

## مطالعه اجمالی میکرومورفولوژی توالی لس - خاک قدیمی در جنوب تاجیکستان

### (مطالعه موردی: منطقه خوالینگ)

فائزه طالبی؛ دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

فرهاد خرمالی\*؛ استاد علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

علیرضا کریمی؛ استاد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

حسین تازیکه؛ دانش‌آموخته دکتری علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

رجب کوربانوف؛ دانشیار گروه هیدرواکولوژی، دانشگاه ایالتی، مسکو، روسیه

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲

### چکیده:

وجود توالی لس - خاک قدیمی در جنوب تاجیکستان بیان کننده وجود دوره‌های اقلیمی سرد و خشک و گرم و مرطوب است. پژوهش حاضر با هدف بررسی میکرومورفولوژی توالی های لس - خاک قدیمی جنوب تاجیکستان و مقایسه میزان تحول و هوادیدگی آن ها با توالی های لس - خاک قدیمی در ایران پرداخته است. مقطع مورد مطالعه در منطقه خوالینگ در جنوب تاجیکستان واقع شده و شامل یک خاک جدید، دوازده واحد لسی و شانزده پدوکمپلکس می باشد. برای دستیابی به اهداف این تحقیق از هریک از افق‌ها، نمونه‌های دست نخورده برای مطالعه میکرومورفولوژی جمع آوری شد. مقاطع نازک تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج میکرومورفولوژیکی نشان داد در خاک‌های قدیمی مقادیر زیاد پوشش‌های رسی، پدوفیچرهای اکسیدهای آهن و منگنز، علائم فعالیت‌های زیستی و... وجود داشت که حاکی از تکامل بالای این خاک‌ها بود. بررسی شاخص تکامل میکرومورفولوژیکی خاک نشان داد که خاک جدید تکامل ضعیف‌تری در مقایسه با خاک‌های قدیمی داشت. خاک‌های قدیمی به دلیل داشتن پوشش‌های رسی جهت‌یافته، اکسیدهای آهن و منگنز بر روی خاکدانه‌ها و میکروساختمان‌های توسعه یافته بیانگر این هستند که در زمان شکل‌گیری این خاک‌ها شرایط اقلیمی و محیطی نسبت به حال حاضر گرم‌تر و مرطوب‌تر بوده است.

واژگان کلیدی: آسیای میانه، اقلیم گذشته، پالئوپدولوژی.

## مقدمه

خاک های قدیمی یا پالتوسول ها<sup>۱</sup> که در شرایط اقلیمی گرم و مرطوب تشکیل می شوند توسط رسوبات لسی در شرایط اقلیمی سرد و خشک مدفون شده است. بنابراین، توالی های لس-خاک قدیمی در فراهم آوردن اطلاعات و داده های مختلف در مورد اقلیم و شرایط محیطی گذشته مورد استفاده قرار می گیرند ( Frindte et al., 2020; Ghafarpour et al., 2021; Amiri et al., 2023; Kehl et al., 2021; 2021; 10; 2021). رسوبات لس- خاک قدیمی در آسیای میانی منعکس کننده چرخه تغییر اقلیم در دوره کواترنری هستند و از دیرباز به عنوان یک منطقه کلیدی مورد توجه پژوهشگران رسوب شناسی و خاک شناسی بوده است (Kehl et al; 2021; Maleki et al., 2023: 27; He et al., 2021).

تجمع گرد و غبار در طول دوره کواترنر در آسیای میانه منجر به تشکیل رسوبات گسترده لس در جنوب تاجیکستان شده است (Dodonov et al., 2006; Dodonov and Baiguzina, 1995). بنابراین، این منطقه یکی از بزرگترین ذخایر لس در آسیای میانه را دارد که برای مطالعه تغییرات اقلیمی دوره کواترنر دارای اهمیت می باشد (Li et al., 2019; Tian et al., 2020; Challier et al., 2024). توالی های لس- خاک قدیمی نشان دهنده چندین دوره تغییر اقلیم است. این توالی ها دارای شواهد تکامل خاک هستند و در مطالعات پالتوپدولوژی یا علم مطالعه خاک های قدیمی که هدف اصلی آن بازسازی شرایط پیدایش خاک به منظور شناسایی عوامل خاک ساز می باشد، نقش به سزایی دارد (He et al., 2021; Bronger, 2003). نتایج حاصل از مطالعات بر روی توالی های لس- خاک قدیمی در تاجیکستان، بیانگر این مطلب است که خاک های قدیمی به دلیل افزایش مقادیر رس، آبشویی، هوادیدگی، وجود اکسیدهای آهن و علائم فعالیت های زیستی در مقایسه با لس ها به خوبی تکامل یافته است. همه این فرآیندها حاکی از یک رژیم مطلوب برای تشکیل خاک تحت شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در دوران بین یخچالی است (Dodonov et al., 2006; Ding et al., 2002, Parviz et al., 2020). به منظور تکمیل مطالعات پالتوپدولوژی، بکارگیری مطالعات میکرومورفولوژی نیز ضروری است. میکرومورفولوژی به بررسی و شناخت فرآیندهای موثر در تشکیل و تکامل خاک با استفاده از تکنیک های میکروسکوپی و فوق میکروسکوپی می پردازد.

اهمیت مطالعات میکرومورفولوژی به حدی است که به عقیده استوپس (Stoops, 2003) هیچ روش دیگری مانند "میکرومورفولوژی" وجود ندارد که توانایی تشخیص ماهیت و پیچیدگی پلی‌ژنز خاک‌ها را داشته باشد. در مطالعه میکرومورفولوژی توالی‌های لس- خاک قدیمی در منطقه آق‌بند در استان گلستان وجود پوشش رسی و پدوفیچر کربنات مشاهده شد که نشان‌دهنده تشکیل این توالی‌ها در اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب بود (Taheri et al., 2016).

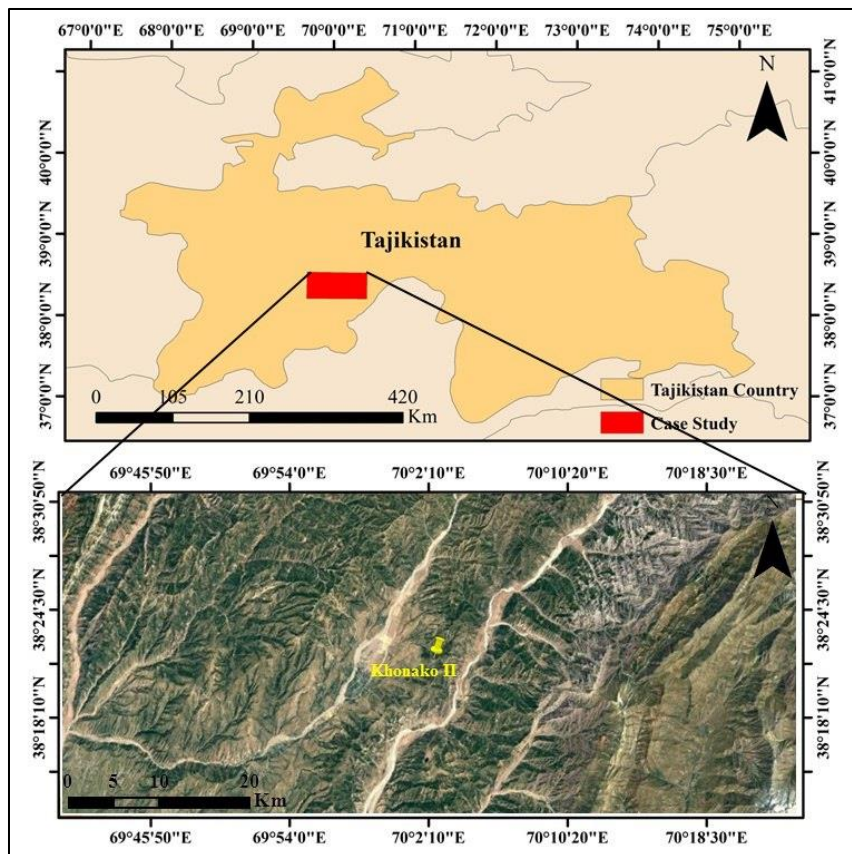
شاخص<sup>۱</sup> MISECA از جمله شاخص‌های میکرومورفولوژیکی است که برای تخمین درجه تکامل خاک‌ها در یک توالی لس- خاک قدیمی، بازسازی شرایط اقلیم گذشته و فرآیندهای خاکسازي مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص، مقدار کمی مولفه‌های میکرومورفولوژیکی مانند بی‌فابریک، فراوانی پوسته‌های رسی، مناطق تخلیه‌شده از آهک، میکروساختمان، اکسیدهای آهن و منگنز و درجه هواپدیدی کانی‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد و در نهایت با جمع کردن وزن اختصاص داده شده به هر یک از مشخصه‌های مذکور، درجه تکامل خاک به سه دسته ضعیف (صفر تا ۸)، متوسط (۹-۱۶) و خوب (۱۷-۲۴) تقسیم‌بندی می‌شود. شهریار و همکاران (Shahriari et al., 2014) با مطالعه پالئوپدولوژی سه توالی لس- خاک قدیمی در منطقه آق‌بند، نکا و مبارک‌آباد (شمال ایران) بیان کردند، شاخص میکرومورفولوژیکی MISECA تغییرات پدولوژیکی اقلیم گذشته را نشان می‌دهد. در طول دهه‌های اخیر، مطالعات مختلفی بر روی توالی‌های لس- خاک قدیمی جنوب تاجیکستان انجام شده است (Challier et al., 2019; Tian et al., 2020; Parviz et al., 2020; Li et al., 2024). اما، تاکنون مطالعات میکرومورفولوژی در این منطقه به‌منظور درک فرآیندهای پدوژنیک و ارتباط آن‌ها با اقلیم گذشته صورت نگرفته است. بدین جهت پژوهش حاضر با هدف بررسی میکرومورفولوژی توالی لس- خاک قدیمی جنوب تاجیکستان و مقایسه میزان تحول و هواپدیدی آن با توالی‌های لس- خاک قدیمی ایران پرداخته است.

---

1 Micromorphological Soil Development Index

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش یک توالی لس- خاک قدیمی در محدوده جغرافیایی ( $38^{\circ}35'26''N$ ,  $70^{\circ}46'34''E$ ) در ۱۰ کیلومتری شهر خوالینگ در جنوب تاجیکستان واقع شده است (شکل ۱). در این منطقه ارتفاع از سطح دریا ۱۸۸۷ m، متوسط دمای سالانه ۹C-۱۱ $^{\circ}$  و متوسط بارندگی سالانه ۵۰۰-۸۵۰ mm گزارش شد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و مزیک می‌باشد. ترانشه مورد مطالعه به ارتفاع ۱۲۵ متر شامل یک خاک جدید (MS)، دوازده واحد لسی (L) و شانزده پدوکمپلکس (PC) است (شکل ۲). خاک جدید براساس راهنمای رده‌بندی خاک آمریکایی (Soil Survey Staff, 2023) و همچنین سامانه جهانی طبقه‌بندی خاک (WRB, 2023) طبقه‌بندی شدند.

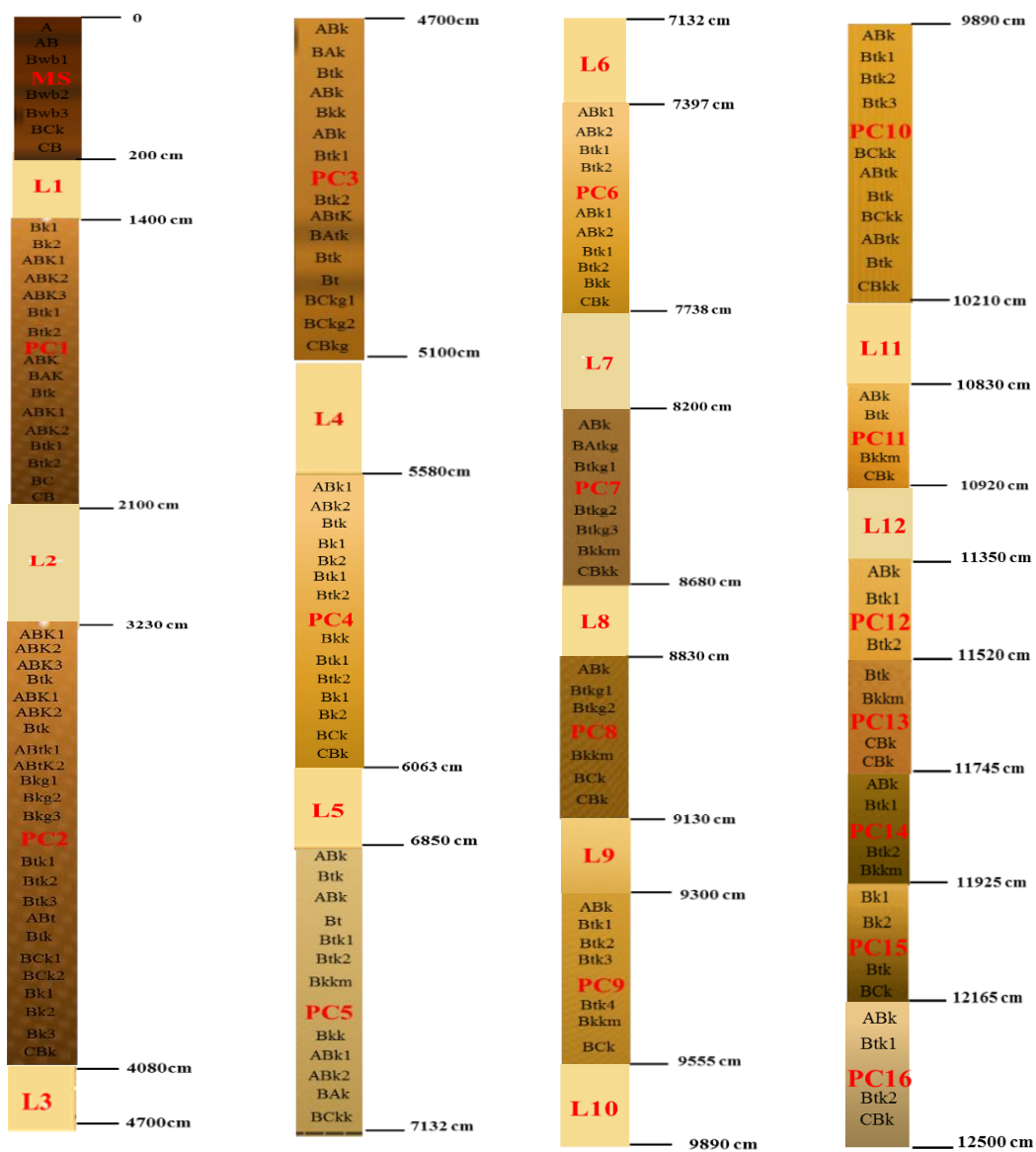


شکل ۱. موقعیت توالی لس- خاک قدیمی منطقه خوالینگ در جنوب تاجیکستان

جهت بررسی میکرومورفولوژی و مطالعه فرآیندهای خاکساز توالی لس- خاک قدیمی مورد مطالعه، از افق‌ها و لایه‌های مختلف نمونه‌های دست نخورده برداشته شد. سپس از هر پدوکمپلکس، تکامل یافته‌ترین افق‌ها و افق‌های کلسیک و پتروکلسیک و از هر لایه لسی نمونه‌های متعددی انتخاب شدند. نمونه‌های دست نخورده خاک هواخشک شده با مخلوط استون و رزین پلی‌استر و با افزودن کاتالیست و کبالت در شرایط خلا در دسیکاتور اشباع و در هوای آزاد طی چند ماه سخت شدند. نمونه‌های سخت شده، برش داده شد و بر روی لام شیشه‌ای چسبانده و تا ضخامت ۳۰ میکرون با استفاده از کاغذ سمباده و پودر کربورانوم نازک شدند. مقاطع با میکروسکوپ پلاریزان در نور عادی (PPL) و متقاطع (XPL) براساس روش بولاک و همکاران (۱۹۸۵) و تعاریف ارائه شده توسط استوپس (۲۰۲۰) مطالعه شدند.

### یافته‌های پژوهش و بحث

خاک جدید<sup>۱</sup> با ضخامت ۲ متر روی توالی لس- خاک قدیمی مورد مطالعه تشکیل شده است و دارای افق سطحی اکریک و افق زیرسطحی کمبیک می‌باشد. رده‌بندی خاک براساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی خاک Typic Haploxerepts و براساس سامانه جهانی طبقه‌بندی خاک Cambisols نام‌گذاری شد. در صحرا، رسوبات لسی با رنگ روشن (ولیبوی زیادتر نسبت به خاک قدیمی) از خاک‌های تشکیل شده در ترانشه به طور آشکاری متمایز و دارای ساختمان توده‌ای بوده که نشان دهنده عدم تکامل پدوژنیکی این لایه‌ها می‌باشد. خصوصیات میکرومورفولوژیکی تکامل یافته‌ترین افق هریک از پدوکمپلکس‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است.



شکل ۲. طرحی شماتیک از ترانشه مورد مطالعه

جدول ۱: خصوصیات میکرومورفولوژیکی و درجه تکامل متکامل ترین افق‌های هر پدوکمپلکس

درجه تکامل خاک	شاخص MISECA	پدوفیچر	بی فابریک	حفرات	میکروساختمان	خاک جدید / پدوکمپلکس
ضعیف	۶	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم)، بقایای گیاهی و فضولات جانوری داخل کانال	کلسیت کریستالیتیک	کانال و حجره	دانه‌ای	خاک جدید افق A
متوسط	۱۰	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم و آهک سوزنی شکل (خیلی کم))، اکسیدهای آهن و منگنز (۲-۳٪)	کلسیت کریستالیتیک (۶۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) از نوع پورواسترایتد (۴۰٪)	حفرات بی-شکل و کانال	بلوکی اوبه‌دار با جداشدگی ضعیف	پدوکمپلکس ۱ افق Btk
متوسط	۱۳	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم و نودول آهک)، اکسیدهای آهن و منگنز (۲-۴٪)، پوشش‌های رسی (۱-۲٪)	اسپکلد (لکه‌ای) (۶۰٪) و کلسیت کریستالیتیک (۴۰٪)	حفرات بی‌شکل و کانال	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف	پدوکمپلکس ۲ افق Btk
خوب	۱۷	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم، آهک سوزنی شکل و نودول آهک)، اکسیدهای آهن و منگنز (۲-۴٪)، پوشش‌های رسی (۲-۴٪)	کلسیت کریستالیتیک (۶۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) (۴۰٪)	حفرات بی‌شکل و کانال	مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی متوسط	پدوکمپلکس ۳ افق Bt
متوسط	۱۵	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم، آهک سوزنی شکل و نودول آهک)، اکسیدهای آهن و منگنز (۲-۱٪)، پوشش‌های رسی (۲٪)	کلسیت کریستالیتیک	حفرات بی‌شکل و کانال	مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی ضعیف	پدوکمپلکس ۴ افق Btk

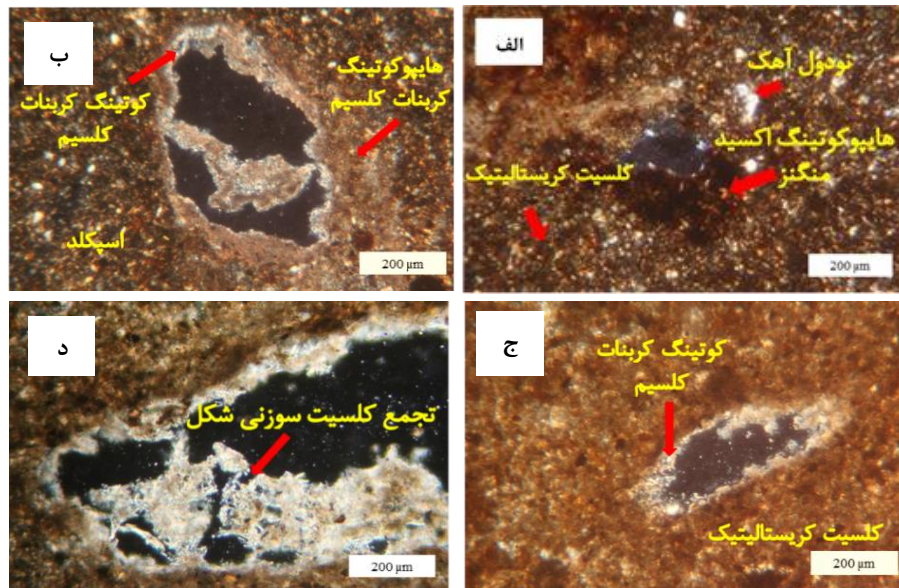
پدوکمپلکس	میکروساختمان	حفرات	بی فابریک	پدوفیچر	شاخص MISECA	درجه تکامل خاک
پدوکمپلکس ۵ افق Bt	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی متوسط	حفرات بی- شکل و کانال	اسپکلد (لکه‌ای)	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم (۲- ۵٪)، اکسیدهای آهن و منگنز (۵٪)، پوشش‌های رسی (۶-۲)	۱۷	خوب
پدوکمپلکس ۶ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف تا متوسط	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک (۷۰٪) و اسپکلد (لکه- ای) (۳۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۵٪)، پوشش‌های رسی (۳-۵٪)	۱۴	متوسط
پدوکمپلکس ۷ افق Btkg	مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی متوسط	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسیدهای آهن و منگنز (۷-۵٪)، پوشش‌های رسی (۲-۱٪)	۷	ضعیف
پدوکمپلکس ۸ افق Btkg	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۶-۵٪)، پوشش‌های رسی (۲-۱٪)	۷	ضعیف
پدوکمپلکس ۹ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف تا متوسط	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک (۸۰٪) و اسپکلد (لکه- ای) (۲۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۴-۲٪)، پوشش‌های رسی (۵-۱٪)	۸	ضعیف
پدوکمپلکس ۱۰ افق Btk	مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی متوسط و کانال	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک (۷۰٪) و اسپکلد (لکه- ای) (۳۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۵-۲٪)، پوشش‌های رسی (۴-۲٪)	۱۰	متوسط
پدوکمپلکس ۱۱ افق Btk	مکعبی زاویه‌دار با جداشدگی ضعیف تا متوسط	حفرات بی- شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک (۸۰٪) و اسپکلد (لکه- ای) (۲۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوئینگ و هایپوکوئینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۵-۲٪)، پوشش‌های رسی (۲-۱٪)	۱۱	متوسط

پدوکمپلکس	میکروساختمان	حفرات	بی فابریک	پدوفیچر	شاخص MISECA	درجه تکامل خاک
پدوکمپلکس ۱۲ افق Btk	مکعبی زاویه دار با جداشدگی ضعیف	حفرات بی شکل و کانال	کلسیت (۷۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) (۳۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم و نودول آهن)، اکسید آهن و منگنز (۲-۴٪)، پوشش‌های رسی (۱-۴٪)	۷	ضعیف
پدوکمپلکس ۱۳ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی متوسط	حفرات بی شکل و کانال	کلسیت (۸۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) (۲۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم)، اکسید و نودول آهن و منگنز (۲- ۴٪)، پوشش‌های رسی (۲-۳٪)	۱۰	متوسط
پدوکمپلکس ۱۴ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف	حفرات بی شکل و کانال	کلسیت (۸۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) (۲۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم و آهن سوزنی شکل)، اکسید آهن و منگنز (۲-۴٪)، پوشش‌های رسی (۲-۳٪)	۹	متوسط
پدوکمپلکس ۱۵ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی ضعیف	حفرات بی شکل و کانال	کلسیت کریستالیتیک	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم)، اکسید آهن و منگنز (۱-۳٪)، پوشش‌های رسی (۱-۳٪)	۷	ضعیف
پدوکمپلکس ۱۶ افق Btk	مکعبی بدون زاویه با جداشدگی متوسط	حفرات بی شکل و کانال	کلسیت (۸۰٪) و اسپکلد (لکه‌ای) (۲۰٪)	پدوفیچرهای کربناته (کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم ونودول آهن)، اکسید آهن و منگنز (۲-۴٪)، پوشش‌های رسی (۲-۳٪)	۹	متوسط

## بررسی پدوفیچرها<sup>۱</sup>

### پدوفیچرهای کربناته

نودول‌های آهنی به‌عنوان یکی از فراوان‌ترین اشکال کربنات کلسیم در مقاطع مورد مطالعه مشاهده گردید. اما فراوانی و توزیع این نوع پدوفیچر در مقاطع مختلف متفاوت بود که بیان‌کننده تشکیل آن‌ها در شرایط اقلیمی مختلف بوده است (شکل ۳ الف). نودول‌های آهنی در توالی لس - خاک قدیمی در مقایسه با خاک جدید بیشتر مشاهده شد، که نشان‌دهنده این مطلب است که این خاک‌ها تحت تاثیر دوره‌های متوالی مرطوب و خشک شدن قرار گرفته است (Panin et al., 2019: 23).



شکل ۳. الف) PC3: نودول آهن، هایپوکوتینگ اکسید منگنز و بی‌فابریک کلسیت کریستالینیک در افق ABk، ب) PC5: کوتینگ، هایپوکوتینگ کربنات کلسیم و بی‌فابریک لکه‌ای (اسپکلد) در افق Btk، ج) خاک جدید: کوتینگ کربنات کلسیم و بی‌فابریک کلسیت کریستالینیک در افق Bck، د) PC1: تجمع کلسیت سوزنی شکل در افق ABk (تمام تصاویر در زیر نور متقاطع گرفته شده است).

اکثریت غالب پدوفیچرهای کربناته در بیشتر مقاطع مورد مطالعه شامل پدوفیچر کوتینگ و هایپوکوتینگ کربنات کلسیم است که به فرآیندهای پخشیدگی و حرکت تعلیقی آهنی نسبت داده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳ب) مشاهده

می‌شود، این نوع پدوفیچرها که در تمام توالی لس- خاک قدیمی با شدت و تکامل متفاوت تشکیل شده‌است، در خاک جدید به ندرت مشاهده شد (شکل ۳ج). یکی دیگر از پدوفیچرهای مشاهده شده در خاک‌های جدید و قدیمی (از عمق ۶-۲۰ متر) کلسیت سوزنی شکل می‌باشد که وجود مواد آلی تجزیه‌پذیر و رطوبت کافی در زمان تشکیل این خاک‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۳ د). این نتایج با نتایج برخی پژوهشگران مطابقت دارد (Bajnoczi et al 2006; Najafi., 2019; ) (Pourmasoumi Parashkouh et al., 2019; Khormali et al., 2006; Amiri et al, 2023).

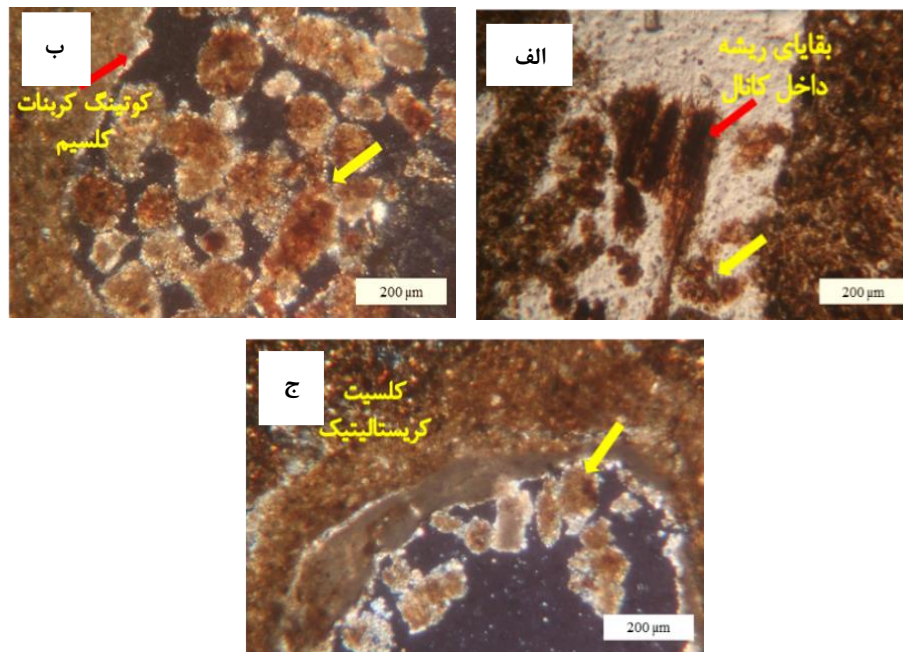
### پدوفیچرهای ناشی از فعالیت بیولوژیکی

در بخش خاک جدید فضولات جانوری<sup>۱</sup> و بقایای ریشه در داخل کانال‌ها<sup>۲</sup> به وضوح مشاهده شد (شکل‌های ۴ الف و ب). پدوفیچرهای ناشی از فعالیت‌های بیولوژیک، بقایای فضولات جانوری و بقایای ریشه‌های گیاهی در مقاطع نازک خاک جدید دلالت بر حاکمیت شرایط مطلوب برای رشد و نمو و به تبع آن فعالیت بالای بیولوژیکی در این افق‌ها دارد.

---

1 Excremental Pedofeatures

2 channels

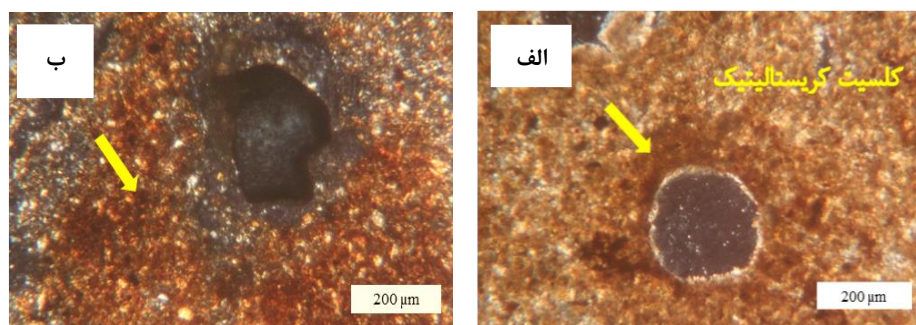


شکل ۴) الف) خاک جدید: بقایای ریشه و فضولات جانوری که با جهت های زرد رنگ مشخص شده، افق A. ب) خاک جدید: وجود فضولات جانوری در کنار کوتینگ کربنات کلسیم افق Bck. ج) PC3: فضولات جانوری با جهت زرد رنگ مشخص شده، افق ABk. (تمام تصاویر به غیر از تصویر الف در نور متقاطع هستند)

فعالیت موجودات زنده در خاک‌های قدیمی جنوب تاجیکستان به‌عنوان شاهدهی بر وجود شرایط اقلیمی مساعد در زمان تشکیل این خاک‌ها در مقایسه با لس‌ها شناخته شد (Dodonov et al., 2006)، که نتایج مطالعه حاضر را تایید می‌نماید. همانطور که در شکل (۴ ج) مشاهده می‌شود علاوه بر خاک جدید، فضولات جانوری در افق‌های ABk برخی از پدوکمپلکس‌ها (پدوکمپلکس سوم) تشخیص داده‌شد که نمایانگر شرایط دیرینه مناسب از لحاظ آب و هوایی برای فعالیت بیولوژیکی در زمان تشکیل این خاک‌ها بوده است، که موجب تکامل خاک‌های قدیمی شده‌است.

### پدوفیچر اکسیدهای آهن و منگنز

در تمام واحدهای لسی مقطع مورد مطالعه به مقدار کم (۶٪-۳) پوشش‌های ضعیف اکسید آهن و منگنز به صورت هایپوکوتینگ مشاهده شد که شرایط هیدرومورفیک ضعیف را نشان می‌دهد. اما در افق Ck واحد لسی سوم به دلیل شرایط اکسید و احیا متناوب که در هنگام تشکیل و تکامل این خاک‌ها رخ داده‌است تجمع اکسیدهای آهن و منگنز بیشتر مشاهده شد (شکل‌های ۵ الف و ۵ ب).



شکل ۵ الف) L3: بی‌فابریک کلسیت کریستالیتیک افق Ck. ب) PC8: افق Btkg. هایپوکوتینگ اکسید منگنز با جهت زرد رنگ مشخص شده است (تمام تصاویر در نور متقاطع هستند).

همان‌گونه که در شکل ۵-ب نشان داده شده‌است در برخی پدوکمپلکس‌ها حضور این نوع پدوفیچر در مقادیر زیاد (۱۰٪) قابل توجه بود. طاهری و همکاران (Taheri et al., 2016: 5) بیان داشتند که وجود این پدوفیچرها در توالی‌های لس-خاک قدیمی شمال ایران نشان از شرایط مرطوب زمان تشکیل خاک‌ها دارد.

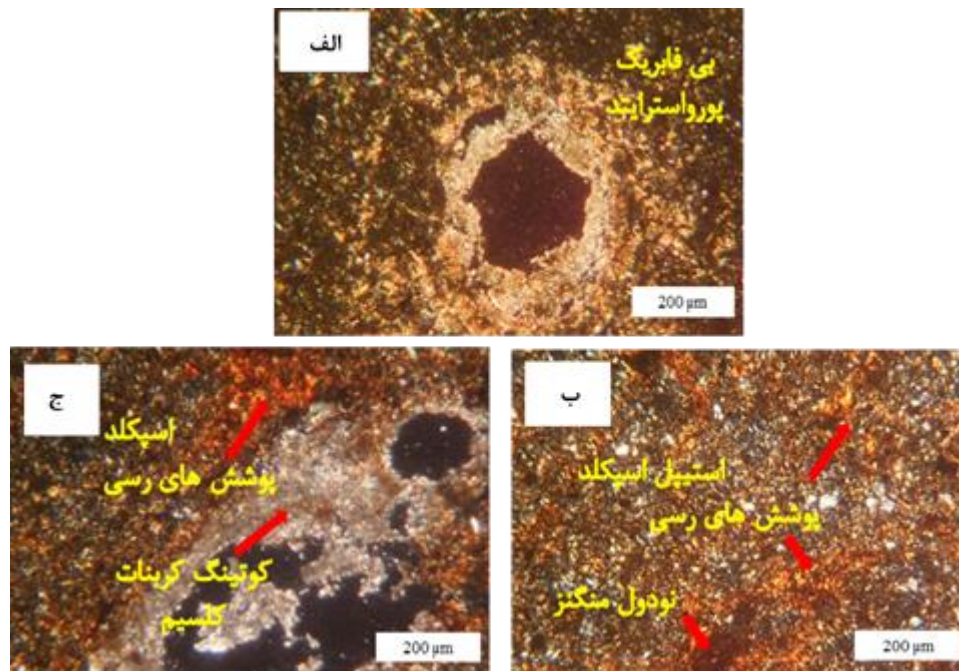
### پدوفیچر انتقال رس

حضور پوشش‌های رسی<sup>۱</sup> در مقاطع نازک خاک می‌تواند بیان‌کننده حرکت رس‌های ایلوویال باشد که به صورت رس‌های جهت‌یافته اطراف حفرات در نتیجه نفوذ آب تشکیل شده‌است. علی‌رغم مقدار زیاد رس در افق‌های آرچلیک پدوکمپلکس اول نسبت به افق‌های خاک جدید، پوسته‌های رسی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید. وجود پوشش‌های رسی شکسته شده در اطراف حفرات و وجود بی‌فابریک پورواسترایتد<sup>۲</sup> در بخشی از مقطع (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد که رس‌ها به صورت

1 Clay coatings

2 Porostriated

منسجم در اطراف حفرات و کانال‌ها تجمع پیدا نکرده است و در زمینه خاک پراکنده شده است که طبق نظر نورد و همکاران (Nordt et al., 2004:11) این اتفاق به دلیل وجود انقباض و انبساط زیاد در خاک رخ می‌دهد. امیری و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی میکرومورفولوژی توالی لس-خاک قدیمی بلوچ آباد (گلستان، ایران) بیان کردند که به دلیل وجود مقادیر زیاد رس در خاک‌های قدیمی مربوط به اوایل دوران MIS5، دوران MIS7 و MIS9 دومین‌های رسی به دلیل وجود انقباض و انبساط در زمان تشکیل آن خاک‌ها در زمینه خاک پخش شده است (Amiri et al, 2023: 12).



شکل ۶ الف) PC1: بی فابریک پورواسترایتد در افق Btk، ب) PC1: پوشش های رسی، نودول منگنز و بی فابریک استیبل اسپیکلد در افق Btk و ج) PC10: تشکیل پوشش رسی بر روی کورتینگ کربنات کلسیم و بی فابریک اسپیکلد در افق Btk. (تمام تصاویر در نور متقاطع هستند).

در بخش زیرین افق‌های پدوکمپلکس اول در ترانشه مورد مطالعه تشکیل پدوفیچرهای رسی از فراوانی بیشتری برخوردار است (شکل ۶-ب) که میزان رطوبت بالای خاک برای انتقال رس، وجود دوره‌های خشکی برای نگهداری آن‌ها و همچنین انقباض و انبساط کمتر خاک‌ها را نشان می‌دهد. دودونوف و همکاران (Dodonov et al., 2006: 7) در مطالعه میکرومورفولوژی در جنوب تاجیکستان حضور پوشش‌های رسی شکسته شده در زمینه خاک به تخریب پدوژنیک پوشش-های رسی در اثر بیوتوریشن یا پدیده انبساط و انقباض نسبت دادند. در مواردی در افق‌های Btk پدوکمپلکس دهم

پوشش‌های رسی بر روی کربنات کلسیم قرار گرفته که این پدیده در میکرومورفولوژی سوپرایمپوزد<sup>۱</sup> که از انواع پدوفیجرهای مرکب است، نام دارد (شکل ۶-ج). حضور توام این پدوفیچرها زمانی اتفاق می‌افتد که یک فرآیند بعد از فرآیند دیگر اتفاق افتاده و به عبارتی بیانگر تخلیه مجدد آهک از افق‌های بالایی و تجمع آن در زیر پوشش‌های رسی و همچنان نشان دهنده تشکیل این توالی‌ها در اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب می‌باشد، که با نتایج حاصل از مطالعات میکرومورفولوژیکی امیری و همکاران (Amiri et al, 2023:10)، طاهری و همکاران (Taheri et al., 2016: 5) و ولامینک و همکاران (Vlaminck et al., 2018: 5) همخوانی دارد.

### بی‌فابریک<sup>۲</sup>

بی‌فابریک غالب در خاک جدید به دلیل حضور میکریته‌های کلسیت در زمینه خاک از نوع کلسیت کریستالیتیک<sup>۳</sup> می‌باشد (شکل ۳ ج). مهم‌ترین دلیل مشاهده این نوع بی‌فابریک در خاک وجود مقادیر زیاد کربنات در مواد مادری می‌باشد. لذا در خاک‌ها و افق‌های کمتر هوادیده شده بخصوص خاک جدید بی‌فابریک کلسیت کریستالیتیک و با هوادیدگی بیشتر در خاک‌های قدیمی با تخلیه آهک بی‌فابریک لکه‌ای و در مواردی ممکن است بی‌فابریک خطی نیز مشاهده شود. در تمام واحدهای لسی بی‌فابریک کلسیت کریستالیتیک مشاهده شد (شکل ۵ الف). یکی از مهم‌ترین فرآیندهای خاکساز، آبشویی کربنات‌ها به اعماق زیرین و تشکیل مناطق تهی‌شده از آهک می‌باشد که منجر به ایجاد بی‌فابریک اسپکلد<sup>۴</sup> یا (لکه‌ای)<sup>۴</sup> در زمینه خاک می‌شود (Khormali et al., 2006: 5). در خاک‌های قدیمی مقطع مورد مطالعه به دلیل شرایط رطوبتی مناسب‌تر، شستشوی کربنات‌ها از زمینه و انتقال به سمت پایین یا اطراف کانال‌ها نسب به واحدهای لسی بیشتر انجام شده است. بنابراین بی‌فابریک چیره در این خاک‌ها از نوع اسپکلد (لکه‌ای) و استیپل اسپکلد<sup>۵</sup> می‌باشد (شکل‌های ۶-ج و ۶-ب).

1 Superimposed

2 b-fabric

3 Calcitic crystallitic

4 Speckled

5 Stipple-speckled

## میکروساختمان<sup>۱</sup>

در خاک جدید میکروساختمان از نوع گرانولار و حفرات مشاهده شده شامل کانال و حجره<sup>۲</sup> می‌باشد که به شرایط مناسب برای فعالیت بیولوژیکی مانند رشد و نفوذ ریشه و فعالیت جانوران در خاک نسبت داده می‌شود (Kemp et al., 2003:4). خرمالی و همکاران (Khormali et al., 2012: 7) بیان کردند که حفرات در اثر پدیده‌های انبساطی و انقباضی حاصل از تر و خشک شدن بوجود می‌آیند و تحت تاثیر فرآیندهای پدوژنیک شامل انتقال رس و تجمع کربنات ثانویه قرار می‌گیرند. اکثر حفرات در لایه‌های لسی مورد مطالعه از نوع واگی و تعدادی کانال و در خاک‌های قدیمی ترکیبی از واگی، چمبر و کانال بودند. میکروساختمان غالب لایه‌های لسی از نوع توده‌ای<sup>۳</sup> می‌باشد (شکل ۷-الف). در خاک‌های قدیمی با درجه تکامل‌یافتگی کم، میکروساختمان‌های غالب از حالت مکعبی بدون زاویه (یا زاویه‌دار) با تمایز ضعیف<sup>۴</sup> تا مکعبی بدون زاویه (زاویه‌دار) با درجه تمایز متوسط<sup>۵</sup> متفاوت می‌باشد (شکل ۷ ب و ج). حضور میکروساختمان مکعبی شرایط اقلیمی مطلوب در زمان تشکیل خاک‌های قدیمی را نشان می‌دهد که با نتایج بررسی میکرومورفولوژیکی طاهری و همکاران (Taheri et al., 2016: 4) مطابقت دارد. مطالعات میکرومورفولوژیکی امیری و همکاران (Amiri et al., 2023) و ملکی و همکاران (Maleki et al., 2023) نشان داد که با کاهش بارندگی میکروساختمان‌ها از بلوکی بدون زاویه یا زاویه‌دار با تمایز خوب به میکروساختمان توده‌ای تغییر می‌کند.

---

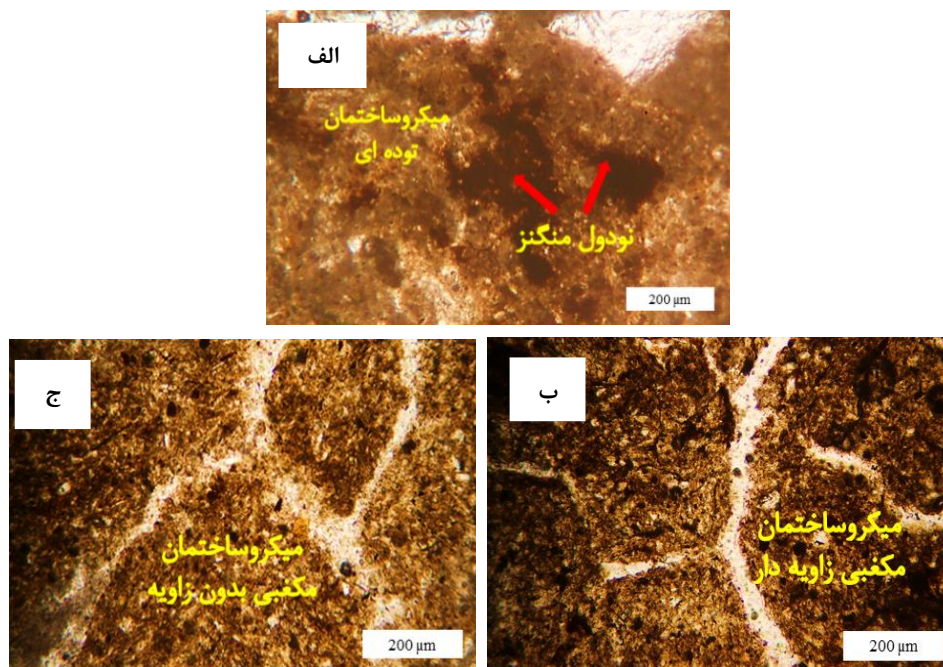
1 Microstructure

2 Chambers

3 Massive

4 Weakly-separated subangular (angular) blocky

5 Well-separated subangular (angular) block



شکل ۷. الف) L7، میکروساختمان توده ای. ب) و ج) به ترتیب PC10 و PC5، میکروساختمان مکعبی زاویه دار و بدون زاویه (تمام تصاویر زیر نور معمولی هستند).

### شاخص MISECA

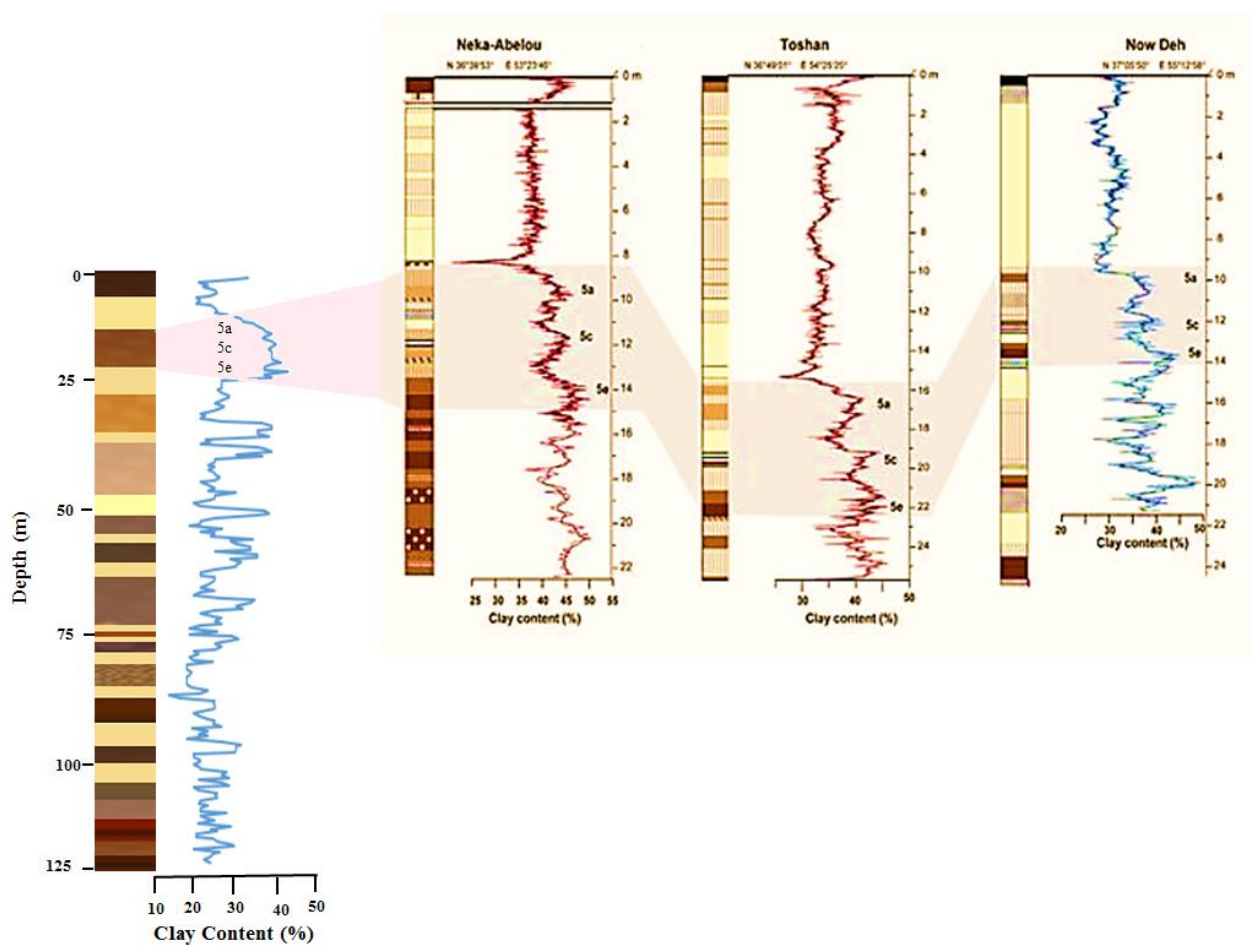
براساس شاخص MISECA خاک‌های مورد مطالعه با تکامل یافتگی ضعیف، متوسط و خوب دسته‌بندی شده است (جدول ۱). مقادیر این شاخص برای افق‌های خاک جدید بین ۵ تا ۶ متغیر می‌باشد. بنابراین این خاک‌ها در ردیف خاک‌های با تکامل ضعیف قرار می‌گیرند. میزان تحول افق‌ها براساس شاخص MISECA در پدوکمپلکس‌های اول، دوم، چهارم، ششم، دهم و چهاردهم کم بوده (> ۹) و تنها افق‌های Btk براساس این شاخص دارای تحول متوسط (۹-۱۵) است. حضور پوشش‌های رسی و ساختمان خوب از دلایل افزایش این شاخص در این افق‌ها قلمداد می‌شود. وجود هیدروکسید و اکسیدهای آهن و منگنز (حدود ۵-۷٪) در پدوکمپلکس‌های هفتم، هشتم و نهم قابل توجه بود و براساس شاخص MISECA این پدوکمپلکس‌ها دارای تحول ضعیف (۸-۷) می‌باشد. اما در پدوکمپلکس‌های دهم و یازدهم میزان تکامل بیشتر شده است، به طوری که افق Btk به دلیل داشتن ساختمان خوب و پوشش رسی زیاد بخش‌هایی با بی‌فابریک اسپکلد مشاهده شد که نشان‌دهنده شرایط مطلوب برای حرکت رس در درون افق‌ها می‌باشد. افق‌های آرچلیک (Bt) در

پدوکمپلکس‌های سوم و پنجم با بی‌فایریک اسپیکلد و بخش‌هایی خطی مشاهده شد. این افق‌ها به دلیل وجود منطقه تخلیه کربنات (۷۰٪) و پوشش رسی (۶-۲٪) دارای درجه تحول خوب براساس شاخص MISECA بوده و بالاترین عدد (MISECA=17) را در کل توالی‌ها به خود اختصاص داده‌است که این مطلب موید فراهمی رطوبت بیشتر در زمان تشکیل این پدوکمپلکس‌ها می‌باشد. بیشترین تکامل براساس شاخص MISECA مربوط به افق‌های Btk (MISECA=10) و (MISECA=9) به ترتیب در پدوکمپلکس‌های سیزدهم و شانزدهم می‌باشد ولی به طور کلی تمام افق‌های این پدوکمپلکس‌ها به غیر از افق‌های مذکور در گروه خاک‌های با تکامل ضعیف دسته‌بندی می‌شوند. همچنین پدوکمپلکس‌های دوازدهم و پانزدهم دارای تکامل ضعیف می‌باشند (MISECA=7). افق‌های Bt پدوکمپلکس‌های سوم و پنجم مطالعه حاضر بیشترین میزان تحول را براساس این شاخص به دلیل وجود پوشش‌های رسی، ساختمان خوب و منطقه تخلیه کربنات (۷۰-۸۰٪) نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد فراهمی رطوبت در زمان شکل‌گیری این پدوکمپلکس‌ها بیشتر بوده‌است.

### مقایسه با توالی‌های لس - خاک قدیمی مطالعه شده در ایران

با توجه به چینه‌نگاری توالی مورد مطالعه، پدوکمپلکس اول شامل دو خاک قدیمی می‌باشد، که احتمالاً خاک قدیمی اول معادل دوره MIS 5-a یا MIS 5-c است زیرا درجه توسعه یافتگی آن با توجه به شاخص MISECA کم بوده است. خاک قدیمی دوم با درجه تکامل یافتگی متوسط نشان دهنده وجود شرایط اقلیمی گرم و مرطوب‌تری در مقایسه با خاک قدیمی اول است و احتمالاً معادل دوره MIS 5-e می‌باشد. از جنبه چینه‌نگاری این پدوکمپلکس مشابه با پدوکمپلکس‌های تشکیل شده در توالی‌های نکا، توشن و نوده در شمال ایران می‌باشد (شکل ۸) (Kehl et al., 2021: 13; Vlamink et al., 2018: 5). همچنین محققان بیان کردند در طول دوره MIS 5 شدت فرایندهای خاکسازگی در اوایل این دوره در مقایسه با اواخر آن بیشتر بوده است. با توجه به مشاهدات چینه‌نگاری پدوکمپلکس دوم و سوم می‌توان بیان کرد که پدوکمپلکس‌های دوم و سوم به ترتیب در دوره MIS 7 و MIS 9 شکل گرفته‌است. بررسی میکرومورفولوژیکی پدوکمپلکس‌های دوم و سوم نشان می‌دهد که خاک‌های قدیمی تشکیل شده در این پدوکمپلکس‌ها از جنبه خاکشناسی، خصوصیات میکرومورفولوژیکی (مانند پوشش رسی، میکروساختمان و مناطق تخلیه آهک و ...) و شاخص میکرومورفولوژیکی

(MISECA) به خوبی تکامل یافته است که با نتایج مطالعات میکرومورفولوژی پالتوسول‌های واحد ۳ و ۴ بلوچ آباد که به ترتیب معادل دوره‌های MIS 7 و MIS 9 می‌باشد مطابقت دارد (Amiri et al., 2023:12).



شکل ۸. همبستگی چینه‌نگاری توالی لس- خاک قدیمی در جنوب تاجیکستان با تعدادی توالی لس- خاک قدیمی در شمال ایران

## نتیجه گیری

جنوب تاجیکستان یکی از بزرگترین ذخایر لس در آسیای میانه است. بنابراین، مطالعه خاک‌های قدیمی در این منطقه که توسط رسوبات لسی از یکدیگر جدا شده است فرصتی برای بازسازی گوشه‌ای از تغییرات اقلیمی آسیای میانه را فراهم می‌کند. براساس مطالعه میکرومورفولوژیکی ترانسه مورد مطالعه، وجود ساختمان قوی، پوشش‌های رسی ضخیم، اکسیدهای آهن و منگنز و شستشوی کامل کربنات از زمینه خاک‌های قدیمی نشان‌دهنده تشکیل این خاک‌ها در دوره‌های گرم و مرطوب کوتاه‌تر یا دوره‌های بین‌یخچالی است.

تشکیل شانزده پدوکمپلکس تا عمق ۱۲۵ متر در زیر خاک جدید، وجود حداقل شانزده دوره اقلیمی مناسب از لحاظ فراهمی رطوبت و افزایش فرآیندهای پدوژنیک را اثبات می‌کند. شاخص MISECA توانسته تغییرات پدولوژیکی را در افق‌های آرچلیک و همچنین سایر افق‌ها به خوبی نشان دهد. همچنین تغییرات این شاخص بیانگر وجود تفاوت در مقدار رطوبت در زمان تشکیل توالی‌ها می‌باشد. نتایج میکرومورفولوژی نشان داد که شرایط اقلیمی در زمان تشکیل پدوکمپلکس‌های سوم و پنجم در مقایسه با سایر پدوکمپلکس‌ها از جنبه فراهمی رطوبت برای شروع فرایندهای خاکسازي مناسب‌تر بوده است.

## منابع

- Amiri, Z., Khormali, F., Frechen, M., & Kehl, M., 2023. Micro-morphological analysis and estimation of paleoprecipitation in the Loess-Paleosol sequence, eastern Golestan Province, 8(3,4), 414-430 (In Persian).
- Bajnoczy, B., & Kovacs-Kis, V., 2006. Origin of pedogenic needle-fiber calcite revealed by micromorphology and stable isotope composition-a case study of a Quaternary paleosol from Hungary. *Geochemistry*, 66(3), 203-212.
- Brewer, R., & Sleeman, J. R., 1960. Soil structure and fabric: definition, classification and interpretation. *Journal of Soil Science*, 11,172-185.
- Bronger, A., 2003. Correlation of loesspaleosol sequences in East and Central Asia with SE Central Europe: towards a continental Quaternary pedostratigraphy and paleoclimatic history. *Quaternary International*, 106-107, 11-31.
- Bullock, P., Federoff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T. & Babel, U. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research Publications, Wolverhampton, UK.
- Challier, A., Thomsen, K., Kurbanov, R., Sosin, P., Murray, A., Guerin, G., Meshcheryakova, O., Karayev, A., Khormali, F., Taratunina, N., Utkina, A & Buylaert, J. 2024. A detailed quartz and feldspar luminescence chronology for the Khonako II loess section (Southern Tajikistan). *Quaternary Geochronology*. 83. 101571.
- Dar, R.A., Chandra, R., Romshoo, S.A., & Kowser, N., 2015. Micromorphological investigations of the Late Quaternary loess–paleosol sequences of the Kashmir Valley, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111, 328-338.
- Ding, Z. L., Ranov, V., Yang, S.L., Finaev, A., Han, J.M., Wang, G.A., 2002. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth and Planetary Science Letters* 200 (3-4), 387-400.
- Dodonov, A.E., & Baiguzina, L.L., 1995. Loess stratigraphy of central asia: palaeoclimatic and palaeoenvironmental aspects. *Quat. Sci. Rev.* 14, 707–720.

- Dodonov, A. E., Sadchikova, T.A., Sedov, S.N., Simakova, A.N & Zhou, L.P., 2006. Multidisciplinary approach for paleoenvironmental reconstruction in loess-paleosol studies of the Darai Kalon section, Southern Tajikistan. *Quat. Int*, 152, 48–58.
- Frindte, K., Lehndorff, E., Vlaminc, S., Werner, K., Kehl, K., Khormali, F & Knief, C., 2020. Evidence for signatures of ancient microbial life in paleosols. *Geoderma* 179-180, 113-122.
- Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Steven, L., Forman & Cheng, L., 2021. The formation of iron oxides and magnetic enhancement mechanisms in northern Iranian loess-paleosol sequences: Evidence from diffuse reflectance spectrophotometry and temperature dependence of magnetic susceptibility, *Quaternary International*, 589, 68-82.
- Gunal, H., & Ransom, M.D., 2006. Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. *Catena*, 68, 59-69.
- He, M., BaoDong, J., Jin, Zh., Chun-YaoLiu, Ch., Xiao, J., Zhang, F., Sun, H., Zhao, Zh., Gou, L., Liu, W., Luo, Ch., Son, Y., Ma, L & Deng, L., 2021. Pedogenic processes in loess-paleosol sediments: Clues from Li isotopes of leachate in Luochuan loess, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 299, 151-162.
- Kehl, M., Vlaminc, S., Köhler, T., Laag, Ch., Rolf., Ch., Tsukamoto, S., Frechen, M., MariSumita, M., Schmincke, U. & Khormali, F., 2021. Pleistocene dynamics of dust accumulation and soil formation in the southern Caspian Lowlands - New insights from the loess-paleosol sequence at Neka-Abelou, northern Iran, *Quaternary Science Reviews*, 253, 106774.
- Kemp, R. A., Toms, P. S., Sayago, J. M., Derbyshire, E., King, M., & 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.
- Khormali, F., Abtahi, A. & Stoops, G., 2006. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma*, 132, 31-46.
- Khormali, F., Ghergherechi, S., Kehl, M. & Ayoubi, S., 2012. Soil formation in loess derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran, *Geoderma*, 179-180, 113-122.
- Li, Y., Song, Y., Dimitris G. Xiuling, K., Yunus, Ch., Liangcheng Tan, M. ,2019. Atmospheric dust dynamics in southern Central Asia: Implications for buildup of Tajikistan loess sediments, *Atmospheric Research*, 229, 78-85.

- Maleki, S., Khormali, F., Kehl, M., Azizi, Gh., Shahpouri, F., Shahbazi, R. & Frechrn., M., 2023. A loess-paleosol record of climate and vegetation change during the past 27,000 years from South East of the Caspian Sea, Iran. *Quaternary International*, 652, 1-16.
- Mantel, S., Dondeyne, S & Deckers., S., 2023. World reference base for soil resources (WRB). *Encyclopedia of soil in the Environment (Second Edition)*, 4, 206-217.
- Najafi, H., Karimi, A., Haghnia, G.H., Khormali, F., Ayoubi, S. & Tazikeh, H., 2019. Paleopedology and magnetic properties of Sari loess-paleosol sequence in Caspian lowland, northern Iran. *Journal of Mountain Science*, 16(7), 1559-1570.
- Nordt, L.C., Wilding, L.P., Lynn, W.C., & Crawford, C.C., 2004. Vertisol genesis in humid climate of the coastal plain of Texas, U.S.A. *Geoderma*, 122, 83-102.
- Panin, P. G., Timireva, S.N., Konstantinov, E.A., Kalinin, P.I., Kononov, Yu. M., Alekseev, A.O., 2019. Plio-Pleistocene paleosols: Loess-paleosol sequence studied in the Beregovoye section, the Crimean Peninsula, 172,590–618.
- Parviz, N., Shen, Zh, Yunus, M & Zulqarnain, S., 2020. Loess deposits in southern Tajikistan (Central Asia). *Magnetic properties and paleoclimate. Science Reviews*, 158, 15-28.
- Pourmasoumi Parashkouh, M., Khormali, F., Ayoubi, S. O., Kiani, F., Kehl, M., & Lehndorff, E. (2019). The micromorphology of forest soils developed on loess along a precipitation gradient in northern Iran. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(2), 1-20. (In Persian).
- Shahriari, A., Kormali, F., Kehl, M., Karimi, A.R & Lehndorff, E. (2014). Using stable isotopes composition and biomarkers as proxies of paleoclimate and paleovegetation along an ecological gradient in some parts of loess deposits of northern Iran. *Thesis of Ph.D In Soil Sience (Soil Genesis & Classification and Land Evaluation)*. (In Persian).
- Soil Survey Staff. 2023. *Soil classification systems: World reference base and soil taxonomy*. USDA. 4, 197-205.
- Stoops, G., 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. SSSA. Madison, WI . Book Series:ASA, CSSA, and SSSA Books.
- Stoops, Georges, Marcelino, V., & Mees, F., 2018. *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier.

- Stoops, G., Langohr, R. and Van Ranst, E. 2020. Micromorphology of soils and palaeosoils in Belgium. An inventory and meta-analysis. CATENA, 194, 104718.
- Taheri, M., Khormali, F., Wang, X., Amini, A., Wei, H., Kehl, M., Frechen, M., Chen, F., 2016. Micromorphology of the lower Pleistocene loess in the Iranian Loess Plateau and its paleoclimatic implications, Quaternary International, 1-10.
- Tian, S, Sun, J., Zhang, Z., Abdulov, S., Cao, M., Gadoev, M. & Oimahmadov, I., 2020. Loess deposits in the Tajik Basin, Central Asia: chronology, provenance and palaeoclimatic implications since the Last Glacial, 1–20.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Rolf. Ch., Oliver Franz, S., Lauer, T., Lehndorff, E., Frechen, M. & Khormali, F., 2018. Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran), 180, 75-95.
- Zarate, M. A., Kemp, R. A., & Blasi, A. M., 2002. Identification and differentiation of Pleistocene paleosols in northern Pampas of Buenos Aires, Argentina. Journal of south America. Earth Science, 15, 303-313.