



Investigating magnetic susceptibility distribution and weathering indices under different geomorphic surfaces chaldoran area

Ashraf Malekian^{1*}, Ali Asghar Jafarzadeh², Shahin Oustan³, Moslem Servati⁴

1. Corresponding Author, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email:

ashraf.malekian@pnu.ac.ir

2. Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email:

jafarzadeh1396@yahoo.com

3. Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email:

oustan@mail.com

4. Department of Green Space, Faculty of Agriculture, Shahid Bakeri High Education Center of Miandoab, Urmia University, Email: moslemservati@mail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 6, 2022

Revised: Jan. 9, 2023

Accepted: Feb. 25, 2023

Published online: May. 22, 2023

Keywords:

Iron,
Pedogenic Iron,
Drainage,
Land Use.

ABSTRACT

Magnetic susceptibility (χ) is a fast, non-destructive and simple method for determining soil properties and describing soil formation processes, which has been studied at different geomorphic levels, in order to investigate the effects of soil formation factors (elevation, elevation, and parent materials). This research aims to evaluate the changes of different forms of iron, drainage, land use and human activities (agriculture) on changes in soil magnetic receptivity and investigate CIW, CIA and CPA aeration indices in different geomorphic units in the year 2021 in Chaldaran study area in the northwest Iran and West Azarbaijan province. For this purpose, 9 test soils were excavated and evaluated in five dominant geomorphic units in the region, such as slope plain, covered pediment, alluvial cone, plain and flood plain. After dissection and sampling from the genetic horizons of the excavated rocks and transporting them to the laboratory, the physicochemical properties of the samples were measured along with their magnetic properties and aeration indices of CIW, CIA and CPA. The results showed that the range of magnetic receptivity of the soils of the region varied from 42.90×10^{-8} to $1053.20 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Also, the average value of χ_{lf} of the studied soils in different geomorphic units was observed as flood plain > alluvial cone > covered pediment > plain > slope plain. Although the values of magnetic receptivity depending on the frequency of the examined soil samples were variable between 0.07% and 3.50%; But in most horizons, the value of χ_{fd} was less than 2%. This result indicates the presence of multi-domain coarse particles in the region that were added through parent material. Also, the results of CIA, CIW and CPA aeration indices indicate the stage of weak to moderate aeration in the region. Further, it was observed that the leaching of diamagnetic materials to the lower soil layers, ferrimagnetic minerals transferred by water and agricultural activities, has led to changes in the χ_{lf} trend with depth. Also, according to the A-CN-K curve and the chemical composition of the oxides of the studied elements, a moderate aeration process was observed in the region. On the other hand, the studied region is affected by water sediments and agricultural activities; It seems that carrying out the processes of sedimentation, soil formation, aeration and cultivation in this area has changed the chemical composition of the soils. Finally, it can be concluded that the equitic conditions caused a decrease in the acceptability and amount of Fed due to poor drainage in the studied soils.

Cite this article: Malekian, A., Jafarzadeh, A.A., Oustan, Sh., & Servati, M. (2023). Investigating Magnetic Susceptibility Distribution and Weathering Indices under Different Geomorphic Surfaces Chaldoran area, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (3), 533-557. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348332.669354>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348332.669354>



توزیع پذیرفتاری مغناطیسی و شاخص‌های هوادیدگی در سطوح مختلف ژئومورفیک در برخی خاک‌های منطقه چالدران

اشرف ملکیان^{۱*}، علی اصغر جعفرزاده^۲، شاهین اوستان^۳، مسلم ثروتی^۴۱. نویسنده مسئول، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، ایمیل: ashraf.malekian@pnu.ac.ir۲. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: jafarzadeh1396@yahoo.com۳. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: oustan@mail.com۴. گروه فضای سبز، دانشکده کشاورزی، مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایمیل: moslemservati@mail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۶/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۳/۱

واژه‌های کلیدی:

تکامل خاک،

آهن پدوژنز،

زهکشی،

کاربری اراضی.

پذیرفتاری مغناطیسی (χ) روشی سریع، غیرتخریبی و ساده برای تعیین خصوصیات خاک و توصیف فرآیندهای تشکیل خاک است که در سطوح ژئومورفیک مختلف، به‌منظور بررسی اثرات فاکتورهای تشکیل خاک (پستی و بلندی، مواد مادری و ...) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این پژوهش با هدف بررسی اثرات اشکال مختلف آهن، زهکشی، کاربری اراضی و فعالیتهای انسانی (کشاورزی) بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی خاک و بررسی شاخص‌های هوادیدگی CIW، CIA و CPA در واحدهای ژئومورفیک مختلف در سال ۱۴۰۰ در منطقه مطالعاتی چالدران در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان غربی انجام گردید. بدین منظور ۹ خاکرخ شاهد در پنج واحد ژئومورفیک غالب در منطقه از جمله دشت دامن‌های، پدیمت پوشیده، مخروطه افکنه، دشت و دشت سیلابی حفر و ارزیابی گردید. پس از تشریح و نمونه‌برداری از افق‌های ژنتیکی خاک‌رخی‌های حفر شده، خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌ها به‌همراه ویژگی‌های مغناطیسی آنها و شاخص‌های هوادیدگی CIW، CIA و CPA اندازه‌گیری شد. دامنه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های منطقه که تحت تاثیر رسوبگذاری، خاکسازي، هوادیدگی و کشت و کار قرار داشت، از 10^{-8} تا 10^{-1} kg تا 10^{-2} تغییر بود. همچنین، میانگین مقدار χ_{fd} خاک‌رخی‌های مورد مطالعه در ژئوفرم‌های مختلف به‌صورت دشت سیلابی < مخروط افکنه < پدیمت پوشیده < دشت < دشت دامنه‌ای مشاهده گردید. با وجود اینکه مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نمونه‌های خاک مورد بررسی بین ۰/۰۷ تا ۳/۵۰ درصد متغیر بود؛ اما در بیشتر افق‌ها مقدار χ_{fd} کمتر از ۲ درصد اندازه‌گیری گردید. این نتیجه نشان‌دهنده حضور ذرات درشت چندحوزه‌ای در منطقه است که از طریق مواد مادری اضافه شده‌اند. همچنین نتایج مقادیر شاخص‌های هوادیدگی CIA، CIW و CPA و همچنین منحنی A-CN-K و ترکیب شیمیایی اکسیدهای عناصر مورد مطالعه نشان دهنده مرحله هوادیدگی ضعیف تا متوسط در منطقه است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، آبشویی مواد دیامغناطیس به لایه‌های زیرین خاک، انتقال کانی‌های فری مغناطیس توسط آب و فعالیت‌های کشاورزی، منجر به تغییرات روند χ_{fd} با عمق شده است. همچنین نتایج نشان داد که شرایط اکوییک به علت زهکشی ضعیف در خاک‌های مورد مطالعه موجب کاهش پذیرفتاری و میزان Fed شده است.

استناد: ملکیان؛ اشرف، جعفرزاده؛ علی اصغر، اوستان؛ شاهین، ثروتی؛ مسلم، (۱۴۰۲). توزیع پذیرفتاری مغناطیسی و شاخص‌های هوادیدگی در سطوح مختلف ژئومورفیک در برخی خاک‌های منطقه چالدران، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۳)، ۵۵۷-۵۳۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348332.669354>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348332.669354>

مقدمه

آهن چهارمین عنصر فراوان در پوسته زمین است (Huang *et al.*, 2018) که در چندین فاز اساسی، از جمله کانی‌های سیلیکات اولیه، کانی‌های پدوژنیک، اکسیدها و هیدروکسیدها با درجه‌های مختلف کریستالی و همچنین کمپلکس با مواد آلی وجود دارد (Azadi *et al.*, 2021). در پژوهش‌های متعددی مشاهده شده که در زمان شکل‌گیری و توسعه خاک، گونه‌ها و پایداری اکسیدهای آهن تغییر می‌کند (Torrent *et al.*, 1980; Diaz, 1989; Vodyanitskii, 2010; Huang, 2018). آهن آزاد یا پدوژنیک (Fe_d) با سیترات بی‌کربنات دی تیونات (CBD) و آهن آمورف (Fe_o) با اگزالات استخراج و اندازه‌گیری می‌گردد (Li *et al.*, 2022). با افزایش سن خاک، نسبت آهن پدوژنیک به آهن کل افزایش و نسبت آهن آمورف به آهن کل کاهش می‌یابد (Liu *et al.*, 2020; Gus-Stolarczyk *et al.*, 2022; Azadi *et al.*, 2021; Franz *et al.*, 2012). از گونه‌های دیگر آهن، آهن مغناطیس می‌باشد که یکی از روش‌های اندازه‌گیری آن پذیرفتاری مغناطیسی است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی روشی سریع، غیر تخریبی، ساده و نسبتاً ارزان می‌باشد که در دامنه گسترده‌ای از مطالعات مربوط به خاک کاربرد دارد (Maxbauer *et al.*, 2017). مگنتیت و مگهماتیت کانی‌های مغناطیسی غالب در خاک هستند که باعث افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌ها می‌شوند (Mullins, 1977; Maxbauer, 2016). خصوصیات مغناطیسی خاک تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی از جمله مواد مادری، درجه هوازدگی، شرایط ژئولوژیک، هیدرولوژیک، درجه تکامل خاک (Zhang, 2019) و شرایط آب و هوایی و نوع گیاهان قرار می‌گیرند (Lu, 2000; Blundell *et al.*, 2009). یافته‌ها حاکی از آن است که دما و بارندگی، خصوصیات مغناطیسی را در سطح خاک افزایش می‌دهند (Lu, 2000). De Jong *et al.* (2000) گزارش کردند که در مناطق مرطوب کانی‌های فری مگنتیت به صورت پدوژنز حضور دارد. همچنین در پژوهش دیگری مشاهده شد که شرایط آب و هوای گرم و مرطوب استوایی سبب افزایش هوادیدگی شیمیایی و تشکیل مگنتیت / مگهماتیت و هماتیت به صورت پدوژنزی شده و در نتیجه مقدار خصوصیات مغناطیسی را در خاک‌های آهکی تا $6.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ افزایش داده است (Lu *et al.*, 2012). پستی و بلندی از دیگر عوامل تاثیرگذار بر خصوصیات مغناطیسی می‌باشد، زیرا ارتباط تنگاتنگی با زهکشی خاک و انتقال ذرات خاک دارد. پذیرفتاری مغناطیسی در طول یک کاتنا، با توجه به اندازه ذرات متفاوت می‌باشد. به طوری که معمولاً میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک معمولاً در پایین شیب به دلیل تحول در ماده مادری و تغییرات بخش ریز خاک نسبت به اراضی بالادست افزایش می‌یابد (Thompson & Oldfield, 1986).

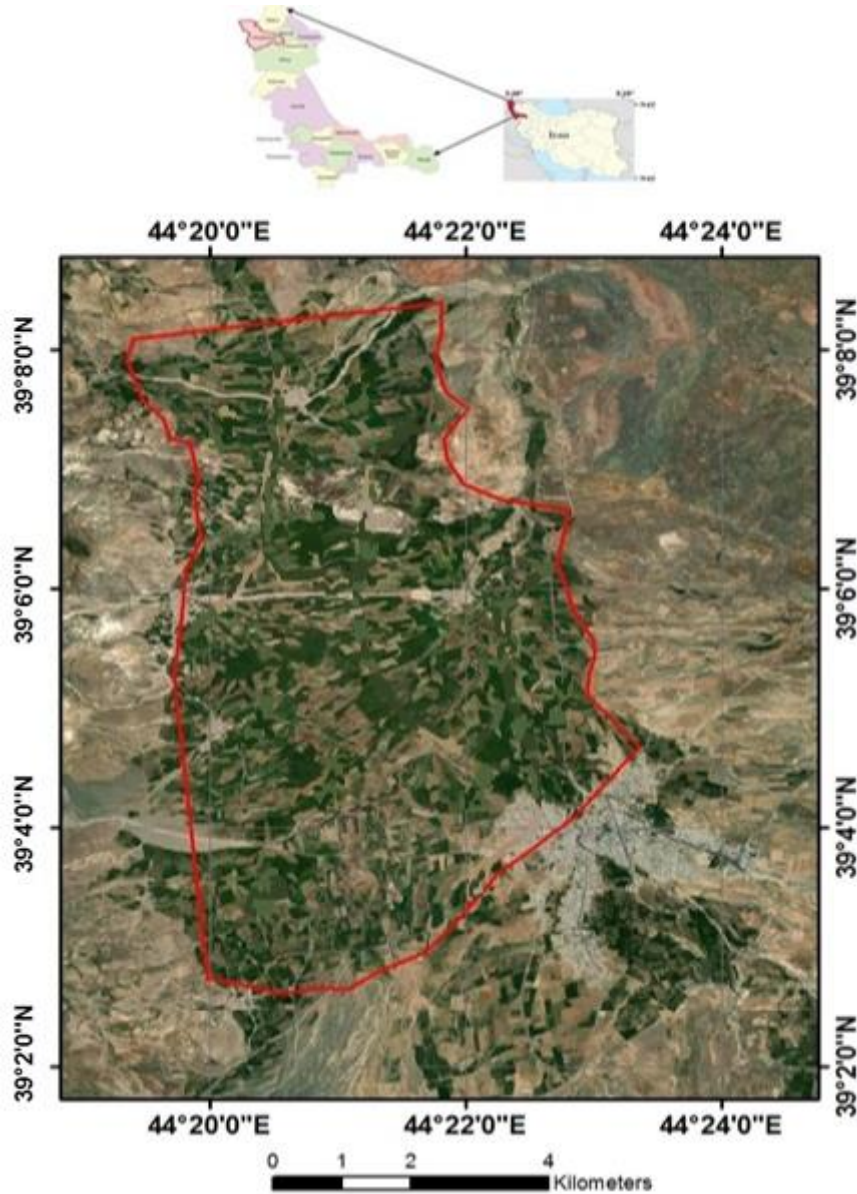
Owliaie & Najafi Ghiri (2014) در مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های دشت مادوان مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس را در دامنه ۰/۵ تا ۵ درصد گزارش نمودند. آن‌ها مقادیر بالاتر این شاخص را در افق‌های تجمع رس و نزدیک‌تر به سطح و در خاک‌های با زهکشی خوب گزارش نمودند. Quijano *et al.* (2011) با بررسی اراضی کشت شده در شمال شرق اسپانیا اعلام کردند که پذیرفتاری مغناطیسی تحت تاثیر ارتفاع و شیب قرار گرفته به طوری که بیشترین میزان پذیرفتاری در بالادست شیب و کمترین میزان در پایین دست شیب مشاهده شده است. Owliaie *et al.* (2006) نیز در مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد حداکثر مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی را در موقعیت‌های پایدار ژئومورفولوژیک مشاهده نمودند. از دیگر فاکتورهای موثر در خصوصیات مغناطیسی درجه هوادیدگی خاک می‌باشد. خصوصیات مغناطیسی خاک با افزایش هوادیدگی، افزایش می‌یابد (Su *et al.*, 2015). در طی فرایند هوادیدگی، عناصر متحرک (از جمله سدیم و پتاسیم) نسبت به عناصر غیر متحرک (مانند آلومینیوم و آهن) بیشتر از خاک خارج می‌شوند. در نتیجه، در اثر پیشرفت هوادیدگی، غلظت عناصر غیر متحرک در خاک افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های کمی مطالعه هوادیدگی خاک، اندازه‌گیری شاخص‌های هوادیدگی می‌باشد. شاخص‌های هوادیدگی مختلفی وجود دارند که از آن جمله می‌توان به CIA، CIW و CPA اشاره نمود (Shu *et al.*, 2018). به طور معمول، با افزایش شدت هوادیدگی، مقدار این شاخص‌ها افزایش می‌یابد (Mahu *et al.*, 2018).

همان‌گونه که ذکر شد، پذیرفتاری مغناطیسی از ویژگی‌هایی است که در زمان کوتاهی قابل اندازه‌گیری است. از سوی دیگر رسوبات بادرفتی و در برخی مواقع، رسوبات آبرفتی حاصل از رودخانه‌های فصلی و موقتی سبب تغییر در ویژگی‌های مختلف خاک (از جمله خصوصیات مغناطیسی) و یا ایجاد شکل‌های اراضی مختلف و به تبع آن، تغییر سیمای اراضی می‌گردند. از این رو، مطالعه آن‌ها منجر به درک ما از شرایط ژئومورفولوژیکی، و خصوصیات مغناطیسی خاک می‌گردد. بدین منظور در مطالعه حاضر، اشکال مختلف آهن، پارامترهای مغناطیسی و شاخص‌های هوادیدگی در واحدهای ژئومورفیک مختلف منطقه چالدران، مورد مطالعه قرار گرفته است. اهداف این پژوهش شامل (۱) بررسی تغییرات اشکال مختلف آهن و پذیرفتاری مغناطیسی خاک؛ (۲) تأثیر زهکشی، کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی (کشاورزی) بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی خاک و (۳) بررسی شاخص‌های هوادیدگی CIA، CIW و CPA در واحدهای ژئومورفیک

مختلف می‌باشد.

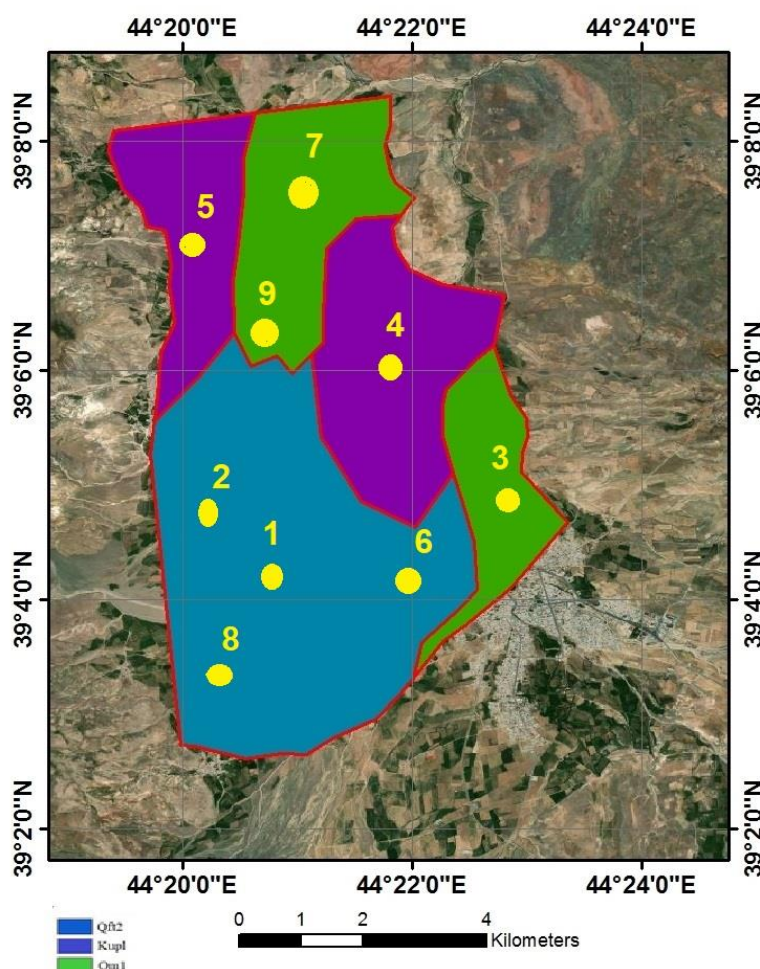
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: منطقه مورد مطالعه بخشی از چالدران (۱۹° ۴۴' تا ۲۴' ۴۴° شرقی و ۰۲' ۳۹° تا ۰۸' ۳۹° شمالی) در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان غربی با مساحت تقریبی ۳۲۰۰ هکتار می‌باشد (شکل ۱). میانگین درجه حرارت و بارش سالانه منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۹/۳ درجه سلسیوس و ۴۱۱/۹ میلی‌متر در سال است. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی منطقه با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار JNSM^۱ به ترتیب زیریک و مزیک می‌باشند (ملکیان و همکاران، ۱۴۰۱). علاوه بر نزولات جوی، آب سد بارون واقع در ۲۰ کیلومتری مرکز شهرستان به‌عنوان منبع آب، مورد استفاده کشاورزان منطقه قرار می‌گیرد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

کاربری عمده منطقه نیز کشت آبی گندم، جو، یونجه و سیب‌زمینی می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه غالباً از رسوبات کواترنری تشکیل شده است. در برخی قسمت‌ها نیز به صورت رگه‌ای سنگ آهک، گابرو، دیوریت و بازالت نیز قابل مشاهده است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

Qft2: Low level piedment fan and vally terrace deposits
 Kupl: Tectonized association of peridotites, gabbro, diorite, trondhjemite, diabase and basic volcanic
 Om1: Globotrunca limestone



The location of control soil pedons in the existing units in the study area

مطالعات میدانی: از تفسیر چشمی تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، نقشه توپوگرافی (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰) و بازدیدهای میدانی به منظور تفکیک واحدهای ژئومورفولوژیک اولیه برای تعیین مناطق نمونه‌برداری استفاده شد. برای تهیه نقشه ژئومورفولوژی منطقه از عکس هوایی و نقشه‌های توپوگرافی استفاده شد. برای تهیه نقشه‌ها از دو روش مشاهدات مستقیم از قبیل بازدید میدانی و صحرایی (۷۰٪) و مشاهدات غیرمستقیم از قبیل بررسی داده‌های نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و کاربری ارضی، عکس‌های ماهواره ای، هوایی و سایر اسناد و مدارک (۳۰٪) استفاده شده است (Bridge & Demicco, 2008). در این منطقه پنج واحد ژئومورفیک از جمله دشت دامنه‌ای^۱ (خاک‌رخ‌های ۷ و ۵)، پدیمت پوشیده^۲ (خاک‌رخ ۶)، مخروطه افکنه^۳ (خاک‌رخ ۲)، دشت^۴ (خاک‌رخ‌های ۹، ۴، ۳، ۱)، دشت سیلابی^۵ (خاک‌رخ ۸) شناسایی شد (Boettinger *et al.*, 2010). ۶۰ خاک‌رخ در منطقه مطالعاتی به روش تصادفی در واحدهای ژئومورفیک مختلف حفر گردید. از میان خاک‌رخ‌های حفر شده، در مجموع ۹ خاک‌رخ به عنوان خاک‌رخ شاهد انتخاب شدند (شکل ۲). خاک‌رخ‌های شاخص با توجه به مطالعات صحرایی و نتایج آزمایشگاهی انتخاب شدند (Soil Survey Staff, 2012). به طور کلی خاک‌رخ‌ها طوری انتخاب شدند که کل منطقه مورد مطالعه را پوشش دهند. کلیه خاک‌رخ‌های حفر شده براساس راهنمای تشریح خاک (Soil Survey Staff, 1993) تشریح و براساس طبقه‌بندی جامع خاک آمریکا (Soil Taxonomy, 1999) و کلید رده‌بندی خاک (Keys to Soil

- 1 Piedmont plain
- 2 Pediment
- 3 Alluvial fan
- 4 Plain
- 5 Food plain

(Taxonomy, 2014) تا سطح زیرگروه انجام شدند.

آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

نمونه‌برداری در هر خاک‌رخ از کلیه افق‌ها انجام شد. نمونه‌های خاک هوا خشک گردید و بعد از کوبیده شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. کربن آلی خاک (SOC) با استفاده از روش اکسیداسیون مرطوب (Walkley and Black, 1934)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، کلسیم کربنات معادل به روش خنثی‌سازی (Nelson, 1982) اندازه‌گیری شد. قابلیت هدایت الکتریکی و اسیدیته عصاره‌های اشباع به ترتیب با EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند. مقدار گچ به روش استون (Nelson *et al.*, 1982)، آهن آزاد (Fe_d) با استفاده از سیترات بی‌کربنات دی‌تیونات (Mehra & Jackson, 1958)، آهن غیر کریستالی (Fe_o) با استفاده از آمونیوم اسید اگزالات (Schwertmann, 1973) و آهن کل با استفاده از اسید نیتریک - پرکلریک (۱:۳) استخراج شد (Hseu, 2002).

غلظت آهن استخراج شده با جذب اتمی Perkin Elmer Analyst 800 تعیین شد. همچنین پذیرفتاری مغناطیسی خاک (χ) در فرکانس‌های کم ۰/۴۶ کیلوهرتز و فرکانس بالا ۴/۶ کیلوهرتز با استفاده از یک سیستم پذیرفتاری مغناطیسی MS2B Bartington instrument اندازه‌گیری شد. درصد پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) تعریف شده توسط (Maher, 1988) با استفاده از معادله محاسبه شد.

$$\chi_{fd} = [(\chi_{lf} - \chi_{hf})\chi_{lf}] \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

χ_{fd} پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، χ_{lf} پذیرفتاری مغناطیسی با فرکانس پایین و χ_{hf} پذیرفتاری مغناطیسی با فرکانس بالا است.

علاوه بر این موارد، درصد اکسید عناصر K_2O و Na_2O ، Al_2O_3 ، CaO به وسیله دستگاه X-ray fluorescence spectrometer اندازه‌گیری شد و شاخص‌های هوادیدگی CIW (Harnois, 1988)، CIA (Nesbitt & Young, 1982) و CPA (Bugge *et al.*, 2011) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۲) تا (۴) محاسبه گردید:

$$CIW = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$CIA = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$CPA = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

منظور از CaO^* در این معادلات، مقدار CaO موجود در کانی‌های سیلیکاته می‌باشد. از این‌رو، مقدار کلسیم موجود در کربنات‌ها (کلسیت، دولومیت) و فسفات‌ها (آپاتیت) با کاربرد معادله ۵ (Honda & Shimizu, 1998) تصحیح شد:

$$CaO^* = 0.35 \times (2 \times Na_2O \%) / 62(5)$$

مقدار همه اکسید عناصر مذکور در این شاخص‌ها بر حسب جزء مولی می‌باشد.

از درصد اکسید عناصر برای ترسیم منحنی A-CN-K نیز استفاده شد. این منحنی ابزاری مفید برای بررسی روند هوادیدگی سنگ‌ها و محصولات هوادیدگی آن‌ها است. در این منحنی، Al_2O_3 (همان A) در رأس پلات قرار دارد؛ $CaO^* + Na_2O$ (همان CN) در گوشه پایین سمت چپ و K_2O (همان K) در گوشه پایین سمت راست قرار دارد (Nesbitt & Young, 1984).

همچنین منحنی Mafic - Felsic - Weathered (MFW) (Ohta & Arai, 2007) ترسیم شد. جهت ترسیم این منحنی ابتدا مجموع هشت اکسید اصلی سیلیسیم، تیتانیوم، آلومینیوم، آهن، منیزیم، کلسیم، سدیم و پتاسیم بر اساس ۱۰۰ درصد محاسبه می‌شوند. مقادیر M، F و W با استفاده معادلات ۱ تا ۳ محاسبه شدند. مقادیر exp هر کدام از فاکتورهای M، F و W محاسبه شده و expهای محاسبه شده بر اساس عدد ۱۰۰ دوباره محاسبه گردیدند. در نهایت منحنی MFW بر اساس داده‌های نهایی ترسیم شد.

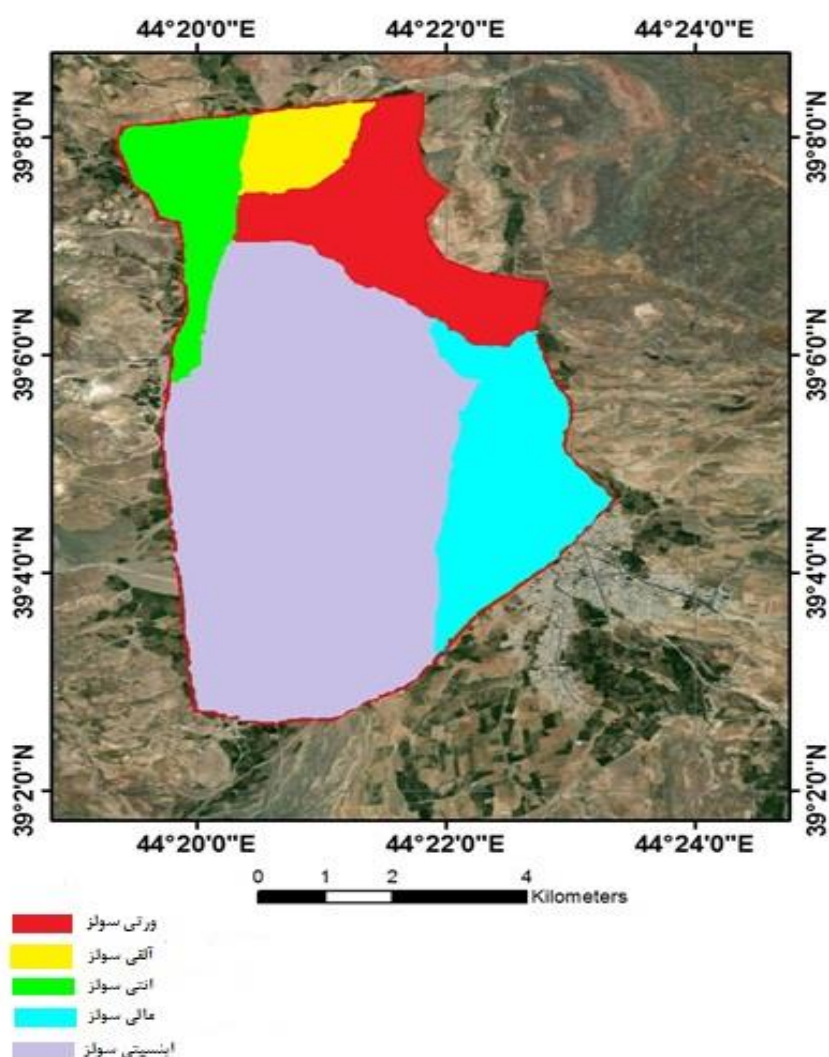
$$M = 0.395 \ln(SiO_2) + 0.206 \ln(TiO_2) + 0.316 \ln(Al_2O_3) + 0.160 \ln(Fe_2O_3) + 0.246 \ln(MgO) + 0.368 \ln(CaO) + 0.073 \ln(Na_2O) - 0.342 \ln(K_2O) + 2.266 \quad (1)$$

$$F = 0.191 \ln(SiO_2) + 0.397 \ln(TiO_2) + 0.020 \ln(Al_2O_3) + 0.375 \ln(Fe_2O_3) + 0.243 \ln(MgO) + 0.079 \ln(CaO) + 0.392 \ln(Na_2O) + 0.333 \ln(K_2O) - 0.892 \quad (2)$$

$$W = 0.203 \ln(SiO_2) + 0.191 \ln(TiO_2) + 0.296 \ln(Al_2O_3) + 0.215 \ln(Fe_2O_3) - 0.002 \ln(MgO) - 0.448 \ln(CaO) - 0.464 \ln(Na_2O) + 0.008 \ln(K_2O) - 1.374 \quad (3)$$

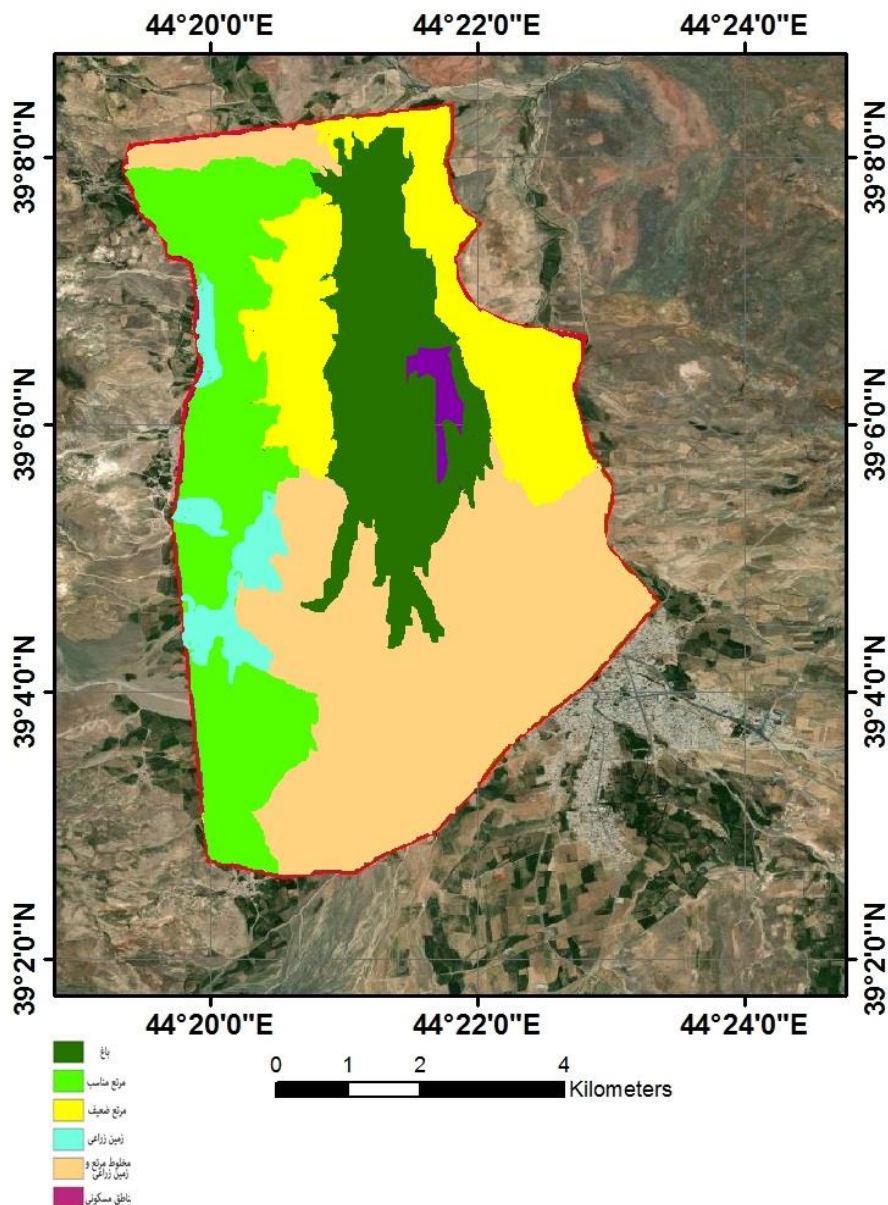
نتایج و بحث

جدول ۱ خصوصیات عمومی خاک‌های شاهد مطالعه شده را نشان می‌دهد. بر مبنای طبقه‌بندی تاکسونومی ۲۰۱۴ خاک‌های مورد مطالعه در رده‌های انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز، آلفی‌سولز، مالی‌سولز و ورتی‌سولز قرار گرفتند. به‌غیر از خاک‌های ۷ و ۹ که در کاربری باغ قرار داشتند، مابقی خاک‌ها شاهد غالباً در کاربری مرتع و برخی در اراضی زراعی واقع شده‌اند (شکل ۴). بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، هیو در محدوده ۱۰-۲/۵ YR قرار دارد. وجود گچ و کربنات‌ها در برخی افق‌ها سبب بالارفتن ولیوی خشک در آن‌ها شده و رنگ خاک روشن‌تر شده است. همچنین مقدار کربنات‌ها بیشتر از اکسیدهای آهن هستند. گرچه ساختمان خاک در نیمرخ‌های حفر شده متفاوت بود، اما ساختمان مکعبی بدون زوایه و تک دانه‌ای، غالب‌ترین ساختمان به ترتیب در افق‌های تحت الارض و سطح الارض خاک‌های مورد مطالعه بودند. اگرچه خاکدانه‌های منفرد یک فرم ساختار خاک نیستند، اما عدم وجود آن به شدت به بافت خاک، کانی‌شناسی رسی و محتوای مواد آلی مرتبط است. وضعیت زهکشی خاک‌ها در دامنه نسبتاً خوب تا ضعیف بود (جدول ۲).



شکل ۳. نقشه خاک‌شناسی منطقه مورد مطالعه (تا سطح زیر گروه)

جدول ۳ خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های شاهد را نشان می‌دهد. مقدار رس، سیلت و شن به ترتیب در دامنه‌های ۵۵/۳۰-۸/۴۰، ۶۹/۸۰-۹/۳۰، ۸۲/۳۰-۸/۳۰ درصد متغیر بوده است. دامنه تغییرات کربن آلی بین ۱/۸۶-۰/۰۸ درصد بود. در اکثر افق‌های سطحی مقدار کربن آلی بالایی مشاهده شد که بیشترین مقدار در افق سطحی کاربری مرتع مشاهده شد. بارندگی مناسب و رژیم طوبتی زیریک در منطقه شرایط رطوبتی مناسب را برای افزایش مقدار ماده آلی در افق‌های سطحی ایجاد نموده است.



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

میزان pH بین ۶/۸۹-۸/۵۸، کربنات کلسیم معادل در دامنه ۲۸/۴۹-۲/۹۶ درصد، مقدار گچ در دامنه ۲/۱۰-۸۲ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی در دامنه ۴۸/۱۰-۷/۳۰ میلی‌اکی‌والان بر صد گرم و هدایت الکتریکی عصاره اشباع بین مقادیر ۱۰/۷۰-۰/۱۶ دسی‌زیمنس بر متر بود. در اکثر خاک‌رخ‌ها به ویژه در سطوح پایدارتر افق‌های سطحی به میزان نسبتاً زیادی از کربنات کلسیم تخلیه شده‌اند. آبشویی کربنات‌ها از افق‌های سطحی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی از جمله تبدیل کربنات به بی‌کربنات کلسیم با حلالیت بالاتر در نتیجه واکنش با اسید کربنیک و یا در اثر اسیدهای آلی آزاد شده از تجزیه مواد آلی در سطح خاک باشد. در خاک‌رخ‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ انتقال رس از افق‌های سطحی و تجمع در افق زیرین، ناشی از بارش نسبتاً خوب منطقه و فصول متمایز خشک و مرطوب است که منجر به تشکیل افق آرجیلیک همراه با تشکیل پوسته‌های رسی بر روی سطوح خاکدانه و واحدهای ساختمانی شده و رده آلفی‌سولز را ایجاد نموده است. در خاک‌رخ‌های ۳ و ۴ به علت قرار گرفتن در پنجه و پای شیب و زهکشی نسبتاً ضعیف، شرایط برای تجمع ماده آلی در سطح فراهم و اپی پدون مالیک (رده مالی سولز) تشکیل شده است. در مجموع شرایط پستی و بلندی، وضعیت زهکشی و کاربری اراضی عوامل اصلی تاثیرگذار بر تکامل خاک‌های منطقه می‌باشند.

جدول ۱. ویژگی‌های عمومی خاکرخ‌های مورد مطالعه

واحد ژئومورفیک	شماره خاکرخ	نام خاک	سیلاب	زهکشی	شیب	مواد مادری
دشت دامنه‌ای	۷	Natrixerals	F0	ضعیف	A	Globotrunca limestone
	۵	Haploxerals	F0	نسبتاً خوب	A	Low level piedment fan and vally terrace deposits
پدیمت پوشیده	۶	Haploxerals	F0	نسبتاً خوب	B	Tectonized association of peridotites, gabbro, diorite, trondhjemite, diabase and basic volcanics
مخروط افکنه	۲	Calcixereps	F1	نسبتاً خوب	A	Tectonized association of peridotites, gabbro, diorite, trondhjemite, diabase and basic volcanics
دشت	۱	Xerorthents	F2	نسبتاً ضعیف	A	Low level piedment fan and vally terrace deposits
	۴	Haploxerolls	F0	نسبتاً ضعیف	C	Globotrunca limestone
	۳	Calcixerolls	F1	نسبتاً ضعیف	C	Low level piedment fan and vally terrace deposits
	۹	Haploxererts	F0	نسبتاً ضعیف	A	: Low level piedment fan and vally terrace deposits
دشت سیلابی	۸	Natrixerals	F0	ضعیف	A	Low level piedment fan and vally terrace deposits

F0 بدون سیلاب، دارای سیلاب کم، F2 دارای سیلاب متوسط

A: صاف تا شیب خیلی ملایم: ۰ تا ۲ درصد، B: دارای شیب ملایم: ۲ تا ۵ درصد، C: شیب دار: ۵ تا ۸ درصد

جدول ۲. ویژگی‌های مورفولوژیکی افق‌های مختلف خاکرخ‌های مورد مطالعه

افق	عمق (سانتی متر)	رنگ		پوسته رسی و یا تراکم	ساختمان
		مرطوب	خشک		
خاکرخ ۱ (دشت)					
Ap	۳۰-۰	۱۰ YR ۴/۳	۱۰ YR ۵/۴	-	۲ mgr
C1	۶۴-۳۰	۷/۵ YR ۴/۲	۷/۵ YR ۵/۳	-	Sg
C2	۸۳-۶۴	۷/۵ YR ۲/۳	۷/۵ YR ۴/۳	-	Sg
Cg1	۱۰۵-۸۳	-	۷/۵ YR ۳/۲	-	Sg
Cg2	۱۴۵-۱۰۵	-	۷/۵ YR ۳/۳	-	Sg
خاکرخ ۲ (مخروط افکنه)					
Ap	۱۹-۰	۱۰ YR ۴/۳	۱۰ YR ۵/۴	-	۳ mgr
Bk1	۴۵-۱۹	۷/۵ YR ۴/۴	۷/۵ YR ۵/۴	K۲ m۱	mabk۲
Bk2	۶۷-۴۵	۷/۵ YR ۴/۳	۷/۵ YR ۵/۳	K۲ m۲	mabk۳
Bw	۹۰-۶۷	۷/۵ YR ۴/۲	۷/۵ YR ۴/۳	-	۳ fabk
Bg	۱۴۸-۹۰	۷/۵ YR ۳/۳	-	-	۲ fabk
خاکرخ ۳ (دشت)					
A	۲۷-۰	۷/۵ YR ۳/۲	۷/۵ YR ۴/۳	-	۳ fgr
Bw	۵۹-۲۷	۷/۵ YR ۵/۲	۷/۵ YR ۵/۳	-	۲ mcbk
Bkg1	۸۲-۵۹	۷/۵ YR ۴/۳	-	C۳ m۳	۲ Fcbk
Bkg2	۱۱۹-۸۲	۷/۵ YR ۴/۲	-	C۳ F۲	۱ fabk
Bg	۱۵۳-۱۱۹	۷/۵ YR ۳/۲	-	-	۱ Cabk



خاکرخ ۴ (دشت)					
-	۲ fgr	۱۰ YR ۳/۲	۱۰ YR ۳/۲	۲۸-۰	A
-	۲ mabk	۱۰ YR ۴/۲	۱۰ YR ۴/۳	۵۲-۲۸	Bw
-	fabk, m\	۱۰ YR ۳/۲	۱۰ YR ۴/۳	۸۰-۵۲	BC
-	m	۱۰ YR ۴/۳	۱۰ YR ۵/۴	۱۴۶-۸۰	C
خاکرخ ۵ (دشت دامنه‌ای)					
-	۳cgr	۱۰ YR ۴/۳	۱۰ YR ۵/۳	۲۸-۰	A
-	\ mabk\ fgr,	۱۰ YR ۳/۳	۱۰ YR ۴/۳	۷۵-۲۸	AB
TmCDP	۲cabk	۱۰ YR ۴/۲	۱۰ YR ۴/۳	۱۰۵-۷۵	Bt
K۲ m۴	۲cabk	۱۰ YR ۵/۴	۱۰ YR ۴/۴	۱۴۷-۱۰۵	BK
خاکرخ ۶ (پدیمت پوشیده)					
-	\ mgr	۷/۵ YR ۴/۴	۷/۵ YR ۵/۴	۱۸-۰	Ap
-	۲cabk	۷/۵ YR ۳/۳	۷/۵ YR ۴/۴	۶۵-۱۸	Btk
K۲C ۳	۲cabk	۷/۵ YR ۴/۳	۷/۵ YR ۵/۴	۱۴۷-۶۵	Bk
خاکرخ ۷ (دشت دامنه‌ای)					
-	۲mgr	۱۰ YR ۴/۴	۱۰ YR ۵/۴	۲۰-۰	Ap
-	۲mabk	۱۰ YR ۳/۲	۱۰ YR ۴/۳	۴۵-۲۰	Bw1
-	۳mabk	۱۰ YR ۳/۳	۱۰ YR ۴/۳	۷۳-۴۵	Bw2
TcDFP	۳CPr	۱۰ YR ۳/۲	۱۰ YR ۳/۳	۱۰۲-۷۳	Btn
-	Sg	۱۰ YR ۶/۳	۱۰ YR ۷/۴	۱۴۵-۱۰۲	C
خاکرخ ۸ (دشت سیلابی)					
-	۲fgr	۱۰ YR ۴/۳	۱۰ YR ۵/۴	۲۵-۰	Ap
-	۲fcbk	۱۰ YR ۳/۲	۱۰ YR ۴/۳	۵۳-۲۵	Bw
TcDFP	۲fPr	۱۰ YR ۳/۳	۱۰ YR ۴/۳	۸۲-۵۳	Btn
-	Sg	۱۰ YR ۵/۳	۱۰ YR ۶/۴	۱۴۸-۸۲	C
خاکرخ ۹ (دشت)					
	۲cgr	۲/۵ YR ۳/۴	۲/۵ YR ۴/۶	۲۵-۰	Ap
SS	۳mwdg	۲/۵ YR ۴/۳	۲/۵ YR ۵/۶	۷۵-۲۵	Bss1
SS	۲mwdg	۲/۵ YR ۴/۳	۲/۵ YR ۵/۶	۱۰۴-۷۵	Bss2
	m	۲/۵ YR ۵/۳	۲/۵ YR ۶/۴	۱۴۴-۱۰۴	C

* نمادها بر اساس Schoeneberger *et al.* (2012) و همکاران استفاده می‌شوند. به شرح زیر:

درجه ساختار ۱: ضعیف؛ ۲: متوسط؛ ۳: قوی

اندازه ساختار f: خوب؛ m: متوسط؛ C: درشت

نوع ساختار sg: تک دانه؛ m: متراکم؛ abk: زاویه ای؛ gr: دانه ای؛ c: ستونی، pr: منشوری، weg: گوه

جدول ۳. رده‌بندی و برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی افق‌های مختلف برخی از خاک‌های مورد مطالعه

افق	عمق (سانتیمتر)	pH	ECa (dS m ⁻¹)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	کلاس بافتی ^b (%)	CCE ^c (%)	گچ (%)	CEC ^d (cmol/kg)	OC ^e (%)	SAR ^f (%) ^{0.5}
خاک‌رخ ۱ (دشت): Sandy, mixed, nonacid, mesic Typic Xerorthents												
Ap	۰-۲۰	۷/۱۲	۰/۸۷	۴۰/۵	۳۱/۶	۲۷/۹	CL	۱۰/۱	۰/۰	۱۸/۴	۱/۰۲	۲/۸
C1	۲۰-۶۴	۷/۰۵	۰/۵۶	۶۸/۸	۱۸/۴	۱۲/۴	SL	۳/۴۳	۰/۰	۱۱/۲	۰/۳۴	۳/۹
C2	۶۴-۸۳	۷/۲۴	۰/۱۶	۷۳/۱	۱۶/۴	۱۰/۵	SL	۴/۲۴	۰/۰	۹/۸	۰/۲۱	۶/۱
Cg1	۱۰۵-۸۳	۷/۱۲	۰/۵۸	۸۰/۶	۱۰/۵	۸/۹	LS	۲/۹۶	۰/۰	۷/۳	۰/۱۳	۸/۴
Cg2	۱۴۵-۱۰۵	۷/۱۷	۰/۸۲	۸۲/۳	۹/۳	۸/۴	LS	۳/۱۷	۰/۰	۷/۵	۰/۰۸	۷/۲
خاک‌رخ ۲ (مخروط افکنده): Fine loamy, mixed, superactive, mesic Typic Calcixerpts												
Ap	۰-۱۹	۷/۴۸	۰/۸۴	۴۷/۷	۳۶/۱	۱۶/۲	L	۱۱/۳۶	۰/۰	۲۰/۶	۱/۸۶	۶/۲
Bk1	۱۹-۴۵	۷/۷۲	۰/۷۲	۴۷/۱	۳۷/۲	۱۵/۷	L	۱۹/۷۳	۰/۰	۱۳/۱	۰/۹۳	۷/۹
Bk2	۴۵-۶۷	۷/۹۳	۰/۵۳	۳۴/۶	۴۸/۱	۱۷/۳	L	۲۱/۴۷	۰/۰	۱۲/۶	۰/۶۳	۱۰/۳
Bw	۶۷-۹۰	۷/۳۴	۰/۲۷	۳۹/۷	۳۷/۲	۲۳/۱	L	۹/۵۱	۰/۰	۱۰/۶	۰/۶۲	۱۰/۳
Bg	۱۴۸-۹۰	۷/۲۶	۰/۴۶	۳۹/۷	۳۶/۱	۱۴/۲	L	۹/۸۷	۲/۱	۱۳/۲	۰/۴۵	۹/۴
خاک‌رخ ۳ (دشت): Fine-silty, mixed, superactive, calcareous, mesic, Typic Calcixerolls												
A	۰-۲۷	۷/۳۹	۱/۲۳	۱۱/۱	۶۱/۴	۲۷/۵	SiCL	۵/۸۳	۰/۰	۲۳/۲	۱/۵۲	۶/۷
Bw	۲۷-۵۹	۷/۴۸	۱/۶۷	۸/۳	۶۹/۸	۲۱/۹	SiL	۱۲/۶۳	۰/۰	۳۴/۷	۰/۹۳	۷/۴
Bkg1	۵۹-۸۲	۷/۳۷	۳/۲۶	۱۴/۱	۵۸/۹	۲۷	SiCL	۲۴/۸۴	۰/۰	۲۰/۵	۰/۶۲	۹/۳
Bkg2	۸۲-۱۱۹	۷/۶۱	۴/۰۸	۱۳/۶	۶۶/۹	۱۹/۵	SiL	۲۸/۴۹	۰/۰	۱۶/۲	۰/۴۷	۹/۷
Bg	۱۵۳-۱۱۹	۷/۶۴	۲/۱۴	۱۲/۱	۶۴/۲	۲۳/۷	SiL	۷/۷۷	۰/۰	۲۲/۶	۰/۲۸	۶/۱
خاک‌رخ ۴ (دشت): Fine, mixed, superactive, mesic, Typic Haploxerolls												
A	۰-۲۸	۷/۱۴	۰/۶۹	۳۳/۲	۱۷/۹	۴۸/۹	C	۳/۸۷	۰/۰	۴۸/۱	۱/۱۶	۳/۶
Bw	۲۸-۵۲	۷/۵۷	۰/۷۴	۳۰	۱۶/۸	۵۳/۲	C	۱۰/۹۳	۰/۰	۴۶/۴	۰/۹۱	۴/۳
BC	۵۲-۸۰	۷/۶۱	۰/۸۸	۲۹/۲	۲۰	۵۰/۸	C	۱۴/۲۱	۰/۰	۳۷/۷	۰/۶۳	۵/۸
C	۸۰-۱۴۶	۷/۸۴	۱/۱۲	۱۹/۶	۲۵/۱	۵۵/۳	C	۲۸/۳۶	۰/۰	۲۴/۱	۰/۲۳	۷/۳
خاک‌رخ ۵ (دشت دامنه‌ای): Fine, mixed, superactive, mesic Typic Haploxeralfs												
A	۰-۲۸	۶/۸۹	۲/۱	۱۴/۴	۴۳/۵	۴۰/۱	SiC	۴/۷۶	۰/۰	۲۷/۴	۱/۳۷	۳/۴
AB	۲۸-۷۵	۷/۲۶	۲/۱۸	۱۱/۴	۴۶/۲	۴۲/۴	SiC	۶/۵۹	۰/۰	۳/۲۴	۱/۰۲	۵/۷
Bt	۷۵-۱۰۵	۷/۳۴	۲/۶۴	۸/۴	۴۹/۱	۴۲/۵	SiC	۱۱/۵۳	۰/۰	۲۹/۴	۰/۷۴	۷/۲
BK	۱۴۷-۱۰۵	۷/۷۶	۳/۲۱	۱۸/۱	۵۶/۶	۲۵/۳	SiC	۱۹/۳۶	۱/۳	۱۶/۳	۰/۴۲	۵/۹
خاک‌رخ ۶ (پدیمت پوشیده): Fine loamy, mixed, superactive, mesic Calcic Haploxeralfs												
Ap	۰-۱۸	۷/۸۲	۲/۷۶	۳۳/۱	۴۱/۴	۲۵/۵	L	۱۲/۶۳	۰/۰	۱۹/۲	۰/۸۴	۷/۴
Btk	۱۸-۶۵	۷/۹۷	۳/۲۸	۲۷/۲	۳۳/۲	۳۹/۶	CL	۲۰/۱۳	۰/۰	۲۸/۴	۰/۴۷	۸/۸
Bk	۶۵-۱۴۷	۸/۱۳	۱/۲۷	۲۱/۵	۳۳/۴	۴۵/۱	C	۲۶/۷۱	۱/۳۴	۱۲/۵	۰/۱۳	۱۱/۶
خاک‌رخ ۷ (دشت دامنه‌ای): Fine loamy, mixed, superactive, mesic Typic Natrixeralfs												
Ap	۰-۲۰	۸/۰۵	۳/۸	۴۵/۵	۳۲/۸	۲۱/۷	L	۵/۷۸	۰/۰	۲۱/۴	۰/۹۶	۱۰/۵
Bw1	۲۰-۴۵	۸/۱۴	۵/۷	۲۵/۳	۳۸/۳	۲۶/۴	L	۷/۳۴	۰/۰	۱۷/۵	۰/۸۳	۱۲/۳
Bw2	۴۵-۷۳	۸/۳۴	۷/۳	۴۳/۲	۲۹/۴	۲۷/۲	CL	۹/۶۲	۰/۰	۱۵/۲	۰/۷۴	۱۱/۹
Btn	۷۳-۱۰۲	۸/۵۸	۱۰/۷	۲۷/۸	۳۷/۴	۳۴/۷	CL	۱۰/۴۸	۰/۰	۲۳/۱	۰/۵۲	۱۷/۲
C	۱۰۲-۱۴۵	۸/۲۱	۶/۳	۶۲/۹	۱۸/۷	۱۸/۴	SL	۸/۴۷	۱/۵	۹/۸	۰/۱۱	۱۰/۳
خاک‌رخ ۸ (دشت سیلابی): Fine loamy, mixed, active, mesic Typic Natrixeralfs												
Ap	۰-۲۵	۸/۰۹	۲	۵۲/۹	۲۸/۷	۱۸/۴	SL	۶/۲۶	۰/۰	۲۳/۶	۰/۸۶	۸/۴
Bw	۲۵-۵۳	۸/۱۲	۳/۸	۴۵/۷	۲۷/۹	۲۶/۴	SCL	۹/۵۱	۰/۰	۱۶/۳	۰/۴۵	۱۰/۴
Btn	۵۳-۸۲	۸/۵۶	۹/۹	۲۵/۸	۳۸/۵	۳۵/۷	CL	۱۱/۳۷	۰/۰	۱۹/۷	۰/۵۲	۲۱/۶
C	۸۲-۱۴۸	۸/۲۲	۵/۴	۵۸/۸	۲۱/۸	۱۹/۴	SL	۵/۳۶	۱/۶۰	۹/۴	۰/۱۴	۱۰/۵
خاک‌رخ ۹ (دشت): Fine, mixed, superactive, mesic, Chromic Haploxererts												
Ap	۰-۲۵	۷/۲۸	۰/۹	۲۵/۸	۲۸/۹	۴۵/۳	C	۱۳/۲۵	۰/۰	۲۱/۵	۱/۱۴	۴/۵
Bss1	۲۵-۷۵	۸/۱۹	۱/۵	۹/۳	۳۷/۵	۵۳/۲	C	۱۱/۷۵	۰/۸۲	۳۶/۸	۰/۹۸	۱۳/۲
Bss2	۷۵-۱۰۴	۸/۴۳	۱/۵۴	۱۵/۲	۳۱/۲	۵۳/۶	C	۱۰/۳۴	۰/۸۲	۳۹/۴	۰/۷۸	۱۴/۷
C	۱۰۴-۱۴۴	۷/۳۷	۱/۹۳	۲۰/۴	۳۸/۱	۴۱/۵	C	۱۲/۸۵	۰/۹۲	۱۹/۳	۰/۲۲	۵/۲

^a هدایت الکتریکی

^b L = لوم، C = رس، CL = لوم رسی، SL = لوم شنی، SCL = لوم رسی شنی، LS = ماسه لومی، SiC = خاک رس سیلتی، SiCL = لوم سیلتی

^c کرنات کلسیم معادل

^d ظرفیت تبادل کاتیونی

^e کرن آلی

^f نسبت جذب سدیم

خصوصیات مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده در واحدهای مختلف ژئومرفیک

دامنه χ_{lf} خاک‌ها (جدول ۴) از $42/90 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ (افق Ap، خاکرخ ۱) تا $1053/20 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ (افق C1، خاکرخ ۱) بود. مقادیر بالای χ_{lf} خاک‌های منطقه تحت تاثیر زمین‌شناسی، رسوب‌گذاری و مواد انتروپدوژنیک قرار داشت (Lu et al., 2008; Ayoubi et al., 2019). Sarmast et al. (2019) - بیشترین مقدار χ_{lf} در خاکرخ ۱ (انتی‌سولز) مشاهده شد. پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های با زهکشی مناسب با افزایش محتوای شن خاک افزایش می‌یابد (De Jong et al. 2000) و کانی‌های فری‌مغناطیس به ارث رسیده از جمله مگنتیت اغلب در ذرات سیلت، شن و ذرات درشت‌تر وجود دارند. از آنجایی که خاکرخ شماره یک حاوی بیشترین مقدار از ترکیبات فوق و همچنین بافت سنی می‌باشد، بنابراین بیشترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در این خاکرخ مشاهده شد.

میانگین χ_{lf} در واحدهای ژئومرفیک منطقه به صورت دشت سیلابی < مخروط افکنه < پدیمت پوشیده < دشت < دشت دامنه‌ای است. کانی‌های فری مغناطیس به صورت ذرات ریز می‌توانند به وسیله باد و آب منتقل شوند (Liu et al., 2018). بنابراین تفاوت در مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های تشکیل شده در واحدهای ژئومرفیک مختلف را می‌توان به کانی‌های فری‌مغناطیسی منتقل شده به وسیله آب (بیشترین مقدار χ_{lf} در خاکرخ ۱ مشاهده کرد که مقدار سیلاب این خاکرخ در کلاس F2 قرار داشت) و همچنین مواد مادری و فعالیت‌های کشاورزی نسبت داد که هر کدام به سهم خود، بر روی پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها تأثیر گذاشته است. بنابراین مدیریت خاک یکی دیگر از عوامل تمایز بین پروفیل‌های خاک است. نتایج مطالعات ترابی گل سفیدی و کریمیان اقبال (۱۳۸۱) در بررسی تکامل خاک با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان نشان داد که فاکتورهایی نظیر مواد مادری، اقلیم و زمان بیشترین تأثیرگذاری را بر توزیع پذیرفتاری مغناطیسی دارند.

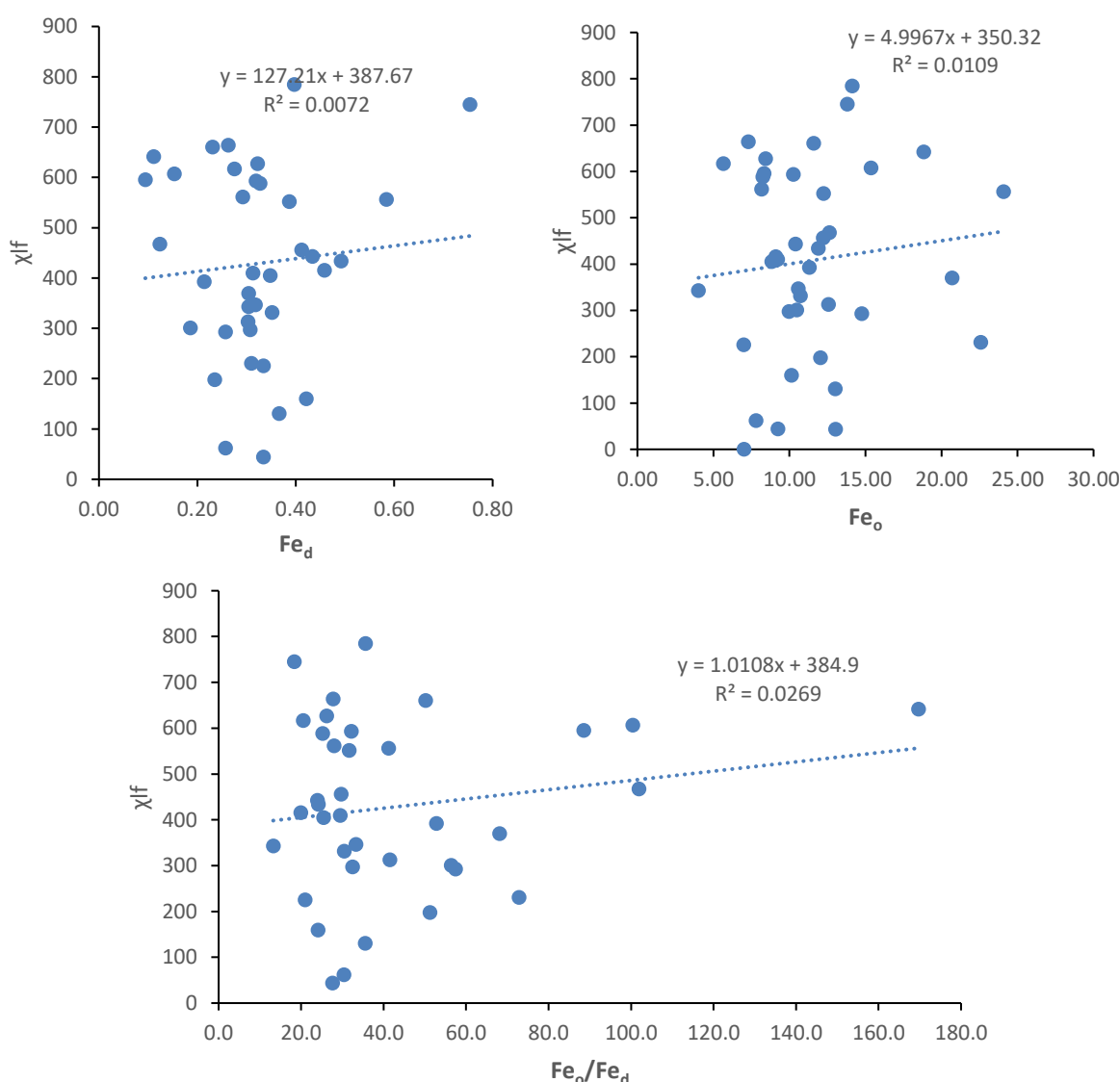
مقادیر χ_{fd} نمونه‌های خاک مورد بررسی بین $3/50 - 0/07$ درصد بود (جدول ۳). با توجه به اطلاعات جدول ۳ مشاهده می‌شود که در بیشتر افق‌های مورد مطالعه، مقدار χ_{fd} کمتر از ۲ درصد می‌باشد. بنابراین بر اساس طبقه‌بندی ارایه شده توسط Dearing (1999) خاک‌های مورد مطالعه از ذرات سوپرپارامغناطیس نیستند.

توزیع شکل‌های مختلف آهن در ژئومرف‌های منطقه

مقادیر اشکال مختلف آهن در واحدهای ژئومورفیکی مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. دامنه تغییرات آهن کل از $12/05 \text{ g kg}^{-1}$ (افق C2 خاکرخ ۱) تا $42/60 \text{ g kg}^{-1}$ (افق Bss2 خاکرخ ۹) می‌باشد. همچنین، میانگین آهن کل در خاکرخ‌های مورد مطالعه به ترتیب به صورت پدیمت پوشیده < مخروط افکنه < دشت سیلابی < دشت دامنه‌ای = دشت تغییر می‌کند. با بررسی روند تغییرات میزان آهن و میزان پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای ژئومورفیکی مختلف می‌توان بیان کرد که تفاوت در مواد مادری و موقعیت سیمای اراضی از عوامل اصلی این تغییرات می‌باشد. (Huang et al. 2018) گزارش کردند که تفاوت‌هایی که در بین ردیف خاک‌های شالیزاری توسعه یافته بر روی رسوبات دریایی آهکی و خاک اسیدی رس قرمز کواترنری در جنوب چین ایجاد شده است ناشی از تفاوت مواد مادری می‌باشد. همچنین بیان نمودند که درجه هوازدگی و موقعیت سیمای اراضی بر نرخ و فازهای اکسیدهای آهن موثر است.

برخی پژوهشگران از Fe_d برای نشان دادن سن نسبی خاک‌ها استفاده کرده‌اند (Blume & Schwertmann, 1969). دامنه تغییرات Fe_d از $4/01 \text{ g kg}^{-1}$ (افق Ap خاکرخ ۷) تا $24/08 \text{ g kg}^{-1}$ (افق Bk خاکرخ ۵) بود. همچنین میانگین مقدار Fe_d در واحدهای ژئومورفیک مطالعه شده به ترتیب به صورت پدیمت پوشیده < دشت < دشت دامنه‌ای < دشت سیلابی < مخروط افکنه بود. این روند را می‌توان بدین صورت توجیه نمود که شکل متبلور آهن از واحد مخروط افکنه به سمت واحد فیزیوگرافی دشت افزایش یافته است که می‌تواند تکامل بیشتر خاک‌های واحد دشت را نسبت به واحد مخروط افکنه نشان دهد، که بالا بودن میانگین درصد رس و عمق سولوم (جدول ۲) بیشتر در واحد فیزیوگرافی دشت‌ها نسبت به مخروط افکنه نیز مؤید این مطلب است. از طرفی خاک‌های موجود در واحدهای دشت (سیلابی)، دامنه ای و ... از شرایط پویاتری نسبت به واحد مخروط افکنه برخوردارند که این امر می‌تواند به دلیل شرایط پایدارتر ژئومورفولوژیک و سرعت بالای هوازدگی درجا (با توجه به مقدار رس) باشد. روند تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی با شکل‌های آهن در منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. به طور کلی در خاک‌ها نسبت Fed/Feo بیانگر عواملی چون شرایط اکسایش - کاهش، حضور لیگاند‌های آلی، درجه هوازدگی و شرایط تکاملی خاک می‌باشد (Lu et al., 2012). در پژوهش حاضر با افزایش میزان پذیرفتاری مغناطیسی، پارامترهای Fed/Feo و Fed/Fe_d افزایش یافته است که رابطه مثبت و معنی‌داری بین مقدار Fe_d و Fed/Feo با پذیرفتاری مغناطیسی توسط Hu et al. (2009) نیز گزارش شده است. این در حالی است که بسیاری از محققین رابطه مثبت و معنی‌داری میان آهن متبلور و پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها و رابطه منفی معنی‌داری بین اکسید آهن بی‌شکل مشاهده کرده‌اند (Sarmast et al., 2017). اوسط و حیدری (۱۴۰۱)

نیز در مطالعه خود رابطه مثبت میان میزان پذیرفتاری مغناطیسی با پارامتر Fe_o/Fed و رابطه منفی معنی‌داری بین میزان پذیرفتاری مغناطیسی، با پارامترهای آهن قابل عصاره‌گیری با سیترات دیتینونات، Fed/Fet و $(Fed-Fe_o)/Fet$ گزارش نمودند. مقدار Fe_o در خاک‌های مطالعه‌شده از 0.09 g kg^{-1} (افق C2 خاکرخ ۱) تا 0.75 g kg^{-1} (افق BC خاکرخ ۴) متغیر بود (جدول ۳). همچنین میانگین مقدار Fe_o در واحدهای ژئومورفیک به ترتیب در دشت سیلابی < دشت دامنه‌ای < مخروط افکنه < پدیمنت پوشیده < دشت متغیر بود. خاک‌های موجود در دشت‌های سیلابی بدلیل موقعیت ژئومورفیک خود دارای بافت سنگین‌تری می‌باشند که با شرایط موجود امکان افزایش آهن پدوژنیک فراهم نبوده و شکل آهن غالباً به شکل Fe_o می‌باشد. توزیع عمودی Fe_o در خاک، روند مشخصی با عمق نشان نداد.



شکل ۵. روند تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{lf}) با شکل‌های آهن در خاکرخ‌های مورد مطالعه

Blume & Schwertmann, (1969) پیشنهاد کردند مقدار اکسیدهای آهن بلوری را می‌توان از، تفاوت بین Fe_o و Fe_d محاسبه کرد. مقدار اکسیدهای آهن کریستالی در خاک‌ها از $3/72$ (افق Ap خاکرخ ۷) تا $23/50$ (افق Bk، خاکرخ ۵) بود. همچنین میانگین مقدار Fe_o مشابه با روند میانگین مقدار Fe_d بود. به طوری بیشترین مقدار Fed و $Fe_d - Fe_o$ در افق Bk، خاکرخ ۵ مشاهده شد. این خاکرخ شیب کم‌تر و زهکشی مناسب و کلاس F0 را نسبت به دیگر خاکرخ‌ها داشت. وفایی زاده و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند، در شرایط بارندگی بیشتر، زهکشی بهتر و ژئومورفولوژی پایدارتر ترکیبات پدوژنیک آهن بیشتری تولید می‌شود.

نسبت Fe_o/Fe_d نیز می‌تواند نشان‌دهنده مرحله هوادهی و تکامل خاک باشد (Layzell & Eppes, 2013). دامنه تغییرات نسبت Fe_o/Fe_d در واحدهای ژئومورفیک مورد مطالعه از ۰/۰۱ تا ۰/۰۸ بود. از آنجایی که مقدار Fe_o در منطقه مورد مطالعه کم بود، از این رو نمی‌توان از این شاخص برای بررسی تکامل خاک استفاده نمود (Xue et al., 2022; Azadi & Raiesi, 2021). به طور کلی عوامل زهکشی، شیب، مقدار سیلاب و کاربری اراضی مهم‌ترین نقش را در اشکال آهن منطقه داشته است.

توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{lf}) در واحدهای ژئومورفیک

تغییرات عمودی χ_{lf} به‌منظور درک اثر عوامل تشکیل‌دهنده خاک منطقه مورد بررسی قرار گرفت. خاک رخ ۱ در واحد دشت قرار دارد، که در آن افق‌های با شوری کم و کربنات کلسیم معادل از ۲/۹۶ درصد در افق Cg1 تا ۱۰/۱ درصد در افق Ap مشاهده شد (شکل ۶، جدول ۴). همچنین دامنه تغییرات مقدار χ_{lf} از $42/90 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ در افق Ap تا $1053/20 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ در افق C1 بود (جدول ۴). بیشترین میزان پذیرفتاری در افق C1 یافت شد که این امر را می‌توان به مواد مادری آن نسبت داد. البته شرایط زهکشی مناسب در افق‌های زیرین و کشت و کار صورت گرفته در افق‌های سطحی و مقدار کربنات کلسیم بالا در افق Ap منجر به کاهش پذیرفتاری مغناطیسی در افق‌های آن گردیده است و از این رو روند مشخصی از χ_{lf} در این خاک رخ مشاهده نشد. (Karimi & Khademi, 2012) گزارش کردند، مواد دیامغناطیس از جمله کربنات‌ها موجب کاهش χ_{lf} در خاک می‌گردد.

خاک رخ ۲ در واحد ژئومورفیک مخروط افکنه قرار داشت. در این خاک رخ نیز مانند خاک رخ ۱ روند نامنظمی در مقدار χ_{lf} مشاهده شد. رسوب‌گذاری پی در پی در این خاک رخ منجر به شکل‌گیری این روند نامنظم شده است (شکل ۶، جدول ۴). با این تفاوت که افق زیرین آن (Bg) بیشترین مقدار χ_{lf} را داشت. با وجود شرایط اکوییک در این افق، اما به دلیل کم بودن مقدار آهک و سدیم تبادلی و بالا بودن درصد شن و سیلت و با توجه به این که این ذرات حاوی کانی‌های فری مغناطیس به ارث رسیده همانند مگنتیت و ... می‌باشند، این افق نسبت به افق‌های بالایی مقدار χ_{lf} بیشتری داشت. آهک و املاح خاک از مواد دیامغناطیس می‌باشد که باعث کاهش مواد مغناطیسی می‌شود. همچنین مقدار χ_{lf} در افق‌های سطحی این خاک رخ را می‌توان به محیط کاهشی به وجود آمده در نتیجه تجزیه ماده آلی توسط باکتری‌های موجود در خاک، تولید مگنتیت و تغییر درجای اکسیدها و هیدروکسیدهای غیرمغناطیسی به میکروکریستال‌های فری مغناطیس مرتبط دانست (Sokolowska et al., 2016). از طرفی نوسانات آب زیر زمینی نیز می‌تواند دلیلی بر شرایط احیایی این خاک رخ باشد که شواهد آن در مطالعات صحرایی نیز مشهود بود.

خاک رخ ۳ مالی سول می‌باشد که در واحد ژئومورفیک دشت قرار داشت. دامنه مقدار χ_{lf} در این خاک رخ از $44 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ (افق A) تا $660/50 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ (افق Bkg1) بود (شکل ۶، جدول ۴). این خاک رخ در پنجه شیب قرار دارد. شیب کم و کاربری باغ باعث انباشته شدن مواد آلی در افق‌های سطحی گردیده در نتیجه کم‌ترین مقدار χ_{lf} در افق سطحی مشاهده شد. همبستگی منفی بین ماده آلی و پذیرفتاری مغناطیسی بوسیله Sarmast et al. (2017) نیز گزارش شده است. بالاترین مقدار χ_{lf} در افق Bkg1 مشاهده گردید. علت تفاوت شدید در مقدار پذیرفتاری مغناطیسی افق‌های موجود در این خاک رخ می‌تواند به مقادیر متفاوت مواد دیامغناطیس و اثر رقت آن‌ها بر کانی‌های مغناطیسی خاک نسبت داده شود.

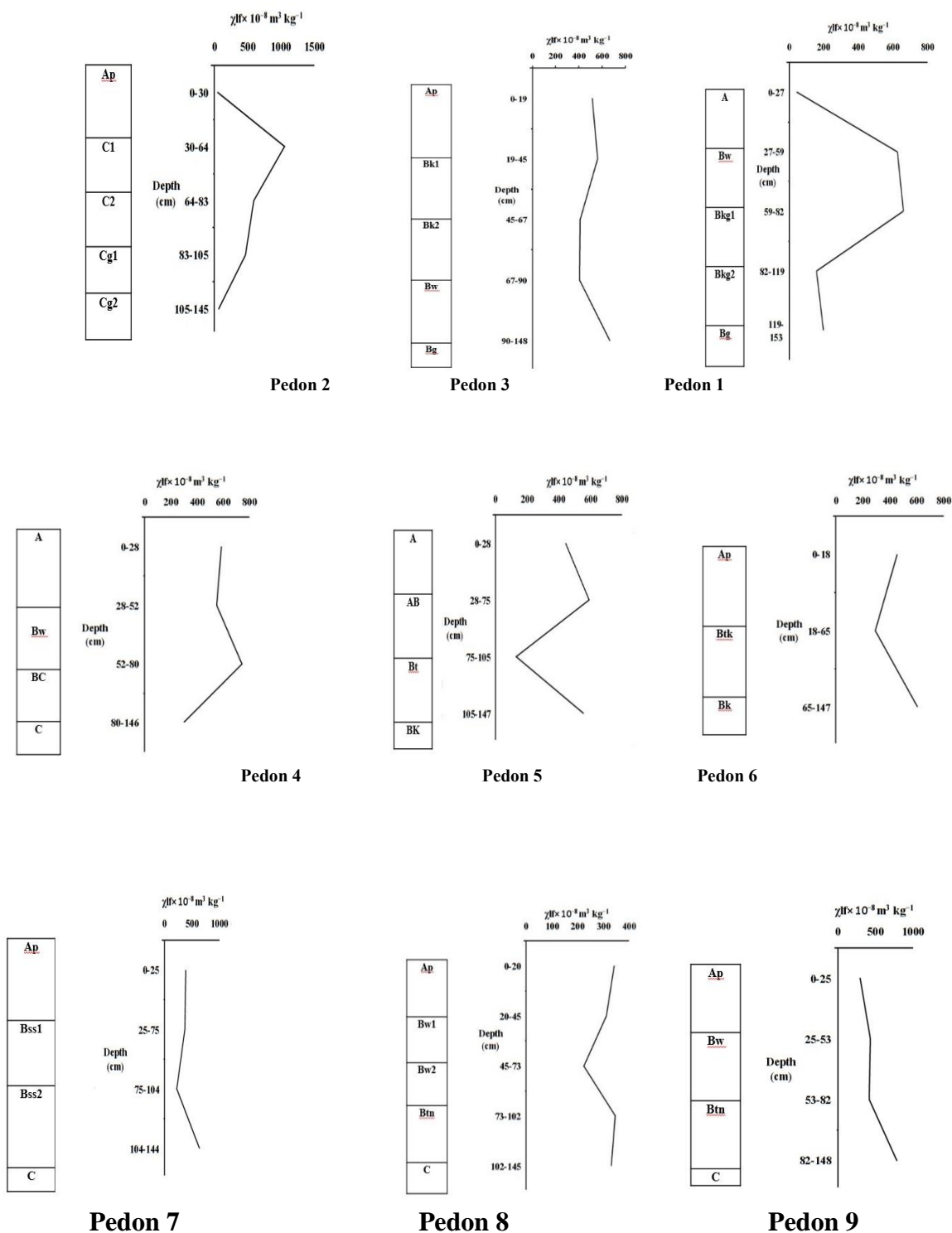
خاک رخ ۴ نیز همانند خاک رخ ۳ مالی سول بود و در واحد ژئومورفیک دشت قرار داشت. این خاک رخ در پنجه شیب قرار داشت. شیب کم و کشت و کار صورت گرفته در آن باعث انباشته شدن مواد آلی در افق‌های سطحی شده در نتیجه موجب کاهش مقدار χ_{lf} در افق‌های سطحی گردیده است. از این رو بیشترین مقدار χ_{lf} در افق زیر سطحی BC مشاهده شد. حضور کربنات کلسیم بالا نسبت به دیگر افق‌های این خاک رخ در افق C موجب کاهش مقدار χ_{lf} در افق C گردیده است (شکل ۶، جدول ۴).

خاک رخ ۵ در واحد ژئومورفیک دشت دامنه‌ای قرار داشت. دامنه مقدار χ_{lf} در این خاک رخ از $130/50 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ تا 10^{-8} تا $593/10 \times m^3 kg^{-1}$ (افق Bk) بود (جدول ۴). میزان پذیرفتاری در این خاک رخ با تغییر نوع افق از الوویال به ایلوویال دچار افت می‌شود که به دلیل وجود ترکیبات آهن متفاوت می‌باشد. این موضوع با یافته‌های محققین پیشین (Owliaie et al., 2006b) در توافق است و می‌تواند به‌عنوان شاخصی از میزان فرایندهای خاک‌سازی مطرح گردد (Owliaie et al., 2006 b).

خاک رخ ۶ در واحد ژئومورفیک پدیمت پوشیده بود. در این خاک رخ نیز مشابه با خاک رخ ۵ کم‌ترین مقدار χ_{lf} در افق ایلوویال Btk مشاهده شد. به غیر از افق Btk با افزایش عمق مقدار χ_{lf} روند افزایشی را نشان داد (جدول ۴، شکل ۶).

خاک رخ ۷ در واحد ژئومورفیک دشت دامنه‌ای قرار داشت. بر عکس خاک رخ ۶ بیشترین مقدار χ_{lf} در افق Btn مشاهده شد. دلیل این امر را می‌توان به انتقال ذرات ریز مگنتیت همراه با ذرات رس نسبت داد. تفاوت خاک رخ ۶ و ۷ به دلیل نوع ماده مادری دو خاک رخ و

همچنین موقعیت واحدهای ژئوموفیک متفاوت می‌باشد. با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس که از حوصله این بحث خارج است رس‌های موجود در خاکرخ ۶ از نوع ۱:۱ می‌باشد و از این روند تبعیت نمی‌کند. (Alamdari et al. (2010 گزارش کردند، انتقال ذرات ریز خاک و مخصوصاً رس یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در بخش‌هایی که رس رسوب کرده می‌باشد، چرا که محققین معتقدند ذرات ریز مغناطیسی (ماگمات) در طی این فرآیند، همراه با ذرات رس به‌صورت پوشش روی رس انتقال می‌یابند (شکل ۶ جدول ۴).



شکل ۶. توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{lf}) در خاکرخ‌های شاهد

جدول ۴. شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی خاک در خاکرخی‌های شاهد مورد مطالعه

افق	عمق (سانتیمتر)	Fe _T ^a (g kg ⁻¹)	Fe _o ^b (g kg ⁻¹)	Fe _d ^c (g kg ⁻¹)	Fe _e -Fe _o	Fe _o /Fe _d	hf ^d χ × 10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	hf ^e χ × 10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	fd ^f χ (%)
خاکرخی ۱ (دشت)									
Ap	۰-۳۰	۳۸/۱۲	-/۲۵	۱۳/۰۴	۱۲/۷۹	-/۰۲	۴۱/۴۰	۴۲/۹۰	۳/۵۰
C1	۳۰-۶۴	۱۵/۰۴	-/۱۰	۷/۰۰	۶/۹۰	-/۰۱	۱۰۴۴/۸۰	۱۰۵۳/۲۰	-/۸۰
C2	۶۴-۸۳	۱۲/۰۵	-/۰۹	۸/۳۲	۸/۲۳	-/۰۱	۵۹۱/۰۰	۵۹۵/۵۰	-/۷۶
Cg1	۸۳-۱۰۵	۳۸/۴۶	-/۱۲	۱۲/۶۳	۱۲/۵۱	-/۰۱	۴۶۱/۸۰	۴۶۷/۴۰	۱/۲۰
Cg2	۱۰۵-۱۴۵	۲۳/۰۰	-/۲۶	۸/۷۱	۷/۵۵	-/۰۳	۶۰/۶۰	۶۲/۰۰	۲/۲۶
خاکرخی ۲ (مخروط افکنه)									
Ap	۰-۱۹	۲۵/۵۳	-/۲۸	۵/۶۵	۵/۳۷	-/۰۵	۵۱۳/۸۰	۵۱۶/۶۰	-/۵۴
Bk1	۱۹-۴۵	۲۹/۵۲	-/۲۹	۸/۱۷	۷/۸۸	-/۰۴	۵۵۷/۸۰	۵۶۱/۳۰	-/۶۲
Bk2	۴۵-۶۷	۳۱/۴۹	-/۳۱	۹/۲۲	۸/۹۱	-/۰۳	۴۰۲/۸۰	۴۰۹/۶۰	۱/۶۶
Bw	۶۷-۹۰	۳۷/۱۶	-/۳۵	۸/۸۴	۸/۴۹	-/۰۴	۴۰۰/۴۰	۴۰۵/۱۰	۱/۱۶
Bg	۹۰-۱۴۸	۲۷/۴۳	-/۲۶	۷/۲۹	۷/۰۳	-/۰۴	۶۶۱/۹۰	۶۶۳/۸۰	-/۲۹
خاکرخی ۳ (دشت)									
A	۰-۲۷	۲۷/۷۴	-/۳۳	۹/۲۳	۸/۹۰	-/۰۴	۴۳/۵۰	۴۴/۰۰	۱/۱۴
Bw	۲۷-۵۹	۳۰/۵۲	-/۳۲	۸/۴۴	۸/۱۲	-/۰۴	۶۴۳/۵۰	۶۲۶/۹۰	-/۵۴
Bkg1	۵۹-۸۲	۲۹/۱۸	-/۲۳	۱۱/۵۹	۱۱/۲۶	-/۰۲	۶۵۴/۴۰	۶۶۰/۵۰	-/۹۲
Bkg2	۸۲-۱۱۹	۳۹/۰۰	-/۴۲	۱۰/۱۴	۹/۷۲	-/۰۴	۱۵۶/۲۰	۱۵۹/۶۰	۲/۱۳
Bg	۱۱۹-۱۵۳	۲۸/۷۲	-/۲۴	۱۲/۰۳	۱۱/۸۰	-/۰۲	۱۹۳/۳۰	۱۹۷/۷۰	۲/۲۳
خاکرخی ۴ (دشت)									
A	۰-۲۸	۲۷/۷۴	-/۳۳	۸/۲۵	۷/۹۲	-/۰۴	۵۸۴/۵۰	۵۸۸/۲۰	-/۶۳
Bw	۲۸-۵۲	۳۱/۳۶	-/۳۹	۱۲/۲۴	۱۱/۸۵	-/۰۳	۵۵۱/۳۰	۵۵۱/۷۰	-/۰۷
BC	۵۲-۸۰	۲۸/۹۷	-/۷۵	۱۳/۸۱	۱۳/۰۵	-/۰۵	۷۴۲/۵۰	۷۴۵/۰۰	-/۳۴
C	۸۰-۱۴۶	۲۸/۷۸	-/۱۹	۱۰/۴۹	۱۰/۳۰	-/۰۲	۲۹۵/۷۰	۳۰۰/۵۰	۱/۶۰
خاکرخی ۵ (دشت دامنه‌ای)									
A	۰-۲۸	۳۲/۳۲	-/۴۳	۱۰/۳۹	۹/۹۶	-/۰۴	۴۳۷/۱۰	۴۴۲/۶۰	۱/۲۴
AB	۲۸-۷۵	۲۸/۴۲	-/۳۲	۱۰/۲۶	۹/۹۴	-/۰۳	۵۹۱/۶۰	۵۹۳/۱۰	-/۲۵
Bt	۷۵-۱۰۵	۲۸/۷۳	-/۳۷	۱۳/۰۱	۱۲/۶۴	-/۰۳	۱۲۹/۵۰	۱۳۰/۵۰	-/۷۷
Bk	۱۰۵-۱۴۷	۳۲/۰۵	-/۵۸	۲۴/۰۸	۲۳/۵۰	-/۰۲	۵۴۵/۴۰	۵۵۶۱۰/۱۰	۱/۹۷
خاکرخی ۶ (پدیمت پوشیده)									
Ap	۰-۱۸	۳۳/۴۱	-/۴۱	۱۲/۲۲	۱۱/۸۱	-/۰۳	۴۵۰/۰۰	۴۵۵/۹۰	۱/۲۹
Btk	۱۸-۶۵	۳۱/۳۸	-/۲۶	۱۴/۷۶	۱۴/۵۱	-/۰۲	۲۹۰/۴۰۰	۲۹۲/۸۰	-/۸۲
Bk	۶۵-۱۴۷	۳۱/۸۴	-/۱۵	۱۵/۳۶	۱۵/۲۱	-/۰۱	۶۰۶/۳۰	۶۰۶/۹۰	-/۱۰
خاکرخی ۷ (دشت دامنه‌ای)									
Ap	۰-۲۰	۱۷/۶۰	-/۳۰	۴/۰۲	۳/۷۲	-/۰۸	۳۴۰/۲۰	۳۴۲/۸۰	-/۷۶
Bw1	۴۵-۲۰	۳۰/۶۳	-/۳۰	۱۲/۵۸	۱۲/۲۷	-/۰۲	۳۰۷/۷۰	۳۱۲/۸۰	۱/۶۳
Bw2	۴۵-۷۳	۳۱/۴۰	-/۳۳	۷/۰۰	۶/۶۶	-/۰۵	۲۲۲/۳۰	۲۲۵/۱۰	۱/۲۴
Btn	۷۳-۱۰۲	۳۰/۲۶	-/۳۲	۱۰/۵۸	۱۰/۲۶	-/۰۳	۳۴۴/۸۰	۳۴۶/۷۰	-/۵۵
C	۱۴۵-۱۰۲	۲۳/۹۸	-/۳۵	۱۰/۷۲	۱۰/۳۷	-/۰۳	۳۲۸/۴۰	۳۳۱/۳۰	-/۸۸
خاکرخی ۸ (دشت سیلابی)									
Ap	۰-۲۵	۳۰/۸۲	-/۳۱	۹/۹۸	۹/۶۷	-/۰۳	۲۹۵/۱۰	۲۹۷/۲۰	-/۷۱
Bw	۲۵-۵۳	۲۷/۹۶	-/۴۹	۱۱/۹۰	۱۱/۴۱	-/۰۴	۴۲۸/۵۰	۴۳۳/۵۰	۱/۱۵
Btn	۵۳-۸۲	۲۱/۱۹	-/۴۶	۹/۱۰	۸/۶۵	-/۰۵	۴۱۲/۰۰	۴۱۵/۴۰	-/۸۲
C	۸۲-۱۴۸	۲۶/۵۳	-/۴۰	۱۴/۱۴	۱۳/۷۴	-/۰۳	۷۸۰/۷۰	۷۸۴/۵۰	-/۴۸
خاکرخی ۹ (دشت)									
Ap	۰-۲۵	۲۵/۹۷	-/۲۱	۱۱/۳۰	۱۱/۰۹	-/۰۲	۳۸۶/۵۰	۳۹۲/۳۰	۱/۴۸
Bss1	۲۵-۷۵	۲۹/۰۲	-/۳۰	۲۰/۷۰	۲۰/۴۰	-/۰۱	۳۶۴/۷۰	۳۶۹/۶۰	۱/۳۳
Bss2	۷۵-۱۰۴	۳۰/۳۳	-/۳۱	۲۲/۵۸	۲۲/۲۷	-/۰۱	۲۲۹/۶۰	۲۳۰/۶۰	-/۴۳
C	۱۰۴-۱۴۴	۴۲/۶۰	-/۱۱	۱۸/۸۴	۱۸/۷۳	-/۰۱	۶۳۳/۹۰	۶۴۱/۵۰	۱/۱۸

^a آهن کل

^b آهن قابل استخراج اگزالات

^c آهن قابل استخراج دیتیونیت-سیترات-بی کربنات

^d حساسیت مغناطیسی فرکانس پایین

^e حساسیت مغناطیسی وابستگی به فرکانس

^f حساسیت مغناطیسی فرکانس بالا

خاکرخ ۸ در واحد ژئومورفیک دشت سیلابی بود. دامنه λf در این خاکرخ از $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \times 297/20$ تا Ap $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ $784/50$ افق C بود (جدول ۴، شکل ۶). در این خاکرخ با افزایش عمق مقدار λf روند افزایشی را نشان داد. در این خاکرخ بیشترین مقدار λf در افق C مشاهده شد. به علت رسوب آهن در افق C این امر را می‌توان به مواد مادری نسبت داد. در خاکرخ ۹ نیز مشابه با خاکرخ ۸ بیشترین مقدار λf در افق C مشاهده شد (شکل ۶، جدول ۴). این خاکرخ در واحد ژئومورفیک دشت بود. مقدار λf در افق‌های سطحی این خاکرخ را می‌توان به فرایند هوازدگی در طی کشت و کار صورت گرفته نسبت داد (Lu et al., 2012). چون فرایند هوازدگی در خاکرخ‌هایی که کشت و کار در آن‌ها صورت گرفته است، با توجه به مدیریت کشت و تاثیر کودهای شیمیایی یا عناصر سنگین دستخوش تغییر قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد به دلیل به هم خوردگی‌هایی است که در ساختمان و جهت‌گیری رس‌ها رخ می‌دهد. کشت و کار باعث در هم ریختگی خاک و همچنین افزایش کودها و املاح شیمیایی در افق سطحی منجر به کاهش خصوصیات مغناطیسی می‌گردد. از طرفی هوازدگی که در افق سطحی صورت می‌گیرد سبب تغییر اشکال آهن و در نتیجه تغییر خصوصیت مغناطیسی می‌شود.

شاخص‌های هوازدگی

با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۵، دامنه تغییرات شاخص CIA از $60/82$ (افق C2، خاکرخ ۱) تا $78/77$ (افق Bg، خاکرخ ۳) بود. همچنین بیشترین و کمترین میانگین شاخص CIA به ترتیب در ژئوفرم‌های دشت سیلابی و پدیمنت پوشیده مشاهده شد. به طور کلی، مقدار CIA برابر با $50-65$ ، $65-85$ و $85 >$ در خاک به ترتیب نشان‌دهنده شدت هوازدگی ضعیف، متوسط و شدید می‌باشد (Goydaragh et al., 2021; Esfandiarpour-Borouje et al., 2022). بر این اساس، تمامی افق‌های خاکرخ‌های حفار شده در منطقه، دارای CIA بین 50 تا 80 می‌باشند که این موضوع نشانگر آن است که خاک‌های منطقه در مرحله هوازدگی ضعیف تا متوسط قرار دارند. شاخص CPA یکی دیگر از شاخص‌های هوازدگی مورد استفاده در این تحقیق است که به نوعی مکمل شاخص CIA می‌باشد. این شاخص با حذف CaO از معادله خود توانسته اثر دیگر اکسیدهای کلسیم موجود در کانی‌هایی نظیر آپاتیت و دولومیت را خنثی کند. همچنین در این شاخص فرض شده است که پتاسیم، حداقل نقش را در هوازدگی دارد. دامنه تغییرات این شاخص در منطقه مشابه با شاخص CIA در دو خاکرخ ۱ و ۳ بود و مقادیر آن بین $80/67$ (افق C2، خاکرخ ۱) تا $93/87$ (افق Bg، خاکرخ ۳) بود (جدول ۵). بیشترین و کمترین مقدار میانگین شاخص CPA به ترتیب در واحدهای ژئومورفیک دشت سیلابی و پدیمنت پوشیده با توجه به فرمول و نمودار مشاهده شد.

مقدار شاخص CIW نیز از 65 (افق C2، خاکرخ ۱) تا $87/20$ (افق Bg، خاکرخ ۳) متغیر بود. بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص نیز مانند شاخص CPA به ترتیب در ژئوفرم‌های دشت سیلابی و پدیمنت پوشیده مشاهده شد (جدول ۵). شاخص CIW به علت حذف پتاسیم از معادله خود، مقادیر بیشتری نسبت به شاخص CIA را نشان می‌دهد. در واقع با انجام این کار، مشکل انتقال پتاسیم در اثر فرایندهای دیاژنتیک و دگرگونی حذف شده است.

به طور کلی، با افزایش شاخص‌های CIA، CIW و CPA در واقع Na_2O و CaO از خاک و رسوبات خارج می‌شوند و غلظت Al_2O_3 در آن‌ها افزایش می‌یابد (Mahu et al., 2018). عوامل بسیاری بر هوازدگی شیمیایی مؤثر می‌باشند که از آن جمله می‌توان به بارندگی، دما، توپوگرافی، رسوب‌گذاری و پوشش گیاهی اشاره نمود (Bao et al., 2019). به نظر می‌رسد که در منطقه مورد مطالعه، خاک‌ها تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی از جمله اقلیم، توپوگرافی، پوشش گیاهی و موقعیت واحد ژئومورفولوژی قرار دارند. Zhao et al. (2017) بیان نمودند که ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات، منجر به تغییر ترکیب عناصر اصلی در خاک می‌گردد.

با توجه به منحنی A-CN-K (شکل ۷) مشاهده می‌شود کانی کلسیت در رأس CN قرار گرفته و مکان قرارگیری کانی‌های ایلایت و اسمکتایت‌ها در محدوده 70 تا 85 درصد رأس A است. وقتی که همه پلاژیوکلازها هوازدیده گردند، روند هوازدگی از وسط مرز A-K قطع شده و مجدداً به سمت رأس A تغییر جهت می‌دهد؛ زیرا پتاسیم سریع‌تر و زودتر از آلومینیوم از مواد باقی‌مانده خارج می‌شود (Malick & Ishiga, 2016). مقدار بالایی UCC¹ در این منحنی مراحل اولیه هوازدگی را نشان می‌دهد. UCC بیانگر درصد اکسید عناصر Ca، k، Na و Al در پوسته سطحی زمین می‌باشد که محققان از آن به عنوان مراحل هوازدگی گزارش کرده اند (Rudnick & Gao, 2003).

جدول ۵. تغییرات شکل اکسید عناصر اصلی و شاخص‌های هواپدگی

افق	عمق (سانتیمتر)	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	CIAa	CPAb	CIWc
خاکرخ ۱ (دشت)								
Ap	۰-۳۰	۰/۸۷	۱۳/۴۴	۹/۸۲	۱/۶۶	۷۲/۸۲	۹۰/۳۸	۸۰/۶۸
C2	۶۴-۸۳	۲/۴۹	۱۷/۱۰	۶/۳۲	۱/۶۷	۶۰/۸۲	۸۰/۶۷	۶۵/۰۰
خاکرخ ۲ (مخروط افکنه)								
Ap	۰-۱۹	۱/۶۶	۱۴/۵۹	۷/۹۶	۱/۱۶	۶۶/۳۶	۸۴/۲۳	۷۰/۳۸
Bk1	۱۹-۴۵	۱/۰۸	۱۵/۵۳	۷/۱۴	۱/۵۴	۷۳/۲۸	۸۹/۷۳	۷۹/۵۴
Bw	۶۷-۹۰	۱/۳۴	۱۶/۱۶	۶/۲۲	۱/۳۶	۷۱/۵۴	۸۸/۰۰	۷۶/۵۳
خاکرخ ۳ (دشت)								
A	۰-۲۷	۱/۱۶	۱۶/۱۴	۷/۲۰	۱/۴۳	۷۳/۴۳	۸۹/۴۳	۷۹/۰۰
Bw	۲۷-۵۹	۱/۲۳	۱۶/۲۸	۶/۰۱	۱/۲۸	۷۳/۲۸	۸۸/۹۴	۷۸/۱۶
Bkg1	۵۹-۸۲	۰/۷۷	۱۴/۳۱	۹/۴۸	۱/۴۲	۷۶/۵۴	۹۱/۸۷	۸۳/۴۰
Bg	۱۱۹-۱۵۳	۰/۴۸	۱۲/۰۹	۱۴/۳۱	۱/۳۷	۷۸/۷۷	۹۳/۸۷	۸۷/۲۰
خاکرخ ۴ (دشت)								
A	۰-۲۸	۱/۰۷	۱۵/۰۲	۷/۰۵	۱/۵۷	۷۳/۶۴	۸۹/۵۱	۷۹/۱۵
Bw	۲۸-۵۲	۱/۱۰	۱۶/۱۷	۵/۷۱	۱/۲۸	۷۴/۸۹	۸۹/۹۳	۷۹/۹۰
BC	۵۲-۸۰	۰/۵۵	۱۱/۵۶	۱۵/۶۸	۱/۲۴	۷۷/۳۹	۹۲/۷۴	۸۵/۰۴
C	۸۰-۱۴۶	۰/۸۲	۱۳/۳۵	۱۲/۴۷	۱/۳۷	۷۴/۷۲	۹۰/۸۲	۸۱/۴۹
خاکرخ ۵ (دشت دامنه ای)								
A	۰-۲۸	۱/۶۷	۱۷/۴۶	۶/۱۲	۱/۱۷	۷۰/۱۱	۸۶/۴۰	۷۳/۸۷
AB	۲۸-۷۵	۱/۲۰	۱۶/۲۶	۶/۷۸	۱/۳۱	۷۳/۵۲	۸۹/۱۷	۷۸/۵۶
Bt	۷۵-۱۰۵	۱/۰۸	۱۶/۵۰	۵/۴۳	۱/۳۹	۴۵/۰۰	۹۰/۲۸	۸۰/۵۱
BK	۱۰۵-۱۴۷	۰/۸۳	۱۳/۶۴	۸/۱۱	۲/۰۹	۷۱/۸۹	۹۰/۹۰	۸۱/۶۳
خاکرخ ۶ (پدیمنت پوشیده)								
Ap	۰-۱۸	۱/۱۲	۱۵/۹۹	۶/۲۸	۱/۳۷	۷۳/۹۷	۸۹/۶۷	۷۹/۴۲
Btk	۱۸-۶۵	۰/۸۵	۱۵/۴۷	۸/۶۰	۱/۵۹	۷۶/۰۷	۹۱/۷۱	۸۳/۱۱
Bk	۶۵-۱۴۷	۰/۸۱	۱۱/۴۵	۷/۷۷	۱/۷۳	۷۶/۰۴	۹۲/۰۶	۸۳/۷۶
خاکرخ ۷ (دشت دامنه ای)								
Ap	۰-۲۰	۰/۸۴	۸/۷۴	۸/۳۶	۱/۳۴	۶۵/۷۲	۸۶/۳۵	۷۳/۷۷
Bw1	۴۵-۲۰	۱/۳۳	۱۶/۵۷	۴/۸۹	۱/۴۹	۷۱/۷۲	۸۸/۳۴	۷۷/۱۱
Btn	۷۳-۱۰۲	۱/۳۲	۱۷/۲۵	۵/۷۱	۱/۲۸	۷۳/۳۵	۸۸/۸۲	۷۷/۹۴
C	۱۴۵-۱۰۲	۱/۶۸	۱۵/۷۴	۹/۸۲	۱/۲۹	۶۷/۴۱	۸۵/۰۶	۷۱/۷۰
خاکرخ ۸ (دشت سیلابی)								
Ap	۰-۲۵	۱/۱۵	۱۵/۷۵	۵/۷۹	۱/۳۲	۷۳/۴۹	۸۹/۲۸	۷۸/۷۴
Bw	۵۳-۲۵	۱/۲۵	۱۶/۰۶	۶/۵۴	۱/۳۱	۷۲/۶۶	۸۸/۶۵	۷۷/۶۵
Btn	۵۳-۸۲	۱/۶۵	۱۷/۲۷	۶/۱۴	۱/۲۶	۶۹/۸۱	۸۶/۴۲	۷۳/۸۹
C	۸۲-۱۴۸	۱/۶۴	۱۳/۴۲	۸/۷۴	۱/۹۸	۶۲/۰۴	۸۳/۲۶	۶۸/۸۷
خاکرخ ۹ (دشت)								
Ap	۰-۲۵	۱/۱۷	۱۴/۳۶	۹/۸۹	۱/۳۱	۷۱/۴۲	۸۸/۱۸	۷۶/۸۴
Bss2	۷۵-۱۰۴	۰/۵۲	۱۲/۳۶	۹/۵۷	۱/۶۹	۷۶/۷۱	۹۳/۵۳	۸۶/۵۳
C	۱۰۴-۱۴۴	۱/۳۱	۱۶/۳۵	۷/۳۵	۱/۴۴	۷۱/۸۵	۸۸/۳۵	۷۷/۱۴

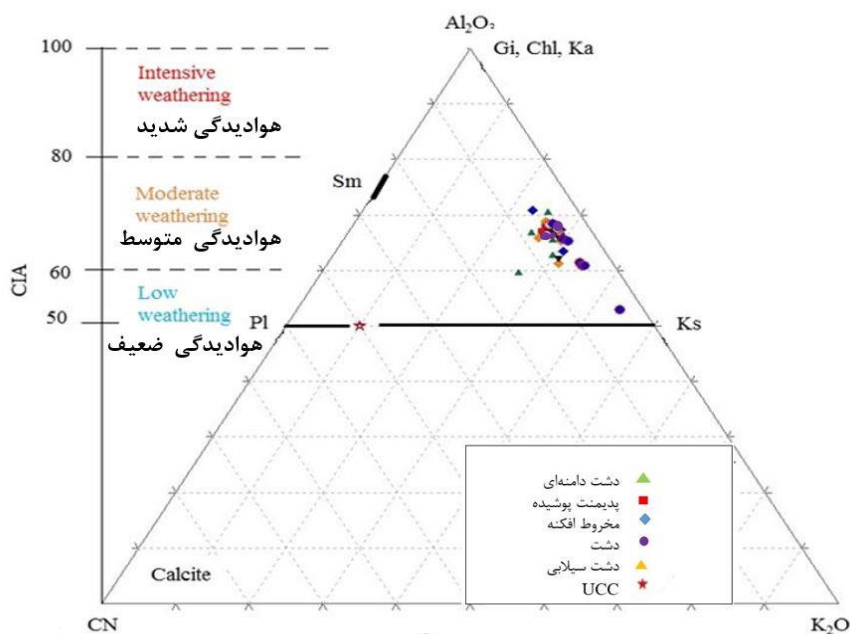
c شاخص شیمیایی هوازدگی

b پروکسی شیمیایی دگرسانی

a شاخص تغییر شیمیایی

همچنین در همه خاکرخ‌ها، مقادیر بالای UCC و موازی خط A-K نشان‌دهنده فرایند هواپدگی ضعیف و متوسط در منطقه می‌باشد. با این حال اکثر نمونه‌ها در محدوده شدت هواپدگی متوسط قرار داشته و رژیم رطوبتی زیریک و آبیاری در طی کشت و کار در سطوح ژئومورفیک سبب خروج عناصر متحرک از قبیل پتاسیم، سدیم گردیده است. مطالعات مشابهی نیز نشان دادند که شرایط اقلیمی و کشت

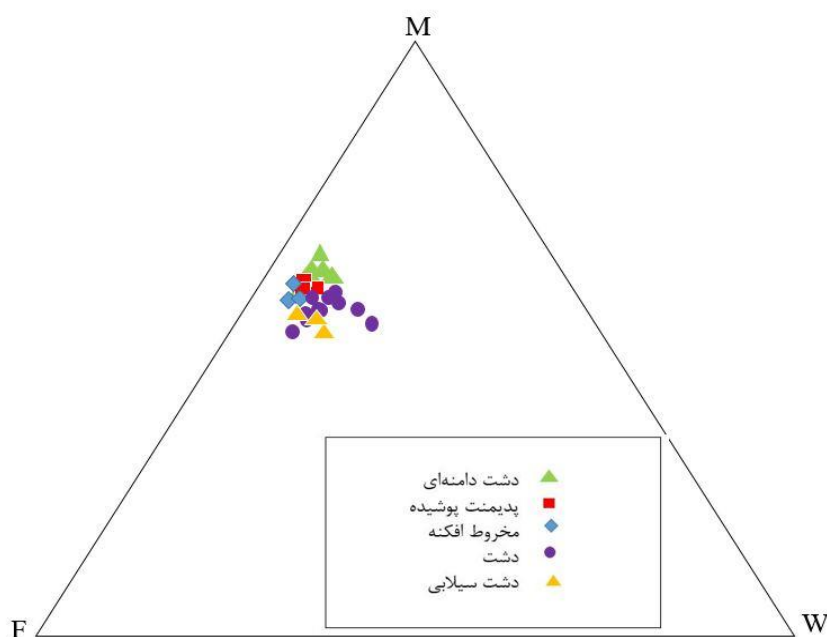
و کار نقش قابل توجهی را در هوادیدگی شیمیایی دارند (Tunçay et al., 2019). شکل ۸ منحنی MFW سطوح ژئومورفیک منطقه را نشان می‌دهد که این منحنی با به‌کاربردن اغلب اکسیدهای اصلی محاسبه می‌شود و نتایج مشابهی با منحنی A-CN-K نشان می‌دهد. ارفع نیا و اسد زاده (۱۳۹۸) نیز در مطالعه رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند.



شکل ۷. منحنی A-CN-K در سطوح ژئومورفیک منطقه

Honda & Shimizu (1998) و داده‌های UCC از مقاله Rudnick & Gao (2003) بود. $CN = CaO^* + K_2O$ و CaO^* مقدار مولار کربنات در کانی‌های سیلیکات می‌باشد. محاسبه این روش طبق روش Honda &

Pl= Plagioclase (پلاژیوکلاز), Sm= Smectite (اسمکتایت), Gi= gibbsite (گیبسایت), Chl= Chlorite (کلرایت), Ka=Kaolinite (فلدسپار پتاسیم), Ks = K- feldspar (کائولینایت)



شکل ۸. منحنی MFW در سطوح ژئومورفیک منطقه

F: مواد مادری با ترکیب اسیدی، M: مواد مادری با ترکیب بازی، W: Weathered: نمونه‌های هوادیده

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش ارزیابی اثرات فاکتورهای تشکیل خاک بر مقدار و توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی بود. برای این منظور تعداد ۹ خاکرخ شاهد در پنج واحد ژئومورفیک غالب منطقه از جمله دشت دامنه‌ای، پدیمت پوشیده، مخروطه افکنه، دشت و دشت سیلابی در استان آذربایجان غربی واقع در کشور ایران حفر شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فاکتورهای مواد مادری، پستی و بلندی همراه با وضعیت زهکشی و کاربری از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر تشکیل، تکامل و پذیرفتاری مغناطیسی ژئوفرم‌های مختلف منطقه چالدران می‌باشد. در اغلب خاکرخ‌های مطالعه شده مقدار پذیرفتاری مغناطیسی χ با افزایش عمق افزایش می‌یابد و در برخی خاک‌ها میزان χ به دلیل انتقال ذرات ریز فرومگنتیک به همراه ذرات رس در افق B حداکثر بود. تغییرات نامنظم شاخص پذیرفتاری مغناطیسی در اکثر پروفیل‌های حفر شده در منطقه نشان می‌دهد که این شاخص بیش از تکامل، تحت تاثیر مواد مادری و رسوب‌گذاری قرار دارد. شرایط زهکشی خاک و رژیم رطوبتی نیز به میزان زیادی بر پذیرفتاری مغناطیسی و توزیع Fe_d موثر بوده است. در مجموع شرایط اکوییک در خاک‌های مورد مطالعه موجب کاهش پذیرفتاری و میزان توزیع آهن پدوژنیک (Fe_d) شده است. همچنین ذرات فری مغناطیس تشکیل‌دهنده خاک‌های منطقه از نوع ذرات درشت چندحوزه‌ای (>110 میکرومتر) بودند. نتایج ارزیابی شاخص‌های CIW ، CIA و CPA نیز نشان داد که مرحله هوادیدگی ضعیف تا متوسط در منطقه حاکم بوده است. با توجه به منحنی A-CN-K و ترکیب شیمیایی اکسیدهای عناصر مورد مطالعه، فرایند هوادیدگی متوسطی در منطقه حاکم است. به نظر می‌رسد که انجام فرآیندهای رسوب‌گذاری، خاک‌سازی، هوادیدگی و کشت و کار در این منطقه، سبب تغییر ترکیب شیمیایی خاک‌ها شده است. در هر حال، برای درک بهتر خصوصیات مغناطیسی خاک‌ها در ژئوفرم‌های مختلف بهتر است که ارتباط دیگر پارامترهای مغناطیسی مانند IRM_{100mT}^1 ، $SIRM^2$ ، $IRM-100mT^3$ and NRM^4 در منطقه، مورد بررسی قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- ارفع نیا، حامد؛ اسدزاده، فرخ (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های هوادیدگی شیمیایی در رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۶(۲): ۵۳-۵۳. doi: 10.22069/jwsc.2019.14883.299573-53
- اوسط، مریم؛ حیدری، احمد (۱۴۰۱). روند تکامل خاک در خاک‌های درجا توسعه‌یافته در یک زمین‌نمای کوهستان (مطالعه موردی: روستای باندر). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۱): ۱۴۱-۱۴۱. doi: 10.22059/ijswr.2022.331427.669086158-141
- ترابی گل سفیدی، حسین؛ کریمیان اقبال، مصطفی (۱۳۸۱). مطالعه و بررسی تکامل خاک با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی در حاشیه رودخانه سفیدرود در گیلان، مجله علوم خاک و آب، ۲(۱۶): ۳۳-۱۷.
- کریمی، علیرضا؛ خامی، حسین (۱۳۹۱). تأثیر مواد مادری، گچ و کربنات‌ها بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های جنوب مشهد. علوم آب و خاک، ۱۶(۶۱): ۲۴۷-۲۶۰.
- ملکیان، اشرف؛ جعفرزاده، علی اصغر؛ اوستان، شاهین؛ ثروتی، مسلم (۱۴۰۱). مطالعه تغییر و تحول خاک - سیمای اراضی منطقه چالدران، شمال غربی ایران. علوم آب و خاک، ۲۶(۲): ۱۳۵-۱۵۳.
- وفایی زاده، روح اله؛ ایوبی، شمس الله؛ مصدقی، محمد رضا؛ یوسفی فرد، مریم (۱۳۹۵). تأثیر موقعیت شیب و تغییر کاربری اراضی بر ویژگی های خاک و پذیرفتاری مغناطیسی در اراضی تپه ماهوری یاسوج. آب و خاک، ۳۰(۲): ۶۳۲-۶۴۲. doi: 10.22067/jsw.v30i2.48970642-632

REFERENCES

- Alamdari, P. Jafarzadeh, A. A. Oustan, S. and Toomanian, N. (2010). Iron oxide forms and distribution in a transect of Dasht-e-Tabriz soils, northwest Iran. Journal of Food, Agriculture and Environment, 8(3&4), 976-979.
- Ayoubi, S. and Mirsaidi, A. (2019). Magnetic susceptibility of Entisols and Aridisols great groups in southeastern Iran. Geoderma Regional, 16, p.e00202

- Azadi, N. and Raiesi, F. (2021). Biochar alleviates metal toxicity and improves microbial community functions in a soil co-contaminated with cadmium and lead. *Biochar*, 3(4), pp.485-498.
- Azadi, A., Shakeri, S., & Zareian, Gh. (2021). The effect of landform units on the origin and distribution of extractable forms of iron oxide in some calcareous soils. The 4th national conference of farm water management., Karaj, Iran.
- 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.
- Bao, J. Song, C. Yang, Y. Fang, X. Meng, Q. Feng, Y. and He, P. (2019). Reduced chemical weathering intensity in the Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) during the Late Cenozoic. *J. Asian. Earth. Sci.* 170, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.10.018>.
- Blume, H. P. and Schwertmann, U.(1969). Genetic evaluation of profile distribution of aluminum, iron, and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33(3), 438-444. doi:10.2136/sssaj1969.03615995003300030030x
- Blundell, A. Dearing, J.A. Boyle, J.F. and Hannam, J.A. (2009). Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth Sci. Rev.* 95 (3), 158–188.
- Boettinger, J.L., Howell, D.W., Moore, A.C., Hartemink, A.E. and Kienast-Brown, S. eds., 2010. Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation. Springer Science & Business Media.
- Bridge, J. and Demicco, R., 2008. Earth surface processes, landforms and sediment deposits. *Earth Surface Processes*.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N. and Markovič, S.B. (2011). An evaluation 554 of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International* 555 240, 12–21.
- De Jong, E. Kozak, L.M. Rostad, H.P.W. (2000). Effects of parent material and climate on the magnetic susceptibility of soils in different slop positions in Saskatchewan, Canada. *Catena* 40 (3), 291-305.
- Diaz, M. C. and Torrent, J. (1989). Mineralogy of iron oxides in two soil chronosequences of central Spain. *Catena*. 16, 291–299. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(89\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0341-8162(89)90015-5).
- Dearing, J. (1999). Environmental magnetic susceptibility: Using the bartington MS2 system. Chi Publishing, Keniloworth.
- Esfandiarpour-Boroujeni, I., Bandehelahi, F., Mosleh, Z., Karimi, A., Farpoor, M. H., & Fattahi, M. (2022). Evaluating the Effects of Sedimentary Cycles (Aeolian and Fluvial) on Chemical Weathering Indices in Rafsanjan Region, Southeast of Iran. *Desert*, 27(1), 115-139.921-924.
- Franz, C., Makeschin, F., Roig, H., Schubert, M., Weiß, H. and Lorz, C. (2012). Sediment characteristics and sedimentations rates of a small river in Western Central Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 65(5), pp.1601-1611.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In: Klute, I.I., Ed., *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of America, Madison, 383-412.
- Goydaragh, M.G., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Golchin, A., Jafarzadeh, A.A. and Lado, M. (2021). Predicting weathering indices in soils using FTIR spectra and random forest models. *Catena*, 204, p.105437.
- Gus-Stolarczyk, M., Drewnik, M., Szymański, W. and Stolarczyk, M. (2022). Impact of podzolization on lamellae transformation in sandy soils in a temperate climate—A case study from southern Poland. *Geoderma*, 406, p.115535.
- Harnois, L. (1988). The CIW, Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55, 319-322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6).
- Honda, M. and Shimizu, H. (1998). Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology*, 45(6), 1125-1143
- Hong, C.Y., Wu, C.C., Chiu, Y.C., Yang, S.Y., Horng, H.E. and Yang, H.C. (2006). Magnetic susceptibility reduction method for magnetically labeled immunoassay. *Applied Physics Letters*, 88(21), p.212512.
- Hseu, Z. Y. Chen, Z. S. Tsai, C. C. Tsui, C. C. Cheng, S. F. Liu, C. L. and Lin, H. T. (2002). Digestion methods for total heavy metals in sediments and soils. *Water, air, and soil pollut*, 141(1-4), 189-205. <https://doi.org/10.1023/A:1021302405128>
- Huang, L. Jia, X. Shao, M. A. Chen, L. Han, G. and Zhang, G. (2018). Phases and rates of iron and magnetism changes during paddy soil development on calcareous marine sediment and acid Quaternary red-clay. *Sci. Rep.*, 8(1), 444. doi:10.1038/s41598-017-18963-x.
- Hu, M. Y., Yan, H. Y., Chung, W.-S., Shiao, J.-C. and Hwang, P. P. (2009). Acoustically evoked potentials in



- two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 153(3), 278–283. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.02.040>.
- Li, M. Y., Zhang, X. T., Liu, H. Y., & Wei, S. Q. (2022). Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 43(8), 4301-4312.
- Liu, R., Ma, T., Qiu, W., Du, Y. and Liu, Y. (2020). Effects of Fe oxides on organic carbon variation in the evolution of clayey aquitard and environmental significance. *Science of the Total Environment*, 701, p.134776.
- Liu, L. Zhang, Z. Zhang, K. Liu, H. and Fu, S. (2018). Magnetic susceptibility characteristics of surface soils in the Xilingele grassland and their implication for soil redistribution in wind-dominated landscapes: A preliminary study. *Catena*, 163, 33-41.
- Lu, S.G. Xue, Q.F. Zhu, L. Yu, J.Y. (2008). Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. *Catena* 73 (1), 23–33.
- Lu, S. (2000). Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena* 40 (4), 359–373.
- Lu, S.G. Chen, D.J. Wang, S.Y. and Liu, Y.D. (2012a). Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun-Gui Plateau, China: evidence for pedogenic magnetic minerals. *J. Appl. Geophys.* 77, 39–50.
- Layzell, A. L. and Eppes, M. C. (2013). Holocene pedogenesis in fluvial deposits of the Conejos River valley, southern Colorado. *The Compass: Earth Science Journal of Sigma Gamma Epsilon*, 84(4), 4.
- Maher, B. A. (1988). Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophys. Inter.* 94(1), 83-96
- Mahu, E. Asiedu, D. K. Nyarko, E. Hulme, S. Coale, K. H. and Anani, C. Y. (2018). Provenance, paleo-weathering and-redox signatures of estuarine sediments from Ghana, Gulf of Guinea. *Quat. Int.* 493, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.005>.
- Malick, B. M. L. and Ishiga, H. (2016). Geochemical classification and determination of maturity source weathering in beach sands of eastern San'in Coast, Tango Peninsula, and Wakasa Bay, Japan. *Earth. Sci. Res.* 5(1), 44-56.
- Maxbauer, D. P. Feinberg, J. M. and Fox, D. L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: a review of magnetic methods and challenges. *Earth Sci Rev.* 155, 28-48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>.
- Maxbauer, D. P. Feinberg, J. M. Fox, D. L. and Nater, E. A. (2017). Response of pedogenic magnetite to changing vegetation in soils developed under uniform climate, topography, and parent material. *Sci. Re.* 7(1), 17575. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17722-2>
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L. (1958). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clays Miner.* 7. 317–327. doi:10.1346/CCMN.1958.0070122.
- Mullins, C. E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science—a review. *Eur. J. Soil Sci.* 28, 223–246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x>
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Agron. Monger. vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 539–577.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 48, 1523–1534.
- Ohta, T., and Arai H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology*, 240: 280–297. 67.
- Owliaie, H.R. and Najafi Ghiri M. (2014). Effect of topography and land use on the soil magnetic susceptibility, Case study: Madvan Plain, Kohgilouye Province. *Journal of Soil and Water Science*, 40: 159-169. in Persian with English abstract.
- Owliaie, H.R. Heck R.J. and Abtahi A. (2006b). Distribution of magnetic susceptibility in Kohgilouye Boyerahmad soils, southwestern Iran. *Proceeding of 18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, Pennsylvania. USA.
- Quijano, L. Gaspar, L. López-Vicente, M. Chaparr, A.E. Machín, J. and Navas A. (2011). Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue, D10, 1-6. *Proceedings Tandil*, Argentina.

- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. In R. L. Rudnick, H. D. Holland, and K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (pp. 1–64). Elsevier–Pergamon, Oxford.
- Sarmast, M. Farpoor, M. H. and Boroujeni, I. E. (2017). Magnetic susceptibility of soils along a lithotoposequence in southeast Iran. *Catena*, 156, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.019>.
- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Broderson, W.D. (2006). *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 314p.
- Schwertmann, U. (1973). Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil. Sci.* 53 (2), 244–246.
- Shu, P. Li, B. Wang, H. Qiu, Y. Niu, D. Dianzhang, D. and An, Z. (2018). Geochemical characteristics of surface dune sand in the Mu Us Desert, Inner Mongolia, and implications for reconstructing the paleoenvironment. *Quat. Int.* 479, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.05.053>.
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. US Department of Agriculture Handbook 18.
- Soil Survey Staff, USDA. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Agriculture Handbook, Second Edition, No. 436. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12nd ed.). United States Department of Agriculture. NRCS.
- Sokolowska, Z., Alekseev, A., Skic, K. and Brzezinska, M. (2016). Impact of wastewater application on magnetic susceptibility in Terric Histosol soil. *International Agrophysics*, 30(1).
- Su, N. Yang, S. Y. Wang, X. D. Bi, L. and Yang, C. F. (2015). Magnetic parameters indicate the intensity of chemical weathering developed on igneous rocks in China. *Catena*, 133, 328-341. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.003>
- Thompson R. and Oldfield F. (1986). *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London. 227p.
- Torrent, J. Schwertmann, U. and Schulze, D. G. (1980). Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*. 23, 191–208. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(80\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0016-7061(80)90002-6).
- Tunçay, T., Dengiz, O., Bayramin, I., Kilic, S. and Baskan, O. (2019). Chemical weathering indices applied to soils developed on old lake sediments in a semi-arid region of Turkey. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(1), 60-72.
- USDA. (2014). *Keys to soil taxonomy*. Soil Survey Staff.
- Vodyanitskii, Y. N. (2010). Iron hydroxides in soils: A review of publications *Eur. J. Soil. Sci.* 43, 1244–1254. <https://doi.org/10.1134/S1064229310110074>
- Walkey, A. and Black, I. A. (1934). An examination of Degtiareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. *Soil Science Society of American Journal*, 79: 459-465.
- Xue, B., Huang, L., Li, X., Lu, J., Gao, R., Kamran, M., Fahad, S. (2022). Effect of Clay Mineralogy and Soil Organic Carbon in Aggregates under Straw Incorporation. *Agronomy*, 12(2), 534.
- Zhao, Y. Yang, S. Liu, J. T. Fan, D. Yang, R. J. Bi, L. and Chang, Y. P. (2017). Reconstruction of silicate weathering intensity and paleoenvironmental change during the late Quaternary in the Zhuoshui River catchment in Taiwan. *Quat. Int.* 452, 43-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2016.12.013>.
- Zhang, Y. (2019). Spatial variability of soil magnetic susceptibility under different scales: a case study of Xiangtan. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1176, No. 4, p. 042025). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1176/4/042025



Investigating Magnetic Susceptibility Distribution and Weathering Indices under Different Geomorphic Surfaces Chaldoran area

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

There are various weathering indices consisting of the Chemical index of weathering (CIW), Chemical Index of Alteration (CIA), Chemical Proxy of Alteration (CPA). Typically, the value of these indicators increases by increasing weathering intensity. Magnetic susceptibility is a property that can be measured in a short time and according to various studies has a good relationship with some physical, chemical, evolutionary properties, drainage conditions, weathering and in some cases land use type. Therefore, in the present study, different forms of iron, magnetic parameters and weathering indices in different geomorphic surfaces of Chaldoran have been studied. The objectives of this study include (1) investigating changes in various forms of iron and magnetic susceptibility of soil; (2) the effect of drainage, land use and human (agricultural) activities on changes in soil magnetic susceptibility; 3) Investigation of weathering indices of CIW, CIA and CPA at different geomorphic surfaces.

Material and Methods

Based on the study of the predominant geomorphic surfaces of the region, including the piedmont plain (pedons 5 and 7), mantled pediment (pedon 6), alluvial fan (pedon 2), plains (pedons 1.3,4,9), flood plain (pedon 8) in figure 1 and a visual interpretation of Google Earth satellite images, topographic maps and field visits, the initial geomorphic surfaces of the sampling areas were determined. A total of 60 soil profiles were dug by supervised random sampling in different soil series, taking into account the entire study area. Also selected according to field studies and laboratory results, important and effective land characteristics, number of indicator pods. All excavated excavations were described according to the Soil Survey Staff (1993) and classified according to the Comprehensive Soil Classification of the United States (Soil Taxonomy, 1999) and the Keys to Soil Taxonomy (2010). Among the excavated Pedons, nine representative Pedons were chosen that mostly composed of quaternary sediments in terms of geology of the study area. In some parts, it could also be seen as veins of Limestone, Gabbro, Diorite and Basalt. Afterwards, soils were classified according to the soil taxonomy 2014 system. Sampling was performed in each control soil from top to bottom horizons and magnetic susceptibility was measured in all horizons. The soil samples were then dried at room temperature and passed through a 2 mm sieve after crushing. After that, the Soil Organic Carbon (SOC) using the Walkley-Black wet oxidation method, soil texture by pipette method, calcium carbonate equivalent by neutralization method, EC and pH of saturated extracts were measured using EC meter and pH meter, respectively. Besides, the amount of gypsum was measured using acetone method. Free iron (Fed) using dithionate bicarbonate citrate, non-crystalline iron (Feo) using ammonium acid oxalate, and total iron using nitric-perchloric acid (1:3) were extracted. The concentration of extracted iron was determined by utilizing the atomic absorption of Perkin Elmer Analyst 800. Furthermore, the magnetic susceptibility of soil (χ) at low frequencies 0.46 kHz, high frequency 4.6 kHz, (χ) was measured using MS2B Bartington magnetic susceptibility system.

Results and Discussion

The range of χ_{lf} of soils ranged from $42.90 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (Horizon Ap, Pedon 1) to $1053.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (Horizon C1, Pedon 1). The average χ_{lf} in the geomorphic units of the area is obtained in the form of flood plain > alluvial fan > mantled pediment > plain > piedmont plain. The χ_{fd} values of the studied soil samples were in the range of 0.07- 3.50%.

The range of changes in total iron is from 12.05 g kg⁻¹ (Horizon C2, Pedon 1) to 42.60 kg⁻¹ (Horizon Bss2, Pedon 9). Also, the mean of total iron in the studied Pedons is in the form of mantled pediment > alluvial fan > flood plain > piedmont plain = plain, respectively. Moreover, the mean Fed values in the studied geomorphic units were in the form of mantled pediment > plain > piedmont plain > flood plain > alluvial fan, respectively. The amount of Feo in the studied soils varied from 0.09 g kg⁻¹ (Horizon C2, Pedon 1) to 0.75 g kg⁻¹ (Horizon BC, Pedon 4). Furthermore, the average value of Feo in geomorphic units is flood plain > piedmont plain > alluvial fan > mantled pediment > plain, respectively. The range of changes in the Feo/Fed ratio in the studied geomorphic units was from 0.08 to 0.01. In addition, the range of changes in χ_{lf} value varied from $42.90 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ on the Horizon Ap to $1053.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ on the Horizon C1.

The range of changes in CIA index was from 60.82 (horizon C2, pedon 1) to 78.77 (horizon Bg, pedon 3). Moreover, the highest and lowest mean of CIA index were observed in flood plain and mantled pediment geofoms, respectively. Therefore, all horizons of excavated Pedon in the area have a CIA between 50 and 80, indicating that the soils of the area are in the phase of weak to moderate weathering. Another meteorological index used is the CPA index, which is somewhat complementary to the CIA index. The highest and lowest mean values of CPA index were observed in flood plain and mantled pediment geomorphic units, respectively. Meanwhile, the value of CIW index varied from 65 (horizon C2, pedon 1) to 87.20 (horizon Bg pedon 3).

Conclusion

The aim of this study was to evaluate the effects of soil formation factors on the amount and vertical distribution of magnetic susceptibility. Nine control excavations were excavated in five dominant geomorphic units of the region, including slope plain, covered pediment, alluvial fan, plain, flood plain in West Azerbaijan province located in Iran. The obtained results of this paper confirmed that the parent materials, topography along with drainage, and land use status factors, had been known as the most important factors affecting the formation, evolution, and magnetic susceptibility of different geoforms in Chaldoran area. In most of the studied Pedons, the amount of magnetic susceptibility χ increased by increasing depth, whereas in some Pedons, the amount of χ was maximal due to the transfer of fine ferrimagnetic particles with clay particles in Horizon B. The soil drainage conditions and moisture regime had also greatly influenced both the magnetic susceptibility and Fed distribution. Overall, the aquic conditions in the studied soils reduced the susceptibility of the Fed rate. Meanwhile, the ferrimagnetic particles forming the soils of the area were of the type of multi-zone coarse particles ($\mu\text{m} > 110$). Furthermore, the CIA, CIW and CPA weathering indices revealed a weak to moderate weathering phase in the area. Nevertheless, to better understand the magnetic properties of soils under different geoforms, it is better to explore the relationship of other magnetic parameters in the area.

Keywords: Iron, Pedogenic Iron, Drainage, Land Use.