

میکرومورفولوژی خاک‌های لسی اوایل پلیستوسن و مقایسه آن با لس‌های مدرن

معصومه نجفی‌نیا^۱، فرهاد خرمالی^{۲*}، فرشاد کیانی^۳، مجتبی بارانی مطلق^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۲- استاد گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۵ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶	وجود تناوبی از خاک‌های قدیمی در رسوبات لسی شمال ایران، اشاره به دوران سرد و خشک در زمان رسوب‌گذاری لس و دوران گرم و مرطوب در زمان تشکیل خاک‌های قدیمی دارد. از این رو، این پژوهش با هدف پژوهش میکرومورفولوژیک خاک‌های لسی اوایل پلیستوسن و مقایسه آن با لس‌های مدرن در مناطق آق‌بند، یلی-بدراق و قره‌آغاچ استان گلستان انجام شد. پس از مشاهدات مقدماتی و صحرایی و تعیین افق‌ها برای هر خاک‌رخ در منطقه، از هر یک از افق‌ها به مقدار کافی، نمونه خاک برای انجام آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی و همچنین نمونه دست نخورده، به‌منظور پژوهش مقاطع نازک خاک جمع‌آوری شد. یکی از روش‌های مهم برای شناسایی و تفسیر لس‌های مدرن و خاک‌های قدیمی در راستای مطالعات اقلیم‌شناسی گذشته، بررسی میکرومورفولوژیکی خاک است. نتایج به‌دست آمده از مقاطع نازک خاک‌های پالتوسول و مدرن نشان می‌دهد که زمان و تغییرات آب و هوا، باعث تغییر در ویژگی-های میکرومورفولوژیکی خاک (مانند نوع و تعداد حفرات، ریزساختمان خاک، بی‌فابریک و پدوفیچر و ...) می‌شود. مشاهده‌های میکرومورفولوژیکی، شواهد مختلفی از وقوع فرآیندهای پدوژنیک را در این خاک‌ها نشان داد. بی‌فابریک غالب خاک‌ها به‌دلیل آبشویی آهک در افق‌های آرجیلیک، لکه‌ای و در افق‌های کلسیک، بلورین می‌باشد. از مهم‌ترین شاخص‌های خاک‌سازی، وجود پوشش‌های رسی دور حفرات در برخی از افق‌های خاک‌های قدیمی است که شواهدی از شرایط اقلیمی مرطوب‌تر برای آب‌شویی و انتقال رس است. تشکیل لس و خاک‌های قدیمی مورد پژوهش احتمالاً به ترتیب مربوط به دوره‌های یخچالی و بین یخچالی با شرایط اقلیمی متفاوت بوده است.

کلمات کلیدی:

لس- خاک قدیمی،

آب و هوای گذشته،

میکرومورفولوژی،

گلستان

* عهده دار مکاتبات

Email: fkhormali@gau.ac.ir

مقدمه

خاک‌های قدیمی (پالئوسول‌ها) که در شرایط اقلیمی متفاوت از زمان حال، تشکیل و حفظ شده‌اند، یکی از مهم‌ترین کلیدهای تشخیص شرایط اقلیمی گذشته هستند؛ زیرا محصول هوادیدگی مواد مادری در شرایط اقلیمی زمان تکاملشان هستند (۲۰). پالئوسول‌ها اولین بار توسط روهمی (۲۶) به ۳ دسته خاک‌های مدفون^۱، باقیمانده^۲ و ظاهر شده^۳ تقسیم شدند.

عواملی که طبقه بندی پالئوسول‌ها را پیچیده می‌کند

دوره‌های رسوب گذاری و خاک‌سازی؛ همراه بودن با رویدادهای پلی ژنتیک که چندین دوره خاک‌سازی را تجربه کرده‌اند؛ از دست رفتن افق سطحی پیش از مدفون شدن نهایی (۱۵). رسوبات لسی شمال ایران، منعکس کننده چندین چرخه تغییر اقلیم و تکامل سیمای زمین، برای دوره میانی تا انتهایی کواترنری هستند. تغییر اقلیم در ارتفاعات ایران و مناطق اطراف آن در اواسط و اواخر دوره کواترنری بر اساس دوره‌های بارندگی و بین بارندگی یا یخچالی و بین یخچالی مورد بحث قرار گرفته است (۳۱).

خاک‌های لسی قرمز رنگ پالئوسول، در شمال ایران با نام رسوبات لسی قرمز رنگ اوایل پلیستوسن شناخته می‌شوند (۲۹). نتایج حاصل آزمایش‌های مغناطیسی بر روی لس‌های شمال ایران، بیانگر این مطلب است که قدمت آن‌ها بین ۲-۱/۸ میلیون سال است (۳۲). یکی از روش‌های مهم برای شناسایی و تفسیر لس - خاک قدیمی در راستای مطالعات اقلیم‌شناسی گذشته، بررسی میکرومورفولوژیکی خاک می‌باشد. از بررسی نیمه کمی و کمی مشخصه‌های میکرومورفولوژی می‌توان در تشخیص افق‌های مشخصه مانند کلسیک و آرجلیک، تشخیص افق‌های مدفون شده، شبیه‌سازی رسوب گذاری لس‌ها، پیش‌بینی تغییرات اقلیم و دوره‌های خشک و تر گذشته، فرآیند رسوب گذاری و

فرسایش، بهره‌گرفت (۳۴). به‌طور کلی، هدف از پژوهش میکرومورفولوژی خاک‌ها شناسایی فرآیند مؤثر در تشکیل و تغییر شکل آن است. استوپس (۲۸) بیان می‌کند که هیچ روش دیگری مانند " میکرومورفولوژی " وجود ندارد که بتواند ماهیت و پیچیدگی پلی ژنر خاک‌ها را بیان کند و قابلیت تشریح چگونگی تشکیل خاک را داشته باشد. امروزه میکرومورفولوژی، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تشریح فرآیندهای حاکم بر خاک و تغییرات ناشی از فرآیندهای گوناگون، مانند تغییر اقلیم و کاربری است. خصوصیات میکرومورفولوژیکی خاک‌های قدیمی برای نشان دادن تغییرات و شرایط محیطی استفاده می‌شود، برای مثال اشکال عمده میکرومورفولوژیکی خاک‌های قدیمی (کلسیک زدایی و تجمع کربنات کلسیم ثانویه، بیوتوربایسون، قرمز شدن، تجمع رس و قلیایی شدن و ...) بر حسب فرآیندهای پدوژنیکی سازنده تفسیر شده و در ارتباط با سنجدن شرایط محیطی گذشته هستند (۹). شاخص‌های میکرومورفولوژی که توسط طاهری و همکاران^۴ (۲۹) مورد بررسی قرار گرفت، نشان می‌دهد که خاک‌های قدیمی در توالی لس قرمز شمال شرق ایران، در یک محیط با متوسط بارندگی سالانه ۶۵۰ - ۴۵۰ میلی‌متر به وجود آمده‌اند که نشان‌دهنده اقلیم مرطوب‌تر گذشته نسبت به اقلیم خشک کنونی حال حاضر منطقه است. وانگ و همکاران^۵ (۳۲) بیان کردند که مطالعات میکرومورفولوژیکی خاک‌های پالئوسول، شرایط آب و هوایی دیرینه و شرایط تشکیل دهنده خاک و الگوهای باد درون قاره‌ها را بازسازی می‌کند. رسوبات لسی در شمال ایران، منبع با ارزشی از اطلاعات محیطی و شرایط آب و هوایی دیرینه و همچنین اطلاعاتی درباره فرآیندهای خشکی در آسیای میانه که باعث حرکت لس‌ها شده در اختیار ما قرار می‌دهد.

- 1- Buried
- 2- Residue
- 3- Relict

4- Taheri *et al.*
5- Wang *et al.*

بررسی تفسیر عکس‌های هوایی در هر منطقه ۳ خاک - رخ قدیمی برای پژوهش کانی‌شناسی انتخاب شد. به منظور مقایسه تغییرات پیدایشی و پدولوژیکی خاک - ها در گذشته با شرایط موجود اقلیمی، ۳ خاک رخ مدرن (خاک‌هایی که در شرایط کنونی محیطی تشکیل شده‌اند) نیز در همان مناطق با مواد مادری لسی حفر و به صورت مشابه با خاک‌های قدیمی تشریح و نمونه - برداری گردید. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱)، اسیدیته خاک در حالت گل اشباع (۱۷) و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (۲۴) اندازه‌گیری شد. کربن آلی خاک (۲۱)، کربنات کلسیم معادل (۲۲) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۴) به روش‌های معمول اندازه‌گیری شد. نمونه‌های دست نخورده خاک هوا خشک شده با مخلوط استون و رزین پلی‌استر و با افزودن کاتالیست و کبالت در شرایط خلأ در دسیکاتور طی چند مرحله با افزودن تدریجی رزین اشباع شده و در هوای آزاد طی چند ماه سخت شدند. نمونه‌های سخت شده، برش داده و روی لام شیشه‌ای چسبانده شد. ضخامت نمونه تا حد ۲-۱ میلی‌متر توسط دستگاه برش کاهش یافت. ضخامت نمونه با کاغذ سمباده حدود ۳۰ میکرون رسید. مقاطع نازک تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان (مدل Euromex) در نور پلاریزه معمولی (PPL) و متقاطع (XPL) بر اساس تعاریف استوپس (۲۸)، مورد پژوهش و تشریح قرار گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های

مطالعاتی

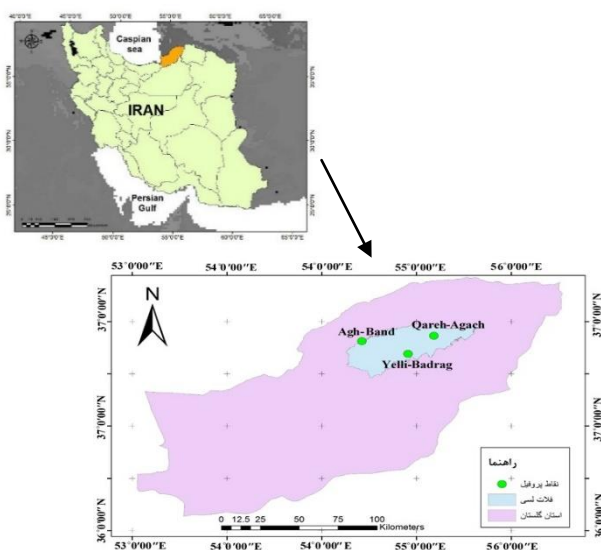
در خاک‌های قدیمی، افق‌های آرجیلیک و کلسیک مشاهده می‌شود (جدول ۲). تکامل خاک‌های قدیمی در مقایسه با خاک‌های مدرن مجاورشان از نظر پدولوژیک بیش‌تر است. رنگ خاک، یکی از خصوصیات بارز و انعکاس‌دهنده شرایط محیطی است که به نوع مواد مادری و مرحله هوادیدگی خاک بستگی دارد.

خرمالی و همکاران^۱ (۱۴) تخریب پوشش‌های رسی در خاک‌های قدیمی را به خاصیت انقباض و انبساط ناشی از شرایط خشک و مرطوب نسبت دادند و عنوان کردند که آهک‌زدایی عامل غالب در تکامل خاک‌های دارای افق آرجیلیک می‌باشد. همچنین برای طبقه‌بندی افق‌های آرجیلیک بر اساس میزان تحول، شاخص میکرومورفولوژیک MISECA را ارائه نمودند. کمپ (۱۱) بیان کرد که براساس مقایسه پدیده‌های مشاهده شده در خاک‌های قدیمی با پدیده‌هایی که در حال حاضر در خاک‌ها به وجود می‌آیند می‌توان شرایط حاکم بر خاک‌های گذشته را الگوسازی نمود. برخی از خاک‌های قدیمی که چندین دوره خاک‌سازی و تغییر اقلیم را تجربه کرده‌اند، دارای شواهد خاک‌سازی هستند که همدیگر را متأثر کرده و گاهی اثرات آن‌ها به صورت مضاعف در خاک به جا مانده است که این خاک تحت عنوان پلی ژنتیک شناخته می‌شوند. تفسیر ترکیبی توالی لس - خاک قدیمی وجود چندین مرحله در توسعه خاک را نشان می‌دهد. اهمیت میکرومورفولوژی به‌ویژه در علم پیدایش خاک به حدی است که سیستم تاکسونومی خاک از آن به عنوان یک روش مطمئن برای شناسایی آسان یک سری فرآیندهای خاک‌سازی استفاده می‌کند. در این پژوهش با بررسی میکرومورفولوژی مقاطع نازک خاک، به مقایسه بین خاک‌های قدیمی و مدرن در مقاطع لسی و بررسی میزان تحول و هوادیدگی آن‌ها پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش در اقلیم گرم و خشک، در فلات لسی شرق گلستان در محدوده جغرافیایی بین جاده گنبد- داشلی‌برون از شرق تا کلاله- مراوه تپه از غرب و کوه‌های کپه‌داغ در شمال و گرگان‌رود در جنوب واقع شده است (شکل ۱). مشخصات خاک‌های لسی مدرن و قدیمی در جدول ۱ ارائه شده است. پس از

نجفی نیا و همکاران: میکرومورفولوژی خاک‌های لسی...



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مناطق مورد پژوهش
Figure (1) Geographical location of the study areas

جدول (۱) اطلاعات عمومی خاک‌های لسی مدرن و قدیمی مورد پژوهش
Table (1) General information of the studied modern and old loess-derived soils

رده‌بندی خاک Soil classification	رژیم حرارتی Temperature regime	رژیم رطوبتی Moisture regime	میانگین دمای سالانه Mean annual temperature (°C)	متوسط بارندگی Mean annual precipitation (mm)	منطقه Region
Typic Haploxeralfs (Calcic Luvisol)	Thermic	Dry Xeric	17.6	300	آق‌بند (خاک قدیمی) Agh-Band (Paleosol)
Typic Xerorthents (Calcaric Regosol)	Thermic	Dry Xeric	17.6	300	آق‌بند (خاک مدرن) Agh-Band (modern soil)
Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisol)	Thermic	Typic Xeric	16	400	یلی‌بدراق (خاک قدیمی) Yelli-Badrag (Paleosol)
Typic Haploxerepts (Calcaric Cambisol)	Thermic	Typic Xeric	16	400	یلی‌بدراق (خاک مدرن) Yelli-Badrag (modern soil)
Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisol)	Thermic	Dry Xeric	17	350	قره‌آغاچ (خاک قدیمی) Qareh-Agach (Paleosol)
Typic Xerorthents (Calcaric Regosol)	Thermic	Dry Xeric	17	350	قره‌آغاچ (خاک مدرن) Qareh-Agach (modern soil)

نمونه‌های خاک قدیمی، دارای مقدار رس بیش‌تری نسبت به مواد مادری خود هستند که تأییدکننده شرایط اقلیمی مساعد برای انجام فرآیندهای خاک‌سازی و تکامل بیش‌تر خاک قدیمی نسبت به مواد مادری آن‌ها است که با نتایج طاهری و همکاران (۲۹) مطابقت دارد. یکی دیگر از ویژگی‌های معمول خاک‌های لسی، وجود کربنات کلسیم است که مقدار آن ۱۵-۱۰ درصد و تا ۴۰ درصد هم می‌رسد. مقدار کربنات کلسیم معادل در افق‌های مختلف متفاوت بوده که شرایط اقلیمی را نشان می‌دهد. با تکامل افق‌ها و شستشو و انتقال کربنات‌ها این مقدار کاهش، و در افق‌های تجمعی افزایش می‌یابد تا جایی که افق‌های Bkkm در خاک‌رخ قدیمی قره‌آغاچ با ۳۶/۵ درصد و Bkmb در خاک‌رخ قدیمی یلی‌بدراق با ۳۲ درصد کربنات تشکیل شده است. به عبارت دیگر، کاهش میزان کربنات کلسیم نشان‌دهنده افزایش رطوبت و افزایش بارندگی در زمان تشکیل و تکامل افق‌ها است که با نتایج ضیایی و همکاران (۳۴) هماهنگی دارد. در مقابل، خاک‌های مدرن به جزء قره‌آغاچ، مقدار کربنات‌ها از سطح به عمق، به‌طور عمومی افزایش کمی دارد که نشان‌دهنده حضور کربنات در مواد مادری یا به عبارت دیگر آهکی بودن مواد مادری و همچنین شستشوی کربنات از افق‌های سطحی و تجمع آن در افق‌های زیرسطحی است. مقایسه ظرفیت تبادل کاتیونی بین نمونه خاک‌های مدرن و نمونه خاک‌های قدیمی، نشان‌دهنده بالاتر بودن مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک قدیمی است. کمترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (۱۹ سانتی‌مول بر کیلوگرم) مربوط به افق C خاک مدرن در آق‌بند است. و بیشترین مقدار آن (۴۸ سانتی‌مول بر کیلوگرم) مربوط به افق Btk₁ در خاک‌رخ قدیمی یلی‌بدراق است. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز تحت تأثیر مواد آلی، درصد و نوع کانی‌های رسی خاک است. ترکیب و مقدار کانی‌های رسی، نقش تعیین‌کننده در مقدار CEC دارند (۸).

آهن و منگنز در فعل و انفعالات اکسیداسیون احیا شرکت نموده و در ایجاد رنگ خاک مؤثر هستند. رنگ خاک و توزیع آن در رابطه با مواد تشکیل‌دهنده خاک و فرآیند اکسیداسیون بوده، به طوری که در جدول‌های مربوطه، همیشه راهنمای خوبی در رابطه با مواد تشکیل‌دهنده و همچنین شکل‌های اکسید شده یا احیا شده ترکیبات آهن است. با فرض یکسان بودن مواد مادری- لیس‌ها و خاک قدیمی، رنگ و به خصوص درجه قرمز شدن بازتاب شدت فرآیندهای خاک‌سازی و هوادیدگی هستند. تغییر رنگ خاک‌های لسی جوان به رنگ زرد کم‌رنگ بوده (جدول ۲) زیرا کم‌تر تحت تأثیر هوادیدگی قرار گرفته‌اند (۲۵). تغییرات رنگ، مشخص‌کننده شرایط محیطی مناسب‌تر نسبت به شرایط امروزی (دما و به خصوص بارندگی) است.

طاهری و همکاران (۲۹) بر اساس نتایج پژوهش میکرومورفولوژی، بیان کردند که احتمالاً میزان متوسط سالیانه بارندگی در زمان تشکیل خاک‌های لسی اوایل پلیستوسن، ۶۵۰-۴۵۰ میلی‌متر بوده است. آزمایش بافت خاک نشان می‌دهد که سیلت، ذره غالب در خاک‌رخ-های مدرن بوده که در بیش‌تر افق‌ها بیش از ۶۰ درصد ذرات را تشکیل می‌دهد. با توجه به منشأ بادرقتی رسوبات لسی، غالب بودن سیلت مورد تأیید بسیاری از پژوهشگران است و جزء خصوصیات اصلی این خاک‌ها می‌باشد که با نتایج ضیایی و همکاران^۱ (۳۴) مطابقت دارد. اما در خاک‌های قدیمی، ذرات رس بیشترین مقدار را دارند. به صورت میانگین، حدود ۵۰-۳۰ درصد رس در افق‌های مختلف مشاهده شد. مقدار رس به صورت چشم‌گیری در خاک‌های قدیمی در مقایسه با خاک‌های مدرن افزایش یافته است که این مسأله می‌تواند به دلیل هوادیدگی و یا انتقال رس به افق‌های تحتانی باشد.

موس (۱۸) نیز افزایش میزان رس در توالی‌های لس-خاک قدیمی را نتیجه انتقال رس و هوادیدگی، به-خصوص در بخش خاک‌های قدیمی می‌داند. تمامی

است. از خصوصیات بازر کانال‌ها، وجود بقایای ریشه و مواد آلی در داخل آن‌ها است که نشانه فعالیت زیستی است. طاهری و همکاران (۲۹) با تکیه بر پژوهش میکرومورفولوژیک خاک‌های لسی نشان، دادند که پوشش‌های رسی ناشی از انتقال و تجمع ذرات ریز رس و تجمع آهک می‌تواند در بهبود و پایداری ساختمان خاک مؤثر باشد که با نتایج نجفی‌نیا و همکاران (۱۹) نیز مطابقت دارد. با توجه به نتایج فیزیکی‌وشیمیایی به‌دست آمده در مقاطع مورد پژوهش، افق دارای ریزساختمان توده‌ای، بیشترین مقدار سیلت را دارد. به‌طور کلی مقدار سیلت در این افق‌ها، بیش از ۵۰ درصد بوده است. ریزساختمان مکعبی بدون زاویه با تمایز متوسط و خوب بیشترین فراوانی را در خاک‌های قدیمی دارد. وجود این نوع ساختمان را می‌توان به مقدار رس و نوع رس نسبت داد؛ به‌طوری که افق توسعه یافته آرچلیک در خاک‌رخ‌های لسی قدیمی، دارای ساختمان مکعبی زاویه‌دار با تمایز خوب است که بیان‌کننده تکامل این افق است.

بی‌فابریک

بی‌فابریک‌های مشاهده شده در مقاطع شامل بلورین، لکه‌ای و نامشخص است. بی‌فابریک بلورین، در اثر فراوانی ذرات ریز کلسیت میکریتی حاصل شده است. رسوب از محلول خاک و فرآیند آبشویی افق‌های فوقانی در بروز این بی‌فابریک مؤثر هستند (۱۳). بی‌فابریک لکه‌ای در نتیجه، آب‌شویی بخشی از آهک به اعماق زیرین و خاصیت بی‌رفرنزانی رس ایجاد شده است (۷). وجود بی‌فابریک لکه‌ای به همراه بی‌فابریک بلورین بیان‌کننده فرآیند تخلیه موضعی آهک در خاک است.

بی‌فابریک خاک در خاک‌رخ‌های غنی از آهک عمدتاً بلورین بوده؛ چرا که در این خاک‌ها، تخلیه آهک رخ داده است. این نتیجه با پژوهش میکرومورفولوژی طاهری و همکاران (۲۹) در خاک‌های پالئوسول قرمز رنگ فلات لسی شمال ایران مطابقت داشته است. مقدار بالای کربنات و بی‌فابریک بلورین، می‌تواند ناشی از فرآیند تجمع

علت اصلی افزایش CEC، با توجه به نتایج کانی‌شناسی به‌دست آمده (۲۹)، میزان رس زیاد و غالب بودن کانی اسمکتیت است. کمتر بودن میزان ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک‌های لسی مدرن در مقایسه با خاک‌های لسی قدیمی به علت کمتر بودن میزان رس، ماده آلی و غالب بودن کانی‌های ایلیت و کلریت است.

نتایج میکرومورفولوژی

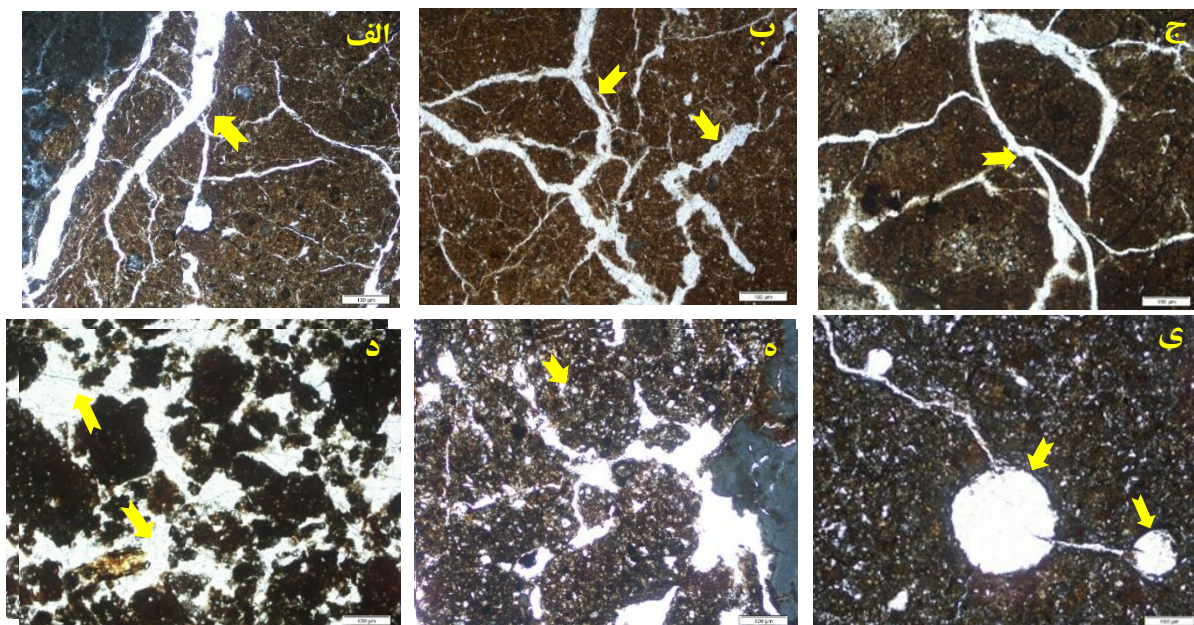
برای هر یک از نمونه‌ها، مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی مانند ریزساختمان، نوع حفرات، رنگ و وضوح، توزیع اندازه ذرات درشت به ریز (C/f)، بی‌فابریک، پدوفیچر (شامل پوشش‌های رسی، حضور و یا عدم وجود کربنات کلسیم، اکسیدهای آهن و منگنز و ...) و مواد آلی بررسی شد.

ریزساختمان و حفرات

در مقاطع خاک‌های لسی مدرن ریزساختمان خاک عمدتاً از نوع کانال، دانه‌های و مکعبی نسبتاً گوشه‌دار و ریزساختمان خاک‌های لسی قدیمی عمدتاً از نوع مکعبی گوشه‌دار و نسبتاً گوشه‌دار است (شکل ۲). مقایسه مقاطع نازک افق‌های سطحی خاک‌های قدیمی و مدرن نشان می‌دهد که مقدار مواد آلی در خاک‌های قدیمی، کاهش یافته است؛ به سبب کاهش مواد آلی و کاهش فعالیت بیولوژیک نوع حفرات نیز تحت تأثیر قرار گرفته است؛ به‌طوری که در خاک‌های قدیمی حفرات کانالی، بی‌شکل و همچنین ریزساختمان‌های اسفنجی و کروی به تدریج کاهش یافته و به تعداد حفرات انقباضی افزوده می‌شود. در این مقاطع ریزساختمان مکعبی بیش‌ترین فراوانی را دارد ضمن این که توسعه ریزساختمان بهتر بوده و از وضوح بیش‌تری برخوردار است. وجود حفرات صفحه‌ای و نیز ریزساختمان مکعبی به‌طور عمده بر اثر خاصیت انقباض و انبساط دوره‌ای به وجود می‌آید (۱۹). بررسی حفرات در خاک‌های لسی مدرن، نشان می‌دهد که کانال‌ها شکل غالب حفرات هستند. همچنین قطر کانال‌ها و حفرات بی‌شکل در خاک‌های مدرن بیش‌تر از خاک‌های قدیمی

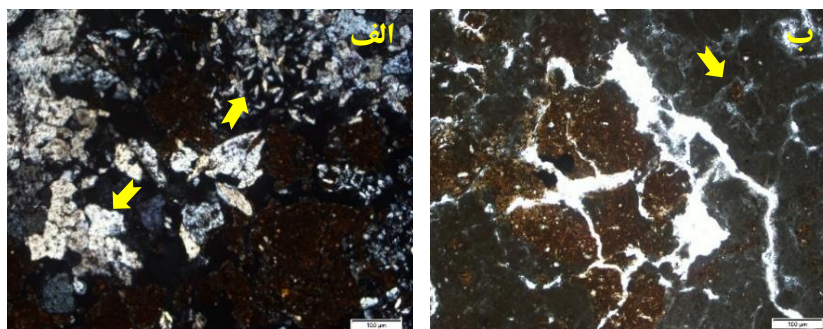
الگوی پراکنش نسبت ذرات درشت به ریز در تمام افق‌های خاک قدیمی و مدرن از نوع پورفیریک است. حد میان ذرات درشت به ریز ۲۰ میکرون انتخاب شد. نتایج به-دست آمده نشان داد که نسبت c/f در نمونه‌های خاک لسی مدرن از این نسبت در نمونه‌های خاک قدیمی بیشتر است. علت این امر، تشکیل پدوژنیک مقدار زیادی رس در خاک‌های قدیمی است. در حقیقت الگوی پراکنش نسبت ذرات درشت به ریز در خاک‌های قدیمی از نوع پورفیریک تک فاصله و تا حدودی باز است. اما در نمونه‌های خاک مدرن، به علت نزدیک شدن ذرات به هم نوع الگوی پراکنش نسبت ذرات درشت به ریز پورفیریک تک فاصله‌ای و پورفیریک نزدیک است. اصلی‌ترین کانی درشت در تمام مقاطع، از نوع ذرات معدنی کوارتز زاویه دار یا بدون زاویه است.

مجدد آهک نیز باشد (۱۴). کانال‌های پوشیده شده توسط کلسیت (در افق‌های Bkk و Bkkm) این فرضیه را اثبات می‌کند. بی‌فابریک در خاک رخ غنی از گچ خاک مدرن منطقه آق‌بند، نیز بلورین است. بی‌فابریک غالب مشاهده شده در خاک‌های قدیمی، لکه‌ای است؛ زیرا با توجه به مطالعات مغناطیسی که توسط طاهری و همکاران (۲۹) در منطقه آق‌بند صورت گرفته است، میانگین بارندگی سالیانه گذشته منطقه را در حدود ۴۵۰-۶۵۰ میلی‌متر برآورد کرده‌اند که به دلیل افزایش میزان بارندگی و افزایش تراکم پوشش گیاهی آن زمان مقداری از آهک از زمینه خاک شسته شده است و به موجب آن، قسمت‌هایی از سولوم خاک‌های تشکیل شده در این نواحی، از آهک تهی شده و بی‌فابریک لکه‌ای که اشاره به جهت یافتگی فیلسیلیکات‌ها دارد، پدیدار گشته است.



شکل (۲) ریزساختمان و حفرات در مقاطع خاک‌های قدیمی و مدرن. الف: ریزساختمان مکعبی گوشه‌دار در افق زیرسطحی (Btkg₁- پالئوسول آق‌بند). ب: حفرات صفحه‌ای در افق زیرسطحی (Btkg₁- پالئوسول آق‌بند). ج: حفرات صفحه‌ای در افق زیرسطحی (Btkgb- پالئوسول یلی‌بدراق). د: حفرات واگ در افق زیرسطحی (Bw- مدرن یلی‌بدراق). ه: ریزساختمان توده‌ای در افق سطحی (A- مدرن یلی‌بدراق). ی: حفرات حجره در افق زیرسطحی (C- مدرن یلی‌بدراق)

Figure (2) Microstructure and voids of Sections paleosol and modern soils. a: Angular blocky microstructure of the subsurface horizon (Btkg₁- paleosol Agh-Band). b: Plane voids in subsurface horizon (Btkg₁- paleosol Agh-Band). c: Plane voids in subsurface horizon (Btkgb- paleosol Yelli-Badrag). d: Vugh voids in subsurface horizon (Bw- modern Yelli-Badrag). e: Massive microstructure in the surface horizon (A- modern Yelli-Badrag). f: Chamber voids in the subsurface horizon (C- modern Yelli-Badrag)



شکل (۳) بی فابریک خاک‌های مختلف. الف: بی فابریک گچ بلورین در افق سطحی (Ay- پالئوسول آق‌بند). ب: بی فابریک کلسیت بلورین در افق زیرسطحی (Bkmb- پالئوسول یلی‌بدراق)

Figure(3) Different soil b- fabric. a: Gypsic crystallitic b- fabric in the surface horizon (Ay- paleosol Agh-Band). b: Calcitic crystallitic b- fabric in the subsurface horizon (Bkmb- paleosol Yelli-Badrag)

بر مرز کانال و حجره‌ها در عمق خاک‌های قدیمی، نشانه تجمع آهک شسته شده و شستشوی آن از سطح خاک است.

ندول‌های کلسیت میکریست، غالب‌ترین نوع کربنات‌های پدوژنیک می‌باشد (شکل ۴). تشکیل و مورفولوژی این ندول‌ها به وسیله عوامل زیادی شامل فرآیندهای انحلال و تبلور، غلظت نمک، بافت خاک (۳۳) پایداری خاک و شرایط هیدرومورفوسم (۲۷) و شرایط مناسب برای رسوب کربنات کلسیم تعیین می‌شود.

نتایج میکرومورفولوژی، نشان داده است در تمامی خاک‌رخ‌ها ندول آهک وجود دارد، ولی اندازه و مقدار آن از خاک‌رخ‌های خاک مدرن به قدیمی کاهش یافته است. منشأ ندول‌هایی با مرز نامنظم درجا یا پدوژنیک است (۲)؛ ولی سگال و استوپس (۲۷) معتقدند که مرز خارجی همیشه نمی‌تواند ملاک مناسبی برای منشأ ندول‌ها باشد؛ چرا که مرز خارجی، به راحتی می‌تواند تحت تأثیر عوامل به هم زنده خاک قرار گیرد. این ندول‌ها در نتیجه ترسیب مجدد کربنات ثانویه ناشی از فرآیند آبشویی حاصل شده‌اند که با نتایج حاصل از بررسی‌های میکرومورفولوژیک طاهری و همکاران (۲۹) روی توالی لس - پالئوسول فلات لسی شمال شرق ایران مطابقت می‌کند.

پوشش‌های کربنات کلسیم

بسته به فرآیندهای فیزیکوشیمیایی و فعالیت جانوری در خاک، تجمع کربنات کلسیم می‌تواند فرم‌های مختلفی را در خاک به وجود آورد (۱۳).

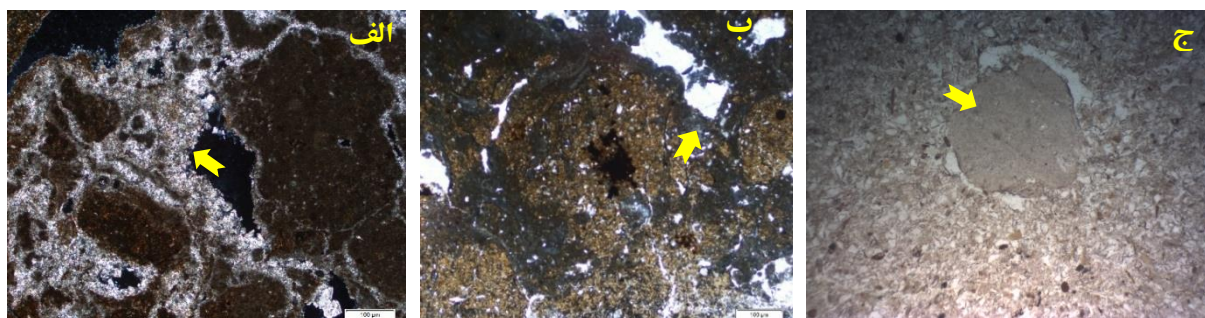
کربنات کلسیم از ویژگی‌های ثانویه لس‌ها به شمار می‌آید. در پژوهش میکرومورفولوژیک حاضر، گستره وسیعی از شکل‌های متنوعی از کربنات کلسیم خاک‌ساز مانند انواع پوشش‌ها، ندول و پرشدگی دیده شده است. بیش‌ترین شکل‌های آهکی هم در خاک‌های قدیمی و هم در خاک‌های مدرن مربوط به سخت دانه‌های آهکی است. عمق آبشویی بیش‌تر در خاک‌های لسی قدیمی نسبت به خاک‌های لسی مدرن، سبب شستشوی بیشتر آهک از افق‌های سطحی این خاک‌ها شده است.

پوشش کربنات کلسیم در تمامی خاک‌رخ‌ها دیده شده است. بروئر و اسلیمن (۳) تشکیل پوشش آهکی را تحت تأثیر دو پروسه پخشیدگی و حرکت تعلیقی می‌دانند. طی فرآیند پخشیدگی، پلاسمای آهکی از بی فابریک خاک به طرف سطوح نظیر حفرات و خاک‌دانه‌ها حرکت می‌کند. در حرکت تعلیقی محلول حاوی کربنات از منافذ به داخل بی فابریک خاک حرکت کرده و مواد آهکی را روی سطوح به جای می‌گذارد (۲۷). مشاهده پوشش‌های آهک

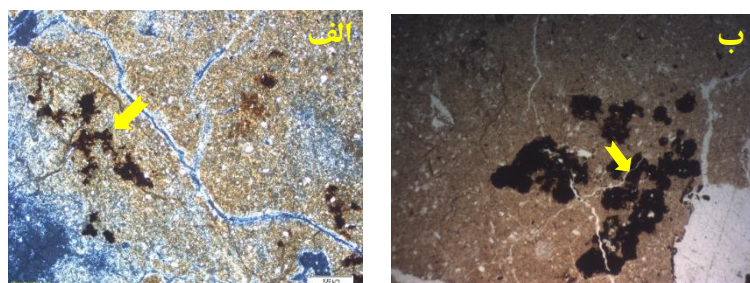
نجفی نیا و همکاران: میکرومورفولوژی خاک‌های لسی...

در تمام مقاطع خاک‌های قدیمی و مدرن با مقادیر متفاوت مشاهده شد. هیپوکوتینگ و ندول اکسیدهای آهن و منگنز از مهم‌ترین پدوفیچرهای رداکسی مورفیک موجود در خاک‌های قدیمی است. موقعیت ندول‌های اکسیدهای آهن و منگنز که بیشتر در اطراف حفرات و به فاصله کمی از آن بود که نشانگر شرایط احیاء در فضای خلل و فرج و شرایط اکسیدتری در زمینه خاک است، از این رو اکسیدهای محلول با حرکت به طرف زمینه خاک و برخورد با شرایط اکسید، به صورت نامحلول درآمده و به صورت ندول رسوب و تجمع پیدا کرده‌اند. خاک‌های قدیمی به دلیل مقدار زیاد رس و نفوذپذیری کم و همچنین شرایط اشباع خاک و نیز به دلیل هوادیدگی بیشتر و آزادسازی آهن از ساختار کانی‌ها، مقادیر بیشتری از عوارض اکسید و احیا را نشان دادند.

پدوفیچر پوشش‌های اکسیدهای آهن و منگنز
اکسیدهای آهن و منگنز به تغییرات اقلیمی بسیار حساس هستند و در بین خاک و سنگ حرکت می‌کند و در خاکدانه‌ها رسوب می‌کنند (۵). تشکیل و رفتار اکسیدهای آهن و منگنز به صورت پوششی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، شکل و نوع کاربری اراضی است (۳۰). در خاک‌های قدیمی اکسیدهای آهن و منگنز به شکل کوتینگ و هیپوکوتینگ مشاهده شد (شکل ۵). ویژگی مهم این هیپوکوتینگ‌ها، افزایش اشباع شدگی با نزدیک شدن به سمت حفره است. هیپوکوتینگ‌های اکسیدهای آهن و منگنز در حفرات، نتیجه تفاوت در شرایط رداکس و زهکشی نامناسب خاک است. این پدوفیچرها، زمانی تشکیل می‌شوند که آب غنی از آهن و منگنز در طول دیواره میکروپوره‌های غنی از هوا عبور کند (۱۶).



شکل (۴) پدوفیچرهای کربنات کلسیم. الف: پوشش کربنات کلسیم در افق زیرسطحی. (Ay - پالئوسول آق‌بند). ب: پوشش کربنات کلسیم در افق زیرسطحی (Btkg₄₁ - پالئوسول قره‌آغاچ). ج: ندول آهک در افق سطحی (C - مدرن آق‌بند)
Figure(4) Calcium carbonate pedofeatures. a: Calcium carbonate coating in the subsurface horizon (Ay- paleosol Agh-Band). b: Calcium carbonate coating in the subsurface horizon (Btkg₄₁- paleosol Qareh-Agach). c: Calcite Nodules in surface horizon (C- modern Agh-Band)



شکل (۵) پدوفیچرهای اکسید آهن و منگنز. الف: اکسیدهای آهن و منگنز در اطراف حفره (Btkgb - پالئوسول یلی‌بدراق)، ب: تجمع اکسیدهای آهن و منگنز در زمینه خاک (Btkgb - پالئوسول یلی‌بدراق)
Figure(5) Fe, Mn oxidas pedofeatures. a: Fe, Mn oxidas around the void (Btkgb – paleosol Yelli-Badrag). b: Accumulation of Fe, Mn oxidas in the Soil context (Btkgb - paleosol Yelli-Badrag)

عوارض خاکساز رسی

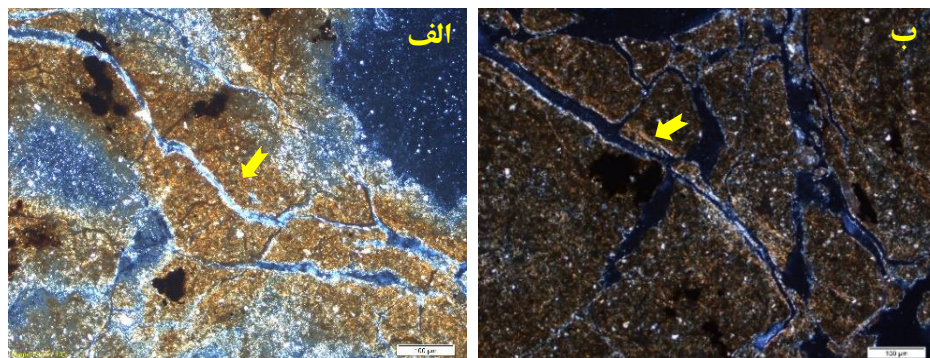
مربوط نیست. نبود پوشش‌های رسی قابل توجه در خاک‌رخ‌های قدیمی به سبب حضور قابل توجه کانی اسمکتیت است که فرآیند انبساط و انقباض با شدت بیش‌تری وجود داشته و به موجب آن شرایط نامساعدتری را برای حفظ و پایداری پوشش‌های رسی فراهم می‌کند. پوشش‌های رس در اطراف حفرات، دارای شکستگی هستند. این شکستگی‌ها، نشان‌دهنده وجود فرآیندهای انقباض و انبساط ناشی از خشک و خیس شدن متوالی و تخریب فیزیکی پوشش‌ها است (۱۴ و ۲۳).

پدوفیچر گچ

یکی دیگر از پدوفیچرهای مشاهده شده کریستال‌های گچ است. مقدار آن در خاک‌رخ‌های مدرن هر سه منطقه و به‌خصوص افق A و C خاک‌رخ مدرن منطقه آق‌بند افزایش چشم‌گیری دارد که با اندازه‌گیری گچ به صورت آزمایشگاهی مطابقت دارد. خصوصیات غالب دیده شده در افق‌های خاک‌های مدرن، وجود گچ عدسی شکل، پر شدگی حفرات با گچ عدسی شکل و گچ‌های کریستالی بر سطوح حفرات بوده است. حضور گچ در افق B_۱ خاک‌رخ‌های قدیمی سه منطقه یک فرآیند پلی ژنتیک است و به نظر می‌رسد که مربوط به انحلال و تجمع گچ از لس‌های مدرن و نفوذ آن به خاک‌های قدیمی زیری اتفاق افتاده باشد.

شواهد میکرومورفولوژی موجود در مقاطع نازک از جمله پوشش‌های رسی بر حفرات کانالی، نشان‌دهنده حرکت انبوهی از رس‌های ایلوویال است که به صورت رس‌های جهت یافته در طول خاک‌رخ به وسیله آب-شویی است که در طول شکاف‌ها و کانال‌ها به افق‌های زیر سطحی انتقال پیدا کرده و آرایش یافته است. پوشش‌های رسی در خاک، شواهدی از انتقال رس از افق‌های بالایی به افق‌های تحتانی در نتیجه نفوذ آب هستند. فاکتور کلیدی برای تجمع رس، وجود دوره‌های خشکی است تا رس منتقل شده نگهداری شود (۶). در افق‌های متکامل آرچلیک (افق Bt خاک‌رخ‌های قدیمی) پوشش‌های رسی لایه‌ای با تمایز بالا در اطراف حفرات مشاهده شده است.

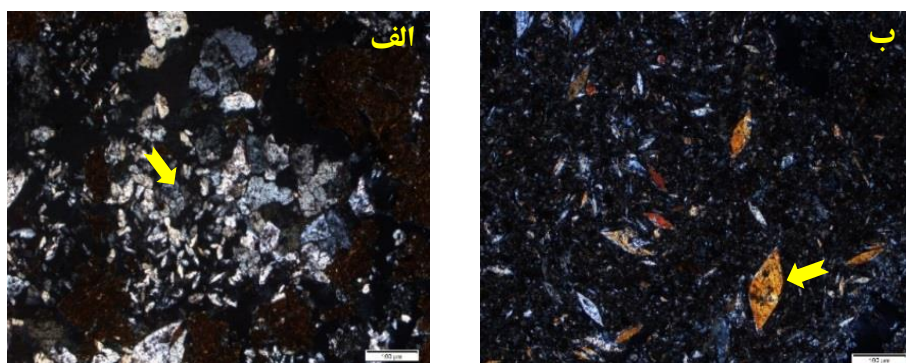
در منطقه، مورد پژوهش، افق آرچلیک در خاک‌های قدیمی روی سطوح زمین نمای پایدار تشکیل شد. در این شرایط مقادیر کم تا زیاد پدوفیچرهای تخلیه آهک، تجمع رس و پدیدار شدن بی فابریک لکه‌ای و خطی در لایه‌های فوقانی و بلورین در افق‌های عمقی خاک مشاهده می‌شود (۱۴). استقرار پوشش طبیعی جنگل و پایداری زمین نما گذشته منطقه، شرایط مناسب برای آبشویی آهک و رس را فراهم آورده است و وجود پوشش رسی اطراف حفرات به اقلیم حال حاضر منطقه،



شکل (۶) پدوفیچرهای ناشی از تجمع و تخلیه رس. الف: رس‌های آرایش یافته در اطراف حفره (Btkgb) پالنوسول یلی-بدراق، ب: رس‌های آرایش یافته در اطراف حفره (Btkb) پالنوسول یلی بدراق

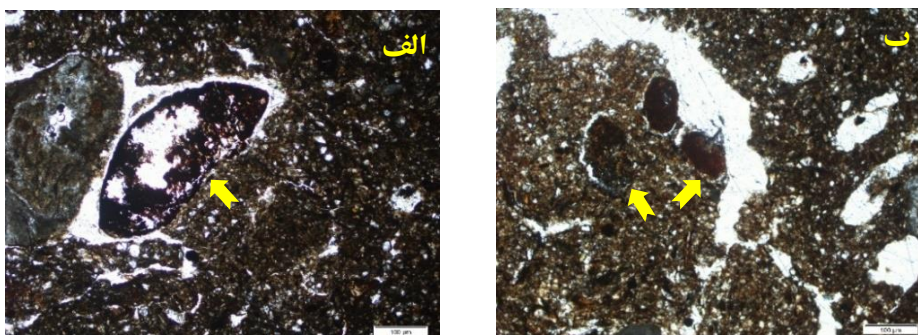
Figure(6) Clay depletion and Impregnative pedofeatures. a: Clay orientated around the void (Btkgb) – paleosol Yelli-Badrag. b: Clay orientated around the void (Btkb - paleosol Yelli-Badrag)

نجفی نیا و همکاران: میکرومورفولوژی خاک‌های لسی...



شکل (۷) پدوفیچر اشکال مختلف گچ. الف: گچ عدسی شکل به همراه گچ کریستاله در افق (Ay - پالئوسول آق‌بند). ب: گچ عدسی شکل در افق (C-مدرن آق‌بند)

Figure(7) various forms of gypsum pedofeatures. a: Typic gypsic and Gypsic crystallitic in the horizon (Ay – paleosol Agh-Band). b: Typic gypsic in the horizon (C – modern Agh-Band)



شکل (۸) عوارض زیستی. الف: بقایای گیاهی و لکه‌های ماده آلی در افق (A- مدرن یلی بدراق) ب: بقایای آلی و مسیرهای عبور و مرور جانوران در افق (A-مدرن یلی بدراق).

Figure(8) Biological complications. a: Plant remains and organic matter spots in the horizon (A- modern Yelli-Badrag). b: Organic matter and animal paths in the horizon (A- modern Yelli-Badrag)

است (۱۰) که مشاهده حفرات نوع صفحه‌ای در این خاک نشان‌دهنده این تغییرات است.

شاخص MISECA

شاخص میکرومورفولوژی تحول خاک (MISECA) برای تخمین درجه تکامل خاک‌ها محاسبه گردید. نتایج حاصل در جدول ۲ آمده است. افق‌های آرچلیک مطابق این شاخص دارای درجه تکامل متوسط می‌باشند. مقایسه درجه تکامل افق‌های Bt خاک‌های قدیمی در سه منطقه با استفاده از شاخص MISECA نشان داد (جدول ۳)، که افق Bt خاک‌های قدیمی در سه منطقه مورد پژوهش، تقریباً در یک محدوده هستند.

عوارض خاک‌ساز ناشی از فعالیت زیستی

وجود حفرات کانالی نشان‌دهنده رشد و نفوذ ریشه گیاهان در خاک و فعالیت زیستی موجودات زنده است (۱۲). وجود این حفره در خاک‌های لسی مدرن و قدیمی را می‌توان به این شکل توجیه کرد که در خاک‌های مدرن به دلیل ماده آلی بیشتر نسبت به خاک‌های قدیمی و همچنین وجود بقایای ریشه، فعالیت جانوری بیشتر، فشردگی خاک کمتر، حفرات بیشتر از نوع کانال بوده است. در مقابل در خاک‌های قدیمی، وجود کانی اسمکتیت زیاد، اثر مهمی روی پارامترهای فیزیکی خاک از قبیل تخلخل و وزن مخصوص ظاهری خاک گذاشته

بیان کردند، خاک‌های قدیمی در توالی لس قرمز فلات شرق استان گلستان، در یک محیط با متوسط بارندگی سالانه ۶۵۰-۴۵۰ میلی‌متر بوجود آمده‌اند و نشان‌دهنده اقلیم مرطوب‌تری نسبت به اقلیم تشکیل خاک‌های مدرنی است که به‌وجود آمده‌اند.

این نتیجه بر اساس مطالعات میکرومورفولوژی (نظیر ریزساختمان، حفرات، رنگ، بی‌فابریک، پدوفیچرها و عوارض بیولوژیک) مطابقت می‌کند و با شاخص‌های MISECA اندازه‌گیری شده توسط طاهری و همکاران (۲۹) در منطقه آق‌بند استان گلستان هماهنگی دارد. آن‌ها

جدول (۳) بررسی شاخص MISECA در افق‌های آرجلیک خاک‌رخ‌های خاک‌های قدیمی
Table(3) Investigating index MISECA in the argilic horizons paleosol sections

MISECA	درجه Alteration degree	اکسیدهای Fe.Mn oxides	منطقه تخلیه شده از آهک Decalcified Zone (%)	پوشش‌های رسی Clay coating	بی‌فابریک b- fabric	ریزساختمان Microstructure	افق Horizon	منطقه Region
13 moderately developed	2	1	3	1	3	3	Btg ₂	خاک قدیمی آق‌بند Agh-Band paleosol
16 moderately developed	3	1	4	1	4	3	Btk ₂	خاک قدیمی یلی‌بدراق yelli-Badrag paleosol
15 moderately developed	3	1	4	1	3	3	Btkg ₂	خاک قدیمی قره‌آغاچ Qareh-Agach paleosol

ریزساختمان از نوع مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی خوب و بی‌فابریک لکه‌ای و بلورین (نشان دهنده شستشویی آهک و تجمع رس) است. پدوفیچرهای غالب پوشش رس، ندول کلسیت، اکسیدهای آهن و منگنز می‌باشد. در نمونه‌های خاک‌های مدرن از غالبیت حفره صفحه‌ای کاسته شده و بر نوع واگ و کانال افزوده شده است. ریزساختمان غالب مکعبی بدون زاویه با جدا شدگی خوب تا متوسط می‌باشد. بی‌فابریک غالب از نوع بلورین است. پدوفیچرهای غالب ندول کلسیت و گچ عدسی شکل و پر شدگی حفرات با گچ می‌باشد. خاک‌های قدیمی از تکامل خاک‌رخ قابل توجهی برخوردار بوده و شستشوی آهک و مهاجرت متعاقب رس در خاک‌رخ خاک سبب تشکیل افق آرجلیک شده است. وجود افق کلسیک در اعماق خاک نیز مؤید آهک‌زدایی و شستشوی شدید آهک در خاک‌رخ خاک است. یکی از عوارض پدوژنیک مشاهده شده در خاک‌های قدیمی

نتیجه‌گیری

وجود خاک‌های لسی قدیمی اوایل پلیستوسن در بین رسوبات لسی مدرن اواخر پلیستوسن در استان گلستان، شرایط مطالعه مقایسه پدولوژیکی و میکرومورفولوژیکی خاک‌های مدرن و خاک‌های قدیمی را در این مناطق فراهم آورد و نتایج آن گوشه‌ای از تغییرات اقلیمی شمال ایران را روشن کرد. فرآیندهای انتقال رس، ایجاد پوشش‌های رسی و تشکیل افق آرجلیک، انحلال آهک، انتقال و رسوب به شکل کرنات کلسیم ثانویه در خاک‌های آلفی سولز، آزادسازی اکسیدهای آهن و منگنز از کانی‌ها و توزیع آن‌ها در ماتریکس خاک، در خاک‌های لسی قدیمی از مهم‌ترین فرآیندهای پدوژنیک صورت گرفته در خاک‌های این منطقه است. نتایج پژوهش مقاطع نازک نشان داد که در نمونه‌های خاک‌های قدیمی، نوع غالب حفره واگ و صفحه‌ای،

نجفی نیا و همکاران: میکرومورفولوژی خاک‌های لسی...

شستشو و انتقال رس می‌باشد که به صورت پوشش‌های رسی در مقاطع نازک افق آرجیلیک دیده می‌شود. مقایسه توزیع پوشش‌های رسی در خاک‌رخ خاک‌های این سه منطقه نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه یلی‌بدراق از تکامل بیشتری برخوردار بوده و نشان‌دهنده اقلیم مرطوب آن نسبت به دو منطقه دیگر می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند در جهت تکمیل مطالعات شواهد تغییر اقلیم گذشته در خاک‌های پالئوسل بسیار مفید باشد.

منابع

1. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
2. Brewer, R. 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. John wily sons. Inc. Network. 442 pp.
3. Brewer, R., and Sleeman, J.R. 1960. Soil structure and fabric: definition, classification and interpretation. *Journal of Soil Science*, 11: 172-185.
4. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp: 891-901.
5. Dixon, J.B., and Skinner, H.C.W. 1992. Manganese minerals in surface environments. In: Skinner, H.C.W., Fitzpatrick, R.W. (Eds.), *Biominalization Processes of Iron and Manganese- Modern and Ancient Environments*. Catena Verlag. Cremlingen, pp: 31-50.
6. Fedoroff, N., Courty, M.A., and Thompson, M.L. 1990. Micromorphological evidence of paleoenvironmental change in Pliocene and Holocene paleosols. In: Douglas, L. A. ed. *Soil micromorphology: A basic and applied science*. Developments in Soil Science, pp: 653-665.
7. Fitzpatrick, E.A. 1993. *Soil microscopy and micromorphology*. John Wiley and Sons Pub., Chichester: John Wiley and Sons, 29.
8. Gunal, H., and Ransom, M.D. 2006, b. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. *Catena*, 65: 222-236.
9. Guo, Z., Federoff, N., and An, Z.S. 1991. Genetic type of the Holocene soil and the Pleistocene paleosol in the Xifeng loess section in central China. *Loess, Environment and Global Change*, 93-111.
10. Katswario, T., Cox, J.W., and Van Es, H. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical properties. *Agronomy Journal*, 94: 299-304.

11. Kemp, R.A. 1999. Micromorphology of loess-paleosol sequences: a record of paleo environmental change. *Catena*, 35: 179-196.
12. Kemp, R.A., Toms, P.S., King, M., and Krohling, D.M. 2004. The pedosedimentry evolution and chronology of Tortugas, a late Quaternary type-site of northern Pampa, Argentina. *Quaternary International*, 114: 101-112.
13. Kemp, R.A., Toms, P.S., Sayago, J.M., Derbyshire, E., King, M., and Wagoner, L. 2003. Micromorphology and OSL Dating of the basal part of the loessosol sequence at La Mesada in Tucuman province, Northwest Argentina. *Quaternary International*, 106: 111-117.
14. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, Sh., and stoops, G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid region of southern Iran. *Catena*, 776: 1-29.
15. Mack, G.H., James, W.C., and Monger, H.C. 1993. Classification of paleosols. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 188-203.
16. McCarthy, P.J., Martini, I.P., and Leckie, D.A. 1998. Use of micromorphology for paleoenvironmental interpretation of complex alluvial paleosols: an example from the Mill Creek Formation (Albian), southwestern Alberta, Canada. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 143: 87-110.
17. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A.L. (Ed.): *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp: 199-224.
18. Muhs, D.R. 2013. The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research*, 9: 3-48.
19. Najafinia, M., Khormali, F., Kiani, F., and Baranimotlagh, M. 2017. Comparison of the clay micromorphology of the early Pleistocene paleosols with modern loess-derived soils. *International Conference on Loess Research*, pp. 80.
20. Nedachi, Y., Nedachi, M., Bennett, G., and Ohmoto, H. 2005. Geochemistry and mineralogy of the 2.45 Ga Pronto paleosols, Ontario, Canada. *Chemical Geology*, 214: 21-44.
21. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Buxton, D.R. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. SSSA, Madison, WI, USA, pp: 539-579.
22. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: *Methods of Soil Analysis. Part II*. Page, A.L. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp: 181-197.
23. Nordt, L.C., Wilding, L.P., Lynn, W.C., and Crawford, C.C. 2004. Vertisol genesis in humid climate of the coastal plain of Texas, U.S.A. *Geoderma*, 122: 83-102.

24. Page, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., and Hendricks, G.J. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 1460-1465.
25. Pashaei, A. 1997. Study of physico-chemical characteristics and the source of loess deposits in Gorgan plain region. *Earth Science Journal, Iranian Geology Organization*, 23-24: 67-68.
26. Ruhe, R.V. 1965. Quaternary and paleopedology. In wright, H.E., and D.G. Fery (Eds.). *The Quaternary of the United State*. Princeton University Press. Princeton, NJ, pp: 755- 764.
27. Segal, J.L., and Stoops, G. 1972. Pedogenic calcic accumulation in arid and semiarid region of the Indo-Gangetic alluvial plain of the erstwhile Punjab (India). Their morphology and origin. *Geoderma*, 8: 59-72.
28. Stoops, G. 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. SSSA. Madison, WI.
29. Taheri, M., Khormali, F., Wang, X., Amini, A., Wei, H., Kehl, M., Frechen, M., and Chen, F. 2017. Micromorphology of the lower Pleistocene loess in the Iranian Loess Plateau and its paleoclimatic implications. *Quaternary International*, 429: 31-40.
30. Tan, W., Liu, F., Feng, X., Huang, Q., and Li, X. 2005. Adsorption and redox reaction of heavy metals on Fe- Mn nodules from Chinese Soils. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284: 600-605.
31. Wang, X., Wei, H., Khormali, F., Taheri, M., Kehl, M., Frechen, M., Lauer, M., and Chen, M. 2017. Grain-size distribution of Pleistocene loess deposits in northern Iran and its palaeoclimatic implications. *Quaternary International*, 429: 41-51.
32. Wang, X., Wei, H., Taheri, M., Khormali, F., Danukalova. G., and Chen, F. 2016. Early Pleistocene climate in western arid central Asia inferred from loess-palaeosol sequences. *Scientific Reports*, 1-9.
33. Wider, M., and Yaalon, D.H. 1982. Micromorphological fabrics and developmental stages of carbonate nodular forms related to soil characteristics. *Geoderma*, 28: 203-220.
34. Ziyae, A., Pashaei, A., Khormali, F., and Roshani, M.R. 2013. Some physico-chemical, clay mineralogical and micromorphological characteristics of loess-paleosols sequences indicators of climate change in south of Gorgan. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(1): 1-27.