

## میکرومورفولوژی خاک‌های جنگلی توسعه یافته بر روی لس در یک گرادیان بارش در شمال ایران

معصومه پورمعصومی پرشکوه<sup>۱</sup>، فرهاد خرمالی<sup>۲\*</sup>، شمس اله ایوبی<sup>۳</sup>، فرشاد کیانی<sup>۴</sup>، مارتین کهل<sup>۵</sup> و ایوا لهندورف<sup>۶</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری 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- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ۵- استاد انستیتوی جغرافیا دانشگاه کلن
- ۶- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه بُن

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>به منظور بررسی درجه تکامل خاک‌های جنگلی مدرن تشکیل شده بر روی لس، ۶ خاک رخ واقع در یک گرادیان بارندگی در شمال ایران (استان‌های گلستان و مازندران) انتخاب گردید و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، میکرومورفولوژی و برخی شاخص‌های رنگ آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. خاک‌های مورد مطالعه در رده‌های آلفی سول و مالی سول طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که دو فرایند مهم در تشکیل و تکامل خاک‌های این مناطق، آبشویی آهک و متعاقب آن تجمع رس می‌باشد. همچنین مطالعات میکرومورفولوژی نشان داد که رابطه مثبتی بین گرادیان تغییرات اقلیمی (افزایش بارندگی) و شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک (MISECA) وجود دارد. بی‌فابریک غالب خاک‌ها بدلیل آبشویی آهک در افق‌های آرجیلیک، لکه‌ای و در افق‌های کلسیک، کریستالینیک می‌باشد. در منطقه توشن تشکیل و حفظ پوشش‌های ضخیم و قرمز رنگ رس به غالب بودن ورمیکولیت در این خاک رخ نسبت داده شد. رابطه همبستگی بین سه شاخص رنگ هارست، تورنت و الکساندر با انواع شکل‌های آهن، نشان داد که شاخص تورنت و الکساندر برای منطقه مورد مطالعه، بهتر از شاخص هارست عمل نموده است. به‌علاوه شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک بیشترین همبستگی را با شاخص تورنت نشان داد.</p>	<p>دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۲۷</p> <p><b>کلمات کلیدی:</b> میکرومورفولوژی تشکیل خاک شاخص رنگ لس ایران</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: khormali@yahoo.com</p>

توسط آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی شناسایی شوند در مقاطع نازک قابل رویت می‌شوند، از میکرومورفولوژی ابزاری ارزشمند برای تفسیر عوارضی چون تکامل بی‌فابریک‌های خطی، عوارض ناشی از ذوب شدن و یخ زدن، فعالیت جانوری، تشکیل پوسته‌های رسی و پایداری

### مقدمه

تغییرات اقلیمی در طول دوره کوتاه‌تر توسط تناوبی از دوره‌های سرد و گرم مشخص می‌شود که بصورت تغییراتی در فابریک خاک‌ها یا رسوبات ثبت می‌گردد. این حقیقت که تغییرات کوچک مقیاس بیش از آنکه

افق‌های سطحی مناطق با بارندگی بیشتر و پوشش گیاهی متراکم‌تر دیده می‌شود. قرقره چپی و همکاران<sup>۲</sup> (۱۱) در تحقیق دیگری نشان دادند که علاوه بر اقلیم، حضور و مقدار کانی رسی ورمیکولیت در تحول افق آرجیلیک مؤثر است.

از نخستین و ساده‌ترین ویژگی‌های ریخت‌شناختی که توجه بسیاری از خاک‌شناسان را برای سنجش میزان تکامل خاک‌ها و مقایسه آن‌ها به خود جلب نمود، شاخص‌های رنگ خاک است که با ویژگی‌های مختلف خاک در ارتباط می‌باشد و تابع عواملی مانند مقدار ماده آلی، نوع کانی‌ها، زهکشی و اقلیم است (۷). اولین شاخصی که بر مبنای رابطه رنگ خاک و مقدار کانی-های آهن توسعه یافت، شاخص هارست (۱۴) بود. در این شاخص هیو به یک مقدار عددی تبدیل می‌شود و با افزایش مقدار آهن، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد. تورنت و همکاران<sup>۳</sup> (۳۸) و الکساندر<sup>۴</sup> (۲) شاخص هارست را اصلاح کردند و نشان دادند که مقدار این شاخص‌های اصلاح شده (RR و Rr) با افزایش مقدار اکسید آهن، افزایش می‌یابد. همچنین مطابق نظر الکساندر (۲) عدد ثابت بزرگتر از ۲۰ در شاخص Rr، نتایج بهتری را برای نمونه خاک‌های مختلف با هیوی 10YR به دنبال خواهد داشت. حسینی و همکاران<sup>۵</sup> (۱۳) از شاخص‌های رنگ مختلف برای مقایسه تکامل خاک-ها در برش طولی کرمان-بافت استفاده کردند. رابطه همبستگی بین سه شاخص هارست، تورنت و الکساندر با انواع شکل‌های آهن در این مطالعه نشان داد که شاخص هارست برای منطقه موردنظر بهتر از دو شاخص دیگر عمل می‌کند.

در طول دوره یخچالی پلیستوسن، شمال ایران منطقه-ای وسیع برای تجمع غبار و تشکیل لس‌ها بود. این رسوبات بطور گسترده شیب‌ها و اراضی پست مناطق

خاکدانه می‌سازد (۳۶). از سالیان پیش، تلاش‌های زیادی جهت کمی‌نمودن ویژگی‌های خاک انجام شده است که در نهایت، منجر به ارائه شاخص‌های کمی توسعه و تکامل خاک گردیده است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص‌های ریخت‌شناسی، میکرومورفولوژیکی و مطالعه انواع شکل‌های آهن اشاره کرد. شاخص MISECA از جمله شاخص‌های میکرومورفولوژیکی است که در ابتدا برای بیان درجه تحول افق‌های آرجیلیک در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک بکار گرفته شد. این شاخص مقدار کمی مشخصه‌های میکرومورفولوژیکی مانند ساختمان میکروسکوپی، بی‌فابریک، حضور پوسته‌های رسی، مناطق تخلیه شده از آهک، اکسیدهای آهن و منگنز و درجه هواپدگی کانی‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و در نهایت با جمع نمودن نمرات مربوط به هر یک از مشخصه‌های ذکر شده، مقدار شاخص MISECA در دامنه‌ای بین صفر تا ۲۴ بدست می‌آید. خرمالی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۲) در بررسی درجه تکامل افق‌های آرجیلیک در خاک‌های آهکی جنوب ایران بیان داشتند که در مقاطع نازک افق‌های آرجیلیک با تکامل بالا، مناطق تهی شده از آهک فراوان دیده می‌شود. در صورتی که این عوارض در افق‌های آرجیلیک با درجه تکامل ضعیف، خیلی کم است یا وجود ندارد. فرم‌های مختلف تجمع کربنات کلسیم در خاک به فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و فعالیت جانوری بستگی دارد. در شرایط طبیعی خاک جنگلی، به دلیل پایدار بودن اراضی و شدت نفوذ عمقی آب به خاک، ترکیبات آهک به اشکال مختلف از جمله نودول در خاک تجمع می‌یابند (۲۰). اولیایی (۲۹)، در مطالعه میکرومورفولوژی عوارض کربناته پدوژنیک در جنوب شرقی ایران دریافت که درجه تلقیح نودول‌های آهکی با اکسیدهای Fe/Mn و نیز عوارض تخلیه آهک در مناطق با بارندگی بیشتر افزایش می‌یابد و نودول‌های سوزنی‌شکل و سیتومورفیک در

2- Ghergherechi *et al.*

3- Torrent *et al.*

4- Alexander

5- Hosseini *et al.*

1- Khormali *et al.*

بود (۴۴، ۲۱، ۲۰) و مطالعات میدانی برای یافتن مناسب-ترین مکان برای حفر خاک‌رخ‌های مدرن در مناطق جنگلی صورت گرفت تا احتمال اشتباه در حفر خاک-رخ‌ها بدلیل وجود خاک‌های قدیمی در این مناطق و در دسترس نبودن نتایج سن یابی بخصوص در مناطق جنگلی به حداقل کاهش یابد. پس از تشریح، نمونه برداری صورت گرفت و خاک‌ها با استفاده از کلید تاکسونومی خاک (۳۱) طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). برخی اطلاعات عمومی خاک‌رخ‌های مدرن مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. همه خاک‌رخ‌های مورد مطالعه افق Bt دارند و در قله شیب و شیب تقریبی ۸ تا ۱۰ درصد واقع شده‌اند. از همه افق‌ها یک نمونه دست-خورده برای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی و نیز یک نمونه دست‌نخورده به صورت کلوخه برای مشاهده‌های میکرومورفولوژیکی تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید.

### روش‌های آزمایشگاهی

واکنش خاک در گل اشباع با دستگاه پ هاش متر و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد (۳۲)، تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۰)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (۳۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشینی کاتیون‌ها با استات سدیم (۶)، ماده آلی با روش والکلی و بلک (۲۷)، عصاره‌گیری آهن آزاد با عصاره‌گیر سترات بی کربنات دی‌تیونات (۲۵) و آهن فعال با استفاده از عصاره‌گیر اگزالات آمونیوم (۲۴) انجام شد. سپس عصاره‌های حاوی آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو AA-670 قرائت شده و غلظت فرم‌های مختلف آهن در خاک محاسبه گردید.

### مطالعات میکرومورفولوژی

برای مطالعات میکرومورفولوژی نمونه‌های دست‌نخورده بصوت کلوخه از هر افق برداشته شد و در مجاورت هوا، خشک گردید. با استفاده از روش‌های

دامنه‌ای کوه‌های البرز را می‌پوشانند (۹). در این میان جنگل‌های خزری یکی از بقایای جنگل‌های پهن برگ و خزان‌کننده طبیعی در جهان هستند که بخشی از آن‌ها روی همین رسوبات لسی مستقر شده‌اند. حضور افق‌های Bt توسعه یافته در خاک‌های جنگلی یکی از ویژگی‌های برجسته خاک‌های لسی تشکیل شده در دوره بین یخچالی آخر در شمال ایران می‌باشد (۱۵). در استان‌های گلستان و مازندران خاک‌های تحت پوشش جنگل اغلب در رده آلفی سول (۳۴) و یا لووی سول (۴۱) طبقه‌بندی می‌شوند. پایداری سطوح ژئومورفیک تحت پوشش جنگلی شرایط لازم را برای آیشویی کربنات‌ها و مهاجرت رس در طول خاک‌رخ و تشکیل افق آرجیلیک در همه خاک‌ها فراهم می‌کند. میزان رس افق Bt، مقدار کربن آلی خاک در افق A و عمق تجمع آهک بطور معنی‌داری با افزایش بارندگی و کاهش دما، افزایش می‌یابد (۲۱). در گذشته مطالعات زیادی بر روی توالی-های لس-پالئوسول در استان گلستان و بخشی از مازندران صورت گرفته ولی مطالعاتی که به افق Bt خاک‌های لسی با پوشش جنگلی منحصر گردد، محدود است. بنابراین اهداف این تحقیق شامل بررسی تکامل و میکرومورفولوژی خاک‌های مشتق از لس تحت پوشش جنگلی در طول گرادیان بارش با تمرکز بر فرایندهای خاک‌ساز به‌ویژه درجه توسعه‌یافتگی افق آرجیلیک و بررسی شاخص‌های رنگی تکامل خاک در ارتباط با اشکال آهن در خاک‌های لسی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه بخشی از اراضی جنگلی شمال ایران در استان‌های گلستان و مازندران و یک گرادیان بارندگی شرقی غربی را در آن شامل می‌شود (شکل ۱). پوشش جنگلی این مناطق به‌طور عمده شامل بلوط، ممرز، انجیلی و افرا می‌باشد. تعداد ۶ خاک‌رخ مدرن با مواد مادری لس انتخاب شد. انتخاب مکان خاک‌رخ‌ها بر اساس مطالعاتی که در گذشته در این مناطق انجام شده

در دو سیستم تاکسونومی و WRB نشان می‌دهد. تمام خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در منطقه جنگلی واقع شده‌اند. خاک‌ها در این مناطق دارای تکامل بالایی بوده و در رده آلفی سول و مالی سول طبقه‌بندی می‌شوند. پوشش گیاهی مترکم موجب نفوذ قسمت عمده آب باران به داخل خاک و شسته شدن و حذف آهک از افق‌های سطحی و تجمع در عمق خاک‌رخ می‌شود. پس از حذف آهک که عامل فلاکوله کننده ذرات رس است آبشویی موجب حرکت ذرات رس و تجمع آن بالای افق کلسیک و تشکیل افق آرجیلیک می‌گردد. در مطالعات صحرایی همه خاک‌رخ‌ها به استثنای خاک‌رخ قپان، اشکال کربنات کلسیم ثانویه در افق‌های کلسیک و برخی افق‌های C بصورت رشته‌ای<sup>۱</sup> و سخت دانه<sup>۲</sup> مشاهده شد. پوسته‌رسی مشاهده شده در سطوح خاکدانه‌ها طی مشاهدات صحرایی افق‌های Bt و مقدار رس اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مؤید افزایش رس در افق Bt نسبت به افق‌های بالایی است که می‌توان آن را به منشأ ایلوویال رس نسبت داد. حداقل و حداکثر مقدار رس به ترتیب در افق‌های Bt خاک‌رخ‌های قپان (۳۵٪) و نکا (۵۲٪) مشاهده شد (جدول ۲).

رنگ غالب در خاک‌رخ‌ها در محدوده 10YR و 7.5YR قرار دارد که اغلب از خانواده قهوه‌ای (قهوه‌ای، قهوه‌ای تیره و قهوه‌ای مایل به زرد کم‌رنگ) می‌باشد، به استثنای افق A و Bt1 مالی سول نکا (5YR 5/6, 10YR) که افق A کمترین ویلو و کروما و افق Bt رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز روشن را به خود اختصاص داده‌اند. تجزیه مکانیکی خاک‌ها نشان می‌دهد که سیلت جز غالب در خاک‌های مورد مطالعه و بیانگر منشأ بادرفتی رسوبات لسی است. بافت خاک، اغلب از نوع لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی و لومی می‌باشد. به‌طور کلی میانگین مقدار رس از خاک‌رخ قپان به سمت نکا افزایش و مقدار سیلت کاهش می‌یابد (جدول ۲). وجود کربنات کلسیم

متداول از این نمونه‌ها مقاطع نازک تهیه شد. مقاطع با میکروسکوپ پلاریزان در نور ساده (PPL) و نور متقاطع (XPL) و بر اساس تعاریف استویز (۳۵) مطالعه گردید. شاخص میکرومورفولوژی تحول خاک (MISECA) برای تخمین درجه تکامل افق‌های آرجیلیک محاسبه گردید (۲۲).

### شاخص‌های رنگ خاک

براساس مشاهدات صحرایی و رنگ خاک بدست آمده از دفترچه رنگ مانسل، شاخص‌های رنگ هارست (۱۴)، تورنت و همکاران (۳۸) و الکساندر (۲) محاسبه شدند:

$$HI = H^* \times \frac{V}{C} \quad (1)$$

$$RR = (10 - H^*) \times \frac{C}{V} \quad (2)$$

$$Rr = (K - H^*) \times \frac{C}{V} \quad (3)$$

HI، RR و Rr به ترتیب شاخص هارست، تورنت و الکساندر می‌باشند. در این شاخص‌ها V، H\* و C به ترتیب ویلو، معادل عددی هیو و کروما هستند. K در شاخص الکساندر، ضریب ثابت است و طبق نظر الکساندر اعداد بزرگتر از ۲۰ برای این ضریب مناسب-ترند. در این مقاله از K=25 استفاده شده است. معادل عددی هیو برای شاخص‌های هارست و الکساندر مشابه بوده و شامل:

$$5R=5, 7.5R=7.5, 10R=10, 2.5YR=12.5, 5YR=15, 7.5YR=17.5, 10YR=20$$

معادل عددی هیو برای شاخص تورنت شامل:

$$10YR=10, 7.5YR=7.5, 5YR=5, 2.5YR=2.5, 10R=0$$

### نتایج و بحث

#### ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک‌رخ‌ها

جدول ۲ برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیکی و شیمیایی خاک‌های تشکیل شده روی یک گردان بارندگی در شمال ایران و طبقه بندی آن‌ها را

1- Mycelium  
2- Concretion

دارای تکامل خوب می‌باشند. این نتایج با نتایج قرقره‌چی و همکاران (۱۱) در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب جنوب غربی استان گلستان مطابقت دارد. ساختمان میکروسکوپی غالب از حالت کانالی و حجره‌ای در خاک‌های با توسعه متوسط تا مکعبی زاویه‌دار و نیمه-زاویه‌دار در خاک‌های خوب توسعه یافته متغیر است. حفره‌های نوع کانال و حجره در همه خاک‌ها وجود دارد. به دلیل کاربری جنگلی و حضور ماده آلی قابل توجه در خاک و نیز آثار فراوان ناشی از فعالیت موجودات خاک‌زی، مشاهده حفراتی از نوع کانالی و حجره‌ای دور از انتظار نیست (۲۳ و ۴۲). به طوری که وجود مقادیر زیاد فضولات جانوری در حفرات کانال و بقایای ریشه گیاهان و نیز ایجاد فابریک گرانولار در زمینه تأییدکننده این مطلب می‌باشد (شکل ۲). همچنین تنوع حفرات در مناطق مرطوب‌تر بیشتر شده و در بسیاری موارد شکل حفرات توسط فرایندهای خاک‌ساز مانند تجمع رس و آهک تحت تأثیر قرار گرفته است. وجود حفرات صفحه‌ای در افق Bt خاک‌رخ سوسرا می‌تواند ناشی از خاصیت انقباض و انبساط ذرات خاک به دلیل غالب بودن کانی اسمکتیت (۴۴) در این افق باشد. ذرات درشت خاک‌ها اغلب کوارتز و کلسیت و در مواردی بلورهای کشیده میکا (مسکویت) می‌باشد و الگوی توزیع نسبی در همه خاک‌رخ‌های مورد مطالعه، پرفریک است.

همچنین مطالعات میکرومورفولوژی در راستای تأیید نتایج مطالعات فیزیکی و شیمیایی نشان می‌دهد فرایندهای خاک‌ساز غالب در همه خاک‌رخ‌ها انحلال و تخلیه آهک و رسوب مجدد آن و نیز تجمع رس و ایجاد پوسته‌های رسی در افق آرجیلیک می‌باشد. پوسته‌های رسی در مقطع نازک همه افق‌های آرجیلیک مشاهده شد اما درجه خلوص، ضخامت و فراوانی آن در قسمت غربی گرادیان اقلیمی، افزایش می‌یابد (شکل ۳).

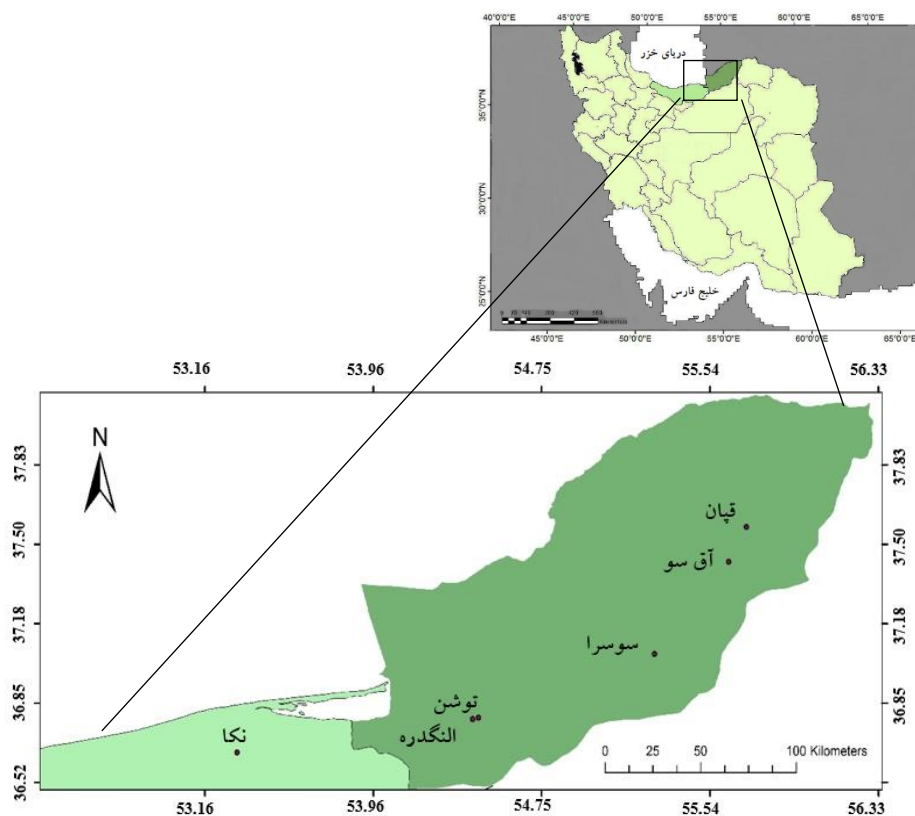
از ویژگی‌های رایج در لس‌ها می‌باشد. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل در خاک‌رخ‌های مطالعه شده از ۰/۵ تا ۳۷ درصد (افق Bk2 نکا) متغیر است. تجمع کربنات‌های پدوژنیک در برخی خاک‌رخ‌ها تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر هم مشاهده شد. همان‌طور که انتظار می‌رود کربنات‌های پدوژنیک در مناطق با بارندگی کمتر در نزدیکی سطح خاک دیده می‌شوند (۲۰). هرچند روند منظمی برای عمق تجمع کربنات‌ها در طول این گرادیان بارندگی دیده نشد اما میانگین عمق تجمع آهک در افق‌های کلسیک در شرق این گرادیان بارندگی حدود ۸۰ سانتی‌متر و در غرب این گرادیان حدود ۱۰۰ سانتی‌متر است که نشان‌دهنده شست و شوی بیشتر به سمت غرب این گرایان می‌باشد. از بین عوامل اقلیمی (بارندگی و دما که مهم‌ترین عوامل می‌باشند) علاوه بر مقدار بارندگی، توزیع فصلی آن نیز در عمق آبشویی و تجمع کربنات مؤثر است. اثر دما نیز روی تشکیل کربنات‌های پدوژنیک و تجمع آن پیچیده است به طوری که کربنات‌های پدوژنیک را می‌توان در دامنه‌ای از بیابان‌های داغ تا مناطق اقلیمی سرد توندرا مشاهده کرد (۴۳). مقدار pH خاک‌ها، دامنه‌ای از ۵/۴۱ تا ۷/۷۰ را در بر می‌گیرد. برخی پژوهش‌ها از نظر تئوری این دامنه از pH را برای تجمع رس در خاک‌رخ‌های واقع در مناطق جنگلی مطلوب می‌دانند (۳۳). در حالی که برخی دیگر نشان دادند pH بالای ۶ برای رخ‌داد این فرایند مناسب‌تر است (۳۱).

### ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی

جدول ۳ خصوصیات میکرومورفولوژیکی برخی افق‌های خاک‌رخ‌های مورد مطالعه و شاخص میکرومورفولوژی تحول خاک (MISECA) در افق آرجیلیک را نشان می‌دهد. افق‌های آرجیلیک مطابق این شاخص دارای درجه تکامل متوسط تا خوب می‌باشند. در واقع می‌توان خاک‌رخ‌ها را به دو دسته تقسیم نمود. در قسمت شرقی این گرادیان، خاک‌رخ‌ها دارای تکامل متوسط و در قسمت غربی این گرادیان، خاک‌رخ‌ها

جدول (1) خصوصیات اقلیمی و موقعیت مکانی مناطق مورد مطالعه  
Table (1) Climatological data and site characteristics of the studied regions

نکا Neka	النگدره Alangdareh	توشن Toshan	سوسرا Sousara	آق سو Agh Su	قپان Qapan	خاکرخ Pedon
39s 707533-4058886	40s 273106-4075179	40s 270696-4074597	40s 347531-4102573	40s 379176-4144146	40s 386770-4159860	محل خاکرخ Location (UTM)
تیبیک زریک- ترمیک Typic Xeric-Thermic	زریک مرطوب- ترمیک Moist xeric-Thermic	تیبیک زریک- ترمیک Typic Xeric-Thermic	زریک مرطوب- مزیک Moist xeric-Mesic	زریک- ترمیک Xeric- Thermic	زریک- ترمیک Xeric- Thermic	رژیم رطوبتی و حرارتی SMR-STR
800	750	650	750	630	500	متوسط بارندگی سالانه Mean annual precipitation (mm)
17	17	17	15	16	15.9	میانگین دمای سالانه Mean annual temperature (°C)



شکل (1) موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه.  
Figure (1) The geographical location of the study area.

تیره رنگ مجزا در زمینه خاک به ویژه در خاک رخ نکا دیده می-شوند (شکل ۳۴).

بی فابریک غالب در افق‌های آرجیلیک همه خاک‌رخ‌ها به جز توشن لکه‌ای بوده و در افق آرجیلیک خاک‌رخ توشن خطی می‌باشد (شکل ۶). البته بی فابریک خطی با درجه ضعیف‌تری در افق‌های Bt خاک‌رخ‌های نکا و الگدره نیز مشاهده گردید. گونال و رانزوم (۱۲) در مطالعه خاک‌های لسی کانزاس، رابطه معنی‌داری را بین بی فابریک ما-اسکل سپیک (معادل بی فابریک خطی در سیستم استویز ۲۰۰۳) با افزایش ضخامت و پیوستگی پوسته‌های رسی مشاهده نمودند که نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌نماید.

بی فابریک لکه‌ای می‌تواند در نتیجه آیشویی بخشی از آهک به اعماق زیرین و ویژگی بایرفرینجنسی رس ایجاد شود (۸). در اراضی با کاربری جنگل، تشکیل افق آرجیلیک با بی فابریک لکه-ای نشان‌دهنده پایداری اراضی است که باعث ایجاد زمان کافی برای شستشوی کربنات از افق سطحی و انتقال به طرف پایین ذرات رس می‌شود (۱۸). اولیایی (۳۰) تداوم تخلیه غیر یکسان آهک از مناطق مختلف ماتریکس (تخلیه بیشتر از مناطق مجاور حفرات و کانال‌ها) را سبب نمایان شدن بی فابریک لکه‌ای ذکر می-کند. گونال و رانزوم (۱۲) وجود بی فابریک خطی در ماتریکس خاک را به انقباض و انبساط پلاسمای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک نسبت می‌دهند. البته درجه توسعه یافتگی بی- فابریک خطی توسط عوامل زیادی کنترل می‌شود. به نظر می‌رسد این نوع بی فابریک در مناطق با بارندگی بالاتر نسبت به مناطق خشک‌تر گسترش بیشتری داشته و با افزایش عمق، افزایش می‌یابد (۳۶). نلتون و همکاران (۲۸) معتقدند مجموعه‌ای از فعالیت‌های جانوری و ریشه‌ای، تبلور کربنات کلسیم و فشار انقباض و انبساط حاصل از تناوب خشکی و رطوبت، باعث تخریب پوشش‌های رسی و تشکیل بی فابریک خطی می‌گردد. بی فابریک در افق‌های Btk بصورت کریستالیتیک تا نسبتاً لکه‌ای (شکل ۶a) و در افق‌های Bk، Bck و C کریستالیتیک می‌باشد (شکل ۹). عوارض خاک-ساخت آهکی که در مقاطع نازک مشاهده شد شامل کریستال‌های سوزنی شکل آهک ثانویه، پوشش‌های آهکی داخل خلل و فرج خاک که در افق‌های پایینی برخی خاک‌رخ‌ها بصورت پرشدگی-های ناقص درآمده، نودول‌های آهکی با اشکال تیبیک و ژئود و نیز در مواردی بلورهای کلسیت سیتومورف می‌باشد (شکل ۸b).

حداکثر ضخامت پوسته‌های رسی اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۰۸/۹، ۱۶۵، ۴۱۳، ۵۰۹، ۵۲۱ میکرومتر برای خاک‌رخ‌های قپان، آق‌سو، الگدره، نکا و توشن مشاهده شد. در خاک‌رخ سوسرا علیرغم مقدار زیاد رس در افق آرجیلیک نسبت به افق‌های سطحی، پوسته رسی قابل ملاحظه‌ای که بتوان ضخامت آن را اندازه گرفت، مشاهده نگردید (شکل ۳). اسمکتیت کانی اصلی گزارش شده در افق آرجیلیک این خاک‌رخ می‌باشد (۴۴). مطابق نظر کمپ و زاراته (۱۶) دلیل اصلی حضور ضعیف پوسته رسی در افق آرجیلیک تخریب فیزیکی آن به دلیل انبساط و انقباض زیاد در نتیجه حضور مقدار قابل ملاحظه رس اسمکتیت در خاک است. شکل e و d ۳ حضور پوسته‌های رسی با لایه‌بندی میکروسکوپی قوی و ضخامت بالا را در مقاطع نازک خاک‌رخ‌های توشن و الگدره نشان می‌دهد که اغلب توسط رسوب اکسیدهای آهن پوشیده شده‌اند. پژوهش‌های ولامینگ و همکاران (۴۰) در توالی لس- خاک در توشن نیز وجود پوسته‌های رسی قوی پوشیده شده با اکسید آهن را تأیید می‌کند. وجود و حفظ پوسته‌های رسی با ویژگی‌های مذکور توسط نتایج کانی‌شناسی نیز قابل توجیه است. خرمالی و همکاران (۲۱) معتقدند وجود ورمیکولیت می‌تواند با کاهش پتانسیل انقباض و انبساط باعث حفظ پوسته‌های رسی گردد. در واقع در افق Bt خاک‌رخ توشن افزایش مقدار کانی ورمیکولیت که با کاهش مقدار اسمکتیت نیز همراه می‌باشد (۱) باعث حفظ و تقویت پوسته‌های رسی می‌گردد (شکل ۴). در نتیجه این فاکتور به-همراه سایر فاکتورهای دخیل در شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک مانند بی فابریک نمرات بالایی را بخود اختصاص داده‌اند و علیرغم بارندگی متوسط سالانه ۶۵۰ میلی‌متر در این منطقه، شاخص MISECA در این خاک‌رخ بالاتر از سایر خاک-رخ‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر غیر از عامل اقلیم، نوع کانی رسی نیز توانسته است بر مقدار و ضخامت پوشش‌های رسی تأثیر گذار باشد.

علاوه بر حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن بصورت پوشش روی پوسته‌های رسی و نیز اطراف حفرات، نودول‌ها و رنگدانه‌های اکسید آهن نیز به فراوانی در زمینه مقاطع نازک خاک-رخ‌ها به ویژه نکا به دلیل شرایط اکسایش و کاهش متناوب مشاهده گردید (شکل ۵). همچنین اکسیدهای منگنز نیز علاوه بر حضور ترکیبی با اکسیدهای آهن، در برخی موارد بصورت سخت دانه‌های

جدول (۲) برخی از خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و طبقه‌بندی خاک‌های مورد مطالعه

Table (2) some morphological, physicochemical properties and classification of the studied soils

Clay %	Silt %	Sand %	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (Cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup> )	کربنات کلسیم معادل CCE %	کربن آلی OC (%)	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	جوشش با اسید Effervescence	ساختار structure	رنگ مرطوب Color (moist)	عمق Depth (cm)	Horizon
<b>Qapan</b> Fine, mixed, superactive, thermic Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisols)												
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-7	O
29	52	19	45	0.5	4.55	1.28	6.20	-	3,m, gr	10YR 3.5/4	7-20	A
35	53	12	34	0.5	1.85	1.03	6.15	-	1,m, abk	10YR 3/4	20-35	Bt1
32	56	12	28	1	0.44	1.12	6.99	-	2,m,abk	10YR 3/3.5	35-65	Bt2
26	60	14	23	18	0.52	0.68	7.47	+	2,m,sbk	10YR 5/3.5	65-80	Btk
28	54	18	36	14.5	0.42	0.63	7.30	+	1,m,abk	10YR 3/4	80-105	Bck1
26	52	22	13	14.5	0.40	0.52	7.26	+	1,m,abk	10YR 3/4	105-130	Bck2
24	52	24	19	12.5	0.27	0.51	7.50	+	ma	10YR 4/4	130-155	Ck
<b>Agh Su</b> Fine, mixed, superactive, thermic, Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisols)												
32	58	10	30	1.5	2.08	1.14	6.98	-	2,m,gr	10YR 3/4	0-18	A
42	50	8	38	1.5	1.36	1.22	6.86	-	2,m,abk	10YR 4/4	18-48	Bt1
40	48	12	36	20.5	0.84	1.34	6.93	-	3,m,abk	7.5YR 4/5	48-91	Bt2
30	44	26	27	25.5	0.39	0.72	6.98	+	2,m,abk	10YR 4/6	91-120	Btk
28	44	28	25	26.5	0.42	0.90	7.04	+	1,f,abk	10YR 4/6	120-132	Bk
28	56	16	25	20.5	0.35	0.99	6.98	+	ma	10YR 4/6	132->2m	C
<b>Sousara</b> Fine, mixed, superactive, mesic, Typic Haploxeralfs ( Haplic Luvisols)												
30	56	14	28	1	5.26	1.03	6.45	-	1,f,gr	10YR 3/3	0-14	A
32	56	12	29	1	1.36	0.82	5.41	-	2,m,abk	10YR 4.5/5	14-30	Bw
42	46	12	38	1.5	0.71	0.93	5.86	-	3,m,abk	7.5YR 4/5	30-80	Bt
26	46	28	23	29	0.42	0.54	7.16	+	1,f,sbk	10YR 4/6	80-110	Bk1
24	50	26	21	28	0.39	0.63	7.05	+	1,f,sbk	10YR 4/6	110-170	Bk2
26	52	22	23	26	0.27	0.90	7.08	+	ma	10YR 4/6	170->2m	C
<b>Toshan</b> Fine, vermiculitic, thermic, Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisols)												
32	57	11	34	0.5	2.29	0.97	6.63	-	2,m,abk	10YR 3/4	0-20	A
50	38	12	47	2.5	0.85	1.15	5.95	-	3,C,Pr	7.5YR 3/4	20-45	Bt1
40	46	14	41	1.5	0.52	1.15	6.30	-	3,C,Pr	7.5YR 3.5/4	45-99	Bt2
18	62	20	28	25.5	0.42	2.65	7.20	+	2,m,sbk	10YR 4/6	99-135	Btk1
22	60	18	30	27	0.37	0.27	7.63	+	2,m,abk	10YR 3.5/6	135-165	Btk2
<b>Alangdareh</b> Fine, vermiculitic, thermic, Typic Haploxeralfs ( Haplic Luvisols)												
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-3	Oi
38	46	16	52	1.5	4.25	1.53	6.95	-	2,m,abk	10YR 3/3	3-15	A
52	38	10	41	2	0.60	0.65	5.85	-	2,m,abk	7.5YR 4/3	15-42	Bt1
46	46	8	45	1	0.66	0.73	6.50	-	2,f,abk	7.5YR 3.5/4	42-88	Bt2
16	66	18	41	7	0.23	0.54	7.15	+	2,m,abk	10YR 4/4	88-103	Btk
20	52	28	30	33.5	0.44	0.87	7.55	+	ma	10YR 4.5/4	103-133	Bkkm
23	49	28	34	36.5	0.50	0.73	7.30	+	ma	10YR 5/4	133-163	BC
26	46	28	21	34.5	0.29	0.88	7.42	+	ma	10YR 5/4	163-213	C
<b>Neka</b> Fine, mixed, superactive, thermic, Calcic Argixerolls (Luvi_Calcic Kastanozem)												
38	50	12	38	3	2.53	0.69	6.67	-	2,f,abk	10YR 2/3	0-15	A
46	42	12	41	3	1.56	0.89	7.16	-	2,f,abk	7.5YR 3.5/4	15-34	ABt
52	38	10	47	2.5	0.84	0.87	6.79	-	3,m,abk	5YR 5/6	34-60	Bt1
48	44	8	43	1.5	0.71	0.70	6.85	+	3,m,abk	7.5YR 4/6	60-83	Bt2
34	48	18	30	30	0.42	0.99	7.11	+	2,m,abk	10YR 5/6	83-102	Btk
32	48	20	29	31	0.42	0.97	7.19	+	1,f,sbk	10YR 5/6	102-130	Bk1
28	52	20	25	37	0.19	0.89	7.04	+	1,f,sbk	10YR 5/6	130-170	Bk2
22	64	14	19	25	0.27	0.58	7.36	+	ma	10YR 5/6	170->2m	Ck



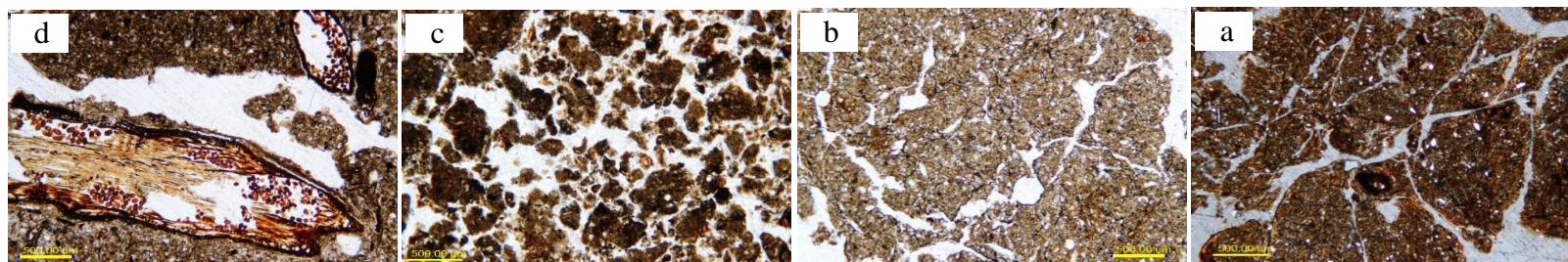
جدول (۳) تشریح میکرومورفولوژی مقاطع نازک برخی افق‌های خاک‌رخ‌های مورد مطالعه

Table (3) The micromorphological description of thin sections of some horizons in studied pedons

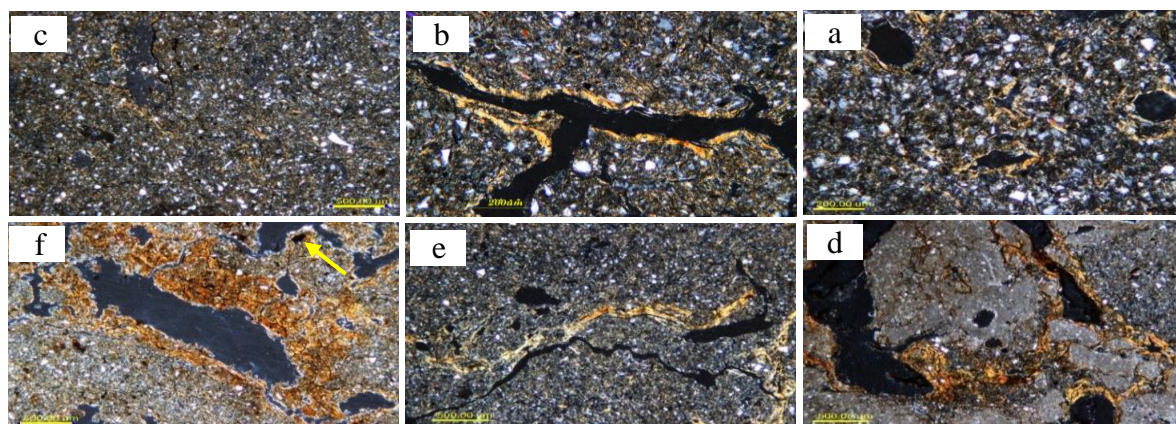
شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک MISECA	درصد مناطق تخلیه شده از آهک Decalcified Zone Percentage	فراوانی اکسیدهای آهن یا منگنز Frequency of Fe/Mn oxides	درجه دگرسانی Alteration degree	بقایای گیاهی Plant residue	عوارض خاک ساخت Pedofeatures	بی- فابریک b- fabric	ساختمان میکروسکوپی و حفرات Microstructure and Voids	الگوی توزیع نسبی (RDP)	افق Horizon	خاک‌رخ Pedon
13- moderately developed	>70%	Few	4	FR, DR, FR, OP, DR	Ex, CC, Ex, CaC, CaC, Nsc	Spk, Spk, Cry, Spk	Gr, Sb, Cvp, Chm, Vu, Ch, Chm, Vu, Ch	Por, Por, Por	A, Bt1, Bk, BCk1	قیان Qapan
15- moderately developed	>70%	Common	4	FR, OP, DR, OP	Ex, FeN, Ex, CC, Ex, CaN	Spk, Spk, Cry	Ch, Chm, Cru, Sb, Ch, Chm, Ch, Chm, Vu	Por, Por, Por	A, Bt1, Btk	آق سو Agh Su
16- moderately developed	>70%	Common	4	DR, DR, DR	Ex, FeN, Ex, FeN, CC, Ex, Nsc	Spk, Spk, Spk, Cry	Ch, Chm, Cru, Ch, Chm, Sb, Ch, Chm, Pn, Ma	Por, Por, Por, Por	A, Bw, Bt, Bk2	سوسرا Sousara
23- well developed	100	Many	4	DR, FR, OP, DR, DR	Ex, Fe/MnN, FeN, CC, Ex, CC, CaN, Nsc	Spk, Str, Cry, Str	Ch, Chm, Ab, Sb, Ma, Ch, Chm	Por, Por, Por	A, Bt1, Btk	توشن Toshan
18- well developed	>70%	Common	4	DR, FR, DR, FR	Ex, FeN, CC, Ex, Nsc	Spk, Str, Spk, Str	Gr, Cru, Ch, Chm, Sb, Ch, Chm, Sbk	Por, Por, Por	A, Bt1, BC	النگره Alangdare
20- well developed	100	Many	4	DR, OP, OP	Ex, Fe/MnN, CC, Ex, Fe/MnN, CC, Ex, CaN, Nsc, Cyc, CaN, Nsc	Str, Spk, Str, Cry, Cry	Ch, Chm, Ab, Cru, Sb, Ab, Ch, Ma, Ch, Chm, Vu, Ch, Chm, Vu	Por, Por, Por, Por	ABt, Bt2, Bk1, Ck	نکا Neka

Gr: دانه‌ای. Ab: مکعبی زاویه‌دار. Sb: مکعبی نیمه زاویه‌دار. Ma: توده‌ای. Cvp: حفرات آرایشی مرکب. Ch: کانال. Chm: حجره‌ای. Vu: حفرات واگ و ریزساختمان واگی. Pn: صفحه‌ای. Cru: اسفنجی. Spk: لکه‌ای. Str: خطی. Cry: کریستالی. Ex: فضولات جانوری. CC: پوسته رسی. CaC: پوسته آهکی. CaN: ندول آهک. Fe/MnN: ندول آهن و منگنز. Por: پورفیریک. Nsc: کلسیت سوزنی شکل. Cyc: کلسیت سیتومورفیک. OP: پیگمان‌های آلی. DR: بقایای پوسیده ریشه. FR: بقایای تازه ریشه.

Gr: granular. Ab: angular blocky. Sb: subangular blocky. Ma: massive. Cvp: compound packing void. Ch: channel. Chm: chamber. Vu: vugh void and vughy microstructure. Pn: plane. Cru: crumb. Spk: speckled. Str: striated. Cry: crystallitic. Ex: excrement. CC: clay coating. CaC: calcite coating. CaN: calcite nodules. Fe/MnN: Fe/Mn nodules. Por: porphyric. Nsc: Needle-shaped calcite. Cyc: Cytomorphitic calcite. OP: organic pigment. DR: Decomposed organic residues. FR: fresh organic residues.



شکل (۲) تصویر مقاطع نازک از خاکدانه‌های مکعبی زاویه‌دار و بدون زاویه با تمایز خوب در افق Bt1 توشن (a)، حفرات و ساختمان میکروسکوپی حجره‌ای در افق Bt2 آق سو (b)، ساختمان میکروسکوپی گرانوله در افق A النگدره (c)، عوارض ناشی از فعالیت بیولوژیکی درون بقایای ریشه در افق A سوسرا (d) (PPL)  
 Figure (2) Photomicrograph of well-separated angular and subangular blocky microstructure in Bt1 horizon of Toshan (a), chamber voids and microstructure in Bt2 horizon of Agh Su (b), granular microstructure in A horizon of Alangdareh (c), biological pedofeature



شکل (۳) تصویر مقاطع نازک از پوشش رسی در اطراف حفرات واگ در افق Bt2 قبان (a)، پوشش رسی در داخل کانال در افق Bt2 آق سو (b)، پوشش رسی ضعیف در افق Bt سوسرا (c)، پوشش رسی در اطراف حفره و بی‌فابریک کریستالی در زمینه افق Btk1 توشن (d)، پوشش رسی در اطراف کانال در افق Bt2 النگدره (e)، پوشش رسی پوشیده شده با آهن در اطراف حفره و ندول مگنز که با فلش نشان داده شده است در افق Bt2 نکا (f) (XPL)

Figure (3) Photomicrograph of clay coating around vugh in Bt2 horizon of Qapan (a), clay coating inside a channel in Bt2 horizon of Agh Su (b), weak clay coating in Bt horizon of Sوسرا (c), clay coatings around voids and crystallite b-fabric in matrix of Btk1 horizon of Toshan (d), clay coating around channel in Bt2 horizon of Alangdareh (e), clay coating covered with iron oxide around void with Mn nodules in matrix shown with arrow in Bt2 horizon of Neka(f), (XPL)

سوزنی شکل و سیتومورف را در افق‌های سطحی خاک‌رخ گزارش کرده‌اند (۱۹ و ۲۹) اما در مناطق مورد مطالعه این فرم‌ها در عمق بیش از ۱۵۰ سانتی‌متری نیز مشاهده گردید. در افق C خاک‌رخ سوسرا بلورهای سوزنی کلسیت به صورت پوششی اطراف خاکدانه‌ها را پوشانده‌اند. حضور همزمان فضولات جانوری در کنار تجمع انواع فرم‌های کلسیت در افق‌های پایینی و نیز مورفولوژی گرانولار برخی از انواع آنها می‌تواند نشان‌دهنده نقش موجودات خاک‌زی در انتقال این عوارض باشد (شکل ۸C). نودول‌های خاک‌ساخت مشاهده شده در مقاطع نازک قیان و آق‌سو اغلب به صورت توده‌های نرم<sup>۴</sup> و نیز نودول‌های ژئودیک قابل مشاهده است (شکل ۸e و d). همچنین وجود تعداد زیادی نودول‌های کلسیت در اعماق پایین برخی خاک‌رخ‌ها (افق C النگدره) (شکل ۹) در مقایسه با افق‌های سطحی نشان‌دهنده شرایط اقلیمی مرطوب‌تر، پوشش گیاهی متراکم‌تر و در نتیجه تشدید فعالیت‌های بیولوژیکی است که موجب شده فرایند انحلال و رسوب و نیز کریستاله شدن مجدد کلسیت تسهیل گردد. این نتایج با نتایج اولیایی (۲۹) مطابقت دارد. آلونسو زارزا (۳) معتقد است تجمع کربنات‌ها در زمین‌نماهای مدرن می‌تواند فرایندی نسبتاً سریع باشد که به صورت کلسیتی شدن مستقیم سلول‌های ریشه گیاهان یا فعالیت میکروبی درون ریزوسفر حتی در رژیم‌های فرساینده رخ دهد و به گونه گیاهی خاصی وابسته نیست.

تجمع آهک در خاک‌رخ قیان اغلب به صورت کوتینگ و هایپوکوتینگ خالص در افق‌های تحتانی دیده می‌شود که ضخامت برخی از کوتینگ‌ها به بیش از ۲۰۰ میکرومتر می‌رسد (شکل ۷ b و a). در افق‌های Bk و C خاک‌رخ‌های آق‌سو و سوسرا تجمع کلسیت به صورت منسجم‌تری دیواره حفرات را پوشانده و در مواردی تشکیل ندول داده است (شکل ۷C). افق‌های Btk خاک‌رخ توشن به شدت آهکی شده‌اند. به طوری که آهک حداقل ۵۰ درصد سطح مقطع را پوشانده است. همچنین در این افق‌ها اغلب رس از افق‌های فوقانی در اثر شستشو به پایین منتقل شده و روی آهک قرار گرفته است (شکل ۳d). در افق‌های Btk خاک‌رخ‌های نکا و النگدره حضور توأم پوسته رسی و آهک مشاهده شد به طوری که در مواردی آهک روی پوسته رسی قرار گرفته است که می‌تواند نشان‌دهنده تخلیه مجدد افق‌های فوقانی از آهک و قرارگیری آن بر روی پوسته‌های رسی باشد (شکل ۷d). بژدک و همکاران<sup>۱</sup> (۵) وجود فرم سوزنی شکل آهک را نشان‌دهنده رطوبت کافی در خاک و حضور مواد آلی تجزیه‌پذیر دانسته‌اند، شاید به همین دلیل این فرم بطور غالب در خاک‌رخ‌های نکا، سوسرا و النگدره مشاهده شد (شکل ۸a). این پژوهشگران همچنین بیان داشتند که تشکیل این فرم به معدنی شدن بیولوژیکی<sup>۲</sup> در درون میسیلیوم قارچ‌ها ارتباط دارد و اشباع بودن محلول خاک با کاتیون کلسیم در حفظ این فرم در خاک مؤثر است. برخی مطالعات فرایند معدنی شدن بیولوژیکی را در خاک‌های مدرن، فسیل و کالکریت‌ها جزء فرایندهای رایج می‌دانند (۳). میلییر و همکاران<sup>۳</sup> (۲۶) فرایند معدنی شدن بیولوژیکی را با استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپی کربن اثبات کردند. هر چند بسیاری پژوهش‌ها حضور فرم‌های

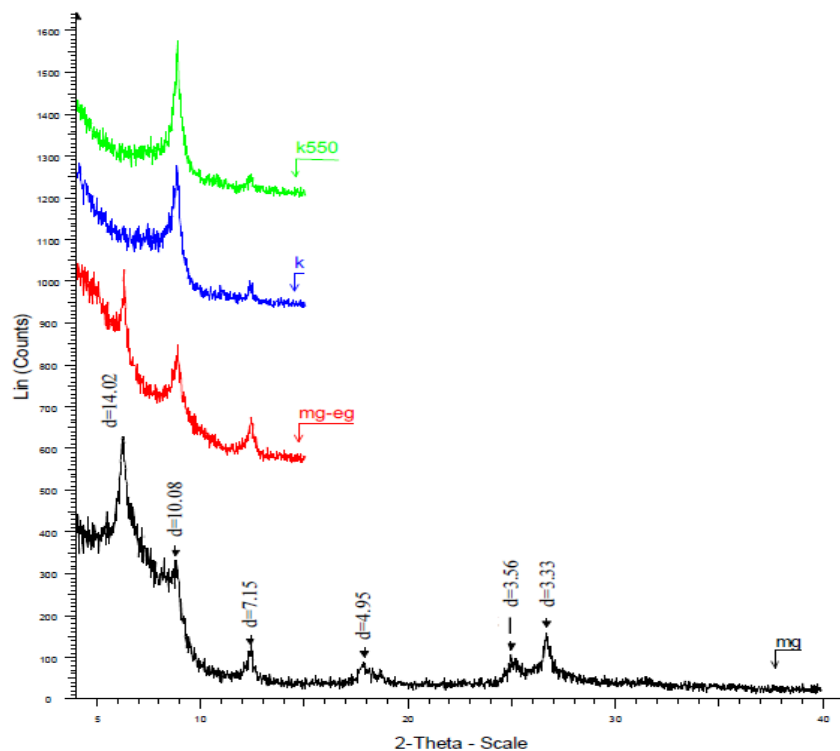
1- Becze *et al.*

2- Biomineralisation

3- Milliere *et al.*

4- Soft Mass

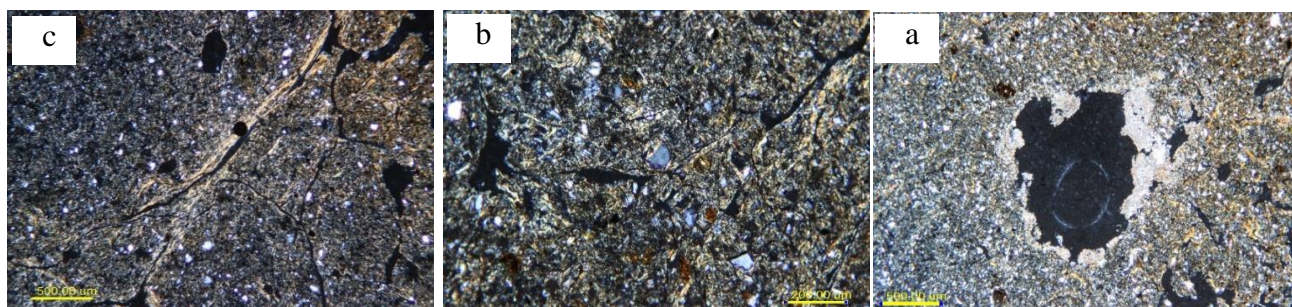
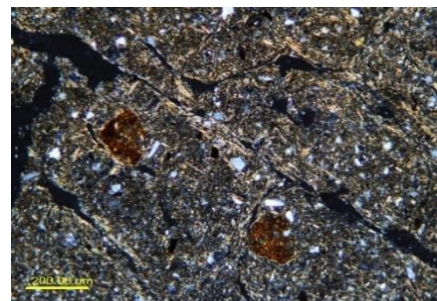
پورمعصومی پرشکوه و همکاران: میکرومورفولوژی خاک‌های جنگلی...



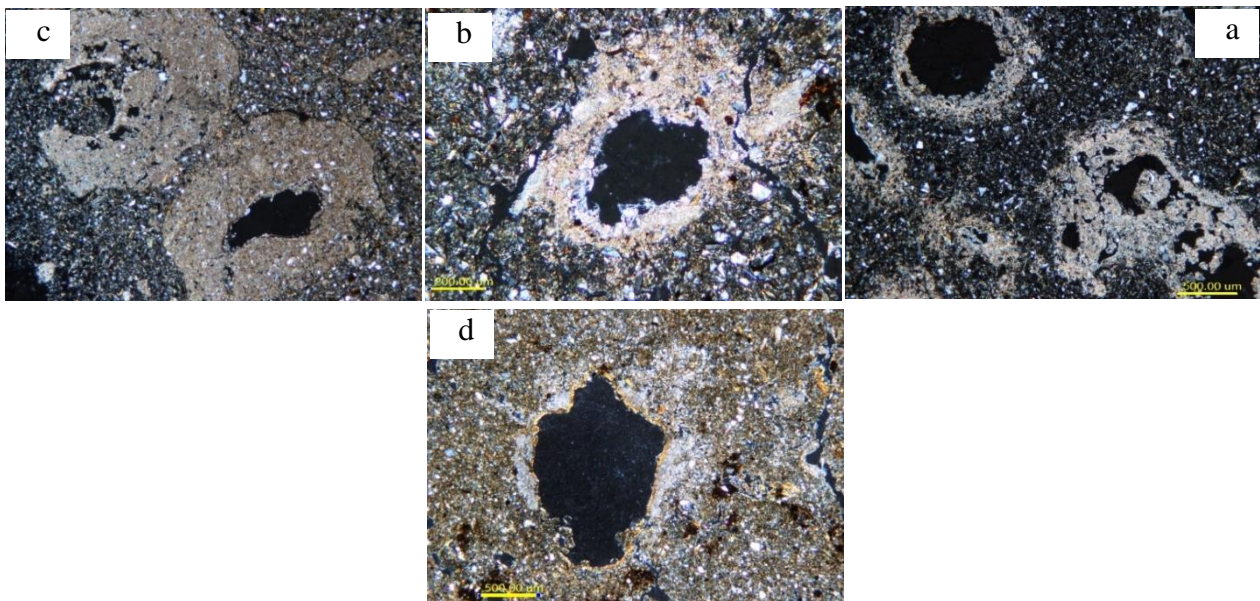
شکل (۴) الگوی پراش اشعه ایکس بخش رس افق Bt خاک رخ توشن  
Figure (4) XRD pattern of clay fraction of Bt horizon in Toshan pedon

شکل (۵) ندول‌های اکسید آهن همراه بی‌فابریک خطی در زمینه افق Bt1 النگدره (XPL)

Figure (5) Iron oxide nodules with striated b-fabric in Bt1 horizon of Alangdareh, (XPL)

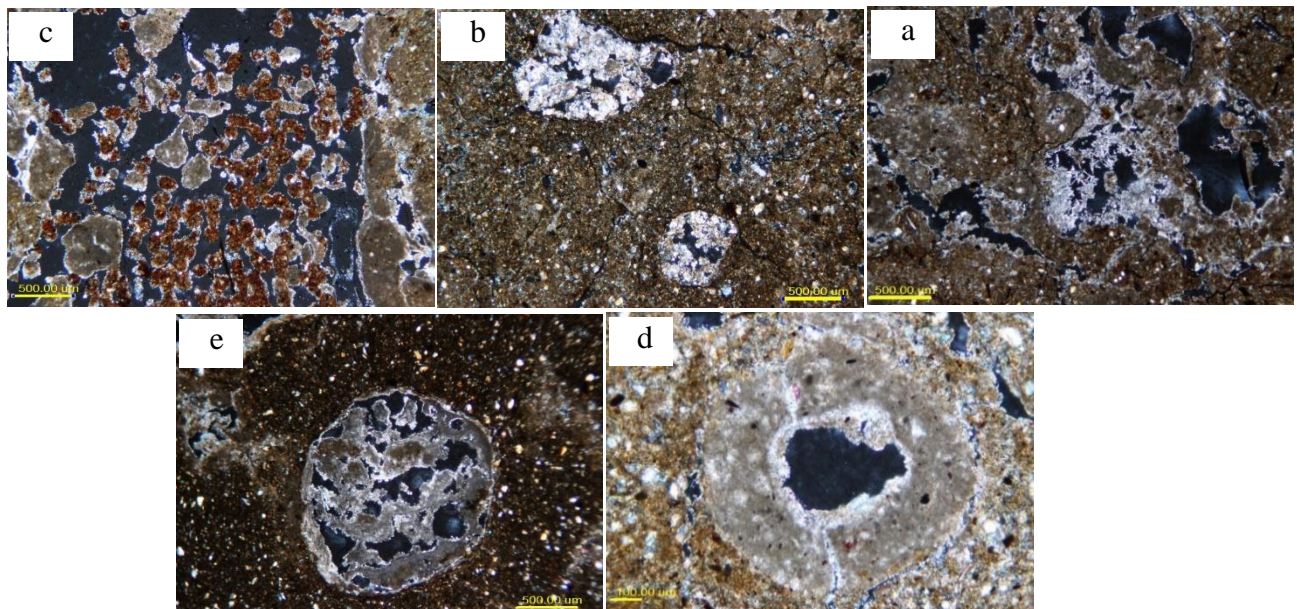


شکل (۶) پوشش کلسیت در اطراف حفره و بی‌فابریک لکه‌ای و کریستالی در زمینه اطراف آن در افق Btk النگدره (a)، بی‌فابریک خطی در اطراف ذرات کوارتز در افق Bt1 توشن (b)، بی‌فابریک خطی در اطراف کانال در افق Bt1 توشن (c) (XPL)  
Figure (6) Calcite coating around vugh with speckled and crystallite b b-fabric in matrix of Btk horizon of Alangdareh (a), granostriated and prostrated b-fabric in Bt1 horizon of Toshan (b and c), (XPL)



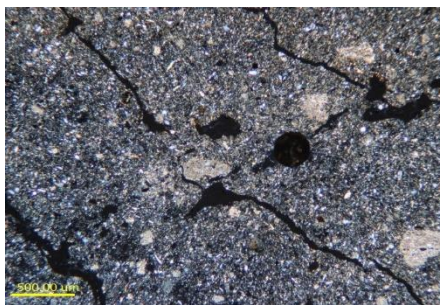
شکل (۷) تصاویر مقاطع نازک از کوتینگ و هایپوکوتینگ آهک در افق Ck و BCK2 قپان (a و b)، پرشدگی متراکم آهک درون حفره و تشکیل نودول ژئود در افق C آق سو (c)، پوشش مرکب آهک و رس در اطراف حفره در نتیجه فرایند آهکی شدن مجدد در افق Btk النگدره (d) (XPL)

Figure (7) Photomicrograph of calcite coating and hypocoating in Ck and BCK2 horizons of Qapan (a and b), dense calcite infilling in void which formed a geodic nodule in C horizon of Agh Su (c), calcite coatings overlying clay coatings as a result of recalcification in Btk horizon of Alangdareh (d), (XPL)



شکل (۸) تصاویر مقاطع نازک از کلسیت سوزنی درون حفره از افق Bk2 سوسرا (a)، بلورهای کلسیت سیتومورف در افق Btk نکا (b)، حضور فضولات جانوری در کنار گرانول‌های کلسیت در افق C النگدره (c)، نودول ژئودیک در افق Btk قپان (d)، توده نرم کلسیت درون حفره در افق Ck قپان (e)

Figure (8) Photomicrograph of needle-shaped calcite in vugh in the Bk2 horizon of Sousara (a), cytomorphic calcite crystals in Btk horizon of Neka (b), presence of excremental features with calcite granules in C horizon of Alangdareh (c), a geodic nodule in Btk horizon of Qapan (d), calcite soft mass in void of Ck horizon of Qapan, (XPL)



شکل (۹) توزیع نودول‌های آهنی در بی‌فابریک کریستالیتیک در افق C النگدیره (XPL)  
 Figure (9) Distribution of calcite nodule in matrix with crystallite b-fabric in C horizon of Alangdareh (XPL)

### شاخص‌های رنگ، MISECA و اشکال آهن

نتایج مربوط به انواع شکل‌ها و نسبت‌های آهن و نیز میانگین وزنی شاخص‌های رنگ در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مقدار اکسید آهن آزاد ( $Fe_d$ ) در افق‌های Bt بالاتر از سایر افق‌هاست و حداکثر مقدار  $Fe_d$  در افق Bt1 خاک‌رخ النگدیره اندازه‌گیری شد. رابطه مثبت و معنی‌داری بین  $Fe_d$  و مقدار رس در خاک‌ها مشاهده گردید ( $r^2=0.62$ ,  $p<0.01$ ). خان و فنتون<sup>۱</sup> (۱۷) همبستگی میان تغییرات مقدار رس و آهن آزاد را در خاک به دلیل حرکت همزمان این دو عامل در طول خاک‌رخ می‌دانند. روش اگزالات آمونیم، اکسیدهای آهن غیرمتبلور (فری‌هیدرات) و پیوند خورده با ماده آلی را استخراج می‌کند. بنابراین  $Fe_o$  شاخصی از میزان تقریبی غلظت فری‌هیدرات است (۳۹). افزایش این شاخص از مواد مادری به سمت سطح خاک در همه خاک‌رخ‌ها مشاهده شد. تازیکه و همکاران (۳۷) نیز افزایش این شاخص را از مواد مادری به سمت افق‌های سطحی در خاک‌های حاصل از سنگ رس، ماسه سنگ و سنگ آهک در شمال‌شرق بجنورد گزارش کردند. ایشان تشکیل پدوژنیک مگه‌میت را دلیل احتمالی این روند افزایشی مطرح نمودند. همزمان با مشاهده افزایش شدت فرایندهای خاک‌ساز در مطالعات میکرومورفولوژی در گرادیان بارندگی مورد نظر، میانگین وزنی آهن عصاره‌گیری شده

با دی‌تیونات نیز در خاک‌رخ توشن بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. همچنین از بین شاخص‌های رنگ مورد استفاده در این مطالعه، شاخص رنگ تورنت، روند منظم‌تری را با گرادیان بارش در منطقه نشان می‌دهد (جدول ۴). ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. در بررسی رابطه همبستگی بین شاخص‌های رنگ هارست، تورنت و الکساندر با اشکال آهن خاک‌های مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان دهنده رابطه معنی‌دار مثبت شاخص‌های رنگ تورنت (RR) و الکساندر ( $R_{r25}$ ) با  $Fe_d$  و  $Fe_d-Fe_o$  در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد (جدول ۵). الکساندر (۲) نشان داد که همبستگی بین  $Fe_d$  و  $Fe_d-Fe_o$  و شاخص Rr با مقدار عدد ثابت ۲۵، افزایش می‌یابد (به ترتیب  $r=0.958$ ,  $0.964$ ). رابطه منفی معنی‌دار بین شاخص هارست و الکساندر در سطح احتمال ۱ درصد ( $r=0.936$ ) تأیید می‌کند که شاخص هارست عکس شاخص الکساندر عمل می‌کند و با کاهش مقدار آهن، مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک (MISECA) بیشترین همبستگی را با شاخص رنگ تورنت نشان می‌دهد (شکل ۱۰). خرمالی و همکاران (۲۲) همبستگی قوی بین شاخص MISECA و شاخص رنگ هارست در خاک‌های آهنی جنوب ایران گزارش کردند.

جدول (۴) نتایج مربوط به مقدار انواع شکل‌های آهن و شاخص‌های رنگ در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه  
Table (4) Results of iron forms value and color indices in studied pedons.

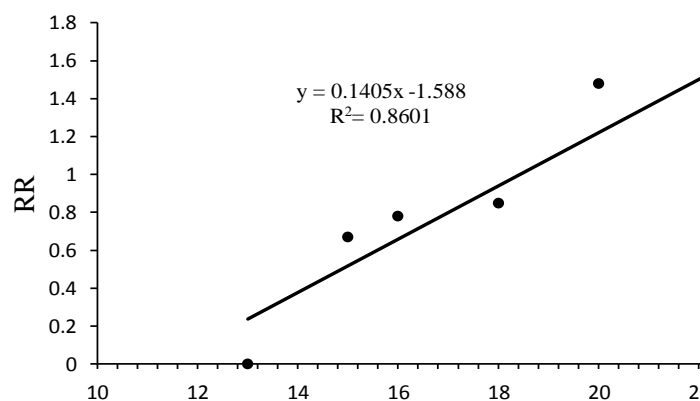
میانگین وزنی شاخص‌های رنگ Weighted mean of the color indices			Feo/Fed	Fed-Feo	Feo	Fed	عمق Depth	افق Horizon	خاک‌رخ Pedon				
RR	R <sub>25</sub>	HI	%										
0	5.81	17.87	0.18	0.4	0.09	0.49	7-20	A	Qapan قاپان				
			0.16	0.43	0.08	0.51	20-35	Bt1					
			0.16	0.27	0.05	0.32	35-65	Bt2					
			0.10	0.28	0.03	0.31	65-80	Btk					
			0.10	0.38	0.04	0.42	80-105	BCK1					
			0.15	0.29	0.05	0.34	105-130	BCK2					
			0.08	0.33	0.03	0.36	130-155	Ck					
0.67	7.45	14.62	0.17	0.34	0.07	0.41	0-18	A	Agh Su آق سو				
			0.09	0.48	0.05	0.53	18-48	Bt1					
			0.08	0.48	0.04	0.52	48-91	Bt2					
			0.05	0.4	0.02	0.42	91-120	Btk					
			0.06	0.34	0.02	0.36	120-132	Bk					
0.78	7.64	14.34	0.09	0.32	0.03	0.35	132->2m	C	Sousara سوسرا				
			0.45	0.23	0.19	0.42	0-14	A					
			0.19	0.43	0.10	0.53	14-30	Bw					
			0.18	0.41	0.09	0.50	30-80	Bt					
			0.09	0.32	0.03	0.35	80-110	Bk1					
1.44	8.32	13.84	0.08	0.35	0.03	0.38	110-170	Bk2	Toshan توشان				
			0.10	0.26	0.03	0.29	170->2m	C					
			0.32	0.34	0.16	0.50	0-20	A					
			0.21	0.5	0.13	0.63	20-45	Bt1					
			0.14	0.54	0.09	0.63	45-99	Bt2					
0.85	5.4	21.66	0.12	0.23	0.03	0.26	99-135	Btk1	Alangdareh النگدیره				
			0.11	0.31	0.04	0.35	135-165	Btk2					
			0.49	0.21	0.20	0.41	3-15	A					
			0.17	0.54	0.11	0.65	15-42	Bt1					
			0.11	0.39	0.05	0.44	42-88	Bt2					
			0.10	0.43	0.05	0.48	88-103	Btk					
			0.06	0.32	0.02	0.34	103-133	Bkkm					
1.48	7.74	15.17	0.13	0.2	0.03	0.23	133-163	BC	Neka نکا				
			0.03	0.3	0.01	0.31	163-213	C					
			0.20	0.4	0.10	0.50	0-15	A					
			0.21	0.41	0.11	0.52	15-34	ABt					
			0.12	0.51	0.07	0.58	34-60	Bt1					
			0.08	0.54	0.05	0.59	60-83	Bt2					
			0.08	0.37	0.03	0.40	83-102	Btk					
0.08	0.34	0.03	0.37	0.30	0.37	102-130	Bk1						
								0.06	0.29	0.02	0.31	130-170	Bk2
								0.08	0.33	0.03	0.36	170->2m	Ck

جدول (۵) ماتریس همبستگی شاخص‌های رنگ با شکل‌ها و نسبت‌های مختلف آهن (n=39)  
 Table (5) Correlation matrix between color indices, forms and different ratios of iron (n=39)

Rr <sub>25</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub> -Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	RR	HI
					1
				1	-0.364
			1	0.805*	-0.707
		1	0.933**	0.757*	-0.693
	1	-0.137	0.226	0.086	-0.125
1	0.160	0.836*	0.874*	0.662	-0.936**

\*\*، \* به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد می‌باشد.

\*\*، \* represent the significance at the probability level of 99% and 95% respectively



شکل (۱۰) نمودار پراکنش و معادله رگرسیون خطی شاخص میکرومورفولوژیکی تکامل خاک در مقابل میانگین وزنی شاخص رنگ تورنت برای هر خاک‌رخ

Figure (10) Distribution diagram and linear regression equation of MISECA vs weighted mean of Torrent color index for each pedon

ویژگی‌ها، شاخص MISECA توانسته افق‌های آرجیلیک را در این گرادیان بارش به دو دسته با درجه تکامل متوسط و خوب تقسیم نماید. به‌علاوه به‌دلیل ضریب همبستگی بالای بین شاخص MISECA و شاخص رنگ تورنت، شاخص‌های میکرومورفولوژیکی تکامل و رنگ خاک می‌توانند بعنوان دو شاخص قوی در بررسی اثرات گرادیان بارندگی بر تشکیل و تحول خاک در شمال ایران مورد استفاده قرار گیرند. نتایج این مطالعه می‌تواند در جهت تکمیل مطالعات شواهد تغییر اقلیم گذشته در خاک‌های پالئوسل بسیار مفید باشد.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که تکامل خاک در مناطق مورد مطالعه تحت تأثیر فاکتورهای خاک‌ساز به‌ویژه اقلیم می‌باشد که این تأثیر به‌صورت تغییر در ویژگی‌های میکرومورفولوژی خاک-رخ‌ها به‌ویژه در افق‌های آرجیلیک خود را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش بارندگی از شرق به غرب این گرادیان به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، تغییرات قابل توجهی در مقدار و ضخامت پوسته‌های رسی، بی‌فابریک، اکسیدهای آهن و منگنز و نیز شکل تجمع کربنات کلسیم ثانویه ایجاد می‌شود. به دلیل این



### منابع

1. Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Gorji, M., and Ayoubi, Sh. 2018. Effects of environmental factors on classification of loess-derived soils and clay minerals variations, northern Iran. *Journal of Mountain Science*, 15(5): 976-991.
2. Alexander, E.B. 1985. Estimating relative ages from iron-oxide/total-iron ratios of soils in the western Po Valley, Italy: a discussion. *Geoderma*, 35: 257-259.
3. Alonso-Zarza, A.M. 2018. Study of a modern calcrete forming in Guadalajara, Central Spain: An analogue for ancient root calcretes. *Sedimentary Geology*, 373: 180-190.
4. Bajnoćzi, B., and Kovaćs-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: 203-212.
5. Becze- Deak, J., Langhor, R., and Verrechia, E.P. 1997. Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected section of the European loess belt. *Geoderma*, 76: 221-252.
6. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 891-901.
7. Fernandez, R.N., Schulze, D.G., Coffin, D.L., and Vanssoyoc, G.E. 1988. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil-landscape. *Soil Science Society of American Journal*, 52: 1023-1026.
8. Fitzpatrick, E.A. 1993. *Soil microscopy and micromorphology*. John Wiley and Sons Pub., Chichester Country.
9. Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., and Skowronek, A. 2009. Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran. *Quaternary International*, 128: 220-233.
10. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, second ed. Agronomy, Vol. 9, pp. 383-411.
11. Ghergherechi, S., Khormali, F., Mahmoudi, Sh., and Ayoubi, S. 2011. Micromorphology of argillic horizon developed on loess derived soils in humid and sub humid regions of South Western Golestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2: 237-350. (In Persian with English Abstract)
12. Gunal, H., and Ransom, M.D. 2006. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. *Catena*, 65: 222-236.
13. Hosseini, S.S., Esfandiarpour Borujeni, I., Farpoor, M.H., and Karimi, A.R. 2015. Comparison of different soil development indices along Kerman-Baft transect. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(2): 1-24.

14. Hurst, V.J. 1977. Visual estimation of iron in saprolite. Geological Society of America Bulletin, 88:174-176.
15. Kehl, M., Sarvati, R., Ahmadi, H., Frechen, M., and Skowronek, A. 2005. Loess paleosol-sequences along a climatic gradient in Northern Iran. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 55: 149–173.
16. Kemp R.A., and Zárate M.A. 2000. Pliocene pedosedimentary cycles in the southern Pampas, Argentina. *Sedimentology*, 47: 3-14.
17. Khan, F.A., and Fenton, T.E. 1996. Secondary iron and manganese distributions and aquic conditions in a Mollisol catena of Central Iowa. *Soil Science Society American Journal*, 60: 546-551.
18. Khormali, F., Ajami, M., and Ayoubi, S. 2006. Genesis and micromorphology of soils with loess parent material as affected by deforestation in a hillslope of Golestan province, Iran. In: 18th International Soil Meeting (ISM) on Soil Sustaining Life on Earth, Managing Soil and Technology, May 22-26, pp. 149-151.
19. 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.
20. Khormali, F., and Shamsi, S. 2009. Micromorphology and quality attributes of the loess derived soils affected by land use change: A case study in Ghapan watershed, Northern Iran. *Journal of Mountain Science*, 6: 197–204.
21. Khormali, F., Ghergherechi, S., Kehl, M., and Ayoubi, S. 2012. Soil formation in loess-derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. *Geoderma*, 179–180: 113-122.
22. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., and Stoops, G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semi-arid regions of southern Iran. *Catena*, 53: 273-301.
23. Kooistra, M. J. 1978. Soil development in recent marine sediments of the intertidal zone in the Oosterschelde, the Netherlands: a soil micromorphological approach. Wageningen: Stichting voor Bodemkartering Wageningen. pp: 1-184.
24. Mckeague, J.A., and Day, J.H. 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 46:13-22.
25. Mehra, O.P., and Jackson, M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 5: 317–327.
26. Milliere, L., Hasinger, O., Bindschedler, S., Cailleau, G., Spangenberg, J.E., and Verrecchia, E.P. 2011. Stable carbon and oxygen isotope signatures of pedogenic needle fibre calcite. *Geoderma*, 161: 74–87.

27. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp: 539–579.
28. Nettleton, W.D., Olsen, C.G., and Wysocki, D.A. 2000. Paleosol classification: Problems and solutions. *Catena*, 41: 61-92.
29. Owliaie, H.R. 2012a. Micromorphology of calcitic features in calcareous soils of Kohgilouye Province, Southwestern Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14: 225-239.
30. Owliaie, H.R. 2012b. Study of genesis and micromorphology of soils along a catena in Yasouj Region (Case Study: Dasht-e-roum Plain). *Journal of Water and Soil*, 26(2): 427-439. (In Persian with English Abstract)
31. Quénard, L., Samouëlian, A., Laroche, B., and Cornu, S. 2011. Lessivage as a major process of soil formation: a revisitation of existing data. *Geoderma*, 167–168: 135–147.
32. Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture Handbook No. 60 Washington, DC.
33. Sauzet, O., Cammas, C., Barbillon, P., Étienne, M.P., and Montagne, D. 2016. Illuviation intensity and land use change: Quantification via micromorphological analysis. *Geoderma*, 266: 46-57.
34. Soil survey staff. 2014. *Keys to soil taxonomy*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
35. Stoops, G. 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
36. Stoops, G., Marcelino, V., and Mees, F. 2010. *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, first ed. Elsevier Science, p. 752.
37. Tazikeh, H., Khormali F., Amini A., Barani Motlagh M., and Ayoubi Sh. 2017. Soil-parent material relationship in a mountainous arid area of Kopet Dagh basin, North East Iran. *Catena*, 152: 252-267.
38. Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H., and Alferez, F. 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, 136: 354-358.
39. Torrent, J., Barrón, V., Liu, Q.S., 2006. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. *Geophysical Research Letters*, 33, L02401.
40. Vlaminck, S., Kehl, M., Lauer, T., Shahriari, A., Sharifi, J., Eckmeier, E., Lehndorff, E., Khormali, F., and Frechen, M. 2016. Loess-soil sequence at Toshan (Northern Iran): Insights into late Pleistocene climate change. *Quaternary International*, 399: 122-135.

41. World reference base for soil resources (WRB). 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
42. Zarate, M., Kemp, R.A., Espinosa, M., and Ferrero, L. 2000. Pedosedimentary and paleoenvironmental significance of a Holocene alluvial sequence in the southern Pampas, Argentina. *The Holocene*, 10: 481-488.
43. Zamanian, K., Pustovoytov, K., and Kuzyakov, Y. 2016. Pedogenic carbonates: forms and formation processes. *Earth-Science Reviews*, 157: 1-17.
44. Zeraat Pische, M. 2010. Carbon stock and mineral factors controlling soil organic carbon in a climosequence, Golestan province. M.Sc Thesis, Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources, 135pp. (In Persian with English Abstract)