

## Assessing parameters of distribution particle size and pores of a coarse-textured soils using CBCT-scan image processing

M. Ghosairy Sabry<sup>1</sup>, K. Ganjalipour<sup>2</sup> and K. Nabiollahi<sup>3\*</sup>

1. MSc student, Soil Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, University of Kurdistan
2. PhD in Engineering Geology, Kharazmi University of Tehran (Geology Expert, Mahab Ghods Consulting Engineers Company)
3. Associate Professor, Soil Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, University of Kurdistan

Received: 18 November 2020

Accepted: 15 January 2021

### Abstract

**Introduction** CT scan was first invented by Hounsfield in the twentieth century in 1972. But it was soon used in engineering, agriculture, biology, physics, chemistry, etc. Recently, with advances in computed tomography at the global level, the use of different generations of X-rays on a micrometer scale to study some of the different phenomena in soil science has begun. Due to the lack of geotechnical and soil mechanics studies in many engineering projects, CT scan image processing method can be used as a suitable method for extracting soil particle size and other soil characteristics. The main purpose of this study: a) The use of CBCT-scan in soil science for the first time in Iran. B) Comparing the ability of CBCT-scan in terms of quality of results with conventional methods. C) Identify the best filter and binary method (threshold). Another goal of this research is to acquaint more researchers with the application of computed tomography (CT-scan) technology in soil science studies.

**Material and Methods** The sampling area for this study was located in Diwandareh-Saqez axis in Kurdistan province, where six disturbed and undisturbed soil samples were collected in a sandy area (12 samples in total). In disturbed samples, particle size distribution was measured by ASTM D421 method, and the porosity of the samples was measured directly using the fuzzy equations in soil mechanics. In a radiology laboratory, three-dimensional images of intact soil samples were taken using a Planmeca Promax 3D CBCT CT scanner. In this study, ImageJ software was used to process CBCT-scan images. With this software, the percentage of phases, number of particles and particle size can be calculated. One of the most important steps in image processing is generating binary images. A total of 17 global thresholding methods have been proposed for generating binary images in ImageJ software. In this study, 15 standard methods for generating binary images were examined and the best method was selected. The total pore volume and soil particle size distribution of each sample calculated by quantifying X-ray images were compared with the total pore volume and soil particle size distribution obtained in the soil science laboratory and performance of the CT scan method evaluated by statistical parameters including The results of the accuracy evaluation for the correlation coefficient, mean absolute value of deviations, mean square error, root mean square error, and mean absolute error percentage.

**Results and discussion** The most significant point in image processing is the image thresholding method. In this study, due to the nature of CBCT-scan images, global thresholding was preferred. From the results of image processing, it can be understood that the results of binary images with Otsu and Intermodos methods are in complete agreement with the laboratory sample. The average

of total porosity of the processing image slides is 44.03%, which is approximately consistent with the calculated 45/6% for the laboratory sample. Also, the average of ineffective porosity of the samples is about 6.53%. Therefore, it can be said that the effective porosity of the samples is about 37.5%. The results of the accuracy evaluation for the correlation coefficient, mean absolute value of deviations, mean square error, root mean square error, and mean absolute error percentage were 0.98, 1.082, 1.229, 1.108 and 2.334 respectively, indicating that the use of CBCT-scan images and image processing technique can identify and evaluate the geometric properties of granular soils with acceptable accuracy. The advantages of the computed tomography method of the soil are: (1) Obtaining information from the three-dimensional structure of the soil with appropriate accuracy in a short time, (2) Non-destructiveness of this method, and (3) Accurate separation into soil phases in different energy radiations.

**Conclusion** Using the processes defined by the authors for image processing, this technique is well able to determine some engineering features such as particle size distribution, total porosity, effective porosity and ineffective porosity. Also, the best thresholding method for binary images and processing in ImageJ is the Otsu and Intermodes method. The accuracy of the device used in this research is 0.2 mm, in other words, spaces or grains smaller than this value cannot be identified; For this reason, in the present study, the term coarse-textured soils, which means gravel to coarse-grained sand, has been emphasized. The results of evaluating the statistical parameters testify to the accuracy and ability of this method.

**Key words:** *Otsu, Intermodes, ImageJ software, Granulation curve, porosity, computed tomography*

## ارزیابی پارامترهای توزیع اندازه ذرات و منافذ یک خاک درشت بافت با استفاده از پرتونگاری مقطعی اشعه ایکس (CBCT-scan)

ماجد قصیری صبری<sup>۱</sup> کمال گنجعلی پور<sup>۲</sup> و کمال نبی اللهی<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان  
 ۲- دکترای زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی تهران (کارشناس زمین شناسی شرکت مهندسین مشاور مهتاب قدس)  
 ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶	
<b>کلمات کلیدی:</b> <i>Otsu</i> <i>Intermodes</i> نرم افزار <i>ImageJ</i> منحنی دانه بندی، تخلخل، توموگرافی کامپیوتری	
* عهده دار مکاتبات E-mail: k.nabiollahi@uok.ac.ir	
	<p>علم پردازش تصویر، از علوم پرکاربرد در فنون مهندسی می باشد و از دیرباز مطالعات و تحقیقات گسترده ای در این زمینه صورت گرفته و پیشرفت های فراوانی حاصل شده است. سرعت گسترش این پیشرفت ها به حدی بوده است، که می توان تأثیر پردازش تصویر را در بسیاری از علوم و صنایع به وضوح مشاهده نمود. سرعت پایین و مخرب بودن روش های رایج قبلی اهمیت استفاده از تکنیک پردازش تصویر در محاسبه منافذ و توزیع اندازه ذرات را دوچندان می کند. در این تحقیق شش نمونه خاک دست خورده و شش نمونه دست نخورده درشت بافت (Sandy) نمونه برداری شد. با استفاده از نمونه های دست خورده منحنی دانه بندی و تخلخل کل با روش های معمول آزمایشگاهی اندازه گیری شد. از نمونه های دست نخورده هم تصاویر سی سی تی اسکن در آزمایشگاه عکس برداری تهیه شد و پس از پردازش تصاویر ویژگی های دانه بندی، تخلخل کل، تخلخل غیر مفید و مفید این نمونه ها تعیین شد. صحت سنجی نتایج ویژگی های تخمین زده شده با روش پردازش تصاویر سی سی تی اسکن نسبت به داده های به دست آمده از روش های آزمایشگاهی، با پارامترهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این در این پژوهش از ماده حاجب ویزپاک برای محاسبه تخلخل مفید استفاده شد و با کمک این ماده تخلخل مفید نسبت به تخلخل کل محاسبه شد. ضریب همبستگی پیرسون بین داده آزمایشگاهی و داده های اخذ شده از پردازش تصاویر سی سی تی اسکن ۰.۹۸ می باشد. نتایج ارزیابی صحت نشان داد (۱.۰۸۲، ۱.۲۲۹، ۱.۱۰۸ و ۲.۳۳۴ به ترتیب برای میانگین قدرمطلق انحرافات، میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین درصد خطای مطلق) که استفاده از تصاویر CBCT-scan و تکنیک پردازش تصویر با دقت قابل قبولی می تواند ویژگی های هندسی خاک های درشت بافت را تخمین بزند. همچنین براساس نتایج به دست آمده، بهترین روش آستانه گذاری تصاویر برای پردازش تصاویر در نرم افزار <i>ImageJ</i> روش <i>Ostu &amp; Intermodes</i> تعیین شد.</p>

## مقدمه

چین انجام دادند با بهره‌گیری از یک دستگاه سی‌تی‌اسکن صنعتی توانستند محاسبه درستی از سایز و نوع ساختار ماکروپورها، حجم سنگریزه، طول خط مستقیم ماکروپورسایتی، حجم کل تخلخل، سطح ویژه، توزیع قطر منافذ، تعداد و پراکندگی مکانی ماکروپورها را به صورت مستقیم انجام دهند. در مطالعه دیگری که توسط کارین مولر و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۸) در نیوزیلند انجام شد، با نمونه‌برداری از خاکی با کاربری مرتع در دوره بافت و ساختمان‌های متفاوت و عکس‌برداری از نمونه‌ها به وسیله دستگاه سی‌تی‌اسکن و مقایسه تجزیه و تحلیل عکس‌ها و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی به این نتیجه رسیدند که سی‌تی‌اسکن یک ابزار قدرتمند برای بررسی برخی ویژگی‌ها مربوط به جریان آب و گاز می‌باشد. واز و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۱) ضمن پژوهش بر روی دو خاک اکسی‌سول در کارلوس سیتی برزیل با استفاده از میکروسی‌تی‌اسکن صنعتی موفق به محاسبه مقدار خلل و فرج و توزیع قطر منافذ شدند. مطالعه دیگری توسط راب و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۴) در جنوب شرقی ملبورن استرالیا بر روی خاک‌های یک مزرعه حصارکشی شده که به مدت ۱۵ سال تحت چرا بوده صورت پذیرفت. آنها منحنی رطوبت به دست آمده در آزمایشگاه علوم خاک را با نتایج عکس‌های سی‌تی‌اسکن مقایسه کردند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که برای اندازه‌گیری ماکروپورهای بزرگتر از ۳۰۰ میکرومتر استفاده از تصاویر سی‌تی‌اسکن بهتر جواب می‌دهد. پیرس و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۹) در برزیل ۳ نوع سیستم مدیریتی بدون شخم، شخم حداقل و شخم رایج در کنار خاک یک جنگل ثانویه را نمونه‌برداری کردند و نمونه‌ها را با دستگاه میکروسی‌تی‌اسکن تصویربرداری و آنالیز نمودند و موفق شدند که حجم ماکروپورها و مزوپورها را به دست

سی‌تی‌اسکن برای اولین بار توسط هانزفیلد<sup>۱</sup> در قرن بیستم در سال ۱۹۷۲ اختراع شد. توموگرافی کامپیوتری در ابتدا فقط در پزشکی استفاده شد ولی خیلی زود در زمینه‌های دیگر مانند مهندسی، زراعت، زیست‌شناسی، فیزیک، شیمی و غیره، مورد استفاده قرار گرفت (۱۹ و ۱). همچنین در علوم خاک توسط پتروویچ<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۲ به عنوان پیش‌گام کاربرد سی‌تی‌اسکن جهت اندازه‌گیری تراکم خاک با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت. هاینزورث و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۸۳)، کرسطانا و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۸۶) در دو تحقیق مجزا به اندازه‌گیری محتوی حجمی آب در خاک‌ها با استفاده از تصاویر سی‌تی‌اسکن پرداختند که نتایج حاصل از تحقیقات آنها زمینه لازم جهت پذیرش استفاده از سی‌تی‌اسکن به عنوان تکنیکی مقرون به صرفه و با دقت و کیفیت بالا را میسر ساخت. اخیراً با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه توموگرافی کامپیوتری در سطح جهانی، در مقیاس میکرومتری استفاده از نسل‌های مختلف اشعه ایکس برای بررسی برخی از پدیده‌های مختلف در علوم خاک آغاز شده‌است. در پژوهشی که توسط لوو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) در آمریکا به منظور استفاده از تکنیک سی‌تی‌اسکن برای برآورد برخی از ویژگی‌های مختلف خاک انجام شد، نتایج حاصل از کاربرد سی‌تی‌اسکن بر روی دو کاربری اراضی و دو نوع خاک متفاوت توسط آنها نشان داد که ویژگی‌های ماکروپور، سطح ویژه کلی، دانسیته شبکه‌های ماکروپور، دانسیته طول ماکروپور و دانسیته گره‌ها را می‌توان با دقت و اعتبار بالا مشخص کرد. منگ و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) در پژوهش خود که بر روی خاک جنگل‌های شمال بیجینگ در

1- hounsfield

2- Petrovic

3- Hainsworth *et al.*4- Crestana *et al.*5- Luo *et al.*6- Meng *et al.*7- Müller *et al.*8- Vaz *et al.*9- Rab *et al.*10- Pires *et al.*

تخریب تکنوژنیک و آگروژنیک خاک (تراکم، از دست دادن مواد آلی و غیره)، انجام توصیفات کمی از ساختار سه بعدی خاک و سایر ویژگی‌ها مهم خاک استفاده می‌شود.

هدف اصلی از انجام این پژوهش: الف) استفاده از سی تی اسکن<sup>۲</sup> (CBCT-scan) در علوم خاک برای اولین بار در ایران. ب) مقایسه توانایی سی بی سی تی اسکن از نظر کیفیت نتایج با روش‌های سنتی مرسوم. ج) شناسایی بهترین فیلتر و روش باینری کردن (آستانه گذاری) می‌باشد. مزایای ویژه روش توموگرافی فرصت‌های خوبی برای مطالعه فرآیندهای خاک در یک سطح کیفی جدید فراهم می‌کند. جهت گیری اولویت‌های توسعه مطالعات توموگرافی در علوم خاک در دنیا مشخص شده است. یکی دیگر از اهداف این پژوهش آشنا نمودن هر چه بیشتر پژوهشگران با کاربرد تکنولوژی توموگرافی کامپیوتری<sup>۳</sup> (CT- scan) در مطالعات علوم خاک است.

### مواد و روش‌ها

#### نمونه برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی

منطقه نمونه برداری جهت انجام این پژوهش محور دیواندره - سقز در استان کردستان بود که تعداد شش نمونه خاک دست خورده و دست نخورده در ناحیه‌ای با بافت درشت (Sandy) برداشت شد (در مجموع ۱۲ نمونه). نمونه‌های دست نخورده بوسیله استوانه‌های فلزی نمونه برداری با قطر شش سانتی متر و ارتفاع دوازده سانتی متر برداشت شدند.

در نمونه‌های دست خورده دانه بندی به روش ASTM D421، و تخلخل نمونه‌ها با استفاده از روابط فازی در مکانیک خاک و به روش مستقیم اندازه گیری شد (۲). در یک آزمایشگاه رادیولوژی با بهره گیری از دستگاه سی بی سی تی اسکن پلانمکا پرومکس سه بعدی<sup>۴</sup>

پیاورند. هان و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) از سی تی اسکن پزشکی فیلیپس به منظور مشاهده ساختار سه بعدی منافذ خاک با پرتونگاری رایانه‌ای استفاده کردند و در نهایت پس از به دست آوردن نتایج، این تکنیک را روشی بسیار مناسب جهت مشاهده سریع و غیرمخرب معماری فضای داخلی خاک دانستند. در سال‌های اخیر در برزیل، مهندسين و محققين موفق به طراحی و ساخت اسکنرهای قابل حمل شدند که با موفقیت توانستند دستگاه را به محل مورد مطالعه برده و تصاویر اشعه ایکس و گاما را از خاک بگیرند (۱۲). از دیگر استفاده‌های موفقیت آمیز از اشعه ایکس سی تی اسکن می‌توان به مواردی مثل توصیف شبکه‌های منافذ، توزیع زیست توده، توزیع ریشه، جرم مخصوص ظاهری، توزیع مواد آلی و پارامترهای انتقال اشاره نمود (۵، ۱۳، ۱۴، ۱۶، ۲۰، ۲۳). یکی از مهم ترین مراحل در آنالیز تصاویر سی تی اسکن پردازش تصویر است. به مجموعه فعالیت‌هایی که برای آنالیز تصویر در زمینه‌های مختلف انجام می‌شود، علم پردازش تصویر گویند. استفاده از پردازش تصویر جهت استخراج اطلاعات در بسیاری از علوم و رشته‌ها کاربرد دارد. به عنوان مثال، در علوم زمین شناسی از تکنیک‌های پردازش تصویر جهت استخراج و مطالعه بافت خاک نتایج موفقیت آمیزی حاصل شده است (۷). توسعه کامپیوتری روش پردازش و تحلیل تصاویر، فرآیند شناسایی و اندازه گیری اتوماتیک مشخصات دانه بندی را تسهیل نموده است (۹). با توجه به عدم وجود مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک خاک در بسیاری از پروژه‌های مهندسی، می‌توان روش پردازش تصویر را به عنوان روشی مناسب جهت استخراج دانه بندی ذرات خاک و دیگر مشخصات خاک مورد استفاده قرار داد. پردازش تصاویر سه بعدی سی تی اسکن و داده‌های سه بعدی مورفولوژی سنگدانه‌ها و ساختار فضای منافذ خاک برای بهبود کیفیت محاسبات ویژگی‌ها هیدروفیزیکی، بررسی

2- Cone Beam Computed Tomography  
3- Computed Tomography

1- Han *et al.*



شکل (۲) دستگاه سی بی سی تی اسکن پلانمکا پرومکس سه بعدی

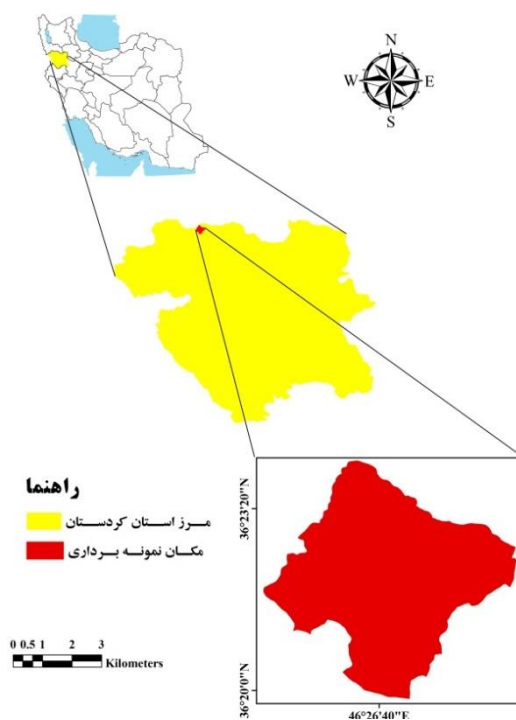
Figure (2) Planmeca Promax 3D CBCT scan device

### آنالیزهای عکس برداری

استخراج موفقیت آمیز اطلاعات مفید از تصاویر معمولاً نیاز به موفقیت در دو مورد اصلی دارد. اولین مورد این است که بر محدودیت‌های کیفیت تصویر غلبه کرد و محتوای اصلی تصویر را به وضوح مشاهده کرد. این مرحله را پردازش تصویر می‌نامند که خروجی آن تصویر دیگری است. و مورد دوم محاسبه اندازه‌گیری‌های معنی‌دار است که این مرحله تجزیه و تحلیل تصویر نام دارد. به طور کلی برای رسیدن به هدف مذکور دو مرحله اصلی شامل پردازش و اندازه‌گیری را باید پشت سر گذاشت.

**پردازش تصاویر:** در این تحقیق از نرم‌افزار ImageJ جهت پردازش تصاویر CBCT-scan تهیه شده از نمونه‌های دست‌نخورده خاک استفاده شد. تصاویر مربوطه با استفاده از نرم‌افزار ImageJ V1.4 به تصویر باینری تبدیل شد و سپس آنالیزهای مورد نیاز بر روی برش‌های تصاویر که به صورت سطح مقطع‌های پشت سرهم و منظم بود، انجام شد. همچنین برای مشاهده سه‌بعدی نمونه خاک و ساختار داخلی آن از نرم‌افزار Planmeca Romexis Viewer استفاده شد. نرم‌افزار ImageJ یک برنامه قدرتمند برای آنالیز

سه‌بعدی<sup>۱</sup> از نمونه‌های دست‌نخورده خاک تصویربرداری به عمل آمد (شکل ۲). دستگاه توموگرافی کامپیوتری پلانمکا پرومکس سه‌بعدی، یک دستگاه توموگرافی مخروطی می‌باشد. مشخصات فنی این دستگاه به شرح ذیل است: ولتاژ آند ۵۴-۹۰ کیلوولت، جریان آند ۱-۱۴ میلی آمپر، نقطه کانونی ۰.۵ میلی متر، دارای آند ثابت، دارای آشکارساز تصویر صفحه تخت، حصول تصویر با چرخش تکی ۲۰۰ درجه، زمان اسکن شیء ۷.۵-۲۷ ثانیه و زمان بازسازی آن ۲-۲۵ ثانیه می‌باشد. برای تصویربرداری نمونه‌های تحت مطالعه، ولتاژ آند دستگاه روی ۹۰ کیلو ولت و جریان آند آن روی ۴ میلی آمپر تنظیم شد.



شکل (۱) موقعیت منطقه نمونه برداری

Figure (1) location of sampling area

مشخص باشد از روش آستانه گذاری سراسری یا ساده استفاده می شود. نحوه عملکرد روش های آستانه گذاری سراسری تصاویر بدین صورت است که تصویر به دو کلاس اصلی پس زمینه و پیش زمینه بخش بندی می شود و روش سعی در یافتن بهترین آستانه برای تقسیم هیستوگرام تصویر به دو کلاس دارد. یعنی زمانی که تفاوت بین اشیاء پیش زمینه و پس زمینه بسیار مشخص باشد می توان به سادگی از یک مقدار آستانه استفاده کرد تا هر دو اشیاء را از هم تفکیک کند. بنابراین، در این نوع آستانه گذاری، مقدار آستانه T صرفاً به خاصیت پیکسل و مقدار سطح خاکستری تصویر بستگی دارد.

در مجموع ۱۷ روش آستانه گذاری سراسری برای باینری کردن عکس ها در نرم افزار ImageJ پیشنهاد شده است. در این تحقیق ۱۵ روش استاندارد برای باینری کردن عکس ها مورد بررسی قرار گرفت و بهترین روش انتخاب شد (شکل ۳). البته بسته به هدف تحقیق می توان توزیع قطر منافذ، یا توزیع سایز ذرات را محاسبه کرد. یعنی می توان دانه یا پس زمینه ( فضای خالی بین دانه ها) را هدف محاسبه و پردازش قرار داد. برای مثال منافذ پس از انجام این مرحله فضاهای خالی که در واقع همان منافذ می باشند از رنگ سیاه در زمینه سفید، به رنگ سفید در زمینه سیاه تبدیل می شوند. یعنی پس زمینه یا منافذ مورد پردازش قرار می گیرد و بقیه محاسبات بر روی این نقاط انجام می شود. ضمن اینکه ارزش هر پیکسل ۰ (صفر) یا ۲۵۵ است، و حد میانه وجود ندارد.

### تعیین مرز دانه ها یا فضاهای خالی

این دستور روشی است برای جدا کردن خودکار یا برش ذرات مجزایی که در تصاویر با هم اتصال پیدا کرده اند. در این روش نرم افزار ابتدا نقشه فاصله اقلیدسی<sup>۱</sup> (EDM) را محاسبه کرده و نقاط خورده شده نهایی<sup>۲</sup> (UEP) را پیدا می کند. سپس هر کدام از UEP ها را تا حد امکان تا رسیدن به لبه ذره یا لبه ناحیه ی دیگر

تصاویر است و کاربردهای مختلفی دارد. این نرم افزار که توسط موسسه ملی بهداشت ایالات متحده آمریکا طراحی شده است در روی پلاتفورم جاوا نوشته شده و استفاده بسیاری در تصویربرداری پزشکی دارد. کاربرد این نرم افزار برای مهندسين بدست آوردن توزیع اندازه ذرات، اندازه گیری سایز دانه ها و بسیاری موارد دیگر می باشد. با این نرم افزار می توان درصد فازها، تعداد ذرات و اندازه ذرات را محاسبه کرد. در زمین شناسی می توان به کمک این نرم افزار مساحت، محیط، قطر، کرویت، و سایر مشخصات هندسی را به دست آورد. مراحل کلی پردازش و استخراج اطلاعات هندسی بر روی تصاویر تهیه شده از نمونه های خاک در این نرم افزار به شرح زیر می باشد:

### مقیاس دهی به تصاویر

در این مرحله برای عکس ها مقیاس مکانی تعریف می شود تا نتایج اندازه گیری در واحدهای کالیبره شده مانند میلی متر یا اینچ ارائه شود. تنظیم نسبت ابعاد پیکسل (pixel aspect ratio) به مقداری غیر از ۱.۰ پشتیبانی از مقیاس های مختلف عمودی و افقی را ممکن می کند.

### تبدیل تصویر به تصویر خاکستری ۸ بیتی

در این مرحله تصاویر CT-scan از ۱۶ بیت به یک عکس ۸ بیت خاکستری تبدیل شد و ارزش هر پیکسل تصویر بین ۰-۲۵۵ قرار می گیرد.

### استفاده از فیلترها

برای پردازش بهتر عکس ها و حذف نویزها در نرم افزار فیلترهایی به صورت پیش فرض وجود دارد. البته امکان تعریف و افزودن فیلترهای جدید نیز وجود دارد. و در صورت نیاز می توان از آنها استفاده کرد.

### تبدیل تصاویر به عکس باینری

در نرم افزار ImageJ راه های مختلفی برای تبدیل عکس های مختلف به عکس های باینری وجود دارد. تمام این روش ها اصطلاحاً آستانه گذاری یا thresholding نامیده می شوند. هنگامی که توزیع شدت روشنایی بین اجسام پیش زمینه و پس زمینه بسیار

1- Euclidean Distance Map  
2- Ultimate Eroded Points

قیصری صبری و همکاران: ارزیابی پارامترهای توزیع اندازه ذرات...

برای ذرات انتخاب شده مناسب‌ترین بیضی را ترسیم می‌شود. به عبارتی دیگر، بزرگترین و کوچکترین قطر ذرات برابر با بزرگترین و کوچکترین قطر بیضی در برگرفته ذرات است.

### اندازه‌گیری متغیر هدف

در این مرحله متغیرهای انتخاب شده در تصاویر باینری شمارش و اندازه‌گیری می‌شوند. در شکل شماره ۵ مراحل انجام کار در نرم‌افزار ImageJ ارائه شده است.

در این تحقیق در ابتدا در آزمایشگاه و در آزمون دانه‌بندی، میزان درصد وزنی دانه‌های خاک در بالای هر الک محاسبه و توزیع اندازه ذرات و منحنی دانه‌بندی خاک ترسیم شد

سپس برای تعیین دانه‌بندی براساس تصاویر پردازش به شرح ذیل عمل شد:

۱- پردازش تصاویر و تعیین مساحت هر کدام از ذرات برای هریک از روش‌های باینری کردن تصاویر (روش منتخب).

منبسط می‌کند. تقسیم‌بندی ذرات برای اشیاء محدب صاف که بیش از حد با هم هم‌پوشانی ندارند بهتر عمل می‌کند. در این حالت در واقع مرز دانه‌های خاک مشخص می‌شود، شکل ۴ نمایی شماتیک از این مرحله را نمایش می‌دهد.

### انتخاب متغیر هدف

در این مرحله متغیرهای مورد نیاز برای اندازه‌گیری انتخاب می‌شوند که مهم‌ترین این متغیرها عبارت‌اند از:

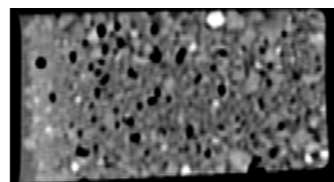
### مساحت دانه‌ها یا فضاها

مساحت قسمتهای انتخاب شده از تصویر براساس پیکسل مربع است. اما در نرم افزار این قابلیت وجود دارد تا تصاویر را با واحدهای استاندارد دیگری مانند میلی‌متر یا اینچ مقیاس دهی نمود.

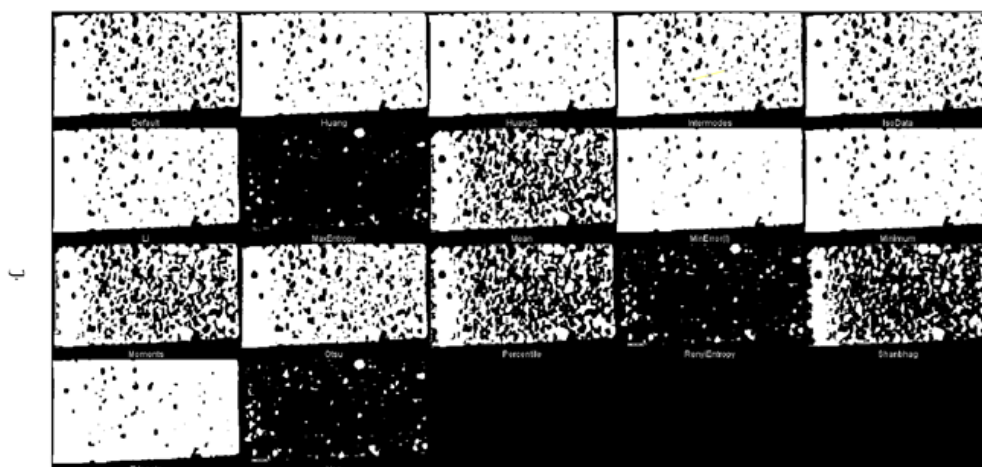
### محیط ذرات

طول مرز بیرونی مناطق انتخاب شده (ذرات یا هر جزء منتخب دیگر) را بیان می‌کند. (در این تحقیق محیط ذرات یا منافذ هدف اندازه‌گیری می‌باشد). با این تکنیک حتی می‌توان سطح ویژه ذرات را با کمک مساحت و محیط محاسبه کرد.

### بیضی برازش شده بر دانه‌ها یا ذرات



الف

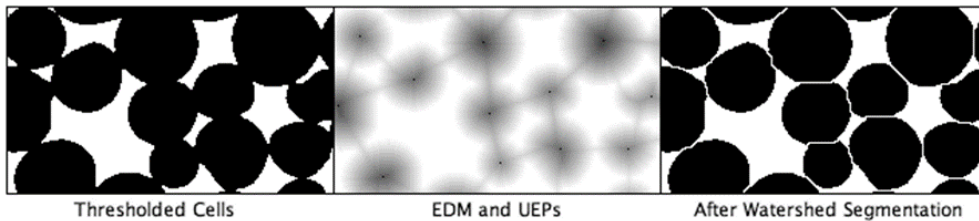


شکل (۳) روش‌های مختلف Thresholding در نرم‌افزار ImageJ برای یکی از نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق (الف) تصویر خام (CBCT-scan؛ ب) تصویر باینری شده به روش‌های مختلف.



Figure (3) Different thresholding methods in imagej software for one of the samples used in this research

A) Raw CBCT-scan Image B) The generated binary image by different methods



شکل (۴) فرآیند مجزا کردن (watershed filter) ذرات در ImageJ (برگرفته از راهنمای نرم افزار)

Figure (4) separation processes of particles (Watershed filter) in ImageJ (Taken from software manual)

۲- تعیین درصد فضای اشغال شده توسط فضاهای بین ذرات نسبت به سطح مقطع نمونه برای هر مقطع.  
۳- تعیین میانگین درصد فضای اشغال شده توسط فضاهای بین ذرات نسبت به سطح مقطع نمونه بر اساس اندازه گیری های صورت گرفته در همه مقاطع و معرفی آن.

۲- رسم منحنی فراوانی تجمعی بر اساس مساحت تجمعی ذرات ریزتر از مساحت چشمه های هر الک دانه بندی.

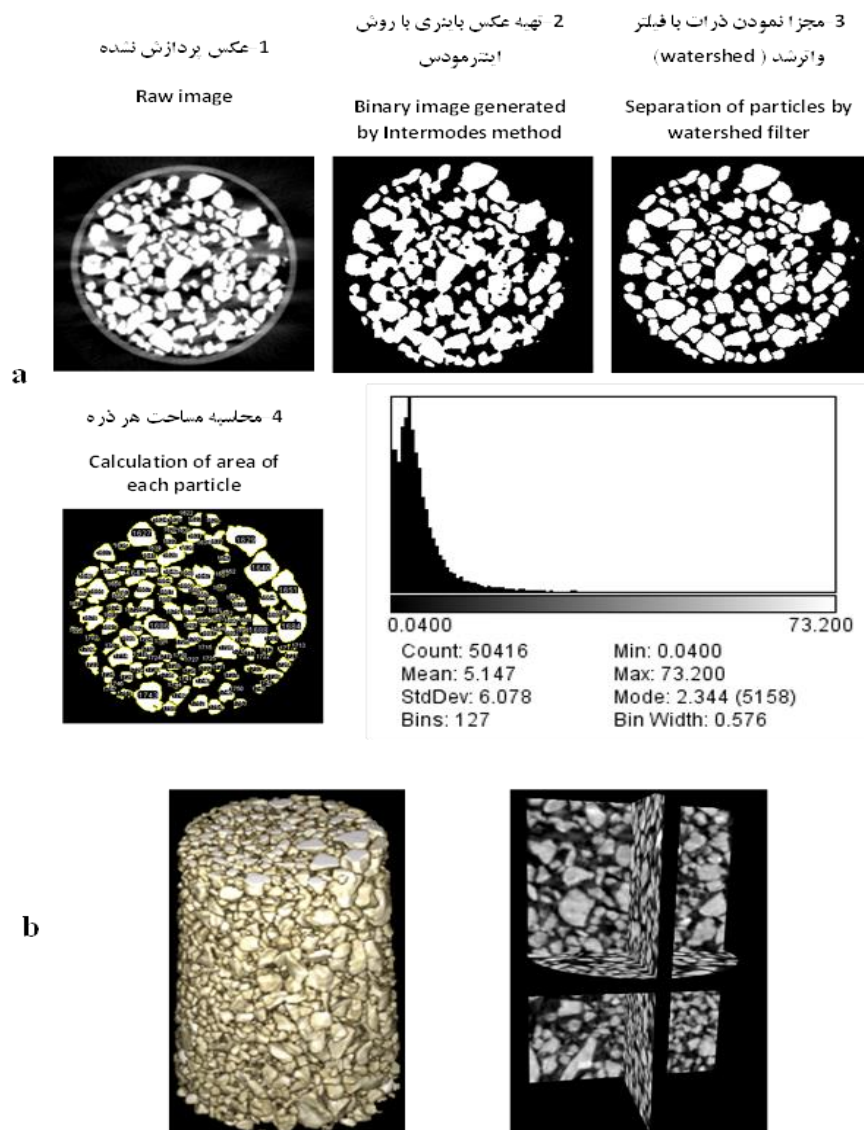
میزان تخلخل کل و توزیع آن نیز با انتخاب فضاهای خالی به جای ذرات به عنوان متغیر هدف امکان پذیر است. برای محاسبه تخلخل مفید و غیرمفید از ماده حاجب ویزپاک<sup>۱</sup> استفاده شد. در ابتدا ۳ غلظت مختلف ۲۰ میلی لیتر بر لیتر، ۱۵ میلی لیتر بر لیتر و ۱۰ میلی لیتر بر لیتر از این ماده تهیه شد. بدیهی هرچه غلظت ماده حاجب بالاتر باشد کیفیت نمایش آن در تصویر اشعه ایکس بالاتر خواهد رفت. اما از آنجا در محیط طبیعی بحث اندرکنش خاک و آب مطرح است با کمک قیف مارش ویسکوزیته این ۳ غلظت از ماده حاجب محاسبه و نزدیک ترین آنها به ویسکوزیته آب مقطر که غلظت ۱۰ میلی لیتر بر لیتر بود برای انجام عکس برداری انتخاب شد. بررسی تصاویر اخذ شده با هر سه غلظت نشان دادند که غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر نیز اهداف تحقیق حاضر را تامین می نماید. نمونه چند دقیقه قبل از تصویربرداری با محلول فوق الذکر اشباع شد.

برای تعیین تخلخل مفید و غیرمفید به صورت کلی طبق مراحل زیر عمل شد:

۱- پردازش تصاویر باینری شده به روش Intermodos (تمامی اسلایدهای یک نمونه) و تعیین مساحت تمامی ذرات یا فضاها.

1- Visipaque

قیصری صبری و همکاران: ارزیابی پارامترهای توزیع اندازه ذرات...



شکل (۵) الف) مراحل مختلف پردازش تصویر ب) مقایسه تصویر ImageJ (سمت راست) و Planmeca Romexis Viewer (سمت چپ)  
Figure (5) A) Stages of image processing B) Comparison of ImageJ Picture (right) and Planmeca Romexis Viewer (left)

آزمایشگاه خاکشناسی از طریق روابط فازی به دست آمد مقایسه و از طریق پارامترهای آماری زیر عملکرد روش سی بی سی تی اسکن مورد ارزیابی قرار گرفت:

میانگین قدر مطلق انحرافات

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n}$$

میانگین مربعات خطا

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}$$

### اعتبار سنجی نتایج

در نهایت پس از تجزیه و تحلیل عکس‌های سه بعدی سی بی سی تی اسکن و کمی کردن اندازه دانه‌ها و فضاهای خالی خاک نتایج آن با منحنی دانه بندی و تخلخل اندازه گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شد. در واقع حجم کل منافذ و توزیع اندازه ذرات خاک هر نمونه که بوسیله کمی سازی تصاویر اشعه ایکس محاسبه شد با حجم کل منافذ و توزیع اندازه ذرات خاک که در

آستانه‌گذاری به دو روش آستانه‌گذاری سراسری و آستانه‌گذاری محلی طبقه‌بندی می‌شود. اگر آستانه انتخاب شده در عملیات پردازش تصویر برای کل تصویر ثابت نگه‌داشته شود آستانه‌گذاری سراسری نامیده می‌شود. اگر مقدار آستانه به گونه‌ای انتخاب شود که با اشیاء موجود در تصویر تغییر کند آستانه‌گذاری محلی نامیده می‌شود.

در شرایطی که تصاویر دارای شرایط روشنایی متفاوتی در نقاط مختلف باشد استفاده از آستانه‌گذاری ساده ممکن است مفید نباشد. بنابراین بهتر است از آستانه‌گذاری محلی یا تطبیقی استفاده شود. در این حالت برای نواحی کوچک از تصویر آستانه‌های مختلف محاسبه می‌شود؛ بنابراین آستانه‌های متفاوتی برای نواحی مختلفی از تصویر به دست می‌آید. از این روش برای بالابردن کنتراست تصاویر هم استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به ماهیت تصاویر سی تی اسکن، آستانه‌گذاری سراسری ترجیح داده شد. البته در ادامه نشان داده خواهد شد که استفاده از آستانه‌گذاری ساده نتایج مطلوبی ارائه می‌دهد.

نرم‌افزار ImageJ از ۱۷ روش آستانه‌گذاری سراسری برای باینری کردن تصاویر استفاده می‌کند که روش پیش‌فرض نرم‌افزار همان روش IsoData است که کمی تغییرات در آن به وجود آمده است. در شکل ۳ تمامی ۱۷ روش نمایش داده شده است. اما در این تحقیق نویسندگان از ۱۵ الگوریتم سراسری استاندارد (global thresholding) برای پردازش تصاویر در ImageJ استفاده کرده‌اند: Intermodes, Huang, Mean, MaxEntropy, Li, IsoData, Otsu, Moments, Minimum, MinError, Shanbhag, RenyiEntropy, Percentile, Yen و Triangle. هرکدام از این روش‌ها بر اساس رویکردهای متفاوتی که نسبت به ویژگی‌های مختلف تصویر دارند کار می‌کنند. به عنوان مثال، الگوریتم‌های Li و MaxEntropy مقدار آستانه را با توجه به آنتروپی

ریشه میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}}$$

میانگین درصد خطای مطلق

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n} \times 100$$

ضریب همبستگی پیرسون

$$R^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

که در آنها  $A_t$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $F_t$  مقادیر مشاهداتی،  $n$  تعداد داده‌ها،  $X$  و  $Y$  به ترتیب مقادیر مطلق مشاهداتی و پیش‌بینی شده،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  به ترتیب مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است.

### نتایج و بحث

مهم‌ترین نکته در پردازش تصویر روش باینری کردن تصاویر است در این تحقیق تصاویر به صورت دو بعدی تحت پردازش قرار گرفتند. دستگاه CBCT هر ۰/۲ میلی‌متر یک مقطع طولی یا عرضی از تصویر تهیه می‌کند به عبارت دیگر می‌توان گفت که دستگاه مورد اشاره در حال حاضر برای پردازش دانه‌بندی ذرات بزرگتر از این اندازه مناسب است همچنین فضاها و ماکروپورهای بزرگتر از این اندازه با استفاده از این تکنیک قابل تحلیل هستند هرچند دستگاه‌های دقیق‌تر تا ۵ نانومتر هم در کشور وجود دارند و می‌توان برای تحلیل خاک‌های ریزدانه‌تر مورد استفاده قرار گیرند.

تکنیک آستانه‌گذاری یکی از تکنیک‌های مهم در بخش‌بندی تصویر است. این تکنیک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x,y) > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } f(x,y) \leq \text{threshold} \end{cases}$$

در اینجا threshold مقدار آستانه است.  $x, y$  مختصات نقطه دارای مقدار آستانه است.  $f(x,y)$  یا همان پیکسل‌های تصویر خاکستری هستند و  $g(x,y)$  تصویر آستانه‌گذاری شده است.

پردازش با نرم افزار ImageJ محاسبه کرده‌اند. آنها با کمک گرفتن از توموگرافی کامپیوتری منافذ بزرگ خاک‌های با ساختار متفاوت را به خوبی شناسایی کردند.

تخلخل کلی خاک مجموع تخلخل‌های موثر و غیرمفید است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد می‌توان تخلخل کلی یک نمونه خاک را با استفاده از تصاویر CBCT به دست آورد، بنابراین اگر بتوان مقدار هر کدام از تخلخل‌های مفید یا غیرمفید تعیین کرد دیگری نیز قابل محاسبه خواهد بود. در این تحقیق محققین روشی نوین برای تعیین تخلخل غیرمفید ارائه نمودند.

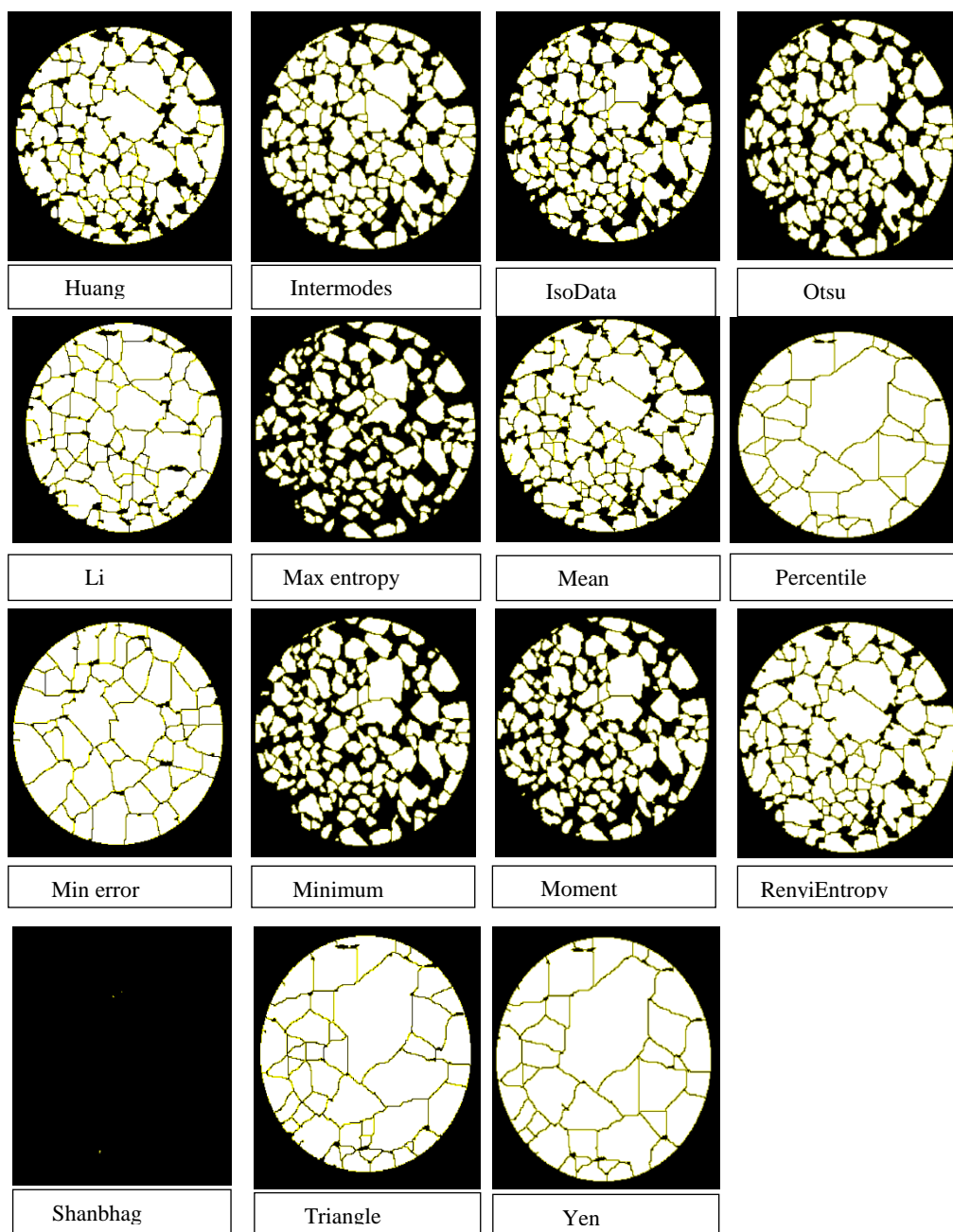
هنگامیکه یک نمونه خاک اشباع می‌شود به علت عدم ارتباط منافذ غیرمفید با دیگر منافذ موجود در خاک، این فضاها توسط آب اشغال نمی‌شود و همچنان دارای هوا می‌باشند بنابراین در صورتی که آب با ماده آشکارساز اشعه ایکس موسوم به ماده حاجب مخلوط شود می‌توان تمام فضاهایی که توسط آب اشغال شده است را از منافذی که توسط هوا اشغال شده‌اند تفکیک نمود. پس با همان روش پردازشی که پیشتر توضیح داده شد می‌توان فضاهای اشباع نشده در هر اسلایس را تعیین نمود. به عبارت دیگر می‌توان تخلخل غیرمفید را در هر اسلایس محاسبه نمود و تفاضل تخلخل کل و غیرمفید با تخلخل موثر برابر خواهد بود.

در شکل شماره ۸ تخلخل محاسبه شده برای تعدادی از اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه نمایش داده شده است، همچنین در شکل شماره ۹ نمودار تخلخل کل محاسبه شده برای تمامی اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه نشان داده شده است. میانگین تخلخل کل اسلایس‌ها برابر ۴۴.۰۳ درصد می‌باشد که تقریباً با ۴۵.۶ درصد محاسبه شده براساس نمونه آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارد.

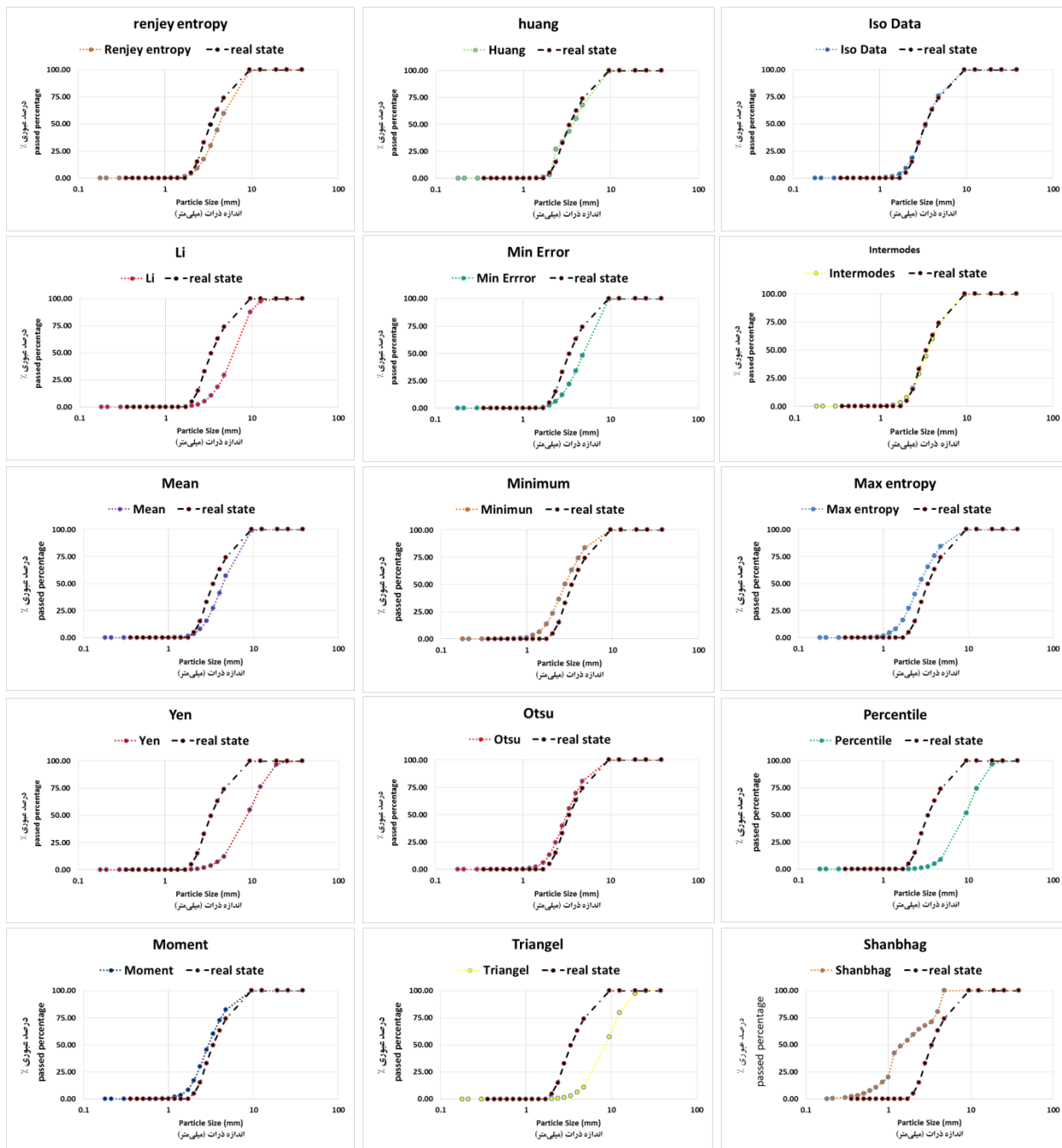
(محتوای اطلاعات) تصویر انتخاب می‌کنند. از طرف دیگر، الگوریتم IsoData به هیستوگرام تصویر اشاره دارد، در حالی که Triangle یک روش هندسی است. متداول‌ترین روش‌های آستانه‌گذاری سراسری، روش Otsu و آستانه‌گذاری مبتنی بر آنتروپی است. الگوریتم Otsu از محبوب‌ترین روش‌های آستانه‌گذاری ساده است. البته تکنیک‌های آستانه‌گذاری محدود دیگری مانند کیتلر و ایلینگورث، کاپور، تسای، هوانگ و ین و همکاران وجود دارد.

در شکل ۶ پردازش نهایی تصاویر و تشخیص ذرات برای تمامی روش‌های مختلف باینری کردن تصاویر نمایش داده شده است. با نگاه کردن به تصاویر تقریباً می‌توان گفت که تعدادی از روش‌های باینری کردن تصاویر مناسب اهداف این تحقیق نیستند اما می‌توان گفت که روش‌های Max, Otsu, IsoData, Minimum, Intermodes entropy و Moments مناسب‌ترین روش‌ها هستند. منحنی دانه‌بندی حاصل از روش‌های باینری کردن تصاویر در شکل شماره ۷ آورده شده است، در این شکل منحنی دانه‌بندی آزمایشگاهی نیز آورده شده است. از شکل ۷ می‌توان فهمید نتایج حاصل از تصاویر باینری شده با روش‌های Otsu, Intermodes و IsoData بهترین هماهنگی را با نمونه آزمایشگاهی دارد. بنابراین بر همین اساس روش Intermodes برای باینری کردن تصاویر در ادامه این تحقیق انتخاب شد. هنگامی که هیستوگرام مربوط به یک تصویر دو حالت (bimodal) یا چند حالت (multimodal) است، بهترین مقدار آستانه، انتخاب کمترین مقدار بین دو قله یا قله‌های هیستوگرام تصویر است. روش انتخابی نیز بر این مبنا عمل می‌کند.

تعدادی از محققان مانند کارین مولر و همکاران (۲۰۱۸) ماکروپورهای خاک را بوسیله عکس‌های سی تی اسکن و



شکل (۶) انواع روش‌های باینری کردن  
Figure (6) Types of binary methods



شکل (۷) مقایسه منحنی دانه‌بندی آزمایشگاهی و منحنی دانه‌بندی براساس تصاویر پردازش شده (تصاویر باینری شده با روش‌های مختلف)

Figure (7) Comparison curve of laboratory particle size distribution curve and the curve based on processed images (generated binary images by different methods)

اسلایس نیز در کنار آن ذکر شده‌است. در شکل ۱۱ نمودار تخلخل غیر موثر بر اساس تصاویر پردازش شده برای تمامی اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه نشان داده شده است. بر

در شکل شماره ۱۰ تعدادی اسلایس پردازش شده از تصویر سی‌تی اسکن نمونه اشباع شده با مخلوط ماده حاجب و آب نمایش داده شده‌است و میزان تخلخل هر

مواد مختلفی باشند. هرچند روش‌های زیادی برای انجام تقسیم‌بندی تصویر ایجاد شده است.

**جدول (۱) مقایسه آماری نتایج سی‌بی‌سی تی اسکن با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای میزان حجم منافذ نمونه‌ها**

**Table (1) Statistical comparison of CBCT scan results with laboratory results obtained for pore volume of samples**

پارامترهای آماری Statistical parameters	مقدر value <sup>1</sup>
میانگین قدر مطلق انحرافات MAD	1.082
میانگین مربعات خطا MSE	1.229
ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	1.108
میانگین درصد خطای مطلق MAPE	2.334
ضریب همبستگی پیرسون R <sup>2</sup>	0.98

حداقل از اواسط قرن بیستم، توزیع اندازه منافذ (PSD)<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری برای توصیف ساختار فیزیکی خاک به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. قبلاً ثابت شده است که اشکال هندسی مختلف منافذ، تاثیر بسزایی در حرکت املاح و هوا در خاک دارند. در روش نگه‌داشت آب، شکل همه‌ی منافذ بدلیل عدم امکان مشاهده مستقیم به صورت کروی فرض می‌شود، در حالیکه در واقعیت منافذ دارای اشکال هندسی بسیار گوناگونی هستند. سی تی اسکن به ما قابلیت مشاهده اشکال و پیچ‌خوردگی‌های منافذ را می‌دهد.

ضمن اینکه باید به این نکته توجه داشت که در روش‌های سنتی رایج همه‌ی منافذ محاسبه می‌شوند اما روش سی تی اسکن با کمک ماده حاجب، قدرت تشخیص تخلخل مفید نسبت به تخلخل غیرمفید را فراهم می‌کند. از مزایای دیگر این تکنیک جدید در دسترس بودن دستگاه‌های سی تی اسکن و سی بی سی تی اسکن در اکثر شهرها و ارزان بودن عکس‌برداری با این دستگاه‌هاست. کیفیت تصاویری که با این دستگاه‌های

اساس نتایج نمایش داده شده در شکل ۱۱ میانگین تخلخل غیرموثر نمونه تحت مطالعه حدود ۶.۵۳ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که تخلخل مفید نمونه حدود 37.5 درصد می‌باشد. ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های اخذش از تصاویر سی بی سی تی اسکن 0.98 می‌باشد. بقیه نتایج اعتبارسنجی روش پردازش تصاویر سی بی سی تی اسکن نسبت به نتایج آزمایشگاه خاکشناسی در جدول (۱) آمده است.

نتایج ارزیابی صحت نشان داد که استفاده از تصاویر CBCT-scan و تکنیک پردازش تصویر با دقت قابل قبولی می‌تواند ویژگی‌های هندسی خاک‌های درشت بافت را تخمین بزند.

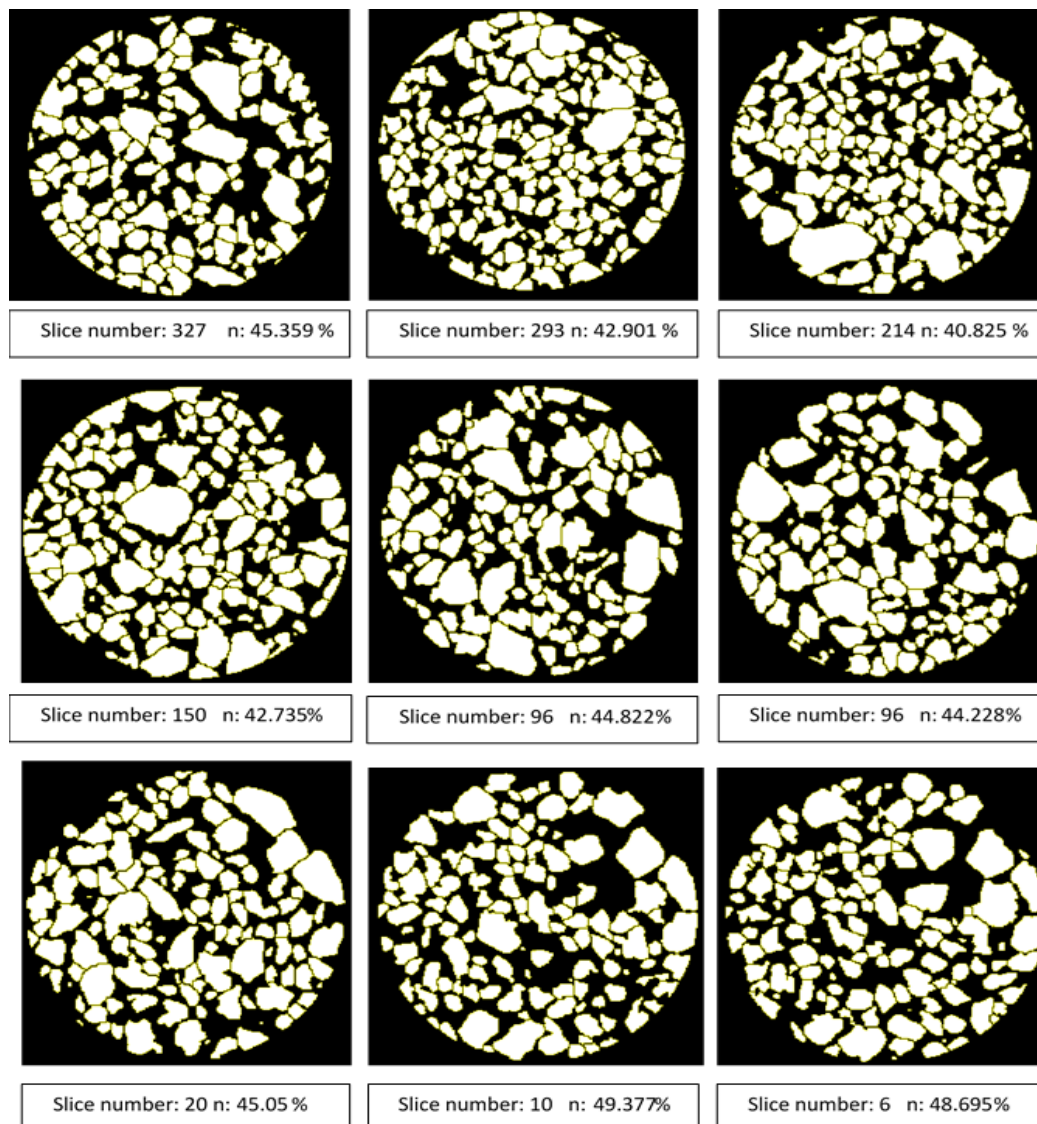
جدای از این‌ها، تکنیک سی تی اسکن به محقق اجازه مشاهده مستقیم ساختار داخلی نمونه را می‌دهد که در روش‌های قبلی این امکان بدون آسیب رساندن و دست‌کاری نمونه وجود نداشت. در مقایسه با توموگرافی کامپیوتری، روش معمول توصیف خاک با مقاطع نازک و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باعث صرف وقت و انرژی زیادی می‌شود. این روش‌ها معمولاً نمونه‌ها را از بین می‌برند. انجام آزمایش‌ها و تعداد مقاطع نازک تهیه شده از یک نمونه معین (بسته به فاصله بین برش‌های همسایه) بسیار محدود است. وضوح این روش با ضخامت قسمت‌های نازک که معمولاً حدود ۲۰-۳۰ میکرومتر است، محدود می‌باشد. در مورد توموگرافی رایانه‌ای، وضوح نظری تصویرها فقط با طول موج منبع تابش محدود می‌شود. در عین حال، توموگرافی کامپیوتری نیاز به ابزارهای پیشرفته‌ای دارد، در حالی که ابزارهای مورد نیاز برای تولید و توصیف مقاطع نازک و سایر آزمون‌های آزمایشگاهی نسبتاً ساده هستند و معمولاً به راحتی در دسترس قرار می‌گیرند.

یک مشکل جدی ذاتی برای روش توموگرافی کامپیوتری، ضرورت انتخاب مقادیر آستانه برای تمایز بین مواد مختلف (فازها) نمونه است (تقسیم‌بندی تصاویر). کمی‌سازی داده‌ها این مسئله را پیچیده‌تر می‌کند زیرا پیکسل‌ها یا وکسل‌ها در مرزهای فاز ممکن است حاوی

1- Pore Size Distribution

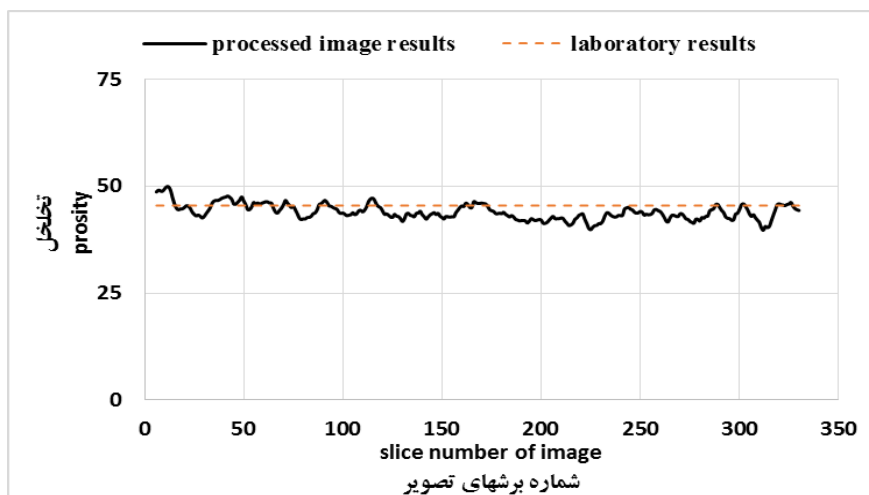
امکان برش نمونه آماده شده وجود دارد، چون نمونه از هم می‌پاشد.

اشعه ایکس گرفته می‌شود بسیار با دقت و با کیفیت بالا می‌باشد که به محقق اجازه تجزیه و تحلیل سریع و تفسیر خوبی می‌دهد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به قابل تکرار آن برای هر نمونه به تعداد دلخواه، اشاره کرد. به طور مثال در روش سطح مقطع سریالی فقط یک بار

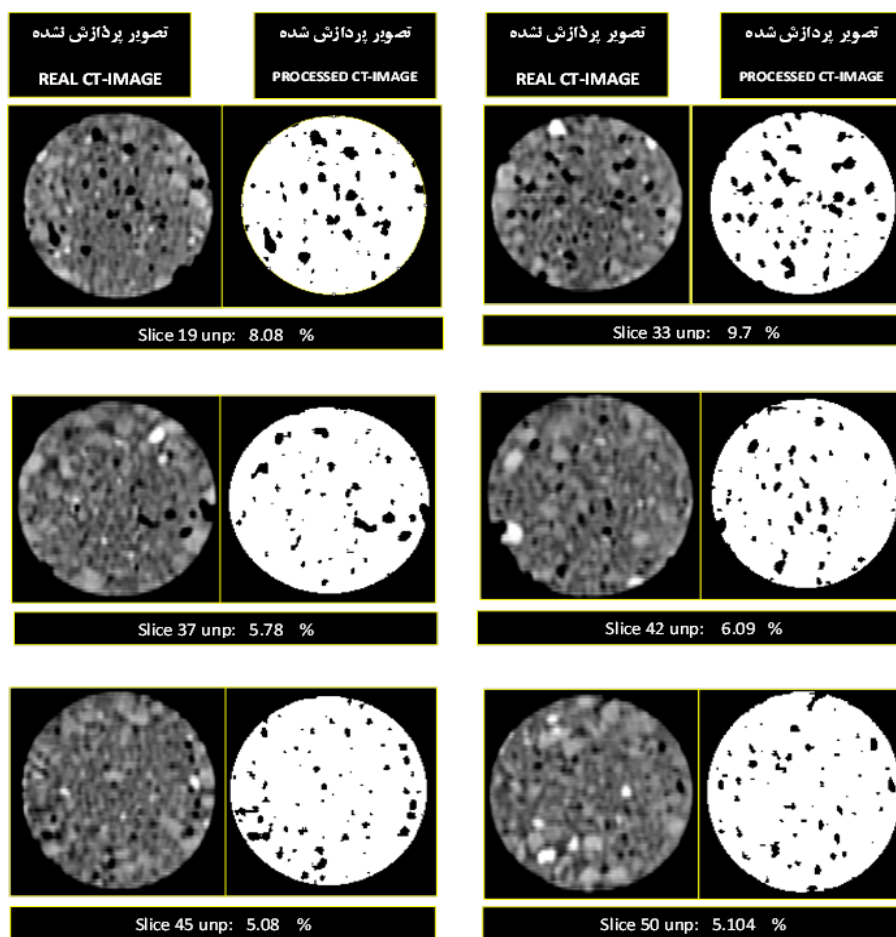


شکل (۸) تعیین تخلخل کلی بر اساس تصاویر پردازش شده برای تعدادی از اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه  
 Figure (8) Determination of total porosity based on processed images for number of slices of understudied sample

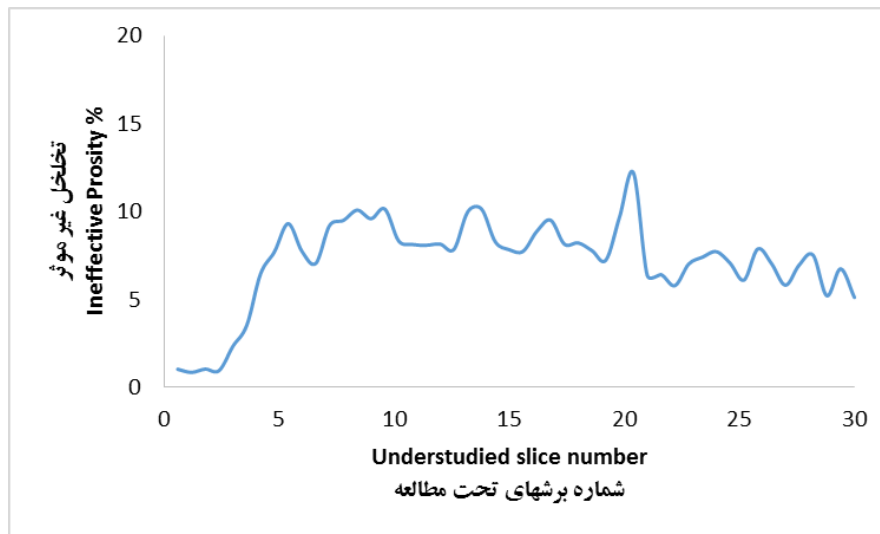




شکل (۹) نمودار تخلخل کلی بر اساس تصاویر پردازش شده برای تمامی اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه  
Figure (9) Total porosity diagram based on processed images for all slices of the understudied sample



شکل (۱۰) تعیین تخلخل غیر موثر بر اساس تصاویر پردازش شده برای تعدادی از اسلایس‌های نمونه تحت مطالعه  
Figure (10) Determination of ineffective porosity based on processed images for a number of understudied sample slides



شکل (۱۱) نمودار تخلخل غیر موثر بر اساس تصاویر پردازش شده برای تمامی اسلایس های نمونه تحت مطالعه  
**Figure (11) Ineffective porosity diagram based on processed images for all slices of the understudied sample**

۲- غیرمخرب بودن این روش به ما این امکان را می دهد تا نمونه بدون بهم ریختگی و تغییر تخلخل مورد بررسی قرارگیرد.

۳- امکان تفکیک دقیق فازها و اجزای خاک در تابش های مختلف انرژی وجود دارد.

شاید تنها عیبی که در این روش وجود دارد این است که تکنولوژی مورد استفاده نسبتاً گران است و همچنین دستگاه های سی تی اسکن زود به زود پیشرفت کرده و وارد نسل های بعدی می شوند، که نیازمند تحقیقات جدید با دستگاه های جدید می باشد. ضمن اینکه برای پردازش تصاویر در این تکنیک، محققین به دلایل مختلف از برنامه های متنوعی استفاده می کنند که کار را برای مقایسه نتایج محققین کمی دشوار می کند.

با این حال، برای خاک هایی که به دلیل طیف گسترده ای از اندازه منافذ و مورفولوژی، از نظر ساختار فیزیکی بسیار ناهمگن هستند، تخمین توزیع اندازه منافذ چالش برانگیز است. برخلاف کار قابل توجه در توسعه تکنیک های سنتی تهاجمی و روش های تجزیه و تحلیل تصویر سه بعدی غیرمخرب، هنوز در مورد اینکه چه روشی باید استفاده شود، اتفاق نظر وجود ندارد. در این زمینه، هدف از پژوهش حاضر ارائه یک بررسی نظری از

ضمن اینکه باید به این نکته توجه داشت که در روش های سنتی رایج تمامی منافذ محاسبه می شوند اما روش سی تی اسکن با کمک ماده حاجب، قدرت تشخیص تخلخل مفید نسبت به تخلخل غیرمفید را فراهم می کند. از مزایای دیگر این تکنیک جدید در دسترس بودن دستگاه های سی تی اسکن و سی بی سی تی اسکن در اکثر شهرها و ارزان بودن عکس برداری با این دستگاه ها است. کیفیت تصاویری که با این دستگاه های اشعه ایکس گرفته می شود بسیار با دقت و با کیفیت بالا می باشد که به محقق اجازه تجزیه و تحلیل سریع و تفسیر خوبی می دهد. از دیگر مزایای این روش می توان به قابل تکرار آن برای هر نمونه به تعداد دلخواه، اشاره کرد. به طور مثال در روش سطح مقطع سریالی فقط یک بار امکان برش نمونه آماده شده وجود دارد، چون نمونه از هم می پاشد.

فواید روش توموگرافی کامپیوتری خاک را می توان به طور خلاصه به شکل ذیل بیان نمود

۱- امکان بدست آوردن داده ها و اطلاعات از ساختار سه بعدی خاک با دقت مناسب در زمان کوتاه (بسته به نوع دستگاه و رزولوشن مورد نیاز توموگرافی می تواند از چند ثانیه تا چند ساعت به طول بیانجامد).

تخلخل مفید را به محققین می‌دهد. مقایسه بین دانه‌بندی و تخلخل به دست آمده در نمونه آزمایشگاهی و نتایج حاصل از پردازش تصاویر سی تی اسکن به خوبی گویای توانایی این روش در استخراج پارامترهای فیزیکی خاک‌های دانه‌ای است. البته در استفاده از این تکنیک بایستی نکاتی را نیز مد نظر قرار داد تا از برخی گمراهی‌ها نیز جلوگیری نمود که مهم‌ترین آن این است که دقت دستگاه مورد استفاده در این تحقیق 0.2 میلی‌متر است، همچنین دقت برش زنی‌های طولی و عرضی نیز ۰.۲ میلی‌متر است و به عبارت دیگر فضاها یا دانه‌های ریزتر از این مقدار قابل شناسایی نیستند؛ به همین دلیل در تحقیق حاضر بر عبارت خاک‌های درشت بافت که منظور گراول تا ماسه درشت دانه است، تاکید شده است. البته دستگاه‌های صنعتی با دقت‌های بسیار بالا نیز وجود دارند و می‌توانند برای اهداف دقیق‌تر و خاک‌های ریزدانه‌تر مورد استفاده قرار گیرند.

روش‌های اساسی و مقایسه روش‌های موجود با روش‌های نوین برای کاربرد در علوم خاک بود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد تا کاربرد تصاویر سی تی اسکن در تعیین برخی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از علم پردازش تصویر مورد بررسی قرار گیرد. همانطور که اشاره شد، با استفاده از فرآیندهای تعریف شده برای پردازش تصاویر، این تکنیک به خوبی قادر به تعیین برخی ویژگی‌های مهندسی نظیر دانه‌بندی، تخلخل کل و تخلخل مفید و غیرمفید می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در نرم‌افزار ImageJ همه روش‌های باینری کردن تصاویر برای پردازش جهت دستیابی به اهداف این تحقیق مناسب نیست و بهترین آنها برای باینری نمودن تصاویر روش Ostu و Intermodes می‌باشد. همچنین استفاده از ماده حاجب (آشکارساز اشعه ایکس)، به صورت مخلوط با آب، جهت اشباع نمودن نمونه به خوبی توانایی شناسایی فضاهای به هم مرتبط یا به عبارت دیگر همان

### References

1. Al-Raoush, R. and Papadopoulos, A. 2010. Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. *Powder technology*, 200(1-2): 69-77.
2. Braja, M. Das. 2011 *Principles of Foundation Engineering*. 7th Edition, Centage Publisher.
3. Crestana, S., Cesareo, R., and Mascarenhas, S. 1986. Using a computed tomography miniscanner in soil science. *Soil Science*, 142(1): 56.
4. Hainsworth, J. M. and Aylmore, L. A. G. 1983. The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Soil Research*, 21(4): 435-443.
5. Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., Sakaki, T., Nishimura, T., and Komatsu, T. 2016. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters. *Soils and Foundations*, 56(4): 676-690.
6. Han, Q., Zhou, X., Liu, L., Zhao, Y., and Zhao, Y. 2019. Three-dimensional visualization of soil pore structure using computed tomography. *Journal of Forestry Research*, 30(3): 1053-1061.
7. Horgan, G. 1998. Mathematical morphology for analysing soil structure from images. *European Journal of Soil Science*, 49(2): 161-173.
8. Luo, L., Lin, H., and Li, S. 2010. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. *Journal of Hydrology*, 393(1-2): 53-64.
9. McEwan, I. K., Sheen, T. M., Cunningham, G. J., and Allen, A. R. 2000. Estimating the size composition of sediment surfaces through image analysis. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*. 142(4): 189-195. Thomas Telford Ltd.

10. Meng, C., Niu, J., Li, X., Luo, Z., Du, X., Du, J., and Yu, X. 2017. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China. *Journal of Soils and Sediments*, 17(9): 2357-2370.
11. Müller, K., Katuwal, S., Young, I., McLeod, M., Moldrup, P., de Jonge, L. W., and Clothier, B. 2018. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures. *Geoderma*, 313: 82-91.
12. Naime, J. D. M. 2001. Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo. *Embrapa Instrumentação-Tese/dissertação (ALICE)*.
13. Naveed, M., Moldrup, P., Arthur, E., Wildenschild, D., Eden, M., Lamandé, M., and de Jonge, L. W. 2013. Revealing soil structure and functional macroporosity along a clay gradient using X-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2): 403-411.
14. Nunan, N., Ritz, K., Rivers, M., Feeney, D. S., and Young, I. M. 2006. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 133(3-4): 398-407.
15. Petrovic, A. M., Siebert, J. E., and Rieke, P. E. 1982. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 46(3): 445-450.
16. Pierret, A., Capowicz, Y., Belzunces, L., and Moran, C. J. 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma*, 106(3-4): 247-271.
17. Pires, L. F., Roque, W. L., Rosa, J. A., and Mooney, S. J. 2019. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 191: 197-206.
18. Rab, M. A., Haling, R. E., Aarons, S. R., Hannah, M., Young, I. M., and Gibson, D. 2014. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. *Geoderma*, 213: 460-470.
19. Stampanoni, M., Borchert, G., Abela, R., and Rüegsegger, P. 2003. Nanotomography based on double asymmetrical Bragg diffraction. *Applied Physics Letters*, 82(17): 2922-2924.
20. Tracy, S. R., Roberts, J. A., Black, C. R., McNeill, A., Davidson, R., and Mooney, S. J. 2010. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of experimental botany*, 61(2): 311-313.
21. Vaz, C. M., De Maria, I. C., Lasso, P. O., and Tuller, M. 2011. Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 75(3): 832-841.
22. Vaz, C. M. P., Tuller, M., Lasso, P. R. O., and Crestana, S. 2014. New perspectives for the application of high-resolution benchtop X-ray microCT for quantifying void, solid and liquid phases in soils. In *Application of soil physics in environmental analyses*, 261-281. Springer, Cham.
23. Wang, W., Kravchenko, A. N., Johnson, T., Srinivasan, S., Ananyeva, K. A., Smucker, A. J. M., and Rivers, M. L. 2013. Intra-aggregate pore structures and *Escherichia coli* distribution by water flow within and movement out of soil macroaggregates. *Vadose Zone Journal*, 12(4): 1-14.

