

## مطالعه میکرومورفولوژیکی تخلخل و ریزساختمان افق سطحی خاک‌های لسی استان گلستان تحت تأثیر کاربری اراضی با استفاده از آنالیز تصویر

مریم محمدزاده محمدآباد<sup>۱</sup>، فرهاد خرمالی<sup>۲\*</sup>، فرشاد کیانی<sup>۳</sup> و محمد عجمی<sup>۴</sup>

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

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹	
<b>کلمات کلیدی:</b> میکرومورفولوژی، آنالیز تصویر، ریزساختمان، تخلخل، کاربری اراضی	آنالیز تصویرروشی پیشرفته برای کمی کردن خصوصیات خاک و افزایش دقت و صحت نتایج مطالعات میکرومورفولوژیکی است. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر نوع کاربری اراضی بر تخلخل و ریزساختمان افق سطحی خاک‌ها، تعداد ۹ خاک‌رخ در کاربری-های متفاوت جنگل طبیعی و مصنوعی، اراضی رها شده، باغ و زراعی حفر و تشریح گردید. سپس از هر افق یک نمونه جهت انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی و یک نمونه دست‌نخورده جهت مطالعات میکرومورفولوژی برداشته شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مانند pH، بافت و کربن آلی اندازه‌گیری شد. پس از آماده‌سازی مقاطع نازک خاک، مطالعات میکرومورفولوژی با میکروسکوپ پلاریزان و عکس‌برداری از آن‌ها صورت پذیرفت. درصد تخلخل کل خاک، قطر معادل و مساحت حفرات با استفاده از نرم‌افزار Image Tool محاسبه شد و داده‌های به دست آمده مورد تجزیه آماری قرار گرفت. مشاهدات میکروسکوپی نشان داد در کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی، ریزساختمان غالب خاک از نوع دانه‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار است ولی در کاربری زراعی عمدتاً از نوع توده‌ای و مکعبی زاویه‌دار می‌باشد. درصد حفرات کانال در کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی بیشتر از سایر کاربری‌هاست. اکثر حفرات در کاربری زراعی به دلیل جنگل تراشی و تخریب ساختمان خاک، از نوع واگ و صفحه‌ای می‌باشند. نتایج آنالیز تصویر نشان داد، با تغییر کاربری از جنگل به زراعی، درصد حفرات با قطر و مساحت زیاد، به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است. کاربری‌های باغ و جنگل طبیعی به ترتیب با ۶۷/۹۷ و ۶۶/۸۰ درصد، بیشترین تخلخل و کاربری‌های زراعی و رها شده به ترتیب با ۳۰/۷۹ و ۳۳/۵۰ درصد، کمترین تخلخل را دارند.

\* عهده دار مکاتبات

Email: Khormali@yahoo.com

### مقدمه

افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش تقاضا برای محصولات زراعی موجب شده است تا امروزه پوشش‌های طبیعی زمین به ویژه جنگل‌ها به سرعت تخریب و تبدیل به زمین‌های کشاورزی شوند (۱۷). تغییر کاربری و مدیریت اراضی، به شدت روی خواص فیزیکی و شیمیایی و قابلیت‌های بیولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارد (۳). تخلخل خاک و پایداری خاکدانه (۲۴)، مقدار کربن آلی (۱۲) و ویژگی‌های منافذ خاک (۲۹) از شاخص‌های مهم کیفیت خاک هستند. حجم کل، توزیع اندازه و شکل خلل و فرج خاک، بسیاری از فرآیندها و قابلیت‌های خاک، از جمله ذخیره‌سازی و انتقال آب، نفوذ گاز، فعالیت‌های میکروبی و مقاومت میکابایی خاک نسبت به نفوذ ریشه را تعیین می‌کند (۳۶). مطالعات نشان داده است که توصیف بهتر توزیع اندازه حفرات برای درک تعدادی از فرآیندهایی که در خاک رخ می‌دهد، مثل ثبات ساختمان، حرکت آب و املاح و تجزیه کربن آلی بسیار مفید است (۲۸). ساختار منافذ خاک به نوع مدیریت خاک و تغییرات محیطی بسیار حساس است (۲۹). مطالعات انجام شده توسط لپیچک و همکاران<sup>۱</sup> (۲۸) و داکوستا و همکاران<sup>۲</sup> (۱۴) نشان می‌دهد تغییر کاربری اراضی، خاک‌ورزی و تراکم می‌تواند تخلخل کل، توزیع اندازه و قابلیت‌های منافذ خاک را تغییر دهد و در نتیجه فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را در خاک تحت تأثیر قرار دهد.

مشاهدات میدانی خصوصیات خاک و تعیین وزن مخصوص ظاهری و تخلخل، با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده، مراحل اولیه در بررسی ساختار خاک هستند. همچنین میکرومورفولوژی خاک، چندین دهه، به طور کیفی، برای مطالعه فرآیندها و تشکیل خاک و نیز ساختار خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱، ۲۷). میکرومورفولوژی، روش مطالعه نمونه‌های خاک دست‌نخورده با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی و

اولترامیکروسکوپی به منظور تشخیص اجزای سازنده آن و تعیین روابط متقابل آن‌ها از نقطه نظر زمانی و مکانی می‌باشد (۴۷). این دانش در کنار مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بسیاری از مشکلات پیچیده تشکیل و طبقه‌بندی خاک را پاسخگو بوده است و روشی مطمئن برای شناسایی فرآیندهای خاکساز می‌باشد (۴۳). از تکنیک‌های میکرومورفولوژی جهت شناسایی فرآیندهای تشکیل خاک و مطالعه پارامترهایی از خاک مانند توزیع مکانی مواد آلی، خلل و فرج و ساختمان خاک که تحت تأثیر مدیریت قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود (۳۰).

مطالعات میکرومورفولوژی انجام شده توسط خرمالی و عجمی (۲۳) و ایوبی و همکاران (۴) نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی منجر به تغییر در ساختمان و حفرات می‌شود. ریزساختمان اسفنجی و دانه‌ای با تخلخل بالا در اراضی مرتعی در اثر تغییر کاربری به ریزساختمان توده‌ای و مکعبی با تخلخل کم و حفرات از نوع صفحه‌ای<sup>۳</sup> در اراضی زراعی تبدیل می‌شود. فعالیت‌های کشاورزی منجر به از دست رفتن خاک و تراکم و کاهش خصوصیات کیفیت خاک مثل فعالیت میکروبی، تخلخل و ریزساختمان می‌شود.

استفاده از تصاویر و تکنیک‌های پردازش تصویر فرصت‌های جدیدی را برای آنالیزهای کمی در میکرومورفولوژی خاک فراهم می‌کند (۱۹). آنالیز تصویر<sup>۴</sup> مقاطع نازک، یک ابزار کارآمد برای مطالعه کمی تفاوت‌های موجود در ساختار خاک، تحت مدیریت‌های متفاوت اراضی می‌باشد (۳۷). استفاده از نرم‌افزارهای مختلف آنالیز تصویر سبب افزایش تکرارپذیری، دقت در تشخیص و کمی کردن عوارض میکروسکوپی موجود در خاک می‌شود (۴۴). آنالیز تصویر مقاطع نازک خاک و همچنین توموگرافی تخمینی و تصاویر رزونانس مغناطیسی ابزارهای جدیدی هستند که درک خصوصیات و فرآیندهای فیزیکی خاک را بهبود می‌بخشند (۲۶). بیشتر

3- Plane

4- Image Analysis

1- Lipiec *et al.*

2- Da Costa *et al.*

نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و تکنیک آنالیز تصویر، تغییرات تخلخل و ریزساختمان افق‌های سطحی خاک را که بر اثر جنگل تراشی و تغییر کاربری اراضی ایجاد شده است، مورد بررسی قرار دهد.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز توشن می‌باشد که در جنوب غرب شهرستان گرگان (استان گلستان) و در طول شرقی ۲۴° ۵۴' تا ۲۶° ۵۴' و عرض شمالی ۴۶° ۳۶' تا ۴۹° ۳۶' در حد واسط حوضه زیارت و انجیراب واقع شده است (شکل ۱). مواد مادری خاک‌ها را رسوبات بادی لسی تشکیل داده‌اند. اقلیم منطقه نیمه مرطوب، متوسط بارندگی سالیانه ۶۲۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه آن ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و ترمیک و پوشش گیاهی منطقه شامل جنگل‌های طبیعی<sup>۳</sup> (NF) و مصنوعی سوزنی‌برگ<sup>۴</sup> (AF)، باغ<sup>۵</sup> (OR)، زراعی<sup>۶</sup> (CL) و اراضی رها شده<sup>۷</sup> (AL) می‌باشد. پوشش جنگلی منطقه به طور عمده از درختان بلوط، ممرز، انجیلی و همچنین مساحت کمی از آن از کاج دست‌کاشت (جنگل مصنوعی سوزنی‌برگ) تشکیل شده است. اراضی زراعی، بیشتر تحت کشت گندم، سویا و کلزا قرار دارند. اخیراً در بخشی از پست-ترین اراضی زراعی حوضه نیز عملیات گل‌خراب کردن زمین‌ها و تبدیل آن‌ها به شالیزار آغاز شده است. باغ‌ها اغلب زیتون کاری شده‌اند. اراضی رها شده نیز که در واقع ابتدا زیر پوشش طبیعی جنگلی بوده‌اند، قبل از این اغلب کشاورزی شده و هم‌اکنون بیشتر به صورت تمشک‌زار و علف‌زار درآمده‌اند.

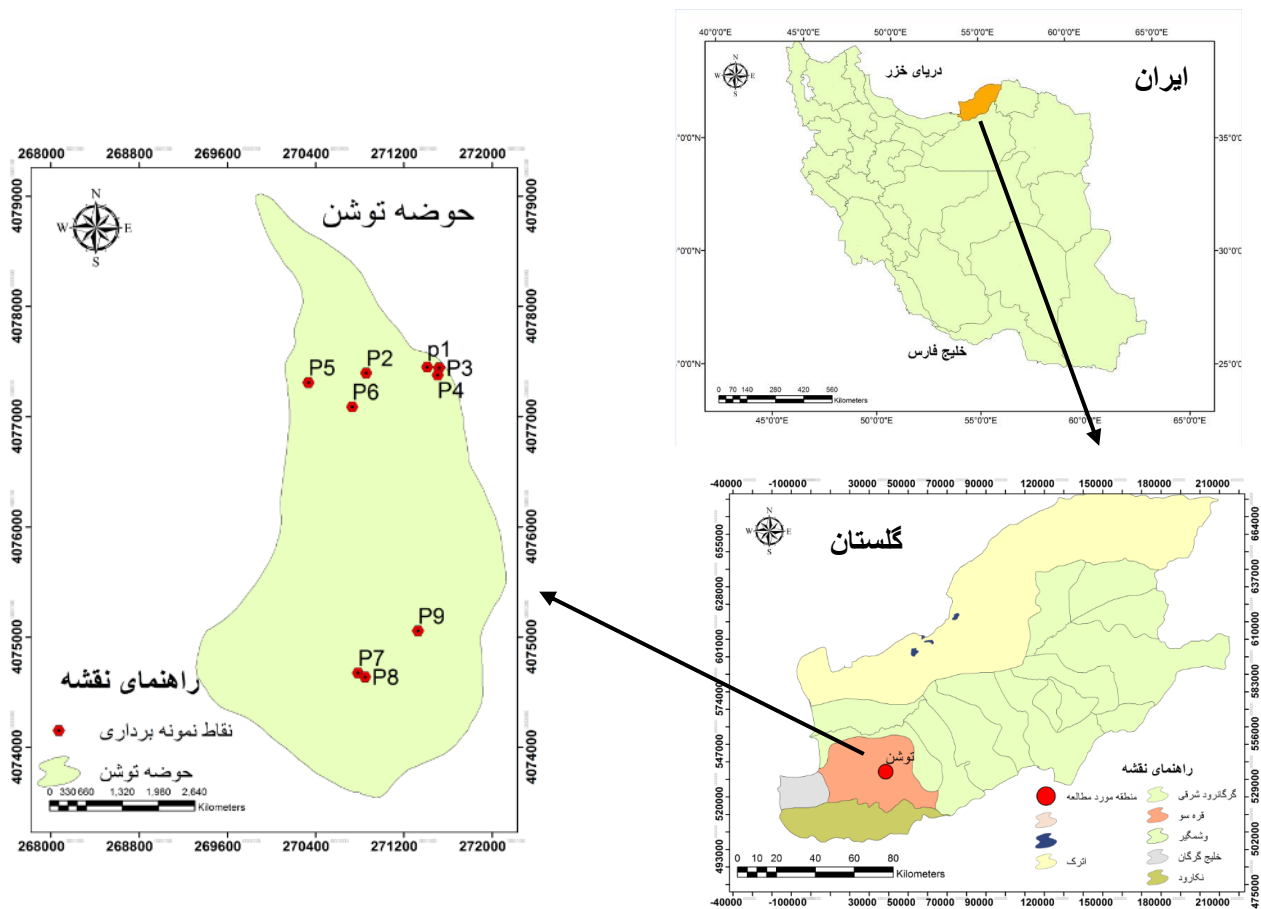
مطالعات انجام شده با استفاده از آنالیز تصویر در علوم خاک، به تجزیه و تحلیل شکل، اندازه، جهت‌یافتگی و نحوه توزیع حفرات پرداخته‌اند (۱۵). راسا و همکاران<sup>۱</sup> (۴۴) توزیع حفرات خاک‌های رسی را در کاربری‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار<sup>۱</sup> AnalySIS مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

از محدود مطالعات انجام شده در ایران می‌توان به مطالعه خصوصیات ماکروپورها، تعیین میزان تخلخل ناشی از ماکروپورها و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس ویژگی‌های به دست آمده از آنالیز تصویر با استفاده از نرم‌افزار Image Tool اشاره نمود (۱۸). خرمالی (۲۲)، نیز آنالیز تصویر و روش‌های میکروسکوپی را در تخمین مقدار گچ و تخلخل خاک‌های گچی مورد استفاده قرار داد. محمدی و همکاران نیز با استفاده از آنالیز تصویر به مقایسه درصد حفرات در خاک‌های تراکم‌یافته و بدون تراکم جنگل در استان گیلان پرداختند (۳۳). نتایج میرکریمی و همکاران (۳۲) در رابطه با مطالعه خصوصیات میکرومورفولوژیکی و بررسی آنالیز تصویر تخلخل افق مالیک خاک‌های مالی‌سولز جنوب گرگان‌رود تحت تأثیر کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که جنگل و مرتع بکر بالاترین درصد تخلخل و خاک زراعی کمترین درصد تخلخل را دارا می‌باشند. در کاربری زراعی خاک‌ورزی و فشار ناشی از ماشین‌آلات کشاورزی موجب شکستن خاکدانه‌ها و کاهش اندازه حفره‌ها از نظر قطر معادل و مساحت، نسبت به کاربری‌های طبیعی شده است.

هم‌اکنون مساحت زیادی از اراضی جنگلی در منطقه توشن (استان گلستان)، مورد تخریب قرار گرفته و به اراضی زراعی و باغات تبدیل شده و یا به صورت مرتع رها شده‌اند. بخشی از اراضی نیز به منظور جلوگیری از تخریب شدید، مدتی است که تحت پوشش جنگل‌های مصنوعی سوزنی‌برگ قرار گرفته‌اند. این مطالعه تلاش دارد تا با بهره‌گیری از مطالعه میکرومورفولوژی مقاطع

3- Natural Forest  
4- Artificial Forest  
5- Orchard  
6- Cropland  
7- Abandoned Land

1- Rasa et al.  
2- Soft Imaging System



شکل (۱) نقشه موقعیت منطقه و پراکنش نقاط نمونه برداری در حوضه مورد مطالعه.  
Figure (1) Locatoin map and distribution of sampling points in study area

(۲۱) و pH خاک در حالت گل اشباع و با استفاده از دستگاه pH متر الکتروود شیشه‌ای اندازه گیری شد (۳۱). هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی در عصاره اشباع انجام شد (۴۵). کربن آلی توسط دی کرومات پتاسیم در مجاورت اسیدسولفوریک غلیظ اکسید شد، سپس توسط آمونیوم فرو سولفات نیم نرمال در مجاورت معرف فناترولین با روش تیتراسیون اندازه گیری شد (۳۸). کربنات کلسیم معادل به روش پیچ و همکاران<sup>۲</sup> (۳۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش چاپمن<sup>۳</sup> (۱۳) اندازه گیری شد. وزن مخصوص ظاهری، از نمونه‌های خاک دست نخورده که توسط سیلندرهای استوانه‌ای جمع آوری شده بود، تعیین گردید (۹).

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تخلخل و ریز ساختمان افق سطحی خاک‌ها، در مجموع تعداد ۹ خاک رخ حفر شد (۲ خاک رخ در جنگل طبیعی، ۱ خاک رخ در جنگل مصنوعی سوزنی-برگ، باغ و رها شده و ۴ خاک رخ در اراضی زراعی (زراعی شیب دار و زراعی مسطح هر کدام ۲ خاک رخ) (شکل ۲). بعد از مشاهدات صحرائی و تعیین افق‌ها برای هر خاک رخ، از هر افق یک نمونه جهت انجام آزمایشات فیزیکی و شیمیایی و یک نمونه دست نخورده جهت مطالعات میکرومورفولوژی و تهیه تصویر، برداشته و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۰)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها<sup>۱</sup> (MWD) به روش الک مرطوب

2- Page et al.  
3- Chapman

1- Mean Weight Diameter



**Inclined CL (P1, P5): Ws, Bs, Lh**



**Flat CL (P2, P6): Fp, Ts, Pp**



**AF (P3): Ws, Bs, Lh**



**NF (P4): Ws, Bs, Lh**



**OR (P7): Ws, Bs, Lh**



**AL (P8): Ws, Bs, Lh**



**NF (P9): Ws, Bs, Lh**

شکل (۲) نمای کاربری‌های مختلف و خاکرخ‌های مورد مطالعه.

Figure (2) View of different land uses and studied pedons.

Inclined: شیب‌دار. Flat: مسطح. P: خاکرخ. Ws: شیب غربی. Bs: پشت شیب. Lh: تپه لسی. Fp: موقعیت مسطح. Ts: پنجه شیب. Pp: دشت دامنه‌ای.

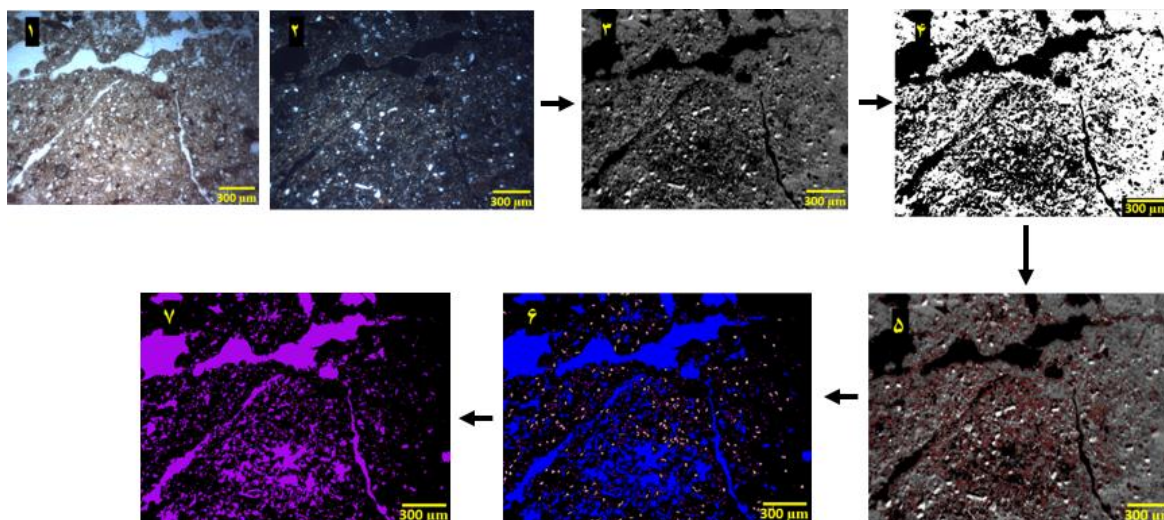
P: Profile. Ws: Western slope. Bs: Back slope, Lh: Loess hill. Fp: Flat position. Tp: Toe slope. Pp: Piedmont plain.

شود، با بزرگنمایی  $\times 40$ ، در دو نور PPL و XPL تهیه و به نرم‌افزار Image Tool منتقل شد (شکل ۳). سپس عکس‌ها کالیبره<sup>۴</sup> شده، به رنگ خاکستری<sup>۵</sup> درآمده و همپوشانی شدند. (دو تصویر گرفته شده در نور PPL و XPL در داخل نرم‌افزار همپوشانی<sup>۶</sup> شدند، به این ترتیب بخشی از ذرات کوارتز و گچ که در نور XPL روشن هستند و به رنگ سفید خاکستری دیده می‌شوند با تکنیک همپوشانی از حفرات جدا شدند و بخشی از این کانی‌ها که در حالت خاموشی بودند به روش دستی در نرم‌افزار در تصویر نهایی حذف گردیدند. در مواردی هم از تیغه کمکی<sup>۷</sup> برای تأیید تشخیص دقیق استفاده شد (۲۲).

نمونه‌های دست‌نخورده خاک به وسیله‌ی جعبه کوبینا از هر افق برداشته شد و در مجاورت هوا خشک شدند. نمونه‌ها با مخلوط استون و رزین پلی‌استر با افزودن کاتالیست در شرایط خلأ در دسیکاتور اشباع شده و در هوای آزاد طی چند هفته سخت شدند. مقاطع پس از برش و سایش و نصب روی لام، با سمباده و پودر کاربوران دوم به ضخامت ۳۰ میکرومتر تهیه شدند. مقاطع تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان، زیر نور پلاریزان معمولی<sup>۱</sup> (PPL) و متقاطع<sup>۲</sup> (XPL)، بر اساس تعاریف ارائه شده توسط استوپس<sup>۳</sup> (۴۷) به صورت کیفی مطالعه شدند. از هر مقطع تهیه شده تعداد ۲۰ عکس، به طوری که نماینده‌ای از توزیع مناسب حفرات در عکس‌ها ایجاد

4- Calibrate  
5- Grayscale  
6- Subtraction  
7- Gypsum Plate

1- Plane Polarized Light  
2- Cross Polarized Light  
3- Stoops



شکل (۳) مراحل آنالیز تصویر در نرم افزار Image Tool. ۱: تصویر زیر نور PPL. ۲: تصویر زیر نور XPL. ۳: کالیبره، خاکستری و همپوشانی کردن دو تصویر. ۴: محاسبه تخلخل کل (%). (رنگ سیاه، تخلخل کل را نشان می‌دهد). ۵: مشخص کردن تعداد کل حفرات (نقطه‌های قرمز رنگ) برای محاسبه مساحت و قطر معادل حفره. ۶: محاسبه مساحت حفرات (هر رنگ نشان دهنده‌ی یک کلاس مساحت حفره می‌باشد، برای مثال رنگ آبی کلاس  $> 1000$  میکرومتر مربع را نشان می‌دهد. ۷: محاسبه قطر معادل حفرات (هر رنگ نشان دهنده‌ی یک کلاس قطر معادل حفره می‌باشد برای مثال رنگ بنفش کلاس  $> 10$  میکرومتر را نشان می‌دهد).

**Figure (3) Process of image analysis in the image tool software. 1: The image under PPL. 2: The image under XPL. 3: Calibration, grayscale and subtraction of two images. 4: Calculation of the total porosity (%) (Black color shows total porosity). 5: Specification of the total number of voids (Red points) for calculation of area and feret diameter. 6: calculating the area of the voids (Each color indicates an area class of the void, for example, blue show class of  $> 1000 \mu\text{m}^2$ ). 7: calculating feret diameter of the voids (Each color indicates a feret diameter class of the void, for example, purple shows class of  $> 10 \mu\text{m}$ )**

طبقه‌بندی نرم‌افزار، بالاترین حد کلاس در هر بخش تعیین شد و درصد حفره‌ها در هر یک از کلاس‌ها محاسبه و از نرم-افزار SPSS 16.0 برای انجام مقایسه میانگین بین داده‌های به دست آمده استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه و نام علمی خاک‌ها تا سطح زیر گروه، بر اساس سیستم رده‌بندی آمریکایی (۴۶) در جدول ۱ نشان داده شده است. با تغییر کاربری از جنگل به زراعی pH خاک افزایش پیدا کرده است. در کاربری‌های باغ، رها شده و زراعی، تغییر

پس از همپوشانی دو عکس، محدوده حفره‌ها توسط نرم‌افزار مشخص شد. پارامترهای درصد تخلخل کل<sup>۱</sup>، مساحت<sup>۲</sup> و قطر معادل حفره<sup>۳</sup> به طور کمی مورد مطالعه قرار گرفت. برای حفره‌های تقریباً کروی می‌توان فاکتور قطر معادل حفره تعریف کرد. قطر معادل حفره عبارت است از قطر دایره‌ای که مساحتی مشابه با مساحت حفره مورد نظر اشغال می‌کند. ۳ کلاس قطر معادل حفره بر حسب میکرومتر و ۵ کلاس مساحت بر حسب میکرومتر مربع برای حفره‌های موجود در مقاطع نازک خاک در نظر گرفته شد (۳۲). سپس در بخش

- 
- 1- Total Porosity
  - 2- Area
  - 3- Feret Diameter



بیشترین درجه شیب که همراه با بیشترین میزان فرسایش می‌باشد، وجود دارد.

خرمالی و همکاران (۲۴) با مطالعه ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی روی شاخص‌های کیفیت خاک در خاک-های لسی استان گلستان دریافتند، قطع کامل جنگل و به تبع آن کشت و کار در ۵۰ سال گذشته روی اراضی تپه ماهوری لسی منجر به کاهش بیش از ۷۰ درصد ماده آلی و کاهش کیفیت خاک شده است، در حالی که جنگل‌کاری مجدد این اراضی تخریب‌شده با زیتون و سرو باعث افزایش بیش از ۵۰ درصد ماده آلی و بهبود کیفیت خاک در مقایسه با اراضی زراعی گردیده است.

## ۲- میکرومورفولوژی

مشاهدات میکرومورفولوژی مقاطع نازک افق سطحی کاربری‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۱-۲- ریزساختمان و حفرات

ریزساختمان و حفرات افق سطحی کاربری‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. در کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی، شرایط محیطی مناسب و پایدار و پوشش گیاهی انبوه، موجب افزایش ماده آلی افق سطحی خاک و ایجاد ریزساختمان غالب دانه‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار همراه با تخلخل زیاد شده است. نفوذ ریشه‌ی گیاهان و درختان در خاک و فعالیت زیاد میکروارگانیسم‌ها و جانوران خاک مانند کرم خاکی باعث ایجاد حفرات کانال با قطر زیاد و واگ‌های درشت می‌شود. وجود این نوع ریزساختمان و حفرات در افق سطحی کاربری جنگل مصنوعی که پس از جنگل‌تراشی مورد تخریب شدید واقع شده بود، نشان می‌دهد طرح کاشت درختان سوزنی‌برگ پس از گذشت ۴۰-۳۰ سال، موجب افزایش ماده آلی، بهبود ساختمان و ارتقاء کیفیت فیزیکی (افزایش میزان خاکدانه‌بندی و تشکیل ساختمان‌های مطلوب) افق سطحی خاک شده است. در جنگل طبیعی هاپلوزریتز، قطع برخی از درختان و تبدیل جنگل متراکم به نیمه‌متراکم موجب تخریب جزئی ریزساختمان خاک سطحی و تبدیل حفرات کانال به واگ‌های درشت شده است.

کاربری و جنگل‌تراشی، موجب فرسایش و کاهش ماده آلی افق سطحی نسبت به اراضی جنگلی شده است. در افق سطحی کاربری‌های جنگل طبیعی و باغ، درصد رس بیشتر و بافت خاک سنگین‌تر از سایر کاربری‌هاست. در اراضی زراعی شیب‌دار قطع درختان و انجام عملیات کشت و کار موجب تخریب ساختمان خاک و جاری شدن رواناب می‌شود و ذرات ریز خاک از سطح این اراضی شسته شده و به اراضی زراعی مسطح وارد می‌شود که موجب کاهش درصد رس و کربن آلی در افق سطحی این اراضی نسبت به اراضی زراعی مسطح می‌شود.

حمل و انتقال حجم زیاد مواد خاکی از موقعیت‌های با شیب بالاتر، سبب افزایش کربن آلی در موقعیت‌های با شیب کمتر شده است (۵۰). مجیری و همکاران (۳۴) با مطالعه تأثیر تغییر کاربری و موقعیت شیب روی ویژگی‌های کیفیت خاک در فریدون شهر اصفهان نتایج مشابه به دست آوردند. کمترین مقدار وزن مخصوص ظاهری در افق سطحی کاربری‌های جنگل طبیعی، مصنوعی و باغ و بیشترین مقدار آن در کاربری‌های زراعی و رها شده که تحت کشت و کار و خاک‌ورزی قرار گرفته‌اند، می‌باشد. در افق سطحی کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی، ماده آلی زیاد موجب تشکیل خاکدانه‌های درشت و MWD بیشتر نسبت به سایر کاربری‌ها می‌شود؛ در حالی که در کاربری باغ، رها شده و زراعی، کاهش ماده آلی افق سطحی در اثر جنگل‌تراشی و فرسایش خاک سطحی، موجب کاهش MWD می‌شود. انجام عملیات کشت و کار و خاک‌ورزی در کاربری‌های رها شده و زراعی موجب خرد شدن خاکدانه‌ها و کاهش بیشتر MWD افق سطحی می‌شود.

ایوبی و همکاران (۵) با مطالعه تأثیر توپوگرافی و تغییر کاربری اراضی بر خاکدانه‌سازی و کربن آلی خاک در غرب ایران گزارش کردند، به طور کلی بیشترین میزان خاکدانه‌سازی و تجمع کربن آلی در خاک‌های جنگل طبیعی قرار گرفته روی دامنه‌های شیب‌دار مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت زمین روی تثبیت کربن در محیط‌های طبیعی می‌باشد. کمترین میزان کربن آلی در

جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه  
 Table (1) Physical and chemical properties of the studied profiles

بافت	میانگین وزنی قطر خاکدانه	شن	سیلت	رس	وزن مخصوص ظاهری	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی	عمق (cm)	افق
Texture	MWD (mm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	BD (g.cm <sup>-3</sup> )	CCE (%)	OC (%)	pH	EC (ds.m <sup>-1</sup> )	Depth (cm)	Horizon
خاک‌رخ ۱: کاربری زراعی، تیپیک کلسی‌زریتر											
Profile1: CL, Typic Calcixerepts											
SiL	0.36	12.8	69.2	17.8	1.54	19	1.20	7.7	0.49	0-25	Ap
SiL	-	15	64.2	20.7	1.63	36	0.42	7.9	0.41	25-50	Bk1
SiL	-	15.7	66.4	17.8	1.63	35.5	0.27	8.0	0.31	50-80	Bk2
SiC	-	2.95	47.01	50.04	1.91	7.5	0.11	7.4	0.49	80-120	Btkb
خاک‌رخ ۲: کاربری زراعی، آکوئیک هاپلوزریتر											
Profile2: CL, Aquic Haploxerepts											
SiCL	0.23	7.1	63.5	29.2	1.47	9	1.63	7.7	0.69	0-20	Ap
SiC	-	1.4	57.8	40.7	1.78	14	1.48	7.7	0.59	20-45	Bg1
SiC	-	7.1	43.5	49.2	1.71	19	0.54	8.1	0.79	45-95	Bg2
SiCL	-	4.2	60.7	34.9	-	10	0.46	7.9	0.53	>95	Cg
خاک‌رخ ۳: کاربری جنگل مصنوعی، تیپیک کلسی‌زریتر											
Profile3: AF, Typic Calcixerepts											
SiCL	1.80	15.7	54.9	29.2	1.32	19.5	4.29	7.5	0.95	1-12	A
SiL	-	22.1	62.8	14.9	1.53	53.5	0.58	7.7	0.48	12-45	Bk
SiL	-	30.7	57.1	12.1	1.90	60.5	0.23	7.9	0.44	45-80	Bck
SiL	-	19.2	65.7	14.9	-	53	0.03	-	0.39	80-120	Crk
خاک‌رخ ۴: کاربری جنگل طبیعی، تیپیک کلسی‌زروئل											
Profile4: NF, Typic Calcixerolls											
SiCL	1.68	6.4	61.4	32.1	1.30	3.5	4.68	7.6	1.36	0-20	A
SiL	-	10	74.9	14.9	1.64	25.5	0.93	7.8	0.69	20-50	Bk1
SiL	-	15	64.2	20.7	1.62	32	0.46	7.7	0.46	50-85	Bk2
Si	-	10	80.7	9.2	1.56	24.5	0.46	7.8	0.80	85-130	Bck
خاک‌رخ ۵: کاربری زراعی، تیپیک کلسی‌زریتر											
Profile5: CL, Typic Calcixerepts											
SiL	0.47	6.4	67.1	26.4	1.52	16.5	1.24	7.8	0.46	0-22	Ap
SiL	-	13.5	74.2	12.1	1.59	35	0.07	7.8	0.27	22-65	Bk
SiL	-	12.8	77.1	9.9	1.53	33	0.23	7.6	0.46	65-90	Ck
SiL	-	15.7	72.1	12.1	1.63	27.5	0.03	7.9	0.56	>90	2Btb
خاک‌رخ ۶: کاربری زراعی، آکوئیک هاپلوزریتر											
Profile6: CL, Aquic Haploxerepts											
CL	0.25	20.7	49.9	29.2	1.48	13.5	1.56	7.6	0.77	0-20	Ap
SiCL	-	12.8	59.9	27.1	1.70	14	0.93	8	0.58	20-40	Bw
SiL	-	12.8	68.5	18.5	1.59	15	0.93	7.9	0.47	40-60	Bg1
SiCL	-	10	59.9	29.9	1.66	18	0.93	8	0.43	60-84	Bg2
SiL	-	18.5	59.9	21.4	1.65	27	0.15	7.9	0.45	84-102	2Ckg
خاک‌رخ ۷: کاربری باغ، تیپیک هاپلوزرالفر											
Profile7: OR, Typic Haploxeralfs											
SiC	0.76	9.2	49.9	40.7	1.40	3	1.71	6.8	0.60	0-22	Ap
C	-	1.4	39.9	58.5	1.87	3.5	0.46	6.6	0.39	22-60	Bt
C	-	10	39.9	49.9	1.87	4.5	0.54	6.5	0.25	>60	ABtb
خاک‌رخ ۸: کاربری رها شده، تیپیک هاپلوزرالفر											
Profile8: AL, Typic Haploxeralfs											
SiL	0.28	12.8	65.7	21.4	1.51	10.5	1.32	7.7	0.58	0-28	A
SiCL	-	10	54.2	35.7	1.86	7	0.42	7.4	0.37	28-40	ABt
SiC	-	6.4	52.8	40.7	1.70	2	0.11	7.1	0.90	40-75	Bt
SiL	-	24.2	63.5	12.1	1.77	17	0	7.8	0.43	75-110	Bk
خاک‌رخ ۹: کاربری جنگل طبیعی، تیپیک هاپلوزریتر											
Profile9: NF, Typic Haploxerepts											
SiCL	1.41	7.1	57.1	35.7	1.34	3.5	3.19	6.7	0.79	1-13	A
SiCL	-	12.8	57.1	29.9	1.78	1	0.78	7	0.7	13-42	Bw
SiL	-	13.5	62.8	23.5	1.72	10	0.78	7.8	0.53	42-80	Bk
SiL	-	12.8	69.2	17.8	1.78	21	0.54	7.8	0.51	80-120	Bck



جدول (۲) تشریح میکرومورفولوژی مقاطع نازک افق سطحی خاک‌رخی‌های مورد مطالعه  
 Table (2) Micromorphological description of thin sections of surface horizons of the studied profiles

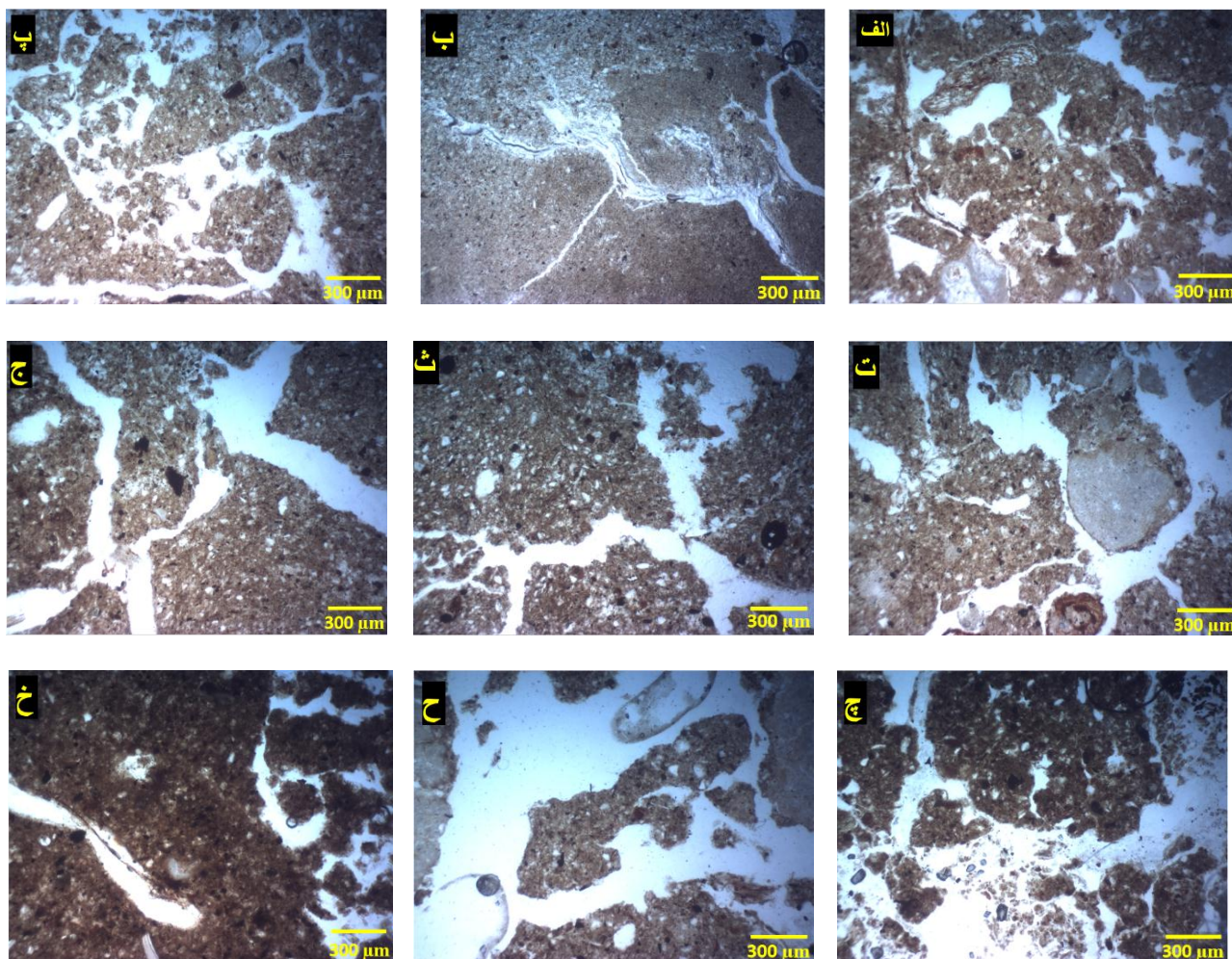
عوارض بیولوژیک** Biological Features	حفرات* voids	ریزساختمان** Microstructure	افق، کاربری، عمق (cm) Horizon, Land use. Depth (cm)
Ex (1 %), Nsc (5 %), Res (5 %), Omm (20 %)	Vu > Pn > Cp <sub>v</sub>	Gr (40 %), Vu (50 %), Ma (10 %)	AP- P1 (CL) 0- 25
Nsc (3 %), Pf (10 %), Res (15 %)	Pn > Vu > Ch and Chm (60 μm -1mm)	Ma (50 %), Ab (50 %)	Ap- P2 (CL) 0 - 20
Ex (15 %), Pf (50 %), Res (30 %), Omm (30 %)	Ch and Chm (100 μm-2 mm) > Vu > Pn = Cp <sub>v</sub>	Gr (20 %), Sb (60 %), Ma (20 %)	A- P3 (AF) 1 - 12
Ex (5 %), Pf (75 %), Res (35 %), Omm (30 %)	Ch and Chm (60μm-3mm) > Vu > Pn	Sb	A- P4 (NF) 0 - 20
Ex (1 %), Pf (10 %), Res (15 %), Omm (20 %)	Vu > Cp <sub>v</sub> > Ch and Chm (40-140 μm) > Pn	Gr (40 %), Ab (25 %), Ma (35 %)	Ap – P5 (CL) 0 - 22
Ex (1 %), Pf (10 %), Res (20 %)	Vu > Ch and Chm (20-200 - μm) > Cp <sub>v</sub> > Pn	Gr (20 %), Ma (50 %), Sb (30 %)	Ap – P6 (CL) 0 - 20
Ex (7 %), Pf (15 %), Res (20 %), Omm (25 %)	Ch and Chm (60μm-2 mm) > Vu > Pn	Ma (40 %), Vu (30 %), Sb (30 %)	Ap – P7 (OR) 0 - 22
Ex (1 %), Pf (10 %), Nsc (30 %), Cyc (3 %), Res (15 %), Omm (25 %)	Ch and Chm (20 μm-1.3 mm) = Vu > Pn	Ma (50 %), Sb (25 %), Vu (25 %)	A – P8 (AL) 0 - 28
Pf (15 %), Res (15 %), Omm (40 %)	Ch and Chm (20 μm-1 mm) > Vu = Pn > Cp <sub>v</sub>	Gr (30 %), Sb (30 %), Vu (40 %)	A – P9 (NF) 1 - 13

P: خاک‌رخ. Gr: دانه‌ای. Ab: مکعبی زاویه‌دار. Sb: مکعبی نسبتاً زاویه‌دار. Ma: توده‌ای. Cp<sub>v</sub>: حفرات آرایشی مرکب. Ch: کانال. Chm: حجره‌ای. Vu: حفرات واگ و ریزساختمان واگی. Pn: صفحه‌ای. Ex: فضولات جانوری. Nsc: کلسیت سوزنی شکل. Res: بقایای آلی. Omm: لکه‌های ماده آلی. Pf: مسیره‌های عبور و مرور جانوران. Cyc: کلسیت سیتومورفیک. \* اعداد داخل پرانتز قطر حفرات کانال و حجره‌ای را نشان می‌دهند. \*\* اعداد داخل پرانتز فراوانی نسبی هر یک از عوارض خاک‌ساز در داخل زمینه را نشان می‌دهند.

P: Profile. Gr: granular. Ab: Angular blocky. Sb: Subangular blocky. Ma: Massive. Cp<sub>v</sub>: Compound packing void. Ch: channel. Chm: chamber. Vu: vugh voids and vughy microstructure. Pn: Plane. Ex: Excremental. Nsc: Needle-shaped calcite. Res: Organic Residues. Omm: Organic matter mottles. Pf: Passage features. Cyc: Cytomorphic calcite.

\*Numbers in parentheses show the diameter of channel and chamber voids.

\*\*Numbers in parentheses show the relative abundance of each pedofeature in the groundmass.



شکل (۴) ریزساختمان و حفرات کاربری‌های مختلف. الف: ریزساختمان دانه‌ای، واگی و توده‌ای و حفرات غالب واگ در کاربری زراعی (خاک‌رخ ۱). PPL. ب: ریزساختمان توده‌ای و مکعبی زاویه‌دار و حفرات صفحه‌ای در کاربری زراعی (برنج). PPL. پ: ریزساختمان دانه‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات کانال در کاربری جنگل مصنوعی. PPL. ت: ریزساختمان مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات کانال و حجره‌ای در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۴). PPL. ث: ریزساختمان واگی و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات واگ و کانال در کاربری باغ. PPL. ج: ریزساختمان توده‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات واگ و کانال در کاربری رها شده. PPL. چ: ریزساختمان دانه‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات واگ و کانال در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۹). PPL. ح: حفرات کانال با قطر زیاد در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۴). PPL. خ: حفرات کانال با قطر کم در کاربری زراعی (خاک‌رخ ۵). PPL.

Figure (4) Microstructure and voids of different land uses. a: Granular, vughy and massive microstructure and dominant vugh voids in CL land use (P1). PPL. b: Angular blocky and massive microstructure and plane voids in CL land use (rice). PPL. c: Granular and subangular blocky microstructure and channel voids in AF land use. PPL. d: Subangular blocky microstructure and channel and chamber voids in NF land use (P4). PPL. e: Vughy and subangular blocky microstructure and channel and vugh voids in OR land use. PPL. f: Massive and subangular blocky microstructure and channel and vugh voids in AL land use. PPL. g: Granular and subangular blocky microstructure and channel and vugh voids in NF land use (P9). PPL. h: Channel pores with large diameter in NF land use (P4). PPL. i: Channel pores with small diameter in CL land use (P5). PPL.

ایران نشان داد که خاک سطحی تحت پوشش جنگل طبیعی به طور عمده شامل ریزساختمان اسفنجی با تخلخل بالا، عوارض خاک ساز ناشی از فضولات جانوری<sup>۱</sup> و مسیرهای عبور و مرور موجودات زنده<sup>۲</sup> در خاک می باشد که نشان دهنده ی کربن آلی بالا و فعالیت زیستی زیاد در خاک جنگل طبیعی است؛ در صورتی که در اراضی زراعی، کشت و زرع موجب تخریب خاکدانه های درشت و ایجاد ساختمان مکعبی با تخلخل کم می شود. مطالعه شواهد پدولوژیک و میکرومورفولوژیک عجمی و خرمالی (۲۳) در رابطه با تخریب اراضی جنگل تراشی شده لسی در شرق استان گلستان نشان داد که ریزساختمان خاک سطحی جنگل عمدتاً از نوع دانه ای و اسفنجی است. این امر ناشی از وجود مواد آلی به مقدار زیاد و فعالیت قابل توجه جانوری است. جنگل تراشی و انجام عملیات کشاورزی در منطقه مجاور موجب هدررفت شدید ماده آلی خاک شده، به طوری که ریزساختمان خاک به انواعی از ساختارهای متراکم و توده ای با تخلخل بسیار کم تبدیل شده است.

## ۲-۲- عوارض بیولوژیک

عوارض بیولوژیک افق سطحی کاربری های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. با تغییر کاربری از جنگل طبیعی به زراعی، درصد فضولات جانوری، مسیرهای عبور و مرور جانوران، تجمع ماده آلی و بقایای گیاهی و جانوری در افق سطحی خاک کاهش می یابد. در کاربری جنگل طبیعی، حضور پوشش گیاهی طبیعی و همچنین وجود میکروارگانیسم ها و جانوران در خاک و نیز عدم زیر و رو شدن خاک و اکسید شدن بقایا، موجب افزایش ماده آلی، فضولات جانوری و مسیرهای عبور و مرور جانوران در خاک سطحی می شود، در صورتی که در اراضی زراعی، جنگل تراشی، انجام عملیات زراعی و نیز زیر و رو شدن خاک و اکسید شدن بقایای آلی،

با تغییر کاربری از جنگل به زراعی، خصوصاً زراعی زیر کشت برنج، ریزساختمان و حفرات خاک سطحی تخریب و از درصد و قطر حفرات کانال کاسته شده و به درصد حفرات صفحه ای و واگ های ریز و درشت افزوده شده است. در اراضی زراعی شیب دار، ریزساختمان افق سطحی خاک عمدتاً از نوع دانه ای، مکعبی زاویه دار و توده ای و حفرات خاک نیز غالباً از نوع واگ و صفحه ای می باشد. جنگل تراشی و انجام عملیات کشت و کار و خاک ورزی، موجب تخریب ساختمان خاک، خرد شدن خاکدانه ها و تسریع فرسایش مواد آلی و رس خاک، با هر بار بارندگی و جاری شدن رواناب می شود. تخریب ساختمان و خرد شدن خاکدانه ها موجب پر شدن جزئی یا کامل حفرات از خاک و از بین رفتن یا کاهش حفرات درشت و افزایش حفرات ریز می شود. در اراضی زراعی مسطح که زیر کشت برنج قرار گرفته اند، غرقاب کردن زمین و انجام عملیات خاک ورزی به منظور آماده سازی زمین برای کشت، موجب گل خرابی و تخریب بیشتر ساختمان و خاکدانه های خاک و ایجاد ریزساختمان غالب توده ای و حفرات واگ و صفحه ای در افق سطحی می شود. در کاربری های باغ و رها شده، ریزساختمان غالب افق سطحی از نوع توده ای، واگی و مکعبی نسبتاً زاویه دار و حفرات غالب خاک از نوع کانال و واگ می باشد. در کاربری رها شده به علت این که پس از جنگل تراشی، برای مدتی تحت کشت و خاک ورزی قرار گرفته و سپس رها شده، در نتیجه ریزساختمان خاک تخریب و از درصد و اندازه حفرات کانال و واگ کاسته شده است. اما در کاربری باغ چون پس از جنگل تراشی، مورد کاشت درختان زیتون قرار گرفته است، میزان تخریب کمتر بوده و اکثر حفرات کانال به واگ های ریز و درشت و صفحه ای تبدیل شده اند.

مشاهدات میکرومورفولوژی ایوبی و همکاران (۵) در رابطه با مطالعه تأثیر توپوگرافی و تغییر کاربری اراضی روی خاکدانه سازی و کربن آلی خاک در غرب

خاک، درصد آهک در افق‌های سطحی بسیار ناچیز است. در صورتی که در کاربری رها شده به دلیل آبشویی کمتر، درصد آهک افق سطحی بیشتر از جنگل طبیعی است و توسط گیاهان و قارچ‌ها جذب می‌شود. در کاربری زراعی، کشت و کار و خاک‌ورزی موجب کاهش فعالیت قارچ‌ها و گیاهان می‌شود، بنابراین علی‌رغم وجود آهک زیاد در افق سطحی، تشکیل این فرم‌های کربنات کلسیم به مقدار بسیار ناچیز صورت می‌گیرد.

در کاربری زراعی به دلیل نبودن پوشش گیاهی پایدار، شرایط برای تشکیل این نوع کلسیت فراهم نشده است. بژدک و همکاران<sup>۱</sup> (۸) بیان داشتند که تشکیل کلسیت سوزنی شکل به بیومینرالیزاسیون در درون میسیلیوم قارچ‌ها ارتباط دارد و اشباع بودن محلول خاک با کاتیون  $Ca^{+2}$  در حفظ این فرم در خاک مؤثر است. این پژوهشگران وجود این فرم را بیان‌کننده رطوبت کافی در خاک و حضور مواد آلی تجزیه‌پذیر دانسته‌اند، به همین دلیل این فرم را در کاربری‌های دیگر نمی‌توان دید؛ بنابراین در کاربری جنگل طبیعی بلوط، به دلیل فعالیت قارچ‌ها در این شرایط، وجود کلسیت سوزنی شکل توجیه می‌شود.

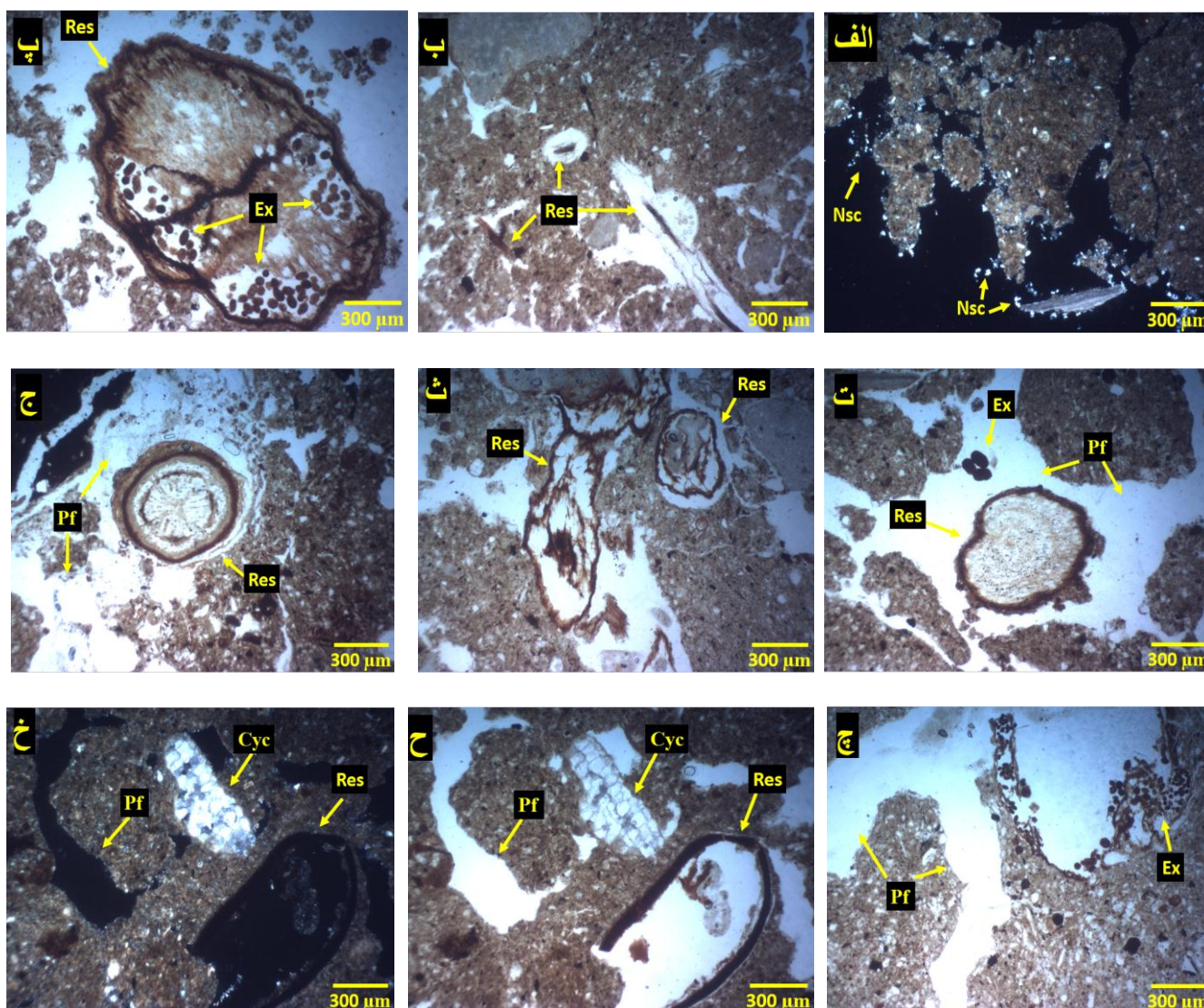
فعالیت بالای جانوری با حضور مقادیر فراوانی از فضولات جانوری و مسیرهای عبور و مرور موجودات زنده در خاک ثابت می‌شود (۱). از نشانه‌های وجود فعالیت بیولوژیک و جانوری در خاک‌های مرتع، جنگل طبیعی بلوط و جنگل مصنوعی سرو، وجود ریزساختمان-های کروی، عوارض خاک‌ساز بقایای جانوری و بقایای ریشه‌های گیاهی در داخل حفره‌هاست (۲۰). مطالعه آلوارز و همکاران<sup>۲</sup> (۲) در زمینه تجزیه کربن در خاک-های تحت مدیریت‌های متفاوت در جنوب شرقی بوئنس آیرس (آرژانتین) نشان می‌دهد که از دست دادن کربن آلی و شخم خاک در اراضی زراعی، منجر به کاهش فعالیت بیولوژیکی می‌شود.

موجب کاهش این عوارض در افق سطحی خاک می‌شود. کشت و کار در اراضی زراعی، جانوران خاک‌زی را تا حدود ۷۰ درصد از بین می‌برد (۷) و خاک‌ورزی موجب از بین رفتن مسیرهای عبور و مرور جانوران در خاک می‌گردد.

در کاربری جنگل مصنوعی، درصد فضولات جانوری و مسیرهای عبور و مرور جانوران و تجمع ماده آلی در افق سطحی خاک به مقدار زیادی مشاهده شد که نشان‌دهنده افزایش فعالیت بیولوژیک و کیفیت خاک پس از طرح کاشت درختان سوزنی‌برگ می‌باشد. در خاک سطحی کاربری‌های باغ و رها شده، درصد فضولات جانوری، مسیرهای عبور و مرور جانوران و تجمع ماده آلی، نسبت به کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی، کمتر و نسبت به اراضی زراعی بیشتر است که نشان می‌دهد پس از جنگل‌تراشی، درصد ماده آلی و فعالیت بیولوژیک در این دو کاربری کاهش یافته است؛ اما چون در کاربری باغ کشت و کار و خاک‌ورزی صورت نگرفته و در کاربری رها شده، مدت کمی کشت و کار انجام شده و سپس رها گردیده و کاهش کیفیت و فعالیت بیولوژیک خاک سطحی به میزان کمتری صورت گرفته است.

در کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی و باغ، اثری از فرم‌های بیولوژیک کلسیت در خاک سطحی مشاهده نشد؛ اما در افق سطحی اراضی زراعی، کلسیت سوزنی شکل به میزان ۳-۵٪ و در افق سطحی کاربری رها شده، کلسیت سوزنی شکل به میزان ۳۰٪ و کلسیت سیتومورفیک به میزان ۳٪ مشاهده شد. در کاربری جنگل طبیعی، وجود پوشش گیاهی دائمی و متراکم، موجب نفوذ قسمت عمده آب باران به داخل خاک و شسته شدن آهک از افق‌های سطحی و تجمع در عمق خاک رخ می‌شود، همچنین تنفس ریشه‌ی گیاهان و درختان و تولید گاز  $CO_2$  موجب انحلال بیشتر و تسریع شست و شوی آهک از افق‌های سطحی می‌شود؛ در نتیجه با وجود فعالیت زیاد میکروارگانیسم‌ها و قارچ‌ها و ریشه‌ی درختان در





شکل (۵) عوارض بیولوژیک در کاربری‌های مختلف. الف: کلسیت سوزنی‌شکل (Nsc) در کاربری زراعی (خاک‌رخ ۱)، XPL. ب: بقایای آلی (Res) اندک در کاربری زراعی (خاک‌رخ ۱)، PPL. پ: بقایای آلی (Res) همراه با فضولات جانوری (Ex) در کاربری جنگل مصنوعی، PPL. ت: بقایای آلی (Res)، فضولات جانوری (Ex) و مسیرهای عبور و مرور جانوران (Pf) در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۴)، PPL. ث: بقایای آلی (Res) زیاد در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۴)، PPL. ج: بقایای آلی (Res) و مسیرهای عبور و مرور جانوران (Pf) در کاربری باغ، PPL. چ: فضولات جانوری (Ex) و مسیرهای عبور و مرور جانوران (Pf) در کاربری جنگل طبیعی (خاک‌رخ ۹)، PPL. ح: کلسیت سیتومورفیک (Cyc)، بقایای آلی (Res) و مسیرهای عبور و مرور جانوران (Pf) در کاربری مرتع، PPL. خ: کلسیت سیتومورفیک (Cyc)، بقایای آلی (Res) و مسیرهای عبور و مرور جانوران (Pf) در کاربری مرتع، XPL.

Figure (5) Biological features in different land uses. a: Needle-shaped calcite (Nsc) in CL land use (P1), XPL. b: Low organic residues (Res) in CL land use (P1), PPL. c: Organic residues (Res) with excremental (Ex) in AF land use, PPL. d: Organic residues (Res), excremental (Ex) and passage features (Pf) in NF land use (P4), PPL. e: Many organic residues (Res) in NF land use (P4), PPL. f: Organic residues (Res) and passage features (Pf) in NF land use (P9), PPL. g: Excremental (Ex) and passage features (Pf) in OR land use, PPL. h: Cytomorphic calcite (Cyc), organic residues (Res) and passage features (Pf) in AL land use, PPL. i: Cytomorphic calcite (Cyc), organic residues (Res) and passage features (Pf) in AL land use, XPL.

رس موجب تشکیل خاکدانه‌های ریز (۰/۰۵ میلی‌متر) و در نتیجه افزایش خلل و فرج ریزتر می‌گردد (۳۵). در افق سطحی کاربری جنگل طبیعی، قطر حفره‌ها از کمتر ۲ تا بزرگتر از ۱۰ میکرومتر متغیر است؛ ولی بیشترین درصد منافذ خاک را حفرات با قطر ۲ تا بزرگتر از ۱۰ میکرومتر تشکیل می‌دهند. در افق سطحی کاربری‌های باغ و رها شده نیز بیشترین درصد حفرات، قطر ۲ تا بزرگتر از ۱۰ میکرومتر دارند؛ اما اندازه حفرات در کاربری جنگل طبیعی بزرگتر از باغ و رها شده است و دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشد. کاهش ماده آلی در اثر جنگل‌تراشی در کاربری‌های باغ و رها شده، به خصوص رها شده، موجب کاهش اندازه خاکدانه‌ها و حفرات و ریزتر شدن آن‌ها و افزایش درصد آن‌ها در مقایسه با جنگل طبیعی می‌شود.

این تأثیرات خاکدانه‌سازی را کاهش می‌دهد و بنابراین پایداری ساختمان این ساختارها در مقایسه با کاربری‌های دیگر مثل جنگل‌ها و مراتع طبیعی کاهش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند به دلیل استفاده مداوم از ماشین‌آلات کشاورزی بدتر شود. ریز ساختمان خاک سطحی جنگل عمدتاً از نوع دانه‌ای و اسفنجی است که این امر ناشی از وجود مقدار زیاد مواد آلی و فعالیت قابل توجه جانوری است.

### ۳- آنالیز تصویر

#### ۳-۱- مطالعه کمی قطر معادل حفره

مقایسه میانگین درصد و اندازه میانگین قطر معادل حفره‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. در کاربری جنگل طبیعی، ماده آلی زیاد و بالا بودن درصد رس باعث تشکیل خاکدانه‌های ریز و درشت و افزایش درصد حفرات ریز و درشت خاک می‌شود. افزایش مواد آلی باعث تشکیل خاکدانه‌های درشت (۰/۱ میلی‌متر) و خلل و فرج درشت می‌شود و افزایش میزان

جدول (۳) مقایسه میانگین درصد و اندازه میانگین حفره‌های به دست آمده با آنالیز تصویر در هر کلاس قطر معادل حفره.

Table (3) The average comparison of percentage and mean size of pores obtained by image analysis in each class of feret diameters pore.

میانگین اندازه حفره‌ها در هر کلاس قطر معادل حفره (μm)			میانگین درصد حفره‌ها در هر کلاس قطر معادل حفره			نوع کاربری	شماره خاک‌رخ Number of profiles
Mean size of the voids in each class of feret diameters pore (μm)	10>	2-10	Mean percentage of the voids in each class of feret diameters pore	10>	2-10		
32.5 <sup>ab</sup>	5.1 <sup>b</sup>	1.3 <sup>ab</sup>	7.4 <sup>d</sup>	8.8 <sup>cd</sup>	7.7 <sup>d</sup>	زراعی CL	1
31.0 <sup>bc</sup>	5.1 <sup>b</sup>	1.3 <sup>b</sup>	11.5 <sup>bc</sup>	12.7 <sup>b</sup>	16.4 <sup>a</sup>	جنگل مصنوعی AF	3
29.9 <sup>cd</sup>	5.1 <sup>b</sup>	1.3 <sup>ab</sup>	10.2 <sup>c</sup>	11.6 <sup>bc</sup>	12.2 <sup>bc</sup>	جنگل طبیعی NF	4
33.3 <sup>a</sup>	5.0 <sup>b</sup>	1.3 <sup>b</sup>	6.8 <sup>d</sup>	6.7 <sup>d</sup>	8.0 <sup>d</sup>	زراعی CL	5
28.5 <sup>d</sup>	5.1 <sup>ab</sup>	1.4 <sup>a</sup>	16.2 <sup>a</sup>	15.9 <sup>a</sup>	14.24 <sup>ab</sup>	باغ OR	7
29.6 <sup>cd</sup>	5.1 <sup>ab</sup>	1.3 <sup>ab</sup>	13.3 <sup>b</sup>	12.4 <sup>b</sup>	10.7 <sup>cd</sup>	رها شده AL	8
32.1 <sup>ab</sup>	5.2 <sup>a</sup>	1.3 <sup>b</sup>	13.3 <sup>b</sup>	10.7 <sup>bc</sup>	9.5 <sup>cd</sup>	جنگل طبیعی NF	9

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین کاربری‌ها در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Similar letters in each column represents nonsignificant difference between land uses at 5% probability level.

به هم می‌فشارد؛ در نتیجه حفره‌ها ممکن است در محل‌هایی با ذرات خاک پر شوند و یا یک حفره درشت به تعدادی حفره ریز تقسیم شود. در کاربری زراعی، قطر معادل حفره برای بیشتر حفره‌ها در محدوده کوچکتر از ۲ میکرومتر است و درصد دیگری از حفره‌ها نیز در محدوده ۱۰-۲ میکرومتر قرار دارند. نتایج به دست آمده از آنالیز تصویر تخلخل خاک توسط وایریو و لال<sup>۱</sup> (۴۹) نشان داد که در کاربری زراعی درصد حفره‌ها با قطری معادل با ۱۰ میکرومتر کمتر از سایر کاربری‌هاست در حالی که در جنگل و مرتع بیشتر می‌باشد. به عقیده این پژوهشگران اجرای عملیات زراعی سبب کاهش اندازه حفره‌ها می‌شود و به طور کلی اندازه حفره‌ها در جنگل و مرتع، بزرگ‌تر از خاک تحت خاک‌ورزی است.

### ۳-۲- مطالعه کمی مساحت حفره

مقایسه میانگین درصد و اندازه میانگین مساحت حفره‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. در کاربری جنگل طبیعی رشد و نفوذ ریشه‌ی گیاهان و درختان در خاک موجب افزایش معنی‌دار حفرات با مساحت زیاد، در مقایسه با سایر کاربری‌ها شده است و بیشترین درصد حفرات، دارای مساحت ۵۰۰ تا بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومتر-مربع می‌باشند. در حالی که در کاربری زراعی، کشت و خاک‌ورزی موجب کاهش معنی‌دار درصد و اندازه حفرات در مقایسه با کاربری جنگل طبیعی شده و بیشترین درصد حفرات خاک، مساحت کمتر از ۵ تا ۵۰ میکرومتر مربع دارند. در کاربری‌های باغ، رهاشده و جنگل مصنوعی، مساحت حفرات از کمتر از ۵ تا بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومتر مربع متغیر است و درصد حفرات در هر کلاس مساحت نسبتاً بالاست اما اندازه میانگین حفرات به طور معنی‌داری کمتر از جنگل طبیعی است. نتایج به دست آمده با نتایج وایریو و لال (۴۹) و گلب و کولیگ<sup>۲</sup> (۱۶) مطابقت دارد.

در کاربری جنگل مصنوعی، بیشترین درصد منافذ خاک را حفرات با قطر کمتر از ۲ تا ۱۰ میکرومتر تشکیل می‌دهند؛ اما به دلیل بالا بودن میزان ماده آلی در افق سطحی این کاربری، اندازه حفرات بزرگتر از ۱۰ میکرومتر، بزرگتر از کاربری‌های باغ و رها شده است و دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشد. با تغییر کاربری از جنگل به زراعی درصد حفرات ریز و درشت خاک سطحی به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است و بیشترین درصد حفرات دارای قطر معادل کمتر از ۲ و ۱۰-۲ میکرومتر می‌باشند. جنگل‌تراشی و انجام عملیات کشت و کار در اراضی زراعی، موجب تلفات شدید مواد آلی و ذرات رس و کاهش پایداری خاکدانه‌ها شده است. از طرفی خاک‌ورزی و تردد ماشین‌آلات سنگین موجب تخریب ساختمان خاک و خرد شدن خاکدانه‌ها و پر شدن منافذ درشت خاک و کاهش درصد آن‌ها و یا تبدیل آن‌ها به تعدادی حفرات ریزتر و افزایش درصد حفرات با قطر کم می‌شود.

در حقیقت عملیات خاک‌ورزی، حفره‌ها را به سمت ریزتر شدن پیش می‌برد، وجود حفره‌های ریز در خاک‌های تحت کشت و کار با افزایش مقدار آب در خاک و در نتیجه افزایش آب قابل دسترس برای گیاه مرتبط است (۴۱)؛ درحالی که حضور بیشتر ماده آلی و تشکیل خاکدانه‌ها در کاربری جنگل طبیعی سبب ایجاد بیشتر حفره‌های درشت نسبت به سایر کاربری‌ها شده که اثرات مفیدی روی نفوذ ریشه و حرکت آب دارد (۴۲).

میرکریمی و همکاران (۳۲) با مطالعه میکرومورفولوژیک تخلخل افق مالیک خاک‌های مالی-سولز جنوب گرگان‌رود تحت تأثیر کاربری‌های مختلف اراضی، دریافتند که اندازه حفره‌ها در کاربری جنگل و مرتع بسیار متنوع بوده و از کم‌تر از ۲ میکرومتر تا چند میلی-متر تغییر کرده است اما در نمونه‌های تحت کشت و کار، به خصوص در کاربری زراعی حفره‌های درشت بسیار کم است و حفره‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میکرومتر به ندرت یافت می‌شوند. درحقیقت در این اراضی وزن ناشی از ماشین‌های کشاورزی موجب فشردگی خاک شده و ذرات خاک را



جدول (۴) مقایسه میانگین درصد و اندازه میانگین حفره های به دست آمده با آنالیز تصویر در هر کلاس مساحت حفره  
**Table (4) The average comparison of percentage and mean size of pores obtained by image analysis in each class of areas pore**

میانگین اندازه حفره ها در هر کلاس مساحت حفره ( $\mu\text{m}^2$ )					میانگین درصد حفره ها در هر کلاس مساحت حفره					نوع کاربری	شماره خاکوخ Number of profiles
Mean size of the voids in each class of areas pore ( $\mu\text{m}^2$ ).					Mean percentage of the voids in each class of areas pore						
>1000	500-1000	50-500	5-50	5>	>1000	500-1000	50-500	5-50	5>	Land use	
33921.9 <sup>ab</sup>	701.1 <sup>b</sup>	170.7 <sup>ab</sup>	20.8 <sup>b</sup>	1.9 <sup>ab</sup>	6.1 <sup>f</sup>	7.1 <sup>c</sup>	8.0 <sup>cd</sup>	9.0 <sup>cd</sup>	7.8 <sup>d</sup>	زراعی CL	1
29902.7 <sup>abc</sup>	705.3 <sup>ab</sup>	171.5 <sup>ab</sup>	20.6 <sup>b</sup>	1.8 <sup>b</sup>	11.8 <sup>bc</sup>	10.9 <sup>b</sup>	11.7 <sup>b</sup>	12.5 <sup>b</sup>	16.1 <sup>a</sup>	جنگل مصنوعی AF	3
38448.0 <sup>a</sup>	704.5 <sup>ab</sup>	168.1 <sup>b</sup>	20.6 <sup>b</sup>	1.8 <sup>ab</sup>	9.3 <sup>cd</sup>	10.4 <sup>b</sup>	10.6 <sup>bc</sup>	11.6 <sup>bc</sup>	12.2 <sup>bc</sup>	جنگل طبیعی NF	4
39405.5 <sup>a</sup>	711.6 <sup>a</sup>	175.6 <sup>a</sup>	20.6 <sup>b</sup>	1.8 <sup>b</sup>	6.8 <sup>df</sup>	7.1 <sup>c</sup>	6.6 <sup>d</sup>	6.6 <sup>d</sup>	7.9 <sup>d</sup>	زراعی CL	5
16743.5 <sup>c</sup>	708.2 <sup>ab</sup>	171.8 <sup>ab</sup>	20.9 <sup>b</sup>	1.9 <sup>a</sup>	14.9 <sup>ab</sup>	16.4 <sup>a</sup>	16.5 <sup>a</sup>	15.9 <sup>a</sup>	14.4 <sup>ab</sup>	باغ OR	7
15053.7 <sup>c</sup>	712.1 <sup>a</sup>	174.6 <sup>a</sup>	20.8 <sup>b</sup>	1.9 <sup>ab</sup>	13.5 <sup>ab</sup>	13.2 <sup>b</sup>	13.1 <sup>b</sup>	12.4 <sup>b</sup>	10.8 <sup>cd</sup>	رها شده AL	8
19379.2 <sup>bc</sup>	709.8 <sup>ab</sup>	175.1 <sup>a</sup>	21.4 <sup>a</sup>	1.8 <sup>ab</sup>	16.2 <sup>a</sup>	13.5 <sup>ab</sup>	12.1 <sup>b</sup>	10.6 <sup>bc</sup>	9.5 <sup>cd</sup>	جنگل طبیعی NF	9

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی دار بین کاربری ها در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.  
 Similar letters in each column represents nonsignificant difference between land uses at 5% probability level.

خاکدانه‌سازی و افزایش خلل و فرج خاک شده است ولی با این حال اندازه حفرات کانال و سایر منافذ، در این کاربری کمتر از جنگل طبیعی می‌باشد. با تغییر کاربری از جنگل طبیعی به رها شده و زراعی، درصد تخلخل کل به طور معنی‌داری کاهش یافته است. در اراضی زراعی، جنگل تراشی و کشت و کار موجب کاهش ماده آلی و رس و نیز پایداری خاکدانه‌ها شده است، همچنین خاک‌ورزی و تردد ماشین‌آلات کشاورزی سنگین موجب فشردگی و تخریب ساختمان خاک، پراکنش منافذ و افزایش تراکم و وزن مخصوص ظاهری خاک شده است که تخلخل خاک را به میزان زیادی کاهش داده است. نتایج مطالعه راهب و حیدری (۴۳) در ارتباط با آنالیز تصویر حفرات در دو کاربری زراعی (شالیزار) و باغ، نمایانگر کاهش میزان حفرات، افزایش وزن مخصوص ظاهری و وجود سخت لایه شخم (لایه گل-خراب) در خاک‌های شالیزاری و وجود تخلخل بالاتر در باغات تحت کشت کیوی می‌باشد. مقدار حفرات کانالی و انشعابات آن‌ها، به دلیل عمق کم ریشه‌های شالی و نبود فعالیت بیولوژیکی شدید در اثر غرقاب سطحی، کاهش می‌یابد در حالی که فراوانی این نوع حفرات در کاربری باغ کیوی، گویای نفوذ بیشتر ریشه‌ی درختان در خاک و فعالیت بیولوژیکی و شرایط زهکشی مناسب‌تر می‌باشد که باعث افزایش تخلخل در این کاربری می‌شود. محمدی و همکاران (۳۳) با مطالعه حفرات در خاک‌های تراکم‌یافته و بدون تراکم جنگل با استفاده از آنالیز تصویر گزارش کردند، اندازه، شکل و متوسط حفرات در دو خاک بسیار متفاوت بوده، به گونه‌ای که تراکم باعث تخریب ساختمان اسفنجی خاک در مقاطع شاهد و تبدیل آن به ساختمان توده‌ای در مقاطع تراکم شده و از درصد تخلخل کل و حفرات درشت خاک کاسته شده و در مقابل درصد حفرات ریز افزایش یافته است.

پاگیلی<sup>۱</sup> (۴۰) با به کار بردن آنالیز تصویر نشان داد که وقتی کل حفره‌های درشت خاک (حفره‌های بزرگ‌تر از ۵۰ میکرومتر مربع) کمتر از ۱۰ درصد باشد، خاک متراکم و بین ۲۵-۱۰ درصد، تخلخل متوسط و مابین ۴۰-۲۵ درصد، خاک متخلخل و اگر بیشتر از ۴۰ درصد باشد، خاک کاملاً متخلخل است؛ بنابراین براساس طبقه‌بندی پاگیلی (۴۰) کاربری زراعی دارای تخلخل متوسط، کاربری‌های جنگل طبیعی مالی‌سولز<sup>۲</sup>، جنگل مصنوعی سوزنی‌برگ و رها شده متخلخل و جنگل طبیعی هاپلوزپتیز و باغ زیتون کاملاً متخلخل طبقه‌بندی می‌شوند.

### ۳-۳- مطالعه کتی درصد تخلخل کل

مقایسه میانگین درصد تخلخل کل افق سطحی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در جدول ۵ و مقایسه میانگین درصد تخلخل کل افق سطحی کاربری‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. بیشترین درصد تخلخل کل در افق سطحی کاربری‌های باغ و جنگل طبیعی مشاهده شد که دارای تفاوت معنی‌دار با سایر کاربرهاست. در کاربری جنگل طبیعی وزن مخصوص ظاهری کم و ماده آلی و رس بالا موجب تشکیل خاکدانه‌ها و منافذ ریز و درشت فراوان می‌شود. از سوی دیگر وجود حفرات کانال با قطر زیاد و واگ‌های درشت در این کاربری موجب افزایش تخلخل خاک می‌شود. در کاربری باغ، کاهش ماده آلی به دلیل جنگل تراشی موجب تخریب جزئی ریزساختمان و تبدیل حفرات کانال به واگ‌های ریز و درشت شده است؛ اما درصد رس زیاد موجب افزایش درصد خاکدانه‌ها و خلل و فرج ریز خاک می‌شود، همچنین پس از احداث باغ، رشد ریشه‌ی درختان موجب ایجاد حفرات کانال و افزایش تخلخل خاک شده است.

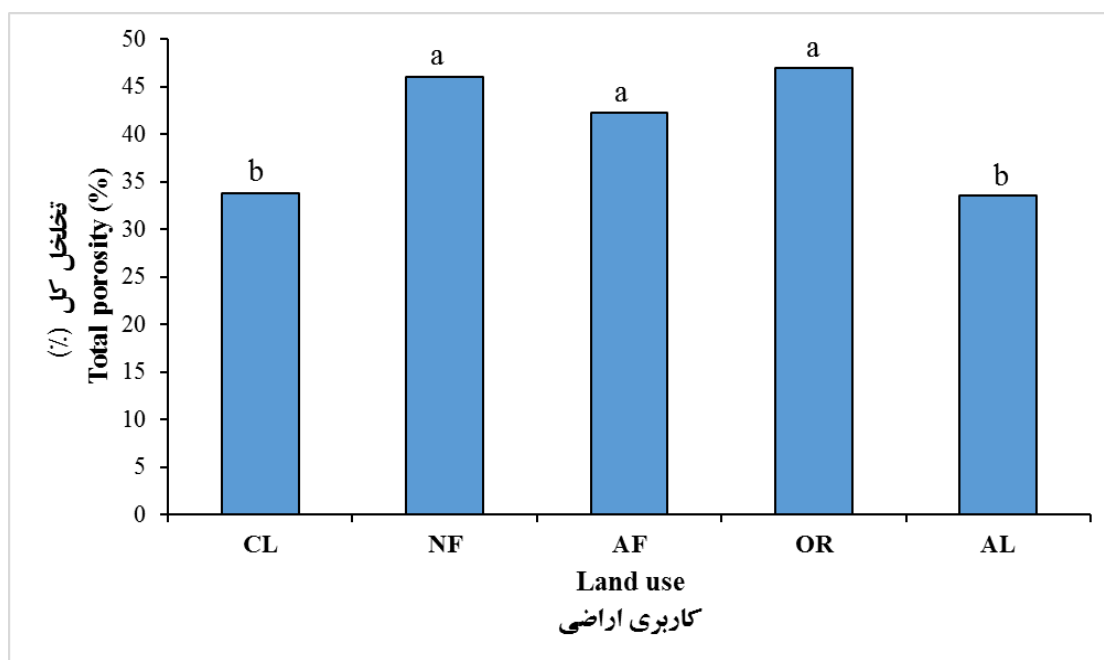
کاربری جنگل مصنوعی دارای تخلخل کمتری نسبت به کاربری‌های باغ و جنگل طبیعی می‌باشد اما تفاوت معنی‌داری ندارد که نشان می‌دهد طرح کاشت درختان سوزنی‌برگ موجب افزایش ماده آلی و

جدول (۵) مقایسه میانگین تخلخل کل (%) خاک سطحی خاکریزهای مورد مطالعه  
**Table (5) The average comparison the total porosity (%) of surface soil in studied profiles**

تخلخل کل (%) Total porosity (%)	نوع کاربری Land use	شماره خاکریز Number of profile
36.73 <sup>bc</sup>	زراعی CL	1
42.29 <sup>ab</sup>	جنگل مصنوعی AF	3
45.16 <sup>a</sup>	جنگل طبیعی NF	4
30.79 <sup>c</sup>	زراعی CL	5
46.97 <sup>a</sup>	باغ OR	7
33.50 <sup>c</sup>	رها شده AL	8
46.80 <sup>a</sup>	جنگل طبیعی NF	9

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی دار بین کاربریها در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

Similar letters in each column represents nonsignificant differences between land uses at 5% probability level.



شکل (۶) میانگین تخلخل کل (%) در کاربریهای متفاوت.

**Figure (6) Average total porosity (%) in different land uses.**

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم اختلاف معنی دار بین کاربریها در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

Similar letters in each column represents nonsignificant differences between land uses at 5% probability level

### نتیجه گیری

مشاهدات میکرومورفولوژی نشان می‌دهد که در افق سطحی کاربری‌های جنگل طبیعی و مصنوعی، مقادیر بالای ماده آلی و رس موجب خاکدانه‌سازی و تشکیل ریزساختمان غالب دانه‌ای و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار همراه با تخلخل زیاد شده است. همچنین رشد و نفوذ ریشه‌ی درختان و حرکت جانوران خاک مانند کرم‌های خاکی باعث ایجاد حفرات غالب کانال و واگ‌های درشت و نیز افزایش بقایا، فضولات جانوری و مسیرهای عبور و مرور جانوران می‌شود. در حالی که در کاربری زراعی جنگل تراشی و عملیات کشت و کار و خاک‌ورزی، موجب کاهش ماده آلی و عوارض بیولوژیک و نیز تخریب ریزساختمان و حفرات خاک سطحی می‌شود. ریزساختمان افق سطحی اراضی زراعی عمدتاً از نوع توده‌ای و مکعبی زاویه‌دار همراه با حفرات غالب واگ و صفحه‌ای می‌باشد. در کاربری‌های باغ و رها شده نیز جنگل تراشی و کاهش ماده آلی خاک موجب تخریب ریزساختمان و حفرات خاک شده است و ریزساختمان غالب افق سطحی از نوع توده‌ای، واگی و مکعبی نسبتاً زاویه‌دار و حفرات غالب خاک از نوع کانال و واگ می‌باشد. در کاربری رها شده به دلیل این که برای مدتی تحت کشت قرار گرفته میزان تخریب بیشتر است. نتایج

حاصل از آنالیز تصویر نشان داد که بیشترین درصد تخلخل کل مربوط به افق سطحی کاربری‌های جنگل طبیعی و باغ می‌باشد. در کاربری جنگل مصنوعی نیز میزان تخلخل کل خاک سطحی زیاد است و با کاربری‌های باغ و جنگل طبیعی تفاوت معنی‌داری ندارد؛ در صورتی که در کاربری‌های رها شده و زراعی به دلیل کشت و کار و خاک‌ورزی، درصد خلل و فرج درشت و تخلخل کل افق سطحی خاک کاهش یافته است و دارای تفاوت معنی‌دار با کاربری‌های باغ و جنگل طبیعی و مصنوعی می‌باشد. در کاربری‌های جنگل طبیعی و باغ، بیشترین درصد منافذ خاک را حفرات با قطر ۲ تا بزرگتر از ۱۰ میکرومتر و مساحت ۵۰۰ تا بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومترمربع تشکیل می‌دهند و جزء خاک‌های کاملاً متخلخل محسوب می‌شوند؛ اما در کاربری زراعی به دلیل خاک‌ورزی و تخریب منافذ درشت، بیشترین درصد منافذ خاک را حفرات با قطر کمتر از ۲ تا ۱۰ میکرومتر و مساحت کمتر از ۵ تا ۵۰ میکرومترمربع تشکیل می‌دهند و جزء خاک‌های با تخلخل متوسط محسوب می‌شود. کاربری‌های جنگل مصنوعی و رها شده جزء خاک‌های متخلخل محسوب می‌شوند.

### منابع

1. Adesodun, J.K., Davidson, D.A., and Hopkins, D.W. 2005. Micromorphological evidence for faunal activity following application of sewage and biocide. *Applied Soil Ecology*, 29: 39-45.
2. Alvarez, C., Alvarez, C.R., Costantini, A., and Basanta, M. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil and Tillage Research*, 142: 25-31.
3. Arnhold, S., Otieno, D., Onyango, J., Koellner, T., Huwe, B., and Tenhunen, J. 2015. Soil properties along a gradient from hillslopes to the savanna plains in the Lambwe Valley, Kenya. *Soil and Tillage Research*, 154: 75-83.

4. Ayoubi, S., Emami, N., Ghaffari, N., Honarjoo, N., and Sahrawat, K.L. 2014. Pasture degradation effects on soil quality indicators at different hillslope positions in a semiarid region of western Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(1): 375-381.
5. Ayoubi, S., Mokhtari Karchegani, P., Mosaddeghi, M.R., and Honarjoo, N. 2012. Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil and Tillage Research*, 121: 18-26.
6. Ayoubi, S., Khormali, F., Sahrawat, K.L., and Rodrigues de Lima, A.C. 2011. Assessing impact of land use change on soil quality indicators in a loessial soil in Golestan province, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13: 727-742.
7. Bastrom, U. 1995. Earthworm population (Lumbricidae) in ploughed and undisturbed soils. *Soil and Tillage Research*, 35: 125-133.
8. 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.
9. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 363-375.
10. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
11. Brewer, R. 1976. *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. Krieger, New York, USA. pp: 482.
12. Bruun, T.B., Elberling, B., Neergaard, A., and Magid, J. 2015. Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation and Development*, 26(3): 272-283.
13. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 891-901.
14. Da Costa, P.A., Mota, J.C.A., Romero, R.E., Freire, A.G., and Ferreira, T.O. 2014. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. *Soil and Tillage Research*, 137: 23-32.
15. Glab, T. 2007. Application of image analysis for soil macropore characterization according to pore diameter. *International Agrophysics*, 21: 61-66.
16. Glab, T., and Kulig, B. 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat. *Soil and Tillage Research*, 99: 169-178.
17. Hall, T.B., Rosillo-Calle, F., Williams R.H., and Woods. J. 1993. Biomass for energy: supply prospects. In: Hall, T.B., Kelly, H. A. K. N. Reddy and R. H.

- Williams, (ed.), *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Island Press, Washington D.C. pp: 593–651.
18. Heidari, A., and Mahmoudi, Sh. 2005. Image analysis using in soil micromorphology, 9th Iranian Soil Science congress, Karaj. (In Persian)
  19. 19- Jiang, S., Kang, Y., and Sun, Z. 2004. A digital image method for analysis of soil pores. In: Chunjiang, Z. (ed.). *Computer and Computing Technologies in Agriculture II*, Volume 2, Springer. pp: 1029-1038.
  20. Kemp, R.A., Toms, P.S., Sayago, J.M., Derbyshire, E., King, M., and Wagoner, L. 2003. Micromorphology and OSL Dating of the basal part of the loess-paleosol sequence at La Mesada in Tucuman province, Northwest Argentina. *Quaternary International*, 106: 111-117.
  21. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 425-442.
  22. Khormali, F. 2005. Application of image analysis and microscopic methods for estimation of porosity and gypsum in Gypsiferous soils. 9th Iranian Soil Science congress, Karaj. (In Persian)
  23. Khormali, F., and Ajami, M. 2011. Pedogenetic investigation of soil degradation on a deforested loess hillslope of Golestan Province, Northern Iran. *Geoderma*, 167: 274-283.
  24. Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C.H., and Wani, S.P. 2009. Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan Province, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134: 178–189.
  25. 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.
  26. Kodesova, R. 2009. Soil micromorphology use for modeling of a non equilibrium water and solute movement. *Plant, Soil and Environment*, 55: 424–428.
  27. Kubiena, W.L. 1938. *Micropedology*. Collegiate Press, Ames, USA. p: 242.
  28. Lipiec, J., Hajnos, M., and Ewieboda, R. 2012. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, 179: 20–27.
  29. Lu, S.G., Malik, Z., Chen, D.P., and Wu, C.F. 2014. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. *Catena*, 123:79-87.
  30. Mahmoodabadi, S.S., and Khormali, F. 2011. Micromorphology of the Loess Derived Soils Affected by Land Use Change: A Case Study in Agh-Su Area (Golestan Province). *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and*

- Technology of Agriculture and Natural Resources), 55: 111-125. (In Persian with English Abstract).
31. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A.L. (ed.): Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 199-224.
  32. Mirkarimi, M., Khormali, F., Kiani, F., and Akef, M. 2011. Micromorphological investigation of mollic epipedon porosity in Mollisols of the southern Gorgan River under different land uses. *Journal of water and soil conservation*, 18(1): 181-197. (In Persian with English Abstract).
  33. Mohammadi, Z., Akef, M., Naghdi, R., Bagheri, I., and Sayyadi, A.R. 2011. Comparison of voids in forest soils with compaction and no compaction using image analysis. 12th Iranian Soil Science congress, Tabriz (In Persian with English Abstract).
  34. Mojiri, A., Kazemi, Z., and Amirossadat, Z. 2011. Effects of land use changes and hillslope position on soil quality attributes (A case study: Fereydoonshahr, Iran). *African journal of Agricultural Research*, 6(5): 1114-1119.
  35. Movahedi Naeini, AR., and Rezaei, M. 2008. *Soil Physics (Fundamentals and Application)*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. p: 474.
  36. Munkholm, L.J., Heck, R.J., and Deen, B. 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma*, 181: 22-29.
  37. Murphy, C.P., Bullock, P., and Turner, R.H. 1977. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I: Principles and techniques. *Journal of Soil Science*, 28: 498-508.
  38. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Buxton, D.R. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 539-579,
  39. Page, M.C., Sparks, D.L. Noll, M.R., and Hendricks, G.J. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Science Society America Journal*, 51: 1460-1465.
  40. Pagliai, M. 1988. Soil porosity aspects. *International Agrophysics*, 4(3): 215-232.
  41. Pagliai, M., Rousseva, S., Vignozzi, N., Piovaneli, C., Pellegrini, S., and Miclaus, N. 1998. Tillage Impact on Soil Quality. 1: Soil Porosity and Related Physical Properties. *Italian Journal. Agronomy*, 2: 11-20.
  42. Pagliai, M., and Vignozzi, N. 2002. The soil pore system as an Indicator of soil quality. *Sustainable Land Management-Environmental Protection, Advance in Geoecology*. 35: 69-80.



43. Raheb, A.R., and Heidari, A. 2014. Micromorphological studies of soils with aquic conditions by image analysis. *Journal of water and soil conservation. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 21(3): 123-143. (In Persian with English Abstract)
44. Rasa, K., Eickhorst, T., Tippkötter, R., and Yli-Halla, M. 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma*, 173: 10-18.
45. Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts In: A.L. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 167-179.
46. Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. p: 370.
47. Stoops, G. 2003. *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. p: 184.
48. Verrecchia, E.P., and Verrecchia, K.E. 1994. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research*. 64(3): 650-664.
49. Wairiu, M., and Lal, R. 2006. Tillage and land use effects on soil microporosity in Ohio, USA and Kolombangara, Solomon Islands. *Soil and Tillage Research*, 88: 80-84.
50. Wilding, N.E., Smeck, A., and Hall, G.F., 1982. *Pedogenesis and Soil Taxonomy. II. The Soil*
51. *Orders. Developments in Soil Science*. Elsevier. p: 410.