



دانشگاه جیرفت
دانشکده کشاورزی

خاکشناسی عمومی



تهیه و تدوین

جواد زمانی باب گهری

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- کلیات

رابطه بین انسان و خاک یک رابطه تنگاتنگ و دوطرفه است و وجود یک جامعه انسانی کارآمد، علاوه بر وجود آب و هوای مناسب به وجود خاک‌های مناسب وابسته است و از آن طرف داشتن یک خاک مناسب و پایدار در یک منطقه به شدت به حضور انسان‌هایی با فرهنگ مناسب در برخورد با خاک و محیط زیست می‌باشد. در حقیقت وجود خاک مناسب و حاصلخیز در یک منطقه یکی از نشانه‌های گسترش و حضور انسان‌ها و قبایل انسانی در آن منطقه می‌باشد که می‌توانند با استفاده مناسب و غیرتخریبی از خاک می‌توانند ضمن تولید محصولات و مواد غذایی، می‌توانند موجب پایدار ماندن طبیعت و محیط زیست منطقه برای ادامه حیات انسانی باشد.

داستان‌های تاریخی و افسانه‌های زیادی در مورد اهمیت خاک در زندگی انسانی و شکل‌گیری تمدن‌های بشری وجود دارد که نشان می‌دهند در جهان ساخته شده و برخاسته از خاک تفکر نکردن و به خاک ناشدنی است. می‌گویند آدم مشتق شده از واژه عبری «آدما (Adama)» به معنای خاک است و حوا به معنای زندگی است و چون وجود حوا بدون وجود آدم بی معنا است، پس زندگی بدون خاک هم بی معنا می‌باشد. خاک پی بناهای مسکونی، کارخانه‌ها و همچنین بستر جاده‌ها، شاهراه‌ها را تشکیل داده و استحکام و طول عمر آن‌ها را تعیین می‌کند. خاک محل اصلی جذب و دریافت مواد زائد ناشی از سیستم فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی می‌باشد.

در زبان یونانی به آدم «هومو (*homo*)» گفته می‌شود که از کلمه‌ی «هوموس (*humus*)» به معنای مواد آلی و مواد زنده‌ی خاکی گرفته شده است و بر همین اساس است که در زبان انگلیسی به «انسان (*human*)» گفته می‌شود.

بزرگ‌ترین تمدن‌ها و شهرنشینی‌ها معمولاً در مکان‌هایی به وجود آمده است که خاک‌های خوب و حاصلخیزی داشته‌اند. استقرار تمدن‌های قدیم در اطراف رود نیل در اثر ظرفیت بالای خاک‌های حاصلخیز اطراف این رود و حضور آب فراوان در این منطقه بوده است. اگر از پدربزرگان خود که در روستاها زندگی می‌کردند هم در مورد محل زندگی آنان سوال کنید متوجه می‌شوید که وجود خاک‌های حاصلخیز و زمین‌های کشاورزی مناسب در کنار چشمه‌سارها و رودخانه‌ها از عوامل اصلی سکونت آنان در یک منطقه بوده است. ایشان در آن زمان به دنبال یک محل بودند که علاوه بر آب دارای خاک مناسب برای کشت و زرع باشد و به محض پیدا کردن این مکان، در آن محل زندگی خود را آغاز می‌کردند و با گسترش کشاورزی و و دامداری در آن منطقه موجب آباد شدن محل می‌شدند.

در این باره همچنین می‌توان به اراضی اطراف رودخانه‌های گنگ، یانگ تسه و هوانگ‌هو در هند و چین اشاره کرد که موجب توسعه شهرنشینی و گسترش تمدن‌هایی بزرگ در اطراف خود شده‌اند. از آنجاییکه حاصلخیزی اراضی اطراف این رودخانه‌ها مرتباً توسط طغیان‌های طبیعی تجدید می‌شده، خاک‌های آن‌ها قادر به تولید مداوم مقادیر فراوان غذا بوده و این مکان را فراهم آورده تا جوامع سازمان‌یافته و ثابت و شهرها جایگزین قبایل اولیه و کوچ‌نشین شوند.

در یونان قدیم خاک به عنوان «جئا (*gaea*)» نام داشت. جئا نیز کلمه‌ای است مونث که آن را الهه زمین می‌نامیدند. جئا از «اورانوس (*uranus*)» که خدای آسمان نام داشت بارور شده و دیگر خدایان یونانیان از آن دو زاده شدند. نام الهه خاک (زمین) هنوز هم بر واژه‌های علمی مانند «ژئولوژی (*geology*)» به معنی زمین‌شناسی، «ژئوفیزیک (*geophysics*)» به معنی زمین - فیزیک و «ژئوپونیک (*geoponic*)» به معنی کشاورزی اطلاق می‌شود. در یونان قدیم به کشاورزان «جرج (*george*)» گفته می‌شد که از کلمه «*geo-tergon*» یعنی کار کردن روی خاک گرفته شده است. همچنین در عقاید اسلامی ما مسلمانان نیز خداوند دو عالم در قرآن در ۱۸ آیه به آفرینش انسان از خاک (تراب) یا گل (طین و صلصال) اشاره داشته است که خود می‌تواند به اهمیت و پاکی خاک نیز اشاره داشته باشد.

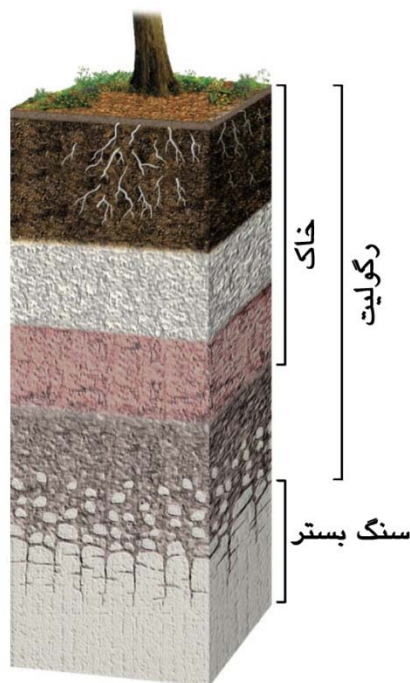
این چنین باورهای درمورد خاک و همچنین آب به دلیل اهمیتی است که خاک و آب در زندگی بشر داشته‌اند و به دفعات زیاد در متون علمی و غیر علمی مکتوب شده است. هر چند دانش امروز یافته‌های جدید بسیاری از این باورها را در مورد آب و خاک زیر سوال برده است اما باید قبول کرد که پیکره زندگی ما را همین باورها تشکیل می‌دهد که رها کردن آن‌ها اگر غیرممکن نباشد بسیار مشکل است. باید به این نکته باور داشته باشیم که اهمیت خاک و آب در زندگی بشر آنقدر زیاد است که ساعت‌ها می‌توان در مورد اهمیت این دو منبع طبیعی صحبت کرد و بنابراین توجه به این منابع باید اول فرهنگ ما شود بعد به صورت جدی به آن‌ها احترام بگذاریم و در حفظ آن‌ها کوشا باشیم.

متأسفانه استفاده نامناسب و عدم حفاظت خاک می‌تواند باعث شسته شدن و حمل آن به داخل جریان‌های آب و رودخانه‌ها شود که علاوه بر تخریب و از بین رفتن خاک، موجب کاهش کیفیت آب‌ها و نیز پر شدن مخازن سدها و در نتیجه کاهش عمر تاسیسات سدسازی خواهد شد. خاک و محیط زیست به عنوان سرمایه‌های ملی باید مورد توجه تمامی افراد یک جامعه به ویژه مهندسين کشاورزی و خاکشناسی که به طور مستقیم با آن در ارتباط می‌باشند، قرار گیرد. یک متخصص محیط زیست هلندی چندین سال قبل در یک بازدید که از منابع طبیعی و اراضی ایران داشت، بی‌توجهی و عدم مسئولیت ما ایرانیان را نسبت به محیط زیست و به ویژه خاک را بسیار خوب تعبیر کرد و گفت "سیلی که شما امروز به محیط زیست می‌زنید طولی نخواهد کشید که محیط زیست با چندین برابر قدرت، آن سیلی را به شما خواهد زد". پس شما که به عنوان افرادی تحصیل کرده، آن هم در رشته‌ای مرتبط با محیط زیست در حال تحصیل هستید، بیش از افراد عادی جامعه نسبت به منابع طبیعی نظیر آب و خاک مسئول هستید که باید ضمن توجه ویژه به این منابع خدادادی و حفظ آن‌ها، باید در زمینه فرهنگ‌سازی و انتقال اهمیت این منابع به جامعه نیز کوشا باشید و بدانید که احترام به محیط زیست احترام به خود انسان است و سلامت آینده‌ی ما بستگی به سلامت محیط زیست دارد.

۱-۲- تعاریف خاک

خاک مجموعه‌ای از اجزای طبیعی روی سطح زمین می‌باشد که شامل مواد زنده و غیره زنده می‌باشند که گیاه در آن رشد می‌کند یا توانایی نگهداشت و رشد گیاه در آن‌ها وجود دارد. تنوع کاربری‌های مختلف و همچنین تنوع خاک‌های موجود در جهان امروزی موجب شده است تعاریف زیادی از خاک داشته باشیم. حتی یک دلیل کم‌توجه‌ای به اهمیت خاک در زندگی انسان همین جنبه‌های متفاوت کاربری آن در بین مردم می‌باشد. از دیدگاه یک مهندس معدن، خاک مجموعه مواد زائدی است که روی سنگ‌ها و کانی‌ها را پوشانیده است که برای استخراج معدن بایستی آن‌ها را کنار زد. از دیدگاه یک مهندس راه‌سازی خاک مجموعه موادی است که برای بستر سازی یکی راه و جاده می‌توان از آن‌ها استفاده کرد و در صورتیکه مشخصات آن برای این عمل مناسب نباشد آن را با سنگ و سنگ‌ریزه‌ها مخلوط می‌کنند. یک زمین‌شناس خاک را حاصل خرد شدن سنگ بستر می‌داند که این مواد را در اصطلاح «رگولیت (Regolith)» گویند. از لحاظ عمق رگولیت می‌تواند از خیلی کم عمق تا حتی ۱۰ متر نیز عمق ضخامت داشته باشد. رگولیت هم می‌تواند از هوادیدگی سنگ بستر زیرین ایجاد شده باشد، یا می‌تواند توسط عوامل انتقالی نظیر باد، آب و یخ از نقاط دیگر حمل و روی بستری از سنگ و یا سایر مواد که سنگ‌ها را پوشانده‌اند رسوب می‌نمایند. اما از نظر یک کشاورز خاک یک محیط برای رشد گیاه محسوب می‌شود که باید غنی از مواد غذایی، با رنگی مناسب و نرم باشد تا بتواند نیازهای گیاه را به خوبی تامین نماید. بنابراین، یک کشاورز، خاک را محیط پرورش گیاهان می‌داند و مایحتاج زندگی روزمره خود را از همین خاک بدست می‌آورد که از این رو توجه بسیار زیادی به

مشخصات آن داشته و از نظر وی خاک بسیار سودمند و حائز اهمیت است. در واقع می‌توان خاک را در دیدگاه کلی بخش بالایی رگولیت دانست که توان رشد گیاه در آن وجود داشته باشد. در برخی مواقع رگولیت آنقدر کم عمق است که تماماً به خاک تبدیل شده و در این حالت مستقیماً روی سنگ بستر قرار دارد. **شکل ۱-۱** موقعیت کلی سنگ بستر، رگولیت و خاک را در یک خاک معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- موقعیت کلی سنگ بستر، رگولیت و خاک حاصل از آن

از دیدگاه دانشمندان نیز تعاریف متفاوتی از خاک وجود دارد که هر کدام به جنبه‌های متفاوتی از آن توجه دارند. در یک تعریف خاک را «یک پیکر (دست‌نخورده) طبیعی» می‌دانند (*soil is natural a body*)، که این تعریف به جنبه محیط زیستی و اهمیت خاک در طبیعت اشاره دارد. همچنین در یک تعریف دیگر خاک را «سنگ‌هایی می‌دانند که در مسیر حرکت به سمت اقیانوس‌ها هستند» (*soil is the rocks on its way to the oceans*)، و این بیان یک تعریف است که اهمیت هوادیدگی و خراش سنگ‌ها در اثر جریان‌های سطحی و نیز تجمع این ذرات در اطراف رودخانه‌ها و دلتاهای رودخانه‌ای را نشان می‌دهد. هسن^۱ در سال ۱۹۴۱ خاک را از دیدگاه خاکشناسی یک متغیر وابسته حاصل از پنج فاکتور خاکساز مستقل شامل آب و هوا، موجودات زنده، پستی و بلندی، مواد مادری و زمان تعریف کرد و بیان خود را به صورت فرمول زیر ارائه نمود.

$$Soil = f(Cl, O, R, P, t)$$

معادله ۱

که در این معادله:

Cl: نشان دهنده‌ی آب و هوا یا اقلیم منطقه (Climate) می‌باشد.

O: بیان کننده‌ی موجودات زنده (Organisms) می‌باشد که اغلب منظور گیاهان و موجودات خاکزی نظیر کرم‌ها می‌باشد اما انسان را نیز شامل می‌شود.

R: نشان دهنده‌ی تاثیر پستی و بلندی و توپوگرافی (Relief) منطقه به عنوان دیگر فاکتور خاکساز می‌باشد.

P: بیان کننده‌ی فاکتور مواد مادری (Parent materials) در فرایند خاکساز می‌باشد.

t: به معنی تاثیر زمان (time) در خاکساز می‌باشد.

بر همین اساس و در یک تعریف کلی، خاک را می‌توان محیطی مغذی جهت رشد گیاهان خشکی‌زی که تحت تاثیر فاکتورهای خاکساز اقلیم، موجودات زنده و پستی و بلندی از مواد ناپیوسته خردشده حاصل از هوازدگی سنگ بستر (مواد مادری) در طول زمان دانست. خاک را همچنین می‌توان یک ترکیب پیچیده‌ی بیوژئوشیمیایی تعریف کرد (Soil is a bio-geo-chemical complex). مواد مادری، مواد ناپیوسته و خرد شده‌ای معدنی و آلی هستند که خاک از آنها به وجود آمده است. اگر چه مواد مادری آلی به موادی گفته می‌شود که مواد معدنی در آنها کم باشد اما به طور کلی مواد مادری با توجه به نحوه رسوب آنها دسته‌بندی می‌شوند. بر همین اساس می‌توان خاک‌ها را به ۸ دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

- **خاک‌های باقی‌مانده (Residuum):** خاک‌هایی هستند که از هوازدگی رسوبات معدنی باقی‌مانده، حاصل از سنگ بستر در محل ایجاد شده‌اند.
- **خاک‌های یخچالی (Glacial till):** خاک‌هایی که روی رسوبات ناشی از یخچال‌ها ایجاد شده‌اند.
- **خاک‌های بادرفتی (Eolian):** خاک‌هایی که روی رسوبات حمل شده توسط باد ایجاد شده‌اند.
- **خاک‌های لُسی (Loess):** خاک‌هایی با ذراتی در حد و اندازه سیلت (Silt) که توسط باد حمل شده‌اند. این خاک‌ها نوع خاصی از خاک‌های بادرفتی می‌باشند و در چین و همچنین استان گلستان به فراوانی وجود دارند.
- **خاک‌های آبرفتی (Alluvium):** خاک‌هایی که روی رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها تشکیل می‌شوند.
- **خاک‌های کوهرفتی (Colluvium):** خاک‌هایی که روی رسوبات دامنه‌ی شیب‌ها و کوه‌ها که توسط نیروی ثقل جابه‌جا شده‌اند، می‌باشند.
- **خاک‌های مارنی (Marine):** خاک‌های تشکیل شده روی بستر دریا‌های قدیمی که اکنون خشک می‌باشند را گویند.
- **خاک‌های دریاچه‌ای یا لاکوسترین (Lacustrine):** خاک‌های تشکیل شده روی بستر دریاچه‌های قدیمی که اکنون خشک می‌باشند را گویند.

۱-۳- وظایف خاک

اهمیت و شاخص بودن خاک به عنوان یک جزء از محیط زیست به دلیل وظایف گسترده‌ای است که این ماده دارد. با توجه به نوع کاربری و هدف هر فرد، خاک می‌تواند دارای وظایف متفاوتی باشد. در بیان ساده می‌توان کاربری و وظیفه‌ای که یک کشاورز از خاک مدنظر دارد را مثال زد که ایشان خاک را محلی مناسب برای رشد گیاه می‌داند و بر این اساس خاک وظیفه تامین مواد غذایی و نگهداشت آب برای گیاه مورد نظر کشاورز را برای به حداکثر رساندن رشد و تولید آن گیاه را دارد. بر همین اساس می‌توان وظایف خاک را به صورت زیر خلاصه کرد:

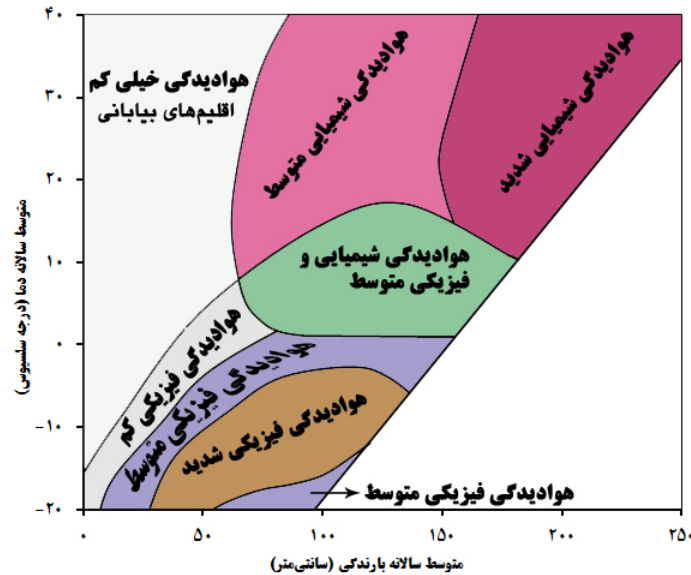
- محیطی برای رشد گیاهان و محصولات کشاورزی است (تامین کننده‌ی آب و مواد غذایی برای گیاه).
 - محلی برای زندگی جمعیت زیادی از جانداران می‌باشد (تنوع زیستی، *Biodiversity*).
 - تنظیم کننده‌ی جریان آب رودخانه‌ها می‌باشد.
 - منبع مواد اولیه برای ساخت ساختمان‌ها، وسایل پزشکی، هنری و غیره می‌باشد.
 - تاثیرهای اقلیم‌های گذشته و موجودات زندگی در سال‌های خیلی دور را بر مواد اولیه را نشان می‌دهد.
 - تصفیه کننده آب‌های آلوده و فاضلاب‌ها قبل از ورود به منابع آب زیرزمینی است.
 - مانع ورود بخش زیادی از کربن برای ورود به اتمسفر می‌باشد (ترسیب کربن، *Carbon sequestration*).
 - تعدیل کننده و تنظیم کننده‌ی توزیع انرژی خورشیدی می‌باشد.
 - به عنوان زیربنا در ساختمان‌ها، راه‌ها و جاده‌ها و دیگر سازه‌های عمرانی می‌باشد.
- از آنجایی که بحث اصلی ما به عنوان یک مهندس کشاورزی، در مورد ارتباط خاک با گیاه است، می‌توان گفت که وظایف خاک در ارتباط با کشاورزی و رشد و توسعه گیاه مدنظر ما می‌باشد. خاک برای داشتن شرایط مناسب جهت رشد و نگهداشت گیاه و محصولات کشاورزی باید یکسری ویژگی‌ها را داشته باشد که به طور کلی می‌توان به مواد زیر اشاره کرد.
- خاک باید تامین کننده‌ی آب مورد نیاز گیاه باشد.
 - خاک باید مقدار کافی اکسیژن برای تنفس ریشه و دیگر موجودات خاکزی را داشته باشد.
 - ساختار فیزیکی خاک باید به نحوی مطلوب باشد تا ضمن نگهداشت گیاه، مانع رشد و توسعه ریشه‌ها نشود.
 - خاک باید حاصلخیز باشد و مواد و عناصر غذایی کافی را در اختیار گیاه قرار دهد.

۱-۴- هوادیدگی و فرایند تشکیل خاک

هوادیدگی؛ خرد شدن و حل شدن سنگ‌ها، خاک و مواد معدنی و همچنین مواد مصنوعی را در تماس با عوامل هوادیدگی، تعریف می‌شود. عوامل هوادیدگی را می‌توان آب، یخ، حیوانات، گیاهان، اسیدها، نمک‌ها و تغییرات دمایی در نظر گرفت.

در حقیقت در علم خاکشناسی هواپدگی فرایندی است که موجب تشکیل خاک در یک محل می‌شود و با خرد شدن سنگ‌ها و سنگ‌ریزه‌ها مواد اولیه تشکیل خاک ایجاد شده سپس با فعالیت دیگر عوامل هواپدگی خاک تشکیل می‌شود. هر چند عوامل فیزیکی و شیمیایی در تشکیل خاک به طور همزمان در حال فعالیت و عمل هستند اما در ابتدای فرایند تشکیل خاک معمولاً عوامل فیزیکی بیشتر بر خرد و ریز شدن سنگ‌ها تاثیرگذار می‌باشند و تغییر چندانى در ترکیب شیمیایی آن‌ها ایجاد نمی‌شود که به این فرایند، هواپدگی فیزیکی گفته می‌شود. فرایندهایی نظیر ضربات ناشی از قطرات باران، فشار ناشی از حرکت آب رودخانه‌ها، حرکت و فشار ریشه‌های گیاهان، فشارهای ایجاد شده از تناوب یخ‌زدن و ذوب شدن آب در درز و شکاف‌ها، گرم و سرد شدن (انبساط و انقباض) سنگ‌ها و نیز برخورد ذرات شن و سنگ‌ریزه‌ها با هم دیگر در طی حمل توسط آب و باد از جمله عوامل مهم در فرایند هواپدگی فیزیکی محسوب می‌شوند. یعنی ۶ عامل آب، باد، خورشید، یخ، گیاهان و حیوانات بر روی سنگ‌های اعمال می‌شوند و در طول چندین سال موجب تغییر و ریز شدن آن‌ها می‌شوند. در حقیقت در ابتدای فرایند تشکیل خاک عوامل هواپدگی فیزیکی موجب ریزتر شدن سنگ‌ها شده و در مرحله بعد با ریز شدن سنگ‌ها فرایندهای شیمیایی افزایش می‌یابند و هواپدگی شیمیایی غالب می‌شود. در هواپدگی شیمیایی عواملی نظیر آب، اکسیژن، دی‌اکسید کربن، موجودات زنده و بارش‌های اسیدی، موجب هیدراته شدن (Hydration)، هیدرولیز (Hydrolysis)، حل شدن (Solution)، کربناته شدن (Carbonation)، اکسید شدن (Oxidation) و احیا شدن (Reduction) مواد ناشی از فرایند هواپدگی فیزیکی و نیز مواد ناشی از هواپدگی شیمیایی می‌شوند. هواپدگی شیمیایی به عنوان مهمترین فرایند در تشکیل خاک بوده و موجب تغییر حالت در نوع ماده اولیه می‌شود. یعنی، در طی فرایند هواپدگی شیمیایی یک کانی با ترکیب مشخص از بین رفته و کانی ثانویه با مشخصات جدید تشکیل می‌شود که به این حالت تغییر شکل شیمیایی نیز می‌گویند. اثربخشی هواپدگی شیمیایی به مقدار زیادی به ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها و نیز اندازه سنگ‌ها بستگی دارد. یعنی به عنوان مثال کوارتز به دلیل مقاومت بیشتر، در مقایسه با الومین و پروکسن در مقابل عوامل شیمیایی با سرعت کمتری تغییر شکل می‌دهد. همچنین در هواپدگی شیمیایی، سنگ‌های آذرین و دگرگونی می‌توانند به کانی‌های اولیه باشند و در طی تغییر شکل شیمیایی به کانی‌های ثانویه تبدیل شوند.

هرچند فرایندهای شیمیایی بعد از فرایندهای فیزیکی اعمال شده و موجب هواپدگی مواد می‌شوند اما در هر دو مرحله عامل موجودات زنده نظیر گیاهان و موجودات خاکری نظیر موش، کرم خاکی و غیره در حال فعالیت هستند و موجب تسریع فرایند هواپدگی فیزیکی و نیز شیمیایی می‌شوند؛ که پیامد حاصل از این عوامل زنده به طور مجزا به عنوان سومین حالت هواپدگی یعنی هواپدگی بیولوژیکی نیز در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی فرایند هواپدگی به وجود آب و دما وابستگی زیادی دارد. یعنی در حضور آب کافی و دمای مناسب هواپدگی سنگ‌ها و تشکیل خاک بهتر و بیشتر انجام می‌شود. شکل ۱-۲ تاثیر مقدار بارندگی و دما بر مقدار هواپدگی خاک در یک منطقه را نشان می‌دهد.

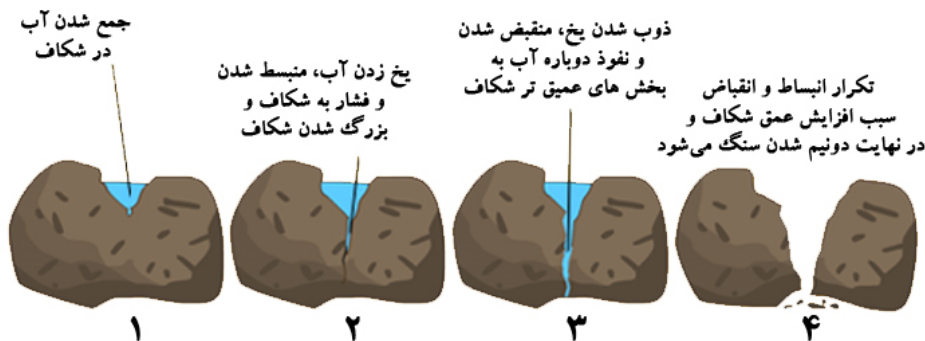


شکل ۱-۲- تاثیر تقابل مقدار متوسط بارندگی و دما سالانه با هوایدگی فیزیکی و شیمیایی (رابطه بین محدوده‌ها و مقادیر درجه حرارت و

بارندگی تقریبی بود و تنها نشان‌دهنده تاثیر پارامترهای می‌باشند و قابل تعمیم به تمامی مناطق و شرایط نمی‌باشند)

همانطور که گفته شد روش‌های مختلفی در هوایدگی فیزیکی خاک وجود دارد که ما در اینجا به اختصار اشاره‌ای فرایندهای معمول در این زمینه خواهیم داشت:

- چرخه یخ زدن و ذوب شدن آب: این فرایند معمولاً در اقلیم‌های معتدل و مرطوب اتفاق می‌افتد. آب در این مناطق وارد درز و شکاف‌های سنگ‌ها می‌شود و در طول شب که درجه حرارت کاهش می‌یابد موجب یخ زدن آب در این شکاف‌ها می‌شود. زمانی که آب یخ می‌زند، انبساط پیدا کرده و موجب ایجاد فشار به دیوارهای شکاف در سنگ می‌شود. دوباره در طول روز با افزایش درجه حرارت این یخ ذوب می‌شود. این چرخه یخ زدن و ذوب شدن آب نهایتاً موجب شکسته شدن سنگ خواهد شد (شکل ۱-۳).



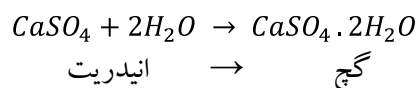
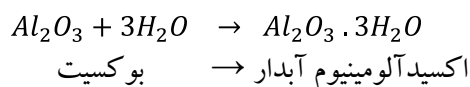
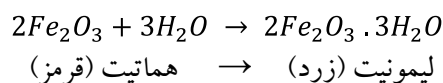
شکل ۱-۳- تاثیر چرخه یخ زدن و ذوب شدن آب بر خرد شدن سنگ‌ها

- **انبساط حرارتی:** این نوع هوادیدگی معمولاً در مناطق خشک اتفاق می‌افتد. در طول روز که درجه حرارت بالا می‌رود سنگ‌های روی زمین گرم و در نتیجه منبسط می‌شوند. در طول شب با کاهش درجه حرارت هوا، سنگ‌ها نیز سرد شده و منقبض می‌شوند. این چرخه انبساط و انقباض موجب ایجاد ترک و شکاف در لایه رویی سنگ‌ها می‌شود که در نهایت موجب جدا شدن این لایه‌ها از سطح سنگ‌ها می‌شود که به این حالت ورقه‌ورقه شدن یا پوسته-پوسته شدن می‌گویند.

- **حرکت ریشه‌ها:** این حالت نوعی هوادیدگی بیولوژیکی نیز می‌باشد. در هوادیدگی بیولوژیکی وجود یک عامل زنده به عنوان عامل هوادیدگی مدنظر است که در این حالت حرکت ریشه با نفوذ در درز و شکاف‌ها و با پیدا کردن مسیر عبور خود با ایجاد فشار می‌تواند موجب جدا شدن سنگ‌ها شود.

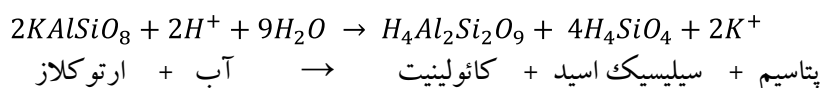
در مورد هوادیدگی شیمیایی هم می‌توان حالت‌های مختلف واکنش‌های شیمیایی که بر تغییر شکل کانی‌ها و مواد سنگی تاثیرگذار می‌باشند و پیش از این نیز به آن‌ها اشاره شد پرداخته شود. از جمله موارد هوادیدگی شیمیایی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- **هیدراته شدن:** به ترکیب شیمیایی مولکول آب با یک ماده یا کانی خاص که موجب تغییر در ساختمان آن شود را هیدراته شدن گویند. کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک در سنگ‌ها فاقد آب بوده و اگر در معرض شرایط مرطوب قرار گیرند با ترکیب شدن آب با کانی‌های موجود در آن‌ها، هیدراته خواهند شد و به محض هیدراته شدن انبساط و افزایش حجم اتفاق می‌افتد و کانی‌ها حالت اولیه خود را از دست داده و نرم می‌شوند. این فرایند معمول‌ترین فرایند در طبیعت است و معمولاً روی کانی‌های ثانویه نظیر کانی‌های اکسید آلومینیوم و اکسید آهن و نیز گچ اعمال می‌شود. معادلات شیمیایی زیر چند حالت از هیدراته شدن کانی‌های معمول را در طبیعت نشان می‌دهند.



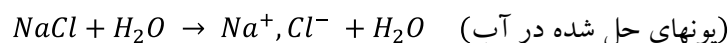
- **هیدرولیز:** این فرایند مهمترین عامل در هوادیدگی شیمیایی محسوب می‌شود. طی این فرایند مولکول آب به هیدروژن (H^+) و هیدروکسید (OH^-) تجزیه شده و این دو ترکیب به صورت شیمیایی در ترکیب با کانی‌های باعث ایجاد

تغییراتی نظیر تبادل، تجزیه ساختار کریستالی کانی‌ها و تشکیل ترکیبات جدید می‌شوند. در این فرایند آب به عنوان یک اسید ضعیف روی کانی‌های سیلیکاتی عمل می‌کند. فرایند اصلی در تبدیل کانی‌های اولیه نظیر فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی نظیر کائولینیت هیدرولیز می‌باشد. یکی از واکنش‌های شیمیایی معمول در این ارتباط را در ادامه آورده شده است:

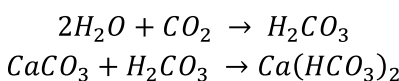


این واکنش از لحاظ حاصلخیزی خاک و تامین عناصر غذایی برای گیاه، حائز اهمیت می‌باشد.

- **حل شدن:** برخی مواد موجود در سنگ‌ها به طور مستقیم در آب حل می‌شوند. مواد حل شده با جریان پیوسته آب از محیط خارج می‌شوند که باعث ایجاد سوراخ‌ها، شیارها و سطوح زبر در سنگ‌ها و نهایتاً موجب تخریب و از هم پاشیدن آن‌ها می‌شود. وقتی آب با مواد اسیدی آلی و معدنی ترکیب شده باشند، این فرایند به طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. به عنوان مثال ترکیب آب با کلروید سدیم موجب افزایش حل شدن مواد حل‌پذیر خواهد شد.

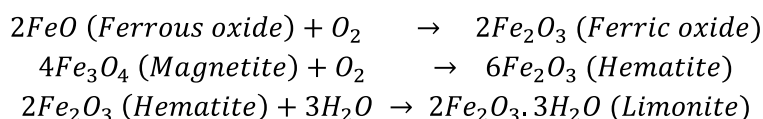


- **کربناته شدن:** واکنش بین دی‌اکسید کربن و ترکیبات کلسیم را کربناته شدن گویند. دی‌اکسید کربن وقتی در آب حل می‌شود باعث ایجاد اسید کربنیک می‌شود. اسید کربنیک ایجاد شده موجب تاثیر بر بسیاری از سنگ‌ها و کانی‌ها نظیر آهک می‌شود. آهک به عنوان سیمان در بسیاری از سنگ‌ها باعث نگهداشت ذرات شن در کنار هم می‌شود که حذف این سیمان موجب از هم پاشیدگی اینگونه سنگ‌ها خواهد شد.

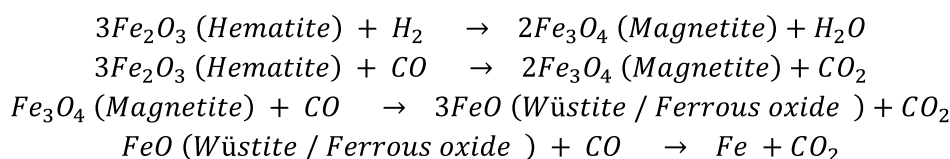


کلسیم بی‌کربنات (حلالیت زیاد) → کلسیت (حلالیت کم)

- **اکسید شدن:** فرایند ترکیب شدن و اضافه شدن اکسیژن با کانی‌ها را اکسیداسیون گویند. در حقیقت در این حالت پذیرنده‌ی نهایی الکترون‌های آزاد شده در واکنش‌های شیمیایی اکسیژن می‌باشد. در واقع در این حالت اکسیژن موجود در هوا به عنوان عامل اکساینده است و با احیا شدن موجب اکسید شدن مواد دیگر می‌شود. اکسیداسیون در حضور رطوبت به دلیل جذب آب توسط ترکیبات اسیدی بیشتر فعال می‌باشد. وقتی کانی‌ها اکسید می‌شوند مقاومت آن‌ها در مقابل فرایند هوازدگی کاهش می‌یابد. کانی‌های آهن‌دار ترکیب‌های معمول و اصلی هستند که در فرایند اکسیداسیون شرکت می‌کنند و با اکسید شدن رنگ خاک را به قرمز و زرد تغییر می‌دهند. برخی از فرایندهای اکسیداسیون کانی‌های آهن در در ادامه آورده شده است:



- **احیا شدن:** فرایند حذف اکسیژن از مواد در حالت اکسیدی را احیاشدن گویند که فرایندی عکس اکسید شدن می باشد. این فرایند از آن جهت دارای اهمیت می باشد که موجب تغییر رنگ خاک به خاکستری و سبز روشن می شود. شرایط احیایی زمانی که مقدار آب زیاد در خاک وجود داشته باشد و حالت غرقابی طولانی مدت وجود داشته باشد حادث می شود. برخی واکنش های احیایی کانی های آهن به صورت زیر می باشند.

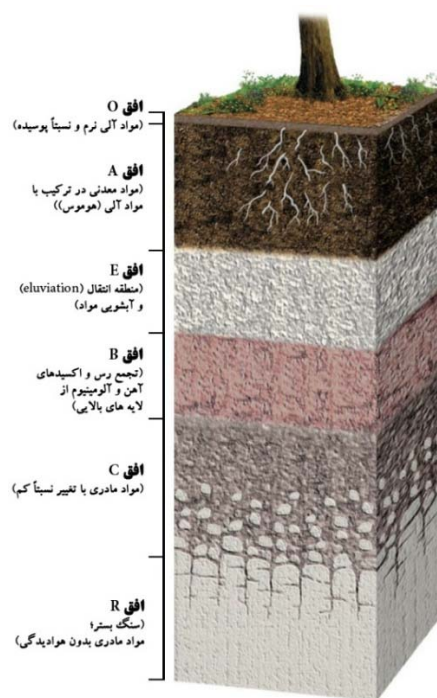


۵-۱- پروفیل خاک و افق های آن

فرایند هوادیدگی خاک در طبیعت به مرور موجب تشکیل و تکامل خاک می شود که این موضوع با لایه بندی خاک ها بیشتر قابل تشخیص است. در حقیقت در ابتدا که هنوز فرایند هوادیدگی اتفاق نیافتاده است، خاک تنها دارای یک لایه از مواد مادری است که در معرض عوامل خاکساز و هوادیدگی قرار گرفته و موجب ایجاد ترکیبات دیگر و در نتیجه به مرور موجب ایجاد لایه های دیگر با ترکیبات متفاوت خواهد شد. افق های خاک لایه هایی هستند که معمولاً افقی و موازی با سطح خاک قرار گرفته که معمولاً هر خاک دارای سه یا چهار افق می باشد. افق های خاک در اغلب موارد توسط ویژگی های فیزیکی به ویژه رنگ و بافت قابل تعریف و تفکیک می باشند. پروفیل خاک هم در حقیقت سیمای عمودی لایه بندی خاک را نشان می دهد که در آن لایه های خاک با توجه به تمایزی که از لحاظ ویژگی های مختلف دارند قابل تشخیص و تفکیک می باشند. **شکل ۴-۱** شماتیک عمومی از یک پروفیل خاک را نشان می دهد. اگر در سفرهای خود در طبیعت به مقاطع و برش های عمودی خاک در اطراف جاده ها توجه کرده باشید به خوبی یک لایه بندی متفاوت از خاک از سطح خاک به عمق را مشاهده کرده اید که به این مقطع همان پروفیل خاک گفته می شود.

افق O: در یک پروفیل خاک کامل و تکامل یافته بالاترین لایه، افق O می باشد. این افق دارای مواد آلی نرم می باشد که در مراحل مختلف تجزیه قرار دارند که بیشتر شاخ و برگ ها گیاهان و یا مواد آلی حاصل از حیوانات می باشند که در سطح خاک تجمع پیدا کردند. خاک های آلی هم دارای یک افق O ضخیم بوده که مشخصه اصلی این خاک ها می باشد. در مراتع و علفزارها معمولاً این افق تشکیل نمی شود و معمولاً در جنگل ها وجود داشته و به عنوان بستر جنگل در نظر گرفته می شود. افق O به سه حالت Oi، Oe و Oa نیز در منابع وجود دارد که بسته به تفاوت در درجه تجزیه مواد در این افق دسته بندی می شوند.

افق Oi حاوی مواد تجزیه نشده یا تا حدودی تجزیه شده می باشد که اغلب شاخ و برگ گیاهان پهن برگ و سوزنی برگ ها و و خزه ها و گلشنک ها می باشند. مواد آلی موجود در این افق اکثراً جزء مواد آلی فیبریک (Fibric) دسته بندی می شوند. رنگ این افق قهوه ای مایل به زرد روشن یا قهوه ای مایل به قرمز می باشد. افق Oe حاوی مواد نسبتاً تجزیه یافته است و در این دسته بندی از لحاظ تجزیه مواد میان دو افق Oi و Oa قرار می گیرد. مواد آلی موجود در این افق اکثراً جزء مواد آلی همیک (Hemic) دسته بندی می شوند. رنگ مواد درون این افق از قهوه ای مایل به خاکستری تیره تا قهوه ای مایل به قرمز تیره متفاوت است. افق Oa دارای مواد آلی با بیشترین مقدار تجزیه است. به دلیل تجزیه ای که در مواد آلی این افق اتفاق افتاده است جزم مخصوص ظاهری مواد در این افق بیشتر از دو افق قبلی می باشند. مواد آلی موجود در این افق اکثراً جزء مواد آلی ساپریک (Sapric) دسته بندی می شوند. رنگ مواد درون این افق از خاکستری بسیار تیره تا سیاه تغییر می کند.



شکل ۱-۴- افق های خاک در شماتیکی از یک پروفیل خاک تکامل یافته

افق A: این افق به عنوان بالاترین لایه اکثر خاک های معدنی محسوب می شود و معمولاً به عنوان خاک سطحی ادر نظر گرفته می شود. این افق معمولاً حاوی مقدار کافی مواد آلی نسبتاً تجزیه شده (هوموسی شده) می باشد که موجب تیره تر بودن این لایه نسبت به لایه های زیرین آن شده است. در واقع این لایه معمولاً حاوی هوموس^۱ می باشد. هوموس جزئی از مواد آلی تجزیه شده ی خاک می باشد که بی شکل و فاقد ساختارهای گیاهی و جانوری می باشد. به دلیل وجود مواد آلی بیشتر در این لایه

1 Topsoil
2 Humus

نسبت به لایه‌های زیرین آن، جرم مخصوص ظاهری این خاک کمتر بوده و در مقابل توان نگهداشت آب و فعالیت بیولوژیک آن بیشتر از دیگر بخش‌های خاک می‌باشد. به دلیل فرسایش خاک (حمل ذرات خاک از محل به محلی دیگر) نیز انتقال ذرات ریزتر تحت جریان آب به لایه‌های زیرین، بافت خاک افق A معمولاً درشت‌تر از لایه‌های زیرین می‌باشد. این افق از خاک معمولاً به عنوان لایه اصلی رشد ریشه، به ویژه ریشه محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. دلیل وجود شرایط مواد غذایی، آب و اکسیژن کافی این لایه به عنوان محل اصلی فعالیت‌های موجودات خاکزی نظیر کرم‌های خاکی، قارچ، باکتری‌ها و بسیاری ریزجانداران خاکزی دیگر می‌باشد. به همین دلیل افق A، پوشش زیستی خاک نیز نامیده می‌شود. در حقیقت پوشش زیستی خاک به مجموع افق‌های بالای افق B گفته می‌شود. یعنی اگر خاکی دارای افق E نیز بود، به مجموع افق‌های A و E پوشش زیستی خاک گفته می‌شود. بنابراین افق را می‌توان با تجمع مواد هوموسی در ترکیب با مواد معدنی و نیز وجود نشانه‌های ناشی از کشت و کار و چرای حیوانات به خوبی تشخیص داد. اگر افق A با ادوات شخم به هم خوردگی داشته باشد (یعنی افق A که در زمین‌های کشاورزی وجود دارد) آن را به A_p نشان می‌دهند.

افق E: این در واقع یک افق آبشویی شده است. واژه E از انتقال یافته (*Eluviated*) گرفته شده است و نشان دهنده لایه از خاک است که ذرات رس و اکسیدهای آهن و آلومینیوم از آن شسته شده‌اند و مواد با مقاومت بالا به هوادیدگی و آبشویی نظیر ذرات کوارتر و به صورت ذرات شن و سیلت در آن باقی مانده‌اند. رنگ این افق به دلیل عدم وجود مواد ذکر شده به حالت رنگ پریده و روشن‌تر از افق‌های بالایی و پایین خودش می‌باشد. این افق معمولاً در مناطق نیمه گرمسیری و در خاک‌هایی تکامل یافته و هوادیده وجود دارد و به طور معمول بین افق A و B تشکیل می‌شود (شکل ۱-۴). اما به طور معمول در نزدیکی خاک و زیر افق O یا A قرار دارد. یعنی وجود این افق نیازمند وجود افق A نمی‌باشد اما در صورت وجود این افق باید افق B هم در زیر آن وجود داشته باشد. این افق معمولاً در خاک‌های مناطق جنگلی تشکیل می‌شود و کمتر در چمزارها و مناطق مرتعی قابل مشاهده می‌باشد. این افق هم می‌تواند در مناطقی که سطح سفره آب زیرزمینی در آن‌ها بالا می‌باشد تشکیل شود و هم در مناطقی که سطح سفره آب در آن‌ها در اعماق بیشتر قرار دارد، تشکیل شود. در مناطقی که سفره آب زیرزمینی پایین می‌باشد در اثر تشکیل اسیدهای ضعیف از آبشویی لایه‌های سطحی اکسیدهای آهن و آلومینیوم موجود در این افق به مرور حل شده و موجب انتقال آن‌ها به افق‌های زیرین می‌شوند. اما در مناطقی که سطح سفره آب زیرزمینی بالا می‌باشد و نوسانات سطح سفره آب در آن‌ها شایع می‌باشد، وجود شرایط احیایی موجب احیاء آهن موجود در افق‌های سطحی شده که این آهن (Fe^{2+}) حلالیت بیشتری داشته و با پایین رفتن سطح سفره آهن احیا شده از لایه‌های سطحی شسته شده و در لایه‌های زیری تجمع پیدا می‌کند (در این حالت این افق را با علامت E_g نشان می‌دهند تا از افق E معمولی قابل تشخیص باشد).

افق B: این افق معمولاً محل تجمع مواد حاصل از افق‌های بالای خود می‌باشد و یک لایه از خاک می‌باشد که فرایندهای تشکیل خاک به مقدار کافی روی آن تاثیرگذار بوده است، به گونه‌ای که ویژگی‌های مواد مادری آن دیگر قابل مشاهده نمی‌باشد. این افق معمولاً خاک زیرسطحی^۱ هم گفته می‌شود. در شرایط مرطوب این افق با تجمع موادی نظیر ذرات رس، کربنات‌ها، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و مواد آلی همراه می‌باشد. یعنی این مواد تحت فرایند رسوب و ته‌نشینی^۲ از افق‌های بالایی در این افق تجمع می‌یابند. وجود آب موجب آبشویی مواد از افق‌های سطحی و تجمع آن‌ها در این افق می‌شود. بر همین اساس این افق را افق تجمعی خاک^۳ نیز می‌نامند. بسته به نوع مواد تجمع یافته در این افق، نام‌های متفاوتی به آن اطلاق می‌شود اما شاید بتوان مهم‌ترین و متداول‌ترین آن‌ها در ایران را افق‌های حاصل از تجمع رس، آهک و گچ دانست که به ترتیب افق آرجلیک، کلسیک و جیسیک نامیده می‌شوند و با علامت‌های B_t ، B_k و B_y نشان داده می‌شوند. تجمع موادی مانند گچ و آهک در افق B می‌تواند به صورت عادی یا حالت سخت شده و به هم پیوسته باشد که در صورت سخت شدگی لایه در این افق آن‌ها را پتروکلسیک (B_{km}) و پتروجیسیک (B_{ym}) می‌نامند. به مجموع افق‌های بالای افق C (معمولاً A و B) سولوم^۴ خاک گفته می‌شود.

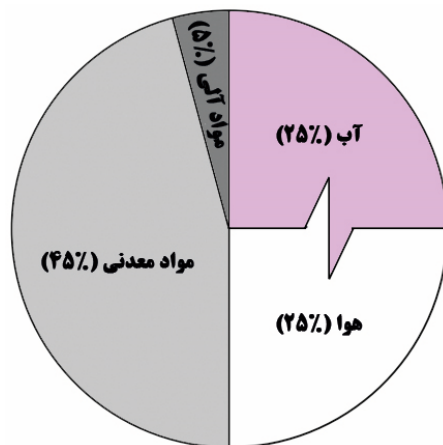
افق C: در یک خاک تکامل یافته افق C زیر افق B قرار گرفته است. این افق به مقدار کمی تحت تاثیر فرایندهای خاکسازی قرار گرفته است و بنابراین توسعه خاکشناسی کمی دارد. به عبارت دیگر افق C شامل مواد ناپیوسته هستند که در زیر سولوم خاک قرار گرفته‌اند که فرایندهای خاکسازی در آن‌ها تاثیر زیادی نگذاشته‌اند که حاوی مواد سنگ مادری می‌باشد و رنگ آن‌ها به مواد غیرهوادیده تمایل دارد. خاک تشکیل شده در سولوم خاک هم می‌تواند شبیه به مواد موجود در افق C باشند و هم می‌توانند متفاوت از آن مواد باشد. در واقع این افق از هوادیدگی^۵ نسبی سنگ بستر تشکیل می‌شود که مواد سنگی در سنگ بستر در اثر شکسته شدن و خرد شدن افق C را تشکیل می‌دهند. اگر این افق به دلیل وجود شرایط ماندابی نشانه‌هایی از احیاء در آن وجود داشته باشد آن را با C_g نشان می‌دهند.

افق R: این افق به عنوان یک افق سنگی است که پایه و اساس پروفیل خاک را تشکیل می‌دهد و به همین دلیل به آن سنگ بستر می‌گویند. موادی نظیر گرانیت، بازالت، کوارتز، ماسه سنگ، سنگ آهک و غیره نمونه‌ای از سنگ بسترهایی می‌باشند که افق R را تشکیل می‌دهند. افق R می‌توان دارای تعدادی درز و شکاف اما این درز و شکاف‌ها آنقدر کم و کوچک می‌باشد که اجازه نفوذ ریشه در آن‌ها را نمی‌دهد. اگر مواد خاکی بالای سنگ بستر از هوادیدگی^۵ این افق تشکیل شده باشند به افق R سنگ مادری^۵ گفته می‌شود.

1 Subsoil
2 Illuviation
3 Accumulated layer
4 Solum
5 Parent rock

۱-۶- خاک به عنوان یک سیستم سه فازی پراکنده

سیستم‌های موجود در طبیعت از حالت‌های مختلف ماده تشکیل شده است که به هر کدام از این حالات در اصطلاح فاز گفته می‌شود. به طور کلی هر بخش از یک سیستم که داخل آن از لحاظ فیزیکی یکنواخت باشد فاز نام دارد. از نظر فیزیکی سه فاز مختلف تعریف می‌شود که خاک نیز می‌تواند هر سه این فازها را داشته باشد. از دیدگاه فیزیکی، خاک یک سیستم سه فازی شامل فازهای جامد، مایع و گاز می‌باشد. که در مبحث فیزیک خاک به طور جداگانه به هر کدام از این فازها در فصل‌های مجزا پرداخته می‌شود اما در اینجا جهت آشنایی اولیه و کلی در مورد هر کدام از این فازها توضیح مختصری آورده شده است. مقادیر نسبی سه فاز جامد، مایع و گاز در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. زیرا تغییر در مقدار هر کدام از این فازها می‌تواند اثرات نامطلوبی بر رشد و نمو گیاهان که هدف اصلی در بحث کشاورزی می‌باشد، بگذارد. به عنوان مثال اگر نسبت بخش جامد خاک از یک حدی بیشتر باشد اثرات نامطلوبی را بر فرایندهای موجود در خاک خواهد گذاشت؛ یعنی در این حالت خاک ممکن است متراکم‌تر باشد و مقدار اکسیژن آن کمتر باشد و اثرات نامطلوبی در تنفس ریشه و رشد گیاه بگذارد. بنابراین در تمامی شرایط باید فازهای جامد، مایع و گاز خاک با نسبت مطلوبی کنار یکدیگر قرار بگیرند تا محیط مناسبی برای رشد و نمو گیاهان فراهم سازند. در شکل ۱-۵ ترکیب حجمی هر کدام از اجزاء خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- درصد حجمی فازهای مختلف خاک

فاز جامد (Solid Phase): همانطور که در شکل ۱-۵ نیز آورده شده است حدود ۵۰ درصد حجم خاک را مواد جامد یا همان فاز جامد خاک تشکیل می‌دهد که شامل مواد معدنی و مواد آلی می‌باشد. به فاز جامد خاک زمینه یا ماتریس خاک^۱ نیز گفته می‌شود. ماتریس خاک شامل ذراتی است که از لحاظ ترکیب شیمیایی و مینرالوژیکی (شکل، اندازه و جهت) با هم متفاوت می‌باشند. بنابراین می‌توان فاز جامد خاک را به دو گروه مواد معدنی و مواد آلی تقسیم کرد. مواد آلی خود از لحاظ اندازه به شن، سیلت و رس تقسیم‌بندی می‌شود که در فصل بعد به به طور کامل در مورد آنها بحث شده است. این مواد از ترکیبات

1 Phase

2 Soil matrix

معدنی مانند کوارتز، فلدسپاتها، آلومینوسیلیکاتها و اکسیدهای آهن و آلومینیوم تشکیل شده‌اند و استخوان‌بندی اصلی خاک را تشکیل می‌دهند. جزء دیگر فاز جامد خاک مواد آلی خاک می‌باشند. از لحاظ تئوری این مواد حدود ۵ درصد حجمی خاک را شامل می‌شوند. مقدار مواد آلی در خاک شاید به دلایل مختلف متفاوت باشد اما مواد آلی جزء لاینفک هر خاک بوده و خواص فیزیکی و شیمیایی آنرا تا حد قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهند. مواد آلی خاک عبارتند از کلیه اجسام آلی موجود در خاک اعم از زنده یا مرده، تازه یا کهنه، ساده یا پیچیده. مواد آلی خاک شامل بقایای گیاهی و حیوانی در مراحل مختلف تجزیه، هوموس، میکروبها، ترشحات ناشی از جانداران خاک و هر ترکیب آلی دیگر می‌باشد. بقایای گیاهی یا حیوانی که به هر طریقی وارد خاک می‌شوند در نتیجه فعالیت موجودات زنده خاک تجزیه و ضمن آزاد کردن قسمتی از مواد غذایی خود دچار تغییرات زیادی می‌شوند. سرعت فعالیت ریزجانداران خاک جهت تجزیه بقایای گیاهی و حیوانی به وجود آب، هوای کافی و حرارت مناسب برای فعالیت آنها بستگی دارد. این مواد در خاک طی فرایندهای تجزیه بیوشیمیایی باعث تشکیل مواد سیاه رنگی به نام کلئیدهای آلی یا هوموس می‌شوند.

فاز مایع (Liquid Phase): درون خلل و فرج خاک توسط مقادیر متفاوتی از آب پر شده است که فاز مایع خاک را تشکیل می‌دهد. در طبیعت این آب هرگز به صورت خالص نبوده و به همین دلیل به فاز مایع خاک محلول خاک نیز گفته می‌شود. کلیه عناصر غذایی در فاز مایع خاک و به شکل محلول قابل جذب گیاه هستند. کلیه واکنش‌های شیمیایی که منجر به رسوب و یا فراهم بودن عناصر غذایی برای ریشه گیاه می‌شوند، در همین فاز مایع خاک صورت می‌گیرند.

فاز گازی (Gaseous Phase): فاز مایع و فاز گاز به صورت متناوب با هم در حال جایگزین می‌باشند. فاز گازی را هوا یا اتمسفر خاک نیز می‌گویند و منظور همان گازهای موجود در خاک می‌باشد که در بخشی از خلل و فرج که محلول خاک در آنها وجود ندارد قرار دارند. ترکیب گازهای موجود در اتمسفر خاک عموماً همان ترکیب موجود در اتمسفر بالای سطح خاک می‌باشد با این تفاوت که مقادیر این گازها در فاز گازی خاک نسبت به اتمسفر خاک متفاوت می‌باشند. به طور کلی قسمت اعظم گازهای تشکیل دهنده اتمسفر خاک شامل اکسیژن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و هیدروژن می‌باشد. مقدار اکسیژنی که در این هوا خاک وجود دارد از مقدار اکسیژن موجود در اتمسفر کمتر است این بدان علت است که ریشه گیاهان برای رشد و نمو اکسیژن را مصرف کرده و دی‌اکسید کربن پس می‌دهند.

در مطالعات خاکشناسی اثر چهار بخش مواد معدنی، مواد آلی، آب و هوا بر رشد گیاه بسیار مهم است. اثر این مواد به طور هم‌زمان بر رشد گیاه خواهد بود و به نوعی اثر متقابل آنها بر یکدیگر در رشد گیاه تاثیرگذار است. به عنوان مثال اگرچه یکی از نیازهای اصلی گیاه وجود آب در خاک است اما زیاد بودن آب در خاک هم نمی‌تواند باعث رشد بیشتر گیاه باشد و حالت

تداوم در پر بودن خلل و فرج خاک از آب برای گیاه مفید نمی‌باشد و گیاه هم‌زمان با نیاز به آب به هوا هم نیاز دارد و کاهش آب خاک می‌تواند باعث افزایش هوای خاک شود که این موضوع نشان دهنده‌ی تاثیر اثر متقابل این دو فاز بر رشد گیاه می‌باشد. مواد آلی هم با اتصال به فاز جامد معدنی خاک موجب تشکیل ذرات درشت‌تر و در نتیجه ایجاد منافذ درشت‌تر می‌شود که از این طریق بر مقدار آب و هوای خاک و در نتیجه بر رشد گیاه تاثیر خواهد گذاشت. بنابراین در تفسیر تاثیر فازهای یک خاک بر رشد گیاه نباید اثر متقابل آن‌ها را فراموش کرد. این موضوع حتی بر قابلیت دسترسی گیاه به عناصر غذایی هم تاثیر می‌گذارد.

۷-۱- پدولوژی و اداپولوژی

پدولوژی^۱ و اداپولوژی^۲ دو شاخه مختلف از مطالعات خاکشناسی می‌باشد. پدولوژی از دو کلمه یونانی پدون^۳ به معنی خاک و لوگوس به معنی مطالعه اقتباس شده است که در مجموعه به معنی مطالعه خاک می‌باشد. در این حالت از مطالعات خاکشناسی، منشاء و تشکیل خاک، مورفولوژی خاک و رده‌بندی و نیز تشریح آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. یعنی توجه‌ای به مطالعات خاک به عنوان یک محیط برای رشد موجودات و کاربرد عملی آن ندارد و خاک را به عنوان یک جسم طبیعی مورد مطالعه قرار می‌دهد.

اما اداپولوژی از دو کلمه ادافوس^۴ به معنای خاک یا زمین لوگوس به معنی مطالعه اقتباس شده است که به خاک به عنوان یک محیط برای رشد موجودات زنده به ویژه گیاه نگاه می‌کند. یعنی دانشمندان اداپولوژیست خاک و ویژگی‌های مختلف آن را از دیدگاه رشد گیاه مورد مطالعه قرار می‌دهند. زیرشاخه‌های عمومی اداپولوژی به طور کلی دو بخش می‌باشند که شامل خاکشناسی کشاورزی که تحت عنوان اگروپولوژی^۵ نیز شناخته می‌شود که به مطالعه خاک به عنوان محیط کشت گیاهان زراعی و باغی می‌پردازد و بخش دیگر آن به تحت عنوان خاکشناسی زیست محیطی می‌باشد که به چگونگی استفاده انسان از خاک و نیز تاثیر خاک در ارتباط با استفاده انسان بر رشد گیاهان می‌پردازد. هدف کلی بحث ما نیز در ادامه به عنوان مهندسين کشاورزی توجه به جنبه اداپولوژی خواهد بود اما به هر صورت به دلیل وجود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پایه این دو بخش از مطالعات خاکشناسی به طور کاملاً قابل تفکیک نمی‌باشند.

1 Pedology
2 Edaphology
3 Pedon
4 Edaphos
5 Agrology

فصل دوم

فیزیک خاک

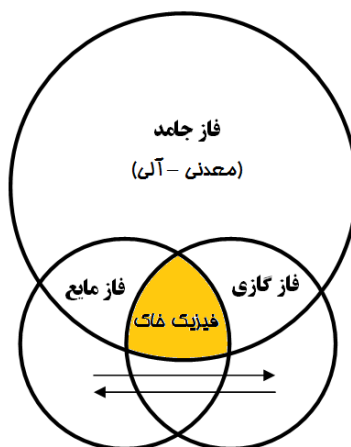
۱-۲- کلیات

خاک مجموعه‌ای از اجزای طبیعی روی سطح زمین می‌باشند که شامل مواد زنده و غیره زنده می‌باشند که گیاه در آن رشد می‌کند یا توانایی نگهداشت و رشد گیاه در آن‌ها وجود دارد. اجزای تشکیل دهنده خاک به چهار دسته‌ی مواد سخت، موجودات زنده، آب و هو تقسیم می‌شوند. **مواد سخت**، شامل ترکیبات معدنی موجود در خاک می‌باشد ولی ممکن است دارای مقداری مواد آلی نیز باشند. البته این ترکیبات معدنی از تخریب سنگ‌های اولیه یا سنگ مادر حاصل شده‌اند که گاهی اوقات همراه با مواد تازه کلونیدی و نمک‌ها می‌باشند. **موجودات زنده**، بسیاری از تغییرات مفیدی که در خاک‌ها ایجاد می‌شود توسط موجودات زنده انجام می‌پذیرد. موجودات زنده شامل ریشه گیاهان، باکتری‌ها، قارچ‌ها، کرم‌ها و بالاخره حلزون‌ها می‌باشند که در خاک زندگی می‌کنند. **آب**، شامل آبی که در خاک وجود دارد که باعث حمل مواد حل شده درون خاک می‌شود. البته این مواد حل شده برای رشد و نمو گیاهان به مصرف می‌رسد. آب موجود در خاک‌ها از باران و آب‌های نفوذی، آب جذب شده و بالاخره آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود که در مواقع خشکی از محل خود خارج شده و به مصرف می‌رسد. **هوای موجود در خاک**؛ همراه با آب در خلل و فرج خاک وجود دارد که البته این هوا از ضروریات رشد و نمو گیاهان و ادامه حیات حیوانات می‌باشد. مقدار اکسیژنی که در هوای خاک وجود دارد از مقدار اکسیژن موجود در اتمسفر کمتر است این بدان علت است که ریشه گیاهان برای رشد و نمو اکسیژن را مصرف کرده و دی اکسید کربن پس می‌دهند.

خواص فیزیکی خاک در تعیین قابلیت استفاده از آن برای مقاصد گوناگون حائز اهمیت می‌باشد. استحکام و تحمل فشار، قابلیت زهکشی در حالت مرطوب و خشک، قدرت ذخیره رطوبت، سهولت نفوذ ریشه گیاهان در خاک، تهویه و قابلیت نگهداری عناصر غذایی گیاهان در خاک همگی ارتباط نزدیک با ویژگی‌های فیزیکی خاک دارند. در باروری زمین، علاوه بر حاصلخیزی و ویژگی‌های شیمیایی خاک، ویژگی‌های فیزیکی نیز اهمیت ویژه‌ای دارند. اهمیت برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت، ساختمان، ظرفیت نگهداشت رطوبت، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری و جرم مخصوص ظاهری در تولید محصول به خوبی مشخص شده است. برخی ویژگی‌های فیزیکی در مواردی به اندازه‌ای مهم می‌باشند که می‌توان گفت تأثیر آنها حتی از حاصلخیزی و ویژگی‌های شیمیایی خاک مهم‌تر می‌باشد، زیرا ویژگی‌های فیزیکی خود بر حاصلخیزی خاک نیز تأثیرگذار می‌باشند.

همانطور که از واژه "فیزیک خاک" مشخص است این علم از دو بخش فیزیک و خاک تشکیل شده است. یعنی می‌توان با در نظر گرفتن هر دو جنبه این علم تعریف جامع و کلی از این علم داشته باشیم. فیزیک علمی است که به کنکاش در ماهیت و حالت ماده و انرژی‌های موجود و نحوه نقل و انتقال این دو در سیستم‌های طبیعی و غیر طبیعی می‌پردازد. بنابراین با توجه به تعریف خاک و مدنظر قرار دادن تعریف علم فیزیک می‌توان فیزیک خاک را به این صورت تعریف کرد "فیزیک خاک یکی از شاخه‌های علم خاکشناسی می‌باشد که به کنکاش و جستجو در ویژگی‌های فیزیکی خاک و مطالعه نوع و چگونگی کنار هم قرار گرفتن مواد تشکیل دهنده‌ی خاک می‌پردازد و وظیفه آن پیش‌بینی، اندازه‌گیری و کنترل فرایندهای فیزیکی است که در خاک رخ می‌دهد". بنابراین می‌توان گفت همانطور که علم فیزیک روابط بین ماده و انرژی را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد فیزیک خاک نیز به بررسی حالات و حرکت مواد و ورود و حمل و نقل انرژی در خاک می‌پردازد. علم فیزیک خاک نسبت به شاخه‌های دیگر خاکشناسی مانند شیمی و حاصلخیزی پیشرفت و قدمت کمتری دارد. دلیل این موضوع این است که اکثر رهبران علم خاکشناسی شیمی‌دان و زمین‌شناس بوده‌اند. اما با توجه به اهمیتی که مباحث فیزیک خاک و حاصلخیزی فیزیکی خاک در عملکرد محصول داشته است در سالیان اخیر توجه عمده‌ای به علم فیزیک خاک جهت بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش عملکرد محصول شده است.

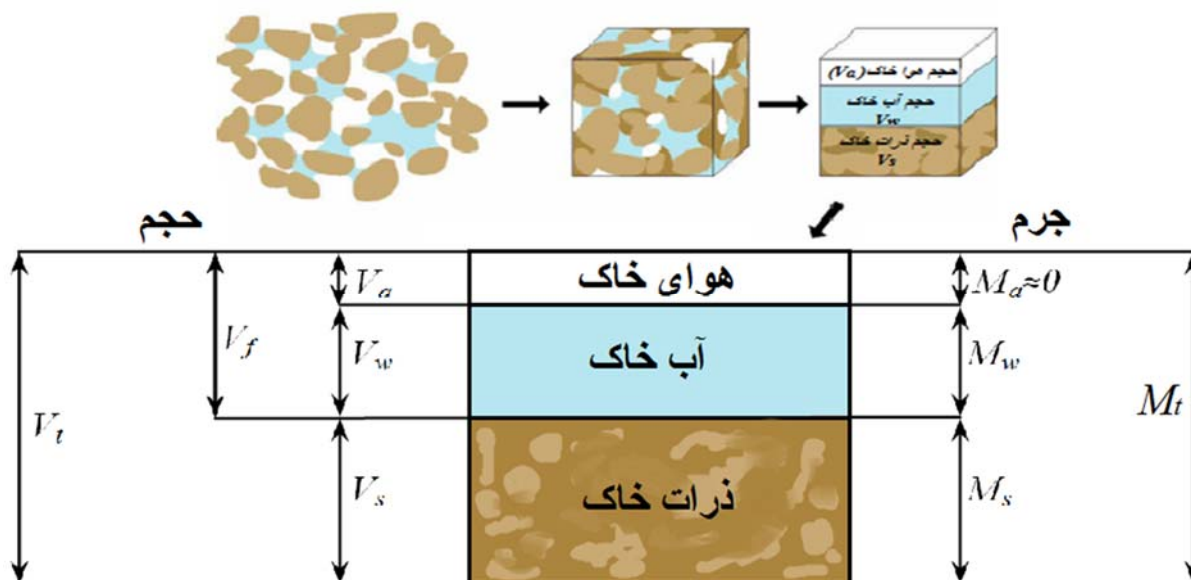
همانطور که در فصل قبل گفته شد، خاک یک سیستم سه فازی متخلخل است که دارای سه فاز جامد، مایع و گاز می‌باشد. برای اینکه بهتر با مفهوم فیزیک خاک در ارتباط با این سه فاز آشنا شویم بهتر است **شکل ۱-۲** را در ارتباط با این موضوع مشاهده نمایید. همانطور که در شکل مشخص است، در واقع علم فیزیک خاک علمی است که برهم‌کنش و روابط بین چهار ترکیب مختلف موجود در خاک (یعنی مواد معدنی، مواد آلی، آب و هوا) و روابط بین این چهار جزء را در ارتباط با فرایندهای فیزیکی موجود در خاک مورد بررسی قرار می‌دهد.



شکل ۲-۱- فیزیک خاک علم مطالعه ویژگی‌ها و برهمکنش‌ها بین چهار ترکیب مختلف (مواد معدنی، مواد آلی، محلول خاک و هوای خاک) و سه فاز جامد، مایع و گاز درون خاک می‌باشد. در شرایط بهینه در حدود ۵۰ درصد حجمی خاک را فاز جامد تشکیل می‌دهد و فاز مایع و گازی هر کدام ۲۵ درصد حجم خاک را شامل می‌شوند.

۲-۲- روابط حجمی و جرمی مواد تشکیل دهنده خاک

اکنون برای شناخت و تعریف بهتر شرایط فیزیکی خاک بهتر است روابط حجمی و جرمی بین سه فاز جامد، مایع و گازی را شرح دهیم. اگر یک خاک که در شرایط طبیعی می‌بینید را به گونه‌ای فرض کنید که بتوان حجم هر کدام از فازهای آن را به صورت جداگانه مشاهده و تعریف کنیم، می‌توان **شکل ۲-۲** را برای آن خاک فرض کرد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود هر کدام از فازهای خاک به صورت جداگانه تعریف شده است و برای راحتی در اندازه‌گیری و درک بهتر روابط، فرض شده است که ما می‌توانیم خاک را با این شرایط داشته باشیم.



شکل ۲-۲- شمایی کلی از خاک به عنوان یک سیستم سه فازی

در شکل فوق حجم فازهای مختلف خاک در سمت چپ شکل نشان داده شده است و جرم‌های اجزاء در سمت راست آورده شده است. حجم اجزاء در این شکل با V نشان داده شده است و جرم مربوط به هر جزء با M نشان داده شده است و تعریف جرم و حجم هر کدام از اجزاء به صورت جداگانه در **جدول ۱-۲** آورده شده است.

جدول ۱-۲- نمادهای استفاده شده برای حجم و جرم فازهای مختلف خاک

حجم ذرات خاک (V_s)	حجم آب خاک (V_w)	حجم هوای خاک (V_a)	حجم کل خاک ($V_t = V_s + V_w + V_a$)
جرم ذرات خاک (M_s)	جرم آب خاک (M_w)	جرم هوای خاک ($M_a \approx 0$)	جرم کل خاک ($M_t = M_s + M_w$)

حال با درک بهتر از حجم و جرم فازهای مختلف خاک می‌توان روابط عددی بین این اجزاء و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را به راحتی تعریف کرد.

۱-۲-۲- چگالی ذرات جامد خاک - جرم مخصوص حقیقی خاک (ρ_s or ρ_p):

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{معادله ۱-۲})$$

همانطور که در **معادله ۱-۲** مشخص است جرم مخصوص حقیقی خاک، نسبت جرم اجزاء جامد خاک به حجم اجزاء جامد خاک تعریف می‌شود. در بیشتر خاک‌های معدنی میانگین چگالی ذرات حدود $2.6-2.7$ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که تقریباً برابر با چگالی کانی کوارتز می‌باشد که کانی رایج در خاک‌های شنی می‌باشد. کانی‌های رسی آلومینوسیلیکات هم دارای چگالی مشابهی می‌باشند و وجود اکسیدهای آهن و دیگر کانی‌های که چگالی آن‌ها بالا است سبب افزایش جرم مخصوص حقیقی خاک خواهد شد. این در حالی است که وجود مواد آلی سبب کاهش جرم مخصوص حقیقی خاک خواهد شد.

برای تعیین جرم مخصوص حقیقی، دو کمیت جرم و حجم ذرات جامد یک نمونه خاک را باید تعیین نمود. جرم نمونه با خشک شده در آن (محفظه‌ی خشک‌کن برقی) و توزین آن تعیین می‌شود و حجم نمونه خاک نیز با استفاده از قانون ارشمیدس محاسبه می‌شود. بر اساس قانون ارشمیدس، وقتی جسمی در آب قرار گیرد برابر جرم آب هم حجم آن جسم از جرم آن کاسته می‌شود. روش پیکنومتر که بر اساس قانون ارشمیدس بنا شده است برای مدت مدیدی است که برای تعیین حجم ذرات خاک در آزمایشگاه‌های خاکشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا یک پیکنومتر تمیز و خشک را برداشته و وزن آن را با درپوش اندازه می‌گیرند (W_p). سپس حدود ۱۰ گرم خاک خشک که از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شده است را درون آن می‌ریزند و بعد از تمیز کردن سطح بیرونی پیکنومتر در پوش پیکنومتر را گذاشته و آن را دوباره توزین می‌کنند (W_{ps}). در مرحله بعد پیکنومتر را تا نصف با آب مقطر پر کرده و پیکنومتر را روی حمام بخار آب یا گرم‌کن قرار داده تا برای خارج کردن هوای محبوس به مدت ۱۰ دقیقه بجوشد. بعد از جوشیدن آب درون پیکنومتر اجازه می‌دهند تا دمای

آن تا دمای آزمایشگاه کاهش پیدا کند و سپس پیکنومتر را با آب مقطر (جوشیده و خنک شده) پر کرده و درپوش آن را به دقت روی آن قرار داده و با یک پارچه خشک سطح بیرونی پیکنومتر را خشک می کنند و وزن آن را یادداشت می کنند (W_{PSW}). در پایان محتویات درون پیکنومتر را تخلیه کرده و آن را به طور کامل تمیز و دوباره پیکنومتر را با آب مقطر (جوشیده و خنک شده) پر می کنند و درپوش را به دقت گذاشته و با یک پارچه آن را خشک و وزن آن را یادداشت می کنند (W_{PW}). در آخر جرم مخصوص حقیقی خاک بر حسب $g\ cm^{-3}$ با استفاده از معادله ۲-۲ محاسبه می شود.

$$\rho_s = \frac{\rho_w(W_{PS} - W_P)}{(W_{PS} - W_P) - (W_{PSW} - W_{PW})} \quad \text{(معادله ۲-۲)}$$

در این معادله؛

ρ_w : جرم مخصوص آب بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب که بستگی به دمای محیط دارد.

W_{PS} : وزن پیکنومتر بعلاوه خاک بر حسب گرم (قبل از اضافه کردن آب).

W_P : وزن پیکنومتر خالی بر حسب گرم.

W_{PSW} : وزن پیکنومتر پر شده با خاک و آب بر حسب گرم.

W_{PW} : وزن پیکنومتر پر شده با آب بر حسب گرم.

۲-۲-۲- چگالی ظاهری خشک - جرم مخصوص ظاهری خشک (ρ_b or ρ_d) (Dry Bulk Density):

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_w + V_a} \quad \text{(معادله ۳-۲)}$$

جرم مخصوص ظاهری خشک خاک نشان دهنده نسبت جرم خاک خشک به کل حجم خاک می باشد. همانطور که در شکل ۲-۲ نیز نشان داده شده است حجم کل خاک شامل حجم بخش جامد و حجم خلل و فرج خاک می باشد. بدیهی است که مقدار ρ_b همیشه از ρ_s کمتر می باشد و اگر خلل و فرج خاک نصف حجم خاک را شامل شوند مقدار ρ_b نیز نصف ρ_s ، یعنی حدود $1/3$ تا $1/35$ گرم بر سانتی متر مکعب، خواهد شد. مقدار ρ_b در خاک های درشت بافت بیشتر از خاک های ریز بافت می باشد. به عنوان یک مقیاس می توان گفت که جرم مخصوص ظاهری در خاک های شنی می تواند حدود $1/6$ گرم بر سانتی متر مکعب باشد و این در حالی است که مقدار این پارامتر در خاک های لومی خاکدانه ای و خاک های رسی حتی تا $1/1$ گرم بر سانتی متر مکعب و کمتر نیز می رسد. بنابراین می توان گفت که جرم مخصوص ظاهری خاک تحت تاثیر بافت خاک، ساختمان خاک، مقدار ماده آلی و ویژگی های انقباض و انبساط رس ها خاک قرار می گیرد. هر چه ساختمان خاک مناسب تر و خاکدانه ای باشد جرم مخصوص ظاهری خاک نیز کوچکتر خواهد بود و هر چه ساختمان خاک تحت تاثیر فعالیت های کشاورزی تخریب شده باشد مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک نیز بیشتر خواهد شد (توضیح ساختمان خاک در ادامه همین فصل

آورده شده است). تراکم خاک که خود نشانه‌ای از تخریب ساختمان خاک می‌باشد با کاهش حجم خلل و فرج خاک سبب کاهش حجم خاک و افزایش نسبت جرم به حجم خاک خواهد شد؛ بنابراین تراکم خاک سبب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک خواهد شد اما حتی در شدیدترین حالت تراکم نیز مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک همچنان از مقدار جرم مخصوص حقیقی یا همان جرم مخصوص ذرات خاک کمتر خواهد بود، زیرا حتی در این شرایط خاک همچنان به صورت یک جسم متخلخل در نظر گرفته می‌شود.

جرم مخصوص ظاهری یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم و پرکاربرد در خاکشناسی می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری برای تبدیل درصد رطوبت جرمی به رطوبت حجمی، محاسبه تخلخل خاک، برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و برآورد جرم حجم‌های بزرگ خاک بویژه در مورد خاک‌برداری و خاک‌ریزی‌های به کار می‌رود. جرم مخصوص ظاهری خاک یکی از مهمترین ویژگی‌هایی است که به آسانی می‌تواند تاثیر مدیریت‌های کوتاه و بلند مدت را بر خاک نشان دهد. به عنوان مثال افزودن کودهای آلی به خاک به سرعت سبب تغییر جرم مخصوص خاک خواهد شد. بعد از افزودن مواد آلی به خاک به دلیل اثر رقیق‌کنندگی مواد آلی در خاک، جرم مخصوص ظاهری کاهش نشان می‌دهد. بنابراین هر چه مقدار مواد آلی خاک بیشتر باشند جرم مخصوص ظاهری خاک کمتر خواهد بود.

روش‌های مختلفی برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک وجود دارد. که دو روش معمول آن که در بیشتر آزمایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل روش کلوخه و استوانه (*core method*) می‌باشد.

تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک با روش کلوخه: در این روش جرم خاک با توزین یک کلوخه مشخص و حجم آن با استفاده از قانون ارشمیدس تعیین می‌شود. در این روش کلوخه‌ای با حجم حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب را به یک سیم مسی یا نخ آویزان کرده و آنرا با دقت وزن می‌کنند. سپس کلوخه را توسط پارافین اندوده می‌کنند تا نسبت به آب غیر قابل نفوذ شود. برای این منظور پارافین جامد را در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده تا ذوب شود و بعد از آن کلوخه را چندین مرتبه در پارافین وارد می‌کنند تا اینکه لایه‌ای از پارافین بطور کامل کلوخه را بپوشاند. بعد از اینکه تمام کلوخه به طور کامل توسط پارافین پوشانده شد جرم آن را دوباره توسط ترازو اندازه‌گیری کرده تا جرم پارافین تعیین شود. حال با قرار دادن این کلوخه در یک بشر آب و اندازه‌گیری جرم کلوخه، با استفاده از قانون ارشمیدس می‌توان حجم آن را تعیین کرد. در واقع حجم کلوخه برابر حجم آب جابجا شوند یعنی همان کاهش جرم کلوخه در حالت غوطه‌ور بودن در آب نسبت به جرم آن در حال عادی خواهد بود. در این مرحله قبل از اینکه حجم خاک را تعیین کنیم باید حجم پارافین را از حجم کل کلوخه کم کنیم. برای این کار می‌توان از جرم مخصوص پارافین (0.9 گرم بر سانتی‌متر مکعب) و معادله ۲-۴ استفاده کرد.

$$\text{جرم پارافین} = \frac{\text{جرم مخصوص پارافین}}{\text{حجم پارافین}} \quad (\text{معادله ۲-۴})$$

تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک با روش استوانه: در این روش از نمونه دست نخورده استفاده می‌شود. برای این منظور یک نمونه بردار استوانه‌ای (*core*) با دقت توسط چکش به درون خاک کوبیده می‌شود و بعد از اینکه درون سیلندر کاملاً از خاک پر شد آن را با دقت از درون خاک خارج کرده و حجم خاک درون آن را با توجه به حجم استوانه فلزی تعیین می‌کنند و با قرار دادن آن در آون و خشک کردن آن، جرم خاک را نیز تعیین کرده و جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از معادله ۲-۳ تعیین می‌شود.

۳-۲-۲- تخلخل خاک (*Soil Porosity (f or E)*):

$$f = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_w + V_a}{V_s + V_w + V_a} \quad (\text{معادله ۲-۵})$$

تخلخل خاک شاخصی از نسبت حجم خلل و فرج خاک می‌باشد. این شاخص معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۶ درصد می‌باشد (۶۰٪-۳۰٪). خاک‌های درشت بافت اگر چه دارای اندازه خلل و فرج درشتی نسبت به خاک‌های ریز بافت می‌باشند اما حجم خلل و فرج در این خاک‌ها کم می‌باشد و بنابراین تخلخل این خاک‌ها نسبت به خاک‌های ریز بافت کمتر می‌باشد. مقدار تخلخل در خاک‌های رسی به دلیل وجود فرایندهای متناوبی مانند انبساط و انقباض، خاکدانه‌سازی و دیسپرس شدن و نیز تراکم و ایجاد شکاف‌ها در این خاک‌ها، دارای تغییرپذیری زیادی می‌باشد. به طور کلی تخلخل خاک به کسر جزئی حجم خلل و فرج خاک اشاره دارد و همانطور که در معادله ۲-۵ نیز آورده شده است عبارت است از نسبت حجم خلل و فرج خاک به حجم کل خاک اما این مقدار به طور متوسط باید برابر با تخلخل سطحی (*areal porosity*)، یعنی کسر جزئی از سطح خلل و فرج در یک برش عمودی، و نیز تخلخل خطی (*lineal porosity*)، یعنی کسر جزئی از طول خلل و فرج در طول یک خط فرضی عبور کرده از هر کدام از جهات ستون خاک، باشد. باید به این نکته توجه داشت که تخلخل خاک نشان دهنده توزیع اندازه منافذ خاک نمی‌باشد و تنها حجم نسبی این منافذ را به عنوان کسری از حجم کل خاک نشان می‌دهد اما با این وجود این پارامتر یکی از ویژگی‌های مهم خاک خاک می‌باشد که در بحث‌های مهم و مدیریتی فیزیک خاک دارای اهمیت خاص خود می‌باشد.

برای تعیین تخلخل خاک بعد از تعیین جرم مخصوص ظاهری و حقیقی با روش‌هایی که قبلاً توضیح داده شد مقدار آن را می‌توان با استفاده از معادله ۲-۶ بدست آورد.

$$f = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \text{معادله ۶-۲}$$

در این معادله نسبت $\frac{\rho_b}{\rho_p}$ نشان دهنده حجم نسبی ذرات خاک می باشد که با کم کردن آن از ۱ حجم نسبی منافذ خاک یا همان تخلخل محاسبه می شود.

۴-۲-۲- رطوبت خاک (Soil Wetness):

رطوبت خاک یا مقدار نسبی رطوبت در خاک می تواند توسط شاخص های متفاوتی بیان شود. این شاخص ها بسته به اینکه نسبت به چه جزئی از خاک باشند متفاوت می باشند. به عنوان مثال مقدار رطوبت خاک می تواند نسبت به جرم ذرات جامد، نسبت به جرم کل خاک، نسبت به حجم ذرات جامد، نسبت به حجم کل خاک و همچنین می تواند نسبت به حجم منافذ خاک بیان شود. در ادامه توضیحات کلی در مورد چند شاخص مهم در بیان مقدار رطوبت خاک در آورده شده است که دو شاخص اول شاخص های اصلی و عمومی در بیان رطوبت خاک می باشند.

الف) رطوبت جرمی خاک (Mass Wetness (θ_m or w)):

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad \text{(معادله ۷-۲)}$$

این شاخص در واقع جرم آب خاک (M_w) را نسبت به جرم ذرات خاک خشک (M_s) نشان می دهد و اشاره به مقدار رطوبت وزنی خاک دارد. در این تعریف منظور از خاک خشک خاک خشک شده در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس می باشد. مقدار رطوبت در حالتی که خاک در هوا خشک شود معمولاً بیشتر از مقدار رطوبت در خاک خشک شده در آون می باشد زیرا وقتی خاک در هوا خشک شود هنوز مقداری رطوبت به صورت بخار جذب شده در خاک وجود دارد که به آن رطوبت هیگروسکوپ (*hygroscopic water*) گفته می شود. مقدار رطوبت جرمی خاک برخی مواقع به صورت نسبتی از دهگان بیان می شود ولی معمولاً به صورت درصد بیان می شود. در خاک های معدنی که اشباع می باشند مقدار رطوبت می تواند بین ۲۵ تا ۶۰ درصد باشد که این مقدار نیز بستگی به جرم مخصوص ظاهری خاک دارد. به طور کلی مقدار رطوبت اشباع در خاک های رسی بیشتر از خاک های شنی می باشد. وجود مواد در خاک سبب افزایش رطوبت جرمی اشباع خاک خواهد شد به گونه ای که در خاک های آلی مقدار رطوبت جرمی اشباع می تواند بیش از ۱۰۰ درصد هم باشد.

ب) رطوبت حجمی خاک (Volume Wetness (θ_v or θ)):

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = \frac{V_w}{V_s + V_f} \times 100 \quad \text{(معادله ۸-۲)}$$

رطوبت حجمی یا جزء حجمی رطوبت خاک به طور کلی به عنوان درصدی از حجم کل خاک محاسبه می شود و کمتر به عنوان درصدی از حجم ذرات خاک بیان می شود. این شاخص نیز در حالت اشباع در خاک های ریز بافت بیشتر از خاک های درشت بافت می باشد. به طور کلی می توان گفت که در خاک های شنی مقدار رطوبت حجمی در حالت اشباع بین ۴۰ تا ۵۰ درصد، در خاک های با بافت متوسط مقدار این شاخص حدوداً ۵۰ درصد و در خاک های رسی مقدار این شاخص می تواند ۶۰ درصد هم باشد. مقدار رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع به دلیل وجود رس های منبسط شوند در خاک که رطوبت بیشتر در خود ذخیره می کنند می تواند بیشتر از تخلخل خاک در حالت خشک باشد. استفاده از رطوبت حجمی برای بیان مقدار رطوبت خاک معمولاً راحت تر از رطوبت جرمی می باشد زیرا این شاخص ارتباط مستقیم تری برای محاسبه جریان آب در خاک و نیز مقدار رطوبت اضافه شدن به خاک توسط باراندگی و آبیاری و نیز رطوبت کم شده توسط زهکش شدن و تبخیر و تعرق دارد. رطوبت حجمی خاک همچنین نشان دهنده عمق آب موجود در واحد عمق خاک می باشد.

اگر طرفین معادلات ۷-۲ و ۸-۲ را بر هم تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{\theta_v}{\theta_m} = \frac{M_s \cdot V_w}{M_w \cdot V_t} \quad (\text{معادله ۹-۲})$$

با ساده کردن طرف راست معادله فوق می توان به معادله ۱۰-۲ دست پیدا کرد.

$$\frac{\theta_v}{\theta_m} = \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (\text{معادله ۱۰-۲})$$

ρ_w چگالی آب می باشد که مقدار آن برابر با ۱ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. بنابراین با در نظر گرفتن مقدار چگالی آب در معادله ۱۰-۲ می توان به معادله ۱۱-۲ رسید که یکی از معادله پر کاربرد در تبدیل مقدار جرمی رطوبت به مقدار حجمی آن می باشد.

$$\theta_v = \rho_b \times \theta_m \quad (\text{معادله ۱۱-۲})$$

مثال ۱-۲

با در نظر گرفتن شکل ۲-۲، اگر مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر از یک خاک در حالت مرطوب جرمی معادل با ۱۵۰۰ گرم داشته باشد و بعد از خشک شدن آن در آن آون، جرم آن به ۱۲۰۰ گرم کاهش پیدا کند مقدار رطوبت آن را با چهار پارامتر ارائه شده در بدست آورید (جرم مخصوص حقیقی خاک ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب فرض شود).

حل: در این مثال هدف تعیین مقدار رطوبت جرمی و حجمی، عمق معادل آب موجود در خاک و درجه اشباع خاک می باشد که بدین منظور با در نظر گرفتن معادلات ارائه شده به صورت زیر عمل می کنیم.

رطوبت جرمی:

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \rightarrow \theta_m = \frac{(1500 - 1200)g}{1200g} \times 100 \rightarrow \theta_m = 25\%$$

رطوبت حجمی:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \times 100 \rightarrow \theta_m = \frac{(1500 - 1200)g \times 1cm^3g^{-1}}{10 \times 10 \times 10 cm^3} \times 100 \rightarrow \theta_v = 30\%$$

همچنین می توان مقدار رطوبت حجمی را به صورت زیر محاسبه کرد. در این حالت ابتدا باید مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک مورد نظر را با استفاده از داده های داده شده در مثال محاسبه کنیم و بعد با استفاده از معادله ۱۱-۲ مقدار رطوبت حجمی را با داشتن رطوبت جرمی محاسبه کرد.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{1200 g}{10 \times 10 \times 10 cm^3} = 1.2 g cm^{-3}$$

$$\theta_v = \rho_b \times \theta_m \rightarrow \theta_v = 1.2 \times 25\% = 30\%$$

۲-۲-۵ تخلخل تهویه ای یا جزء یا کسر هوای خاک (Air-Filled Porosity or Fractional Air Contenten (f_a or E_a))

$$f_a = \frac{V_a}{V_t} = \frac{V_a}{V_s + V_w + V_a} \quad (\text{معادله ۱۲-۲})$$

تخلخل تهویه ای در واقع مقدار نسبی هوای خاک می باشد و این پارامتر به عنوان یک مقیاس مهم از تهویه خاک در نظر گرفته می شود.

$$Fa = F - \theta_v$$

محدوده نرمال پارامترهای ارائه شده در این بخش جهت راهنمایی بیشتر در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲- محدوده نرمال برخی از روابط جرمی حجمی خاک

ویژگی خاک	محدوده نرمال	واحد
جرم مخصوص ذرات خاک	۲/۶ - ۲/۸	گرم بر سانتی متر مکعب
جرم مخصوص ظاهری خاک	۰/۷ - ۱/۸	گرم بر سانتی متر مکعب
تخلخل	۰/۳ - ۰/۶	---
رطوبت جرمی خاک	۰-۰/۴	---
رطوبت حجمی خاک	۰-۰/۷	---
تخلخل تهویه ای	۰-۰/۶	---

۲-۳ بافت خاک^۱

مواد موجود در فاز جامد ترکیبی از ذرات معدنی جدا از هم در اندازه های متفاوت، همچنین ترکیبات بی شکل و نیز ترکیبات متصل به هم و پوشیده شده با مواد دیگر می باشند. ذرات موجود در فاز جامد حاصل از فرایندهای هواپدگی و دیگر پروسه ها

می‌باشند. ترکیبات بی‌شکل شامل ترکیبات اکسیدهای آهن آبدار و مواد هوموسی می‌باشند که مقدار آنها کم بوده و می‌توان فاز جامد را ترکیبی از ذرات معدنی با اندازه بزرگ و قابل تشخیص با چشم تا ذرات ریز کلوئیدی که توسط میکروسکوپ‌های الکترونی قابل تشخیص می‌باشند در نظر گرفت. یکی از مهمترین ویژگی این ذرات توزیع اندازه و شکل آنها می‌باشد. این ویژگی بر شکل خلل و فرج، حجم کل خلل و فرج و نیز سطح ویژه ذرات تاثیر گذار می‌باشد. سطح ویژه ذرات یک ویژگی بسیار مهم می‌باشد و تاثیر زیادی بر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک دارد.

به طور کلی می‌توان ذرات یک خاک را در گروه‌های متفاوتی تقسیم‌بندی کرد تا خاک‌های مختلف بر اساس دارا بودن مقدار نسبی هر کدام از این گروه‌های اندازه‌ای به انواع مختلف از لحاظ ریزی و درشتی تقسیم‌بندی شوند. ریزی و درشتی یک خاک بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند سرعت حرکت آب در خاک، قدرت نگهداری آب در خاک، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و ویژگی‌های شیمیایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی، انتقال املاح به سطح ریشه گیاه و جذب عناصر توسط گیاه تاثیر گذار می‌باشد.

معمولاً بافت خاک به عنوان مهمترین ویژگی فیزیکی خاک محسوب می‌شود و نمایه‌ای از چگونگی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد و نشان‌دهنده آن است که آیا ذرات تشکیل دهنده یک خاک درشت یا ریز یا اینکه دارای حد متوسطی از لحاظ اندازه می‌باشند. بافت خاک در واقع نشان‌دهنده نسبت جزئی ذرات اولیه خاک^۱ می‌باشد. ذرات درشت‌تر موجود در یک خاک از لحاظ فیزیکی و شیمیایی چندان فعال نمی‌باشند و بیشتر اسکلت خاک را تشکیل می‌دهند. وجود ذرات ریزتر در یک خاک نشان‌دهنده فعال بودن آن خاک از لحاظ فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. بافت خاک هم از لحاظ کیفی و هم از لحاظ کمی قابل بررسی می‌باشد. معنای کیفی بودن بافت خاک منظور حالتی است که در اثر لمس کردن خاک حاصل می‌شود. ذرات درشت معمولاً حالت زبری داشته اما ذرات ریز حالت نرمی و چسبندگی از خود نشان می‌دهند. یک خاکشناس با تجربه می‌تواند با ورز دادن و مالیدن یک خاک مرطوب بین انگشتان خود مشخص کند که بافت این خاک درشت است یا ریز و حتی می‌تواند با ارزیابی دقیق‌تر آن خاک، مقدار تقریبی ذرات تشکیل دهنده آن خاک را مشخص کند و کلاس بافتی خاک مورد نظر را نیز تعیین کند.

روش معمول در تعیین اندازه کمی ذرات در یک خاک با استفاده از تقسیم‌بندی ذرات خاک در سه محدوده متفاوت از لحاظ اندازه یعنی شن یا ماسه (sand)، سیلت (silt) و رس (clay) می‌باشد. به سیلت، لای، لیمون و گل ماسه نیز می‌گویند. برای تعیین اندازه‌های فوق از روش تجزیه مکانیکی^۲ استفاده می‌شود و نتیجه آن را ترکیب مکانیکی^۳ یا همان بافت خاک می‌گویند. معیارهای متفاوتی برای ارائه محدوده اندازه‌ای ذرات خاک وجود دارد و متاسفانه یک معیار واحد و جامع جهت دسته‌بندی

1 Primary soil particles

2 Mechanical analysis

3 Mechanical composition

ذرات خاک به منظور تعیین بافت خاک وجود ندارد. به عنوان مثال دسته‌بندی انجام شده توسط وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) متفاوت از معیار ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS) می‌باشد. تعدادی از معیارهای ارائه شده برای دسته‌بندی اندازه ذرات خاک در شکل ۲-۳ آورده شده است.

قطر ذرات خاک (مقیاس لگاریتمی) (میلی متر)									
0.001 0.01 0.1 1 10									
دس	سیلت			خ. ریز	ریز	متوسط	درشت	خ. درشت	سنگریزه
				شن					
دس	سیلت		ریز		درشت			سنگریزه	
			شن						
دس	سیلت			ریز		درشت			سنگریزه
				شن					
دس	ریز	متوسط	درشت	ریز	متوسط	درشت	سنگریزه		
	سیلت			شن					
دس	سیلت			ریز	متوسط	درشت	سنگریزه		
				شن					

شکل ۲-۳- چندین استاندارد برای دسته‌بندی اجزاء خاک بر اساس محدوده قطر ذرات؛ USDA: وزارت کشاورزی ایالات متحده، ISSS: انجمن بین‌المللی علوم خاک، USPRA: وزارت راه ایالات متحده، BSI: موسسه استاندارد انگلیس، MIT: موسسه تکنولوژی ماساچوست و DIN: استاندارد آلمان.

اولین مرحله برای تعیین بافت خاک این است مشخص کنیم حد بالایی اندازه ذراتی که می‌توانند جزء مواد خاکی قرار گیرند چند می‌باشد. برخی خاک‌ها حاوی تکه سنگ‌های بزرگی می‌باشند که معمولاً رفتار آنها مانند مواد خاکی نمی‌باشند ولی اگر مقدار این ذرات در خاک زیاد باشد ممکن است بر رفتار توده خاک تاثیر بگذارند. بنابراین به طور معمول مواد خاکی به ذراتی اطلاق می‌شوند که اندازه قطر آنها کمتر از ۲ میلی‌متر باشد و ذرات بزرگتر را تحت عنوان سنگریزه^۱ در نظر می‌گیرند و اگر ذرات بزرگ، اندازه بزرگتر از چند سانتی‌متر داشته باشند تحت عنوان قله سنگ^۲ و ذرات بزرگتر را نیز تخته سنگ^۳ می‌نامند. اگر ذرات با قطر بزرگتر از ۲ میلی‌متر حجم زیادی از خاک را به خود اختصاص دهند به گونه‌ای که فرایندهای فیزیکی خاک

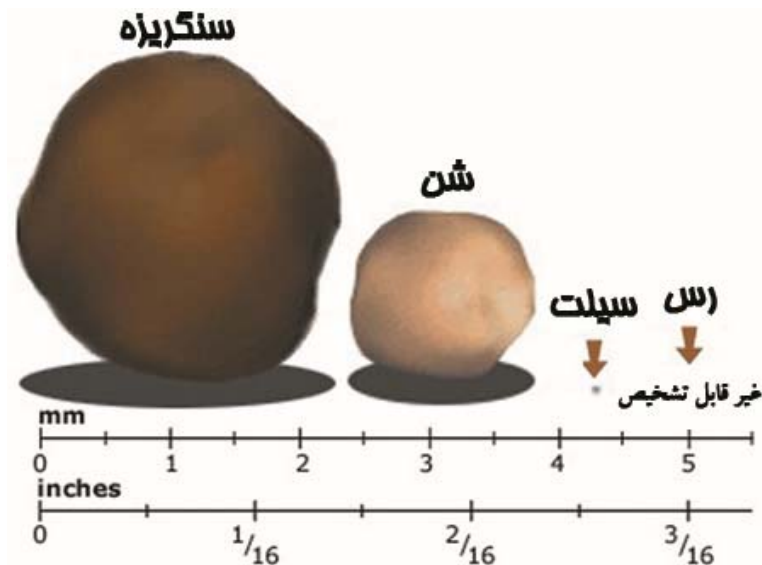
1 Gravel
2 Stone یا Cobble
3 boulder

را به طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار دهند جزء حجمی و محدوده اندازه این ذرات باید همراه با مقدار ذرات کوچکتر گزارش شود.

همانطور که در بالا نیز گفته شد، معیارهای متفاوتی برای ارائه اندازه ذرات خاک وجود دارد اما در این بین معیار ارائه شده توسط وزارت کشاورزی آمریکا و معیار انجمن بین‌المللی علوم خاک مقبولیت بیشتر دارند. همانطور که در **شکل ۲-۳** نیز آورده شده است در این دو معیار بزرگترین گروه ذرات که تحت عنوان مواد خاکی شناخته می‌شوند، تحت عنوان شن دسته‌بندی شده‌اند. ذرات شن به ذرات گفته می‌شود که حد بالایی اندازه قطر آنها ۲۰۰۰ میکرومتر (۲ میلی‌متر) و حد پایین این ذرات ۵۰ میکرومتر (۰/۰۵ میلی‌متر) (در معیار وزات کشاورزی آمریکا) و ۲۰ میکرومتر (۰/۰۲ میلی‌متر) (در معیار انجمن بین‌المللی علوم خاک) می‌باشند. ذرات شن معمولاً دسته‌بندی‌های کوچکتری مانند ریز، متوسط و درشت نیز دارند که در **شکل ۲-۳** این موضوع به طور واضح آورده شده است. ذرات شن حالت زبری دارند و جنس این ذرات معمولاً کوارتز بوده اما این ذرات ممکن است همچنین از موادی مانند فلدسپار و میکا نیز تشکیل شده باشند. در این **رابطه شکل ۲-۴** به خوبی ذرات شن از لحاظ اندازه در مقایسه با دیگر ذرات تشکیل دهنده خاک را نشان می‌دهد.

گروه دوم از ذرات خاک سیلت می‌باشد. این گروه ذرات به ذراتی گفته می‌شود که از لحاظ اندازه بین ذرات شن و رس قرار می‌گیرند. ذرات سیلت از لحاظ کانی‌شناسی و فیزیکی همانند ذرات شن می‌باشند اما از لحاظ اندازه کوچکتر از ذرات شن بوده. بنابراین سطح بیشتری در واحد جرم خود ایجاد می‌کنند و اغلب توسط ذرات رس پوشیده شده‌اند که این موضوع سبب تغییر رفتار فیزیکوشیمیایی ذرات سیلت می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که جداسازی ذرات سیلت از شن بر اساس ویژگی‌های فیزیکی (اندازه ذرات) می‌باشد. حد بالایی اندازه ذرات سیلت ۵۰ میکرومتر (در معیار وزارت کشاورزی آمریکا) و ۲۰ میکرومتر (در معیار انجمن بین‌المللی علوم خاک) و حد پایین آن ۲ میکرومتر (۰/۰۰۲ میلی‌متر) می‌باشد. این ذرات ویژگی‌های حد واسط رس و شن را دارند و از لحاظ لمسی حالت صابونی داشته و حساس‌ترین ذرات خاک به فرسایش محسوب می‌شوند. گروه دیگر ذرات تشکیل دهنده مواد خاکی، رس‌ها می‌باشند. این گروه کوچکترین ذرات خاک را شامل می‌شود. اندازه ذرات این گروه کوچکتر از ۲ میکرومتر یا همان ۰/۰۰۲ میلی‌متر می‌باشد و معمولاً تحت عنوان ذرات کلوئیدی خاک در نظر گرفته می‌شوند. این گروه از ذرات معمولاً از لحاظ مورفولوژی بیشتر حالت ورقه‌ای و سوزنی داشته و جزء گروهی از کانی‌های تحت عنوان آلومینوسیلیکات‌ها دسته‌بندی می‌شوند. این گروه از کانی‌ها تحت عنوان کانی‌های ثانویه خاک شناخته می‌شوند، که از تغییر شکل کانی‌های اولیه که از سنگ‌ها حاصل شده‌اند به وجود می‌آیند. لازم به ذکر است که رس‌ها تنها شامل آلومینوسیلیکات‌ها نمی‌باشند و ذرات ریزی مانند کربنات کلسیم و اکسیدهای آهن که اندازه آنها کوچکتر از ۲ میکرومتر می‌باشند نیز جزء گروه رس‌های خاک قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان گفت که جداسازی ذرات رس از ذرات سیلت بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (اندازه و جنس ذرات) بوده است. ذرات رس عموماً دارای بار منفی بوده و با توجه به اندازه ریزی

که دارند فعالترین ذرات معدنی خاک از لحاظ فیزیکوشیمیایی محسوب می‌شوند. همچنین این ذرات از لحاظ لمسی حالت چسبندگی داشته و وجود مقادیر کم این ذرات در خاک نیز سبب ایجاد خاصیت شکل‌پذیری در خاک می‌شود. فضای بین ذرات ریز معمولاً پیچ در پیچ بوده و پیچیدگی بیشتری نسبت به ذرات درشت دارند و تخلخل خاک‌های دارای ذرات ریز بیشتر از ذرات درشت می‌باشد.



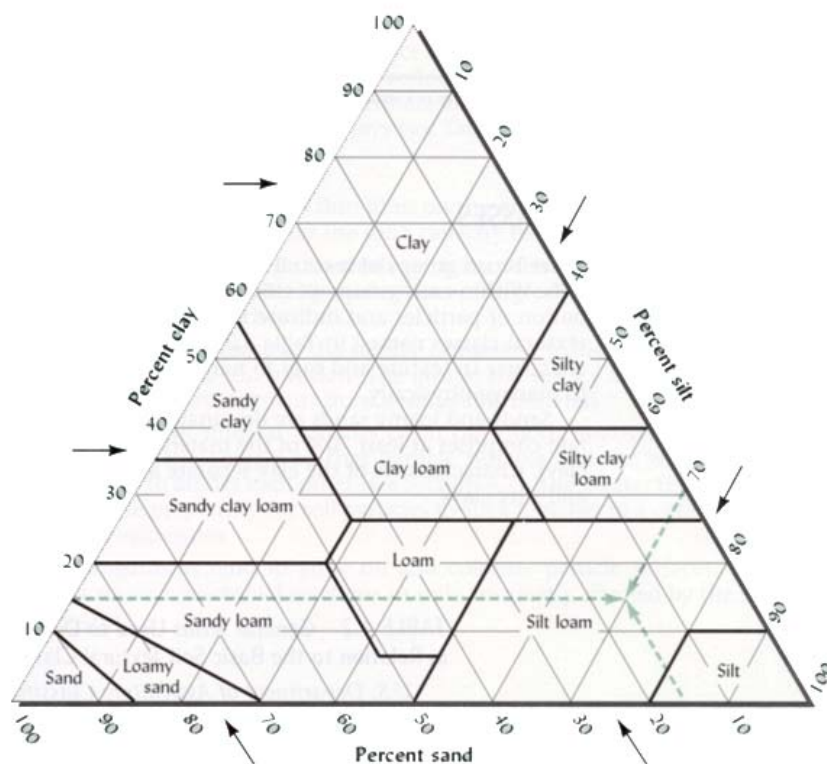
شکل ۲-۴- مقایسه ذرات تشکیل دهنده خاک از لحاظ اندازه

۱-۳-۲- کلاس بافتی خاک

سهم نسبی سه ذره شن، سیلت و رس در خاک را اصطلاحاً بافت خاک گویند. معرفی و تعیین کلی بافت خاک را تحت عنوان کلاس بافتی خاک تعریف می‌کنند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که بافت خاک بر اساس درصد نسبی ذرات شن، سیلت و رس در کلاس‌های مختلفی قرار می‌گیرند که این کلاس‌های بافتی در دیاگرامی مثلثی شکل تحت عنوان مثلث بافت خاک نشان داده می‌شوند (شکل ۲-۵). در تعریف بافت خاک باید به این موضوع توجه داشت که سهم نسبی ذرات در تعیین کلاس بافتی خاک بر اساس تاثیری که این ذرات بر رفتار فیزیکی خاک دارند، می‌باشد نه بر اساس مقدار آنها. به عنوان مثال مقدار ذرات شن، سیلت و رس در یک خاک با کلاس بافتی لوم (*loam*) که به عنوان یک خاک متوسط از لحاظ بافت در نظر گرفته می‌شود به طور مساوی و برابر با ۳۳٪ نمی‌باشد بلکه مقدار کمتری از ذرات رس هم می‌تواند اثری که مقادیر بیشتری از شن و سیلت بر ویژگی‌های خاک می‌گذارند بر رفتار فیزیکی خاک بگذارد. بنابراین همانطور که در مثلث بافت خاک نیز مشاهده می‌کنید (شکل ۲-۵) تاثیر وجود ۲۰٪ درصد رس در خاک معادل با تاثیر ۴۰٪ سیلت و شن می‌باشد و در این حالت بافت خاک یک بافت متوسط بوده و در کلاس لوم قرار می‌گیرد. خاک با بافت لوم معمولاً به عنوان یک خاک ایده‌آل برای رشد

گیاه و برای کشاورزی در نظر گرفته می‌شود، زیرا ظرفیت نگهداشت آب و عناصر غذایی در این خاک بهتر از یک خاک شنی که زه‌کشی و تهویه در آن زیاد می‌باشد، است و همچنین ویژگی‌های شخم‌پذیری در این خاک مناسب‌تر از یک خاک رسی می‌باشد. اما باید این را در نظر گرفت که این موضوع در تمامی موارد صحت نداشته و در شرایط متفاوت و در محیط‌های مختلف و برای گونه‌های گیاهی خاص یک بافت سنگین (ریز بافت) یا سبک (درشت بافت) ممکن است مناسب‌تر از یک خاک لوم عمل کند.

نام بافت خاک در مثلث بافت خاک با توجه به درصد تاثیر هر کدام از این اجزاء انتخاب شده است. یعنی بافت خاک لومی که نشان دهنده‌ی یک بافت متوسط می‌باشد شامل ۳۳٪ شن، ۳۳٪ سیلت و ۳۳٪ رس نمی‌باشد بلکه مقادیر اجزای شن و سیلت در بافت لومی بیش‌تر از مقادیر رس در آن می‌باشد (به عنوان مثال ۴۰٪ شن و ۴۰٪ سیلت بعلاوه ۲۰٪ رس یک بافت لومی را شامل می‌شود) (جدول ۲-۳). یعنی به دلیل ریز بودن رس و از طرفی فعال بودن آن تاثیر مقادیر کمتر آن در خاک می‌تواند نام بافت آن خاک را بیشتر از اجزای شن و سیلت تحت تاثیر قرار دهد. برای مثال دیگر در این رابطه می‌توان به بافت رس خالص (Clay) و شن خالص (Sand) در مثلث بافت خاک اشاره کرد. وقتی مقادیر رس بیش از ۶۰ درصد باشد بافت خاک با وجود هر مقدار از دیگر اجزای خاک به عنوان بافت رسی در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه این مقدار برای بافت سیلت خالص و شن خالص بیش از ۹۰ درصد می‌باشد. این موضوع نیز نشان‌دهنده‌ی تاثیر اجزای تشکیل دهنده‌ی خاک بر نام بافت آن می‌باشد.



شکل ۲-۵- مثلث بافت خاک (USDA)

جدول ۲-۳- محدوده مقادیر اجزای شن، سیلت و رس در خاک با بافت لوم

رس	سیلت	شن
۷-۲۷ درصد	۲۹-۵۰ درصد	۲۷-۵۱ درصد

اگر ذرات با قطر بزرگتر از ۲ میلی متر در خاک زیاد باشد، پیشوندهایی مانند *gravelly*، *rockiness* و *stoniness* به نام بافت خاک اضافه می شود. به عنوان مثال نام بافت خاک لوم شنی که دارای مقادیر قابل توجهی از ذرات با قطر بیش از ۲ میلی متر است به صورت *gravelly sandy loam* بیان می شود.

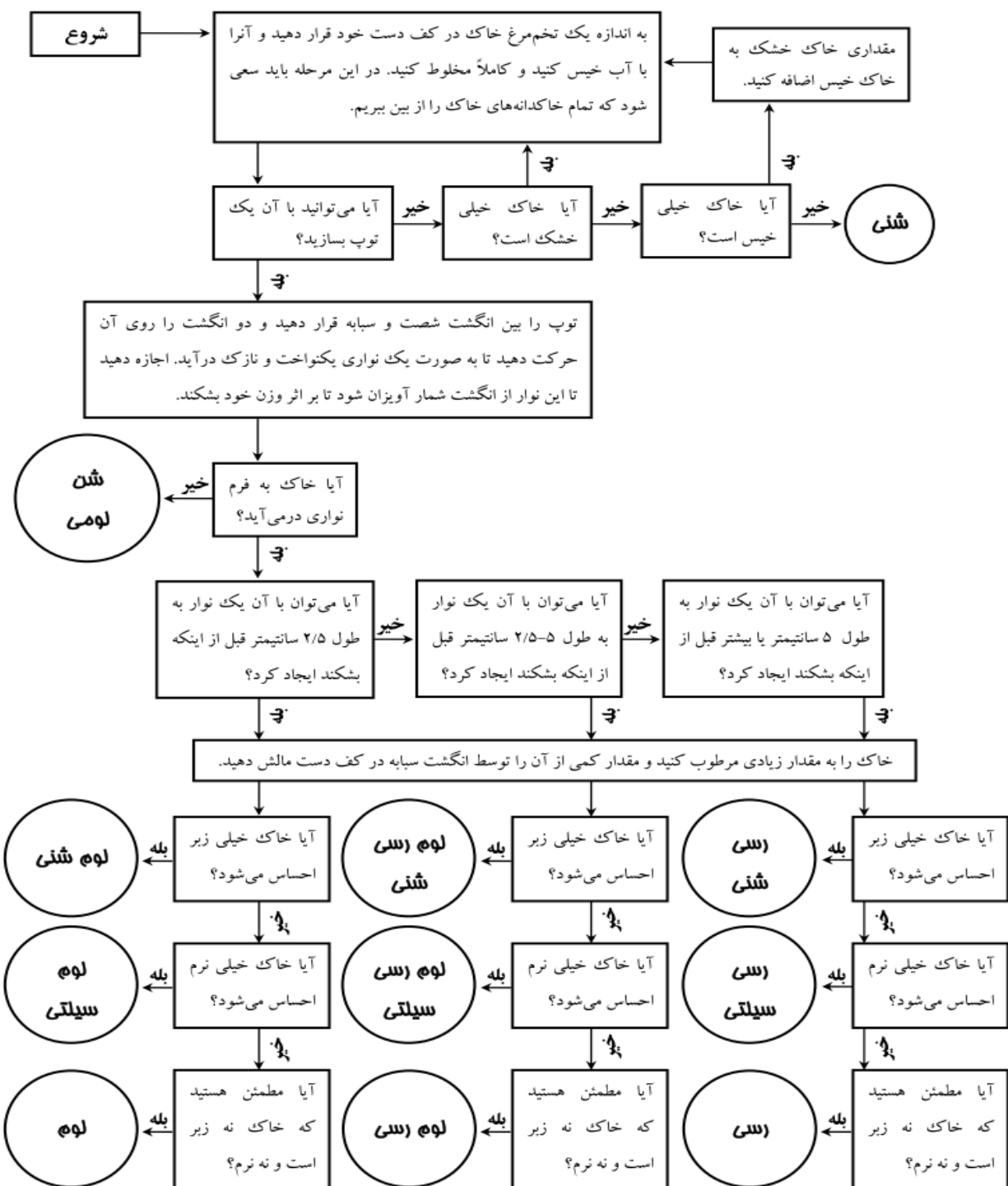
۲-۳-۲- روش های تعیین کلاس بافتی خاک

روش لمسی (روش مزرعه ای)

بافت خاک می تواند به طور کامل به روش لمسی و بدون نیاز به وسایل اندازه گیری خاصی تعیین شود. این روش به عنوان اولین و سریع ترین راه برای تعیین بافت خاک شناخته می شود و اصولاً در مزرعه انجام می شود. این روش برای ارزیابی اولیه تعیین بافت خاک و نیز زمانی که وسایل تعیین بافت خاک در دسترس نمی باشد یک روش مناسب می باشد اما به مقدار زیادی به تجربه فرد بستگی دارد؛ یعنی در این روش افراد با تجربه می توانند تا حدود زیادی کلاس بافتی خاک را تعیین نمایند. اساس این روش ارزیابی دستی از ویژگی های خاک مانند نواری شدن، زبری و نرمی، چسبندگی و خمیری بودن گل آماده شده از نمونه خاک می باشد. به منظور مجرب شدن در این روش بهترین راه پیشنهادی استفاده از خاک های با بافت مشخص و لمس کردن خاک های متفاوت از نظر بافت می باشد. تغییر در مواد آلی خاک، مینرالوژی و خاکدانه ای شدن رس ها، تفاوت در ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز فاکتورهای دیگر می تواند بر ویژگی های لمسی خاک تاثیر گذار باشد. یک فلوچارت شماتیک برای تعیین بافت خاک به روش لمسی توسط کارشناسان و دانشمندان خاکشناسی وجود دارد که در شکل ۲-۶ می توان آن را مشاهده نمایید. روش تعیین بافت خاک به روش لمسی به طور کامل در این فلوچارت توضیح داده شده است.

استفاده از مثلث بافت خاک

یکی دیگر از روش های تعیین کلاس بافتی خاک استفاده از مثلث بافت خاک می باشد که در شکل ۲-۵ مشاهده می شود. به منظور استفاده از مثلث بافت خاک جهت تعیین بافت خاک ابتدا باید مقدار درصد هر کدام از ذرات اولیه خاک را به روشی تعیین کرد. بدین منظور از تجزیه مکانیکی خاک استفاده می شود. اولین مرحله در تجزیه مکانیکی خاک پراکنده کردن ذرات خاک در نمونه می باشد.

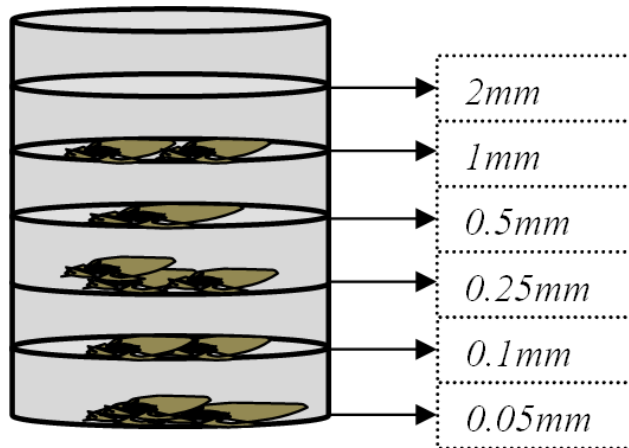


شکل ۲-۶- شمایی از فلوجارت تعیین بافت خاک به روش لمسی

ذرات اولیه خاک اغلب به طور طبیعی به صورت تجمعی از ذرات با اندازه مختلف می‌باشد و این ذرات باید با حذف عوامل سیمان‌کننده (مواد آلی، کربنات کلسیم یا اکسیدهای آهن) به ذرات مجزاء تبدیل شوند. به منظور پراکنده کردن ذرات خاک از روش‌های شیمیایی و مکانیکی مختلفی استفاده می‌شود. به منظور حذف مواد آلی در خاک معمولاً از آب اکسیژنه، برای

حذف اثر کربنات کلسیم از اسید کلریدریک و نیز به برای از بین بردن اثر املاح در تجمع ذرات اولیه خاک از ترکیباتی پراکنده کننده‌ای مانند اکسالات سدیم، پیروفسفات سدیم، متافسفات سدیم، کربنات سدیم به تنهایی و یا بصورت ترکیبی استفاده می‌شود. در خاک‌های آهکی و در آزمایشگاه‌های ایران معمولاً از مخلوطی از کربنات و فسفات سدیم استفاده می‌شود و ترکیب این دو معمولاً تاثیر بهتری در پراکندن ذرات خاک دارند. روش‌های یاد شده جزء روش‌های شیمیایی پراکندن ذرات خاک می‌باشند و از روش‌های مکانیکی تفکیک ذرات خاک می‌توان به هم‌زدن، تکان دادن و نیز استفاده از لرزش‌های التراسونیک اشاره کرد. روش استاندارد اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات خاک بعد از پراکنده کرده خاک با روش‌های شیمیایی، مکانیکی یا التراسونیک شامل، تفکیک ذرات با اندازه‌های مختلف توسط الک کردن، ترسیب، اندازه‌گیری جرم در هر بخش از اندازه ذرات و سپس بیان مقدار نسبی هر یک از کلاس‌های اندازه ذرات است (درصد از کل نمونه خشک شده در آن). معمولاً بعد از پراکنده کردن ذرات توسط روش‌های مختلف، ذرات شن را توسط الک کردن از ذرات سیلت و رس جدا کرده و مقدار ذرات رس و سیلت را به روش رسوب‌سنجی (ترسیب) اندازه‌گیری می‌کنند.

معمولاً به منظور جداسازی ذرات شن از ذرات سیلت و رس از الک 0.075 میلی‌متر استفاده می‌شود و همچنین برای تعیین توزیع اندازه ذرات خاک در بخش شن می‌توان از الک‌هایی با اندازه‌های متفاوت استفاده کرد. شکل ۲-۷ سری الک مورد استفاده جهت جداسازی ذرات شن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷- سری الک برای تفکیک اجزای شن

همچنین جهت جداسازی ذرات ریزتر از 0.075 میلی‌متر از روش رسوب‌سنجی استفاده می‌شود که اساس این روش سرعت نسبی ته‌نشینی ذرات با اندازه متفاوت درون یک مخلوط آب و خاک (سوسپانسیون) می‌باشد.

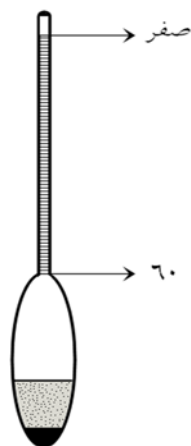
بر طبق قانون استوکز (Stokes' Law) سرعت نهایی ته‌نشینی یک ذره گرد تحت تاثیر ثقل در یک مایع دارای چگالی (ρ_l) و گرانیوی (η) مشخص رابطه مستقیم با مجذور شعاع ذره مورد نظر (r) دارد. اگر یک ذره به شعاع r ، جرم m و چگالی ρ_s در

مایعی در حال سقوط باشد زمان ته نشست آن (t) در یک عمق مشخص از سوسپانسیون (h) با استفاده از معادله ۲-۱۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$t = \frac{18\eta h}{d^2 g (\rho_s - \rho_l)} \quad (\text{معادله ۲-۱۳})$$

که در این معادله t : زمان بر حسب ثانیه، گرانروی سوسپانسیون ($0.01 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$)، h : عمق از سوسپانسیون (سانتی‌متر) که ذراتی با قطر d (سانتی‌متر) از آن ته نشین شده‌اند. g : شتاب ثقل (980 cm s^{-2})، ρ_s : چگالی حقیقی ذرات خاک ($2/65$ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و ρ_l : چگالی آب (1 گرم بر سانتی‌مترمکعب) می‌باشند.

از روش‌های رسوب‌سنجی جهت تعیین بافت خاک می‌توان به روش هیدرومتر و پیپت اشاره کرد. هیدرومتر وسیله‌ای است که چگالی مخلوط آب و خاک را در عمق مشخصی را نشان می‌دهد. هیدرومتر در واقع وسیله‌ای شیشه‌ای است که دارای یک حباب می‌باشد که به یک ساقه بلند متصل شده است (شکل ۲-۸). ساقه هیدرومتر به قسمت‌هایی تقسیم شده است که اعداد آن از حباب به سمت انتهای ساقه هیدرومتر کاهش می‌یابد. عدد ساقه هیدرومتر در مخلوط آب و خاک نشانگر مقدار مواد جامد معلق بر حسب گرم در لیتر می‌باشد. بنابراین اعداد هیدرومتر در واقع چگالی عمقی از سوسپانسیون می‌باشند که حباب هیدرومتر در آن غوطه‌ور شده است. هر چه چگالی سوسپانسیون کمتر باشد هیدرومتر بیشتر در آن فرو می‌رود و عددی که هیدرومتر نشان می‌دهد کمتر می‌شود.



شکل ۲-۸- شمایی از هیدرومتر استاندارد، ASTM No. 152 H

روش پیپت توسط سرویس حفاظت خاک وزارت کشاورزی آمریکا به عنوان روش استاندارد انتخاب شده است، زیرا در دامنه وسیعی از خاک‌ها کاربرد دارد. اما به طور سنتی روش هیدرومتر نیز برای تعیین توزیع اندازه ذرات بویژه در نمونه‌هایی که به طور کامل پراکنده نمی‌شوند به کار می‌رود. دقت روش هیدرومتر کمتر از روش پیپت است ولی روش آسانتری برای تعیین بافت خاک است و در بسیاری موارد دارای دقت قابل قبول می‌باشد. در روش پیپت با استفاده از قانون استوکس زمان سقوط

ذرات با قطر معین (مثلاً ذرات سیلت) را از عمق مشخصی از سوسپانسیون را محاسبه کرده و بعد از گذشت زمان مورد نظر، توسط یک پیت با حجم مشخص از مخلوط آب و خاک و از عمق مورد نظر نمونه برداری انجام می شود و نمونه مربوطه در آون خشک شده و مقدار ذرات موجود در نمونه محاسبه می شود. به عنوان مثال اگر زمان سقوط ذرات با قطر بزرگتر از 0.002 میلی متر (ذرات سیلت) از عمق 20 سانتی متری را محاسبه کرده باشیم، بعد از گذشت زمان محاسبه شده نمونه ای که از عمق 20 سانتی متری برداشته می شود دارای ذراتی با اندازه کوچکتر از 0.002 میلی متر (ذرات رس) خواهد بود.

بعد از تعیین درصد هر کدام از ذرات اولیه خاک یعنی شن، سیلت و رس به راحتی می توان با استفاده از مثلث بافت خاک (شکل ۲-۵) کلاس بافتی خاک مورد نظر را تعیین نمود.

مثال ۲-۲

با استفاده از قانون استوکس زمان لازم برای ته نشینی ذرات شن (قطر بزرگتر از 50 میکرومتر) و سیلت (قطر بزرگتر از 2 میکرومتر) را از عمق 20 سانتی متری یک سوسپانسیون خاک و آب محاسبه نمایید (دمای محیط 20 درجه سلسیوس).

حل: در این مثال به راحتی می توان با استفاده از معادله ۲-۱۱ زمان های خواسته شده را محاسبه نمود. اما نکته مهم در استفاده از معادله ۲-۱۱ همخوانی در واحدهای پارامترهای مورد استفاده می باشد. واحدها باید به گونه ای انتخاب شوند تا واحد نهایی برای زمان یک واحد منطقی باشد.

زمان ته نشینی ذرات شن

$$t = \frac{18\eta h}{d^2 g (\rho_s - \rho_l)} \rightarrow t = \frac{18 \times 0.01 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \times 20 \text{ cm}}{(0.005 \text{ cm})^2 981 \text{ cm s}^{-2} (2.65 - 1) \text{ g cm}^{-3}} \rightarrow t = 89 \text{ s}$$

زمان ته نشینی ذرات سیلت

برای محاسبه زمان ته نشینی ذرات سیلت تنها لازم است قطر ذرات را در معادله 0.0002 سانتی متر قرار دهیم.

$$t = \frac{18\eta h}{d^2 g (\rho_s - \rho_l)} \rightarrow t = \frac{18 \times 0.01 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \times 20 \text{ cm}}{(0.0002 \text{ cm})^2 981 \text{ cm s}^{-2} (2.65 - 1) \text{ g cm}^{-3}} \rightarrow t = 55602 \text{ s} = 15.44 \text{ hr}$$

۲-۴- ساختمان خاک

آجرهایی که به صورت نامنظم بر روی یکدیگر قرار گرفته اند یک پشته بدمنظره را ایجاد می کند. همین آجرها تنها اگر مرتب باشند و به یکدیگر متصل شوند می توانند یک خانه یا یک کارخانه را ایجاد کنند. به طور مشابه خاک نیز می تواند تنها به صورت تجمعی از ذرات نامنظم جدا و نرم^۱ و غیر پایدار باشد یا می تواند شامل یک ساختمان قابل تشخیص از ذراتی به هم پیوسته و مجتمع تحت عنوان خاکدانه^۲ باشد که دارای اندازه و شکل منظمی می باشند. در یک بنا یا ساختمان شما به تک تک

1 Losse

2 Aggregate

آجرها توجه ندارید بلکه آنچه اهمیت دارد شکل، اندازه، استحکام و مقاومت این ساختمان است که از ترکیب آجرهای مختلف و نحوه چیده شدن آن‌ها کنار یکدیگر بوجود آمده است. در خاک نیز ما به تک تک ذرات توجه نداریم بلکه مهم ساختمان خاک است که از کنار هم قرار گرفتن ذرات خاک حاصل می‌شود.

بنابراین برای مطالعه خاک، تنها بررسی ذرات خاک به صورت جداگانه و منفرد کافی نمی‌باشد. نظم و ترتیب ذرات منفرد در خاک را ساختمان خاک^۱ می‌گویند. از طرفی چگونگی به هم چسبیدن اجزاء تشکیل دهنده خاک و شکل خاک را نیز می‌توان تحت عنوان ساختمان خاک تعریف کرد. نظم و ترتیب قرار گرفتن ذرات اولیه خاک،^۲ نظم خلل و فرج درون خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد به همین دلیل در برخی موارد ساختمان خاک را تحت عنوان نظم خلل و فرج خاک نیز تعریف می‌کنند. در خاک‌هایی که مقدار مناسبی از رس وجود داشته باشد باعث می‌شود که ذرات اولیه خاک در یک گروه واحد متمرکز شوند و واحدی تحت عنوان خاکدانه و یا ذرات ثانویه خاک^۳ را ایجاد می‌کنند.

به طور کلی هیچ‌گونه مقیاس اندازه‌ای و پایداری خاصی برای شناسایی این خاکدانه‌ها وجود ندارد و خاکدانه‌های قابل مشاهده که قطر آنها از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است را پد^۴ یا ماکرواگریگیت^۵ (خاکدانه‌های بزرگ) می‌نامند. معمولاً این خاکدانه‌ها تجمعی از گروه‌های کوچکتر یا میکرواگریگیت‌ها^۶ (خاکدانه‌های ریز) می‌باشند که خود این واحدها نیز تجمعی از واحدهای ساختمانی ریزتر مانند خوشه‌ها^۷ و بسته‌ها رسی^۸ می‌باشند.

با توجه به اینکه ذرات خاک از لحاظ اندازه، شکل و نحوه جهت‌گیری با هم متفاوت هستند و می‌توانند به طور متفاوتی با هم پیوند برقرار کنند، توده حاصل از آنها نیز می‌تواند شکل‌بندی و آرایش‌های متفاوتی را تشکیل دهند. ساختمان خاک به شدت تحت تاثیر تغییرات آب و هوا، فعالیت بیولوژیکی خاک و مدیریت خاک قرار می‌گیرد. ساختمان خاک تحت تاثیر نیروهای مخرب مکانیکی و فیزیکوشیمیایی آسیب می‌پذیرد. از ویژگی‌های یک ساختمان ایده‌آل می‌تواند به متخلخل بودن ساختمان خاک سطحی، مقاومت کافی در برابر نیروهای مکانیکی خارجی و جرم مخصوص ظاهری کم اشاره کرد. ساختمان خاک نزدیک به حالت ایده‌آل را می‌توان در اراضی تحت کشت مرتع و خاک‌های جنگلی مشاهده کرد.

ساختمان خاک بر بسیاری از ویژگی‌های مرتبط به خاک و گیاه تاثیر زیادی دارد. از این ویژگی‌های می‌توان به مواردی نظیر توانایی خاک در رشد ریشه گیاه، دریافت، ذخیره و انتقال آب در خاک، چرخه کربن و عناصر غذایی (نیتروژن و فسفر) و

-
- 1 Soil structure
 - 2 Primary particles
 - 3 Secondary particles
 - 4 Ped
 - 5 Macroaggregates
 - 6 Microaggregates
 - 7 Clusters
 - 8 Packets of clay particles

مقاومت خاک در برابر فرسایش اشاره کرد. همچنین برای بدست آوردن حداکثر محصول (به استثنای برنج) وجود ساختمان مناسب ضروری است.

۱-۴-۲- تقسیم‌بندی ساختمان خاک

تقسیم‌بندی ساختمان خاک بر اساس اندازه خاکدانه‌ها (*Size*)

تقسیم‌بندی ساختمان خاک بر اساس اندازه به طور کلی شامل گروه‌هایی به صورت زیر می‌باشد:

خیلی ریز یا خیلی نازک (*very fine or very thin*)،

ریز یا نازک (*fine or thin*)

متوسط (*medium*)

درشت یا ضخیم (*coarse or thick*)

خیلی درشت یا خیلی ضخیم (*very coarse or very thick*)

توزیع اندازه خاکدانه‌ها در ساختمان خاک تعیین کننده توزیع اندازه منافذ می‌باشد که این موضوع نیز بر فرسایش‌پذیری^۱ سطح خاک به ویژه در مقابل فرسایش بادی تاثیر بسزایی دارد. توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک‌های متفاوت یک کمیت نسبی و وابسته به شرایط تعیین محدوده اندازه‌ی خاکدانه‌ها به ویژه نیروهای مکانیکی درگیر در جداسازی خاکدانه‌ها می‌باشد. اندازه خاکدانه‌ها برای خاکانه‌های با شکل متفاوت از لحاظ کلاس اندازه‌ای ذکر شده در بالا، متفاوت می‌باشد. نمونه‌ای از تقسیم‌بندی ساختمان خاک بر اساس اندازه را در جدول ۴-۲ مشاهده می‌نمایید.

جدول ۴-۲- تقسیم‌بندی ساختمان خاک بر اساس اندازه خاکدانه‌ها

ساختمان‌های متفاوت بر اساس شکل خاکدانه‌ها				کلاس اندازه ساختمان
منشوری	بلوکی	کروی	ورقه‌ای	
۱۰ >	۵ >	۱ >	۱ > [†]	خیلی ریز
۲۰-۱۰	۱۰-۵	۲-۱	۲-۱	ریز
۵۰-۲۰	۲۰-۱۰	۵-۲	۵-۲	متوسط
۱۰۰-۵۰	۵۰-۲۰	۱۰-۵	۱۰-۵	درشت
۱۰۰ <	۵۰ <	۱۰ <	۱۰ <	خیلی درشت

[†] واحد اعداد موجود در جدول میلی‌متر می‌باشد.

تقسیم‌بندی ساختمان خاک بر اساس شکل خاکدانه‌ها

به طور کلی می‌توان سه ساختار تک دانه‌ای^۱، توده‌ای^۲ و خاکدانه‌ای^۳ را به عنوان گروه‌های اصلی ساختمان خاک تعریف کرد. ساختمان تک دانه‌ای مربوط به وقتی است که ذرات به یکدیگر متصل نشده‌اند و هر کدام از ذرات به صورت جداگانه وجود دارند و ساختمان آن‌ها به طور کامل نرم می‌باشد؛ مانند ساختمان موجود در خاک‌های درشت دانه و یا ساختمان موجود در رسوبات موجود در تپه‌های شنی. ساختمان توده‌ای نیز در اثر مدیریت‌های اشتباه در مزارع و به طور معمول در اثر عبور و مرور ماشین‌آلات کشاورزی در رطوبت نامناسب در مزارع این ساختمان حاصل می‌شود. در این ساختمان یک نظم خاصی بین ذرات خاک مشاهده نمی‌شود و خاک به صورت یک جسم بسیار سخت و متراکم مشاهده می‌شود. در گذشته خاک‌هایی را که دارای ساختمان تک‌دانه و توده‌ای بودند را به عنوان خاک‌های بدون ساختمان^۴ در نظر می‌گرفتند در حالی که حتی این چنین نظم و ترتیبی در خاک نیز یک ساختمان محسوب می‌شود و می‌توان آن را تحت عنوان ساختمان تک دانه‌ای و توده‌ای در تقسیم‌بندی ساختمان در نظر گرفت.

اگر ساختمان تک دانه‌ای و توده‌ای را به عنوان دو کران برای ساختمان خاک تعریف کنیم، در بین این دو ساختمان می‌توان حالت‌های بینابینی از تجمع ذرات خاک مشاهده کرد که آن‌ها را تحت عنوان خاک‌های خاکدانه‌ای تقسیم‌بندی می‌کنند که این گروه خاک‌ها دارای واحدهای قابل تشخیص تحت عنوان خاکدانه یا خاکواحد (*Ped*) می‌باشند. به طور کلی وجود ساختمان خاکدانه‌ای در خاک باعث ایجاد شرایطی مناسب برای رشد گیاه، به ویژه در مراحل حساس رشد مانند جوانه‌زنی و استقرار نشاء، می‌شود. بنابراین با توجه به موارد گفته شده در بالا ساختمان خاک را بر اساس شکل و ترتیب قرارگیری ذرات کنار یکدیگر می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد (شکل ۲-۹):

ساختمان ورقه‌ای یا بشقابی (*Platy*): تجمع خاکدانه‌ها در این نوع ساختمان به صورت ورقه‌ای می‌باشد. این ساختمان غالباً در سطح خاک زمین‌های بکر دیده می‌شود و معمولاً از مواد مادری به ارث می‌رسد (ته نشینی و رسوب مواد مادری). در این ساختمان فراوانی شکافهای افقی بیشتر از عمودی است و به همین دلیل در برخی موارد مشکل نفوذ آب در این خاک‌ها وجود دارد.

ساختمان گرد یا کروی (*Granular*): این ساختمان معمولاً در افق‌های سطحی خاک مشاهده می‌شوند (به ویژه خاک‌های حاصلخیز). مانند دانه‌های نقل بوده و معمولاً اندازه آن کمتر از ۰/۵ سانتی‌متر می‌باشد. در این نوع ساختمان اگر خاکدانه‌ها نیز متخلخل باشند به آن ساختمان دانه‌ای متخلخل یا اسفنجی (*Crumb*) می‌گویند. این ساختمان یکی از مشخصه‌های خاک‌های

-
- 1 Single grained
 - 2 Massive
 - 3 Aggregated
 - 4 Structureless

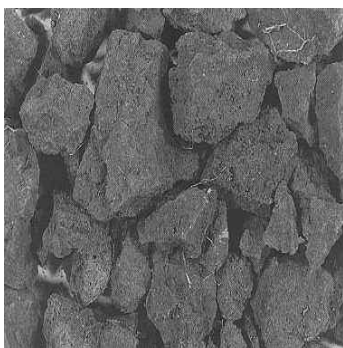
حاصلخیز می باشد (مانند مالی سول ها). یکی از مزیت های مهم این ساختمان این است که در اثر خیس شدن همچنان قابل نفوذ باقی می ماند.

ساختمان مکعبی یا بلوکی (Blocky): دانه های زاویه دار که معمولاً دارای قطر بین ۱/۵ تا ۵ سانتی متر می باشند. این نوع ساختمان غالباً در افق های زیر سطحی خاک یافت می شوند. درز و شکاف های عمودی و افقی تقریباً یکسان (طول، عرض و ارتفاع تقریباً یکسانی دارند). اگر لبه های آن تیز و زاویه دار باشند به آن *Angular Blocky* و اگر لبه های آن گرد و مدور باشند به آن *Subangular Blocky* گویند.

ساختمان منشوری (Prism-like): ستون های عمودی خاک که دارای طول چند سانتی متری می باشند و دارای سطحی صاف یا زاویه دار می باشند و معمولاً در افق های زیرین خاک های قلیا (سدیمی) یافت می شوند. در این نوع ساختمان درز و شکاف عمودی بیشتر به چشم می خورد. اگر بالا و پایین واحد ساختمانی کروی باشد آن را ساختمان ستونی (*Columnar*) و اگر به صورت زاویه دار باشد به آن ساختمان منشوری (*Prismatic*) گویند.

ساختمان توده ای (Massive): در این حالت هیچگونه ساختمانی در خاک قابل تشخیص نمی باشد و خاک به صورت یک جسم بسیار سخت و متراکم مشاهده می شود. از لحاظ اندازه نسبتاً بزرگ می باشد و اغلب در خاک های با بافت سنگین مشاهده می شود. وجود این ساختمان می توان در اثر وجود رس در خاک و مدیریت های اشتباه کشت و کار ناشی شود. این ساختمان حاصل مدیریت غلط در مزرعه مانند تخریب مواد آلی و ورود ماشین آلات در رطوبت های نامناسب می باشد.

ساختمان تک دانه ای (Single grain): در این ساختمان، خاک به صورت تک دانه های جدا از هم و غیر چسبنده بوده و استحکام بسیار کم دارد. در این حالت فردیت هر ذره در توده خاک حفظ شده و عموماً در خاک های با بافت ماسه ای یافت می شود. وجود ساختمان تک دانه ای در خاک تنها ناشی از ماهیت ترکیبی ذرات خاک می باشد و مدیریت خاک در آن تاثیر چندانی ندارد. یک دانشمند استرالیایی به نام امرسون در سال ۱۹۵۹ اظهار کرد که اگر مقدار رس در خاک کمتر از ۱۰ درصد باشد ساختمان خاک تک دانه ای است و اگر مقدار رس در خاک افزایش یابد دُمین ها در خاک تشکیل شده و می توان انتظار وجود ساختمان های خاکدانه ای را داشت.



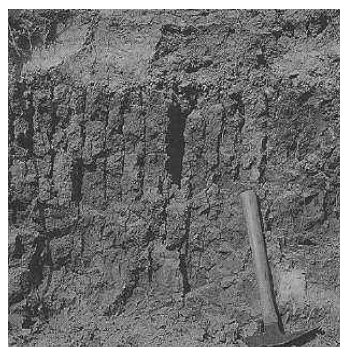
ساختمان مکعبی



ساختمان ورقه‌ای



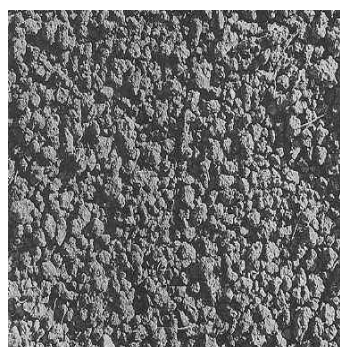
ساختمان ستونی



ساختمان منشوری



ساختمان توده‌ای



ساختمان کروی



ساختمان تک‌دانه‌ای

شکل ۲-۹- انواع ساختمان خاک بر اساس شکل ظاهری

۲-۵- رنگ خاک

رنگ خاک معیاری از ترکیب خاک می باشد. به طور کلی، خاک‌های سیاه رنگ ماده آلی بیشتری از خاک‌های روشن دارند. ترکیبات آهن نیز نقش مهمی در رنگ خاک دارند. خاک‌های قرمز دارای هماتیت (Fe_2O_3) و خاک‌های قهوه‌ای مایل به زرد دارای لیمونیت ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$) می‌باشند. رنگ خاکستری و یا خاکستری متمایل به آبی نشانه‌ای از شرایط عدم تهویه، آب ایستادگی و احیاء آهن در خاک است. در این خاک‌ها اکسید فرو (FeO) فرم غالب آهن را تشکیل می‌دهد. وجود نقاط یا رگه‌های زرد و قرمز در خاک‌های خاکستری نشانه‌ای از تناوب شرایط اکسیداسیون و احیاء می‌باشد. وجود مقدار زیادی از کربنات‌ها به خاک رنگ سفید و یا نزدیک به خاکستری می‌دهد. رنگ خاک در جذب حرارت نیز بسیار مهم است. هرچه خاک تیره‌تر باشد حرارت بیشتری جذب نموده و گرم‌تر خواهد بود.

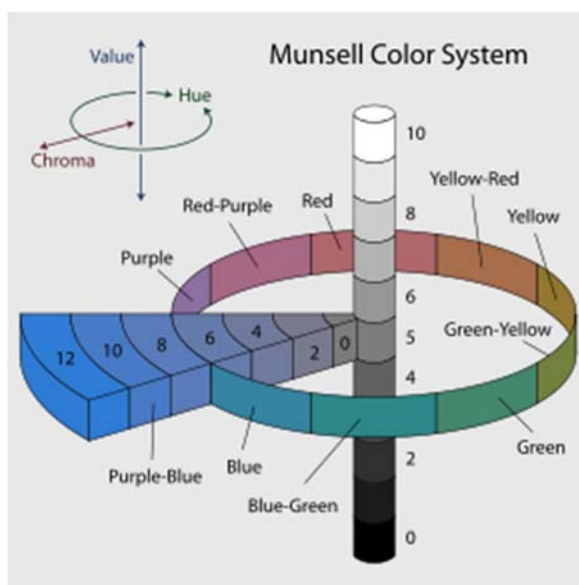
رنگ مشخصه‌یی از خاک است که به آسانی قابل تشخیص می‌باشد و برای منطقه‌یی محدود علامت بارزی برای تمایز انواع خاک آن محدوده به حساب می‌آید. رنگ خاک معمولاً معلول پدیده‌های پدوژنر یا یکی از عوامل تشکیل خاک می‌باشد. معذالک ممکن است که تعیین‌کننده رنگ خاک است، نقش اساسی را در تشکیل خاک نداشته و یا این که رنگ معینی از خاک و حتی سنگ‌های مشابه نتیجه تأثیر عوامل متفاوت داشته باشند. بدین ترتیب در استفاده از مشخصه رنگ به عنوان علامت بارز گروه معینی از خاک باید همواره جانب احتیاط را رعایت نمود و در طبقه‌بندی خاک‌ها نباید رنگ را به عنوان تعیین‌کننده‌ی اصلی به حساب آورد.

۱-۲-۵- عناصر و عوامل تعیین‌کننده رنگ خاک

مهم‌ترین مواد تعیین‌کننده رنگ خاک عبارتند از: هوموس و ترکیب‌های معدنی مانند اکسیدها، سولفورها، سولفات‌ها، کربنات و کلرورها. رنگ‌های روشن و متمایل به سفید معمولاً فراوانی مواد معدنی متمایل به سفید یا بی رنگ است که از آن میان می‌توان سیلیس، آهک (کلسیم کربنات)، گچ (کلسیم سولفات)، نمک (سدیم کلرور) و رس خالص (آلومینیم سیلیکات) را نام برد. رنگ روشن به ندرت در افق‌های سطحی خاک‌های تکامل یافته مشاهده می‌شود (مگر در مناطق خشک و صحرایی)؛ این رنگ اغلب در افق‌های تحتانی، در خاک‌های جوان و تکامل نیافته و یا خاک‌های فرسایش یافته‌یی که افق‌های سطحی خود را از دست داده‌اند، دیده می‌شود. رنگ‌های تیره و قرمز هم در بالا توضیح داده شد که به چه دلیلی در خاک می‌تواند وجود داشته باشند.

برای ارزیابی علمی رنگ خاک از سیستم رنگ مانسل^۱ (دفترچه رنگ مانسل) استفاده می‌شود. دفترچه رنگ مانسل شامل حدود ۲۵۰ رنگ متفاوت است که بر اساس رنگ غالب (هیو Hue)، درجه روشنی و تیرگی نسبی (ولیو Value) و خلوص

نسبی یا قدرت طیفی رنگ (کروما *Chroma*) خاک را در رنگ‌های متفاوت دسته‌بندی می‌کند. شکل ۲-۱۰ سیستم رنگ مانسل را به صورت یک دایره از ترکیب هیو، ولیو و کروما را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰- سیستم رنگ مانسل

هیو: شامل شاخص رنگ غالب در طیف تابشی است و به صورت معیاری از ترکیب نورهای رنگی که به چشم می‌آید، تعریف می‌شود. در روش مانسل ۵ هیوی اصلی وجود دارد که شامل رنگ قرمز (*R*)، زرد (*Y*)، سبز (*G*)، آبی (*B*) و ارغوانی (*P*) می‌باشد. فاصله بین هر کدام از این هیوهای اصلی به ۱۰ زیربخش تبدیل می‌شود که ترکیب دو هیو اصلی (یعنی به عنوان مثال *YR*) در نصف این فاصله‌ها قرار می‌گیرد. یعنی در کل ۱۰ هیو ایجاد می‌شود که هر کدام از این هیوها با شماره ۵ و به صورت زیر نام‌گذاری می‌شوند.

$$5R \rightarrow 5YR \rightarrow 5Y \rightarrow 5GY \rightarrow 5G \rightarrow 5BG \rightarrow 5B \rightarrow 5PB \rightarrow 5P \rightarrow 5RP \rightarrow 5R$$

به طور کلی فاصله بین این هیوها نیز به ۱۰ بخش مجزا تقسیم‌بندی می‌شود که در مجموع ۱۰۰ هیو با مقادیر مختلف ایجاد می‌شود. اما در عمل ۴۰ هیو بیشتر وجود ندارد که فاصله بین این ۱۰ هیو بالایی به صورت ۲/۵ افزایش یافته است (یعنی به عنوان مثال ۵R با افزایش ۲/۵ واحدی تبدیل می‌شود به ۷.۵R یا به عنوان مثال ۱۰R تبدیل می‌شود به ۲.۵YR). به عنوان مثال روند زیر، تغییر رنگ را از قرمز به زرد نشان می‌دهد.

$$2.5R \rightarrow 5R \rightarrow 7.5R \rightarrow 10R \rightarrow 2.5YR \rightarrow 5YR \rightarrow 7.5YR \rightarrow 10YR \rightarrow 2.5Y \rightarrow 5Y \rightarrow 7.5Y \rightarrow 10Y$$

ولیو: معرف درجه روشنی یا تیرگی نسبی رنگ، در ارتباط با مقیاس خاکستری خنثی (بی رنگ) است. ولیو در مقیاس خاکستری خنثی از سیاه خالص (صفر) تا سفید خالص (۱۰) گسترش دارد. علائم ولیو معیاری است از مقدار نوری که در

شرایط استاندارد نوری که به چشم می‌رسد (نور انعکاس یافته). در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است که مقادیر روشن اعداد بزرگتر (بیشتر) داشته و مقادیر تیره اعداد کمتری از لحاظ ولیو دارا می‌باشند.

کروما: خلوص نسبی یا قدرت طیفی رنگ را نشان می‌دهد و معرف درجه اشباع خاکستری خنثی به وسیله رنگ می‌باشد (یعنی وجود رنگ خاکستری). در دفترچه رنگ مانسل برای رنگ‌های خنثی، مقیاس کرومای خاک‌ها از مقادیر صفر تا ۸ در نظر گرفته می‌شود؛ به عبارتی کرومای ۸ قویترین درجه برای کرومای خاک است. تیره ترین پرده های این هیو، در پایین و روشن-ترین آن، در بالای جدول واقع شده اند. ضعیف‌ترین حالت کروما هم (خاکستری‌ترین رنگ) در سمت چپ و قویترین آن در سمت راست قرار دارد.

فرمول و نحوه گزارش رنگ خاک به صورت ترکیبی از اعداد هیو، ولیو و کروما و به صورت زیر می باشد:

$$\text{Hue } \frac{\text{Value}}{\text{Chroma}}$$

یعنی مقادیر هر کدام از این شاخص‌ها به صورت فرمول فوق در آن قرار می‌گیرند و نشان دهنده رنگ یک خاک می‌باشد. برای تعیین رنگ خاک همانطور که گفته شد از دفترچه‌های رنگ مانسل استفاده می‌شود که با توجه به رنگ‌های معمول خاک‌ها، این دفترچه‌ها در خاکشناسی شامل ۹ صفحه است که ۷ صفحه آن نشان‌دهنده رنگ‌های معمول خاک‌ها یعنی رنگ‌های 10R, 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y و 5Y می‌باشند و دو صفحه آن برای بررسی شرایط خاک‌های احیایی (Gley) می‌باشند.

برای استفاده از دفترچه رنگ مانسل معمولاً خاک را در دو حالت خشک و مرطوب روی رنگ‌های موجود در دفترچه قرار می‌دهند تا رنگی که بیشترین همخوانی و شباهت را با خاک مورد نظر در حالت خشک و مرطوب دارند را پیدا کنند. سپس با در نظر گرفتن اعداد و توضیحات روی رنگ مورد نظر، رنگ خاک را در سیستم مانسل مشخص می‌کنند که به عنوان مثال **جدول ۲-۵** رنگ برای دو حالت مرطوب و خشک در دو عمق از یک خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵- رنگ خاک تعیین شده برای چند حالت از یک خاک

نوع خاک	هیو	ولیو	کروما	رنگ مانسل
خاک سطحی خشک	5YR	۷	۶	$5YR \frac{7}{6}$
خاک سطحی مرطوب	10YR	۵	۸	$10YR \frac{5}{8}$
خاک عمق ۳۰ سانتی متری خشک	7.5YR	۵	۸	$7.5YR \frac{5}{8}$
خاک عمق ۳۰ سانتی متری مرطوب	7.5YR	۳	۴	$7.5YR \frac{3}{4}$

مسائل نمونه

مسئله ۱-۳- ظرفی محتوی خاک مرطوب به وزن ۴۵۰ کیلوگرم دارای رطوبت وزنی ۰/۲ می باشد. وزن خاک خشک و وزن آب موجود در خاک را حساب کنید.

مسئله ۲-۳- نمونه خاکی با رطوبت حجمی ۰/۲۵ وزنی معادل ۳۰۰ گرم دارد. با فرض جرم مخصوص ظاهری خشک ۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب برای این خاک، حجم خاک خشک این نمونه خاک را حساب کنید.

مسئله ۳-۳- خاکی در حالت اشباع دارای رطوبتی وزنی ۰/۴۵ می باشد. اگر جرم مخصوص ظاهری این خاک ۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب باشد، جرم مخصوص حقیقی این خاک را محاسبه کنید.

مسئله ۴-۳- اگر رطوبت خاکی ۳۳ درصد حجمی باشد و جرم مخصوص ظاهری و حقیقی آن به ترتیب ۱/۵ و ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب باشد تخلخل تهویه ای این خاک را بدست آورید.

مسئله ۵-۳- جرم نمونه خاک مرطوبی ۱۰۰۰ گرم و حجم آن معادل ۶۴۰ سانتی متر مکعب می باشد. جرم این نمونه خاک بعد از خشک شدن در آون به ۸۰۰ گرم کاهش پیدا می کند. با فرض جرم مخصوص ذرات خاک برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب، مقدار جرم مخصوص ظاهری (ρ_b)، تخلخل (f)، نسبت پوکی (e)، رطوبت جرمی (θ_m) و حجمی (θ_v)، نسبت حجم آب (v_w)، درجه اشباع (S) و تخلخل تهویه (f_a) این خاک را محاسبه نمایید.

مسئله ۴-۳- اگر از یک استوانه به قطر ۵/۵ سانتی متر و ارتفاع ۴/۲ سانتی متر جهت نمونه برداری استفاده شود، تمامی پارامترهای خواسته شده در مسئله ۳-۴ را زمانی که جرم خاک مرطوب و جرم خاک خشک شده در آون برای یک نمونه خاک به ترتیب ۱۵۵ و ۱۲۵ گرم محاسبه شده باشد.

مسئله ۵-۳- جرم مرطوب یک هکتار زمین به عمق ۲۰ سانتی متر رطوبت حجمی ۲۰ درصد با جرم مخصوص ظاهری خشک ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب را محاسبه نمایید؟

سوالات چهار گزینه ای

۱- به طور کلی مواد آلی خاک چند درصد از حجم مواد جامد خاک را شامل می شوند؟

- (۱) ۰/۵ درصد (۲) ۵ درصد (۳) ۱۰ درصد (۴) ۱۵ درصد

۲- عمق معادل آب در ستون خاکی به ارتفاع ۲۰ سانتی متر با رطوبت جرمی ۲۵ درصد و جرم مخصوص ظاهری ۱/۲ چند سانتی متر می باشد؟

- (۱) ۶ (۲) ۹ (۳) ۶۰ (۴) ۹۰

۳- حجم کل یک گرم خاک خشک دست نخورده با کدام یک از روابط زیر قابل بیان می باشد؟

$$(1) \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2) \frac{\rho_s}{\rho_b} \quad (3) \frac{1}{\rho_b} \quad (4) \frac{1}{\rho_s}$$

۴- تخلخل در یک خاک با چگالی ظاهری A و چگالی حقیقی B برابر است با:

$$(1) 1 - \frac{A}{B} \quad (2) 1 - \frac{B}{A} \quad (3) 1 + \frac{A}{B} \quad (4) 1 + \frac{B}{A}$$

۵- اگر رطوبت جرمی خاکی ۲۰٪ باشد با فرض جرم مخصوص ظاهری و حقیقی به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب، تخلخل تهویه خاک چند درصد می باشد؟

$$(1) ۱۰ \quad (2) ۲۰ \quad (3) ۳۰ \quad (4) ۴۰$$

۶- کدام مورد در مورد جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) و جرم مخصوص حقیقی خاک (ρ_s) صحیح می باشد؟

- (۱) در محاسبه ρ_s و ρ_b هم حجم فاز جامد و هم حجم خلل و فرج خاک دخالت دارند.
- (۲) در محاسبه ρ_b فاز جامد و خلل و فرج هر دو دخالت دارند اما در محاسبه ρ_s تنها فاز جامد دخالت دارند.
- (۳) در محاسبه ρ_b تنها فاز جامد دخالت دارند اما در محاسبه ρ_s فاز جامد و خلل و فرج هر دو دخالت دارند.
- (۴) هیچ کدام

۷- نسبت پوکی خاکی (e) برابر یک می باشد، کدام گزینه در مورد این خاک صحیح می باشد؟

- (۱) رطوبت جرمی خاک ۵۰ درصد می باشد.
- (۲) ۵۰ درصد از خاک را منافذ تشکیل می دهند.
- (۳) نسبت جرم مخصوص ظاهری به حقیقی این خاک ۰/۵ می باشد.
- (۴) ۵۰ درصد منافذ خاک را منافذ ریز تشکیل می دهند.

۸- اگر بخواهیم مقدار آب موجود در یک مزرعه ای به وسعت ۳ هکتار به عمق ۲۵ سانتی متر را از رطوبت حجمی ۱۰ درصد به رطوبت حجمی ۱۵ درصد برسانیم، چند متر مکعب آب لازم می باشد؟

$$(1) ۷۵ \quad (2) ۱۲۵ \quad (3) ۲۵۰ \quad (4) ۳۷۵$$

۹- اگر تخلخل خاکی با جرم مخصوص حقیقی ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب برابر ۵۰ درصد باشد، جرم مخصوص ظاهری این خاک چند تن بر متر مکعب می باشد؟

$$(1) ۱/۲۵ \quad (2) ۱/۵ \quad (3) ۱۲۵۰ \quad (4) ۱۵۰۰$$

۱۰- نسبت تخلخل تهویه ای به تخلخل کل در یک خاک برابر است با:

- (۱) نسبت پوکی
- (۲) نسبت رطوبت حجمی به جرمی
- (۳) نسبت جرم مخصوص ظاهری به حقیقی
- (۴) هیچ کدام

۱۱- اگر خاکی که دارای ۵۰ سانتی متر مکعب بخش جامد، ۲۵ سانتی متر مکعب آب و ۲۵ سانتی متر مکعب هوا باشد را متراکم کرده تا حجم کل آن به ۸۰٪ مقدار اولیه برسد چند درصد از تخلخل آن کاسته می شود؟

$$(1) ۱۲/۵ \quad (2) ۱۵/۵ \quad (3) ۲۵ \quad (4) ۳۱$$

۱۲- جرم خشک یک خاک مرطوب به وزن ۱۰۰ گرم و رطوبت جرمی ۰/۲ چند گرم می باشد؟

$$(1) ۸۰ \quad (2) ۸۳/۳ \quad (3) ۹۰ \quad (4) ۹۳/۳$$

۱۳- نمونه از یک خاک غیرقابل انبساط از مزرعه برداشته‌ایم که حجم آن ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب می‌باشد و ویژگی‌های زیر در آزمایشگاه محاسبه شده است:

جرم مرطوب: ۱۵۰ گرم جرم اشباع: ۱۷۰ گرم جرم خشک: ۱۲۰ گرم،
 تخلخل تهویه‌ای این خاک چند درصد می‌باشد (چگالی آب یک گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شود)؟

۱۰ (۱) ۱۵ (۲) ۲۰ (۳) ۲۵ (۴)

