکت اسکن جهت ارزیابی منشاء پذیرفتاری مغناطیسی استفاده گردیدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های خاک، ۲۳ تا ۹۱ درصد از پذیرفتاری مغناطیسی خود را پس از تیمار CBD از دست دادند که بیانگر اختلاف در منشاء (پدوژنیک یا لیتوژنیک) پذیرفتاری مغناطیسی بوده است. کاهش پذیرفتاری مغناطیسی به مقدار زیادتری در خاک‌های با تکامل پروفیلی بیشتر و هم‌چنین در سطح خاک غالباً مشاهده گردید. کاهش پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) پس از تیمار CBD، ۲۲ تا ۸۹ درصد بوده است. رابطه مثبت و معنی‌داری میان میزان کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در خاک‌های مطالعه شده مشاهده گردید. تصاویر میکروکت اسکن با قدرت تفکیک فضایی ۳۳ میکرومتر، حضور ذرات اکسید مغناطیسی آهن (مگنتیت) لیتوژنیک را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پذیرفتاری مغناطیسی خاک، تکامل خاک، اکسید آهن، پدوژنیک، میکروکت اسکن، استان فارس

### مقدمه

معادله  $K$  بدون واحد است. پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند برحسب واحد جرمی نیز بیان گردد که بر این اساس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\chi_{\text{mass}} = \kappa / \rho$$

در این معادله  $\rho$  جرم مخصوص ظاهری جسم بر حسب  $\text{kg/m}^3$  و  $\chi_{\text{mass}}$  پذیرفتاری مغناطیسی جرمی برحسب  $\text{kg/m}^3$  می‌باشد (۲۰). اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی روشی سریع، غیر تخریبی، ساده و نسبتاً ارزان می‌باشد که در دامنه گسترده‌ای

پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic susceptibility) یا قابلیت مغناطیسی شدن کمیته است که میزان مغناطیده شدن یک جسم در یک میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد (۲۱). این کمیت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\kappa = M/H$$

در معادله بالا  $M$  میزان مغناطیس‌پذیری جسم،  $H$  شدت میدان مغناطیسی و  $\kappa$  پذیرفتاری مغناطیسی حجمی است. در این

۱. استادیاران خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

۲. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، شهرکرد

۳. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، شیراز

۴. عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [owliaie@mail.yu.ac.ir](mailto:owliaie@mail.yu.ac.ir)

از مطالعات مربوط به خاک و سنگ کار برد دارد (۲۰ و ۳۱). رفتارهای مغناطیسی در اجسام به ۵ دسته تقسیم می‌شوند که بر حسب میزان پذیرفتاری مغناطیسی و به ترتیب نزولی شامل فرومگنتیسم (Ferromagnetism) (مانند آهن خالص با حداکثر میزان پذیرفتاری مغناطیسی)، فری مگنتیسم (Ferrimagnetism) (مانند مگنتیت و مگهمیت)، کتند آنتی فرومگنتیسم (Cantedantiferromagnetism) (مانند هماتیت و گوئیتیت)، پارامگنتیسم (Paramagnetism) (مانند لپیدوکروسیت) و دیامگنتیسم (Diamagnetism) (مانند کوارتز، آهک، گچ و ماده آلی با حداقل پذیرفتاری مغناطیسی و حتی منفی) می‌باشند (۲۰).

منبع اصلی پذیرفتاری مغناطیسی در غالب خاک‌ها کانی‌های فری-مگنتیت مانند مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) و مگهمیت ( $\gamma Fe_2O_3$ ) می‌باشند. محیط‌های پدوژنیک بر پایداری و تبادلات این کانی‌ها در خاک تأثیر می‌گذارد (۲۶).

تکامل متوالی خاک منجر به ارزیابی یک الگوی توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در نیمرخ خاک می‌شود. از آنجایی که غالباً پذیرفتاری مغناطیسی افق‌های الویوال (Eluvial) بیشتر از افق‌های ایلوویال (Illuvial) می‌باشد، بنابراین میزان افزایش پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند در کنار سایر عوامل به عنوان شاخصی از میزان تأثیر فرایندهای خاک‌سازی مطرح گردد (۱۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۷). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها اساساً به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری-مگنتیت می‌باشد که به میزان زیادی به عوامل خاک‌ساز شامل ماده مادری، آب و هوا، پستی و بلندی و پوشش گیاهی بستگی دارد (۹). فرضیه مطرح در مورد افزایش پذیرفتاری مغناطیسی، بیشتر اشاره به تغییر شکل در جای آهن غیر مغناطیسی، به ریز بلورهای مگنتیت و مگهمیت دارد (۲۰).

آبشویی کربنات‌ها و گچ و هم‌چنین تجمع ماده آلی در سطح خاک و یا سایر تغییرات شدید در توده خاک می‌تواند میزان پذیرفتاری مغناطیسی در یک افق را نسبت به سایر افق‌ها تغییر دهد که این امر مربوط به افزایش یا کاهش غلظت

ترکیبات مغناطیسی در خاک می‌باشد. تغییرات ناشی از انتقال ترکیبات آهن در نیمرخ خاک و یا آزادسازی اکسیدها از داخل سیلیکات‌های حاوی آهن به عنوان تغییرات مطلق در نظر گرفته می‌شوند (Minerogenic basis). مقدار این عوامل به راحتی با حذف اثرات مواد دیامگنتیک مانند آهک، گچ و ماده آلی در محاسبه، مطابق معادله زیر به دست می‌آید (۴).

$$\chi_{\text{minero}} = (\chi_{\text{oven dry}} \times 100) / [(100 - (OM + CCE + Gypsum))]$$

در معادله بالا  $\chi_{\text{minero}}$  میزان پذیرفتاری مغناطیسی بر مبنای مینروژنیک (مطلق)،  $\chi_{\text{oven dry}}$  میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک خشک شده در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد، OM درصد ماده آلی، CCE درصد کربنات کلسیم معادل و Gypsum درصد گچ در نمونه خاک مورد نظر می‌باشند.

فاین و همکاران (۱۰) پیشنهاد کردند که مقدار بیشتر مواد آلی و ریز موجودات هتروتروف در نزدیک سطح خاک می‌تواند تشکیل کانی‌های فری-مگنتیت را افزایش دهند. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی برای ارزیابی نیم‌رخ‌های خاک در مطالعه ردیف زمانی مناسب و مفید می‌باشد. با استفاده از این تکنیک تفاوت در مواد مادری و انقطاع موجود در خاک‌های غیر یکنواخت قابل شناسایی است (۱۱ و ۲۷). بسیاری از محققین معتقدند که تیمار سیترات-بیکربنات - دی تیونات (CBD) قادر به استخراج آهن موجود در اکسیدهای آزاد پدوژنیک می‌باشد، اما قادر به استخراج آهن از کانی‌های اکسید آهن با درجه تبلور بالا و کانی‌های اولیه آن نیست (۱۸، ۱۹ و ۳۴). بنابراین اندازه‌گیری مجدد پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD می‌تواند نقش فرایندهای پدوژنیک را در حضور اکسیدهای آهن فرومگنتیک در خاک را نشان دهد (۱۲ و ۳۳).

ترابی گل سفیدی و کریمیان اقبال (۳) در مطالعه تکامل خاک با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان کاهش ۸ تا ۴۱ درصد در میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مورد مطالعه را پس از حذف اکسیدهای آهن آزاد (پدوژنیک) به وسیله تیمار CBD مشاهده نمودند. نامبردگان دلیل کمتر بودن کاهش در پذیرفتاری مغناطیسی پس از این تیمار نسبت به سایر مطالعات مشابه را وجود کانی‌های

بعد از تیمار CBD با پارامتر  $\chi_{fd}$  رابطه مستقیم دارد (۷ و ۱۱). مطالعات بسیار اندکی روی پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های ایران صورت گرفته است. به همین دلیل هدف از مطالعه حاضر بررسی تعیین منشاء پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مناطق مختلف استان فارس با استفاده از عصاره‌گیری اکسیدهای پدوژنیک آهن و تصاویر سه بعدی میکرو کت اسکن بوده است.

### مواد و روش‌ها

استان فارس با وسعت ۱۳۳ هزار کیلومتر مربع، بین طول ۵۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و عرض ۲۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی واقع شده و ۸٪ وسعت کشور را به خود اختصاص می‌دهد. ارتفاع این استان از حدود ۵۰۰ تا ۳۹۰۰ متر از سطح دریا در نوسان می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه استان از حدود ۵۰ تا ۸۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه هوا از ۱۲ °C تا ۲۳ °C می‌باشد. بر طبق نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (۲) خاک‌های این استان دارای رژیم‌های رطوبتی زیریک، یوستیک و اریدیک و رژیم‌های حرارتی مزیک، ترمیک و هایپرترمیک می‌باشند. نیم‌رخ‌های خاک بر اساس راهنمای شناسایی خاک (۲۸) تشریح و سپس بر مبنای کلید تاکسونومی خاک (۲۹) طبقه‌بندی گردیدند.

۱۴ نیم‌رخ خاک در مناطق مختلف اقلیمی استان فارس انتخاب (شکل ۱) و از افق‌های مشخصه به مقدار لازم نمونه خاک برداشته و به آزمایشگاه منتقل گردید. توزیع اندازه‌ای ذرات توسط روش پی‌پت (۶) اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی روی عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی و pH گل اشباع توسط دستگاه pH متر اندازه‌گیری گردید (۳۲). ظرفیت تبادل کاتیونی ذرات خاک با استات سدیم یک نرمال در pH ۸/۲ به روش چاپمن (۵) اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری میزان کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون

اولیه اکسید آهن مغناطیسی در خاک‌ها دانسته‌اند که این تیمار توانایی خروج آنها را نداشته است.

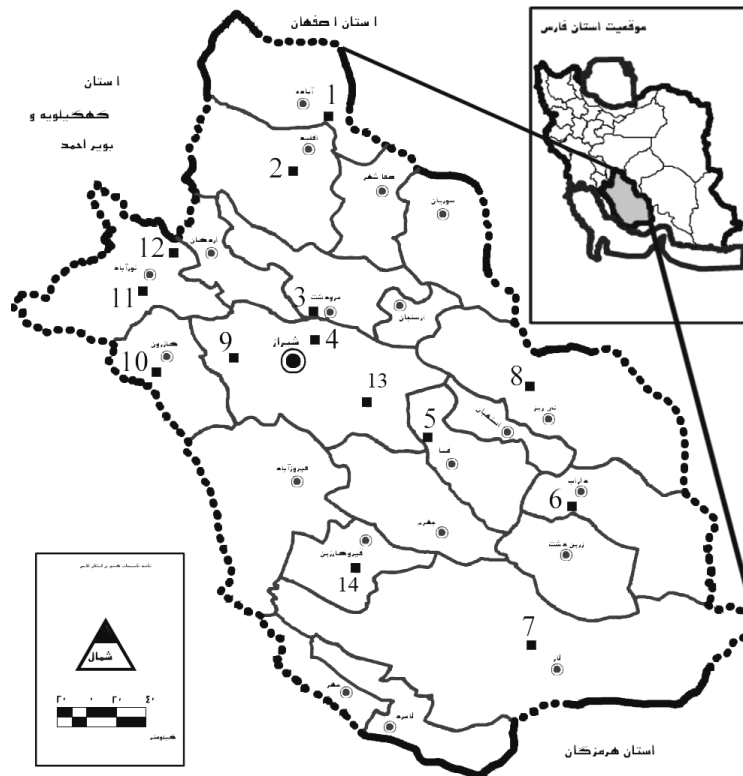
اندازه بلورهای مغناطیسی به میزان زیادی بر پذیرفتاری مغناطیسی آنها اثر دارد. ذرات با قطر بیشتر از ۱۱۰ میکرومتر را چند خاکدانه‌ای (MD) (Multi Domain) می‌نامند که دارای بیش از یک خاکدانه هستند. ذرات کمتر از ۰/۲ میکرومتر فقط دارای خاکدانه منفرد پایدار (SSD) (Stable Single Domain) می‌باشند. ذرات با اندازه ۰/۲ تا ۱۱۰ میکرومتر به اندازه کافی بزرگ هستند که بیش از یک خاکدانه داشته باشند، اما رفتار مغناطیسی خاکدانه منفرد پایدار را نشان می‌دهد. این گروه را شبه خاکدانه منفرد (PSD) (Pseudo- Single Domain) می‌نامند (۷).

ذرات بسیار ریز (Ultrafine) کوچک‌تر از ۰/۰۳ میکرومتر جزء SSD محسوب می‌شوند، اما ویژگی‌های منحصر به فردی را نشان می‌دهند که به آن رفتار سوپر پارامگنتیک (SP) (Superparamagnetic) گفته می‌شود. میزان پذیرفتاری مغناطیسی این ذرات زیاد، اما خواص مغناطیسی آنها پس از حذف میدان مغناطیسی به سرعت کاسته می‌شود. رفتار ویژه مغناطیسی این ذرات بسیار ریز بستگی به فرکانس میدان مغناطیسی دارد. در فرکانس کم میدان مغناطیسی، این ذرات رفتار SP را نشان داده و در فرکانس زیاد میدان مغناطیسی مشابه ذرات SSD عمل می‌نمایند (۷).

حضور مواد SP به وسیله کمیته به نام پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ %) قابل اندازه‌گیری است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

که در آن  $\chi_{fd}$  %، درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس،  $\chi_{lf}$  پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پائین (KHz) ۰/۴۶،  $\chi_{hf}$  پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس زیاد (۴/۶ KHz) می‌باشد. هر چه اختلاف میان پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس‌های زیاد و کم یک خاک بیشتر باشد نشان‌دهنده دخالت بیشتر ذرات مغناطیسی کوچک‌تر از ۰/۲ میکرومتر (عمدتاً پدوژنیک) می‌باشند. کاهش میزان پذیرفتاری مغناطیسی



شکل ۱. موقعیت نیم‌رخ‌های خاک مطالعه شده در استان فارس

پذیرفتاری مغناطیسی جرمی ( $m^3kg^{-1}$ ) می‌باشد که به دلیل بزرگ بودن واحد، اعداد به دست آمده در ضریب  $10^{-8}$  ضرب و گزارش گردیدند. ارتباط داده‌ها با استفاده از رگرسیون خطی با برنامه کامپیوتری SPSS مورد بررسی قرار گرفت.

دستگاه میکرو کت اسکن اشعه ایکس (X-Ray Micro CT-Scan) امکان عکس‌برداری سه بعدی نمونه‌های خاک را با قدرت تفکیک فضائی ۵ تا ۴۰ میکرومتر فراهم می‌نماید. با استفاده از تصویرهای به دست آمده که شامل تعداد بسیار زیادی مقاطع قابل حرکت در سه بعد می‌باشد، الگو و آرایش سه بعدی پدیده‌های درون خاک از جمله کریستال‌های آهنک، گچ، اکسیدهای آهن، مواد آلی و حفرات قابل بررسی می‌باشند. به این منظور نمونه‌های خاک دست نخورده درون ظروف پلی اتیلنی خاص قرار داده شده و جهت استاندارد مقایسه‌ای یک لوله پلاستیکی کوچک حاوی آب مقطر کنار نمونه خاک قرار داده می‌شود. اساس کار دستگاه تفاوت در تراکم یا دانسیته مواد مختلف می‌باشد، به این صورت که هر چه دانسیته مواد بیشتر

برگشتی اسید کلریدریک با عصاره جمع‌آوری شده انجام یافت (۲۵). کربن آلی از طریق اکسایش با اسید کرومیک و تیتراسیون با سولفات آهن آمونیاکی به روش جکسون (۱۶) اندازه‌گیری شد. مقدار گچ در نمونه‌ها نیز با روش استون اندازه‌گیری گردید (۲۵).

پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های پودری خاک به‌وسیله دستگاه MS2 Meter ، Bartington Dual Frequency فرکانس‌های ۴۶ KHz و ۴/۶ KHz اندازه‌گیری گردید. برای این منظور حدود ۱۰ گرم خاک خشک شده در آون (دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) در ظروف پلاستیکی کوچک با قطر ۲/۲ سانتی‌متر ریخته تا ارتفاع آن به حدود ۲cm برسد. قرائت‌های شاهد روی ظروف خالی در ابتدا و انتهای قرائت نمونه خاک، جهت تصحیح اثرات احتمالی ظرف بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی انجام گرفت (۷). پس از عصاره‌گیری نمونه‌های خاک توسط سیترات - بی‌کربنات - دی تیونات (CBD) پذیرفتاری مغناطیسی مجدداً اندازه‌گیری گردید (۱۴). واحد

حداقل آن در افق C نیم‌رخ ۱، به ترتیب ۵ و ۹/۹ مشاهده گردید.

نسبت میان  $\chi_{If}^{m}/\chi_{If}^{od}$  بیانگر اثر حضور مواد دیامگنتیک و پویای کربنات کلسیم، گچ و ماده آلی می‌باشد. حداکثر نسبت  $\chi_{If}^{m}/\chi_{If}^{od}$  در افق Bky3 نیم‌رخ ۱۴ به میزان ۶/۱ و حداقل آن به میزان ۱/۲ در افق Ap نیم‌رخ ۱۱، مشاهده گردیده است. بالاتر بودن این نسبت بیانگر بیشتر بودن مجموع کربنات کلسیم، گچ و مواد آلی در این خاک‌ها می‌باشد.

در اکثر نیم‌رخ‌های مطالعه شده (به جز نیم‌رخ‌های ۷، ۸، ۱۱ و ۱۲) با افزایش عمق، میزان پذیرفتاری مغناطیسی کاهش یافته است (جدول ۳). به طور کلی تغییرات عمودی پذیرفتاری مغناطیسی در طول نیم‌رخ خاک به میزان زیادی به تبدیل در جای اکسیدهای غیر مغناطیسی آهن به بلورهای بسیار ریز فری-مگنتیک بستگی دارد. محلول شدن  $Fe^{+2}$  و متعاقب آن رسوب مجدد به صورت فرم‌های مغناطیسی‌تر از عوامل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در سطح خاک می‌باشد (۱۰). بر طبق نظر گرمیلی و همکاران (۱۳) افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در لایه‌های سطح خاک به میزان زیادی به تبدیل در جای اکسیدهای آهن غیر مغناطیسی و اکسی هیدروکسیدهای آهن به ریز بلورهای فری مگنتیک بستگی دارد.

در سایر نیم‌رخ‌هایی که حداکثر پذیرفتاری مغناطیسی در افق B مشاهده گردید، به نظر می‌رسد که آبشویی ذرات بسیار ریز فری-مگنتیک و انتقال آنها از افق سطحی به افق B، خصوصاً در خاک‌های الفی سول، دلیل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی بوده است. گاهی نیز عواملی مانند انقطاع سنگی، پوشیده شدن خاک با رسوبات جدید و یا اختلاط خاک به صورت طبیعی یا تحت تأثیر دخالت انسان، می‌تواند عاملی برای عدم یکنواختی کاهش پذیرفتاری مغناطیسی با عمق باشد (۲۲).

خاک‌های هیدرومورفیک با زه‌کشی ضعیف منجر به ایجاد شرایط بی‌هوایی و عدم تبدیل کانی‌های پارامگنتیک و کنتد آنتی فرومگنتیک (مانند لپیدوکروسیت و گوئیت) به کانی‌های

باشد، میزان کاهش انرژی (Attenuation) پرتوایکس ساطع شده از منبع توسط جسم بیشتر خواهد بود و در این صورت تصویر حاصل زمینه روشن‌تری در یک مقیاس خاکستری خواهد داشت (۱۷).

جهت مقایسه تراکم مواد از شاخصی به نام Hounsfield Unit (HU) استفاده می‌گردد (۱۵). بر این اساس از موادی با تراکم مشخص به عنوان استاندارد استفاده می‌گردد. این استانداردها که در مرحله بارزسازی تصاویر (Image enhancement) به کار می‌روند، آب خالص و هوا می‌باشند. این مقدار برای هوا ۱۰۰۰- و برای آب صفر می‌باشد. دستگاه میکروکت اسکن مورد استفاده در این تحقیق، مدل EVS MS-8 MicroCT بود که جهت قدرت تفکیک ۳۳ میکرومتر در ولتاژ ۱۰۰ کیلو ولت و شدت جریان ۸۰ میلی آمپر تنظیم گردید. جهت انجام تصحیحات و بارزسازی تصویری و مشاهده سه بعدی تصاویر از نرم‌افزارهای Microview و NIH ImageJ استفاده گردید.

## نتایج و بحث

برخی پارامترهای اقلیمی و مشخصات عمومی نیم‌رخ‌های خاک مطالعه شده در جدول ۱ نشان داده شده است. بر این اساس نیم‌رخ‌های خاک مورد مطالعه در ۵ راسته آنتی سول، اینسپتی سول، الفی سول، مالی سول و ایریدیسول قرار می‌گیرند. این نیم‌رخ‌ها در کلاس‌های زه‌کشی بسیار ضعیف تا خوب و کاربری‌های زراعی، جنگل و مرتع قرار می‌گیرند. جدول ۲ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش (۵۵ نمونه) را نشان می‌دهد.

مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها در مبنای خاک خشک شده در آون  $(\chi_{If}^{od})$  و مینروژنیک  $(\chi_{If}^{m})$  که بیانگر اثر حضور مواد دیامگنتیک و پویای کربنات کلسیم، گچ و ماده آلی می‌باشد در جدول ۳ نشان داده شده است. بر این اساس، حداکثر میزان پذیرفتاری مغناطیسی بر مبنای خاک خشک شده در آون و مینروژنیک در افق Bt نیم‌رخ ۱۲ به ترتیب ۱۰۶ و ۱۳۲/۴ و



جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نیم‌رخ‌های مطالعه شده

| گنج                                   | کربنات کلسیم<br>معادل<br>----- % ----- | کربن آلی | ظرفیت تبادل کاتیونی<br>cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | هدایت الکتریکی<br>dSm <sup>-1</sup> | pH   | درصد توزیع ذرات خاک |      |    | عمق<br>(cm) | افق  |
|---------------------------------------|--|----------|---|-------------------------------------|------|---------------------|------|----|-------------|------|
|                                       |  |          |   |                                     |      | رس                  | سیلت | شن |             |      |
| <u>نیم رخ ۱ - Typic Haplocalcids</u>  |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| -                                     | ۴۱/۰                                   | ۰/۵      | ۱۲  | ۲/۹                                 | ۷/۹۰ | ۲۷                  | ۳۴   | ۳۹ | ۰-۲۵        | Ap   |
| -                                     | ۳۷/۰                                   | ۰/۲۵     | ۱۴  | ۱/۰                                 | ۸/۰  | ۳۶                  | ۲۱   | ۴۳ | ۲۵-۶۰       | Bk   |
| -                                     | ۴۹/۰                                   | ۰/۱۵     | ۹   | ۰/۸                                 | ۸/۲  | ۲۶                  | ۱۷   | ۵۷ | ۶۰-۱۰۰      | C    |
| <u>نیم رخ ۲ - Calcic Haploxeralfs</u> |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| -                                     | ۳۱/۰                                   | ۰/۷۵     | ۱۷/۳  | ۰/۴                                 | ۷/۶  | ۲۲                  | ۴۷   | ۳۱ | ۰-۲۰        | Ap   |
| -                                     | ۳۸/۳                                   | ۰/۴۵     | ۲۰/۸  | ۰/۳                                 | ۷/۷  | ۲۷                  | ۴۶   | ۲۷ | ۲۰-۷۵       | Bt   |
| -                                     | ۴۳/۹                                   | ۰/۳      | ۲۵/۲  | ۰/۳                                 | ۷/۷  | ۳۴                  | ۴۵   | ۲۱ | ۷۵-۱۰۰      | Btk1 |
| -                                     | ۵۴/۰                                   | ۰/۱۵     | ۳۰/۰  | ۰/۲                                 | ۷/۸  | ۳۵                  | ۴۱   | ۲۴ | ۱۰۰-۱۳۵     | Btk2 |
| <u>نیم رخ ۳ - Calcic Haploxeralfs</u> |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| -                                     | ۳۶/۰                                   | ۰/۹      | ۱۶/۲  | ۱/۲۵                                | ۷/۴  | ۳۹                  | ۵۰   | ۱۱ | ۰-۳۰        | Ap   |
| -                                     | ۳۸/۲                                   | ۰/۶      | ۱۴/۹  | ۰/۹۵                                | ۷/۷  | ۵۱                  | ۳۹   | ۱۰ | ۳۰-۵۵       | Bt   |
| -                                     | ۳۹/۱                                   | ۰/۵      | ۱۳/۵  | ۰/۷۰                                | ۷/۷  | ۴۵                  | ۴۸   | ۷  | ۵۵-۹۰       | Btk1 |
| -                                     | ۴۲/۷                                   | ۰/۵      | ۱۲/۳  | ۰/۴                                 | ۷/۸  | ۴۲                  | ۵۰   | ۸  | ۹۰-۱۱۵      | Btk2 |
| -                                     | ۴۵/۰                                   | ۰/۲      | ۱۱/۱  | ۰/۵                                 | ۷/۹  | ۲۶                  | ۶۲   | ۱۲ | ۱۱۵-۱۴۰     | C    |
| <u>نیم رخ ۴ - Typic Calcixerpts</u>   |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| -                                     | ۱۷/۰                                   | ۱/۲      | ۲۲/۴  | ۰/۵۹                                | ۸/۰  | ۳۰                  | ۳۵   | ۳۵ | ۰-۳۰        | Ap   |
| -                                     | ۲۸/۰                                   | ۰/۶۵     | ۲۱/۳  | ۰/۵۲                                | ۸/۰  | ۴۰                  | ۳۹   | ۲۱ | ۳۰-۵۵       | Bk1  |
| -                                     | ۳۰/۴                                   | ۰/۲۵     | ۱۵/۶  | ۰/۵۰                                | ۸/۱  | ۲۵                  | ۴۶   | ۱۹ | ۵۵-۱۱۰      | Bk2  |
| -                                     | ۳۷/۵                                   | ۰/۱      | ۱۳/۳  | ۰/۵۵                                | ۸/۴  | ۱۶                  | ۵۱   | ۳۳ | ۱۱۰-۱۶۰     | C    |
| <u>نیم رخ ۵ - Typic Calcixerpts</u>   |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| ۱/۰                                   | ۲۹/۰                                   | ۱/۳      | ۱۶/۸  | ۰/۷۴                                | ۷/۷  | ۲۲                  | ۴۴   | ۳۴ | ۰-۱۵        | A    |
| ۵/۱                                   | ۳۶/۰                                   | ۰/۶۷     | ۲۰/۷  | ۰/۳۵                                | ۸/۱  | ۳۸                  | ۳۲   | ۳۰ | ۱۵-۴۵       | Byk  |
| ۱/۳                                   | ۴۲/۰                                   | ۰/۴۱     | ۱۹/۳  | ۰/۲۷                                | ۸/۱  | ۳۹                  | ۳۲   | ۲۹ | ۴۵-۷۰       | Bk1  |
| ۰/۷                                   | ۴۸/۰                                   | ۰/۳۴     | ۱۷/۱  | ۰/۴۳                                | ۸/۲  | ۲۹                  | ۳۱   | ۴۰ | ۷۰-۱۴۰      | Bk2  |
| <u>نیم رخ ۶ - Typic Aquisalids</u>    |  |          |   |                                     |      |                     |      |    |             |      |
| ۰/۵                                   | ۲۳/۰                                   | ۰/۶      | ۴/۵   | ۴۶/۳                                | ۷/۲۵ | ۲۰                  | ۲۶   | ۵۴ | ۰-۲۰        | Az   |
| ۰/۷                                   | ۲۴/۵                                   | ۰/۴      | ۴/۱   | ۶۱/۲                                | ۷/۴  | ۱۶                  | ۲۵   | ۵۹ | ۲۰-۴۵       | Bz1  |
| ۰/۲                                   | ۳۲/۳                                   | ۰/۲      | ۳/۹   | ۵۵/۵                                | ۷/۷  | ۱۷                  | ۲۱   | ۶۲ | ۴۵-۶۵       | Cz1  |
| -                                     | ۳۶/۱                                   | -        | ۴/۴   | ۴۸/۳                                | ۸/۰  | ۱۵                  | ۱۸   | ۶۷ | ۶۵-۹۰       | Cz2  |
| -                                     | ۴۱/۸                                   | -        | ۳/۳   | ۵۴/۲                                | ۸/۰  | ۱۳                  | ۱۰   | ۷۷ | ۹۰-۱۳۰      | C    |

ادامه جدول ۲.

| گنج                            | کربنات کلسیم<br>معادل<br>----- % ----- | کربن آلی | ظرفیت تبادل کاتیونی<br>cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | هدایت الکتریکی<br>dSm <sup>-1</sup> | پ هاش | درصد توزیع ذرات خاک |      |    | عمق<br>(cm) | افق |
|--------------------------------|--|----------|---|-------------------------------------|-------|---------------------|------|----|-------------|-----|
|                                |  |          |   |                                     |       | رس                  | سیلت | شن |             |     |
| نیم رخ ۷ - Aridic Calcustepts  |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| -                              | ۴۵/۰                                   | ۰/۵      | ۱۴/۵  | ۰/۶                                 | ۷/۸   | ۲۶                  | ۵۱   | ۲۳ | ۰-۳۰        | Ap  |
| -                              | ۵۸/۰                                   | ۰/۲      | ۱۶/۰  | ۰/۴                                 | ۸/۱   | ۳۰                  | ۵۴   | ۱۶ | ۳۰-۶۵       | Bk1 |
| -                              | ۵۹/۵                                   | ۰/۱      | ۱۶/۵  | ۰/۳                                 | ۸/۲   | ۲۷                  | ۵۳   | ۲۰ | ۶۵-۱۰۰      | Bk2 |
| -                              | ۶۴/۵                                   | ۰/۱      | ۱۳/۸  | ۰/۳                                 | ۸/۱   | ۲۸                  | ۵۰   | ۲۲ | ۱۰۰-۱۴۰     | C   |
| نیم رخ ۸ - Gypsic Haplosalids  |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| ۲/۲                            | ۲۶/۶                                   | ۱/۲۵     | ۱۱/۲  | ۱۸۹                                 | ۷/۳   | ۲۴                  | ۴۶   | ۳۰ | ۰-۱۵        | Az  |
| ۱۹/۷                           | ۲۳/۴                                   | ۰/۵      | ۱۳/۳  | ۲۵                                  | ۷/۶   | ۳۷                  | ۳۰   | ۳۳ | ۱۵-۴۵       | By1 |
| ۱۶/۶                           | ۲۵/۷                                   | ۰/۲      | ۱۱/۶  | ۲۲                                  | ۷/۷   | ۳۶                  | ۳۲   | ۳۲ | ۴۵-۷۰       | By2 |
| ۱۴/۸                           | ۲۴/۰                                   | ۰/۱      | ۱۰/۲  | ۲۳                                  | ۷/۹   | ۳۰                  | ۴۷   | ۲۳ | ۷۰-۱۴۰      | By3 |
| نیم رخ ۹ - Typic Endoaqualfs   |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| -                              | ۵۲/۸                                   | ۱/۶      | ۲۳/۱  | ۰/۶                                 | ۷/۴   | ۳۲                  | ۴۶   | ۲۲ | ۰-۲۰        | Ap  |
| -                              | ۵۳/۰                                   | ۱/۳      | ۲۶/۷  | ۰/۵                                 | ۷/۵   | ۴۱                  | ۴۵   | ۱۴ | ۲۰-۷۰       | Btg |
| -                              | ۶۴/۵                                   | ۱/۰      | ۱۸/۱  | ۰/۴                                 | ۷/۶   | ۲۸                  | ۲۹   | ۴۳ | ۷۰-۱۱۵      | Bg  |
| نیم رخ ۱۰ - Gypsic Calcustepts |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| ۷/۶                            | ۴۶/۵                                   | ۰/۵      | ۹/۹   | ۱/۲                                 | ۷/۶   | ۱۶                  | ۵۷   | ۲۷ | ۰-۳۰        | Ap  |
| ۸/۲                            | ۴۷/۳                                   | ۰/۳      | ۱۱/۷  | ۱/۰                                 | ۷/۸   | ۱۶                  | ۵۲   | ۳۲ | ۳۰-۵۵       | Byk |
| ۱۹/۹                           | ۴۴/۳                                   | ۰/۲      | ۱۰/۴  | ۲/۷                                 | ۷/۵   | ۲۱                  | ۴۴   | ۳۵ | ۵۵-۱۱۰      | By1 |
| ۲۷/۶                           | ۳۵/۸                                   | ۰/۱      | ۸/۷   | ۳/۲                                 | ۷/۹   | ۱۷                  | ۴۹   | ۳۴ | ۱۱۰-۱۶۰     | By2 |
| نیم رخ ۱۱ - Typic Argiustolls  |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| -                              | ۱۳/۳                                   | ۱/۵      | ۱۶/۹  | ۰/۷                                 | ۷/۶   | ۲۵                  | ۵۲   | ۲۳ | ۰-۳۰        | Ap  |
| -                              | ۱۹/۰                                   | ۰/۶      | ۱۹/۴  | ۰/۷                                 | ۷/۸   | ۴۳                  | ۴۵   | ۱۲ | ۳۰-۷۰       | Bt  |
| -                              | ۲۸/۶                                   | ۰/۲      | ۱۸/۳  | ۰/۵                                 | ۷/۸   | ۴۴                  | ۳۹   | ۱۷ | ۷۰-۱۲۰      | Btk |
| نیم رخ ۱۲ - Calcic Argixerolls |  |          |   |                                     |       |                     |      |    |             |     |
| -                              | ۲۱/۰                                   | ۲/۱      | ۲۹/۳  | ۰/۳                                 | ۷/۱   | ۳۲                  | ۳۸   | ۳۰ | ۰-۲۰        | A   |
| -                              | ۱۷/۵                                   | ۱/۴۳     | ۳۴/۵  | ۰/۲                                 | ۷/۳   | ۴۶                  | ۳۴   | ۲۰ | ۲۰-۴۵       | Bt  |
| -                              | ۲۶/۳                                   | ۰/۶      | ۲۷/۹  | ۰/۲                                 | ۷/۵   | ۴۱                  | ۳۴   | ۲۵ | ۴۵-۸۰       | Btk |
| -                              | ۵۵/۰                                   | ۰/۲      | ۲۶/۶  | ۰/۱                                 | ۷/۶   | ۲۸                  | ۳۰   | ۴۲ | ۸۰-۱۲۰      | C   |



ادامه جدول ۲.

| گج                              | کربنات کلسیم<br>معادل | کربن<br>آلی | ظرفیت تبادل کاتیونی<br>cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | هدایت الکتریکی<br>dSm <sup>-1</sup> | pH  | درصد توزیع ذرات خاک |      |    | عمق<br>(cm) | افق  |
|---------------------------------|-----------------------|-------------|---|-------------------------------------|-----|---------------------|------|----|-------------|------|
|                                 |                       |             |   |                                     |     | رس                  | سیلت | شن |             |      |
| نیم رخ ۱۳ - Calcic Haploxeralfs |                       |             |   |                                     |     |                     |      |    |             |      |
| ۰/۷                             | ۳۹/۳                  | ۰/۵         | ۱۳/۴  | ۰/۸                                 | ۷/۸ | ۳۳                  | ۴۷   | ۲۰ | ۰-۲۵        | Ap   |
| ۱/۱                             | ۴۴/۱                  | ۰/۳         | ۱۷/۱  | ۱/۳                                 | ۸/۱ | ۴۹                  | ۴۲   | ۹  | ۲۵-۵۰       | Btk  |
| ۱۱/۹                            | ۳۵/۵                  | ۰/۲         | ۱۴/۷  | ۳/۳                                 | ۸/۲ | ۳۴                  | ۳۶   | ۳۰ | ۵۰-۸۰       | Byk  |
| ۱۹/۲                            | ۳۴/۶                  | ۰/۱         | ۱۱/۱  | ۴/۶                                 | ۷/۹ | ۲۴                  | ۴۴   | ۳۲ | ۸۰-۱۳۰      | By   |
| نیم رخ ۱۴ - Gypsic Calcicstepts |                       |             |   |                                     |     |                     |      |    |             |      |
| ۲۵/۰                            | ۴۱/۳                  | ۱/۴         | ۱۱/۷  | ۴/۴                                 | ۷/۵ | ۲۳                  | ۵۰   | ۲۷ | ۰-۲۰        | Ap   |
| ۳۶/۳                            | ۴۵/۰                  | ۰/۷         | ۱۵/۹  | ۸/۳                                 | ۸/۰ | ۴۲                  | ۳۶   | ۲۲ | ۲۰-۴۰       | Byk1 |
| ۴۲/۰                            | ۴۰/۰                  | ۰/۵         | ۱۱/۷  | ۱۱/۵                                | ۸/۱ | ۴۴                  | ۲۰   | ۳۶ | ۴۰-۸۰       | Byk2 |
| ۴۱/۰                            | ۴۲/۵                  | ۰/۱         | ۱۲/۶  | ۱۲/۷                                | ۸/۲ | ۵۱                  | ۲۳   | ۲۶ | ۸۰-۱۲۰      | Byk3 |

مناسب، آبشویی نسبتاً زیاد کربنات کلسیم از سطح و تکامل نسبتاً زیاد می‌باشند (جدول های ۱ و ۲).

افزایش بارندگی (رطوبت) علاوه بر افزایش میزان سرعت هوادیدگی و آبشویی مواد، موجب آزاد سازی بیشتر ترکیبات آهن از ساختار کانی‌ها و افزایش نسبی آنها در نیم‌رخ خاک می‌گردد. به علاوه بیشتر بودن بارندگی موجب افزایش تراکم پوشش گیاهی و ازدیاد فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تشکیل بیشتر کانی‌های فرو مگنتیک و در مجموع افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌ها می‌گردد (۷).

میزان کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD بین ۲۳٪ در افق Byk3 نیم‌رخ ۱۴ تا ۹۱/۱٪ در افق Bt نیم‌رخ ۱۲ متغیر بوده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر گردید شرایطی مانند

فرو مگنتیک (مانند مگنتیت و مگهمیت) می‌شود. چنین شرائطی در نیم‌رخ شماره ۹ در منطقه دشت ارژن مشاهده گردید که به رغم بارندگی نسبتاً مناسب، میزان زیاد رس و تکامل خاک، دارای پذیرفتاری مغناطیسی اندکی می‌باشد. کاهش میزان تشکیل اکسیدهای بلورین آهن در خاک‌های با زه‌کشی ضعیف، منجر به افزایش نسبت میزان ترکیبات آهن بی شکل و آلی به ترکیبات بلورین آهن می‌شود (۸، ۱۳، ۲۳ و ۲۴).

بیشترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی در میان خاک‌های مطالعه شده در نیم‌رخ ۱۲ در منطقه دشتک سپیدان مشاهده گردید. عواملی که احتمالاً موجب این افزایش گردیده است از جمله شامل بارندگی زیاد، پایداری ژئومورفیک (فیزیوگرافی دشت مرتفع)، ماده آلی نسبتاً زیاد در سطح خاک، زه‌کشی

جدول ۳. برخی خصوصیات پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مطالعه شده\*

| $\% \Delta \chi_{fd}$         | $\% \chi_{fd}(CBD)$ | $\% \chi_{fd}$ | $\% \Delta \chi_{lf}$ | $\chi_{lf}^m (CBD)$ | $\chi_{lf}^m$ | $\chi_{lf}^{od}$ | افق  |
|-------------------------------|---------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------|------------------|------|
| نیم رخ ۱- Typic Haplocalcids  |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۶۹/۰                          | ۰/۹                 | ۲/۹            | ۵۴/۵                  | ۹/۴                 | ۲۰/۶          | ۱۲               | Ap   |
| ۵۷/۷                          | ۰/۹                 | ۲/۲            | ۴۸/۳                  | ۵/۸                 | ۱۱/۲          | ۷                | Bk   |
| ۴۴/۱                          | ۰/۶                 | ۱/۱            | ۳۸/۶                  | ۶/۱                 | ۹/۹           | ۵                | C    |
| نیم رخ ۲- Calcic Haploxeralfs |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۷۱/۱                          | ۱/۶                 | ۵/۶            | ۶۶/۱                  | ۱۵/۵                | ۴۵/۸          | ۳۱               | Ap   |
| ۶۰/۷                          | ۱/۷                 | ۴/۳            | ۵۹/۹                  | ۲۰/۴                | ۵۰/۹          | ۳۱               | Bt   |
| ۴۷/۱                          | ۲/۰                 | ۳/۸            | ۴۴/۷                  | ۲۶/۹                | ۴۸/۶          | ۲۷               | Btk1 |
| ۲۹/۲                          | ۲/۳                 | ۳/۳            | ۳۹/۲                  | ۳۳/۲                | ۵۴/۷          | ۲۵               | Btk2 |
| نیم رخ ۳- Calcic Haploxeralfs |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۵۵/۵                          | ۱/۳                 | ۲/۹            | ۴۹/۵                  | ۲۰/۲                | ۴۰/۰          | ۲۵               | Ap   |
| ۵۰/۱                          | ۱/۳                 | ۲/۷            | ۴۸/۱                  | ۱۹/۶                | ۳۷/۹          | ۲۳               | Bt   |
| ۴۰/۴                          | ۱/۶                 | ۲/۷            | ۳۷/۶                  | ۱۹/۷                | ۳۱/۶          | ۱۹               | Btk1 |
| ۳۵/۷                          | ۱/۶                 | ۲/۵            | ۳۸/۳                  | ۱۸/۶                | ۳۰/۱          | ۱۷               | Btk2 |
| ۲۷/۲                          | ۱/۲                 | ۱/۷            | ۳۵/۵                  | ۱۱/۸                | ۱۸/۳          | ۱۰               | C    |
| نیم رخ ۴- Typic Calcixercepts |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۳۹/۳                          | ۱/۶                 | ۲/۷            | ۴۳/۲                  | ۱۶/۱                | ۲۸/۴          | ۲۳               | Ap   |
| ۳۹/۶                          | ۱/۶                 | ۲/۶            | ۳۸/۸                  | ۱۶/۴                | ۲۶/۸          | ۱۹               | Bk1  |
| ۳۳/۲                          | ۱/۵                 | ۲/۲            | ۳۱/۷                  | ۱۳/۸                | ۲۰/۲          | ۱۴               | Bk2  |
| ۲۵/۴                          | ۱/۵                 | ۲/۰            | ۲۷/۲                  | ۱۱/۷                | ۱۶/۰          | ۱۰               | C    |
| نیم رخ ۵- Typic Calcixercepts |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۴۶/۲                          | ۰/۷                 | ۱/۳            | ۳۸/۳                  | ۱۷/۳                | ۲۸/۰          | ۱۹               | A    |
| ۳۹/۱                          | ۰/۸                 | ۱/۳            | ۳۷/۷                  | ۱۷/۲                | ۲۷/۷          | ۱۶               | Byk  |
| ۳۵/۲                          | ۰/۸                 | ۱/۲            | ۳۳/۹                  | ۱۶/۴                | ۲۴/۹          | ۱۴               | Bk1  |
| ۳۰/۰                          | ۰/۸                 | ۰/۹            | ۳۳/۳                  | ۱۴/۶                | ۲۱/۸          | ۱۱               | Bk2  |
| نیم رخ ۶- Typic Aquisalids    |                     |                |                       |                     |               |                  |      |
| ۴۰/۸                          | ۰/۸                 | ۱/۴            | ۳۶/۳                  | ۱۳/۵                | ۲۱/۲          | ۱۶               | Az   |
| ۳۰/۲                          | ۰/۸                 | ۱/۲            | ۲۹/۴                  | ۱۲/۴                | ۱۷/۵          | ۱۳               | Bz1  |
| ۲۵/۱                          | ۰/۷                 | ۱/۰            | ۲۷/۱                  | ۱۳/۰                | ۱۷/۹          | ۱۲               | Cz1  |
| ۲۶/۸                          | ۰/۸                 | ۱/۱            | ۲۸/۸                  | ۱۳/۴                | ۱۸/۸          | ۱۲               | Cz2  |
| ۲۲/۶                          | ۰/۵                 | ۰/۷            | ۲۶/۴                  | ۱۱/۴                | ۱۵/۵          | ۹                | C    |

ادامه جدول ۳.

| افق                            | $\chi_{lf}^{od}$ | $\chi_{lf}^m$ | $\chi_{lf}^m$ (CBD) | $\% \Delta \chi_{lf}$ | $^x \% \chi_{lf}$ | $\% \chi_{lf}$ (CBD) | $\% \Delta \chi_{lf}$ |
|--------------------------------|------------------|---------------|---------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| نیم رخ ۷- Aridic Calcustepts   |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Ap                             | ۱۷               | ۳۱/۴          | ۱۹/۴                | ۳۸/۱                  | ۱/۳               | ۰/۷                  | ۴۴/۹                  |
| Bk1                            | ۱۲               | ۲۸/۸          | ۱۸/۲                | ۳۶/۹                  | ۱/۴               | ۰/۸                  | ۴۰/۰                  |
| Bk2                            | ۱۱               | ۲۷/۳          | ۱۸/۵                | ۳۲/۲                  | ۱/۱               | ۰/۷                  | ۳۵/۹                  |
| C                              | ۹                | ۲۵/۵          | ۱۸/۳                | ۲۸/۲                  | ۰/۶               | ۰/۴                  | ۳۱/۴                  |
| نیم رخ ۸- Gypsic Haplosalids   |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Az                             | ۱۳               | ۱۸/۸          | ۱۳/۲                | ۲۹/۹                  | ۱/۰               | ۰/۷                  | ۲۹/۴                  |
| By1                            | ۱۷               | ۳۰/۵          | ۲۲/۹                | ۲۵/۰                  | ۱/۲               | ۰/۹                  | ۲۷/۶                  |
| By2                            | ۱۰               | ۱۷/۶          | ۱۳/۲                | ۲۴/۷                  | ۰/۹               | ۰/۶                  | ۲۸/۰                  |
| By3                            | ۱۰               | ۱۶/۴          | ۱۲/۵                | ۲۴/۱                  | ۰/۵               | ۰/۴                  | ۲۴/۷                  |
| نیم رخ ۹- Typic Endoaqualfs    |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Ap                             | ۱۱               | ۲۴/۸          | ۷/۲                 | ۷۱/۰                  | ۱/۲               | ۰/۵                  | ۵۹/۳                  |
| Btg                            | ۹                | ۲۰/۱          | ۵/۰                 | ۷۵/۳                  | ۰/۸               | ۰/۳                  | ۶۴/۳                  |
| Bg                             | ۸                | ۲۳/۷          | ۸/۳                 | ۶۵/۱                  | ۰/۵               | ۰/۳                  | ۴۲/۹                  |
| نیم رخ ۱۰- Gypsic Calcustepts  |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Ap                             | ۲۸               | ۶۲/۷          | ۲۸/۷                | ۵۴/۲                  | ۲/۱               | ۰/۸                  | ۶۱/۱                  |
| Byk                            | ۲۵               | ۵۶/۶          | ۲۸/۳                | ۵۰/۰                  | ۱/۵               | ۰/۷                  | ۵۴/۷                  |
| By1                            | ۲۰               | ۵۶/۶          | ۳۶/۱                | ۳۶/۲                  | ۰/۶               | ۰/۴                  | ۳۸/۴                  |
| By2                            | ۱۷               | ۴۷/۲          | ۳۰/۶                | ۳۵/۱                  | ۰/۶               | ۰/۴                  | ۳۲/۲                  |
| نیم رخ ۱۱- Typic Argiustolls   |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Ap                             | ۳۹               | ۴۶/۴          | ۱۶/۷                | ۶۴/۰                  | ۴/۸               | ۲/۰                  | ۵۷/۳                  |
| Bt                             | ۴۷               | ۵۸/۸          | ۲۲/۹                | ۶۱/۱                  | ۴/۷               | ۲/۲                  | ۵۲/۴                  |
| Btk                            | ۳۱               | ۴۳/۶          | ۲۲/۱                | ۴۹/۴                  | ۲/۹               | ۱/۶                  | ۴۳/۳                  |
| نیم رخ ۱۲- Calcic Argixerolls  |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| A                              | ۵۶               | ۷۴/۳          | ۱۰/۳                | ۸۶/۱                  | ۸/۷               | ۱/۸                  | ۷۹/۵                  |
| Bt                             | ۱۰۶              | ۱۳۲/۴         | ۱۱/۸                | ۹۱/۱                  | ۱۰/۷              | ۱/۲                  | ۸۸/۸                  |
| Btk                            | ۷۸               | ۱۰۷/۳         | ۱۸/۲                | ۸۳/۰                  | ۶/۹               | ۱/۴                  | ۸۰/۱                  |
| C                              | ۱۸               | ۴۰/۳          | ۱۹/۶                | ۵۱/۴                  | ۶/۱               | ۲/۹                  | ۵۲/۳                  |
| نیم رخ ۱۳- Calcic Haploxeralfs |                  |               |                     |                       |                   |                      |                       |
| Ap                             | ۲۸               | ۴۷/۳          | ۲۷/۷                | ۴۱/۵                  | ۱/۹               | ۱/۱                  | ۴۴/۴                  |
| Btk                            | ۲۶               | ۴۷/۸          | ۲۸/۷                | ۴۰/۰                  | ۱/۴               | ۰/۸                  | ۴۴/۳                  |
| Byk                            | ۲۱               | ۴۰/۳          | ۲۶/۹                | ۳۳/۳                  | ۱/۰               | ۰/۷                  | ۳۱/۰                  |
| By                             | ۱۶               | ۳۵/۴          | ۲۴/۴                | ۳۱/۱                  | ۰/۶               | ۰/۵                  | ۲۴/۹                  |

ادامه جدول ۳.

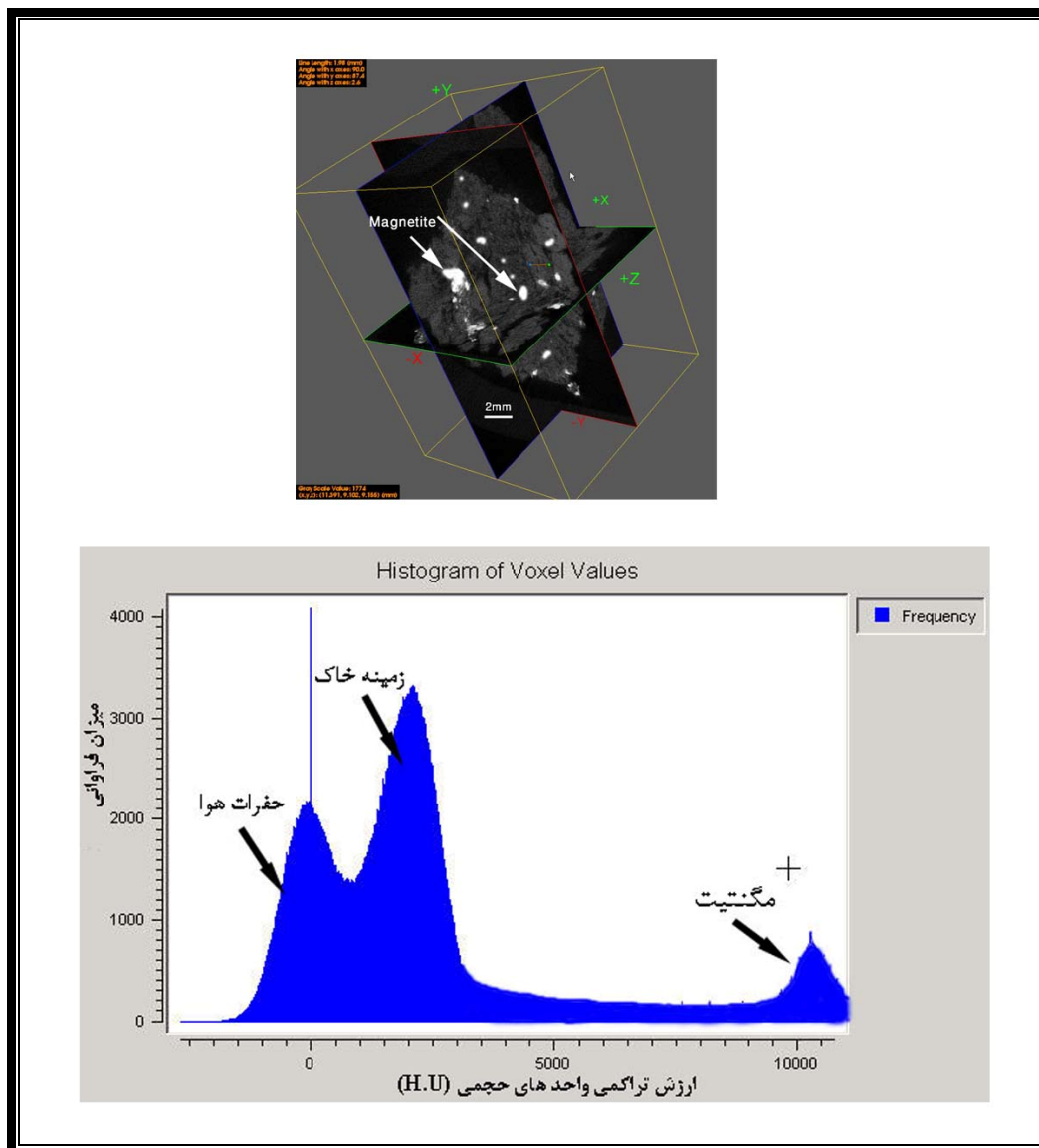
| افق                            | $\chi_{lf}^{od}$ | $\chi_{lf}^m$ | $\chi_{lf}^m$ (CBD) | $\% \Delta \chi_{lf}$ | $\% \chi_{lf}^x$ | $\% \chi_{lf}^{(CBD)}$ | $\% \Delta \chi_{lf}^d$ |
|--------------------------------|------------------|---------------|---------------------|-----------------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| نیم رخ ۱۴ - Gypsic Calcustepts |                  |               |                     |                       |                  |                        |                         |
| Ap                             | ۱۲               | ۳۹/۶          | ۲۸/۱                | ۲۹/۱                  | ۱/۲              | ۰/۸                    | ۳۰/۲                    |
| Byk1                           | ۹                | ۵۰/۶          | ۳۷/۱                | ۲۶/۶                  | ۰/۴              | ۰/۳                    | ۲۵/۰                    |
| Byk2                           | ۸                | ۴۶/۷          | ۳۴/۴                | ۲۶/۳                  | ۰/۳              | ۰/۲                    | ۲۴/۱                    |
| Byk3                           | ۶                | ۳۶/۷          | ۲۸/۳                | ۲۳/۰                  | ۰/۱              | ۰/۱                    | ۲۲/۲                    |

نیم‌رخ‌های ۹ و ۱۲ نیز در مناطق نسبتاً پر باران می‌باشند که احتمالاً بارندگی زیاد موجب آبشویی ترکیبات آهن پدوژنیک تشکیل شده در سطح خاک به افق B گردیده است. درصد نسبتاً بالای کاهش میزان پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD در نیم‌رخ ۹ که دارای شرایط زه‌کشی ضعیف می‌باشد، احتمالاً به دلیل زیاد بودن ترکیبات بی‌شکل و آلی آهن می‌باشد که هر دوی این ترکیبات توسط تیمار CBD از خاک خارج می‌شوند. این میزان کاهش در نیم‌رخ ۶ که به میزان کمتری دارای شرایط اکوتیک بوده، کمتر بوده است. بر طبق نظریات فنگ و جانسون (۹) و گرمیلی و همکاران (۱۳) خاک‌های با زه‌کشی مناسب معمولاً دارای پذیرفتاری مغناطیسی بیشتری نسبت به خاک‌های با زه‌کشی ضعیف می‌باشند. بر طبق نظر نامبردگان شرایط بی‌هوایی منجر به عدم تبدیل کانی‌های پارامگنتیک و کتد آنتی فرومگنتیک (مانند لپیدوکروسیت و گوئیتیت) به کانی‌های فری مگنتیک (مانند مگنتیت و مگهمیت) می‌شود.

مقدار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در دامنه ۰/۱ در افق Byk3 نیم‌رخ ۱۴ تا ۱۰/۷ در افق Bt نیم‌رخ ۱۲ متغیر بوده است. همان‌گونه که در قسمت قبلی بیان گردید، بیشتر بودن این عامل نشان دهنده نقش بیشتر ذرات مغناطیسی کوچک‌تر از ۰/۳ میکرومتر (عمدتاً پدوژنیک) در پذیرفتاری مغناطیسی می‌باشد. درصد کاهش پذیرفتاری مغناطیسی وابسته

بارندگی مناسب، میزان کافی مواد آلی، فیزیوگرافی پایدار و زه‌کشی خوب از جمله مواردی هستند که احتمالاً در منطقه دشتک سپیدان منجر به افزایش تشکیل ذرات آهن مغناطیسی پدوژنیک گردیده است. در مقابل نیز در اغلب مناطق با بارندگی اندک و تکامل پروفیلی کمتر، تغییرات میزان پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD به حداقل رسیده است. فنگ و جانسون (۹) و مالینز (۲۰) ارتباط برخی عوامل خاک ساز به ویژه اقلیم را بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی خاک بررسی نموده‌اند و گزارش‌های مشابهی را ارائه نموده‌اند. اولیائی و همکاران (۱) در مطالعه منشاء پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مناطق مختلف اقلیمی استان کهگیلویه و بویراحمد، ۲۶ تا ۹۳ درصد کاهش در میزان پذیرفتاری مغناطیسی را پس از تیمار CBD، مشاهده نمودند. در مطالعه نامبردگان، مقادیر بیشتر کاهش، در خاک‌های با تکامل پروفیلی بیشتر و عمدتاً در سطح خاک گزارش گردیده است.

در تمامی نیم‌رخ‌ها به جز نیم‌رخ‌های ۹ و ۱۲ با افزایش عمق درصد کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD کاهش یافته است که نشان‌دهنده بیشتر بودن تأثیر فرایندهای هوازدگی در سطح خاک می‌باشد که موجب آزاد سازی بیشتر ترکیبات آهن از داخل کانی‌های خاک و تشکیل پدوژنیک آنها گردیده است. مطالعات مشابه در کهگیلویه و بویراحمد نتایج نسبتاً مشابهی را نشان داده است (۱ و ۲۳).



شکل ۲ (بالا). تصویر سه بعدی میکروکت اسکن (توان تفکیک ۳۳ میکرومتر) نشان‌دهنده آرایش اجزاء نمونه دست نخورده خاک افق Byk2 نیم رخ ۱۴، نقاط سفید رنگ مربوط به حضور مگنتیت با درجه تراکم بسیار بیشتر از زمینه خاک می‌باشد. (پائین)- هیستوگرام توزیع تراکمی واحدهای حجمی (voxel) موجود در این خاک براساس شاخص تراکمی HU.

زیر بیان می‌گردد:

$$\% \Delta \chi_{if} = 0.09 (\% \chi_{fd}) - 1.91, n=55, R^2=0.58, P<0.01$$

این رابطه بیان گر این مطلب است که ترکیبات مغناطیسی پدوژنیک عمدتاً در دامنه اندازه ای کوچک تر از ۰/۰۳ میکرومتر می‌باشند، چرا که خروج آنها به میزان زیادی بر روی پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس تأثیر گذار بوده

به فرکانس پس از تیمار CBD نیز در دامنه ۲۲/۲ تا ۸۸/۸ در صد بوده است.

نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار میان در صد کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD ( $\% \chi_{fd}$ ) و در صد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\% \chi_{if}$ ) در خاک‌های مطالعه شده وجود دارد. این ارتباط به وسیله معادله

است. موارد مشابهی توسط سایر محققان در خاک‌های استان کهگیلویه و بویر احمد گزارش شده است (۲۳). نیم‌رخ‌های خاک شماره ۸، ۱۰ و ۱۴ روی رسوبات گچی سازندهای گچساران، رازک و آغاچاری تشکیل شده‌اند. این سازندها متشکل از رسوبات تبخیری ضخیم و گسترده همراه با لایه‌های ژپس با میان لایه‌های مارن قرمز و خاکستری و اکسید مغناطیسی آهن (مگنتیت با فرمول شیمیایی  $Fe_3O_4$ ) می‌باشند.

ترکیبات پدوژنیک فری مگنتیک از جمله مگهمیت از نظر اندازه بسیار کوچک‌تر از فری مگنتیک‌های توارثی از جمله مگنتیت می‌باشند (۲۶). این ذرات مگنتیت عمدتاً در ابعاد سیلت، شن و درشت‌تر بوده و به راحتی به وسیله آهن ربا از خاک و یا سنگ مادر هوا دیده خارج می‌شوند. تیمار CBD توانایی انحلال و خروج این ترکیب اکسید آهن را از خاک ندارد، به همین دلیل تیمار CBD کمترین اثر را بر کاهش پذیرفتاری مغناطیسی این خاک‌ها داشته است.

تصاویر به دست آمده توسط میکروکت اسکن حضور این ترکیبات را که دارای تراکم و دانسیته بسیار زیادتری نسبت به زمینه خاک داشته‌اند را نشان می‌دهد (شکل ۲ بالا). به طور کلی درجه تراکم زمینه خاک‌های مورد مطالعه بر اساس شاخص H.U. در دامنه تقریبی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ بوده است در حالی که این شاخص برای ذرات مگنتیت در دامنه ۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ بوده است که بسیار بیشتر از زمینه خاک می‌باشد. هیستوگرام توزیع تراکمی نمونه خاک دست نخورده نیم‌رخ شماره ۱۴ حاوی مگنتیت، حضور این ماده را نشان می‌دهد (شکل ۲ پایین).

همچنین عدم مشاهده نقاط متراکم و با دانسیته بالا در خاک‌های با حداکثر میزان پذیرفتاری مغناطیسی توسط این دستگاه حتی با قدرت تفکیک ۱۰ میکرومتر، نشان دهنده کوچک‌تر بودن اندازه این ترکیبات از توان تفکیک دستگاه می‌باشد. با افزایش فن آوری در ساخت

دستگاه‌های میکروکت اسکن و افزوده شدن به قدرت تفکیک تصاویر به دست آمده از آن می‌توان مستقیماً حضور ترکیبات مغناطیسی پدوژنیک را در خاک مشاهده نمود. نتایج مشابهی در خاک‌های گچی استان کهگیلویه و بویر احمد نیز گزارش شده است (۱ و ۲۴).

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تکامل بیشتر خاک در نتیجه تأثیر عوامل خاک‌ساز به ویژه اقلیم، عامل مهمی در تغییرات میزان اکسیدهای مغناطیسی آهن فری مگنتیک از نوع پدوژنیک بوده است. بر این اساس میزان کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD در خاک‌های تکامل یافته تر نسبت به خاک‌های کمتر تکامل یافته و همچنین در افق‌های سطحی نسبت به افق‌های زیرین، بیشتر بوده است. به علاوه کاهش پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس که بیانگر اهمیت نسبی ذرات بسیار ریز مغناطیسی پدوژنیک می‌باشد، پس از تیمار CBD روند نسبتاً مشابهی را با پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مورد مطالعه نشان داد. رابطه ای مثبت و معنی‌دار میان در صد کاهش پذیرفتاری مغناطیسی پس از تیمار CBD و در صد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در خاک‌های مورد مطالعه مشاهده گردید. تصاویر به دست آمده از میکروکت اسکن با قدرت تفکیک ۳۳ میکرومتر امکان مشاهده ترکیبات اکسید آهن مغناطیسی لیتوژنیک را در مواد مادری و خاک‌های تشکیل شده روی سازندهای گچی استان فراهم نمود. با توجه به مزایای نسبی اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی که در مقدمه بر شمرده شد و مطالعات اندک انجام شده بر روی خاک‌های ایران، نیاز به تحقیق بیشتر در مورد عوامل مؤثر بر تغییرات این عامل ضروری به نظر می‌رسد.

## منابع مورد استفاده

۱. اولیائی، ح.، ع. ابطحی و ر. ج. هک. ۱۳۸۴. بررسی منشاء و اثرات تیمارهای حرارتی بر قابلیت مغناطیسی خاک‌های استان کهگیلویه و بویر احمد. خلاصه مقالات نهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه تهران. صفحه ۳۴۶-۳۴۷.
۲. بنائی، م. ح. ۱۳۷۸. نقشه رژیم های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، وزارت جهاد کشاورزی، ایران.
۳. ترابی گل سفیدی، ح. و م. کریمیان اقبال. ۱۳۸۱. مطالعه و بررسی تکامل خاک با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان. مجله علوم خاک و آب ۱۶ (۲): ۲۰۶-۲۱۳.
4. Blume, H.P. and U. Schwertmann. 1969. Genetic evaluation of profile distribution of Al, Fe and Mn oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 438-444.
5. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. PP. 891-901. *In: C.A. Black (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.*
6. Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. PP. 545-567. *In: C.A. Black (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. American Society of Agronomy, Madison, WI.*
7. Dearing, J.A., K.L. Hay, S.M.J. Balsan, A.S. Huddleston, E.M.H. Wellington and P.J. Loveland. 1996. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of contributing theories using a national data set. *Geophys. J. Intern.* 127: 728-734.
8. De Jong, E., D.J. Pennock and P.A. Nestor. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena* 40: 291-305.
9. Feng, Z.D. and W.C. Johnson. 1995. Factors affecting the magnetic susceptibility of a loess-soil sequence, Barton County, Kansas, USA. *Catena* 24: 25-37.
10. Fine, P., M.J. Singer, R. Laven, K. Verosub and R.J. Southard. 1989. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. *Geoderma* 44: 287-306.
11. Fine, P., M.J. Singer and K.L. Verosub. 1992. The use of magnetic susceptibility measurements in assessing soil uniformity in chronosequence studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1195-1199.
12. Fine, P., K.L. Verosub and M.J. Singer. 1995. Pedogenic and lithogenic contributions to the magnetic susceptibility record of the Chinese loess paleosol sequence. *Geophysical Journal International.* 122: 97-107.
13. Grimley, D.A., N.K. Arruda and M.W. Bramstedt. 2004. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. *Catena* 58: 183-213.
14. Holmgren, G.G.S. 1976. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 210-211.
15. Hounsfeld, G.N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. description of system, *Br. J. Radiol.* 46: 1016-1022.
16. Jackson, M.L. 1975. Soil chemical analysis-advanced course. Univ. of Wisconsin, College of Agric., Dept. of Soil Sci. Madison, WI.
17. Ketchman, R. and W.D. Carlson. 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray tomographic imagery: application to geosciences. *Comp. Geosci.* 27: 381-400.
18. McKeague, J.A. and J.H. Day. 1966. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 13-22.
19. McKeague, J. A., J.E. Brydon and N.M. Miles. 1971. Differentiation of forms of extractable iron and aluminum in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 38-53.
20. Mullins, C.E. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-A review. *J. Soil Sci.* 28: 223-246.
21. Nafeh, M.H. and M.K. Brussel. 1985. Electricity and magnetism. John Wiley & Sons Pub., New York.
22. Oades, J.M. 1963. The nature and distribution of iron compounds in soils. *Soils and Fert.* 26: 69-80.
23. Owliaie, H.R., R.J. Heck and A. Abtahi. 2006a. The magnetic susceptibility of soils in Kohgilouye, Iran. *Canadian J. Soil Sci.* 86: 97-107.
24. Owliaie, H.R., R.J., Heck and A. Abtahi. 2006b. Distribution of magnetic susceptibility in Kohgilouye Boyerahmad soils, southwestern Iran. *Proceeding of 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, Pennsylvania. USA.*
25. Richards, L.A. (ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handb. No. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
26. Schwertmann, U. and R.M. Taylor. 1989. Iron oxides. PP. 379-438. *In: Dixon, J.B. and S.B. Weed, (Eds.), Minerals in soil environment. Soil Science Society of America, Madison, USA.*

27. Singer, M.J. and P. Fine. 1989. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of California soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1119-1127.
28. Soil Survey Staff, 1993. *Soil Survey Manual*. USDA. Handbook No. 18. Washington, DC.
29. Soil Survey Staff, 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. USDA, NRCS. Washington, DC.
30. Thomasson, A.J. and P. Bullock. 1975. Pedology and hydrology of some surface water gley soils. *Soil Sci.* 119: 339-348.
31. Thompson, R. and F. Oldfield. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London.
32. U. S. Salinity Laboratory Staff. 1945. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA. Handbook 60, Washington D.C.
33. Verosub, K.L., P. Fine, M.J. Singer and J. TenPas. 1993. Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess-paleosol sequences. *Geology* 21: 1011-1014.
34. Walker A.L. 1983. The effects of magnetite on oxalate- and dithionite-extractable iron. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:1022-1026.