



## Application of microscopic features of soil pores in the assessment of soil physical quality

Aida Bakhshi Khorramdarre<sup>1</sup> | Parisa Alamdari<sup>2</sup> | Ahmad Heidari<sup>3</sup> | Mohammad Hossein Mohammadi<sup>4</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: [aida\\_bakhshi@ut.ac.ir](mailto:aida_bakhshi@ut.ac.ir)

2. Corresponding author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: [p\\_alamdari@znu.ac.ir](mailto:p_alamdari@znu.ac.ir)

3. Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Daneshkadeh Ave., Karaj, Iran Email: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)

4. Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Daneshkadeh Ave., Karaj, Iran. Email: [mhmohmad@ut.ac.ir](mailto:mhmohmad@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Aug. 21, 2023

**Revised:** Oct. 14, 2023

**Accepted:** Oct. 21, 2023

**Published online:** Dec. 23, 2023

**Keywords:**

Image Analysis,  
Minimum Dataset,  
Principal Component Analysis,  
Soil Properties.

### ABSTRACT

Researchers consistently seek methods that minimize data requirements and decrease soil quality assessment costs. Soil pores are recognized as indicators of soil physical quality due to their environmental sensitivity. This study identified key parameters related to soil pores and physico-chemical properties to assess their potential as indicators of soil physical quality. Conducted between 2020 and 2022 at the University of Tehran's Soil Sciences Department Micromorphology Laboratory, the study used image analysis to determine the parameters related to pores resulting from 126 experimental units, including amendements, removals and disruptive experimental treatments and affected by 22 cycles of wetting and drying which were determined in two types of soils, sandy loam and silty clay. Parameters included sphericity, elongation, area, and compactness. The first two principal components (PC1 and PC2) represent more than 70% of the variations in the studied soils. Parameters like sphericity (81% and 80% correlation with PC1 and PC2) and elongation (77% and 83% correlation with PC1 and PC2) in loamy sand, and elongation (53% and 87% correlation with PC1 and PC2) and pore area (48% and 68% correlation with PC1 and PC2) in silty clay loam were identified as quality indicators. Comparing soil quality based on pores in different treatments with control showed 32% and 18% differences in loamy sand and silty clay loam, respectively, demonstrating indicator efficacy in reflecting soil quality changes. The microscopic features of pores that possess fractal properties were successfully utilized in this study for assessing soil quality. Based on this method, it is possible to employ this approach for determining soil quality on a field scale.

Cite this article: Cite this article: Bakhshi Khorramdarre, A., Alamdari, P., Heidari, A., & Mohammadi, M. H. (2023). Application of Microscopic Features of Soil Pores in the Assessment of Soil Physical Quality, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (10), 1581-1596. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363159.669546>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363159.669546>



**کاربرد ویژگی‌های میکروسکوپی منافذ خاک در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک**آیدا بخشی خرمدره<sup>۱</sup> | پریسا علمداری<sup>۲</sup> | احمد حیدری<sup>۳</sup> | محمدحسین محمدی<sup>۴</sup>۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ایران. رایانامه: [aida\\_bakhshi@ut.ac.ir](mailto:aida_bakhshi@ut.ac.ir)۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ایران. رایانامه: [p\\_alamdari@znu.ac.ir](mailto:p_alamdari@znu.ac.ir)۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: [mhmohmad@ut.ac.ir](mailto:mhmohmad@ut.ac.ir)**اطلاعات مقاله****چکیده**

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱

**واژه‌های کلیدی:**

آنالیز تصویر،

تجزیه و تحلیل مولفه اصلی،

دسته داده حداقل،

ویژگی‌های خاک.

منافذ خاک به دلیل اثرپذیری از شرایط محیطی، به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک شناخته می‌شود. در این مطالعه پارامترهای مختلف مربوط به منافذ خاک تعیین و در کنار برخی دیگر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک برای تعیین دسته داده حداقل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا قابلیت آن‌ها در بکارگیری به عنوان شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک سنجیده شود. در بازه سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ و در کارگاه میکرومورفولوژی گروه علوم خاک دانشگاه تهران، پارامترهای مربوط به منافذ ناشی از ۱۲۶ واحد آزمایشی شامل تیمارهای آزمایشی اصلاحی و تخریبی و متاثر از ۲۲ دوره تر و خشک شدن در دو خاک شن لومی و رس سیلتی از جمله ضریب گردی، کشیدگی، مساحت و فشردگی منافذ با استفاده از روش آنالیز تصویر تعیین شد. نهایتاً این ویژگی‌ها با روش تجزیه مولفه اصلی پالایش گشته و مهمترین ویژگی‌های تعیین‌کننده کیفیت فیزیکی خاک تعیین گردید. دو مولفه اصلی اول و دوم (PC1 و PC2) بیان‌گر بیش از ۷۰ درصد از تغییرات خاک‌های مورد مطالعه بود. از طرفی با توجه به همبستگی قوی مشاهده شده، پارامترهای ضریب گردی (۸۱ و ۸۰ درصد همبستگی با PC1 و PC2) و کشیدگی منافذ (با ۷۷ و ۸۳ درصد همبستگی با PC1 و PC2) در خاک شن لومی و پارامترهای کشیدگی (با ۵۳ و ۸۷ درصد همبستگی با PC1 و PC2) و مساحت منافذ (با ۴۸ و ۶۸ درصد همبستگی با PC1 و PC2) در خاک رس سیلتی به عنوان شاخص‌های تعیین کیفیت شناسایی شدند. با توجه به توانایی در بیان تغییرات خاک‌ها، ویژگی‌های میکروسکوپی منافذ با موفقیت در این مطالعه جهت تعیین کیفیت خاک بکارگیری شدند. از طرفی به دلیل خاصیت فراکتالی منافذ، می‌توان از این شیوه در تعیین کیفیت خاک در مقیاس بزرگ‌تر استفاده نمود.

استناد: بخشی خرمدره، آیدا؛ علمداری، پریسا؛ حیدری، احمد؛ و محمدی، محمدحسین (۱۴۰۲). کاربرد ویژگی‌های میکروسکوپی منافذ خاک در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۰)، ۱۵۹۶-۱۵۸۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363159.669546>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363159.669546>

## مقدمه

خاک برای جوامع انسانی حیاتی است زیرا نه تنها کمیت و کیفیت غذا و تولید مواد فیبری را افزایش می‌دهد، بلکه بستری برای حمایت از تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم است. بعلاوه با توجه به این که محصولات گیاهی منبع اصلی تولید مواد غذایی هستند، بهره‌گیری پایدار از منابع خاکی برای سلامت بلندمدت انسان ضروری است (Nakajima et al., 2015). حفظ تولید حداکثری در بلندمدت بدون کاهش کیفیت خاک (SQ) و تخریب خاک هدف اصلی برنامه‌های استفاده پایدار از خاک است (Askari and Holden, 2014). برخلاف کیفیت آب و هوا، کیفیت خاک صرفاً بر اساس سطح آلودگی‌های موجود در آن تعیین نمی‌گردد، بلکه تعریف گسترده‌تری داشته و به عنوان ظرفیت خاک از نظر عملکردهای مورد انتظار از آن در چارچوب کاربری‌های اکوسیستم تعریف می‌شود که سبب ایفای نقش بیولوژیکی خاک به‌صورت پایدار، حفظ کیفیت زیست محیطی و افزایش سلامت گیاهان و جانوران می‌شود (Davidson, 2000). ارزیابی دقیق و قابل اتکای SQ یک امر کلیدی در تعریف برنامه‌های مختلف مدیریت خاک است (Guo et al., 2017). اندازه‌گیری یک پارامتر نمی‌تواند تعیین‌کننده SQ باشد و برای این منظور باید تعدادی از ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری گردد (Obade and Lal, 2017). با این که چارچوب‌ها و مدل‌های مفهومی مختلفی شامل روش‌های کمی و کیفی برای ارزیابی SQ توسعه داده شده است (Karlen et al., 1997; Andrews et al., 2004; Paz-Kagan et al., 2014; Askari and Holden, 2014; Obade and Lal, 2017)، تمامی این روش‌ها بسیار زمان‌بر و متکی به مکان هستند، و تنوع و پیچیدگی ذاتی خاک‌ها سبب می‌شود این روش‌ها کاربری محدودی داشته باشند. بنابراین، ارزیابی دقیق و قابل اتکای SQ در مقیاس‌های منطقه‌ای، ملی و جهانی مستلزم تحقیقات بیش‌تری است (Obade and Lal, 2017).

## پیشینه پژوهش

استفاده از شاخص‌های منفرد در تعیین SQ کارایی کافی ندارد زیرا در برابر عوامل محیطی واکنش‌های ناهمسوپی نشان می‌دهند (Mukherjee and Lal, 2014) که در شناسایی اثرات عوامل محیطی و فعالیت‌های انسانی بر کیفیت خاک اختلال ایجاد می‌کند (Karlen et al., 1997). در واقع مفهوم SQ چندین ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را به صورت منفرد یا تلفیقی در نظر می‌گیرد (Andrews et al., 2004) تا عملکرد خاک را تحت کاربری‌های مختلف و برنامه‌های مدیریتی متفاوت کشاورزی را که سبب خاکدانه‌سازی، ثبات ویژگی‌ها و یا تخریب خاک می‌شود تعیین کند (Karlen et al., 2003). معمولاً، ترکیبی از اندازه‌گیری‌ها و تجزیه‌های متعدد خاک به عنوان شاخص‌های SQ مورد استفاده قرار می‌گیرند (Andrews et al., 2004; Karlen et al., 2006; Masto et al., 2008). از طرفی ویژگی‌های پویای خاک مانند ماده آلی خاک (SOM<sup>2</sup>)، خاکدانگی و عمده ویژگی‌های زیستی، ویژگی‌هایی هستند که بیش‌ترین پاسخ را به برنامه‌های مدیریتی، دست‌خوردگی و یا تغییر کاربری اراضی نشان می‌دهند (Masto et al., 2008). با این حال، SQ و ارزیابی آن بستگی به ویژگی‌های مکان جغرافیایی خاک داشته و تحت تاثیر عوامل تعیین‌کننده محیطی مانند اقلیم (درجه حرارت و مقدار بارندگی)، نحوه مدیریت اراضی و ویژگی‌های ذاتی خاک دارد (Andrews et al., 2004).

چگونگی ترکیب شاخص‌های کیفی و کمی خاک به صورت هدفمند برای ایجاد شاخص‌های کیفیت خاک (SQI<sup>3</sup>) جامع، همچنان به عنوان یک چالش در تعیین SQ تلقی می‌گردد (Obade and Lal, 2017). طیفی از شیوه‌های انتخاب شاخص، امتیازدهی به شاخص و تجمیع امتیازات برای اهداف خاص توسعه داده شده است، با این حال SQI‌های ناشی از این شیوه‌ها معمولاً در شرایط محیطی محدودی که در آن ایجاد شده‌اند کاربرد دارند (Qi et al., 2009; Askari and Holden, 2014; Guo et al., 2017). Yu et al. (2018) با فرض این که SQI ابزار مناسبی برای ارزیابی اثرات کاربری‌های مختلف اراضی و عملیات مدیریتی بر کیفیت خاک است، پژوهشی را انجام داده و دسته داده حداقل (MDS<sup>4</sup>) شامل شاخص‌های کلیدی خاک برای تعیین SQ را تعیین کردند و با بهره‌گیری از مناسب‌ترین تابع امتیازدهی (خطی یا غیر خطی) یک SQI توسعه دادند. همچنین این محققین با شیوه‌ی تلفیق (جمع‌ی یا جمع وزنی<sup>5</sup>) برای کاربری‌های مختلف اراضی تأثیر این کاربری‌ها بر SQ را مورد بررسی قرار دادند. این محققین با استفاده از روش تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA<sup>6</sup>) از میان ۲۲ پارامتر اندازه‌گیری شده، ۱۳ ویژگی را به عنوان دسته داده حداقل انتخاب کردند و نتایج تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان

1 - Soil quality

2- Soil organic matter

3- Soil quality index

4- Minimum Date Set

5- Additive or weighting additive

6- Principal component analysis

داد که تغییر کاربری اراضی کشاورزی به مرتع سبب افزایش کیفیت خاک شده است. اگرچه ارزیابی SQ به‌عنوان ابزاری برای بررسی و کمی‌سازی اثرات شخم و مدیریت خاک (Hussain et al., 1999; Shukla et al., 2013; Armenise et al., 2006; al., 2006)، نوع کاربری اراضی (Masto et al., 2008; Rahmanipour et al., 2014)، و پوشش گیاهی (Fu et al., 2004; Bastida et al., 2006; Navas et al., 2011) بر عملکرد خاک بکار برده می‌شود، با این حال تمامی این مطالعات در مقیاس‌های بزرگ مزرعه‌ای انجام شده و کنترل کاملی بر شرایط محیطی خاک اعمال نشده است، همچنین ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی خاک برای بررسی تغییرات ویژگی‌های خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است. در این مطالعه ویژگی‌های خاک تحت شرایط کاملاً کنترل شده دمایی و رطوبتی تحت تاثیر تیمارهای تخریبی، شیمیایی و فیزیکی قرار گرفت تا امکان مقایسه ویژگی‌های خاک‌ها تحت تاثیر تیمارهای مورد استفاده فراهم گردد. با وجود این‌که، استفاده از ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی نیازمند دانش و تخصص فنی است، سبب می‌شود تعیین SQI وابستگی مکانی و آب و هوایی نداشته باشد. از طرفی به دلیل اینکه منافذ خاک جزو ویژگی‌های فراکتال<sup>۱</sup> محسوب می‌شوند، لذا استفاده از این ویژگی‌ها در تعیین کیفیت خاک در مقیاس گلدان با اطمینان بیش‌تری قابلیت تعمیم به مقیاس مزرعه را خواهد داشت (Wang et al., 2022). همچنین Moncada et al. (2014) پیشنهاد کردند که به دلیل ارتباط مستقیم ویژگی‌های هندسی منافذ خاک با هدایت هیدرولیکی آن، از این ویژگی‌ها برای تعیین کیفیت فیزیکی و ساختمانی خاک استفاده شود. لذا در این مطالعه اولاً از شیوه‌ای استفاده شد که وابستگی مکانی نداشته و کارایی آن تحت تاثیر ویژگی‌های خاک قرار نمی‌گیرد و ثانیاً با اعمال تیمارهای متنوع تلاش شد تا اثرات این تیمارها بر کیفیت فیزیکی خاک مشخص شود.

## روش‌شناسی پژوهش

### نمونه‌برداری خاک و تهیه تیمارهای مطالعاتی

در این مطالعه که در بازه بین سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ انجام شد، دو بافت خاک متفاوت از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک شن لومی جنوب شهرستان نظرآباد واقع در جنوب غربی استان البرز (مختصات ۵۴° ۳۵' شمالی و ۳۲° ۵۰' شرقی) و خاک رس سیلتی مزرعه تحقیقاتی کوهین واقع در غرب استان قزوین (مختصات ۲۲° ۳۶' شمالی و ۳۵° ۴۹' شرقی) نمونه‌برداری شد. مقادیر کافی از نمونه دست‌خورده از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری دو خاک مذکور به اتاق نگهداشت و هوادهی نمونه‌های خاک گروه علوم خاک دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران منتقل گردید. پس از پخش و هوادهی کامل نمونه‌های خاک به مدت ۷۲ الی ۱۲۰ ساعت، به منظور فروپاشی ساختمان اولیه خاک و خاک‌دانه‌های آن، چندین مرحله عمل گذراندن خاک از دستگاه کوبش انجام شد تا نهایتاً حجم یکنواختی از خاک هواخشک شده با حذف حداکثری خاکدانه‌های درشت به دست آید.

ایجاد تیمارهای آزمایشی

واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌هایی پلاستیکی با ظرفیت ۱ کیلوگرم (ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و حجم ۷۰۰ سانتی‌متر مکعب) بود که ۹ نوع تیمار اصلاحی، حذف و تخریبی در آن‌ها اعمال گردید. تیمارهای اصلاحی از طریق افزودن سه سطح کربنات کلسیم (۱/۵، ۳ و ۵ درصد)، سه سطح ماده آلی (مقادیر ۰/۶، ۱ و ۲ درصد کمپوست)، سه سطح آهن (۰/۵، ۱ و ۲ درصد اکسید آهن هفت‌آبه)، سه سطح کاتیون‌های سدیم و کلسیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر کلسیم کلراید و سدیم کلراید) به روش Farahani et al., (2018) و سه سطح از ترکیب کربنات کلسیم-کمپوست-آهن (سطح اول، نسبت ۱/۵-۰/۶-۰/۵ درصد، سطح دوم، نسبت ۱-۱-۳ درصد، سطح سوم، نسبت ۲-۲-۵ درصد) اعمال شد. همچنین تیمارهای حذف از طریق حذف کربنات کلسیم (آهک)، ماده آلی، و اکسید آهن خاک‌ها به شیوه استاندارد (Sarkar et al., 2018) آماده گردید. تیمارهای تخریبی نیز از طریق گلخراب کردن خاک‌ها ایجاد شد به طوری که یک تیمار به مدت ۱۸۰ روز دوره تر و خشک شدن را پشت سر گذاشت و دیگری بلافاصله و بدون تغییر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به منظور اطمینان از ایجاد شرایط یکسان در تکرارهای هر تیمار مورد مطالعه، حدود ۳۵۰۰ گرم از هر یک از خاک‌های شن لومی و رس سیلتی برای آماده‌سازی هر تیمار جدا گشته و پس از پایان فرایند افزودن یا حذف مواد مورد نظر، به صورت یکباره به درون گلدان‌ها منتقل شد تا سه تکرار از هر سطح تیمار مورد نظر آماده گردد. در این مطالعه، نیازی به اصلاح جرم مخصوص ظاهری خاک‌های درون گلدان‌ها و معادل‌سازی آن با شرایط مزرعه نبود، زیرا با اعمال چند دوره تر و خشک شدن، خاک هر تیمار با توجه به ویژگی‌هایی که داشت بدون دخالت انسان،

به احتمال‌ترین جرم مخصوص ظاهری متمایل شد (Bian et al., 2022). بنابراین به همراه شش تیمار شاهد (سه تکرار بافت شن لومی و سه تکرار بافت رس سیلتی) در مجموع تعداد ۱۲۶ واحد آزمایشی شامل سه تکرار از سه سطح از پنج تیمار اصلاحی در دو بافت خاک مورد مطالعه (۳\*۳\*۵\*۲)، سه تکرار از سه تیمار حذف آهک، اکسید آهن و ماده آلی در هر دو بافت خاک (۳\*۳\*۲)، سه تکرار از دو سطح تیمار تخریبی در دو بافت شن لومی و رس سیلتی (۳\*۲\*۲) مورد مطالعه قرار گرفت.

### اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن

واحدهای آزمایشی مورد مطالعه پس از آماده‌سازی با بکارگیری لوازم سرمایشی، گرمایشی و تهویه‌ای تحت شرایط کنترل شده دمایی (دمای ۲۴ الی ۲۶ درجه سانتی‌گراد) و در معرض تهویه مناسب قرار گرفتند. برای ایجاد شرایط بهینه جهت اثرگذاری تیمارهای مورد مطالعه بر ساختمان خاک، دوره‌های تر و خشک شدن به مدت شش ماه در اتاق تهویه اعمال شد. تیمارهای خاک درون گلدان‌های پلاستیکی تشکیل دهنده واحدهای آزمایشی با استفاده از آب مقطر و با اضافه کردن آب از بالا آبیاری شدند. به منظور جلوگیری از تخریب ساختمان خاک سطحی، حین آبیاری از یک مانع پلاستیکی استفاده شد که در سطح خاک قرار گرفته و سبب شد آب به آهستگی در سطح خاک پخش گردد. مقدار آب آبیاری معادل با ۸۵ درصد اشباع بود (معادل با ۱۰ درصد جرمی در خاک شن لومی و ۲۶ درصد جرمی در خاک رس سیلتی) و پس از اضافه کردن این مقدار آب به نمونه خاک، گلدان‌ها تا نوبت بعدی آبیاری به حال خود رها می‌شدند. خاک‌ها در رطوبت‌های بیش‌تر از ۸۵ درصد اشباع وضعیت سیال پیدا می‌کردند و ساختمان آن‌ها تحت تاثیر قرار می‌گرفت، و از طرفی خاک‌های طبیعی به ندرت رطوبت‌های بیش‌تر از این حد را تجربه می‌کنند (Vereecken et al., 2008). لذا جهت تعیین مقدار آب لازم برای رسیدن رطوبت خاک به ۸۵ درصد اشباع ابتدا رطوبت اشباع خاک اندازه‌گیری شده و سپس جرم خاک مرطوب در وضعیت ۸۵ درصد اشباع محاسبه شد. به این ترتیب در هر بار آبیاری اختلاف جرم خاک در وضعیت رطوبتی موجود و جرم خاک در رطوبت معادل ۸۵ درصد اشباع تعیین و به همان میزان آب به خاک اضافه شد. گلدان‌های مورد مطالعه فاقد حفره زهکشی بودند و بنابراین تنها راه تخلیه آب از آن‌ها تبخیر سطحی بود. با توجه به عدم زهکشی از خاک‌ها، مواد خاکی امکان خروج از گلدان را نداشته و تنها خروجی هر واحد آزمایش رطوبتی بود که از سطح خاک خارج می‌شد. بر همین اساس، امکان پایش مقدار رطوبت خاک با توزین مستقیم گلدان‌ها وجود داشت و نوبت بعدی آبیاری مقارن با وضعیتی بود که در آن تغییرات رطوبتی در دو روز متوالی به حداقل رسید و تفاوت معنی‌داری بین مقدار رطوبت خاک در زمان اندازه‌گیری و روز گذشته‌ی آن وجود نداشت. برای شناسایی این وضعیت رطوبتی، از روز چهارم پس از آبیاری، روزانه ۱۰ درصد از واحدهای آزمایشی (۱۲ گلدان به صورت تصادفی توزین و بر اساس رطوبت خاک درون گلدان، در مورد نیاز آبیاری تصمیم‌گیری می‌شد. با توجه به کنترل شرایط محیطی، در تمام دوره تر و خشک شدن در روزهای هفتم یا هشتم پس از رهاسازی خاک نزدیک به اشباع، نوبت آبیاری بعدی فرا می‌رسید بنابراین در طول دوره شش ماهه ۲۲ چرخه تر و خشک شدن تکرار شد. در واقع با اینکه به دلیل توان نگهداری متفاوت آب در خاک‌های سبک و سنگین بافت، سطح رطوبت در دو بافت مورد مطالعه متفاوت بود، با این حال تغییرات رطوبت در هر دو آن‌ها تقریباً باهم به حداقل می‌رسید. چنین وضعیتی در ابتدای فاز دوم تبخیر ایجاد می‌شود و در دمای اتاق پس از ۸ الی ۱۰ روز پس از آبیاری رخ می‌دهد (Lehmann et al., 2008).

### مطالعات میکرومورفولوژیکی و آزمایشگاهی

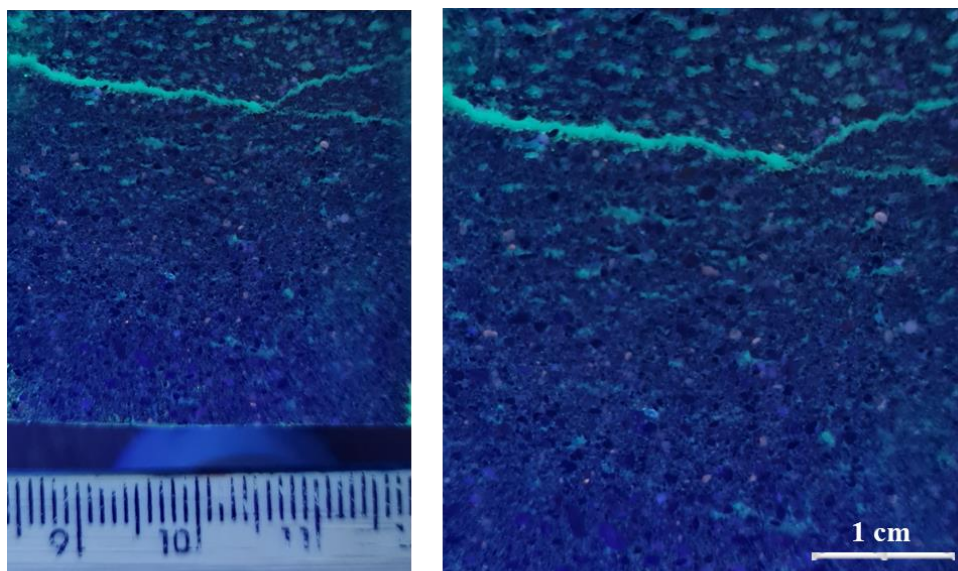
#### تلقیح تیمارها با رزین پلی‌استر و فلئورسنت

پس از اتمام دوره تر و خشک شدن، به منظور آماده‌سازی نمونه‌های خاک جهت تصویربرداری دیجیتال، تیمارها با استفاده از مخلوط ۵:۱ رزین پلی‌استر و استایرن و مقادیر متناسب سخت‌کننده<sup>۱</sup> (۸ قطره در هر لیتر رزین-استایرن) و کاتالیزور<sup>۲</sup> (۲۰ قطره در هر لیتر رزین-استایرن) تلقیح گردیدند. همچنین به منظور افزایش قابلیت مشاهده منافذ خاک در تصاویر دیجیتال، به ازای هر لیتر از مایه تلقیح مقدار ۲/۵ گرم فلئورسنت اضافه گردید تا پس از پر کردن منافذ خاک، حداکثر درخشندگی را در آن‌ها ایجاد نماید (Ringrose-Voase et al., 1996). مایه تلقیح ابتدا تا میانه‌های عمق هر گلدان اضافه شد و به مدت دو ساعت تحت مکش ۰/۵ بار قرار گرفت تا رزین جایگزین هوای محبوس بین خاکدانه‌ها گردد. سپس گلدان‌ها از دسیکاتور خارج گردید و بلافاصله مجدداً مایه تلقیح به آن‌ها اضافه شد به طوری که تا حدود ۱ سانتی‌متر بالای سطح خاک را بپوشاند و بلوک خاک کاملاً در مایه تلقیح غوطه‌ور گردد. در این مرحله هر گلدان به مدت دو

ساعت دیگر درون دستگاه دسیکاتور تحت مکش ۰/۵ بار قرار گرفت. نهایتاً پس از خارج کردن نمونه‌ها از دستگاه دسیکاتور، مقداری رزین بیشتر به گلدان‌ها اضافه گردید و سطح آن پوشانده شد تا از تبخیر سریع استایرن پیشگیری گردد (Wei et al. 2019). پس از یک هفته، پوشش سطحی هر گلدان جدا شد تا استایرن در دمای اتاق تبخیر شود. پس از حدود ۷۵ روز رزین پلی‌استر به سختی مورد نظر رسید و آماده ایجاد برش گردید.

#### برش، سایش، و تصویربرداری از نمونه‌ها

جهت تسهیل تصویربرداری و مشاهده منافذ خاک و توسعه احتمالی ساختمان خاک، بلوک‌های سخت شده خاک برش و سایش داده شدند (Wei et al. 2019). در هر تیمار دو برش افقی و دو برش عمودی ایجاد شد و به عبارتی چهار سطح افقی و چهار سطح عمودی (در مجموع ۸ سطح شامل دو برش از چهار وجه) در هر بلوک خاک برای تصویربرداری آماده شد. تصویربرداری از هر سطح در اتاقک تاریک مجهز به دو لامپ فرابنفش<sup>۱</sup> انجام شد تا حداکثر درخشندگی در منافذ پر شده با مایه تلقیح حاوی فلئورسنت ایجاد گشته و امکان مشاهده کوچک‌ترین منافذ فراهم گردد. تصویربرداری سطوح برش داده شده با استفاده از دوربین دیجیتال با وضوح ۱۲ مگاپیکسل و لنز f/1.8 انجام شد. نهایتاً تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ.1.53s پردازش و تجزیه و تحلیل گردید. شکل (۱) نشان‌دهنده نمونه‌ای از تصویر خام سطح برش داده شده (به همراه مقیاس، شکل ۱-الف)، و تصویر مقیاس دهی شده (شکل ۱-ب) است که در نرم‌افزار برای پردازش آماده گردید.



(الف)

(ب)

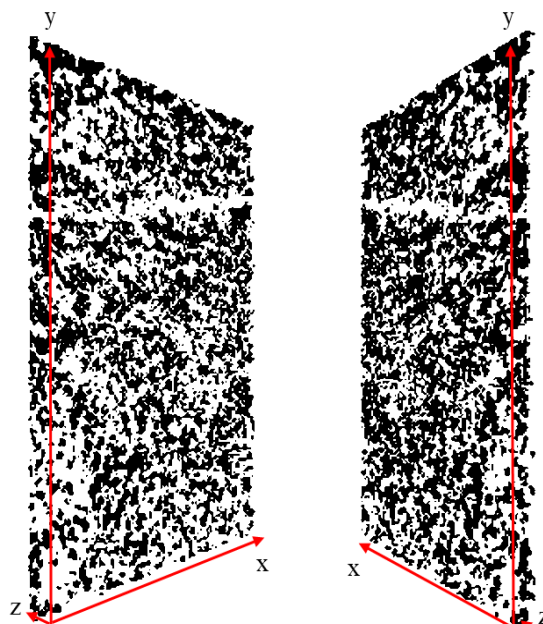
شکل ۱- یک نمونه از تصاویر خام تهیه شده از مقاطع برش داده شده (الف)، و تصویر برش داده شده و مقیاس دهی شده جهت پردازش نهایی (ب).

#### پیش‌پردازش تصاویر

پس از بارگذاری تصاویر رنگی در نرم‌افزار ImageJ مقیاس تصاویر تعیین شد، واسنجی گردید و سپس به فرمت سیاه و سفید<sup>۲</sup> تبدیل شد. به منظور پردازش دقیق‌تر تصاویر، نسخه‌های سیاه و سفید تصاویر با شیوه آستانه‌بندی<sup>۳</sup> به فرمت تفکیک شده<sup>۴</sup> تغییر یافت تا درون تصویر منافذ با پیکسل‌های سفید و بخش جامد با پیکسل‌های سیاه از هم مجزا گردند. تصاویر آستانه‌بندی شده از طریق شیوه انباشت<sup>۵</sup> بر روی هم منطبق گردید تا ۴ تصویر سه‌بعدی (۲ تصویر در وجوه عمودی و ۲ تصویر در وجوه افقی) برای هر تیمار ایجاد گردد. ویژگی‌های کلیدی فضای منافذ خاک، شامل تخلخل سه‌بعدی<sup>۶</sup> (حجم و کسل‌های -کوچکترین جزء سه‌بعدی شناسایی شده در تصویر - منافذ تقسیم بر تعداد

1. UV lamp
2. Grayscale
3. Thresholding
4. Binary images
5. Stacking
6. 3D porosity

کل و کسل‌ها)، ضریب گردی<sup>۱</sup> (ضرایب صفر و ۱ به ترتیب مربوط به گردترین و طولی‌ترین منافذ است)، نسبت طول کوچک به طول بزرگ<sup>۲</sup>، کشیدگی<sup>۳</sup> منافذ، و جهت‌گیری منافذ<sup>۴</sup> با استفاده از پردازنده‌های سه‌بعدی و دوبعدی در نرم‌افزار Image J تعیین گشت. شکل (۲) یکی از نمونه‌های تصاویر پردازش شده به شیوه تجزیه و تحلیل سه‌بعدی را نشان می‌دهد. برخی از ویژگی‌های دوبعدی و سه‌بعدی منافذ مانند سطح مقطع و ضریب گردی منافذ مستقیماً در خروجی نرم‌افزار ImageJ فراهم شد، در حالی که برخی ویژگی‌ها مثل تخلخل به عنوان بخشی از حجم تصویر که توسط منافذ اشغال گردید محاسبه شد.



شکل ۲- تصویر سه‌بعدی حاصل از انباشت یک نمونه از مقاطع مورد مطالعه.

#### تعیین شاخص کیفیت خاک و امتیازدهی به کیفیت خاک تیمارهای مورد مطالعه

دسته داده حداقل از بین ۱۵ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و میکرومورفولوژیکی اندازه‌گیری شده در این مطالعه در محیط نرم‌افزار Orange تعیین شد. این ویژگی‌ها شامل درصد رس، سیلت و شن (ویژگی‌های طبقه‌بندی کننده<sup>۵</sup>)، رطوبت اشباع، کربن آلی، pH، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح مقطع منافذ، حجم منافذ، تخت شدگی منافذ، کشیدگی منافذ، ضریب گردی منافذ، و تراکم منافذ (ویژگی‌های عددی<sup>۶</sup>) بود. تعیین کیفیت خاک با اجرای فرایندهایی شامل بارگذاری داده‌ها در محیط نرم‌افزار Orange، بکارگیری تکنیک PCA، و انتخاب دسته داده حداقل و شاخص‌های کیفیت خاک، انجام شد. جهت تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از افزونه Preprocessor در نرم‌افزار Orange، داده‌های مورد مطالعه به فرم نرمال تغییر داده شد تا همه ویژگی‌های مورد مطالعه دارای مقیاسی یکسان باشند. کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر مربوط به هر ویژگی مورد مطالعه به ترتیب اعداد صفر و ۱ را در فرم نرمال به خود اختصاص دادند سایر مقادیر نیز اعداد متناسبی در دامنه صفر و ۱ داشتند.

برای تعیین کیفیت خاک دسته داده حداقل با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل مولفه اصلی تعیین گردید. پس از تعیین مولفه‌های اصلی (مهم‌ترین ویژگی‌های توصیف‌کننده خاک که با  $PC^y$  بیان می‌شود) و دسته داده حداقل، مقادیر مربوط به هر یک شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس دو عامل تعیین گردید؛ ۱) مقدار همبستگی هر یک از ویژگی‌های موجود در دسته داده حداقل با مؤلفه‌های اصلی اول و دوم ( $PC1$  و  $PC2$ )، ۲) مقدار مشارکت هر یک از مولفه‌های اصلی در واریانس کل داده‌ها. به عبارتی سهم هر شاخص در تعیین امتیاز کیفیت خاک تابع مستقیمی از همبستگی اجزای آن شاخص با هر یک از مولفه‌های اصلی و واریانس ناشی از آن مؤلفه اصلی در کل مجموعه داده مورد مطالعه بود. جهت انتخاب دسته داده حداقل مقدار امتیاز مشخصه هر ویژگی در تغییرات خاک با استفاده از معادله (۱) محاسبه

1. Sphericity
2. Aspect ratio
3. Elongation
4. Object orientation
- 5 - Categorical features
- 6 - Numerical features
- 7 - Principal component

شد.

$$S = (F \times W_{PC1}) + (F \times W_{PC2}) + \dots + (F \times W_{PCn}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله، S، امتیاز مشخصه هر ویژگی، F، مقدار ویژگی مورد بررسی، و  $W_{PC}$ ، وزن مولفه‌های اصلی در تعیین واریانس مجموعه داده است.

پس از تعیین امتیاز مشخصه‌ها در هر ویژگی، شاخص کیفیت خاک بر اساس وزن هر مشخصه ( $W_i$ ) و امتیاز آن ( $S_i$ ) از معادله (۲) به دست آمد (Li et al., 2019).

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \times S_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

## یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک قبل از اعمال تیمارها در جدول (۱) مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کلیدی دو بافت خاک مورد مطالعه است که به وضوح از نظر کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و درصد ذرات اولیه (رس، سیلت و شن) با یکدیگر متفاوت‌اند.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو خاک نمونه‌برداری شده.

ویژگی‌ها	رس (%)	شن (%)	سیلت (%)	درصد آهک	CEC (cmolc.kg <sup>-1</sup> )	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	BD (kg.m <sup>-3</sup> )	OC (%)
شن لومی	۱۲/۱	۸۲/۶	۵/۳	۱۵/۵	۵/۲	۰/۸۸	۸/۱۲	۱۳۴۰	۰/۱۴
رس سیلتی	۴۱/۷	۱۰/۲	۴۸/۱	۲۶/۹	۲۶/۰	۰/۴۹	۷/۶۲	۱۲۹۰	۰/۴۷

\*OC: کربن آلی خاک، BD: جرم مخصوص ظاهری خاک، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

### ویژگی‌های اندازه‌گیری شده پس از اتمام دوره‌های تر و خشک شدن

پس از اتمام دوره‌های تر و خشک شدن، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، و میکرومورفولوژیکی مورد نظر، اندازه‌گیری شد (جدول ۲). ویژگی‌های خاک تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده قرار گرفته و ویژگی‌های آن‌ها نسبت به تیمار شاهد تغییرات متفاوتی داشت. برای مثال، ضریب گردی جز در تیمار حذف آهک خاک شن لومی و سطح سوم تیمار ماده آلی خاک رس سیلتی که به صورت معنی‌داری (در سطح ۹۵ درصد) بیش‌تر از سایر تیمارها بود، در سایر تیمارهای مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. در کل، سطح سوم تیمار ماده آلی در خاک رس سیلتی بیش‌ترین تغییرات را در ویژگی‌های خاک مورد مطالعه داشته و عمده ویژگی‌های میکروسکوپی و درصد کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی به صورت معنی‌داری تحت تاثیر این تیمار قرار گرفت. درحالی که سطح سوم تیمار ماده آلی در خاک شن لومی صرفاً درصد کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی را به صورت معنی‌دار تغییر داده است. بر اساس آنچه در مطالعه (Bian et al., 2022) مشاهده شد، جرم مخصوص ظاهری خاک‌های به هم ریخته پس از تجربه چند دوره تر و خشک شدن و در غیاب عوامل تاثیر گذار دیگر، به مقدار اولیه خود میل می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که جرم مخصوص ظاهری خاک شاهد نیز به مقادیر خاک نمونه‌برداری شده نزدیک شود. با این حال، جرم مخصوص ظاهری خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش تحت تاثیر تیمارهای مختلف قرار گرفته و در خاک شن لومی از مقدار ۱۳۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار شاهد (معادل جرم مخصوص ظاهری خاک نمونه‌برداری شده اولیه) تا ۱۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار ترکیبی کاهش و تا ۱۶۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار تخریب شده، افزایش یافت. در خاک رس سیلتی نیز، جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار شاهد برابر با ۱۲۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود که تا ۱۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار ترکیبی کاهش یافته و تا ۱۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار تخریب شده افزایش یافت. در واقع هیچ‌یک از تیمارهای اصلاحی به کار رفته سبب کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک نشده‌اند، در حالی که تیمار تخریبی صفر (بدون تجربه تناوب تر و خشک شدن) در هر دو خاک شن لومی و رس سیلتی سبب افزایش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک شده است. هرچند جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار تخریبی ۱۸۰ (شش ماه متناوب تر و خشک شدن) در خاک شن لومی کاهش پیدا کرده و به محدوده خاک شاهد رسید، ولی در تیمار تخریب شده خاک رس سیلتی، کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک به حدی نبود که اختلاف معنی‌دار آن با خاک شاهد از بین برود. با وجود عدم تفاوت معنی‌دار عمده ویژگی‌های تیمارهای مختلف از هر بافت خاک مورد مطالعه، باید دید این تیمارها کیفیت فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه را تا چه حد تحت تاثیر قرار داده‌اند.



جدول ۲. برخی ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی تیمارهای مورد مطالعه.

تیمار	سطح تیمار	تراکم منافذ	ضریب گردی منافذ	کشیدگی منافذ	فشردگی ساختمان	حجم تخلخل خاک (cm <sup>3</sup> )	سطح مقطع منافذ (cm <sup>2</sup> )	pH	کربن آلی (%)	قابلیت هدایت الکتریکی (μS.cm <sup>-1</sup> )	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup> )	جرم مخصوص ظاهری خاک (kg.m <sup>-3</sup> )
<b>شن لومی</b>												
شاهد	-	۰/۰۸	۰/۰۸	۱/۴۴	۴۸۳۶	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲۴	۸/۱۲	۰/۱۴	۸۷۷	۵/۳۴	۱۳۱۰
کربنات کلسیم	۱	۰/۱۳	۰/۲۱	۳/۵	۴۱۱۵	۱/۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱	۷/۹۶	۰/۱۶	۱۰۹۱	۵/۴۸	۱۳۸۰
	۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۲/۳	۵۴۲۱	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۳/۸۳	۸/۲	۰/۱۵	۱۳۰۷	۵/۷۷	۱۴۸۰
	۴	۰/۲ <sup>b</sup>	۰/۱	۲/۱	۵۱۲۷	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۳/۴۳	۸/۰۵	۰/۱۶	۱۰۳۰	۵/۴۵	۱۴۰۰
اکسید آهن	۱	۰/۱	۰/۰۹	۱/۷	۴۸۲۶	۹/۰×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱/۱۸	۷/۸۷	۰/۱۴	۱۰۲۷	۵/۳۶	۱۳۹۰
	۲	۰/۰۹	۰/۰۷	۲/۰	۵۲۱۵	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲۵	۷/۹۴	۰/۱۵	۹۹۴	۵/۷	۱۵۲۰
	۳	۰/۱	۰/۰۶	۱/۶	۵۶۲۵	۱/۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۴۳	۸/۰۶	۰/۱۴	۱۰۷۶	۵/۵۶	۱۲۹۰
ماده آلی	۱	۰/۰۸	۰/۲۹	۴/۸	۴۰۲۳	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۷	۸/۲۱	۰/۱۷	۹۱۵	۵/۴۱	۱۳۴۰
	۲	۰/۰۷	۰/۳۳	۵/۶	۳۷۴۵	۱/۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲	۸/۱	۰/۱۷	۹۴۷	۵/۱	۱۴۴۰
	۳	۰/۱۱	۰/۲۲	۳/۷	۴۷۱۵	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰	۸/۰۷	۰/۱۸ <sup>b</sup>	۹۱۷	۵/۹۶ <sup>b</sup>	۱۵۰۰
کاتیون‌های کلسیم و منیزیم	۱	۰/۱۱	۰/۱۴	۴/۹	۳۹۶۵	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۱	۷/۸۳	۰/۱۵	۱۱۲۴	۵/۴۲	۱۳۳۰
	۲	۰/۰۹	۰/۲۱	۵/۰	۳۹۲۸	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱۱	۷/۹۶	۰/۱۵	۱۱۷۳	۵/۳۴	۱۳۶۰
	۳	۰/۱	۰/۱۶	۴/۷	۴۲۳۶	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۳	۷/۸۶	۰/۱۴	۱۲۷۱	۵/۳۱	۱۴۷۰
ترکیبی	۱	۰/۲ <sup>b</sup>	۰/۱۳	۴/۴	۴۸۳۰	۱/۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۴/۷۳ <sup>b</sup>	۸/۱۱	۰/۱۶	۱۲۱۰	۵/۵۷	۱۳۷۰
	۲	۰/۲ <sup>b</sup>	۰/۲۱	۴/۲	۵۰۲۲	۱/۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۳/۶۶	۸/۰۷	۰/۱۵	۱۲۴۰	۵/۴۹	۱۳۱۰
	۳	۰/۱	۰/۱۷	۴/۴	۵۲۶۶	۱/۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۳/۳۵	۷/۹۱	۰/۱۷	۱۳۲۰	۵/۳۳	۱۲۵۰
حذف اهک	-	۰/۰۶	۰/۳۷ <sup>b</sup>	۶/۰	۳۲۱۵ <sup>c</sup>	۱/۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲۷	۷/۶۲ <sup>c</sup>	۰/۱۳	۹۴۸	۵/۱۹	۱۴۱۰
حذف اکسید آهن	-	۰/۱۳	۰/۱۷	۳/۱	۵۱۱۸	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۰/۹۶	۸/۱۱	۰/۱۳	۹۸۲	۵/۳۴	۱۲۷۰
حذف ماده آلی	-	۰/۱	۰/۲۸	۴/۲	۵۰۸۴	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۰/۹۲	۷/۹۸	۰/۱۲ <sup>c</sup>	۱۰۳۱	۵/۲۹	۱۴۶۰
تیمار تخریبی	صفر	۰/۰۵	۰/۱۱	۱/۴	۴۴۲۵	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰	۸/۱۶	۰/۱۴	۹۱۶	۵/۴۱	۱۶۲۰ <sup>b</sup>
	۱۸۰	۰/۱۲	۰/۲۴	۵/۷	۵۲۱۵	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۳	۸/۰۴	۰/۱۶	۱۰۲۲	۵/۰۹	۱۳۸۰
<b>رسی سیلتی</b>												
شاهد	-	۰/۲	۰/۴۱	۴/۸	۵۹۸۷	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲۸	۷/۶۲	۰/۴۷	۴۹۲ <sup>c</sup>	۲۵/۹۵	۱۲۹۰
کربنات کلسیم	۱	۰/۱۹	۰/۳۲	۴/۷	۲۵۴۹	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۵	۷/۵۴	۰/۵	۶۸۷	۲۶/۸۷	۱۲۸۰
	۲	۰/۲۳	۰/۲۹	۳/۲	۳۹۸۹	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۰/۹۸	۷/۷۸	۰/۴۹	۸۴۱	۲۷/۱۲	۱۲۲۰
	۳	۰/۲	۰/۳۱	۳/۵	۴۲۱۶	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۱	۷/۶۲	۰/۵۱	۹۴۵ <sup>c</sup>	۲۵/۹	۱۱۸۰
اکسید آهن	۱	۰/۱۷	۰/۳۷	۳/۱	۶۳۹۵ <sup>b</sup>	۱/۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱	۷/۵۶	۰/۴۴	۶۴۶	۲۳/۷	۱۲۵۰
	۲	۰/۲۲	۰/۲۶	۳/۷	۴۹۸۷	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱۷	۷/۷۱	۰/۴۷	۶۳۳	۲۴/۱	۱۲۸۰
	۳	۰/۱۷	۰/۲۹	۴/۰	۴۵۲۹	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱۱	۷/۶۴	۰/۵۴	۶۵۷	۲۳/۷	۱۲۱۰
ماده آلی	۱	۰/۲	۰/۳۲	۴/۴	۳۸۲۵	۹/۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱/۰۲	۷/۷۳	۰/۵۸	۷۰۴	۲۶/۶	۱۲۶۰
	۲	۰/۰۹	۰/۳۷	۶/۳	۲۷۴۴	۱/۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۴۲	۷/۶۶	۰/۶۱ <sup>b</sup>	۶۴۷	۲۷/۹	۱۲۲۰
	۳	۰/۰۶ <sup>c</sup>	۰/۴۶ <sup>b</sup>	۷/۳ <sup>b</sup>	۴۹۸۸	۱/۵×۱۰ <sup>-۱b</sup>	۱/۵۳ <sup>b</sup>	۷/۸۴	۰/۶۱ <sup>b</sup>	۶۸۶	۲۹/۱ <sup>b</sup>	۱۲۸۰
کاتیون‌های کلسیم و منیزیم	۱	۰/۱۴	۰/۴۳	۵/۱	۴۰۷۴	۱/۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۳۴	۷/۷۶	۰/۴۹	۷۲۴	۲۶/۴	۱۳۲۰
	۲	۰/۱۹	۰/۳۵	۳/۶	۴۷۶۵	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۹	۷/۸۲	۰/۴۷	۶۹۳	۲۵/۶	۱۴۴۰
	۳	۰/۱۶	۰/۳۸	۴/۲	۳۹۵۶	۱/۱×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۲۲	۷/۷۲	۰/۵	۶۸۶	۲۴/۹	۱۱۹۰
ترکیبی	۱	۰/۲۴	۰/۲۶	۳/۲	۳۰۱۹	۹/۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۰/۹۲	۷/۸۶	۰/۵۱	۷۱۲	۲۳/۸	۱۳۷۰
	۲	۰/۱۷	۰/۳۳	۳/۸	۲۵۵۲	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۱	۷/۹	۰/۵۳	۷۳۴	۲۴/۳	۱۱۹۰
	۳	۰/۲	۰/۳	۳/۵	۳۱۱۸	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۱/۰۵	۷/۸	۰/۵۲	۷۴۶	۲۵/۴	۱۱۶۰
حذف اهک	-	۰/۱۱	۰/۲۲	۵/۷	۴۵۱۲	۱/۵×۱۰ <sup>-۱b</sup>	۱/۲	۷/۷۳	۰/۴۷	۶۳۴	۲۳/۲	۱۲۱۰
حذف اکسید آهن	-	۰/۱۷	۰/۲۴	۴/۲	۴۳۱۱	۱/۰×۱۰ <sup>-۱</sup>	۰/۹۸	۷/۸۴	۰/۴۹	۷۰۶	۲۱/۷	۱۲۱۰
حذف ماده آلی	-	۰/۱۴	۰/۲۷	۵/۰	۶۲۳۶	۹/۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۰/۹۴	۷/۹۳	۰/۴۸	۶۹۱	۲۳/۹	۱۲۸۰
تیمار تخریبی	صفر	۰/۲۶	۰/۳۱	۲/۷	۳۷۲۱	۸/۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۰/۹۰	۷/۷۲	۰/۴۶	۶۶۹	۲۳/۴	۱۵۵۰ <sup>b</sup>
	۱۸۰	۰/۱۹	۰/۲۷	۳/۱	۴۰۱۸	۹/۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۰/۹۶	۷/۶	۰/۴۹	۷۴۸	۲۲/۸	۱۵۱۰ <sup>b</sup>

b: افزایش معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها، c: کاهش معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها



## تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک

### بکارگیری تکنیک PCA

در نتیجه اعمال شیوه PCA بر داده‌های نرمال شده مربوط به ۱۵ ویژگی اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک، دو مولفه کلیدی شناسایی شد که مجموعاً ۷۱ درصد از کل واریانس ناشی از داده‌های مورد مطالعه را در مجموعه داده خاک‌های شن لومی و رس سیلتی ایجاد می‌کند. مولفه کلیدی اول (PC1) ۶۰ درصد از کل واریانس و مولفه کلیدی دوم (PC2) ۱۱ درصد از کل واریانس مجموعه داده مورد مطالعه را شامل شد، لذا این دو مولفه کلیدی به عنوان نماینده‌ای از کل مجموعه داده مورد مطالعه مد نظر قرار گرفت. از طرفی شیب تغییرات واریانس ناشی از مولفه‌های کلیدی محتمل (۱۵ مولفه) پس از مولفه کلیدی دوم افت می‌کند و می‌توان دریافت که مولفه‌های سوم تا شانزدهم تأثیر معنی‌داری بر افزایش واریانس پوشش داده شده توسط مؤلفه‌های کلیدی ندارد. جدول (۳) نشانگر مولفه‌های شناسایی شده بر اساس ۱۵ ویژگی تجزیه و تحلیل شده و واریانس ناشی از هر یک از آن‌هاست.

جدول ۳- واریانس ناشی از مؤلفه‌های شناسایی شده. دو مؤلفه اول ۷۱ درصد از کل واریانس را شامل شده است.

مؤلفه‌های شناسایی شده	واریانس ناشی از هر مؤلفه
PC1	۰/۶
PC2	۰/۱۱
PC3	۰/۰۸
PC4	۰/۰۶
PC5	۰/۰۴
PC6	۰/۰۳
PC7	۰/۰۲
PC8	۰/۰۱
PC9	۰/۰۱
PC10	۰/۰۰۱
PC11	۰/۰۰۰۰۱

### انتخاب دسته داده حداقل و مشخصه‌های کیفیت خاک

همبستگی بین مقادیر نرمال شده کشیدگی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه و دو مولفه کلیدی تعیین شد (PC1 و PC2). بر همین اساس ویژگی‌هایی که بیشترین همبستگی را با مولفه‌های کلیدی ۱ و ۲ داشتند شناسایی شد. بر اساس همین رویکرد مهمترین ویژگی‌های خاک که می‌توانستند بجای مولفه‌های ۱ و ۲ تغییرات تیمارهای مختلف را بیان کنند شناسایی و حفظ، و سایر ویژگی‌ها کنار گذاشته شد. همان‌طور که ذکر شد مولفه اول و دوم به ترتیب ۶۰ و ۱۱ درصد و مجموعاً ۷۱ درصد از کل واریانس مجموعه داده را شامل شده و بنابراین به ترتیب وزن ۰/۸۵ و ۰/۱۵ را در تعیین واریانس کل داده‌ها داشتند. وزن مؤلفه‌های اول و دوم در معادله (۱) بکار رفته و بر اساس آن امتیاز مشخصه هر ویژگی در بیان تغییرات خاک محاسبه شد که در جدول (۴) قابل مشاهده است. در بافت خاک شن لومی به ترتیب دو ویژگی گردی (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۸۰) با مؤلفه‌های اول و دوم و امتیاز مشخصه (۰/۸۱) و کشیدگی منافذ (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸۳) با مؤلفه‌های اول و دوم و امتیاز مشخصه (۰/۷۸) و در خاک رس سیلتی نیز به ترتیب کشیدگی (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۸۷) با مؤلفه‌های اول و دوم و امتیاز مشخصه (۰/۵۸) و مساحت منافذ (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۶۸) با مؤلفه‌های اول و دوم و امتیاز مشخصه (۰/۵۱) بیشترین همبستگی را با مولفه‌های اول و دوم داشت (جدول ۴). به این ترتیب ضریب گردی و کشیدگی منافذ به عنوان دسته داده حداقل در خاک شن لومی و کشیدگی و مساحت منافذ نیز به عنوان دسته داده حداقل در خاک رس سیلتی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که درصد رس علی‌رغم امتیاز مشخصه برابر با مساحت منافذ، به عنوان دسته داده حداقل انتخاب نشد زیرا بر اساس نظر متخصصین در شیوه تجزیه مؤلفه اصلی داشتن همبستگی حداقلی با همه مولفه‌های شناسایی شده بسیار اهمیت دارد (Li et al., 2019) در حالی که در این مطالعه درصد رس هیچگونه همبستگی با مولفه اصلی دوم ندارد.

جدول ۴. همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و دو مولفه اصلی تعیین شده

ویژگی	خاک شن لومی		امتیاز مشخصه	خاک رس سیلتی		امتیاز مشخصه
	PC2	PC1		PC2	PC1	
کشیدگی منافذ	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۵۳	۰/۵۸
تراکم منافذ	۰/۵۱	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۱۲	۰/۲۲
مساحت منافذ	۰/۳۹	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۶۸	۰/۴۸	۰/۵۱
حجم منافذ	۰/۲۹	۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۱۷	۰/۲۴
ضریب گردی منافذ	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۵۱	۰/۳۳	۰/۳۶
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۲۸
کربن آلی	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۱۱
فشردگی منافذ	۰/۳۹	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۵
رطوبت اشباع	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۴۷	۰/۴۴
pH	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۵۰
جرم مخصوص ظاهری	۰/۴۰	۰/۶۴	۰/۴۴	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۱۸
هدایت الکتریکی	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۴۹	۰/۴۴
رس	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۶۰	۰/۵۱
سیلت	۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۱۵
شن	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۱۵

### محاسبه شاخص کیفیت خاک

در بین تیمارهای خاک مورد مطالعه، تیمارهای مربوط به بافت شن لومی بیشترین امتیازهای کیفیت خاک را داشتند (جدول ۵). جالب توجه است که کیفیت تیمار حذف آهک خاک شن لومی، پس از شش ماه دوره تر و خشک شدن بیش‌تر از سایر تیمارهای مورد مطالعه بود. در عین حال، سه سطح تیمار حذف اکسید آهن خاک شن لومی کمترین امتیاز کیفیت خاک را به دست آوردند. میانگین امتیاز کیفیت تیمارهای خاک مورد مطالعه برابر با ۰/۳۴ بود، به طوری که، ۲۴ تیمار امتیازی کم‌تر و ۱۸ تیمار امتیازی بیش‌تر از میانگین به دست آوردند. بر اساس تجزیه و تحلیل آماری که با تعیین Z-Score انجام شد، تیمارهایی که امتیازی بیش‌تر از ۰/۵۰ و ۰/۶۷ داشتند به ترتیب به احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد کیفیت بیش‌تری از سایرین داشتند. تعداد ۸ تیمار امتیاز کیفیت خاک بیش از ۰/۵۰ داشته و بجز سطح سوم تیمار ماده آلی خاک رس سیلتی، سایر تیمارها دارای بافت شن لومی بودند. تیمارهای حذف آهک و سطح دوم ماده آلی خاک شن لومی نیز با احتمال ۹۹ درصد کیفیت بیش‌تری از سایر تیمارهای مورد مطالعه داشتند. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در مجموعه داده مورد مطالعه در این پژوهش تیمارهای شاهد بافت خاک شن لومی و رس سیلتی به ترتیب امتیاز کیفیت خاک ۰/۶ و ۰/۳۳ را به خود اختصاص دادند، بنابراین بر اساس شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش، کیفیت اولیه خاک شن لومی را به طور قابل توجهی بالاتر از خاک رس سیلتی ارزیابی گردید. برآیند کلی تیمارهای اعمال شده در این مطالعه سبب افت کیفیت خاک‌های شن لومی و رس سیلتی به میزان ۳۲ و ۱۸ درصد شده است. بنابراین اختلاف معنی‌داری بین دو بافت خاک مورد مطالعه از نظر پاسخ به تیمارهای مورد بررسی مشاهده شد و علی‌رغم اینکه خاک شن لومی کیفیت اولیه بیش‌تری داشت به مقدار بیش‌تری تحت تاثیر تیمارهای کاهنده کیفیت خاک قرار گرفت.

### بحث

Mukherjee et al. (2014) پیش‌نیاز تعیین کیفیت خاک را انتخاب شاخص‌هایی به نمایندگی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دانسته و استفاده از تک معیارها در تعیین کیفیت خاک را به دلیل اثرات ناهم‌سوی عوامل محیطی بر آن معیارها غلط برشمردند. همچنین Mastro و همکاران (۲۰۰۸) توصیه کردند ویژگی‌هایی همچون درصد ماده آلی خاک، ویژگی‌های زیستی و درجه خاکدانی که به تغییرات محیطی پاسخ نشان می‌دهند، به عنوان شاخص کیفیت خاک انتخاب گردند. در این مطالعه ویژگی‌های مربوط به منافذ خاک شامل ضریب گردی و کشیدگی منافذ در خاک شن لومی و کشیدگی و مساحت منافذ در خاک رس سیلتی امکان پوشش بیش از ۷۰ درصد از واریانس ناشی از مجموعه داده مورد بررسی را که شامل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکرومورفولوژیکی خاک‌ها بود فراهم نمود. لذا برداشت قطعی این است که از بین ویژگی‌های مورد مطالعه، ویژگی‌های هندسی منافذ بیش‌ترین قابلیت را در بیان تغییرات خاک‌های مورد مطالعه داشته‌اند.



جدول ۵. امتیازدهی به کیفیت خاک تیمارهای مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های کیفیت خاک تعیین شده

تیمار	بافت خاک	مساحت منافذ	ضریب گردی منافذ	کشیدگی منافذ	امتیاز کیفیت خاک
حذف آهک	شن لومی	۰/۰۶۱	۰/۷۹۲	۰/۷۳۴	۰/۷۶۳
ماده آلی - سطح ۲	شن لومی	۰/۰۵۳	۰/۷۰۰	۰/۶۷۵	۰/۶۸۷
شاهد	شن لومی	۰/۰۵۸	۰/۶۱۹	۰/۵۹۰	۰/۶۰۴
ترکیبی - سطح ۳	شن لومی	۰/۰۴۶	۰/۵۶۱	۰/۶۱۵	۰/۵۸۸
ماده آلی - سطح ۱	شن لومی	۰/۰۳۹	۰/۶۰۷	۰/۵۵۶	۰/۵۸۲
ماده آلی - سطح ۳	رس سیلتی	۰/۰۹۰	۱/۰۰۰	۰/۹۲۶	۰/۵۳۵
تخریب شده - ۱۸۰	شن لومی	۰/۰۴۱	۰/۴۶۹	۰/۵۷۱	۰/۵۱۹
کاتیون - سطح ۲	شن لومی	۰/۰۴۴	۰/۴۲۳	۰/۵۸۶	۰/۵۰۳
حذف ماده آلی	شن لومی	۰/۰۲۴	۰/۵۲۴	۰/۴۳۷	۰/۴۸۲
ترکیبی - سطح ۲	شن لومی	۰/۰۴۲	۰/۴۶۹	۰/۴۹۷	۰/۴۸۳
ترکیبی - سطح ۱	شن لومی	۰/۰۶۸	۰/۴۶۲	۰/۴۸۵	۰/۴۷۳
ماده آلی - سطح ۲	رس سیلتی	۰/۰۷۸	۰/۷۹۲	۰/۷۷۸	۰/۴۵۱
کاتیون - سطح ۳	شن لومی	۰/۰۳۵	۰/۳۰۷	۰/۵۴۱	۰/۴۲۲
ماده آلی - سطح ۳	شن لومی	۰/۰۳۰	۰/۴۴۶	۰/۳۹۳	۰/۴۲۰
کاتیون - سطح ۱	شن لومی	۰/۰۳۳	۰/۲۶۱	۰/۵۷۱	۰/۴۱۳
کربنات کلسیم - سطح ۱	شن لومی	۰/۰۴۳	۰/۴۲۳	۰/۳۶۴	۰/۳۹۴
حذف آهک	رس سیلتی	۰/۰۵۳	۰/۴۴۶	۰/۶۸۹	۰/۳۹۲
کاتیون - سطح ۱	رس سیلتی	۰/۰۶۹	۰/۹۳۱	۰/۶۰۱	۰/۳۵۲
شاهد	رس سیلتی	۰/۰۶۲	۰/۸۸۵	۰/۵۵۶	۰/۳۲۵
حذف اکسید آهن	شن لومی	۰/۰۲۸	۰/۳۳۳	۰/۳۰۵	۰/۳۱۸
کربنات کلسیم - سطح ۱	رس سیلتی	۰/۰۳۷	۰/۶۷۷	۰/۵۴۱	۰/۳۰۶
ماده آلی - سطح ۱	رس سیلتی	۰/۰۳۴	۰/۶۶۱	۰/۴۹۷	۰/۲۸۱
کاتیون - سطح ۳	رس سیلتی	۰/۰۵۵	۰/۸۱۵	۰/۴۶۷	۰/۲۷۵
تخریب شده - صفر	شن لومی	۰/۰۳۴	۰/۱۹۲	۰/۳۴۹	۰/۲۶۹
اکسید آهن - سطح ۳	رس سیلتی	۰/۰۴۴	۰/۶۰۷	۰/۴۳۸	۰/۲۵۴
حذف اکسید آهن	رس سیلتی	۰/۰۳۲	۰/۴۴۵	۰/۴۲۸	۰/۲۴۲
ترکیبی - سطح ۱	رس سیلتی	۰/۰۴۳	۰/۷۰۰	۰/۴۰۸	۰/۲۳۷
اکسید آهن - سطح ۲	رس سیلتی	۰/۰۵۱	۰/۵۲۸	۰/۳۹۳	۰/۲۳۳
حذف ماده آلی	رس سیلتی	۰/۰۲۹	۰/۴۹۲	۰/۴۰۷	۰/۲۳۱
کاتیون - سطح ۲	رس سیلتی	۰/۰۴۲	۰/۷۴۶	۰/۳۷۹	۰/۲۲۱
ترکیبی - سطح ۳	رس سیلتی	۰/۰۳۷	۰/۶۲۰	۰/۳۶۴	۰/۲۱۱
کربنات کلسیم - سطح ۳	رس سیلتی	۰/۰۳۳	۰/۶۵۴	۰/۳۶۴	۰/۲۰۹
کربنات کلسیم - سطح ۲	شن لومی	۱/۰۰۰	۰/۱۹۲	۰/۱۸۶	۰/۱۸۹
کربنات کلسیم - سطح ۲	رس سیلتی	۰/۰۳۰	۰/۶۰۷	۰/۳۲۰	۰/۱۸۴
اکسید آهن - سطح ۱	رس سیلتی	۰/۰۴۲	۰/۷۹۲	۰/۳۰۵	۰/۱۸۲
ترکیبی - سطح ۲	رس سیلتی	۰/۰۲۳	۰/۵۲۸	۰/۳۲۰	۰/۱۸۱
کربنات کلسیم - سطح ۳	شن لومی	۰/۹۵۶	۰/۱۶۹	۰/۱۵۷	۰/۱۶۳
تخریب شده - ۱۸۰	رس سیلتی	۰/۰۲۸	۰/۶۵۴	۰/۲۶۰	۰/۱۵۲
تخریب شده - صفر	رس سیلتی	۰/۰۲۱	۰/۶۵۴	۰/۲۴۶	۰/۱۴۱
اکسید آهن - سطح ۳	شن لومی	۰/۰۷۹	۰/۰۸۳	۰/۱۶۹	۰/۱۲۶
اکسید آهن - سطح ۲	شن لومی	۰/۰۵۹	۰/۱۰۹	۰/۱۳۷	۰/۱۲۳
اکسید آهن - سطح ۱	شن لومی	۰/۰۵۲	۰/۱۴۵	۰/۰۹۴	۰/۱۲۰

استفاده از شیوه‌های میکروسکوپی از چند دهه اخیر تاکنون جزو پر ارجاع‌ترین شیوه‌ها در تعیین ویژگی‌های خاک‌ها از جمله ویژگی‌های هندسی منافذ بوده است. ریشه اصلی چنین اقبال بالایی، ابهامات و عدم قطعیت شدید روش‌های مرسوم در تعیین ویژگی‌های منافذ است. شیوه‌های مرسوم، همه منافذ خاک را کروی فرض می‌کنند و این یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف این روش‌هاست (Bakhshi et al., 2023). بنابراین، اثرات تیمارهای مختلف بر کیفیت خاک‌های مورد مطالعه با بکارگیری معیارهای مذکور فراهم گردید و افزایش یا کاهش کیفیت خاک‌های اولیه تحت تاثیر تیمارهای بهبود دهنده و تخریب‌گر به وضوح در جدول (۵) مشاهده شد. از طرفی Angelaki و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که استفاده از اطلاعات منحنی مشخصه آب خاک که بیان‌گر توزیع اندازه‌های منافذ خاک است، به خوبی قادر به توجیه ویژگی‌های

هیدرولیکی خاک است که به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌ها تلقی می‌گردد. (Moncada et al. (2014) نیز بر استفاده موفقیت‌آمیز از ویژگی‌های میکروسکوپی منافذ در تعیین کیفیت خاک‌ها تاکید کردند. بنابراین می‌توان در این مطالعه قابلیت ویژه‌ای برای منافذ خاک در نظر گرفت که با اندازه‌گیری پارامترهای مختلف آن امکان تعیین شاخص‌های کیفیت خاک فراهم گردید و بیش از ۷۰ درصد واریانس کل مجموعه داده با استفاده از پارامترهای مرتبط با منافذ خاک پوشش داده شد و نیازی به استفاده از سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در مجموعه داده حداقل نبود.

Guo et al. (2017) نتیجه گرفتند که کاربرد طیف وسیع شیوه‌های تعیین شاخص‌ها و امتیازدهی به کیفیت خاک محدود به شرایطی می‌شود که در آن ایجاد شده‌اند، بنابراین استفاده از شاخص‌هایی که معیارهای سنجش محدودی دارند و معیارهای سنجش آن‌ها وابستگی محیطی ندارد می‌تواند سبب عدم وابستگی شیوه تعیین کیفیت خاک به اقلیم و مدیریت اراضی شوند. برای مثال منافذ خاک دارای دو معیار سنجش اصلی اندازه و شکل هستند و بر اساس شرایط محیطی و مدیریتی از نظر این دو معیار تحت تاثیر قرار می‌گیرند، بنابراین اگر از ویژگی منافذ برای تعیین کیفیت خاک استفاده گردد قابلیت بکارگیری تحت شرایط متنوع را نیز خواهد داشت. به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود استفاده از پارامترهای مختلف مربوط به منافذ خاک همانند این مطالعه امکان تعیین کیفیت خاک را داشته باشد. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده شد، استفاده از پارامترهای مربوط به منافذ، تغییرات کیفیت خاک در اثر اعمال تیمارهای مختلف در هر دو خاک شن لومی و رس سیلتی را توجیه نموده است. امتیاز کیفیت خاک شن لومی در تیمار شاهد برابر با ۰/۶۰ بود که اعمال تیمارهای سطح دوم ماده آلی و حذف آهک کیفیت آن را به ترتیب تا ۰/۶۹ و ۰/۷۶ افزایش داد، در حالی که اعمال تیمارهای اکسید آهن کیفیت این خاک را تا ۰/۱۲ کاهش داد. (Ferreira et al. (2018) نشان دادند که حضور آهک سبب کوتاه‌تر شدن و کاهش پیوستگی منافذ شده و کشیدگی منافذ را کم می‌کند. در این مطالعه حذف آهک سبب شد کشیدگی منافذ خاک شن لومی افزایش یافت (جدول ۲) و به همین دلیل کیفیت تیمار حذف آهک در خاک شن لومی بیش‌ترین امتیاز را داشته باشد. هرچند کشیدگی منافذ در تیمار حذف آهک خاک رس سیلتی افزایش معنی‌داری نداشت، با این حال این تیمار بیش‌ترین کیفیت را در بین خاک‌های رس سیلتی نشان داد. البته مشاهده بیش‌ترین امتیاز کیفیت خاک در تیمار حذف آهک می‌تواند در خصوص نگرش به رابطه ویژگی‌های هندسی منافذ و کیفیت خاک تردید ایجاد کند. هرچند بکارگیری تیمارهای اصلاحی مختلف از جمله ماده آلی، تیمار ترکیبی و کاتیون سبب افزایش ضریب گردی، کشیدگی و مساحت منافذ شده و در تیمار حذف آهک هم شرایط مشابهی مشاهده می‌شود اما برای کسب اطمینان می‌توان برخی ویژگی‌ها از قبیل هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، ظرفیت نگهداری آب، و استحکام ساختمانی در خاک‌های مشابه را سنجیده و در مورد کیفیت فیزیکی خاک‌هایی که آهک در آن‌ها حذف شده نتیجه‌گیری نمود. در خاک رس سیلتی کیفیت خاک شاهد برابر با ۰/۳۳ بود که در سطح سوم تیمار ماده آلی تا امتیاز ۰/۵۳ افزایش یافت. ویژگی‌های منافذ خاک در سطح سوم ماده آلی در مقایسه با سایر تیمارهای خاک رس سیلتی افزایش معنی‌داری را نشان داد و کیفیت خاک رس سیلتی نیز در این تیمار بیش‌ترین مقدار را داشت. با این حال، همچنان کیفیت خاک در تیمارهای ماده آلی، ترکیبی، حذف آهک و شاهد خاک شن لومی بیش‌تر از سطح سوم تیمار ماده آلی در خاک رس سیلتی بود. از طرفی (Lu et al., 2014) مشاهده کردند که افزایش اکسید آهن و کاهش ماده آلی سبب کاهش میانگین قطر منافذ خاک شده و فراوانی منافذی که مکش ماتریک بیش از ۳۰ بار ایجاد می‌کنند افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی توزیع اندازه منافذ خاک فاقد منافذ تهویه‌ای و دخیل در جریان خواهد شد. خاک رس سیلتی در تیمار تخریب شده‌ای که دوره تر و خشک شدن را پشت سر گذاشت کم‌ترین امتیاز کیفیت فیزیکی را داشت و تا امتیاز ۰/۱۴ کاهش یافت.

Blott and Pye (2008) توصیه کردند اثرات منافذ و خاکدانه‌ها از طریق کمی‌سازی ویژگی‌های شکل منافذ و خاکدانه‌ها انجام گردد. همچنین Rezanezhad et al. (2009) مشاهده کردند همبستگی بسیار قوی بین هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده از طریق تجزیه و تحلیل تصاویر سه‌بعدی و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده از طریق روش‌های مرسوم وجود دارد. نتیجه‌گیری آن‌ها نشان داد که هدایت هیدرولیکی خاک مستقیماً تحت تاثیر ویژگی‌های هندسی منافذ از جمله کرویت، گردی و اعوجاج حفرات قرار می‌گیرد. در این مطالعه ضریب گردی و کشیدگی منافذ در خاک شن لومی و کشیدگی و مساحت منافذ در خاک رس سیلتی به عنوان دسته داده حداقل انتخاب شد. منافذ با کشیدگی زیاد و بدون گوشه بر خلاف انواع گوشه‌دار سبب افزایش نفوذپذیری خاک‌ها و رشد و توسعه ریشه می‌شود (Pagliai, and Vignozzi, 2002). از طرفی ثابت شده است که، حضور منافذ با کشیدگی و ضریب گردی زیاد سبب بهبود کیفیت فیزیکی خاک‌ها از دیدگاه هدایت هیدرولیکی و رشد و توسعه ریشه می‌شود (Pagliai et al., 2004; Tuller et al., 2004). بر همین اساس و همچنین با توجه به این‌که عمده منافذ خاک‌های مورد مطالعه از نوع بدون گوشه بودند، کشیدگی منافذ به همراه ضریب گردی و مساحت



منافذ به عنوان توابع هرچه بیشتر در نظر گرفته شدند.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شیوه‌های مختلف تعیین کیفیت خاک از لحاظ دقت، هزینه و جامعیت مورد مقایسه قرار می‌گیرند. استفاده از پارامترهای مربوط به منافذ، در کنار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی بیان‌گر این بود که دو مولفه اصلی اول بیش از ۷۰ درصد کل واریانس مجموعه داده را پوشش می‌دهد. پارامترهای مربوط به منافذ خاک شامل کشیدگی، ضریب گردی و مساحت آن‌ها بیش‌ترین همبستگی را با دو مولفه اصلی PC1 و PC2 داشت. بر همین اساس کیفیت خاک‌های مورد مطالعه با بکارگیری دو پارامتر مختلف یک ویژگی منفرد یعنی ضریب گردی و کشیدگی منافذ در خاک شن لومی و کشیدگی منافذ و مساحت آن در خاک رس سیلتی با موفقیت تعیین شد. افزایش کشیدگی منافذ خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش با توجه به نوع منافذ تشکیل‌دهنده که عمدتاً از نوع بدون گوشه بود به عنوان یک تابع هرچه بیشتر در نظر گرفته شد. با این حال، در شیوه مشابه و تعیین دسته داده حداقل، باید توجه شود که اگر پارامترهای دیگری همچون فشردگی منافذ انتخاب شود و یا منافذ خاک را منافذ گوشه‌دار تشکیل داده باشد باید به درستی در رابطه با نوع تابع این منافذ تصمیم‌گیری کرد. با رعایت این موارد، استفاده از تک معیار منافذ خاک، با موفقیت منجر به تعیین کیفیت خاک‌هایی با بافت متضاد و تحت تاثیر تیمارهای مختلف شد. پیشنهاد می‌شود با تعیین پارامترهای کامل منافذ خاک، اولویت این پارامترها را در تعیین کیفیت خاک در مقایسه با مهمترین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مزرعه و مرتع سنجید.

" هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد "

## REFERENCES

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*. 68(6), 1945-1962.
- Angelaki, A., Bota, V., & Chalkidis, I. (2023). Estimation of Hydraulic Parameters from the Soil Water Characteristic Curve. *Sustainability*. 15(8), 6714.
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M. A., Stellacci, A. M., Ciccicarese, A., & Rubino, P. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*. 130, 91-98.
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*. 230, 131-142.
- Bakhshi, A., Heidari, A., Mohammadi, M. H., & Ghezelbash, E. (2023). Estimation of Water Retention at Low Matric Suctions Using the Micromorphological Characteristics of Soil Pores. *Eurasian Soil Science*, 1-14.
- Bastida, F., Moreno, J. L., Hernandez, T., & García, C. (2006). Microbiological activity in a soil 15 years after its revegetation. *Soil Biology and Biochemistry*. 38(8), 2503-2507.
- Bian, X., Zhang, W., Li, X., Shi, X., Deng, Y., & Peng, J. (2022). Changes in strength, hydraulic conductivity and microstructure of superabsorbent polymer stabilized soil subjected to wetting-drying cycles. *Acta Geotechnica*, 17(11), 5043-5057.
- Davidson, D. A. (2000). Soil quality assessment: recent advances and controversies. *Progress in Environmental Science*. 2(4), 342-350.
- Farahani, E., Emami, H., & Keller, T. (2018). Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. *International Agrophysics*, 32(1).
- Fu, B. J., Liu, S. L., Chen, L. D., Lü, Y. H., & Qiu, J. (2004). Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape. *Ecological Research*. 19, 111-118.
- Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., & Li, F. (2017). A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena*. 152, 135-143.
- Hussain, I. M. T. I. A. Z., Olson, K. R., Wander, M. M., & Karlen, D. L. (1999). Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and tillage Research*. 50(3-4), 237-249.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how?. *Geoderma*. 114(3-4), 145-156.
- Karlen, D. L., Hurley, E. G., Andrews, S. S., Cambardella, C. A., Meek, D. W., Duffy, M. D., & Mallarino, A. P. (2006). Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy journal*. 98(3), 484-495.

- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Lehmann, P., Assouline, S., & Or, D. (2008). Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical Review E*, 77(5), 056309.
- Li, P., Shi, K., Wang, Y., Kong, D., Liu, T., Jiao, J., & Hu, F. (2019). Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, 190, 31-40.
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Purakayastha, T. J., Patra, A. K., & Singh, D. (2008). Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *Land degradation & development*, 19(5), 516-529.
- Moncada, M. P., Penning, L. H., Timm, L. C., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2014). Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil and Tillage Research*, 140, 20-28.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Comparison of soil quality index using three methods. *PloS one*, 9(8), e105981.
- Nakajima, T., Lal, R., & Jiang, S. (2015). Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 146, 323-328.
- Navas, M., Benito, M., Rodríguez, I., & Masaguer, A. (2011). Effect of five forage legume covers on soil quality at the Eastern plains of Venezuela. *Applied soil ecology*, 49, 242-249.
- Obade, V., & Lal, R. (2016). A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of the total environment*, 541, 424-434.
- Pagliai, M., & Vignozzi, N. (2002). The soil pore system as an indicator of soil quality. *Advances in GeoEcology*, 35, 69-80.
- Paz-Kagan, T., Shachak, M., Zaady, E., & Karnieli, A. (2014). A spectral soil quality index (SSQI) for characterizing soil function in areas of changed land use. *Geoderma*, 230, 171-184.
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334.
- Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., & Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological indicators*, 40, 19-26.
- Ringrose-Voase, A. J. (1996). Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil*, 183, 27-47.
- Sarkar, D., De, D. K., Das, R., & Mandal, B. (2014). Removal of organic matter and oxides of iron and manganese from soil influences boron adsorption in soil. *Geoderma*, 214, 213-216.
- Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*, 44(4).
- Wang, S., Lv, L., Xue, K., Zhang, D., Li, M., Li, D., & Yuan, C. (2022). Micropore structure and fractal characteristics of clays due to freeze-thaw and compression based on mercury intrusion porosimetry. *Frontiers in Earth Science*, 10, 851673.
- Wei, T., Fan, W., Yu, N., & Wei, Y. N. (2019). Three-dimensional microstructure characterization of loess based on a serial sectioning technique. *Engineering Geology*, 261, 105265.
- Yu, P., Liu, S., Zhang, L., Li, Q., & Zhou, D. (2018). Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*, 616, 564-571.



## Application of Microscopic Features of Soil Pores in the Assessment of Soil Physical Quality

### EXTENDED ABSTRACT

#### Background

In the pursuit of efficient soil quality assessment methods, researchers continuously seek strategies that minimize data requirements and reduce associated costs. Among the multitude of indicators contributing to a comprehensive understanding of soil health, soil pores stand out due to their intricate relationship with environmental conditions.

#### Objective:

This study aimed to conduct a comprehensive exploration of a wide range of parameters associated with soil pores, alongside specific physical and chemical properties. The overarching goal was to establish a minimal yet effective dataset necessary for rigorous analysis, while simultaneously evaluating the potential of these identified parameters as robust indicators of soil's physical quality.

#### Methodology:

This study was conducted based on concepts introduced for determination of soil quality and image analysis used for collected some soil porosity properties. Orange. 3 software used for apply PCA procedure. The research was carried out between 2020 and 2022 at the Micromorphology Laboratory of the Soil Sciences Department at the University of Tehran. Advanced image analysis techniques were employed to delve into the intricate world of soil pores. The study focused on assessing parameters related to pores resulting from experimental treatments and affected by 22 cycles of wetting and drying were determined in two types of soils, sandy loam and silty clay. Parameters under investigation included sphericity, elongation, area, and compactness of pores.

#### Findings:

The investigation yielded insightful outcomes that shed light on the potential of pore-related parameters as effective indicators of soil quality. The first two principal components (PC1 and PC2) represent more than 70% of the variations in the studied soils. Furthermore, due to the strong correlations observed, parameters such as porosity (with 81% and 80% correlation to PC1 and PC2) and pore connectivity (with 77% and 83% correlation to PC1 and PC2) were identified as quality indicators for loamy sand soils, while parameters like cohesion (with 53% and 87% correlation to PC1 and PC2) and pore area (with 48% and 68% correlation to PC1 and PC2) were identified as quality indicators for silty clay soils. Furthermore, the study compared soil quality assessments based on the identified pore-related indicators across different treatments with a control group. The results highlighted significant variations of 32% and 18% for loamy sand and silty clay loam soils, respectively. These discrepancies underscored the sensitivity of the identified parameters to shifts in soil quality and their potential as effective indicators.

#### Conclusion:

By harnessing the power of advanced image analysis techniques, this research has effectively expanded our understanding of soil pores and their potential as indicators of soil's physical quality. The findings provide valuable insights for streamlining soil quality assessment practices, making them more cost-effective and efficient. As sustainable land management gains increasing importance, these identified indicators hold promise for monitoring and enhancing soil health. Given the ability to express soil changes, the microscopic features of pores were successfully employed in this study for soil quality determination. Moreover, due to the fractal nature of these pores, this method can also be used for soil quality assessment on a larger scale.

**Keywords:** Image Analysis, Minimum Dataset, Principal Component Analysis, Soil Properties.