دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

مدیریت پایدار منابع خاک

تراکم

تهیه و تنظیم

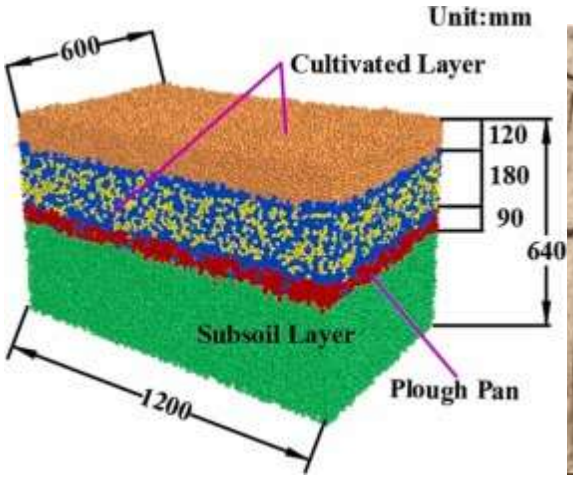
حیدر غفاری

مدیریت تراکم خاک

مقدمه

در سال‌های اخیر، تراکم خاک به عنوان یکی از مخرب‌ترین مسائل زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا بر دینامیک آب خاک، فرسایش، چرخه نیتروژن و کربن خاک، نیاز و اثربخشی انرژی کشت، شستشوی آفت‌کش‌ها و رشد محصول تأثیر می‌گذارد.. اتحادیه اروپا فشردگی خاک را به عنوان یکی از تهدیدات اصلی خاک که ممکن است باعث تخریب خاک شود، معرفی کرده است [۲]. به زبان ساده تراکم خاک را می توان افزایش جرم ظاهری یا کاهش تخلخل خاک در اثر بارهای وارده خارجی یا داخلی توصیف کرد. فشردگی خاک به عنوان یک مشکل پیچیده و چند بعدی در نظر گرفته می‌شود که اثرات متقابل خاک، گیاه، آب و هوا و ماشین آلات در آن نقش مهمی دارند.. تردد چرخ ها ناشی از استفاده از ماشین آلات سنگین و مدیریت نامناسب خاک می تواند باعث فشرده شدن خاک شود و لایه های نفوذ ناپذیری در خاک ایجاد کند که چرخه آب و مواد مغذی را محدود کند. این وضعیت می تواند منجر به کاهش رشد، عملکرد و کیفیت محصول و همچنین کاهش شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کیفیت خاک مانند تخریب ساختار خاک، افزایش رواناب سطحی، فرسایش خاک، انتشار گازهای گلخانه ای، کاهش هدایت آبی خاک، کاهش تغذیه آب زیرزمینی و از دست دادن تنوع زیستی شود [۳، ۴].

به طور عمده، دو نوع تراکم خاک وجود دارد: تراکم خاک سطحی و تراکم زیرسطحی. فشردگی خاک سطحی را پوسته شدن خاک (soil crusting) نیز می نامند. این نوع تراکم خاک زمانی اتفاق می‌افتد که خاکدانه‌های سطحی خاک از طریق برخورد قطرات باران، رواناب، آب آبیاری یا خاک‌ورزی شکسته می‌شوند. بنابراین ورود آب و هوا به خاک را با ایجاد رواناب و فرسایش خاک محدود می کند و مانع از سبز شدن نهال می شود. فشردگی زیرسطحی را می‌توان به عنوان تراکم ناشی از خاک‌ورزی و تراکم ناشی از ترافیک چرخ‌های ماشین آلات، بسته به جایی که رخ می‌دهد، تعریف کرد. ابزارهای خاکورزی مانند دیسک‌ها، گاوآهن های برگردان دار و ابزارهای نوع جارویی باعث تراکم ناشی از خاکورزی می‌شوند. این نوع تراکم خاک بیشتر به عنوان "هاردپن" یا "کفه شخم" نامیده می شود و در لایه‌ای از خاک در ست زیر عمق خاک ورزی زمانی رخ می دهد که خاک به طور مکرر در همان عمق کشت شود. تراکم ناشی از تردد چرخ وسایل نقلیه در زیر منطقه خاکورزی قرار دارد و به دلیل بار وزن محور به خاک ایجاد می شود. از بین بردن این نوع تراکم خاک سخت ترین است، بنابراین پیشگیری مهم است [۴، ۵، ۶، ۷].



مکانیک تراکم خاک

تراکم خاک شـامل بازآرایی میکروسـکوپی و نزدیک شـدن ذرات جامد خاک به یکدیگر در نتیجه اعمال بار مکانیکی اسـت. اگر نیرویی به خاک وارد شـود، نیرو بین ذرات خاک انتشـار پیدا میکند و چنانچه مقاومت برشـی دانه ها از تنش بر شی اعمال شده بیشتر با شد، هیچگونه جابجایی یا آرایش جدیدی بین ذرات رخ نمیدهد. اما اگر کمتر با شد، دانه ها روی هم لغزیده شـده و به هم نزدیکتر میشـوند و آرایش جدیدی را ایجاد میکنند که منجر به کاهش تخلخل و حجم کلی خاک می‌شود. با نزدیک شدن ذرات به هم (تراکم) مقاومت برشی آنها به تدریج افزایش می یابد تا سرانجام برابر با تنش برشی شود. در این هنگام تراکم پایان می یابد. در همه خاکها به جز خاکهاری رسی سیراب، این فرایند بی درنگ و آنی رخ می دهد. مقاومت بر شی خاک تابعی از خ صو صیات خاک ا ست. معادله گ سیختگی مور–کولومب رابطه بین مقاومت برشی خاک (τ) و خصوصیات خاک و تنش برشی σ را به صورت زیر بیان میکند:

$$\tau = \sigma . \tan \varphi + C$$

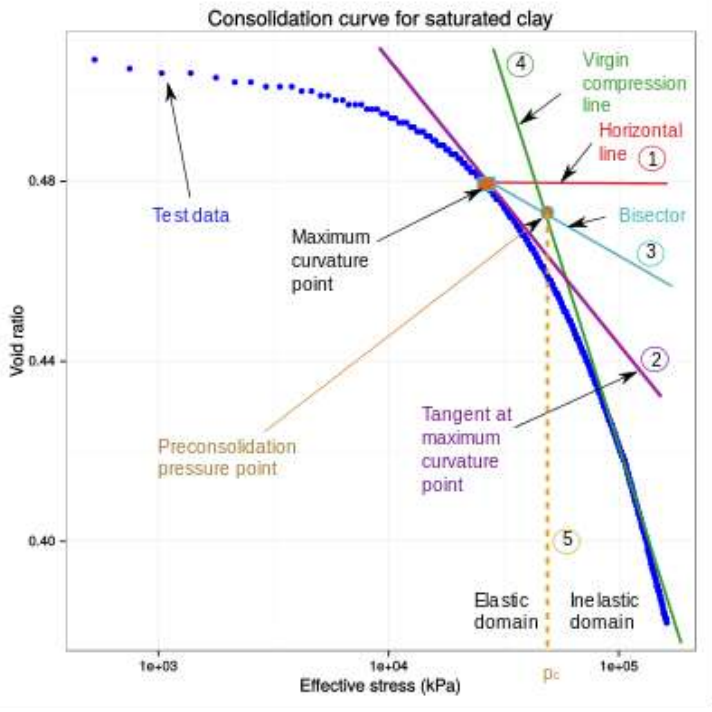
که در آن، c ضریب چسبندگی، φ زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات، τ مقاومت برشی و σ تنش نرمال وارده به خاک ا ست. ضریب چسبندگی تابعی از میزان رس و زاویه ا صطکاک داخلی تابعی از اندازه ذرات خاک ا ست. با افزایش اندازه ذرات زاویه اصـطکاک داخلی افزایش می یابد. مقاومت برشـی را می توان در یک جعبه برشـی، دسـتگاه آزمایش سـه محوری یا حلقه برشی تعیین کرد.

درجه فشـردگی پارامتری کمی اسـت و به عنوان "نسـبت چگالی ظاهری در شـرایط طبیعی به چگالی ظاهری حداکثر بد ست آمده از آزمایش تراکم " تعریف می‌شود (Håkansson 1990 ؛ Lipiec و هاتانو ۲۰۰۳). هرچه این عدد از ۱ کوچکتر باشـد، میزان فشـردگی خاک کمتر خواهد بود. تراکم خاک با حذف هوای خاک ، تغییر در سـاختار خاک و افزایش ماکروسـکوپی مقاومت خاک همراه اسـت (تیلور ۱۹۷۱). پدیده تراکم خاک را می توان در مفهوم کلاسـیک الاسـتوپلاسـتیک پدیده‌های تنش–کرنش با در نظر گرفتن خاک به عنوان ماده ای که تا حد معینی از تنش واکنش الا ستیک نشان می دهد ، تو ضیح داد که فراتر از حد الا ستیک، هرگونه تنش افزایشی منجر به تغییر شکل پلا ستیک

(غیرقابل برگشت) می شود (هورن ۱۹۸۸). این آستانه تنش را که تنش پیش تراکمی می‌نامند معیاری برای مدیریت تراکم است و برابر است با حداکثر تنشی که یک خاک میتواند تحمل کند بدون اینکه ساختار فیزیکی آن دچار آسیب شود. این تنش آستانه‌ای برای یک خاک معین، تابعی از شرایط آب و هوایی، بافت خاک ، ساختمان خاک و پتانسیل ماتریک (رطوبت خاک) دارد (هورن و همکاران ۱۹۹۵).

تنش پیش تراکم حداکثر تنش اصلی است که خاک می تواند بدون تغییر شکل و فشردگی پلاستیکی در برابر آن مقاومت کند. با یک آزمایش تک محوری تعیین می شود که توسط آن یک نمونه خاک در سیلندر توسط پیستون با افزایش تنش عمودی بارگیری می شود. هرچه خاک خشک تر باشد، خاکدانه‌ها قوی تر بوده و از این رو تنش پیش تراکم افزایش می‌یابد. در خاکهای کشاورزی، تنش پیش تراکم بستگی به شرایط رطوبت خاک ، ساختار خاک و ایجاد پیوندهای فیزیکی و شیمیایی دارد. اگر خاک فراتر از تنش پیش تراکم بارگیری شود ، خاک تغییر شکل پلاستیکی می دهد. در خاکهای شنی ، ساختار و ترک وجود ندارد و مکانیسم شکست توصیف شده در آزمون تک محوری امکان پذیر نیست. با این حال ، در بسیاری از خاکهای شنی تنش پیش تراکم به خوبی قابل تشخیص نیست.

تنش پیش تراکمی از چندین روش میتواند تعیین شود که رایج‌ترین آن روش کاساگراند است. در این روش از منحنی تنش–کرنش استفاده میشود. این منحنی از لگاریتم تنش در محور افقی در برابر نسبت پوکی بدست می آید. برای تعیین آن، ابتدا نقطه ای که دارای بیشترین انحنا را دارد پیدا کرده، خط مماس با آن را ترسیم کرده و یک خط افقی موازی با محور X هم از این نقطه عبور می دهند. سپس نیمساز این دو خط را رسم می کنند. در محله بعد، قسمت انتهایی منحنی که تقریبا حالت خطی دارد را از بالا امتداد داده تا خط نیمساز را قطع کند. نقطه متناظر با محل تقاطع دو خط روی محور افقی به عنوان تنش پیش تراکمی تعیین میشود.



۲ علل فشردگی خاک

تراکم می تواند یک پدیده طبیعی با شد نا شی از انجماد و خ شک شدن یا پدیده م صنوعی نا شی از عملیات مکانیکی. روشـهای کشـاورزی معمولی نیز می تواند خاک را از طریق فشـردن تخریب کند. در کشـاورزی مدرن ، اکثر عملیات میدانی از کا شت تا بردا شت به صورت مکانیکی با ا ستفاده از ما شین های چرخ سنگین انجام می شود که می توانند خاک را در هر گذر متراکم کنند (ویلیامسون و نیلسن ۲۰۰۰). تراکم خاک در نتیجه تردد ماشین به طور کلی بستگی به مقاومت خاک و مقدار بارگذاری (فشـار) ماشـین دارد (Alakukku et al. 2003). مقاومت خاک تحت تأثیر مواد آلی، محتوای آب، سـاختمان خاک و بافت قرار دارد در حالی که بارگذاری با بار محور، تعداد تایرها، ابعاد تایر، سـرعت لاسـتیک، تعداد دفعات تردد و اثرات متقابل تایر و خاک در ارتباط اسـت (کربی و همکاران ۱۹۹۷ ؛ Sakai و al. 2008). بار محور را نباید با فشار محور ا شتباه گرفت زیرا بار محور وزن ما شین (کیلوگرم) ا ست در حالی که فشار بار محور در واحد سطح (کیلوپا سکال) بوده و عامل ا صلی در تراکم خاک ا ست. افزایش فشار بر روی خاک شانس تراکم خاک را افزایش می دهد (Gysi و همکاران ۱۹۹۹). افزایش دفعات عبور ماشین ها بر روی خاک منجر به تراکم بالای خاک و شرایط فیزیکی نامنا سب خاک برای ظهور بذر می شود (بوتا و همکاران ۲۰۰۶ ؛ ساکایی و همکاران ۲۰۰۸). با این حال، بخش عمده ای از تراکم کل خاک توسـط اولین گذر (Bakker و Davis 1995 ؛ Silva و همکاران ۲۰۰۸) یا تردد اولیه (Sakai و همکاران ۲۰۰۸) ایجاد می شود و تعداد ۱۰ گذر می تواند تا خاک را تا عمق ۵۰ سانتی متر تحت تأثیر قرار دهد. (حمزه و اندرسون ۲۰۰۵).

پایکوب کردن خاک توسط حیوانات و دامها نیز می تواند باعث فشردگی خاک شود و ساختار خاک را خراب کند (سیلوا و همکاران ۲۰۰۳). فشردگی خاک نا شی از چرای حیوانات در مقایسه با تراکم خاک نا شی از و سایل مکانیکی که فقط در مسـیر حرکت چرخ‌ها رخ میدهد، در سـطح گسـترده تری صـورت میگیرد (دروری ۲۰۰۶ ؛ سـیگوآ و کلمن ۲۰۰۹). خرابی فیزیکی توسط چرای حیوانات بستگی به شدت پایمال شدن ، رطوبت خاک ، پوشش گیاهی ، شیب زمین و نوع کاربری زمین دارد. عمق فشـردگی خاک ناشـی از حیوانات باعث می تواند از ۵ تا ۲۰ سـانتی متر متغیر باشـد و ممکن اسـت بر دانسـیته ظاهری خاک ، هدایت هیدرولیکی ، حجم ماکروپورها و مقاومت نفوذ خاک تأثیر بگذارد (حمزه و اندرسـون ۲۰۰۵ ؛ سـیگوآ و کلمن ۲۰۰۹). اثرات چرا حیوانات در خواص فیزیکی خاک (درویری و همکاران ۲۰۰۸) و نیتروژن و کربن خاک به طور مف صل در مقاله (Bhandral et al. 2007؛ Piñeiro et al. 2010) مورد بحث قرار گرفته است.

برخلاف زمین های زیر کشـت، عملیات برداشـت در جنگل‌ها به چند دلیل باعث فشـردگی بیشـتر خاک می شـود: (۱) ا ستفاده از ما شین آلات سنگین برای بردا شت ؛ (۲) بریدن ، هل دادن ، کشیدن و بردا شتن چوبها ؛ (۳) در حین انتقال چوبهایی که فشار ترکیبی را بر خاک وارد می کنند ؛ (۴) نبود عملیات خاکورزی در جنگل ها برای سست شدن خاک. در جنگل ها ، عملیات برداشـت باعث انواع مختلف اختلالات خاک می شـود و احتمال تراکم خاک به طور مسـتقیم با سیستم برداشت ارتباط دارد (سووا و کولاک ۲۰۰۸). عمدتاً تراکم شدید خاک زمانی ایجاد می شود که عملیات برداشت و انتقال تماما با ماشین آلات انجام شود و این عملیات می تواند خاک را تا عمق ۶۰ سانتی متری متراکم کرده و اثرات آن را بیش از ۳ سال باقی بگذارد (Greacen and Sands 1980). یک عملیات چوب بری ساده در جنگل ها می تواند ۲۰ تا ۳۰ درصد از زمین جنگل را تا عمق ۳۰ سانتی متر آسیب برساند (Herbauts et al. 1996). استفاده از ماشین های چند منظوره سبک وزن می تواند تخریب خاک را کاهش دهد (رادفورد و همکاران ۲۰۰۰).

در مناطق شهری، پارکهای شهری و اماکن تفریحی تعداد زیادی بازدیدکننده دارند و با افزایش جمعیت شهری ، فشار بازدیدکنندگان بر این سایتها روز به روز در حال افزایش ا ست (Frick et al. 2007). اثرات تردد بازدیدکنندگان بر خاک و پوشش گیاهی توسط بسیاری از نویسندگان گزارش شده است (جیم ۱۹۸۷ ؛ سارا و ژولف ۲۰۰۷) و این تأثیرات در برخی موارد طولانی مدت است (کیسلینگ و همکاران ۲۰۰۹). افزایش فشار بازدیدکنندگان منجر به فشردگی خاک ، افزایش جرم مخصوص ظاهری ، کاهش تخلخل خاک و کاهش محتوای مواد آلی می شود (ماریون و کول ۱۹۹۶ ؛ سارا و ژولف ۲۰۰۷).

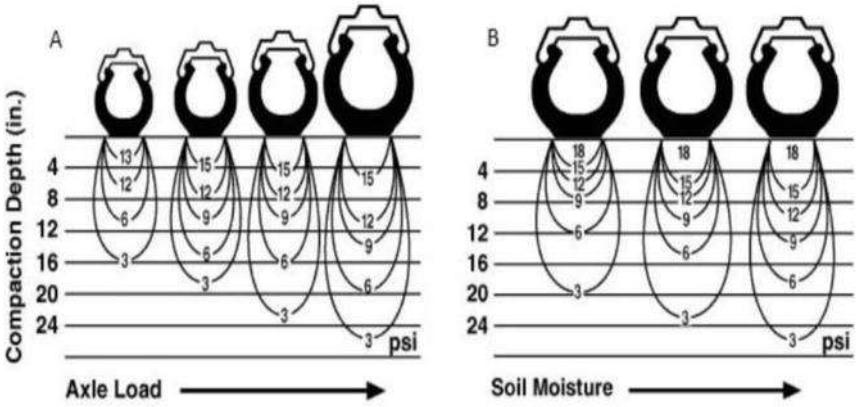
عملیات نظامی یا تمرینات آموزشی نظامی در گذشته نیز منجر به تراکم شدید خاک در برخی نقاط شده است (Silveira و همکاران ۲۰۱۰) و افزایش تراکم توده خاکها تا ۲,۱۲ Mg/m3 به دلیل عملیات نظامی گزارش شده است (وب ۲۰۰۲ ، ۲۰۰۲) به

علل طبیعی (ریشه درختان، بارندگی، چرخه های فصلی و غیره) تراکم خاک به اندازه عوامل انسانی مضر نیستند: تراکم خاک مرتبط با علل طبیعی در ۵ سانتی متر بالای خاک محدود شده و تراکم خاک در اثر پایمال شدن و فشار شهری بر روی یک سایت می تواند خاک را تا ۲۰ سانتی متر فشرده کند در حالی که عملیات مکانیکی می تواند خاک را تا ۶۰ سانتی متر متراکم کند. مهم نیست که علت تراکم چیست، تراکم بر پویایی آب تأثیر می گذارد (Schlotzhauer و Price 1999) ، انتشار آفت کش ها (Alletto et al. 2010؛ Van den Berg et al. 1999) ، فرسایش خاک (Kosmas و همکاران ۱۹۹۷) ، چرخه کربن و نیتروژن (DeNeve andHofman 2000) ، رشد گیاه (Lowery و Schuler 1991) ، و هزینه عملیات مکانیکی (Soane and Pidgeon 1975) ؛ همانطور که در بخشهای بعدی بحث خواهیم کرد.

عوامل موثر بر تراکم

عوامل موثر بر تراکم خاک به دو دسته تقسیم میشوند. عوامل خاکی و عوامل ماشینی. محتوای آب خاک، بافت و ساختار خاک و مواد آلی خاک چهار عامل اصلی خاکی هستند که میزان فشردگی را پس از قرار گرفتن خاک در معرض بار ترافیکی وسایل نقلیه تعیین می کنند. حساسیت خاکها به تراکم تابعی از بافت و ساختمان خاک است. به عنوان مثال، خاکهای لومی سیلتی با محتوای کلوئیدی کم در مقایسه با خاکهای لومی و رسی با بافت متوسط یا ریز حساس تر هستند در حالی که خاکهای شنی نسبت با سایر خاکها کمتر در معرض فشردگی قرار دارند (هورن و همکاران ۱۹۹۵). به طور کلی، هرچه تنوع اندازه ذرات بیشتر باشد، حساسیت خاکها به تراکم بیشتر است. زیرا ذرات ریز در حفرات بین ذرات درشت تر قرار میگیرند. اسمیت و همکاران در آزمایشی ۳۵ نوع خاک را از مناطق جنگلی که طیف وسیعی از بافت خاک (محتوای رس از ۸ تا ۶۶ درصد) و کربن آلی (از ۰/۲۶ تا ۵/۷۷ درصد) را شامل میشد، آزمایش کردند. با اعمال فشار های مختلف شامل ۱۰۰ ، ۲۰۰ ، ۴۰۰ ، ۶۰۰ ، ۱۰۰۰ ، و ۱۴۰۰ کیلو پا سکال چگالی ظاهری اندازه گیری شد و رابطه ای بین فشار اعمال شده (P) ، میزان آب (W) و تراکم توده خاک (D) برقرار شد. هنگامی که یک خاک لومی تحت فشارهای مختلف و رطوبت قرار می گرفت ، رفتار کاملاً متفاوتی با یک خاک شن لومی داشت. خاک لومی

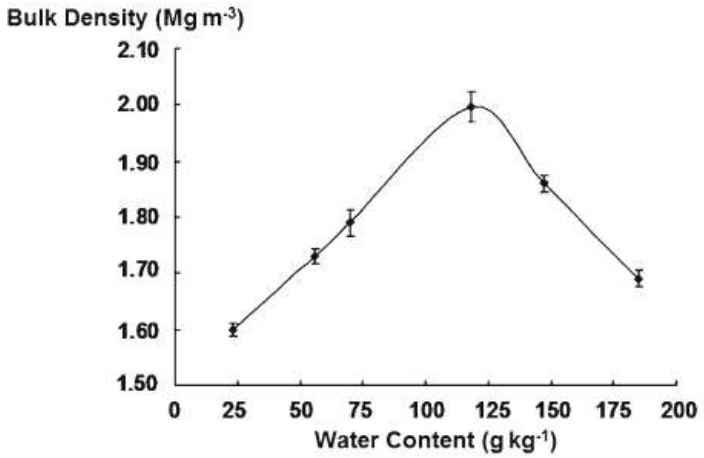
هنگام خشـــک بودن، در برابر تراکم مقاوم و هنگام مرطوب بودن مســـتعد تراکم بود. در حالی که شـــن لومی مقاومت بیشتری در برابر تراکم نشان داد.



مواد آلی خاک به دلیل داشـتن خاصـیت الاسـتیسـیته و همچنین تقویت سـاختمان خاک مقاومت در برابر تغییر شـکل و/تراکم را افزایش میدهد (اثرات برگشـــت ، Soane 1990). محتوای کربن آلی بالا حتی می تواند تراکم پذیری خاک را در سطوح رطوبتی بالا در خاک های رسی و رسی سیلتی کاهش دهد (اسمیت و همکاران ۱۹۹۷).

فرایند تراکم خاک به شـدت تحت تأثیر محتوای آب خاک اسـت (حمزه و اندرسـون ۲۰۰۵ ؛ هورن و همکاران ۱۹۹۵ ؛ مصدقی و همکاران ۲۰۰۰). رطوبت بر مقاومت فروروی و ظرفیت حمل بار یا حداکثر فشار مجاز بر روی خاک تأثیر می گذارد (مدودف و Cybulko 1995). به طور کلی، خاکی با رطوبت بسیار کم نسبت به خاکی با رطوبت زیاد در برابر تراکم آسـیب پذیرتر اسـت (Gysi et al. 1999). اما این رابطه خطی و مسـتقیم نیسـت و از یک آسـتانه به بعد با افزایش رطوبت، تراکم کاهش می یابد. به این حد آستانه، حد بحرانی تراکم گفته میشود. وقتی میزان رطوبت آنقدر زیاد باشد که تمام منافذ خاک با آب پر شود ، از تراکم بیشتر خاک جلوگیری میکند (اسمیت و همکاران ۱۹۹۷).

هنگامی که خاک در سراسر پروفیل خشک و سفت است، ممکن است اثر تراکم قابل توجهی وجود نداشته باشـد. با این حال، زمانی که لایه‌های سـطحی مرطوب و نرم روی خاک خشـک قرار گرفتند، ممکن اسـت لایه‌های بالایی به شدت فشرده شوند، و زمانی که لایه‌های سطحی خشک و سفت با خاک زیرین مرطوب است، فشار ممکن است تا حدی به سمت پایین منتقل شود و تا خاک زیرین فشرده شود.



آگاهی از محتویات آب در ارتباط با تراکم خاک برای یک خاک خاص می تواند در زمانبندی عملیات مکانیکی معمول در آن خاک مفید باشد (باتی ۲۰۰۹ ؛ اوهو و همکاران ۱۹۸۹). تراکم خاک می تواند تحت تأثیر وضعیت انرژی آب، یعنی پتانسیل آب ، چه پتانسیل ماتریک و چه اسمزی باشد (Charpentier and Bourrié 1997). در شرایط غیر اشباع، مکش می تواند بر تراکم تأثیر بگذارد و اثر مکش باید از اثر فشار اعمال شده جدا شود (Cui و همکاران ۲۰۱۰).

از جمله خصوصیات ماشین میتوان به بار محوری، ابعاد لاستیک، فشار لاستیک و تعداد چرخ اشاره کرد. تردد توسط لاستیک ماشین های سنگین مزرعه به عنوان عامل اصلی تراکم خاک در مزارع کشاورزی شناخته شده است. تراکم خاک توسط چرخ ها با کاهش تخلخل خاک در ناحیه زیر چرخ و تشکیل شیارها در سطح خاک مشخص می شود [۱۸]. درجه تراکم خاک توسط ماشین‌های کشاورزی نه تنها به ویژگی‌های ماشین‌های کشاورزی، بلکه به ویژگی‌های خاک مانند رطوبت، نوع خاک، بافت، ساختار و رطوبت بستگی دارد [۳، ۸، ۲۵]. چندین محقق [۲۶، ۲۷، ۲۸] نشان دادند که میزان تراکم به ویژگی های خاک، وزن، فشار و ارتعاشات ماشین آلات کشاورزی بستگی دارد. ماشین‌های مختلف یا حتی ماشین‌های مشابه با لاستیک‌های مختلف، در بارگذاری و فشار روی خاک متفاوت هستند [۲۵، ۲۶]. نواز و همکاران [۱۳] گزارش داد که تراکم خاک توسط یک ماشین به مقاومت خاک بستگی دارد که تحت تأثیر مواد آلی، محتوای آب، ساختار خاک، و بافت، و خواص ماشین بیان شده توسط بار محور، تعداد لاستیک، ابعاد تایر، سرعت تایر است. و برهمکنش خاک و تایر. بوتا و همکاران [۲۹] گزارش کردند که اندازه تایر و نسبت عمق شیار به عرض تایر تأثیر قابل توجهی بر تراکم خاک دارد. محققان تاکید کردند که کشاورز باید به بار محور، اندازه لاستیک و میزان آب خاک در لحظه ترافیک توجه کند. همچنین اندازه، باد و شکل تایر علاوه بر بار لاستیک، تأثیرات قابل توجهی بر فشار زمین دارد که نشان‌دهنده تراکم خاک ناشی از ترافیک است [۳۰، ۳۱]. هاکانسون و ریدر [۳۲] دریافتند که و سایل نقلیه با بار محوری بالا معمولاً هنگام حمل و نقل در خاک‌هایی با محتوای رطوبت بالا باعث تراکم عمیق زیر خاک می شوند و این تراکم عمیق زیر خاک باعث کاهش مداوم و احتمالاً دائمی در عملکرد محصول می‌شود. رطوبت خاک و بار محوری باعث تراکم خاک در اعماق مختلف می شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ مشاهده می شود که بار محوری زیاد می تواند

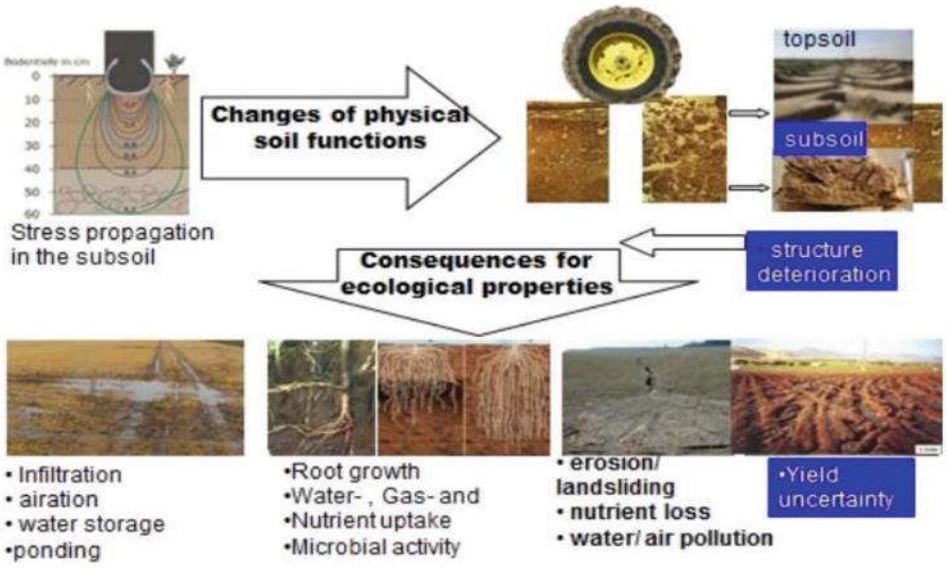
منجر به تراکم خاک به عمق بیشتر شود. همچنین، در یک بار و اندازه تایر معین، افزایش رطوبت خاک باعث تراکم بسیار عمیق تر از خشک می شود [۳۳]. داسیلوا و همکاران [۳۴] بیان کرد که فشارهای تماسی زیاد اعمال شده به خاک، که به عنوان نسبت جرم محور هر ماشین و سطح تماس مسیر توصیف می‌شود، علاوه بر ایجاد اثرات منفی دیگر، منجر به درجه بیشتری از تراکم می شود. محققان تاکید کردند که می‌توان اثرات فشردگی خاک را از طریق فشار تماس مناسب ماشین‌های کشاورزی به حداقل رساند. آنها پیشنهاد کردند که استفاده از فناوری‌های جدید و شیوه‌های مدیریتی مناسب برای مشخص کردن اندازه ماشین و حل مشکلات ماشین-خاک، به‌ویژه در مورد توزیع فشارهای ناشی از چرخ‌ها در خاک، توسعه و اتخاذ شود تا از اثرات منفی فشرده‌سازی جلوگیری شود. به طور مشابه، پورترفیلد و کارپنتر [۳۵] بیان کردند که تماس لاستیک با فشار بالا با زمین باعث افزایش چگالی خاک می شود. بنابراین، محققان توصیه کردند که فشار تماس را پایین نگه دارید تا از فشردگی جلوگیری شود. شدت قاچاق که به تعداد عبور ماشین‌آلات کشاورزی روی خاک در طول عمر محصول نیز گفته می‌شود، علاوه بر فشار تماس با زمین چرخ و بار مطلق چرخ، تأثیر بسزایی بر میزان تراکم و عمق دارد. که فشار چرخ بر روی خاک تأثیر می گذارد [۳۶]. ژانگ و همکاران [۳۷] بیان کرد که افزایش دفعات عبور مرتبط با تراکتورهای چهار چرخ کوچک، که جرم کمتر و فشار زمین کمتر از تراکتور با قدرت متوسط است، به طور بالقوه مضرتر از موارد مرتبط با تراکتور با قدرت متوسط است. روسانوف [۳۸] که مقادیر استاندارد رسمی حداکثر تنش نرمال مجاز را در عمق ۰٫۵ متر گزارش کرد، مشاهده کرد که شدت ترافیک بیشتر منجر به تنش خاک بیشتر از تنش مجاز در زیر خاک می شود. به طور مشابه، بوتا و همکاران. [۳۹] مشاهده کردند که فرکانس بالای ترافیک (۱۰ و ۱۲ عبور تراکتور در مسیرهای مشابه) یک تراکتور سبک در خاک معمولی Argiudol باعث افزایش قابل توجهی در شاخص مخروط و چگالی ظاهری خشک در سطوح سطحی و زیر خاک شد. با این حال، حمزه و اندرسون [۱۸] گزارش کردند که اولین عبور چرخ باعث بخش عمده ای از کل فشردگی خاک می شود و تراکم خاک زیرین ممکن است توسط ترافیک مکرر با بار محوری کم ایجاد شود و اثرات می تواند برای مدت بسیار طولانی باقی بماند. زمان. به طور خلاصه می توان گفت که عبور مکرر ماشین آلات کشاورزی در همان مکان ها باعث افزایش فشردگی خاک می شود. همچنین شاه و همکاران. [۱۲] تاکید کرد که در کشاورزی فشرده، بار محوری زیاد تراکتورهای سنگین و ماشین‌های صحرایی منجر به متراکم شدن لایه خاک، آسیب به ساختار خاک و زیر خاک و کاهش بهره‌وری محصول و خاک می‌شود.

کلر و همکاران [۴۰] که تأثیر افزایش وزن و سایل نقلیه کشاورزی را بر تنش خاک و وزن مخصوص ظاهری خاک تجزیه و تحلیل کرد، نشان داد که افزایش وزن ماشین آلات منجر به افزایش سطح تراکم زیر خاک شده است و تأکید کرد که عملیات کشاورزی آتی باید محدودیت مکانیکی ذاتی خاک در نظر گرفته شود.

اثرات تراکم خاک بر ویژگی‌های خاک و رشد گیاه

فشردگی خاک بسیاری از جنبه‌های خاک مانند مقاومت، تهویه، انتقال آب و گرما را که بر تعادل شیمیایی و بیولوژیکی نیز تأثیر می گذارد، تغییر می‌دهد. به نوبه خود، تمام این تغییرات در خاک بر ر شد ری شه و اندام هوایی و در نتیجه تولید محصـــول و کیفیت محیطی جدول تأثیر می گذارد. در شـــکل زیر خلاصـــه ای از مطالعات مربوط به اثرات تراکم خاک بر خاک، محیط و رشـــد گیاه را ارائه می دهد. هرچند در بســـیاری از مطالعات، تراکم خاک زیرین بر شرایط فیزیکی خاک تأثیر منفی اشت و به طور قابل‌توجهی عملکرد محصول را کاهش داد. اما برخی از مطالعات نشان داد که تراکم متوسط تأثیری بر عملکرد محصول نداشته یا می‌تواند عملکرد را افزایش دهد. تراکم متوسط خاک باعث افزایش تماس بذر/ریشه با خاک شده و ظهور به موقع بذر، رشد ریشه و توانایی گیاه در جذب رطوبت و جذب مواد مغذی از خاک را بهبود می بخشد.

تراکم خاک ناشی از تردد وسایل نقلیه سنگین و ماشین آلات منجر به خراب شدن ساختمان خاک، هم در لایه سطحی و هم در زیر خاک می شود. به دلیل بارگذاری دینامیکی، ویژگی های فیزیکی خاک مانند توزیع اندازه حفره ها و تداوم حفره ها تحت تأثیر منفی قرار میگیرند که منجر به کاهش نفوذپذیری هوا و آب و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می شود. محققان تاکید کردند که این تغییرات در ساختار خاک ممکن است بر زیست خاک، تعادل فیزیکی- شیمیایی و پتانسیل اکسیدا سیون و احیا، ظرفیت فیلتر و بافری خاک، تغذیه آب زیرزمینی و در نهایت بر عملکرد محصول تأثیر منفی داشته باشد.



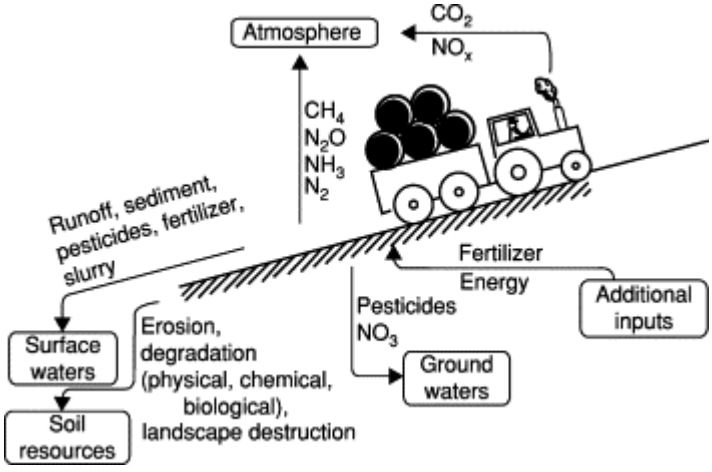
اثر عمده فشـــردگی خاک بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌عنوان افزایش جرم ظاهری خاک و کاهش تخلخل کل شـناخته می‌شـود، زیرا خاکدانه‌های خاک به هم نزدیک‌تر می‌شـوند و در نتیجه جرم بیشـتری در واحد حجم و فضـای کمتری برای هوا و آب در خاک ایجاد می‌شـود. تغییرات در سـیسـتم منافذ خاک به دلیل فشردگی می‌تواند بر ویژگی‌های هیدرولیکی و هوادهی خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع و حرکت هوا در خاک تأثیر منفی بگذارد. در خاک های متراکم، ذرات به قدری به هم فشرده می شوند که فضای هوا و آب به شدت کاهش می یابد. کمبود فضای منافذ منجر به کمبود اکسیژن می شود که برای رشد گیاه، تجزیه

مواد آلی، بازیافت مواد مغذی و تهویه خاک بسیار مهم است. علاوه بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک، مقاومت در برابر نفوذ به طور قابل توجهی بر رشد ریشه گیاه و عملکرد محصول تأثیر می گذارد. کارهای قبلی نشان داد که رشد ریشه گیاه زمانیکه که مقاومت به نفوذ خاک فراتر از ۲ و ۳ مگاپاسکال است به طور کامل متوقف یا کند میشود. همچنین تغییر خواص فیزیکی خاک به دلیل فشردگی خاک می تواند تحرک عناصر، چرخه نیتروژن و کربن و تنوع زیستی خاک را تغییر دهد [۱۳].

اثرات تراکم خاک بر رشد گیاه پیچیده است و به عوامل زیادی بستگی دارد. عمدتاً مشخص شده است که مقاومت بالای نفوذ خاک و غلظت کم اکسیژن در خاک فشرده می‌تواند عملکرد محصول را به دلیل کاهش نرخ رشد ریشه و در نتیجه دسترسی محدود به آب و عناصر غذایی کاهش دهد. همچنین گیاهان در خاک‌های متراکم به دلیل کاهش نفوذ آب و افزایش رواناب می توانند دچار تنش آبی شوند فشردگی خاک یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد مشاهده شده برای محصولات عمده در بسیاری از کشورهای اروپایی است.

تاثیر تراکم بر محیط زیست

تراکم خاک بر تعدادی از پارامترهای محیطی حتی در فاصله قابل توجهی از محل اصلی که در آن تراکم رخ داده است، تأثیر می گذارد (شکل ۱۰). تراکم ممکن است شار گازهای گلخانه ای از خاک به اتمسفر را از طریق مکانیسم های مرتبط با تأثیر بر نفوذپذیری خاک، هوادهی و رشد محصول تغییر دهد. تراکم انتشار CO_2 را افزایش می دهد زیرا کشت خاک های متراکم به انرژی بیشتری نسبت به کشت خاک های متراکم نشده نیاز دارد. تقریباً ۹۰ در صد از انتشار جهانی N_2O به جو از خاک ناشی می شود. خاک های متراکم نسبت به خاک های غیر متراکم مرطوب تر هستند و نیترات زدایی افزایش می یابد. با کاهش تخلخل پر از هوا، شار N_2O به سرعت افزایش می یابد (شکل ۱۱). فشردگی ناشی از ترافیک وسایل نقلیه قبل از استقرار محصولات غلات می تواند باعث افزایش قابل توجهی در شار N_2O در طول دوره رشد اولیه در بهار شود (جدول ۲).



به دلیل کاهش نفوذپذیری، خاک های متراکم معمولا رواناب بیشتری را نشان می دهند و در نتیجه فرسایش بیشتری نسبت به خاک های غیر متراکم نشان می دهند. شیارهای سطحی و حتی خندق‌ها گاهی مستقیماً با ردپای چرخ‌ها مرتبط هستند، به‌ویژه پس از دوره‌های بارندگی بسیار فرسایشی. از طرفی، طی فرایند فرسایش، ذرات خاک به همراه آلودگی ها، کود و آفت کش ها به آبهای سطحی منتقل میشوند.

مدل‌سازی و معادلات ریاضی تراکم

فرآیند ساخت یک مدل تراکم خاک را می توان به چهار مرحله کلی تقسیم کرد: (۱) مدل سازی نیروهای مکانیکی اعمال شده روی سطح از و سایل نقلیه مزرعه. (۲) شنا سایی ف شارهایی که باعث تراکم می شوند. (۳) تعریف روابط تنش–کرنش یک خاک معین (۴) مدل سازی انتشار نیروها در خاک و تأثیر این نیروها بر تراکم خاک. بخش‌های بعدی جزئیات هر یک از مراحل بالا در ساخت مدل‌های تراکم خاک را برر سی می‌کنند و ن شان می‌دهند که چگونه برخی از این مدل‌ها با مدل‌های رشد محصول مرتبط هستند.

مدل سازی فشار وارد بر سطح

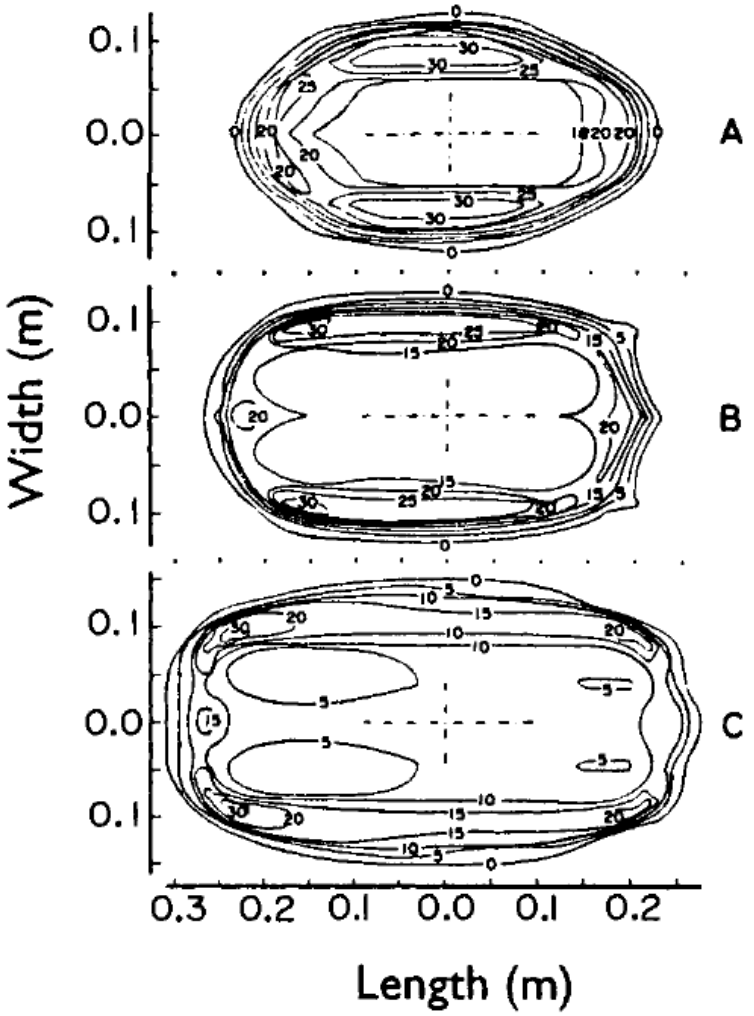
مطالعات زیادی برای ایجاد روابط بین بار و سیله نقلیه مزرعه و تنش در سطح خاک انجام شده ا ست. به دلیل هند سه پیچیده لاستیک ها در وسایل نقلیه مزرعه، ایجاد رابطه ای که برای طیف وسیعی از خاک و انواع لاستیک ها و شرایط کارکرد و سیله نقلیه، مانند سرعت خودرو، لغزش چرخ و غیره اعمال شود، د شوار ا ست. کولن و کویپرز (۱۹۸۳)) یک روش ساده برای تخمین فشار تماس متوسط (pm)از فشار باد لاستیک pj پیشنهاد کرده است:

$$p_m = k\, p_{iz}$$

که در آن k = ضریب مربوط تعداد لایه‌های لا ستیک ا ست که از ۱,۱ برای لا ستیک های ۴ یا ۶ لایه تا ۱,۲۵ برای لا ستیک های ۱۶ لایه متغیر ا ست. معادله فوق ف شار ایجاد شده بر روی یک سطح سفت و سخت تحت شرایط بار استاتیک را اندازه گیری میکند، وتغییرات در خاک و شرایط بار دینامیکی که معمولاً در مزرعه با آن مواجه هستیم را در نظر نمی گیرد. یکی از دلایل رویکردهای ساده، پیچیدگی اندازه گیری سطح تماس بین خاک و تایر است. به طور کلی، سطح تماس یک تایر در شرایط بار استاتیک با فشار دادن لاستیک آجدار روی کاغذ روی یک سطح سفت اندازه گیری می شود. روش دیگری که معمولاً در شرایط بار استاتیک استفاده می شود، پر کردن ردپای آجها در خاک با گچ و سپس تعیین م ساحت آن ا ست. برای تخمین سطح تماس زیر لا ستیک متحرک، رایج ترین روش ضرب طول تماس تایر در عرض بخش تایر است. پس از تعیین سطح تماس، فشار متوسط تماس را می توان با تقسیم بار بر سطح تماس تخمین زد. Söhne (۱۹۵۸) تخمین زد که حداکثر فشار تماس برای یک تایر تراکتور بدون گیره بالا ۱,۴–۲,۰ برابر فشار متو سط اندازه گیری شده با تکنیک فوق ا ست. بر ا ساس اندازه گیری های تنش با مبدل های قرار داده شده بر روی لاستیک ها و در خاک، اشتاینر و سونه (۱۹۷۹) رابطه زیر را برای تخمین فشار تماس متوسط روی سطح خاک، Pavg ایجاد کردند:

$$P_{avg} = 2.677 + 0.575\ IPR + 0.011\ DL - 0.016\ d$$

که در آن IPR = فشار باد لاستیک (bar)؛ DL = بار دینامیکی (kN)؛ d = قطر خارجی تایر (سانتی متر) است.



شکل: نقشه خطوط توزیع فشار تماس با زمین (kPa) در زیر یک تایر صاف ۱۱–۳۸ روی ماسه سفت. (الف) تا ۹۷ کیلو پاسکال باد شده است. (ب) تا ۶۹ کیلو پاسکال باد شده است. (C) تا ۴۱ کیلو پاسکال باد شده است. جهت حرکت تایر از راست به چپ بود (از Vanden Berg and Gill, 1962).

مدل سازی انتشار افقی و عمودی تنش در خاک

اکثر مدل هایی که انتشار و توزیع تنش ها را توصیف می کنند، بر اساس نظریه کشسانی تنش–کرنش هستند (گوپتا و همکاران، ۱۹۸۹). این تئوری بیان می‌کند که در حالت تعادل، جابجایی درون ج سم به دلیل بار اعمال شده م ستقیماً با بار متناسب است. مدل‌های موجود تراکم خاک برای انتشار و توزیع تنش‌ها را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد: (الف) مدل‌های المان محدود. (ب) مدل های تحلیلی.

مدل های المان محدود

اساس مدل تراکم خاک المان محدود، تقسیم پیوسته خاک به مجموعه ای از تعداد محدودی اجزا است که در نقاط گره‌ای به هم متصل شده اند (شکل ۴). جابجایی در هر نقطه گره به دلیل تنش اعمال شده خارجی با ا ستفاده از یک

تابع جابجایی محاسبه میشود که شرایط تراکم پذیری را در همه زمان ها برآورده می کند. در اکثر مدل‌های تراکم خاک با اجزای محدود، رابطه تنش–کرنش شبیه به یک ماده خطی–الاستیک در نظر گرفته می‌شود:

$$\{\sigma\} = [C] \{e\}$$

که $\{\sigma\}$ = بردار تنش. $\{e\}$ = بردار کرنش; $[C]$ = ماتریس سازنده که به خواص مواد وابسته یعنی مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (υ) بستگی دارد. این پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$E = \sigma/e$$

$$\upsilon = - (\text{lateral strain} / \text{axial strain})$$

که σ = تنش و e = کرنش در مواد الا ستیک خطی در یک بعد ا ست. معادلات تعادل برای جابجایی انرژی پتانسیل و گره های نا شناخته برای هر جز ایجاد می شود. سپس ماتریسی حاوی مجموعه‌ای از معادلات از تمام اجزا پیو ستار به طور همزمان برای جابجایی ها در همه گره ها حل می شود.

از آنجایی که خاک های کشاورزی به عنوان مواد پلا ستیکی غیر خطی رفتار می کنند، فرض مقدار واحد از E (شیب تنش–کرنش) در محدوده تنش اعمالی معتبر نیست. در این روش در طول شبیه سازی، تنظیمات مدول یانگ در هر افزایش بار یا در هر تکرار برای بار کل اعمال شده به طور مداوم مورد نیاز است. چندین روش برای ترکیب مدول یانگ در مدل‌های تراکم خاک با عناصر محدود در مقالات پیشنهاد شده‌است. پرومپرال و همکاران (۱۹۷۱) نسبت پواسون را ثابت فرض کرد و مدول یانگ را از رابطه تنش نرمال $\{\sigma\}$ و تنش برشی در کرنش های برشی مختلف برآورد کرد. برخی محققان از مدل هذلولی زیر برای تخمین مدول یانگ استفاده کردند:

$$E_t = [1-\{R_f(1-\sin\phi)(\sigma_1-\sigma_3)\}/\{2\,c\cos\phi + 2(\sigma_3+p_a)\sin\phi\}]^2\, K\, p_a[(\sigma_3+p_a)/p_a]^n$$

که R_f = نسبت شکست. c و φ = پارامترهای معادله مور–کولومب ؛ K = عدد مدول. η = توانی که نرخ تغییرات E اولیه را با $\sigma 3$ تعیین می کند. p = فشار اتمسفر است.

دانکن و چانگ (۱۹۷۰) همچنین دریافتند که نسبت پوا سون که از آزمون های سه محوری تعیین می شود، با افزایش تنش انحرافی از ۰,۱۱ به ۰,۴۹ افزایش یافته است. بنابراین، این نویسندگان همچنین بر نیاز به تغییر تدریجی در نسبت پواسون در طول شبیه‌سازی با مدل اجزای محدود تأکید کردند. در مدل آنها، نسبت پواسون از رابطه به دست آمد:

$$\upsilon = (\Delta e_1 - \Delta e_v)/2\,\Delta e_1$$

که در آن $\Delta e1$ = کرنش محوری افزایشی. Δev = کرنش حجمی افزایشی.

راپر و ارباخ (a۱۹۹۰) به این نتیجه ر سیدند که پیش‌بینی تنش خاک به نسبت پوا سون و تقریباً م ستقل از مدول یانگ ولبسته ا ست. در شبیه سازی با مقدار بالا و ثابت نسبت پوا سون، خاک سست اولیه نیروی زیادی را به سمت جانبی

منتقل می کند و مقاومت بیش از حد و مصنوعی ایجاد می کند و در نتیجه تراکم خاک را محدود می کند. آنها تغییر هر دو پارامتر در طول شبیه سازی را پیشنهاد کردند.

مدل های تحلیلی

اکثر مدل های تحلیلی انتشار و توزیع تنش ها در خاک بر اساس حل تحلیلی توزیع تنش در محیطی همگن، الاستیک، هم سانگرد، نیمه نامتناهی تحت بار نقطه ای روی سطح زمین ا ست. این راه حل در ابتدا تو سط بو سینسک (۱۸۸۵) پیشنهاد شد و بعداً توسط فرولیچ (۱۹۳۴) اصلاح شد تا به دلیل افزایش مدول یانگ با عمق خاک ناشی از فشار روباره با شد. Söhne (۱۹۵۳) اولین کسی بود که از معادلات Boussinesq ا صلاح شده برای پیش بینی توزیع تنش در خاک از یک وسیله نقلیه کشاورزی استفاده کرد. معادلات اصلاح شده بوسینسک که تنش های مختلف بر روی یک خاک را توصیف می کند (شکل ۶) در نتیجه بار نقطه ای، P، در سطح خاک به شرح زیر است (Söhne, 1953):

1. Vertical normal stress, σ_z:

$$\sigma_z = (\nu P/2\pi r^2)\cos^{\nu}\beta = (\nu P/2\pi z^2)\cos^{\nu+2}\beta$$

2. Horizontal normal stress, σ_h:

$$\sigma_h = (\nu P/2\pi r^2)\cos^{\nu-2}\beta\,(\sin^2\beta) = (\nu P/2\pi z^2)\cos\beta\sin^2\beta$$

3. Shear stress (τ) belonging to σ_z and σ_h:

$$\tau = (\nu P/2\pi r^2)\cos^{\nu-1}\beta\,(\sin\beta) = (\nu P/2\pi z^2)\cos^{\nu+1}\beta\sin^2\beta$$

که r = فاصله شعاعی از بار نقطه. z = فاصله عمودی از بار نقطه; β = زاویه نقطه مورد نظر نسبت به خط عمودی. P = بار نقطه ای; ν = ضریب تمرکز Fröhlich. ضریب تمرکز به خصوصیات خاکها بستگی دارد.

مدل سازی رابطه بین تنش –کرنش

همانطور که فشردگی خاک، با دانسیته ظاهری (یا یکی از مقادیر مشتق شده از آن، مانند تخلخل کل، نسبت پوکی و غیره) بیان می شود، دانسیته ظاهری به عنوان معیار اساسی در مطالعات تراکم در نظر گرفته می شود. با این حال، مشخص شده که پاسخ‌های محصول فقط به طور غیرمستقیم با مقادیر دانسیته ظاهری مرتبط است. و سایر ویژگی‌ها، مانند ساختار و توزیع اندازه منافذ، نفوذپذیری، ویژگی‌های تهویه و مقاومت خاک که به شدت تحت تأثیر تراکم هستند، تأثیر بیشتری بر رشد محصول دارند. برای ارزیابی خطر تراکم خاک ناشی از وسایل نقلیه لازم است خصوصیات فیزیکی وسایل نقلیه صحرایی، شدت ترافیک و قابلیت تراکم خاک به صورت ساده و کمی بیان شوند. رابطه ای که باید مورد مطالعه، ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گیرد، ممکن است به شکل مفهومی زیر بیان شود:

$$F = f(W,T,S)$$

که در آن F = خطر وقوع تراکم در مزرعه. W = قابلیت تراکم چرخ یا ماشین. T = شدت ترافیک. S = تراکم پذیری خاک در زمان تردد.

اساساً دو رویکرد وجود دارد که در حال حاضر در مدل سازی تراکم خاک استفاده می شود. اولین رویکرد توسط Söhne (۱۹۵۳) پیشنهاد شد، که فرض کرد تنش اصلی بر یک مشخصه حجمی خاک برای پیش‌بینی کرنش خاک در زیر لاستیک تراکتور کافی است. بر اساس این مفهوم، گوپتا و لارسون (۱۹۸۲) از رابطه اندازه‌گیری شده تنش نرمال با دانسیته ظاهری خاک در یک آزمون فشاری تک محوری برای تخمین خطوط هم‌دانسیته از خطوط هم‌تنش استفاده کردند که با استفاده از معادلات بوسینسک (۱۸۸۵) قابل پیش‌بینی است. این نگرانی وجود دارد که آیا یک آزمایش فشاری تک محوری (که تغییر در کرنش خطی ناشی از تنش معمولی را فراهم می کند) در توصیف تغییرات در دانسیته ظاهری خاک (کرنش حجمی) به دلیل بارهای اعمال شده روی سطح از وسایل نقلیه مزرعه کافی است یا خیر. به عبارت دیگر، داده‌های آزمایش سه محوری که تغییر در کرنش حجمی به دلیل تنش‌های اصلی حداکثر $\sigma 1$ و حداقل $\sigma 3$ را نشان می‌دهد، ممکن است برای توصیف تغییرات دانسیته ظاهری خاک به دلیل تنش اعمالی سطحی مورد نیاز باشد.

کولن و کوپیرز (۱۹۸۳) با استفاده از اصول مکانیک خاک و داده های آزمون سه محوری گزارش شده در مقالات مربوط به خاک های کشاورزی، نشان دادند که دانسیته ظاهری عمدتاً بر اساس $\sigma 1$ تغییر میکند و کمتر تحت تاثیر $\sigma 3$ قرار دارد. این نشان می دهد که رابطه تنش نرمال و دانسیته ظاهری بدست آمده از آزمایش تک محوری ممکن است برای تخمین خطوط دانسیته از خطوط هم تنش کافی باشد. دکستر و تانر (۱۹۷۳) رابطه زیر را برای توصیف تغییر در دانسیته خاک، D، در طول فشرده‌سازی هیدرواستاتیک در یک دستگاه سه محوری پیشنهاد کردند:

$$D = D_0 + B \exp(-K \sigma_a) - C \exp(-L \sigma_a)$$

که در آن D0 = حداکثر دانسیته محدودکننده در پایان آزمایش تک محوری، (C+ Do + B) = دانسیته اولیه; σa= فشار اعمال شده نرمال. K و L معیارهایی هستند که نشان می دهد با افزایش σa با چه سرعتی حداکثر دانسیته به دست می آید.

برای در نظر گرفتن اثرات رطوبت خاک و بار اعمالی امیر و همکاران (۱۹۷۶) معادله زیر را پیشنهاد کردند.

$$N = A_n - B_n \ln(\sigma_r - \sigma_a) - C_n \ln \theta$$

که N = تخلخل خاک. σr= فشار باقیمانده؛ σa = فشار اعمال شده نرمال؛ θ = محتوای حجمی آب؛ A", B", C" = ثابت های معادله هستند.

روش‌های کنترل تراکم خاک

راهبردهای زیادی برای جلوگیری از فشردگی خاک در مزارع کشاورزی و بهبود خاک متراکم شده یا کاهش تنش های مرتبط با آن استفاده شده است. استراتژی‌ها را می‌توان تقریباً به سه گروه تقسیم کرد: اقدام برای جلوگیری از تراکم بیشتر، اقدام برای اصلاح و ترمیم تراکم و اقدام برای افزایش مقاومت خاک [۳۳، ۶۸].

بهترین راه برای مدیریت تراکم خاک، جلوگیری از وقوع آن ا ست. این شامل کاهش بار محوری، باد و اندازه مناسب تایرها، به حداقل رساندن خاک‌ورزی خاک، افزایش پایداری ساختمان خاک و انجام عملیات مزرعه‌ای در رطوبت مناسب خاک است [۶]. ظرفیت خاک برای مقاومت در برابر تنش (یعنی استحکام در برابر فشار) و بارگذاری ماشین به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر فشردگی خاک توسط ماشین‌های کشاورزی در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. مقاومت خاک در برابر فشار تحت تأثیر مواد آلی، محتوای آب، ساختار خاک و بافت است. بنابراین، بهبود پایداری ساختاری خاک و خاکدانه ها می تواند خطر فشردگی خاک را کاهش دهد [۱۳]. پایداری ساختمان خاک و خاکدانه ها را می توان با افزایش میزان مواد آلی خاک و کاهش تنش به خاک ناشی از تردد ماشین آلات بهبود بخشید. این را می توان با استفاده از سیستم های خاکورزی حفاظتی [۱۱] به دست آورد. چندین محقق گزارش کردند که استفاده طولانی‌مدت از سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی خطر تراکم خاک را کمتر کرده ا ست، زیرا باعث افزایش محتوای مواد آلی سطحی، ساختار خاک پایدارتر و افزایش هدایت هیدرولیکی به دلیل سوراخ‌های کرم و کانال‌های زیستی می‌شود [۶۳، ۶۹]. بارگذاری ماشین بر روی خاک با بار محور، تعداد لاستیک، ابعاد تایر، سرعت تایر و اندرکنش خاک تایر توصیف می‌شود [۱۳]. بار محور و فشار تماس تایرها مهمترین پارامترهای موثر بر تراکم خاک شناخته شده‌اند. بار چرخ زیاد ممکن است منجر به تراکم خاک در هر دو لایه زیرین و عمیق شود، در حالی که بارهای محوری کم باعث تراکم در خاک سطحی و تنها قسمت بالایی خاک زیرین می شود. برای کاهش بار محور، ما شین با ا ستفاده از مواد جدید سبک تر ساخته می‌شود یا از چندین محور برای پخش بار ا ستفاده می‌شود. همچنین، افزایش سطح تماس چرخ با سطح زمین میتواند فشار را کاهش دهد. زیرا بار چرخ به تنهایی هیچ اطلاعاتی در مورد سطح تنش منتقل شده به خاک و توزیع تنش مربوطه در خاک نمی دهد. سطح تماس چرخ و خاک و ابعاد ا صلی چرخ مانند عرض و طول بر فشار تماس با خاک چرخ تأثیر بسزایی دارد [۱۱]. توزیع تنش در ناحیه تماس بین تایر و خاک از اهمیت اولیه برای انتشار تنش در خاک برخوردار است.

با توجه به نتیجه بررسی ما، می توان گفت که بار چرخ و فشار تماس با خاک، ابزار مهندسی اصلی برای کنترل تراکم خاک زیرین است و برای جلوگیری از تراکم دائمی خاک، ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده در شرایط بحرانی مزرعه نباید باعث تنش بالاتر از ظرفیت باربری (مقاومت) خاک شود. خطر تراکم ممکن است با استفاده از تنش پیش تراکم به عنوان شاخص ظرفیت باربری یک خاک به صورت کمی برآورد شود.

مدیریت فشردگی خاک ممکن است از طریق استفاده مناسب از برخی یا همه تکنیک های زیر حاصل شود: (۱) کاهش فشـار روی خاک یا کاهش بار محور یا افزایش سـطح تماس چرخ ها، (۲) هدایت عملیات مزرعه ای در رطوبت بهینه خاک، (۳) کاهش تعداد و شـدت عبور ماشـین آلات کشـاورزی ، (۴) مهار ترافیک به مناطق خاصـی از مزرعه یا ترافیک کنترل شـده، (۵) بهبود مواد آلی خاک از طریق حفظ محصـول و بقایای مرتع، (۶) از بین بردن فشردگی خاک با شکاف عمیق در حضور یک عامل خاکدانه‌ساز، (۷) گنجاندن گیاهان با ریشه های عمیق و قوی در تناوب زراعی.

بر این اساس، راهکارهای زیر را برای پیشگیری و کاهش فشردگی خاک و اثرات مخرب آن پیشنهاد میشود:

حفظ مقدار کافی مواد آلی مانند نگهداری کلش، کود سـبز و قهوه‌ای یا افزودن مواد آلی گیاهی یا حیوانی از منابع خارجی در خاک، سـاختار خاک را تثبیت می‌کند و آن را در برابر تراکم مقاوم‌تر می‌کند، زیرا به عنوان بافری عمل می‌کند که مانع یا کاهش انتقال آن به خاک زیرین می‌شود. [۱۸].

ترافیک کنترل شـــده، که تمام بارهای ماشـــین آلات را به کمترین منطقه ممکن از خطوط ترافیک دائمی محدود می کند، تو سط بـ سیاری از محققان [۷۳] برای کاهش آ سیب به خاک نا شی از عبور ما شین آلات کـشاورزی سنگین یا مکرر روی زمین تو صیه شده ا ست. با کنترل ترافیک، منطقه ردیابی شده تراکم کمی عمیق تر خواهد دا شت اما خاک بین مـسیرها متراکم نمی شود. گفته شده ا ست که سیـستم های ترافیک کنترل شده دارای مزایای ا ساسی در حفظ شرایط ساختاری خاک "خوب" بسترهای کشت غیرقابل تراکم هستند.

استراتژی دیگر برای مدیریت تراکم، کاهش مناسب فشار تماس تایرها و بارهای محور است. بنابراین، ماشین آلات و تجهیزات مورد ا ستفاده در مزرعه در شرایط بحرانی باید با کنترل بار چرخ ها و تنظیم فـشار باد تایر ها استفاده شوند [۱۱]. روش های دیگر برای کاهش تراکم عبارتند از استفاده از چرخ های دوگانه، مسیرهای لاستیکی و تایرهای شناور.

تکنیک‌های کـشاورزی حفاظتی را می‌توان برای کاهش ترافیک روی خاک انجام داد. یک سیـستم خاکورزی حفاظتی می تواند نیاز به تردد وســایل نقلیه در مزرعه را کاهش دهد زیرا نیازهای کمتری برای عملیات خاکورزی یا کشت وجود دارد [۷۴].

زیر شکن کردن / ا سکنه را می توان برای از بین بردن فـشردگی خاک، از بین بردن کفه های سخت و بهبود خاک های سخت ایجاد شده به دلیل ترافیک ا ستفاده کرد. شکاف عمیق خاک فشرده ممکن ا ست سلامت خاک و توانایی گیاهان را برای مقاومت در برابر بیماری بهبود بخشد [۷۵].

ترکیب مح صولات زراعی و گیاهان مرتعی با ری شه های قوی که قادر به نفوذ و شکـستن خاک های متراکم شده در تناوب هستند، برای به حداقل رساندن خطرات تراکم زیرزمینی مطلوب است [۵۶].

عملیات مزرعه ای نباید در شـرایط خاک مرطوب انجام شـود. خاک در شـرایط مرطوب تراکم پذیرتر اسـت. ترافیک در شرایط رطوبت بالا ممکن است خاک را متراکم کند، در حالی که همین ترافیک در شرایط خشک نمی تواند [۱۸].

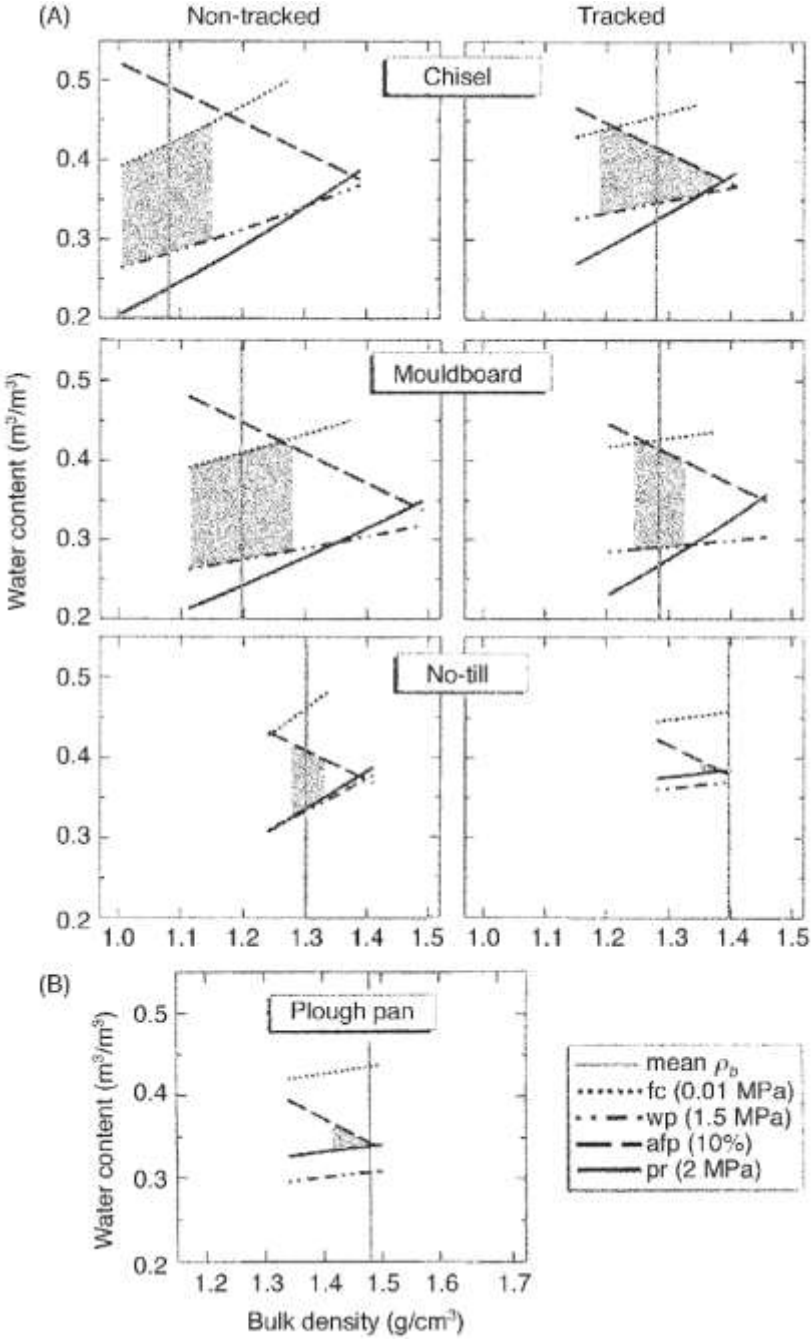
شاخص‌های ارزیابی اثر تراکم بر رشد گیاه و تولید محصول

تراکم خاک تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصول دارد. اساساً تراکم به معنی کاهش حجم خاک است، یعنی در واقع کاهش حجم منافذ. تداوم منافذ نیز ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. این امر باعث کاهش توانایی خاک در هدایت آب و هوا می شود. همچنین ممکن است جریان ترجیحی را در منافذ درشت ایجاد کند، که انتقال مواد مغذی و آفت کش های جذب شده به کلوئیدها را به افق های عمیق تر تسهیل می کند. تهویه ضعیف خاک ممکن است باعث رشد غیر مطلوب گیاه شود و باعث از بین رفتن نیتروژن خاک و تولید گازهای گلخانه ای از طریق نیتروژن زدایی در مکانهای بی هوازی شود. افزایش جرم مخصوص ظاهری ناشی از تراکم باعث افزایش قدرت مکانیکی ماتریس خاک می شود. همه اینها ممکن است رشد ریشه و بهره برداری محصول از آب خاک و مواد مغذی را محدود کند.

مطالعات نشان داده است که شاخص LLWR و IWC برای ارزیابی وضعیت فیزیکی خاک به طور ویژه در رابطه با تراکم خاک شاخص‌هایی مناسب و مفید هستند. زیرا با استفاده از این مفاهیم عوامل فیزیکی اصلی مؤثر بر رشد گیاه شامل پتانسیل آب، وضعیت تهویه، مقاومت مکانیکی و هدایت هیدرولیکی خاک در قالب یک پارامتر خلاصه شده و می‌توان از آن به عنوان شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک استفاده کرد. خاک‌های با ویژگی‌های فیزیکی نامناسب دارای LLWR و IWC کمتر و خاک‌هایی با ویژگی‌های مناسب دارای LLWR و IWC بیشتر و درنتیجه توان تولید بیشتر هستند.

مفهوم LLWR بر این واقعیت استوار است که پاسخ گیاه به محتویات مختلف آب خاک در داخل یک دامنه‌ای حداقل و در خارج از آن حداکثر است. این دامنه که حداقل محدودیت برای رشد گیاه را ایجاد میکند، به پتانسیل آب ، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک بستگی دارد. این شاخص دارای چهار پارامتر است: θfc، θwp، θafp و θpr، که به ترتیب نشان دهنده رطوبت ظرفیت مزرعه (fc) ، رطوبت نقطه پژمردگی (wp)، رطوبت معادل 10٪ تخلخل تهویه ای(afp) و رطوبت معادل مقاومت ۲ MPa (pr). شکل الف زیر نشان می دهد که چگونه تراکم باعث کاهش LLWR خاکهای سطحی لومی خاک رس مختلف می شود.

شکل ۱۰,۱ مفهوم محدوده رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) برای (A) خاک سطحی و (B) کفه شخم یک خاک رسی را نشان میدهد.. رشد محصول در محتویات آب زیر و بالاتر از محدوده های مشخص شده توسط مناطق سایه دار محدود می شود.



گنجایش آب انتگرالی (IWC)

گنجایش آب انتگرالی در واقع نسخه اصلاح شده LLWR است. از جمله معایب شاخص LLWR این است که برای محدودیت‌های تهویه، مقاومت مکانیکی و پتانسیل آب یک آستانه ثابت و ناگهانی در نظر می‌گیرد، در صورتی که اثر این عوامل تدریجی است. گنجایش آب انتگرالی این عیب را برطرف کرده و اثرات عوامل فوق الذکر را تدریجی لحاظ می‌کند. علاوه بر این، محدودیت هدایت هیدرولیکی را نیز در بردارد. در این روش، مقدار کل آب قابل استفاده گیاه طبق معادله زیر از حاصلضرب توابع وزنی مربوط به هر محدودیت در مقدار آب خاک به دست می‌آید (Groenevelt et al., 2001):

معادله ۴

$$IWC = \int_{0}^{\infty} \left(\prod_{i=1}^{n} \omega_i(h) \right) C(h).dh$$

که در آن $C(h)$ گنجایش ویژه رطوبتی (cm^{-1})، ωi توابع وزنی (بین صفر و یک) برای انواع محدودیت‌ها و h مکش ماتریک (cm) ا ست. گنجایش ویژه رطوبتی از م شتق‌گیری معادله منحنی رطوبتی خاک به د ست می‌آید که در مرحله قبل نحوه اندازه‌گیری آن شرح داده شد.

نوع محدودیت	تابع وزنی	
تهویه	$\omega_a(h) = \frac{\log(h) - \log(h_0)}{\log(h_f) - \log(h_0)}$	معادله ۵
هدایت هیدرولیکی زیاد	$\omega_{kwet}(h) = \left[\frac{K_r(330)}{K_r(h)}\right]^p$	معادله ۶
هدایت هیدرولیکی کم	$\omega_{kdry}(h) = \left[\frac{12000}{h}\right]^{-d}$	معادله ۷
مقاومت مکانیکی خاک	$\omega_r(h) = 2.5 - (ah^b)$	معادله ۸

که در روابط فوق، $h0$ و hf به ترتیب مکش ماتریک در تخلخل تهویه ای ۱۰ و ۱۵ در صد، $Kr(h)$ و $Kr\ (330)$ به ترتیب هدایت هیدرولیکی نسبی و هدایت هیدرولیکی در مکش ماتریک ۳۳۰ سانتیمتر است. علائم p، d، a و b ضرایب مدلها هستند.