

Investigating temperature-dependent magnetic susceptibility and color measurement changes in a loess-paleosol sequence, Northern Golestan province, Iran

Zaniar Amiri^{*1}, Farhad Khormali², Manfred Frechen³, Martin Kehl⁴,
Christian Zeeden⁵

1. Corresponding Author, Dept. of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zaniar.amiri2020@gmail.com
2. Dept. of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: khormali@yahoo.com
3. Dept. of Geochronology, LIAG Institute, Hannover, Germany. E-mail: manfred.frechen@leibniz-liag.de
4. Dept. of Geomorphology, University of Cologne, Cologne, Germany. E-mail: martin.kehl@uni-koeln.de
5. Dept. of Geophysics, LIAG Institute, Hannover, Germany. E-mail: christian.zeeden@leibniz-liag.de

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.01.2023
Revised: 07.04.2023
Accepted: 07.04.2023

Keywords:
Climate change,
Iron oxide,
Loess,
Quaternary

ABSTRACT

Background and Objectives: During the Quaternary period, mid to high-latitude areas were affected by loess deposition. In Iran's northern and northeastern regions, significant loess deposits are prevalent and distributed throughout the Iranian Loess Plateau and along the northern foothills of the Alborz Mountains. Intercalated within these loess deposits are paleosols, formed during warm and moist climatic conditions (interglacial period). These paleosols offer an opportunity to study the climatic and environmental changes that occurred during the Quaternary period. Understanding the relationship between loess deposition and paleosol formation can offer significant insights into the mechanisms that drive changes in global climate and how they affect the Earth's geology and ecosystems. Studies have shown that loess sediments and loess-derived soils contain different concentrations of iron minerals such as hematite, iron oxyhydroxide, and goethite. These minerals are susceptible to environmental changes, and evaluating the changes of these minerals in loess-paleosol sequences can be a valuable indicator for studying paleoenvironmental changes. The two principal minerals that cause color and magnetic susceptibility changes in loess-paleosol sequences are goethite and hematite. Therefore, the assessment of loess-paleosol sequences from the aspect of magnetic and colorimetric parameters provides the possibility to identify paleoenvironmental and climatic changes. The main goal of this research is to investigate the changes in iron oxides in the loess-paleosol sequence in the east of Golestan province using colorimetric techniques and temperature-dependent magnetic susceptibility in order to provide enough information for reconstructing the paleoclimatic conditions during the formation of paleosols.

Materials and Methods: Sampling was performed from the loess-paleosol sequence in the eastern Golestan province for each loess and paleosol horizon. Initial colorimetric and magnetic susceptibility measurements were carried out respectively for 1345 and 24 samples at LIAG Institute in Germany. Color measurements were carried out with a spectrophotometer machine that covered the visible light range. The temperature magnetic susceptibility was carried out using the 20-700 °C temperature range in an argon atmosphere to minimize oxidation.

Results and Discussion: According to the results of this study, we can mention the identification of iron minerals in loess and paleosol samples using colorimetric analysis. Iron minerals such as hematite, goethite, and maghemite can be detected at wavelengths 565, 435, and 595 nm, respectively. Colorimetric results showed that the ratio of hematite to goethite of paleosols has increased compared to loess sediments in the study area, which indicates the increase in precipitation and soil moisture during the interglacial period. The heating curve (temperature-dependent magnetic susceptibility) of loess samples at 560-590 degrees Celsius showed a sharp decrease due to magnetite minerals in these samples. At the same time, this happens in paleosols at a temperature of 300-350 degrees Celsius, which is due to the loss of the maghemite mineral formed during the interglacial period. The results showed that the decrease in the heating curve in paleosols indicates the increase in the intensity of soil-forming processes.

Conclusion: The results of this study showed that iron minerals such as magnetite, maghemite, hematite, and goethite in loess and paleosols play an essential role in magnetic properties and soil color. Also, the increase in the presence of hematite and maghemite in paleosols indicates the increase in the intensity of soil formation processes and humidity during the formation of paleosols. The results of this research showed that the colorimetric technique, along with temperature-dependent magnetic susceptibility, can be one of the fastest and most accurate methods in studying and identifying paleosols.

Cite this article: Amiri, Zaniar, Khormali, Farhad, Frechen, Manfred, Kehl, Martin, Zeeden, Christian. 2024. Investigating temperature-dependent magnetic susceptibility and color measurement changes in a loess-paleosol sequence, Northern Golestan province, Iran. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (4), 133-144.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.21310.2098

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



بررسی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی و رنگ‌سنجی در یک توالی لس - پالتوسول، شرق استان گلستان، ایران

زانیا امیری^{۱*}، فرهاد خرمالی^۲، مانفرد فرشن^۳، مارتین کهل^۴، کریستین زیدن^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zaniar.amiri2020@gmail.com
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: khormali@yahoo.com
۳. گروه ژئوکرونولوژی موسسه لیگ، هانوفر، آلمان. رایانامه: manfred.frechen@leibniz-liag.de
۴. گروه ژئومورفولوژی دانشگاه کلن، کلن، آلمان. رایانامه: martin.kehl@uni-koeln.de
۵. گروه ژئوفیزیک موسسه لیگ، هانوفر، آلمان. رایانامه: christian.zeeden@leibniz-liag.de

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳</p> <p>واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، تغییر اقلیم، کوآترنر، لس</p>	<p>سابقه و هدف: در طول دوره کوآترنر، مناطق میانی تا عرض جغرافیایی بالا تحت تأثیر رسوب لس قرار گرفتند. در نواحی شمالی و شمال شرقی ایران، نهشته‌های لس قابل توجهی وجود دارد که در امتداد دامنه شمالی رشته‌کوه‌های البرز و فلات لسی ایران پراکنده شده است. درون این نهشته‌های لس، پالتوسول‌هایی هستند که در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب (دوره بین یخبندان) تشکیل شده‌اند. این پالتوسول‌ها تغییرات اقلیمی و محیطی رخ داده در دوره کوآترنر را نشان می‌دهند. درک رابطه بین رسوب لس و تشکیل پالتوسول‌ها می‌تواند بینش قابل توجهی را در مورد فرایندهایی که باعث تغییرات در آب‌وهوای جهانی می‌شود و چگونگی تأثیر آن‌ها بر زمین و اکوسیستم ارائه دهد. بررسی‌ها نشان داده است که رسوبات لسی و خاک‌های مشتق از آن غلظت‌های متفاوتی از کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت، اکسی‌هیدروکسید آهن و گوتیت را در خود دارند. کانی‌های آهن‌دار به تغییرات محیطی بسیار حساس هستند و بررسی تغییرات این کانی‌ها در توالی‌های لس - پالتوسول می‌تواند شاخصی ارزشمند برای مطالعه تغییرات محیطی گذشته باشد. دو کانی اصلی که باعث ایجاد تغییر رنگ پذیرفتاری مغناطیسی در توالی‌های لس-پالتوسول می‌شوند گوتیت و هماتیت است. بنابراین بررسی این توالی‌ها از جنبه پارامترهای مغناطیسی و رنگ‌سنجی این امکان را فراهم می‌کند که تغییرات محیطی و اقلیمی گذشته را در توالی‌های لس - پالتوسول شناسایی کرد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات اکسیدهای آهن در توالی لس - پالتوسول بلوچ‌آباد در شرق استان گلستان با استفاده از تکنیک‌های رنگ‌سنجی و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما به منظور ارائه اطلاعات کافی برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته در طول شکل‌گیری پالتوسول‌ها است.</p>

مواد و روش‌ها: نمونه‌برداری از توالی لس- پالئوسول بلوچ‌آباد در شرق استان گلستان، برای هر افق لس و پالئوسول انجام شد. بررسی رنگ‌سنجی و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما به ترتیب برای ۱۳۴۵ و ۲۴ نمونه در مؤسسه لیاق، آلمان انجام شد. رنگ‌سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در محدوده نور مرئی و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما نیز در محدوده دمایی ۲۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در محیط حاوی گاز آرگون برای جلوگیری از اکسیداسیون انجام شد.

نتایج و بحث: از جمله نتایج این مطالعه می‌توان به شناسایی کانی‌های آهن دار در نمونه‌های لس و پالئوسول با استفاده از آنالیز رنگ‌سنجی اشاره کرد. کانی‌های آهن دار مانند هماتیت، گنویت و ماگنیت را به ترتیب می‌توان در طول موج‌های ۵۶۵، ۴۳۵ و ۵۹۵ نانومتر شناسایی کرد. نتایج رنگ‌سنجی نشان داد که نسبت هماتیت به گنویت پالئوسول‌ها در مقایسه به رسوبات لسی در منطقه مورد مطالعه افزایش داشته است که نشان‌دهنده افزایش بارندگی و رطوبت خاک در دوران بین‌یخچالی است. منحنی گرمایشی (پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما) نمونه‌های لس در دمای ۵۹۰-۵۶۰ درجه سانتی‌گراد کاهش شدیدی را نشان داد به دلیل وجود کانی مگنتیت در این نمونه‌ها است. در حالی که این اتفاق در پالئوسول‌ها در دمای ۳۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد که به دلیل از بین رفتن کانی ماگنیت تشکیل شده در دوران بین‌یخچالی است. نتایج نشان داد که هرچه مقدار کاهش منحنی گرمایشی در پالئوسول‌ها بیش‌تر باشد نشان‌دهنده افزایش شدت فرایندهای خاکساز است.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت، ماگنیت، هماتیت و گنویت در لس و پالئوسول‌ها نقش مهمی در ایجاد خواص مغناطیسی و رنگ خاک دارند. هم‌چنین افزایش حضور هماتیت و ماگنیت در پالئوسول‌ها نشان‌دهنده افزایش شدت فرایندهای خاکساز و رطوبت در زمان تشکیل پالئوسول‌ها است. نتایج این پژوهش نشان داد که تکنیک رنگ‌سنجی و در کنار پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما می‌تواند یکی از روش‌های سریع و دقیق در مطالعه و شناسایی پالئوسول‌ها باشد.

استناد: امیری، زانیار، خرما، فرهاد، فرش، مانفرد، کهل، مارتین، زیدن، کریستین (۱۴۰۲). بررسی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی و رنگ‌سنجی در یک توالی لس- پالئوسول، شرق استان گلستان، ایران. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۳ (۴)، ۱۳۳-۱۴۴.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.21310.2098



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

یکی از وقایع مهم دوره کوتاه‌تر تکرار دوره‌های یخچالی و بین‌یخچالی است که در دوران یخچالی رسوبات لسی و در دوره‌های بین‌یخچالی پالئوسول‌ها شکل گرفته است (۱). رسوبات لسی شکل گرفته در دوره کوتاه‌تر به صورت وسیعی در شمال و شمال شرق ایران در دامنه شیب شمالی رشته‌کوه البرز پراکنده شده‌اند که منعکس‌کننده چندین چرخه اقلیمی است (۲). ارتباط رسوبات لسی و خاک‌های مشتق شده از آن با تغییرات اقلیمی از دیرباز تاکنون مورد توجه بسیاری از دانشمندان بوده است، زیرا این رسوبات یکی از مهم‌ترین بایگانی‌های زمینی در رابطه با تغییرات اقلیمی است (۳ و ۴). برخلاف بایگانی دریچه‌ها و دیگر سوابق زمینی که توزیع آن‌ها پراکنده است، پیوستگی موجود در توالی‌های لس پالئوسول آن‌ها را به آرشپو ارزشمندی از حفظ تغییرات محیطی گذشته در رژیم‌های آب‌وهوای غالب آن زمان تبدیل کرده است (۵). به همین دلیل شواهد ثبت شده در پالئوسول‌ها می‌تواند نقش مهمی در بازسازی شرایط محیطی گذشته داشته باشند (۶).

پذیرفتاری مغناطیسی در خاک تحت تأثیر شرایط اقلیمی می‌تواند تغییر کند. از این رو می‌توان از آن به عنوان یک شاخص آب‌وهوایی نام برد که معمولاً نشان‌دهنده مقدار کانی‌های مغناطیسی موجود در نمونه است، هرچه مقدار پذیرفتاری مغناطیسی بالاتر باشد نشان‌دهنده غلظت بیشتر کانی‌های مغناطیسی است (۳ و ۷). بیشتر مطالعات اولیه در رابطه با پذیرفتاری مغناطیسی محدود به پذیرفتاری مغناطیسی و وابسته به فرکانس بوده است که این خصوصیات مغناطیسی ایجاد شده در رسوبات و خاک‌ها تحت تأثیر عواملی مانند اکسیدهای آهن، کانی‌های رسی حاوی آهن، خصوصیات به ارث رسیده از ژئوشیمی مواد مادری است هستند یا ممکن است این خصوصیات

طی فرآیندهای خاکسازي به وجود آمده باشند (۸). کانی‌های مغناطیسی مانند گنویت، هماتیت، مگهمایت و مگنتیت در تعادل با مجموعه عوامل فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی در خاک‌های با زهکشی مناسب یا نسبتاً مناسب در اثر هوادیدگی و پدوژنز تشکیل می‌شوند که با بررسی مغناطیسی می‌توان آن‌ها را به آسانی شناسایی کرد و غلظت نسبی آن‌ها را محاسبه نمود (۹). در اثر هوادیدگی شیمیایی رسوبات لسی کانی‌های مغناطیسی مانند مگنتیت و مگهمایت به وجود می‌آیند که با آنالیز پذیرفتاری مغناطیسی لس و پالئوسول‌ها قابل شناسایی هستند (۱۰ و ۱۱). ماهر و تامپسون (۱۹۹۵) برای اولین بار بیان کردند که میزان پذیرفتاری مغناطیسی با مقدار بارندگی و رطوبت که یکی از عوامل اثرگذار بر فرایندهای پدوژنیک در زمان تشکیل پالئوسول‌ها مرتبط است (۱۲). چرخه اکسید و احیا با فراهم کردن شرایط برای تبدیل اکسیدهای آن به فرومگناطیس‌ها نقش مؤثری در میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک دارند (۱۳). کانی‌های فرومگناطیس در شرایط دمای بالا در سطح خاک غالباً با آزبادی گنویت و مگهمایت تشکیل می‌شود (۱۴). اندازه‌گیری خصوصیات مغناطیسی در رسوبات لسی ایران، نشان‌دهنده افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در افق‌های خاکی در مقایسه با افق‌های بدون تکامل زیرین آن‌ها است (۲). غفارپور و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی خصوصیات مغناطیسی توالی لس پالئوسول مبارک‌آباد در شرق استان گلستان نشان دادند که افق‌های Bt در پالئوسول‌ها درجه توسعه‌یافتگی بیشتری دارد که نشان‌دهنده بارندگی بیشتر در زمان شکل‌گیری آن‌هاست (۱۵). غفارپور و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که منحنی‌های گرمایش و سرمایش (پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به دما) می‌تواند بیان‌کننده شدت فرایندهای خاکساز در توالی‌های لس - پالئوسول باشد (۱۶).

گرفته است (شکل‌های ۱ و ۲). میانگین دمای هوای سالیانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالیانه حدود ۴۵۰ میلی‌متر در سال است. ارتفاع توالی مورد مطالعه حدود ۵۵ متر است که با حفر پروفیل پله‌ای در دامنه شمالی تپه مورد بررسی قرار گرفت که شامل ۱۲ لایه پالتوسول (با احتساب خاک سطحی) است که لایه‌های لسی را از هم جدا کرده است. خاک سطحی بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی به صورت تیپیک کلسی زریپت طبقه می‌شود.

رنگ‌سنجی: در دهه گذشته آنالیزهای رنگ‌سنجی با شناسایی بصری نمودارهای رنگی مانسل^۱ انجام شده است اما اهمیت آن برای بازسازی اقلیم گذشته کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (۲۰ و ۲۱). اسپکتروفتومتر با ارائه مقادیر عددی معادل روشنایی (از صفر تا ۱۰۰ که معادل سیاه‌وسفید است)، قرمزی (از منفی که نشان‌دهنده رنگ سبز است تا مثبت که نشان‌دهنده رنگ قرمز است متغیر است) و آبی (از منفی که معادل رنگ آبی است شروع می‌شود و تا مثبت که نشان‌دهنده رنگ زرد است ادامه دارد) از نمونه‌ها باعث حذف عدم قطعیت‌های موجود در رنگ‌سنجی مانسل شد (۲۲).

اندازه‌گیری نور منعکس شده پراکنده^۲ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر کونیکا به روش بالسام و دیتون (۱۹۹۶) بر روی ۱۳۴۵ نمونه لس و پالتوسول در موسسه لیاگ (آلمان) انجام شد (۲۳). طیف نوری مورد استفاده شده در این مطالعه از بازه ۳۶۰ تا ۷۴۰ نانومتر بود. برای شناسایی اکسیدهای آهن با استفاده از نتایج رنگ‌سنجی مشتق اول^۳ برحسب درصد در نانومتر محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل کانی‌های اکسید آهن به دلیل غلظت کم آن‌ها در رسوبات و سنگ‌ها بسیار سخت است، به‌طور مثال غلظت هماتیت معمولاً کم‌تر از ۰/۳ درصد وزنی است که این مقدار در رنگ قرمز ایجاد شده در نمونه بسیار مهم است به‌طوری‌که دانشمندان بیان کردند که کم‌تر از ۰/۱ درصد وزنی هماتیت باعث ایجاد رنگ قرمز می‌شود (۱۷). این کانی‌ها معمولاً با روش‌های شیمیایی یا به‌وسیله پراش اشعه ایکس شناسایی می‌شوند، آنالیز شیمیایی به دلیل کند بودن و دشواری در تحلیل نتایج دقت بالایی ندارد، شناسایی به روش پراش اشعه ایکس نیز به تجهیزات گران‌قیمت نیاز دارد و در بهترین شرایط فقط می‌توان اکسیدهای آهن را در غلظت‌های بیش‌تر از ۰/۲ درصد شناسایی کند. در سال‌های اخیر پژوهش‌گران برای شناسایی و مطالعه اکسیدهای آهن و سایر مواد معدنی از تکنیک‌های رنگ‌سنجی استفاده کردند (که مشکلات تکنیک‌های دیگر را ندارد) و بیان کردند که رنگ‌های نارنجی، زرد و قرمز در خاک توسط مواد معدنی حاوی آهن کنترل می‌شوند (۷، ۹، ۱۸ و ۱۹). بنابراین آنالیز نتایج رنگ‌سنجی می‌تواند به شناسایی اکسیدهای آهن‌دار در خاک کمک کند.

هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات اکسیدهای آهن در توالی لس- پالتوسول بلوچ‌آباد در شرق استان گلستان با استفاده از تکنیک‌های رنگ‌سنجی و پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی به‌منظور بازسازی شرایط اقلیمی گذشته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: موقعیت جغرافیایی توالی لس- پالتوسول بلوچ‌آباد در عرض شمالی ۳۷° ۳۰' ۱۳" و طول شرقی ۲۶° ۳۳' ۵۵" با ارتفاع ۱۷۰ متر از سطح دریا در ۲۰ کیلومتری شرق شهرستان کلالة در استان گلستان و در پای شیب شمالی رشته‌کوه البرز قرار

1- Munsell

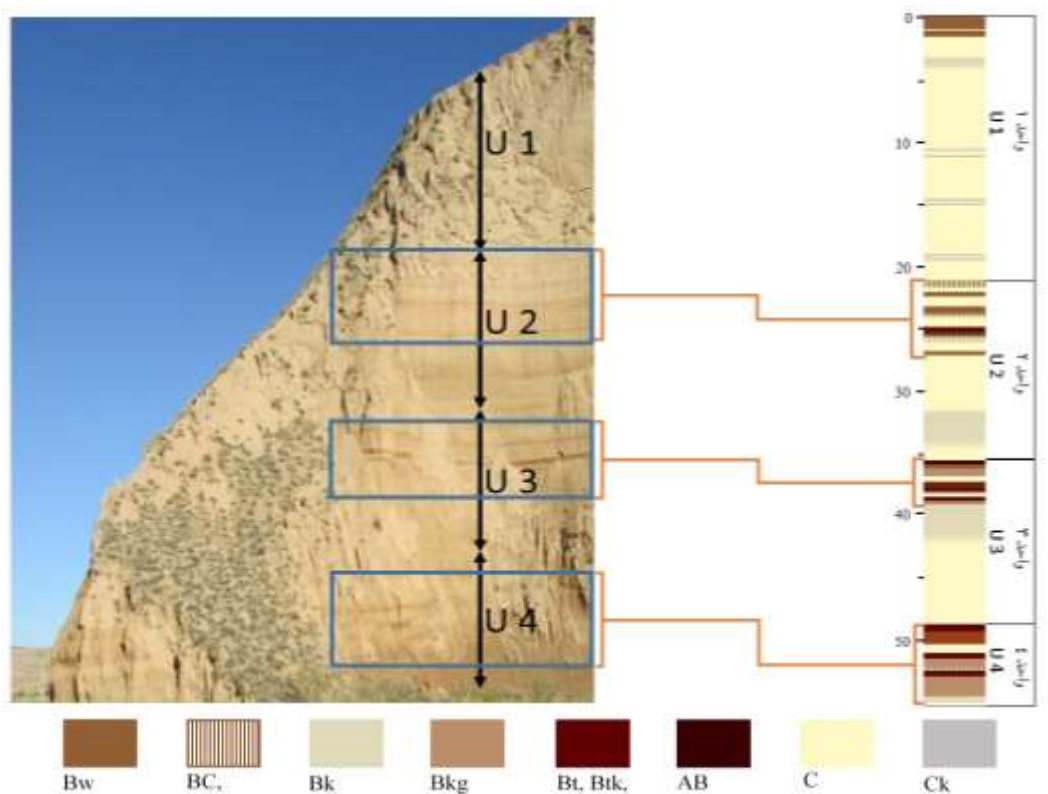
2- Diffuse reflectance spectrophotometer

3- The first derivative



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه پراکنش لس‌های شمال شرق گلستان، ایران.

Figure 1. The location of the studied area in the loess distribution map of northeastern Golestan, Iran.



شکل ۲- چینه‌نگاری پروفیل مورد مطالعه با عمق حدود ۵۵ متر.

Figure 2. Stratigraphy of the studied profile with a depth of about 55 meters.

نمودار با افزایش دما شدت بیشتری دارد. کاهش نزولی نمودار در دمای ۵۶۰ تا ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد به علت وجود کانی مگنتیت است و شدت زیاد در کاهش این منحنی نشان‌دهنده این است که مگنتیت نقش اصلی را در پذیرفتاری مغناطیسی نمونه دارد. پژوهش‌گران بیان کردند که با افزایش مقدار بارندگی (افزایش شدت فرایندهای خاکساز) شیب سقوط (نزول منحنی گرمایشی) شدت بیشتری به خود می‌گیرد بنابراین هرچه شیب سقوط منحنی بیشتر باشد به معنی شرایط محیطی مطلوب‌تر برای افزایش شدت فرایندهای خاکساز بوده و در نتیجه درجه تکامل افزایش می‌یابد (۲۴ و ۲۵). در منحنی گرمایشی مربوط به نمونه‌های پالئوسول روند کاهش نزولی نمودار در حرارت حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که به دلیل وجود کانی ماگماتیت به وجود آمده طی فرایندهای خاکساز است، با افزایش حرارت به دماهای بیش‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ماگماتیت خاکساز به هماتیت تبدیل می‌شود. از جمله فرضیه‌هایی که می‌توان برای تولید ماگماتیت در پالئوسول‌ها و با شدت بسیار کم‌تر در لایه‌های لسی بیان کرد این است که در طول فصل سرد با افزایش بارندگی رطوبت خاک افزایش می‌یابد و در طول فصل گرم با افزایش دما و کاهش بارندگی شرایط برای تشکیل درجای ماگماتیت فراهم می‌شود که با مدل ارائه‌شده توسط ماهر (۱۹۹۸) در مورد تشکیل فرم‌های مختلف کانی‌های مغناطیسی در خاک مطابقت دارد (۲۶). هم‌چنین یافته‌های دانشمندان نشان می‌دهد که بارندگی و متعاقب آن رطوبت خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در غلظت اکسیدهای آهن خاک دارد، اما تغییرات فصلی دما و تبخیر و تعرق نیز با تأثیر گذاشتن بر به وجود آمدن شرایط اکسایشی و کاهش در ریز محیط^۲ خاک از اهمیت به‌سزایی

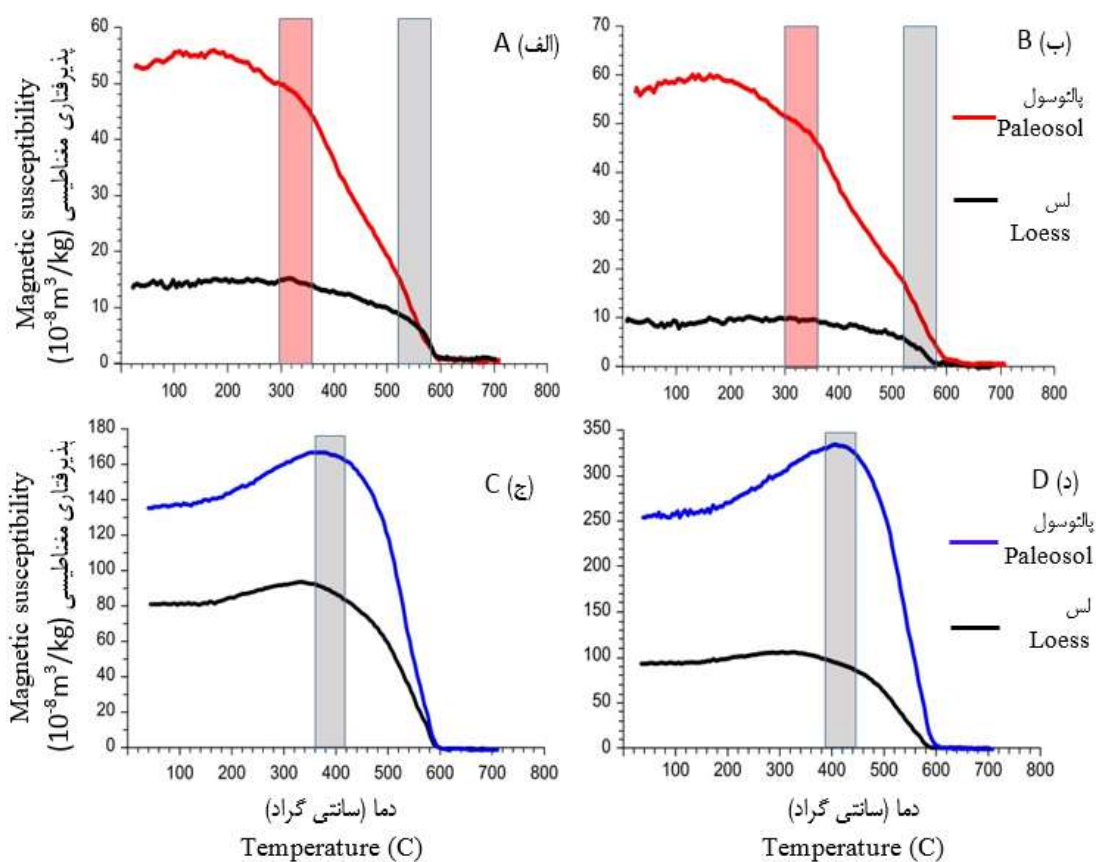
پذیرفتاری مغناطیسی: برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی (X-T) ۲۴ نمونه لس و پالئوسول انتخاب شد، که حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم از هر نمونه که به‌وسیله بوته چینی پودر شده بود استفاده شد. منحنی حرارتی با استفاده از دستگاه کاپا بریج^۱ مجهز به کوره حرارت بالا سی اس-۳ (CS-3) در فرکانس ۹۷۶ هرتز در مؤسسه لیگ (آلمان) اندازه‌گیری شد. دمای کوره حرارت بالا از ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای اتاق) شروع به افزایش حرارت می‌کند تا به دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد و سپس مجدداً نمونه را تا رسیدن به دمای اتاق سرد می‌کند، برای جلوگیری از وقوع واکنش‌های جانبی تمام این فرایند در محیط اشباع‌شده با گاز آرگون صورت می‌گیرد، هم‌چنین میدان مغناطیسی هنگام اندازه‌گیری ۳۰۰ آمپر بر متر بود. قبل از شروع اندازه‌گیری برای تعیین پذیرفتاری مغناطیسی پس‌زمینه‌ای وابسته دما دستگاه با لوله خالی و بدن نمونه خاک کنترل شد، سپس پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و برای به‌دست آوردن پذیرفتاری واقعی نمونه‌ها عدد به‌دست‌آمده از پذیرفتاری مغناطیسی پس‌زمینه تفریق شد.

نتایج و بحث

شکل ۳ نشان می‌دهد که منحنی گرمایش نمونه‌های لس (الف و ب نمودار سیاه‌رنگ) در حرارت حدود ۵۶۰ تا ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد پذیرفتاری مغناطیسی شروع به کاهش داشته و این روند با افزایش دما تا صفر شدن مقدار آن ادامه دارد، درحالی‌که کاهش منحنی گرمایشی برای پالئوسول‌ها (الف و ب نمودار قرمز رنگ) در حرارت ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است و افزایش شیب کاهش

قله منحنی برای هر دو نمونه لس و پالتوسول در حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است و با کاهش دما شیب نمودار تغییرات شدیدی را نشان نمی‌دهد علت اصلی وجود قله منحنی در حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تولید مجدد کانی‌های مغناطیسی از کانی‌های سیلیکاته آهن‌دار مانند کلرایت است (۱۶ و ۲۹).

برخوردار هستند (۲۷ و ۲۸). از دیگر موارد قابل توجه در نمودار گرمایشی این است که در حرارت ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد نمودار یک پیک کاهشی دیگر را نشان می‌دهد که به علت وجود کانی هماتیت به ارث رسیده از مواد مادری است. شکل ۳ (ج) و (د) نشان‌دهنده منحنی سرمایشی برای دو نمونه لس و پالتوسول است و همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد

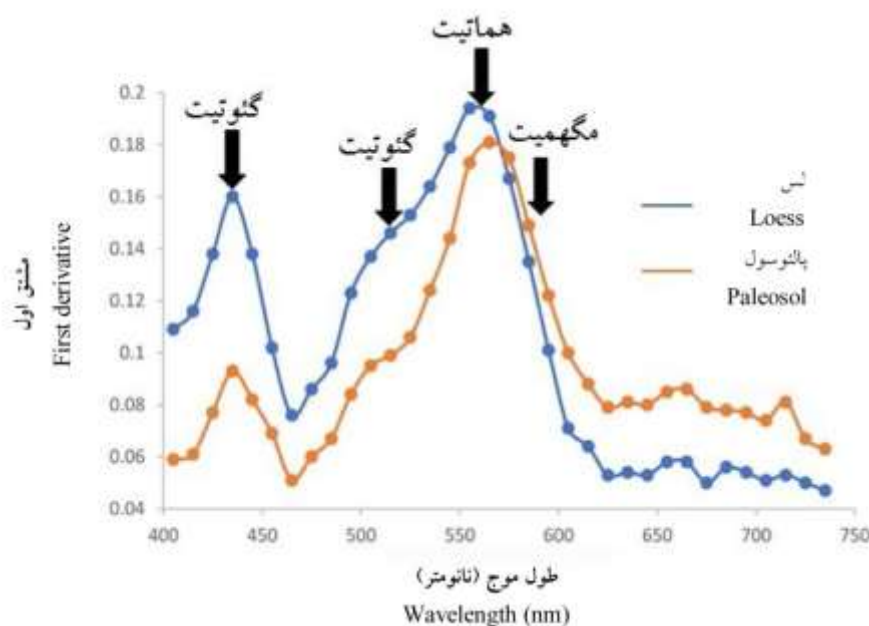


شکل ۳- منحنی گرمایش (الف و ب) و سرمایشی (ج و د) را در ۲ نمونه لس و ۲ نمونه پالتوسول.

Figure 3. Heating (A and B) and cooling (C and D) curves in 2 loess and paleosol.

توالی لس پالتوسول منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

نمودار مشتق اول حاصل از داده‌های رنگ‌سنجی برای یک نمونه لس و پالتوسول به‌عنوان نماینده‌ای از



شکل ۴- مقادیر مشتق اول از دو نمونه لس و پالئوسول.

Figure 4. Values of the first derivative of two loess and paleosol samples.

جدول ۱ نشان‌دهنده نسبت هماتیت به گئوتیت است که این نسبت در پالئوسول‌ها بیش‌تر از لایه‌های لسی است، که می‌توان این‌گونه تفسیر کرد در اثر افزایش بارندگی و رطوبت خاک هماتیت تشکیل شده است بنابراین می‌توان گفت که این نسبت عمدتاً از چرخه یخبندان/ بین یخبندان پیروی می‌کند.

بررسی منابع نشان داد که قله ۵۶۵ نانومتر در منحنی رنگ‌سنجی مربوط به هماتیت است، هم‌چنین دو قله در ۴۳۵ و ۵۳۵ نانومتر نشان‌دهنده کانی مغناطیسی گئوتیت و قله ۵۹۵ نانومتر نشان‌دهنده حضور مگهمیت است. هم‌چنین برای محاسبه نسبت هماتیت به گئوتیت از مقادیر شدت در ۵۶۵ نانومتر به ۴۳۵ نانومتر استفاده شد (۳۰).

جدول ۱- نسبت هماتیت به گئوتیت در پالئوسول‌ها و لایه لسی زیر آن.

Table 1. The ratio of hematite to goethite in paleosols and its underlying loess layers.

واحد Unit	1	2	3	4
پالئوسول Paleosol	1.1	1.26	1.29	1.44
لس Loess	1.01	1.21	1.13	1.39

مورد استفاده قرار گیرد (۱۶). هم‌چنین مقدار نسبت هماتیت به گئوتیت از واحد یک به واحد چهار روند افزایشی را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش شدت خاکساز است.

غفارپور و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی نسبت هماتیت به گئوتیت در یک توالی لس پالئوسول بیان کردند که این نسبت می‌تواند به‌منزله یک شاخص خشک/مرطوب برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته

منابع

1. Liu, T., Ding, Z., & Rutter, N. (1999). Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quaternary Science Reviews*, 18 (10), 1205-1212. doi: [10.1016/S0277-3791\(98\)00110-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00110-3).
2. Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., & Skowronek, A. (2009). Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran. *Quaternary International*, 198 (1-2), 220-233. doi: [10.1016/j.quaint.2008.12.012](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.012).
3. Maher, B. A. (2016). Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 154, 23-84. doi: [10.1016/j.quascirev.2016.08.004](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.004).
4. Retallack, G. (1988). Field recognition of paleosols. *Geological Society of America, Special Paper* 216, 1-19. doi: [10.1130/SPE216-p1](https://doi.org/10.1130/SPE216-p1).
5. Marković, S. B., Stevens, T., Kukla, G. J., Hambach, U., Fitzsimmons, K. E., Gibbard, P., ... Svirčev, Z. (2015). Danube loess stratigraphy-Towards a pan-European loess stratigraphic model. *Earth-Science Reviews*, 148, 228-258. doi: [10.1016/j.earscirev.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.005).
6. Sheldon, N. D., & Tabor, N. J. (2009). Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth-Science Reviews*, 95 (1), 1-52. doi: [10.1016/j.earscirev.2009.03.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.03.004).
7. Song, Y., Fang, X., King, J. W., Li, J., Naoto, I., & An, Z. (2014). Magnetic parameter variations in the Chaona loess/paleosol sequences in the central Chinese Loess Plateau, and their significance for the middle Pleistocene climate transition. *Quaternary Research*, 81 (3), 433-444. doi: [10.1016/j.yqres.2013.10.002](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.10.002).
8. Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & 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-Science Reviews*, 155, 28-48. doi: [10.1016/j.earscirev.2016.01.0149](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.0149).
9. Balsam, W., Ji, J., & Chen, J. (2004). Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility. *Earth and Planetary Science Letters*, 223 (3), 335-348. doi: [10.1016/j.epsl.2004.04.023](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.023).
10. Heller, F., & Evans, M. E. (1995). Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 33 (2), 211-240. doi: [10.1029/95RG00579](https://doi.org/10.1029/95RG00579).
11. Evans, M. E., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Elsevier, 303p.
12. Maher, B. A., & Thompson, R. (1995). Paleorainfall Reconstructions from Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosols. *Quaternary Research*, 44 (3), 383-391. doi: [10.1006/qres.1995.1083](https://doi.org/10.1006/qres.1995.1083).
13. Tite, M. S., & Linington, R. E. (1975). Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils. *Nature*, 256 (5518), 565-566. doi: [10.1038/256565a0](https://doi.org/10.1038/256565a0).
14. Mullins, C. E. (1977). Magnetic Susceptibility of the Soil and Its Significance in Soil Science – a Review. *Journal of Soil Science*, 28 (2), 223-246. doi: [10.1111/j.1365-89.1977.tb02232.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-89.1977.tb02232.x).
15. Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Karimi, A., & Ayoubi, S. (2016). Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran. *Quaternary Research*, 86 (1), 95-109. doi: [10.1017/S0033589400039740](https://doi.org/10.1017/S0033589400039740).
16. Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Forman, S. L., Cheng, L., & Song, Y. (2021). The formation of iron oxides and magnetic enhancement mechanisms in northern Iranian loess-paleosol sequences: Evidence from diffuse reflectance spectrophotometry and temperature dependence of magnetic susceptibility. *Quaternary International*, 589, 68-82. doi: [10.1016/j.quaint.2021.02.019](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.02.019).
17. Deaton, B. C., & Balsam, W. L. (1991). Visible Spectroscopy-A Rapid Method for Determining Hematite and Goethite Concentration in Geological Materials: Research method paper. *Journal of*

- Sedimentary Research*, 61 (4). doi: **10.0406/0628**.
18. Schwertmann, U. (1993). Relations Between Iron Oxides, Soil Color, and Soil Formation. In *Soil Color* (pp. 51-69). John Wiley & Sons, Ltd. doi: **10.2136/sssaspepub31.c4**.
 19. Torrent, J., Liu, Q., Bloemendal, J., & Barrón, V. (2007). Magnetic Enhancement and Iron Oxides in the Upper Luochuan Loess-Paleosol Sequence, Chinese Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 71 (5), 1570-1578. doi: **10.2136/sssaj2006.0328**.
 20. Günster, N., Eck, P., Skowronek, A., & Zöller, L. (2001). Late Pleistocene loess and their paleosols in the Granada Basin, Southern Spain. *Quaternary International*, 76-77, 241-245. doi: **10.1016/S1040-6182(00)00106-3**.
 21. Machalet, B., Frechen, M., Hambach, U., Oches, E. A., Zöller, L., & Marković, S. B. (2006). The loess sequence from Remisowka (northern boundary of the Tien Shan Mountains, Kazakhstan)-Part I: Luminescence dating. *Quaternary International*, 152-153, 192-201. doi: **10.1016/j.quaint.2005.12.014**.
 22. Sun, Y., He, L., Liang, L., & An, Z. (2011). Changing color of Chinese loess: Geochemical constraint and paleoclimatic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40 (6), 1131-1138. doi: **10.1016/j.jseaes.2010.08.006**.
 23. Balsam, W. L., & Deaton, B. C. (1996). Determining the composition of late Quaternary marine sediments from NUV, VIS, and NIR diffuse reflectance spectra. *Marine Geology*, 134 (1), 31-55. doi: **10.1016/0025-3227(96)00037-0**.
 24. Liu, Y., Shi, Z., Deng, C., Su, H., & Zhang, W. (2012). Mineral magnetic investigation of the Talede loess-paleosol sequence since the last interglacial in the Yili Basin in the Asian interior. *Geophysical Journal International*, 190 (1), 267-277. doi: **10.1111/j.1365-246X.2012.05527.x**.
 25. Li, G., Xia, D., Jin, M., Jia, J., Liu, J., Zhao, S., & Wen, Y. (2015). Magnetic characteristics of loess-paleosol sequences in Tacheng, northwestern China, and their paleoenvironmental implications. *Quaternary International*, 372, 87-96. doi: **10.1016/j.quaint.2014.08.002**.
 26. Maher, B. A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137 (1), 25-54. doi: **10.1016/S0031-0182(97)00103-X**.
 27. Maher, B. A., Meng Yu, H., Roberts, H. M., & Wintle, A. G. (2003). Holocene loess accumulation and soil development at the western edge of the Chinese Loess Plateau: Implications for magnetic proxies of palaeorainfall. *Quaternary Science Reviews*, 22(5), 445-451. doi: **10.1016/S0277-3791(02)00188-9**.
 28. Orgeira, M. J., Egli, R., & Compagnucci, R. H. (2011). A Quantitative Model of Magnetic Enhancement in Loessic Soils. In E. Petrovský, D. Ivers, T. Harinarayana, & E. Herrero-Bervera (Eds.), *The Earth's Magnetic Interior* (pp. 361-397). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: **10.1007/978-94-007-0323-0_25**.
 29. Sharifigarmdareh, J., Khormali, F., Scheidt, S., Rolf, C., Kehl, M., & Frechen, M. (2020). Investigating soil magnetic properties with pedogenic variation along a precipitation gradient in loess-derived soils of the Golestan province, northern Iran. *Quaternary International*, 552, 100-110. doi: **10.1016/j.quaint.2019.11.022**.
 30. Wu, Y., Qiu, S., Fu, S., Rao, Z., and Zhu, Z. 2018. Pleistocene climate change inferred from multi-proxy analyses of a loess-paleosol sequence in China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 154, 428-434. doi: **10.1016/j.jseaes.2017.10.007**.