

مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی و تغییرات رنگ در توالی لس- خاک‌های

قدیمی در منطقه چنارلی، شمال شرق استان گلستان

امین غفاریپور؛ دانشجوی دکترای دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

فرهاد خرمالی*؛ استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

کریستین رولف؛ استاد مؤسسه ژئوفیزیک کاربردی لایب نیتس (LIAG)

حسین تازیکه؛ دکترای علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مارتین کهل؛ استاد مرکز تحقیقات اقیانوس‌شناسی هیلمولتر (GEOMAR) آلمان

مانفرد فرشن؛ استاد مؤسسه ژئوفیزیک کاربردی لایب نیتس (LIAG)

کریستین زیدن؛ استاد مؤسسه ژئوفیزیک کاربردی لایب نیتس (LIAG)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

چکیده

خواص مغناطیسی واحدهای لسی دوره کواترنر، که با خاک‌های قدیمی در شمال ایران متمایز می‌شوند، مدلی برای درک فرایندهای خاک‌ساز و ارتباط آن با بارندگی کنونی و اقلیم گذشته در این منطقه ارائه می‌دهد. در این مطالعه تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی بازتابی انتشاری (از این پس DRS) در آزمایش‌های اندازه‌گیری رنگ و همچنین پذیرفتاری مغناطیس وابسته به دما (از این پس $\chi-T$) در محیط آرگون از توالی لس- خاک قدیمی اواخر پلیستوسن در منطقه چنارلی در شمال ایران ارائه شد. بدین منظور مواد معدنی اکسید آهن مغناطیسی، مگنتیت، ماگهمیت، هماتیت، و گوتیت در لس و خاک قدیمی شناسایی شد. نتایج DRS نشان داد نسبت هماتیت به گوتیت با روند فرایندهای خاک‌ساز و بارندگی و تشکیل خاک قدیمی ارتباط مثبت و قابل توجهی دارد. داده‌های این تحقیق همچنین نشان داد تشکیل ماگهمیت خاک‌ساز و انحلال آن نقش مهمی در تقویت و کاهش پذیرفتاری مغناطیسی در توالی‌های لس- خاک قدیمی دارد. کلیدواژگان: اکسیدهای آهن، رسوبات لسی، شمال ایران، فرایندهای خاک‌ساز، کواترنر.

مقدمه

رسوبات لس^۲ کواترنری در مناطق وسیعی از کره زمین یافت می‌شوند (موهس^۳ ۲۰۰۷: ۱۵). این رسوبات به دلیل داشتن تناوب‌هایی از لس- خاک قدیمی تغییرات اقلیمی کواترنر را در خود ثبت کرده‌اند (سانگ^۴ و همکاران ۲۰۲۱: ۱۱۰۲۷۹). نوسانات رطوبتی و دمایی با نشانگرهای اقلیمی، هنگام رسوب لس و تشکیل خاک‌های قدیمی، در توالی‌های لس- خاک قدیمی ثبت شده است. لس‌های شمال ایران، به سبب اینکه نقطه اتصال در کمربند لس‌های اروپا و آسیا هستند، منطقه‌ای کلیدی برای مطالعه لس‌ها به شمار می‌روند. نهشته‌های لس شمال ایران منابع ارزشمندی برای مطالعه تغییرات آب‌وهوایی

و محیطی گذشته در اوراسیا هستند (غفارپور^۱ و همکاران ۲۰۱۶: ۹۸). توالی‌های لس- خاک قدیمی در شمال ایران در دامنه کوه‌های البرز به ضخامت تا ۳۰ متر و در فلات لسی شمالی ایران تا ضخامت حدود ۶۰ متر پراکنده شده‌اند (لویر^۲ و همکاران ۲۰۱۷: ۱۴). مواد معدنی اکسید آهن مغناطیسی- عمدتاً گوتیت^۳، هماتیت^۴، مگنتیت^۵، ماگهمیت^۶- در خاک‌های با زهکشی خوب یا فصلی با زهکشی خوب در تعادل با مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی تشکیل می‌شوند. از آنجا که اکسیدهای آهن معمولاً در غلظت‌های کم (اغلب کمتر از ۱ درصد) در خاک وجود دارند، کمی‌سازی آن‌ها دشوار است (بالسام^۷ و همکاران ۲۰۰۴: ۲۲۸۲). سیستم رنگی مانسل (مانسل^۸ ۱۹۰۵: ۸۹) اولین سیستم مبتنی بر آزمایش‌های علمی دقیق است و قادر است رنگ را با القاب عددی ثابت توصیف کند. این سیستم را وزارت کشاورزی ایالات متحده^۹ برای تحقیقات خاک به تصویب رساند و همچنان به مثابه وسیله‌ای برای توصیف رنگ در طیف گسترده‌ای از مواد استفاده می‌شود (لامان^{۱۰} و همکاران ۲۰۰۵: ۶۰). سیستم رنگ مانسل را کمیسیون بین‌المللی روشنایی^{۱۱} به چالش کشید و تا حدودی جایگزین سیستم رنگ مانسل شده است. هر دو سیستم مانسل و کمیسیون بین‌المللی روشنایی بر اساس تقلید از بینایی چشم انسان طراحی شده‌اند. از آنجا که شناسایی رنگ توسط چشم به چگونگی تفسیر طیف نور مرئی توسط چشم بستگی دارد و چشم تمایل دارد تفاوت طیف‌های مرئی را تا حد ممکن پنهان کند، رنگ‌های مشابه که ناشی از مخلوط شدن طول موج‌های طیفی مختلف باشد ممکن است به درستی تشخیص داده نشود. این پدیده متامریسم نامیده می‌شود (داموث^{۱۲} و بالسام ۲۰۰۳: ۳). برای غلبه بر این محدودیت، روش^{۱۳} DRS توسعه یافت که در آن نور منعکس شده از یک نمونه در یک کره بازتابی جمع‌آوری و با مقایسه با نور منعکس شده از یک استاندارد سفید خالص در محدوده طول موج تجزیه و تحلیل می‌شود (بالسام و همکاران ۲۰۱۴: ۲۲۸۲). در سال‌های اخیر DRS برای مطالعه اکسیدهای آهن و سایر مواد معدنی استفاده شده است (جی^{۱۴} و همکاران ۲۰۰۱: ۲۴؛ تارنت^{۱۵} و همکاران ۲۰۰۷: ۱۵۷۱).^{۱۶} χ -T به طور گسترده برای مطالعه روند تغییرات کانی‌ها بر اثر حرارت در نمونه‌های طبیعی به کار می‌رود. همچنین این شیوه در بسیاری از مطالعات توالی‌های لس- خاک قدیمی در چین و اروپا استفاده شده است (سانگ و همکاران ۲۰۱۸: ۱۱۰۸۸؛ زیدن^{۱۷} و همکاران ۲۰۱۶: ۱۳۲). منحنی‌های گرمایش و سرمایش χ -T در فرایند گرم شدن و سرد شدن می‌تواند شدت فرایندهای خاک‌ساز را در توالی‌های لس- خاک قدیمی نشان دهد (غفارپور و همکاران ۲۰۲۱: ۷۴). در این پژوهش منحنی‌های χ -T برای مطالعه نمونه‌های توالی لس- خاک قدیمی منطقه چنارلی استان گلستان در شمال شرق ایران به

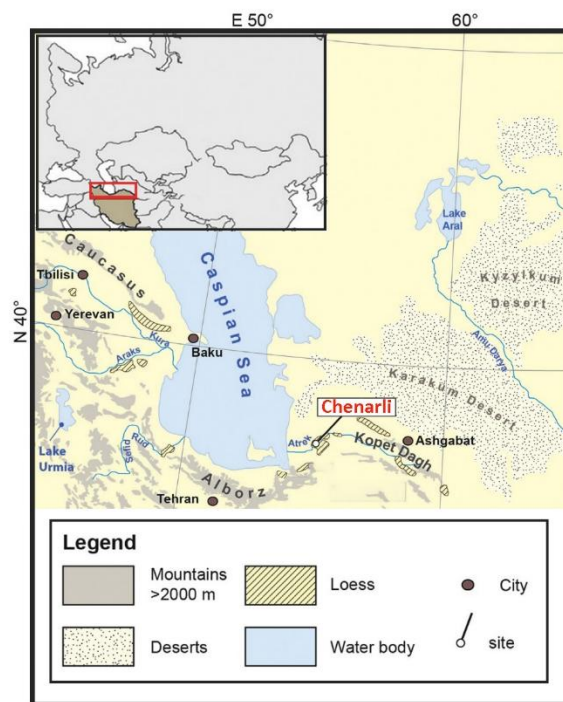
1. Ghafarpour
2. Lauer
3. α -FeOOH
4. α -Fe₂O₃
5. Fe₃O₄
6. γ -Fe₂O₃
7. Balsam
8. Munsell
9. USDA
10. Laamanen
11. CIELAB (L*a*b*)
12. Damuth
13. diffuse reflectance spectrophotometry
14. Ji
15. Torrent
16. temperature-dependent magnetic susceptibility
17. Zeeden

کار رفت. اهداف این مطالعه شامل: ۱. به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر در مورد تغییرات اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت، ماگنمیت) در توالی لس- خاک قدیمی مورد مطالعه تحت تأثیر عوامل اقلیمی و فرایندهای خاک‌ساز؛ ۲. تعیین عامل کنترل‌کننده افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در این توالی لس- خاک قدیمی بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

توالی لس- خاک قدیمی مورد مطالعه در نزدیکی روستای چنارلی قرار گرفته است. این روستا در قسمت جنوبی رشته‌کوه کپه‌داغ و در شرقی‌ترین قسمت فلات لسی شمال ایران، نزدیک شهر مراوه‌تپه در استان گلستان، است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. آب‌وهوای نیمه‌خشک چنارلی با متوسط بارندگی سالانه ۴۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای هوای سالانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد مشخص می‌شود.

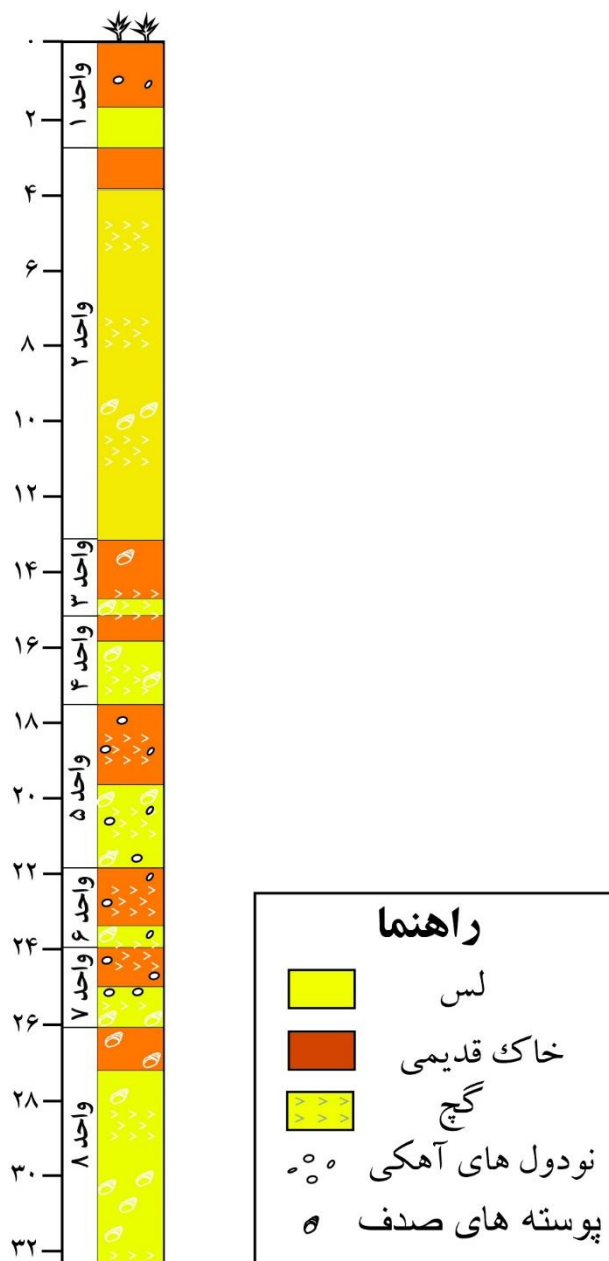


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه پراکنش لس در آسیای مرکزی و شمال ایران

آب‌وهوا در منطقه مورد مطالعه متأثر از چرخه فصلی مدیترانه‌ای است که در آن رطوبت خاک از مهر تا اسفند افزایش و سپس در تابستان به شدت کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که دمای هوا از تیر تا شهریور به اوج خود می‌رسد (خرمالی^۱ و همکاران ۲۰۲۰: ۸۰). توالی مورد مطالعه به ارتفاع تقریبی ۳۲ متر از ۸ واحد لسی تشکیل شده است که به وسیله

1. Khormali

خاک‌های قدیمی از هم جدا شده‌اند. وجود گچ و نودول‌های آهکی و پوسته‌های صدفی از مشخصات این واحدهای لسی است (شکل ۲). خاک مدرن در واحد ۱ توسعه یافته است و بر اساس طبقه‌بندی امریکایی به صورت کلسی زیرپت طبقه‌بندی می‌شود. واحد ۸ دربرگیرنده خاکی قدیمی است که بر اساس نتایج سن‌یابی لومینسنس (غفارپور و همکاران، داده‌های منتشرنشده) سن آن حدود ۱۳۰ هزار سال برآورد شده است.



شکل ۲. توالی‌های لسی- خاک قدیمی و عمق آن از سطح خاک (به متر) در منطقه چنارلی

رنگ‌سنجی

تعیین خواص رنگ‌سنجی با اندازه‌گیری نور منعکس‌شده پراکنده روی بیست نمونه کمتر از ۲ میلی‌متر از لس و خاک مدرن و خاک قدیمی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر کونیکا^۱ انجام شد. اندازه‌گیری‌ها طبق روش استاندارد اکامیر^۲ و همکارانش (۲۰۱۳) انجام پذیرفت. تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی استفاده‌شده در این مطالعه شامل محدوده طیفی نور مرئی از ۳۶۰ تا ۷۴۰ نانومتر بود. اطلاعات طیفی به دست آمده به ترتیب با استفاده از نرم‌افزار اسپکترا میک^۳ به سیستم‌های رنگ کمیسون بین‌المللی و سیستم رنگ مانسل تبدیل شد. مقادیر مشتق اول^۴ (از این پس IDV) بر حسب درصد در نانومتر محاسبه شد و قله‌های منحنی IDV نشان‌دهنده اکسیدهای آهن است (بالسام^۵ و دیتون^۶: ۱۹۹۱: ۴۱۳).

پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی

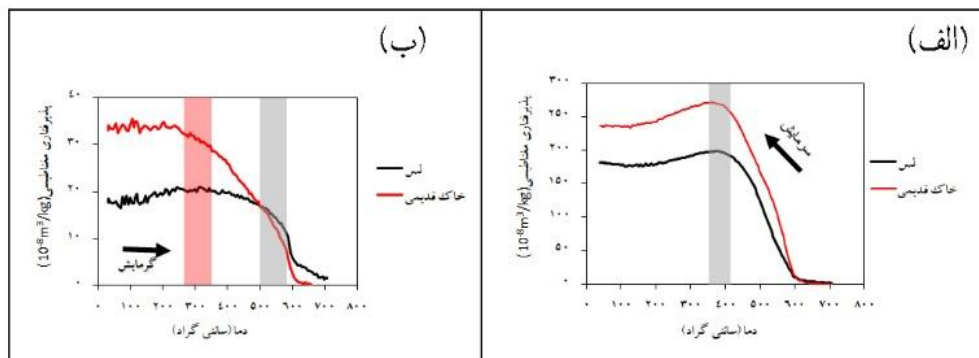
بیست نمونه دست‌نخورده از خاک مدرن و توالی‌های لس- خاک قدیمی برای اندازه‌گیری $\chi-T$ انتخاب شد. از هر نمونه حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در بوتله چینی پودر شد. منحنی‌های $\chi-T$ با استفاده از دستگاه کپاریج^۷ که مجهز به کوره درجه حرارت بالا سی-اس-سه^۸ با فرکانس ۹۷۶ هرتز است با افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای اتاق) تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس بازگشت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در محیط آرگون اندازه‌گیری شد. میدان مغناطیسی هنگام اندازه‌گیری ۳۰۰ آمپر بر متر بود. قبل از اندازه‌گیری نمونه‌ها، به منظور تعیین پذیرفتاری پس‌زمینه وابسته به دما، دستگاه با لوله خالی کنترل شد. پذیرفتاری مغناطیسی حرارتی هر یک از نمونه‌های رسوب با تفریق از پذیرفتاری پس‌زمینه، با استفاده از برنامه کروال^۹، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های یادشده در آزمایشگاه گروبنهاگن، متعلق به مؤسسه تحقیقات زمین‌فیزیک کاربردی لیاغ^۹، در شهر هانوفر آلمان، انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

شکل ۳ تفاوت منحنی‌های گرمایش و سرمایش $\chi-T$ را در نمونه لس واحد ۲ و خاک قدیمی واحد ۵ نشان می‌دهد. در منحنی گرمایش نمونه لس کاهش نزولی نمودار گرمایش در حرارت ۵۶۵ - ۵۸۵ درجه سانتی‌گراد رخ داد؛ درحالی‌که کاهش نزولی نمودار گرمایش در نمونه خاک قدیمی در حرارت ۳۰۰ - ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ داد (شکل ۳ الف). در مقابل، منحنی‌های سرمایش برای هر دو نمونه لس و خاک قدیمی تقریباً یکسان بود که توسط دومین‌های فوق پارامغناطیسی به‌علاوه مگنتیت‌های تک‌دومین، که حین گرمایش تولید می‌شود، کنترل می‌شود و قله نمودار را در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد (شکل ۳ ب). نمودارهای گرمایش $\chi-T$ در شکل ۳ الف وجود کانی‌های آهن‌دار مگنتیت (کاهش نزولی نمودار گرمایش در حرارت ۵۶۵ - ۵۸۵ درجه

1. konica minolta cm-5
2. Eckmeier
3. spectra magic NX (Konica Minolta)
4. first-derivative values
5. Balsam
6. kappa-bridge (MFK1-FA)
7. CS-3
8. CUREVAL 5.0
9. leibniz-institut für angewandte geophysik (LIAG)

سانتی‌گراد) و هماتیت به‌ارث‌رسیده از مواد مادری (کاهش نزولی نمودار گرمایش در حرارت ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد) را در نمونه لس واحد ۲ نشان می‌دهد. شکل ۳ ب وجود ماگهمیت خاک‌ساز (کاهش نزولی نمودار گرمایش در حرارت ۳۰۰ - ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و تبدیل آن به هماتیت را در نمونه خاک قدیمی واحد ۵ نشان می‌دهد. این روند در همه لس‌ها، خاک مدرن، و خاک‌های قدیمی توالی مورد مطالعه به جز در خاک قدیمی واحد ۷ دیده می‌شود. به نظر می‌رسد، بعد از مرطوب شدن خاک در زمستان، کاهش رطوبت خاک در تابستان به علت کاهش بارندگی و هم‌زمان افزایش شدید دما از تیر تا شهریور شرایط مناسب برای تشکیل درجای ماگهمیت خاک‌ساز را فراهم می‌کند. بنابراین داده‌های χ -T به احتمال قوی ماهیت فصلی تشکیل ماگهمیت خاک‌ساز در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی توالی مورد مطالعه را ثابت می‌کند. این نتیجه مطابق مدلی است که ماهر^۱ (۱۹۹۸) در زمینه تشکیل فرم‌های آهن فرومغناطیس در خاک ارائه کرد که در آن تناوب فصل مرطوب و خشک (شرایط اکسیدی) جهت اکسید شدن سریع مگنتیت دانه‌ریز به ماگهمیت و سپس به هماتیت لازم است. این نتایج تاییدکننده یافته‌های پیشین پژوهشگران است که نشان می‌دهد اگرچه بارندگی تعیین‌کننده اصلی محتوای رطوبت خاک است، فعل و انفعالات فصلی دما و تبخیر و تعرق بر فعالیت اکسایش و کاهش ریزمحیط خاک^۲ اثر می‌گذارد و غلظت اکسیدهای آهن خاک‌ساز را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ماهر و همکاران ۲۰۰۳: ۴۵۰؛ اورگریا^۳ و همکاران ۲۰۱۱: ۳۷۰). بنابراین نمودارهای χ -T نشان می‌دهد که عامل اصلی افزایش پذیرفتاری خاک در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی نسبت به مواد مادری لسی پیدایش ماگهمیت خاک‌ساز در خاک‌های قدیمی است که با نتایج غفاریپور و همکاران (۲۰۲۱) و شریفی گرم‌دره^۴ و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.



شکل ۳. منحنی‌های سرمایش (الف) و گرمایش (ب) χ -T در نمونه لس واحد ۲ و خاک قدیمی واحد ۵

نمودار 1DV از داده‌های رنگ‌سنجی نشان می‌دهد، هم در نمونه‌های لس هم در خاک‌های قدیمی، هماتیت دارای قله منحنی در ۵۶۵ نانومتر است (شکل ۴). حال آنکه گوتیت دارای دو قله 1DV در ۵۳۵ و ۴۳۵ نانومتر است و قله ایجادشده در ۵۹۵ نانومتر نشان‌دهنده حضور ماگهمیت است (شکل ۴). نتایج رنگ‌سنجی نشان می‌دهد نسبت هماتیت به

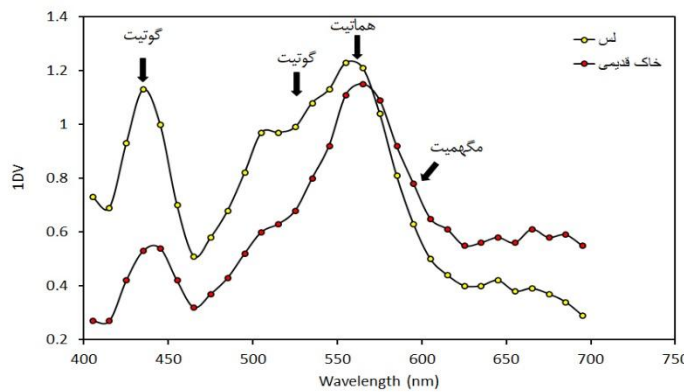
1. Maher
2. soil microenvironment
3. Orgeira
4. Sharifigarmdareh

گوتیت (هماتیت/ گوتیت) با تشکیل خاک مدرن و خاک‌های قدیمی در واحدهای لسی رابطه مثبت دارد؛ طوری که در هر واحد این نسبت در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی از مواد مادری لسی آن‌ها بیشتر است (جدول ۱).

جدول ۱. نسبت هماتیت به گوتیت در خاک مدرن، خاک‌های قدیمی و لس‌ها

شماره واحد	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸
نسبت هماتیت/ گوتیت در خاک‌های مدرن و قدیمی	۱/۲۲	۱/۱۴	۱/۳۴	۱/۵۳	۱/۶۳	۲/۰۷	۲/۲۳	۱/۷۰
نسبت هماتیت/ گوتیت در لس‌ها	۱/۱۱	۰/۹۷	۰/۹۶	۱/۲۱	۱/۵۱	۱/۵۴	۱/۲۰	۱/۱۶

افزایش نسبت هماتیت/ گوتیت در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی نشان‌دهنده تشکیل هماتیت خاک‌ساز در اثر بارندگی و رطوبت بیشتر خاک در آن‌هاست. بنابراین نسبت هماتیت/ گوتیت به منزله یک شاخص خشک/ مرطوب در توالی‌های لس- خاک قدیمی شمال ایران برای تفسیر اقلیم گذشته قابل استفاده است (غفارپور و همکاران ۲۰۲۱: ۷۶). نتایج داده‌های رنگ‌سنجی این مطالعه تأییدکننده یافته‌های بسیاری از مطالعات اخیر است که رابطه مستقیم یا غیرمستقیم فراوانی اکسیدهای آهن در خاک‌های قدیمی با میزان بارندگی اقلیم گذشته را نشان می‌دهد (بالسام و همکاران ۲۰۰۴: ۳۴۳؛ تورنت^۱ و همکاران ۲۰۰۷: ۱۵۷۴؛ لانگ^۲ و همکاران ۲۰۱۱: ۱۱۶؛ لیو^۳ و همکاران ۲۰۱۳: ۳۷۰؛ هیلند^۴ و همکاران ۲۰۱۵: ۹۷۷).



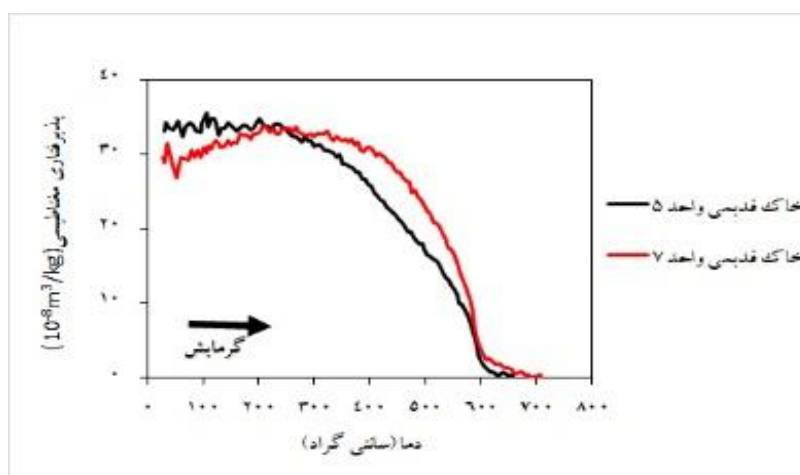
شکل ۴. مقادیر مشتق اول (1DV) دو نمونه لس و خاک قدیمی

از بین رفتن ماگهمیت خاک‌ساز در خاک قدیمی واحد ۷

نمودارهای گرمایش χ -T متعلق به خاک قدیمی واحد ۷ و خاک قدیمی واحد ۵ در شکل ۵ آمده است. این نمودار نشان‌دهنده وجود مگنتیت به‌ارثررسیده از مواد مادری (کاهش نمودار در نزدیکی ۵۸۵ درجه سانتی‌گراد) و نبود ماگهمیت

1. Torrent
2. Long
3. Liu
4. Hyland

خاک‌ساز در نمونه به علت عدم نمودار بین ~ 300 تا ~ 350 درجه سانتی‌گراد است. داده‌های سن‌یابی لومینسنس نشان داد خاک قدیمی واحد ۷ در حدود ۱۲۰ هزار سال قبل و هم‌زمان با مرحله ایزوتوپ دریایی ۵ ای (MIS 5e) تشکیل شده است. بنابراین بارندگی زیاد در این دوره، که با آهک‌زدایی و تجمع رس و شرایط ماندابی در این خاک قدیمی همراه شده، موجب شده تحت این شرایط ماگهمیت خاک‌ساز به علت شرایط غیرهوازی موقتی توسط میکروارگانیسم‌ها مصرف شود و از بین برود (اورگریا و همکاران ۲۰۱۱: ۳۷۰). در نتیجه نمودار گرمایشی این خاک قدیمی متفاوت از خاک قدیمی شماره ۵ (شکل ۵) و خاک‌های قدیمی دیگر واحدهاست. بنابراین از نمودارهای گرمایش و سرمایش χ -T در توالی‌های لس- خاک قدیمی می‌توان به مثابه شاخصی برای تفسیر اقلیم کواترنری استفاده کرد.



شکل ۵. نمودارهای گرمایش χ -T برای خاک‌های قدیمی واحد ۷ و ۵

نتیجه

نتایج DRS و χ -T روی واحدهای لسی جداشده با خاک‌های قدیمی در توالی مورد مطالعه اطلاعات جدیدی در مورد اکسید آهن مغناطیسی- عمدتاً مگنتیت، ماگهمیت، هماتیت، گوتیت- در رسوبات لس کواترنر شمال ایران ارائه می‌دهد. میزان تشکیل هماتیت و ماگهمیت، که در اثر هوازدگی در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی از طریق فرایندهای خاک‌ساز رخ می‌دهد، به تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای- شامل فصلی بودن بارندگی، نوسانات دمایی فصلی، میزان تبخیر و تعرق که بر رطوبت خاک اثر می‌گذارند- بستگی دارد. افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک مدرن و خاک‌های قدیمی عمدتاً ناشی از تشکیل ماگهمیت پدوژنیک است که به خشک شدن و مرطوب شدن متناوب خاک نیاز دارد. انحلال خاک‌ساز کانی ماگهمیت به دلیل بارندگی زیاد است که در خاک قدیمی واحد ۷ که متعلق به دوره MIS 5e است منجر به کاهش محتوای مغناطیسی خاک شده است.

منابع

- 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, pp. 335-348.
- Balsam, W., Ji, J., Renock, D., Deaton, B.C., & Williams, E. (2014). "Determining hematite content from NUV/Vis/NIR spectra: limits of detection. Am", *Mineral*, 99, pp. 2280-2291.
- Balsam, W.L. & Deaton, B.C. (1991). "Sediment dispersal in the Atlantic Ocean: evaluation by visible light spectra", *Rev. Aquat. Sci*, 4, pp. 411-447.
- Damuth, J.E. & Balsam, W.L. (2003). "Data report: spectral data from sites 1165 and 1167 including the HiRISC section from Hole 1165B", In: Cooper, A.K., O'Brien, P.E., & Richter, C. (Eds.), *Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 188, pp. 1-49.
- Eckmeier, E., Egli, M., Schmidt, M.W.I., Schlumpf, N., Notzli, M., Minikus-Stary, N., & Hagedorn, F. (2013). "Preservation of fire-derived carbon compounds and sorptive stabilisation promote the accumulation of organic matter in black soils of the Southern Alps", *Geoderma*, 159, pp. 147-155.
- 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, pp. 68-82.
- 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, pp. 98-109.
- Hyland, E., Sheldon, N.D., Van der Voo, R., Badgley, C., & Abrajevitch, A. (2015). "A new paleoprecipitation proxy based on soil magnetic properties: implications for expanding paleoclimate reconstructions", *Geological Society of America Bulletin*, 127, pp. 975-981.
- Ji, J., Balsam, W., & Chen, J. (2001). "Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan Loess Section (China) based on diffuse reflectance spectrophotometry", *Quaternary Research*, 56, pp. 23-30.
- Khormali, F., Shahriari, A., Ghafarpour, A., Kehl, M., Lehndorff, E., & Frechen, M. (2020). "Pedogenic carbonates archive modern and past precipitation change—A transect study from soils and loess-paleosol sequences from northern Iran", *Quaternary International*, 552, pp. 72-90.
- Laamanen, H., Jaaskelainen, T., & Parkkinen, J. (2005). "Conversion between the reflectance spectra and the Munsell notations", *Color Research, Appl.* 31, pp. 57-66.
- Lauer, T., Vlaminck, S., Frechen, M., Rolf, C., Kehl, M., Sharifi, J., Lehndorff, E., & Khormali, F. (2017). "The Agh Band loess-palaeosol sequence e a terrestrial archive for climatic shifts during the last and penultimate glacial-interglacial cycles in a semiarid region in northern Iran", *Quaternary International*, 429, pp. 13-30.
- Liu, Z., Liu, Q., Torrent, J., Barr'ón, V., & Hu, P. (2013). "Testing the magnetic proxy χ_{fd} /HIRM for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shaanxi Province, China", *Global Planet, Change* 110, pp. 368-378.
- Long, X., Ji, J., & Balsam, W. (2011). "Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: spectral and magnetic

- measurements”, *Journal Geophysical Research*, Earth Surf, 116 (F3).
- Maher, B.A. (1998). “Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications”, *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, 137, pp. 25–54.
- Maher, B.A., MengYu, 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 Review*, 22, pp. 445–451.
- Muhs, D.R. (2007). “Loess deposits, origins and properties”, In: Elias, S.A. (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Oxford.
- Munsell, A.H. (1905). *A Color Notation: A Measured Color System Based on the Three Qualities Hue, Value, and Chroma*, Ellis and Company, Boston.
- Orgeira, M.J., Egli, R., & Compagnucci, R.H. (2011). “A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils”, In: *The Earth’s Magnetic Interior*, Springer, Dordrecht, pp. 361–397.
- 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, pp. 100–110.
- Song, Y., Li, Y., Cheng, L., Zong, X., Kang, S., Ghafarpour, A., Li, X., Sun, H., Fu, X., Dong, J., & Mamadjanov, Y. (2021). “Spatio-temporal distribution of Quaternary loess across Central Asia”, *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, pp. 110279.
- Song, Y., Li, Y., Wang, Q., Dong, H., Zhang, Z., & Orozbaev, R. (2018). “Effect of chemical pretreatments on magnetic susceptibility of loess from Central Asia and the Chinese Loess Plateau”, *RSC Adv*. 8, pp. 11087–11094.
- Torrent, J., Liu, Q., Bloemendal, J., & Barron, V. (2007). “Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess-paleosol sequence, Chinese Loess Plateau”, *Soil Science Society of America Journal*, 71, pp. 1570-1578.
- Zeeden, C., Kels, H., Hambach, U., Schulte, P., Protze, J., Eckmeier, E., Markovic, S.B., Klasen, N., & Lehmkuhl, F. (2016). “Three climatic cycles recorded in a loess- palaeosol sequence at Sendlac (Romania) e implications for dust accumulation in south-eastern Europe”, *Quaternary Science Review*, 154, pp. 130-142.