19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

تحول و چشم‌انداز آینده آنالیز تصویر در میکرومورفولوژی خاک: از روش‌های بصری تا هوش مصنوعی

آیدا بخشی[1*]، احمد حیدری[2]

۱ و ۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

ساختمان خاک و منافذ آن نقشی بنیادین در پویایی آب، هوا و ویژگی‌های زیستی ایفا می‌کنند، اما مطالعه و کمی‌سازی آن‌ها همواره یکی از دشوارترین چالش‌ها در علوم خاک بوده است. روش‌های اولیه مبتنی بر مشاهده بصری، نظیر سیستم ارزیابی بصری خاک (*VSE*[1]) در دهه ۱۹۵۰، امکان توصیف کیفی ویژگی‌های ساختمانی را فراهم کردند اما فاقد دقت و قابلیت تکرار بودند. از دهه ۱۹۹۰ به بعد، ورود مورفولوژی ریاضی (MM[2]) مسیر کمی‌سازی ساختار منافذ را گشود و در ادامه فناوری‌های تصویربرداری سه‌بعدی مانند میکرو-توموگرافی رایانه‌ای (mCT[3]) جهشی اساسی در مشاهده مستقیم شبکه‌های متصل منافذ ایجاد کردند. در دهه اخیر، ظهور الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، فرایند پردازش و تفکیک تصاویر را به سطحی جدید رسانده و امکان تحلیل خودکار کلانداده‌های تصویری را فراهم ساخته است. با این حال، چالش‌هایی نظیرعدم قطعیت در پیکربندی تصاویر، نبود استانداردهای یکپارچه و محدودیت اجرایی روش‌ها همچنان پابرجاست. این مقاله با رویکردی مرور-تحلیلی، تحول تاریخی آنالیز تصویر در مطالعه ساختمان خاک را از مراحل اولیه تا وضعیت کنونی بررسی کرده و چشم‌انداز آینده را در زمینه استفاده از هوش مصنوعی، تصویربرداری چندمقیاسی و تلفیق مدل‌های داده‌محور و فیزیکی ترسیم می‌کند.

واژگان کلیدی: تحلیل تصویر، ساختمان خاک، شبکه منافذ خاک، میکرو-توموگرافی رایانه‌ای، یادگیری ماشین.

1 - Visual Soil Evaluation
2 - Mathematical Morphology
3 - micro-CT

مقدمه

کیفیت ساختمان خاک در فرایندهای انتقال آب، هوا و مواد مغذی موثر است، بنابراین یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده کیفیت خاک، حاصلخیزی و پایداری اکوسیستم‌های زراعی است (Dexter, 1988). در گذشته، مطالعه این ویژگی‌ها عمدتاً به روش‌های سنتی مانند اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، روش‌های غیرمستقیم، و نهایتاً مشاهدات میکروسکوپی دوبعدی محدود بود. این روش‌ها علاوه بر اینکه وقت‌گیر هستند، اطلاعات ناقصی از ساختمان سه‌بعدی خاک ارائه می‌نمایند (Ringrose-Voase & Bullock, 1984). نقطه عطف تعیین کننده در این حوزه، ورود آنالیز تصویر دیجیتال بود که امکان استخراج کمی و دقیق ویژگی‌های ریخت‌شناختی منافذ خاک را فراهم کرد (Jastrow & Miller, 2018).

از دهه ۱۹۹۰ به بعد، با گسترش micro-CT و پیشرفت‌های پردازش تصویر، رویکردی نوین برای مشاهده مستقیم، غیرمخرب و سه‌بعدی خاک شکل گرفت (Taina et al., 2008). این تحول سبب شد که ویژگی‌هایی مانند پیوستگی شبکه منافذ، تخلخل مؤثر، و مقاومت مکانیکی خاک با دقت فراتری اندازه‌گیری شوند. در دو دهه اخیر، ظهور روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مسیر تحلیل تصویر را متحول ساخته و امکان استخراج خودکار و پیشرفته ویژگی‌ها از داده‌های پرحجم micro-CT و تصویربرداری طیفی را فراهم کرده است (Abrosimov et al., 2021). با وجود این پیشرفت‌ها، همچنان چالش‌های قابل توجهی وجود دارد؛ از جمله اینکه فهم بهتر ارتباط بین الگوهای تصویری و کارکردهای خاک، و شکاف میان مدل‌های داده‌محور و درک مفهومی پژوهشگران نیاز به تبیین مفهومی و معنایی دارد(Vogel et al., 2010).

جدول (۱) مسیر تکامل روش‌های تصویربرداری و تحلیل ساختار خاک را از ارزیابی‌های نیمه‌کمی اولیه تا فناوری‌های پیشرفته سه‌بعدی و هوش مصنوعی نشان می‌دهد. گلوگاه‌ها و پیشرفت‌های کلیدی هر دوره در جدول (۱) ذکر شده و ارتباط بین روش‌شناسی و فهم عملکرد خاک در آن نمایان است.

جدول ۱- پیشرفت‌ها و گلوگاه‌های توسعه روش‌های آنالیز تصویر در مطالعه ساختمان خاک.

دوره زمانی	تکنیک‌های غالب (منابع)	پرسش‌های کلیدی که دنبال شد	گلوگاه/محدودیت اصلی	پیام علمی/اثر ماندگار
قبل از ۲۰۰۰	VSE (Batey, 2000, Emmet-Booth et al., 2016) ریخت‌شناسی ریاضی (Horgan, 1998)	چطور می‌توان کیفیت خاک و تأثیر مدیریت را سریع و نیمه‌کمی ارزیابی کرد؟ آیا مطالعه دوبعدی می‌تواند نماینده خاک سه‌بعدی باشد؟	این روش‌ها نیاز به برون‌یابی برای تبدیل به دید سه‌بعدی دارد (Horgan, 1998)	تثبیت نخستین زبان مشترک برای ساختمان خاک در عمل و نظریه
۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵	Micro-CT (Abrosimov et al., 2021, Ball et al., 2007, Guimarães et al., 2011, Franco et al., 2019)	آیا می‌توان ساختمان خاک را غیرمخرب و سه‌بعدی دید؟	هزینه بالا؛ وابستگی به روش‌های نیمه‌دستی در پیکربندی (Emmet-Booth et al., 2016)	تثبیت CT به‌عنوان ابزار مرجع در خاک‌شناسی و ارتقای VSE از روش تجربی به شاخص علمی معتبر
۲۰۱۵ تا امروز	AI Segmentation (CNN, RF) (Lavrukhin et al., 2021; Jiang et al., 2025)؛ FIB-SEM، Chen et al., 2024) DECT (Gerke et al., 2021; Abrosimov et al., 2021)	چگونه می‌توان مرزهای فازی (solid–pore–water–root) را دقیق‌تر تفکیک کرد؟	عدم قطعیت پیکربندی؛ نبود پروتکل استاندارد؛ حساسیت شدید ویژگی‌های مرتبه بالاتر (مثل هدایت هیدرولیکی) به خطاهای کوچک (Jiang et al., 2025)	ورود AI و متدهای چندمقیاسه به خاک‌شناسی؛ انتقال پرسش‌ها از «چه می‌بینیم؟» به «چقدر می‌توانیم به دیدن خود اعتماد کنیم؟»
آینده نزدیک	شبکه‌های عصبی خودیادگیر (Abrosimov et al., 2021, Chen et al., 2024)؛ ادغام VES با سنجش‌ازدور (Franco et al., 2019)	چگونه می‌توان مدل جامع و پویای خاک دیجیتال ساخت که همزمان فیزیکی، شیمیایی و زیستی باشد؟	یکپارچه‌سازی داده‌ها و کاهش مداخله انسانی در پیکربندی	حرکت به سوی مدل‌های دیجیتال سه‌بعدی چندمقیاسه و غیرمخرب؛ پیوند مستقیم ساختمان خاک با پایداری اکوسیستم

در این پژوهش با تمرکز بر سیر تحول تاریخی آنالیز تصویر در علوم خاک، از روش‌های سنتی تا فناوری‌های مدرن micro-CT و هوش مصنوعی، به بررسی کاربردها، محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده این حوزه می‌پردازد. هدف اصلی، ترسیم نقشه‌ای جامع از وضعیت کنونی دانش و ارائه چشم‌اندازهایی برای استفاده از نسل بعدی فناوری‌ها مانند مدل‌های زبانی بزرگ (LLMs[4]) و هوش ترکیبی در تحلیل ساختمان و سلامت خاک است.

4 - Large language models

مواد و روش‌ها

این مطالعه در قالب یک مرور تحلیلی-تاریخی با رویکردی نظام‌مند انجام شده است که هدف اصلی آن، نه تنها فهرست‌کردن مطالعات، بلکه ترسیم یک نقشه راه مفهومی از تکامل رویکردهای فکری و فناورانه در حوزه آنالیز تصویر برای مطالعه میکرومورفولوژی خاک از دهه ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۵ است. بررسی مطالعات در این بازه زمانی، با تأکید بر نحوه ارتباط بین پیشرفت‌های روش‌شناختی و پاسخ به سؤالات بنیادین خاک‌شناسی انجام شده است.

سبک جستجو و انتخاب منابع

جستجوی اولیه مقالات در پایگاه‌های داده Web of Science، google scholar، و Scopus با استفاده از ترکیباتی از کلیدواژه‌های اصلی شامل soil microstructure، Visual Soil Evaluation، image analysis، و machine learning soil segmentation انجام شد.

محدوده زمانی جستجو از سال ۱۹۴۷ (معرفی اولین روش ارزیابی بصری ساختمان خاک) تا سال ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد، اما تمرکز تحلیل بر روی دوره‌های کلیدی تکامل از ۱۹۹۰ به بعد بود. معیارهای گزینش منابع به گونه‌ای طراحی شد که هر منبع نماینده یک نقطه عطف در سیر تکامل این حوزه باشد. به این ترتیب، در دسته اول مطالعات پایه‌گذار بررسی شدند. این دسته شامل مطالعاتی بود که برای اولین بار یک روش کلیدی را معرفی یا استانداردسازی نموده‌اند (Horgan, 1998, Ball et al., 2007, Guimarães et al., 2011). دسته دوم شامل پژوهش‌هایی بود که نقطه عطف فناورانه داشتند و در برگیرنده نتایجی بودند که به معرفی یا بکارگیری یک فناوری تصویربرداری جدید پرداخته و جهشی در کیفیت یا مقیاس داده‌ها ایجاد نمودنده‌اند (Taina et al., 2008, Gerke et al., 2021). دسته سوم را مطالعات روش‌شناختی پیشرو تشکیل داد. در این دسته مطالعاتی که بر حل یک چالش تحلیلی عمیق تمرکز داشتند، به ویژه پژوهش‌های مربوط به طبقه‌بندی اجزای تصویر و کمّی‌سازی عدم قطعیت قرار داشت (Jiang et al., 2025, Lavrukhin et al., 2021). نهایتاً در دسته چهارم، مقالات مروری کلیدی و تاثیرگذار در این حوزه (Emmet-Booth et al., 2016, Rabot et al., 2018, Abrosimov et al., 2021) نیز برای اطمینان از پوشش جامع و اجتناب از دوباره‌کاری ارزیابی شدند.

ابزارهای کمکی در فرآیند تحلیل

برای مدیریت حجم گسترده منابع و استخراج بهینه ارتباط و تمایز آنها و تشکیل شبکه‌های مطالعاتی صحیح، از ابزار هوش مصنوعی NoteBookLM به عنوان دستیار پژوهشی استفاده شد. این ابزار برخلاف سایر ابزار پرکاربرد فاقد ریسک توهم[5] است و بدون خلق محتوا و صرفاً با تکیه بر منابع در دسترس، با بالاترین دقت ممکن در دسته‌بندی، خلاصه‌نویسی و ایجاد نقشه ذهنی در رابطه با موضوع مورد نظر کمک می‌نماید.

نتایج و بحث

آغاز روش‌های بصری و دوبعدی

اولین تلاش‌ها برای کمی‌سازی ساختمان خاک بر پایه روش‌های بصری میدانی و شاخص‌هایی مانند VSE انجام شد (Emmet-Booth et al., 2016). چنین رویکردهایی اگرچه سریع و کم‌هزینه بودند، اما ذهنی بودن و خطای بالای ارزیابی انسانی بزرگ‌ترین محدودیت آن‌ها محسوب می‌شد. هم‌زمان، استفاده از مورفولوژی ریاضی در دهه ۱۹۹۰ امکان تحلیل کمی تصاویر دوبعدی را فراهم کرد (Horgan, 1998). این روش‌ها نقطه آغاز ورود آنالیز تصویر به علوم خاک بودند، اما هنوز درکی از پویایی سه‌بعدی منافذ فراهم نمی‌کردند.

گذار به تصویربرداری سه‌بعدی

با معرفی فناوری micro-CT، امکان مشاهده و تحلیل سه‌بعدی منافذ خاک فراهم شد (Franco et al., 2019). در این مرحله شاخص‌هایی چون تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ، و اتصال منافذ به یکدیگر قابل استخراج شدند (Abrosimov et al., 2021).

5 - Hallucination

آخرین ارزیابی صورت گرفته نشان داد که استفاده از micro-CT دقت مدل‌سازی جریان آب و تبادل گازها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است (Chen et al., 2024). با این حال، در این مرحله همچنان، هزینه‌های اجرایی زیاد، حساسیت به شرایط رطوبتی و حجم بالای داده‌ها چالش‌های اصلی باقی ماندند.

ورود هوش مصنوعی و چالش بخش‌بندی

گام بعدی، بهره‌گیری از یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای بهبود فرآیند پیکربندی[6] بود. الگوریتم‌هایی مانند CNNs[7] در مطالعات اخیر برای شناسایی مرزهای دقیق بین فاز جامد، آب و هوا در خاک به‌کار رفت (Lavrukhin et al., 2021). این تحول کمک کرد تا مشکل عدم قطعیت در پیکربندی کاهش یابد (Jiang et al., 2025). بعلاوه روش‌های داده‌محور توانستند نسبت به روش‌های آستانه‌گذاری سنتی عملکرد بسیار بهتری ارائه دهند.

فناوری‌های نوین

تحقیقات جدید نشان داده‌اند که استفاده از nano-CT و multi-energy CT imaging ظرفیت بالایی برای بررسی هم‌زمان چند فاز خاک (مانند مواد آلی و معدنی) دارد(Chen et al., 2024). این روش‌ها می‌توانند به‌ویژه در مطالعات کوچک مقیاس مثل بررسی تعامل ریزوسفر-میکروبیوم تحول ایجاد کنند. با این حال، نیاز به توان محاسباتی بالا و نبود پروتکل‌های استاندارد بین‌المللی همچنان مانع کاربرد گسترده آن‌هاست.

چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

اگرچه پیشرفت‌های اخیر درک ما از ساختمان خاک را به سطحی بی‌سابقه ارتقا داده است، سه شکاف مهم همچنان پابرجاست. عدم قطعیت پیکربندی حتی با کمک شبکه‌های عمیق، دقت کامل و صحیح نیست و نتایج وابسته به کیفیت داده‌ی اولیه هستند (Jiang et al., 2025). کمبود داده‌های استاندارد و مرجع برای آموزش و آزمون الگوریتم‌ها مانع پیشرفت سریع‌تر از رویکرد روش شناسی است (Franco et al., 2019). فاصله دانش تخصصی با پیشرفت تکنولوژی سبب شده است که تلفیق قوانین فیزیکی خاک‌شناسی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین هنوز به‌طور کامل محقق نگردد (Abrosimov et al., 2021).

جدول (۲) نشان می‌دهد که مسیر تحول تصویربرداری خاک نه صرفاً یک پیشرفت خطی، بلکه گذار از روش‌های ساده و کیفی به سمت فناوری‌های پیچیده، داده‌محور و چندمقیاسی بوده است. به‌ویژه، چالش‌های امروزی (مانند عدم قطعیت در پیکربندی تصاویر و کمبود داده‌های مرجع) آینده پژوهش را به سمت ترکیب دانش فیزیکی و هوش مصنوعی هدایت می‌کند.

جدول ۲- رویکردهای متنوع در استفاده از روش‌های آنالیز تصویر در مطالعه ساختمان خاک

رویکرد	قابلیت‌ها و دستاوردها	محدودیت‌ها و چالش‌ها	جهت‌گیری آینده	منابع کلیدی
ارزیابی بصری(VSE/VESS)	ارزیابی سریع میدانی، کاربرد گسترده در مدیریت مزرعه	ذهنی بودن، عدم تکرارپذیری، وابستگی به تجربه کاربر	تلفیق با اپلیکیشن‌های موبایلی و تصویربرداری دیجیتال	Emmet-Booth et al. (2016)
ریخت‌شناسی ریاضی (MM)	تحلیل کمی دوبعدی، استخراج شاخص‌های ساختاری	محدود به تصاویر D۲، ناتوان در بازنمایی شبکه منافذ	استفاده ترکیبی با تصاویر D ۳ وML	Horgan (1998)
micro-CT	بازنمایی سه‌بعدی منافذ، شاخص‌های هندسی دقیق	هزینه بالا، حساسیت به شرایط رطوبتی، حجم داده سنگین	توسعه استانداردهای تحلیلی و مقایسه بین‌مقیاسی	Franco et al. (2019); Abrosimov et al. (2021)
nano-CT و multi-energy imaging	تفکیک بسیار بالا، امکان شناسایی چندفاز	نیاز به سخت‌افزار پیشرفته و توان پردازشی بالا	ترکیب با مدل‌سازی فرآیندی وmulti-omics	Chen et al. (2024)

6 - Segmentation
7 - Convolutional Neural Networks

رویکرد	قابلیت‌ها و دستاوردها	محدودیت‌ها و چالش‌ها	جهت‌گیری آینده	منابع کلیدی
یادگیری ماشین و شبکه‌های عمیق(CNN, U-Net)	بخش‌بندی دقیق‌تر، کاهش خطای انسانی، پردازش داده‌های بزرگ	عدم قطعیت بخش‌بندی (SU)، نیاز به داده‌های مرجع	توسعه مدل‌های self-supervisedو XAI برای افزایش تبیین‌پذیری	Lavrukhin et al. (2021); Jiang et al. (2025)

چشم‌انداز آینده مسیری را ترسیم می‌کند که شامل یکپارچه‌سازی تحلیلی و مطالعه چندمقیاسی، توسعه روش‌های خودیادگیر و استفاده از مدل‌های زبانی بزرگ برای تحلیل ویژگی‌های فضای ناهمگن ساختمان خاک و ارتباط آن‌ها با کلان‌داده‌های تصویری است. این روند می‌تواند به سمت هوش ترکیبی حرکت کند که در آن قدرت مدل‌های داده‌محور و تبیین‌پذیری دانش فیزیکی با هم ادغام شوند.

نتیجه‌گیری

تحلیل روندهای تصویربرداری و آنالیز ساختار خاک نشان داد که این حوزه از روش‌های ساده و کیفی مانند ارزیابی بصری به سمت فناوری‌های پیشرفته‌ای چون micro-CT و nano-CT و نهایتاً مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عمیق حرکت کرده است. هر مرحله پیشرفت در روش‌های تجزیه و تحلیل تصویر، اگرچه دقت و توان تبیین الگوهای خاک را افزایش داده، اما با چالش‌های خاص خود همراه بوده است. از دستی و متکی بودن روش‌های سنتی گرفته تا هزینه و حجم داده در روش‌های سه‌بعدی و در نهایت عدم شفافیت در ارزیابی مدل‌های یادگیری عمیق. مرور منابع موجود نشان می‌دهد که آینده این حوزه به‌طور جدی در گرو ترکیب هوش مصنوعی با دانش فیزیکی خاک و همچنین توسعه یادگیری ماشین خودنظارتی (Self-supervised learning) است تا هم تبیین‌پذیری و هم اعتمادپذیری نتایج ارتقا یابد. از سوی دیگر، ادغام داده‌های چندمقیاسی و استفاده از مدل‌های زبانی بزرگ در استخراج دانش متنی می‌تواند گام بعدی در ساخت هوش ترکیبی برای علوم خاک باشد. مسیری که نه تنها فهم ما از دینامیک خاک را عمیق‌تر خواهد کرد، بلکه ابزارهای نوینی برای مدیریت پایدار خاک و آب در اختیار جامعه علمی و تجاری قرار می‌دهد.

فهرست منابع

Abrosimova, K. N., Gerke, K. M., Fomin, D. S., Romanenko, K. A., & Korost, D. V. (2021). Tomography in Soil Science: From the First Experiments to Modern Methods (A Review). *Eurasian Soil Science*, 54(9), 1385–1399.

Ball, B.C., Batey, T., & Munkholm, L.J. (2007). Field assessment of soil structural quality - a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23, 329–337.

Batey, T. (2000). Soil profile description and evaluation. In: Smith, K.A., & Mullins, C.E. (Eds.), Soil and environmental analysis: physical methods. Marcel Dekker, New York, pp. 595–628.

Chen, Y., Geng, H., He, Y., & Liu, Y. (2024). Review of test methods for the micro-pore characteristics of soils. *Environmental Earth Sciences*, 83:661.

Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil and tillage research*, *11*(3-4), 199-238.

Emmet-Booth, J. P., Forristal, P. D., Fenton, O., Ball, B. C., & Holden, N. M. (2016). A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. *Soil Use and Management*, 32, 623–634.

Franco, H. H. S., Guimarães, R. M. L., Tormena, C. A., Cherubini, M. R., & Favilla, H. S. (2019). Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, 190, 61–69.

Gerke, K. M., Korostilev, E. V., Romanenko, K. A., & Karsanina, M. V. (2021). Going submicron in the precise analysis of soil structure: A FIB-SEM imaging study at nanoscale. *Geoderma*, *383*, 114739.

Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., & Tormena, C.A. (2011). Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27, 395–403.

HORGAN. (1998). Mathematical morphology for analysing soil structure from images. *European Journal of Soil Science*, *49*(2), 161-173.

Jastrow, J. D., & Miller, R. M. (2018). Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In *Soil processes and the carbon cycle* (pp. 207-223). CRC press.

Jiang, Y., Chen, D., & Lavrukhin, O. (2025). Deep learning approaches for soil image segmentation: Addressing uncertainty and interpretability. *Geoderma*, *437*, 116422.

Lavrukhin, E. V., Gerke, K. M., Romanenko, K. A., Abrosimov, K. N., & Karsanina, M. V. (2021). Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil XCT images based on pore-scale modelling of saturated flow properties. *Soil Tillage Res.* 209 (15), 104942.

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., & Bullock, P. (1984). The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, *35*(4), 673-684.

Taina, I. A., Heck, R. J., & Elliot, T. R. (2008). Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Canadian Journal of Soil Science*, *88*(1), 1-19.

Vogel, H.-J., Weller, U., & Schlüter, S. (2010). Quantification of soil structure based on Minkowski functions. *Comput. Geosci.* 36, 1236–1245.

Evolution and Future Perspectives of Image Analysis in Soil Micromorphology: From Visual Methods to Artificial Intelligence

Aida Bakhshi[1*], Ahmad Heidari[2]

1 & 2- Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Daneshkadeh Ave., Karaj, Iran

[*]Aida_bakhshi@ut.ac.ir

Abstract (Times New Roman, 10pt, Bold)

Soil structure and pore networks play a fundamental role in the dynamics of water, air, and biological exchange, yet their study and quantification have long been among the most challenging tasks in soil science. Early approaches based on visual observation, such as the Visual Soil Evaluation (VSE) system developed in the 1950s, enabled qualitative description of structural features but lacked accuracy and reproducibility. Since the 1990s, the introduction of Mathematical Morphology opened pathways for quantitative analysis of pore structures, followed by three-dimensional imaging technologies such as micro–computed tomography (micro-CT), which brought a major breakthrough in directly observing connected pore networks. Over the past decade, the advent of machine learning and deep learning algorithms has advanced image segmentation and processing to a new level, enabling automated analysis of large-scale imaging datasets. Nevertheless, challenges such as segmentation uncertainty, the absence of unified standards, and limited transferability across soil types remain unresolved. This review provides an analytical overview of the historical evolution of image analysis in studying soil structure, tracing its development from early visual methods to the current state of the art, and outlines future directions for integrating artificial intelligence, multiscale imaging, and hybrid data-driven and physics-based modeling.

Keywords: Image Analysis, Machine Learning, micro-CT, Soil Pore Network, Soil Structure