

## بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پایداری خاکدانه و پذیرفتاری مغناطیسی (مطالعه‌ی موردی: دشت داوران رفسنجان، استان کرمان)

عیسی اسفندیارپور<sup>۱\*</sup>، ندا فکور<sup>۲</sup>، علیرضا کریمی<sup>۳</sup>، زهره مصلح<sup>۴</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲)

### چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی روابط بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک با پذیرفتاری مغناطیسی و پایداری خاکدانه‌ها در منطقه داوران رفسنجان بود. برای این منظور، پس از برداشت ۵۰ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۱۰ سانتی‌متر) از واحد دشت ریگی و ۴۳ نمونه از واحد پهله رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی، پذیرفتاری مغناطیسی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و برخی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که میانگین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در دشت ریگی، ۸۴۲/۵۳ و در پهله رسی، ۶۳۲/۱۳ ( $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) است که این مقادیر نسبت به نتایج گزارش شده برای پذیرفتاری مغناطیسی نقاط مختلف ایران، خیلی زیاد است و عامل اصلی آن را باید در مواد مادری منطقه جست‌وجو نمود. پایین بودن میانگین پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در هر دو واحد مطالعاتی نیز بر این موضوع صحه می‌گذارد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که رابطه همبستگی مستقیمی بین شکل‌های آهن (دیتیوناتی و اگزالاتی) با پایداری خاکدانه‌ها در هر دو ژئوفرم مطالعاتی وجود دارد؛ لیکن میزان این همبستگی برای آهن دیتیوناتی، بسیار بالا و معنادار بود. همچنین، یک رابطه همبستگی منفی بین پذیرفتاری مغناطیسی با قابلیت هدایت الکتریکی، ماده‌ی آلی و کربنات کلسیم معادل در هر دو واحد ژئومورفیک مطالعاتی وجود دارد. رابطه همبستگی مثبت و معناداری بین مقدار سیلت، شن و اجزای شن با پذیرفتاری مغناطیسی در هر دو واحد ژئومورفیک مطالعاتی مشاهده شد. بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پذیرفتاری مغناطیسی، همبستگی منفی وجود داشت که دلیل آن، احتمالاً وجود شن زیاد حاصل از بادرفت و اثر سوء آن بر پایداری خاکدانه می‌باشد. از سوی دیگر، نتایج حاصل از مدل رگرسیون گوبای آن بود که دو متغیر آهن دیتیوناتی و شن، تأثیر معناداری بر پذیرفتاری مغناطیسی و سه متغیر شن، رس و قابلیت هدایت الکتریکی، تأثیر معناداری بر پایداری خاکدانه‌ها دارند.

**واژه‌های کلیدی:** ایران مرکزی، بادرفت، شکل‌های آهن

اسفندیارپور ع.، فکور ن.، کریمی ع.، مصلح ز. ۱۳۹۹. بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پایداری خاکدانه و پذیرفتاری مغناطیسی (مطالعه موردی: دشت داوران رفسنجان، استان کرمان). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۱. صفحه: ۴۴-۵۸.

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان (مکاتبه کننده)

۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

\* پست الکترونیک: [esfandiarpoor@vru.ac.ir](mailto:esfandiarpoor@vru.ac.ir)

## مقدمه

پیوندشده با ماده آلی و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن با درجه تبلور متفاوت اشاره نمود. اکسی هیدروکسیدهای آهن می‌توانند در دامنه‌ای از ترکیبات بی‌شکل تا بلورین در خاک وجود داشته باشند که از آن جمله، مگنتیت و مگهمیت، عوامل اصلی ایجاد پذیرفتاری مغناطیسی محسوب می‌شوند (Preetz et al., 2000; Fontes et al., 2000). پذیرفتاری مغناطیسی، شاخصی است که نشان دهنده میزان مغناطیس شدن مواد در یک میدان مغناطیسی است (De Jong et al., 2000). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها می‌تواند به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری مغناطیس باشد که به میزان زیادی به عوامل خاک‌ساز شامل ماده مادری، آب و هوا، پستی و بلندی و پوشش گیاهی در بستر زمان بستگی دارد (Feng & Johnson, 1995). بنابراین، تکامل متوالی خاک، منجر به ایجاد یک الگوی توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در خاک می‌شود. آبشویی کربنات‌ها و گچ و نیز تجمع ماده آلی در سطح خاک و یا سایر تغییرات شدید در توده خاک، می‌توانند میزان پذیرفتاری مغناطیسی در یک افق را نسبت به سایر افق‌ها تغییر دهند که این موضوع با افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی در خاک مرتبط است (Bityukova et al., 1999). به‌طور کلی، پایداری خاکدانه‌ها و پذیرفتاری مغناطیسی تا حدی زیادی متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشند که شناخت و درک این ارتباط می‌تواند نقش مهمی در مدیریت خاک‌ها، به‌ویژه در مناطقی با قابلیت فرسایش‌پذیری بالا داشته باشد.

اطلاعات بسیار اندکی در مورد پذیرفتاری مغناطیسی خاک و ارتباط آن با پایداری خاکدانه‌ها در واحدهای ژئومورفیک موجود در مناطق خشک وجود دارد. پژوهش حاضر می‌کوشد تا تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پایداری خاکدانه و پذیرفتاری مغناطیسی در دو ژئوفرم بادی دشت داوران رفسنجان (استان کرمان) را تعیین نماید.

## مواد و روش‌ها

## معرفی منطقه مطالعاتی

دشت داوران در مختصات  $14^{\circ} 00' 56''$  تا  $41' 07''$   $56^{\circ}$  طول شرقی و  $29' 53'' 30^{\circ}$  تا  $30' 35'' 30^{\circ}$

ساختمان خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و پویای خاک است که دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عوامل اکولوژیکی و انسانی در درازمدت بر آن اثر می‌گذارند (Diaz-Zorita et al., 2002; Rabot et al., 2018). واحد اصلی ساختمان خاک، خاکدانه نام دارد. خاکدانه‌ها ذرات ثانویه‌ای هستند که در اثر هم‌آوری ذرات اولیه رس، سیلت و شن به همراه ماده آلی و عوامل سیمانی (اتصال‌دهنده) تشکیل می‌شوند (Bronick & Lal, 2005). خاکدانه‌سازی را می‌توان فرآیندی طبیعی محسوب نمود که طی آن مجموعه‌ای از ذرات خاک به‌گونه‌ای کنار هم قرار می‌گیرند که نیروهای نگه‌دارنده درونی آن‌ها قوی‌تر از نیروهای بین خاکدانه‌های مجاور است. خاکدانه‌ها نخست طی فرآیندهای فیزیکی تشکیل می‌شوند و فرآیندهای شیمیایی و زیستی در پایدارسازی آن‌ها مؤثر هستند (Martinez-Mena et al., 2008). برخی از عوامل ذاتی خاک (مانند مقدار رس، ماده‌ی آلی و سزکویی‌اکسیدها) از طریق فرآیندهای اتصال، موجب استحکام و چسبندگی ذرات خاک می‌شوند و بدین‌ترتیب در خاکدانه‌سازی مؤثر می‌باشند (Levy & Mamedov, 2002; Wuddivira et al., 2006). پایداری خاکدانه‌ها منافذ موجود در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد که این ویژگی نیز بر روی حرکت و ذخیره‌سازی آب در خاک، فرسایش، فعالیت‌های بیولوژیکی و همچنین رشد محصول مؤثر است (Amezka, 1999). در هر حال، پایداری خاکدانه‌ها دربردارنده اطلاعات کلیدی در مورد عملکرد و کیفیت خاک است (Chrenková et al., 2014; Wu et al., 2017).

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن موجود در خاک می‌باشند. در واقع، آهن می‌تواند به‌عنوان عامل خاکدانه‌ساز عمل کند. چون در فرآیند دانه‌بندی خاک و تشکیل کمپلکس‌های اکسیدی، موجب برقراری اتصالات قوی بین ذرات خاک می‌شود که در این راستا نقش اکسیدهای آهن در ایجاد خاکدانه‌های ریز، بیشتر است (Regelink et al., 2015). فازهای گوناگونی از آهن در خاک وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به آهن موجود در کانی‌های سیلیکاتی اولیه و رس‌ها، آهن

شدند که از هرگونه جابه‌جایی و به‌هم‌ریختگی نمونه‌ها جلوگیری گردد. در نهایت، نمونه‌های برداشت‌شده از دو واحد مزبور، به آزمایشگاه منتقل شدند.

#### مطالعات آزمایشگاهی

پس از هواخشک کردن نمونه‌های مرکب خاک و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1951)، کربن آلی به روش واگلی و بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، پی‌اچ گل اشباع با استفاده از دستگاه پی‌اچ‌متر مدل Ecomet، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج مدل Ecomet، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Richards, 1954)، گچ به روش استون (Nelson et al., 1978)، سدیم محلول با روش شعله‌سنجی و کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از روش کمپلکسومتری و تیتراسیون توسط ورسین (Lanyon & Heald, 1982) و مقدار آهن دیتیوناتی و اگزالاتی خاک با دستگاه جذب اتمی مدل BC SAVantAA (Mehra & Jackson, 1960) اندازه‌گیری شدند. با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول، مقدار عددی نسبت جذب سطحی سدیم (Sodium adsorption ratio: SAR) محاسبه شد. هم‌چنین، جداسازی اجزای گوناگون بخش شن خاک با استفاده از سری الک ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی‌متر انجام گرفت که برای این منظور از محتویات سیلندرهای به‌کار گرفته‌شده برای تعیین بافت خاک استفاده گردید. برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها، از میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک خشک استفاده شد. پس از تصحیح شن، برای محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) از رابطه زیر استفاده شد:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{W_t} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $X_i$  قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک بر حسب میلی‌متر،  $W_i$  وزن خشک خاکدانه‌های روی هر الک بر حسب گرم و  $W_t$  وزن کل نمونه خاک بر حسب گرم است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک، به‌وسیله دستگاه مغناطیس‌سنج بارتینگتن مدل MS2 موجود در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. برای این منظور، حدود ۱۰ گرم از خاک هوا خشک دو میلی‌متر را درون یک ظرف

عرض شمالی و در ۱۵ کیلومتری شرق رفسنجان قرار دارد. ژئوفرم‌های غالب این منطقه شامل تلماسه (Sand dune)، سنگفرش بیابانی (Desert pavement) (دشت ریگی) و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی (Aeolian clay flat) می‌باشند. از این‌رو، بخشی از اراضی دو واحد ژئومورفیک دشت ریگی و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی با مساحتی حدود ۲۰۰۰ هکتار برای این پژوهش انتخاب شدند (شکل ۱). میانگین درجه حرارت و بارش سالانه‌ی منطقه مورد مطالعه در یک دوره آماری ۲۵ ساله (۱۳۶۹ تا ۱۳۹۴) به‌ترتیب ۱۸/۹ درجه‌ی سلسیوس و ۸۰/۳۱ میلی‌متر است. مواد مادری خاک‌های منطقه شامل رسوبات کواترنری است که به‌صورت رسوبات بادرفتی و آبرفتی - می‌باشند و از سنگ‌های مختلف (مانند مارن، شیل، کنگلومرا، گرانیت، ماسه‌سنگ، کوارتزیت و سنگ‌آهک) منشأ می‌گیرند. منطقه مورد مطالعه دارای شیب یکنواخت با جهت شرق به غرب بوده که میانگین شیب آن، یک درصد است.

#### مطالعات ستادی و صحرائی

ابتدا با استفاده از تصاویر گوگل ارث، دو ژئوفرم بادرفتی "پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی" و "دشت ریگی" انتخاب شدند (شکل ۱). پس از تعیین محدوده هر واحد در نرم‌افزار ایلویس، موقعیت ۹۳ نقطه مشاهداتی در قالب یک الگوی شبکه‌ای منظم در این واحدها (۵۰ نمونه در دشت ریگی و ۴۳ نمونه در پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی) با فاصله ۲۰۰ متری تعیین شد و مختصات جغرافیایی آن‌ها به‌دست آمد. پس از آن، موقعیت هر یک از نقاط مشاهداتی با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی در ژئوفرم‌های مورد مطالعه مشخص شد و از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری) هر نقطه مشاهداتی، نمونه‌برداری صورت گرفت. پس از تعیین موقعیت هر نقطه، از چهار نقطه در اطراف آن به شعاع تقریبی یک متر از مرکز آن نقطه، نمونه‌ها جمع‌آوری شدند. در ادامه، همه نمونه‌ها با هم مخلوط شدند و یک نمونه خاک مرکب از هر نقطه تهیه شد. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها از هر نقطه در عمق مورد نظر با بیلچه نمونه‌ی خاک برداشت گردید و داخل یک قوطی پلاستیکی ریخته شد. سپس قوطی‌ها در داخل یک جعبه طوری قرار داده

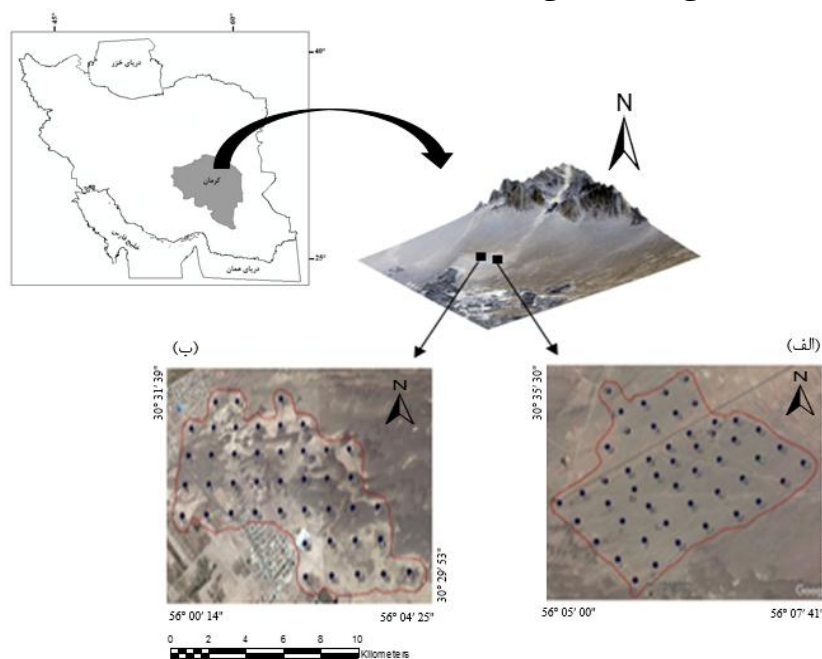
فیزیکی و شیمیایی خاک با میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک و پایداری خاکدانه‌ها و نیز مطالعه ارتباط بین پذیرفتاری مغناطیسی با پایداری خاکدانه‌ها در واحدهای مختلف، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. اجرای تحلیل رگرسیون و به‌کارگیری مدل‌های رگرسیونی به‌منظور بررسی و تشخیص متغیرهای مؤثر (مثبت یا منفی) در تبیین واریانس یک متغیر وابسته، مستلزم آن است که هرکدام از آنها به‌صورت متغیری واحد و در مقیاس حداقل فاصله‌ی در دسترس باشند (Amini & Boroumand, 2015). لذا برای بررسی و تعیین عوامل و متغیرهای مؤثر بر "میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها" و "پذیرفتاری مغناطیسی" به‌عنوان متغیرهای وابسته، نمونه‌های خاک مربوط به هر دو واحد ژئومورفیک مورد مطالعه با یکدیگر تجمیع شدند و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه در این واحدها به‌عنوان متغیرهای مستقل (پیش‌بین) وارد مدل رگرسیون شدند و با استفاده از روش گام به گام تحلیل گردیدند. تمامی این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.

پلاستیکی کوچک با قطر ۲/۲ سانتی‌متر ریخته تا ارتفاع آن به حدود ۲ سانتی‌متر برسد. ظرف مزبور را داخل دستگاه مغناطیس‌سنج قرار داده و مقدار پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه در دو فرکانس ۰/۴۶ ( $\chi_{lf}$ ) و ۴/۶ ( $\chi_{hf}$ ) کیلوهرتز قرائت‌های شاهد بر روی ظروف خالی، در ابتدا و انتهای قرائت نمونه‌های خاک، برای تصحیح اثرات احتمالی ظرف بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی انجام گرفت. سپس درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) از طریق معادله زیر محاسبه شد (Dearing, 1999):

$$\chi_{fd} = \frac{\chi_{hf} - \chi_{lf}}{\chi_{lf}} \quad (2)$$

که  $\chi_{hf}$  و  $\chi_{lf}$  به ترتیب بیانگر پذیرفتاری مغناطیسی جرمی نمونه‌های خاک در فرکانس‌های پایین (۰/۴۶ کیلوهرتز) و بالای (۴/۶ کیلوهرتز) دستگاه برحسب مترمکعب بر کیلوگرم می‌باشند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، شاخص‌های موقعیت (مانند میانگین و میانه)، شاخص‌های پراکنش (مانند واریانس و انحراف معیار) و شاخص‌های شکل (مانند ضریب چولگی و ضریب تغییرپذیری) داده‌ها در محیط نرم‌افزاری SPSS بررسی شدند. همچنین، برای بررسی ارتباط ویژگی‌های



شکل ۱- موقعیت ژئومورف‌های انتخاب‌شده به‌همراه نقاط مشاهداتی در هر واحد ژئومورفیک

Figure 1. The position of selected geoforms showing sampling sites at each geomorphic unit

(الف: دشت ریگی، ب: پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی)

(A: desert pavement, B: aeolian clay flat)

## نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌ها شامل میانگین، میانه، واریانس، کمینه، بیشینه، چولگی و ضریب تغییرپذیری برای دو واحد ژئوفرم دشت ریگی و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده‌اند. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی ( $\chi_{fd}$ ) در دشت ریگی از ۵۵۸ تا ۱۳۲۴/۲ با میانگین  $۸۴۲/۵۳ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  (۱) و در پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی از ۲۳۶/۴ تا ۱۳۵۶/۸ و میانگین  $۶۳۲/۱۳ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  متغیر است که این مقادیر نسبت به نتایج گزارش شده برای پذیرفتاری مغناطیسی نقاط مختلف ایران، خیلی زیاد است. برای نمونه، میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در شمال ایران از حدود  $۳۰ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  در رسوبات لسی تا حدود  $۲۰۰ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  در خاک‌های قدیمی متغیر است (Karimi et al., 2013). درحالی‌که در خاک‌های جنوب مشهد، دامنه تغییرات آن از ۵/۲ تا  $۱۲۲/۷ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  است (Karimi & Khademi, 2012). با توجه به اینکه واحدهای مزبور تحت تأثیر رسوبات بادرفتی قرار دارند و نمونه‌ها نیز از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری) برداشت شده‌اند و فرآیندهای خاک‌ساز در آن‌ها اتفاق نیفتاده است، این پذیرفتاری مغناطیسی زیاد، نشان دهنده طبیعت مواد مادری است. به عبارت دیگر، پذیرفتاری مغناطیسی موجود، به ترکیب مواد مادری منطقه بستگی دارد. زان و همکاران (Zan et al., 2015) اعلام نمودند که میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها به مقدار زیادی تحت تأثیر سنگ مادری است. پژوهش حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2015) که بر روی خاک‌های موجود در برش طولی کرمان تا بافت (جنوب شرقی ایران) انجام شد، نشان دهنده تأثیر ماده مادری بر روی پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های آذرین و رسوبی بود. البته میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های حاصل از سنگ‌های آذرین، بسیار بیشتر از سنگ‌های رسوبی بود. سرمست و همکاران (Sarmast et al., 2017) نیز پژوهشی بر روی خاک‌های جنوب شرقی ایران انجام دادند و محدوده پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها را بین  $۱۹۳/۱$  تا  $۲۷۰۴/۲ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  بیان نمودند. ایشان وجود اختلاف در میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌هایی با مواد مادری مشابه را به دلیل

تفاوت در روند شکل‌گیری این خاک‌ها (شرایط اسیدی و بازی آن‌ها) بیان کردند. هم‌چنین، لو (Lu, 2000) با تحقیق بر روی پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های چین، اظهار داشت که مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ‌های بازالت، آندزیت و گرانودیوریت، بیش از  $۲۵۰ \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \times 10^{-8}$  و خاک‌های تشکیل شده بر روی گرانیت و سایر سنگ‌های آذرین اسیدی و حتی خنثی در حدود  $۵۰$  تا  $۱۲۰ \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$  می‌باشد. طاقدیس و فرپور (Taghdis & Farpoor, 2018) با مطالعه خاک‌های منطقه بردسیر استان کرمان اظهار داشتند که علی‌رغم بالا بودن مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی، مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس پایین و در محدوده  $۰/۵۲$  تا  $۱/۷۳$  درصد با میانگین  $۱/۰۴$  درصد متغیر است که نشان‌دهنده حضور ذرات چندحوزه‌ای به ارث رسیده از مواد مادری آذرین به‌عنوان منشأ اصلی پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های این منطقه می‌باشد.

از سوی دیگر، نتایج جدول‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده آن است که میانگین پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ( $\chi_{fd}$ ) در هر دو واحد مطالعاتی، بسیار کم (زیر یک درصد) است. از سوی دیگر، هر چه اختلاف بین  $\chi_{fd}$  و  $\chi_{hf}$  بیشتر باشد؛ نشان‌دهنده حضور ذرات کوچک‌تر از  $۰/۰۲$  میکرون است که به ذرات سوپراپارامغناطیس معروف هستند. به دیگر سخن، هر چه مقدار  $\chi_{fd}$  بیشتر باشد، مقدار ذرات سوپراپارامغناطیس نیز در خاک بیشتر خواهد بود. به‌طور معمول، مقادیر کم پذیرفتاری وابسته به فرکانس به دلیل کم بودن فرایندهای پدوژنیک است و این که پذیرفتاری مغناطیسی از مواد مغناطیسی موجود در مواد مادری منشأ گرفته است. دیرینگ (Dearing, 1999) بیان نمود خاک‌هایی با پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس کمتر از پنج درصد، فاقد مواد سوپراپارامغناطیس هستند و خاصیت مغناطیسی آن‌ها مربوط به مواد مادری است که این استدلال برای خاک‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر نیز صحت دارد. مقدار آهن دیتیوناتی ( $\text{Fe}_d$ ) در منطقه مطالعاتی به دلیل طبیعت ماده مادری بسیار زیاد است، به‌گونه‌ای که در واحد دشت ریگی از  $۳۰۰۰$  تا  $۴۸۰۸/۷$  با میانگین  $۴۲۸۷/۶۱ \text{ mg kg}^{-1}$  و در واحد پهنه رسی از  $۳۴۸۵$  تا  $۹۰۱۰$  با میانگین  $۵۸۹۰/۸۷ \text{ mg kg}^{-1}$  متغیر است

میزان آهن دیتیوناتی تحت تأثیر ماده مادری از ۸ تا ۲۰ (mg kg<sup>-1</sup>) و آهن اگزالاتی از ۰/۳ تا ۵ (mg kg<sup>-1</sup>) در افق‌های سطحی خاک متغیر بود. احتمالاً دلیل بیشتر بودن میزان آهن دیتیوناتی در خاک‌های مطالعاتی پژوهش حاضر نسبت به خاک‌های مطالعاتی پژوهش مزبور، تفاوت در ماده مادری می‌باشد.

(جدول‌های ۱ و ۲). میزان آهن اگزالاتی (Fe<sub>o</sub>) نیز در واحد دشت ریگی از ۰/۳۴ تا ۱۴/۰۷ با میانگین ۴/۷۵ (mg kg<sup>-1</sup>) و در واحد پهنه رسی از ۰/۸۴ تا ۱۴/۳۷ با میانگین ۷/۲۲ (mg kg<sup>-1</sup>) متغیر است (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج مطالعه سرمست و همکاران (Sarmast *et al.*, 2017) در خاک‌های جنوب استان کرمان نشان داد که

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطالعه‌شده در واحد ژئوform دشت ریگی

Table 1. Summary statistics of physical and chemical soil properties in desert pavement geoform unit

Variable	Unit	Mean	Median	Variance	Min	Max	CV (%)	Skewness
pH	-	7.96	8.01	0.11	7.02	9.01	4.1	-0.278
EC	dS m <sup>-1</sup>	13.24	9.51	137.29	1.51	52.32	88.5	1.213
SP	%	29.51	30.78	28.69	17.90	41.32	18.1	-0.222
OM	%	0.30	0.27	0.01	0.17	0.68	33.3	3.230
CCE	%	25.2	25.1	3.87	17.5	29.5	7.8	-0.631
Gyps	%	0.14	0.10	0.018	0	0.5	95.8	0.866
SAR	(mmol <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	17.89	15.67	299.24	0.70	108.66	96.7	3.080
C	%	8.6	9.0	21.14	1.0	16.4	53.5	-0.042
Si	%	24.2	25.4	50.52	9.4	39.4	29.4	-0.215
S	%	67.2	62.8	84.42	56.8	86.8	13.7	0.960
VCS	%	0.9	0.6	1.14	0.0	6.0	118.6	2.546
CS	%	2.0	1.6	1.45	0.6	5.9	60.2	1.768
MS	%	5.7	4.9	5.43	2.5	14.8	40.8	1.356
FS	%	33.9	32.3	33.39	24.4	47.4	17.0	0.836
VFS	%	24.6	24.6	12.29	17.5	32.5	14.3	-0.086
MWD	mm	1.71	1.77	0.03	1.20	1.92	10.1	-1.277
Fe <sub>o</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	4.75	4.62	6.29	0.34	14.07	52.8	0.874
Fe <sub>d</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	4287.62	4429.10	163020.71	3000	4808.7	9.4	-1.280
χ <sub>fd</sub>	%	0.39	0.43	0.02	0.10	0.65	36.3	-0.444
χ <sub>lf</sub>	×10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	842.5	758.25	40952.90	558	1324.	24.0	0.896
χ <sub>hf</sub>	×10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	839.8	755.25	40385.01	555.6	1320.7	23.9	0.898

EC: electrical conductivity; SP: saturation percentage; OM: organic material; CCE: calcium carbonate equivalent; Gyps: gypsum; SAR: sodium adsorption ratio; C: clay; Si: silt; S: sand; VCS: very coarse sand; CS: coarse sand; MS: medium sand; FS: fine sand; VFS: very fine sand; MWD: mean weight diameter; Fe<sub>o</sub>: ammonium oxalate extractable iron; Fe<sub>d</sub>: dithionite-citrate extractable iron; χ<sub>fd</sub>: low frequency magnetic susceptibility; χ<sub>hf</sub>: high frequency magnetic susceptibility; χ<sub>fd</sub>: frequency dependence magnetic susceptibility.

پایین خصوصیت مورد نظر و تغییرات بیشتر از ۹۰ درصد، حاکی از تغییرپذیری بالای آن خصوصیت است. بر این اساس، پی‌اچ در هر دو واحد مطالعاتی و کربنات کلسیم معادل و آهن دیتیوناتی در واحد دشت ریگی از تغییرپذیری کم و متغیرهای گچ، نسبت جذب سطحی سدیم و شن خیلی‌درشت از واحد دشت ریگی و متغیرهای گچ، شن درشت و خیلی‌درشت از واحد پهنه رسی، دارای تغییرپذیری بالا هستند. سایر متغیرها تغییرپذیری متوسطی داشتند (جدول‌های ۱ و ۲). جدول‌های ۳ و ۴ رابطه همبستگی خطی ویژگی‌های

میانگین میزان پایداری خاکدانه‌ها (MWD) در واحد دشت ریگی، ۱/۷۱ میلی‌متر و در واحد پهنه رسی، ۱/۴۹ میلی‌متر می‌باشد. نگاهی به ضریب تغییرات (CV) محاسبه شده برای ویژگی‌های مختلف نشان می‌دهد که شن خیلی‌درشت در هر دو واحد دشت ریگی و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی، دارای بیشترین تغییرات می‌باشند. این در حالی است که واکنش خاک در هر دو واحد مزبور، از کمترین تغییرپذیری برخوردار است. وای و همکاران (Wei *et al.*, 2008) اظهار داشتند که تغییرات کم‌تر از ۱۰ درصد، دلالت بر تغییرپذیری

سوی دیگر، مقدار ضریب همبستگی بین مقدار رس و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، بیشتر از ضریب همبستگی بین درصد کربنات کلسیم معادل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بود (جدول‌های ۳ تا ۶). نکته قابل تأمل در این پژوهش، آن است که در بین اجزای معدنی خاک، سیلت بیشترین نقش را در پایداری ساختمان خاک داشته است و همبستگی مثبت و معنادار قوی بین میزان سیلت و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو واحد مذکور مشاهده شد. نگاهی به ضرایب همبستگی موجود در جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که حتی تأثیر سیلت بر پایداری خاکدانه‌ها بیش از رس بوده است. در مقابل، همبستگی منفی و معناداری بین پایداری ساختمان خاک و میزان شن در دو واحد ژئومورفیک مورد مطالعه وجود داشت. صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2011) نیز به نتایج مشابهی در این زمینه دست یافتند.

فیزیکی خاک با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای ژئومورفیک مطالعاتی را نشان می‌دهند. همچنین، جدول‌های ۵ و ۶ نشانگر رابطه همبستگی خطی ویژگی‌های شیمیایی خاک با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در دو واحد دشت ریگی و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی هستند. مقدار رس خاک، یکی از عوامل مؤثر بر تشکیل خاکدانه‌های پایدار در خاک است. اطمینان و همکاران (Etminan *et al.*, 2010) بیان نمودند که مقدار رس موجود در خاک، در مقایسه با کربنات کلسیم موجود در خاک با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همبستگی قوی‌تری دارد. اظهارات این پژوهشگران، با نتایج حاصل از پژوهش حاضر همخوانی دارد. چرا که در این پژوهش نیز همبستگی مثبت و معناداری بین مقدار رس و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو واحد ژئومورفیک مورد مطالعه دیده شد و از

جدول ۲- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطالعه‌شده در واحد ژئوفرم پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی

Table 2. Summary statistics of physical and chemical soil properties in aeolian clay flat geoform unit

Variable	Unit	Mean	Median	Variance	Min	Max	CV (%)	Skewness
pH	-	7.85	7.81	0.28	7.04	8.9	6.7	0.431
EC	dS m <sup>-1</sup>	21.42	21.8	296.5	1.05	55.5	80.4	0.277
SP	%	31.43	31.1	32.7	20.87	46.03	18.2	0.629
OM	%	0.31	0.23	0.03	0.18	0.9	55.9	1.955
CCE	%	23.9	24.5	29.1	16.8	42	22.6	0.845
Gyps	%	0.14	0.1	0.02	0	0.5	101	1.135
SAR	(mmol l <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	17.89	17.85	167.3	0.88	58.5	72.3	1.132
C	%	3.7	3	9.3	1	11	82.4	0.859
Si	%	26.7	26.2	208.1	4.2	56.2	54	0.141
S	%	69.6	68.8	230.2	38.8	94.8	21.8	0
VCS	%	1	0.6	1.5	0	4.9	122.5	1.801
CS	%	4	2.4	24.5	0.3	27.1	123.7	2.988
MS	%	8.4	6.7	44.9	0.8	36.1	79.8	2.469
FS	%	28.5	28	150.2	5.9	62.4	43	0.493
VFS	%	27.7	26.4	170.8	10	56.8	47.2	0.757
MWD	mm	1.49	1.58	0.08	0.54	1.8	19	-0.985
Feo	mg kg <sup>-1</sup>	7.22	7.07	16.52	0.84	14.37	56.3	0.05
Fed	mg kg <sup>-1</sup>	5890.8	5692.5	1158560.4	3485	9010	18.3	0.756
χ <sub>fd</sub>	%	0.53	0.49	0.07	0.08	1.2	49.9	0.663
χ <sub>lf</sub>	×10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	632.1	574.7	76411.9	236.4	1356.	43.7	0.701
χ <sub>hf</sub>	×10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	629.3	572.2	76153.2	234.9	1350.	43.8	0.7

EC: electrical conductivity; SP: saturation percentage; OM: organic material; CCE: calcium carbonate equivalent; Gyps: gypsum; SAR: sodium adsorption ratio; C: clay; Si: silt; S: sand; VCS: very coarse sand; CS: coarse sand; MS: medium sand; FS: fine sand; VFS: very fine sand; MWD: mean weight diameter; Fe<sub>o</sub>: ammonium oxalate extractable iron; Fe<sub>d</sub>: dithionite-citrate extractable iron; χ<sub>lf</sub>: low frequency magnetic susceptibility; χ<sub>hf</sub>: high frequency magnetic susceptibility; χ<sub>fd</sub>: frequency dependence magnetic susceptibility.

دلیل این موضوع را جایگزینی بیشتر آلومینیوم به جای آهن در ساختار بلوری آهن (مانند هماتیت، مگنتیت و مگهمیت) بیان نمودند که در نتیجه این جایگزینی، سطح ویژه افزایش می‌یابد و به دنبال آن، پایداری خاکدانه‌ها افزایش خواهد یافت.

ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2017) نیز با پژوهش بر روی خاک‌های قرمز رنگ جنوب چین، اظهار داشتند که اکسیدهای آهن و آلومینیوم تأثیر قابل توجهی بر پایداری خاکدانه‌ها دارند. ایشان تعامل اکسیدهای آهن و آلومینیوم و ماده‌ی آلی خاک و نقش‌های مختلف اکسیدهای آهن و آلومینیوم در شکل‌گیری و یا شکستن خاکدانه‌های با اندازه‌ی متوسط را کلیدی برای پایداری و توزیع اندازه‌ی خاکدانه‌های منطقه‌ی مطالعاتی خود بیان نمودند. بررسی جدول‌های ۳ تا ۶ حاکی از آن است که همبستگی آماری معناداری بین مقدار آهن اگزالاتی با هیچ‌یک از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه وجود ندارد؛ اما آهن دیتیوناتی با کل سیلت موجود در واحد دشت ریگی، دارای همبستگی مثبت معنادار و با کل شن، دارای همبستگی منفی معنادار می‌باشد. از سوی دیگر، ارتباطات معنادار اخیر در واحد پهنه‌ی رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی مشاهده نشد. نتایج پژوهش کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2016) نشان داد که آهن با شن، همبستگی مثبت معنادار و با سیلت و رس، همبستگی منفی معنادار داشت که دلیل این همبستگی را وجود آهن به ارث رسیده از ماده‌ی مادری بیان نمودند. نتایج پژوهش حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2015) در برش طولی کرمان - بافت نیز نشان داد که بیشترین میزان آهن در بخش شن خاک بود که نشان‌دهنده تأثیر مواد مادری بر میزان آهن خاک است. از سوی دیگر، نتایج بیانگر وجود یک رابطه همبستگی منفی بین پذیرفتاری مغناطیسی ( $\chi_f$ ) و قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی و کربنات کلسیم معادل در هر دو واحد ژئومورفیک مطالعاتی می‌باشند (جدول‌های ۵ و ۶). سرمست و همکاران (Sarmast *et al.*, 2017) نیز در پژوهش خود بر روی خاک‌های جنوب شرقی ایران، رابطه‌ای منفی بین پذیرفتاری مغناطیسی و مقدار کربنات کلسیم معادل، گچ، انیدریت و نمک‌های محلول مشاهده کردند که نتایج ایشان با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارند.

نتایج پژوهش حاضر نیز بیانگر وجود رابطه همبستگی مثبت بین پایداری خاکدانه‌ها با میزان ماده آلی در واحدهای ژئومورفیک مطالعاتی است (جدول‌های ۵ و ۶). هرچند این رابطه از لحاظ آماری معنی‌دار نیست که شاید دلیل احتمالی آن وجود میزان ماده آلی بسیار کم (با میانگین تقریبی ۰/۳ درصد در واحدهای دشت ریگی و پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی) در اقلیم خشک منطقه مطالعاتی باشد؛ لیکن همین مقدار کم به‌عنوان یک عامل سیمانی‌کننده در هم‌آوری ذرات و تشکیل خاکدانه‌هایی با پایداری بالاتر، عمل نموده است. پژوهشگران مختلف نیز به نقش ماده آلی در استحکام خاکدانه‌ها اذعان نموده‌اند (Tejada *et al.*, 2006; Karimi *et al.*, 2008; Hajabbasi *et al.*, 2008). نگاهی گذرا به ضرایب همبستگی بین ماده آلی با پایداری خاکدانه‌ها و نیز مقدار کربنات کلسیم معادل با پایداری خاکدانه‌ها (جدول‌های ۵ و ۶) حاکی از بالاتر بودن این ضریب برای کربنات کلسیم معادل است. به دیگر سخن، به‌نظر می‌رسد که نقش کربنات‌ها در پایداری ساختمان خاک واحدهای مطالعاتی بیشتر از ماده آلی بوده است. اقلیم خشک منطقه و بالا بودن میزان کربنات‌ها در خاک‌های مطالعاتی می‌تواند توجیه‌کننده این نتایج باشد.

از سوی دیگر، نتایج گویای رابطه همبستگی مستقیمی بین شکل‌های آهن با پایداری خاکدانه‌ها در هر دو ژئوفرم مطالعاتی می‌باشد؛ لیکن میزان این همبستگی برای آهن دیتیوناتی بسیار بالا و معنادار است (جدول‌های ۵ و ۶). کم بودن مقدار آهن اگزالاتی در کل منطقه می‌تواند دلیل پایین بودن ضریب همبستگی بین این ویژگی با MWD باشد. از سوی دیگر، بیشتر بودن میزان آهن دیتیوناتی و نیز درصد سیلت در واحد پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی، می‌تواند دلیلی بر بالاتر بودن ضریب همبستگی بین آهن دیتیوناتی با MWD در این واحد باشد. برخلاف تصور عموم که بیان می‌شود آهن با ساختار بلوری ضعیف در پایداری خاکدانه‌ها بیشترین نقش را دارد (Goebel *et al.*, 2017)، یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که آهن دیتیوناتی، نقش مهم‌تری نسبت به آهن اگزالاتی در پایداری خاکدانه‌ها داشته است. این یافته‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش گوئبل و همکاران (Goebel *et al.*, 2017) مطابقت دارند. آن‌ها



جدول ۳- همبستگی ویژگی‌های فیزیکی خاک با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در واحد ژئوform دشت ریگی

Table 3. Correlation of some soil physical properties with dry aggregate stability, iron shapes and magnetic susceptibility in desert pavement geoform unit

	C	Si	S	VCS	CS	MS	FS	VFS	SP	MWD	Feo	Fed	$\chi_{fd}$	$\chi_{lf}$	$\chi_{hf}$
C	1														
Si	0.19	1													
S	-0.65**	0.87**	1												
VCS	-0.25	-0.2	0.28*	1											
CS	-0.42**	-0.5**	0.6**	0.42**	1										
MS	-0.52**	-0.67**	0.78**	0.32*	0.7**	1									
FS	-0.63**	-0.73**	0.88**	0.18	0.38**	0.7**	1								
VFS	-0.08	-0.39**	0.33**	-0.22	0	-0.1	0.02	1							
SP	0.48**	0.36**	-0.52*	-0.33*	-0.47**	-0.4**	-0.49**	-0.03	1						
MWD	0.33*	0.42**	-0.44**	0.22	0.42**	-0.32*	-0.46**	0.01	0.19	1					
Feo	0.23	-0.03	0.14	0.12	-0.15	0.11	0.22	-0.05	0.03	0	1				
Fed	0.23	0.42**	-0.44**	-0.22	-0.41**	-0.32*	-0.46**	0.01	0.19	0.75**	0	1			
$\chi_{fd}$	0.14	0.5**	-0.41**	-0.31*	-0.17	-0.16	0.12	0.13	0.01	0.26	0.23	0.22	1		
$\chi_{lf}$	0.2	0.32*	0.45**	0.11	0.32*	0.41**	0.3*	0.32*	-0.04	-0.25	0.04	-0.25	-0.17	1	
$\chi_{hf}$	0.2	0.32*	0.45**	0.11	0.32*	0.41**	0.35*	0.32*	-0.04	-0.25	0.04	-0.26	-0.18	0.99**	1

\*\* and \* significant at 1 and 5% probability level respectively

جدول ۴- همبستگی ویژگی‌های فیزیکی خاک با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در واحد ژئوفرم پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرستی

Table 4. Correlation of some soil physical properties with dry aggregate stability, iron shapes and magnetic susceptibility in aeolian clay flat geoform unit

	C	Si	S	VCS	CS	MS	FS	VFS	SP	MWD	Feo	Fed	$\chi_{fd}$	$\chi_{lf}$	$\chi_{hf}$	
C	1															
Si	0.14	1														
S	-0.33*	-0.98**	1													
VCS	-0.13	-0.16	0.18	1												
CS	-0.14	-0.51**	0.51**	0.14	1											
MS	-0.3*	-0.6**	0.63**	0.02	0.68**	1										
FS	-0.21	-0.71**	0.72**	0.23	0.09	0.45**	1									
VFS	0.03	0.06	-0.07	-0.21	-0.29	-0.58**	-0.48**	1								
SP	0.19	0.62**	-0.46**	-0.27	-0.33*	-0.56**	-0.58**	0.31*	1							
MWD	0.32*	0.41**	-0.45**	-0.47**	-0.32*	-0.36*	-0.46**	0.32*	0.37*	1						
Feo	-0.18	0.09	-0.17	-0.04	-0.21	-0.07	0.09	-0.04	0.04	0.21	1					
Fed	0.05	0.16	-0.17	-0.01	-0.11	-0.31*	-0.19	0.24	0.28	0.02	-0.02	1				
$\chi_{fd}$	0.07	0.48**	-0.47**	-0.31*	-0.01	-0.39**	0.48**	0.17	0.42**	0.11	-0.09	0.17	1			
$\chi_{lf}$	0.01	0.54**	0.51**	0.12	0.36*	0.69**	0.49**	0.47**	-0.55**	-0.36*	-0.12	-0.23	-0.53**	1		
$\chi_{hf}$	0.01	0.54**	0.51**	0.12	0.36*	0.69**	0.49**	0.47**	-0.55**	-0.36*	-0.12	-0.24	-0.53**	0.99**	1	

\*\* and \* significant at 1 and 5% probability level respectively

جدول ۵- همبستگی ویژگی‌های شیمیایی با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در واحد ژئوفرم دشت ریگی

Table 5. Correlation of some soil chemical properties with dry aggregate stability, iron shapes and magnetic susceptibility in desert pavement geofrom unit

	pH	EC	OM	CCE	Gyps	SAR	MWD	Feo	Fed	$\chi_{fd}$	$\chi_{lf}$	$\chi_{hf}$
pH	1											
EC	-0.74**	1										
OM	-0.47**	0.52**	1									
CCE	0.2	0.03	-0.1	1								
Gyps	-0.03	0.1	0.09	0.08	1							
SAR	-0.4**	0.51**	0.03	0.25	-0.02	1						
MWD	0.21	-0.15	0.15	0.17	0.19	0.05	1					
Feo	0.07	-0.04	0.2	-0.16	0	-0.13	0	1				
Fed	0.21	-0.15	-0.15	-0.17	-0.15	0.05	0.62**	0	1			
$\chi_{fd}$	0.01	-0.05	-0.03	-0.02	-0.04	0.01	0.26	0.23	0.26	1		
$\chi_{lf}$	0.03	-0.07	-0.13	-0.01	-0.04	0.13	-0.25	0.04	-0.25	-0.17	1	
$\chi_{hf}$	0.02	0.07	-0.13	-0.01	-0.04	0.13	-0.25	0.04	-0.26	-0.18	0.99**	1

کریمی و همکاران (Karimi et al., 2016) با مطالعه خاک‌های دشت مشهد اظهار داشتند که بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی متأثر از بخش شن خاک بوده است و همبستگی کمی بین پذیرفتاری مغناطیسی با میزان سیلت و رس وجود دارد. همچنین، نتایج به دست آمده از حل مدل رگرسیونی، گویای آن است که از میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف، تنها دو متغیر آهن دیتیوناتی و شن، تأثیر معناداری بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها و سه متغیر شن، رس و قابلیت هدایت الکتریکی، تأثیر معناداری بر پایداری خاکدانه‌ها دارند (جدول‌های ۷ و ۸).

همچنین، نتایج به دست آمده از حل مدل رگرسیونی، گویای آن است که از میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف، تنها دو متغیر آهن دیتیوناتی و شن، تأثیر معناداری بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها و سه متغیر شن، رس و قابلیت هدایت الکتریکی، تأثیر معناداری بر پایداری خاکدانه‌ها دارند (جدول‌های ۷ و ۸). با توجه به ضرایب بتا، ترتیب نقش‌آفرینی متغیرهای مستقل خروجی مدل در تبیین واریانس پذیرفتاری مغناطیسی به ترتیب مربوط به متغیرهای آهن دیتیوناتی و شن می‌باشند. پیش از این نیز به رابطه همبستگی مثبت و معنادار پذیرفتاری مغناطیسی با ذرات شن و تأثیرپذیری آن از مواد مادری اشاره شد که نتایج مدل رگرسیونی نیز مؤید این مطلب می‌باشند.

به‌طور کلی، مواد دیامغناطیس مانند گچ، کربنات‌ها، ماده آلی و آب، مقدار پذیرفتاری مغناطیسی را کاهش می‌دهند. در بین مواد دیامغناطیس، گچ و کربنات‌ها به دلیل تحرکی که در خاک دارند، در جریان فرآیندهای خاک‌سازی، باعث کاهش تأثیر مواد مغناطیسی می‌شوند و اثر فرآیندهایی که سبب تغییر پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌شوند را کم‌رنگ می‌کنند (Orgeira et al., 2011). کریمی و همکاران (Karimi et al., 2013) نشان دادند که گچ و کربنات‌ها به نسبت سهمی که از خاک اشغال می‌کنند، باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند و تأثیر عوامل ایجادکننده یا تغییردهنده پذیرفتاری مغناطیسی را می‌پوشانند.

نتایج جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که رابطه همبستگی مثبت و معناداری بین سیلت کل، شن کل و اجزای آن با پذیرفتاری مغناطیسی در هر دو واحد ژئومورفیک مطالعاتی وجود دارد. بر اساس اظهارات یانگ و همکاران (Yang et al., 2009) و دی‌جانگ و همکاران (De Jong et al., 2000)، این موضوع بر به ارث رسیدگی خاصیت مغناطیسی خاک‌های مورد مطالعه از مواد مادری آن‌ها دلالت دارد. سرمست و همکاران (Sarmast et al., 2017) نیز همبستگی مثبت و معناداری بین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی و درصد شن خاک‌های مطالعاتی خود مشاهده کردند که آن‌ها نیز دلیل این موضوع را به ارث رسیدگی مواد مغناطیسی از مواد مادری دانسته‌اند.

جدول ۶- همبستگی ویژگی‌های شیمیایی با پایداری خاکدانه‌ها، شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی در واحد ژئوform پهنه رسی پوشیده با رسوبات بادرفتی

Table 6. Correlation of some soil chemical properties with dry aggregate stability, iron shapes and magnetic susceptibility in aeolian clay flat geoform unit

	pH	EC	OM	CCE	Gyps	SAR	MWD	FeO	Fed	$\chi_{fd}$	$\chi_{lf}$	$\chi_{hf}$
pH	1											
EC	-0.74**	1										
OM	-0.37*	0.44**	1									
CCE	-0.39**	0.18	-0.04	1								
Gyps	0.09	-0.12	-0.24	-0.28	1							
SAR	0.18	-0.32*	-0.05	0.11	0.02	1						
MWD	-0.46**	-0.12	0.13	0.27	0.07	0.1	1					
FeO	0.11	0.15	-0.08	-0.11	0.07	-0.08	0.11	1				
Fed	-0.34*	-0.11	-0.15	-0.06	-0.27	-0.05	0.75**	-0.02	1			
$\chi_{fd}$	0.28	-0.32*	-0.2	-0.3*	0.05	0.07	0.11	-0.09	0.17	1		
$\chi_{lf}$	0.15	-0.27	-0.02	0.3*	0.05	0.01	-0.36*	-0.12	-0.23	-0.53**	1	
$\chi_{hf}$	0.15	-0.27	-0.02	0.3*	0.05	0.01	0.36*	-0.12	-0.24	-0.53**	0.99**	1

شن و قابلیت هدایت الکتریکی، بازدارنده بوده است. پیش از این نیز به نقش مثبت رس در هم‌آوری ذرات خاک و ایجاد خاکدانه‌های با پایداری بیشتر اشاره شد که نتایج مدل رگرسیون نیز بر این موضوع صحت می‌گذارد.

ضرایب بتای موجود در جدول ۸ نیز نقش ذرات شن در پایداری خاکدانه‌ها را بیش از ذرات رس برآورد نموده‌اند. به دیگر سخن، کمترین نقش‌آفرینی در پایداری خاکدانه‌ها بر عهده قابلیت هدایت الکتریکی بوده است. نگاهی به علامت ضرایب بتا در این جدول نشان می‌دهد که تأثیر رس در این ارتباط، تقویت‌کننده و تأثیر ذرات

جدول ۷- نتایج اجرای مدل رگرسیون برای متغیر وابسته پذیرفتاری مغناطیسی

Table 7. The result of regression model for magnetic susceptibility as a dependent variable

Model's parameters	Non-standard coefficients (B)	Standard coefficients	P-value	VIF
Fixed coefficients	0.45	---	0.004	---
Fe <sub>d</sub> (ppm)	-6.452 × 10 <sup>-5</sup>	-0.336	0.001	1.007
Sand (%)	0.005	0.271	0.005	1.007

جدول ۸- نتایج اجرای مدل رگرسیون برای متغیر وابسته میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

Table 8. The result of regression model for weighted average diameter of aggregates as a dependent variable

Model's parameters	Non-standard coefficients (B)	Standard coefficients	P-value	VIF
Fixed coefficients	2.176	---	0	---
Sand (%)	-0.009	-0.423	0	1.505
Clay (%)	0.013	0.248	0.015	1.295
EC (dS m <sup>-1</sup> )	-0.004	-0.223	0.024	1.224

کانی‌های مغناطیسی در واحدهای مطالعاتی است که بر اساس نتایج حاصل از پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، این ذرات مغناطیسی در حد و اندازه شن (مگنتیت) و به ارث رسیده از مواد مادری هستند. با توجه به اندازه‌گیری آسان پذیرفتاری مغناطیسی و نیز قیمت تمام‌شده پایین آن و نیز نظر به وجود همبستگی بین این پارامتر با برخی از ویژگی‌های خاک که هزینه و زمان اندازه‌گیری آن‌ها نسبتاً بالا می‌باشد (مانند شکل‌های آهن)، پیشنهاد می‌گردد تا در مطالعات آتی، توابع انتقالی خاک (Pedotransfer functions) در رابطه با پذیرفتاری مغناطیسی مورد بررسی قرار گیرند.

### نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، می‌توان اظهار داشت که دو ویژگی پذیرفتاری مغناطیسی و پایداری خاکدانه به میزان زیادی متأثر از سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشند و در این میان، درصد شن فاکتوری تأثیرگذار بر این پارامترها می‌باشد. این موضوع احتمالاً به ویژگی‌های خاص منطقه مورد مطالعه (از جمله، وجود شن زیاد حاصل از بادرفت) مرتبط است. از سوی دیگر، میزان پذیرفتاری بسیار بالای خاک‌های مطالعاتی، حاکی از وجود میزان زیاد

**References**

- Amézketa E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14: 83–151.
- Amini A., and Boroumand T. 2015. Sociological explanation of influent factors on depopulation of rural Areas (Case study: Padena Sofla, Semirom). *Journal of Applied Sociology*, 26: 137-154.
- Bitjukova L.R., Scholger R., and Birke M. 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soil in Tallinn. *Physical and Chemistry of the Earth*, 24: 829-835.
- Bouyoucos G. J. 1959. A recalibration of hydrometr method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy*, 43: 434-438.
- Bronick C. J., and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Chrenková K., Mataix-Solera J., Dlapa P., and Arcenegui A. 2014. Long-term changes in soil aggregation comparing forest and agricultural land use in different Mediterranean soil types. *Geoderma*, 235–236: 290–299.
- Dearing J. A. 1999. Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System. Bartington Instruments Ltd., Oxford, UK, 54 p.
- De Jong E., Pennock D., and Nestor, P. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena*, 40: 291-305.
- Diaz-Zorita M., Perfect E., and Grove J.H. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil Tillage Research*, 64: 3-22.
- Etminan S., Kiani F., Khormali F., and Habashi H. 2010. Lime and soil clay percent Effects on Aggregate Sustainability in Shasht Kalateh Forest Lands in Golestan Province. 5<sup>th</sup> National Conference on New Ideas in Agriculture, Khorasgan, Islamic Azad University, Khorasgan Branch.
- 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.
- Fonetes M. P. F., De Oliveira T. S., De Costa L. M., and Campos A. A. G. 2000. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soil from daffereent parent materials. *Geoderma*, 96: 81-99.
- Goebel M. O., Kruegera J., Fleigeb H., Igelc J., Hornb R., and Bachmann J. 2017. Frequency dependence of magnetic susceptibility as a proxy for fine-grained. *Catena*, 158: 46–54.
- Hajabbasi M., Besalatpour A., and Melali A. 2008. Impacts of converting rangelands to cultivated land on physical and chemical properties of soils in west and southwest of Isfahan. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11: 525-534.
- Hosseini S.S., Esfandiarpour Borujeni I., Farpoor M.H., and Karimi A.R. 2015. Comparison of different soil development indices along Kerman-Baft transect. *Journal of Soil Management and Sustainable*, 5: 1-23. (In Persian)
- Karimi A., Haghnia G. H., and Ayoubi SH. 2016. Impacts of parent material and land use on agnetic susceptibility and selected heavy metals in surface soils of Mashhad plain, northeastern Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 138: 127-134.
- Karimi A., and Khademi H. 2012. Effects of Parent Materials, Gypsum and Carbonates on the Magnetic Susceptibility of Soils in Southern Mashhad. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 16: 247- 260. (In Persian)
- Karimi A., Khademi H., and Ayoubi SH. 2013. Magnetic susceptibility and morphological characteristics of a loess–paleosol sequence in northeastern Iran. *Catena*, 101: 56–60.
- Karimi H., Soufi M., Haghnia G.H., and Khorasani R. 2008. Investigation of aggregate stability and soil erosion potential in some loamy and sandy clay loam soils: case study in Lamerd watershed (south of Fars province). *Journal of Agriculture Science and Natural Resource*, 14: 11-20. (In Persian)
- Lanyon L. E., and Heald W. R. 1982. Magnesium, calcium, strontium, and barium. Methods of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Properties, Methods of Soil Analysis. Part 2, 247-262.
- Levy G. J., and Mamedov A. I. 2002. High-energy-moisture-characteristic aggregate stability as a predictor for a seal formation. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1603–1609.
- Lu S. G. 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena*, 40: 359–373.

- Martinez-Mena M., Lopez J., Almagro M., Boix-Fayos V., and Albaladejo J. 2008. Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of south-east Spain. *Soil and Tillage Research*, 99: 119-129.
- Mehra O. P., and Jackson M. L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7: 317-327.
- Nelson D. W., and Sommers L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: laboratory methods. In: Sparks D. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Soil Science Society of America Journal, Madison, Wisconsin, pp. 961-1010.
- Nelson R. E., Klameth L. C., and Nettleton W. D. 1978. Determining soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 659-661.
- Orgeira M., Egli R., and Compagnucci R. 2011. A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils. In: Petrovský E. et al. (Eds.), *the Earth's Magnetic Interior*. IAGA Special Sopron Book Series, Springer, the Netherlands, pp. 361-397.
- Preetz H., Igel J., Hannam J.A., and Stadler S. 2017. Relationship between magnetic properties and reddening of tropical soils as indicators of weathering. *Geoderma*, 303: 143-149.
- Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., and Vogel H.J. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314: 122-137.
- Regelink I. C., Stoof C. R., Rousseva S., Weng L., Lair G. J., Kram P., Nikolaidis N. P., Kercheva M., Banwart S., and Comans R. N. J. 2015. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*, 247-248: 24-37.
- Richards L. A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline-Alkali Soils*. U.S.D.A. Hand book, Washington, D.C., U.S.A. 60p.
- Salehi A., Mohammadi A. and Safari A. 2011. Investigation and comparison of physical and chemical soil properties and quantitative characteristics of trees in less-damaged and damaged area of Zagross forests (Case study: Poldokhtar, Lorestan province). *Iranian Journal of Forest*, 3: 81-89. (In Persian)
- Sarmast M., Farpoor M. H., and Esfandiarpour Boroujeni I. 2017. Magnetic susceptibility of soils along a lithotoposequence in southeast Iran. *Catena*, 156: 252-262.
- Taghdis S., and Farpoor M. 2018. Magnetic Susceptibility Related to Soil Properties in Different Land Uses of Bardsir Region, Kerman Province. *Journal of Water and Soil*, 32 (1): 185-197. (In Persian)
- Tejada M., Garcia C., Gonzalez J. L., and Hernandez M. T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry Journal*, 38: 1413-1421.
- Wei J. B., Xiao D. N., Zeng H., and Fu Y. K. 2008. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of two black soil region, northeastern China. *Environmental Geology*, 53: 1663-1672.
- Wu X., Wei Y., Wang J., Wang D., She L. Wang J., and Cai CH. 2017. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *Catena*. 156: 205-215.
- Wuddivira M. N., Stone R. J., and Ekwue E. I. 2006. Soil texture, clay mineralogy and organic matter effects on structural stability and hydraulic characteristics of selected Trinidad soils after rainfall. *Tropical Agriculture*, 83: 69-78.
- Yang P., Mao R., and Shao H. 2009. An investigation on magnetic susceptibility of hazardous saline-alkaline soils from the contaminated Hai River Basin, China. *Journal of Hazardous Materials*, 172: 494-497.
- Zan J., Fang X., Yan M., Zhang W., and Zhang Z. H. 2015. Magnetic variations in surface soils in the NE Tibetan Plateau indicating the climatic boundary between the Westerly and East Asian summer monsoon regimes in NW China. *Global and Planetary Change*, 130: 1-6.
- Zhao J., Chen S. H., Hua R., and Li Y. 2017. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 167: 73-79.

## Assessing the Effects of Soil Physicochemical Properties on Aggregate Stability and Magnetic Susceptibility (Case Study: Davarn Plain of Rafsanjan, Kerman Province)

Isa Esfandiarpour<sup>1\*</sup>, Neda Fakour<sup>2</sup>, Ali Reza Karimi<sup>3</sup>, Zohreh Mosleh<sup>4</sup>

(Received: May 2019 Accepted: June 2019)

### Abstract

The main purpose of this research was to study the effect of soil physicochemical properties on aggregate stability and magnetic susceptibility in two aeolian geomorphic units (desert pavement and aeolian clay flat) of Davarn plain in Rafsanjan. After taking 50 samples from the surface soil (0 to 10 cm) of desert pavement and 43 samples of aeolian clay flat, the magnetic susceptibility, mean weight diameter of aggregates and some of their most important physical and chemical characteristics were determined. Results showed that the mean magnetic susceptibility in desert pavement was 842.53 and in clay flat was 632.13 ( $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) which is very high compared to those in soils of Iran and its main reason could be attributed to the parent material of the area. The low mean frequency-dependent magnetic susceptibility in the both study units also confirms this issue. The mean weight diameter of aggregates in the desert pavement varied from 1.20 to 1.93 mm and in the clay flats from 0.54 to 1.80 mm. The findings of this research showed a direct correlation between iron forms ( $\text{Fe}_d$  and  $\text{Fe}_o$ ) with aggregate stability in the both of studied geofoms; however, the level of this correlation was high and significant for  $\text{Fe}_d$ . The results also indicated that there is a negative correlation between magnetic susceptibility with electrical conductivity (EC), organic matter (OM) and calcium carbonate equivalent (CCE) in the both of studied units. A positive and significant correlation was seen between total silt, total sand and its fractions with magnetic susceptibility in both geomorphic units. In addition, a negative correlation was seen between the mean weight diameter of aggregates and magnetic susceptibility, which its possible reason can be the presence of a large amounts of sand resulted from aeolian losses and its adverse effects on aggregate stability. The results of regression model indicated that dithionate iron and sand had a significant effect on the magnetic susceptibility; and sand, clay and electrical conductivity had a significant effect on aggregate stability.

**Keywords:** Aeolian, Central Iran, Iron forms

Esfandiarpour I., Fakour N., Karimi A.R., and Mosleh Z. 2020. Assessing the effects of soil physicochemical properties on aggregate stability and magnetic susceptibility (Case study: Davarn plain of Rafsanjan, Kerman Province). *Applied Soil Research*, 8(1): 44-58.

1. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

2. Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4. Research Assistant Professor, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj

\* Corresponding Author Email: [esfandiarpour@vru.ac.ir](mailto:esfandiarpour@vru.ac.ir)