Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Investigating the Relationship Between Soil Particle Size Distribution and Pore Thickness Under Different Compaction Levels Using X-ray Computed Tomography

Mojtaba Shirazi[a], Ataallah Khademalrasoul[a*], and Lars Juhl Munkholm[b]

[a] Department of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
[b] Department of Agroecology, Aarhus University, Denmark.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
August 22, 2026
Revised
September 15, 2026
Accepted
September 22, 2026
Published online
November 16, 2026

Keywords
Soil structure
Soil compaction
Particle size analysis
Tomography
Soil pore network

***Corresponding author's email**
a.khademalrasoul@scu.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil compaction caused by machinery traffic is one of the major factors contributing to the degradation of soil physical quality in mechanized agricultural systems, as it can alter particle arrangement and pore-network architecture. This study aimed to evaluate the effects of different levels of machinery-induced compaction on particle-size distribution and three-dimensional soil pore architecture and to investigate the relationships between particle- and pore-domain properties. Integrating laser diffraction particle-size analysis (PSA) and X-ray computed tomography (X-ray CT) may provide a more comprehensive assessment of structural changes in compacted soils.

Materials and Methods: The study was conducted in a sugarcane field located in the Debel Khozaei Agro-Industry Company, Khuzestan Province, Iran. Soil samples were collected from three treatments with three replications: before harvesting (BH), after harvesting with 75% wagon load capacity (AH-75%), and after harvesting with 100% wagon load capacity (AH-100%). Particle-size distribution was determined using laser diffraction analysis, while three-dimensional pore characteristics were quantified from X-ray CT images. Particle-size distribution indices and pore characteristics were obtained from the PSA data and three-dimensional CT images, respectively. Correlation analysis and principal component analysis (PCA) were used to evaluate the relationships between particle-size and pore characteristics.

Results: Soil compaction increased Median particle size (D50), geometric mean diameter (GMD), and mean weight diameter (MWD), while decreasing Span. The D50 increased from approximately 1.07 µm in BH to 7.34 and 5.26 µm in AH-75% and AH-100%, respectively. Compaction also slightly decreased mean pore thickness but markedly increased pore number. Mean pore diameter decreased from approximately 151.0 µm in BH to 140.0 and 142.0 µm in AH-75% and AH-100%, respectively, whereas pore number increased from approximately 146,000 to 462,000 and 413,000, respectively. The most pronounced structural changes were observed in AH-75%, suggesting an important role of soil moisture in determining the susceptibility of soil to machinery-induced compaction. Principal component analysis showed that the first two components explained 86.59% of the total variance. Particle-size and pore characteristics formed two relatively distinct but complementary dimensions of soil structure.

Conclusion: Overall, the results demonstrated that machinery-induced soil compaction affects both the particle and pore domains of soil structure. The combined application of laser diffraction analysis and X-ray computed tomography provides a comprehensive assessment of structural changes and soil physical quality associated with machinery traffic. These complementary techniques can improve the understanding of soil structural responses to compaction.

Cite this article: Shirazi, M., Khademalrasoul, A., Munkholm, L.J., 2026. Investigating the Relationship Between Soil Particle Size Distribution and Pore Thickness Under Different Compaction Levels Using X-ray Computed Tomography. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 323-341.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373992.834
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

بررسی رابطه بین توزیع اندازه‌ی ذرات و معماری منافذ خاک تحت سطوح مختلف تراکم با استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس

مجتبی شیرازی[۱]، عطاله خادم الرسول[۱*] و Lars Juhl Munkholm[۲]

[۱] گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

[۲] گروه اگرواکولوژی، دانشگاه آرهوس، دانمارک.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی

آنالیز اندازه ذرات

تراکم خاک

توموگرافی

ساختمان خاک

شبکه منافذ خاک

***ایمیل نویسنده مسئول**

a.khademalrasoul@scu.ac.ir

چکیده

تراکم خاک ناشی از تردد ماشین‌آلات یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب کیفیت فیزیکی خاک در سامانه‌های کشاورزی مکانیزه است که می‌تواند آرایش ذرات و ساختار شبکه منافذ را تغییر دهد. هدف این پژوهش، بررسی اثر سطوح مختلف تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات بر ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات و معماری سه‌بعدی شبکه منافذ خاک و بررسی روابط میان این دو بخش از ساختمان خاک بود. نمونه‌برداری در سه تیمار شامل قبل از برداشت (BH)، پس از برداشت با ۷۵ درصد ظرفیت سبد حمل نیشکر (AH-75%) و پس از برداشت با ۱۰۰ درصد ظرفیت سبد حمل نیشکر (AH-100%) و در سه تکرار انجام شد. توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش پراش لیزری و ویژگی‌های سه‌بعدی منافذ با استفاده از توموگرافی کامپیوتری پرتو ایکس تعیین شدند. روابط میان شاخص‌های توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های منافذ با استفاده از تحلیل همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی بررسی شد. نتایج نشان داد که تراکم خاک موجب افزایش شاخص‌های D50، میانگین هندسی قطر ذرات (GMD) و میانگین وزنی قطر ذرات (MWD) و کاهش شاخص Span شد. مقدار D50 از حدود ۱/۰۷ میکرومتر در تیمار BH به ۷/۳۴ و ۵/۲۶ میکرومتر به‌ترتیب در تیمارهای AH-75% و AH-100% افزایش یافت. همچنین، تراکم موجب کاهش جزئی ضخامت متوسط منافذ و افزایش چشمگیر تعداد منافذ شد؛ به‌طوری‌که ضخامت متوسط منافذ از ۰/۰۱۵۱ سانتی‌متر در تیمار BH به‌ترتیب به ۰/۰۱۴۰ و ۰/۰۱۴۲ سانتی‌متر و میانگین تعداد منافذ از حدود ۱۴۶۰۰۰ به ۴۶۲۰۰۰ و ۴۱۳۰۰۰ رسید. بیشترین تغییرات ساختاری در تیمار AH-75% مشاهده شد که می‌تواند بیانگر نقش مهم رطوبت خاک در میزان حساسیت آن به تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات باشد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفه اول ۸۶/۵۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند و شاخص‌های حاصل از اندازه‌گیری اندازه ذرات و ویژگی‌های منافذ، دو بُعد متمایز اما مکمل از ساختمان خاک را نشان دادند. در مجموع، نتایج نشان داد که ترکیب روش پراش لیزری و توموگرافی کامپیوتری پرتو ایکس می‌تواند ارزیابی جامع‌تری از تغییرات ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک در اثر تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات فراهم کند.

استناد: شیرازی، م.، خادم‌الرسول، ع.، Munkholm, L.J.، ۱۴۰۵. بررسی رابطه بین توزیع اندازه‌ی ذرات و معماری منافذ خاک تحت سطوح مختلف تراکم با استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه‌ی ایکس. مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۳۲۳- ۳۴۱.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373992.834

CC BY NC

مقدمه

ساختمان خاک بیانگر نحوه سازمان‌یافتگی ذرات جامد و فضاهای منفذی بوده و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک محسوب می‌شود. بسیاری از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به ویژگی‌های هندسی و توپولوژیکی شبکه منافذ وابسته‌اند. منافذ خاک علاوه بر انتقال آب و هوا، در رشد ریشه، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، جابه‌جایی عناصر غذایی و تبادلات گازی نقش اساسی دارند (Wang And Zhang, 2024). ازاین‌رو، تغییر در اندازه، شکل و پیوستگی منافذ می‌تواند عملکرد هیدرولیکی و زیستی خاک را تحت تأثیر قرار دهد و مطالعه ساختار منفذی خاک را به یکی از موضوعات مهم پژوهش‌های فیزیک خاک تبدیل کرده است (Ghosh et al., 2023). تراکم خاک با بازآرایی ذرات و تغییر معماری منافذ، به‌ویژه کاهش منافذ درشت و اختلال در پیوستگی شبکه منفذی، موجب افت نفوذپذیری و محدودیت رشد ریشه می‌شود (Thotakuri et al., 2024).

در کنار ساختمان خاک، توزیع اندازه ذرات یکی از بنیادی‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک به شمار می‌رود که علاوه بر تعیین کلاس بافتی، در شکل‌گیری و پایداری ساختمان خاک نیز نقش مهمی دارد و بر فرآیندهایی نظیر نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی، مقاومت مکانیکی و توسعه شبکه منافذ اثر می‌گذارد (Gorączko And Topoliński, 2020). توسعه روش‌های مبتنی بر پراش لیزری امکان اندازه‌گیری سریع و دقیق توزیع اندازه ذرات را فراهم کرده و شاخص‌هایی نظیر D10، D50 و D90، که به‌ترتیب قطر متناظر با ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد توزیع تجمعی ذرات را نشان می‌دهند، و همچنین شاخص‌های GMD و MWD به‌ترتیب به‌عنوان میانگین هندسی و میانگین وزنی قطر ذرات، برای توصیف ویژگی‌های ابعادی ذرات به‌کار گرفته می شوند. Span نیز شاخصی از گستردگی نسبی توزیع اندازه ذرات است (Messing et al., 2023؛ Gresina et al., 2025). در میان این شاخص‌ها، Span به دلیل توصیف گستردگی و ناهمگنی توزیع اندازه ذرات اهمیت ویژه‌ای دارد. مقادیر بالاتر Span نشان‌دهنده دامنه وسیع‌تر اندازه ذرات و ناهمگنی بیشتر فاز جامد خاک است، در حالی که مقادیر کمتر بیانگر توزیع یکنواخت‌تر ذرات است. از آنجا که نحوه بسته‌بندی و آرایش ذرات بر توسعه فضای منفذی تأثیر می‌گذارد، انتظار می‌رود Span نیز به‌طور غیرمستقیم با ویژگی‌های ساختاری خاک و شبکه منافذ مرتبط باشد (Svensson et al., 2022؛ Gresina et al., 2025).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که توزیع اندازه ذرات نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار منفذی و رفتار فیزیکی خاک دارد (Gorączko And Topoliński, 2020). همچنین در شرایطی که فرآیند دیسپرس‌سازی ذرات به‌طور کامل انجام نشود، شاخص‌های حاصل از پراش لیزری علاوه بر اندازه ذرات اولیه، تا حدودی وضعیت سازمان‌یافتگی فاز جامد و تجمعات پایدار خاک را نیز منعکس می‌کنند. با این حال، توزیع اندازه ذرات به‌تنهایی قادر به توصیف کامل ساختمان خاک نیست، زیرا خاک‌هایی با PSD مشابه ممکن است به دلیل تفاوت در آرایش ذرات و معماری شبکه منافذ، رفتار فیزیکی متفاوتی داشته باشند. ازاین‌رو، استفاده از روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی برای مطالعه مستقیم ساختار داخلی خاک در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. تصویربرداری کامپیوتری اشعه‌ی ایکس[1] یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های غیر مخرب برای مطالعه ساختار داخلی مواد متخلخل محسوب می‌شود. این فناوری امکان بازسازی سه‌بعدی ساختار خاک را بدون تخریب نمونه فراهم کرده و اطلاعات دقیقی از هندسه، اندازه، توزیع و پیوستگی منافذ ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های سنتی که اغلب به اندازه‌گیری شاخص‌های میانگین محدود می‌شوند، توموگرافی پرتو ایکس قادر است ویژگی‌های سه‌بعدی شبکه منافذ را با دقت بالا کمی‌سازی کند (Ghosh et al., 2023). پژوهش‌های متعددی از توموگرافی پرتو ایکس برای مطالعه ساختار منفذی خاک استفاده کرده‌اند. Zhao و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی ساختار داخلی خاکدانه‌ها نشان دادند که تغییرات ریزساختاری خاک به‌خوبی توسط تصاویر سه‌بعدی X-Ray CT قابل آشکارسازی است. همچنین Singh و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که شاخص‌های حاصل از X-Ray CT، به‌ویژه ویژگی‌های هندسی منافذ، نسبت به بسیاری از شاخص‌های کلاسیک فیزیک خاک حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات مدیریتی دارند. در یک مطالعه مروری جامع نیز Ghosh و همکاران (۲۰۲۳) توموگرافی پرتو ایکس را یکی از مؤثرترین ابزارهای مطالعه ساختار سه‌بعدی خاک معرفی کردند و بر قابلیت این روش در ارزیابی شبکه منافذ و فرآیندهای انتقالی تأکید نمودند.

Shirazi و همکاران (۲۰۲۶) نشان دادند که استفاده از تصاویر CT و نرم‌افزار ImageJ/Fiji امکان ارزیابی دقیق تغییرات ساختمان خاک و کمی‌سازی ویژگی‌های منفذی را فراهم می سازد. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که شاخص‌های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر X-Ray CT قادرند تغییرات ناشی از تراکم خاک را با دقت بالایی آشکار کنند. همچنین Bimantara و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از Micro-CT و اندازه‌گیری‌های میدانی انتشار N_2O نشان دادند که تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات موجب افزایش معنی‌دار چگالی ظاهری، کاهش نفوذپذیری گازی و تضعیف پیوستگی شبکه منافذ می‌شود. نتایج

[1] X-ray CT: X-ray Computed Tomography

این پژوهش بیانگر آن بود که تغییرات ایجادشده در معماری منافذ می‌تواند پیامدهای مهمی بر فرآیندهای انتقال گاز و عملکرد زیست‌محیطی خاک داشته باشد. این یافته‌ها اهمیت ارزیابی کمی ساختار منفذی و شاخص‌های هندسی منافذ را در مطالعات کیفیت فیزیکی خاک بیش از پیش آشکار می‌سازد. یکی از شاخص‌های مهم استخراج‌شده از تصاویر X-Ray CT ، ضخامت منافذ[۱] است که بیانگر ابعاد مشخصه فضای منفذی در ساختار خاک بوده و می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره میزان بازشدگی یا فشردگی شبکه منافذ ارائه دهد. این شاخص در مقایسه با پارامترهای کلاسیکی نظیر تخلخل کل، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات ریزساختاری نشان داده و امکان ارزیابی دقیق‌تر اثر فرآیندهای مدیریتی و مکانیکی بر ساختمان خاک را فراهم می‌کند (Wang And Zhang, 2024).

از آنجا که ضخامت منافذ نمایانگر یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی فاز منفذی خاک[۲] است، بررسی ارتباط آن با شاخص‌های توصیف‌کننده فاز جامد خاک[۳] می‌تواند درک عمیق‌تری از سازوکار شکل‌گیری ساختمان خاک فراهم سازد. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در دو حوزه تحلیل اندازه ذرات و تصویربرداری سه‌بعدی خاک، اغلب مطالعات این دو دسته اطلاعات را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. در بسیاری از پژوهش‌ها، توزیع اندازه ذرات صرفاً به‌عنوان شاخصی برای تعیین بافت خاک مورد استفاده قرار گرفته و در مقابل، مطالعات مبتنی بر توموگرافی پرتو ایکس عمدتاً بر توصیف شبکه منافذ و ویژگی های هندسی آن متمرکز بوده‌اند. در نتیجه، اطلاعات محدودی در خصوص ارتباط میان ناهمگنی فاز جامد خاک و ویژگی‌های سه‌بعدی شبکه منافذ، به‌ویژه ضخامت منافذ، در دسترس است. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که آنالیز اندازه ذرات[۴] با حداقل جداسازی[۵] انجام شده و بخشی از تجمعات طبیعی خاک حفظ می شوند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا در چنین حالتی شاخص‌هایی نظیر Span می‌توانند علاوه بر ویژگی‌های ذره‌ای، جنبه‌هایی از سازمان‌یافتگی ساختاری فاز جامد را نیز منعکس نمایند.

بر این اساس، وجه تمایز پژوهش حاضر در بررسی همزمان فاز جامد و فاز منفذی خاک برای ارزیابی پاسخ ساختاری خاک به تراکم است. در این مطالعه، شاخص‌های حاصل از آنالیز توزیع اندازه ذرات (PSA)، شامل شاخص‌های اندازه مرکزی و گستردگی توزیع، در کنار ویژگی‌های هندسی سه‌بعدی منافذ استخراج‌شده از تصاویر X-Ray CT مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، ارتباط بین این دو گروه از شاخص‌ها با استفاده از تحلیل همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارزیابی شد تا میزان همراهی و تفاوت رفتار فاز جامد و فاز منفذی در شرایط مختلف تراکم مشخص شود. این رویکرد امکان بررسی همزمان تغییرات سازمان یافتگی ذرات و معماری سه‌بعدی فضای منفذی و در نتیجه، ارائه دیدگاه جامع‌تری نسبت به پاسخ ساختمان خاک به تراکم را فراهم می‌کند.

پژوهش حاضر با هدف بررسی ارتباط بین شاخص‌های توزیع اندازه ذرات و ضخامت منافذ سه‌بعدی استخراج‌شده از تصاویر X-Ray CT در سطوح مختلف تراکم انجام شد. اهداف اختصاصی این تحقیق شامل: (۱) ارزیابی اثر سطوح مختلف تراکم بر شاخص‌های توزیع اندازه ذرات، (۲) بررسی تغییرات ویژگی‌های هندسی منافذ سه‌بعدی خاک، شامل ضخامت، حداکثر ضخامت و تعداد منافذ، در سطوح مختلف تراکم و (۳) تعیین ارتباط بین شاخص‌های حاصل از آنالیز اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار منافذ سه‌بعدی خاک.

مواد و روش

موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی

این مطالعه در سال ۱۴۰۴ در اراضی کشاورزی شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی (31°04'38.1"N 48°30'27.3"E) واقع در استان خوزستان انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک، رژیم رطوبتی اریدیک[۶] و رژیم حرارتی هایپرترمیک[۷] بوده و خاک‌های غالب آن از رده‌های آریدی سول[۸] و اینسپتی‌سول‌ها[۹] هستند (Abdoli and Jafari, 2018). بر اساس داده‌های اقلیمی ده سال گذشته، حداقل و حداکثر دمای روزانه منطقه در فصل زمستان و تابستان به‌ترتیب ۱/۲− و ۵۲ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. همچنین حداقل و حداکثر رطوبت نسبی روزانه به‌ترتیب ۲ و ۱۰۰ درصد بوده است. بیشینه تبخیر روزانه ثبت‌شده در این دوره ۳۲ میلی‌متر، میانگین تبخیر ماهانه ۱۸۶ میلی‌متر و مجموع تبخیر سالانه ۱۸۷۳ میلی‌متر گزارش شده است. این شرایط اقلیمی نشان‌دهنده حاکمیت تنش‌های حرارتی و کمبود رطوبت در منطقه بوده و اهمیت مدیریت صحیح خاک و آب را در سامانه‌های تولید نیشکر دوچندان می‌سازد (شکل ۱).

---

[۱] Pore diameter
[۲] Soil Pores Phase
[۳] Soil particles phase
[۴] Particle size Analyse
[۵] Dispersion
[۶] Aridic
[۷] Hyperthermic
[۸] Aridisols
[۹] Inceptisols



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی.

Figure 1. Location of the Study Area.

نمونه‌برداری خاک

نیشکر گیاهی چندساله است که تنها یک‌بار در آغاز چرخه تولید کشت می‌شود و در سال‌های بعد بدون کشت مجدد، از طریق رویش مجدد ساقه‌ها مدیریت و برداشت می‌گردد. در سیستم تولید نیشکر، سال اول پس از کشت با عنوان Plant Cane (PC) شناخته می‌شود و پس از نخستین برداشت، مراحل بعدی به عنوان بازرویی[۱] شامل R1، R2، R3 و ... نام‌گذاری می شوند و در فاصله بین این مراحل (پس از PC)، تنها عملیات داشت و برداشت انجام می‌شود. به‌منظور بررسی اثر تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات برداشت بر ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در دو وضعیت شامل قبل از تردد ماشین‌آلات برداشت و بدون تراکم (BH) و پس از تردد ماشین‌آلات برداشت و ایجاد تراکم میدانی (AH) انجام شد. نمونه‌های خاک با استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلن با قطر ۸ سانتی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر برداشت شدند. ماشین‌آلات مورد استفاده در عملیات برداشت شامل هاروستر نیشکر مدل ۷۰۰۰ و تراکتور به همراه سبد حمل ساقه‌های خردشده نیشکر بودند. به‌منظور بررسی اثر شدت بارگذاری ماشین‌آلات بر تراکم خاک، نمونه‌برداری پس از تردد ماشین‌آلات در دو سطح ظرفیت سبد حمل شامل ۱۰۰ درصد ظرفیت (AH-100%) و ۷۵ درصد ظرفیت (AH-75%) انجام شد. بنابراین، سطوح تراکم در این پژوهش بر اساس شرایط واقعی عملیات برداشت و میزان بار حمل‌شده توسط ماشین‌آلات تعریف شدند و تراکم آزمایشگاهی بر اساس درصدی از چگالی خشک بیشینه اعمال نشد. شایان ذکر است که فاصله زمانی بین نمونه‌برداری BH و AH تنها چند ساعت بود تا اثر عملیات برداشت و تردد ماشین‌آلات بر وضعیت خاک، بدون دخالت قابل‌توجه تغییرات زمانی، مورد ارزیابی قرار گیرد. نمونه‌برداری برای تعیین رطوبت خاک بلافاصله پس از تردد ماشین‌آلات برداشت و اعمال تراکم میدانی انجام شد؛ بنابراین، مقادیر رطوبت گزارش‌شده برای تیمارهای AH بیانگر وضعیت رطوبتی خاک پس از اعمال تراکم هستند.

تصویربرداری کامپیوتری اشعه‌ی ایکس (X-Ray CT) و تحلیل تصاویر

به‌منظور ارزیابی ساختار منفذی خاک، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه توموگرافی کامپیوتری پرتو ایکس (TESCAN CoreTOM) در دانشگاه آرهوس دانمارک اسکن شدند. تصویربرداری با ولتاژ ۱۸۰ کیلوولت، توان ۶۰ وات و اندازه پیکسل

[۱] Ratoon

۶۰ میکرومتر انجام شد. با توجه به اینکه یکی از اهداف این پژوهش بررسی اثر تراکم بر لایه‌ی سطحی خاک است به همین منظور تصویربرداری از نمونه‌ها از لایه سطحی انجام شد و از هر نمونه ۱۰۰۰ برش متوالی معادل با ۶ سانتی‌متر تهیه گردید و یک ناحیه مورد مطالعه[۱] به ابعاد ۶۵ × ۶۵ میلی‌متر از بخش مرکزی نمونه جهت کاهش اثر لرزش در کناره‌های لوله‌ی پلی اتیلن، استخراج شد. پردازش تصاویر شامل بازسازی سه‌بعدی، حذف نویز، آستانه‌گذاری، بخش‌بندی، مدل‌سازی سه‌بعدی و کمی‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ImageJ/Fiji (نسخه ۱/۵۴p) انجام گرفت. برای تفکیک فضای منفذی از فاز جامد، از ابزار Auto Local Threshold با الگوریتم Phansalkar استفاده شد. در این روش، Radius برابر ۳ و پارامترهای ۱ و ۲ برابر صفر تنظیم شدند و آستانه‌گذاری به‌صورت محلی بر روی مجموعه تصاویر اعمال شد. در نهایت شاخص‌های هندسی شبکه منافذ شامل ضخامت منافذ[۲]، حداکثر ضخامت منافذ[۳] و تعداد منافذ[۴] از تصاویر سه‌بعدی شدند، همچنین، به‌منظور بررسی ویژگی‌های فاز جامد خاک، آنالیز اندازه ذرات به روش پراش لیزری (PSA: Particle Size Analysis) انجام شد. در آماده‌سازی نمونه‌ها تنها از آب مقطر به‌عنوان محیط پراکنش استفاده شد و از مواد پراکنده‌کننده شیمیایی استفاده نگردید. شاخص‌های D10، D30، D50، D60، D90، میانگین هندسی قطر ذرات (GMD[۵])، میانگین وزنی قطر ذرات (MWD[۶])، ضریب یکنواختی (Cu[۷])، ضریب انحنا (Cc[۸]) و Span از داده‌های حاصل محاسبه شدند.

محاسبه شاخص‌های توزیع اندازه ذرات

از توزیع تجمعی اندازه ذرات حاصل از آنالیز اندازه ذرات به روش پراش لیزری (PSA)، قطرهای متناظر با صدک‌های مختلف توزیع شامل D10، D30، D50، D60 و D90 استخراج شدند. در این شاخص‌ها، حرف D بیانگر قطر ذره و عدد زیرنویس بیانگر درصد تجمعی ذرات کوچک‌تر یا مساوی آن قطر است، به‌عنوان مثال D50 قطری است که ۵۰ درصد از توزیع تجمعی اندازه ذرات در ابعادی کوچک‌تر یا مساوی آن قرار دارد و به‌عنوان میانه توزیع اندازه ذرات شناخته می‌شود. میانگین هندسی قطر ذرات (GMD: Geometric Mean Diameter) و میانگین وزنی قطر ذرات (MWD: Mean Weight Diameter) نیز بر اساس قطر نماینده و درصد وزنی هر کلاس اندازه ذرات محاسبه شدند. در این روابط d_i قطر نماینده کلاس اندازه ذرات و W_i درصد وزنی ذرات در هر کلاس است. ضریب یکنواختی (Cu: Coefficient of Uniformity) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

ضریب انحنا (Cc: Coefficient of Curvature) نیز از رابطه زیر به‌دست آمد:

رابطه (۲)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

همچنین، شاخص Span به‌عنوان معیاری از گستردگی نسبی توزیع اندازه ذرات، از رابطه زیر محاسبه شد:

رابطه (۳)

$$Span = \frac{D_{90} \times D_{10}}{D_{50}}$$

مقادیر بالاتر Span نشان‌دهنده گستردگی بیشتر و ناهمگن‌تر بودن توزیع اندازه ذرات است. روابط مورد استفاده برای محاسبه میانگین هندسی قطر ذرات (GMD) و میانگین وزنی قطر ذرات (MWD) نیز به‌ترتیب به صورت زیر بودند:

رابطه (۴)

$$GMD = exp\left(\frac{\sum W_i ln(d_i)}{\sum W_i}\right)$$

رابطه (۵)

$$MWD = \frac{\sum W_i d_i}{\sum W_i}$$

در روابط ۴ و ۵، d_i قطر نماینده‌ی کلاس اندازه‌ی ذرات و W_i درصد وزنی ذرات در هر کلاس است.

آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R (نسخه x.۴) در محیط RStudio 2025.09.0 انجام شد. مورد بررسی شامل شاخص‌های توزیع اندازه ذرات حاصل از آنالیز پراش لیزری (D10، D50، D90، Span، GMD و MWD) و ویژگی های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر توموگرافی کامپیوتری پرتو ایکس (ضخامت، بیشینه‌ی ضخامت و تعداد منافذ) بودند. برای ارزیابی اثر تیمارهای مختلف بر متغیرهای مورد مطالعه، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) استفاده شد. در مواردی که اثر تیمار معنی‌دار بود، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی (Tukey HSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. به‌منظور بررسی روابط بین شاخص‌های حاصل از آنالیز پراش لیزری و ویژگی‌های منفذی خاک، ضرایب همبستگی

[۱] ROI: Region of Interest
[۲] Diameter
[۳] Max Diameter
[۴] Number of Pores
[۵] Geometric Mean Diameter
[۶] Mean Weight Diameter
[۷] Uniformity Coefficient
[۸] Coefficient of Curvature

پیرسون محاسبه و به‌صورت ماتریس همبستگی نمایش داده شد. همچنین برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای حاکم بر تغییرات ساختاری خاک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA: Principal Component Analysis) بر اساس ماتریس همبستگی متغیرها انجام شد. مقادیر ویژه (Eigenvalues)، درصد واریانس تبیین‌شده و بارهای عاملی متغیرها برای تفسیر مؤلفه‌های اصلی استخراج گردید. کلیه آزمون‌های آماری در سطح معنی‌داری ۵ درصد ارزیابی شدند و نمودارهای آماری با استفاده از بسته‌های تخصصی موجود در محیط R ترسیم گردیدند.

نتایج

تأثیر تراکم بر شاخص‌های توزیع اندازه ذرات

میانگین شاخص‌های توزیع اندازه ذرات حاصل از آنالیز پراش لیزری برای تیمارهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اعمال تراکم موجب تغییرات محسوسی در ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات خاک شد. به‌طور کلی، تیمارهای متراکم (AH-75% و AH-100%) در مقایسه با تیمار شاهد (BH) مقادیر بالاتری از اغلب شاخص‌های اندازه ذرات را نشان دادند. میانگین قطر مؤثر ذرات در تمامی صدک‌های اندازه‌گیری شده با افزایش شدت تراکم روند افزایشی نشان داد. به‌طوری‌که مقدار D10 از ۰/۲۵۴ میکرومتر در تیمار BH به ۱/۱۳۳ و ۰/۶۴۳ میکرومتر به‌ترتیب در تیمارهای AH-75% و AH-100% افزایش یافت. همچنین میانگین D50 از ۱/۰۶۶ میکرومتر در تیمار شاهد به ۷/۳۴۳ و ۵/۲۵۷ میکرومتر در تیمارهای AH-75% و AH-100% رسید. روند مشابهی برای D90 مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱۷/۱۰۰ میکرومتر در BH به ۵۰/۹۳۳ و ۴۱/۵۹۷ میکرومتر در تیمارهای متراکم افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که اعمال تراکم با افزایش اندازه مؤثر واحدهای اندازه‌گیری‌شده همراه بوده است.

بررسی تغییرپذیری بین تکرارها نشان داد که دامنه تغییرات شاخص‌های اندازه ذرات بسته به تیمار و شاخص مورد بررسی متفاوت بود. برای نمونه، D50 در تیمارهای BH، AH-75% و AH-100% به‌ترتیب در دامنه ۱/۹۴۸–۰/۳۸۰، ۷/۷۶۰–۷/۰۶۰ و ۸/۲۹۰–۱/۱۲۰ میکرومتر قرار داشت. دامنه تغییرات D90 نیز به‌ترتیب ۳۰/۷۶۰–۱/۴۰۰، ۵۶/۱۶۰–۴۴/۰۵۰ و ۵۸/۱۳۰–۲۵/۲۷۰ میکرومتر بود. همچنین، MWD در تیمارهای BH، AH-75% و AH-100% به‌ترتیب دامنه‌های ۹/۶۶۷–۰/۶۳۲، ۲۰/۳۳۰–۱۷/۱۵۰ و ۲۱/۰۴۰–۸/۵۹۰ میکرومتر را نشان داد. این اختلاف در دامنه تغییرات با مقادیر انحراف معیار گزارش‌شده در (جدول ۱) نیز مطابقت داشت و نشان‌دهنده تفاوت میزان پراکندگی بین تکرارها در شاخص‌های مختلف بود.

شاخص‌های میانگین هندسی قطر ذرات (GMD) و میانگین وزنی قطر ذرات (MWD) نیز الگوی مشابهی را نشان دادند. میانگین GMD از ۱/۶۰۴ میکرومتر در تیمار BH به ۷/۲۲۳ میکرومتر در AH-75% و ۵/۴۰۳ میکرومتر در AH-100% افزایش یافت. دامنه تغییرات GMD در این تیمارها به‌ترتیب ۲/۶۳۵–۰/۴۲۸، ۷/۶۴۰–۶/۹۲۰ و ۸/۲۱۰–۲/۰۵۰ میکرومتر بود. بیشترین میانگین مقادیر GMD و MWD در تیمار AH-75% مشاهده شد که بیانگر تغییر بیشتر در سازمان‌یافتگی ذرات و ریزخاکدانه‌ها در این تیمار است.

شاخص Span که بیانگر گستردگی توزیع اندازه ذرات است، روندی متفاوت از سایر شاخص‌ها نشان داد. میانگین این شاخص در تیمارهای BH، AH-75% و AH-100% به‌ترتیب ۱۳/۵۱۷، ۶/۸۰۳ و ۱۱/۹۰۳ بود و دامنه تغییرات آن‌ها به‌ترتیب ۲۱/۶۲۰–۳/۲۹۰، ۷/۸۴۰–۵/۹۲۰ و ۲۲/۴۱۰–۶/۴۴۰ قرار داشت. کاهش مقدار Span در تیمارهای متراکم، به‌ویژه در AH-75%، بیانگر کاهش پراکندگی اندازه ذرات و تمرکز بیشتر توزیع حول مقادیر میانی است. میانگین شاخص یکنواختی (Cu) نیز از ۱۵/۹۷۷ در تیمار BH به ۹/۱۵۰ در AH-75% کاهش یافت، در حالی که مقدار آن در AH-100% برابر با ۱۳/۴۴۰ بود. دامنه تغییرات Cu در این سه تیمار به‌ترتیب ۴۰/۴۲۰–۳/۲۵۰، ۱۱/۷۴۰–۷/۰۴۰ و ۱۹/۸۷۰–۹/۱۲۰ بود. در مقابل، میانگین شاخص انحنای توزیع (Cc) در تیمارهای متراکم مقادیر بالاتری نسبت به تیمار شاهد نشان داد و از ۰/۴۲۷ در BH به ۱/۴۲۳ و ۱/۴۸۰ به‌ترتیب در AH-75% و AH-100% افزایش یافت. دامنه تغییرات Cc نیز به‌ترتیب ۰/۹۰۰–۰/۰۴۲، ۱/۸۰۰–۱/۱۸۰ و ۲/۸۲۰–۰/۴۲۰ بود. این تغییرات نشان‌دهنده تفاوت در شکل توزیع اندازه ذرات و نحوه سازمان‌یافتگی فاز جامد خاک در اثر اعمال تراکم است.

جدول ۱- شاخص‌های توزیع اندازه ذرات خاک در تیمارهای مختلف بر اساس آنالیز PSA

Table 1. Particle size distribution indices of soil under different treatments determined by particle size analysis (PSA)

شاخص Index										تکرار Repetition	تیمار Treatment
MWD (µm)	GMD (µm)	Cc	Cu	Span	D90 (µm)	D60 (µm)	D50 (µm)	D30 (µm)	D10 (µm)		
9.667	2.635	0.042	40.420	15.640	30.760	12.210	1.948	0.392	0.302	**1**	
0.632	0.428	0.900	3.250	3.290	1.400	0.480	0.380	0.250	0.150	**2**	
7.250	1.750	0.340	4.260	21.620	19.140	1.330	0.870	0.380	0.310	**3**	**BH**
5.850	1.604	0.427	15.977	13.517	17.100	4.673	1.066	0.341	0.254	**Mean**	
4.677	1.111	0.436	21.175	9.348	14.786	6.541	0.802	0.079	0.090	**SD**	
20.330	7.640	1.290	8.670	6.650	52.770	10.590	7.760	4.090	1.220	**1**	
17.150	7.110	1.180	7.040	5.920	44.050	9.620	7.210	3.940	1.370	**2**	
19.120	6.920	1.800	11.740	7.840	56.160	9.520	7.060	3.730	0.810	**3**	**AH-75%**
18.867	7.223	1.423	9.150	6.803	50.993	9.910	7.343	3.920	1.133	**Mean**	
1.605	0.373	0.331	2.386	0.969	6.247	0.591	0.369	0.181	0.290	**SD**	
8.590	2.050	0.420	11.330	22.410	25.270	2.430	1.120	0.470	0.210	**1**	
17.090	5.950	2.820	19.870	6.440	41.390	8.720	6.360	3.290	0.440	**2**	
21.040	8.210	1.200	9.120	6.860	58.130	11.670	8.290	4.230	1.280	**3**	**AH-100%**
15.573	5.403	1.480	13.440	11.903	41.597	7.607	5.257	2.663	0.643	**Mean**	
6.362	3.116	1.224	5.677	9.101	16.431	4.720	3.710	1.957	0.563	**SD**	

نکته۱ : واحد تمامی شاخص‌ها میکرومتر می‌باشند، بغیر از شاخص‌های Span، Cc و Cu که بدون واحد هستند.

Note 1: The unit for all indices is micrometers (µm), except for Span, Cc, and Cu, which are dimensionless.

تأثیر تراکم بر ویژگی‌های هندسی منافذ

میانگین ویژگی‌های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر X-Ray CT در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اعمال تراکم با تغییراتی در برخی ویژگی‌های ساختار منافذ خاک همراه بود، هرچند شدت و جهت این تغییرات در تمامی شاخص‌ها یکسان نبود. میانگین ضخامت منافذ در تیمارهای مورد مطالعه در محدوده ۱۳۹/۷ تا ۱۵۱/۳ میکرومتر قرار داشت. بیشترین مقدار این شاخص در تیمار شاهد (BH) با میانگین ۱۵۱/۳ میکرومتر مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار AH-75% با میانگین ۱۳۹/۷ میکرومتر بود. تیمار AH-100% نیز با میانگین ۱۴۱/۷ میکرومتر در موقعیتی بین دو تیمار دیگر قرار گرفت.

روند مشابهی برای شاخص حداکثر ضخامت منافذ مشاهده شد. میانگین این شاخص در تیمار BH برابر با ۱۵۹/۰ میکرومتر بود، در حالی که مقادیر متناظر برای تیمارهای AH-75% و AH-100% به‌ترتیب ۱۴۴/۷ و ۱۴۶/۷ میکرومتر محاسبه شد. اگرچه تیمار شاهد به‌طور کلی مقادیر بیشتری از Diameter و Max diameter را نشان داد، دامنه تغییرات این دو شاخص بین تیمارها نسبتاً محدود بود. نتایج تحلیل واریانس نیز نشان داد که اختلاف مشاهده‌شده در ضخامت منافذ بین تیمارها از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P = 0.371$). بنابراین، با وجود اینکه میانگین ضخامت منافذ در تیمارهای متراکم‌شده نسبت به شاهد کمتر بود، این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود و نمی‌توان کاهش ضخامت منافذ را به‌عنوان یک اثر قطعی تراکم در نظر گرفت.

در مقابل، تعداد منافذ واکنش متفاوتی نسبت به تراکم نشان داد. میانگین تعداد منافذ از ۱۴۵۹۹۶ در تیمار BH به ۴۶۲۰۵۲ در تیمار AH-75% و ۴۱۲۵۷۸ در تیمار AH-100% افزایش یافت. بیشترین تعداد منافذ در تیمار AH-75% مشاهده شد که حدود ۳/۲ برابر مقدار مشاهده‌شده در تیمار شاهد بود. همچنین، تیمار AH-100% نیز نسبت به BH افزایش قابل توجهی در تعداد منافذ نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که تراکم، در شرایط مطالعه حاضر، بیشتر با تغییر در تعداد و سازمان فضایی واحدهای منفذی همراه بود تا تغییر معنی‌دار در ضخامت متوسط منافذ.

بررسی داده‌های خام نیز نشان داد که ضخامت منافذ در تیمار BH در دامنه ۱۴۳ تا ۱۶۲ میکرومتر تغییر می‌کرد، در حالی که این دامنه در تیمارهای AH-75% و AH-100% به‌ترتیب ۱۳۳ تا ۱۵۰ و ۱۳۱ تا ۱۵۳ میکرومتر بود. همچنین، بیشترین مقدار شاخص Max diameter در کل داده‌ها مربوط به تیمار BH و برابر با ۱۷۱ میکرومتر بود، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار AH-100% و برابر با ۱۳۴ میکرومتر مشاهده شد.

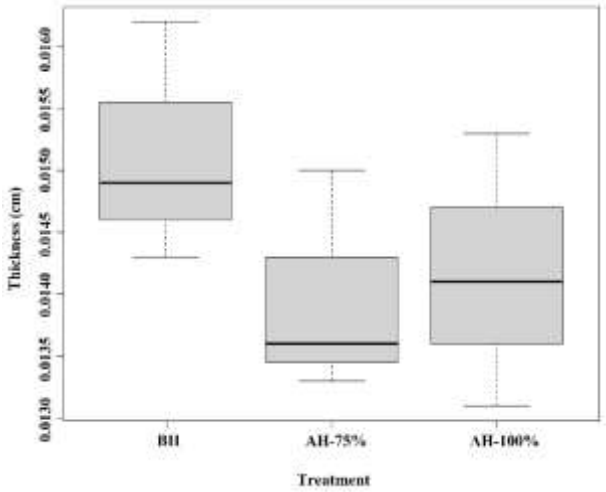
توزیع داده‌های شاخص ضخامت در تیمارهای مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. همپوشانی قابل توجه جعبه‌ها و دامنه بین چارکی داده‌ها بین تیمارها با نتایج تحلیل واریانس مطابقت داشت و عدم معنی‌داری آماری اختلاف ضخامت منافذ را تأیید کرد. با این حال، تیمار BH به‌طور کلی مقادیر بالاتری از ضخامت منافذ را نشان داد و پراکندگی بیشتر داده‌ها در این تیمار می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت بیشتر بین نمونه‌ها از نظر ویژگی‌های منفذی باشد، هرچند برای نتیجه‌گیری قطعی درباره ناهمگنی مکانی

شبکه منفذی به تعداد بیشتری نمونه نیاز است. در مقابل، تیمارهای AH-75% و AH-100% الگوی نسبتاً فشرده‌تری از توزیع ضخامت منافذ را نشان دادند که می‌تواند بیانگر بازآرایی ساختار منفذی در اثر اعمال تراکم باشد.

جدول ۲- ویژگی‌های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس (CT) در تیمارهای مختلف

Table 2. Pore geometric properties extracted from X-ray computed tomography (CT) images under different treatments

ویژگی‌های هندسی منافذ Pore Geometric Properties			تکرار Repetition	تیمار Treatment
تعداد منافذ Number of Pores	حداکثر ضخامت (سانتی‌متر) Max Diameter (µm)	ضخامت (سانتی‌متر) Diameter (µm)		
107377	157.0	149.0	**1**	
171914	149.0	143.0	**2**	
158698	171.0	162.0	**3**	**BH**
145996	159.0	151.3	**Mean**	
33375	11.1	9.7	**SD**	
716912	137.0	133.0	**1**	
202795	157.0	150.0	**2**	
466450	140.0	136.0	**3**	**AH-75%**
462052	144.7	139.7	**Mean**	
257119	10.4	9.2	**SD**	
582444	134.0	131.0	**1**	
260803	160.0	153.0	**2**	
394486	146.0	141.0	**3**	**AH-100%**
412578	146.7	141.7	**Mean**	
161081	13.0	11.0	**SD**	



شکل ۲- توزیع ضخامت منافذ (Diameter) در تیمارهای مختلف تراکم خاک بر اساس نمودار جعبه‌ای

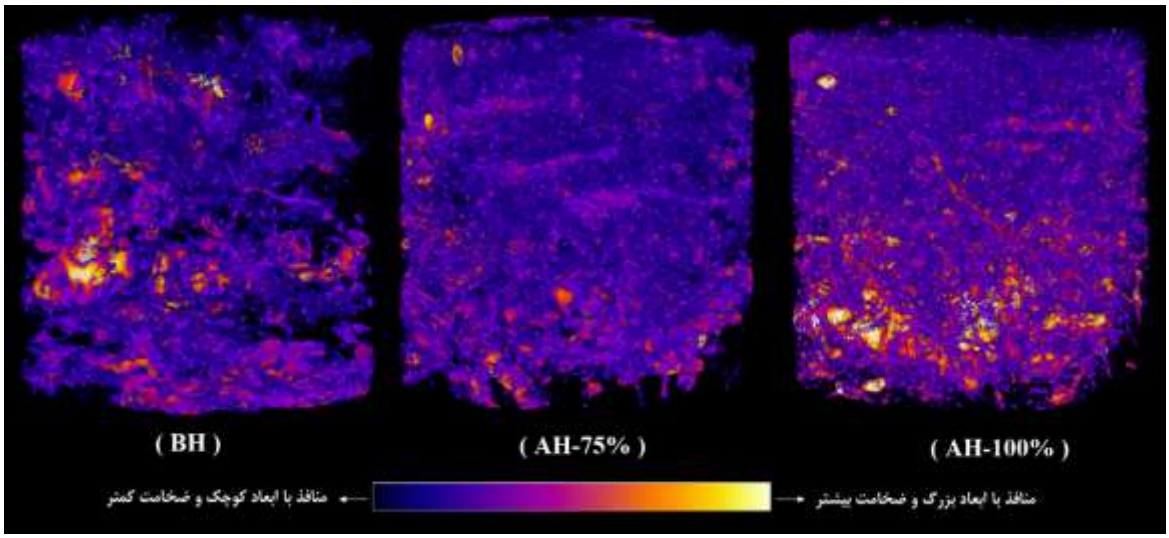
Figure 2. Distribution of pore diameter (Diameter) among soil compaction treatments represented by boxplots

بررسی تغییرپذیری بین تکرارها

بررسی مقادیر مربوط به سه تکرار در جداول ۱ و ۲ نشان داد که میزان تغییرپذیری بین تکرارها بسته به شاخص و تیمار متفاوت است. در شاخص‌های توزیع اندازه ذرات، برخی شاخص‌ها مانند D50، D90، GMD و MWD، به‌ویژه در تیمارهای BH و AH-100%، پراکندگی بیشتری بین تکرارها نشان دادند، در حالی که شاخص‌هایی مانند D50 و MWD در تیمار AH-75% دامنه تغییرات محدودتری داشتند. در ویژگی‌های هندسی منافذ نیز Diameter و Max Diameter تغییرپذیری نسبتاً محدودی داشتند، در حالی که Number of Pores تغییرپذیری بیشتری بین تکرارها نشان داد. در مجموع، مقادیر SD و دامنه‌های مشاهده‌شده در جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهند که میزان پراکندگی بین تکرارها در شاخص‌های مختلف یکسان نبوده است.

تغییرات معماری سه‌بعدی شبکه منافذ

بازسازی سه‌بعدی ساختار منفذی خاک با استفاده از تصاویر X-Ray CT تفاوت‌های آشکاری را میان تیمارهای مورد مطالعه نشان داد (شکل ۳). در تیمار شاهد، شبکه منفذی شامل تعداد کمتری منفذ با ابعاد نسبتاً بزرگ‌تر بود، در حالی که در تیمارهای متراکم، به‌ویژه AH-75%، تعداد منافذ افزایش یافته و ساختار منفذی به واحدهای کوچک‌تر تقسیم شده بود. این تفاوت‌های بصری با نتایج کمی استخراج‌شده از تصاویر CT نیز مطابقت داشت.



شکل ۳- بازسازی سه‌بعدی شبکه منافذ خاک حاصل از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس (CT) در تیمارهای مختلف.

Figure 3. Three-dimensional reconstruction of the soil pore network derived from X-ray CT images under different treatments.

روابط بین شاخص‌های اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار منافذ خاک

ضرایب همبستگی بین شاخص‌های حاصل از آنالیز اندازه ذرات و ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر X-ray CT در (جدول ۳) ارائه شده است. شاخص‌های D10، D50، D90، GMD و MWD دارای همبستگی مثبت و قوی تا بسیار قوی با یکدیگر بودند. بیشترین ضریب همبستگی بین D50 و GMD با مقدار $r = 0.994$ مشاهده شد. همچنین، D90 با MWD ($r = 0.986$)، GMD با MWD ($r = 0.980$)، D50 با MWD ($r = 0.961$) و D90 با GMD ($r = 0.955$) همبستگی بسیار قوی نشان دادند. در مقابل، شاخص Span با اغلب شاخص‌های اندازه ذرات دارای همبستگی منفی بود؛ به‌طوری‌که بیشترین ضرایب منفی آن با D50 ($r = -0.605$) و GMD ($r = -0.524$) مشاهده شد. ویژگی‌های منفذی نیز الگوی مشخصی از همبستگی را نشان دادند. Diameter و Max Diameter دارای همبستگی تقریباً کامل با یکدیگر بودند ($r = 0.999$)، در حالی که هر دو شاخص با Number of Pores همبستگی منفی قوی داشتند؛ به‌طوری‌که ضرایب همبستگی Diameter و Max Diameter با Number of Pores به‌ترتیب برابر با $r = -0.825$ و $r = -0.838$ بودند. در مقابل، همبستگی بین شاخص‌های اندازه ذرات و Number of Pores در محدوده ۰/۳۶۳ تا ۰/۴۹۷ قرار داشت، در حالی که روابط آنها با Diameter و Max Diameter عمدتاً ضعیف و منفی بود. همچنین، Span با Diameter، Max Diameter و Number of Pores به‌ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۱۵۰، ۰/۱۴۹ و ۰/۰۱۲- را نشان داد.

جدول ۳- ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار منافذ خاک.

Table 3. Pearson correlation coefficient matrix between particle size distribution indices and soil pore structure characteristics.

Number of Pores	Max Diameter	Diameter	MWD	GMD	Span	D90	D50	D10	شاخص Index
								1.000	**D10**
							1.000	0.887	**D50**
						1.000	0.929	0.803	**D90**
					1.000	-0.320	-0.605	-0.509	**Span**
				1.000	-0.524	0.955	0.994	0.901	**GMD**
			1.000	0.98	-0.377	0.986	0.961	0.829	**MWD**
		1.000	-0.247	-0.245	0.15	-0.305	-0.237	-0.215	**Diameter**
	1.000	0.999	-0.261	-0.258	0.149	-0.315	-0.249	-0.22	**Max Diameter**
1.000	-0.838	-0.825	0.489	0.442	-0.012	0.497	0.414	0.363	**Number of Pores**

تحلیل همبستگی بین شاخص‌های اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار منافذ، اطلاعات بیشتری درباره ارتباط ساختاری بین فاز جامد و فضای منفذی خاک فراهم کرد. همبستگی بسیار قوی بین D50 و GMD ($r = 0.994$) تا حدی قابل انتظار است، زیرا هر دو شاخص بیانگر موقعیت مرکزی توزیع اندازه ذرات هستند. افزایش همزمان این دو شاخص در تیمارهای متراکم نشان می دهد که مرکز مؤثر توزیع اندازه ذرات به سمت واحدهای درشت‌تر جابه‌جا شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری PSA در این مطالعه با آب و بدون استفاده از ماده پراکنده‌کننده انجام شد، این تغییر می‌تواند علاوه بر اندازه ذرات اولیه، تحت تأثیر پایداری تجمعات و بازآرایی واحدهای ذره‌ای نیز قرار گرفته باشد و در نتیجه بیانگر تغییر در سازمان‌یافتگی فاز جامد باشد. در بخش منافذ نیز، همبستگی منفی نسبتاً قوی بین ضخامت منافذ و تعداد منافذ ($r = -0.825$) نشان می‌دهد که افزایش تعداد واحدهای منفذی عموماً با کاهش ابعاد متوسط آنها همراه بوده است؛ الگویی که با بازآرایی و قطعه‌قطعه‌شدن احتمالی بخشی از فضاهای منفذی بزرگ‌تر در اثر تنش مکانیکی سازگار است. این تغییر می تواند به کاهش سهم منافذ بزرگ‌تر و بالقوه پیوسته و در نتیجه محدودشدن برخی مسیرهای سریع انتقال آب و هوا منجر شود، اگرچه این پیامدها در مطالعه حاضر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند. همچنین، همبستگی تقریباً کامل بین ضخامت و بیشینه ضخامت منافذ ($r = 0.999$) تا حد زیادی ناشی از ماهیت هندسی مشابه این دو شاخص است. در مقابل، همبستگی‌های ضعیف تا متوسط بین شاخص‌های اندازه ذرات و ویژگی‌های منفذی نشان می‌دهد که معماری منافذ تنها تابع اندازه ذرات نیست و آرایش فضایی، نحوه تماس ذرات و سازمان‌یافتگی شبکه منفذی نیز نقش مهمی دارند. بنابراین، نتایج همبستگی نشان می‌دهند که تغییرات فاز جامد و منفذی به یکدیگر مرتبط‌اند، اما رابطه‌ای یک‌به‌یک میان آنها وجود ندارد. همچنین، این روابط همبستگی به‌تنهایی اثبات‌کننده رابطه علّی نیستند، بلکه شواهدی از سازگاری تغییرات ساختاری دو فاز در پاسخ به تراکم خاک ارائه می‌کنند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که بخش عمده تغییرات موجود در داده‌های حاصل از آنالیز پراش لیزری (PSA) و تصاویر پرتو ایکس (X-Ray CT) توسط دو مؤلفه اصلی نخست قابل توصیف است (جدول ۴). مؤلفه اول (PC1) با مقدار ویژه ۵/۵۳۷ معادل ۶۱/۵۲ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کرد، در حالی که مؤلفه دوم (PC2) با مقدار ویژه۲/۲۵۷ معادل ۲۵/۰۷ درصد دیگر از واریانس را توضیح داد. در مجموع، دو مؤلفه نخست ۸۶/۵۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را پوشش دادند که نشان‌دهنده توان بالای این دو مؤلفه در توصیف الگوی کلی تغییرات میان متغیرهای مورد مطالعه است. همچنین مؤلفه سوم (PC3) با مقدار ویژه ۰/۸۵۴ معادل ۹/۴۸ درصد از واریانس را تبیین کرد و مجموع واریانس تجمعی سه مؤلفه اول را به ۹۶/۰۸ درصد رساند (جدول ۳). بررسی بارهای عاملی نشان داد که بیشتر شاخص‌های اندازه ذرات، شامل D10، D50، D90، GMD و MWD، بارگذاری بالایی روی PC1 داشتند، در حالی که ضخامت و حداکثر ضخامت منافذ عمدتاً با PC2 مرتبط بودند. در مقابل، Span دارای بارگذاری منفی قوی برابر با ۰٫۸۷۱− روی PC3 بود (جدول ۵). این الگو نشان‌دهنده جهت‌گیری آماری متفاوت Span در فضای چندمتغیره است؛ با این حال، این جدایی نباید به‌عنوان یک فرآیند فیزیکی یا اکولوژیکی مستقل تفسیر شود، زیرا Span یک شاخص مشتق‌شده از توزیع اندازه ذرات است و با شاخص‌هایی مانند D10، D50 و D90 ارتباط ریاضی و آماری دارد. نمودار دو بعدی PCA (شکل ۵) نیز الگوی توزیع متغیرها و تیمارهای مورد مطالعه را در فضای مؤلفه‌های اصلی نشان داد. بردارهای مربوط به شاخص‌های D10، D50، D90، GMD و MWD در جهت مشابهی قرار گرفتند که بیانگر همبستگی مثبت میان این متغیرها

است. در مقابل، بردارهای ضخامت و بیشینه‌ی ضخامت در بخشی متفاوت از فضای چندمتغیره قرار گرفتند و بیشترین ارتباط را با محور PC2 نشان دادند، همچنین شاخص تعداد منافذ در امتداد مثبت PC2 قرار گرفت و از سایر شاخص‌های PSA تفکیک شد. از سوی دیگر، شاخص Span در جهتی مخالف اکثر شاخص‌های توزیع اندازه ذرات قرار گرفت که بیانگر تفاوت الگوی تغییرات این متغیر با سایر شاخص‌های اندازه ذرات است. به طور کلی، نتایج PCA نشان داد که متغیرهای حاصل از PSA و CT در فضای چندمتغیره داده‌ها دو گروه نسبتاً متمایز را تشکیل می‌دهند؛ به‌طوری‌که شاخص‌های مرتبط با اندازه ذرات عمدتاً در امتداد مؤلفه اول و متغیرهای مرتبط با معماری منافذ عمدتاً در امتداد مؤلفه دوم قرار گرفتند.

جدول ۴- مقادیر ویژه ، درصد واریانس تبیین‌شده و واریانس تجمعی مؤلفه‌های اصلی حاصل از تحلیل PCA

Table 4. Eigenvalues, percentage of explained variance, and cumulative explained variance of principal components derived from principal component analysis (PCA)

مؤلفه اصلی Component	مقدار ویژه Eigenvalue	واریانس تبیین‌شده (درصد) Variance (%)	واریانس تجمعی (درصد) Cumulative (%)
PC1	5.537	61.52	61.52
PC2	2.257	25.07	86.59
PC3	0.854	9.48	96.08
PC4	0.205	2.28	98.35
PC5	0.139	1.55	99.9
PC6	0.007	0.08	99.99
PC7	0.001	0.01	100
PC8	0	0	100
PC9	0	0	100

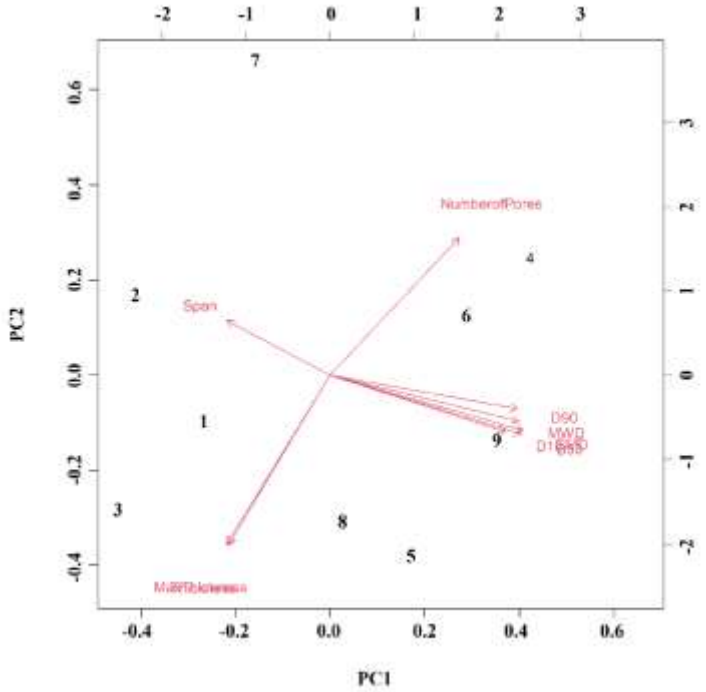
جدول ۵- بارهای عاملی متغیرهای حاصل از آنالیز پراش لیزری (PSA) و توموگرافی پرتو ایکس (CT) بر روی مؤلفه‌های اصلی در تحلیل PCA

Table 5. Factor loadings of variables obtained from laser diffraction analysis (PSA) and X-ray computed tomography (CT) on the principal components in PCA analysis

متغیر Variable	PC1	PC2	PC3
D10	0.370	-0.186	0.027
D50	**0.405**	-0.194	0.039
D90	0.396	-0.110	-0.279
Span	-0.219	0.180	**-0.871**
GMD	**0.408**	-0.181	-0.061
MWD	**0.400**	-0.151	-0.240
Diameter	-0.214	**-0.559**	-0.173
Max Diameter	-0.219	**-0.557**	-0.161
Number of Pores	0.273	**0.453**	-0.209

نکته ۱- مقادیر پررنگ نشان‌دهنده بارهای عاملی غالب ($|Loading| \geq 0.400$) هستند.

Note 2: Bold values indicate dominant factor loadings ($|\text{loading}| \geq 0.40$).



شکل ۴- نمودار دو بعدی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای شاخص‌های حاصل از PSA و CT و موقعیت تیمارهای مورد مطالعه در فضای چندمتغیره

Figure 5. Principal component analysis (PCA) biplot showing the relationships among PSA and CT variables and the distribution of treatments in the multivariate space

بحث

پاسخ شاخص‌های PSA به تراکم خاک

نتایج آنالیز پراش لیزری (PSA) نشان داد که اعمال تراکم موجب تغییر قابل توجه در شاخص‌های توزیع اندازه ذرات شد. افزایش میانگین مقادیر D50، GMD و MWD در تیمارهای متراکم نسبت به تیمار شاهد بیانگر آن است که تراکم نه تنها بر آرایش فضایی ذرات اثر گذاشته، بلکه ساختار تجمعی خاک را نیز تحت تأثیر قرار داده است. بیشترین مقادیر این شاخص‌ها در تیمار AH-75% مشاهده شد؛ به‌طوری‌که میانگین D50 از ۱/۰۷ میکرومتر در تیمار BH به ۷/۳۴ میکرومتر در AH-75% افزایش یافت. همچنین میانگین GMD و MWD به‌ترتیب از ۱/۶۰ و ۵/۸۵ میکرومتر در تیمار شاهد به ۷/۲۲ و ۱۸/۸۷ میکرومتر در تیمار AH-75% رسید. از آنجا که در فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها تنها از آب برای جداسازی استفاده شد و از عوامل پراکنده‌کننده شیمیایی استفاده نگردید، بخشی از ریزخاکدانه‌ها و واحدهای ساختمانی پایدار احتمالاً در طول اندازه‌گیری حفظ شده‌اند. بنابراین شاخص‌های حاصل از PSA در این مطالعه صرفاً بیانگر اندازه ذرات اولیه نیستند، بلکه تا حدی وضعیت تجمع ذرات و سازمان یافتگی ریزساختاری خاک را نیز منعکس می‌کنند. در چنین شرایطی، افزایش D50، GMD و MWD را می‌توان نشانه‌ای از حضور واحدهای ساختمانی بزرگ‌تر و متراکم‌تر دانست که در اثر اعمال تنش مکانیکی و نزدیک‌تر شدن ذرات به یکدیگر شکل گرفته‌اند. شاخص Span نیز رفتار متفاوتی نسبت به سایر شاخص‌ها نشان داد. کاهش میانگین Span از ۱۳/۵۲ در تیمار شاهد به ۶/۸۰ در تیمار AH-75% بیانگر کاهش گستردگی توزیع اندازه ذرات و یکنواخت‌تر شدن جمعیت ذرات اندازه‌گیری‌شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که تراکم می‌تواند علاوه بر تغییر اندازه مؤثر ذرات، الگوی توزیع آن‌ها را نیز دستخوش تغییر کند. از سوی دیگر، کاهش Cu در تیمارهای متراکم نسبت به BH نیز مؤید کاهش ناهمگنی نسبی توزیع اندازه ذرات در اثر بازآرایی ساختاری خاک است.

نقش رطوبت خاک در شدت تغییرات ساختاری

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش آن بود که بیشترین تغییرات ساختاری در شاخص‌های PSA و CT در تیمار AH-75% مشاهده شد، در حالی که این تیمار تحت بیشترین شدت بار قرار نداشت. به طور مشخص، بیشترین مقادیر D50، GMD، MWD و همچنین بیشترین تعداد منافذ در این تیمار ثبت شد. این یافته نشان می‌دهد که شدت تغییرات ساختاری خاک تنها تابع میزان تنش اعمال‌شده نیست و شرایط رطوبتی خاک در زمان اعمال بار نیز می‌تواند در میزان حساسیت خاک به تراکم نقش داشته باشد. در زمان اعمال تنش، رطوبت حجمی خاک در

تیمارهای BH، AH-75% و AH-100% به ترتیب برابر با ۱۵/۵ ، ۱۴/۴ و ۹/۱ درصد بود. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که میزان رطوبت خاک می‌تواند بر حساسیت آن به تنش‌های مکانیکی و قابلیت بازآرایی ذرات و خاکدانه‌ها تأثیر بگذارد. با افزایش رطوبت، آب موجود در منافذ می‌تواند با کاهش اصطکاک بین ذرات، جابه‌جایی و بازآرایی آنها را تسهیل کند؛ در مقابل، در رطوبت‌های پایین‌تر، مقاومت مکانیکی خاک افزایش یافته و می‌تواند تحرک و بازآرایی ذرات را محدود کند.

اگرچه تیمار AH-100% تحت بار بیشتری قرار گرفته است، رطوبت پایین‌تر خاک در زمان اعمال تنش احتمالاً موجب افزایش مقاومت خاک و محدود شدن جابه‌جایی و بازآرایی ذرات شده است. رطوبت بالاتر در تیمار AH-75% همزمان با تغییرات ساختاری بیشتر مشاهده شد؛ با این حال، از آنجا که رطوبت خاک بلافاصله پس از تردد ماشین‌آلات و اعمال تراکم اندازه‌گیری شد، نمی‌توان بر اساس این داده‌ها رابطه علّی بین رطوبت و تغییرات ساختاری را استنباط کرد. بنابراین، تفاوت رطوبت مشاهده‌شده در تیمارها صرفاً به‌عنوان یک ویژگی همراه با شرایط پس از تراکم در نظر گرفته می‌شود. این موضوع می‌تواند تا حدی توضیح‌دهنده مشاهده بیشترین مقادیر D50، GMD، MWD و تعداد منافذ در این تیمار باشد. با این حال، این تفسیر باید به‌عنوان یک توضیح احتمالی برای تفاوت پاسخ تیمارها در نظر گرفته شود، نه به‌عنوان تعیین مستقیم رطوبت بحرانی تراکم خاک.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی اثر تراکم بدون در نظر گرفتن وضعیت رطوبتی خاک می‌تواند به تفسیر ناقص پاسخ ساختاری خاک منجر شود. بنابراین، شدت بار و رطوبت خاک باید به‌عنوان دو عامل برهم‌کنش‌کننده در فرآیند تراکم در نظر گرفته شوند؛ به‌گونه‌ای که رطوبت می‌تواند میزان تأثیر تنش مکانیکی بر هر دو حوزه فاز جامد و فاز منفذی خاک را تعدیل یا تشدید کند.

تغییرات معماری منافذ در اثر تراکم

بررسی ویژگی‌های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر CT نشان داد که پاسخ شبکه منفذی خاک به تراکم با پاسخ شاخص‌های PSA متفاوت بوده است. اگرچه میانگین ضخامت منافذ در تیمار شاهد (۰/۰۱۵۱ سانتی‌متر) اندکی بیشتر از تیمارهای متراکم بود، اما اختلاف مشاهده‌شده از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P = 0.371$). به همین ترتیب، بیشینه ضخامت منافذ نیز تنها تغییرات محدودی بین تیمارها نشان داد. در مقابل، تعداد منافذ حساسیت بسیار بیشتری نسبت به تراکم از خود نشان داد. میانگین تعداد منافذ از حدود ۱۴۶ هزار در تیمار BH به ۴۶۲ هزار در تیمار AH-75% و ۴۱۳ هزار در AH-100% افزایش یافت. افزایش تعداد منافذ همراه با کاهش عددی میانگین ضخامت منافذ در تیمارهای متراکم‌شده مشاهده شد. با این حال، از آنجا که تفاوت میانگین ضخامت منافذ از نظر آماری معنی‌دار نبود ($P = 0.371$) و تخلخل کل و حجم تجمعی منافذ در این مطالعه به‌طور مستقیم محاسبه نشده‌اند، این الگو به‌تنهایی برای اثبات قطعه‌قطعه‌شدن منافذ بزرگ‌تر به منافذ کوچک‌تر کافی نیست. بنابراین، این نتایج صرفاً نشان‌دهنده تغییر در معماری سه‌بعدی شبکه منافذ هستند و می‌توانند با تغییر در سازمان‌یافتگی و تقسیم ساختاری شبکه منافذ سازگار باشند. در واقع، افزایش تعداد منافذ همراه با کاهش نسبی ضخامت آن‌ها بیانگر فرآیند خردشدگی یا قطعه‌قطعه شدن شبکه منفذی[۱] در اثر تنش مکانیکی است.

مشاهدات حاصل از بازسازی سه‌بعدی تصاویر X-Ray CT نیز این نتیجه را تأیید کرد. در تیمار شاهد، شبکه منفذی عمدتاً از منافذ کمتر اما با ابعاد بزرگ‌تر تشکیل شده بود، در حالی که در تیمارهای متراکم، به‌ویژه AH-75%، شبکه منفذی به تعداد بیشتری واحد منفذی کوچک‌تر تقسیم شده بود. چنین تغییری معمولاً با کاهش پیوستگی شبکه منافذ و محدود شدن مسیرهای انتقال آب و هوا همراه است و می‌تواند آثار قابل توجهی بر عملکرد هیدرولیکی و زیستی خاک داشته باشد. همبستگی بسیار قوی و مثبت بین ضخامت منافذ و بیشینه‌ی منافذ با مقدار r برابر با ۰/۹۹۹ نشان داد که این دو شاخص اطلاعات مشابهی از وضعیت هندسی منافذ ارائه می‌کنند. همچنین همبستگی منفی قوی این شاخص‌ها با تعداد منافذ (به‌ترتیب ۰/۸۲۵- و ۰/۸۳۸-) مؤید آن است که افزایش تعداد منافذ با کاهش ابعاد متوسط آن‌ها همراه بوده است.

تغییرپذیری بین تکرارها و ناهمگونی ساختاری خاک

بررسی ویژگی‌های هندسی منافذ استخراج‌شده از تصاویر CT نشان داد که پاسخ شبکه منفذی خاک به تراکم با پاسخ شاخص‌های PSA متفاوت بوده است. اگرچه میانگین ضخامت منافذ در تیمار شاهد (۱۵۱/۳ میکرومتر) اندکی بیشتر از تیمارهای متراکم بود، اما اختلاف مشاهده‌شده از نظر آماری معنی دار نبود ($P = 0.371$). به همین ترتیب، بیشینه ضخامت منافذ نیز تنها تغییرات محدودی بین تیمارها نشان داد. در مقابل، تعداد منافذ حساسیت بسیار بیشتری نسبت به تراکم از خود نشان داد. میانگین تعداد منافذ از حدود ۱۴۶ هزار در تیمار BH به ۴۶۲ هزار در AH-75% و ۴۱۳ هزار در AH-100% افزایش یافت. این الگو نشان می‌دهد که تراکم الزاماً موجب حذف کامل فضای منفذی نمی شود، بلکه بیشتر باعث بازآرایی معماری منافذ و تجزیه احتمالی

[۱] Pore Fragmentation

منافذ بزرگ‌تر به تعداد بیشتری از منافذ کوچک‌تر می‌شود. با این حال، از آنجا که اختلاف ضخامت منافذ از نظر آماری معنی‌دار نبود، این الگو باید به‌عنوان یک روند مشاهده‌شده در داده‌ها، نه یک اثر قطعی تراکم، تفسیر شود.

مشاهدات حاصل از بازسازی سه‌بعدی تصاویر X-Ray CT نیز این نتیجه را تا حدی تأیید کرد. در تیمار شاهد، شبکه منفذی عمدتاً از منافذ کمتر اما با ابعاد بزرگ‌تر تشکیل شده بود، در حالی که در تیمارهای متراکم، به‌ویژه AH-75%، شبکه منفذی به تعداد بیشتری واحد منفذی کوچک‌تر تقسیم شده بود. چنین تغییری می‌تواند با کاهش پیوستگی شبکه منافذ و محدود شدن مسیرهای انتقال آب و هوا همراه باشد، هرچند این پیامدها در مطالعه حاضر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند. همبستگی بسیار قوی و مثبت بین ضخامت منافذ و بیشینه ضخامت منافذ با مقدار $r = 0.999$ نشان داد که این دو شاخص اطلاعات مشابهی از وضعیت هندسی منافذ ارائه می‌کنند. همچنین، همبستگی منفی قوی این شاخص‌ها با تعداد منافذ (به‌ترتیب $r = -0.825$ و $r = -0.838$) نشان داد که افزایش تعداد واحدهای منفذی در مجموعه داده مورد مطالعه با کاهش ضخامت آن‌ها همراه بوده است.

ارتباط بین فاز جامد و فاز منفذی خاک

یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی همزمان تغییرات فاز جامد و فاز منفذی خاک در پاسخ به تراکم بود. نتایج نشان داد که اگرچه هر دو بخش ساختمان خاک تحت تأثیر تراکم قرار گرفتند، اما شدت و الگوی پاسخ آن‌ها یکسان نبود. شاخص‌های PSA نظیر D50، GMD و MWD افزایش محسوسی را در تیمارهای متراکم نشان دادند، در حالی که شاخص‌های ضخامت منافذ و بیشینه‌ی ضخامت منافذ تغییرات نسبتاً محدودی داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که تغییر در سازمان‌یافتگی ذرات الزاماً به همان شدت در ابعاد منافذ منعکس نمی‌شود. ساختمان خاک حاصل تعامل پیچیده میان آرایش فاز جامد و فاز منفذی است و تغییر در یکی از این دو بخش لزوماً به معنای تغییر مستقیم و متناسب در بخش دیگر نیست. ضرایب همبستگی نیز این موضوع را تأیید کردند. شاخص‌های حاصل از PSA عمدتاً همبستگی‌های قوی با یکدیگر داشتند، در حالی که ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های منفذی ضعیف‌تر بود. این نتیجه نشان می‌دهد که فرآیندهای حاکم بر تغییرات آرایش ذرات و فرآیندهای کنترل‌کننده معماری منافذ، اگرچه به یکدیگر مرتبط هستند، اما به طور کامل وابسته به هم نیستند.

نتایج همبستگی میان شاخص‌های اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار منافذ نشان می‌دهد که تغییرات فاز جامد و فضای منفذی خاک در اثر تراکم به یکدیگر مرتبط‌اند، اگرچه این ارتباط کاملاً یک‌به‌یک نیست. همبستگی‌های مثبت و قوی بین D10، D50، D90، GMD و MWD بیانگر آن است که تغییرات اندازه ذرات در بخش‌های مختلف توزیع اندازه ذرات به‌صورت نسبتاً هماهنگ رخ داده است. به‌ویژه، همبستگی بسیار قوی بین D50 و GMD را می‌توان با ماهیت مشترک این دو شاخص در توصیف موقعیت مرکزی توزیع اندازه ذرات توضیح داد؛ بنابراین، افزایش همزمان آنها در تیمارهای متراکم نشان می‌دهد که مرکز مؤثر توزیع اندازه ذرات به سمت واحدهای درشت‌تر جابه‌جا شده است. همچنین، ارتباط قوی D90 با GMD و MWD نشان می دهد که تغییرات بخش درشت‌تر توزیع نیز با تغییر کلی اندازه ذرات همراه بوده است. با این حال، از آنجا که آنالیز اندازه ذرات در این مطالعه با آب و بدون استفاده از ماده پراکنده‌کننده انجام شد، افزایش این شاخص‌ها لزوماً به معنای افزایش اندازه ذرات اولیه نیست و می‌تواند تحت تأثیر پایداری تجمعات و بازآرایی واحدهای ذره‌ای قرار گرفته باشد. در مقابل، روابط منفی Span با شاخص‌های مرکزی اندازه ذرات، به‌ویژه D50 و GMD، نشان می‌دهد که افزایش اندازه مرکزی توزیع الزاماً با افزایش گستردگی نسبی آن همراه نبوده و می‌تواند با کاهش پراکندگی نسبی توزیع مرتبط باشد.

در مورد فضای منفذی، همبستگی تقریباً کامل بین Diameter و Max Diameter تا حد زیادی با ماهیت هندسی مشابه این دو شاخص قابل انتظار است، زیرا هر دو ویژگی ابعاد هندسی منافذ را توصیف می‌کنند. در مقابل، رابطه منفی قوی بین Diameter و Number of Pores و همچنین Max Diameter و Number of Pores نشان می‌دهد که افزایش تعداد واحدهای منفذی عموماً با کاهش ابعاد آنها همراه بوده است. این الگو با بازآرایی و قطعه‌قطعه‌شدن احتمالی بخشی از فضاهای منفذی بزرگ‌تر در اثر تنش مکانیکی سازگار است. در شرایط تراکم، نزدیک‌شدن و بازآرایی ذرات می‌تواند هندسه فضاهای خالی را تغییر داده و به شکل‌گیری تعداد بیشتری از واحدهای منفذی با ابعاد کوچک‌تر منجر شود. چنین تغییری ممکن است سهم منافذ بزرگ‌تر و بالقوه پیوسته را کاهش داده و در نتیجه برخی مسیرهای سریع انتقال آب و هوا را محدود کند؛ با این حال، از آنجا که هدایت هیدرولیکی، پیوستگی منافذ و فعالیت زیستی در مطالعه حاضر مستقیماً اندازه‌گیری نشده‌اند، این پیامدها باید به‌عنوان آثار بالقوه ساختاری در نظر گرفته شوند.

در مقابل، همبستگی‌های ضعیف تا متوسط بین D10، D50، D90، GMD و MWD با Number of Pores و همچنین روابط عمدتاً ضعیف و منفی آنها با Diameter و Max Diameter نشان می‌دهد که معماری منافذ تنها تحت کنترل

اندازه ذرات نیست. ویژگی‌هایی مانند آرایش فضایی ذرات، نحوه تماس آنها، شکل و سازمان‌یافتگی واحدهای جامد و نحوه اتصال فضاهای خالی می‌توانند در تعیین هندسه شبکه منفذی نقش داشته باشند. همچنین، نبود رابطه مشخص بین Span و ویژگی های منفذی نشان می‌دهد که گستردگی توزیع اندازه ذرات به‌تنهایی نمی‌تواند تغییرات تعداد یا ابعاد منافذ را توضیح دهد. در مجموع، الگوی همبستگی‌ها نشان می‌دهد که تراکم خاک موجب تغییر همزمان در سازمان‌یافتگی فاز جامد و معماری فضای منفذی می‌شود، اما پاسخ این دو بخش مستقل از یکدیگر نیز نیست و توسط مجموعه‌ای از فرآیندهای ساختاری کنترل می‌شود. بنابراین، روابط همبستگی مشاهده‌شده شواهدی از همراهی تغییرات دو فاز فراهم می‌کنند، اما به‌تنهایی برای اثبات رابطه علّی مستقیم میان ویژگی‌های اندازه ذرات و ساختار منافذ کافی نیستند.

تفسیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) شواهد بیشتری در خصوص تفکیک دو حوزه ساختاری خاک فراهم کرد. دو مؤلفه نخست در مجموع ۸۶٫۵۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند که نشان‌دهنده سهم بالای این دو محور در توصیف الگوی تغییرات متغیرهای مورد بررسی است. بارهای عاملی نشان داد که D10، D50، GMD و MWD دارای بارگذاری‌های مثبت و نسبتاً بالا بر روی PC1 بودند و سهم قابل توجهی در تشکیل این مؤلفه داشتند. در مقابل، شاخص Span دارای بارگذاری منفی قوی بر روی PC3 (۰/۸۷۱-) بود. این الگو نشان‌دهنده جهت‌گیری آماری متفاوت Span در فضای چندمتغیره است؛ با این حال، این جدایی نباید به‌عنوان شواهدی از یک فرآیند فیزیکی یا اکولوژیکی مستقل تفسیر شود. Span یک شاخص مشتق‌شده از توزیع اندازه ذرات است و از نظر ساختاری و آماری با شاخص‌هایی مانند D10، D50 و D90 مرتبط است؛ بنابراین، بارگذاری قوی آن بر روی PC3 می‌تواند تا حدی ناشی از ساختار ریاضی و روابط میان شاخص‌های توزیع اندازه ذرات باشد. با وجود این، از نظر مفهومی، Span اطلاعاتی درباره گستردگی توزیع اندازه ذرات ارائه می‌دهد، در حالی که شاخص‌هایی مانند D50 و GMD بیشتر موقعیت مرکزی توزیع را توصیف می‌کنند. بر این اساس، PC1 را می‌توان عمدتاً نمایانگر ویژگی‌های مرتبط با اندازه و توزیع ذرات در فاز جامد خاک دانست.

از سوی دیگر، ضخامت منافذ و حداکثر ضخامت منافذ دارای بیشترین بارگذاری منفی بر روی PC2، به‌ترتیب ۰/۵۵۹- و ۰/۵۵۷-، بودند، در حالی که تعداد منافذ بارگذاری مثبت نسبتاً بالایی برابر با ۰/۴۵۳ بر روی همین مؤلفه نشان داد. این الگو نشان می‌دهد که PC2 عمدتاً تغییرات مرتبط با معماری و هندسه شبکه منفذی را توصیف می‌کند. جدایی بردارهای مربوط به شاخص‌های PSA از متغیرهای CT در نمودار بای‌پلات PCA نشان داد که این دو گروه متغیر، اگرچه هر دو به ساختار خاک مربوط هستند، ابعاد متفاوتی از آن را توصیف می‌کنند. بنابراین، PSA و CT را نمی‌توان روش‌های جایگزین یکدیگر دانست؛ بلکه این دو تکنیک اطلاعات مکملی درباره دو جنبه اصلی ساختمان خاک، یعنی ویژگی‌های فاز جامد و معماری فاز منفذی، فراهم می کنند.

بر این اساس، می‌توان یک چارچوب مفهومی برای تفسیر نتایج ارائه کرد که در آن تراکم خاک به‌طور همزمان با تغییر در هر دو حوزه ساختاری همراه است. در فاز جامد، افزایش D50، GMD و MWD در تیمارهای متراکم‌شده می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در توزیع و آرایش ذرات باشد. در فاز منفذی نیز افزایش تعداد منافذ همراه با کاهش عددی میانگین ضخامت منافذ می‌تواند با تغییر در سازمان‌یافتگی و معماری شبکه منفذی سازگار باشد. با این حال، از آنجا که تخلخل کل و حجم تجمعی منافذ در این مطالعه به‌طور مستقیم محاسبه نشده‌اند و تفاوت میانگین ضخامت منافذ نیز از نظر آماری معنی‌دار نبود، نمی‌توان این الگو را به‌عنوان شاهد قطعی برای قطعه‌قطعه‌شدن منافذ بزرگ‌تر به منافذ کوچک‌تر تفسیر کرد. در مجموع، ارزیابی همزمان PSA و CT امکان دستیابی به درک جامع‌تری از تغییرات ساختاری خاک در اثر تراکم را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای مناسبی برای پایش اثرات تراکم بر کیفیت فیزیکی خاک باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تراکم ناشی از تردد ماشین‌آلات کشاورزی موجب تغییرات قابل توجهی در هر دو مؤلفه اصلی ساختمان خاک، یعنی فاز جامد و فاز منفذی، می‌شود. شاخص‌های حاصل از آنالیز توزیع اندازه ذرات شامل D50، GMD و MWD در تیمارهای متراکم نسبت به تیمار شاهد افزایش یافتند که بیانگر تغییر در سازمان‌یافتگی ذرات و ریزخاکدانه‌های خاک است. در مقابل، نتایج حاصل از تحلیل و کمی سازی تصاویر کامپیوتری اشعه‌ی ایکس نشان داد که تراکم با افزایش تعداد منافذ همراه بود، در حالی که ضخامت و حداکثر ضخامت منافذ تغییرات محدودی نشان دادند و اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود؛ موضوعی که بیانگر بازآرایی شبکه منفذی و تبدیل منافذ بزرگ‌تر به تعداد بیشتری از منافذ کوچک‌تر در اثر اعمال تنش مکانیکی است.

یکی از یافته‌های قابل توجه این پژوهش آن بود که بیشترین تغییرات ساختاری در تیمار AH-75% مشاهده شد، در حالی که شدت بار اعمال‌شده در این تیمار کمتر از تیمار AH-

100% بود. این موضوع نشان می‌دهد که پاسخ ساختمان خاک به تراکم تنها تابع شدت تنش مکانیکی نیست و شرایط رطوبتی خاک در زمان اعمال بار نیز می‌تواند در میزان تغییرات ساختاری نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین، ارزیابی اثرات تراکم باید با در نظر گرفتن همزمان شدت بار و وضعیت رطوبتی خاک انجام شود. تحلیل همبستگی و مؤلفه‌های اصلی نشان داد که شاخص‌های حاصل از PSA و CT الزاماً رفتار مشابهی ندارند و هر یک جنبه متفاوتی از ساختمان خاک را توصیف می‌کنند. در حالی که شاخص‌های PSA عمدتاً ویژگی‌های مرتبط با فاز جامد خاک را منعکس می‌کنند، پارامترهای استخراج‌شده از CT بیانگر ویژگی های هندسی و فضایی شبکه منافذ هستند. تفکیک این دو گروه متغیر در تحلیل PCA نشان داد که تغییرات ساختاری ناشی از تراکم را نمی‌توان تنها با مطالعه ذرات یا منافذ به‌طور جداگانه تبیین کرد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از PSA و X-Ray CT می‌تواند اطلاعات مکملی درباره پاسخ ساختمان خاک به تراکم فراهم کند. در حالی که شاخص‌های PSA تغییرات مرتبط با اندازه و سازمان‌یافتگی فاز جامد را آشکار کردند، شاخص‌های استخراج‌شده از CT تغییرات هندسی و فضایی شبکه منافذ را نشان دادند. بنابراین، ترکیب این دو رویکرد امکان تفسیر جامع‌تر تغییرات ساختاری خاک در اثر تراکم و بررسی همزمان تغییرات فاز جامد و فاز منفذی را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی همزمان ویژگی‌های فاز جامد و فاز منفذی می‌تواند به توسعه شاخص‌های جامع‌تر کیفیت فیزیکی خاک و درک بهتر مکانیسم‌های اثر تراکم بر عملکرد خاک منجر شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، ارتباط بین شاخص‌های PSA و ویژگی‌های سه‌بعدی شبکه منافذ در دامنه وسیع‌تری از بافت‌ها، سطوح رطوبتی و اعماق مختلف خاک مورد بررسی قرار گیرد تا چارچوبی جامع برای تبیین روابط بین ساختار ذرات و ساختار منفذی خاک ارائه شود.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران/دبیر تخصصی/سردبیر نشریه و بنابر درخواست ایشان میسر خواهد بود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:
نویسنده اول: نمونه‌برداری خاک در مزرعه، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام اسکن نمونه‌های خاک، پردازش و تحلیل تصاویر توموگرافی، استخراج داده‌های کمی از تصاویر با استفاده از نرم‌افزار، انجام آنالیزهای آماری، نگارش مقاله.
نویسنده دوم: اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.
نویسنده سوم: آموزش روش‌شناسی، کمک در انجام آنالیزهای آماری، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تائید همه آن‌ها است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از حوزه‌ی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید اهواز به جهت تأمین هزینه‌ی مورد نیاز این تحقیق که قسمتی از قرارداد پژوهانه به شماره‌ی SCU.AS1404.364 است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

حمایت مالی

این تحقیق از حمایت مالی دانشگاه شهید اهواز به شماره قرارداد پژوهانه‌ی SCU.AS1404.364 برخوردار بوده است.

References

1. Abdoli, Y., and Jafari, S. 2018. The Effect of topography and irrigation on soil development and clay mineral diversity of Khuzestan's gypsic soils. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 22(1), 387-403. https://doi.org/10.29252/jstnar.22.1.387
2. Bimantara, D. S., Peixoto, L., Munkholm, L. J., Shirazi, M., Butterbach-Bahl, K., and Dold, C. 2026. Tractor-induced soil compaction drives nitrous oxid emissions. *Soil and Tillage Research*, 264, 107323. https://doi.org/10.1016/j.still.2026.107323
3. Ghosh, T., Maity, P. P., Rabbi, S. M. F., Das, T. K., and Bhattacharyya, R. 2023. Application of X-ray computed tomography in soil and plant: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1216630. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1216630
4. Goraczko, A., and Topolinski, S. 2020. Particle size distribution of natural clayey soils: A discussion on the use of laser diffraction analysis (LDA). *Geosciences*, 10(2), 55. https://doi.org/10.3390/geosciences10020055
5. Gresina, F., Szalai, Z., Zachary, D., Kiss, K., Madarasz, B., Angyal, Z., ... and Varga, G. 2025. Combined effect of a pretreatment and optical settings on the laser diffraction particle size distribution of soils and sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 25(1), 160-178 . https://doi.org/10.1007/s11368-024-03933-4
6. Messing, I., Mingot Soriano, A. M., Svensson, D. N., and Barron, J. 2023. Variability and compatibility in determining soil particle size distribution by sieving, sedimentation and laser diffraction methods. *Soil and Tillage Research*, 235, 105987. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105987
7. Shirazi, M., Khademolrasoul, A., and Munkholm, L. J. 2026. Computed Tomography (CT-Scan): A novel method for 3D visualization and quantitative assessment of soil structure. *Accepted for oral presentation at the 19th Iranian Soil Science Congress (ISSC19)*. (In Persian)
8. Singh, J., Singh, N., and Kumar, S. 2020. X-ray computed tomography measured soil pore parameters as influenced by crop rotations and cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 84(4), 1267-1279. https://doi.org/10.1002/saj2.20105
9. Svensson, D. N., Messing, I., and Barron, J. 2022. An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method. *Soil and Tillage Research*, 223, 105450. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106247
10. Thotakuri, G., Chakraborty, P., Singh, J., Xu, S., Kovacs, P., Iqbal, J., and Kumar, S. 2024. X-ray computed tomography Measured pore characteristics and hydro-physical properties of soil profile as influenced by long-term tillage and rotation systems. *Catena*, 237, 107801. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107801
11. Wang, N., and Zhang, T. (2024). Soil pore structure and its research methods: A review. *Soil and Water Research*, 19(1), 1-24. https://doi.org/10.17221/64/2023-SWR
12. Zhao, Y., Hu, X., and Li, X. 2020. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography. *Catena*, 193, 104622. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104622