



دانشگاه گورگان و منابع طبیعی گورگان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد هجدهم، شماره اول، ۱۳۹۰  
www.gau.ac.ir/journals

## میکرومورفولوژی تکامل برخی خاک‌های لسی غرب استان گلستان در یک توالی اقلیم- توپوگرافی- پوشش گیاهی

مونا لیاقت<sup>۱</sup> و \*فرهاد خرمالی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

<sup>۲</sup> دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۱

### چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی میکرومورفولوژی تکامل برخی خاک‌های لسی غرب استان گلستان در یک توالی اقلیم- توپوگرافی- پوشش گیاهی است، که از زمین‌های پست شمال شروع شده و در جنوب به اراضی مرتفع جنگلی ختم می‌شوند. ۴ خاک‌رخ مورد مطالعه، در رژیم‌های رطوبتی اریدیک، زیریک و یودیک و در محدوده ارتفاع ۴۰۰-۲۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند. ۲۰ نمونه دست‌خورده خاک، به‌منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و ۲۰ نمونه دست‌نخورده خاک برای مطالعات میکرومورفولوژی از این مناطق جمع‌آوری شدند. خاک‌های مورد مطالعه از شمال به جنوب عبارت بودند از Typic Calcixerolls (خاک‌رخ ۲)، Typic Haploxerepts (خاک‌رخ ۱)، Gypsic Aquisalids (خاک‌رخ ۳) و Typic Hapludalfs (خاک‌رخ ۴). بررسی‌ها نشان دادند خاک‌های واقع در رژیم‌های رطوبتی زیریک و یودیک، دارای مقدار رس بیشتر می‌باشند. خاک آلفی سولز با رژیم رطوبتی یودیک و کاربری جنگل، دارای pH اسیدی ضعیف می‌باشد، ولی در اقلیم نیمه‌خشک و حضور گچ و آهک در خاک اریدی سولز، سبب افزایش pH در خاک شده است. حضور بلورهای ریز کلسیت در خاک اریدی سولز و افق زیرین خاک مالی سولز، سبب ایجاد بی‌فابریک کریستالیتیک در این خاک‌ها شده است. حال آن‌که بی‌فابریک غالب در خاک آلفی سولز، لکه‌ای- خطی می‌باشد. ساختمان میکروسکوپی غالب در خاک‌های آلفی سولز، اریدی سولز و اینسپتی سولز، مکعبی نیمه‌زاویه‌دار است. در افق سطحی خاک مالی سولز، ساختمان

\* مسئول مکاتبه: khormali@yahoo.com

میکروسکوپی دانه‌ای و اسفنجی مشاهده شد. همچنین در خاک مالی سولز، درصد حفره‌های بیش‌تری نسبت به سایر راسته‌ها مشاهده گردید. اطلاعات کمی میکروسکوپی خاک، با استفاده از نرم‌افزار Image Tool و آنالیز تصویر، انجام پذیرفت. تنوع حفره‌ها نیز با تغییر از رژیم رطوبتی اریدیک به سمت رژیم‌های مرطوب‌تر زیریک و یودیک بیش‌تر شد. در خاک‌های واقع در رژیم رطوبتی زیریک، پدوفیچرهای متنوعی از آهک و پوشش‌های اکسیدهای آهن و منگنز و در رژیم رطوبتی یودیک، پوشش‌های رسی و فرم تکه‌ای رس مشاهده گردید. پدوفیچرهای گچ نیز در خاک واقع در رژیم رطوبتی اریدیک دیده شد.

**واژه‌های کلیدی:** میکرومورفولوژی، آنالیز تصویر، تکامل خاک، توپوگرافی، رژیم رطوبتی

#### مقدمه

پستی و بلندی و اقلیم، دو مؤلفه اساسی در تشکیل و تکامل خاک می‌باشند. نقش توپوگرافی به‌عنوان عامل تشکیل‌دهنده خاک، می‌تواند موجب کند یا تند شدن اثر اقلیم شود. اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک (جو باگی و جکسون، ۲۰۰۰؛ جکوبز و ماسوم، ۲۰۰۵) و در نتیجه فعالیت‌های میکروبی خاک (نائل و همکاران، ۲۰۰۴) و نیز تشکیل و تکامل خاک‌ها، تأثیر مستقیم و غیرمستقیم دارد. اثر مستقیم اقلیم، توسط دما و رطوبت اعمال می‌شود. با افزایش میزان بارندگی، درجه تکامل خاک‌ها بیش‌تر می‌گردد. همچنین اقلیم، بر نوع کانی‌های رسی خاک‌ها تأثیر می‌گذارد (خرمالی و قربانی، ۲۰۰۹). دمای بالاتر، سرعت هوادیدگی شیمیایی را افزایش می‌دهد، ولی در برخی هوای گرم‌تر، سرعت هوادیدگی کاتیون‌ها به شدت کاهش می‌یابد (وست و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به تأثیر توپوگرافی، سرعت هوادیدگی در بلندی‌ها بیش‌تر است. این سرعت می‌تواند در سرعت شستشوی عناصر، تشکیل و دگرگونی کانی‌های رسی نمایان شود (اگلی و همکاران، ۲۰۰۸). الیوت و دورهان (۲۰۰۹) تکامل افق‌های آرجیلیک خاک‌ها را در نوادا (آمریکا) مورد مطالعه قرار دادند. طبق بررسی آن‌ها تکامل این خاک‌ها، در اثر هوادیدگی و رژیم رطوبتی حاضر که دارای رطوبت کافی برای شستشوی رس است، افزایش می‌یافت. آن‌ها همچنین بیان کردند افزایش مقدار کلسیم در افق Btk خاک مورد مطالعه آن‌ها، موجب فلاکوله کردن ذرات رس می‌شود، و به این ترتیب از شستشوی رس‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه مانع تکامل افق آرجیلیک در خاک می‌گردد. وو و چن (۲۰۰۵) نیز مشاهده نمودند در خاک‌های اینسپتی سولز واقع در رژیم رطوبتی پرئودیک در تایوان، انتقال رس در حدی نیست که افق آرجیلیک را تشکیل دهند.

به منظور تکمیل مطالعات مورفولوژی و تکامل خاک‌ها، بهره‌گیری از مطالعات میکرومورفولوژی نیز ضروری است. میکرومورفولوژی ابزاری دقیق برای مطالعه رده‌بندی و مدیریت خاک می‌باشد (استوپس، ۲۰۰۳). میکرومورفولوژی خاک، اجزای خاک را از نظر اندازه، شکل، چگونگی توجیه و تمرکز مورد بررسی قرار می‌دهد و تنها بیانگر مقدار کمی اجزای تشکیل‌دهنده خاک نمی‌باشد، بلکه چگونگی توزیع و توجیه آن‌ها را به‌عنوان معیار معتبری در ارزیابی بسیاری از فرایندها و یا پاسخ خاک در برابر کاربری‌ها مورد توجه قرار می‌دهد (استوپس، ۲۰۰۳).

گونال و رندسوم (۲۰۰۶) به مطالعه میکرومورفولوژی سه خاک مختلف تگزاس با میزان بارندگی متغیر (۷۱۵-۵۴۰ میلی‌متر) پرداختند. آن‌ها مشاهده بی‌فابریک خطی را به‌دست آمده از فعالیت‌های انبساط و انقباض ناشی از خشک و مرطوب شدن دانستند. نتایج مطالعات خرمالی و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد، در زمین‌های دارای کاربری جنگل واقع در استان گلستان، راسته‌های مالی‌سولز و آلفی‌سولز وجود دارد و شواهدی از شستشوی رس و بی‌فابریک خطی<sup>۱</sup> در مقاطع میکروسکوپی آن‌ها مشاهده گردید.

قرقره‌چی (۲۰۰۷) با بررسی میکرومورفولوژی و تحول خاک‌ها در یک ردیف اقلیمی-ارضی خاک‌های لسی استان گلستان، دریافت که در رژیم آریدیک، خاک‌هایی با تکامل حداقل از راسته آریدی‌سولز دیده می‌شود، و در رژیم رطوبتی زیریک، اینسپتی‌سولز، مالی‌سولز و در رژیم رطوبتی یودیک، آلفی‌سولز مشاهده می‌گردد. مشاهدات میکرومورفولوژی نیز نشان داد آرایش و مقدار زیاد پوشش رسی در افق آرجیلیک با توسعه خوب را می‌توان به‌میزان بارندگی ( $600 <$  میلی‌متر)، کاهش پتانسیل انقباض و انبساط خاک ناشی از حضور مقدار قابل توجه کانی ورمی‌کولیت و پایداری سطوح نسبت داد. بی‌فابریک این افق‌ها از نوع ترکیبی کریستالیتیک-لکه‌ای بود و مقدار نواحی تخلیه آهک بیش از ۷۰ درصد می‌باشد.

تخلیه آهک می‌تواند نمایانگر رژیم مرطوب منطقه باشد. آهک‌زدایی<sup>۲</sup> عامل غالب در تکامل آن دسته از خاک‌های آهکی است که افق آرجیلیک دارند. خاک‌های دارای مقادیر زیاد کلسیت اغلب دارای بی‌فابریک کریستالیتیک کلسیت هستند، به‌استثنا برخی از خاک‌های دارای افق آرجیلیک، که هنگامی که تخلیه آهک در این خاک‌ها صورت گرفته باشد، می‌تواند بی‌فابریک لکه‌ای<sup>۳</sup> داشته باشند

1- Straited

2- Decalcification

3- Speckled

(خرمالی و همکاران، ۲۰۰۳). بی‌فابریک لکه‌ای می‌تواند در نتیجه آب‌شویی بخشی از آهک به اعماق زیرین و ویژگی بایرفرینجنس<sup>۱</sup> رس ایجاد شود (فیتزپاتریک، ۱۹۹۳).

خرمالی و همکاران (۲۰۰۶) مشاهده نمودند اندازه و فراوانی بلورهای ریز کلسیت و پوشش‌های کلسیت، با حرکت از رژیم رطوبتی اریدیک به سمت زیریک افزایش می‌یابد. ولی به سمت مناطق دارای رژیم رطوبتی یوستیک کاهش مجدد پیدا می‌کنند. آن‌ها آهک سیتومورفیک و کلسیت‌های سوزنی را در مناطق دارای رژیم رطوبتی یوستیک و دارای پوشش گیاهی متراکم و مقدار رطوبت و موادآلی کافی (بژدک و همکاران، ۱۹۹۷) مشاهده نمودند. این پدوفیچرها در مناطق دارای رژیم رطوبتی زیریک نادر می‌باشند. پدوفیچر تخلیه آهک نیز در مناطق دارای رژیم رطوبتی زیریک که دارای رطوبت بیش‌تری هستند، یافت می‌شود. مقدار زیاد ندول‌های میکریتی کلسیت به‌ویژه در خاک اریدی‌سولز، شاهدهی بر جوان بودن این خاک‌ها می‌باشند (الونسو و همکاران، ۲۰۰۴).

با استفاده از مطالعات میکرومورفولوژی می‌توان ساختمان میکروسکوپی و نیز حفره‌های خاک را مورد بررسی قرار داد. پایرز و همکاران (۲۰۰۸) نیز برای توصیف بهبود ساختمان خاک در تناوب خشکی و رطوبت از آنالیزهای میکرومورفولوژی استفاده نمودند. بررسی میکرومورفولوژی اندازه، شکل و حجم حفره‌های زمین‌های زراعی، نشان می‌دهد که حفره‌ها با سایر ویژگی‌های ساختمان میکروسکوپی خاک در ارتباط می‌باشند (کیلفیدر و ون‌درمر، ۲۰۰۸). حضور و نبودن مالچ و شخم (گلب و کولیک، ۲۰۰۸) و نیز فعالیت کرم‌ها (لاماند و همکاران، ۲۰۰۳)، می‌تواند بر ویژگی‌های حفره‌ها تأثیرگذار باشد. ساختمان خاک، بافت خاک و نوع حفره‌ها در تشکیل فرم‌های مختلف گچ نیز مؤثر می‌باشند (تومانیان و همکاران، ۲۰۰۱).

انجام نشدن مطالعات دقیق، سبب شده تا این پژوهش با هدف بررسی تکامل برخی خاک‌های لسی غرب استان گلستان در یک توالی اقلیم- توپوگرافی- پوشش گیاهی، از دیدگاه میکرومورفولوژی صورت پذیرد.

## مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه: مواد مادری خاک‌های مناطق مورد مطالعه، از لس تشکیل شده است، که از جمله مواد باررفتی ریز و مرکب از ذرات بسیار سبک، متخلخل و سیلنتی می‌باشند. همچنین

1- Birefrinjence

لس‌ها محتوی شن و مقداری رس هستند. رسوبات لسی توسط باد جابجا شده و به‌صورت رسوبات غیرلایه‌بندی شده و سخت نشده روی یکدیگر انباشته شده‌اند و تنها می‌توانند به‌وسیله کربنات کلسیم به‌دست آمده از عوامل هوازدگی، سیمانی شده باشند. لس‌های این منطقه به‌عنوان رسوبات بادی-یخچالی معرفی شده‌اند، و از وسیع‌ترین رسوبات دوران پلیستوسن-کواترنری هستند.

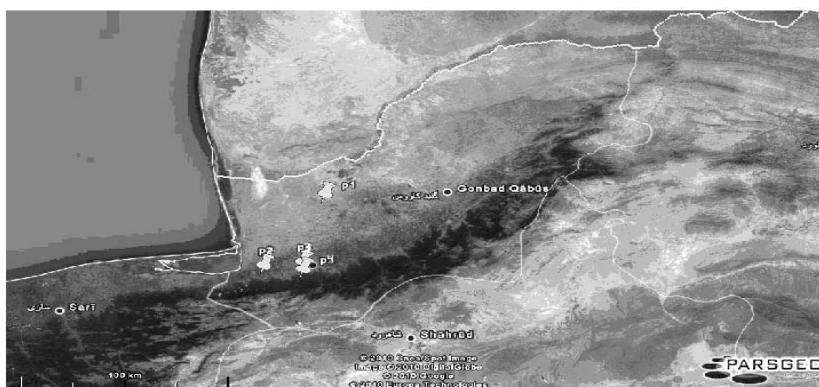
**مطالعات آزمایشگاهی:** پس از بررسی نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و خاک‌شناسی منطقه، محل دقیق ۴ خاک‌رخ مورد مطالعه شناسایی و نسبت به حفر آن‌ها اقدام گردید. پروفیل‌های مورد مطالعه، منتخب از نتیجه پروفیل‌های شاهد موجود در نقشه‌های قدیم بودند. نقشه ماهواره‌ای موقعیت خاک‌رخ‌های منتخب حفر گردیده در شکل ۱ آورده شده است. نمونه‌برداری در یک توالی اقلیم-توپوگرافی- پوشش گیاهی در رژیم‌های رطوبتی اریدیک، زریک و یودیک و در محدوده ارتفاع ۴۰۰-۲۰ متری صورت گرفت (جدول ۱). قابل ذکر است که خاک‌رخ ۱ دارای سطح آب زیرزمینی بالا و آب زیرزمینی شور و سولفاته می‌باشد (زائرنوملی، ۲۰۰۷).

۲۰ نمونه دست‌خورده خاک، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از ۴ منطقه در جهت شمال-جنوب استان، جمع‌آوری شدند. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از هر منطقه، هوا خشک و کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی زیر روی آن‌ها صورت گرفت.

بافت خاک نمونه‌ها توسط روش هیدرومتر (بیوکس، ۱۹۶۲) تعیین گردید. pH گل اشباع با کمک دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد (ریتو و همکاران، ۲۰۰۳). اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی بر روی عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی صورت گرفت (پیچ و همکاران، ۱۹۸۷). اندازه‌گیری کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با عصاره جمع‌آوری شده انجام یافت (ریچاردز، ۱۹۵۴). کربن آلی نمونه‌ها از روش اکسایش تر با بی‌کرومات پتاسیم در مجاورت اسیدسولفوریک غلیظ و تیتراسیون برگشتی با فروسولفات آمونیوم تعیین شد و میزان مواد آلی بر حسب درصد از ضرب کردن درصد کربن آلی در عدد ۱/۷۲۴ به‌دست آمد (جکسون، ۱۹۷۵). سپس به روش سیستم جامع رده‌بندی خاک آمریکایی (۲۰۰۶) این خاک‌ها طبقه‌بندی شدند.

نمونه دست‌نخورده خاک هم به‌منظور مطالعات میکرومورفولوژی از این مناطق برداشته شدند. نمونه دست‌نخورده از افق‌های سطحی و زیرسطحی برداشته شده، توسط رزین پلی‌استر تلقیح و خشک شدند

و در نهایت از آنها مقاطع نازکی با ضخامت ۳۰ میکرومتر، برای انجام مطالعات میکرومورفولوژی تهیه شد (مورفی، ۱۹۸۶). در این مقاطع، ویژگی‌های میکرومورفولوژی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای به دست آوردن اطلاعات کمی در مورد تعداد حفره‌ها از نرم‌افزار Image Tool استفاده شد.



شکل ۱- نقشه ماهواره‌ای موقعیت خاک‌رخ‌های حفر گردیده.

جدول ۱- رژیم رطوبتی- حرارتی، اقلیم و توپوگرافی و نام علمی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه.

ارتفاع (متر)	فیزیوگرافی	اقلیم	متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)	متوسط درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	رژیم رطوبتی- حرارتی	نام علمی	خاک‌رخ
۲۰	اراضی پست دشت	نیمه‌خشک	۳۸۰	۱۹/۴	اریدیک- ترمیک	Gypsic Aquisalids	۱
۲۴	رسوبی دامنه‌ای	مدیترانه‌ای	۵۷۰	۱۶/۴	زریک- ترمیک	Typic Haploxerepts	۲
۱۷۶	دشت دامنه‌ای	مدیترانه‌ای	۵۹۰	۱۶/۸	زریک- ترمیک	Typic Calcixerolls	۳
۴۰۰	تپه جنگلی (پای شیب)	نیمه‌مرطوب	۷۱۴	۱۴	یودیک- مزیک	Typic Hapludalfs	۴

### نتایج و بحث

خصوصیات مورفولوژی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های مورفولوژی خاک‌های مورد مطالعه.

افق	عمق (سانتی‌متر)	رنگ خاک (مرطوب)	رنگ‌دانه	گچ	آهک ثانویه	پوشش رسی
<b>1: Fine-silty, mixed, active, thermic, Gypsic Aquisalids</b>						
A	۰-۲۵	10YR 4/4		-	-	-
B <sub>zy</sub>	۲۵-۶۰	10YR 4/4	1fcmy	-	-	-
BC <sub>z</sub>	۶۰-۹۰	10YR 4/6	7.5YR 3/4	1fcmy	-	-
C <sub>z</sub>	۹۰-۱۴۰	10YR 4/6	gley	1fcmy	-	-
<b>2: Fine-loamy, mixed, calcareous, thermic, Typic Haploxerepts</b>						
A <sub>p</sub>	۰-۲۰	10YR 4/4	-	-	-	-
B <sub>w<sub>1</sub></sub>	۲۰-۵۵	10YR 4/4	-	-	ef1rsf	-
B <sub>w<sub>r</sub></sub>	۵۵-۱۰۰	10YR 4/6	-	-	ef1rsf	-
<b>3: Fine, mixed, superactive, calcareous, thermic, Typic Calcixerolls</b>						
A <sub>p</sub>	۰-۲۵	10YR3/2	-	-	ef1rsc	-
AB	۲۵-۶۰	10YR3/2	-	-	esm2rsc	-
B <sub>k</sub>	۶۰-۱۰۰	10YR5/3	-	-	esm2rsf	-
<b>4: Fine, vermiculitic, superactive, mesic, Typic Hapludalfs</b>						
A	۰-۳۵	10YR 3/4	-	-	-	-
B <sub>t<sub>1</sub></sub>	۳۵-۷۰	7.5YR 3/3	-	-	-	+
B <sub>t<sub>r</sub></sub>	۷۰-۱۱۰	5YR 4/6	-	-	-	+

1fcmy: مقدار کم گچ ریز به فرم رشته‌ای، ef1rsf: مقدار کم آهک (جوشش کم) در اندازه ریز به فرم کمی کشیده و رشته‌ای، esm2rsc: مقدار زیاد آهک با جوشش زیاد در اندازه متوسط به فرم کمی کشیده و سخت دانه، esm2rsf: مقدار زیاد آهک با جوشش زیاد در اندازه متوسط به فرم کمی کشیده و رشته‌های ec1rsc: مقدار کم آهک (جوشش کم) در اندازه ریز به فرم کمی کشیده و سخت دانه.

#### بررسی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی، افق‌های پیدایشی و تکامل خاک‌ها

تغییرات رس و بافت خاک: با توجه به توزیع اندازه ذرات در جدول ۳، مشاهده می‌شود که خاک‌های واقع در مناطق مرطوب‌تر (جدول ۱)، مانند خاک‌رخ ۴، Typic Hapludalfs و خاک‌رخ ۳ Typic Calcixerolls دارای مقدار رس بیشتری نسبت به سایر خاک‌ها می‌باشند. مقدار بیش‌تر رس، می‌تواند ناشی از هوادیدگی بیش‌تر صورت گرفته در این خاک‌ها باشد. در نتیجه با تغییر رژیم رطوبتی از اریدیک به زیریک و یودیک، بافت خاک ریزتر می‌شود. همین امر سبب شده با توجه به مثلث بافت خاک، کلاس بافت این خاک‌ها، لوم رسی سیلتی<sup>۱</sup> و رس سیلتی<sup>۲</sup> باشد (جدول ۳). بافت ریز

1- Silty Clay Loam

2- Silty Clay

به‌خصوص در خاک آلفی‌سولز مشاهده می‌شود. به‌دلیل شرایط اقلیمی مرطوب و پایداری افق سطحی، شرایط برای انتقال و شستشوی رس و تشکیل افق آرجیلیک در این خاک فراهم است و موجب شده این خاک در راسته تکامل یافته آلفی‌سولز قرار گیرد. خرمالی و همکاران (۲۰۰۳) با مطالعه میکرومورفولوژی افق‌های آرجیلیک خاک‌های آهکی استان فارس به این نتیجه دست یافتند که آهک‌زدایی و انتقال رس احتمالاً طی شرایط مرطوب‌تر گذشته اتفاق افتاده و با آهک‌زدایی<sup>۱</sup> در شرایط خشک‌تر بعدی ادامه یافته است. آن‌ها وجود پدوفیچرهای تخلیه آهک<sup>۲</sup> در افق‌های فوقانی خاک‌های مناطق مرطوب‌تر را نشان‌دهنده حرکت فعال آهک می‌دانند. آهک‌زدایی<sup>۳</sup> عامل غالب در تکامل آن دسته از خاک‌های آهکی می‌باشد که افق آرجیلیک دارند. خاک مالی‌سولز نیز دارای مقدار رس به‌نسبت زیادی است. ولی مقدار کم‌تر رس این خاک نسبت به خاک آلفی‌سولز، ناشی از عملیات خاک‌ورزی، تلفات مواد آلی و تخریب خاک‌دانه‌ها و به‌دنبال آن تلفات ذرات کوچک‌تر می‌باشد، که موجب شده مقدار رس در خاک سطحی این خاک کم‌تر باشد (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۹). با این وجود افزایش مقدار رس با افزایش عمق در این خاک مشاهده می‌شود. مقدار رس زیاد در این خاک نیز، نشان‌دهنده شرایط مناسب اقلیمی برای شستشو و انتقال رس است. ولی عملیات شخم در این خاک زراعی به مقدار زیادی موجب تشکیل نشدن افق آرجیلیک شده است. خاک‌رخ‌های ۱ و ۲ دارای بافت درشت‌تر و دارای کلاس بافت لوم سیلتی<sup>۴</sup> می‌باشند. واقع شدن خاک‌رخ ۲ Haploxerepts Typic در مناطق پست‌تر و دشت رسوبی دامنه‌ای (جدول ۱)، سبب شده تا مقدار رس این خاک نیز به‌نسبت زیاد باشد. با این حال نبود افزایش قابل‌توجه مقدار رس با افزایش عمق در این خاک نشان‌دهنده نبود تکامل این خاک‌ها است. وو و چن (۲۰۰۵) با مطالعه خاک‌های اینسپتی‌سولز در تایوان با رژیم رطوبتی پرپودیک و رژیم حرارتی مزیک در بلندی‌های ۲۱۰۰-۱۹۰۰ متری دریافتند که مقدار رس موجود در افق کمبیک خاک‌ها ناشی از مواد مادری است، و انتقال رس در حدی نمی‌باشد که افق آرجیلیک را تشکیل دهد. خاک اریدی‌سولز نیز در اراضی پست واقع شده است، ولی شرایط اقلیمی سبب شده تا در این خاک مقدار رس به‌نسبت کم‌تری وجود داشته باشد.

- 1- Recalcification
- 2- Calcite Depletion
- 3- Decalcification
- 4- Silty Loam



جدول ۳- ویژگی های فیزیکی - شیمیایی خاک های مورد مطالعه.

SAR (ppm)	CCE (درصد)	EC (دسی زیمنس بر متر)	OC (درصد)	pH	کلاس بافت	توزیع اندازه ذرات			عمق (سانتی متر)	افق	خاک ریح
						نسبت (درصد)	وس (درصد)	شن (درصد)			
۵۰۸۷/۴	۱۸	۶۲/۰	۷/۰	۷/۷	SIL	۲۳	۶۵	۱۲	۰-۲۵	A	
۶۰۹۹/۳	۱۸/۵	۵۳/۷	۷/۰	۷/۷	SIL	۳۲	۵۹	۹	۲۵-۶۰	Bzy	Gypsic Aquisalids :۱
۷۱۱۱/۳	۱۵/۵	۵۶/۹	۱/۰	۷/۷	SIL	۲۸	۵۷	۱۵	۶۰-۹۰	BCz	
۷۸۳۴/۷	۷۱	۴۸/۳	۳/۰	۷/۷	SIL	۲۳	۶۲	۱۵	۹۰-۱۴۰	Cz	
	۵/۵	۱/۱	۸/۱	۷/۳	SIL	۳۴	۵۷	۸	۰-۲۰	Ap	
	۷	۸/۰	۶/۱	۶/۷	SIL	۳۵	۴۵	۲۰	۲۰-۵۵	Bw <sub>۱</sub>	Typic Haploxerepts :۲
	۵/۵	۵/۰	۳/۰	۶/۹	SIL	۲۸	۳۵	۱۸	۵۵-۱۰۰	Bw <sub>۲</sub>	
	۷	۸/۱	۲/۳	۶/۶	SiCL	۳۱	۴۷	۲۱	۰-۲۵	Ap	
	۱۲/۵	۷/۰	۷/۱	۶/۹	SiCL	۴۰	۴۵	۱۵	۲۵-۶۰	AB	Typic Calcixerolls :۳
	۵/۱	۸/۰	۸/۰	۸/۲	SIC	۴۲	۴۳	۱۵	۶۰-۱۰۰	Bk	
	۶/۵	۶/۰	۳/۰	۶/۳	SiCL	۴۰	۵۱	۹	۰-۳۵	A	
	۶	۷/۰	۱/۱	۶/۹	SIC	۴۸	۴۴	۸	۳۵-۷۰	Bt <sub>۱</sub>	Typic Hapludalfs :۴
	۶	۳/۴	۷/۰	۶/۹	SIC	۵۱	۴۱	۸	۷۰-۱۱۰	Bt <sub>۲</sub>	

**تغییرات pH و CCE:** خاک واقع در راسته ارییدی سولز خاک‌رخ ۱، دارای آب و هوای گرم و نیمه‌خشک می‌باشد، مقدار زیادی گچ و آهک به دلیل شرایط اقلیمی این منطقه، قابل انتظار است. این خاک‌رخ در زمین‌های پست شمال استان واقع شده، و دارای شرایط آب‌گیری می‌باشد. آب زیرزمینی منطقه شور و سولفاته بوده و عمق آن در حدود ۲ متر می‌باشد. به همین جهت این خاک، جزو خاک‌های شور و سدیمی (با توجه به مقدار SAR) به حساب می‌آید (جدول ۳). شرایط اقلیمی، فیزیوگرافی و درصد گچ و ضخامت مناسب خاک، شرایط لازم را برای تشکیل افق جیسیک فراهم می‌کند. به دنبال حضور مقادیر زیاد گچ و آهک و کاتیون‌های قلیایی، EC و pH این خاک به نسبت سایر خاک‌ها بالاتر می‌باشد (جدول ۳).

خاک‌رخ ۴ به دلیل کاربری جنگل و اقلیم مرطوب یودیک که مناسب برای شستشوی کاتیون‌های بازی به اعماق است و نیز جذب بیش‌تر این کاتیون‌ها مانند کلسیم و منیزیم از خاک، pH به نسبت اسیدی دارد. کربنات کلسیم معادل در زمین‌های زیر کاربری جنگل کم‌تر از زمین‌های کشاورزی می‌باشد (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۹).

اقلیم مدیترانه‌ای خاک‌رخ واقع در راسته اینسپتی سولز خاک‌رخ ۲، موجب شده تا مقدار کربنات کلسیم معادل و در نتیجه pH این خاک با افزایش عمق مقداری افزایش یابد، و مقدار CCE آن در حد به نسبت متوسطی قرار گیرد. ولی به دلیل نبود انتقال رس، تکامل چندانی در این خاک مشاهده نمی‌شود. در افق Bk خاک‌رخ ۳، به دلیل عملیات خاک‌ورزی، توزیع آهک مشاهده می‌شود. همچنین به واسطه شرایط اقلیمی، آهک از افق‌های فوقانی آب‌شویی شده است. افزایش آهک با افزایش عمق و وجود آهک در افق‌های زیرین این خاک‌رخ نشان‌دهنده شرایط برای تخلیه آهک از افق‌های فوقانی می‌باشد. این امر موجب شده این افق CCE و pH زیادی نسبت به افق‌های فوقانی خود داشته باشد (جدول‌های ۲ و ۳).

**تغییرات کربن آلی:** اقلیم (دما و رطوبت) ذخیره کربن آلی خاک را در کنترل دارد (جوباگی و جکسون، ۲۰۰۰). خاک راسته مالی سولز (خاک‌رخ ۳)، به دلیل رژیم رطوبتی زیریک، شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای و پوشش گیاهی مناسب، دارای کربن آلی زیادی می‌باشد (جدول ۳). با افزایش ریزش‌های جوی ذخیره کربن آلی خاک نیز افزایش می‌یابد (جکوبز و ماسوم، ۲۰۰۵). وجود مقدار کربن آلی در حد کفایت، ضخامت مناسب لایه سطحی خاک و ساختمان قوی خاک، شرایط تشکیل افق مالیک و در

نتیجه تکامل این خاک را فراهم کرده است. به دنبال افزایش کربن آلی در این خاک‌ها، فعالیت‌های میکروبی نیز افزایش می‌یابد (نائل و همکاران، ۲۰۰۴). افزایش فعالیت‌های میکروبی محرکی برای شستشوی کربنات می‌باشند (اگلی و همکاران، ۲۰۰۸).

دمای مناسب ناشی از ارتفاع خاک‌رخ ۴ (۱۴ درجه سانتی‌گراد) و رژیم رطوبتی یودیک و اقلیم مرطوب و کاربری جنگل، سبب ایجاد مقدار زیاد کربن آلی در سطح خاک شده است. در مقاطع میکروسکوپی خاک‌های آلفی‌سولز و مالی‌سولز به دلیل اقلیم و کاربری مناسب و وجود ریشه‌های فراوان تا اعماق خاک‌رخ، بقایای بافت گیاهی هوموسی شده و نیز غیرهوموسی در حفره‌های خاک یافت شد.

پوشش گیاهی خاک‌رخ‌های ۱ و ۲ به دلیل ارتفاع کم‌تر و دمای بالاتر و اقلیم نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای، به نسبت دو خاک‌رخ دیگر، مناسب نمی‌باشد. به دنبال کاهش مقدار پوشش گیاهی، مقدار کربن آلی در این خاک‌ها نیز کم می‌باشد. با افزایش دما، تنفس میکروبی افزایش یافته و ذخیره کربن آلی خاک کاهش می‌یابد (جکوبز و ماسوم، ۲۰۰۵). عملیات خاک‌ورزی در خاک‌رخ ۲، نیز به تلفات کربن آلی خاک کمک می‌کند (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۹) (جدول ۳).

#### مطالعات میکرومورفولوژی

تغییرات توزیع نسبی  $c/f$ : توزیع نسبی ذرات درشت و ریز ( $c/f$ ) در تمام راسته‌ها پورفیریک می‌باشد. در این ارزیابی حد ۲۰ میکرون برای ذرات در نظر گرفته شده است. ذرات درشت خاک‌ها اغلب کوارتز و آهک می‌باشند (جدول ۴).

بی‌فابریک: خاک اریدی‌سولز در اراضی پست واقع شده و در شرایط زه‌کشی ضعیف و آب‌گیری قرار دارد. بی‌فابریک غالب خاک اریدی‌سولز با شرایط زه‌کشی ضعیف، کریستالیتیک است (شکل ۲)، و عامل اصلی در انتقال ذرات کلسیت، نوسانات آب زیرزمینی می‌باشد (قرقره‌چی، ۲۰۰۷).

در افق‌های زیرین خاک‌رخ ۳، حضور گسترده بلورهای ریز کلسیت میکربیتی در زمینه خاک مشاهده می‌شود که باعث شده بی‌فابریک غالب آن کریستالیتیک باشد.

جدول ۴- تشریح ویژگی‌های میکرومورفولوژی خاک‌های مورد مطالعه.

پدوفیچرها	بی‌فایریک	ساختمان میکروسکوپی و حفره‌ها	توزیع $\text{CF}^*$	حد ۲۰ میکرومتر	عمق (سانتی‌متر)	افق
خاکدروخ ۱: Gypsic Aquisalids						
پوشش‌های نازک کلسیت، وجود مقدار کم نودول‌های آهک هم در حفره‌ها و هم در زمینه، پرشدگی حفره توسط گچ (Hydrotopic) (۱۵ درصد)، فضولات جانوری	کریستالینیک <sup>۱</sup>	مکمی نیمه‌زاویه‌دار (جداشدگی ضعیف)، حفره‌های غالب: کانال، بی‌شکل	۲/۸	پورفیریگ، ۲/۸	۱-۲۵	A
پوشش‌های نازک کلسیت، وجود مقدار کم نودول‌های آهک هم در حفره‌ها و هم در زمینه، وجود گچ درون حفره (۱۵ درصد)، حضور پوشش‌های اکسید آهن به مقدار خیلی کم به صورت hypocoating، فضولات جانوری	کریستالینیک	مکمی نیمه‌زاویه‌دار تا زاویه‌دار، حفره‌های غالب: کانال، بی‌شکل	۲/۸	پورفیریگ، ۲/۸	۲۵-۶۰	Bzy
پوشش‌های نازک کلسیت، حفره توسط گچ (Hydrotopic) (۱۰ درصد)، حضور پوشش‌های اکسید آهن به صورت hypocoating	کریستالینیک	مکمی نیمه‌زاویه‌دار و توده‌ای، حفره‌های غالب: کانال، بی‌شکل	۲/۸	پورفیریگ، ۲/۸	۶۰-۹۰	BCz
نودول‌های اکسید آهن (۱۵ درصد)، فضولات جانوری		توده‌ای،				
پوشش‌های نازک کلسیت، وجود گچ درون حفره (۵ درصد)، حضور پوشش‌های اکسید آهن به صورت hypocoating، نودول‌های اکسید منگنز (۱۰ درصد)	کریستالینیک	حفره‌های غالب: بی‌شکل	۱/۹	پورفیریگ، ۱/۹	۹۰-۱۴۰	Cz

1- Crystallitic

ادامه جدول ۴ -

پدوپیچرها	بی فابریک	حفره‌ها	ساختنمان میکروسکوپی و حفره‌ها	توزیع آهک، حد ۲۰ میکرومتر	عمیق (سانتی‌متر)	افق
خاکریخ ۲: Typic Haploxerepts						
فصولات جانوری	لکهای (۸۰ درصد) خطی <sup>۱</sup> (۲۰ درصد)	توده‌ای و در پارهای سوزارده مقدار کم‌دانای، حفره‌های غالب: بی‌شکل مکعبی نیمه‌زاویه‌دار (۹۰ درصد) یا درجه خاکدانگی ضعیف و در صد خیلی کم اسفنجی، حفره‌های غالب: کانال، بی‌شکل مکعبی نیمه‌زاویه‌دار یا درجه خاکدانگی ضعیف، خاکدانگی ضعیف، حفره‌های غالب: کانال، بی‌شکل	۱/۹ پورفیریک، ۰-۲۰	۱/۹ پورفیریک، ۲۰-۵۵	۰-۲۰	Ap
وجود نودول آهک به مقدار کم در زمینه و حفره‌ها، درصد کمی پوشش کلسیت، پرشدگی حفره‌ها توسط آهک، پوشش اکسید آهن به‌صورت quazicoating وجود نودول اکسید آهن (۳ درصد)	لکهای	وجود نودول آهک به مقدار کم در حفره‌ها، پوشش نازک کلسیت به‌صورت Hypocoating پوشش آهک سوزنی به مقدار کم، پوشش اکسید آهن، تجمع دو نوع پوشش کلسیت و رس اطراف یک حفره، فصولات جانوری	۲/۸ پورفیریک، ۵۵-۱۰۰	۲/۸ پورفیریک، ۵۵-۱۰۰	۵۵-۱۰۰	Bw <sub>۱</sub> Bw <sub>۲</sub>

1- Striated

ادامه جدول ۴-

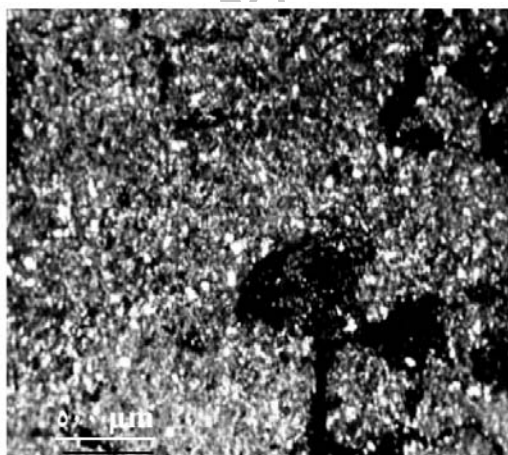
پدوفیچرها	بسی فابریک	ساخته‌مان میکروسکوپی و حفره‌ها	توزیع $\text{d}_f$ حد ۲۰ میکرومتر	عمق (سانتی‌متر)	افق
خاکریخ: Typic Hapludalfs					
نودول‌های اکسید آهن (۱۰ درصد)، فضولات جانوری	لکه‌ای	مکعبی نیمه‌زاویه‌دار، حفره‌های غالب: کانال	پورفیریکی، ۱/۹	۰-۳۵	A
	خطی (۱۰ درصد)				
پوشش رسی اطراف ذرات درشت‌تر، granocoating، نودول‌های اکسید آهن، فضولات جانوری	لکه‌ای	مکعبی نیمه‌زاویه‌دار، حفره‌های غالب: کانال	پورفیریکی، ۱/۹	۳۵-۷۰	B <sub>1</sub>
	خطی (۱۰ درصد)				
پوشش رسی، فضولات جانوری	لکه‌ای	مکعبی نیمه‌زاویه‌دار با درجه خاکدانه‌نگی متوسط، حفره‌های غالب: کانال	پورفیریکی، ۱/۹	۷۰-۱۱۰	B <sub>2</sub>
	خطی (۱۰ درصد)				

ادامه جدول ۴-

پدوفیچرها	بی فابریک	ساخته‌مان میکروسکوپی و حفره‌ها	توزیع cf، حد ۲۰ میکرومتر	عمق (سانتی‌متر)	افق
خاکریخ ۴: Typic Hapludalfs					
نودول‌های اکسید آهن (۱۰ درصد)، فضولات جانوری	لکه‌ای خطی (۱۰ درصد)	مکمی نیمه‌زاویه‌دار، حفره‌های غالب: کانال	۱/۹ پورفیریک، ۱/۹	۰-۳۵	A
پوشش رسی اطراف ذرات درشت‌تر، granocoating نودول‌های اکسید آهن، فضولات جانوری	لکه‌ای خطی (۱۰ درصد)	مکمی نیمه‌زاویه‌دار، حفره‌های غالب: کانال	۱/۹ پورفیریک، ۱/۹	۳۵-۷۰	Bt <sub>1</sub>
پوشش رسی، فضولات جانوری	لکه‌ای خطی (۱۰ درصد)	مکمی نیمه‌زاویه‌دار با درجه خاکدانگی متوسط، حفره‌های غالب: کانال	۱/۹ پورفیریک، ۱/۹	۷۰-۱۱۰	Bt <sub>2</sub>

بی‌فابریک غالب در افق‌های فوقانی خاک‌رخ ۳ (شکل ۳)، و خاک‌های راسته اینسپتی‌سولز (خاک‌رخ ۲) و آلفی‌سولز (خاک‌رخ ۳)، لکه‌ای است. بی‌فابریک لکه‌ای در نتیجه آب‌شویی بخشی از آهک به اعماق زیرین و ویژگی بایریرینجنس<sup>۱</sup> رس ایجاد شده است (فیتزپاتریک، ۱۹۹۳). در اراضی با کاربری جنگل (خاک‌رخ ۴)، تشکیل افق آرچیلیک با بی‌فابریک لکه‌ای نشان‌دهنده پایداری اراضی است، که باعث ایجاد زمان کافی برای شستشوی کربنات از افق سطحی و انتقال به طرف پایین ذرات رس می‌شود (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۶). وجود بی‌فابریک لکه‌ای می‌تواند بیانگر انبساط و انقباض ناشی از تناوب خشکی و رطوبت نیز باشد. در افق‌های توسعه‌یافته آرچیلیک خاک‌رخ ۴ و نیز در افق سطحی خاک‌رخ ۲ علاوه بر بی‌فابریک لکه‌ای، درصد کم‌تری بی‌فابریک خطی حضور دارد (جدول ۴).

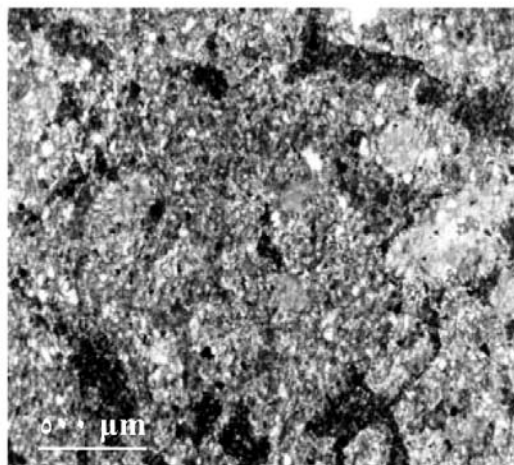
بی‌فابریک خطی در خاک‌های رسی معمول است، که در معرض انبساط و انقباض هستند. مشاهده بی‌فابریک خطی و پوشش‌های رسی در مقطع میکرومورفولوژی خاک آلفی‌سولز نیز شواهدی از وجود افق آرچیلیک در این خاک می‌باشد (جدول ۴).



شکل ۲- بی‌فابریک کریستالینیک افق A خاک اریدی‌سولز (نور XPL).

1- Birefringence





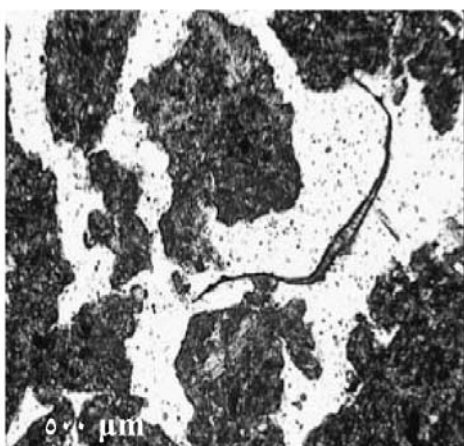
شکل ۳- بی‌فابریک لکه‌ای افق AB خاک مالی سولز (نور XPL).

ساختمان میکروسکوپی: افق سطحی خاک مالی سولز خاک رخ ۳، و با درصد کم‌تری افق AB آن، ساختمان میکروسکوپی اسفنجی و دانه‌ای دارند (شکل ۴). وجود این نوع از ساختمان میکروسکوپی در این خاک، نشان‌دهنده شرایط مناسب این خاک برای حضور موجودات زنده خاک‌زی و فعالیت قارچی آن‌ها می‌باشد. همچنین به سبب دارا بودن کربن آلی زیاد در سطح امکان بهبود خاک‌دانه‌ها و ایجاد چنین ساختمان میکروسکوپی وجود دارد.

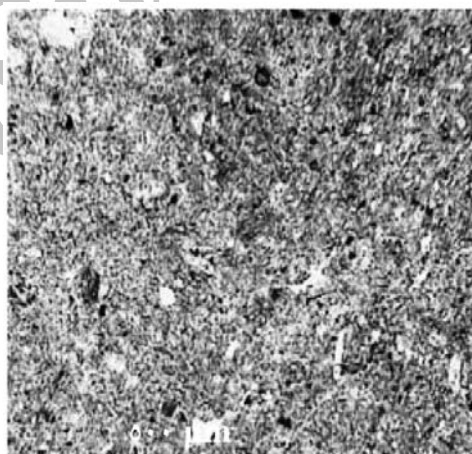
ساختمان میکروسکوپی غالب در خاک‌های آلفی سولز و اریدی سولز و اینسپتی سولز مکعبی بدون زاویه است. وجود این نوع ساختمان میکروسکوپی در افق‌های آرچلیک خاک آلفی سولز با رژیم رطوبتی یودیک، نشان‌دهنده تکامل خوب خاک می‌باشد (قرقره‌چی، ۲۰۰۷). پایرز و همکاران (۲۰۰۸) اظهار داشتند که ویژگی‌های فیزیکی سطح خاک نقش مهمی در انتقال انرژی و مواد بین اتمسفر و خاک ایفا می‌کند و ساختمان درونی خاک می‌تواند در اثر رویدادهای مصنوعی و یا طبیعی تغییر کند، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها فرایند تناوب خشکی و رطوبت است.

ولی در دو افق BCz و Cz خاک رخ ۱ (اریدی سولز)، ساختمان ضعیفی مشاهده شد. به نظر می‌رسد فشار و تراکم به دست آمده از لایه‌های بالایی سبب به وجود آمدن ساختمان ضعیف، در این خاک شده است. حال آن‌که افق‌های فوقانی این خاک توسعه یافته‌تر و دارای ساختمان میکروسکوپی مکعبی بدون زاویه (با تمایز ضعیف) می‌باشد. افق سطحی (Ap) خاک رخ ۲ نیز، ساختمان

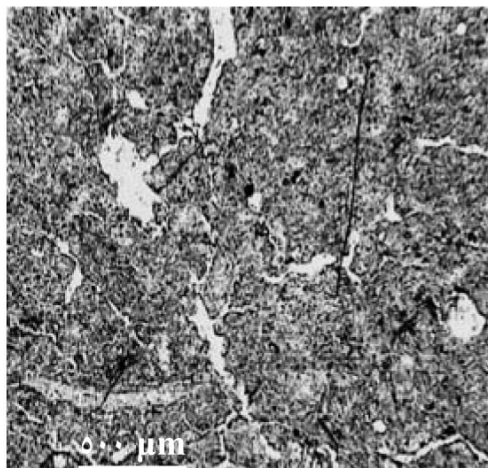
میکروسکوپی توده‌ای و در پاره‌ای موارد دانه‌ای دارد (شکل ۵). رفت و آمد ماشین‌های کشاورزی و عملیات خاک‌ورزی و به هم خوردگی خاک ناشی از آن‌ها، همچنین مواد آلی کم و فعالیت میکروبی محدود، سبب به وجود آمدن ساختمان میکروسکوپی توده‌ای و حفره‌های کم در این خاک شده است. در این خاک با افزایش عمق، در افق‌های کمبیک، ساختمان خاک بهبود یافته و به مکعبی بدون زاویه البته با درجه خاک‌دانگی ضعیف تبدیل شده است (شکل ۶).



شکل ۴- ساختمان میکروسکوپی دانه‌ای در افق سطحی خاک مالی سولز (نور PPL).



شکل ۵- ساختمان میکروسکوپی توده‌ای افق سطحی خاک اینسپتی سولز (نور PPL).



شکل ۶- ساختمان میکروسکوپی مکعبی بدون زاویه با تمایز ضعیف افق  $Bw_1$  خاک اینسپتی سولز (نور PPL).

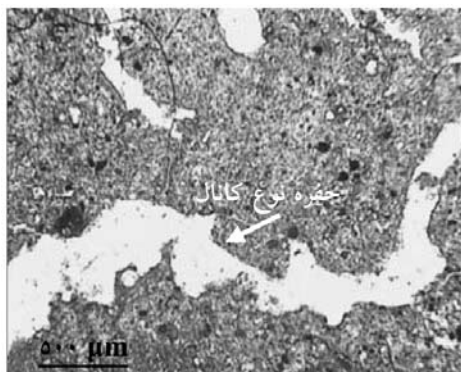
**حفره‌ها:** خاک مالی سولز با داشتن شرایط مناسب اقلیمی و حضور گیاهان و فعالیت‌های میکروبی و مواد آلی بیشتر، درصد حفره‌های بیش‌تری نه تنها در سطح، بلکه در تمام سطوح افق‌هایش نسبت به سایر خاک‌ها دارد. این نتایج با استفاده از آنالیزهای صورت گرفته به وسیله نرم‌افزار Image analysis به دست آمد (جدول ۵).

نوع حفره و مقدار آن، تابعی از نوع ساختمان، انبساط و انقباض، رطوبت و نیز مقدار ماده آلی، بافت خاک، نوع کاربری و پوشش گیاهی می‌باشد. تنوع حفره‌ها با تغییر از رژیم رطوبتی اریدیک به سمت رژیم‌های مرطوب‌تر زریک و یودیک بیشتر می‌شود. حفره‌های نوع کانال تقریباً در تمامی خاک‌ها غالب می‌باشد. ولی مقدار زیاد آن‌ها در خاک‌های تکامل یافته تر آلفی سولز و مالی سولز محسوس‌تر است. به علت کاربری مناسب، مواد آلی بیشتر، وجود ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌های فراوان، حفره غالب در همه افق‌های این خاک‌ها، بیش‌تر کانال می‌باشد (شکل ۷). وجود جانداران زیاد در خاک‌رخ ۳ به دلیل شرایط مساعد برای رشد آن‌ها، موجب ایجاد حفره‌های نوع حجره‌ای که محل استقرار جانداران است، در این خاک شده است. فعالیت کرم‌ها موجب تغییر در اندازه حفره‌ها می‌شود (لاماند و همکاران، ۲۰۰۳). فراوانی حفره‌های صفحه‌ای در اعماق این خاک، می‌تواند ناشی از تراکم در اثر عملیات خاک‌ورزی باشد. با افزایش عمق در رژیم رطوبتی یودیک و خاک آلفی سولز (خاک‌رخ ۴) نیز بر فراوانی حفره‌های صفحه‌ای افزوده می‌شود، که می‌تواند ناشی از خاصیت انقباض و انبساط در تناوب خشکی و رطوبت باشد (شکل ۸).

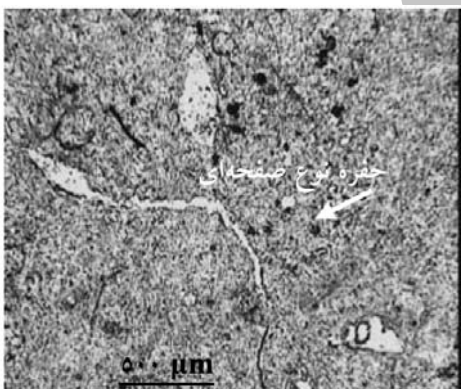
این نوع حفره در افق‌های آرچیلیک این خاک، که محل تجمع رس است، بیش‌تر مشاهده می‌شود. حفره‌های افق‌های آرچیلیک این خاک توسط پوشش رس به‌دست آمده از فرایند آب‌شویی، پوشیده شده‌اند، که یکی از ویژگی‌های بارز و غالب مشاهده شده در حفره‌های خاک آلفی‌سولز می‌باشد. مقدار زیاد مواد آلی در سطح خاک زراعی خاک‌رخ ۳ و کاربری جنگلی خاک‌رخ ۴، موجب شده در حفره‌های کانال و حجره‌ای این خاک‌ها، آثار ریشه گیاهان و بقایای بافت گیاهی مشاهده شود. پس از کانال، حفره‌های بی‌شکل در خاک غیرمتکامل اریدی‌سولز فراوان هستند که بیش‌تر محل تجمع گچ و کربنات کلسیم است. این فراوانی تا حدی پیش می‌رود که با افزایش عمق در افق‌های BCZ و CZ این خاک می‌توان گفت تقریباً حفره‌های بی‌شکل غالب می‌باشند (شکل ۹). در خاک اینسپتی‌سولز، حفره‌های کانال و حفره‌های بی‌شکل بیش‌تر حضور دارند. حفره‌های بی‌شکل بیش‌تر در افق سطحی این خاک دیده می‌شود (شکل ۱۰). عملیات زراعی در این خاک و به‌هم خوردن خاک، موجب ایجاد حفره‌های بی‌شکل در این خاک شده است.

جدول ۵- درصد فراوانی حفره‌ها با استفاده از IMAGE TOOL

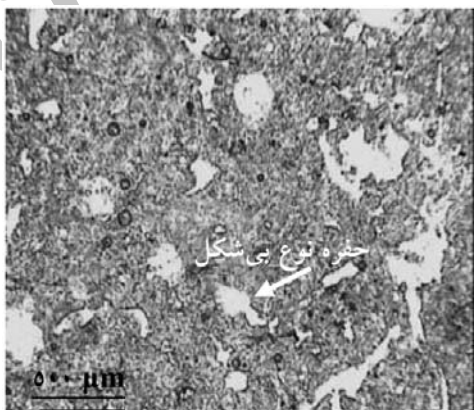
درصد فراوانی حفره‌ها	افق	خاک‌رخ
۲۶/۹	A	
۲۳/۴	B <sub>zy</sub>	Gypsic Aquisalids
۲۲/۹	BC <sub>z</sub>	
۱۸/۱	C <sub>z</sub>	
۲۶/۰۴	A <sub>p</sub>	
۲۴/۳	B <sub>w</sub> <sub>1</sub>	Typic Haploxerepts
۲۴/۱	B <sub>w</sub> <sub>2</sub>	
۳۶/۹	A <sub>p</sub>	
۳۳/۶	AB	Typic Calcixerolls
۳۲/۳	B <sub>k</sub>	
۳۰/۱	A	
۲۸/۲	B <sub>t</sub> <sub>1</sub>	Typic Hapludalfs
۲۴/۵	B <sub>t</sub> <sub>2</sub>	



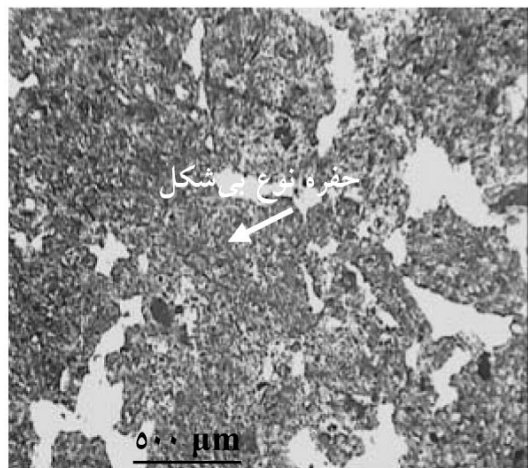
شکل ۷- حفره‌های کانال افق AB خاک مالی سولز (PPL).



شکل ۸- حفره‌های صفحه‌ای افق Bt<sub>1</sub> خاک آلفی سولز (PPL).



شکل ۹- حفره‌های بی شکل افق BCz خاک اریدی سولز (PPL).



شکل ۱۰- حفره‌های بی‌شکل افق Ap خاک ایشپتی سولز (PPL).

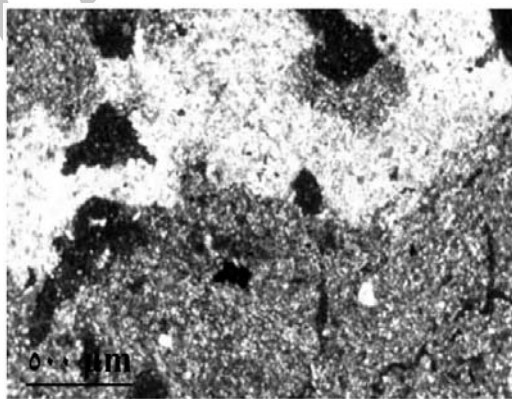
#### پدوفیچر

پدوفیچرهای مربوط به تخلیه و تجمع آهک: لس‌ها دارای مقادیر زیادی آهک می‌باشند (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۹). پدوفیچر تخلیه آهک، در مناطق زیریک- مزیک، که رطوبت کافی برای شستشوی آهک فراهم است مانند خاک‌رخ ۳ (رژیم رطوبتی زیریک)، مشاهده می‌شود (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۶). بی‌فابریک این خاک لکه‌ای می‌باشد. نواحی تخلیه آهک در رژیم رطوبتی بودیک نیز مشاهده شده است. مناطق تخلیه آهک نشان‌دهنده انحلال بیش‌تر و تخلیه کلسیت از افق‌های بالایی است، و نمایانگر حرکت فعال آهک می‌باشد.

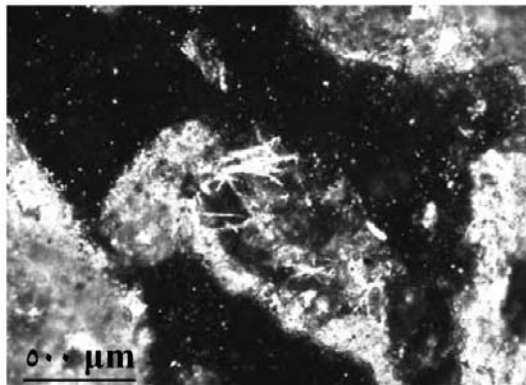
نودول‌های آهک در تمام مقاطع به‌جز خاک آلفی سولز مشاهده شدند (جدول ۴). غالباً ته‌نشینی مجدد کربنات ثانویه به‌دست آمده از فرایند آب‌شویی، موجب به‌وجود آمدن این نودول‌ها شده است. نودول‌های خاک‌های مورد مطالعه اغلب تیپیک می‌باشند و منشاء پدوژنیک دارند. مقدار زیاد نودول‌های میکریتی کلسیت مشاهده شده به‌ویژه در خاک اریدی سولز، نشان‌دهنده این است که خاک‌ها جوان و در مراحل ابتدایی تکامل می‌باشند (الونسو و همکاران، ۲۰۰۴). در بین رژیم‌های رطوبتی، در مناطق اریدیک (خاک‌رخ ۱) نودول‌ها کم‌ترین مقدار را دارند. شرایط اقلیمی خشک، کاهش میزان فرایند انحلال- تبلور مجدد، موجب کاهش رسوب کلسیت و در نتیجه ایجاد محدودیت در تشکیل نودول‌ها در این خاک‌ها می‌شود. نواحی دارای رژیم رطوبتی زیریک (خاک‌رخ‌های ۲ و ۳) مقادیر فراوان نودول‌های کلسیت میکریتی، به‌خصوص در طول کانال‌ها دارند. شرایط اقلیمی مرطوب و پوشش

گیاهی در مناطق مزیک- زریک، فرایند انحلال- تهنشینی و تبلور مجدد کلسیت را تشدید می‌کند. در مطالعه‌ای که به‌وسیله خرمالی و همکاران (۲۰۰۶) انجام شد، اندازه و فراوانی بلورهای ریز کلسیت و پوشش‌های کلسیت از رژیم رطوبتی اریدیک به زریک افزایش یافت. ولی دوباره این مقادیر در مناطقی که رژیم رطوبتی یوستیک داشتند، کاهش یافت.

رژیم رطوبتی زریک، به‌واسطه شرایط رطوبتی مطلوب، می‌تواند فرم‌های آهکی متنوعی داشته باشد. از جمله این فرم‌ها، پرشدگی حفره‌ها، پوشش‌های آهکی، کلسیت سوزنی و نودول‌ها می‌باشند. همچنین پدوفیچر تخلیه آهک، در مناطق زریک، مانند خاک‌رخ ۳ (رژیم رطوبتی زریک)، که رطوبت کافی برای شستشوی آهک فراهم است، مشاهده شد. پرشدگی حفره‌ها توسط میکریت‌های کربنات کلسیم، در افق  $Bw_1$  خاک اینسپتی‌سولز با رژیم رطوبتی زریک مشاهده گردید (شکل ۱۱). رطوبت کافی در این خاک موجب تشکیل این فرم آهک شده است. پوشش کلسیت اطراف حفره‌ها نیز بیش‌تر در رژیم رطوبتی زریک (خاک‌رخ‌های ۲ و ۳) که دارای فرایند آب‌شویی مطلوب، شرایط زه‌کشی به‌نسبت مناسب می‌باشند، مشاهده شد. در رژیم رطوبتی یودیک (خاک‌رخ ۴)، به‌رغم دارا بودن رطوبت کافی، پوشش‌های آهکی مشاهده نشد. زیرا آب‌شویی می‌تواند موجب از بین رفتن پوشش‌های آهکی شود. در افق  $Bk$  خاک مالی‌سولز، پوشش آهک سوزنی مشاهده گردید (شکل ۱۲). از عواملی که ایجاد این نوع از پدوفیچر کلسیت را در کنترل دارد، مواد آلی و رطوبت کافی می‌باشد (بژدک و همکاران، ۱۹۹۷). با توجه به نتایج فیزیکی- شیمیایی و اقلیم، خاک‌رخ ۳ هم دارای مواد آلی بالا و هم در رژیم رطوبتی زریک واقع است (جدول‌های ۱ و ۴).



شکل ۱۱- پرشدگی حفره‌ها افق  $Bw_1$  توسط آهک در خاک اینسپتی‌سولز (XPL).



شکل ۱۲- پوشش آهک سوزنی افق Bk خاک مالی سولز (XPL).

پدوفیچر انتقال رس: مشاهدات میکرومورفولوژی، وجود پوشش رسی را در افق‌های آرچیلیک آلفی سولز اثبات نمودند. خاک رخ ۴ با داشتن افق آرچیلیک و واقع شدن در راسته آلفی سولز و رژیم رطوبتی یودیک، دارای پدوفیچرهای مختلفی از رس از جمله پوشش رس و فرم تکه‌ای رس، است (جدول ۴). پوشش رسی، ناشی از شستشوی رس و حرکت مکانیکی<sup>۱</sup> آن از افق بالایی و تجمع آن‌ها در اطراف حفره‌های زیرین می‌باشد.

در اثر به هم خوردگی زیستی (قرقره‌چی، ۲۰۰۷) که مواد آلی و فضولات جانوری زیاد نیز بیانگر آن است، پوشش‌های رسی می‌توانند تخریب و انتقال یابند. رطوبت کافی در رژیم رطوبتی یودیک، نیز سبب آب‌شویی و انتقال جزیبی رس در خاک رخ ۴ (در افق A) شده است و موجب شده تا ذرات رس به صورت تکه<sup>۲</sup> در زمینه خاک و یا پوشش‌های اطراف حفره‌ها رؤیت شوند (شکل ۱۳).

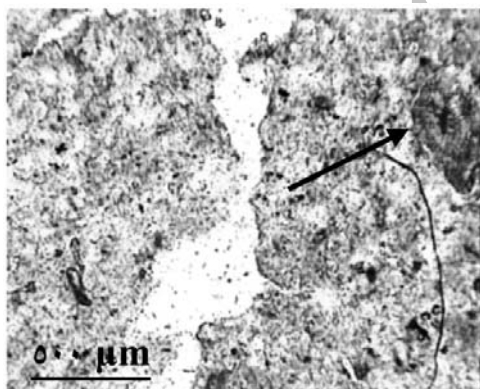
با حرکت از رژیم یودیک به زیریک، سطح اشغال شده و ضخامت پوشش رسی کاهش می‌یابد (قرقره‌چی، ۲۰۰۷). پوشش رسی علاوه بر بی‌فابریک لکه‌ای، در بی‌فابریک کریستالیتیک- لکه‌ای نیز مشاهده می‌شود. ولی پوشش ضخیم رسی در افق آرچیلیک مشاهده می‌گردد، که بی‌فابریک آن‌ها لکه‌ای می‌باشد. خرمالی و همکاران (۲۰۰۳)، با بررسی میکرومورفولوژی افق‌های آرچیلیک بسیاری از خاک‌های آهکی استان فارس، دلیل مشاهده نکردن پوشش‌های رسی را انبساط و انقباض شدید خاک‌های مورد مطالعه دانستند.

1- Lessivage

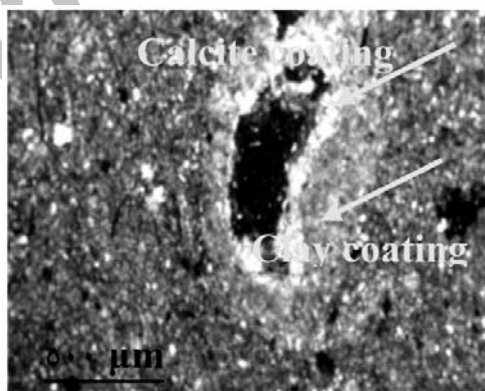
2- Fragment



مشاهدات میکرومورفولوژی مقاطع افق  $Bw_2$  اینسپتی سولز و افق  $Bk$  مالی سولز نیز شواهدی از وجود پوشش ضعیف رس را نشان دادند. در افق  $Bw_2$  اینسپتی سولز، پوشش مرکب (آهک و رس) اطراف حفره‌ها مشاهده شد (شکل ۱۴). در این خاک هیپوکوتینگ رس، روی پوشش آهک می‌باشد. این امر نشان‌دهنده این است که ابتدا انتقال و شستشوی آهک صورت گرفته و سپس شستشوی رس انجام یافته، و رس به صورت پوششی اطراف پوشش آهک قرار گرفته است. البته این پوشش‌ها بر خلاف خاک آلفی سولز به صورت موردی و بسیار ناچیز مشاهده شدند. پوشش رس قرار گرفته بر روی پوشش آهک و قرار گرفتن مجدد پوشش آهک روی آن‌ها، نشان‌دهنده آهکی شدن مجدد می‌باشد (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل ۱۳- پدوفیچر فرم تکه‌ای رس افق A خاک آلفی سولز (PPL).

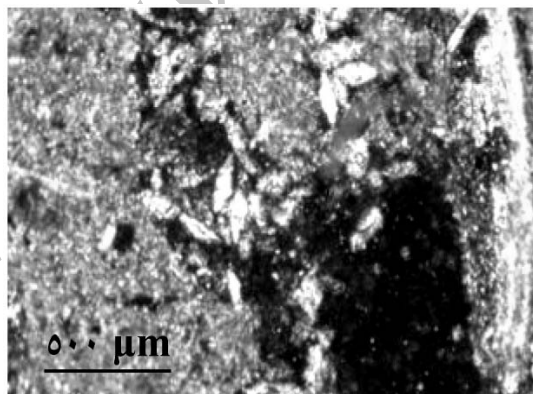


شکل ۱۴- پوشش مرکب (آهک و رس) اطراف حفره‌های افق  $Bw_2$  خاک اینسپتی سولز.

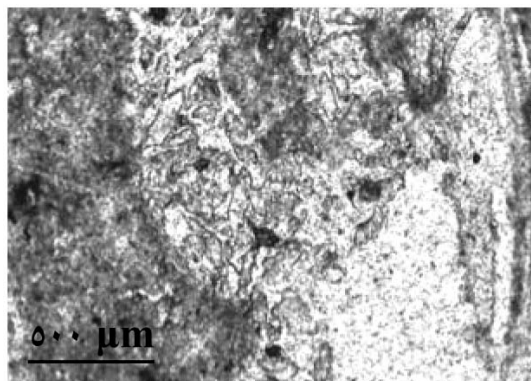
نوع کانی رسی نیز می‌تواند عاملی مؤثر بر مقدار و ضخامت پوشش‌های رسی باشد. پوشش‌های رسی ضخیم و پیوسته زمانی مشاهده می‌شوند که نسبت ذرات ریز رس به مقدار کل رس (FC/TC) و ضریب انبساط خطی کم باشند و اسمکتیت متبلور به مقدار زیاد وجود داشته باشد (گونال و راندسوم، ۲۰۰۶).

**پدوفیچر گچ:** پدوفیچر گچ تنها در خاک اریدی سولز (رژیم رطوبتی اریدیک) مشاهده شد (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). خاک اریدی سولز (خاک‌رخ ۱) دارای آب زیرزمینی سولفات‌ه و شور است (زائرنوملی، ۲۰۰۷). نوسان‌های سطح آب زیرزمینی موجب شده تا وضعیت مساعدی برای تشکیل و بزرگ شدن کریستال‌های گچ فراهم شود. در یک دوره خشکی، آب شور بر اثر نیروی موئینگی بالا آمده و به این صورت سبب شور شدن خاک شده است. مقدار متوسط گچ در این خاک، بین ۳۵-۱۵ درصد متغیر بوده و فرم گچ به صورت لکه و پرشدگی حفره‌ها می‌باشد (قرقره‌چی، ۲۰۰۷). در این خاک، شرایط اقلیمی و درصد گچ و ضخامت مناسب خاک، شرایط لازم را برای تشکیل افق شناسایی جیسیک فراهم کرده است.

مطالعات میکرومورفولوژی، پرشدگی حفره‌ها توسط بلورهای گچ را تنها در خاک‌رخ ۱ (دارای رژیم رطوبتی اریدیک) نشان می‌دهند. این پرشدگی‌ها به صورت هایپیدیوتوپیک<sup>۱</sup> می‌باشند. پرشدگی حفره‌ها به وسیله بلورهای گوشه‌دار، نشان‌دهنده حضور گچ‌های پدوژنیک است.



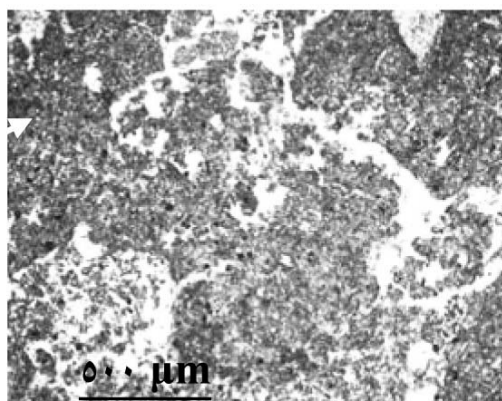
شکل ۱۵- کریستال‌های گچ در حفره‌های افق Bzy خاک اریدی سولز (خاک‌رخ ۱) (نور XPL).



شکل ۱۶- کریستال‌های گچ در حفره‌های افق Bzy خاک اریدی سولز (خاک رخ ۱) (نور PPL).

پدوفیچر اکسیدهای آهن و منگنز: وجود نودول و پوشش‌های اکسید آهن و رنگین‌دانه‌ها<sup>۱</sup> در خاک رخ ۱ (به جز افق سطحی) به دلیل شرایط اکسایش و کاهش متناوب در افق سطحی و زیرسطحی خاک رخ ۴ (A, Bt<sub>1</sub>) و افق Bk خاک رخ ۳ مشاهده می‌شود. بزرگ‌ترین نودول‌ها در رژیم رطوبتی یودیک می‌باشد. هیپوکوتینگ آهن و منگنز از ویژگی‌های بارز رژیم زیریک است، که در افق‌های کمبیک خاک اینسپتی سولز و همچنین در خاک مالی سولز واقع در این رژیم مشاهده شد (جدول ۴). پدوفیچر مربوط به فعالیت‌های زیستی: مقدار زیاد این نوع پدوفیچر، در افق سطحی زمین‌های جنگلی مانند خاک رخ ۴ و خاک واقع در راسته مالی سولز، به دلیل فعالیت جانداران زیاد این خاک‌ها، مشهود است (شکل ۱۷). مشاهده ساختمان مناسب در مقطع میکرومورفولوژی و ساختمان گرانوله<sup>۲</sup> و حفره‌های نوع کانال<sup>۳</sup> و همچنین مقدار زیاد پدوفیچر فضولات جانوری می‌توانند شواهدی بر افزایش فعالیت‌های میکروبی در خاک مالی سولز باشند.

- 
- 1- Mottles
  - 2- Granular
  - 3- Channel



شکل ۱۷- پدوفیچر مربوط به فعالیت‌های بیولوژیکی افق سطحی خاک مالی سولز (PPL).

### نتیجه‌گیری

مطالعات میکرومورفولوژی نشان می‌دهد رژیم‌های رطوبتی مرطوب زیریک و یودیک، به سبب اقلیم و کاربری مناسب، مواد آلی زیادی دارند که منجر به ایجاد ساختمان قوی، به‌ویژه در افق سطحی خاک می‌شوند. به‌دنبال حضور مواد آلی زیاد و فعالیت‌های میکروبی، حفره‌های کانال و انتقالی بیش‌تری نیز در این خاک‌ها به‌دست آمده است، که می‌توانند نقش مؤثری در هدایت هیدرولیکی خاک داشته باشند. رطوبت مناسب موجود در رژیم‌های زیریک و یودیک، موجب هوادپدگی بیش‌تر می‌شود. این امر سبب افزایش میزان رس و انتقال آن‌ها در این خاک‌ها می‌گردد، و شرایط تکامل خاک‌ها را فراهم می‌کند. مرطوب و خشک شدن پی در پی در رژیم رطوبتی زیریک، سبب ایجاد فرم‌های متنوع آهکی می‌شود. این در حالی است که در رژیم یودیک، فرم‌های مختلف رسی ایجاد می‌شود. فرم‌های گچی به سبب اقلیم خشک، در رژیم رطوبتی اریدیک مشاهده می‌گردد.

در نتیجه برای مطالعه تکامل خاک‌ها، علاوه بر مشاهدات صحرائی و مورفولوژی خاک‌ها، مطالعات میکرومورفولوژی نیز می‌تواند یکی از روش‌های مناسب برای بررسی، تشکیل و تکامل خاک‌ها باشد. به گونه‌ای که با بررسی پدوفیچرها و سایر ویژگی‌های مختلف موجود در مقاطع خاک‌ها، می‌توان تکامل و همچنین اثر عوامل مختلف مانند اقلیم و توپوگرافی را در تکامل خاک‌ها مشاهده نمود. کاربری خاک‌ها نیز می‌تواند زیر تأثیراتی قرار گیرد که اقلیم و توپوگرافی بر ساختمان و تکامل خاک دارد.

منابع

1. Alonso, P., Dorronsoro, C., and Egido, J.A. 2004. Carbonation in palaeosols formed on terraces of the Tormes river basin (Salamanca, Spain). *Geoderma*. 118: 261-276.
2. Becze Deak, J., Langhor, R., and Verrechia, E.P. 1997. Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected sections of the European loess belt. *Geoderma*. 76: 221-252.
3. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
4. Egli, M., Merkli, Ch., Sartori, G., Mirabella, A., and Plotze, M. 2008. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence developed on carbonate-rich materials. *Geomorphology*, 97: 675-696.
5. Elliott, P.E., and Dorhan, P.J. 2009. Clay accumulation and argillic - horizon development as influenced by Aeolian vs. local parent material on quartzite and limestone-derived alluvial fans. *Geoderma*. 151: 98-108.
6. Fitzpatrick, E.A. 1993. *Soil microscopy and micromorphology*. J. Wiley and Sons, Chichester.
7. Ghergherechi, Sh. 2007. *Micromorphology and genesis of the soils formed on a climotoposequence; North-South Western Golestan Province*. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 165p. (In Persian)
8. Głab, T., and Kulig, B. 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 99: 169-178.
9. Gunal, H., and Ransom, M.D. 2006. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. *Catena*, 65: 222-236.
10. Jackson, M.L. 1975. *Soil Chemical Analysis Advanced Course*. Univ. of Wisconsin, College of Agric. Dept. of Soils, Madison, WI. 894p.
11. Jacobs, P.M., and Masom, J.A. 2005. Impact of Holocene dust aggradations on A horizon characteristics and carbon storage in loess-derived Mollisols of the Great Plains, USA. *Geoderma*. 125: 95-106.
12. Jobbagy, E.G., and Jackson, R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10: 423-436.
13. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., and Stoops, G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*, 53: 273-301.
14. Khormali, F., Abtahi, A., and Stoops, G. 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma*. 132: 31-46.
15. Khormali, F., and Ghorbani, R. 2009. Origin and distribution of clay minerals in three different climatic regions of eastern Golestan Province. *J. Agric. Sci. and Natur. Resour.* 16p. (In Persian)

16. Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasaro, Ch., and Wani, S.P. 2009. Role of deforestation and hill slope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134: 178-189.
17. Kilfeather, A.A., and Van der Meer, J.M. 2008. Pore size, shape and connectivity in tills and their relationship to deformation processes. *Quaternary Science Reviews*, 27: 250-266.
18. Lamande, M., Hallaire, V., and Curmi, P. 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena*, 54: 637-649.
19. Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments. A and B Academic Publ. Berkhamsted.
20. Nael, M., Khademi, H., and Hajabbasi, M.A. 2004. Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran. *Appl. Soil Ecol.* 27: 221-232.
21. Page, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., and Henndricks, G.J. 1987. Kinetics and mechanism of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil. Soc. Am. J.* 51: 401-408.
22. Pires, L.F., Cooper, M., Cassaro, F.A.M., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., and Dias, N.M.P. 2008. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. *Catena*, 72: 297-304.
23. Richards, L.A. (ed). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S. Salinity Laboratory Staff. USDA. Hand book No. 60. Washington, DC, ASA, 160p.
24. Ritvo, G., Avnimelich, Y., and Kochba, M. 2003. Emperical relationship between conventionally determined pH and insitu values in waterlogged soils, *Aquaculture engineering*, Elsevier, 27: 1-8.
25. Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th edition USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
26. Stoops, G. 2003. Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolite Thin Sections. SSSA, Madison, WI, 182p.
27. Toomanian, N., Jalalian, A., and Karimian Eghbal, M. 2001. Genesis of gypsum enriched soils in north-west Isfahan, Iran. *Geoderma*. 99: 199-224.
28. West, A.J., Galy, A., and Bickle, M. 2005. Tectonic and climatic controls on silicate weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 235: 211-228.
29. Wu, S.P., and Chen, Z.S. 2005. Characteristics and genesis of Inceptisols with placic horizons in the subalpine forest soils of Taiwan. *Geoderma*. 125: 331-341.
30. Zaernomali, S. 2007. Distribution of the different K pools and its relation with soil profil development and clay mineralogy in some selected soils of Golestan Province. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 113p. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 18(1), 2011*  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## **Micromorphology of development of some loess-derived soils of western Golestan province along a climo-topo-biosequence**

**M. Liaghat<sup>1</sup> and \*F. Khormali<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Soil Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources  
Received: 2010/03/13; Accepted: 2010/11/22

### **Abstract**

The aim of the present study, was the micromorphological investigation of development of some loess-derived soils of Golestan province along a climo -topo-biosequence, starting from lowlands in north and ending to forest uplands in south. Four soil profiles, situated in aridic, xeric and udic moisture regimes selected for this study were located at 20 to 400m elevation above sea level. Disturbed and undisturbed samples were taken for physicochemical properties and micromorphological studies. The studied soils in north-south direction were classified as Gypsic Aquisalids (pedon 1), Typic Haploxerepts (pedon 2), Typic Calcixerolls (pedon 3) and Typic Hapludalfs (pedon 4). The results showed that soils in xeric and udic moisture regimes, had higher clay. Alfisols with udic moisture regime and forest land use, were weakly acidic, but at the semiarid climate, gypsum and calcite accumulation caused an increase in pH. In Aridisols and subsurface horizons of Mollisols, crystallitic b-fabric was dominant. Whereas Alfisols showed striated-speckled b-fabric. Subangular blocky microstructure is dominant in Alfisols, Aridisols and Inceptisols. The granular and crumb microstructure were also observed in surface horizons of Mollisols. Moreover Mollisols, showed higher porosity. Quantitative microscopic studies were done using Image Tool software and image analysis techniques. From aridic to udic moisture regime more variation in porosity were observed. In soils of xeric moisture regime, various forms of pedofeatures including calcite and Fe-Mn coatings were observed. In soils of udic moisture regime, clay coatings and clay fragments were dominant. Gypsum pedofeatures were dominant in arid soils.

**Keywords:** Micromorphology, Image analysis, Soil development, Topography, Moisture regime

---

\* Corresponding Author; Email: [khormali@yahoo.com](mailto:khormali@yahoo.com)