

استفاده از شیوه‌های میکرومورفولوژیکی برای طبقه‌بندی هندسی خاکدانه‌های متأثر از تیمارهای

متنوع

چکیده

مقدمه: چرخه‌های تر و خشک شدن با ایجاد توالی‌های منقبض و منبسط شدن در خاکدانه‌ها موجب تغییراتی در میکروساختار خاک می‌شود. در این مطالعه سعی شد با اعمال چرخه‌های رطوبتی در تیمارهای مختلف اصلاحی (کربنات کلسیم، کربنات کلسیم مضاعف، اکسید آهن، تیمار ترکیبی، کاتیون، ماده آلی) و تخریبی (گلخراپی) و حذف (حذف کربنات کلسیم، حذف اکسید آهن، حذف ماده آلی) در خاک‌های شن لومی و رس سیلتی تغییرات ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. این پژوهش بر این فرض استوار است که اعمال تیمارهای مختلف، شدت و نوع اثرات چرخه‌های خیس و خشک شدن بر ویژگی‌های خاکدانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

روش پژوهش: با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، پردازش تصاویر تهیه شده از بلوک‌های خاک به صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام شد و علاوه بر حجم و سطح خاکدانه‌ها، ویژگی‌هایی همچون ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی نیز تخمین و در طبقه‌بندی خاکدانه‌ها استفاده شد. مقایسه تیمارها از طریق تعیین Z-Score انجام شد و به منظور تجزیه و تحلیل آماری و ترسیم نمودارها نیز، به صورت موازی از نرم‌افزارهای Orange.3 و Excel 2016 استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تیمارهایی همچون کربنات کلسیم، کاتیون و ماده آلی سبب افزایش ضریب کشیدگی خاکدانه‌ها، و تیمارهای تخریبی سبب افزایش ضریب پهن‌شدگی در هر دو بافت مورد مطالعه شد. در تیمارهای حذف نیز ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی خاکدانه‌ها عمدتاً کم‌تر از تیمارهای اصلاحی بود. طبقه‌بندی هندسی خاکدانه‌ها نشان داد بخش کمی از آن‌ها در خاک‌های شن لومی در دسته خاکدانه‌های کشیده قرار گرفتند، در حالی که بیش از نیمی از خاکدانه‌ها در دسته انواع پهن‌شده قرار داشت. در خاک رس سیلتی توزیع یکسانی از خاکدانه‌های کشیده، تیغه‌ای و پهن‌شده مشاهده گردید، با این حال در هیچکدام از تیمارهای مورد مطالعه، خاکدانه‌ها در دسته انواع فشرده قرار نداشتند.

نتیجه‌گیری: با توجه به اثر مستقیم شکل خاکدانه‌ها در هدایت هیدرولیکی خاک‌ها، بکارگیری روش مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند به خوبی وضعیت میکروساختار خاک‌ها از دیدگاه خاکدانه‌ها را تعیین نماید.

کلیدواژه‌ها: چرخه‌های تر و خشک شدن، میکروساختار خاک، پردازش تصویر، ضریب کشیدگی خاکدانه‌ها، ضریب پهن‌شدگی خاکدانه‌ها

Using micromorphological techniques for geometrical classification of soil aggregates affected by various treatments

Abstract

The wetting-drying cycles, through the creation of Swelling-Shrinkage sequences in soil aggregates, lead to changes in the soil's microstructure. In this study, attempts were made to investigate changes in the geometric properties of loamy sand and silty clay soils by applying moisture cycles in different treatment conditions, including amendments and degradations. The hypothesis of this research is based on the premise that the presence of different treatment intensities of the effects of wetting-drying cycles affects the soil's microstructure from the perspective of soil aggregates. Using ImageJ software, image processing was performed on 2D and 3D images acquired from soil blocks. In addition to soil aggregate volume and surface area, properties such as sphericity and flatness coefficients were estimated and used for the classification of soil aggregates. For statistical analysis and chart plotting, Orange 3 and Excel 2016 software were used. The results indicated that treatments such as calcium carbonate, cations, and organic matter increased the coefficient of soil aggregates elongation, while degradation treatments led to an increase in the coefficient of soil aggregates flatness in both studied soil textures. Geometric classification of soil aggregates revealed that a small portion of loamy sand soil aggregates were categorized as elongated soil aggregates, while more than half of them fell into the category of flatted soil aggregates. In silty clay soil samples, a uniform distribution of elongated, bladed, and flatted soil aggregates was observed. However, none of the studied treatments resulted in soil aggregates falling into the category of compacted soil. Considering the direct impact of soil aggregate shape on the hydraulic conductivity of soils, the method employed in this research can effectively determine the microstructural status of soils from the perspective of soil aggregates.

Keywords: Image analysis, Soil aggregates elongation, soil aggregates flatness, Soil microstructure, Wetting-drying cycles.

مقدمه

خاک‌های طبیعی شرایط متناوبی از دما و رطوبت را تجربه می‌کنند که در طولانی مدت ممکن است تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی قرار گیرند (Tang et al., 2021). این شرایط تأثیرات قابل توجهی بر روی ساختمان میکروسکوپی و خصوصیات ماکروسکوپی خاک‌ها دارند. به طور کلی، رفتار هیدرومکانیکی خاک‌ها به تغییرات رطوبت حساس است. اگر محتوای آب افزایش یابد، خاک منبسط شده و مقاومت آن کاهش خواهد یافت. اگر محتوای آب کاهش یابد، خاک منقبض شده و حتی ممکن است ترک‌هایی در آن ایجاد شود. حضور این ترک‌ها در خاک می‌تواند به طرز قابل توجهی یکنواختی خاک را کاهش داده، مقاومت مکانیکی آن را کم کند و همچنین هدایت هیدرولیکی خاک را افزایش دهد (Tang et al., 2023).

چرخه‌های تر و خشک شدن از طریق ایجاد همین انقباض و انبساط‌ها سبب تغییراتی عمده در خصوصیات ساختمان خاک می‌شود. به همین دلیل، مدل‌های مرسوم مورد استفاده در مکانیک خاک نمی‌تواند تمام مفاهیم منتج از تناوب تر و خشک شدن خاک را توجیه کند و در برخی موارد، لازم است اثرات ساختمان خاک را نیز در نظر گرفت. (Al-Rawas and McGown (2011) بر نقش حیاتی ساختمان میکروسکوپی خاک در مطالعات مهندسی خاک تأکید کردند. (Dingyi and Jilin (1999) ساختمان میکروسکوپی خاک را به عنوان مهم‌ترین عامل داخلی موثر بر همه ویژگی‌های مکانیکی در نظر گرفتند. تغییر شکل ساختمان خاک عموماً در اثر تغییر آرایش و الگوی تماس بین خاکدانه‌ها رخ می‌دهد.

پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی نشان داده‌اند که بار ناشی از ادوات کشاورزی و وقوع خشکی عوامل اصلی تحول میکروساختار خاک هستند. بنابراین، تحلیل دوره‌های تر و خشک شدن در درک بهتر پدیده‌های ماکرومکانیکی مانند تغییر شکل ساختمان خاک‌های غیراشباع مفید است (Tang et al., 2023). (Farulla et al. (2010) میکروساختار خاک را با استفاده از آنالیز تصویر مورد بررسی قرار دادند. تصاویر با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال تحلیل شدند تا انقباض خاکدانه‌ها در طول فرآیندهای تر و خشک شدن نشان داده شوند. این محققین انبساط و انقباض خاکدانه‌ها در اثر تغییرات رطوبت خاک را در تصاویر مورد بررسی مشاهده کردند.

مطالعه مورفولوژی خاکدانه‌ها نشان داده است که شکل آن‌ها تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی خاک‌ها دارد (Kawamoto et al. 2018; Nguyen et al., 2020). در این ارتباط، اصطلاحات "شکل" و "مورفولوژی" به صورت همزمان استفاده می‌شوند و در هیچ مقیاس خاصی طبقه‌بندی نمی‌شوند. مورفولوژی خاکدانه‌ها معمولاً در سه جنبه تعریف می‌شود، و به عبارت دقیق‌تر، "فرم" (مقیاس اولیه از شکل)، "گردی" (مقیاس دوم) و "گوشه‌ای بودن خاکدانه‌ها" (مقیاس سوم)، برای طبقه‌بندی شکل خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد (Barrett, 1981). جنبه مهم دیگری از شکل خاکدانه‌ها که در منابع مورد بحث قرار گرفته، کرویت آن‌هاست که هم بیان‌گر فرم و هم شاخصی از گردی خاکدانه‌ها هستند (Blott and Pye, 2008).

توصیف فرم خاکدانه‌های سه‌بعدی به طور عمده از طریق محاسبه دو شاخص مستقل انجام می‌شود: ضریب پهن‌شدگی^۱ و ضریب کشیدگی^۲ (Zingg, 1935). ضریب پهن‌شدگی نشان‌گر این است که یک ذره چقدر پهن است، در حالی که ضریب کشیدگی نشان‌گر

میزان طولیل بودن (میله‌ای بودن) است. برخی منابع کمیت فشردگی^۱ را نیز به عنوان یک شاخص سوم در نظر می‌گیرند (Blott and Pye, 2008). با این حال، این کمیت از طریق ضرایب پهن‌شدگی و کشیدگی محاسبه می‌شود، بنابراین این دو شاخص برای کامل کردن توصیف کلی فرم یک ذره کافی هستند (Angelidakis et al., 2022; Maramizonouz and Nadimi, 2022).

ویژگی‌های ساختمانی خاک بر رفتارهای هیدرولیکی و مکانیکی خاک اثرگذار است. از طرفی ویژگی‌های شکل خاکدانه‌ها، در ویژگی ساختمانی خاک تعیین‌کننده است. لذا کسب آگاهی عمیق از فراوانی شکل‌های مختلف خاکدانه‌ها از طریق مطالعات میکرومورفولوژیکی حائز اهمیت است. هدف از این مطالعه بررسی اثرات چرخه‌های پی‌درپی خیس و خشک شدن بر ساختمان خاک از دیدگاه خاکدانه‌های تشکیل دهنده‌ی دو خاک با بافت‌های متفاوت است که تیمارهای اصلاحی و تخریبی مختلفی در آن‌ها اعمال شده باشد. به منظور مشاهده دقیق وضعیت خاکدانه‌ها در هریک از تیمارهای مورد مطالعه، از روش آنالیز تصویر سه‌بعدی استفاده شد تا با دقت کامل شکل قالب خاکدانه‌ها در تیمارهای مورد مطالعه شناسایی گردد، و با دستیابی به اطلاعات مربوط به شکل خاکدانه‌ها، امکان طبقه‌بندی ساختمانی خاک فراهم گردد.

روش پژوهش

نمونه‌برداری خاک و تهیه تیمارهای مطالعاتی

در این مطالعه که در بازه بین سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ انجام شد، دو نمونه خاک 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) جمع‌آوری شد. بنابراین دو بافت خاک سبک و سنگین که اختلاف رفتاری کاملی از نظر ویژگی‌های متکی به بافت داشتند تهیه گشته و مقادیر کافی از نمونه دست خورده 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 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 هفت آبه، $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)، سه سطح کاتیون‌های سدیم و کلسیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر کلسیم کلراید (CaCl_2) و سدیم کلراید (NaCl)) 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 ۱-۳ 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 محتمل‌ترین 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 (۲*۳*۳)، سه تکرار از سه تیمار حذف آهک، اکسید آهن و ماده آلی در هر دو بافت خاک (۲*۳*۳)، سه تکرار از دو سطح تیمار تخریبی در دو بافت شن لومی و رس سیلتی (۲*۳*۳) 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).

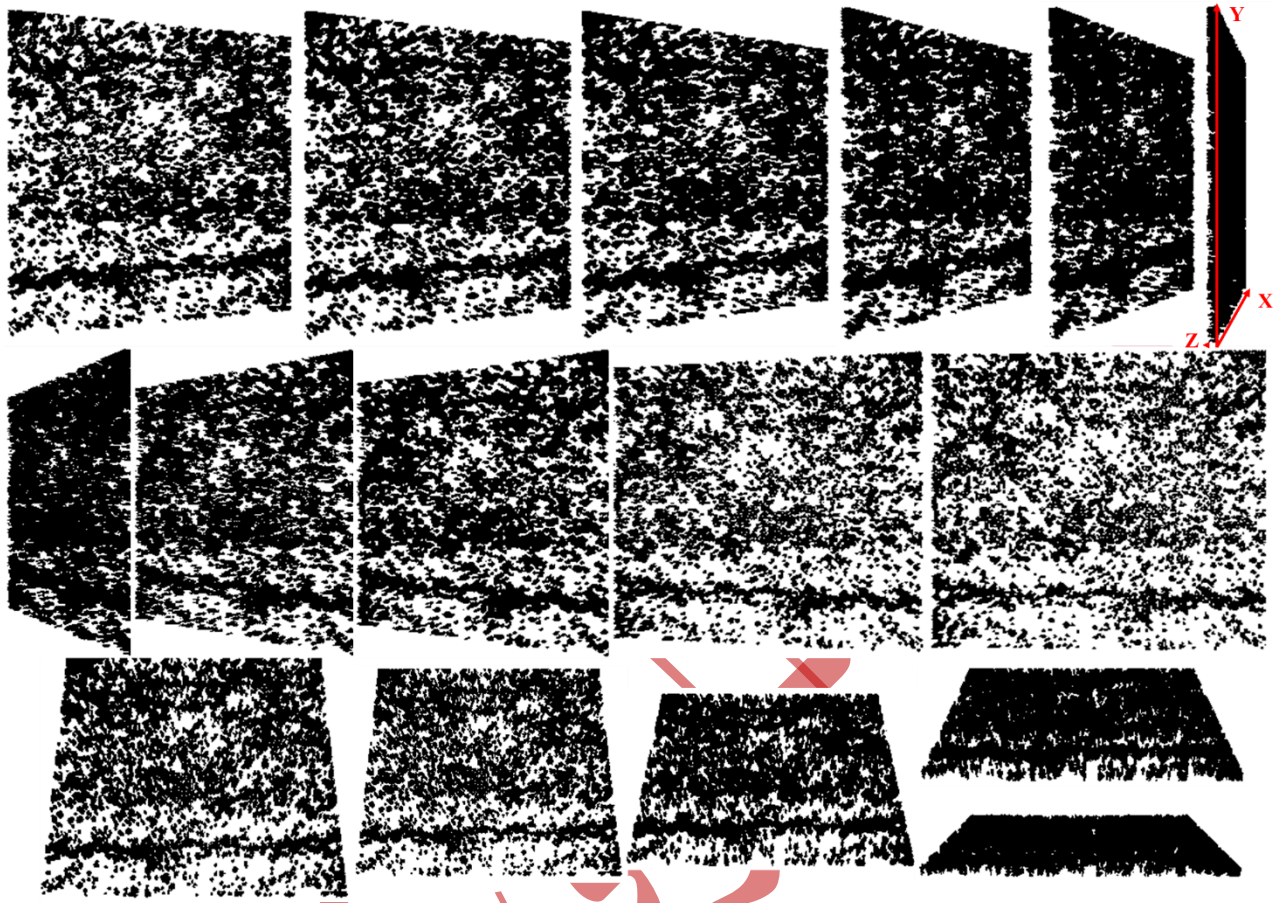
تصویربرداری و تجزیه و تحلیل تصاویر خاک

پس از اتمام دوره تر و خشک شدن، به منظور آماده‌سازی نمونه‌های خاک جهت تصویربرداری دیجیتال، با استفاده از مخلوط ۵:۱ رزین پلی‌استر و استایرن و مقادیر متناسب سخت‌کننده^۱ و کاتالیزور^۲ تلقیح گردید (Ringrose-Voase et al., 1996). مایه تلقیح به مدت چهار ساعت تحت مکش ۰/۵ بار قرار گرفت تا رزین، جایگزین هوای محبوس بین خاکدانه‌ها گردد. پس از حدود ۷۵ روز رزین پلی‌استر به سختی مورد نظر رسید. 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^۳ انجام شد تا خاکدانه‌ها با حداکثر وضوح تصویربرداری گردند. تصویربرداری سطوح برش داده شده با استفاده از دوربین دیجیتال با وضوح ۱۲ مگاپیکسل و لنز f/1.8 انجام شد.

در ادامه جهت پردازش دوبعدی و سه‌بعدی سطوح تصویربرداری شده از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. برای این منظور با اجرای فرایند واسنجی تصاویر به فرمت سیاه و سفید^۴ تبدیل شدند و به منظور پردازش دقیق‌تر، نسخه‌های سیاه و سفید تصاویر با شیوه آستانه‌بندی^۵ به فرمت تفکیک شده^۶ تغییر یافت تا بخش جامد با پیکسل‌های سفید درون تصویر از منافذ آن جدا گردد. تصاویر آستانه‌بندی شده از طریق شیوه انباشت^۷ 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 شکل خاکدانه‌ها خاک، شامل ضرایب کشیدگی، فشردگی، پهن شدگی، و گردی^۸ (ضریب ۱ نمایانگر حداکثر نمود پارامتر مورد نظر در خاکدانه‌ها مورد مطالعه است)، حجم و سطح خاکدانه‌ها با استفاده از پردازنده‌های سه‌بعدی و دوبعدی در نرم‌افزار ImageJ تعیین گشت. شکل (۱) نمونه‌ای از تصاویر سه‌بعدی مورد استفاده برای مطالعه خاکدانه‌ها را که در زوایایی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است نشان می‌دهد.

1. Hardener
2. Catalyst
3. UV lamp
4. Grayscale

5. Thresholding
6. Binary images
7. Stacking
8. Sphericity



شکل ۱- تجزیه و تحلیل سه بعدی (ابعاد X، Y و Z) مقطع یکی از نمونه‌های خاک مورد مطالعه در زوایای مختلف

ترسیم نمودارها و مقایسه‌های آماری

در این مطالعه از نرم‌افزارهای Orange.3 و Excel 2016 برای ترسیم نمودارها، تعیین آماره‌های توصیفی و مقایسات آماری بین تیمارهای مختلف استفاده شد. مقایسات بین تیمارها از نظر تاثیر همزمان آن‌ها بر ضرایب شکل خاکدانه‌های شناسایی شده در پردازش تصویر و بر اساس آزمون برقراری فرضیه صفر، با استفاده از تعیین Z-Score و در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. آماره‌های توصیفی با استفاده از نرم‌افزار Orange.3 به دست آمد و آماره‌هایی همچون میانگین، مُد، میانه، ضریب تغییرات، حداقل، و حداکثر برای ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها خاک تعیین شد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: ضریب کشیدگی^۱، ضریب پهن‌شدگی^۲، ضریب گردی^۳، ضریب فشردگی^۴، سطح خاکدانه^۵، حجم خاکدانه^۶، قطر محاسباتی بر حسب سطح خاکدانه (بر اساس معادله $A = \pi r^2$)، قطر محاسباتی بر حسب حجم خاکدانه (بر اساس معادله $V = \frac{4}{3}\pi r^3$)، و قطر محاسباتی اصلاح شده با ضریب گردی.

طبقه‌بندی خاکدانه‌ها در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

۱ - Aggregates Elongation

۲ - Aggregates Flatness

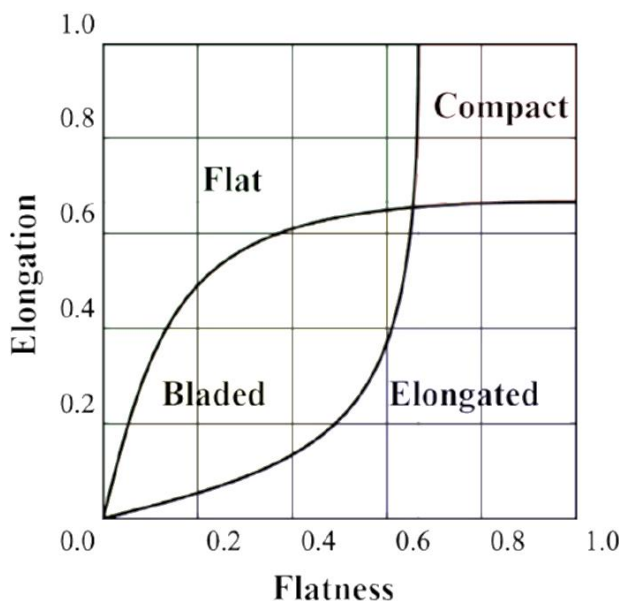
۳ - Aggregates Sphericity

۴ - Aggregates Compactness

۵ - Aggregates Surface

۶ - Aggregates Volume

اخیراً (Angelidakis et al., 2022; Maramizonouz and Nadimi, 2022) شیوه‌ای را برای طبقه‌بندی شکل ذرات غیر کروی معرفی و بکار بردند. شکل (۱) نحوه طبقه‌بندی توصیه شده توسط این محققین را نشان می‌دهد. در این مطالعه نیز از این شیوه برای طبقه‌بندی هندسی خاکدانه‌ها بهره‌گیری شد، تا اثر تیمارهای اصلاحی و تخریبی مورد استفاده در این پژوهش بر قرارگیری خاکدانه‌ها در هریک از دسته‌های طیغه‌ای^۱، فشرده^۲، کشیده^۳ و پهن^۴ مشخص شود.



شکل ۲- طبقه‌بندی خاکدانه‌های غیر کروی در چهار دسته تیغه‌ای، فشرده، کشیده و پهن (Angelidakis et al., 2022)

یافته‌های پژوهش

برخی آماره‌های توصیفی ویژگی‌های مربوط به شکل خاکدانه‌ها در طیف کامل تیمارهای اصلاحی و تخریبی ایجاد شده در جدول (۱) قابل مشاهده است. خاکدانه‌های خاک شن لومی در عمده تیمارهای مورد مطالعه از نظر ضرایب شکل مورد بررسی دارای مقادیر بزرگ‌تری بود. همان‌طور که (Rabot et al., 2018) بیان کردند، ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها به عنوان دیواره منافذ خاک، ویژگی‌های آن‌ها و در نتیجه رفتار فیزیکی خاک‌ها را تعیین می‌کنند، بنابراین میزان اختلاف خاک‌ها از نظر ویژگی‌های ساختمانی بستگی به مقدار اختلاف ویژگی‌های خاکدانه‌ها دارد. بنابراین با مرور جدول (۱) می‌توان به ایجاد اختلاف ساختمانی بین تیمارهای مختلف مورد مطالعه پی برد. ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی که در این مطالعه برای طبقه‌بندی خاکدانه‌ها استفاده شد در عمده تیمارهای خاک شن لومی مقادیر بیش‌تری نسبت به خاک رس سیلتی دارد. ضریب تغییرات ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی در دامنه خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۰/۷۷ بود و این نشان می‌دهد که تنوع قابل ملاحظه‌ای از خاکدانه‌ها در این مطالعه مورد شناسایی قرار گرفته است.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

ویژگی	میانگین	مُد	میان	ضریب تغییرات	حداقل	حداکثر
-------	---------	-----	------	--------------	-------	--------

۱ - Bladed

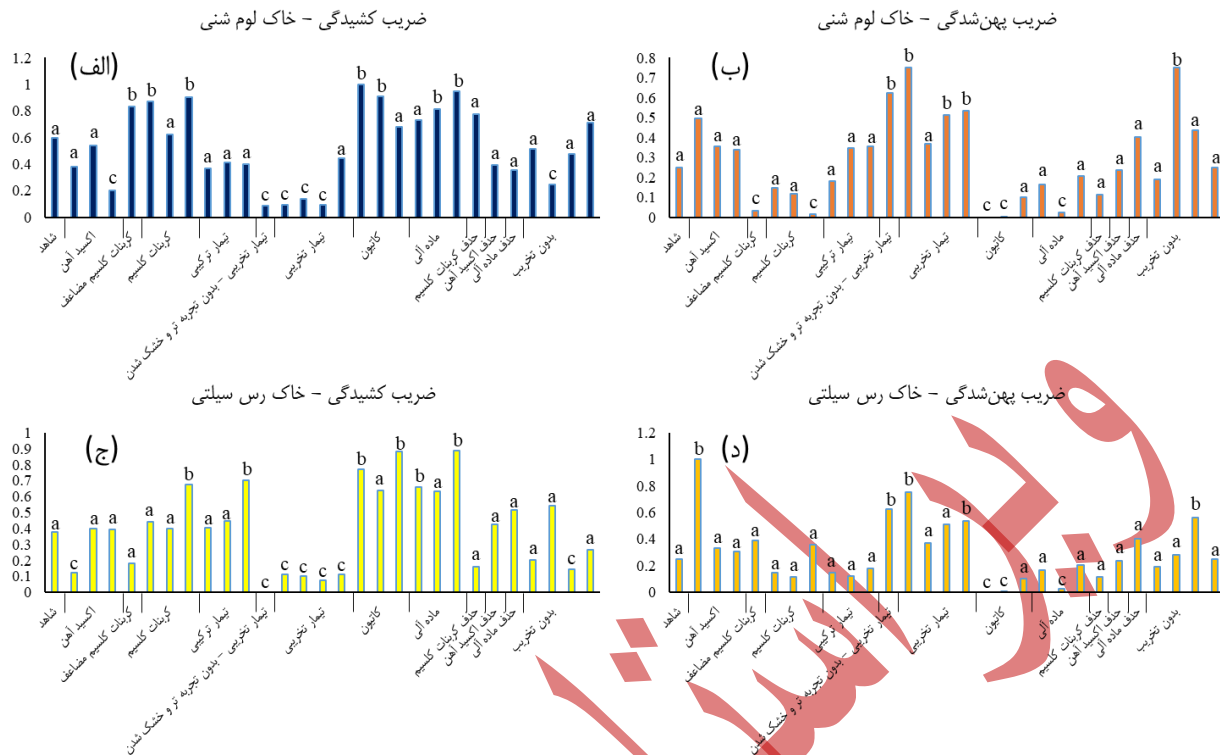
۳ - Elongated

۲ - Compact

۴ - Flat

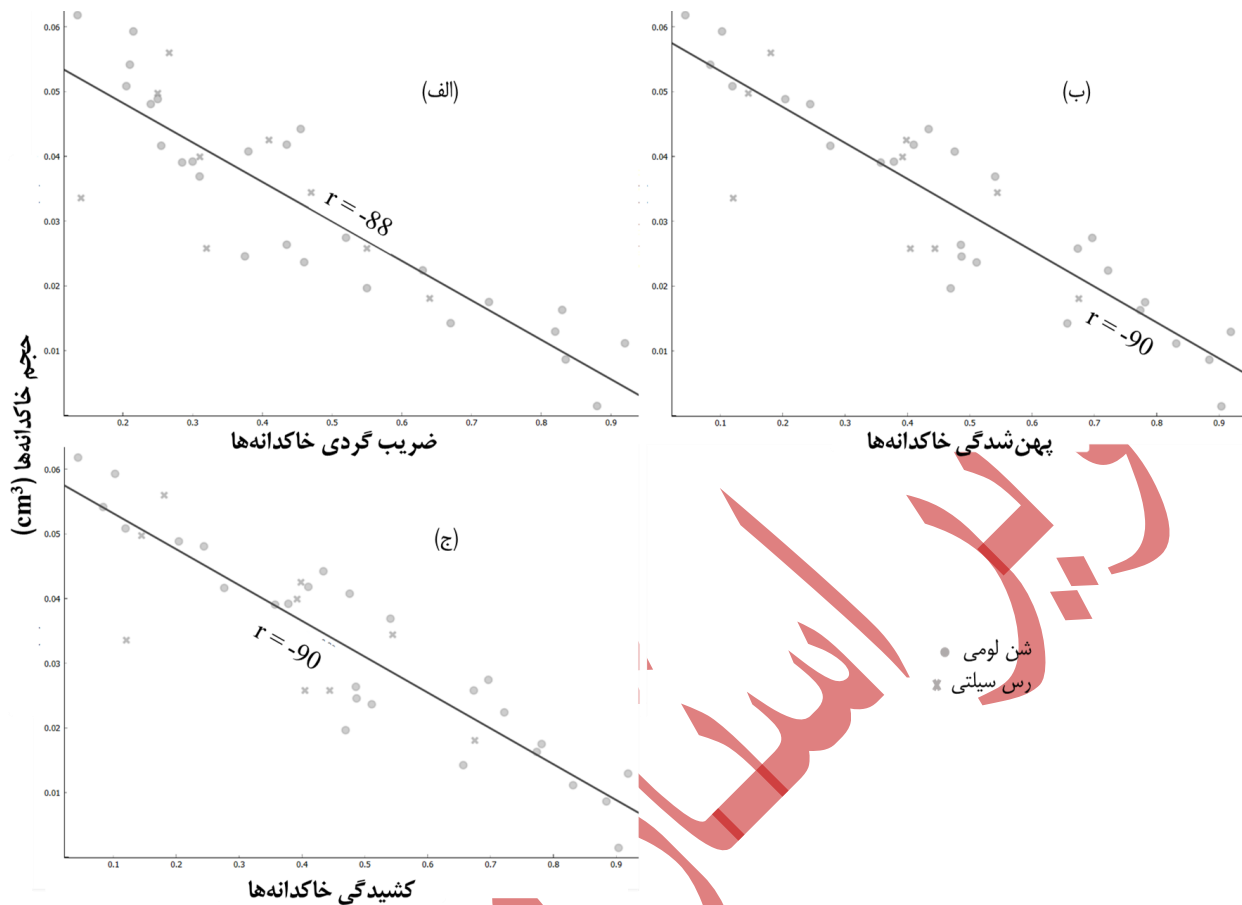
۱/۰	۰/۰	۰/۵۷	۰/۴۶	۰/۶۶	۰/۴۸	کشیدگی خاکدانه‌ها
۰/۹۲	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۴۷	گردی خاکدانه‌ها
۳/۶۲	۰/۰۸	۱/۱۳	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۴۷	قطر برآورد شده از حجم خاکدانه‌ها (اصلاح شده)
۱/۰	۰/۰	۰/۷۷	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۲۹	پهن‌شدگی خاکدانه‌ها
۳/۰	۰/۰۴	۱/۲۶	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۳۴	قطر برآورد شده از مساحت خاکدانه‌ها (اصلاح شده)
۱/۰	۰/۰	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۲۳	فشرده‌گی خاکدانه‌ها
۰/۳۵	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۴	قطر برآورد شده از مساحت خاکدانه‌ها
۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	قطر برآورد شده از حجم خاکدانه‌ها
۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۹۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷	مساحت خاکدانه‌ها
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	حجم خاکدانه‌ها

بررسی ضریب کشیدگی خاکدانه‌های خاک شن لومی در تیمارهای مورد مطالعه نشان داد که این ضریب در تیمارهای کربنات کلسیم مضاعف، سطوح اول و سوم کربنات کلسیم، سطوح اول و دوم تیمار کاتیون کلسیم و سدیم، و سطوح دوم و سوم تیمار ماده آلی افزایش معنی‌داری نسبت به کل تیمارهای مورد بررسی داشته است (شکل ۳). از طرفی در سطح سوم تیمار اکسید آهن، سطوح مختلف تیمار تخریبی و سطح دوم تیمار بدون تخریب (با تجربه ۹۰ روز دوره تر و خشک شدن)، ضریب کشیدگی خاکدانه‌ها به صورت معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارهای مورد بررسی بود. درحالی که، عمده تیمارهای تخریبی و سطح دوم تیمار بدون تخریب نسبت به سایر تیمارهای مورد مطالعه بیش‌ترین ضریب پهن‌شدگی در خاک شن لومی را نشان دادند و این ضریب در تیمارهای کربنات کلسیم مضاعف و سطح سوم تیمار کربنات کلسیم، دو سطح اول تیمار کاتیون، و سطح دوم تیمار ماده آلی به صورت معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارهای مورد مطالعه بود. لذا تقریباً می‌توان این‌گونه برداشت کرد که روند افزایش کشیدگی و پهن‌شدگی خاکدانه‌ها در تیمارهای مورد بررسی به صورت معکوس رخ داده است. بررسی روند تغییرات ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی در تیمارهای مختلف خاک رس سیلتی تشابه قابل ملاحظه‌ای با خاک شن لومی داشت. تیمارهای کربنات کلسیم، تیمار ترکیبی، تیمار کاتیون کلسیم و سدیم و تیمار ماده آلی بیش‌ترین مقادیر کشیدگی و تیمار اکسید آهن، تیمارهای تخریبی و بدون تخریب (بدون تیمارهای اصلاحی) نیز بیش‌ترین مقادیر ضریب پهن‌شدگی را نشان دادند. بنابراین اینگونه استنباط می‌شود که تیمارهای اصلاحی و تخریبی، در کنار چرخه‌های تر و خشک شدن فارغ از بافت خاک اثرات نسبتاً ثابت و مشابهی را بر خصوصیات هندسی خاکدانه‌ها گذاشته‌اند. همسو با نتایج این مطالعه (Denef et al., 2007; Kong et al., 2005; Six and Paustian, 2014) نیز مشاهده نمودند که عملیات مدیریتی و تیمارهایی از جمله مواد آلی سبب تغییر رفتار مکانیکی و ساختمانی خاک‌ها می‌شود. آنچه در شکل (۳) مشاهده شد نشان می‌دهد یکی از منساجات تغییرات ویژگی‌های ساختمانی خاک‌ها در اثر عوامل مدیریتی، اختلافی است که در ویژگی‌های خاکدانه‌ها ایجاد می‌شود، زیرا بر اساس آنچه (Rabot et al., 2018) بیان نمودند، ویژگی‌های خاکدانه‌ها شکل و اندازه منافذ خاک را نیز تعیین می‌کند. مطالعات مربوط به ساختمان میکروسکوپی خاک از جمله (Pagliai et al., 2004) نشان داده است که حضور مواد اصلاحی و تیمارهایی همچون کربن آلی سبب بهبود وضعیت ساختمانی و ویژگی‌های خاکدانه‌ها می‌شود. در این مطالعه نیز مشاهده شد که نه تنها حضور این تیمارها سبب تغییر ویژگی‌های میکروسکوپی خاکدانه‌ها می‌شود، بلکه حذف مواد اصلاحی از جمله کربنات کلسیم، اکسید آهن و ماده آلی نیز سبب ایجاد اختلاف در ضرایب پهن‌شدگی و کشیدگی خاکدانه‌ها می‌شود.



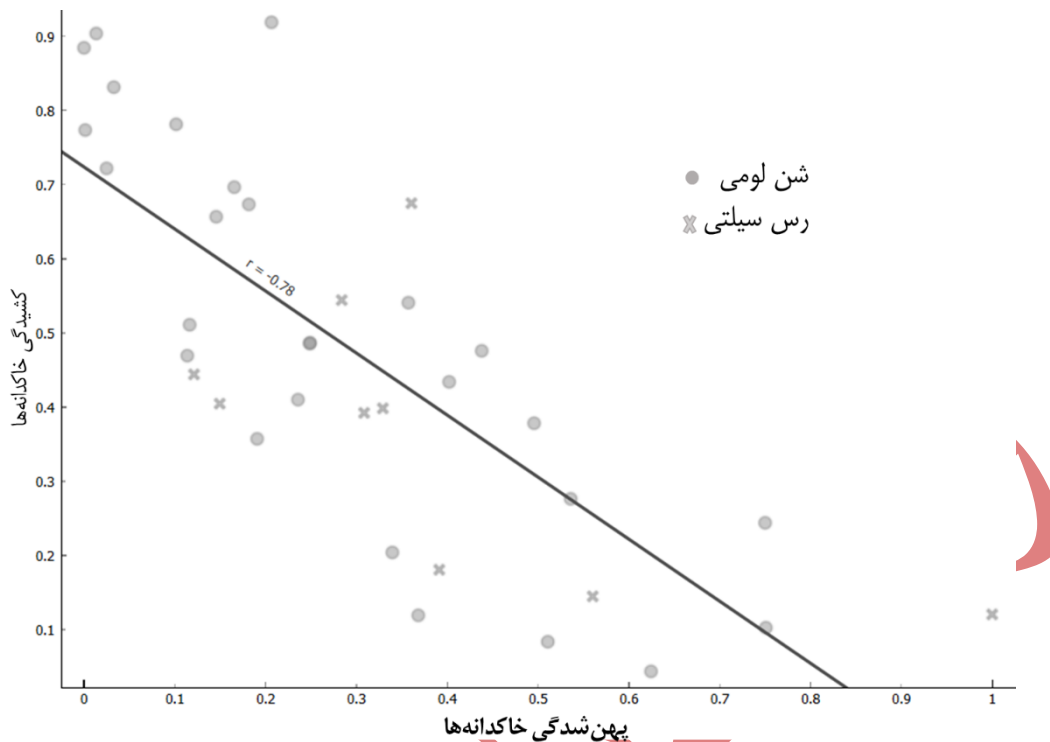
شکل ۳- مقایسه نسبی اثرات همزمان تیمارهای مورد بررسی و دوره‌های تر و خشک شدن بر ضرایب پهن‌شدگی و کشیدگی. (a) عدم تفاوت معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها، (b) افزایش معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها، (c) کاهش معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها.

حجم خاکدانه‌ها از جمله ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها است که در این مطالعه مستقیماً با استفاده از تجزیه و تحلیل سه‌بعدی تصاویر بلوک‌های خاک و با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تعیین گردید. حجم خاکدانه‌ها همانند ضرایب پهن‌شدگی و کشیدگی ماهیت سه‌بعدی دارد (Maramizonouz and Nadimi, 2022)، و فرضیه این است که همبستگی قوی بین ضرایب شکل خاکدانه‌ها و حجم آن‌ها برقرار باشد. روابط قابل مشاهده در شکل (۴) اثبات‌کننده این فرضیه است، به طوری که بین حجم خاکدانه‌ها و ضرایب پهن‌شدگی، کشیدگی و گردی ارتباط معکوس با همبستگی قوی ($r = 90\%$) برقرار است (شکل ۴، الف تا ج). این نتایج بر اهمیت مطالعه سه‌بعدی خاکدانه‌های غیرکروی خاک به منظور طبقه‌بندی هندسی تأکید می‌کند (Kong and Fonseca, 2018). علاوه بر این مطالعه هیچ‌گاه رابطه رگرسیونی مشخصی بین سطح خاکدانه‌ها به عنوان یک ویژگی هندسی دوبعدی و ضرایب شکل مورد مطالعه مشاهده نشد که نشان‌گر اهمیت تکیه بر تکنیک‌های مطالعه سه‌بعدی خاکدانه‌ها در طبقه‌بندی شکل هندسی آن‌هاست.



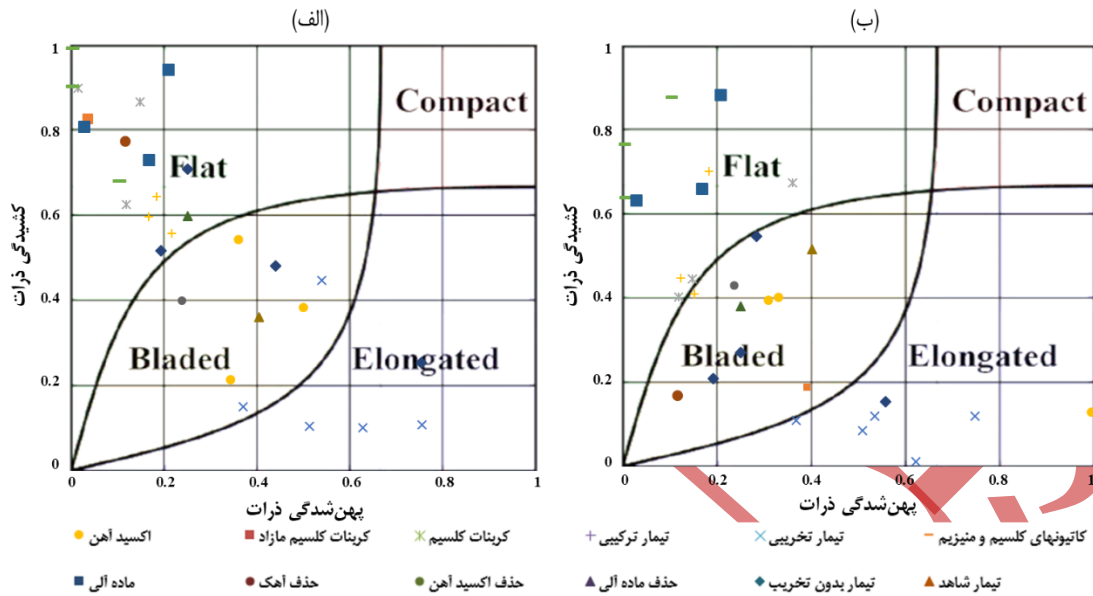
شکل ۴- روابط بین حجم خاکدانه‌ها با ضریب گردی (الف)، پهن شدگی (ب)، و کشیدگی (ج) خاکدانه‌ها که از طریق پردازش تصویر تخمین زده شد.

در این مطالعه ضرایب کشیدگی و پهن شدگی که برای دسته‌بندی خاکدانه‌های غیرکروی استفاده می‌شوند (Angelidakis et al., 2022; Maramizonouz and Nadimi, 2022) رابطه خطی معکوسی را نسبت به هم نشان دادند (شکل ۵). این دو ضریب همبستگی نسبتاً قوی داشته و تقریباً قرینه یکدیگر بودند، به طوری که، خاکدانه‌های کشیده هیچ‌گاه ویژگی‌های یک خاکدانه پهن را نشان ندادند. بررسی ضرایب شکل خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف مورد بررسی (شکل ۳- مؤید صحت چنین برداشتی است و همانطور که مشاهده شد تیمارهایی که شامل خاکدانه‌های کشیده بودند هیچ‌گاه ضریب پهن شدگی بالایی نداشتند و این در هر دو بافت خاک شن لومی و رس سیلتی صدق کرد.



شکل ۵- رابطه بین ضرایب کشیدگی و پهن شدگی مورد استفاده برای طبقه‌بندی شکل خاکدانه‌ها خاک‌های مورد مطالعه.

طبقه‌بندی خاکدانه‌ها بر اساس روش ارائه شده توسط (Angelidakis et al., 2022)، نشان داد که خاکدانه‌ها در دو بافت شن لومی و رس سیلتی در دامنه‌ای از خاکدانه‌های پهن، تیغه‌ای و کشیده گسترده بوده و هیچ‌کدام از تیمارها حاوی خاکدانه‌های فشرده نبوده است (شکل ۶-الف). بیش از نیمی از خاکدانه‌های مورد مطالعه در تیمارهای مختلف خاک شن لومی در دسته خاکدانه‌های پهن قرار گرفتند، در حالی که کم‌تر از ۱۵ درصد خاکدانه‌های این بافت را خاکدانه‌های کشیده تشکیل داده است. با این حال، درصد خاکدانه‌های کشیده، تیغه‌ای و پهن در خاک رس سیلتی در حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بود و فراوانی تقریباً برابری در طبقه‌بندی شکل خاکدانه‌های خاک رس سیلتی مشاهده شد. (Zheng et al., 2021) نشان دادند، خاک‌هایی که حاوی خاکدانه‌های پهن بیش‌تری باشند دارای هدایت هیدرولیکی کم‌تری خواهند بود. با این که نقش منافذ خاک در هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک‌ها کاملاً حیاتی است (Tang et al., 2023)، شکل هندسی خاکدانه‌ها اثر مستقیم در نحوه ایجاد منافذ خاک و اندازه و شکل آن‌ها دارد (Zhang et al., 2023). با توجه به افت شدید هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک‌های سبک بافت نسبت به خاک‌های سنگین بافت (Ghanbarian and Yokeley, 2021)، باید بررسی شود که حضور خاکدانه‌های پهن می‌تواند چه سهمی را در این کاهش ایفا نماید.

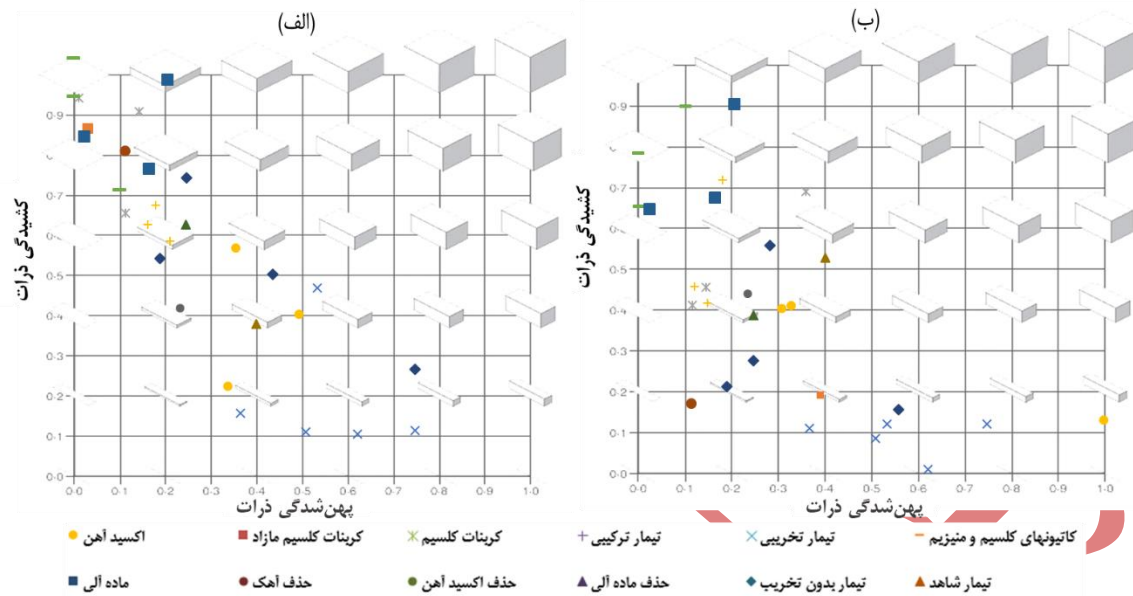


شکل ۶- موقعیت خاکدانه‌ها مورد مطالعه در پژوهش حاضر نسبت به طبقه‌بندی خاکدانه‌های غیرکروی معرفی شده توسط Angelidakis et al., (2022) در دو خاک شن لوم (الف) و رس سیلتی (ب)

شکل سه‌بعدی خاکدانه‌های گوشه‌دار به صورت مکعب‌های مربع و مستطیل خواهد بود. ابعاد خاکدانه‌های مکعبی بستگی به ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی آن‌ها دارد و هرچه ضرایب کشیدگی و پهن‌شدگی خاکدانه‌ها بیشتر باشد نشان‌گر مکعب‌هایی با ارتفاع کم و طول بیشتر است (آنجلیداکیس^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). بر همین اساس، طبقه‌بندی سه‌بعدی خاکدانه‌ها که مطابقت شکل هندسی آن‌ها را با مکعب‌های مختلف نشان می‌دهد، به ترتیب در شکل‌های (الف-۷) و (ب-۷) مشاهده می‌شود. عمده خاکدانه‌ها به‌خصوص در خاک شن لومی با مکعب‌های پهن و کشیده بیش‌ترین تطابق را داشته و به مراتب از مکعب مربع فاصله داشتند. در واقع شکل سه‌بعدی عمده خاکدانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش مطابق با مکعب مستطیل با ضخامت کم بود. تیمار ماده آلی در هر دو بافت شن لومی و رس سیلتی سبب ایجاد خاکدانه‌هایی شد که سطح مقطع مربعی با ضخامت کم بودند، و (Al-Kaisi et al. (2017 این گونه خاکدانه‌ها را در دسته بلوکی قرار دادند. در واقع خاکدانه‌هایی که (Angelidakis et al. (2022 آن‌ها را در دسته خاکدانه‌های پهن شده قرار دادند، بیان‌گر خاکدانه‌های بلوکی^۲ هستند. همچنین خاکدانه‌ها در تیمارهای تخریبی در هر دو بافت مورد مطالعه عمدتاً مطابق با مکعب‌هایی با سطح مقطع مستطیلی و کشیده بودند که (Al-Kaisi et al. (2017 آن‌ها را در دسته خاکدانه‌های ستونی^۳ طبقه‌بندی کرده‌اند. در مطالعات گذشته مشخص شده است که امکان حضور خاکدانه‌های ستونی در خاک‌های در حال تخریب بیشتر است (Mohawesh et al., 2017) و در این مطالعه نیز در خاک‌های تخریب شده بیش‌ترین سهم از خاکدانه‌ها را انواع ستون تشکیل داد.

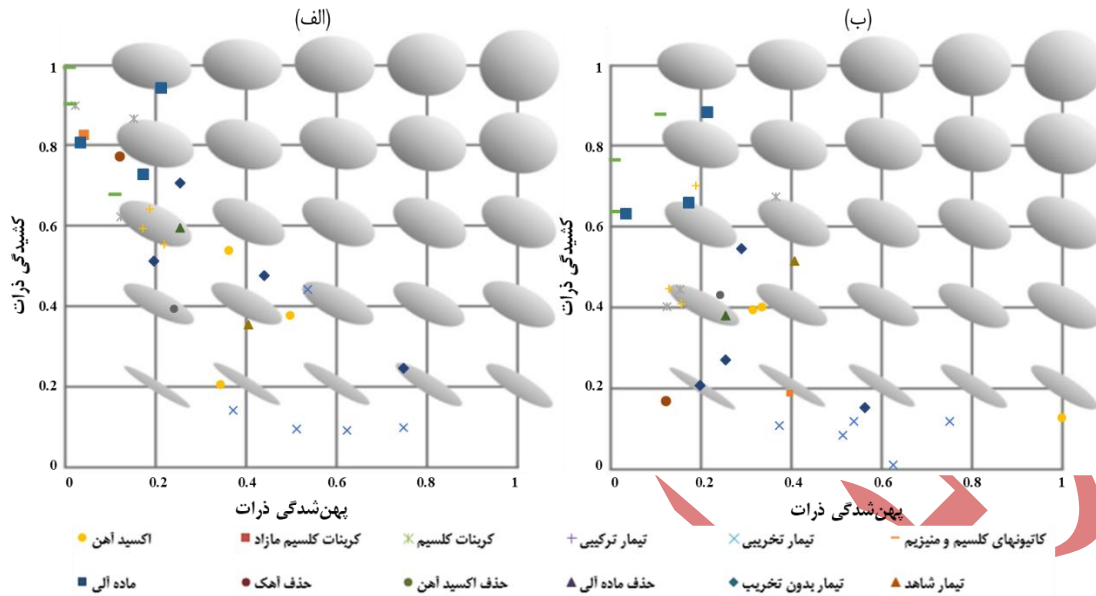
¹ - Angelidakis

2 - Blocky
3 - columnar



شکل ۷- دسته‌بندی مقدار مکعبی بودن خاکدانه‌ها در خاک‌های مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط Angelidakis et al., (2022) در دو خاک شن لوم (الف) و رس سیلتی (ب)

خاکدانه‌های بدون گوشه دارای سطح مقطع دوبعدی دایره‌ای یا بیضی هستند. شکل ۸ (الف و ب) سطح مقطع دوبعدی چنین خاکدانه‌هایی را در خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش نشان می‌دهد. همان‌طور مشاهده می‌شود تمامی خاکدانه‌های بدون گوشه در این مطالعه از شکل دایره فاصله داشته و مطابق با بیضی‌هایی بود که عمدتاً نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر یا بیش‌تر از ۲ داشتند. سطح مقطع بیضی شکل سبب ایجاد منافذ بین خاکدانه‌های غیرکروی شده و چنین منافذی به شدت خصوصیات هیدرولیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Bakhshi et al., 2023). بر اساس آنچه Conzelmann et al. (2022) مشاهده کردند، هرچه سطح مقطع ذرات و خاکدانه‌ها از شکل کروی فاصله گرفته و به فرم بیضی درآیند تخلخل و نفوذپذیری محیط‌های متخلخل کاهش یافته و بالعکس اعوجاج مسیر جریان مرتباً افزایش می‌یابد. در این مطالعه تیمارهای ماده آلی و کاتیون‌های کلسیم و سدیم سبب تشکیل خاکدانه‌هایی با سطح مقطع کاملاً دایره‌ای شد در هر دو بافت خاک شد. از طرفی تیمارهای تخریبی و اکسید آهن سبب ایجاد سطح مقطع کاملاً بیضوی در خاکدانه‌ها شد.



شکل ۸- دسته‌بندی ضریب گردی خاکدانه‌ها در خاک‌های مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط Angelidakis et al., (2022) در دو خاک شن لوم (الف) و رس سیلتی (ب)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تیمارهای اصلاحی و تخریبی سبب تغییرات متفاوتی در ویژگی‌های هندسی خاکدانه‌ها در خاک‌های متأثر از چرخه‌های تر و خشک شدن گردید. طبقه‌بندی خاکدانه‌ها در این مطالعه نشان داد که دو خاک با بافت‌های شن لومی و رس سیلتی در اثر اعمال تیمارهای مذکور و چرخه‌های رطوبتی، در دامنه وسیعی از دسته‌های خاکدانه‌ها کشیده، تیغه‌ای و پهن شده توزیع شدند. این نشان‌گر اهمیت بالای طبیعت خاک‌ها و شرایط محیطی بر تغییرات هندسی خاکدانه‌ها در بافت‌های مختلف است. در واقع در اثر وقوع توالی‌های منظم تر و خشک شدن، خاک‌هایی که از نظر مواد اصلاحی و اثرات تخریبی شرایط متفاوتی داشتند در میان مدت شش ماهه ویژگی‌های به شدت متنوعی در میکروساختار خود پیدا کردند که این بر پویایی ساختمان خاک‌ها در مقیاس خاکدانه‌ها تأکید دارد. استفاده از شیوه‌های پردازش تصویر، دقیق‌ترین روش‌ها برای مشاهده مستقیم خاکدانه‌هاست که در این مطالعه با موفقیت جهت طبقه‌بندی آن‌ها از نظر ویژگی‌های هندسی بکارگیری شد. لذا با توجه به اهمیتی که خاکدانه‌ها در تعیین رفتار مکانیکی و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌ها دارند و همچنین به دلیل نقش تعیین‌کننده‌ای که در اندازه و شکل منافذ خاک دارا هستند، ضروری است که از شیوه‌های دقیق پردازش تصویر به منظور شناسایی شکل خاکدانه‌ها و طبقه‌بندی آن‌ها، به صورت دوره‌ای استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی پس از طبقه‌بندی هندسی خاکدانه‌ها، همزمان ویژگی‌های هندسی منافذ نیز تعیین و همچنین با اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌ها ارتباطات بین اشکال هندسی خاکدانه‌ها و منافذ خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی تعیین گردد.

" هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد "

- Al-Kaisi, M. M., Lal, R., Olson, K. R., & Lowery, B. (2017). Fundamentals and functions of soil environment. In *Soil health and intensification of agroecosystems* (pp. 1-23). Academic Press.
- Al-Rawas, A. A., & McGown, A. (1999). Microstructure of Omani expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2), 272-290.
- Angelidakis, V., Nadimi, S., & Utili, S. (2022). Elongation, flatness and compactness indices to characterise particle form. *Powder Technology*, 396, 689-695.
- Barrett, H. H., & Swindell, W. (1981). The theory of image formation, detection, and processing. In *RADIOLOGICAL IMAGING* (Vol. 1, pp. 317-319). Academic Press.
- 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.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1), 31-63.
- Conzelmann, N. A., Partl, M. N., Clemens, F. J., Müller, C. R., & Poulidakos, L. D. (2022). Effect of artificial aggregate shapes on the porosity, tortuosity and permeability of their packings. *Powder Technology*, 397, 117019.
- Denef, K., Zotarelli, L., Boddey, R. M., & Six, J. (2007). Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(5), 1165-1172.
- Dingyi, X. I. E., & Jilin, Q. I. (1999). Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 21(6), 651-656.
- Kawamoto, R., Andò, E., Viggiani, G., & Andrade, J. E. (2018). All you need is shape: Predicting shear banding in sand with LS-DEM. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 111, 375-392.
- 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).
- Farulla, C., Ferrari, A., & Romero, E. (2010). Volume change behaviour of a compacted scaly clay during cyclic suction changes. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(6), 688-703.
- Ghanbarian, B., & Yokeley, B. A. (2021). Soil classification: A new approach for grouping soils using unsaturated hydraulic conductivity data. *Water Resources Research*, 57(9), e2021WR030095.
- Kong, A. Y., Six, J., Bryant, D. C., Denison, R. F., & Van Kessel, C. (2005). The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil science society of America journal*, 69(4), 1078-1085.
- Kong, D., & Fonseca, J. (2018). Quantification of the morphology of shelly carbonate sands using 3D images. *Géotechnique*, 68(3), 249-261.
- Maramizonouz, S., & Nadimi, S. (2022). Drag force acting on ellipsoidal particles with different shape characteristics. *Powder Technology*, 412, 117964.
- Mohawesh, O., Janssen, M., Maaitah, O., & Lennartz, B. (2017). Assessment the effect of homogenized soil on soil hydraulic properties and soil water transport. *Eurasian Soil Science*, 50, 1077-1085.

- Nguyen, T. T., & Indraratna, B. (2020). The role of particle shape on hydraulic conductivity of granular soils captured through Kozeny–Carman approach. *Geotechnique Letters*, 10(3), 398-403.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and tillage research*, 79(2), 131-143.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137.
- 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.
- Six, J., & Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, A4-A9.
- Tang, C. S., Zhu, C., Cheng, Q., Zeng, H., Xu, J. J., Tian, B. G., & Shi, B. (2021). Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors. *Earth-Science Reviews*, 216, 103586.
- Tang, C. S., Cheng, Q., Gong, X., Shi, B., & Inyang, H. I. (2023). Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focusing on wetting/drying process. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1), 269-284.
- 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).
- 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.
- Zhang, X., Liu, X., Xu, Y., Wang, G., & Ren, Y. (2023). Compressibility, permeability and microstructure of fine-grained soils containing diatom microfossils. *Geotechnique*, 1-15.
- Zheng, W., Hu, X., Tannant, D. D., & Zhou, B. (2021). Quantifying the influence of grain morphology on sand hydraulic conductivity: A detailed pore-scale study. *Computers and Geotechnics*, 135, 104147.
- Zingg, T. (1935). *Beitrag zur schotteranalyse* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Extended Abstract

Background: Soil microstructure plays a pivotal role in its overall health and functionality. Wetting-drying cycles, which induce Swelling-Shrinkage sequences in soil aggregates, are known to have a significant impact on soil microstructure. This study sought to explore the alterations in the geometric properties of two distinct soil types, namely loamy sand and silty clay, by subjecting them to varying moisture conditions, involving both enhancements and deteriorations. The central premise of this research revolves around the notion that different levels of treatment intensity during wetting-drying cycles exert discernible effects on soil microstructure at the soil aggregate level.

Objective: The primary objective of this research was to investigate how wetting-drying cycles, with differing treatment conditions, influence the microstructural attributes of loamy sand and silty clay soils. These treatment conditions encompassed the application of amendments like calcium carbonate, cations, and organic matter, as well as degradation processes. The aim was to discern how these treatments impact soil aggregate shape, volume, surface area, sphericity, and flatness coefficients, with the ultimate goal of classifying the soil aggregates based on their geometric attributes.

Methodology: To achieve this objective, the study employed advanced techniques. Soil blocks were subjected to wetting-drying cycles, and 2D and 3D images of the soil aggregates were captured. Image processing was carried out using ImageJ software to extract valuable information. The parameters of interest included soil aggregate volume, surface area, sphericity, and flatness coefficients. These parameters served as the basis for the classification of soil aggregates. Statistical analysis and visualization were conducted using Orange 3 and Excel 2016 software to draw meaningful insights from the data.

Findings: The study's findings shed light on the significant impacts of the different treatments on soil microstructure. Treatments involving the addition of calcium carbonate, cations, and organic matter resulted in an increase in the coefficient of soil aggregate elongation. Conversely, degradation treatments led to an increase in the coefficient of soil aggregate flatness in both the loamy sand and silty clay soils. Further analysis revealed that in loamy sand soil samples, a small portion of the soil aggregates could be categorized as elongated, whereas more than half fell into the category of flattened soil aggregates. In silty clay soil samples, a more uniform distribution of elongated, bladed, and flattened soil aggregates was observed. However, none of the treatments led to soil aggregates being categorized as compacted soil.

Conclusion: This study underscores the critical significance of soil aggregate shape in shaping soil hydraulic conductivity and, by extension, its impact on agriculture, environmental science, and geotechnical engineering. The research methodology demonstrated its effectiveness in providing a comprehensive view of soil microstructure dynamics under the influence of wetting-drying cycles and diverse treatment conditions. These insights are invaluable, contributing to a more profound comprehension of how soils react to environmental changes. Such knowledge is vital for sustainable land management and agriculture practices, facilitating optimized irrigation, resource conservation, and enhanced crop yields. Beyond agriculture, it holds substantial ecological implications by enabling us to better mitigate the effects of climate change and soil degradation. Moreover, in geotechnical engineering, it offers a powerful tool to improve the safety and durability of civil engineering projects. Overall, this study's findings serve as a foundation for more informed and sustainable practices in a world where responsible land use and environmental stewardship are increasingly critical.

Keywords: *Image analysis, Soil aggregates elongation, soil aggregates flatness, Soil microstructure, Wetting-drying cycles.*