

بررسی کمی ویژگی‌های هندسی خلل و فرج خاک با استفاده از روش رنگ آمیزی فلورسنت

آیدا بخشی خرمدره^۱، احمد حیدری^{۲*}، محمدحسن محمدی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران

۲. استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۲۳)

چکیده

تخلخل خاک در پیدایش و کنترل فرایندها، برهمکنش با محیط و نگهداشت و انتقال آب و املاح نقش اصلی را بر عهده دارد. در روش‌های مرسوم خصوصیات ناهمگن اجزاء تشکیل دهنده تخلخل خاک، با اعمال یک سری فرضیات از قبیل فعال و کروی همه حفرات ساده‌سازی می‌شوند. روش میکرومورفولوژی با مشاهده‌ی مستقیم و تعیین خصوصیات هندسی حفرات خاک امکان توصیف دقیق‌تری از خلل و فرج خاک فراهم می‌آورد. هدف از این مطالعه استفاده از روش رنگ‌آمیزی فلورسنت در کمی‌سازی خصوصیات هندسی خلل و فرج خاک می‌باشد. ۳۹ نمونه خاک دست نخورده با مخلوط رزین-استون حاوی ماده فلورسنت تلقیح، خشکانده و برش داده شدند. سپس با روش تصویر برداری متوالی زیر نور فرابنفش، ۴۰ تصویر رقومی از هر نمونه تهیه شد. تصاویر توسط نرم‌افزار Image Tool آستانه‌بندی و حفرات با رنگ روشن از بخش جامد تفکیک شدند. حفرات بر اساس مساحت، محیط، کشیدگی، فشردگی، گردشگی، قطر معادل، قطر بزرگ و همچنین قطر کوچک کلاس‌بندی شدند. نتایج عددی به صورت فایل Excel از نرم‌افزار استخراج و تعداد و درصد حفرات در هر کلاس تعیین شد. حفرات با مساحت کمتر از ۱۰۰ میکرومترمربع در لایه شخم (> 35 سانتی‌متر) کمتر از ۱۶٪ تخلخل بود که در کفه شخم به بیش از ۲۹٪ رسید. حفرات با مساحت بیش از ۱۰۰ میکرومترمربع در لایه شخم به بیش از ۸۰٪ تخلخل کل بالغ گردیدند. کلاس غالب از نظر فشردگی خاک در همه اعماق کلاس ۰/۵-۰/۳ بود و حداکثر آن (۵۶/۹۴٪) در عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر به دست آمد. کشیده‌ترین حفرات (کلاس ۰/۱) در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متر به دست آمد که در عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متری به حداقل خود (۲۳/۸٪) کاهش یافت. از نظر گردشگی بیش از ۵۵ درصد حفرات دارای شاخص گردشگی ۰/۱-۰/۵ بودند. بر اساس پارامترهای قطر معادل، قطر بزرگ و قطر کوچک فراوانی حفرات ریز، متوسط و درشت تعیین گردیدند. نتایج نشان داد روش میکرومورفولوژی در مطالعات تخلخل و شکل حفرات بسیار توانمند است و ثابت نمود که فرضیات اعمال شده در مورد شکل حفرات خاک در روابط فیزیکی با واقعیت‌های موجود اختلاف قابل توجهی دارند و باید اصلاح شوند.

واژه‌های کلیدی: تخلخل خاک، میکرومورفولوژی، رنگ‌آمیزی فلورسنت، نور فرابنفش، محیط متخلخل.

مقدمه

کیفیت و پایداری ساختمان خاک یکی از مهم‌ترین خصوصیات پویای خاک است که نحوه‌ی رخداد بسیاری از پدیده‌های مهم در تشکیل خاک به آن وابسته است. به عبارتی بین خصوصیات ساختمان خاک و آنچه در خاک روی می‌دهد برهم‌کنش‌های مستقیم و غیر مستقیمی وجود دارد که موجب بروز تغییرات در ویژگی‌های خاک و رفتار آن در فرایندهای مختلف می‌شود (Schoonover, 2015). حفرات مهم‌ترین بخش ساختمان خاک به حساب می‌آیند که در فرایندهای نگهداری و انتقال آب و

املاح، توسعه‌ی ریشه در عمق پروفیل، تنفس جمعیت میکروبی و واکنش خاک نقش مهمی بر عهده دارند (Tuller and Or, 2004).

مورفولوژی و ارتباط حفرات با یکدیگر از گذشته مورد توجه محققین بوده است. شکل حفرات با پدیده‌های مختلف مرتبط می‌باشد که اطلاع از آن‌ها می‌تواند تناسب خاک مورد مطالعه برای اهداف مختلف را مشخص سازد (Zdravkov et al., 2007). طبقه‌بندی‌های حفرات خاک عمدتاً مربوط به اندازه و شکل آن‌ها است. حفرات دارای خصوصیات مختلفی از نظر اندازه، توزیع، شکل و نحوه اتصال به یکدیگر هستند. این خصوصیات در کنار هم سبب می‌شوند که هر حفره در خاک

از این رو، برخی محققین حتی به این نتیجه رسیده‌اند که باید از تلاش برای درک دقیق سیستم حفرات و اندازه آن‌ها صرف نظر کرد. با وجود نظریه‌های با ارزشی که در رابطه با رفتار سیستم آب-خاک-هوا وجود دارد، مفاهیم به کار رفته در این سیستم هنوز جامعیت کافی ندارند (Nimmo, 2004).

توزیع اندازه‌ای حفرات خاک نشان‌دهنده‌ی فراوانی نسبی اندازه‌ی حفرات موجود در یک حجم مشخص از خاک مورد مطالعه است. اهمیت اصلی توزیع اندازه‌ای حفرات خاک در این است که می‌توان از روی آن به سایر خصوصیات خاک پی برد. برای مثال در پیش‌بینی پیچیدگی ساختمان خاک، استفاده از توزیع اندازه‌ای حفرات خاک، جزئیات بیشتری را نسبت به تخلخل کل در اختیار محقق قرار می‌دهد (Nimmo, 2004). تغییرات مکانی اندازه حفرات خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های زیست‌محیط خاکی محسوب می‌شود. ارتباط بین توزیع اندازه‌ای منافذ و توزیع اندازه‌ای ذرات خاک در خاکی که ذرات آن به صورت تصادفی^۱ توزیع شده است بسیار ساده است. در این نوع ساختمان خاک، حفرات درشت، در لابه‌لای ذرات درشت مشاهده خواهند شد. در خاکی که ذرات به صورت غیرتصادفی^۲ توزیع شده باشند ارتباط پیچیده می‌شود و ممکن است حفرات درشت در اثر کنار هم قرارگیری ذرات ریز هم ایجاد شوند (Nimmo, 2004).

تعیین خصوصیات حفرات و تحلیل ویژگی‌های آن‌ها به منظور تعیین رفتارهای خاک همواره با محدودیت‌های مختلفی روبرو بوده است که منشاء این محدودیت‌ها دانش ناکافی و فقدان ابزار مناسب برای مطالعه است (Passoni et al., 2014). مطالعات میکرومورفولوژیکی روش‌های نوین مطالعه‌ی حفرات خاک هستند که امکان مشاهده و مطالعه‌ی مستقیم حفرات و تعیین اندازه، شکل، اتصال منافذ به یکدیگر و توزیع آن‌ها را فراهم می‌سازند. اگر محقق دانش کافی از سرشت حفرات خاک و روش‌های میکرومورفولوژیکی داشته باشد می‌تواند با بهره‌گیری از ابزار موجود به اغلب محدودیت‌های موجود در مسیر مطالعه‌ی حفرات غلبه کند (Cooper et al., 2016).

Passoni et al. (2014) و Cooper et al. (2016) تلاش کردند با استفاده از روش‌های میکرومورفولوژی حفرات را مشاهده و کلاس‌بندی کنند. Russ (2011) و Hirmas et al. (2016) موفق شدند پارامترهای قطر خاکدانه را با استفاده از تجزیه و تحلیل تصویر

نقش متفاوتی نسبت به دیگری داشته باشد (Nimmo, 2004). حفرات نفوذ آب در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Verruijt, 2001). شکاف‌ها و حفرات بزرگ خاک مخازن اولیه‌ی مهمی برای آب وارده از سطح زمین به شمار می‌روند. این حفرات موجب نفوذ سریع آب در خاک می‌شوند. میزان نفوذ آب در خاک به شدت به هدایت هیدرولیکی خاک سطحی بستگی دارد (Vergani and Graf, 2015).

حفرات خاک از نظر اندازه به سه دسته‌ی حفرات درشت (macropores)، حفرات متوسط (mesopores) و حفرات ریز (micropores)، تقسیم‌بندی می‌شوند (Nimmo, 2004). حفرات درشت اندازه‌ای بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون داشته و به دلیل شکاف برداشتن خاک، رشد ریشه و ریزجانداران و شکستن خاکدانه‌ها تشکیل می‌گردند. این حفرات در رطوبت‌های نزدیک به ظرفیت مزرعه پر از هوا هستند. حفرات متوسط اندازه‌ای بین ۳۰ تا ۷۵ میکرون داشته و در رطوبت‌های نزدیک به ظرفیت مزرعه پر از آب هستند. این حفرات به حفرات ذخیره‌ای معروفاند زیرا آب را در خود نگه داشته و به راحتی در اختیار گیاه قرار می‌دهند. حفرات ریز کوچکتر از ۳۰ میکرون هستند و در رطوبت پژمردگی دائم پر از آب می‌باشند. وجود این حفرات از نظر فعالیت جمعیت میکروبی بی‌هوازی در خاک حائز اهمیت است (Perret, 1999). توصیف دقیق حفرات از جمله شکل حفرات مشکل بوده و نیازمند آن است که برخی فرضیات در آن دخیل گردد (Alaoui, 2011). برای تعیین قطر معادل هر جسم سه-بعدی، بزرگ‌ترین قطر آن توسط کولیس اندازه‌گیری می‌شود. نرم‌افزار Image tool قطر کولیس را برای حفرات موجود در خاک تعیین می‌نماید. نکته‌ای که باید توجه شود این است که جهت اصلی یک حفره که بزرگ‌ترین قطر را دارد تعیین کننده‌ی پتانسیل آن حفره در انتقال آب و املاح در خاک است. در حالی که جهت فرعی خاک که دارای کمترین قطر در بین تمامی جهات یک حفره است موجب محدود شدن جریان آب و انتقال املاح در خاک می‌شود.

Russ (2011) و Schoeneberger et al. (2012) برای کسب اطلاعاتی در رابطه با ساختمان خاک گردشگری و قطر معادل را برای خاکدانه‌ها تعیین کردند. تعیین این پارامترها برای حفرات تشکیل دهنده‌ی خاک می‌تواند توصیف بهتری از ساختمان خاک ارائه دهد. به همین دلیل مطالعه‌ی سیستم حفرات خاک در مقایسه با مطالعه‌ی ذرات آن، پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. در مطالعه و تجزیه و تحلیل سیستم حفرات خاک روش‌های متفاوتی به کار برده می‌شود و تاکنون روش یکپارچه و جامعی برای مطالعه‌ی حفرات خاک ارائه نشده است.

پس از تعیین منحنی رطوبتی در نمونه‌های دست نخورده (نتایج در اینجا نیامده است)، از همان نمونه‌ها برای مطالعات میکرومورفولوژی استفاده شد. قبل از انتقال نمونه‌های دست نخورده به کارگاه تلقیح ابتدا آبدایی آن‌ها در آن تحت دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس و به مدت سه هفته انجام گرفت تا وزن آنها ثابت شود. سپس نمونه‌های دست نخورده از استوانه‌ها جدا شده و به ظروف پلاستیکی با اندازه‌ی مناسب منتقل شدند و با مخلوط پلی‌استر رزین باضافه استون به نسبت مساوی به همراه کاتالیست، سخت‌کننده و ماده فلورسنت به مقدار مناسب در دسیکاتور خلاء تلقیح شدند. کاتالیست به مقداری اضافه شد که فرایند سخت شدن حدود شش هفته را سپری نماید. اگر نمونه‌ها در زمان کمتری سخت شوند باید با استفاده از گرما و تکان دادن مکانیکی این زمان را به تعویق انداخت (-Ringrose Voase, 1996). شکل (۱) مراحل تلقیح نمونه‌های خاک دست نخورده را نشان می‌دهد.

پس از سخت شدن نمونه‌ها، ظروف پلاستیکی از آن‌ها جدا شده و نمونه‌ها برش داده شدند. در مواردی که تلقیح کامل انجام نشده بود نمونه‌ها مجدداً تلقیح شدند تا اطمینان حاصل شود که تمام حفرات با رزین پر شده‌اند. بلوک‌های تهیه شده در دستگاه سایش قرار داده شده و سطح آنها کاملاً صاف و صیقلی شد. در این مرحله بلوک در جایگاه ثابت و در اتاقک تاریک مجهز به لامپ‌های فرابنفش قرار داده شد و تصویر دیجیتالی تصاویر با حجم ۱۲ مگاپیکسل و با ابعاد (۳۰۰۰×۴۰۰۰ پیکسل) از نمونه تهیه گردید (Geyger and Beckmann, 1967). بنا براین تصاویر تهیه شده قدرت شناسایی حفرات با ابعاد چند میکرونی را دارا بودند.

استفاده از ماده فلورسنت در مایه تلقیح سبب می‌شود که حتی ریزترین حفرات در زیر نور فرابنفش درخشندگی کافی ایجاد نمایند. در روش برش‌های متوالی (Serial Sectioning) ابتدا نمونه‌های تلقیح شده از وسط به دو قسمت تقسیم شدند. در صورت مشاهده تخلخل تلقیح نشده تلقیح مجدد با مایه تلقیح اولیه صورت گرفت. سطح مقطع کاملاً صاف و صیقلی شد و زیر نور فلورسنت تصویر برداری صورت پذیرفت. پس از تهیه تصویر اول با دستگاه سایش میکرونی، ۵۰ میکرون از سطح نمونه سایش داده شد و در دستگاه تصویربرداری قرار داده شد و تصویر دوم برداشته شد. این کار حداقل ۴۰ بار برای تمام نمونه‌ها تکرار شد. در نهایت از هر نمونه حداقل ۴۰ تصویر با فواصل ۵۰ میکرونی تهیه و نتایج میانگین آنها ارائه گردید. شکل (۲) مراحل برش‌زنی و تهیه‌ی بلوک‌ها و تصویربرداری از آن‌ها را نشان می‌دهد.

تعیین نمایند اما هیچ‌گونه کلاس‌بندی در این رابطه انجام ندادند.

هدف از پژوهش حاضر کلاس‌بندی مستقیم و کمی حفرات خاک با استفاده از پارامترهای بیانگر اندازه و شکل و خصوصیات هندسی آنها است. تعیین توزیع اندازه و شکل حفرات و مقایسه الگوی توزیع آنها در خاک‌های مختلف و در اعماق مختلف یک خاک و ارتباط آن با برخی خصوصیات هیدرولیکی از اهداف دیگر این پژوهش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه ۱۸ پروفیل در مساحت ۶۰ هکتار در باغ بوتانیک احداثی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران مورد مطالعه قرار گرفتند. ۸۶ نمونه دست‌خورده جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه و تعداد ۳۹ نمونه دست‌خورده از افق‌های ژنتیکی ۸ پروفیل با استفاده از استوانه‌های مخصوص یا تهیه کلوخه و انتقال به جعبه‌های کوبینا^۱ با ثبت جهت نمونه بر روی جعبه، تهیه گردید.

جدول ۱ مختصات جغرافیایی پروفیل‌های تشریح و نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. رژیم حرارتی خاک در منطقه‌ی مورد مطالعه ترمیک و رژیم رطوبتی آن اریدیک هم مرز با زیریک است. رژیم رطوبتی خاک پروفیل ۹ با توجه به عوارض اکسید و احیاء مشاهده شده به صورت لکه‌ای، اکوتیک تعیین شد. مواد مادری خاک‌های مورد مطالعه رسوبات آبرفتی ریز بافت واقع بر روی رسوبات قطعات درشت (قلوه سنگ) با عمق متغیر بین ۱۰۰ تا ۱۷۰ سانتی متر می‌باشد. کاربری اراضی در دهه‌های گذشته زراعی بوده و اخیراً (طی ۸-۷ سال گذشته) در اغلب قسمت‌ها به کشت درختان زینتی و احداث باغ بوتانیک تغییر یافته است.

جدول ۱. مختصات جغرافیایی پروفیل‌های نمونه‌برداری شده

شماره‌ی پروفیل	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
پروفیل ۱	۵۰° ۵۷' ۵۶/۰"	۳۵° ۴۸' ۴۳/۱"
پروفیل ۳	۵۰° ۵۷' ۳۸/۵"	۳۵° ۴۸' ۴۱/۷"
پروفیل ۵	۵۰° ۵۸' ۰۲/۳"	۳۵° ۴۸' ۳۷/۹"
پروفیل ۶	۵۰° ۵۸' ۰۸/۱"	۳۵° ۴۸' ۳۵/۳"
پروفیل ۷	۵۰° ۵۸' ۱۲/۵"	۳۵° ۴۸' ۳۴"
پروفیل ۹	۵۰° ۵۸' ۱۱/۸"	۳۵° ۴۸' ۲۵/۲"
پروفیل ۱۱	۵۰° ۵۸' ۰۵/۱۴"	۳۵° ۴۸' ۲۵/۵"
پروفیل ۱۷	۵۰° ۵۷' ۵۳/۳"	۳۵° ۴۸' ۳۳/۱"



قرار دادن نمونه‌ها در خلاء به منظور خروج حباب های هوای محبوس

تهیه ی مایه تلقیح

تلقیح نمونه‌ها

ماده رنگی درخشان مورد استفاده (فلوئورسنت)

شکل ۱. مواد فلورسنت به کار رفته (راست)، آماده سازی و افزودن مایه تلقیح (وسط) و دسیکاتور خلاء جهت تلقیح نمونه‌های دست نخورده (چپ)



اتاقک تریک و دوربین دیجیتال مستقر بر روی آن

مقطع برش زده شده

مقطع برش زده شده تحت نور فرابنفش

دستگاه سایش و برش مورد استفاده برای تهیه ی مقاطع نازک

شکل ۲. دستگاه برش و سایش با دقت میکرومتر جهت تهیه تصاویر متوالی از بلوک‌های تلقیح شده (راست)، مقاطع برش خورد (وسط) و اتاقک تریک با مجهز به لامپ فرابنفش (چپ)

مختلف فراهم می‌کند. از جمله فاکتورهای بیانگر شکل حفرات، مساحت حفرات است که معادل تعداد پیکسل‌های موجود در پلی‌گون تشکیل دهنده حفره بر حسب واحد کالیبره شده نرم-افزار است (شکل ۳). فاکتور دوم بیانگر شکل حفرات، محیط حفرات است که طول خارجی مرز حفرات را نشان می‌دهد و بر حسب واحد کالیبره شده بیان می‌گردد.

گردشده‌گی حفرات بر حسب رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

A نشان دهنده مساحت حفرات و P نشان دهنده محیط

بیرونی آنها می‌باشد. R میزان گردشده‌گی است که عددی بین ۰ و ۱ متغیر است و هرچه عدد بزرگتر باشد نشان دهنده گردشده‌گی بیشتر است و عدد ۱ نشان دهنده دایره کامل می‌باشد. با کوچکتر شدن R از عدد ۱ حفرات از حالت دایره‌ای دورتر می‌شوند.

در مطالعه‌ی حفرات موجود در مقاطع نازک، اجزای تصویر به دو دسته‌ی حفرات و بخش جامد خاک تقسیم می‌شوند و از این رو می‌توان از تصاویر سیاه و سفید برای تجزیه و تحلیل حفرات بهره برد. در مرحله‌ی بعد تصاویر سیاه و سفید با استفاده از نرم‌افزار Image tool و بر اساس درجات روشنایی هر پیکسل به دو گروه روش (حفرات) و تیره (متن جامد خاک) آستانه‌بندی شدند و مرز بین حفرات و بخش معدنی خاک به وضوح در آنها با رنگ‌های تیره و روشن (سیاه و سفید) مشخص گردید.

تصاویر تهیه شده توسط نرم‌افزار Image tool مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت خصوصیات هندسی حفرات خاک کلاس‌بندی و فراوانی هر کلاس به صورت دقیق تعیین شد. فاکتورهای شکل امکان تقسیم‌بندی منافذ را به گروه‌های

نتایج و بحث

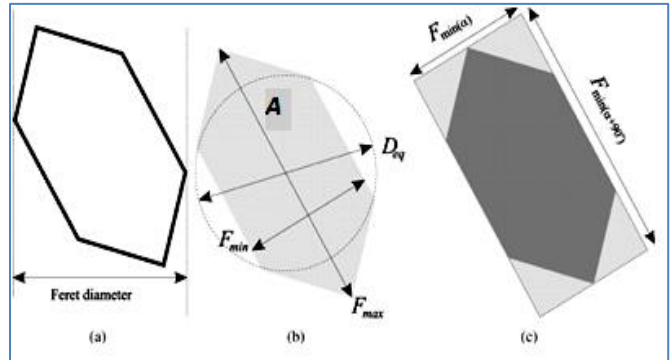
جدول ۲ نتایج طبقه‌بندی پروفیل‌های مورد مطالعه را تا سطح فامیل نشان می‌دهد. خاک‌های مورد مطالعه عمدتاً در رده اریدی سول با یک افق کمبیک (Cambids) و فاقد سایر افق‌های مشخصه بوده و لذا در گروه بزرگ (Haplocambids) قرار گرفتند. زیرگروه خاک‌ها، با توجه به هم‌مرز بودن خاک‌ها بین اقلیم اریدیک با اقلیم زیریک و با توجه به خصوصیات لایه‌بندی خاک دارای خصوصیات فلوننتیک (Xerofluventic) و یا فاقد خصوصیات فلوننتیک (Xeric) تعیین گردید. از نظر کلاس Fine یا Fine-loamy در کلاس Fine-loamy، عمدتاً خاک‌ها در کلاس Fine-loamy یا Fine می‌باشند که دارای فعالیت تبادل کاتیونی active تا superactive هستند. اطلاع از این خصوصیات می‌تواند در زمینه تفسیر نتایج حاصل از مطالعه تخلخل خاک و مورفولوژی حفرات کمک موثری بنماید.

جدول ۲. طبقه‌بندی پروفیل‌های مورد مطالعه تا سطح فامیل

شماره پروفیل	طبقه‌بندی تا سطح فامیل
پروفیل ۱	Fine-loamy, mixed, superactive, thermic, Xerofluventic Haplocambids
پروفیل ۳	Fine-loamy, mixed, active, thermic, Xeric Haplocambids
پروفیل ۵	Fine, mixed, semiactive, thermic, Xerofluventic Haplocambids
پروفیل ۶	Fine-loamy, mixed, active, thermic, Xeric Haplocambids
پروفیل ۷	Fine, mixed, semiactive, thermic, Xerofluventic Haplocambids
پروفیل ۹	Coarse loamy, mixed, superactive, thermic, Aridic Fluvaquents
پروفیل ۱۱	Fine-loamy, mixed, active, thermic, Xeric Haplocambids
پروفیل ۱۷	Fine, mixed, active, thermic, Xeric Haplocambids

جدول ۳ هشت شاخص بیانگر خصوصیات حفرات را به همراه محدوده‌های طبقه‌بندی در هر کلاس نشان می‌دهد. با کمی دقت در جدول ۳ مشاهده می‌شود که کلاس‌های حفرات به گونه‌ای تعیین شده‌اند که دامنه تغییرات در هر کلاس حداقل بوده و حفرات موجود در هر کلاس بیشترین شباهت را دارا - باشند. تعداد حفرات شناسایی شده در ابعاد چند میکرومتر بسیار چشم‌گیر است و این نشان دهنده دقت و توانایی بالای روش رنگ آمیزی فلورسنت با استفاده از نرم‌افزار Image tool در مطالعه حفرات است.

این شیوه کلاس‌بندی حفرات منجر به تعیین فراوانی حفرات و درصد هر یک از کلاس‌های حفرات از تخلخل کل می‌شود (شکل ۳ و جدول ۴). سایر مطالعات کلاس‌بندی حفرات



شکل ۳. پارامترهای شکل حفرات a: قطر کولیس، b: A نشان‌دهنده مساحت، F_{max} و F_{min} به ترتیب قطر کولیس حداقل و حداکثر و D_{eq} قطر معادل و c: $F_{min(a)}$ و $F_{min(a+90^\circ)}$ قطر کولیس حداقل در دو جهت عمود بر هم

از نسبت طول محور کوچک به طول محور بزرگ حفره، کشیدگی حفرات به دست می‌آید. این مقدار عددی بین ۰ و ۱ است. اگر کشیدگی برابر ۱ باشد حفره تقریباً دایره‌ای یا مربعی است و هر چه از ۱ کوچک‌تر شود حفره کشیده‌تر خواهد بود. قطر معادل^۱ قطر دایره‌ای است که دارای مساحتی مساوی مساحت حفره باشد. و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$FD = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که FD قطر معادل و A مساحت حفره است.

فشردگی که نشان‌دهنده کرویت حفرات است و عبارت است از نسبت قطر معادل به طول حفرات. که این شاخص عددی بین ۰ و ۱ است. اگر این شاخص مساوی ۱ باشد، حفره کاملاً مدور است و هر چه از ۱ کوچک‌تر شود شکل از دایره خارج می‌شود. فشردگی از روی معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$C = \sqrt{\frac{4A}{MAL}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن C درجه فشردگی و A مساحت حفره و MAL

طول محور اصلی می‌باشند (Manual of Image tool, 2001).

اتصال حفرات به یکدیگر از جمله خصوصیات از خاک است که به طور مستقیم بر روی سهولت انتقال آب، املاح و گازها در خاک تاثیر می‌گذارد. اگر اتصال حفرات به نحوی باشد که مسیری پر پیچ و خم برای انتقال آب و هوا ایجاد کند، در آن صورت، سرعت حرکت این مواد در خاک آهسته‌تر از زمانی خواهد بود که یک مسیر صاف و مستقیم برای انتقال در اختیار داشته باشند. اتصال حفرات و اعوجاج مسیر جریان، هم به تعداد و اندازه‌ی حفرات و هم به نحوه‌ی توزیع آن‌ها در خاک بستگی دارد (Preatello and Van Lier, 2015).

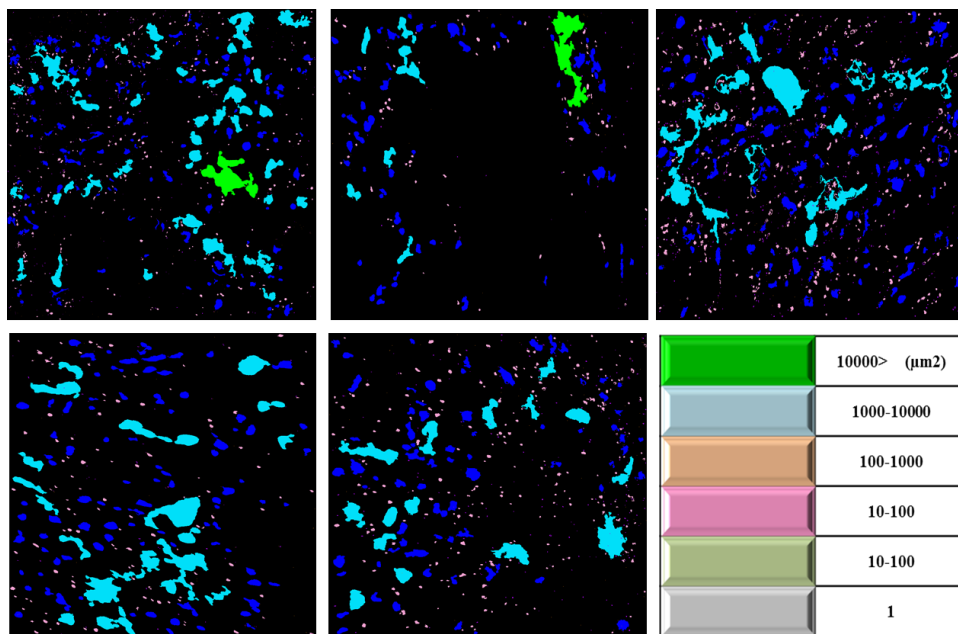
مانند آنچه (Cooper et al., 2016) و (Passoni et al., 2014) در سه دسته‌ی ریز، درشت و متوسط و یا گرد، حد وسط و انجام داده‌اند، همواره به صورت کیفی انجام گرفته و حفرات را کشیده تقسیم‌بندی نموده‌اند.

جدول ۳. محدوده‌های مورد استفاده در کلاس‌بندی حفرات خاک بر اساس خصوصیات آنها

کلاس‌بندی بر اساس قطر کوچک (میکرومتر)	کلاس‌بندی بر اساس قطر بزرگ (میکرومتر)	کلاس‌بندی بر اساس قطر معادل (میکرومتر)	کلاس‌بندی بر اساس گردشدگی	کلاس‌بندی بر اساس فشردگی	کلاس‌بندی بر اساس کشیدگی	کلاس‌بندی بر اساس محیط (میکرومتر)	کلاس‌بندی بر اساس مساحت (میکرومتر مربع)
< ۰/۲۵	۰/۵۰-۲	۱-۲	< ۰/۰۵	۰/۱ - ۰/۲	< ۰/۱	۱-۱۰	۱
۰/۲۵-۰/۵	۲-۵	۲-۵	۰/۰۵-۰/۱	۰/۲ - ۰/۳	۰/۱-۰/۲	۱۰-۲۰	۱-۱۰
۰/۵۰-۲	۵-۱۰	۵-۱۰	۰/۱-۰/۲	۰/۳ - ۰/۵	۰/۲-۰/۳	۲۰-۵۰	۱۰-۱۰۰
۰/۵۰-۲	۱۰-۲۵	۱۰-۱۵	۰/۲-۰/۵	۰/۵ - ۰/۷۵	۰/۳-۰/۵	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰
۵-۱۰	۲۵-۵۰	۱۵-۳۰	۰/۵-۱	۰/۷۵ - ۱	۰/۵-۰/۷۵	۱۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
۱۰-۲۵	۵۰-۱۰۰	۳۰-۵۰	-	-	۰/۷۵-۱	-	۱۰۰۰۰-
۲۵-۵۰	۱۰۰-۱۵۰	۵۰-۷۵	-	-	-	-	-
۵۰-۱۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۷۵-۱۰۰	-	-	-	-	-
> ۱۰۰	-	> ۱۰۰	-	-	-	-	-

نمونه‌ای از کلاس‌بندی تصویری مساحت حفرات خاک در اعماق مختلف پروفیل ۱ در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل حفرات موجود در هر کلاس مساحت با رنگ‌های مجزا قابل تشخیص هستند.

نرم‌افزار Image tool اطلاعات خروجی کلاس‌بندی حفرات را به دو صورت در اختیار محقق قرار می‌دهد. حالت اول اطلاعات تصویری است که در آن حفرات موجود در هر کلاس با رنگی متفاوت از سایرین مجزا شده است و محقق می‌تواند به صورت مشاهده‌ای تغییرات حفرات را در تصویر دنبال نماید.



شکل ۴. نمونه‌ای از کلاس‌بندی مساحت حفرات خاک عمق‌های مختلف پروفیل ۱ به صورت تصویری با استفاده از نرم‌افزار Image Tool

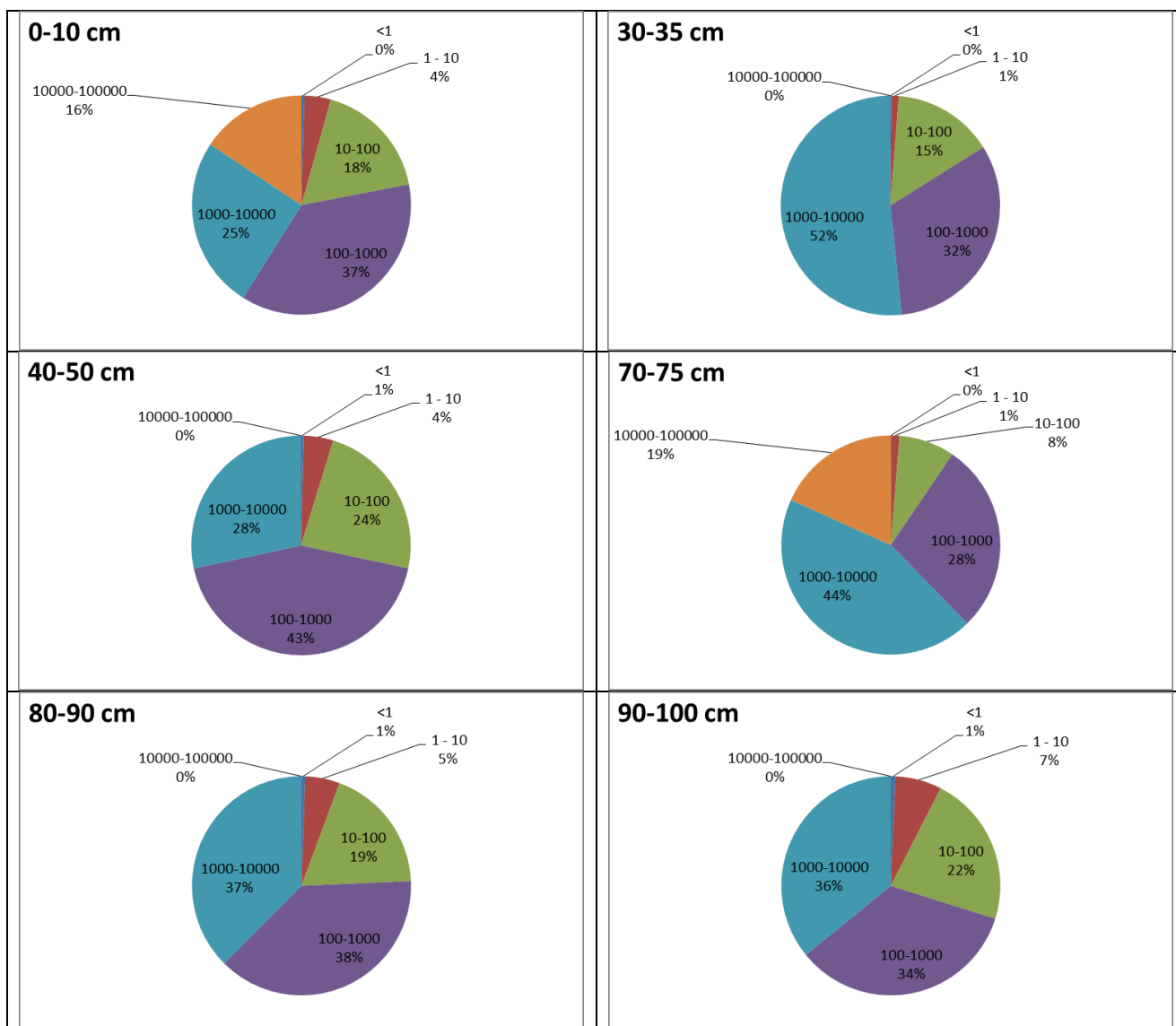
کشیدگی، فشردگی، قطر معادل، قطر بزرگ و قطر کوچک است نشان می‌دهد. حفرات خاک در نمونه‌های تهیه شده از اعماق مختلف همه پروفیل‌های مورد مطالعه با استفاده از روش رنگ آمیزی فلورسنت کلاس‌بندی شدند، در این مقاله جهت اختصار نتایج پروفیل شماره ۵ ذکر شده است (جدول ۴). این نتایج به

خروجی دوم نرم‌افزار Image Tool نتایج کمی کلاس-بندی حفرات به صورت فایل Excel است که خلاصه نتایج استخراج شده در جدول ۴ آمده است. جدول ۴ نتایج تجزیه و تحلیل کمی حفرات خاک در اعماق مختلف پروفیل ۵ را که شامل کلاس‌های مختلف مساحت، محیط، گرد شدگی،

(کفه شخم) به حدود ۲۹ درصد افزایش یافته است. در حالیکه در زیر کفه شخم این مقدار مجدداً به حدود ۱۰ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده عدم تراکم خاک این لایه در اثر عملیات زراعی می‌باشد. زیرا بلافاصله در زیر این لایه درصد حفرات کوچک به بیش از ۲۴ درصد رسیده و در عمق ۱۰۰-۹۰ سانتی‌متری به حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که حفرات بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرومتر مربع که عمدتاً حفرات ساختمانی هستند در افق‌های شخم خورده سطحی بیش از ۸۰ درصد تخلخل را تشکیل داده‌اند و در کفه شخم به حدود ۷۰ درصد کاهش یافته و مجدداً در لایه زیرین کفه شخم پس از یک افزایش شدید به بیش از ۹۰ درصد در دو لایه تجمعی زیرین به ترتیب به حدود ۷۰ و ۸۰ درصد کاهش می‌یابند.

خوبی نمایانگر توانایی روش رنگ آمیزی فلورسنت و نرم‌افزار Image tool در مشاهده‌ی حفرات و کلاس‌بندی آن‌هاست. این روش کلاس‌های مربوط به هندسه حفرات را که در تعیین نقش حفرات مختلف قابل حائز اهمیت است را به خوبی نشان می‌دهد.

شکل ۵ نحوه توزیع کلاس‌های مساحت حفرات خاک از تخلخل کل را در اعماق مختلف پروفیل ۵ نشان می‌دهد. حفرات با مساحت کمتر از ۱۰۰ میکرومتر مربع (قطر تقریبی کمتر از ۱۰ میکرومتر) که عمدتاً حفرات بافتی (کوچکتر از ۱۰ میکرومتر مربع) یا حفرات ساختمانی ریز (۱۰-۱۰۰ میکرومتر مربع) هستند در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متر مجموعاً کمتر از ۲۲ درصد می‌باشند که در عمق ۳۵-۳۰ سانتی‌متر (لایه شخم) به ۱۶ درصد کاهش یافته است ولی در عمق ۴۵-۵۰ سانتی‌متر



شکل ۵. نحوه توزیع کلاس‌های مساحت حفرات خاک بر حسب درصد از تخلخل کل در اعماق مختلف پروفیل ۵

غالب تشکیل دهنده‌ی هر خاکی اصلاح نمود. در معادلات مورد استفاده برای تعیین فاکتور شکل حفرات نسبت بین مساحت و محیط حفره تعیین و با توجه به مقدار این نسبت، حفره‌ی مورد مطالعه به یکی از اشکال هندسی اختصاص پیدا می‌کند. نرم‌افزار Image tool قادر است درجه‌ی گردشگی یک حفره را تعیین کند.

استفاده از روش رنگ آمیزی فلورسنت و نرم‌افزار Image tool امکان تعیین فشردگی حفرات خاک را در محدوده شاخص-های مورد نظر صورت کمی دارد (جدول ۴). فشردگی حفرات، شدت گردی یا نزدیکی حفرات به کره را نشان می‌دهد. در پروفیل شاهد مورد مطالعه (پروفیل ۵) بیشترین حفرات در همه اعماق خاک در کلاس فشردگی ۰/۳-۰/۵ قرار گرفته‌اند که حاکی از فشردگی متوسط (کرویت متوسط) حفرات است. حداکثر فشردگی در عمق ۳۵-۳۰ سانتی متر است (۵۶/۹۴٪) که علت آن را می‌توان به فشردگی ناشی از کفه شخم و بافت متوسط خاک نسبت داد. مابقی حفرات که کلاس فشردگی با شاخص کمتر از ۰/۳ و کلاس فشردگی بیشتر از ۰/۵ دارند کم و بیش به میزان مشابه در دو طرف محدوده کلاس ۰/۳-۰/۵ توزیع شده‌اند و دارای فراوانی کم و بیش یکسانی در اعماق مختلف می‌باشند.

همانطور که مشاهده شد در پروفیل ۵ در اثر انجام شخم مرسوم بیش‌ترین تعداد حفرات را آن‌هایی تشکیل دادند که دارای فشردگی بیش‌تر از ۰/۳ هستند و این نشان از ایجاد تراکم در تمامی عمق‌های پروفیل ۵ است. نتایج و تفاسیر ارائه شده در رابطه با پروفیل ۵ کم و بیش در سایر پروفیل‌های مورد مطالعه نیز قابل مشاهده است.

جدول ۴ کلاس‌بندی شاخص کشیدگی حفرات را نیز نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در عمق‌های ۵-۰ و ۱۰-۰ سانتی‌متر که در معرض عملیات شخم قرار گرفته عمده حفرات آنها را حفرات آرایشی^۲ مرکب تشکیل می‌دهند که بیشترین کشیدگی (کلاس <۰/۱) را دارند. در حالیکه فراوانی حفرات کاملاً کشیده در عمق ۳۵-۳۰ به حداقل می‌رسد (۳۳/۸٪) که با نتایج به دست آمده برای فشردگی حفرات در این عمق سازگاری دارد. حفرات با کشیدگی حداکثر در اعماق بیشتر تابعی از نوع لایه‌های رسوبی است (Xerofluventic Haplocambids) که در رده‌بندی خاک منعکس می‌باشد و حداکثر آن (۴۸/۸۳٪) در عمق ۹۰-۸۰

نتایج نشان داد نرم‌افزار Image tool قادر به تشخیص و تعیین حفرات با قطر ۱/۱۳ تا ۳۵۰ میکرومتر ثبت شده توسط دوربین دیجیتال می‌باشد. بر اساس معادله‌ی لاپلاس و با فرض زاویه‌ی تماس صفر درجه، حفرات با ابعاد ۱/۱۳ میکرومتر مکشی حدود ۲/۶ بار ایجاد می‌کنند. بنا به نظر (Tuller and Or, 2004) منحنی رطوبتی خاک تا مکش ۱ بار مربوط به بخش حفرات ساختمانی است و در مکش‌های بیش‌تر که ناشی از حفرات ریزتر می‌باشند، منحنی رطوبتی غالباً متأثر از توزیع ذرات اولیه خاک می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش تصویربرداری با رنگ آمیزی فلورسنت و استفاده از نرم‌افزار Image tool با توجه به وضوح تصاویر تهیه شده علاوه بر حفرات ساختمانی بخشی از حفرات وابسته به بافت را نیز شناسایی می‌نماید. افزایش وضوح تصاویر سه بعدی و استفاده از پردازش‌گرهای توانمند می‌تواند به نتایج دقیق‌تری در این زمینه منتهی شود.

Cooper et al., (2016) کلاس‌بندی مساحت حفرات را با استفاده از نرم‌افزار^۱ SPIA انجام دادند. آنها نتوانستند حفرات دارای مساحت کم‌تر از ۱۵۶ میکرومتر مربع را تفکیک و طبقه‌بندی نمایند، در حالی که در تحقیق حاضر با توجه به استفاده از روش رنگ آمیزی فلورسنت و نرم‌افزار Image tool حفرات با اندازه‌ی ۱ میکرومتر مربع قابل مشاهده شدند. این نتایج نشان می‌دهد که روش رنگ آمیزی فلورسنت و نرم‌افزار Image tool قابلیت بالایی در مشاهده‌ی حفرات کوچک دارند.

جدول (۴) درصد و فراوانی هر یک از کلاس‌های محیط حفرات پروفیل ۵ را نیز نشان می‌دهد. تعیین محیط حفرات ضمن ارائه برآوردی از سطوح تماس حفرات با بخش سیال خاک به همراه مساحت حفره و با استفاده از معادلات تعیین کننده‌ی فاکتور شکل حفرات، موجب تعیین شکل هندسی واقعی حفرات گردد و می‌تواند شکل هندسی واقعی حفرات را نیز مشخص نماید. بعلاوه با توجه به این‌که تعیین محیط حفره شکل آن را از لحاظ کشیدگی یا گردشگی تعیین می‌کند، در تعیین مکش واقعی حفرات عامل تعیین کننده ای است. در واقع حفرات کشیده مکش متفاوتی نسبت به حفرات گرد و کروی ایجاد می‌کنند و برای تشخیص این حفرات باید مساحت حفره و محیط آن مشخص شود و فاکتور شکل برای آن حفره مورد محاسبه قرار گیرد. بدین ترتیب لزومی به فرض کروی بودن همه حفرات نخواهد بود و می‌توان معادله‌ی لاپلاس را برای شکل حفرات

جدول ۴. فراوانی (تعداد و درصد) هر یک از کلاس‌های پارامترهای مختلف حفرات در پروفیل شماره ۵

عمق cm	۰-۵		۰-۱۰		۳۰-۳۵		۴۰-۵۰		۷۰-۷۵		۸۰-۹۰		۹۰-۱۰۰		
	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	
فراوانی کلاس	*مساحت (میکرومتر مربع)														
	< ۱	۲۰۸	۰/۴۳	۵۹۴	۰/۴۴	۴۰	۰/۱۶	۱۲۹	۰/۳۹	۹۲	۰/۱۱	۴۰۰	۰/۵۶	۱۷۶	۰/۶۸
	۱-۱۰	۴۰۹	۴/۱۲	۱۱۱	۳/۹	۵۶	۱/۰۸	۳۰۵	۴/۳۶	۱۹۶	۱/۱۷	۷۵۱	۵/۰۹	۳۶۸	۶/۸۵
	۱۰-۱۰۰	۲۷۱	۲۰/۸	۷۱۱	۱/۳	۸۶	۱/۸۵	۲۳۰	۱/۶۱	۱۹۴	۸/۲۲	۴۰۹	۱/۶۶	۱۷۹	۳/۴
	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۰۱	۵۱	۱۹۳	۱/۹۸	۲۹	۱/۲۵	۶۲	۱/۲۷	۷۲	۱/۲۰	۹۶	۱/۱۵	۴۲	۱/۲۶
	۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰	۷	۲۳/۶	۱۵	۲۵/۴	۵	۱/۶۴	۴	۱/۳۷	۱۶	۱/۰۴	۱۱	۱/۵۳	۵	۱/۸۷
۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰۰	.	.	۱	۱/۶۶	.	.	.	.	۱	۱/۲۵	.	.	.	.
*محیط (میکرومتر)															
۱-۱۰	۵۳۹	۵/۴۰	۱۴۹	۱/۴۳	۸۶	۵/۱۵	۳۷۸	۱/۷۲	۲۵۶	۶/۹	۱۰۰	۱/۰۱	۴۷۶	۱/۶۸	
۱۰-۲۰	۱۷۸	۴/۵۸	۵۲۴	۱/۳۶	۴۲	۸/۰۲	۱۵۵	۱/۵۳	۱۱۸	۸/۳۹	۳۳۹	۱/۲۶	۱۵۲	۱/۷۴	
۲۰-۵۰	۱۶۲	۱۹/۶	۳۷۳	۱/۹۲	۵۸	۱/۴۶	۱۲۸	۱/۵۴	۱۱۶	۱/۴۲	۲۰۶	۱/۸۳	۸۳	۱/۷۸	
۵۰-۱۰۰	۷۳	۱/۷۳	۱۴۵	۱/۹۳	۱۷	۱/۹۸	۴۸	۱/۶۶	۴۱	۱/۰۴	۷۱	۱/۵۱	۴۱	۵/۳۲	
۱۰۰-۱۰۰۰	۴۴	۱/۶۹	۸۵	۱/۹۵	۱۳	۱/۳۸	۲۰	۱/۱۱	۳۹	۱/۹۸	۴۸	۱/۸۹	۱۸	۲/۳۴	
۱۰۰۰<	.	.	۳	۹/۴	.	.	.	۶/۴۴	۱	۹/۲۸	۱	۳/۵	.	.	
**فشرده‌گی (بدون واحد)															
۰/۱-۰/۲	۲۱	۲/۱۱	۲۷	۱/۰۳	۸	۳/۷۰	۱۵	۲/۰۵	۱۰	۱/۷۵	۲۳	۱/۳۸	۱۶	۲/۰۸	
۰/۲-۰/۳	۱۷۴	۱/۴۷	۳۶۱	۱/۷۳	۲۹	۱/۴۲	۱۲۲	۱/۷۱	۸۲	۱/۳۶	۲۰۵	۱/۲۳	۸۶	۱/۱۷	
۰/۳-۰/۵	۴۶۹	۴۷/۱	۱۲۱	۱/۱۷	۱۲۳	۱/۹۴	۳۳۵	۱/۸۹	۲۷۳	۱/۸۱	۷۷۶	۱/۵۵	۳۳۰	۱/۸۶	
۰/۵-۰/۷۵	۲۰۴	۱/۴۸	۶۴۴	۲۴/۵	۳۶	۱/۶۶	۱۵۵	۱/۲۳	۱۴۳	۱/۰۴	۴۲۵	۱/۴۹	۲۱۷	۱/۱۸	
۰/۷۵-۱	۱۲۸	۱/۸۵	۳۸۳	۱/۵۷	۲۰	۹/۲۶	۱۰۳	۱/۱۱	۶۳	۱/۰۳	۲۳۸	۱/۲۸	۱۲۱	۱/۷۱	
**کشیدگی (بدون واحد)															
< ۰/۱	۴۳۷	۱/۸۸	۱۲۲	۱/۶۳	۳۷۵	۳۳/۸	۳۲۶	۱/۶۵	۲۰۰	۱/۰۳	۸۱۴	۱/۸۳	۳۷۵	۱/۷۰	
۰/۱-۰/۲	۳۴۷	۱/۸۴	۹۲۳	۱/۱۱	۲۵۷	۱/۷۶	۲۵۴	۱/۷۹	۲۶۵	۱/۴۱	۵۴۶	۱/۷۶	۲۵۷	۱/۳۸	
۰/۲-۰/۳	۱۳۷	۱/۷۶	۳۳۷	۱/۸۲	۸۸	۱/۴۲	۸۹	۱/۱۹	۷۳	۱/۷۸	۱۹۶	۱/۷۶	۸۸	۱/۴۳	
۰/۳-۰/۵	۶۳	۶/۳۲	۱۲۶	۴/۷۹	۴۶	۴/۶۳	۵۰	۶/۸۵	۳۱	۵/۴۳	۹۸	۵/۸۸	۴۶	۵/۹۷	
۰/۵-۰/۷۵	۱۱	۱/۱۰	۱۷	۰/۱۶۴	۳	۰/۹۲	۱۰	۱/۳۷	۲	۰/۳۵	۱۱	۰/۶۶	۳	۰/۳۹	
۰/۷۵-۱	.	.	.	.	۱	۰/۴۶	.	.	.	.	۱	۰/۰۶	۱	۰/۱۳
**گردشگی (بدون واحد)															
< ۰/۰۵	۱۵۰	۱/۰۶	۳۳۴	۱/۷۰	۲۵	۱/۵۷	۱۰۷	۱/۶۶	۵۹	۱/۳۳	۱۷۰	۱/۰۲	۸۸	۱/۴۳	
۰/۰۵-۰/۱	۵۷۲	۱/۴۳	۱۵۵	۵/۹	۱۴۸	۱/۵۲	۴۲۱	۱/۶۷	۳۷۱	۱/۹۷	۱۰۰	۱/۱۷	۴۴۹	۱/۳۱	
۰/۱-۰/۲	۱۳۶	۱/۶۵	۴۲۱	۱/۰۱	۲۴	۱/۱۱	۹۹	۱/۵۶	۱۰۲	۱/۸۶	۲۷۴	۱/۴۴	۱۳۰	۱/۸۸	
۰/۲-۰/۵	۳۷	۳/۷۱	۴۸	۱/۸۲	۲	۰/۹۲	۲۶	۳/۵۶	۴	۰/۷	۳۷	۲/۲۲	۱۴	۱/۸۵	
۰/۵-۱	۱۰۱	۱/۱۴	۲۷۵	۱/۴۶	۱۷	۷/۸۷	۷۷	۱/۵۵	۳۵	۶/۱۳	۱۸۳	۱/۹۸	۸۹	۱/۵۶	
*قطر معادل (میکرومتر)															
۱-۲	۳۶۹	۱/۲۰	۱۰۴	۱/۲۰	۶۴	۰/۳۷	۲۵۷	۱/۲۶	۱۵۲	۰/۲۸	۷۰۱	۱/۵۵	۳۱۰	۱/۸۲	
۲-۵	۳۳۱	۵/۶۹	۹۳۵	۵/۸۰	۵۲	۱/۹۸	۲۷۰	۱/۰۸	۲۰۱	۲/۰۴	۶۱۰	۷/۱۴	۳۰۹	۹/۳۶	
۵-۱۰	۱۶۴	۱/۸۱	۳۹۰	۱/۴۰	۵۵	۹/۳۷	۱۱۹	۱/۵۶	۱۱۶	۵/۵۰	۲۲۵	۱/۲۰	۹۴	۱/۷۸	
۱۰-۱۵	۷۸	۱/۳۲	۱۳۴	۱/۹۶	۲۳	۱/۳۷	۴۹	۱/۴۴	۳۸	۵/۷۴	۵۶	۹/۳۴	۳۷	۱/۲۸	
۱۵-۲۰	۴۴	۱/۱۱	۹۵	۱/۶۰	۱۵	۱/۵۰	۲۸	۱/۴۲	۳۷	۱/۷۷	۶۲	۱/۴۲	۱۵	۱/۳۰	
۲۰-۵۰	۹	۱/۹۱	۲۰	۱/۸۱	۴	۱/۴۱	۶	۱/۲۱	۲۰	۱/۳۰	۸	۱/۹۲	۳	۱/۲۶	
۵۰-۷۵	۱	۴/۹۶	۳	۶/۸۰	۲	۱/۱۷	.	.	۴	۱/۱۳	۳	۱/۷۳	۲	۱/۲۰	
۷۵-۱۰۰	.	.	۲	۹/۴۲	۱	۱/۸۲	۱	۱/۰۱	۲	۱/۶۷	۲	۱/۷۰	.	.	
۱۰۰<	.	.	۱	۱/۶	.	.	.	.	۱	۱/۵۷	.	.	.	.
*قطر بزرگ (میکرومتر)															
۰/۵-۲	۴۱۳	۰/۴۹	۱۱۸	۰/۳۹	۷۰	۰/۱۱	۲۹۱	۰/۵۳	۲۱۶	۰/۵۷	۷۸۸	۰/۵۳	۳۵۳	۰/۵۸	
۲-۵	۲۴۹	۱/۵۶	۷۰۵	۱/۳۲	۴۱	۰/۳۹	۲۰۵	۲/۲۰	۱۵۱	۲/۱۹	۴۶۱	۱/۶۶	۲۴۴	۲/۱۱	
۵-۱۰	۱۴۵	۴/۷۱	۳۴۷	۳/۲۶	۵۰	۲/۴۲	۱۰۱	۵/۰۹	۷۷	۵/۴۱	۲۰۷	۳/۶۲	۷۹	۳/۶۵	
۱۰-۲۵	۱۳۷	۱/۸۶	۲۸۹	۱/۲۸	۳۳	۵/۸۷	۹۸	۱/۸۰	۴۸	۱/۶۱	۱۴۷	۱/۲۷	۷۰	۱/۷۸	
۲۵-۵۰	۴۲	۱/۹۴	۷۸	۱/۲۴	۱۵	۱/۷۶	۲۷	۱/۲۷	۲۳	۱/۴۱	۴۶	۱/۹۸	۱۶	۱/۲۳	
۵۰-۱۰۰	۸	۱/۴۳	۲۰	۱/۶۲	۴	۱/۸۲	۷	۱/۱۶	۳	۱/۲۵	۱۳	۱/۱۷	۶	۱/۰۲	
۱۰۰-۱۵۰	۲	۱/۰۲	۵	۱/۰۷	۲	۱/۲۱	۱	۱/۹۵	۱	۱/۵۶	۲	۱/۶۶	۲	۱/۶۳	
۱۵۰-۲۰۰	.	.	۲	۱/۸۲	۱	۱/۴۲	.	.	.	.	۳	۱/۱۰	.	.
*قطر کوچک (میکرومتر)															
< ۰/۲۵	۱۶۳	-	۳۸۵	-	۲۴	-	۱۳۴	-	۵۲	-	۲۸۴	-	۱۳۰	-	
۰/۲۵-۰/۵	.	-	.	-	.	-	.	-	.	-	.	-	.	-	
۰/۵-۲	۴۱۶	۱/۷۴	۱۲۱	۱/۰۷	۶۴	۰/۴۴	۲۷۸	۱/۷۹	۲۱۶	۰/۵۷	۸۰۲	۱/۹۴	۳۷۷	۲/۵۴	
۲-۵	۲۱۰	۴/۶۷	۶۰۴	۱/۲۸	۵۴	۲/۰۴	۱۸۱	۵/۵۱	۱۵۱	۲/۱۹	۳۶۲	۴/۲۷	۱۵۹	۴/۸۶	
۵-۱۰	۱۳۲	۱/۶۲	۲۵۶	۱/۰۸	۴۶	۸/۵۲	۹۳	۱/۵۸	۷۷	۵/۴۱	۱۲۳	۷/۲۱	۶۴	۱/۶۸	
۱۰-۲۵	۶۱	۱/۱۱	۱۳۹	۱/۵۴	۲۰	۱/۸۰	۳۷	۱/۰۳	۴۸	۱/۶۱	۷۸	۱/۰۲	۳۳	۱/۸۱	
۲۵-۵۰	۱۲	۱/۶۶	۲۲	۸/۳۲	۶	۱/۸۶	۵	۱/۱۸	۲۳	۱/۴۱	۱۳	۱/۹۴	۶	۱/۷۰	
۵۰-۱۰۰	۲	۱/۲۰	۶	۶/۷۰	۲	۱/۳۵	۲	۱/۹۰	۴	۱/۹۱	۵	۱/۶۳	۱	۱/۴۰	

** درصد بر مبنای تعداد کل حفرات تعیین شده است.

* درصد بر مبنای تخلخل کل تعیین شده است.

فرض با شرایط واقعی مطابقت چندانی ندارد. از این رو استفاده از روش مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند کمک کند تا فرض دایره‌ای بودن حفرات بسته به شرایط خاک اصلاح شود.

قطر معادل برای تعیین کلاس‌بندی اندازه‌ی اجسام سه‌بعدی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. از آنجایی که حفرات در خاک دارای شکل سه‌بعدی و نامنظم هستند، می‌توان از این پارامتر برای توصیف مورفولوژی حفرات استفاده کرد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴ می‌توان فراوانی میکروپورها، مزوپورها و ماکروپورهای موجود در نمونه‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. بخش اعظم حفرات مورد مشاهده در کلاس‌های با قطر معادل بیش از ۱۵ میکرومتر می‌باشند که با توجه به بافت و ساختمان خاک قابل انتظار بوده و غالبیت حفرات متوسط و درشت را در تخلخل تعیین شده نشان می‌دهد. قطعاً برای مطالعه و تعیین دقیق‌تر حفرات ریز نیاز به تهیه و تجزیه و تحلیل تصاویر با وضوح بالاتری می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اغلب حفرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک دارای قطر بزرگ و کوچک کم‌تر از ۲ میکرون هستند. نکته‌ای که مشاهده می‌شود این است که نرم-افزار در هیچ‌یک از افق‌های مورد مطالعه حفراتی با قطر بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ میکرومتر مشاهده نکرده است درحالی‌که حفرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرومتر به فراوانی در تمامی افق‌ها مشاهده شده‌اند. به عبارتی نرم‌افزار حفرات کوچکتر از ۰/۵ میکرومتر را تماماً برابر با صفر فرض نموده و قادر به اندازه‌ی دقیق آن‌ها نبوده است و از این رو در دامنه‌ی کوچکتر از ۰/۲۵ میکرومتر تعداد حفرات گزارش شده اما در دامنه‌ی ۰/۲۵ تا ۰/۵ میکرومتر هیچ حفره‌ای گزارش نشده است. همین شرایط در نتایج مربوط به سایر پروفیل‌ها نیز مشاهده شد.

باید توجه شود که بر اساس رابطه‌ی پوآزوی، دبی جریان با توان چهارم شعاع منافذ رابطه‌ی مستقیم دارد و در نتیجه افق‌هایی از خاک که دارای منافذ با قطر بزرگ مساوی یا بیش‌تر از ۱۵۰ میکرون هستند قادرند حداقل تا ۵ برابر خاک‌هایی که بزرگ‌ترین قطر حفره‌ی آن‌ها ۱۰۰ میکرون است آب و املاح را جابه‌جا کنند. همچنین با توجه به قانون پوآزی خاکی که دارای یک حفره‌ی ۲۰۰ میکرونی است قادر است به اندازه‌ی ۱/۵ میلیارد حفره‌ی ۱ میکرونی آب و املاح را انتقال دهد. از این رو تعیین حفرات با قطر درشت در خاک حتی اگر تعداد آن‌ها خیلی کم باشد بسیار حائز اهمیت است زیرا منجر به جریان ترجیحی آب و املاح در خاک می‌شوند. چنین حفراتی منجر به ایجاد خطا در تعیین هدایت هیدرولیکی و مکش ورود هوا می-

سانتی‌متر به دست آمده است. فراوانی حفرات از کلاس کاملاً کشیده ($<0/1$)، تا حفرات فاقد کشیدگی (۱-۰/۷۵) کاهش نشان می‌دهد. حفرات فاقد کشیدگی در همه اعماق مساوی یا نزدیک به صفر است که تطابق نتایج به دست آمده را با شرایط واقعی نشان می‌دهد. این شرایط به نوعی بیانگر قابلیت حفرات در انتقال آب و املاح و نفوذپذیری خاک می‌باشد (Nimmo, 2004). تجزیه و تحلیل تصویر حفرات است که می‌تواند نتایج قابل اعتمادی در رابطه با کشیدگی حفرات و تعیین توزیع اندازه‌ی منافذ ارائه دهد.

Cooper et al., (2016) کلاس‌بندی کشیدگی حفرات را به صورت کیفی انجام دادند ولی روش رنگ آمیزی فلورسنت و نرم‌افزار Image tool توانایی تعیین کمی کلاس کشیدگی حفرات را دارد.

از نتایج قابل توجه در جدول ۴ فراوانی زیاد حفرات موجود در کلاس‌های با مساحت و محیط کوچک است که به صورت واضح و آشکار توانایی بالای روش مورد استفاده را در مشاهده‌ی حفرات ریز نشان می‌دهد. تصور می‌شود که عوامل اصلی افزایش قدرت مشاهده در روش مورد استفاده‌ی این پژوهش نسبت به مطالعات (Cooper et al., 2016) و (Passoni et al., 2014)، یکی استفاده از ماده‌ی رنگی فلوروسنت و تصویربرداری با استفاده از نور فرابنفش (UV¹) است که منجر به درخشندگی و قابلیت مشاهده‌ی ریزترین حفرات می‌شود و دیگری استفاده از نرم‌افزار Image tool است که اختصاصاً برای مطالعه‌ی محیط‌های متخلخل تهیه شده است.

مقادیر شاخص گردش‌گی حفرات در جدول ۴ آمده است. تقریباً بیش از ۵۵ درصد حفرات در تمامی اعماق مطالعه شده دارای شاخص گردش‌گی ۰/۱-۰/۰۵ هستند. که حاکی از گردش‌گی اندک حفرات است و به نوعی هماهنگ با شاخص کشیدگی حفرات بیانگر قابلیت انتقال و نفوذپذیری مناسب خاک را نشان می‌دهد. حفرات با گردش‌گی زیاد حداقل فراوانی را نشان می‌دهند که می‌تواند فرض کروی بودن حفرات را مورد تردید قرار دهد.

جدول ۴ نتایج مربوط به کلاس‌بندی قطر معادل، قطر بزرگ و قطر کوچک حفرات نیز نشان می‌دهد. معادله لاپلاس، برای تعیین قطر حفرات از مکش ماتریک آن‌ها استفاده می‌کند و همه‌ی حفرات را به صورت گرد فرض می‌کند. نتایج ارائه شده بر اساس آنالیز تصاویر در این تحقیق نشان می‌دهد که این

برخی ابهامات موجود در روابط فیزیک خاک و رابطه آب و خاک و گیاه کمک نماید. مطالعه و مشاهده مستقیم حفرات بر خلاف سایر روش‌ها به خوبی قادر است حفرات را از نظر خصوصیات هندسی آن‌ها اعم از مساحت، محیط، فشردگی، گردش‌دگی، کشیدگی، قطر معادل، قطر بزرگ و قطر کوچک به خوبی تفکیک کند و توزیع حفرات را از نظر شکل و اندازه در خاک بیان نماید.

تعیین کمی تعداد حفرات موجود در هر کلاس کمک شایانی در تعیین دقیق خصوصیات هیدرولیکی خاک، مطالعه نحوه انتقال املاح، تعیین حفراتی که منجر به جریان ترجیحی آب و املاح می‌شوند و همچنین نحوه توسعه ریشه می‌کند. تعیین کلاس کشیدگی حفرات و فراوانی حفرات در هر کلاس موجب می‌شود که نتایج روش‌های متکی بر منحنی رطوبتی با روش میکرومورفولوژیکی قابل مقایسه شود. در این مطالعه حفرات عمدتاً دارای شاخص کشیدگی کوچک بودند و وجود چنین شرایطی نشان می‌دهد که بیش‌ترین تعداد حفرات خاک دارای شکل غیرکروی هستند و این ثابت می‌کند که در مطالعه حفرات خاک فرض کروی بودن آن‌ها همواره صادق نیست و در همه شرایط نمی‌توان از معادله لاپلاس برای توصیف اندازه حفرات استفاده کرد. چنین شرایطی موجب بروز خطا در نتایج توزیع اندازه‌ی حفرات حاصل از منحنی رطوبتی می‌شود که فرض می‌کند معادله لاپلاس در همه خاک‌ها صادق است. با تعیین کمی مقدار فشردگی حفرات خاک می‌توان راهی برای مدل‌سازی در زمینه نحوه انجام فرایندهای هیدرولیکی در خاک پیدا کرد. فشردگی خاک با توجه به این‌که تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد می‌تواند به عنوان شاخص کیفیت خاک تلقی گردد و با دنبال کردن میزان تغییرات آن می‌توان تغییر در کیفیت خاک را در اثر مدیریت‌های مختلف تعیین نمود. قطر بزرگ و قطر کوچک حفره اهمیت بسیار زیادی در خصوصیات هیدرولیکی آن دارند. طول قطر بزرگ حفره تعیین‌کننده حداکثر جریان قابل عبور از حفره یا به عبارتی حداکثر دبی ممکن برای حفره است. همچنین طول قطر کوچک آن نیز تعیین‌کننده حداکثر دبی حفره است. نرم‌افزار Image tool این قابلیت را دارد که هر حفره را به صورت مجزا به لحاظ طول قطرهای بزرگ و کوچک مورد بررسی قرار دهد. تعیین فراوانی حفرات دارای قطر بزرگ و کوچک، کمک بسیاری در تعیین خصوصیات همچون هدایت هیدرولیکی اشباع، ظرفیت نگهداری آب در خاک و رطوبت قابل استفاده برای گیاه خواهد کرد. همچنین خصوصیات مکانیکی و ساختمانی خاک از جمله مقاومت

شوند و درک منشا این خطا راهی جز مشاهده مستقیم این حفرات باقی نمی‌گذارد.

Hirmas *et al.*, (2016) از طریق تعیین قطر بزرگ و کوچک خاکدانه‌ها به موفقیت جدیدی در زمینه کمی‌سازی خصوصیات هندسی یکی از اجزای ساختمان خاک رسیدند. و خاکدانه‌های خاک را با استفاده از آنالیز تصویر مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. این محققین خصوصیات لایه‌ی سطحی خاک، حفرات بین خاکدانه‌ای و انقباض و انبساط خاک را نیز با استفاده از اسکن سه‌بعدی رقومی‌سازی کردند. در تحقیق حاضر مشخص شد که می‌توان با استفاده از یک شکل دقیق از روش برش‌های متوالی (UV-Flourecent) نتایج قابل قبولی در رابطه با کمی‌سازی خصوصیات ساختمان خاک به دست آورد. در این پژوهش برای تمامی پروفیل‌های مورد مطالعه کلاس‌بندی حفرات با استفاده از نرم‌افزار Image tool انجام گرفت و در همه موارد، روش رنگ آمیزی فلورسنت کارایی لازم را در مطالعه و تفکیک حفرات از یکدیگر داشت.

نتایج نشان داد که اهداف اصلی این پژوهش در رابطه با کلاس‌بندی حفرات و بهبود روش برش‌های متوالی با استفاده از مطالعه UV-Flourecent حاصل گردید. برخلاف سایر روش‌های مطالعه حفرات که توسط Pachepsky *et al.*, (1995)، arah and ball, (1994) و Martys *et al.*, (1994) انجام گرفت در این پژوهش که بر اساس روش برش‌های متوالی مبتنی بر UV-flourecent انجام شد هیچ‌گونه فرضیاتی در رابطه با شکل حفرات انجام نگرفت و حفرات به همان اشکال غیرمنظمی که در خاک بودند مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش مطابق با روشی که (Cabidoche and Guillaume, 1998) مورد استفاده قرار دادند از روش UV-flourecent برای مطالعه حفرات و ثبت ریزترین حفرات بهره‌گیری شد و علاوه بر آن برای اولین بار از نرم‌افزار Image tool که ابزاری مناسب برای تشخیص و تفکیک حفرات است برای کلاس‌بندی کمی حفرات در دامنه‌های کوچک استفاده شد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش ضمن نشان دادن قابلیت‌های روش میکرومورفولوژیکی در مطالعات تخلخل و مورفولوژی حفرات نشان داد که فرضیات اعمال شده در رابطه مورفولوژی حفرات خاک با واقعیت‌های موجود اختلاف قابل توجهی دارند. به خدمت گرفتن اطلاعات حاصل از مشاهدات مستقیم و اندازه‌گیری کمی خصوصیات مورفولوژیکی خاک می‌تواند به رفع

تعیین شوند. با در اختیار داشتن این اطلاعات می‌توان در رابطه با بسیاری از خصوصیات خلل و فرج خاک اظهار نظر نمود.

به نفوذ ریشه، تراکم خاک، تردی خاک و غیره می‌توانند به صورت کمی از طریق توزیع حفرات با قطر کوچک و بزرگ مشخص،

REFERENCES

- Alaoui, A., Lipiec, J., & Gerke, H. H. (2011). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115, 1-15.
- Arah, J.R.M. and Ball, B.C., 1994. A functional model of soil porosity used to interpret measurements of gas diffusion. *European Journal of Soil Science*, 45(2), pp.135-144.
- Cabidoche, Y.M. and Guillaume, P., 1998. A casting method for the three-dimensional analysis of the intraprism structural pores in vertisols. *European Journal of Soil Science*, 49(2), pp.187-196.
- Cooper, M., Vidal-Torrado, P., & Chaplot, V. (2005). Origin of microaggregates in soils with ferralitic horizons. *Scientia Agricola*, 62(3), 256-263.
- Cooper, M., Boschi, R. S., Silva, V. B. D., & Silva, L. F. S. D. (2016). Software for micromorphometric characterization of soil pores obtained from 2-D image analysis. *Scientia Agricola*, 73(4), 388-393.
- Dec, D., Dörner, J., Becker-Fazekas, O., & Horn, R. (2008). Effect of bulk density on hydraulic properties of homogenized and structured soils. *RC Suelo Nutr. Veg*, 8(1), 1-13.
- FitzPatrick, E. A., & Fitzpatrick, E. A. (1993). *Soil microscopy and micromorphology* (p. 304). Chichester: John Wiley & Sons.
- Beckmann, W., & Geyger, E. V. (1967). Entwurf einer Ordnung der natürlichen Hohlraum-, aggregat- und Strukturformen im Boden. *Die Mikromorphometrische Bodenanalyse*, 165-188.
- Hirmas, D. R., Giménez, D., Mome Filho, E. A., Patterson, M., Drager, K., Platt, B. F., & Eck, D. V. (2016). Quantifying Soil Structure and Porosity Using Three-Dimensional Laser Scanning. In *Digital Soil Morphometrics* (pp. 19-35). Springer International Publishing.
- Manual of Image Tool. (2001). UTHSCSA.
- Martys, N.S., Torquato, S. and Bentz, D.P., 1994. Universal scaling of fluid permeability for sphere packings. *Physical Review E*, 50(1), p.403.
- Nimmo, J. R. (2004). Porosity and pore size distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 3, 295-303.
- Oh, S., Kim, Y. K., & Kim, J. W. (2015). A modified van Genuchten-Mualem Model of hydraulic conductivity in Korean Residual Soils. *Water*, 7(10), 5487-5502.
- Pachepsky, Y.A., Shcherbakov, R.A. and Korsunskaya, L.P., 1995. Scaling of soil water retention using a fractal model. *Soil science*, 159(2), pp.99-104.
- Pagliai, M. and Vignozzi, N., 2003. Image analysis and microscopic techniques to characterize soil pore system. *Physical methods in agriculture: Approach to precision and quality*. Kluwer Acad. Publ., New York, pp.13-38.
- Passoni, S., Borges, F. D. S., Pires, L. F., Saab, S. D. C., & Cooper, M. (2014). Software Image J to study soil pore distribution. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(2), 122-128.
- Perfect, E., McLaughlin, N.B., Kay, B.D. and Topp, G.C., 1996. An improved fractal equation for the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 32(2), pp.281-287.
- Perret, J., Prasher, S. O., Kantzas, A., & Langford, C. (1999). Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1530-1543.
- Previatello da Silva, L., & de Jong Van Lier, Q. (2015). Pore space connectivity and porosity using CT scans of tropical soils. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17, p. 1528).
- Russ, J. C. (2011). Processing binary images. *The Image Processing Handbook*, 4, 410-412.
- Schoonover, J. E., & Crim, J. F. (2015). An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154(1), 21-47.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., & Benham, E. C. (2012). Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. *Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE*, 36.
- Tuller, M., & Or, D. (2004). Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 4, 278-289.
- Vergani, C., & Graf, F. (2015). Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. *Ecohydrology*.
- Verruijt, A. (2001). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, Netherlands.
- Zdravkov, B., Čermák, J., Šefara, M., & Janků, J. (2007). Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. *Open Chemistry*, 5(2), 385-395.