فصل اول

مقدمه و هدف

۱-۱- مقدمه

تراکم به معنی کاهش حجم خاک در اثر بار گذاری به سطح آن می‌باشد. در اثر تراکم نه تنها حجم منافذ خاک کاهش می‌یابد، بلکه ممکن است منافذ به هم پیوسته خاک مسدود گردند. همچنین در اثر تراکم خاک، نفوذ آب به خاک و قابلیت دسترسی گیاهان به آب و هوا تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و مجموع اثرات مذکور باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردند (۸۷).

در اثر تراکم، رطوبت منطقه ریشه کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش جریان ترجیحی در ماتریکس خاک می‌باشد (۸۷). تراکم خاک معمولا باعث کاهش نفوذ آب، کاهش خلل و فرج (۱۷)، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش ظرفیت نگهداری آب، افزایش مقاومت مکانیکی در برابر رشد گیاه (۱۷۱) و به دنبال آن کاهش جذب عناصر و فعالیت‌های موجودات زنده ذره‌بینی (۱۴۰) و افت حاصلخیزی خاک می‌شود (۲۵).

تراکم بیش از حد خاک بر اثر عبور و مرور حاصل از کار کردن ماشین‌آلات کشاورزی عامل مهمی در تخریب خاک می‌باشد. با مکانیزه شدن کشاورزی و افزایش تعداد و وزن ماشین‌ها، تراکم خاک‌ها افزایش می‌یابد. تراکم علاوه بر سطح خاک لایه‌های عمیق تر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۶۸). لازم به ذکر است اگرچه فرآیندهای اصلاح زیستی و غیرزیستی می‌توانند اثرات تراکم سطحی را کاهش دهند (۱۶۹)، اما تراکم خاک‌های زیرین می تواند دهها سال و حتی قرن‌ها باقی بماند(۱۴۳). بنابراین ارزیابی و پیش‌بینی تراکم خاک و تغییرات مربوط به خلل و فرج در جلوگیری از تخریب خاک بسیار مهم است (۲۶).

روش‌های مختلفی برای بررسی تراکم خاک در فیزیک و مکانیک خاک وجود دارد که از آن جمله می‌توان به اندازه‌گیری شاخص‌هایی نظیر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل خاک، و مقاومت فروسنجی اشاره نمود (۲۶). این روش‌ها و شاخص‌های اندازه‌گیری شده، اطلاعاتی در مورد وضعیت خاک ارائه داده و می‌توانند برای بیان اثر تردد وسایل سنگین بر عمق‌های مختلف خاک استفاده

شوند. با این وجود در عمل بسیار مشکل است که اثر تراکم خاک بر حرکت آب و رشد گیاه تنها بر اساس اندازه‌گیری شاخص‌های مذکور پیش‌بینی شود. استفاده از آزمایش‌های نفوذ ردیاب یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان اثرات تراکم خاک را بر انتقال آب را به طور مشخص دید. نقش ساختمان در نفوذ آب می تواند با استفاده از مسیرهای نفوذ ماده رنگی در خاک متراکم شده و خاک غیر متراکم بررسی شود (۸۷). مطالعات گوناگون نشان داده‌اند که تعیین الگوی مسیر حرکت آب می‌تواند شاخص خوبی برای توصیف نفوذ آب در خاک باشد (۶۸). توزیع مکانی یک ردیاب رنگی در پروفیل خاک می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در ارزیابی ساختمان های متراکم شده استفاده گردد (۸۷).

هورتون[1] و همکاران (۱۹۹۹) روشی را برای پردازش تصاویر الگوی جریان آب که حاصل توزیع ردیاب رنگی بود، ارائه دادند (۷۸). طبق نظر ایشان، مقایسه توزیع ماده ردیاب در پروفیل عمودی و افقی کرت‌های محل عبور ماشین آلات با کرت‌های شاهد (بدون عبور ماشین) می‌تواند تأثیر تراکم بر مسیرهای نفوذ آب در خاک را به خوبی نشان دهد. این قابلیت ماده رنگی به این دلیل است که توزیع مکانی مسیرهای رنگی شده علاوه بر حجم منافذ به نحوه اتصال سیستم منافذ نیز بستگی دارد (۱۱۷).

کاربرد دیگر استفاده از ردیاب رنگی، نشان دادن مسیرهای جریان‌های ترجیحی در خاک می‌باشد (۶۰، ۵۵، ۳۲ و ۱۵). مطالعه جریان ترجیحی در خاک موضوع مهمی در دو دهه اخیر می باشد (۲۳، ۲۸، ۵۳). جریان ترجیحی از طریق ماکروپورهای خاک ، درز و ترک‌های حاصل از رشد ریشه گیاهان، کانال‌های عبور کرم‌های خاکی و موجودات زنده دیگر صورت می‌گیرد و ممکن است منجر به انتقال ترجیحی املاح و نفوذ آلاینده‌ها شود (۲۶)، همچنین جریان‌های ترجیحی می‌توانند زمان تخریب آلاینده‌ها را شدیداً کاهش داده و اثرات منفی بر آب‌های زیرزمینی را افزایش دهند. در اثر

1- Horton

تراکم بسیاری از مسیرهای نفوذ در قسمت سطحی خاک از بین می‌روند ، در صورتی که سوراخ‌های کرم خاکی و مسیرهای جریان ترجیحی در پلات‌های متراکم باقی می‌مانند که جریان ترجیحی بای پس شده منطقه اطراف ریشه را افزایش می‌دهند.

مطابق بررسی‌های انجام شده توسط فلوری و فولر[1] (۱۹۹۴) ماده رد یاب رنگی بریلیانت بلو CFC به دلیل قیمت متوسط، قابلیت دید مناسب در خاک، جذب ضعیف توسط ذرات خاک و سمیت پایین ، بهترین ماده ردیاب رنگی برای مشخص کردن الگوهای جریان در آزمایش نفوذ ماده رنگی می‌باشد (۵۳) و در چند دهه اخیر توسط دانشمندان علوم خاک استفاده شده است (۱۷۶، ۱۲۵ و ۲۸).

با توجه به مطالب مذکور روش استفاده از ماده رنگی نسبت به روش‌های رایج بررسی تراکم خاک (یعنی استفاده از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک) ارجحیت دارد. اگر چه در کشورهای دیگر، این روش در چندین مطالعه استفاده شده است ولی در ایران تاکنون گزارش منتشر شده‌ای وجود ندارد. از یک سو به دلیل مشکلات خشکی و مقدار کم ماده آلی در خاک‌های کشور و از سوی دیگر تردد زیاد وسایل کشاورزی در مراحل مختلف کاشت محصولات (کشت محصول تا برداشت) باعث شده است تا تراکم خاک یکی از مشکلات مهم در کشاورزی ایران باشد. در این راستا تراکم خاک با ایجاد مشکلات مختلف تهویه‌ای و نفوذ آب در خاک باعث کاهش عملکرد و در برخی مواقع مرگ گیاهان می‌گردد. این مشکل به ویژه در خاک های با بافت سنگین نظیر خاک‌های استان خوزستان بیشتر وجود دارد. گزارش‌های موجود در برخی نقاط استان به طور مثال در کشت و صنعت کارون نشان دهنده وجود تراکم در خاک‌های استان و اهمیت توجه به این مسئله و حل آن است. همان طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، روش استفاده از ماده رنگی برای ارزیابی

1-Flurry and Fulher

تراکم خاک، روشی جدید و مؤثر است که می‌تواند راهگشای بسیاری از سؤالات در مورد توزیع تراکم در خاک، اثر آن بر حرکت آب در خاک و بهبود رشد گیاه باشد.

۱-۲- اهداف تحقیق

۱ -مطالعه اثر تراکم بر الگوی نفوذ ماده ردیاب رنگی به عنوان شاخص حرکت آب در خاک.

۲- مقایسه روش مذکور با اندازه‌گیری شاخص‌های رایج (جرم مخصوص ظاهری و تخلخل) در بررسی تراکم خاک و بررسی رابطه احتمالی بین روش‌ها.

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱- تراکم خاک

تراکم خاک به عنوان کاهش حجم خاک در نتیجه افزایش جرم مخصوص آن، تحت تاثیر نیروهای وارده تعریف شده است. تراکم خاک که به وسیله رفت وآمد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی صورت می‌گیرد، گاهی اوقات تا زیر عمق لایه شخم نیز ادامه می‌یابد و کاهش حاصلخیزی و کیفیت محیطی را در پی دارد. در حال حاضر به دلیل افزایش وزن و بزرگتر شدن ادوات کشاورزی آثار مخرب تراکم از قبل بیشتر شده است (۴۶). بنابراین تولید کنندگان باید توجه بیشتری نسبت به گذشته به این مسئله داشته باشند. تراکم خاک باعث کاهش بازده تولید محصولات می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط آندرساندر[1] (۲۰۰۳) انجام شد گزارش شده است که میزان بازده گیاه یونجه یک ساله در اثر تردد نرمال ماشین آلات به ۳۷ درصد کاهش یافت (۱۵۲). با توجه به مطالعات هاکانسون[2] و همکاران (۱۹۹۴) که به مدت ۵ سال در اراضی کشاورزی تحت عملیات لوله کشی گاز در کشور سوئد صورت گرفته بود، در اثر عبور و مرور ماشین آلات و وسایل نقلیه در طول دوره گازکشی در سال اول حدود ۳۵ درصد و در سال سوم چیزی حدود ۵۰ درصد از محصولات کشاورزی کاهش یافتند (۶۸).

امروزه به دلیل استفاده از اراضی کشاورزی به عنوان جاده‌های عبور ماشین‌های سنگین مورد نیاز در کارهای ساختمانی، تراکم خاک سطحی افزایش یافته است. احداث خطوط راه آهن و لوله کشی گاز و نفت از جمله عملیات ساختمانی می‌باشند که باعث ایجاد تراکم در خاک ها شده‌اند. وزن ماشین‌هایی که برای این عملیات استفاده می‌شود معمولاً ۳×۱۰^{۴} کیلوگرم می باشند. در بعضی موارد از ماشین‌هایی با وزن ۶×۱۰^{۴} کیلوگرم نیز استفاده می‌شود (۲۱). در خاک متراکم اندازه منافذ و پیوستگی منافذ تغییر می‌کند، جرم مخصوص ظاهری افزایش و منافذ درشت خاک (که اغلب اوقات در آن ها هوا وجود دارد) کاهش می‌یابند. هنگامی که منافذ درشت خاک تبدیل به

1- Undersanderr
2-Hakanson

منافذ ریز می‌شوند، منافذ ریز خاک قادرند آب را برای مدت طولانی در خود نگهدارند در این صورت است که خاک به مدت زیادی مرطوب خواهند ماند. با افزایش جرم مخصوص ظاهری، نفوذپذیری آب در خاک کاهش می‌یابد، زیرا بخش عمده آب به همراه املاح در پروفیل خاک از خلل و فرج درشت انتقال می‌یابد. تراکم خاک به طور معنی‌داری بر خصوصیات هیدرولیکی، نفوذپذیری، میزان نگهداری آب در خاک و جریان آب در خاک اثر می‌گذارد (۸۳ و۱۲۲).

هدایت هیدرولیکی اشباع به تراکم ایجادشده توسط عبور و مرور ادوات کشاورزی حساس است و عموماً به صورت تابعی از میزان آب خاک با تراکم کاهش پیدا می‌کند (۱۳۵). اندازه، شکل، پیوستگی و خمیدگی[1] منافذ در خاک های دارای ساختمان که همگی در ویژگی‌های انتقال و ابقاء آب شرکت دارند متأثر از تراکم می‌باشند. لذا تخلخل کل نباید به تنهایی برای همبستگی یا عامل انتقال آب یا هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته شود (۳۶). از آنجا که جریان آب در خاک متأثر از تراکم خاک است، لذا انتقال ماده حل شده در آب نیز از تراکم خاک تاثیر می‌پذیرد. در واقع می‌توان از روی سرعت انتقال ماده حل شده به میزان تراکم خاک پی برد.

۲-۱-۱- درجات تراکم

تراکم خاک را می‌توان به درجات مختلفی طبقه بندی کرد (۱):

- تراکم کم: شامل خاک‌های رسی لومی با جرم مخصوص ظاهری کمتر از ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در افق شخم خورده و همین‌طور خاک‌های شنی لومی با جرم مخصوص ظاهری کمتر از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب.
- تراکم متوسط: شامل خاک‌های لوم رسی با جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ تا ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و خاک‌های شنی و شنی لومی با جرم مخصوص ظاهری بیش از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب.

1- Tortuosity

- تراکم زیاد: شامل خاک‌های ریز بافت با جرم مخصوص ظاهری بیش از ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و خاک‌های بافت درشت با جرم مخصوص ظاهری بیش از ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب.

۲-۲- اثر تراکم بر رشد و تهویه گیاه

تراکم خاک باعث افزایش مقاومت خاک در مقابل نفوذ ریشه گیاه می‌شود. در نتیجه رشد گیاه و میزان محصول کاهش می‌یابد. رشد گیاه در خاکهای متراکم بسیار محدود می‌باشد، زیرا ریشه‌ها توانایی گسترش در خاک را ندارند. بر این اساس، حداکثر مقاومت نفوذ که ریشه‌ها می‌توانند بر آن غلبه کنند ۳۰۰psi می‌باشد. اگر ترک‌ها و شکاف‌هایی در خاک‌های متراکم وجود داشته باشد، احتمال توسعه ریشه در خاک بیشتر و کاهش رشد کمتر می‌شود. در عوض ریشه‌ها در ناحیه بالا یا کنار منطقه متراکم در خاک متمرکز می‌شوند. صرف نظر از اثر مقاومت نفوذ، شرایط غیر هوازی ایجاد شده در خاک متراکم جذب آب، هوا و عناصر غذایی را توسط ریشه محدود می‌کند. همچنین تراکم خاک تشکیل گره در گیاهان لگومینوز را کاهش داده و منجر به کمبود نیتروژن در این محصولات می‌شود (۴۶). با ایجاد تراکم تعداد روزهایی که میزان تخلخل برای رشد ریشه مناسب می‌باشد، کاهش می‌یابد که اثرات منفی بر رشد و نقش گیاه را در پی دارد.

گوپتا[1] و همکاران (۱۹۷۹) برای تعیین شرایط محدود کننده رشد گیاهان در اثر تراکم سه مورد را پیشنهاد دادند:

۱ - خلل و فرج تهویه ای.

۲ - حد بحرانی برای تجمع خاکدانه‌ها.

۳ - حد بحرانی مقاومت خاک برای رشد ریشه .

1-Gupta

همچنین ده درصد خلل و فرج تهویه‌ای را به عنوان حد بحرانی انتخاب نمودند. در تخلخل کمتر از ده درصد، تبادلات گازی با اتمسفر به صفر می‌رسد (۶۶). البته حد بحرانی یاد شده تابع نوع گیاه و سطح فعالیت‌های میکروبی خاک نیز می‌باشد. افزایش مقاومت خاک به وجود آمده در اثر تراکم، باعث کاهش نفوذ ریشه می‌شود. در نتیجه اندازه گیری مقاومت نفوذ سنجی خاک می‌تواند شاخص خوبی از تراکم پذیری خاک باشد. تیلور[1] و همکاران (۱۹۶۹) درصد رشد ریشه‌ی پنبه را در شرایط مختلف تراکم در خاک‌های با بافت و مقدار کربن آلی یکسان بررسی کردند و اظهار داشتند که تراکم خاک منجر به تغییر توزیع اندازه منافذ و کاهش تخلخل کل خاک شده و رشد ریشه گیاهان را کاهش می‌دهد (۱۴۸). علاوه بر کاهش رشد ریشه، تراکم می‌تواند باعث شرایط ماندابی شود. شرایط ماندابی باعث احیای عناصر محلول از قبیل Fe^{+3} و Mn^{+4} شده و در نتیجه از دسترس ریشه گیاه خارج می‌شوند. بعلاوه کاهش رشد ریشه باعث کاهش جذب عناصر غذایی کم تحرک از قبیل فسفر می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقدار محصول می‌گردد (۱).

۲-۳- اثر تردد ماشین‌های کشاورزی بر تراکم خاک

سه عامل وزن، سرعت و تعداد تردد ماشین‌آلات بر تراکم خاک اثر می‌گذارد. با افزایش سرعت ماشین آلات مقدار افزایش در جرم مخصوص ظاهری و همین‌طور عمق تراکم کاهش می‌یابد. معمولاً اینگونه پذیرفته شده است که بار دوم و بیشتر حرکت ماشین آلات در مقایسه با بار اول تراکم بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین باید متذکر شد که بسته به مقاومت اولیه خاک و توزیع مقاومت خاک با عمق ایده فوق ممکن است که صحیح نباشد. خاک تازه شخم‌خورده یا سست، از قانون فوق پیروی می‌کند ولی در خاک با مقاومت بالا تفاوت بین تراکم خاک، پس از بار اول و بارهای بعدی تردد ماشین ها ناچیز می‌باشد (۱). کوایسترا و همکاران[2] (۱۹۸۴) خصوصیات

1- Taylor
2- Kooistra

فیزیکی و مورفولوژیکی لایه شخم[1] دست خورده و دست نخورده را در یک خاک شنی لومی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر تراکم اولیه از تراکم اولیه وخیم تر می‌باشد. زیرا ساختمان خاک سطحی در اثر زیر و رو کردن (شخم زدن) ضعیف و از هم پاشیده می‌شود (۸۴). لجنگراس[2] (۱۹۷۷) اثر تردد ماشین آلات را بر تراکم پذیری هشت خاک را مورد مطالعه قرار داد و اعلام کرد که ۳ بار و در بعضی مواقع تا ۱۸ بار تردد ماشین آلات باعث افزایش تراکم خاک‌ها شد (۹۸).

راقاوان[3] و همکاران (۱۹۷۹) نشان‌دادند که هر چه تعداد تردد تراکتور بیشتر شود نفوذ ریشه کاهش پیدا می‌کند و نیز زمانی که خاک تحت ۱۵ بار عبور تراکتور متراکم گردید عمق نفوذ ریشه به یک سوم خاک غیر متراکم کاهش یافت (۱۳۳). البته سطح تماس تایر ماشین های کشاورزی نیز در تراکم پذیری خاک‌ها مؤثر است. به همین دلیل برای به دست آوردن انرژی مکانیکی وارد شده توسط ماشین آلات، باید علاوه بر وزن و تعداد تردد ماشین‌آلات باید سطح تماس چرخ ها را نیز در نظر گرفت. در واقع هر چه نیروی وارده در سطح کمتری به خاک اعمال شود به همان میزان تراکم بیشتر خواهد بود (۱۳۳). با افزایش سطح تماس چرخ‌ها، میزان تراکم کاهش پیدا می‌کند. زیرا تنش حاصل از وزن، بر سطح بیشتری از خاک توزیع می‌گردد. به همین دلیل استفاده از چرخ‌های پهن تر و یا چرخ‌های جفت، بر کاربرد چرخ‌های با سطح تماس کم ترجیح داده می‌شود. با افزایش باد لاستیک ماشین‌ها، سطح تماس لاستیک‌ها با خاک کاهش‌یافته و لذا تراکم افزایش می‌یابد. به طورکلی، هر گونه تردد ماشین‌ها، تراکم و تخریب ساختمان خاک را ایجاد می‌کند (۱۲۰). تحقیقات انجام شده توسط هاکانسون و ریدر[4] (۱۹۹۴) نشان داد که احتمال خطر و زیان تراکم خاک سطحی در خاک‌هایی که میزان رطوبت آن ها بالا و تحت فشار وسایل نقلیه

1- Plough Pan
2-Liungars
3-Raghavan
4-Hakansson and Reeder

سنگین می‌باشند ، بسیار بیشتر است (۶۸). کویستراً[1] و همکاران (۱۹۸۴) علاوه بر میزان رطوبت و بار حاصل از چرخ فاکتورهای دیگری مانند تعداد عبور ماشین‌آلات ، ابعاد و میزان فشار لاستیک-های چرخ و قدرت خاک را نیز در برآورد خاک مؤثر می‌دانند. (۸۴).

روش‌های اندازه گیری و ارزیابی تراکم

تراکم خاک را می‌توان با استفاده از پارامترهایی مانند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل و... مورد سنجش قرار داد. این روش‌ها تراکم را به آسانی ارزیابی می‌کنند ولی کلاس منافذ متراکم شده و یا تغییرات ساختمانی ایجاد شده را نشان نمی‌دهند. بنابراین روش‌های مستقیم و غیر مستقیمی برای اندازه‌گیری حجم منافذ و تغییرات ایجاد شده در ساختمان خاک در اثر تراکم توسعه یافته‌اند (۱۱۶).

به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تراکم خاک را می‌توان به ۲ دسته تقسیم کرد:

- اندازه‌گیری تراکم خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک :

از جمله پارامترهایی که برای اندازه‌گیری تراکم خاک به کار می‌روند، عبارتند از:

۱ - جرم مخصوص ظاهری خاک.

۲ - تخلخل.

۳ - هدایت هیدرولیکی.

۴ - پخشیدگی گازها.

۵ - مقاومت نفوذ سنجی.

- ارزیابی و اندازه‌گیری تراکم با استفاده از ماده ردیاب رنگی.

با توجه به اینکه تراکم خاک بر بسیاری از خواص فیزیکی خاک اثر گذاشته لذا می‌توان با بررسی این خصوصیات در مورد تراکم به مطالب مهمی پی برد. این روش‌ها و شاخص‌های اندازه‌گیری

1-Kooistra

شده، اطلاعاتی در مورد وضعیت خاک ارائه داده و می‌توانند برای بیان اثر تردد وسایل سنگین بر عمق‌های مختلف خاک استفاده شوند. با این وجود در عمل بسیار مشکل است که اثر تراکم خاک بر حرکت آب و رشد گیاه تنها بر اساس اندازه‌گیری شاخص‌های مذکور پیش بینی گردد. استفاده از آزمایش‌های نفوذ ردیاب یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان اثرات تراکم خاک بر انتقال آب را به طور مشخص دید.

۲-۴- روش‌های فیزیکی اندازه گیری تراکم خاک

۲-۴-۱- جرم مخصوص ظاهری

بارزترین اثر تراکم خاک بر جرم مخصوص ظاهری می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری، توده خاک خشک در یک حجم استاندارد خاک می‌باشد. میزان جرم مخصوص ظاهری بهینه برای خاک‌ها بستگی به بافت خاک دارد که در جدول (۲-۱) ارائه شده است (۱۵۳).

جدول ۲-۱- جرم مخصوص ظاهری بهینه و محدود کننده ریشه با توجه به طبقه بندی USDA.

بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری بهینه	جرم مخصوص ظاهری محدود کننده رشد گیاه
	----------گرم بر سانتی‌متر مکعب----------	
شنی لومی، شنی	<۱/۶	>۱/۸
لوم، لومی شنی	<۱/۴	>۱/۸
لومی رسی، لومی رسی شنی	<۱/۴	>۱/۷۵
لومی سیلتی، سیلتی	<۱/۳	>۱/۷۵
لومی رسی، سیلتی	<۱/۴	>۱/۶۵
رسی سیلتی، رسی شنی	<۱/۱	>۱/۵۹
رسی	<۱/۱	>۱/۴۷

مونی[1] و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند از آن جایی که جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بهینه برای رشد گیاهان در هر نوع خاک متغیر است، درجه تراکم بهینه خاک دست نخورده بستگی به بافت

1-Mooney

خاک، مقدار مواد آلی خاک و خصوصیات ذاتی خاک دارد (۱۱۱). کالی[1] و همکاران (۱۹۸۲) اثرات طولانی مدت لوله‌کشی نفت را بر خصوصیات یک خاک ریز دانه در کانادا بررسی کردند و دریافتند که با انجام عملیات لوله‌کشی نفت، تخلخل و هدایت هیدرولیکی کاهش یافته است، در صورتی‌که جرم مخصوص ظاهری و مقاومت نفوذ تا عمق کمتر از ۳۰ سانتی‌متر افزایش داشته است. به علاوه مشاهده شده است که عملکرد محصولاتی مانند ذرت ، حبوبات و غلات تا ده سال بعد از عملیات لوله‌کشی نفت کاهش یافت (۳۷).

ازمعمول‌ترین روش‌های ارزیابی تراکم خاک، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک است. در روش‌های استاندارد (ASTM ,۱۹۹۲) که معمولاً به روش پروکتور[2] معروف است، خاک درون قالب‌های فلزی با بکاربردن ضربه چکش متراکم گشته و قابلیت تراکم خاک (وزن مخصوص حداکثر) در یک سطح انرژی مشخص می‌گردد (۱۲۹). باید توجه داشت که در آزمایشگاه، تراکم خاک به فشردگی نمونه کوچک خاک اشاره دارد، در صورتی‌که در مزرعه به متراکم شدن هم زمان چندین افق خاک در نیمرخ خاک اشاره دارد. تراکم خاک باعث کاهش قطر خلل و فرج و اتصال آنها بهم گردیده و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری افزایش، نفوذپذیری و انتشار آب و هوا در خاک کاهش می‌یابد. افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک تحت تأثیر تراکم تا یک رطوبت مشخص و سپس کاهش جرم مخصوص خاک با افزایش رطوبت را می توان بر اساس چگونگی آرایش و جهت‌یابی ذرات خاک توضیح داد (۱۴۴). در رطوبت کم، مقدار آب برای تشکیل لایه دوگانه پخشیده کافی نمی‌باشد. با افزایش رطوبت خاک (بیش از رطوبت مناسب برای حداکثر جرم مخصوص ظاهری) ضخامت لایه دوگانه پخشیده، افزایش بیشتری یافته و در نتیجه تراکم پذیری کاهش می‌یابد (۱).

1-Culley
2-Proctor

۲-۴-۲- تخلخل کل[1]

تخلخل کل خاک دومین پارامتری است که برای اندازه‌گیری خاک به کار می‌رود. تخلخل نمایه‌ای از مقدار منافذ خاک است. به لحاظ کمی تخلخل بر حسب نسبت حجم فضای منافذ خاک به حجم کل خاک توصیف می‌شود. در اثر تراکم، ابتدا منافذ درشت خاک (ماکروپورها) که اساسی‌ترین مسیرهای حرکت آب و هوا در خاک می‌باشند تحت تأثیر قرار می‌گیرند. تراکم خاک باعث کاهش خلل و فرج با قطر بزرگتر از ده میکرون می‌شود. در صورتی‌که با بکار بردن فشار تا چهار صد کیلوپاسکال مقدار خلل و فرج با قطر کمتر از ۰/۲ میکرون تغییر نمی‌یابد. برای خاک‌های رسی تا ۱۰۰ کیلوپاسکال خلل و فرج درشت کاهش نمی‌یابند، در صورتی که در ۲۰۰ کیلوپاسکال مقدار زیادی از خلل و فرج درشت از بین می‌روند و در ۸۰۰ کیلوپاسکال هیچ گونه خلل و فرجی باقی نمی‌ماند (۱). دویکر[2] (۲۰۰۴) با انجام مطالعه‌ای در مورد اثرات تراکم بیان کردند که تراکم با کاهش حجم منافذ خاک درصد تخلخل کل خاک را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (۴۶). استراک[3] و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که تخلخل و برخی دیگر از خصوصیات خاک از قبیل بافت و ساختمان خاک بر روی حرکت آب و املاح در خاک اثر می‌گذارند (۱۴۶).

۲-۴-۳- هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی عبارت از نسبت سرعت یا شدت جریان به شیب هیدرولیکی می‌باشد و یا به عبارت دیگر هدایت هیدرولیکی عبارت است از شیب منحنی شدت جریان در برابر شیب هیدرولیکی. در صورتیکه واحد پتانسیل، ارتفاع ستون آب باشد و شیب هیدرولیکی نیز بدون واحد باشد، واحد هدایت هیدرولیکی همان واحد شدت جریان خواهد بود. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های شنی در محدوده 10^{-2} تا 10^{-3} سانتی متر بر ثانیه و خاک‌های رسی 10^{-4} تا 10^{-7}

1- Porosity
1-Duiker
2-Strock

سانتی‌متر بر ثانیه تغییر می‌کند. خصوصیات خاک که هدایت هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد عبارتند از: تخلخل کل، توزیع اندازه‌های خلل و فرج و تورچواسیتی و یا به زبان ساده شکل هندسی خلل و فرج، اندازه، شکل و خمیدگی منافذ همگی در ویژگی‌های انتقال و ابقاء آب شرکت دارند. با توجه به اینکه تراکم باعث ایجاد تغییراتی در خصوصیات فوق می‌گردد، لذا در هدایت هیدرولیکی خاک اثر می‌گذارد (۷۲). هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از پارامترهای بررسی اثر تراکم بر جریان آب می‌باشد و بر اساس میزان وفور آب در منافذ درشت و اتصالات آن‌ها بررسی می‌شود (۹۶ و ۱۲۳). بنابراین تغییرات این دسته منافذ (منافذ درشت) اثر زیادی بر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع دارد. ژانگ[1] و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی اثر تراکم بر هدایت هیدرولیکی گزارش کردند که میزان هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر سطوح تراکم ایجاد شده به میزان زیادی کاهش یافت (۱۸۰). هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از میزان آب خاک، عموماً با تراکم کاهش می‌یابد (۷۹). عواملی از قبیل تعداد تردد ماشین‌های کشاورزی، نوع عملیات شخم، جرم مخصوص ظاهری و میزان رطوبت بر هدایت هیدرولیکی آب در خاک تأثیر دارند (۷۲). لیپیک[2] و همکاران (۲۰۰۳) با ایجاد سطوح مختلف فشردگی در یک خاک لومی گزارش کردند که تراکم با تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک در یک پتانسیل معین بر هدایت هیدرولیکی اثر می‌گذارد (۹۶). هدایت هیدرولیکی اشباع خاک متراکم شده می‌تواند بر اساس پارامترهای منحنی رطوبتی خاک، خصوصیات ذاتی و جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از مدل رگرسیون محاسبه شوند (۱۱۵، ۶۴ و ۱۸).

3-Zhang
1-Lipiec

۲-۴-۴- پخشیدگی گازها در خاک

تراکم خاک باعث کاهش قطر خلل و فرج و اتصال آنها بهم شده و در نتیجه، نفوذ پذیری و انتشار هوا و آب در خاک کاهش می‌یابد. اندازه گیری نفوذپذیری آب در خاک بهتر از پخشیدگی گازها می‌تواند تراکم‌پذیری خاک‌ها را نشان‌دهد. ولی اندازه گیری پخشیدگی گازها ساده‌تر از نفوذپذیری آب در خاک می‌باشد. اریکسون و همکاران پخشیدگی گازها را در خاک تحت مکش‌های ۱۰ تا ۶۰ کیلو پاسکال برای یک خاک متراکم شده تحت فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال اندازه گیری نمودند و نشان دادند که پخشیدگی هوا در این خاک رسی از ۵۵۲ به ۱۵۰ متر در ساعت کاهش یافت.

۲-۴-۵- مقاومت نفوذسنجی

روش مقاومت‌سنج‌نفوذی روش ساده و راحتی برای اندازه‌گیری تراکم‌پذیری خاک‌ها است. میزان فروسنجی خاک تا حدود زیادی تابع رطوبت خاک می‌باشد (۴۸). انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا نفوذسنج‌هایی با مخروط ۳۰ درجه و قطر ۲۰/۲۷ و ۱۲/۸۳ میلیمتر با سرعت نفوذ ۳۰/۵ میلیمتر بر ثانیه را توصیه می‌کنند. اگرچه حد بحرانی مقاومت نفوذسنجی را به طور کلی ۲ مگاپاسکال در نظر می‌گیرند، ولی برای گیاهان مختلف حد نهایی مقاومت نفوذ سنج متفاوت است. نوع بافت خاک نیز در حد بحرانی مقاومت نفوذسنج تأثیر می‌گذارد (۱۴۸).

۲-۴-۶- ساختمان خاک

ترتیب قرار گرفتن ذرات و یا به عبارت دیگر آرایش درونی ماتریس خاک را ساختمان خاک[1] گویند. چون فضای خالی نیز همچون بخش جامد حائز اهمیت است لذا ساختمان خاک را می‌توان ترتیب قرار گرفتن خلل و فرج ریز و متوسط و درشت در نظام ساختمانی دانست. با چنین تعریفی یکی از مهمترین نتایج اولیه ساختمان خاک نمایان می‌گردد. ساختمان خاک را همانطور که

1- Soil Structure

معرفی شد نمی‌توان از ارکان مستقیم رشد گیاه شمرد، بلکه باید از ویژگی‌هایی به حساب آورد که عملاً در عوامل رشد گیاه مؤثر می‌باشند. آبرسانی، تهویه، استفاده گیاهان از مواد غذایی، فعالیت میکروبی و نفوذ ریشه بعلاوه عوامل دیگر همه تابعی از ساختمان خاک به شمار می‌روند. ساختمان ضعیف ممکن است به طور مستقیم عامل محدود کننده رشد گیاه باشد و به عکس ساختمان خوب مناسب‌ترین کارایی را جهت عوامل رشد فراهم سازد. پیوستگی منافذ (خلل و فرج) به ساختمان خاک بستگی دارد و نقش مهمی در حرکت آب و املاح در خاک دارد (۱۲۸). پیوستگی منافذ درشت خاک بسته به نوع خاک، مورفولوژی خاک، فعالیت‌های کشاورزی و انواع جانوران خاک متفاوت می‌باشد (۱۳۰). دوینگ[1] و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که انتشار املاح به ساختمان و میزان آب خاک بستگی دارد (۴۹). والکر[2] و همکاران (۱۹۸۳) دریافتند که بین تخلخل خاک و پارامترهای انتقال املاح همبستگی معنی‌داری وجود دارد. به طور مثال ضریب انتشار منحصراً با اندازه خلل و فرج تعیین می‌شود (۱۶۱).

۲-۴-۶-۱- خلل و فرج خاک

ترتیب قرار گرفتن اجزا خاک تعیین کننده مقدار و طبیعت خلل و فرج خاک است. درصد خلل و فرج به بافت و درجه دانه بندی وابسته است. درصد کل خلل و فرج در مشخص کردن خصوصیات ساختمانی به اندازه توزیع نسبی اندازه خلل و فرج اهمیت ندارد. نسبت خلل و فرج ریز به خلل و فرج درشت تعیین کننده میزان انحراف از حد مطلوب خصوصیات ساختمانی است. خلل و فرج ریز عامل ظرفیت نگهداری آب و خلل و فرج درشت عامل تعیین کننده میزان نفوذپذیری و ظرفیت هوای خاک است. در یک خاک ایده آل ۵۰ درصد کل خلل و فرج از نوع ریز و ۵۰ درصد بقیه از نوع درشت می‌باشد. نکته جالب اینکه با افزایش قطر خاکدانه ها (۵-۰/۵ میلیمتر)، بتدریج مقدار خلل و فرج کل خاک، درصد تخلخل تهویه‌ای و نیز درصد اکسیژن موجود در هوای خاک افزایش

1-Duwing
2-Walker

می‌یابند (۶). موضوع مهم و اصلی در مطالعه تراکم اندازه و نوع خلل و فرج است (۲۶). تراکم باعث کاهش تخلخل کل خاک می‌شود (۹) و این کاهش مربوط به تغییرات شکل خلل و فرج (۱۷۲) و توزیع اندازه منافذ می‌باشد (۶۵).

اندازه و پیوستگی منافذ نقش بسیار مهمی در خصوصیات جریان آب و حرکت املاح دارد. ورورت[1] و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که بین پیوستگی افقی (نه عمودی) منافذ و هدایت هیدرولیکی رابطه خوبی برقرار است که نشان دهنده اهمیت ساختمان خاک و پیوستگی منافذ می‌باشد (۱۵۵). منافذ را از لحاظ فراوانی، اندازه و شکل تقسیم بندی می‌نمایند. از لحاظ فراوانی در صورتی که تعداد خلل و فرج کمتر از یک در واحد سطح باشد آن را کم، بین ۱ تا ۵ متوسط و بیش از ۵ را زیاد طبقه بندی می‌نمایند. در صورتی که از لحاظ اندازه قطر منافذ کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در کلاس بسیار ریز، بین ۰/۵ تا ۲ را در کلاس ریز، بین ۲ تا ۵ را متوسط و بیش از ۵ میلی‌متر را در کلاس های درشت طبقه بندی می‌نمایند.

منافذ با قطر بزرگ تر از ۳۰ میکرومتر شامل بیوپورها و ترک‌های انقباضی می‌باشد و منافذ کوچک تر از ۳۰ میکرومتر می‌تواند در داخل خاکدانه و یا بین آن‌ها وجود داشته باشد. به این نوع تخلخل، خلل و فرج ساختمانی گفته می‌شود و تعیین کننده ظرفیت تهویه و نگه داشت رطوبت در خاک می‌باشد (۴). این منافذ به شدت تحت تأثیر بافت و مقدار کربن آلی بوده و همچنین به نوع مدیریت خاک بسیار حساس می‌باشد. منافذ درشت و طیف کوچکی از منافذ با قطر متوسط حداقل پایداری را در کلاس اندازه‌ای ذرات دارند. بخشی از حجم منافذ بزرگ‌تر از ۳۰ میکرومتر و اتصال آنها به هم اثر عمده‌ای روی جریان آب و املاح، تهویه، خصوصیات مکانیکی خاک و توسعه ریشه دارد. وقتی پتانسیل آب نزدیک صفر است جریان آب و املاح بیشتر از طریق منافذ بزرگ انجام می‌گیرد و منافذ کوچک‌تر مسیرهای فرعی آب می‌باشند. این منافذ منعکس کننده مناطق

1-Verwoort

گسیختگی[1] می‌باشند و با کاهش در جزء حجمی این منافذ مقاومت کششی و استحکام خاک افزایش می‌یابد. منافذی که قطر آنها معادل ۰/۱ تا ۳۰ میکرومتر است اغلب منافذی قوی نامیده می‌شوند و این منافذ آب قابل دسترس برای گیاه را تأمین می‌کنند. این منافذ همچنین جایگاه سکونت میکروارگانیسم‌ها و موجودات کوچک خاک بوده و بشدت تحت تأثیر بافت و مقدار کربن آلی می‌باشند. اما خیلی تحت تأثیر افزایش جرم مخصوص ظاهری ناشی از عبور و مرور یا فشارهای دیگر، نیستند. دسته دیگری از منافذ، کوچک‌تر از ۰/۱ میکرومتر هستند که مدیریت خاک کمترین تاثیر را روی این دسته خواهد داشت. هرچند این منافذ مدت طولانی‌تری پر از آب باقی می‌مانند ولی مقدار کمی از این آب برای گیاه قابل استفاده است (یا حتی می‌توان گفت قابل استفاده نیست) و سرعت جریان آب از این منافذ بسیار کند است. این منافذ از نظر بیولوژیکی غیر فعال بوده و برای ریشه و میکروارگانیسم ها نفوذ ناپذیرند و تنها موجودات ریز که در اندازه‌های مولکولی در آمده باشند، می‌توانند در این منافذ قرار گیرند بنابراین نقش مهم آنها حمایت فیزیکی کربن آلی در برابر تجزیه است (۴).

۲-۴-۶-۲- پایداری ساختمان خاک

اصطلاح پایداری ساختمانی خاک به توانایی خاک برای حفظ آرایش ذرات جامد و فضاهای خالی خود هنگامی که در معرض فشارهای مختلف قرار می‌گیرد، گفته می‌شود (۴). ویژگی‌های پایداری برای یک شکل ساختمانی مجزا و نوع فشار ویژه هستند. فشار ممکن است ناشی از فرآیندهای مختلفی مانند خاکورزی، عبور و مرور ماشین آلات، تر و خشک شدن باشد. برای دریافت پایداری ساختمانی خاک، خاکدانه در معرض الک و تکان دادن در آب یا در معرض انرژی فراصوتی قرار گرفته و به این ترتیب پایداری اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه اصطلاح پایداری ساختمانی مترادف با پایداری خاکدانه در نظر گرفته می‌شود. خاکدانه در مزرعه تحت تنش‌های شخم، عبور و مرور،

1-Failure zone