



Soil Evolution as affected by variation of soil forming factors using magnetic susceptibility technique along Bardsir-Khaneh Sorkh transect

Faeze Sadat Hosseini¹ | Mohammad Hady Farpoor² |

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, Email:

hosseini.f.s.com@gmail.com

2. Corresponding authure, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman.

Kerman, Iran, Email: farpoor@uk.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Magnetic susceptibility is useful to evaluate the effect of soil forming factors on soil evolution. The present research was carried out to compare different soil development indices related to parent material (sedimentary and igneous) and soil moisture regimes (aridic and xeric) along Bardsir-Khaneh Sorkh transect in Kerman. That is why 6 pedons affected by different parent material and soil moisture regimes were selected. The evolution of studied pedons was compared using magnetic susceptibility values, crystalline iron (Fed) extracted by citrate-bicarbonate- dithionate, non-crystalline iron (Feo) extracted by acid ammonium oxalate, morphological soil properties, and diagnostic horizons. Aridisols, Inceptisols, and Alfisols were found using Soil Taxonomy (2022). Results of the study showed the maximum magnetic susceptibility in pedon 5 with igneous parent material and the minimum content in pedon 4 with calcareous parent material. Pedon 2 with an aridic soil moisture regime showed a lower magnetic susceptibility compared to pedon 5 with a xeric moisture regime, whereas the parent material for both pedons was the same. Pedons located on the xeric moisture regime had higher magnetic susceptibility values compared to the aridic regime. A positive significant correlation ($R=0.561$, 99% probability level) between soil evolution index (Fed-Feo) and χ_{lf} values and a negative significant correlation ($R=0.4492$, 99% probability level) between non-crystalline iron (Feo/Fed) and magnetic susceptibility were found. Results of the study showed that magnetic susceptibility distribution in the soil profile was affected by the distribution of different iron forms, soil evolution, parent material, climate, and weathering rate in different soil layers.
Article history:	
Received: March. 13, 2025	
Revised: Apr. 13, 2025	
Accepted: May. 10, 2025	
Published online: July. 2025	
Keywords: Different Iron Forms, Parent Material, Climate, Kerman, Central Iran.	
Cite this article: Hoseini, F. S., & Farpoor, M. H. (2025) Soil Evolution as affected by variation of soil forming factors using magnetic susceptibility technique along Bardsir-Khaneh Sorkh transect, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i> , 56 (5), 1323-1337. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392009.669902	
© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392009.669902	

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Magnetic susceptibility is a valuable tool for evaluating the effect of soil forming factors and processes on soil development. The present research was carried out to compare different soil development indices (iron forms and ratios, magnetic susceptibility, and diagnostic horizons formed) related to parent material (sedimentary and igneous) and soil moisture regimes (aridic and xeric) as two important soil forming factors along Bardsir-Khaneh Sorkh transect in Kerman area, central Iran.

Materials and Methods

The study area was a transect from Bardsir to Khaneh-Sorkh in Kerman Province, central Iran. Six pedons on different geomorphic positions, including rock pediment (pedons 5 and 6), alluvial fan (pedon 3), and mantled pediment (pedons 1, 2, and 4) were selected. Routine physicochemical analyses were performed on all samples. Besides, samples were used for magnetic susceptibility investigations. Parent rocks were also analyzed for magnetic susceptibility determinations. Pedons 1, 3, and 4 were affected by sedimentary parent material whereas pedons 2, 5, and 6 were located on igneous parent rocks. Moreover, to study the effect of climate on magnetic susceptibility, pedons 1 and 2 were selected in aridic and pedons 3-6 on xeric soil moisture regimes. The evolution of studied pedons was compared using magnetic susceptibility values, different iron forms and contents, morphological soil properties, and diagnostic horizons that have been formed.

Results and Discussion

Argigypsid (pedon 1) and Calciargids (pedon 2) in the aridic soil moisture regime of the area were found which could be proof of the presence of a paleoclimate with more available moisture content compared to the present time. This was also reported by other researchers in central parts of Iran. On the other hand, Haploxeralfs (pedons 5 and 6 with igneous parent material), Calcixerpts (pedon 3 with sedimentary parent material), and Haploxerepts (pedon 4 with sedimentary parent material) were formed on the xeric parts of the transect which clearly show the effect of climate and parent material on soil evolution. The maximum χ_{lf} found in soils (pedon 5) with igneous parent material (Table 2). Soils on sedimentary parent material showed somehow high magnetic susceptibility values which were related to the soil evolution (removal of diamagnetic material such as gypsum and calcium carbonate from topsoil) and the role of adjacent igneous formations. Pedons 2 (aridic moisture regime) and 5 (xeric moisture regime) with similar parent material (igneous), but different climatic conditions show different magnetic susceptibility values which is a support for the effect of climate on magnetic susceptibility values. This was also reported by other researchers. Table 3 shows the magnetic susceptibility values on parent rocks. Igneous rocks have higher magnetic susceptibility values compared to sedimentary rocks. The lowest CBD iron content was determined in pedon 3 which is an Inceptisol with moderate development on sedimentary parent material in xeric part of the transect. Pedon 5 with the highest magnetic susceptibility value showed the highest Fed-Feo content (Table 4). Positive significant correlations between Fed, Fed-Feo, and magnetic susceptibility were found as was also supported by other researchers. Results of the study showed that the variation of magnetic susceptibility in soils under study was depended on different iron forms, soil development, rate of weathering, climate, and petrography.

Conclusion

The high χ_{lf} values were found in soils located on igneous parent material compared to sedimentary ones. Increasing weathering and soil development with time caused χ_{lf} values to be increased in both igneous and sedimentary affected soils. No positive correlation was found between magnetic susceptibility values and soil properties. This shows that magnetic susceptibility in the area under study was not probably affected by secondary magnetic particles. The results of the study proved the effect of climate and parent material on soil formation and evolution using the magnetic susceptibility technique. Moreover, magnetic susceptibility was affected by parent material, climate, topography, soil formation and evolution, and iron forms and ratios. This clearly shows the complexity of soil formation. That is why the determination of the direct effect of individual environmental factors on soil magnetic susceptibility value is not possible to be studied by single research.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تکامل خاک متأثر از تغییر فاکتورهای خاک‌سازی با استفاده از تکنیک پذیرفتاری مغناطیسی در برش طولی بردسیر - خانه سرخ

فائزه سادات حسینی^۱ | محمدهادی فرپور^۲^۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: hosseini.f.s.com@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، کرمان، ایران، رایانامه: farpoor@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پذیرفتاری مغناطیسی در ارزیابی تأثیر عوامل خاک‌سازی بر تکامل خاک مفید می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف مقایسه شاخص‌های مختلف تکامل خاک در رابطه با مواد مادری (رسوبی و آذرین) و رژیم‌های رطوبتی (اریدیک و زیریک) مختلف در برش طولی بردسیر - خانه سرخ کرمان انجام شد. برای دستیابی به این هدف، تعداد شش خاکرخ متأثر از مواد مادری و رژیم‌های رطوبتی مختلف انتخاب شد. میزان تکامل خاکرخ‌های مورد مطالعه با استفاده از میزان پذیرفتاری مغناطیسی، آهن متبلور (Fed) عصاره‌گیری شده توسط سترات-بی-کربنات-دی-تیونات، آهن غیر متبلور (Feo) با عصاره‌گیری اسید آمونیوم اگزالات و نیز خصوصیات مورفولوژی خاک و آفق-های مشخصه، مقایسه شد. در سیستم رده‌بندی آمریکایی (۲۰۲۲) خاکرخ‌ها در رده اریدیسول، اینسپتی‌سول و آلفی‌سول قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در خاکرخ ۵ با مواد مادری آذرین و کم‌ترین آن در خاکرخ ۴ با مواد مادری آهکی مشاهده شد. خاکرخ ۲ با رژیم رطوبتی اریدیک نسبت به خاکرخ ۵ دارای رژیم رطوبتی زیریک، پذیرفتاری مغناطیسی کمتری داشت، درحالی که مواد مادری هر دو یکسان بود. خاکرخ‌هایی که در رژیم رطوبتی زیریک بودند مقادیر پذیرفتاری بیشتری را نشان دادند. همبستگی مثبت و معنی‌دار ($R = 0.561$ در سطح یک درصد) بین شاخص تکامل خاک (Fed-Feo) و مقادیر χ_{lf} و همبستگی منفی و معنی‌داری بین آهن غیر بلوری ($R = 0.492$ در سطح یک درصد) و پذیرفتاری مغناطیسی (Fed / Feo) مشاهده شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در خاکرخ تحت تأثیر توزیع اشکال مختلف آهن، تکامل خاک، مواد مادری، اقلیم و سرعت هوازدگی در لایه‌های مختلف خاک بوده است.
واژه‌های کلیدی: اشکال مختلف آهن، ماده مادری، اقلیم، کرمان، ایران مرکزی.	

استناد: حسینی؛ فائزه سادات، فرپور؛ محمدهادی، (۱۴۰۴) تکامل خاک متأثر از تغییر فاکتورهای خاک‌سازی با استفاده از تکنیک پذیرفتاری مغناطیسی در برش طولی

بردسیر - خانه سرخ، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۵)، ۱۳۳۷-۱۳۳۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392009.669902>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392009.669902>

مقدمه

درک چگونگی تکامل و شکل‌گیری خاک این امکان را فراهم می‌آورد تا ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن بهتر پیش‌بینی شود، که این موضوع مستقیماً بر استفاده پایدار و منطقی از اراضی تأثیرگذار است. دانش عمیق تشکیل خاک همچنین به توسعه راهکارهای مؤثر برای مبارزه با تخریب خاک کمک می‌کند. با پی بردن به علل و مکانیسم‌های تکامل و تخریب خاک، می‌توان اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی هدفمند را برای حفظ باروری و بهره‌وری دراز مدت به کار گرفت (Cai et al., 2023 و Liliwirianis et al., 2023).

استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در ارزیابی کانی‌شناسی خاک و اندازه ذرات، ابزار قدرتمندی برای بررسی فرآیندهای خاکساخت در عمق خاک ارائه می‌دهد (Ding et al., 2020 و Cao et al., 2021). پذیرفتاری مغناطیسی، که پاسخ یک ماده به میدان مغناطیسی خارجی را اندازه‌گیری می‌کند، به‌طور مستقیم با کانی‌های مغناطیسی مانند مگنتیت^۱ و مگهمیت^۲ در خاک مرتبط است (Shirzaditabar and Heck, 2021). تغییرات در پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مختلف می‌تواند نشان‌دهنده شدت دوره‌های تشکیل خاک، تغییرات شیمیایی یا تغییرات آب و هوایی در طول زمان باشد. علاوه بر این، توزیع مواد معدنی مغناطیسی می‌تواند به ردیابی حرکت آب در خاک کمک کند و اطلاعاتی را در مورد رژیم‌های رطوبتی گذشته (اقلیم گذشته) و فعلی ارائه دهد (Kehl et al., 2021 و Kader et al., 2022). پذیرفتاری مغناطیسی درجه‌ای است که یک ماده، میدان مغناطیسی با شدت معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Fine et al., 1989). این کمیت به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$K = M/H \quad \text{رابطه ۱}$$

در معادله بالا M میزان مغناطیس‌پذیری جسم و H شدت میدان مغناطیسی (هر دو بر حسب آمپر بر متر) و K پذیرفتاری مغناطیسی حجمی است. در این معادله پذیرفتاری مغناطیسی حجمی بدون واحد است. پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب واحد جرمی به‌صورت رابطه ۲ تعرف می‌شود:

$$X_{\text{mass}} = K/p \quad \text{رابطه ۲}$$

در این معادله p جرم مخصوص ظاهری جسم بر حسب kg/m^3 و X_{mass} پذیرفتاری مغناطیسی جرمی بر حسب m^3/kg می‌باشد (Mullins, 1977). پذیرفتاری وابسته به فرکانس با دو اندازه‌گیری از یک نمونه در دو فرکانس مغناطیسی متفاوت، کم و زیاد اندازه‌گیری می‌شود (Owliaie, 2014 و Li, 2020). استفاده از پارامتر χ_{fd} برای تشخیص وجود دانه‌های مغناطیسی کوچک (>0.03 میکرومتر) که رفتار سوپراپارامگناطیس از خود نشان می‌دهند، مفید است (Djerrab et al., 2012). اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس پایین (χ_{lf}) و پذیرفتاری مغناطیسی فرکانس بالا (χ_{hf}) معمولاً برای تشخیص وجود مواد معدنی آهنی مغناطیسی بسیار ریز استفاده می‌شود که به آن کسر سوپراپارامگناطیسی با اندازه کمتر از 0.3 میکرومتر نیز گفته می‌شود (Warrier et al., 2021). درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$\% \chi_{fd} = 100 \times [(\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf}] \quad \text{رابطه ۳}$$

Chaparro et al., (2020) از پذیرفتاری وابسته به فرکانس به‌عنوان شاخص نیمه‌کمی برای تخمین غلظت ذرات سوپراپارامگناطیس (SP) مطلق برای تعیین مگنتیت و مگهمیت نسبت به سایر کانی‌های مغناطیسی در خاک‌های خود استفاده کردند. پذیرفتاری مغناطیسی تقریباً غلظت کل کانی‌های فری مگنتیک (مگنتیت و مگهمیت) را نشان می‌دهد.

یکی از روش‌های مطالعه توسعه و تکامل خاک، شناخت مواد مادری است که می‌تواند برای بررسی تاریخچه تغییر و تحول خاک مفید باشد (Mullins, 1977). پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های جازموریان در ایران مرکزی تحت تأثیر موادمادری، ژئومورفولوژی و اقلیم مورد مطالعه قرارگرفت (Sanjari et al., 2021). بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های توسعه‌یافته بر روی مواد اولیه آذرین و کمترین مقدار بر روی مواد اولیه رسوبی مشاهده شد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که پذیرفتاری مغناطیسی خاک با اقلیم، مواد اولیه و توپوگرافی ارتباط دارد. اثرات سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی و فرآیندهای خاک بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک در امتداد یک توالی سنگی در یک منطقه خشک جنوب ایران مورد مطالعه قرار گرفت (Moghbali et al., 2021). نتایج نشان داد که فرآیندهای خاکساز طبیعی اجزای مغناطیسی خاک بر توزیع عمودی و مکانی مقادیر پذیرفتاری خاک تأثیر گذاشته است. عوامل اقلیمی از جمله بارندگی، دما، تبخیر و تعرق، یخبندان و باد نقش مهمی در تسریع فرآیندهای خاکساز دارد. برای انجام فرآیندهای خاکساز به‌وجود آب و حرارت مناسب نیاز

است (Egli et al., 2003 و Rustad et al., 2001). مطالعه رابطه بین پذیرفتاری مغناطیسی و خصوصیات خاک با رژیم‌های رطوبتی مختلف می‌تواند تغییرات ویژگی خاک‌های مورد مطالعه که تحت تأثیر اقلیم و رژیم رطوبتی بوده است را مشخص نماید. آب و هوای گرم و مرطوب نیمه‌گرمسیری می‌تواند درجه شدیدی از هوازدگی شیمیایی را القا کند و لذا مگنتیت، مگهمیت و هماتیت خاکساخت را تولید کند (Lu et al., 2012). این پژوهش نشان داد که شرایط آب و هوایی تأثیر قابل توجهی بر سیگنال‌های مغناطیسی خاک دارد.

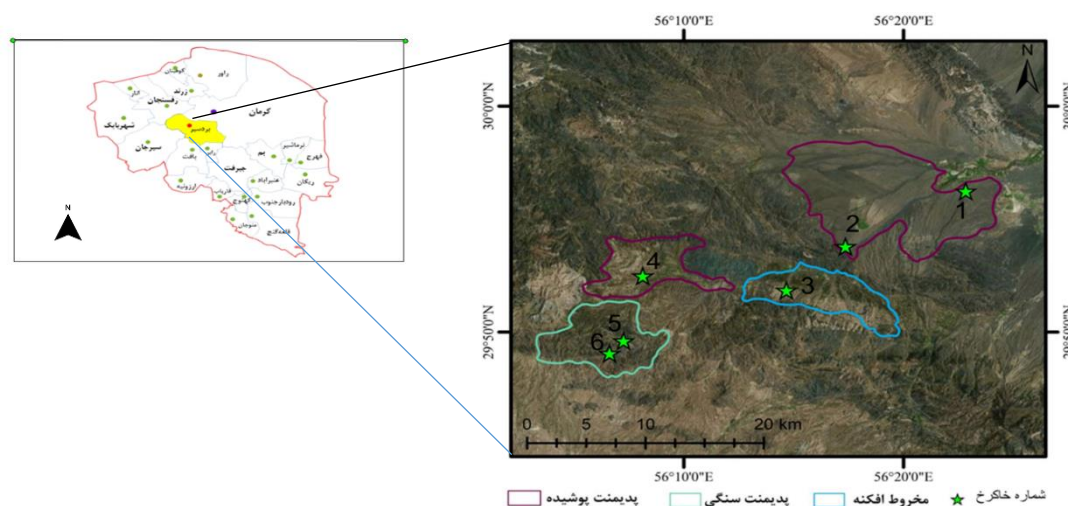
Tsai et al. (2006) با مطالعه تراس‌های رودخانه‌ای در تایوان نشان دادند که سن خاک می‌تواند توسط آهن فعال (Fe_0/Fe_d) تخمین زده شود. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که افزایش (Fe_d) و تغییرات آهن بلوری ($Fe_0 - Fe_d$) با سن خاک و تکامل آن در خاک‌های دشت و مرتع با کاربری زراعی، تپه و اراضی پست همبستگی مناسبی داشته است (عبدلی و همکاران، ۱۳۹۷). در مطالعه اخیر، تغییرات (Fe_0) همبستگی مثبت و معنی‌داری با ماده آلی، شوری و آهنک نشان داد و تغییرات (Fe_d) با مقدار رس رابطه مثبت و معنی‌دار و با مقدار شن، شوری و گچ، کربنات کلسیم و ماده آلی رابطه منفی و معنی‌داری نشان داد.

پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های ایران توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. اما پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های بردسیر و خانه سرخ در استان کرمان که رژیم‌های رطوبتی و مواد مادری مختلفی را تجربه کرده‌اند، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا با توجه به کمبود اطلاعات در این زمینه، مطالعه حاضر برای نیل به اهداف زیر صورت پذیرفت: ۱- بررسی تشکیل، تکامل و طبقه‌بندی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، ۲- مطالعه توزیع ترکیبات یا اشکال مختلف آهن، ۳- بررسی توزیع پذیرفتاری مغناطیسی و ارتباط آن با ترکیبات مختلف آهن در خاک‌های مورد مطالعه، و ۴- بررسی عوامل محیطی از جمله اقلیم و مواد مادری مؤثر بر پذیرفتاری مغناطیسی.

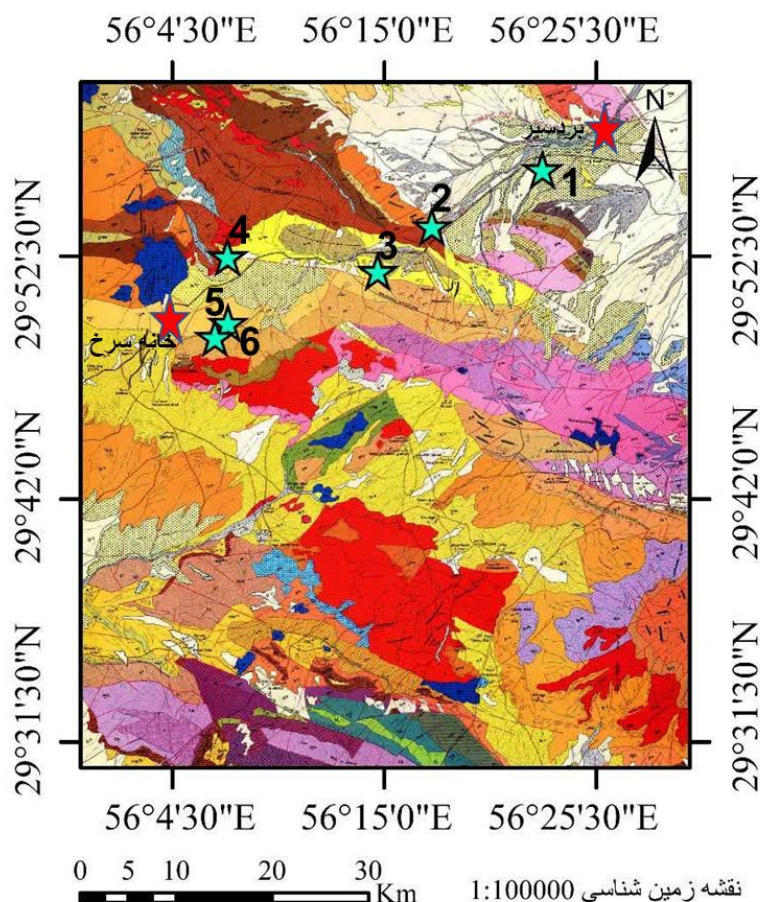
مواد و روش‌ها

مطالعات صحرائی

شکل ۱ موقعیت نسبی منطقه مطالعاتی در استان کرمان و موقعیت خاک‌های انتخابی را بر روی تصویر گوگل ارث نشان می‌دهد. منطقه مطالعاتی به طول ۵۶ کیلومتر و وسعت حدودی ۳۸۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی تا ۵۶ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی تا ۳۰ درجه و ۰ دقیقه شمالی واقع شده است. سطوح ژئومورفیک مختلف شامل پدیمت پوشیده (۱۴۳ کیلومتر مربع)، پدیمت سنگی (۳۸ کیلومتر مربع)، و مخروط افکنه (۷۱ کیلومتر مربع) در منطقه شناسایی شد. برای تعیین روند تغییرات پارامترهای مغناطیسی و تأثیرات مواد مادری و اقلیم بر توزیع آن‌ها، اقدام به حفر، تشریح و نمونه‌برداری از شش خاک‌گرید گردید (Schoeneberger, 2012). نیمی از خاک‌ها (۱ و ۳ و ۴) در مواد مادری رسوبی و نیم دیگر (خاک‌های ۲ و ۵ و ۶) در مناطق متأثر از مواد مادری آذرین حفر شد (شکل ۲). لازم به توضیح است که خاک‌های ۱ و ۲ در رژیم رطوبتی اریدیک (Banaiee, 1998) و سایر خاک‌ها در رژیم رطوبتی زیریک (Banaiee, 1998) انتخاب شدند تا نقش اقلیم و نیز تأثیر متقابل مواد مادری-اقلیم قابل بررسی باشد. به‌علاوه، برای هر خاک‌گرید نمونه سنگ مادر مربوطه جمع‌آوری و آسیاب شد و برای بررسی پذیرفتاری مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت نسبی منطقه مورد مطالعه در استان کرمان و محل حفر خاک‌گریدها بر روی تصویر ماهواره ای گوگل ارث



plQ	رژیم رطوبتی اریدیک / خاکرخ یک / گنگلومرای آهکی: Conglomerate (Limestone):
E ^{abv}	رژیم رطوبتی اریدیک / خاکرخ دو / آندزیت بازالت و برش آتشفشانی: Andesite Basalt and Volcanic Breccia:
M ^s	رژیم رطوبتی زریک / خاکرخ سه و چهار / Sandstone, Laminated Marl, Gypsiferous:
E ^{ta}	رژیم رطوبتی زریک / خاکرخ پنج / ولکانیک برش های آندزیتی: Andesite Volcanic Breccia:
E ^a	رژیم رطوبتی زریک / خاکرخ شش / آندزیت پورفیری: Porphyritic Andesite:



شماره خاکرخ



بردسیر - خانه سرخ

شکل ۲. سازندهای مختلف زمین شناسی اقتباس شده از نقشه چهارگنبد 1:100000 (Khan Nazer, 1995) و رژیم های رطوبتی خاک های منطقه مورد مطالعه (Banaiee, 1998)

مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش های فیزیکی و شیمیایی

نمونه های خاک برداشت شده ابتدا هوا خشک، کوبیده و از الک دو میلی متر عبور داده شد و سپس آزمایش های فیزیکی و شیمیایی معمول بر روی نمونه ها انجام شد. توزیع اندازه ذرات به روش پیپت انجام شد (Gee and Bauder, 1986). سنگریزه در اقیانوس های مختلف به روش حجمی اندازه گیری شد. pH گل اشباع به وسیله دستگاه pH متر جنوی^۱ و اندازه گیری EC (قابلیت هدایت الکتریکی) در عصاره اشباع توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی جنوی صورت پذیرفت. اندازه گیری کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش تیترا سون برگشتی

(Nelson, 1982) و گچ از طریق ترسیب با استون (Nelson, 1982) اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش والکی - بلک (Nelson, 1982) و ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم در $pH = 8/2$ تعیین شد (Bower, 1966). پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک با استفاده از حسگر MS2B دستگاه پذیرفتاری مغناطیسی بارتینگتون در فرکانس‌های کم (χ_{lf} ، %۴۶، کیلوهرتز) و زیاد (χ_{hf} ، %۴۶، کیلوهرتز) اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی اندازه بلورهای مغناطیسی موجود در خاک‌ها و میزان حضور ذرات فری مغناطیس خاکساز در مرز سوپر پارامغناطیس - حوزه منفرد پایدار (کمتر از ۰/۰۲ میکرومتر)، درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید:

$$\chi_{fd} = 100 \times [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \quad \text{رابطه ۳}$$

در معادله بالا، χ_{fd} پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، χ_{lf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس کم (۰/۴۶ کیلوهرتز) و χ_{hf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس زیاد (۴/۶ کیلوهرتز) می‌باشند (Dearing, 1999). اندازه‌گیری آهن متبلور (Fed) با عصاره‌گیری سترات - دی‌تیونات - بی‌کربنات (Mehra & Jackson, 1958) و آهن غیرمتبلور (Feo) با عصاره‌گیری اسید آمونیوم اگزالات (Schwertmann, 1973) به وسیله دستگاه جذب اتمی مدل Varian انجام شد. در نهایت، رده‌بندی خاک‌های مورد مطالعه بر اساس سیستم‌های رده‌بندی آمریکایی (۲۰۲۲) و جهانی (۲۰۲۲) صورت پذیرفت. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SPSS27 استفاده شد.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و رده بندی خاک

جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. حضور توأم کربنات کلسیم معادل و رس در خاک‌های ۱ (Argigypids) و ۲ (Calciargids) در رژیم رطوبتی اریدیک مشاهده شد که حاکی از آب‌شویی و رسوبگذاری احتمالی رس‌ها در اقلیم گذشته با رطوبت قابل دسترس بیشتر و سپس فرآیند کلسیتی شدن^۱ مجدد خاک در اقلیم خشک کنونی می‌باشد. تشکیل افق آرچیلیک در رژیم رطوبتی اریدیک در استان کرمان توسط پژوهشگران مختلف به اقلیم گذشته که رطوبت قابل دسترس بیشتری داشته است، نسبت داده شده است (Sarmast et al., 2016 و سنجری و همکاران، ۱۳۹۰). در مقابل، میزان کربنات کلسیم در افق‌های بالایی خاک‌های پنج (Haploxerales) و شش (Haploxerales) در رژیم رطوبتی زریک نسبت به افق‌های پایینی کمتر است که نشان‌دهنده شستشو و تخلیه آهک از افق‌های بالایی است. این موضوع باعث شده آهک که نقش هم‌آوری برای ذرات رس را بازی می‌کند، از افق‌های فوقانی خارج شده و بنابراین ذرات رس راحت تر به سمت پایین انتقال پیدا کرده و باعث تشکیل افق آرچیلیک شوند. با توجه به اقلیم کنونی زریک در این خاک‌ها، فرآیند مزبور الزاماً مربوط به اقلیم گذشته نبوده و در شرایط عهد حاضر نیز قابل انجام می‌باشد. بیات و همکاران (۱۳۹۵) نیز طی مطالعه مورفولوژی خاک‌های بردسیر به انتقال آهک میسلومی از افق‌های سطحی به افق‌های زیرسطحی دارای سخت‌دانه‌های آهک اشاره کرده‌اند. خاک‌های ۳ (Calcixerepts) و ۴ (Haploxerepts) دارای رژیم رطوبتی زریک و مواد مادری رسوبی بوده‌اند. تکامل در این دو خاک‌ها در مقایسه با خاک‌های ۵ و ۶ کمتر بوده زیرا افق آرچیلیک تشکیل نشده و لذا تنها یک خاک اینسپتی‌سول با تکامل متوسط به وجود آمده که به نوبه خود مؤید نقش ماده مادری در تکامل خاک می‌باشد.

پذیرفتاری مغناطیسی خاک

در مطالعات پذیرفتاری مغناطیسی بیشترین مقادیر χ_{lf} خاک‌های مورد مطالعه مربوط به خاک‌های منشأ گرفته از مواد مادری آذرین (خاک‌ها ۵) به میزان $10^{-8} \times 729/59$ $m^3 kg^{-1}$ بود (جدول ۲). در این تحقیق خاک‌های منشأ گرفته از مواد مادری آهکی (خاک‌ها ۱) بر خلاف انتظار، پذیرفتاری نسبتاً بالایی نشان دادند که دلایل آن را می‌توان به موقعیت ژئومورفیک منطقه، اثرپذیری از مواد مادری اطراف و همچنین افزایش تکامل خاک که منجر به افزایش مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی می‌شود، نسبت داد. (Rasooli et al., 2022) نیز در مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های حوضه لوت، خاک‌ری با منشأ رسوبی اما دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالا در سطح خاک مشاهده کردند. آن‌ها بیان کردند که مقادیر زیاد از ترکیبات غیرکربناته در بخش بالای سولوم و همچنین قرارگیری سنگ‌های آذرین در بالادست و مجاورت خاک‌ها باعث این موضوع گردیده است. بالا بودن نسبی پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌ها ۱ پژوهش حاضر که در رژیم رطوبتی اریدیک واقع بوده و



جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و رده‌بندی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاکرخ	افق	عمق Cm	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت	سنگریزه (%)	EC dS m ⁻¹	pH	CEC cmolcKg ⁻¹	گچ (%)	ماده آلی (%)	کربنات کلسیم معادل (%)	
۱	A	۱۰-۰	۶۸/۰۰	۱۸/۰۰	۱۴/۰۰	SL	۶۵/۰۰	۱/۴۰	۷/۳۵	۱۲/۷۰	-	۰/۲۵	۱۳/۵۰	
	Bk1	۳۰-۱۰	۷۰/۰۰	۱۴/۰۰	۱۶/۰۰	SL	۶۰/۰۰	۲/۴۲	۷/۱۴	۱۴/۵۰	-	۰/۱۹	۱۶/۰۰	
	Bk2	۶۰-۳۰	۷۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۲/۰۰	SL	۵۰/۰۰	۶/۲۶	۷/۱۹	۱۱/۰۵	-	۰/۰۹	۱۵/۰۰	
	Bky	۹۵-۶۰	۷۸/۰۰	۱۲/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۴۸/۵۰	۸/۵۷	۷/۲۲	۹/۰۷	۲۵/۵۰	۰/۱۵	۱۵/۰۰	
	Bty	۱۱۰-۹۵	۷۸/۰۰	۸/۰۰	۱۴/۰۰	SL	۳۷/۵۰	۸/۳۱	۷/۱۷	۱۲/۶۸	۲۴/۶۰	۰/۱۵	۷/۰۰	
	By	۱۵۰-۱۱۰	۵۶/۰۰	۳۲/۰۰	۱۲/۰۰	SL	۳۲/۰۰	۹/۰۰	۷/۱۹	۱۰/۸۷	۲۵/۵۰	۰/۱۱	۶/۰۰	
Soil Taxonomy (2022): Loamy Skeletal, Gypsic, Mesic, Calcic Argigypsis WRB (2022): Skeletal Amphicalcic Gypsisols (Pantoloamic)														
۲	A	۲۰-۰	۷۸/۰۰	۸/۰۰	۱۴/۰۰	SL	۳۵/۰۰	۰/۵۵	۷/۹۳	۱۲/۷۰	-	۰/۲۳	۷/۰۰	
	Btk1	۴۰-۲۰	۷۲/۰۰	۱۰/۰۰	۱۸/۰۰	SL	۱۸/۵۰	۰/۸۴	۷/۸۲	۱۶/۳۰	-	۰/۱۷	۱۶/۰۰	
	Btk2	۶۰-۴۰	۶۴/۰۰	۱۸/۰۰	۱۸/۰۰	SL	۱۲/۰۰	۰/۵۲	۷/۶۸	۱۶/۲۹	-	۰/۰۹	۱۷/۰۰	
	C1	۸۰-۶۰	۷۸/۰۰	۱۲/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۲۰/۹۰	۰/۷۳	۷/۷۷	۹/۰۶	-	۰/۰۹	۱۰/۰۰	
	C2	۱۱۰-۸۰	۸۲/۰۰	۱۰/۰۰	۸/۰۰	SL	۹/۰۰	۰/۳۹	۷/۷۶	۷/۲۶	-	۰/۱۵	۱۰/۵۰	
	Superactive, Mesic, Typic Calciargids Soil Taxonomy (2022): Fine-Silty, Mixed, WRB (2022): Amphiluvic Calcisols (Pantoloamic)													
۳	A	۲۵-۰	۶۸/۰۰	۱۸/۰۰	۱۴/۰۰	SL	۳۶/۰۰	۰/۸۸	۷/۷۱	۱۲/۷۳	-	۰/۰۳	۱۰/۵۰	
	Bw	۵۵-۲۵	۷۰/۰۰	۱۴/۰۰	۱۶/۰۰	SL	۱۷/۳۰	۰/۹۱	۷/۶۶	۱۴/۵۳	-	۰/۳۳	۱۰/۵۰	
	Bk	۸۵-۵۵	۷۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۲/۰۰	SL	۲۰/۰۰	۰/۴۱	۷/۸۲	۱۰/۸۹	-	۰/۲۳	۱۵/۵۰	
	C1	۱۰۵-۸۵	۷۸/۰۰	۱۲/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۱۴/۰۰	۰/۴۲	۷/۷۸	۹/۰۷	-	۰/۳۴	۱۰/۰۰	
	C2	۱۲۰-۱۰۵	۷۸/۰۰	۸/۰۰	۱۴/۰۰	SL	۵/۸۰	۰/۵۰	۷/۶۹	۱۲/۶۸	-	۰/۱۳	۷/۵۰	
	Soil Taxonomy (2022): Coarse Silty, Mixed, Superactive, Mesic, Typic Calcixereps WRB (2022): Haplic Calcisols (Pantoloamic)													
۴	A	۱۵-۰	۵۶/۰۰	۳۲/۰۰	۱۲/۰۰	SL	۷۵/۰۰	۰/۸۸	۷/۶۴	۱۰/۹۳	-	۰/۴۰	۱۰/۰۰	
	Bw1	۴۵-۱۵	۵۹/۰۰	۲۶/۰۰	۱۵/۰۰	SL	۷۹/۰۰	۰/۹۱	۷/۵۹	۱۳/۶۳	-	۰/۳۳	۹/۵۰	
ادامه جدول شماره ۱														
۵	Bw2	۷۵-۴۵	۷۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۲/۰۰	SL	۶۰/۵۰	۰/۴۱	۷/۳۴	۱۰/۸۷	-	۰/۱۳	۹/۵۰	
	Bw3	۱۰۰-۷۵	۸۲/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۸۵/۰۰	۰/۴۲	۷/۵۱	۹/۰۶	-	۰/۱۳	۱۰/۰۰	
	C	۱۴۵-۱۰۰	۸۰/۰۰	۱۲/۰۰	۸/۰۰	LS	۵۵/۰۰	۰/۴۰	۷/۶۹	۷/۲۸	-	۰/۲۵	۱۰/۰۰	
	Soil Taxonomy (2022): Loamy Skeletal, Mixed, Superactive, Mesic, Typic Haploxereps WRB (2022): Fluvis Cambisols (Anoloamic)													
	A	۲۰-۰	۶۲/۰۰	۳۲/۰۰	۶/۰۰	SL	۱۰/۰۰	۰/۴۴	۷/۶۳	۵/۵۲	-	۰/۴۸	۲/۰۰	
	Bt	۴۰-۲۰	۵۴/۰۰	۳۶/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۷/۰۰	۰/۳۸	۷/۶۳	۹/۱۵	-	۰/۵۲	۶/۰۰	
۶	Btk	۶۰-۴۰	۵۰/۰۰	۳۶/۰۰	۱۴/۰۰	L	۵/۶۰	۰/۳۶	۷/۷۶	۱۲/۷۶	-	۰/۵۲	۲۱/۰۰	
	Bk	۸۰-۶۰	۵۶/۰۰	۳۴/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۰/۰۰	۰/۰۰	۷/۷۹	۹/۱۱	-	۰/۳۵	۳۲/۵۰	
	Ck	۱۰۰-۸۰	۷۰/۰۰	۲۲/۰۰	۸/۰۰	SL	۰/۰۰	۰/۷۷	۷/۷۲	۷/۳۰	-	۰/۳۵	۲۸/۰۰	
	Superactive, Mesic, Calcic Haploxeralfs Mixed, Soil Taxonomy (2022): Coarse Silty, WRB (2022): Pantocalcic Luvisols (Arenic)													
	A	۲۰-۰	۶۰/۰۰	۳۰/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۸/۰۰	۰/۲۸	۷/۶۶	۹/۲۴	-	۰/۹۷	۵/۰۰	
	Bt	۴۰-۲۰	۴۴/۰۰	۴۲/۰۰	۱۴/۰۰	L	۵/۰۰	۰/۹۴	۷/۴۱	۱۲/۸۶	-	۰/۹۵	۷/۵۰	
۶	Btk	۶۰-۴۰	۴۴/۰۰	۳۸/۰۰	۱۸/۰۰	L	۷/۰۰	۰/۹۶	۷/۶۵	۱۶/۴۲	-	۰/۷۲	۱۵/۰۰	
	Bk1	۸۰-۶۰	۶۰/۰۰	۳۰/۰۰	۱۰/۰۰	SL	۳/۰۰	۰/۴۷	۷/۶۶	۹/۱۶	-	۰/۵۶	۲۸/۰۰	
	Bk2	۱۰۰-۸۰	۵۲/۰۰	۳۶/۰۰	۱۲/۰۰	L	۰/۰۰	۰/۳۹	۷/۶۹	۱۰/۹۲	-	۰/۳۷	۳۰/۰۰	
	Ck1	۱۲۰-۱۰۰	۵۰/۰۰	۳۶/۰۰	۱۴/۰۰	L	۰/۰۰	۰/۰۰	۷/۸۰	۱۲/۷۳	-	۰/۳۷	۲۷/۵۰	
	Ck2	۱۳۵-۱۲۰	۵۲/۰۰	۳۲/۰۰	۱۶/۰۰	L	۰/۰۰	۰/۹۸	۷/۶۶	۱۴/۵۳	-	۰/۳۱	۲۹/۵۰	
	Soil Taxonomy (2022): Coarse Silty, Mixed, Superactive, Mesic, Calcic Haploxeralfs WRB (2022): Pantocalcic Luvisols (Loamic)													

دارای مواد مادری آهکی می‌باشد نیز می‌تواند به تأثیر مواد مادری آذرین موجود در بالادست و اطراف خاکرخ مزبور نسبت داده شود. لازم به توضیح است که با افزایش عمق در این خاکرخ و کاهش تأثیرپذیری از سطح و افزایش نقش ماده‌مادری، میزان پذیرفتاری مغناطیسی

کاهش یافته است (جدول ۲). از سوی دیگر، آبشویی مواد دیامغناطیس (مانند کربنات‌ها و گچ) و انتقال آن‌ها به افق‌های زیرین می‌تواند منجر به افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در سطح شود (کریمی و خادمی، ۱۳۹۱). همانطور که در جدول ۱ نیز قابل مشاهده است، افق‌های زیرین حاوی گچ، رس و کلسیت در خاکرخ ۱ تشکیل گردیده که همگی جزء مواد دیامغناطیس هستند و باعث کاهش پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند. این موضوع نیز می‌تواند در کاهش پذیرفتاری مغناطیسی خاکرخ ۱ با عمق نقش بازی کرده باشد.

جدول ۲. نتایج مربوط به پذیرفتاری مغناطیسی خاکرخ‌ها

شماره خاکرخ	افق	عمق Cm	$\chi_{\text{fd}}^{\text{f}} \%$ $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \times$	$\chi_{\text{blank}}^{\text{Hf}}$ $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \times$	$\chi_{\text{blank}}^{\text{If}}$ $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \times$	میانگین مقادیر $\chi_{\text{blank}}^{\text{If}}$ $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \times$
۱	A	۱۰-۰	۰/۸۳	۳۰۰/۴۰	۳۰۲/۹۰	۲۶۱/۲۱
	Bk1	۳۰-۱۰	۰/۳۱	۲۵۳/۷۰	۲۵۴/۵۰	
	Bk2	۶۰-۳۰	۰/۴۲	۲۸۲/۵۰	۲۸۳/۷۰	
	Bky	۹۵-۶۰	۰/۶۱	۲۵۹/۷۰	۲۶۱/۳۰	
	Bty	۱۱۰-۹۵	۰/۵۶	۱۷۶/۸۰	۱۷۷/۸۰	
	By	۱۵۰-۱۱۰	۰/۴۵	۲۸۵/۸۰	۲۸۷/۱۰	
۲	A	۲۰-۰	۰/۸۳	۲۶۳/۳۰	۲۶۵/۵۰	۲۴۱/۰۶
	Btk1	۴۰-۲۰	۰/۹۰	۲۷۵/۶۰	۲۷۸/۱۰	
	Btk2	۶۰-۴۰	۰/۵۲	۲۲۷/۵۰	۲۲۸/۷۰	
	C1	۸۰-۶۰	۰/۵۰	۲۱۷/۰۰	۲۱۸/۱۰	
	C2	۱۱۰-۸۰	۱/۱۲	۲۱۲/۵۰	۲۱۴/۹۰	
۳	A	۲۵-۰	۰/۹۳	۳۲۰/۰۰	۳۲۳/۰۰	۳۵۸/۵۲
	Bw	۵۵-۲۵	۰/۹۰	۲۴۷/۱۰	۲۷۶/۶۰	
	Bk	۸۵-۵۵	۰/۴۳	۵۳۱/۳۰	۵۳۳/۶۰	
	C1	۱۰۵-۸۵	۱/۰۲	۳۱۰/۷۰	۳۱۳/۹۰	
	C2	۱۲۰-۱۰۵	۰/۴۳	۳۴۴/۰۰	۳۴۵/۵۰	
۴	A	۱۵-۰	۱/۱۵	۱۷۱/۷۰	۱۷۳/۷۰	۱۶۲/۸۷
	Bw1	۴۵-۱۵	۱/۰۴	۱۶۲/۴۰	۱۶۴/۱۰	
	Bw2	۷۵-۴۵	۰/۹۰	۱۶۵/۷۰	۱۶۷/۲۰	
	Bw3	۱۰۰-۷۵	۰/۸۸	۱۶۸/۶۰	۱۷۰/۱۰	
	C	۱۴۵-۱۰۰	۱/۰۱	۱۳۷/۹۰	۱۳۹/۳۰	
۵	A	۲۰-۰	۰/۵۳	۷۱۴/۷۰	۷۱۸/۵۰	۷۳۹/۵۹
	Bt	۴۰-۲۰	۰/۴۱	۷۴۶/۰۰	۷۴۹/۱۰	
	Btk	۶۰-۴۰	۰/۴۷	۷۴۸/۸۰	۷۵۲/۳۰	
	Bk	۸۰-۶۰	۱/۳۹	۶۹۴/۷۰	۷۰۴/۵۰	
	Ck	۱۰۰-۸۰	۰/۱۰	۷۲۲/۹۰	۷۲۳/۶۰	
۶	A	۲۰-۰	۰/۵۱	۴۰۷/۳۰	۴۰۹/۴۰	۳۷۷/۹۸
	Bt	۴۰-۲۰	۰/۹۲	۳۲۳/۰۰	۳۲۶/۰۰	
	Btk	۶۰-۴۰	۰/۹۵	۲۹۱/۰۰	۲۹۳/۸۰	
	Bk1	۸۰-۶۰	۰/۲۷	۱۸۵/۰۰	۱۸۵/۵۰	
	Bk2	۱۰۰-۸۰	۰/۹۱	۱۹۵/۰۰	۱۹۷/۷۰	
	Ck1	۱۲۰-۱۰۰	۰/۵۸	۲۲۲/۵۰	۲۲۳/۸۰	
	Ck2	۱۳۵-۱۲۰	۰/۴۳	۲۵۲/۶۰	۲۵۳/۷۰	

پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های اصلی با فرکانس پایین ($\chi_{\text{blank}}^{\text{If}}$)، پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های اصلی با فرکانس بالا ($\chi_{\text{blank}}^{\text{Hf}}$)، پذیرفتاری

وابسته به فرکانس ($\chi_{\text{fd}}^{\text{f}} \%$).

خاکرخ‌های ۳ و ۴ دارای مواد مادری آهکی در رژیم رطوبتی زیریک قرار دارند. خاکرخ ۳ نیز با توجه به قرارگیری در سطوح پایین دست مخروط افکنه، از مواد مادری آذرین بالادست و اطراف متأثر بوده است. در کل، علت افزایش پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند به چند

دلیل باشد: ۱- تبدیل درجای هیدروکسیدهای آهن غیر فری-مگنتیک به کانی‌های فری-مگنتیک از طریق پدوژنر ۲- تخلیه کربنات‌ها (مواد دیامغناطیس) از سطح ۳- افزایش کانی فری-مگنتیک ثانویه از طریق هوازدگی. (Le Borgne (1955) علت افزایش پذیرفتاری در سطح را، تبدیل درجای کانی‌های غیر فری-مگنتیک به بلورهای مگنتیت و مگهمیت می‌دانست. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) نیز خاکرخی با منشأ رسوبی اما دارای پذیرفتاری مغناطیسی بالا را مشاهده کردند و علت آن را موقعیت خاکرخ و قرارگیری بر روی مخلوطی از مواد مادری آذرین و رسوبی ذکر نمودند. به نظر می‌رسد که یافته‌های مطالعه با پژوهش‌های انجام شده توسط (Soleimani Sardoo et al., 2023) و (Rasooli et al., 2022) که بر تأثیر مهم تشکیل خاک و سنگ‌شناسی بر پذیرفتاری مغناطیسی تأکید می‌کنند، مطابقت داشته باشد.

خاکرخ‌های ۲ (رژیم رطوبتی اریدیک) و ۵ (رژیم رطوبتی زیریک) دارای موادمادری یکسان آذرین هستند اما شرایط رطوبتی متفاوتی دارند. بنابراین پذیرفتاری مغناطیسی متفاوتی متأثر از نقش اقلیم از خود نشان داده‌اند (جدول ۲). در همین راستا (Ayoubi et al., 2014) گزارش کردند که علت افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در سنگ‌های آذرین مافیک نتیجه هوازدگی سنگ‌ها و در نهایت آزاد شدن کانی‌های فری-مگنتیک تحت تأثیر رطوبت می‌باشد.

جدول ۳ نشان‌دهنده پذیرفتاری مغناطیسی سنگ بستر پودر شده مرتبط به هر خاکرخ می‌باشد. بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به سنگ مادر خاکرخ پنج دارای سنگ‌های آتشفشانی با ترکیبات آندزیت- تراکی آندزیت است که دارای χ_{lf} به میزان $1104/8 \times 10^{-8}$ $m^3 kg^{-1}$ بوده و کمترین آن مربوط به خاکرخ چهار به میزان $51 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ می‌باشد. خاکرخ چهار بر روی مواد ماسه سنگ و سیلت سنگ قرار دارد. نگاه دقیق‌تر حاکی از بالا بودن نسبی میزان پذیرفتاری در خاکرخ‌های یک و سه می‌باشد. باتوجه به توضیحات قبل، خاکرخ یک روی مواد مادری کنگلومرا قرار دارد اما پذیرفتاری مغناطیسی نسبتاً بالایی نشان می‌دهد که علت آن به موادمادری اطراف و بالادست نسبت داده شد. خاکرخ سه هم روی مواد ماسه سنگ، سیلت سنگ و در برخی قسمت‌ها گدازه‌های آندزیتی و سنگ‌های آذری آواری واقع شده است. خاکرخ دو، سنگ‌مادر آذرین داشته و در رژیم رطوبتی اریدیک (Banaiee, 1998) قرار دارد. خاکرخ پنج در رژیم رطوبتی زیریک (Banaiee, 1998) و مواد مادری آذرین است در نتیجه بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی را دارد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به تأثیر آبرفت‌های بالادست، سرعت هوازدگی‌های متأثر از موقعیت ژئومورفیک و اقلیم، و تأثیر غیر قابل انکار باد در منطقه که توسط پژوهشگران دیگر نیز مورد توجه قرار گرفته (Asgari et al., 2018; Ding et al., 2020; Sarmast et al., 2017)، مواد مادری به‌صورت کاملاً مشخص آذرین و یا آهکی نبوده و گاه تأثیر هر دو نوع ماده مادری در خاک‌ها دیده می‌شود. خاکرخ ۵ و ۲ دارای مواد مادری یکسان هستند اما رژیم رطوبتی متفاوتی دارند، که مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاکرخ ۵ در رژیم رطوبتی زیریک، بیشتر از خاکرخ ۲ در رژیم رطوبتی اریدیک است. مقایسه خاکرخ‌های ۲ و ۶ که هر دو بر روی مواد مادری آذرین واقع بوده اما رژیم‌های رطوبتی متفاوتی دارند نشان می‌دهد که میزان پذیرفتاری مغناطیسی در خاکرخ ۶ (رژیم زیریک) بیش از خاکرخ ۲ (رژیم اریدیک) می‌باشد.

جدول ۳. نتایج مربوط به پذیرفتاری مغناطیسی سنگ مادر خاکرخ‌ها

شماره خاکرخ	% χ^d	$\chi^{Hf} blank$	$\chi^{lf} blank$
۱	۰/۵۱	۷۹۵/۲۰	۷۹۹/۳۰
۲	۰/۳۷	۱۳۳/۷۰	۱۳۴/۲۰
۳	۰/۲۴	۶۳۰/۱۰	۶۳۱/۶۰
۴	۰/۰۰	۵۱/۰۰	۵۱/۰۰
۵	۰/۱۸	۱۱۰۲/۸۰	۱۱۰۴/۸۰
۶	۰/۰۰	۳۴۷/۲۰	۳۴۷/۲۰

شکل‌های آهن در خاک

اختلاف بین اکسیدهای آهن استخراج شده به‌وسیله سیترا- دی‌تیونات - بی‌کربنات (CBD) و اگزالات (Fed-Feo)، بیانگر مقدار اکسید آهن با تبلور خوب می‌باشد که با افزایش سن و تکامل خاک، افزایش می‌یابد (Jelenska et al., 2008). کمترین آهن دی‌تیونات مربوط به خاکرخ چهار است که به‌صورت اینسپتی‌سول طبقه‌بندی شده و یک خاک دارای تکامل متوسط و مواد مادری رسوبی در رژیم رطوبتی زیریک است. یون آهن در اثر هوازدگی مواد مادری به خاک آزاد می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط محیطی خاک، ممکن است آهن اکسید شده یا ترکیب و شاید رسوب کند. در نتیجه آهن آزاد شده منجر به تشکیل کانی‌های فری مغناطیسی ثانویه در خاک می‌شود (Lu, 2000). روند تغییرات میانگین وزنی (Fed-Feo) مشابه روند تغییرات میانگین وزنی (Fed) برای هر خاکرخ است (جدول ۴). مقدار (Fed-Feo)،

اکسید آهن با تبلور خوب، در خاکرخ ۵ بیشترین میزان را نشان داد که دارای بیشترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی نیز می‌باشد. افزایش نسبت Fed/Fed در بخش‌هایی از خاک حاکی از جوان بودن خاک‌ها است. تعیین نسبت Fed/Fed به‌عنوان نسبت آهن فعال، می‌تواند تا حدودی بیان‌کننده مراحل هوادیدگی باشد (Azadi, et al., 2021). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در مراحل اولیه هوادیدگی و تکامل خاک ممکن است آزادسازی آهن بی‌شکل یا غیر کریستالی از کانی‌های خاک، از مقدار تشکیل آهن بلوری بیشتر گردد و موجب افزایش Fed/Fed شود (Azadi, et al., 2021). پژوهشگران مختلفی بیان کردند که میزان Fed در طی تکامل خاک افزایش یافته و با افزایش آن میزان Fed/Fed کاهش می‌یابد (Rezapour et al., 2010 و Moghbeli et al., 2021). می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی بیشتر وابسته به شکل‌های مختلف آهن، میزان تکامل یافتگی، درجه هوادیدگی، اقلیم، و سنگ‌شناسی در لایه‌های مختلف خاک است.

جدول ۴. نتایج مربوط به شکل‌های مختلف آهن در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاکرخ	افقی	عمق Cm	Fed/Fed	$\text{Fed}-\text{Fed}$ g kg^{-1}	Feo	Fed
۱	A	۱۰-۰	۰/۰۴۳	۳/۲۸	۰/۱۵	۳/۴۳
	Bk1	۳۰-۱۰	۰/۰۳۹	۴/۹۱	۰/۲۰	۵/۱۱
	Bk2	۶۰-۳۰	۰/۰۴۱	۴/۶	۰/۲۰	۴/۸۰
	Bky	۹۵-۶۰	۰/۰۲۷	۳/۸۴	۰/۱۱	۳/۹۵
	Bty	۱۱۰-۹۵	۰/۰۲۹	۴/۴۱	۰/۱۳	۴/۵۴
	By	۱۵۰-۱۱۰	۰/۰۲۵	۴/۵۸	۰/۱۲	۴/۸۰
۲	A	۲۰-۰	۰/۰۲۴	۸/۲۲	۰/۲۱	۸/۴۳
	Btk1	۴۰-۲۰	۰/۰۲۹	۷/۳	۰/۲۲	۷/۵۲
	Btk2	۶۰-۴۰	۰/۰۴۴	۶/۱۷	۰/۲۹	۶/۴۸
	C1	۸۰-۶۰	۰/۰۳۰	۵/۶۸	۰/۱۸	۵/۸۶
	C2	۱۱۰-۸۰	۰/۰۲۴	۷/۵۵	۰/۱۹	۷/۷۴
۳	A	۲۵-۰	۰/۰۲۸	۷/۶۳	۰/۲۲	۷/۸۵
	Bw	۵۵-۲۵	۰/۰۲۸	۶/۵۸	۰/۱۹	۶/۷۷
	Bk	۸۵-۵۵	۰/۰۳۰	۶/۱۴	۰/۱۹	۶/۳۳
	C1	۱۰۵-۸۵	۰/۰۳۰	۶/۱۶	۰/۲۲	۶/۳۸
	C2	۱۲۰-۱۰۵	۰/۰۴۰	۷/۶۵	۰/۳۲	۷/۹۷
۴	A	۱۵-۰	۰/۰۳۴	۵/۲۶	۰/۱۹	۵/۴۵
	Bw1	۴۵-۱۵	۰/۰۳۲	۶/۰۲	۰/۲۱	۶/۴۳
	Bw2	۷۵-۴۵	۰/۰۳۳	۵/۲۶	۰/۱۸	۵/۴۴
	Bw3	۱۰۰-۷۵	۰/۰۳۱	۵/۲۶	۰/۱۷	۵/۴۳
	C	۱۴۵-۱۰۰	۰/۰۳۰	۵/۷۴	۰/۱۸	۵/۹۲
۵	A	۲۰-۰	۰/۰۲۱	۸/۷۲	۰/۱۹	۸/۹۱
	Bt	۴۰-۲۰	۰/۰۲۰	۷/۷۱	۰/۱۶	۷/۸۷
	Btk	۶۰-۴۰	۰/۰۱۵	۷/۳۲	۰/۱۲	۷/۵۳
	Bk	۸۰-۶۰	۰/۰۱۰	۸/۱۰	۰/۰۹	۸/۱۹
	Ck	۱۰۰-۸۰	۰/۰۱۱	۷/۸۲	۰/۰۹	۷/۹۱
۶	A	۲۰-۰	۰/۰۳۹	۵/۸۱	۰/۲۳	۶/۰۴
	Bt	۴۰-۲۰	۰/۰۲	۷/۲۶	۰/۲۱	۷/۴۷
	Btk	۶۰-۴۰	۰/۰۲	۶/۱۹	۰/۱۹	۶/۳۸
	Bk1	۸۰-۶۰	۰/۰۳۲	۴/۹۲	۰/۲۰	۶/۱۲
	Bk2	۱۰۰-۸۰	۰/۰۲۹	۶/۳۳	۰/۱۶	۶/۴۹
	Ck1	۱۲۰-۱۰۰	۰/۰۳۲	۵/۰۲	۰/۱۷	۵/۱۹
	Ck2	۱۳۵-۱۲۰	۰/۰۲۷	۵/۰۳	۰/۱۴	۵/۱۷

Fed = آهن عصاره‌گیری شده با دی‌تیونات، Feo = آهن عصاره‌گیری شده با اگزالات، $\text{Fed}-\text{Fed}$ = اکسید آهن بلوری، Fed/Fed = اکسید

آهن بی‌شکل

ضرایب همبستگی میان پارامترهای مغناطیسی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در (جدول ۵) گزارش شده است. رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0/999^{**}$) در سطح یک در صد بین Fe_d-Fe_o و Fe_d مشاهده شد. پذیرفتاری مغناطیسی با Fe_d-Fe_o و Fe_d رابطه مثبت و معنی‌داری به ترتیب با ضرایب همبستگی $r=0/545^{**}$ و $r=0/561^{**}$ نشان داد. این نتایج مشابه نتایج Sarmast et al. (2017) بوده و دلیل این همبستگی مثبت و معنی‌دار ناشی از خاصیت مغناطیسی کانی‌های حاوی عنصر آهن می‌باشد. اما پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس با هیچ یک از خصوصیات خاک رابطه مثبت و معنی‌داری نداشت که نشان دهنده این است که ذرات مغناطیسی ثانویه تأثیر معناداری بر پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های منطقه نداشته است. با توجه به جدول ۵ پذیرفتاری مغناطیسی با گچ رابطه منفی، و با سیلت رابطه مثبت و معنی‌داری نشان داد در حالی که پذیرفتاری مغناطیسی با رس رابطه منفی دارد، یعنی با افزایش رس پذیرفتاری کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مقادیر $\chi_{fd}\%$ پایین است، این نشان می‌دهد که پذیرفتاری مغناطیسی تحت تأثیر ذرات ثانویه نبوده چون عمده ذرات مغناطیسی در کسر رس قرار دارند. $\chi_{fd}\%$ با مقادیر EC، گچ، آهک و شن رابطه منفی نشان داد. Dankoub et al. (2012) همبستگی منفی و معنی‌داری را بین χ_{lf} خاک و EC و گچ یافتند و گزارش کردند که این همبستگی منفی را می‌توان به ماهیت دیامغناطیسی اجزای خاک نسبت داد که سهم مغناطیسی مواد معدنی حاوی آهن را در خاک رقیق می‌کند. مقادیر Fe_d همبستگی منفی و معنی‌داری نیز با پارامترهای هدایت الکتریکی، گچ و همچنین رابطه منفی با آهک نشان داد. شاخص تکامل خاک Fe_o/Fed با پذیرفتاری مغناطیسی رابطه منفی و معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان داد. همان‌گونه که جدول ۵ نشان می‌دهد، با افزایش تکامل یافتگی خاک، میزان پذیرفتاری مغناطیسی نیز افزایش یافته است که روند مشابهی توسط Taghdis et al. (2021) نیز در استان کرمان گزارش گردیده است.

جدول ۵. ماتریس هم بستگی میان خصوصیات خاک‌رخی‌های مورد مطالعه

OM	Gypsum	%CaCO ₃	Clay	Silt	Sand	% EC	Feo/Fed	Fed-Feo	Fed	% χ_{fd}	χ
										۱	X
										۱	% χ_{fd}
									۱	۰/۱۶۶ ^{ns}	۰/۵۴۵ ^{**}
								۱	۰/۹۹۹ ^{**}	۰/۱۶۵ ^{ns}	۰/۵۶۱ ^{**}
							۱	۰/۴۹۰ [*]	۰/۴۶۶ ^{**}	۰/۱۱۳ ^{ns}	۰/۴۹۲ ^{**}
						۱	۰/۰۸۰ ^{ns}	۰/۴۹۷ ^{**}	۰/۵۰۱ [*]	۰/۲۴۱ ^{ns}	۰/۱۵۶ ^{ns}
					۱	۰/۱۰۰ ^{ns}	۰/۳۲۸ ^{ns}	۰/۱۰۹ ^{ns}	۰/۱۱۳ ^{ns}	۰/۲۶۷ ^{ns}	Sand
				۱	۰/۹۶۶ ^{**}	۰/۱۰۴ ^{ns}	۰/۳۷۹ ^{ns}	۰/۱۵۳ ^{ns}	۰/۱۴۹ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۳۶۳ [*]
			۱	۰/۰۲۳ ^{ns}	۰/۲۸۱ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۱۳۷ ^{ns}	۰/۱۴۸ ^{ns}	۰/۱۳۰ ^{ns}	۰/۰۳۹ ^{ns}	۰/۳۱۵ ^{ns}
		۱	۰/۱۱۸ ^{ns}	۰/۳۲۳ ^{ns}	۰/۳۴۰ ^{ns}	۰/۱۷۸ ^{ns}	۰/۲۵۶ ^{ns}	۰/۰۶۹ ^{ns}	۰/۰۸۶ ^{ns}	۰/۱۱۳ ^{ns}	۰/۱۲۶ ^{ns}
	۱	۰/۱۸۴ ^{ns}	۰/۰۵۰ ^{ns}	۰/۱۱۱ ^{ns}	۰/۱۱۹ ^{ns}	۰/۹۲۰ ^{**}	۰/۱۹۸ ^{ns}	۰/۴۳۵ [*]	۰/۴۴۱ [*]	۰/۱۷۳ ^{ns}	۰/۱۴۵ ^{ns}
۱	۰/۲۶۳ ^{ns}	۰/۰۱۹ ^{ns}	۰/۰۱۵ ^{ns}	۰/۷۳۵ ^{**}	۰/۷۰۲ ^{**}	۰/۲۹۳ ^{ns}	۰/۲۹۱ ^{ns}	۰/۲۵۴ ^{ns}	۰/۲۵۲ ^{ns}	۰/۰۱۷ ^{ns}	۰/۳۱۲ ^{ns}
											OM

نتیجه‌گیری

خاک‌رخی‌های ۱، ۳ و ۴ بر روی مواد مادری رسوبی کنگلومرا و ماسه‌سنگ و خاک‌رخی‌های ۲، ۵ و ۶ بر روی مواد آذرین آندزیت و بازالت حفر گردیده‌اند. رژیم رطوبتی در خاک‌رخی‌های یک و دو اریدیک و در خاک‌رخی‌های سه، چهار، پنج و شش زیریک می‌باشد. از این رو بسته به رژیم رطوبتی و افق‌های مشخصه تشکیل شده، خاک‌رخی‌ها در رده‌های اریدی‌سول (خاک‌رخی‌های ۱ و ۲)، اینسپتی‌سول (خاک‌رخی‌های ۳ و ۴) و آلفی‌سول (خاک‌رخی‌های ۵ و ۶) طبقه‌بندی شده‌اند. از جمله فرآیندهای خاکساز در این منطقه می‌توان به تجمع گچ، آهک و شست و شو و تجمع رس اشاره نمود. گچ در خاک‌رخی واقع در رژیم رطوبتی اریدیک مشاهده گردید و به سمت رژیم رطوبتی زیریک گچ و افق جیپسیک مشاهده نگردید. در مطالعات پذیرفتاری مغناطیسی مقادیر بیش تر χ_{lf} خاک‌های مورد مطالعه مربوط به خاک‌های منشأ گرفته از مواد مادری آذرین بود (خاک‌رخی ۵). در این تحقیق خاک‌های منشأ گرفته از مواد مادر آهکی پذیرفتاری نسبتاً بالایی نشان دادند که دلایل آن را می‌توان به موقعیت منطقه، مواد مادری اطراف و همچنین افزایش تکامل خاک که منجر به افزایش مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی می‌شود، نسبت داد. خاک‌های رسوبی به دلیل تکامل ضعیف و محتوای کم اکسیدهای آهن مغناطیسی اولیه، مقادیر χ_{lf} پایینی در مراحل اولیه تشکیل داشتند. با گذشت زمان، با غالب شدن فرآیند هوازدگی و روند تکامل خاک، χ_{lf} خاک به تدریج افزایش می‌یابد. در خاک‌های دارای منشأ آذرین با افزایش تکامل میزان پذیرفتاری روند صعودی پیدا می‌کند (خاک‌رخی شش). خاک‌رخی یک در رژیم رطوبتی اریدیک در مقایسه با

خاک‌رخ‌های سه و چهار در رژیم رطوبتی زیریک که دارای مواد مادری یکسانی بودند، مقدار پذیرفتاری نسبتاً کمتری را نشان داد. خاک‌رخ ۱ در رژیم رطوبتی اریدیک و دارای مواد مادری کنگلومرای آهکی دارای مقادیر پذیرفتاری نسبتاً بالایی می‌باشد که علت آن را می‌توان به موقعیت این خاک‌رخ و اثرپذیری آن از مواد مادری آذرین بالادست و مجاور نسبت داد. به‌علاوه، خاک‌رخ دو در رژیم رطوبتی اریدیک و دارای مواد مادری آذرین، نسبت به خاک‌رخ پنج که دارای رژیم رطوبتی زیریک و مواد مادری آذرین می‌باشد، پذیرفتاری مغناطیسی کمتری را نشان داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی پیچیده‌تر از آن است که فقط به ماده مادری یا اقلیم به‌صورت مجزا از یکدیگر مرتبط بوده، بلکه تابع ترکیبی از عوامل شامل شکل‌های مختلف آهن، میزان تکامل یافتگی، درجه هوازدگی، اقلیم، و سنگ‌شناسی می‌باشد.

بیشترین مقدار آهن متبلور که میزان تکامل خاک را نشان می‌دهد، در خاک‌رخ پنج در رژیم رطوبتی زیریک و دارای مواد مادری آذرین مشاهده گردیده است. پذیرفتاری مغناطیسی با Fed و Fed-Feo رابطه مثبت و معنی‌دار نشان داد، اما پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس با هیچ یک از خصوصیات خاک رابطه مثبت و معنی‌داری نداشت و این نشان‌دهنده این است که ذرات مغناطیسی ثانویه تأثیری بر پذیرفتاری مغناطیسی در منطقه نداشته است. به‌طور کلی، مقادیر اکسیدهای آهن آزاد Fed، اکسید آهن با تبلور خوب Fed-Feo از خاک‌رخ یک تا شش روند تقریباً افزایشی داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌های منطقه در روند تشکیل و تکامل خود متأثر از اقلیم و مواد مادری بوده‌اند. از سوی دیگر، غیر ممکن است که تأثیر عوامل محیطی منفرد بر روی پذیرفتاری مغناطیسی خاک را به‌طور مستقیم بررسی کرد. مواد مادری، توپوگرافی، آب و هوا، پیدایش و تکامل خاک و اشکال شیمیایی اکسیدهای آهن به‌طور همزمان بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک تأثیر گذاشته‌اند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- بیات، امیر؛ فرپور، محمد هادی؛ جعفری، اعظم (۱۳۹۵). خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکرومورفولوژیکی و کانی‌شناسی رسی خاک‌های منطقه بردسیر متأثر از سازندهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیم. مجله آب و خاک، دوره ۳۰، شماره ۵، صص ۱۵۱۵-۱۵۳۰.
- حسینی، سمیه السادات؛ اسفندیارپور بروجنی، عیسی؛ فرپور، محمد هادی؛ کریمی، علیرضا (۱۳۹۴). مقایسه شاخص‌های مختلف تکامل خاک در برش طولی کرمان-بافت. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، دوره ۵، شماره ۲، صص ۱-۲۳.
- سنجری، صالح؛ فرپور، محمد هادی؛ کریمیان اقبال، مصطفی؛ اسفندیارپور بروجنی، عیسی (۱۳۹۰). نحوه‌ی تشکیل، میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی رسی خاک‌های واقع بر سطوح ژئومرفیک گوناگون در منطقه‌ی جیرفت. مجله آب و خاک، دوره ۲۵، شماره ۲، صص ۴۱۱-۴۲۵.
- عبدلی، یونس؛ جعفری، سیروس؛ بشکار، عباس (۱۳۹۷). رابطه بین اشکال مختلف آهن و پذیرفتاری مغناطیسی با تکامل خاک‌های منطقه رامهرمز، استان خوزستان. آب و خاک، دوره ۳۲، شماره ۶، صص ۱۱۴۹-۱۱۶۴.
- کریمی، علیرضا؛ خادمی، حسین (۱۳۹۱). تأثیر مواد مادری، گچ و کربنات‌ها بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های جنوب مشهد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، دوره ۱۶، شماره ۱، صص ۲۴۷-۲۵۸.

REFERENCES

- Abdoli Y., Jafari S., & Beshkar A. (2019). Correlation between different Fe foams and magnetic susceptibility with the development of some Ramhormoz's soils, Khuzestan Province, Iran. *Journal of Water and Soil*, 32(6): 1149-1164., <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.68206>, (In Persian).
- Asgari N., Ayoubi S., & Demattê, J. A. (2018). Soil drainage assessment by magnetic susceptibility measures in western Iran. *Geoderma regional*, 13: 35-42.
- Ayoub S., Amiri S., & Tajik S. (2014). Lithogenic and anthropogenic impacts on soil surface magnetic susceptibility in an aird region of Central Iran. *Archives of Agronomy and soil Science*, 60 (10): 1467-1483.
- Azadi A., Baghernejad M., Gholami A., & Shakeri S. (2021). Forms and distribution pattern of soil Fe (Iron) and Mn (Manganese) oxides due to long-term rice cultivation in Fars Province, Southern Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(16): 1894-1911.
- Banaiee M.H. (1998). Soil Moisture and temperature regime map of soils of Iran. *Soil and Water Research*



Institute, Tehran, Iran.

- Bayat A., Farpoor M.H., & Jafari A. (2016). Physicochemical properties, micromorphology and clay mineralogy of soils affected by geological formations, geomorphology and climate. *Journal of Water and Soil*, 30(5): 1515-1530., <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.33013>, (In Persian).
- Bower C. A., & Hatcher J. T. (1966). Simultaneous determination of surface area and cation-exchange capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 30(4): 525-527.
- Cai W., Bora M. J., Pekkat S., Bordoloi S., Garg A., & Sekharan S. (2023). A new and simple model for predicting soil erosion based on hole erosion tests. *Acta Geophysics*, 71(2):823-836. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00904-6>.
- Cao Z., Zhang K., He J., Yang Z., & Zhou Z. (2021). Linking rocky desertification to soil erosion by investigating changes in soil magnetic susceptibility profiles on karst slopes. *Geoderma* 389:114949. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114949>
- Chaparro M.A.E., Moralejo M.D.P., Böhnelt H.N., & Acebal S.G. (2020). Iron oxide mineralogy in Mollisols, Aridisols and Entisols from southwestern Pampean region (Argentina) by environmental magnetism approach. *Catena*, 190, Article No. 104534, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104534>
- Dankoub Z., Ayoubi S., Khademi H., & Lu S. G. (2012). Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, Central Iran. *Pedosphere*, 22: 33-47.
- Dearing J.A. (1999). Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing.
- Ding Z., Zhang Z., Li Y., Zhang L., & Zhang K. (2020). Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil Tillage Research*, 199:104568.
- Djerrab A., Zedam R., Camps P., Defafilia N., Abdessadok S., Triki D., & Bahra N. (2012). Etude sédimentologique et magnetique d'une séquence alluviale du pléistocène supérieur-holocène del'Oued Adaila (El Ma Labiod, Tébessa, Algérie) et indications.
- Egli M., Mirabella A., Sartori G., & Fitze P. (2003). Weathering rates as a function of climate: results from a climosequence of the val Genova (Trentino Italian Alps). *Geoderma*, 111: 99-121.
- Fine P., Singer M.J., Laven R., Verosub K., & Southard R.J. (1989). Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. *Geoderma*, 44: 287- 306.
- Gee G.W., & Bauder J.W. (1986). Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Agron. Monogr. vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 388-409.
- Hosseini S.S., Esfandiarpour Boroujeni I., Farpoor M.H., & Karimi. A.R. (2015). Comparison of different soil development indices along Kerman-Baft transect. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(2): 1-23. (In Persian).
- IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. In *International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*, 4th ed.; International Union of Soil Sciences: Vienna, Austria.
- Jelenska M., Hasso-Agopsowicz A., Kadzialko-Hofmokl M. K., Sukhorada A., Bondar K., & Matviishina Z. H. (2008). Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52: 255-270.
- Kader S., Novicevic R., & Jaufer L. (2022). Soil management in sustainable agriculture: analytical approach for the ammonia removal from the dairy manure. *The Journal of Agricultural Forestry* 68(4):69-78.
- Karimi A., & Khademi H. (2012). Effect of parent material, gypsum and carbonates on magnetic susceptibility of soils, southern Mashad. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 16(61): 247-258. (In Persian).
- Kehl M., Vlaminc S., Köhler T., Laag C., Rolf C, Tsukamoto S, & Khormali F. (2021). Pleistocene dynamics of dust accumulation and soil formation in the southern Caspian Lowlands-New insights from the loess-paleosol sequence at Neka-Abelou, northern Iran. *Quaternary Science Review*, 253:106774.
- Khan Nazer N. H. (1995). Geological Quadrangle Map. Chahargonbad. Geology Organization of Iran.
- Le Borgne E. (1955). Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annales de Geophysique*, 11:399-419.
- Li G., Xia D., Lu H., Wang Y., Jia J., Liu X., & Yang X. (2020). Magnetic, granulometric and geochemical characterizations of loess sections in the eastern Arid Central Asia: Implication for paleoenvironmental interpretations. *Quaternary International*, 552:135-147.

- Liliwirianis N., Isa N.N.M., & Suratman M.N. (2023). Land Resources and Its Degradation in Asia: Its Control and Management. Land Environment Management through Forestry, <https://doi.org/10.1002/9781119910527.ch2>
- Lu S.G. (2000). Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena*, 40:359-373.
- Lu S.G., Chen D.J., Wang S.Y., & Liu Y.D. (2012). Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun-Gui Plateau, China: Evidence for pedogenic magnetic minerals. *Journal of Applied Geophysics*, 77: 39-50.
- Mehra O.P., & Jackson M.L. (1958). Iron oxide removal from soils and clays by a clays and clays dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *National Conference on Minerals*, 7: 317-327.
- Moghbali Z., Owliaie H.R., Adhami E., Najafi-Ghiri M., & Sanjari S. (2021). Pedogenesis and spatial distribution of soil magnetic properties along a lithotoposequence in an arid region of Southern Iran. *Catena*, 198, Article No. 104979, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104979>.
- Mullins C.E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: a review. *Journal of Soil Science*, 28:223-246.
- Nelson D. W., & Sommers L.E. (1982). Total Carbon, Organic matter. P. 539-577. In: A.L. page et al. (Ed), *Method of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monger. No. 9. ASA and SSSA. Madison WI.*
- Owliaie H. (2014). A magnetic investigation along a NE-SW transect of the Yasouj Plain, southwestern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(7):1015-1027. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.855724>
- Rasooli N. Farpoor M.H., Mahmoodabadi M., & Esfandiarpour Boroujeni I. (2022). Pedenvironmental variations assessment using magnetic susceptibility in Lut Watershed Central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 198, 104582.
- Rezapour S., Jafarzadeh, A., Samadi A., & Oustan S. (2010). Distribution of iron oxides forms on a transect of calcareous soils, north- west of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56: 165-182.
- Rustad L. E., Campbell J.L., Marion G.M., Norby R.J., Mitchell M.J., Hartley A.E., Cornelissen J.H.C., & Gurevitch J. (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration net nitrogen mineralization and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *GCTE-NEWS. Oecologia*, 126:543-562.
- Sanjari S., Farpoor M.H., Karimian Eghbal M., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2011). Genesis, micromorphology and clay mineralogy of soils located on different geomorphic surfaces in Jiroft Area. *Journal of Water and Soil* 25(2): 411-425., <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9487> (In Persian).
- Sanjari S., Farpoor M.H., & Mahmoodabadi M. (2021). Magnetic susceptibility of soils as affected by lithology, geomorphology and climate in Jazmoorian Watershed, central Iran. *Geosciences Journal*, 25: 903-913, <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0007-5>.
- Soleimani Sardoo E., Farpoor M.H., Mahmoodabadi M., & Jafari A. (2023). Magnetic susceptibility in soil pedons developed on different parent rocks in Kerman province (Iran). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 67(1):83-106. <https://doi.org/10.1007/s11200-021-0771-8>.
- Sarmast M., Farpoor M.H., & Esfandiarpour Boroujeni I. (2016). Comparing Soil Taxonomy (2014) and updated WRB (2015) for describing calcareous and gypsiferous soils, central Iran. *Catena*, 145: 83-91.
- Sarmast M., Farpoor M. H., & Esfandiarpour Boroujeni I. (2017). Magnetic susceptibility of soils along a lithotoposequence in southeast Iran. *Catena*, 156: 252-262.
- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., & Benham E.C. (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Schwertmann U. (1973). Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 53(2): 244-246.
- Shirzaditabar F., & Heck R. J. (2021). Characterization of soil magnetic susceptibility: a review of fundamental concepts, instrumentation, and applications. *Canadian Journal of Soil Science*, 102(2): 231-251. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0040>.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy*. 13th ed.; U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA
- Taghdis S. Farpoor M. H., Fekri M., & Mahmoodabadi M. (2021). Vertical distribution of magnetic susceptibility as affected by pedoenvironmental factors along arid and semi-arid transect Fars province Iran. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 65: 86-103. [10.1007/s11200-020-1259-7](https://doi.org/10.1007/s11200-020-1259-7).
- Tsai H., Huang W. S., Hseu Z. Y., & Chen Z. S. (2006). A river terrace soil chronosequence of the pakua tableland in central Taiwan. *Soil Science*, 171: 167-179.