

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
معاونت آموزش و ترویج کشاورزی

# روش‌های اندازه‌گیری تراکم خاک

سرشناسه	: رضانی، نوشین، ۱۳۶۴-
عنوان و نام پدیدآور	: روش‌های اندازه‌گیری تراکم خاک/نویسنده نوشین رضانی؛ ویراستار ترویجی سعیده اجاقی؛ تهیه شده در معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه‌های ترویجی.
مشخصات نشر	: تهران: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، نشر آموزش کشاورزی، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری	: ۲۸ ص.: مصور (رنگی)، جدول (رنگی).
شابک	: ۹۷۸-۹۶۴-۵۲۰-۸۱۸-۷-۷
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: خاک -- چگالی -- اندازه‌گیری
موضوع	: Soils -- Density -- Measurement
موضوع	: خاک -- فشردگی
موضوع	: Soil compaction
شناسه افزوده	: اجاقی، سعیده، ۱۳۷۱-، ویراستار
شناسه افزوده	: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. معاونت آموزش و ترویج کشاورزی. نشر آموزش کشاورزی
شناسه افزوده	: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. دفتر شبکه دانش و رسانه‌های ترویجی
رده بندی کنگره	: S۵۹۲/۳
رده بندی دیویی	: ۶۳۱/۴۳
شماره کتابشناسی ملی	: ۷۵۶۵۴۰۰
وضعیت رکورد	: فیبا

ISBN:978-964-520-818-7

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۵۲۰-۸۱۸-۷



**عنوان:** روش‌های اندازه‌گیری تراکم خاک  
**نویسنده:** نوشین رضانی  
**مدیر داخلی:** شیوا پارسانیک  
**ویراستار ترویجی:** سعیده اجاقی  
**تهیه شده در:** معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه‌های ترویجی  
**ناشر:** نشر آموزش کشاورزی  
**شمارگان:** ۱۰۰۰ جلد  
**نوبت چاپ:** اول/۱۳۹۹  
**قیمت:** رایگان  
**مسئولیت صحت مطالب با نویسنده است.**

شماره ثبت در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی ۵۹۲۷۲ به تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ است.

نشانی: تهران، خیابان آزادی، بین نواب و رودکی، پلاک ۲۰۵، معاونت آموزش و ترویج کشاورزی  
 تلفن: ۶۶۴۳۰۴۶۵      تلفکس: ۶۶۴۳۰۴۶۴

کدپستی: ۱۴۵۷۸۹۶۶۸۱

## مخاطبان نشریه

- ◆ کشاورزان پیشرو،
- ◆ کارشناسان،
- ◆ مروجان پهنه‌های تولیدی.

## اهداف آموزشی

- ◆ شما پس از مطالعه این نشریه با روش‌های اندازه‌گیری تراکم (فشرده‌گی) خاک آشنا می‌شوید.



صفحه	فهرست	عنوان
۷	.....	مقدمه
۸	.....	تراکم خاک
۹	.....	روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی تراکم
۱۰	.....	روش‌های فیزیکی اندازه‌گیری تراکم خاک
۲۱	.....	ارزیابی تراکم به روش نفوذ ماده رنگی
۲۲	.....	ماده رنگی بریلیانت بلو اف سی اف



## مقدمه

تراکم خاک به معنای کاهش حجم خاک در اثر بارگذاری و اعمال فشار به سطح خاک است. در اثر تراکم نه تنها حجم منافذ خاک کاهش می‌یابد، بلکه ممکن است منافذ به هم پیوسته خاک نیز مسدود شوند. همچنین نفوذ آب به خاک و قابلیت دسترسی گیاهان به آب و هوا تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و مجموع اثرات ذکر شده باعث کاهش کیفیت خاک و در نتیجه کاهش بازده محصول می‌شود. روش‌های مختلفی برای بررسی تراکم خاک در فیزیک و مکانیک خاک وجود دارد که از آن جمله می‌توان به اندازه‌گیری شاخص‌هایی نظیر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک اشاره نمود. این روش‌ها و شاخص‌های اندازه‌گیری شده، اطلاعاتی در مورد وضعیت خاک ارائه داده و می‌توانند برای بیان اثر تردد وسایل سنگین بر عمق‌های مختلف خاک استفاده شوند. همچنین استفاده از آزمایش‌های نفوذ ردیاب یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان اثرات تراکم خاک بر انتقال آب را به طور مشخص پایش نمود. در کشور ما تردد بیش از حد ادوات کشاورزی در مراحل مختلف کاشت محصولات، مشکلات خشکی و مقدار کم ماده آلی؛ تراکم خاک را به یکی از مشکلات عمده در کشاورزی تبدیل کرده است. بنابراین آشنایی با تراکم و روش‌های اندازه‌گیری آن می‌تواند به بهبود رشد گیاه کمک کند.

## تراکم خاک

تراکم خاک به عنوان کاهش حجم خاک در اثر نیروهای وارده تعریف شده است. در مواردی که تراکم خاک به وسیله تردد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی صورت می‌گیرد، گاهی اوقات تا زیر عمق لایه شخم نیز این تراکم ادامه می‌یابد (شکل ۱) و سبب کاهش حاصلخیزی و کاهش کیفیت زیست محیطی می‌شود. در حال حاضر به دلیل افزایش وزن و بزرگتر شدن ادوات کشاورزی آثار مخرب تراکم خاک نیز بیشتر شده است. بنابراین تولیدکنندگان باید نسبت به گذشته توجه بیشتری به این مسئله داشته باشند.



شکل ۱- تراکم ایجاد شده توسط عبور و مرور ادوات کشاورزی

تراکم خاک منجر به تغییر توزیع اندازه منافذ و کاهش تخلخل کل خاک شده و رشد ریشه گیاهان را کاهش می‌دهد و همچنین موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود. علاوه بر کاهش رشد ریشه، تراکم می‌تواند باعث شرایط ماندابی نیز بشود.



شرایط ماندابی باعث احیای عناصر محلول از قبیل آهن و منگنز شده و در نتیجه این عناصر از دسترس ریشه گیاه خارج می‌شوند. به‌علاوه کاهش رشد ریشه باعث کاهش جذب عناصر غذایی کم‌تحرک از قبیل فسفر می‌شود و موجب کاهش مقدار محصول می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- اثر تراکم خاک بر رشد گیاه

## روش‌های اندازه‌گیری و ارزیابی تراکم

تراکم خاک را می‌توان با استفاده از پارامترهایی مانند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل مورد سنجش قرار داد. این روش‌ها تراکم را به آسانی ارزیابی می‌کنند ولی کلاس منافذ متراکم شده و یا تغییرات ساختمانی ایجاد شده را نشان نمی‌دهند. بنابراین روش‌های مستقیم و غیر مستقیمی برای اندازه‌گیری حجم منافذ و تغییرات ایجاد شده در ساختمان خاک در اثر تراکم توسعه یافته‌اند.

به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تراکم خاک را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- دسته اول: اندازه‌گیری تراکم خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک  
خصوصیات فیزیکی‌ای که برای اندازه‌گیری تراکم خاک به کار می‌روند، شامل موارد ذیل هستند:

- ۱- جرم مخصوص ظاهری خاک
- ۲- تخلخل
- ۳- هدایت هیدرولیکی
- ۴- پخشیدگی گازها
- ۵- مقاومت نفوذ سنجی

- دسته دوم: ارزیابی و اندازه‌گیری تراکم با استفاده از ماده ردیاب رنگی  
با توجه به اینکه تراکم خاک بر روی بسیاری از خواص فیزیکی خاک اثر گذاشته لذا می‌توان با بررسی این خصوصیات در مورد تراکم به مطالب مهمی پی برد. این روش‌ها و شاخص‌های اندازه‌گیری شده، اطلاعاتی در مورد وضعیت خاک ارائه داده و می‌توانند برای بیان اثر تردد وسایل سنگین بر عمق‌های مختلف خاک استفاده شوند. با این وجود در عمل بسیار مشکل است که اثر تراکم خاک بر حرکت آب و رشد گیاه تنها بر اساس اندازه‌گیری شاخص‌های مذکور پیش بینی شود. استفاده از آزمایش‌های نفوذ ردیاب یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان اثرات تراکم خاک بر انتقال آب را به طور مشخص دید.

در ادامه به توضیح روش‌های فیزیکی ذکر شده و استفاده از ماده ردیاب رنگی به منظور اندازه‌گیری و ارزیابی تراکم خاک پرداخته خواهد شد.

### روش‌های فیزیکی اندازه‌گیری تراکم خاک

در این قسمت روش‌های فیزیکی اندازه‌گیری تراکم خاک به صورت جداگانه توضیح داده می‌شوند.

## جرم مخصوص ظاهری

مشخص‌ترین اثر تراکم خاک بر جرم مخصوص ظاهری است. جرم مخصوص ظاهری، توده خاک خشک در یک حجم استاندارد خاک است. میزان جرم مخصوص ظاهری بهینه برای خاک‌ها بستگی به بافت خاک دارد که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- جرم مخصوص ظاهری بهینه و محدود کننده ریشه با توجه به طبقه بندی USDA (وزارت کشاورزی ایالات متحده)

جرم مخصوص ظاهری محدود کننده رشد گیاه	جرم مخصوص ظاهری بهینه	بافت خاک
بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب		
> ۱/۸	< ۱/۶	شنی لومی، شنی
> ۱/۸	< ۱/۴	لوم، لومی شنی
> ۱/۷۵	< ۱/۴	لومی رسی، لومی رسی شنی
> ۱/۷۵	< ۱/۳	لومی سیلتی، سیلتی
> ۱/۶۵	< ۱/۴	لومی رسی، سیلتی
> ۱/۵۹	< ۱/۱	رسی سیلتی، رسی شنی
> ۱/۴۷	< ۱/۱	رسی
> علامت بیشتر (بزرگتر)	< علامت کمتر (کوچکتر)	راهنما جدول

محققان بیان کردند از آن جایی که جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بهینه برای رشد گیاهان در هر نوع خاکی متغیر است، درجه تراکم بهینه خاک دست نخورده (بکر) بستگی به بافت خاک، مقدار مواد آلی خاک و خصوصیات ذاتی خاک دارد. از معمول‌ترین روش‌های ارزیابی تراکم خاک، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک است که در ادامه روش انجام این ارزیابی بیان می‌شود.

- جهت تعیین جرم مخصوص ظاهری، از استوانه‌های نمونه‌برداری ستون‌هایی از خاک به طوری که ساختمان خاک از بین نرود، برداشته و به آزمایشگاه منتقل می‌شوند.
  - ستون‌های خاک تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند.
  - با توجه به مشخص بودن وزن و حجم هر استوانه نمونه‌برداری، از نسبت وزن خشک نمونه به حجم کل استوانه نمونه جرم مخصوص ظاهری تعیین می‌شود.
- شکل ۳ نحوه نمونه برداری خاک دست نخورده به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه نمونه برداری خاک دست نخورده به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری

تراکم خاک باعث کاهش قطر خلل و فرج و اتصال آنها بهم شده و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری افزایش یافته، نفوذپذیری و انتشار آب و هوا در خاک نیز کاهش می‌یابد. با افزایش رطوبت خاک (بیش از رطوبت مناسب برای حداکثر جرم مخصوص ظاهری) ضخامت لایه دوگانه پخشیده، افزایش بیشتری یافته و در نتیجه تراکم پذیری کاهش می‌یابد.

## تخلخل کل

تخلخل کل خاک دومین پارامتری است که برای اندازه‌گیری تراکم خاک به کار می‌رود. تخلخل نمایه‌ای از مقدار منافذ خاک است. به لحاظ کمی تخلخل بر حسب نسبت حجم فضای منافذ خاک به حجم کل خاک توصیف می‌شود. در اثر تراکم، ابتدا منافذ درشت خاک (ماکروپورها) که اساسی‌ترین مسیرهای حرکت آب و هوا در خاک هستند تحت تأثیر قرار می‌گیرند. شکل ۴ نمونه‌ای از یک خاک متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمونه‌ای از یک خاک زراعی که حفره‌های روی آن به خوبی قابل مشاهده است

تراکم خاک باعث کاهش خلل و فرج با قطر بزرگتر از ده میکرون\* می‌شود. در ادامه تاثیر افزایش تراکم خاک بر کاهش خلل و فرج خاک بیان می‌شود.

- با بکار بردن فشار تا ۴۰۰ کیلوپاسکال مقدار خلل و فرج با قطر کمتر از ۰/۲ میکرون تغییر نمی‌یابد.

● در خاک‌های رسی تا فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال\*\* موجب کاهش خلل و فرج درشت خاک نمی‌شود، زمانی که فشار به ۲۰۰ کیلوپاسکال مقدار زیادی از خلل و فرج درشت از بین می‌روند و اگر فشار به ۸۰۰ کیلوپاسکال برسد هیچ گونه خلل و فرجی باقی نمی‌ماند.

طبق مطالعات انجام شده در مورد تاثیر تراکم خاک بر خلل و فرج نتایج زیر مشخص شد:

۱. تراکم با کاهش حجم منافذ خاک درصد تخلخل کل خاک را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.
۲. تخلخل و برخی دیگر از خصوصیات خاک از قبیل بافت و ساختمان خاک بر روی حرکت آب و املاح در خاک اثر می‌گذارند.

**\* میکرون:** واحد اندازه‌گیری قطر سلول‌ها و میکروب‌ها و دیگر ذرات ذره‌بینی است.  
**\*\* پاسکال:** برای اندازه‌گیری فشار به کار می‌رود.

### هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی عبارت از نسبت سرعت یا شدت جریان به شیب هیدرولیکی است و یا به بیان دیگر هدایت هیدرولیکی عبارت است از شیب منحنی شدت جریان در برابر شیب هیدرولیکی. در صورتیکه واحد پتانسیل، ارتفاع ستون آب باشد و شیب هیدرولیکی نیز بدون واحد باشد، واحد هدایت هیدرولیکی همان واحد شدت جریان خواهد بود. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های شنی در محدوده  $10^{-2}$  تا  $10^{-3}$  سانتی‌متر بر ثانیه و خاک‌های رسی  $10^{-4}$  تا  $10^{-7}$  سانتی‌متر بر ثانیه تغییر می‌کند. خصوصیات خاک که هدایت هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد عبارتند از: تخلخل کل، توزیع اندازه و شکل هندسی خلل و فرج، اندازه، شکل و خمیدگی منافذ که همگی در ویژگی‌های انتقال و ابقاء آب شرکت دارند. با توجه به اینکه تراکم باعث ایجاد تغییراتی در خصوصیات فوق می‌شود، لذا در هدایت

هیدرولیکی خاک اثر می‌گذارد.

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از پارامترهای بررسی اثر تراکم بر جریان آب است و بر اساس میزان وفور آب در منافذ درشت و اتصالات آن‌ها بررسی می‌شود. بنابراین تغییرات این دسته منافذ (منافذ درشت) اثر زیادی بر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع دارد.

### پخشیدگی گازها در خاک

تراکم خاک باعث کاهش قطر خلل و فرج و اتصال آنها بهم شده و در نتیجه، نفوذپذیری و انتشار هوا و آب در خاک کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در خاک بهتر از پخشیدگی گازها می‌تواند تراکم‌پذیری خاک را نشان دهد. ولی اندازه‌گیری پخشیدگی گازها ساده‌تر از نفوذپذیری آب در خاک است. در مطالعه‌ای پخشیدگی گاز در خاک غیرمتراکم تحت مکش‌های ۱۰ تا ۶۰ کیلو پاسکال و برای خاک متراکم شده تحت فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد که نتایج آن نشان داد که پخشیدگی گاز در این خاک از ۵۵۲ به ۱۵۰ متر در ساعت کاهش یافته است.

### مقاومت نفوذسنجی

روش مقاومت نفوذسنجی روش ساده و راحتی برای اندازه‌گیری تراکم‌پذیری خاک‌ها است. میزان فروسنجی خاک تا حدود زیادی تابع رطوبت خاک است. انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا نفوذسنج‌هایی با مخروط ۳۰ درجه و قطر ۲۷/۲۰ و ۱۲/۸۳ میلیمتر با سرعت نفوذ ۳۰/۵ میلیمتر بر ثانیه را توصیه می‌کنند. اگرچه حد بحرانی مقاومت نفوذسنجی را به طور کلی ۲ مگا پاسکال در نظر می‌گیرند، ولی برای گیاهان مختلف حد نهایی مقاومت نفوذسنج متفاوت است. نوع بافت خاک نیز در حد بحرانی مقاومت نفوذسنج تأثیر می‌گذارد. شکل ۵ نمونه‌ای از یک نفوذسنج مخروطی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمونه ای از یک نوع نفوذسنج مخروطی

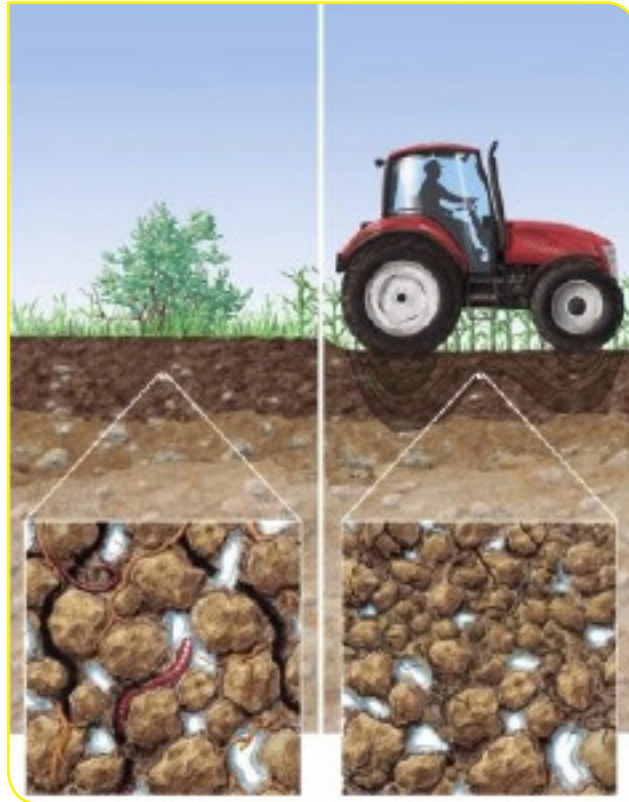
### ساختمان خاک

ترتیب قرار گرفتن ذرات و یا به عبارت دیگر آرایش درونی خاک را ساختمان خاک می‌گویند. چون فضای خالی نیز همچون بخش جامد حائز اهمیت است لذا ساختمان خاک را می‌توان ترتیب قرار گرفتن خلل و فرج ریز، متوسط و درشت در نظام ساختمانی دانست. با چنین تعریفی یکی از مهمترین نتایج اولیه تراکم در ساختمان خاک نمایان می‌شود. ساختمان خاک را همانطور که معرفی شد نمی‌توان از ارکان مستقیم رشد گیاه شمرد، بلکه باید از ویژگی‌هایی به حساب آورد که عملاً در عوامل رشد گیاه مؤثر هستند. عوامل زیر همگی تابعی از ساختمان خاک هستند:

- آبرسانی
- تهویه
- استفاده گیاهان از مواد غذایی
- فعالیت میکروبی
- نفوذ ریشه



ساختمان ضعیف خاک ممکن است به طور مستقیم عامل محدود کننده رشد گیاه باشد و به عکس ساختمان خوب مناسب‌ترین کارایی را جهت عوامل رشد فراهم سازد. شکل ۶ تغییرات ساختمان خاک را بر اثر تراکم ایجاد شده نشان می‌دهد.



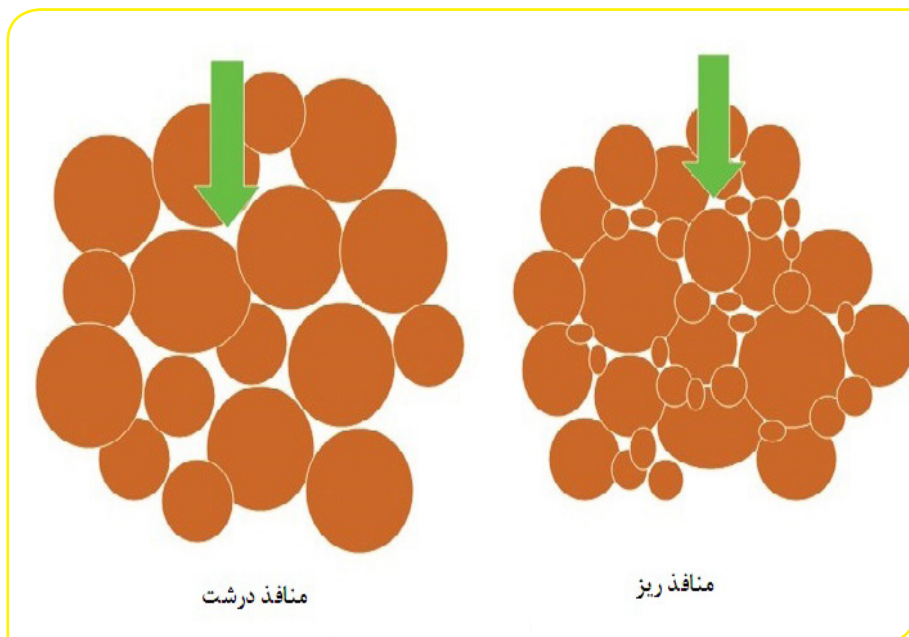
شکل ۶- اثر تراکم بر ساختمان خاک

موضوع مهم و اصلی در مطالعه تراکم، اندازه و نوع خلل و فرج است. تراکم باعث کاهش تخلخل کل خاک می‌شود و این کاهش مربوط به تغییرات شکل خلل و فرج و توزیع اندازه منافذ است. همچنین درجه تراکم خاک به پایداری ساختمان خاک بستگی دارد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

## خلل و فرج خاک

ترتیب قرار گرفتن اجزا خاک تعیین کننده مقدار و طبیعت خلل و فرج خاک است. درصد خلل و فرج به بافت و درجه دانه بندی وابسته است. درصد کل خلل و فرج در مشخص کردن خصوصیات ساختمانی به اندازه توزیع نسبی اندازه خلل و فرج اهمیت ندارد. نسبت خلل و فرج ریز به خلل و فرج درشت تعیین کننده میزان انحراف از حد مطلوب خصوصیات ساختمانی است. خلل و فرج ریز عامل ظرفیت نگهداری آب و خلل و فرج درشت عامل تعیین کننده میزان نفوذپذیری و ظرفیت هوای خاک است. در یک خاک ایده آل ۵۰ درصد کل خلل و فرج از نوع ریز و ۵۰ درصد بقیه از نوع درشت است. نکته جالب اینکه با افزایش قطر خاکدانه‌ها (۵-۰/۵ میلی‌متر)، به تدریج مقدار خلل و فرج کل خاک، درصد تخلخل تهویه‌ای و نیز درصد اکسیژن موجود در هوای خاک افزایش می‌یابد. اندازه و پیوستگی منافذ نقش بسیار مهمی در خصوصیات جریان آب و حرکت املاح دارد. منافذ را از لحاظ فراوانی، اندازه و شکل، تقسیم بندی می‌کنند که این تقسیم بندی به شرح ذیل است.

- از لحاظ فراوانی در صورتی که تعداد خلل و فرج کمتر از یک در واحد سطح باشد آن را کم، بین ۱ تا ۵، متوسط و بیش از ۵ را زیاد طبقه بندی می‌نمایند.
- در صورتی که از لحاظ اندازه، قطر منافذ کمتر از ۰/۵ میلی‌متر باشد در کلاس بسیار ریز، بین ۰/۵ تا ۲ را در کلاس ریز، بین ۲ تا ۵ را متوسط و بیش از ۵ میلی‌متر را در کلاس‌های درشت طبقه بندی می‌نمایند (شکل ۷).



شکل ۷- نمای شماتیک منافذ ریز و درشت خاک

منافذ با قطر بزرگ‌تر از ۳۰ میکرومتر شامل بیوپورها و ترک‌های انقباضی است و منافذ کوچک‌تر از ۳۰ میکرومتر می‌تواند در داخل خاکدانه و یا بین آن‌ها وجود داشته باشد. به این نوع تخلخل، خلل و فرج ساختمانی گفته می‌شود و تعیین‌کننده ظرفیت تهویه و نگه‌داشت رطوبت در خاک است. این منافذ به شدت تحت تأثیر بافت و مقدار کربن آلی بوده و همچنین به نوع مدیریت خاک بسیار حساس است. منافذ درشت و طیف کوچکی از منافذ با قطر متوسط حداقل پایداری را در کلاس اندازه‌ای ذرات دارند. بخشی از حجم منافذ بزرگ‌تر از ۳۰ میکرومتر و اتصال آنها به هم اثر عمده‌ای روی جریان آب و املاح، تهویه، خصوصیات مکانیکی خاک و توسعه ریشه دارد. وقتی پتانسیل آب نزدیک صفر است جریان آب و املاح بیشتر از طریق منافذ بزرگ انجام می‌گیرد و منافذ کوچک‌تر مسیرهای فرعی آب هستند. این منافذ منعکس‌کننده مناطق گسیختگی هستند و با کاهش در جزء حجمی

این منافذ مقاومت کششی و استحکام خاک افزایش می‌یابد. منافذی که قطر آنها معادل ۰/۱ تا ۳۰ میکرومتر است اغلب منافذی قوی نامیده می‌شوند و این منافذ آب قابل دسترس برای گیاه را تأمین می‌کنند. این منافذ همچنین جایگاه سکونت میکروارگانیسم‌ها و موجودات کوچک خاک بوده و بشدت تحت تأثیر بافت و مقدار کربن آلی هستند. اما خیلی تحت تأثیر افزایش جرم مخصوص ظاهری ناشی از عبور و مرور یا فشارهای دیگر، نیستند. دسته دیگری از منافذ، کوچک‌تر از ۰/۱ میکرومتر هستند که مدیریت خاک کمترین تأثیر را روی این دسته خواهد داشت. هرچند این منافذ مدت طولانی‌تری پر از آب باقی می‌مانند ولی مقدار کمی از این آب برای گیاه قابل استفاده است (یا حتی می‌توان گفت قابل استفاده نیست) و سرعت جریان آب از این منافذ بسیار کند است. این منافذ از نظر بیولوژیکی غیر فعال بوده و برای ریشه و میکروارگانیسم‌ها نفوذ ناپذیرند و تنها موجودات ریز که در اندازه‌های مولکولی در آمده باشند، می‌توانند در این منافذ قرار گیرند بنابراین نقش مهم آنها حمایت فیزیکی کربن آلی در برابر تجزیه است.

### پایداری ساختمان خاک

اصطلاح پایداری ساختمانی خاک به توانایی خاک برای حفظ آرایش ذرات جامد و فضاهای خالی خود هنگامی که در معرض فشارهای مختلف قرار می‌گیرد، گفته می‌شود. ویژگی‌های پایداری برای یک شکل ساختمانی مجزا و نوع فشار ویژه هستند. فشار ممکن است ناشی از فرآیندهای مختلفی مانند خاکورزی، عبور و مرور ماشین آلات، تروخشک شدن باشد. برای دریافت پایداری ساختمانی خاک، خاکدانه در معرض الک و تکان دادن در آب یا در معرض انرژی فراصوتی قرار گرفته و به این ترتیب پایداری اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه اصطلاح پایداری ساختمانی مترادف با پایداری خاکدانه در نظر گرفته می‌شود. خاکدانه در مزرعه تحت تنش‌های تراکم، شخم، عبور و مرور، خیس شدن و فرسایش مکانیکی توسط جریان آب قرار می‌گیرد.

## ارزیابی تراکم به روش نفوذ ماده رنگی

آزمایش نفوذ ماده رنگی به عنوان روش مناسبی برای ارزیابی الگوهای جریان در خاک است و در چند دهه اخیر توسط دانشمندان علوم خاک استفاده شده است. نقش ساختمان در نفوذ آب می‌تواند با استفاده از مسیرهای نفوذ ماده رنگی در خاک متراکم شده و خاک غیرمتراکم بررسی شود. روش استفاده از ماده ردیاب رنگی و پردازش تصاویر می‌تواند در بررسی توسعه مسیرهای جریان آب در خاک در اثر تراکم، مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات گوناگون نشان داده‌اند که تعیین الگوی مسیر حرکت آب می‌تواند شاخص خوبی برای توصیف نفوذ آب در خاک باشد. توزیع مکانی یک ردیاب رنگی در پروفیل خاک می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در ارزیابی ساختمان‌های متراکم شده استفاده شود. پردازش تصویر برای استخراج نقاط رنگ‌گرفته روی تصویر به دست آمده از دوربین‌های دیجیتال یا از بخش‌های عکس‌برداری شده به کار می‌رود. امروزه پردازش تصویر روشی مناسب برای نشان دادن مسیرهای رنگی و توصیف کمی الگوهای جریان با تعیین غلظت ماده ردیاب در خاک است. شکل ۸ استفاده از ماده ردیاب رنگی را به منظور بررسی تراکم خاک نشان می‌دهد. ردیاب‌های متعددی در آزمایشات گوناگون برای نشان دادن حرکت آب وجود دارند که از متداول‌ترین آن‌ها بریلیانت بلو اف سی اف است که به شرح در بخش بعدی توضیح داده شده است.



شکل ۸- روش نفوذ ماده ردیاب رنگی به منظور ارزیابی تراکم

## ماده رنگی بریلیانت بلو اف سی اف

بریلیانت بلو اف سی اف در مطالعات متعددی به عنوان ماده ردیاب رنگی استفاده شده است، زیرا سمیت آن پایین است، به خوبی در خاک دیده می‌شود و توسط ذرات خاک جذب سطحی نمی‌شود. دانشمندان متعددی سمیت، جذب و حرکت بریلیانت بلو اف سی اف را بررسی کردند و گزارش کردند که این ماده ردیاب یکی از بهترین انواع مواد ردیاب برای مطالعه فرآیند حرکت آب در خاک است (شکل ۹). بریلیانت بلو اف سی اف دارای دارای شناسنامه‌ای به شرح جدول (۲) است.



شکل ۹- ماده ردیاب رنگی بریلیانت بلو اف سی اف

جدول ۲- شناسنامه بریلیانت بلو اف سی اف

Brilliant Blue FCF	نام انگلیسی
اسید آلی ضعیف	خاصیت
$C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9-S_3$	فرمول شیمیایی
M.W.= ۷۹۲/۸۵	وزن مولکولی (بر حسب گرم بر مول)
این ماده دارای ترکیبات قطبی و غیر قطبی است که تا حدودی خصوصیات جذب پیچیده آن را توجیه می‌کند.	ترکیبات بریلیانت بلو اف سی اف

محققان خصوصیات جذب و دفع ردیاب رنگی بریلیانت بلو اف سی اف در چهار نوع خاک از شنی تا رسی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که قدرت جذب بریلیانت بلو اف سی اف در خاک از ردیاب‌های دیگر کمتر است. با انجام آزمایشات ردیاب بریلیانت بلو اف سی اف اطلاعات کمی با ارزشی برای بررسی جریان‌های ترجیحی و غیرترجیحی حاصل می‌شود. علاوه بر بریلیانت بلو اف سی اف مواد دیگری نیز به عنوان ردیاب در آزمایشات گوناگون برای نشان دادن حرکت آب و جریان ترجیحی استفاده شده‌اند. از جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- ویتاسین بلو

۲- متیلن بلو

۳- یدید، کلرید، برمید

۴- کربنات آمونیوم

در آزمایشات با مدت زمان طولانی از آنیون‌های معدنی مثل کلر و برم به عنوان ردیاب استفاده می‌شود. برم به علت غلظت کم در وسعت زیاد خاک بهترین ردیاب آنیونی معدنی است. برم به میزان کمی در خاک جذب سطحی می‌شود و به صورت اسپری کردن به خاک اضافه می‌شود.

تعداد زیادی از دانشمندان دو یا چندین ماده ردیاب را در غلظت‌های یکسان با هم ترکیب کرده و در آزمایشات مختلفی به کار برده‌اند. ردیاب با قابلیت حرکت کمتر قبل از تراکم و ردیاب با قابلیت حرکت بیشتر بعد از تراکم به خاک اضافه می‌شوند. توزیع دو ماده ردیاب رویت شده در پروفیل‌های عمودی حفر شده توسط دوربین‌های دیجیتالی تصویربرداری می‌شوند. دوربین‌ها مجهز به فیلترهای ویژه ماده ردیاب رنگی هستند. انطباق الگوهای جریان دو ماده ردیاب رنگی مستقیماً اثر تراکم را نشان می‌دهد.

### پردازش تصویر و الگوهای جریان ماده ردیاب رنگی

پردازش تصویر به صورت شیوه‌ای رایج برای توصیف و کمی کردن جریان آب در خاک‌های متراکم و غیرمتراکم درآمده است. پردازش تصویر روشی است که مسیرهای جریان ماده ردیاب رنگی ثبت شده بر روی تصاویر دیجیتالی را پردازش و به الگوهای جریان تبدیل می‌کند و میزان جریان ماده رنگی را به عنوان شاخصی از جریان آب در خاک به صورت کمی در می‌آورد. روش‌های ردیابی رنگی و پردازش تصاویر با یکدیگر به کار می‌روند تا هم نقش ساختمان خاک ارزیابی شود و هم فرآیندهای جریان ترجیحی قابل دیدن باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تصاویر ماده ردیاب رنگی در خاک و الگوی جریان پردازش شده را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰- تصویر نفوذ ماده ردیاب رنگی در خاک





شکل ۱۱- الگوی جریان پردازش شده ماده ردیاب رنگی در خاک

استفاده از ردیاب‌های رنگی نسبت به روش‌های سنتی این برتری را دارد که تمایز میان بخش‌هایی از خاک را که از نظر جریان مواد حل شده فعال هستند با نواحی غیرفعال امکان‌پذیر می‌سازد. پردازش تصاویر و توصیف پیوستگی خلل و فرج امکان ارزیابی مستقیم و غیرمستقیم حرکت آب در خاک را فراهم می‌کند. همچنین می‌تواند برای اندازه‌گیری جهت، شکل، اندازه و توزیع اندازه منافذ در افق‌های مختلف استفاده شود. از آنالیز تصاویر (با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر) می‌توان برای تعیین پارامترهای انتقال املاح و بررسی و توصیف حرکت املاح در ستون‌های خاک استفاده نمود. فناوری‌های پردازش تصویر هم برای دیدن مسیرهای رنگی و هم برای دریافت یک توصیف کمی از الگوهای جریان به کار رفته است. با استفاده از آنالیزهای آماری الگوهای جریان می‌توان حرکت آب و املاح را در خاک بررسی نمود. نرم افزارهای مختلفی برای پردازش تصویر وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نرم افزار متلب (Matlab) اشاره کرد.

عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی، دروگرها و ماشین‌های ساختمانی پارامترهای فیزیکی و الگوهای جریان را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. محققان الگوهای جریان را قبل و بعد از تراکم در پلات‌های مشابه با استفاده از دو نوع ردیاب فلورسانت با هم مقایسه نمودند. برای انجام این کار ردیاب کم تحرک را قبل از ایجاد تراکم و ردیاب پر تحرک را بعد از تراکم به وسیله تردد ادوات به پلات‌ها اضافه نمودند و توزیع مکانی هر دو ردیاب در طول با دوربین دیجیتالی ثبت شد. الگوی به دست آمده از ردیاب‌ها نشان داد که الگوی جریان در زمان قبل و بعد از تردد ادوات تفاوت چشمگیری با یکدیگر داشته‌اند.

الگوهای جریان آب و املاح در برگیرنده اطلاعاتی در مورد سیستم جریان مانند شرایط مرزی و اولیه، محیط جریان مانند غیر یکنواختی و خصوصیات خاک و اثرات متقابل بین محیط و سیستم جریان هستند. پژوهشگران با انجام یک سری آزمایشات مزرعه‌ای نشان دادند که در شرایط آزمایشی یکسان (از قبیل بافت و ساختمان خاک) و شرایط اولیه و شرایط مرزی مشابه الگوهای جریان به صورت معنی‌داری با یکدیگر تفاوت دارند. الگوهای جریان مواد ردیاب رنگی می‌توانند برای توصیف توزیع خلل و فرج (منافذ) نیز استفاده شوند. همچنین می‌تواند به خصوصیات خاک نسبت داده شوند. یکی از فاکتورهای مهمی که بر روی الگوهای جریان تأثیر می‌گذارد بافت و ساختمان خاک است. الگوهای جریان مربوط به دو لایه در یک خاک معین (برای مثال یک لایه لومی بر روی یک لایه شنی) می‌تواند تفاوت‌های بین دو لایه را به طور واضحی مشخص کند. پژوهشگران در سال ۲۰۰۳ روشی را برای نشان دادن مرزهای لایه‌ها در الگوهای جریان توسعه دادند. لایه‌های مشاهده شده در الگوهای جریان را کلاس بندی کرده و توالی این لایه‌ها را با توالی لایه‌های مورفولوژیکی پروفیل‌های خاک هر تیمار به صورت کیفی مقایسه کردند و گزارش کردند که بین توالی لایه‌های مشاهده شده در الگوهای جریان و افق‌های خاک همخوانی بسیار خوبی وجود دارد.

به طور کلی در منابع علمی بررسی‌های اندکی روی تأثیر تراکم خاک بر جریان آب خاک به صورت کمی شده وجود دارد. مشاهدات عملی نشان می‌دهد که پس از تراکم، اندازه روزنه‌های درشت بیش از همه کاهش داشته است که این موضوع می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر انتقال آب به صورت اشباع و غیر اشباع داشته باشد. با این حال، در چند سال اخیر پردازش تصویر به منظور بررسی تفاوت در جریان آب خاک متأثر از فشردگی ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است.

## یادداشت

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---