

تأثیر مواد مادری، گچ و کربنات‌ها بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های جنوب مشهد

علیرضا کریمی^{۱*} و حسین خادمی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

پذیرفتاری مغناطیسی، یک شیوه ساده و سریع برای تعیین ویژگی‌های خاک و رسوبات و تشریح فرآیندهای خاک‌سازی است. تفسیر داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی خاک، نیازمند آگاهی از عوامل مؤثر بر آن است. به منظور شناخت تأثیر مواد مادری و مواد دیامغناطیس گچ و کربنات‌ها، ۴۲ نمونه از افق‌های خاک‌های تشکیل‌شده روی مواد مادری لسی، آبرفتی، گرانیتی و مارنی جنوب مشهد برداشت شد. گچ نمونه‌ها توسط شست‌وشوی متوالی با آب مقطر و کربنات‌ها توسط اسید کلریدریک رقیق حذف شدند. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های اصلی ($\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$)، نمونه‌های عاری از گچ ($\chi_{\text{Gf}}^{\text{lf}}$)، نمونه‌های عاری از گچ و کربنات‌ها ($\chi_{\text{GCF}}^{\text{lf}}$) و نمونه‌های عاری از گچ، کربنات‌ها و شن ($\chi_{\text{GCSF}}^{\text{lf}}$) اندازه‌گیری شد. نتایج، نشان‌دهنده یک همبستگی قوی ۱:۱ بین مقدار اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده $\chi_{\text{Gf}}^{\text{lf}}$ و $\chi_{\text{GCF}}^{\text{lf}}$ بود. $\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$ خاک مارنی با وجود مقدار زیاد کربنات‌ها و گچ، آشکارا از خاک‌های دیگر بیشتر بود و تا $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ می‌رسید. در مقابل، $\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$ ساپرولیت گرانیتی کمتر از $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ بود. $\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$ خاک‌های لسی و آبرفتی حالت حدواسط داشت. $\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$ همه نمونه‌ها (به جز خاک مارنی) با مقدار شن همبستگی منفی داشتند که افزایش پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف شن، مؤید این مطلب بود؛ ولی کاهش پذیرفتاری مغناطیسی خاک مارنی پس از حذف شن، نشان‌دهنده طبیعت متفاوت در مقایسه با دیگر خاک‌ها بود. مقدار سیلت و رس با $\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$ همبستگی مثبت داشت؛ ولی مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی به تغییرات رس حساس‌تر بودند که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر رس در تأمین پذیرفتاری مغناطیسی است. به‌طورکلی، نتایج پژوهش حاضر بیانگر اهمیت مواد مادری و مواد دیامغناطیس متحرک گچ و کربنات‌ها بر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌باشند و لازم است که نقش آنها در تفسیر نتایج پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: پذیرفتاری مغناطیسی، گچ، کربنات‌ها، مارن، گرانیت، لس

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: karimi-a@um.ac.ir

مقدمه

در چند دهه گذشته، اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic susceptibility) به دلیل این که روشی سریع و ارزان است به صورت گسترده در مطالعات خاک، مانند توصیف فرآیندهای خاک‌سازی و تکامل خاکرخ (۹، ۱۲، ۲۰، ۲۱ و ۲۳)، تفسیر اقلیم گذشته (۱۹ و ۲۲) و آلودگی خاک (۷ و ۱۴) استفاده شده است. پذیرفتاری مغناطیسی، شاخصی است که نشان‌دهنده میزان مغناطیسی شدن مواد در یک میدان مغناطیسی است. اگر میزان مغناطیسی شدن براساس حجم بیان شود، پذیرفتاری مغناطیسی عبارت است از (۲۳):

$$k = M / H \quad [1]$$

که M میزان مغناطیسی شدن حجمی جسم، H شدت میدان مغناطیسی و K میزان پذیرفتاری مغناطیسی حجمی است. K بدون واحد است. در مطالعات خاک، به طور معمول از پذیرفتاری مغناطیسی ویژه یا جرمی استفاده می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$c = k / \rho \quad [2]$$

که χ پذیرفتاری مغناطیسی جرمی و ρ جرم حجمی است. واحد χ ، عکس واحد جرم حجمی می‌باشد و در سامانه متریک، m^3kg^{-1} است. عامل اصلی وجود پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌ها، ترکیبات آهن است زیرا میزان آهن در پوسته زمین، ۴۰ برابر مجموع عناصر مغناطیسی دیگر است (۸). در جدول ۱ تقسیم‌بندی مواد براساس شدت مغناطیس‌پذیری نشان داده شده‌اند. در بیشتر خاک‌ها، مگنتیت و مگهمیت عوامل اصلی ایجاد پذیرفتاری مغناطیسی هستند (۲۳).

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی اگرچه ساده می‌باشد ولی تفسیر نتایج آن مهم‌تر بوده و به طور معمول پیچیده است. بنابراین لازم است قبل از هر گونه تفسیری، عوامل مؤثر در ایجاد و تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی شناخته شوند (۲۴). عواملی مانند مقدار و نوع مواد دیامغناطیس، نوع مواد مادری و فرآیندهای خاک‌سازی بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی مؤثر هستند که نقش هر یک از این عوامل باید در تفسیر نتایج در

نظر گرفته شود (۱۱، ۱۳ و ۲۷). در بین مواد دیامغناطیس، گچ و کربنات‌ها به دلیل تحرکی که در خاک دارند در جریان فرآیندهای خاک‌سازی، باعث رقیق شدن تأثیر مواد مغناطیسی می‌شوند و تأثیر فرآیندهایی که سبب تغییر پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند را کم‌رنگ می‌کنند. مواد آلی که از بیرون سامانه خاک، به ویژه به سطح خاک اضافه می‌شوند و هم‌چنین رطوبت موجود در خاک نیز تأثیر مشابهی دارند. به همین دلیل برای حذف اثر این مواد و مقایسه واقعی تغییرات صورت‌گرفته، پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک (Minerogenic) براساس معادله ۳ محاسبه می‌شود (۱۰).

$$\chi_{\text{minero}} = \frac{\chi_{\text{bulk}} \times 100}{(100 - \% \text{water} - \% \text{Organic matter} - \% \text{Carbonates})} \quad [3]$$

که χ_{bulk} پذیرفتاری مغناطیسی نمونه خاک هواخشک و χ_{minero} پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک است.

در ایران مطالعات پذیرفتاری مغناطیسی خاک، بسیار کم و به چند مطالعه انگشت‌شمار محدود می‌گردند (۱، ۲ و ۳) و اطلاعات درباره تأثیر نوع مواد مادری و نوع مواد دیامغناطیس بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک بسیار کم است. این درحالی است که اکثر خاک‌های ایران به ویژه خاک‌های قدیمی در مرکز و شرق ایران، مقدار زیادی کربنات‌ها و گچ دارند و وجود این مواد حتی در افق‌های قدیمی آرجیلیک این مناطق معمول است. از طرف دیگر، برای محاسبه پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک (معادله ۳)، به گچ توجه نشده است. با توجه به این که معادله ۳ برای استفاده در خاک‌های مناطق مرطوب توسعه پیدا کرده است عدم توجه به گچ قابل درک می‌باشد. حال، این پرسش مطرح می‌شود که آیا افزایش گچ مانند مواد دیامغناطیس دیگر به صورت خطی باعث رقیق شدن تأثیر مواد مغناطیسی و کاهش پذیرفتاری مغناطیسی می‌شود؟ از سوی دیگر، اگرچه گچ و کربنات‌ها دیامغناطیس هستند، آیا مقدار زیاد آنها در خاک‌های مناطق خشک که در برخی از موارد به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد، تأثیری بر شدت یا ضعف بروز ویژگی‌های مواد مغناطیسی دارد و می‌توان برای محاسبه پذیرفتاری مغناطیسی مینروژنیک، اثر آنها را حذف کرد؟ در جنوب مشهد، در منطقه‌ای

جدول ۱. تقسیم‌بندی مواد براساس رفتار مغناطیسی (۱۶)

ویژگی مغناطیسی	مثال (پذیرفتاری مغناطیسی برحسب $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)
فرومغناطیس	آهن (۵۰۰۰۰)
فری مغناطیس	مگنتیت (۲۰۰۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰۰۰)، مگهمیت (۴۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰)
آنتی فرومغناطیس	هماتیت (۱۰ تا ۷۶۰)، گئوتیت (۲۶ تا ۲۸۰)
پارامغناطیس	لپیدوکروسیت (۴۰ تا ۷۰)، بیوتیت (۵۲ تا ۹۸)
دیامغناطیس	گچ (۰/۵- تا ۱/۳)، کربنات کلسیم (۰/۳- تا ۱/۴)، کوارتز (۰/۵- تا ۰/۶)

با وسعت کم، خاک‌ها بر روی مواد مادری گوناگون شامل سنگ‌های گرانیتی، رسوبات مارنی، رسوبات آبرفتی و رسوبات لسی تشکیل شده‌اند. خاک‌های تشکیل‌شده دارای افق‌های گوناگون شامل کمبیک، کلسیک، ژپسیک و آرچلیک هستند. خاک‌های تشکیل‌شده از نظر بافت و مقدار گچ و کربنات‌ها، تنوع مناسبی دارند و برای مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی مناسب هستند. بنابراین، اهداف این مطالعه را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

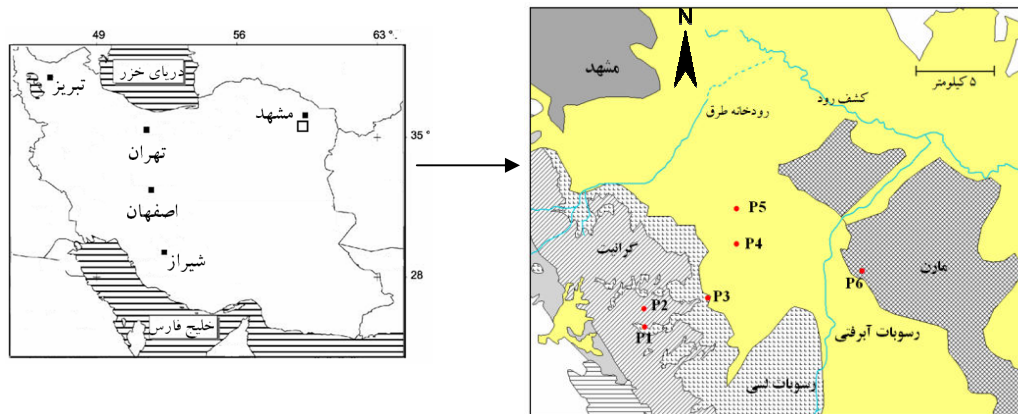
۱. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی در رسوبات مختلف و بررسی چگونگی تأثیر کربنات‌ها و گچ بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی ۲. بررسی تأثیر مواد مادری بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در جنوب مشهد به مرکزیت طول جغرافیایی $59^{\circ} 42'$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 50'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). در این منطقه از غرب به شرق، تپه‌ماهورهای گرانیتی، دامنه تپه‌ماهورهای گرانیتی، دشت دامنه‌ای و تپه‌ماهورهای مارنی قرار دارند. رسوبات لسی با ضخامت کم و پراکنده، بخش‌های مسطح تپه‌ماهورهای گرانیتی و رسوبات لسی با ضخامت بیش از ۱۰ متر، دامنه این تپه‌ها را پوشانده‌اند. دشت دامنه‌ای از رسوبات آبرفتی ارتفاعات دگرگونی و رسوبات لسی منتقل‌شده از تپه‌ماهورهای گرانیتی پوشیده شده است. تپه‌ماهورهای مارنی از مارن‌های قرمز سرشار از گچ تشکیل شده‌اند. خاک‌های این منطقه از نظر توزیع اندازه ذرات،

مقدار گچ و کربنات‌ها از تنوع مناسبی برخوردار هستند (۱۸). دو خاکرخ بر روی تپه‌ماهورهای گرانیتی شامل خاک متشکل از رسوبات لسی بر روی ساپرولیت گرانیتی و خاک گرانیتی تشکیل‌شده به‌صورت درجا، دو خاکرخ در دشت دامنه‌ای و یک خاکرخ بر روی تپه‌ماهورهای مارنی به همراه یک مقطع عمیق لسی در دامنه تپه‌ماهورهای گرانیتی، مطالعه شدند و از افق‌های مختلف آن‌ها تعداد ۴۲ نمونه برداشت گردید. توزیع اندازه ذرات توسط روش پیپت، مقدار کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی و گچ به روش حرارتی تعیین شد (۲۸). برای سهولت، در ادامه، واژه کربنات‌ها به‌جای کربنات کلسیم معادل استفاده خواهد شد.

پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها در چند مرحله شامل نمونه‌های اصلی ($\chi_{\text{bulk}}^{\text{f}}$)، نمونه‌های عاری از گچ ($\chi_{\text{Gf}}^{\text{f}}$)، نمونه‌های عاری از گچ و کربنات‌ها ($\chi_{\text{GCF}}^{\text{f}}$) و نمونه‌های عاری از گچ، کربنات‌ها و شن ($\chi_{\text{GCSf}}^{\text{f}}$) توسط دستگاه MS2 Bartington در فرکانس پایین (0.47 kHz) اندازه‌گیری شد. گچ، توسط شست‌وشوی متوالی با آب مقطر از نمونه‌ها حذف شد. ته‌نشین نشدن رس در سوسپانسیون به‌علت خروج الکترولیت‌ها نشانه‌ای از حذف گچ می‌باشد. برای اطمینان از خروج گچ از تست کلرید باریم استفاده شد (۲۵). کربنات‌های نمونه‌ها که قبلاً گچ آنها حذف شده بود، با توجه به مقدار کربنات‌ها، با استفاده از مقدار مناسب اسیدکلریدریک رقیق حذف شد. برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی، در هر مرحله نمونه‌ها هواخشک شدند. لازم به توضیح است که به‌دلیل این‌که بخش زیادی از آب تبلور گچ در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس خارج می‌شود؛ برای آنالیز



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی به همراه محل حفر خاکرغها و انواع مواد مادری

(P1: خاکرغ لسی بر روی ساپرولیت گرانیتی، P2: خاکرغ گرانیتی، P3: مقطع لسی، P4 و P5: خاکرغهای آبرفتی و P6: خاک مارنی)

شن، سیلت، رس، گچ و کربنات‌ها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. به دلیل تشابه، فقط نتایج ۴ خاکرغ آورده شده است. بیشترین مقدار گچ در خاک‌های مارنی و ساپرولیت گرانیتی است که مقدار آن به بیش از ۴۵ درصد می‌رسد و مجموع مقدار گچ و کربنات‌ها در خاک مارنی تا ۶۷ درصد هم می‌رسد. برخی از پارامترهای آماری و ویژگی‌های خاک در جدول ۳ نشان می‌دهد که خاک‌ها از نظر حداقل، حداکثر و پراکنش ویژگی‌های مؤثر بر پذیرفتاری مغناطیسی از تنوع لازم برخوردار هستند. شکل ۲ الف و ب نشان‌دهنده همبستگی بالای بین پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری و محاسبه شده پس از حذف گچ (χ_{Gf}^{lf}) و حذف گچ و کربنات‌ها (χ_{Gcf}^{lf}) است. تجمع داده‌ها در اطراف خط $Y=X$ نشان‌دهنده دقت زیاد برآورد توسط معادلات ۵ و ۶ می‌باشد. میزان پذیرفتاری مغناطیسی گچ و کربنات‌ها $10^{-8} \times 0.5$ تا $10^{-8} \times 1.5 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (جدول ۱) است که باعث مقداری تفاوت بین مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری و محاسبه شده می‌گردد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که مقدار زیاد گچ و کربنات‌ها بر بروز ویژگی مواد مغناطیسی اثری نداشته‌اند و فقط باعث رقیق شدن اثر آنها می‌شوند. بنابراین، χ_{Gcf}^{lf} محاسبه شده را می‌توان برابر با χ_{minero}^{lf} در نظر گرفت.

نمونه‌های دارای گچ، نباید از درجه حرارت‌های بیشتر از ۴۰ درجه سلسیوس استفاده شود (۲۵).

علاوه بر اندازه‌گیری مستقیم پذیرفتاری مغناطیسی توسط دستگاه، معادلات ۴ و ۵ برای محاسبه تئوریک پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های عاری از گچ (χ_{Gf}^{lf}) و عاری از گچ و کربنات‌ها (χ_{Gcf}^{lf})، پیشنهاد شدند. پس از حذف گچ، درصد نسبی کربنات‌ها در خاک افزایش پیدا می‌کند که این افزایش در مقدار نسبی کربنات‌ها در معادله ۴ مد نظر قرار گرفته است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، دقت معادلات در برآورد پذیرفتاری مغناطیسی را نشان خواهد داد. در این معادلات، فرض شده است که درصد مواد آلی و رطوبت خاک هواخشک در برابر درصد گچ و کربنات‌ها قابل صرف نظر کردن است.

$$\chi_{Gf}^{lf} = \chi_{bulk}^{lf} \times \frac{100}{(100 - \%Gypsum) + \left(\frac{\%Carbonates}{100 - \%Gypsum} - \%Gypsum \right)} \quad [4]$$

$$\chi_{Gcf}^{lf} = \chi_{bulk}^{lf} \times \frac{100}{(100 - \%Carbonates - \%Gypsum)} \quad [5]$$

نتایج و بحث

تأثیر گچ و کربنات‌ها بر پذیرفتاری مغناطیسی

نتایج اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی به همراه نتایج درصد

جدول ۲. توزیع اندازه ذرات، گچ، کربنات‌ها و مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده خاک در تیمارهای گوناگون

$\chi_{\text{GCSf}}^{\text{lf}}$	عمق	شن	سیلت	رس	گچ	کلسیم معادل (کربنات‌ها)	کربنات			افق
							$\chi_{\text{Gf}}^{\text{lf}}$	$\chi_{\text{GCF}}^{\text{lf}}$	$\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$	
	cm	%	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$							
خاک لسی بر روی ساپرولیت گرانیتی										
۱۲۰/۳	۱۱۲	۸۵/۷	۸۱/۱	۲۷	۶/۵	۱۱/۶	۷۳/۱	۱۵/۳	۰-۱۵	Ap
۱۲۲/۲	۱۰۰/۹	۸۱/۴	۷۳	۴۲	۵/۴	۱۶/۱	۶۶/۸	۱۷/۱	۱۵-۴۰	Bk
۱۲۷/۳	۵۲/۳	۴۳/۵	۴۳/۸	۳۱	۵/۳	۱۶/۹	۴۲/۵	۴۰/۶	۴۰-۸۵	2Btk
۷۰/۶	۲۰/۴	۱۷/۷	۱۰/۴	۴	۴۵	۲/۹	۲/۹	۹۴/۲	۸۵-۱۲۰	2Cry1
۱۳/۴	۸/۳	۵/۷	۵/۲	۱۲	۱۰/۳	۱/۹	۸/۳	۸۹/۸	۱۲۰-۱۵۰	2Cry2
خاک گرانیتی										
۱۲۲/۱	۷۵/۹	۶۵/۸	۶۷/۴	۱۹	۴/۳	۷/۴	۳۲/۳	۶۰/۴	۰-۳۰	Ap
۱۱۳/۶	۵۷/۵	۴۸/۶	۴۲/۷	۴۰	۴/۷	۱۱	۴۵/۳	۴۳/۷	۳۰-۶۵	Bk
۳۱/۸	۱۴/۳	۱۲/۵	۶/۶	۱۴	۴۵	۶/۵	۲۷/۳	۶۶/۲	۶۵-۱۰۰	Cry1
۳۲/۴	۱۳	۱۳/۱	۸	۸	۳۶/۸	۵	۲۵	۷۰	۱۰۰-۱۳۰	Cry2
خاک آبرفتی										
۸۲/۸	۶۵/۶	۷۰/۱	۵۸/۴	۱۱	۴/۲	۱۶/۳	۶۴/۱	۶۴/۱	۰-۳۰	Ap
۸۳	۷۲/۳	۶۱/۸	۵۹/۹	۱۳	۲/۹	۱۳/۵	۷۰/۳	۷۰/۳	۳۰-۵۰	Bk
۸۸	۶۸/۷	۶۱/۳	۵۸/۶	۱۹	۴/۳	۲۱/۶	۵۴/۶	۵۴/۶	۵۰-۷۰	C
۷۵/۷	۶۴/۹	۵۴/۱	۵۰/۵	۱۸	۷/۱	۲۵	۵۸/۴	۵۸/۴	۷۰-۱۰۰	Cy
خاک مارنی										
۱۶۲	۱۷۷	۱۳۵/۷	۱۲۲/۷	۲۸	۹/۴	۱۳	۶۰/۷	۲۶/۳	۰-۱۵	Ap1
۱۵۰/۶	۱۶۵/۸	۱۳۲/۲	۱۱۳/۴	۱۰	۱۶/۲	۲۰/۱	۶۸/۳	۱۱/۶	۱۵-۴۰	Ap2
۱۱۱/۸	۱۲۱/۸	۸۰/۳	۴۲/۹	۱۹	۴۷/۲	۶/۸	۳۸/۴	۵۴/۸	۴۰-۶۰	Cy1
۱۵۶/۱	۱۶۷/۷	۱۰۳/۵	۵۷/۴	۱۹	۴۸/۷	۵/۶	۴۳/۶	۵۰/۸	۶۰-۹۰	Cy2
۱۵۷/۲	۱۵۸/۱	۱۰۴/۶	۵۷	۱۶	۴۷/۵	۷/۲	۴۳/۸	۴۹	۹۰-۱۱۰	Cr1
۱۵۲/۵	۱۷۰/۳	۱۳۸/۶	۷۸/۶	۲۹	۴۷/۸	۴/۴	۳۶	۵۹/۶	۱۱۰-۱۴۰	Cr2

$\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$: پذیرفتاری مغناطیسی هواخشک، $\chi_{\text{Gf}}^{\text{lf}}$: پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف گچ، $\chi_{\text{GCF}}^{\text{lf}}$: پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف گچ و کربنات‌ها و $\chi_{\text{GCSf}}^{\text{lf}}$: پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف گچ، کربنات‌ها و شن

جدول ۳. پارامترهای آماری ویژگی‌های خاک

تعداد نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
گچ (/.)	۲/۹	۴۸/۷	۱۳/۵	۱۵/۰۵
کربنات‌ها (/.)	۴	۴۲	۱۹/۳	۷/۸
شن (/.)	۵/۸	۹۴/۲	۲۸/۳	۲۳/۳
سیلت (/.)	۲/۹	۷۸/۵	۵۷/۸	۱۹/۷
رس (/.)	۱/۹	۲۵	۱۳/۹	۶/۲
$\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$	۵/۲	۱۲۲/۷	۵۳/۴	۲۳/۰
$\chi_{\text{Gf}}^{\text{If}}$	۵/۷	۱۳۸/۶	۶۳/۴	۲۹/۴
$\chi_{\text{Gcf}}^{\text{If}}$	۸/۳	۱۷۷	۷۹/۷	۴۱/۵
$\chi_{\text{GCSf}}^{\text{If}}$	۱۳/۴	۱۶۲	۹۲/۰	۳۳/۵

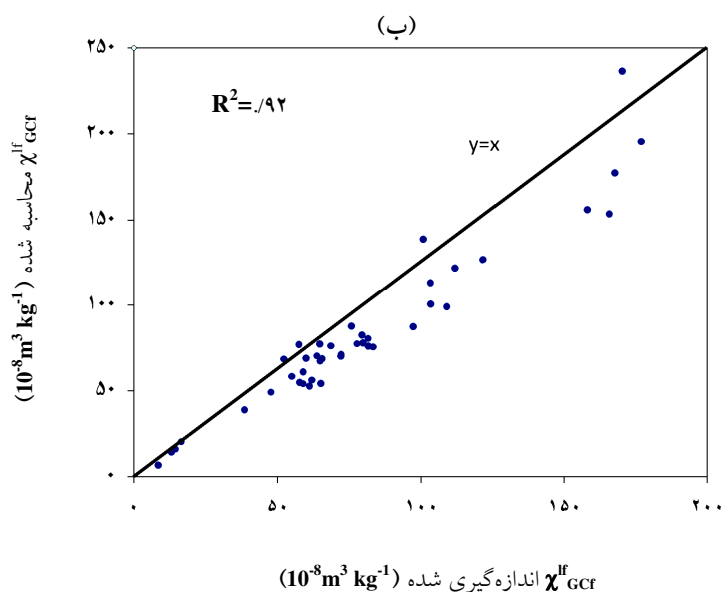
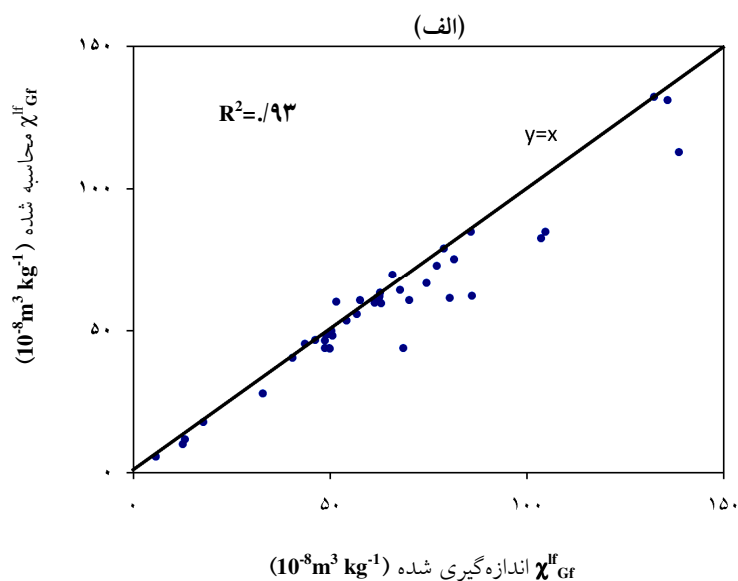
واحد مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \times 10^{-8}$ است.

پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها

لس، گرانیت، مارن و رسوبات آبرفتی چهار نوع ماده مادری اصلی تشکیل‌دهنده خاک‌های این منطقه می‌باشند. کمترین و بیشترین مقدار $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ به ترتیب $5/2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ مربوط به ساپرولیت گرانیتی در زیر خاک لسی (2Cry2) و $122/7 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ مربوط به افق سطحی خاک مارنی (Ap1) است (جدول ۲). با حذف گچ و کربنات‌ها، حداکثر و انحراف معیار پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر زیاد این دو ماده بر پذیرفتاری مغناطیسی است (جدول ۳). $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ و $\chi_{\text{Gcf}}^{\text{If}}$ رسوبات لسی و آبرفتی، حد واسط خاک‌های مارنی و ساپرولیت گرانیتی است. مقدار $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ رسوبات لسی و خاک‌های آبرفتی به ترتیب $40/9 \times 10^{-8}$ تا $59/9 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ و $81/1 \times 10^{-8}$ تا $26/3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ و مقدار $\chi_{\text{Gcf}}^{\text{If}}$ آنها به ترتیب 59×10^{-8} تا $112 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ و $38/5 \times 10^{-8}$ تا $72/3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ است. اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های با مواد مادری گوناگون، دور از ذهن نیست؛ زیرا شرایط تشکیل، نوع مواد تشکیل‌دهنده و به دنبال آن، نوع و مقدار مواد مغناطیسی مواد مادری، متفاوت است. گچ و کربنات‌ها بیش از ۵۰ درصد افق‌های خاک مارنی (به جز دو افق سطحی) را تشکیل می‌دهند؛ با

این حال مقادیر $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ در مقایسه با خاک‌های دیگر زیاد می‌باشند. مقادیر $\chi_{\text{Gcf}}^{\text{If}}$ ، به دلیل حذف شدن گچ و کربنات‌ها، تأثیر مواد مادری و فرآیندهای خاک‌سازی را آشکارتر می‌کنند. $\chi_{\text{Gcf}}^{\text{If}}$ تمامی افق‌های خاک مارنی نسبت به سایر خاک‌ها بسیار زیاد بوده و تا $177 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ در افق سطحی می‌رسد (جدول ۲). پذیرفتاری انواع سنگ‌ها (رسوبی، دگرگونی و آذرین) به ترکیب کانی‌شناسی آنها وابسته است و حتی پذیرفتاری یک نوع سنگ بسته به شرایط تشکیل، تفاوت زیادی دارد. این تفاوت‌ها به حدی است که $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ خاک مارنی جنوب مشهد نسبت به خاک‌های تشکیل‌شده از مواد مادری رسوبی در ژیانگ چین (۲۷) و اتریش (۱۳) بیشتر است.

این نتایج نشان می‌دهند که شرایط تشکیل مارن‌ها در جنوب مشهد منحصر به فرد بوده و مواد مغناطیسی یا در آنها تشکیل شده‌اند یا از یک منبع با مواد مغناطیسی قابل توجه تأمین گردیده‌اند. مارن‌های جنوب مشهد بر روی نقشه زمین‌شناسی به عنوان مارن‌های قرمز معرفی شده‌اند (۴) که قرمز بودن آنها احتمالاً به دلیل وجود ترکیبات آهن مغناطیسی است. مقدار $\chi_{\text{bulk}}^{\text{If}}$ خاک مارنی در سطح زیاد است که دلیل اصلی آن کم شدن گچ در افق‌های سطحی به دلیل شست‌وشوی گچ می‌باشد



شکل ۲. ارتباط مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده (الف) پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف گچ (χ_{Gf}^{lf}) و (ب) پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف گچ و کربنات‌ها (χ_{Gcr}^{lf})

شرایط هوادیدگی در سطح است (۶ و ۲۷).
 χ_{Gcr}^{lf} خاک‌های لسی نیز نسبتاً زیاد است و در افق‌های
 لسی با تحول کم (مانند افق Ap خاک لسی)، بیشتر از
 $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \times 10^4$ است. کریمی و همکاران (۱۸) نشان دادند

ولی تفاوت کم مقادیر χ_{Gcr}^{lf} در افق‌های خاک مارنی، نشان‌دهنده
 تکامل کم در این خاک بوده و عمده فرآیند خاک‌سازی، حل و
 رسوب گچ است. زیاده‌تر بودن جزئی χ_{bulk}^{lf} در افق‌های سطحی
 این خاک و خاک‌های دیگر، به‌طور عمده به دلیل مناسب بودن

که رسوبات مارنی منشأ اصلی رسوبات لسی بوده و به همین دلیل، زیاد بودن پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های لسی قابل توجیه است. χ_{Gcf}^{lf} افق آرچلیک (Btk) مقطع لسی (اطلاعات نشان داده نشده‌اند) از افق‌های مجاور آنها بیشتر است که می‌تواند به دلیل فرآیندهای خاک‌سازی و شرایط هواپدیدی مناسب در زمان تشکیل آنها باشد. مطالعات سن‌یابی نیز نشان داده‌اند که این افق در شرایط گرم و مرطوب آخرین دوره بین‌یخچالی تشکیل شده است (۱۷). کم بودن مقدار χ_{Gcf}^{lf} افق 2Btk خاک لسی (جدول ۲) که در شرایط مشابه افق آرچلیک مقطع لسی تشکیل شده است در دید اول ممکن است غیرعادی باشد. این افق، ترکیبی از لس و گرانیت است و مقدار χ_{Gcf}^{lf} پس از حذف شن که غالباً از کوارتز و فلدسپار حاصل از هواپدیدی گرانیت تشکیل شده است به شدت افزایش پیدا کرده و از افق‌های مجاور بیشتر شده است.

انواع گرانیت از سه کانی اصلی کوارتز، فلدسپار و میکا تشکیل شده‌اند و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی آنها از صفر تا $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ است (۱۶). سنگاوا (۲۷) در مطالعه‌ای در ژیانگ چین نشان داد که مقدار χ_{bulk}^{lf} ساپرولیت گرانیتی تا $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ می‌رسد؛ درحالی‌که حتی مقدار χ_{Gcf}^{lf} ساپرولیت‌های گرانیتی در جنوب مشهد، کمتر از $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ بوده است و با خاک‌های تشکیل‌شده بر روی گرانیت در اتریش (۱۳) مشابه است. پذیرفتاری مغناطیسی ساپرولیت گرانیتی لایه 2Cry1 در زیر خاک لسی (جدول ۲) پس از حذف گچ، کربنات‌ها و شن در مقایسه با ساپرولیت‌های گرانیتی دیگر، افزایش زیادی را نشان می‌دهد. از آنجا که پذیرفتاری مغناطیسی کوارتز و فلدسپار کوارتز نزدیک به صفر می‌باشد نوع میکا تعیین‌کننده میزان پذیرفتاری مغناطیسی گرانیت است. میکای ساپرولیت گرانیتی لایه 2Cry1 بیوتیت می‌باشد. پذیرفتاری مغناطیسی بیوتیت $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ تا $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (جدول ۱) است. بنابراین با حذف شن که بیشتر آن را کوارتز و فلدسپار تشکیل می‌دهد بیشتر بودن χ_{Gcf}^{lf} لایه 2Cry1 قابل درک است.

پذیرفتاری مغناطیس خاک آبرفتی از ساپرولیت‌های گرانیتی بیشتر است و پس از حذف کربنات‌ها، گچ و شن، تغییر قابل توجهی را نشان نمی‌دهد که بیان‌گر این است که بخش رس و سیلت این خاک پذیرفتاری مغناطیسی کمی داشته و همان‌گونه که از مرفولوژی خاک پیدا می‌باشد (جدول ۲) فرآیند خاک‌سازی قابل توجهی در آن رخ نداده است.

نکته دیگر، زیاد بودن مقدار χ_{bulk}^{lf} دو افق سطحی خاک گرانیتی (Ap و Bk) نسبت به ساپرولیت گرانیتی می‌باشد و این اختلاف بین مقادیر χ_{Gcf}^{lf} نیز بیشتر شده است (جدول ۲). مطالعه قبلی (۵) در منطقه نشان داده است که این دو افق، حد واسط رسوبات لسی و خاک‌های درجا هستند که اضافه شدن رسوبات بادآورده به افق‌های سطحی باعث افزایش زیاد پذیرفتاری مغناطیسی این دو افق نسبت به ساپرولیت گرانیتی شده است (۵). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک سطحی به دلیل اضافه شدن مواد با پذیرفتاری مغناطیسی بیشتر توسط گرد و غبار، به‌عنوان یکی از عوامل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی، گزارش شده است (۱۰).

جدول ۴ همبستگی χ_{bulk}^{lf} و اجزای تشکیل‌دهنده خاک (شن، سیلت، رس، گچ و کربنات‌ها) را نشان می‌دهد. به دلیل تفاوت ماهیتی خاک‌های مارنی که در بالا به آن اشاره شد، همبستگی‌ها با و بدون مشارکت خاک مارنی محاسبه شد. به دلیل این‌که مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی خاک مارنی به‌صورت قابل توجهی با دیگر خاک‌ها متفاوت است؛ همبستگی‌ها با حذف خاک مارنی، افزایش قابل توجهی دارند (جدول ۴). از سوی دیگر، با توجه به این‌که پس از حذف گچ و کربنات‌ها، درصد نسبی شن، سیلت و رس تغییر می‌کند همبستگی‌های مشابه برای χ_{Gcf}^{lf} محاسبه نشد. همبستگی بین مقدار گچ و کربنات‌ها با χ_{bulk}^{lf} کم می‌باشد؛ زیرا خاک‌های با گچ مشابه، χ_{bulk}^{lf} متفاوت دارند. همبستگی منفی بین شن و χ_{bulk}^{lf} حاکی از آن است که بخش شن نسبت به کل خاک دارای مواد مغناطیسی کمی است. افزایش پذیرفتاری مغناطیسی پس از حذف شن، دلیلی بر این ادعا است (جدول ۴). برخلاف نتایج این مطالعه، دجنگ و

جدول ۴. همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و ویژگی‌های خاک

گچ + کربنات‌ها (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	
-۰/۰۹	-۰/۵۲**	۰/۴۸**	۰/۴۴**	$\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}}$
-۰/۳۶**	-۰/۷۵**	۰/۶۸**	۰/۶۳**	$\chi_{\text{bulk}}^{\text{lf}^a}$

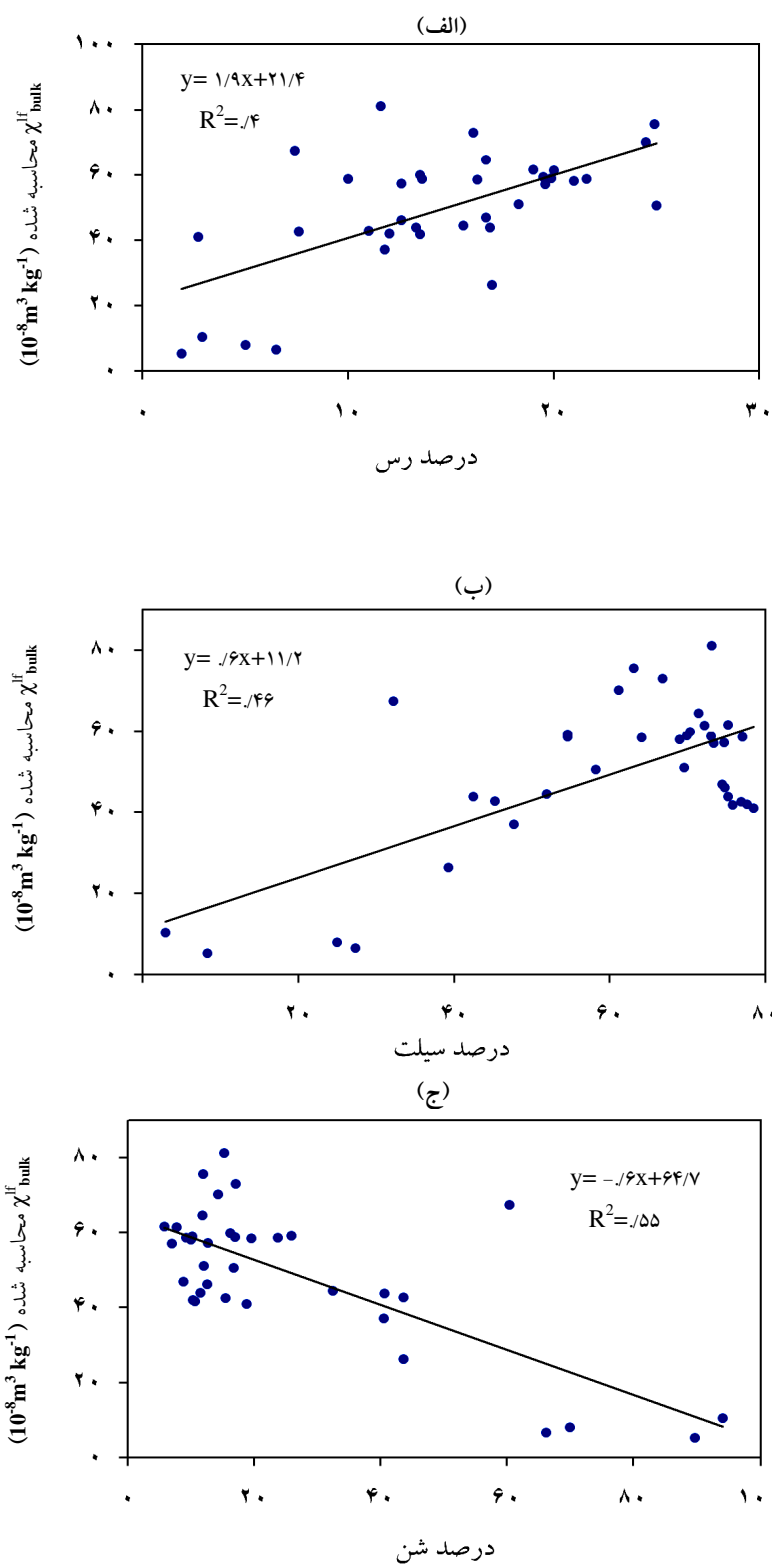
^a. پذیرفتاری مغناطیسی منهای خاک مارنی، واحد مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی $\text{kg}^{-1} \text{m}^3 \times 10^{-8}$ است.

در خاک‌های فائوزم (Phaeozems)، سهم رس بیشتر است. در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، سیلت بسیار بیشتر از رس است (جدول ۲) ولی براساس معادلات در (شکل‌های ۳ - الف و ب)، شیب خط معادله مربوط به رابطه رس و سیلت با پذیرفتاری مغناطیسی به ترتیب $1/92$ و $0/63$ است که با وجود مقدار بیشتر سیلت در خاک‌های مورد مطالعه، اهمیت رس در مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی خیلی بیشتر از سیلت است. شکل ۳ - ج هم تأثیر منفی مقدار شن را در پذیرفتاری مغناطیسی نشان می‌دهد که به غالب بودن کوارتز، فلدسپار و گچ در بخش شن مربوط می‌باشد. به هر حال برای روشن شدن تأثیر فرایندهای خاک‌سازی و عوامل دیگر ایجاد کننده تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی، اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی جداگانه شن، سیلت و تعیین کانی‌های مغناطیسی هر کدام از اجزا به عنوان مطالعات تکمیلی پیشنهاد می‌شود.

در مطالعات زیادی از پذیرفتاری مغناطیسی برای نشان دادن میزان تکامل خاک‌های قدیمی و ارتباط آن با تغییرات اقلیمی استفاده شده است (۱۵، ۲۲ و ۲۶). از مهم‌ترین آنها مطالعات انجام شده روی توالی‌های لس - خاک قدیمی در چین است (۲۶). در این توالی‌ها مواد مادری یکسان بوده و تغییرات گچ و کربنات‌ها در آنها در حدی نیست که بتواند تأثیر فرایندهای خاک‌سازی را پپوشاند. ولی در مطالعه حاضر علاوه بر این که مقدار گچ و کربنات‌ها مواد مادری خاک‌ها متفاوت است، حتی در خاک‌های لسی روی ساپرولیت گرانیته و خاک‌خ گرانیته، مواد مادری یکنواخت نمی‌باشند و تغییرات پذیرفتاری

همکاران (۱۱) نشان دادند که در خاک‌های ساسکاچوان هر چه بافت درشت‌تر شود پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تجمع مواد مغناطیسی در بخش شن است. از آنجا که شن معمولاً، کمتر تحت تأثیر هوازدگی قرار می‌گیرد، می‌تواند منعکس‌کننده وضعیت مواد مادری باشد. حذف شن در خاک‌های مارنی باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی شده است (جدول ۲) که بیانگر این واقعیت است که در این خاک، برخلاف خاک‌های دیگر این منطقه و مشابه با خاک‌های ساسکاچوان (۱۱)، شن نقش مهمی در پذیرفتاری مغناطیسی دارد. اهمیت تأثیر شن در پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مارنی وقتی بیشتر آشکار می‌شود که بدانیم بخش بیشتر شن در این خاک‌ها از گچ تشکیل شده است و در موقع حذف گچ، از خاک خارج شده است و درصد شن افقی‌های خاک مارنی پس از حذف کربنات‌ها و گچ کاهش می‌یابد. این مسأله نیز مجدداً تأکیدی بر تفاوت در ماهیت مغناطیسی خاک‌های مارنی است.

بیشترین مقدار همبستگی بین پذیرفتاری مغناطیسی و مقدار سیلت مشاهده گردید. مقدار رس نیز در مرتبه دوم از نظر میزان همبستگی با پذیرفتاری مغناطیسی قرار داشت. همبستگی مثبت بین پذیرفتاری مغناطیسی و سیلت و رس نشان‌دهنده تأثیر هر دو جزء در پذیرفتاری مغناطیسی است. به عنوان یک قانون کلی، در خلال فرایندهای خاک‌سازی، معمولاً عامل اصلی افزایش پذیرفتاری مغناطیس مربوط به بخش رس است. آلکسی‌یو و همکاران (۶) نشان دادند که سهم اجزای شن، سیلت و رس خاک‌های کمبی سول در پذیرفتاری مغناطیسی یکسان بوده ولی



شکل ۳. ارتباط بین χ_{bulk}^{bf} و (الف) درصد رس، (ب) درصد سیلت و (ج) درصد شن، (نمونه‌های خاک مارنی در نظر گرفته نشده‌اند).

مغناطیسی بدون در نظر گرفتن این موارد غیرمنطقی به نظر می‌رسد. بنابراین، لازم است که نقش مواد مادری و گچ و کربنات‌ها در تفسیر نتایج پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

پذیرفتاری مغناطیسی، یک شاخص مناسب برای بررسی ویژگی‌های خاک و رسوبات است. ترکیب مواد مادری و فرایندهای خاک‌سازی، باعث تغییر در پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها می‌شوند. به‌همین دلیل، برای جلوگیری از هرگونه اشتباه در تفسیر نتایج پذیرفتاری مغناطیسی، باید تأثیر نوع ماده مادری، مواد دیامغناطیس متحرک و فرایندهای خاک‌سازی بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی شناخته شود. مطالعه حاضر با هدف روشن کردن عوامل مؤثر بر پذیرفتاری مغناطیسی و نه تفسیر توضیح مکانیزم‌های تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های جنوب مشهد انجام شد.

این مطالعه به خوبی تأثیر مواد دیامغناطیس مهم مناطق خشک (گچ و کربنات‌ها) و مواد مادری را بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که گچ و کربنات‌ها به نسبت سهمی که از خاک اشغال می‌کنند باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند و تأثیر عومل ایجادکننده یا تغییردهنده پذیرفتاری مغناطیسی را می‌پوشانند. به‌سادگی می‌توان براساس مقدار گچ و کربنات‌ها در خاک و در نظر گرفتن پذیرفتاری مغناطیسی معادل صفر برای گچ و کربنات‌ها، اثر آنها را حذف کرد. به‌دلیل ناچیز

بودن مقدار مواد آلی و رطوبت هواخشک در مقابل گچ و کربنات‌ها، نیازی به در نظر گرفتن تأثیر این دو ماده در مناطق خشک نیست. به عبارت دیگر، می‌توان χ_{GCF}^{lf} محاسبه‌شده را معادل χ_{minero}^{lf} در نظر گرفت. مقایسه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها با مواد مادری متفاوت نشان داد که صرف‌نظر از مکانیسم‌هایی که باعث تغییر در پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند، نوع مواد مادری به‌شدت بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی مؤثر است. در منطقه مورد مطالعه، خاک‌های حاصل از مارن‌های قرمز با مقدار $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ و $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ و گرانیب با مقدار $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار χ_{bulk}^{lf} را دارا می‌باشند و خاک‌های لسی و آبرفتی حد واسط این دو قرار دارند. بخش‌شن تأثیر کاهنده و سیلت و رس اثر افزایشده در مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های مورد مطالعه را دارند. البته در مورد خاک مارنی، حذف‌شن باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی می‌شود که این ویژگی به‌همراه پذیرفتاری مغناطیسی بالای خاک مارنی سبب تمایز آن از سایر خاک‌ها می‌شود. در پژوهش‌های آتی، کانی‌شناسی ترکیبات آهن و آزمایش‌های شیمیایی برای روشن کردن شدت تأثیر مواد مادری و فرایندهای خاک‌سازی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد، به‌دلیل تأمین هزینه انجام این پژوهش در قالب طرح مصوب شماره ۲۴۴ پ، مورخ ۸۸/۷/۶، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. اولیائی، ا.، ا. ادهمی، م. چاکر حسینی، م. رجایی و ع. کسرائیان. ۱۳۸۸. ارزیابی منشأ پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از تیمار CBD و تصاویر میکروکت اسکن در برخی خاک‌های استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۴۶: ۷۷۳-۷۷۸.
۲. ایوبی، ش. ۱۳۸۱. مطالعه شواهد پدوژنیکی تغییر اقلیم در خاک‌های قدیمی دو منطقه اصفهان و امام‌قیس چهارمحال و بختیاری. رساله دکتراي خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
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: ۲۰۶-۲۱۳.

۴. طاهری، ج. ۱۳۷۳. نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مشهد. وزارت معادن و فلزات، سازمان زمین‌شناسی کشور.
۵. کریمی، ع. ح. خادمی و ا. جلالیان. ۱۳۸۷. شناسایی خاک‌های لسی و تفکیک آنها از سایر خاک‌ها در جنوب مشهد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۴۴: ۱۸۵-۲۰۰.
6. Alekseev A., T. Alekseeva, Z. Sokolowska and M. Hajnos. 2002. Magnetic and mineralogical properties of different granulometric fractions in the soils of the Lublin Upland Region. *Intl. Agrophys.* 16:1-6.
7. Blaha U., E. Appel and H. Stanjek. 2008. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility. *Environ. Pollut.* 156: 278-289.
8. Coey I. M. D. 1988. Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. *In: Stucki, J. W., B. A. Goodman and U. Schwertmann (Eds.), Iron in Soils and Clay Minerals.* Reidel Pub., Dordrecht.
9. 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. Intl.* 127: 728-734.
10. Dearing J. A., J. A. Lees and C. White. 1995. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under Oak and Corsican Pine. *Geoderma* 68: 309-319.
11. de Jong E., L. M. Kozak and H. P. W. Rostad. 2000. Effects of parent material and climate on the magnetic susceptibility of Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.* 80: 135-142.
12. Fontes M. P. F., T. S. de Oliveira L. M. da Costa and A. A. G. Campos. 2000. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma* 96: 81-99.
13. Hanesch M. and R. Schloger. 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured through soil profiles. *Geophys. J. Intl.* 161: 50-56.
14. Hanesch M., G. Rantitsch, S. Hemetsberger and S. Scholger. 2007. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. *Sci. Tot. Environ.* 382: 351-363.
15. Heller F. and T. S. Liu. 1986. Paleoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China. *Geophys. Res. Lett.* 13: 1169-1172.
16. Hunt C. P., B. M. Moskowitz and S. K. Banejee. 1995. Magnetic properties of rocks and minerals. PP. 189-204. *In: Ahrens, T. J. (Ed.), Rock Physics and Relations, a Handbook of Physical Constant.* American Geophysical Union, Washington DC, USA.
17. Karimi A., M. Frechen, H. Khademi, M. Kehl and A. Jalalian. 2009. Chronostratigraphy of loess deposits from northeast Iran. *Qat. Intl.* 234: 124-132.
18. Karimi A., H. Khademi, M. Kehl and A. Jalalian. 2009. Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in Northeast Iran. *Geoderma* 148: 241-250.
19. Lu S. G. 2000. Characterization of magnetism and iron oxide minerals of Quaternary red earth and its paleoenvironmental implication. *Acta Ped. Sin.* 37: 182-191.
20. Lu S. G., Q. F. Xue, L. Zhu and J. Y. Yu. 2008. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in eastern China. *Catena* 73: 23-33.
21. Maher B. A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Intl.* 42: 76-92.
22. Maher B. A., M. Y. Roberts and A. G. Wintel. 2003. Holocene loess accumulation and soil development in the western edge of the Chinese Loess Plateau: implication for magnetic proxies of paleorainfall. *Quat. Sci. Rev.* 22: 445-451.
23. Mullins C. E. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: a review. *J. Soil Sci.* 28: 223-246.
24. Oldfield S. 1991. Environmental magnetism- a personal perspective. *Quat. Sci. Rev.* 10: 73-85.
25. Porta, J. 1998. Methodologies for the analysis and characterization of gypsum in soil: A review. *Geoderma* 87: 31-46.
26. Rutter N. W., Z. L. Ding, M. E. Evans and T. S. Liu. 1991. Baoji-type pedostratigraphic section, Loess Plateau, north-central China. *Quat. Sci. Rev.* 10: 1-22.
27. Shenggaio, L. 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena* 40: 359-373.
28. Soil Survey Staff. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report, No. 42. Version 3.0, USDA-NRCS., 693 p.