فروسایی خاک: چالش جهانی

جلد اول

تراکم، سخت شوندگی، شرایط ماندابی

فواد تاجیک

کارشناس ارشد خاکشناسی، عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی،

کرج، بلوار شهید فهمیده، روبروی بانک کشاورزی، صندوق پستی ۸٤٥-۳۱۵۸۵

تلفن: ۲۷۰۵۲٤۲ و ۲۷۰۵۳۲۰ و ۲۷۰۸۳۵۹ فاکس: ۲۷۰٦۲۷۷

نشر با ذکر منبع، آزاد است.

به نام خداوند جان آفرین

آنچه در دست دارید، قرار بود کتابی شود در باره فروسایی یا تخریب خاک و در زمره انتشارات مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی منتشر گردد. بد عهدی ها مانع این کار و دانشگاه صنعتی اصفهان مقصد بعدی این نوشتار شد که آن هم بی سرانجام ماند. پس از گذشت سالها، راهی بهتر از نشر آن در دنیای وب نیافتم که بی شباهت به تیر در تاریکی نیست. امیدوارم حاصل چند سال کوشش من مخاطب خود را بیابد و هدف اولیه که نشر دانش بود، حاصل آید.

ذکر نام نویسنده ای تنها در عنوان، به آن معنا نیست که از یاری دیگران محروم بوده ام. ویرایش متن، ابتدا با دقت تحسین برانگیز استاد گرامی آقای دکتر حمید سیادت صورت گرفت و سپس آقای دکتر محمد علی حاج عباسی بر غنای آن افزودند و از کژی هایش کاستند. اگر نام این بزرگواران بر تارک این متن نیامد از آن جهت است که هرگونه مسئولیت و عواقب نشر الکترونیکی بر عهده نویسنده بماند و از شائبه سوء استفاده از نام آنان بر حذر باشم. در نهایت، آنچه می بینید همچنان نیازمند به روز رسانی، تکمیل و تنقیح است که به یاری حق توسط نویسنده یا خوانندگان علاقمند و صاحبنظر انجام خواهد شد.

پراکنده ساختن این کتاب به هر شکل ممکن آزاد است، به امید آنکه باقیات صالحاتی برای نویسنده به شمار آید.

فؤاد تاجیک

فصل دوم – تراکم خاک در کشاورزی

۲-۱- مقدمه

۲-۱-۱- پیشینه

انسان به طور طبیعی آموخته است که در نواحی اقلیمی معینی زندگی کند که بهترین شرایط را برای کشاورزی دارا باشد. در کانادا، ٦٠ درصد از بهترین اراضی کشاورزی در محدوده ۸۰ کیلومتری شهرهای بزرگ قرار گرفته است (دومانسکی، ۱۹۸۰). توسعه شهرها و صنایع بر تقاضا از کل منابع ارضی می افزاید به طوری که اراضی کشاورزی به طور مستقیم با تغییر کاربری و به طور غیر مستقیم به عنوان محل تخلیه ضایعات خطرناک صنایع از این روند آسیب می بیند (کوت، ۱۹۸۰). وضعیت در حال تغییر فعالیت های بشر، نیروی کار مزرعه ای را به سوی شهرنشینی سوق داده است. کاهش زمین و نیروی کار، توام با تقاضای فزاینده برای غذا و قیمت بالاتر نهاده ها، علم و فن آوری را به تلاش برای افزایش بهره وری اراضی زراعی موجود و بهبود کارآیی تولید کشاورزی واداشته است.

از یک سو، با انجام عملیات بهسازی مانند زهکشی زیرزمینی، آبیاری، کنترل آفات و علف‌ها و پرورش گونه های مقاوم گیاهان، مقدار محصول افزایش یافته و از سوی دیگر، افزایش مکانیزاسیون و گرایش به کاربرد وسیع تر و موثرتر ماشین های کشاورزی به متراکم شدن تدریجی خاک‌ها و در نتیجه کاهش حاصلخیزی در برخی مناطق منجر شده است. همچنین، در اثر استفاده مفرط از کودهای غیرآلی و شخم زیاد از حد و عملیاتی که منجر به کاهش مواد آلی خاک می گردد، حساسیت خاک ها به تراکم افزایش یافته است (رقاوان و همکاران، ۱۹۹۰).

۲-۱-۲- اثرات اقتصادی

برآورد اثر اقتصادی تراکم خاک به دلیل عوامل متعدد دخیل در آن، دشوار است. در منطقه کبک، تا حد ۵۰ درصد از کاهش محصول ذرت به تراکم خاک‌های رسی نسبت داده می شود (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۸). نتایج به دست آمده از آزمایش‌های متعدد بر روی غلات و دانه‌های روغنی در سوئد، ۲۵ درصد کاهش محصول (اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤) و۳۵ درصد افزایش هزینه مصرف سوخت برای شخم خاک‌های متراکم (وورهیس،۱۹۸۰) را نشان داده است. در مزارع کشت و صنعت خوزستان سالهای استفاده بعد از هر بار قلمکاری (راتن) به نیم و بعضا یک چهارم رسیده که علت عمده آنرا متراکم شدن خاک می دانند. لیندزتروم وهمکاران (۱۹۸۱) افزایش رواناب و شدت فرسایش را به تراکم خاک سطحی نسبت داده اند. چانسلور (۱۹۷٦) به افزایش هزینه های اجرایی آبیاری به علت نفوذپذیری اندک و احتمالاً تبخیر شدیدتر در خاک های متراکم اشاره کرده است. کاهش کارایی مصرف کود، هزینه های اصلاح ساختمان خاک در آینده و برخی عوامل دیگر نیز در منابع علمی مورد توجه قرار گرفته اند.

تنها در ایالات متحده آمریکا، خسارات ناشی از کاهش محصول در مزرعه بالغ بر ۱/۸ میلیارد دلار برآورد می شود (۱۹۷۱) که بر مبنای فرض ده درصد کاهش محصول در زمین هایی که یخ زدن زمستانه به عمق خاک هم می رسد، محاسبه گردیده؛ اگر چه در مناطق شمالی مقدار کاهش محصول کمتر از حد واقعی برآورد شده است. مطالعات مختلفی این نظریه قدیمی را که دوره های طبیعی یخ زدن – ذوب شدن وخشک و تر شدن را برای کاهش تراکم خاک ناشی از تردد ماشین‌ها درفاصله دو فصل کاشت کافی می‌داند، رد می‌کنند (وورهیس و همکاران، ۱۹۸۵). به ویژه ابقا و تداوم تراکم خاک زیر سطحی توسط نویسندگان مختلف گزارش شده است (بلیک و همکاران، ۱۹۷٦؛ گامدا و همکاران، ۱۹۷۸؛ هاکانسون، ۱۹۸۲). در کانادا، اثرات فروسایی خاک در مزرعه به طور کلی در محدوده ٦۹۸ تا ۹۱۵ میلیون دلار تخمین زده شد (گیرت، ۱۹۸٦). مهویس (۱۹۸٤) ۸۵ درصد از اثر اقتصادی فروسایی خاک در منطقه کبک را به تراکم نسبت داده است. وی میانگین کاهش محصول مرتبط با تراکم را در حدود ۱۵ درصد از محصول بالقوه برآورد کرده است که معادل ۱۰۰ میلیون دلار کاهش درآمد در کل منطقه می باشد. جدول ٦ برآورد وسعت و شدت تراکم خاک در جهان را نشان می دهد.

جدول ٦- وسعت و شدت تراکم خاک (میلیون هکتار) در جهان (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱).

	خفیف	متوسط	شدید	خیلی شدید	کل	درصد از کل اراضی
آسیا	٤/٦	۵/۰	۰/۲	–	۹/۸	۰/۲۳
آفریقا	۱/٤	۸/۰	۸/۸	–	۱۸/۲	۰/٦۱
آمریکای جنوبی	۲/۹	۰/۸	۰/۳	–	٤/۰	۰/۲۳
آمریکای مرکزی	–	۰/۱	–	–	۰/۱	۰/۰۳
آمریکای شمالی	۰/۵	۰/٤	–	–	۰/۹	۰/۰۵
اروپا	۲٤/۸	۷/۸	۰/٤	–	۳۳/۰	۳/٤۷
استرالیا	۰/۷	–	۱/٦	–	۲/۳	۰/۲٦
کل جهان	۳٤/۸	۲۲/۱	۱۱/۳	–	٦۸/۲	۰/۵۲

۲-۱-۳- اهداف

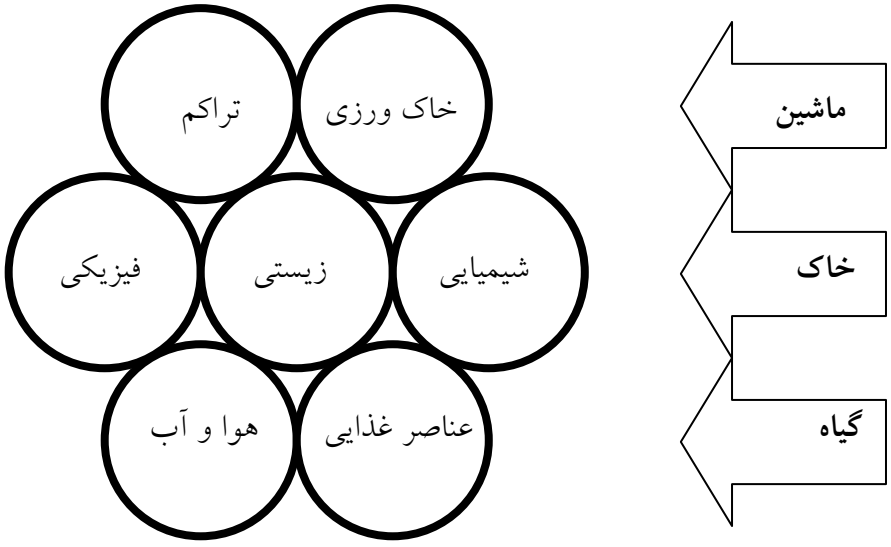
افزایش تعداد مقالات مربوط به تراکم از نیمه دوم قرن بیستم تاکنون با روشن تر شدن اثرات اقتصادی آن که با کاهش محصول توام بوده است، قابل توجیه می باشد. در حال حاضر، تراکم خاک از برخی جهات به خوبی شناخته شده است به طوری که می توان چارچوبی برای مدیریت شرایط فیزیکی خاک ها در سطح مزرعه ارائه نمود. اما هدف این فصل ارائه یک طرح مفهومی از روابط ماشین – خاک – گیاه بر اساس آخرین تحقیقات انجام شده و همچنین، ارائه برخی دیدگاه های کاربردی برای مدیریت خاک در ارتباط با تراکم می باشد. برخی جنبه های تحقیقات خاک ورزی ناچار با تفصیل بیشتری بیان خواهد شد.

۲-۲- سیستم ماشین – خاک – گیاه

۲-۲-۱- تبیین مفاهیم

در کشاورزی مکانیزه مدرن، اهمیت تغییر شرایط خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی کمتر از واکنش گیاه به تغییرات ایجاد شده در محیط ریشه نیست. نمایی از طبقه بندی مفاهیم مربوطه در شکل ۱ آمده است. ترتیب عناصر اصلی سیستم (ماشین، خاک و گیاه) نمایانگر یک مفهوم کنش – واکنش – خروجی می باشد. عنصر اول به دو بخش تراکم و ماشین های خاک ورزی و عنصر دوم به ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی تقسیم می گردد. سومین عنصر نمایانگر نیازهای گیاهان به آب، هوا و عناصر غذایی است. خط های پیوند دهنده به مفهوم اثرات متقابل میان عناصر فرعی می باشد. اغلب منابع علمی موجود در مورد تراکم خاک به چنین تاثیرات متقابلی به ویژه از جنبه های فیزیکی توجه نموده اند.

پیچیدگی موضوع در همین جا پایان نمی‌یابد و تقسیم‌بندی جزئی‌ترین عناصر فوق‌الذکر در سلسله‌های جدیدی از روابط متقابل ادامه می یابد. اثرات وابسته به زمان شامل آب و هوا و کاهش طبیعی تراکم (مانند اثر فعالیت ریشه در ساختمان خاک)، توالی دست خوردگی خاک، رشد گیاهان و محدودیت های زمانی و اقتصادی تولید نیز وابستگی های متقابلی را ایجاد می کنند. در این رابطه تعدادی از سیستم های کشت و خاک ورزی مانند تک کشتی، تناوب کشت، کشت مخلوط، کشت بدون شخم و شخم حداقل نیز شایان توجه است. منابع علمی در مورد روابط ماشین – خاک – گیاه پراکنده و سرشار از مسایل نظری و عملی حل نشده هستند، اما امکان توسعه و ارائه راهبردهایی برای کشاورزی پایدار در آینده نزدیک وجود دارد.



شکل ۱- نمایش مفهومی سیستم ماشین – خاک – گیاه با عناصر فرعی و روابط متقابل آنها.

در این فصل، به منظور مطرح کردن دورنمایی از اجزاء، فرایند تراکم به طور خلاصه تشریح شده و سپس واکنش گیاه به شرایط فیزیکی خاک و عکس العمل فیزیکی به تردد ماشین های کشاورزی مورد بحث قرار گرفته است. روابط اخیر به طور کلی به عنوان شاخص های تغییرات محیط خاک به کار رفته اند. واکنش گیاه به عنوان برایند تغییرات شرایط خاک و فرایندهایی مانند اثر تغییرات محیط خاک بر تراز آب، زیست بوم میکروارگانیسم ها، آزاد شدن عناصر غذایی و غیره در نظر گرفته شده است. تغییرات ساختمان فیزیکی خاک معیاری از اثرات توام دستکاریهای مکانیکی مکرر و نیروهای طبیعی وارد بر خاک در طی یک دوره زمانی معین می باشد.

۲-۲-۲- فرایند تراکم خاک

تراکم خاک را می توان به عنوان فشردگی توده ای از خاک در حجمی کوچکتر تعریف نمود. تغییر در ویژگیهای حجمی با تغییرات ویژگی های ساختمانی، هدایت گرمایی و آبی و انتقال گازها همراه است. این تغییرات به نوبه خود بر تعادل های زیستی و شیمیایی تاثیر می گذارند. به عبارتی، محیط خاک بسته به مقدار تراکم چنان تغییر می کند که کل فرایندهای موجود در خاک را کم و بیش تحت تاثیر قرار می دهد.

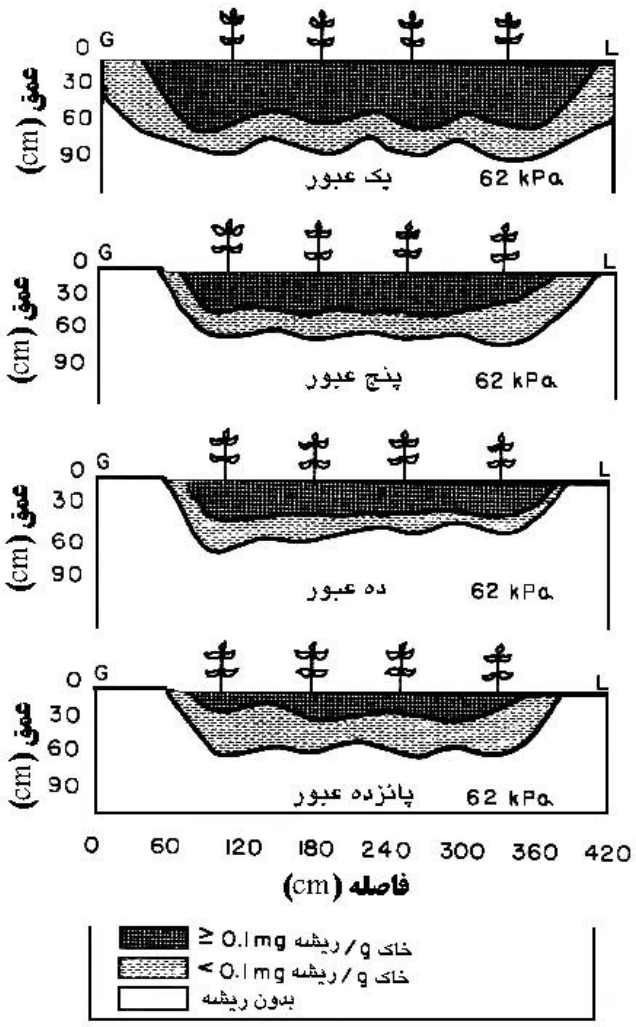
درجه تراکم خاک معمولاً با جرم مخصوص ظاهری در حالت خشک، تخلخل یا مقاومت به فروروی بیان می شود؛ اما تعیین ویژگی های تراکم جنبه های متناقض دارد. پارامترهایی را که تراکم ناشی از عبور چرخ ها را به خوبی توضیح می دهند نمی توان مستقیماً برای ارزیابی عکس العمل های گیاه به کار برد و نیز نمی‌توان تغییرات ناشی از فرایندهای اصلاح کننده تراکم (مانند خاک ورزی و کاهش طبیعی تراکم) را به خوبی بر حسب پارامترهای مربوط به تراکم تعبیر نمود. سون (۱۹۸۵) و سون و بون (۱۹۸٦) پیشنهاد کرده اند که شاخص های ساختمانی جدیدی ابداع شود که مبین رابطه قوی تری میان اثرات متقابل تردد – خاک و خاک – گیاه باشد. در این جهت کوشش هایی توسط بون (۱۹۸٦) صورت گرفته و به صورت نظریه جرم مخصوص بحرانی خاک در رابطه با حد بهینه برای فرایندهای گوناگون مربوط به گیاه ارائه شده است. محور این نظریه، شناخت عوامل محدود کننده برای گیاهان، خاک‌ها و شرایط اقلیمی معین و اثبات روابط میان تراکم پذیری خاک و عوامل محدود کننده اصلی مربوط به خاک می باشد. در برخی شرایط، عامل محدود کننده ممکن است رطوبت و در شرایط دیگر، تهویه یا مقدار عناصر غذایی باشد.

صرف نظر از تعریف کمّی، تخریب ساختمان خاک را می توان به طور عینی در انواع شدید تراکم مشاهده نمود. چنانچه کانالی در یک خاک متراکم احداث شود، سطح دیواره ها (برخلاف خاک های غیر متراکم) صاف است و خلل و فرج آن چندان مشهود نیست. خاک‌های بسیار متراکم، تهویه ضعیف و هدایت هیدرولیکی اندک دارند. اثر تراکم شدید خاک بر رشد گیاهان به صورت تفاوت آشکار رشد در ابتدا و انتهای فصل و در قطعات خاک متراکم و غیر متراکم دیده می شود. در عین حال، نتایج آزمایش های بلند مدت واکنش گیاهان به تراکم (اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤؛ رقاوان و مک کیز،۱۹۸۳) نشان داده اند که جز در شرایط تراکم شدید، تراکم لزوماً برای رشد گیاه زیان آور نمی باشد.

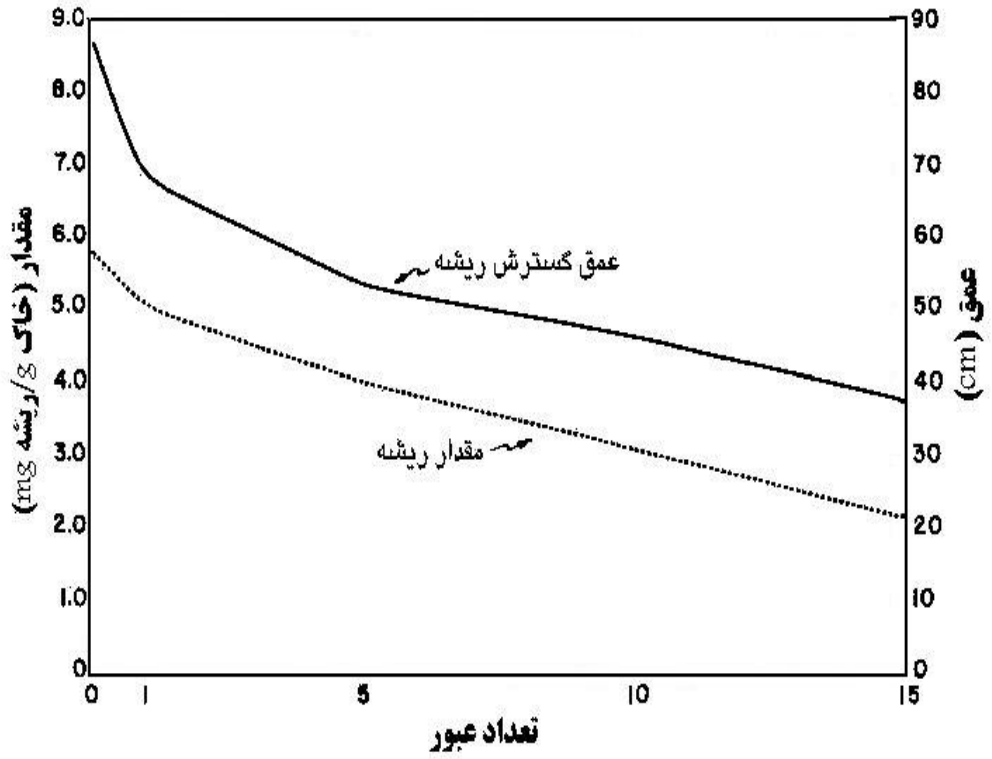
۲-۲-۳- واکنش گیاهان به تراکم

در تولید زراعی باید توجه شود که فرایندهای مربوط به خاک و اتمسفر وابستگی متقابل دارند. مقدار جذب از سیستم ریشه در هر زمان با «پتانسیل فتوسنتز» مرتبط است که آن هم متاثر از مقدار نور و CO_2 قابل دسترس و توانایی گیاه برای جذب آنها توسط بخش های هوایی می باشد. پتانسیل فتوسنتزی که در هر زمان بدست می آید به توانایی سیستم ریشه برای جذب آب، عناصر غذایی و اکسیژن از خاک و تخلیه CO_2 تنفسی بستگی دارد. حداکثر رشد وقتی حاصل می شود که سیستم ریشه بتواند جوابگوی نیازهای پتانسیل فتوسنتزی در شرایطی باشد که خاک لااقل مقدار کافی از عناصر غذایی و آب را داشته و از مکانیسم کارایی برای تبادل گازی برخوردار باشد. حداکثر عملکرد وقتی بدست می آید که شرایط بهینه در سراسر دوره رشد فراهم گردد؛ مانند هنگامی که یک ارتباط مادی منسجم میان رشد گیاه، اقلیم و شرایط نیمرخ خاک مشابه آنچه که در محیط کنترل شده مصنوعی تامین می شود، برقرار باشد.

توازن فوق الذکر ممکن است در خاک های متراکم بر هم بخورد. وجود موانع مکانیکی شدیدتر در خاک ها یا لایه های متراکم، باعث محدود شدن عمق گسترش ریشه (شکل ۲) و مقدار کلی ریشه به ازای واحد وزن خاک (شکل ۳) می گردد.

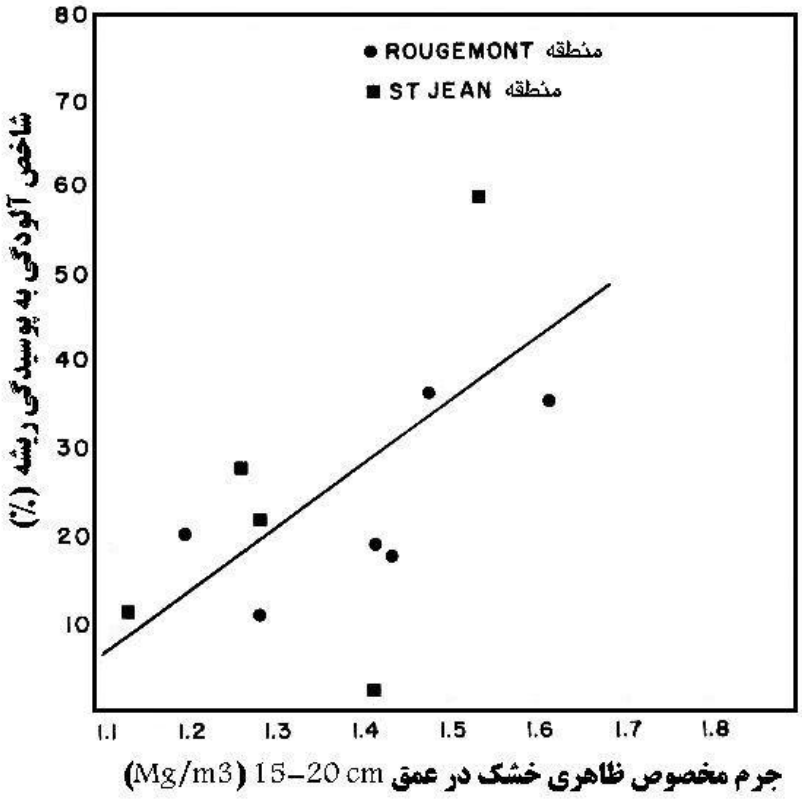


شکل ۲- توزیع مقدار ریشه به ازای واحد وزن خاک در یک خاک رسی که در معرض ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ عبور چرخ در فشار تماس kPa ٦٢ قرار گرفته است [رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹].



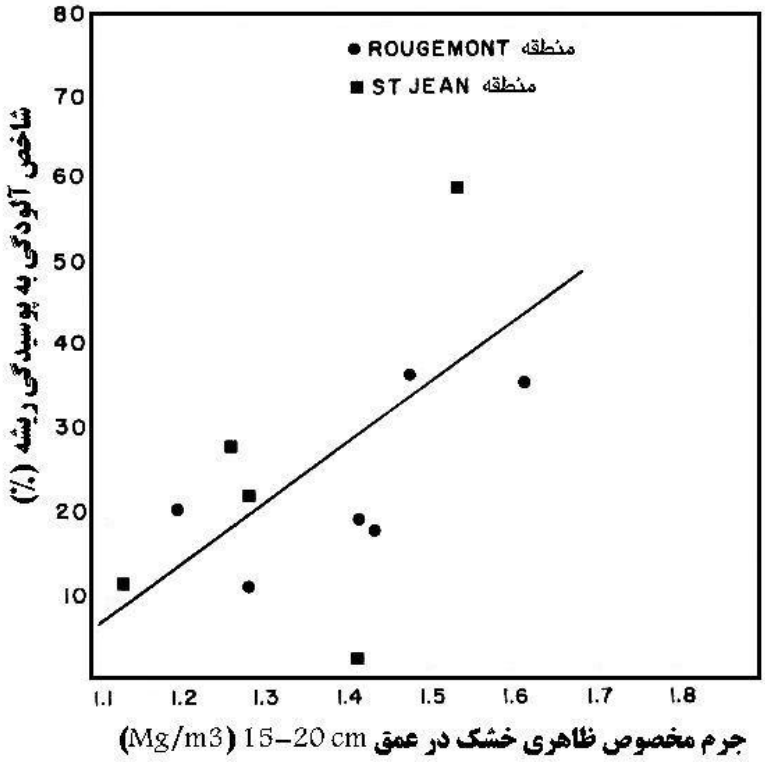
شکل ۳- نمودار عمق گسترش ریشه و مقدار ریشه به ازای واحد وزن خاک ذرت در برابر تعداد عبور چرخ بر یک خاک رسی [رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹].

آشکارترین اثر محدودیت گسترش ریشه بر گیاه، کاهش دسترسی به آب و عناصر غذایی است. کاهش نفوذ آب به خاک عمقی نیز می تواند در حین دوره های خشک، شرایط را بحرانی کند. همچنین، اظهار شده است که محدودیت در فراوانی ریشه می تواند منجر به کاهش توانایی سیستم ریشه در غالب شدن بر اثرات زیان بار عوامل بیماری‌زا در خاک سطحی گردد (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹). طی مطالعه مزارع نخود در جنوب غربی کبک، ویجیه و رقاوان (۱۹۸۰) رابطه ای میان جرم مخصوص ظاهری خاک خشک و شاخص ابتلا به بیماری پوسیدگی ریشه به دست آورده اند (شکل ٤).



شکل ٤- نمودار شاخص آلودگی به پوسیدگی ریشه (Root rot) در مقابل جرم مخصوص ظاهری خشک (DBD) در مزارع نخود دو منطقه از کبک که به طور تصادفی انتخاب شده اند. عمق نمونه برداری ۲۰cm-۱۵ بوده است [ویجیه و رقاوان، ۱۹۸۰].

یک مدل رگرسیون که بر مبنای نتایج آزمایش های مزرعه ای به دست آمده (رقاوان و همکاران، ۱۹۸۲) نشان داده است که در سطوح معین بیماری پوسیدگی ریشه، مقدار محصول متناسب با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش می یابد (شکل ۵).

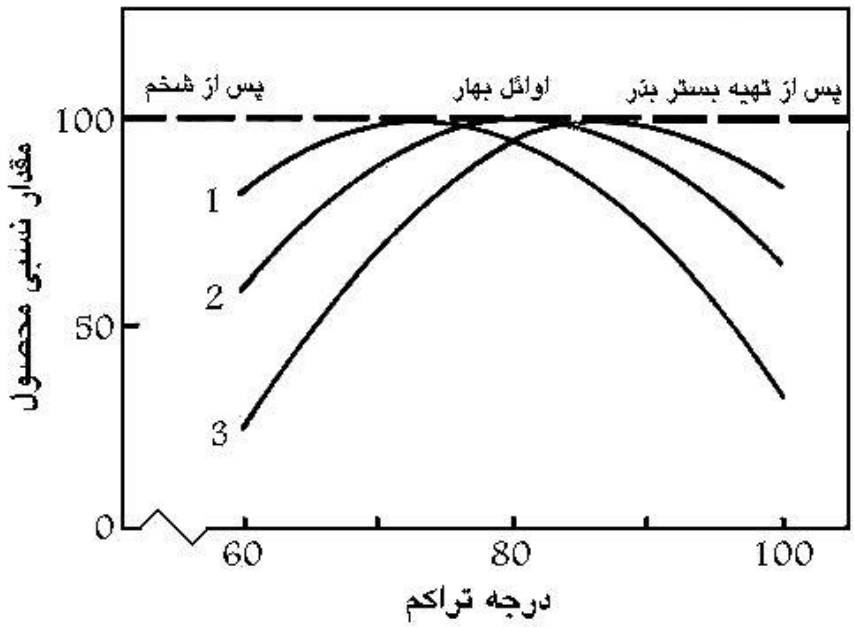


شکل ۵- برآورد مقدار محصول خشک نخود در مقابل DBD برای سطوح مختلف آلودگی و بر مبنای مدل به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه ای [رقاوان و همکاران، ۱۹۸۲].

تغییرات رژیم تهویه ای – رطوبتی ناشی از تراکم خاک بر فعالیت های میکروبی مانند موازنه نیتروژن، تاثیر می گذارد به گونه ای که با افزایش تراکم، نیترات به آمونیوم تبدیل می شود (شپتوخوف و همکاران، ۱۹۸۲؛ ورونین، ۱۹۸۲) که تاثیر نامطلوبی بر مقدار محصول بر جای می گذارد. داده های حاصل از مطالعه گیاه چغندرقند که در قطعات آزمایشی با تراکم متفاوت کشت شده و به مدت ٦ سال به صورت آیش باقی مانده است، نشانگر کاهش محصول به علت اثر دیرپای[1] تراکم پس ماند[2] برموازنه نیتروژن در خاک بوده است (محمد، ۱۹۸۷).

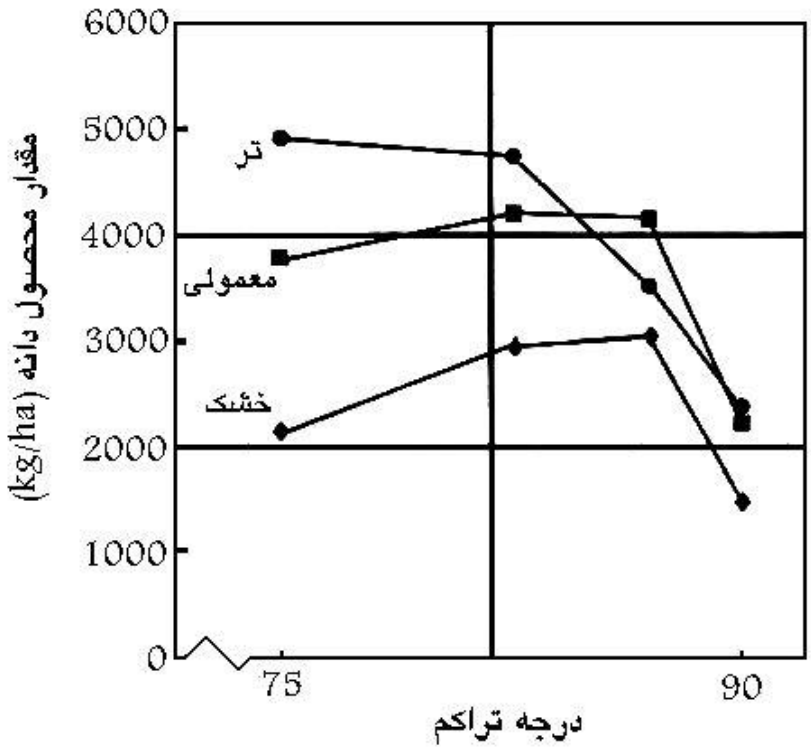
مطالعات مربوط به تراکم منجر به شناسایی اهمیت روابط کلی میان تراکم خاک با مقدار محصول گردیده است. شکل ٦ نشانگر رابطه میان مقدار محصول –تراکم خاک – آب و هوا می باشد.

1- Persistent
2- Residual



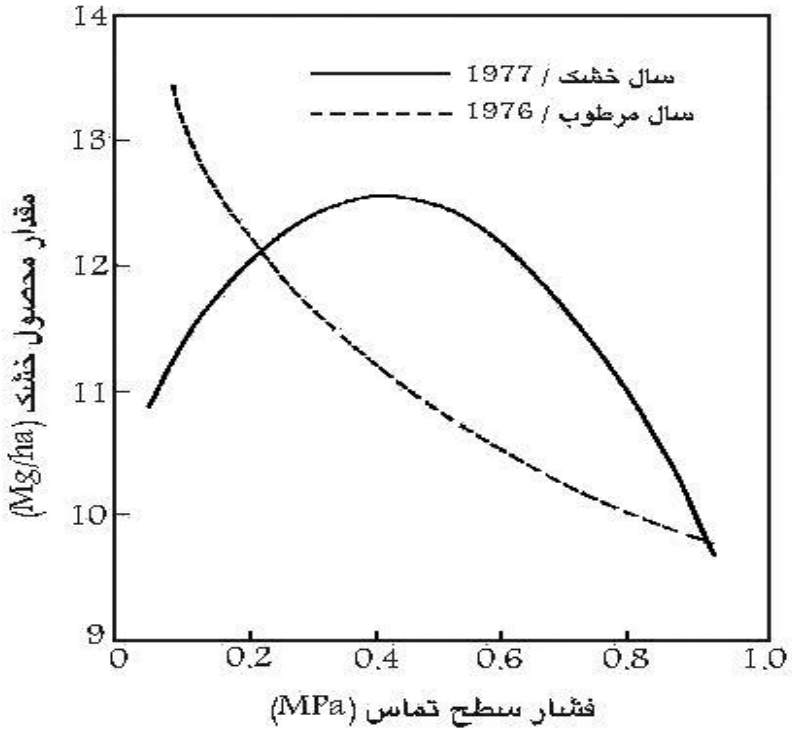
شکل ٦- نمایش روابط تراکم – محصول – آب و هوا. منحنی‌های ۱ ، ۲ و ۳ به ترتیب، نشان دهنده سالهای مرطوب، معمولی وخشک می باشند [اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤].

نکته قابل توجه در این نمودار، آن است که درجه تراکمی که (به عنوان نسبتی از سطح تـراکم اسـتاندارد) حـداکثر محصول در آن بدست می آید به رژیم آب و هوایی بستگی دارد. داده های بدست آمده از آزمایش های شبیه سازی شرایط تراکم – آب و هوا روی جو (اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤) موید این مطلب است (شکل ۷).



شکل ۷- نتایج به دست آمده توسط ادلینگ و فرجدال از آزمون های شبیه سازی اثر تراکم – آب و هوا بر مقدار محصول دانه جو[اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤].

رقاوان و همکاران (۱۹۷۹) نیز نتایج مشابهی را در یک مطالعه مزرعه ای دو ساله روی ذرت بـه دسـت آورده انـد (شکل ۸). نکته قابل توجه آن است که در سال های خشک، مقدار محصول در خاک کمی متراکم، بیـشتر از خـاک سـست بوده است. رقاوان و مک کی (۱۹۸۳) چنین وضعیتی را به تفاوت رطوبت قابل جـذب نـسبت داده انـد زیـرا قطعـات غیـر متراکم به علت تلفات تبخیر، حاوی رطوبت بسیار کم بوده اند؛ در حالیکه قطعات بسیار متراکم، آب را به سختی در خلل و فرج کوچک خود نگهداری کرده اند. موازنه آب در سطوح متوسط تراکم، مطلوب تر بوده است.



شکل ۸- مقدار محصول ذرت در مقابل مقدار تجمعی فشار سطح تماس در سال های مرطوب و خشک [رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹].

مطلب فوق مثالی از این واقعیت است که تراکم به تنهایی اثرات مشاهده شده را بدون توجه به عوامل موثر دیگر توجیه نمی کند. جذب آب توسط ریشه، بیش از تخلخل کل متاثر از توزیع اندازه خلل و فرج و پیوستگی آنهاست. تغییر در توزیع اندازه خلل و فرج در اثر تراکم، عمدتاً در خلل و فرج درشتی روی می دهد که تهویه ومقدار آب قابل جذب وابسته به آنهاست. علاوه بر این، رابطه میان آب قابل جذب و درجه تراکم تابع مقدار نفوذ آب باران می باشد.

اگر چه منحنی های تراکم بهینه، لزوماً طبیعتی آماری دارند و برای هر محصول، نوع خاک و بافت خاک متفاوت می باشند (بون، ۱۹۸٦) اما با استفاده از آنها نگرش اجمالی از روابط خاک – گیاه و به طور غیر مستقیم اثر اقلیم به دست می آید. نقطه حداکثر در منحنی های تراکم بهینه نشانگر حساسیت محصول به تراکم است و بستگی به گونه مورد نظر دارد. گونه های با ریشه عمیق، حساسیت کمتری به تراکم دارند زیرا با شرایط نفوذ در لایه معمولاً متراکم زیر سطحی سازگار می باشند. ویژگی های دیگری مانند مقاومت به خشکی یا مقاومت به شرایط بسیار مرطوب، ممکن است شاخصی از حساسیت کمتر به تراکم محسوب گردند.

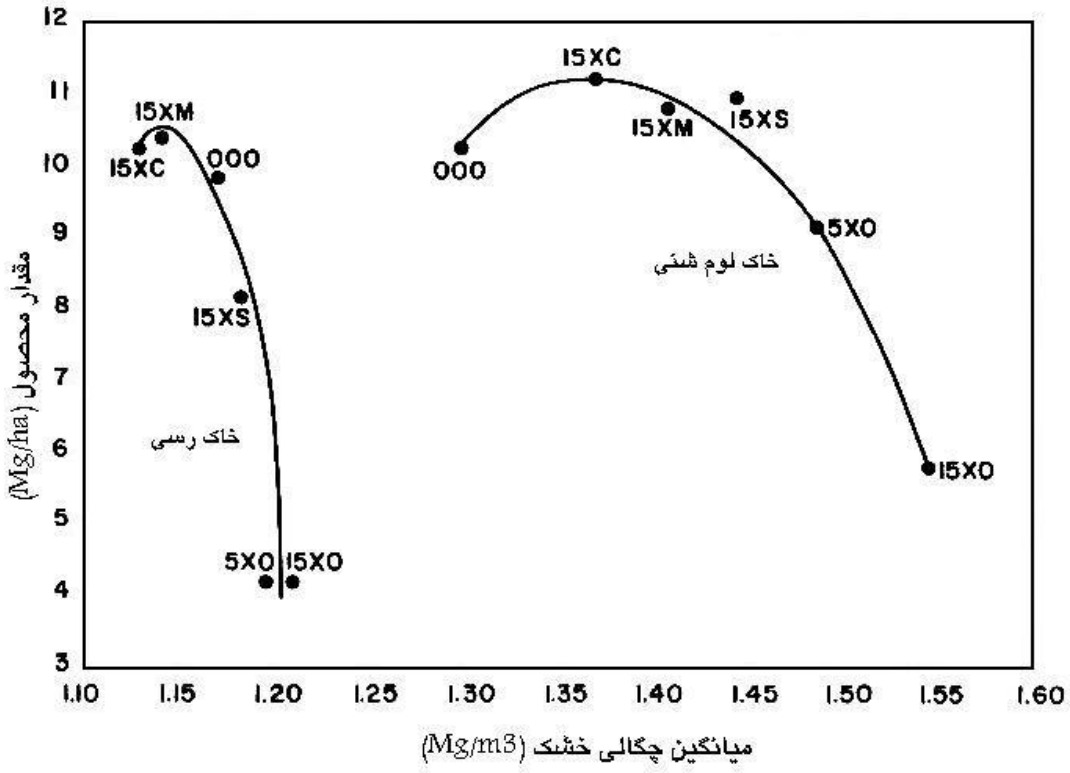
۲-۲-٤- واکنش گیاه به خاک ورزی

خاک‌ورزی به دلایل متعددی مانند آماده کردن بستر بذر، مخلوط کردن بقایای گیاهی و کودهای حیوانی با خاک، کنترل علف های هرز و یا کنترل فرسایش بادی انجام می شود. مروری بر اهداف کلی خاک ورزی توسط لارسون و ازبرن

(۱۹۸۲) ارائه شده است. با توجه به هدف این فصل، خاک ورزی در اغلب موارد به عنوان بخش لازم تولید زراعی و به ویژه به عنوان عملیاتی که منجر به سست کردن لایه های متراکم خاک می گردد، در نظر گرفته شده است. اثرات خاک ورزی بر تولید محصول به خاک، اقلیم، ادوات مورد استفاده و پستی و بلندی خاک بستگی دارد. در جایی که تراکم خاک سطحی مشکل ساز شده است، خاک ورزی مطمئناً می تواند اثر اصلاحی داشته باشد.

در آزمایش های بررسی اثرات توام تراکم – خاک ورزی (کبک، اقلیم مرطوب) توسط نگی و همکاران (۱۹۸۱) در خاک‌های شنی و رسی، بیشترین مقدار محصول در خاک های بسیار متراکم که با گاوآهن قلمی یا برگرداندار شخم شده بود، به دست آمد که نتایج آن با قطعات آزمایشی غیر متراکم و بدون شخم قابل مقایسه بوده است. کمترین مقدار محصول در قطعات متراکم بدون شخم به دست آمد. نتایج به دست آمده از خاک‌های رسی و خاک‌های لوم شنی نشانگر آن بوده است که مقدار محصول را می توان به صورت تابع خمیده خطی[1] از جرم مخصوص خاک نشان داد که در بخش قبلی (با وجود متفاوت بودن ابزار خاک ورزی مورد استفاده) تشریح گردید (شکل ۹). این نتیجه‌گیری‌ها بر مبنای متوسط جرم مخصوص ظاهری خشک در ۲۰ سانتی متر بالایی خاک قرار دارند. برازش منحنی رگرسیون بر داده ها چندان مطلوب نیست که می تواند به اثر متفاوت ادوات خاک ورزی مورد استفاده بر ساختمان خاک و در نتیجه افزایش تغییر پذیری داده ها نسبت داده شود.

1- Curvilinear



شکل ۹- مقدار محصول ذرت در مقابل جرم مخصوص ظاهری خشک در دو خاک رسی و لوم شنی. کدهای روی هر نقطه به ترتیب از سمت چپ نشانگر تعداد عبور، فشار تماس (62 kPa) و ادوات خاک ورزی مورد استفاده در تراکم(O بدون شخم،C گاوآهن قلمی، M گاوآهن برگرداندار،S زیرشکن) می باشد [نگی و همکاران، ۱۹۸۱].

در مناطق خشک تر، راهبردهایی مانند کشت بدون شخم و شخم حفاظتی به طور گسترده‌ای به عنوان روش‌های حفاظت آب و خاک و کنترل فرسایش پذیرفته شده و اغلب از خاک ورزی معمول اجتناب می گردد (لارسون و ازبرن، ۱۹۸۲) اما حتی در چنین مناطقی، خاک ورزی می تواند در کنترل علف های هرز یا آفات و بیماریهای گیاهی یا کاهش مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه سودمند واقع گردد (دان و همکاران، ۱۹۸۷).

۲-۲-۵- واکنش خاک به تردد ماشین های کشاورزی

خاک‌های کشاورزی معمولاً در معرض دو اثر عبور ماشین‌های کشاورزی در جهات مختلف هستند که یکی منجر به تراکم شده (عبور چرخ‌ها) و دیگری (عملیات خاک ورزی) بخشی از نیمرخ خاک را سست و مخلوط می کند. اگر چه تمایل بر آن است که این دو اثر، جداگانه در نظر گرفته شود اما اثرات آنها بر ویژگی‌های خاک عملاً مستقل از هم نیستند زیرا واکنش خاک نسبت به هر یک از آنها تابعی از شرایط ایجاد شده در خاک (در عملیات قبلی) و مجموع اثر نیروهای طبیعی فعال در فاصله این دو عملیات می باشد.

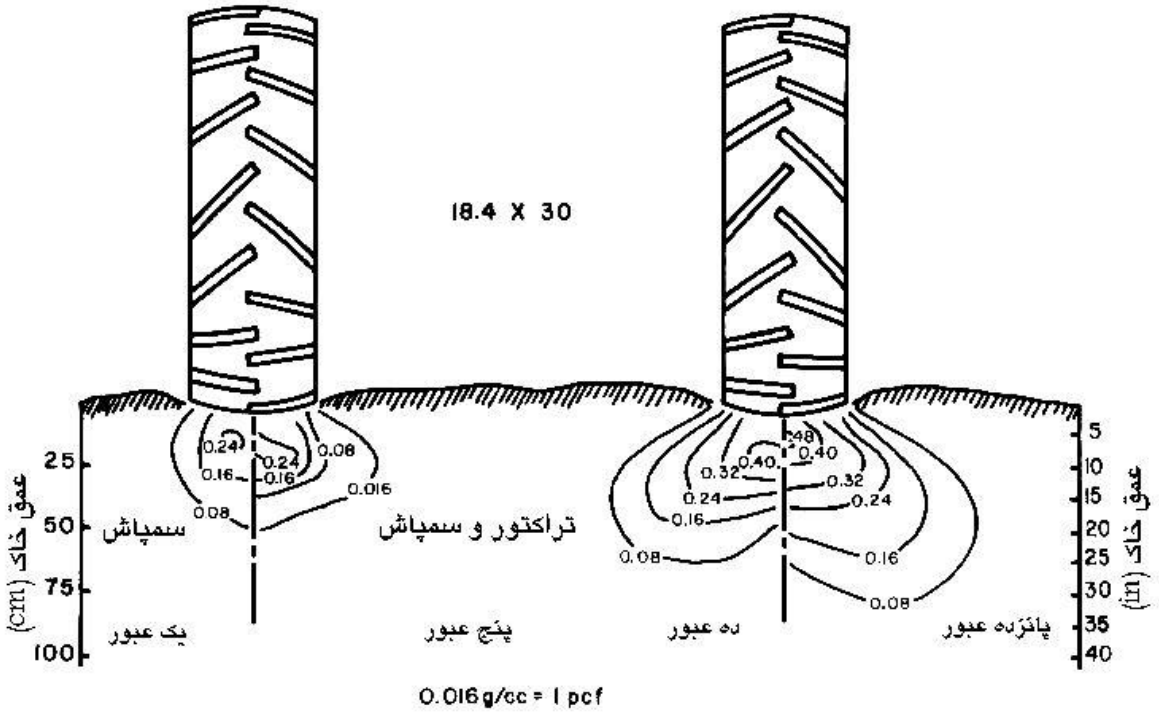
واکنش خاک به تراکم تابعی از متغیرهای مربوط به تردد، ویژگی های خاک و مقدار رطوبت خاک در زمان تردد می باشد. واکنش خاک معمولاً به صورت تغییرات جرم مخصوص ظاهری خشک[1](DBD) ، تخلخل[2] (PO) و یا مقاومت به فروروی[3] (PR) به عنوان تابعی از فشار اعمال شده و مقدار رطوبت خاک[4] (SMC) بیان گردیده است. متغیر DBD در تحقیقات مربوط به تراکم بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰) و با برداشت نمونه های دست نخورده یا اندازه گیری در محل با استفاده از سنجش اشعه گاما صورت می گیرد. مقدار PO به راحتی از DBD و جرم مخصوص جزء جامد خاک به دست می‌آید که هر دو آنها شاخص های غیر مستقیم ویژگی های حرکت آب و قدرت تهویه محسوب می گردند. مقدار PR نیز معیاری از مقاومت خاک و ممانعت مکانیکی در برابر نفوذ ریشه محسوب می گردد. دشواری های تفسیر داده ها به علت اثر متغیرهایی مانند رطوبت، تاکنون کاملاً رفع نشده اند (پرومپرال، ۱۹۷۸). تفسیر داده های دستگاه اندازه گیری مقاومت به فروروی و تغییرات جرم مخصوص ظاهری، مستلزم تعیین SMC پیش و پس از تراکم می باشد.

اگر چه خاک ورزی مستقیماً بر ویژگی‌های فیزیکی خاک اثر می گذارد، اما تاثیر آن به نوع ادوات، عمق شخم، شرایط اولیه خاک و رطوبت خاک در زمان خاک ورزی بستگی دارد (تیسدل و ادم، ۱۹۸٦). خاک ورزی منجر به بهبود شرایط خاک شده و درجه خاکدانه سازی آن را تغییر می دهد و همانگونه که قبلاً تشریح شده است (ون دورن، ۱۹۸۲) تغییرات ایجاد شده در ویژگی های مرتبط با تراکم که ناشی از خاک ورزی اند به ویژه در مقیاس زمانی اثر بارندگی، موقتی دانسته شده (کاسل،۱۹۸۲؛ میک و همکاران،۱۹۸۸) و پارامترهای خاکدانه سازی نیز به طور یکسان تعریف نشده است. این موضوع یکی از دشواری های بزرگ در مرتبط نمودن مقدار تراکم با عملیات خاک ورزی، پس از مشاهده تغییر شرایط خاک محسوب می گردد.

۲-۲-٦- مدل سازی تراکم

عبور چرخ ماشین ها معمولا منجر به فشرده شدن خاک طبق الگوی ارائه شده توسط رقاوان و همکاران (۱۹۷٦) در یک خاک لوم شنی می گردد (شکل ۱۰).

1-Dry bulk density
2-Porosity
3-Penetration resistance
4-Soil moisture content

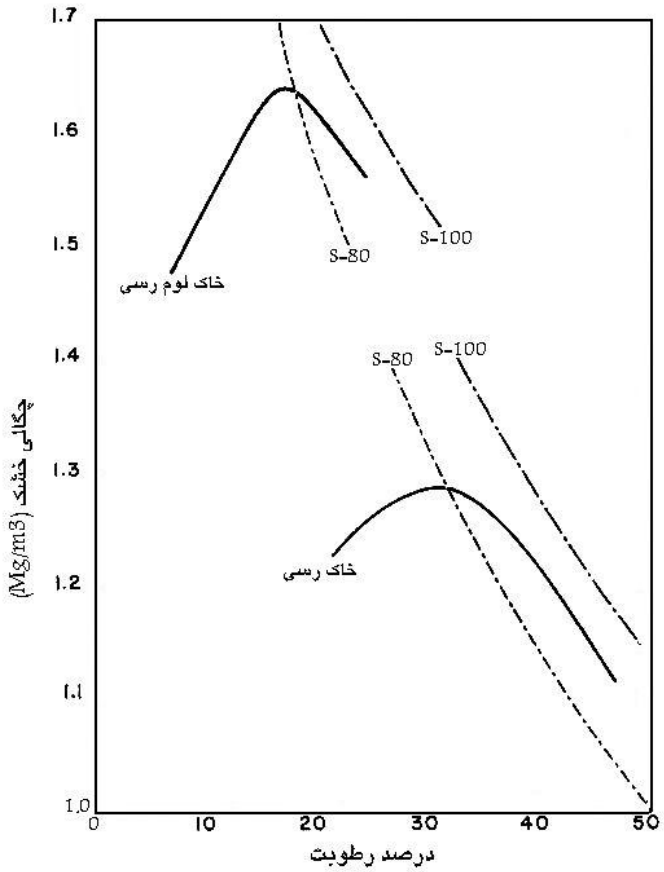


شکل ۱۰- الگوی تغییرات جرم مخصوص ظاهری خشک خاک نسبت به تعداد عبور [رقاوان و همکاران، ۱۹۷٦].

حداکثر تغییرات جرم مخصوص ظاهری در دامنه Mg/m^3 ۰/۱-۰/۵ و در عمق ۲۰-۱۵ سانتیمتری مشاهده شده است. مقدار تغییرات جرم مخصوص ظاهری به بافت خاک، رطوبت موجود در خاک، فشار تماس (درادوات با وزن کمتر از ۱۰ تن در هر محور) یا بار محور (در ادوات سنگین تر از ۱۰ تن در هر محور) و تعداد عبور بستگی دارد. برای ادوات سبک تر، ناحیه با حداکثر تراکم در خاک سطحی (۳۰cm-۰) قرار دارد. ادوات سنگین با متراکم کردن خاک زیر سطحی (۶۰cm-۳۰) مشکل جدی ایجاد می‌کنند، زیرا عملیات اصلاحی مانند کاربرد زیرشکن در مقایسه با خاک ورزی معمول باعث افزایش هزینه ها می گردد. مطالعات مربوط به اثر تردد نشان داده اند که در برخی سیستم های کشت رایج، شدت تردد به گونه ای است که ۹۰ درصد یا بیشتر از سطح مزرعه حداقل یک بار در هر فصل، در معرض عبور چرخ ها قرار می گیرد (برای مثال نگاه کنید به اریکسون و همکاران (۱۹۷٤) در گندم؛ وورهیس (۱۹۷۷) در ذرت). مطالب فوق منجر به ارائه مفهوم «تردد کنترل شده»[1] یا «تولید منطقه ای»[2] گردیده است که در قسمت های بعد تشریح خواهد شد.

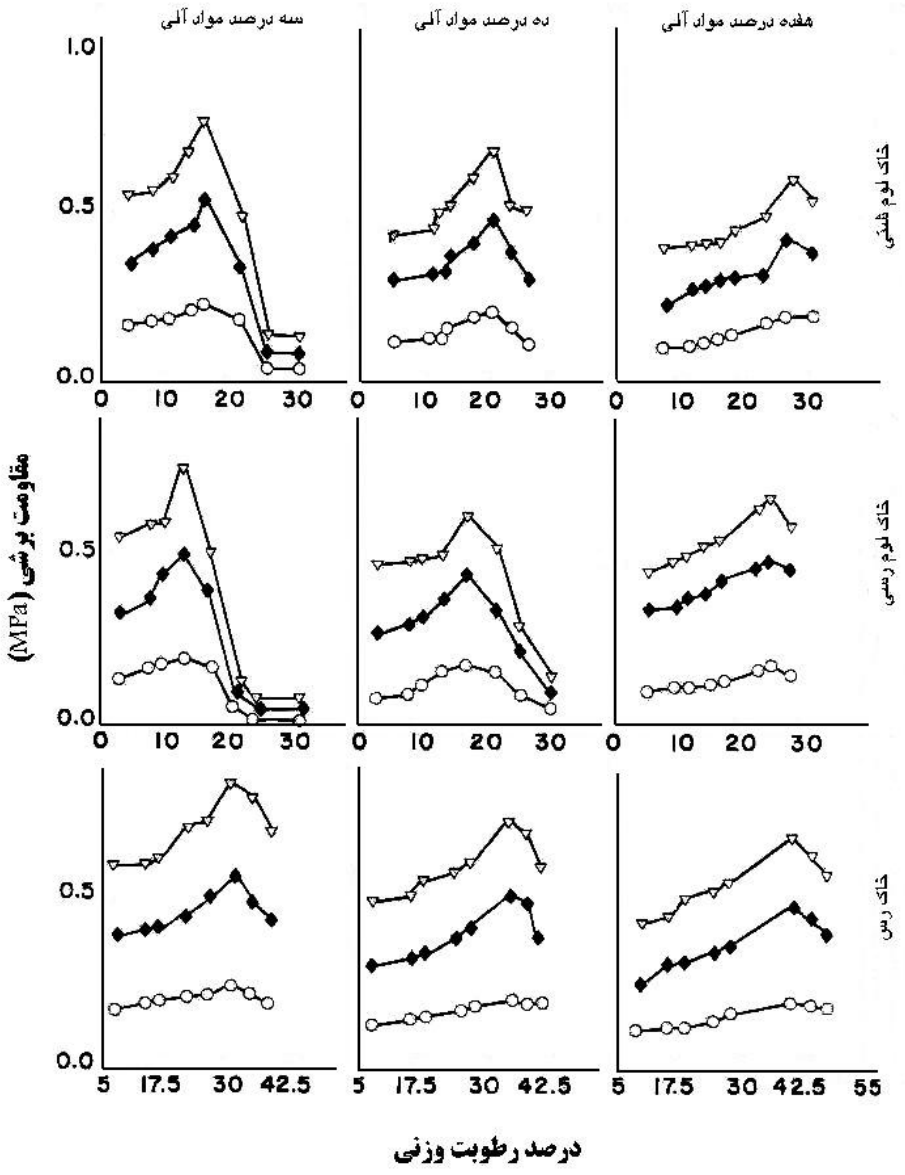
واکنش خاک نسبت به بارهای وارده، بستگی به مقدار رطوبت آن دارد. در مقدار معین انرژی اعمال شده بر سطح خاک، میانگین تغییرات DBD با SMC به شکل خمیده خطی است که در شکل ۱۱ مشاهده می گردد.

1- Controlled traffic
2- Zone production



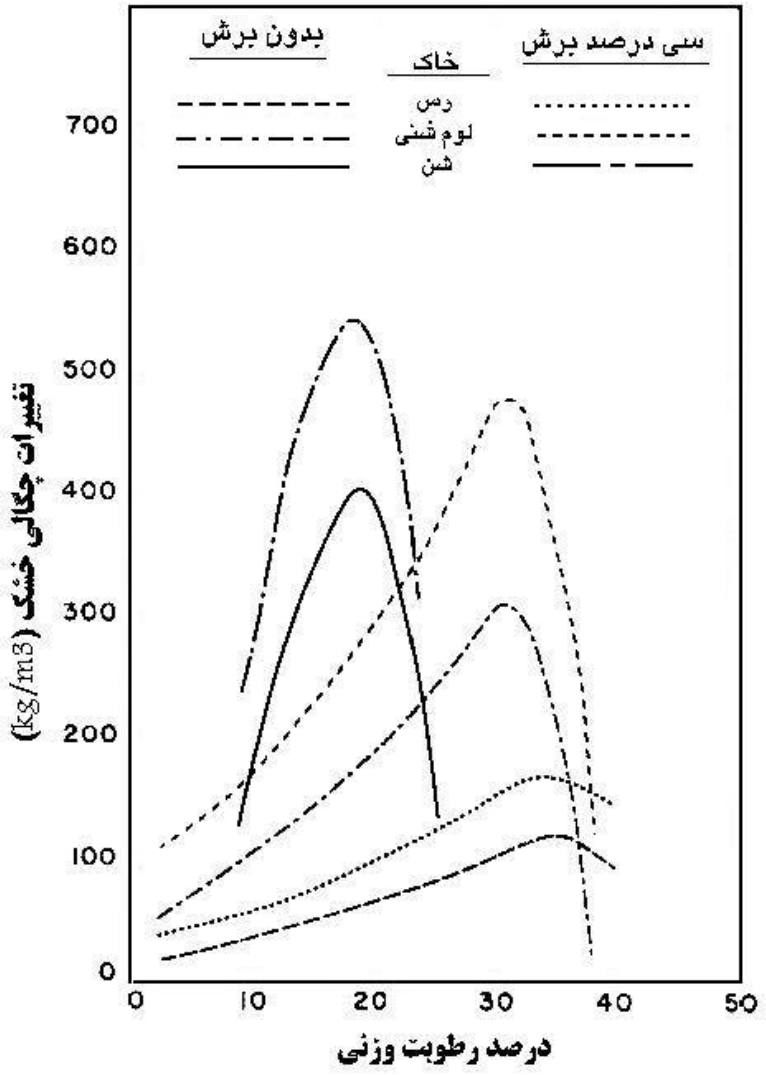
شکل ۱۱- منحنی پراکتور (با استفاده از مقدار رطوبت وزنی) به دست آمده از خاک لوم رسی و رسی با انرژی حاصل از ۲۵ ضربه چکش پراکتور روی هر یک از سه لایه خاک (اوهو و همکاران، ۱۹۸٦).

مقدار حداکثر در منحنی، با آزمایش تراکم پراکتور (لمب، ۱۹۵۱) تعیین می گردد که به انرژی اعمال شده بستگی دارد و موقعیت آن نسبت به محور افقی نمودار، عمدتاً به بافت خاک وابسته است. رقاوان و همکاران (۱۹۷۷a) مشاهده کرده اند که مقدار رطوبت بهینه برای حداکثر تراکم، متناسب با کاهش انرژی اعمال شده در آزمون تراکم ایستا، افزایش می یابد اما چنین اثری در داده های صحرایی آنها مشاهده نشده است. خاک های با بافت ریزتر، نسبت به خاک های درشت بافت، در مقادیر بالاتر رطوبت به حداکثر تراکم می رسند و ظرفیت نگهداری آب آنها نیز بیشتر است. اوهو و همکاران (اوهو و همکاران، ۱۹۸٦) نشان دادند که در سطوح تراکم یکسان، با افزایش مواد آلی و کاهش مقاومت برشی، حد بهینه به سمت رطوبت های بیشتر حرکت می کند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- اثر مواد آلی بر ویژگی های تراکمی سه خاک با بافت متفاوت (O۵ ضربه؛ ♦۱۵ ضربه؛ ∇۲۵ ضربه) [اوهو و همکاران، ۱۹۸۶].

در مقادیر بالاتر رطوبت بهینه (آزمایش تراکم پراکتور) لغزش چرخ می تواند به همان اندازه وزن ادوات باعث تراکم گردد. مطالعات آزمایشگاهی رقاوان و مک کی (۱۹۷۷) نشان داده است که بیش از ۵۰ درصد از تراکم خاک سطحی می تواند به برش ایجاد شده توسط لغزش چرخ نسبت داده شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- تراکم اضافی ناشی از برش ایجاد شده توسط لغزش چرخ در سه خاک با بافت متفاوت [رقاوان و مک کیز، ۱۹۷۷].

حداکثر تاثیر بر تراکم، در لغزش های بین ۱۵ تا ۲۵ درصد مشاهده شده است که شامل مقدار لغزش معمول (۲۰ درصد) نیز می گردد. این اطلاعات در مطالعات صحرایی نیز تایید شده است (رقاوان و همکاران، b ۱۹۷۷ و ۱۹۷۸b). در مقادیر بیشتر لغزش، ساختمان خاک سطحی تخریب می شود. شیارهای عمیق ناشی از حرکت چرخ و معابر حاشیه ای مزرعه نیز به علت ایجاد فرورفتگی بیشتر، در مقادیر زیاد رطوبت خاک باعث ایجاد مشکلاتی می گردند.

کوشش‌های اولیه برای مدل سازی تغییرات جرم مخصوص ظاهری (یا تخلخل) خاک نسبت به بار وارده و مقدار رطوبت بر مبنای متراکم کردن خاک های دست خورده در شرایط آزمایشگاهی بوده است. معادله سوهن (۱۹۵۸) برای بدست آوردن تخلخل یک خاک دست خورده به صورت تابع لگاریتمی از فشار استاتیک اعمال شده در رطوبت معین، در شرایط صحرایی توسط امیر و همکاران (۱۹۷٦) اصلاح شده که در آن تخلخل به عنوان تابعی از رطوبت خاک، فشار اعمال

شده و فشار باقی مانده[1]، نشان داده شده است. آنها برای تعیین بهترین زمان تردد ماشین ها که خطر تراکم را کاهش می دهد، مدل تراکم را با معادله زهکشی تلفیق نمودند. لذا تغییرات تخلخل به صورت معادله ۱ در آمده است:

$$dPo=B\ In(P_2/P_1)+S\ x\ C\ In(t_2/t_1) \quad (۱)$$

که زیر نویس‌های ۱ و ۲ نشانگر مقدار تغییر، پیش و پس از تراکم هستند. B و C ویژگی‌های فشردگی خاک اند و S ثابت ویژه خاک است که اثر زمان بر کاهش رطوبت خاک توسط زهکشی را بیان می‌کند. P_1 فشار باقی مانده یا فشار مورد نیاز برای رساندن خاک کاملاً سست (بکر) به تخلخل مزرعه ای پیش از تراکم و P_2 فشار اعمال شده است. امیر و همکاران (۱۹۷٦) و گوپتا و الماراس (۱۹۸۷) کاربردهای این معادله را با توجه به زمان عملیات ومقدار کاهش تراکم ناشی از بهبود زهکشی و کاهش فشار سطحی، تشریح نموده اند.

جنبه های عملی مفهوم فشار اعمال شده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در آزمایش های صحرایی تراکم، رقاوان و همکاران (۱۹۷٦b ، ۱۹۷۷a) دریافتند که با روش‌های رگرسیون می توان به خوبی جرم مخصوص ظاهری خشک در عمق میانگین خاک سطحی را به مقادیر اندازه گیری شده آن مرتبط نمود، به گونه ای که لگاریتم طبیعی فشار اعمال شده تابعی از مقدار رطوبت خاک در نظر گرفته شود. در این حالت، فشار اعمال شده برابر حاصلضرب فشار تماسی و تعداد عبور (nP) است. معادلات مربوط به SMC قبل و بعد از رطوبت بهینه پراکتور باید بر داده ها برازش مطلوب داشته و ضریب مربوط به متغیر مستقل آنها ثابت و منطقی[2] باشد. معادلات رگرسیون که بر مبنای مطالعات صحرایی بوده و شامل توابع لگاریتمی nP و SMC و لغزش می گردند (رقاوان و مک کی، ۱۹۷۸) برآوردهای مناسبی را نشان داده اند، اگر چه این معادلات نسبت به جهت روابط با nP و عمق خاک و با توجه به مشاهدات عینی الگوی تراکم و دامنه رطوبتی موجود در طبیعت، منطقی به نظر نمی‌رسند. پس از آن، رقاوان و اهو (۱۹۸۵) نشان دادند که می توان فشار تماسی را به انرژی ناشی از ضربات پراکتور مرتبط نمود و این ارتباط مستقل از بافت خاک می باشد. در این صورت، ویژگی های تراکم یک خاک معین در شرایط آزمایشگاهی را می توان در شرایط صحرایی نیز به کار برد. یک جنبه عملی در مطالعه نیروهای تراکمی اعمال شده که تا کنون در مقالات نیامده است، وابستگی اعمال بار معین (مثلاً بار ناشی از پخش کود یا برداشت محصول) به زمان می باشد. بار وارده می تواند به وضوح در قسمتی از مزرعه با قسمت دیگر متفاوت باشد. در هر حال، با اعمال برخی برنامه ریزی ها، تراکم بیش از حد در برخی قسمت های مزرعه، به ویژه در محل دور زدن ماشین ها، قابل اجتناب خواهد بود.

گوپتا و لارسون (۱۹۸۲) مدلی برای تراکم و خرد شدن خاک ارائه کرده اند که قدمی در جهت حل مشکل برخی عملیات زنجیره ای متراکم کننده و خرد کننده خاک محسوب می‌گردد. با فرض وجود رابطه میان جرم مخصوص ظاهری

1- Residual
2- Persistent

در حالت تراکم و توزیع اندازه خاکدانه‌ها، آنها اظهار داشتند که انتخاب ادوات خاک ورزی مناسب که توزیع اندازه خاکدانه و لذا جرم مخصوص ظاهری مطلوب را ایجاد کند، امکان پذیر است. اگر چه نتایج بخش مربوط به تراکم مدل در آزمون های مزرعه ای رضایت بخش بوده (گوپتا و همکاران، ۱۹۸۵) اما تا کنون تخمین های معقولی از مدل ترکیبی که بتواند شرایط پس از عملیات خاک ورزی را نشان دهد، ارائه نشده است. موفقیت چنین کوشش هایی به صحت روابط میان جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه خاکدانه ها وابسته است که آن نیز احتمالاً بر حسب نوع خاک، بافت و شرایط اولیه متغیر خواهد بود.

کاهش طبیعی تراکم خاک در حین یخ زدن – ذوب، انبساط – انقباض، و ایجاد ترک ناشی از فرایند خشک شدن از جمله راه‌های بهبود ساختمان خاک متراکم شده محسوب می گردد اما وارد کردن هر کدام از آنها در یک مدل مناسب اگر غیر ممکن نباشد، بسیار دشوار است. منابع علمی موجود نشان می دهند که طول زمان بهبود ساختمان به اقلیم، نوع خاک، مقدار رس، مقدار مواد آلی و درجه تراکم بستگی دارد. زمان بهبود ساختمان خاک بسیار متراکم در جاده های صحرایی موجاو، بیش از صد سال برآورد شده است (وب و همکاران، ۱۹۸٦). گامدا و همکاران (۱۹۸۷) اظهار داشته‌اند که در یک خاک رسی و در اقلیم معتدل، کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش مقدار محصول حتی پس از یک بار عبور ادوات بسیار سنگین ممکن است سه سال طول بکشد. باید توجه داشت که مقیاس زمانی افزایش محصول مستقیماً به بهبود ساختمان خاک ارتباط ندارد. هاکانسون (۱۹۸۲) با وجود مقادیر بالای DBD و PR ، افزایش محصول در طی زمان را مشاهده نموده است. وی این افزایش را به توسعه شبکه ترک ها و مجاری حاصل از حرکت کرم های خاکی که منجر به بهبود نفوذپذیری و فراوانی ریشه ها می گردد، نسبت داده است. دکستر (۱۹۸٦) مطالعاتی را در شرایط آزمایشگاهی ترتیب داده است تا شواهدی دال بر اهمیت نقش موجودات زنده خاک در اصلاح خاک‌های متراکم و افزایش حجم ریشه ها به دست آورده و سپس ابعاد دیگر موثر بر روند اصلاح طبیعی خاک‌های متراکم را بررسی نماید. مطالعات مربوط به سیستم های بدون شخم بیانگر اثر تجمع مواد آلی و فعالیت ریشه بر اصلاح ساختمان خاک می باشند (لعل و همکاران، ۱۹۷۹).

رفع محدودیت‌های علم مکانیک کلاسیک و کاستی های معادلات تجربی (هیلل، ۱۹۸۷) منجر به ارائه نظریه های کامل‌تری شده است که با آن می توان طبیعت لایه ای خاک را نیز در نظر گرفت. پالوک و همکاران (۱۹۸٦) روش اجزاء محدود[1] را برای ارائه مدل تراکم در شرایط تردد مکرر به کار برده‌اند. هتی آراشی و اکالاهان (۱۹۸۰) نیز نظریه مکانیکی پتانسیل حالت بحرانی[2] را به عنوان جایگزین نظریه کلاسیک تشریح نموده اند. با وجود این، معادله های بدست آمده از روش های تجربی یا مکانیک کلاسیک فهم استواری از پدیده تراکم خاک ارائه داده و راهنمایی های مفیدی برای کاهش خطر تراکم شدید (بوسیله تنظیم زمان عملیات کشاورزی وانتخاب ماشین های مناسب) فراهم می نمایند.

1- Finite element
2- Potential critical state

۲-۲-۷- خلاصه

در این قسمت، طرح مفهومی روابط ماشین – خاک و خاک – گیاه بر مبنای برخی تحقیقات موجود ارائه گردید که درقسمت چارچوب تصمیم گیری با تفصیل بیشتر بیان خواهد شد. عوامل اصلی موثر در واکنش خاک به تردد ماشین ها شناخته شده اند. فرایندهای شناخته شده خاک از تغییرات محیطی ناشی از تراکم و خاک ورزی از راه های گوناگون تاثیر می پذیرند لیکن از اثر عوامل شیمیایی و زیستی در مقالات علمی غفلت شده که احتمالاً علت آن فقدان روش‌های نمونه برداری مناسب و محدود کردن متغیرهای مدل بوده است. یک نکته مهم آن است که اگر چه هر یک از این دیدگاه‌ها را می‌توان بسیار پیچیده بیان نمود اما امکان ارائه مدل‌های واقعی از چنین سیستم پویایی در آینده نزدیک مورد تردید است. خاک‌ها در مکان و زمان بسیار متغیرند. واکنش گیاه به شرایط خاک هم به اقلیم وابسته است که خود فرایندی احتمالی بوده و به تاثیرات متقابل زمانی میان آب وهوا، رشد گیاه و پارامترهای خاک در طول نیمرخ نیز بستگی دارد. همچنین، شواهدی وجود دارد که گیاهان به تغییر ویژگی های فیزیکی خاک به همان اندازه موازنه عناصر غذایی ناشی از تغییرات فیزیکی محیط واکنش نشان می‌دهند. بنا براین، مطالعات جامع برای تعیین حساسیت گیاهان به اثر همزمان عوامل متعدد، ضرورتی آشکار است.

۲-۳- به کار گیری یک چارچوب تصمیم گیری

۲-۳-۱- نکته های بنیادین

بر مبنای نظریه منحنی بهینه، مدیریت خاک‌ها به منظور افزایش تولید توام با حفظ شرایط فیزیکی مطلوب امکان پذیر است، مشروط بر آنکه اقلیم و عوامل توپوگرافی نیز به حساب آیند. تاکید مجدد بر این نکته لازم است که تراکم لزوماً عامل محدود کننده ای نیست و در همه موقعیت ها زیان آور نمی باشد. در مناطق خشک، فواید کاهش تراکم و سست کردن خاک مهم‌تر از تلفات تبخیری رطوبت ناشی از شخم خاک سطحی نیست. بدون تردید، در آینده برای تهیه مدل های خاک و محصول – اقلیم به عملیات کنترل تراکم توجه بیشتری خواهد شد. گوپتا و آلماراس (۱۹۸۷) کاربرد یک پایگاه داده های اقلیمی را درتخمین مقدار رطوبت خاک برای توصیف مقادیر بحرانی بار ناشی از تردد ماشین های کشاورزی در شرایط و زمان معلوم تشریح نموده اند. وپراسکاس (۱۹۸۸) روشی را بر اساس توزیع بارندگی برای تعیین احتمال افزایش محصول تنباکو در اثر شخم عمیق ارائه نموده است.

با فرض شرایط معمول در تولید مکانیزه محصول، یک کشاورز با محدودیت های اساسی مانند نوع خاک، طول فصل رشد و اقلیم و همچنین محدودیت های اقتصادی روبروست که تعیین کننده نوع محصولی هستند که تولید آن می تواند موفقیت آمیز باشد. محدودیت اقتصادی به نوع فعالیت، زمینه های منطقه ای و سطح مداخله دولتی بستگی دارد. با پذیرش این نکته که به حداکثر رساندن سود لزوماً هدف اصلی تولید محصولات زراعی نیست و حفظ یا بهبود شرایط

فیزیکی خاک نیز واجد اهمیت می باشد، ارایه چارچوبی برای تصمیم گیری کشاورز یا مروج کشاورزی ضرورت می یابد. طرحی از نکات اصلی مورد نظر، در شکل ١٤ آمده است.

برای یک فعالیت کشاورزی معین (با فرض وجود حد قابل قبولی از سطح حاصلخیزی و کنترل آفات و بیماری ها) ابتدا باید شرایط اولیه خاک تعیین گردد زیرا واکنش خاک به تردد وابسته به آن است. سپس، باید اثرات یک سری از عملیات بر شرایط خاک در طول فصل رشد برآورد گردد که لازمه آن، فهم رفتار خاک تحت تنش مکانیکی می باشد. همچنین، تراکم باقی مانده و امکان اصلاح آن برای محصولات بعدی باید برآورد گردد. دامنه ای از مقدار محصول احتمالی را می توان از منحنی های بهینه (مقدار محصول در برابر تراکم پذیری) و احتمال وقوع شرایط آب و هوایی مختلف برآورد نمود. تحلیل هزینه – فایده نیز می تواند برای فصل مورد نظر یا چند سال متوالی انجام گیرد. مدل های محصول – اقلیم آشکارا نقش مهمی در راهبردهای مدیریت خاک ایفا می کنند. جزئیات چنین مدل هایی در زیر مورد بحث قرار گرفته اند :

١- تعیین شرایط اولیه خاک پیش از هر گونه عملیات

الف) انتخاب پارامترهای ساختمان خاک

ب) طرح نمونه برداری

I. انتخاب مقیاس مکانی مناسب

II. برآورد تغییر پذیری داده ها

٢- پیش بینی شرایط در طول فصل رشد

الف) برآورد تغییرات ناشی از تراکم

I. بار وارده

II. تعداد عبور

III. لغزش

IV. رطوبت خاک در زمان تردد

ب) برآورد تغییرات ناشی از خاک ورزی

I. نوع ادوات خاک ورزی

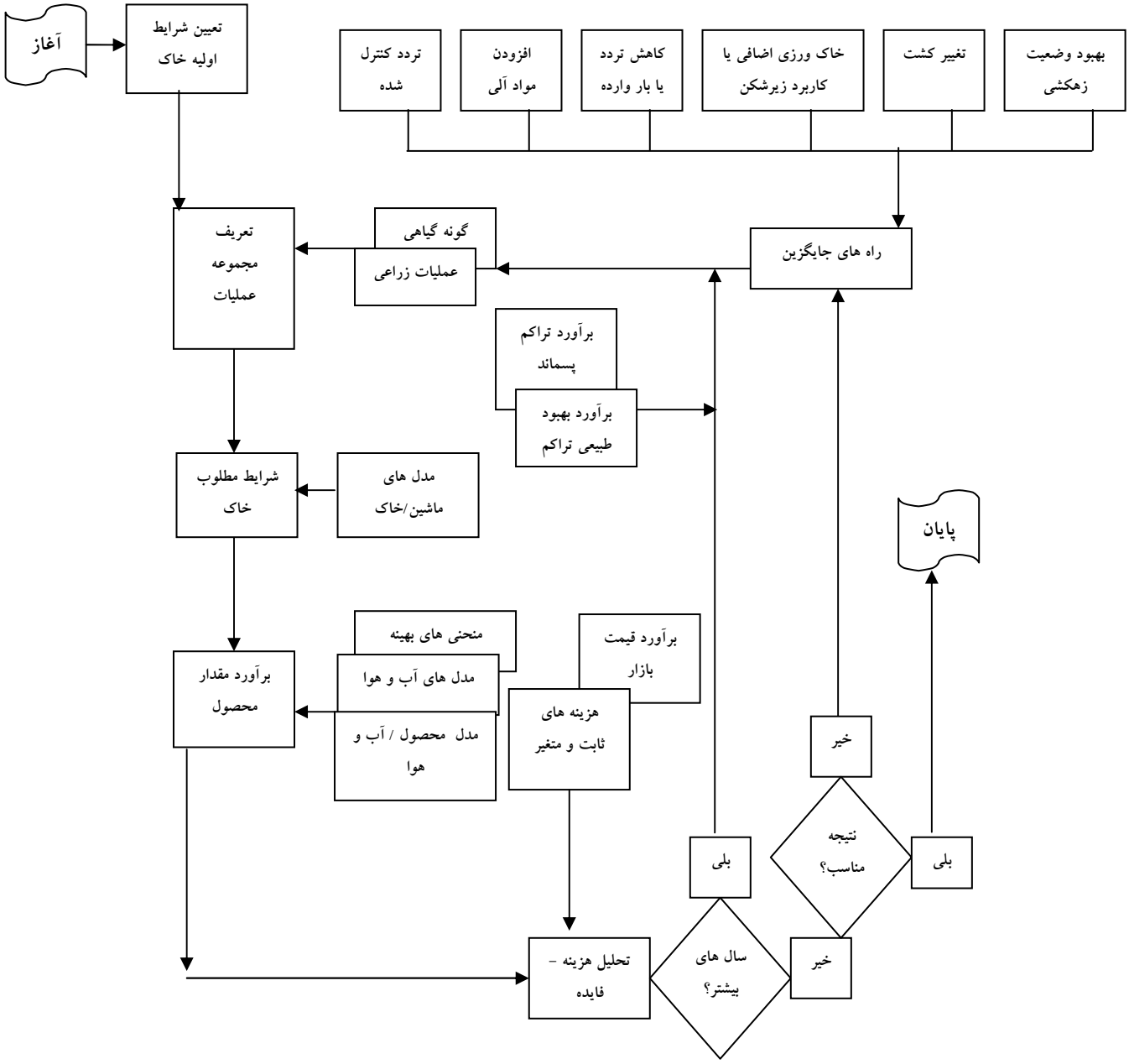
II. عمق عملیات خاک ورزی

٣- برآورد مقدار محصول (و یا بازگشت سرمایه[1])

الف) دانسته های قبلی درباره منحنی‌های بهینه

ب) تحلیل احتمال برای شرایط اقلیمی

1- Economic return



شکل ١٤- چارچوب راهبرد مدیریت پایدار ساختمان خاک با در نظر گرفتن محدودیت های منطقه ای و اقتصادی.

ج) مدل های محصول – اقلیم

د) پیش بینی قیمت بازار

ه) برآورد هزینه ها

I. هزینه های ثابت

II. هزینه های متغیر (مانند خشک کردن دانه ها، حمل و نقل)

شرایط اولیه خاک ممکن است به گونه ای باشد که عملیات اصلاحی به طور غیرمستقیم ضرورت یابد. در این حالت، لازم است راه‌حل‌های جایگزین در نظر گرفته شود. شرایط پیش بینی شده خاک ممکن است احتمال کاهش محصول یا لزوم

عملیات اصلاحی اساسی تا پیش از فرا رسیدن فصل بعدی را شامل گردد و لذا باز هم گزینه های ممکـن دیگـری بایـد در نظر گرفته شود. تخمین مقدار محصول یا بازده اقتصادی، بر مبنای یکـسال یـا چنـد سـال، معمـولاً عامـل تعیـین کننـده‌ای محسوب می گردد.

بر مبنای نتایج برآوردها، روش‌های جایگزین متعددی را می توان در نظر گرفت. اگر پیش بینی شود که عملیات معمول منجر به تراکم شدید می گردد، توصیه هایی مانند نصب زهکش‌های کافی یا منتظر ماندن برای شرایط خشک‌تر پیش از حرکت ادوات چرخدار، کاهش وزن ادوات، کاهش دفعات تردد، یا افزودن مواد آلی (به طور مستقیم یا با اعمال تناوبهای منظم و مناسب) قابل ارائه است. خاک های متراکم با خاک ورزی یا شخم عمیق، کاشت گیاهان پوششی، یا کاربرد مواد آلی و یا آیش گذاری قابل اصلاح‌اند. اثرات یخ زدن – ذوب با غرقاب کردن زمین در اوایل زمستان قابل افزایش است. کاهش تردد یا محدود کردن آن نیز گزینه هایی هستند که در کاربرد ماشین‌های سنتی و برای توسعه ماشین‌های عریض و دارای قابلیت حرکت جانبی تا حدی مورد مطالعه قرار گرفته اند (تیلور، ۱۹۸۵). اگر شرایط خشک‌تری پیش بینی شود، منحنی های بهینه ممکن است افزایش مفیدی در تراکم پذیری نشان دهند. راه حل آخر ممکن است تغییر کشت باشد.

۲-۳-۲- اجرا

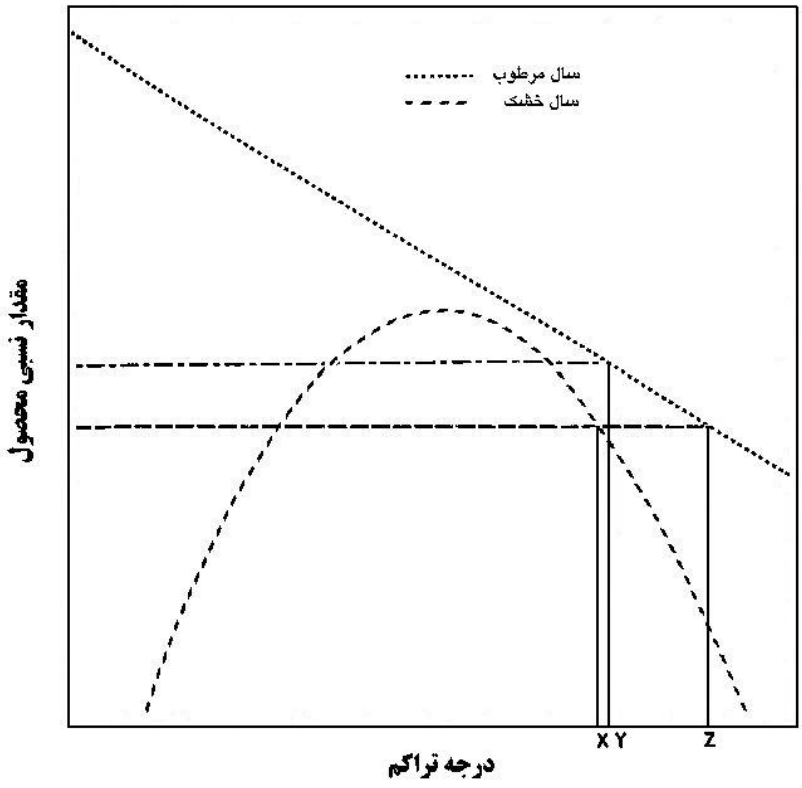
اجرای یک چارچوب تصمیم‌گیری مستلزم شناخت شرایط اولیه می باشد که در منابع علمی کمتر به آن توجه شده است. چند مسئله وجود دارد که باید به آنها پرداخته شود. اول آن که تعیین کنیم آیا بررسی مشکل تراکم، بدون توجه به شدت آن اولویت دارد یا خیر. برای مثال، برخی مزرعه ها چنان دچار مشکلات زهکشی ضعیف، آلودگی به آفات و بیماریها یا مشکل سمیت هستند که مشکل تراکم در آنها اولویت خود را از دست داده است. تراکم ممکن است تنها در عمق معینی از خاک – مانند تشکیل کفه سخت[1] – ایجاد مشکل کند. همچنین، تراکم ممکن است به خاک سطحی محدود گردد یا به اعماق خاک نیز گسترش یابد. در برخی موارد، شرایط عمومی خاک باید با نمونه برداری تعیین شود.

مسئله دوم، تعیین پارامترهای مربوط به تراکم است. با توجه به معیار تراکم پذیری، جرم مخصوص ظاهری خشک و مقاومت به فرو روی معمولاً شاخص‌های خوبی محسوب می گردند. به منظور پیش بینی تراکم، رطوبت خاک، مواد آلی ومقدار بار وارده باید معلوم باشند. مسئله سوم، ارائه طرح و روش نمونه برداری است که سریع بوده و به آسانی قابل اجرا و تفسیر باشد که احتمالا نیازمند وجود کارشناسان وکاردان های کشاورزی و ادوات ویژه در منطقه می باشد. با فرض آنکه مقدار رطوبت، جرم مخصوص و مقاومت به فروروی، صفات مورد نظر خاک بوده وهمزمان قابل اندازه گیری باشند و همچنین بتوان به سرعت داده های مربوطه را تحلیل نمود؛ مشکل تغییر پذیری داده ها همچنان باقی است.

1. Hard pan

کاسل (۱۹۸۲) معادله ای را ارائه کرده است که روابط میان اندازه نمونه و تغییر پذیری ویژگی های آن را نشان می‌دهد. مطالعات اولیه برای تعیین رابطه میان تغییرپذیری داده‌ها و فواصل زمانی نمونه برداری نیز باید انجام شوند، زیرا فاصله زمانی مورد استفاده باید متناسب با محدودیت زمانی تکنسین‌ها و دقت مورد نیاز زارعین باشد. درجه انحناء در اطراف نقطه حداکثر در منحنی پراکتور را نیز می‌توان برای تعیین دامنه احتمال برآورد رطوبت به کار برد. در صورتی که مقدار رطوبت در تعداد عبور معمولی، به نزدیکی حد بهینه میل کند، قله تیزتر منحنی به مفهوم بحرانی‌تر[1] بودن دقت برآورد می باشد.

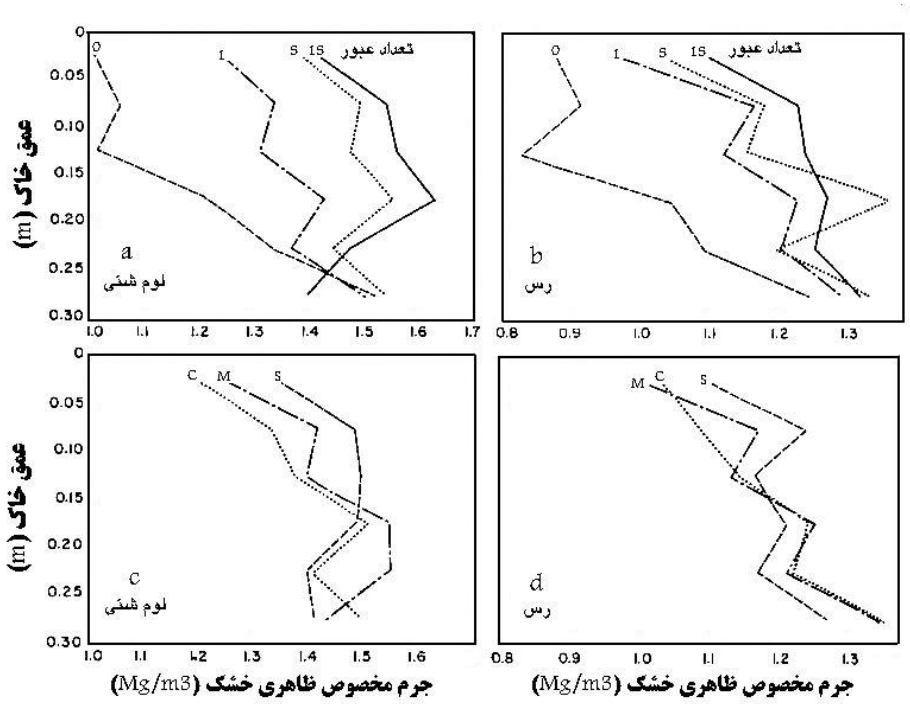
منحنی‌های بهینه را می توان به عنوان راهنمایی درتعیین حدود بحرانی تراکم خاک بر حسب مقدار محصول و در شرایط اقلیمی مربوطه به کار برد. در شکل ۱۵ منحنی‌های محصول – تراکم برای سال‌های خشک و مرطوب نشان داده شده است. دو خط شکسته، مربوط به منحنی بازگشت سرمایه یا عملکرد اقتصادی هستند که یکی در حالت بدون آبیاری و دیگری همراه با آبیاری می باشد. حداکثر درجه متراکم شدن برای موقعیت های مختلف با عمود کردن خطی بر محل تقاطع منحنی های عملکرد اقتصادی و منحنی محصول – تراکم به دست می آید. در این جا فرض شده است که منحنی محصول – تراکم در حالت آبیاری، مشابه سال مرطوب است.



شکل ۱۵- مقدار تراکم بحرانی که از منحنی های بهینه به دست می آید و تابع تعریف اقتصادی سطوح بحرانی تراکم می باشد (_ _ _ ، آستانه اقتصادی محصول؛ - - - ، آستانه اقتصادی بالاتر به علت هزینه های مربوط به سیستم آبیاری؛ X ، سطح بحرانی تراکم (CCL) برای سال خشک و بدون آبیاری؛ CCL, Y برای سال خشک و با وجود سیستم آبیاری؛ CCL, Z برای سال مرطوب).

1. Critical

اهمیت مدل های برآورد تراکم ناشی از خاک ورزی نیز کاملاً روشن است. منحنی های بهینه که مقدار محصول را در مقابل تراکم نشان می دهند، می توانند با کاربرد مدل های مناسب به صورتی ارائه گردند که مقدار محصول به عنوان تابعی از برخی عملیات (که در سطح مزرعه به راحتی قابل تفسیراند) نشان داده شود. اگر چه مسایل نظری اساسی حل نشده ای وجود دارند، اما حدود اطمینان ویژگی‌هایی که از برخی عملیات ناشی می‌شوند را می‌توان ابتدا به‌طور آزمایشی برای خاک‌های نمونه در مناطق مشخص، تعیین نمود. جرم مخصوص ظاهری اولیه خاک و نیمرخ های مربوط به درجات مختلف تراکم برای دو خاک لوم شنی و رسی در شکل ١٦ (a,b) نشان داده شده است. اثرات سست کننده (ضد تراکمی) انواع ادوات خاک ورزی در قطعات آزمایشی با حداکثر تراکم در شکل ١٦ (d,c) نشان داده شده است.



شکل١٦- (a.b) نیمرخ میانگین جرم مخصوص ظاهری برای قطعات با خاک لوم شنی و رسی در فشار تماس ٦٢KPa ، (c,d) نیمرخ جرم مخصوص ظاهری خشک برای قطعات با خاک لوم شنی و رسی که در معرض ١٥ بار عبور با فشار تماس ٦٢KPa قرار گرفته و سپس با گاوآهن قلمی، C ؛ گاوآهن برگرداندار، M ؛ و زیرشکن، S ؛ سست شده اند.

مقدار کاهش تراکم[1] و تراکم پسماند را می توان با تعداد تکرار کافی و در دامنه ای از شرایط اولیه به صورت آماری بیان نمود. در آزمایش های شخم عمیق، برنیه و همکاران (١٩٨٩) نشان داده اند که مقدار کاهش تراکم با دو مرتبه عبور زیرشکن، بیش از یک بار عبور بوده است. مطالعات بعدی ممکن است شامل ترکیبی از اثر ادوات خاک ورزی و سطوح اولیه تراکم خاک بوده و تصویر بهتری از چگونگی نگهداری ساختمان فیزیکی خاک در دامنه ای مناسب ارائه دهند.

1- Loosening

۲-۳-۳- نکته های اقتصادی

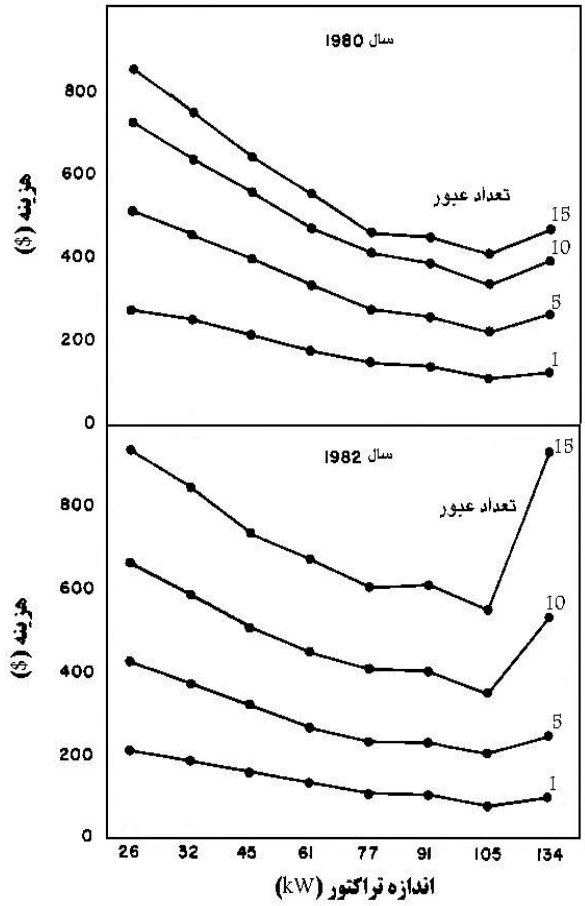
از دیدگاه زارعین معمولی که لزوماً باید متکی به خود باشند، هر فرایند تصمیم‌گیری مربوط به کیفیت خاک، همان‌قدر که متاثر از محدودیت‌های طبیعی مربوط به نوع خاک، توپوگرافی و اقلیم است، به جنبه های اقتصادی نیز محدود می گردد. بنابراین، یکی از جنبه‌های پیش‌روی عملیات حفاظت خاک(شامل تناوب‌های زراعی‌ای که مواد آلی، حاصلخیزی و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشند) عمدتاً به میل تولید کننده برای پذیرش زیان های احتمالی کوتاه مدت به منظور کسب سود از تولید بالقوه پایدار در بلند مدت بستگی دارد. این زیان های احتمالی ممکن است در سطح ملی از طریق برنامه های تشویقی پوشش داده شود.

یک دیدگاه آرمانی نیز آن است که گزینه ها در واقع مستقل از هزینه‌ها باشند، مانند سیستم تولیدی که تنها رفع نیاز جمعیتی خاص مورد نظر آن است. در چنین سیستمی، به حداکثر رساندن تولید می تواند در شرایط کمبود عرضه مورد نظر باشد، در صورتیکه تثبیت مقدار محصول ممکن است در شرایط رکود، هدف تولید قرار گیرد و لذا آستانه تولید با محدودیت هایی مواجه خواهد شد. مطالب فوق‌الذکر به منظور تاکید بر امکان تغییر دیدگاه‌های عام که ممکن است تهدید کننده باشند، ارائه گردیده است که یکی از آنها تلقی کشاورزی به عنوان فراهم کننده انرژی خام مورد نیاز برای پیگیری فعالیت‌های دیگر است. چنین برداشتی می تواند نتیجه تمایل به زراعت در سطح وسیع و خودکار کردن، و متعاقب آن، رواج سازماندهی مجدد کشاورزی محسوب گردد.

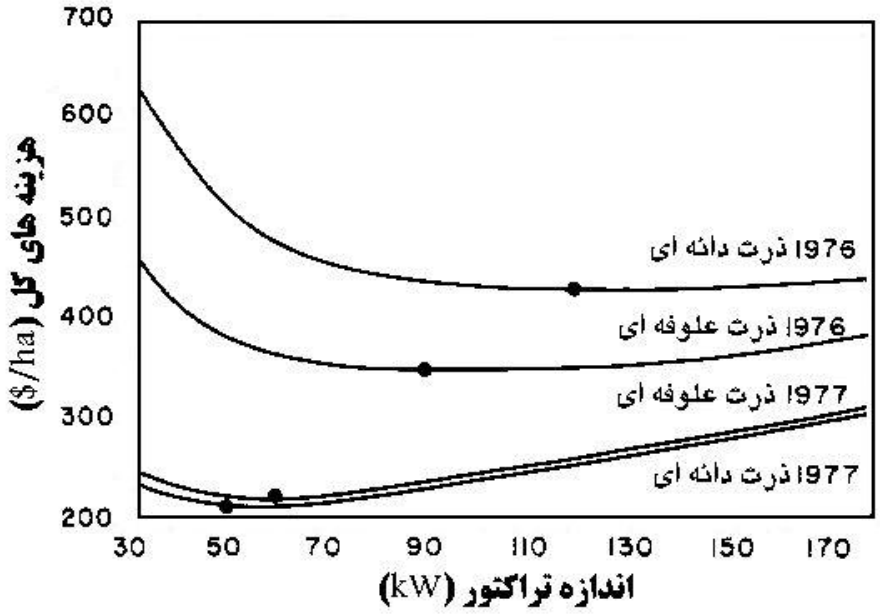
در اینجا، ملاحظات اقتصادی نیازمند توجه بیشتر هستند. روابط میان مقدار محصول، قیمت بازار، تراکم ناشی از تردد ماشین‌ها، و هزینه‌ها اخیراً برای سه محصول مهم در منطقه کبک بررسی شده است. نخود (گونجال و رقاوان، ۱۹۸٦)، ذرت علوفه‌ای و ذرت دانه‌ای (گونجال و همکاران، ۱۹۸۷) از محصولات مورد بررسی بوده اند. مطالعات مورد نظر بر مبنای داده های حاصل از آزمایش های تراکم که در آن، تمام قطعات آزمایشی متراکم بوده، قرار داشته اند. داده های مربوط به مقدار محصول سال های مختلف به صورت تابعی از nP (تعداد عبور) نشان داده شده اند. مقدار کاهش محصول در مزرعه (تفاضل بین مقدار محصول در قطعات متراکم و غیر متراکم) برای اندازه های متفاوت تراکتور، با محاسبه درصد سطح تراکم[1] (CAP) بدست می آید.CAP برابر با نسبتی از سطح تحت بار چرخ های عقب و سطح تحت یک عملیات استاندارد در یک عبور، می باشد. این نسبت با افزایش اندازه تراکتور، کاهش می یابد. بنابراین، تحلیل اقتصادی شامل برآورد مقدار کاهش محصول ناشی از تراکم (در شرایط اقلیمی وهزینه ماشین های متفاوت) می گردد.

نمودار کل هزینه‌ها در ایکر برای محصول نخود به عنوان تابعی از اندازه تراکتور وتعداد عبور در شکل ۱۷ ارائه شده است. داده‌های مشابهی نیز برای ذرت علوفه ای و ذرت دانه ای در شکل ۱۸ مشاهده می گردد.

1- Compaction Area Percentage

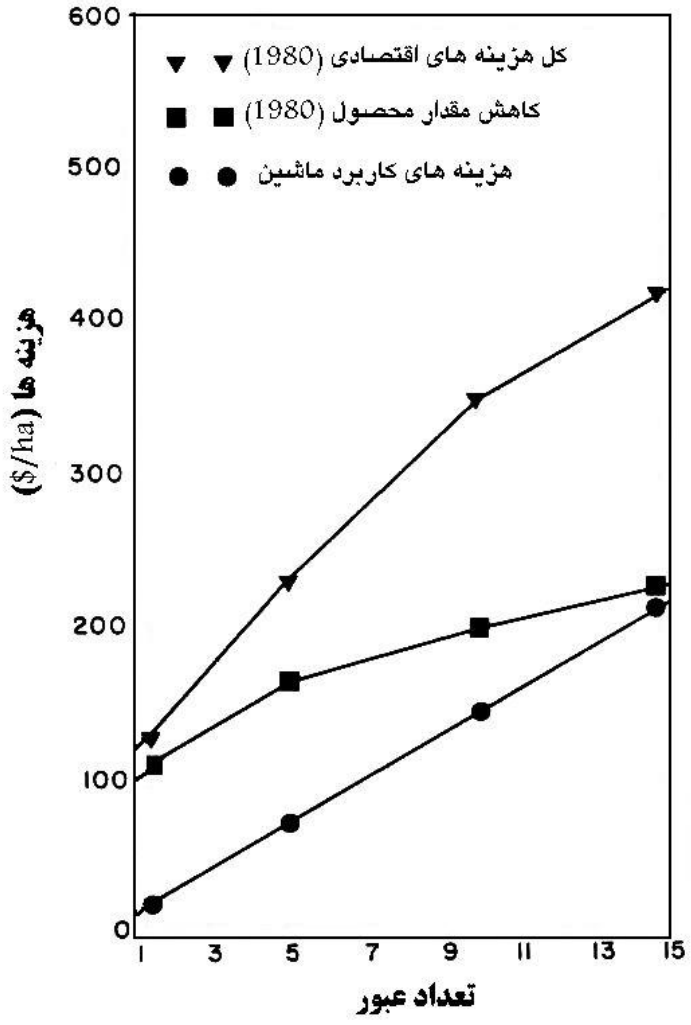


شکل ۱۷- کل هزینه‌ها در ایکر برای تولید نخود در ایالت کبک [گونجال و رقاوان، ۱۹۸٦].



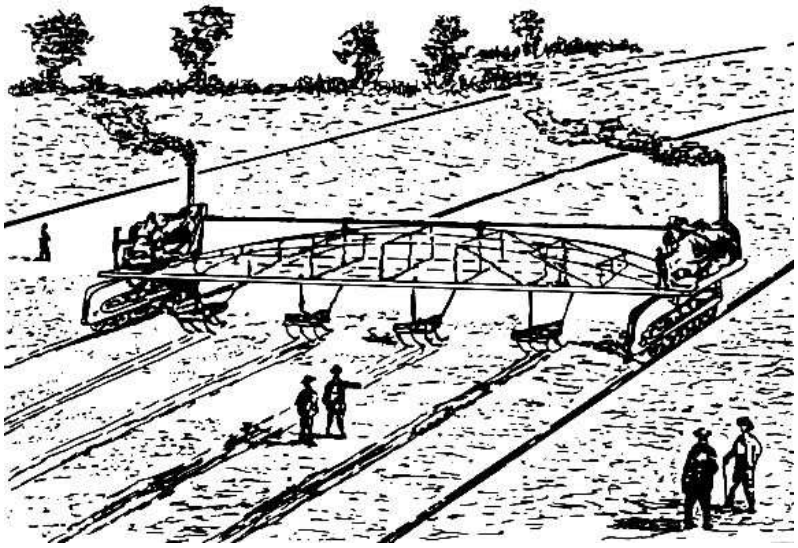
شکل ۱۸- کل هزینه ها در هکتار برای تولید ذرت علوفه ای و ذرت دانه ای به صورت تابعی از اندازه تراکتور در یک سال مرطوب (۱۹۷٦) و یک سال خشک (۱۹۷۷) [گونجال و همکاران، ۱۹۸۷].

نتایج مربوطه نشان داده اند که اندازه مطلوب تراکتور به نوع محصول و شرایط آب و هوایی بستگی دارد و با در نظر گرفتن شدت تردد (درصد سطح تحت پوشش) تراکتورهای کوچک لزوماً بهتر نیستند. با کاهش تعداد عبور، صرفه جویی در هزینه‌ها قابل ملاحظه بوده است (شکل ۱۹). آنچه در هر دو این مطالعات مورد غفلت قرار گرفته است اثرات تراکم باقی‌مانده ناشی از کاربرد ارزان ترین اندازه تراکتور می باشد. اما در عین حال، مطالعاتی در جهت کاربرد فرایند برنامه‌ریزی خطی در مطالعات اقتصادی تراکم (مکاتبه شخصی – G.Lovoie) بر یک مبنای چند ساله، تک کشتی و تناوبی انجام شده است که الزاماً اثرات باقی مانده و اثرهای اصلاح کننده کاربرد مستقیم مواد آلی (اوهو و همکاران، ۱۹۸۵) یا برقراری تناوب های زراعی ویژه را نیز شامل می گردد.

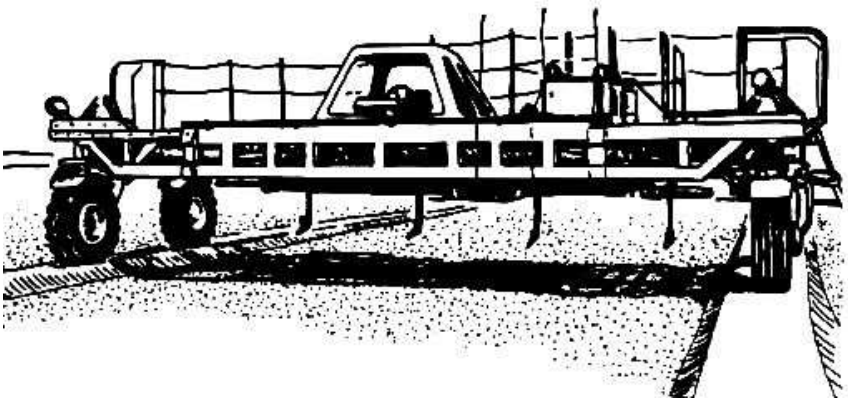


شکل ۱۹– هزینه های اقتصادی کل برای تولید ذرت بعنوان تابعی از تعداد عبور در اندازه بهینه تراکتور [گونجال و رقاوان، ۱۹۸٦] .

یک روش جایگزین که در حال حاضر بیشتر به آن توجه می شود، تردد کنترل شده است. نتیجه ضمنی این روش آن است که درصد کوچکی از کل مساحت مزرعه درمعرض تردد ماشین ها قرار گرفته و در عین صرفه جویی انرژی در فرایند کشش، باقی مانده سطح مزرعه نیز از خطر تراکم مصون می ماند. چنین روشی را شاید بتوان احیای سیستم هالکت[1] دانست (شکل ۲۰) که در زمان ارائه در سال ۱۸۵۸ بسیار گران قیمت محسوب می شد. نوع تکمیل شده سیستم هالکت در شکل ۲۱ دیده می شود که ماشینی عریض با واحد نیروی ویژه و قابلیت حرکت جانبی است.



شکل ۲۰- تردد کنترل شده با استفاده از دو موتور بخار در مسیر مشخص که توسط هالکت در سال ۱۸۵۸ به تصویر کشیده شده است [پارتریج، ۱۹۷۳، طراحی از S. Tinker].



شکل ۲۱- نسخه جدید: ماشین عریض مورد استفاده در تحقیقات مربوط به تردد کنترل شده در وزارت کشاورزی آمریکا [تیلور، ۱۹۸۵، طراحی از S. Tinker].

1- Halkett`s guideway system

امکان کاربرد ماشین های معمولی در چنین زمینه ای نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض آنکه تردد معمولی ماشین های کشاورزی همراه با ۱۵ درصد کاهش در مقدار محصول بالقوه باشد، در حالت تردد کنترل شده که فقط ۱۰ درصد سطح مزرعه در معرض تراکم است، حتی اگر هیچ گیاهی در خطوط تردد نروید، مقدار کل کاهش محصول تنها ۱۰ درصد خواهد بود. اگر کاهش محصول در خطوط تردد، ۵۰ درصد و در بقیه قسمت‌های زمین برابر صفر در نظر گرفته شود، مقدار کل کاهش محصول، تنها ۵ درصد خواهد بود. حرکت جانبی ماشین مزیت
اضافی است که نیاز به محل دور زدن ماشین ها را مرتفع نموده و لذا بر سطح قابل استفاده در کل مزرعه می‌افزاید.

۲-٤- خلاصه و نتیجه گیری

هدف این فصل ارائه یک دیدگاه کلی از مشکل فروسایی خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی بوده است. اصول روابط ماشین – خاک – گیاه به خوبی توضیح داده شده است، اما به علت وجود اثرات متقابل میان تغییرات زمانی و مکانی خاک ها و اقلیم همراه با شرایط متفاوت رشد گیاه، کمّی کردن این روابط دشوار است. تا کنون، در تحقیقات انجام شده، عوامل اصلی موثر در تراکم خاک شناسایی شده و ضمن بیان روش‌های اصلاح، توصیه هایی برای کاهش خطر تراکم از جمله: تنظیم زمان عملیات کشاورزی با توجه به شرایط رطوبتی خاک، الگو و شدت تردد و ویژگی های چرخ و بار وارده؛ شخم عمیق؛ افزودن مواد آلی؛ تناوب‌های ویژه با هدف حفظ سطح حاصلخیزی و مواد آلی ارائه گردیده است. ارایه و تکمیل راهبردهای کنترل شرایط فیزیکی خاک نیز امکان‌پذیر است اما اجرای آنها به ارزیابی هزینه – فایده، سیاست موجود و تغییرات بازار بستگی دارد. شرایط مذکور می تواند به معرفی روش های مناسب امکان سنجی[1] اقتصادی برنامه-های اصلاحی و تناوب‌های زراعی مفید و همچنین توسعه روش های متناسب و ادوات ارزان برای نشان دادن و پایش[2] درجه تراکم اراضی منجر گردد. توصیف آماری تراکم، خاک ورزی و اثر فرایندهای طبیعی بر ویژگی های خاک و همچنین تحلیل احتمال برای شرایط آب و هوایی باید به خدمت گرفته شده و به عنوان راهنمای تصمیم گیری میان مدت و بلند مدت به کار رود.

تهیه و تکمیل راهنماهای عملی همان اندازه مشکل است که به کارگیری و اجرای آنها. کولور و سی چاران (۱۹۸٦) خاطر نشان کرده اند که باید در جهت افزایش آگاهی عمومی در مورد فروسایی خاک اقدام شود، لیکن گیرت (۱۹۸٦) نشان داده است که در کانادا، تفاوت سود خالص در هکتار برای سیستم های کشت حفاظتی معین در مقایسه با سیستم های در حال فروسایی، تنها در دوره زمانی ۱۰ سال یا بیشتر از نظر اقتصادی معنی دار است. در فعالیت هایی که در مرز یک کشاورزی موفق قرار دارند، سیستم های حفاظتی چندان جالب توجه نیست. کولور و سی شاران (۱۹۸٦) به عوامل

1- Feasibility
2- Monitoring

موثر بر درجه پذیرش راهبردهای حفاظتی توسط زارعان، مانند عوامل شخصی (سن و تحصیلات زارع)، اقتصادی (اندازه مزرعه و سود خالص)، دولتی (کمک های مالی، فنی، تحقیقاتی) و فیزیکی (توپوگرافی و اقلیم) اشاره نموده اند.

در حال حاضر، از یک سو تحقیقات کشاورزی به جنبه های بهره وری و افزایش تولید سوق داده شده است که بهینه سازی آن با فشارهای اقتصادی کوتاه مدت محدود می شود. اما از سوی دیگر، حل مشکل فروسایی خاک فرایندی دراز مدت است و باید بجای حداکثر تولید، بر پایداری و دوام آن تاکید بیشتری شود. بدون توجه به پایداری تولید، خاک ها عاقبت به عنوان یک محیط رشد تامین کننده غذا، متروک خواهند شد و ... حکایت همچنان باقیست.

مراجع

Amir, I., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and R.S. Broughton. 1976. Soil compaction as a function of contact pressure and soil moisture content. Can. Agric. Eng. 18(1):54-57.

Barnes, K.K., W.M. Carleton, H.M. Taylor, R.I. Throckmorton, and G.E. Vanden Berg. 1971. Compaction of agricultural soils. ASAE Monograph, St. Joseph, MI.

Bernier, H., G. Bostock, G.S.V. Raghavan, and R.S. Broughton.1989. Subsoiling effects on moisture content and bulk density in the soil profile. Appl. Eng. Agric. 5(1):24-28.

Blake, G.R., W.W. Nelson, andR.R. Allmaras.1976. Persistence of sub-soil compaction in a Mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 943-948.

Boone, F.R. 1986. Towards soil compaction limits for crop growth. Neth. J. Agric. Sci.34:349-360.

Bowen, H.D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: G.F. Arkin and H.M.Taylor (eds.), Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE, St. Joseph, MI.

Cassel, D.K. 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. pp. 45-67. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Special Publ. No.44. Madison, WI.

Chancellor, W.J. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. Bull. 1881, Div. Agr. Sci., Univ. California, Davis.

Coote, F.R. 1980. The deterioration of agricultural land: How sick are our soils? Agrologist 9(4) : 12-14.

Culver, D., and R. Seecharan. 1986. Factors that influence the adoption of soil conservation technologies. Can. Farm Econ. 20(2) : 9-13.

Dann, P.R., A.G. Thomas, R.B. Cunningham, and P.H.R. Moore. 1987. Response by wheat, rape and field peas to pre-sowing herbicides and deep tillage. Aust. J. Exp. Agric. 27:431-437.

Dexter, A.R. 1986a. Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. Plant and Soil 95 : 123-133.

Dexter, A.R. 1986b. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. II. Entry of pea and wheat roots into sub-soil cracks. Plant and Soil 95 : 135-147.

Dexter, A.R., 1986c. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. III. Entry of pea and wheat roots into cylindrical biopores. Plant and Soil 95 : 149-161.

Dumanski, J. 1980. The agricultural land resource: Locating the loss. Agrologist 9(4):15-17.

Eriksson, J., I. Hakansson, and B. Danfors. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Bull. 354, Swed. Inst. Agr. Eng., Uppsala, Sweden. (Eng. Trans. by J.K. Aase).

Gameda, S., G.S. V. Raghavan, E. McKyes and R. Theriault. 1985. A reivew of subsoil compaction. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 970-978.

Gameda, S., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and R. Theriault. 1987a. Sub-soil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects. Soil and Tillage Res. 10: 113-122.

Gameda, S. , G .S. V. Raghavan, E. McKyes, and R. Theriault, 1987b. Sub-soil compaction in a clay soil. II. Natural alleviation. Soil and Tillage Res. 10: 123-130.

Gill, W .R. 1971. Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph, St. Joseph, MI.

Girt, J. 1986. The on-farrn economics of sustainability and public intervention. Can. Farm Econ. 20(2) : 3-8.

Gunjal, K.R. , and G .S. V. Raghavan, 1986. Economic analysis of soil compaction due to machinery traffic. App. Eng. Agric. 2(2) : 85-88.

Gunjal, K.R. , G. Lavoie, and G .S. V. Raghavan. 1987. Economics of soil compaction due to machinery traffic and implications for machinery selection. Can. J. Agric. Econ. 35: 591-603.

Gupta, S.C. , and R.R. Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. Adv. Soil Sci. 6: 65-100.

Gupta, S.C., A. Hadas, W.B. Voorhees, D. Wolf, W.E. Larson, and E.C. Schneider. 1985. Field testing of a soil compaction model. Int. Conf. Soil Dynamics Proc. 5: 979-994.

Gupta, S.C. , and W .E. Larson. 1982. Modelling soil mechanical behavior during tillage. pp. 151-178. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Spec. Pub. 44, Madison, WI.

Hadas, A., W.E. Larson, and R.Ri Allmaras. 1988. Advances in modeling machine-soil-plant interactions. Soil and Tillage Res. 11(4) : 349-372.

Hakansson, I. 1982. Long-term effects of vehicles with high axle load on subsoil compaction and crop response. 9th Conf., Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO) (Osijek, Yugoslavia), pp. 213-218.

Hakansson, I., W.B. Voorhees, and H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil and Tillage Res. 11(3):239-282.

Hettiaratchi, D.R.P., and J.R. O'Callaghan. 1980. Mechanical behaviour of agricultural soils. I. Agric. Eng. Res. 25: 239-259.

Hillel, D. 1987. Modeling in soil physics: A critical review. In: L.L. Boersma (ed.), Future developments in soil science research. Socil Sci. Soc. Am. , Madison, WI.

Lal, R., G.F. Wilson, and B.N. Okigbo. 1979. Changes in properties of an alfisol produced by various crop covers. Soil Sci. 127: 377-382.

Lambe, T.W. 1951. Soil testing for engineers. p. 165. Wiley, NY.

Larson, W.E., and G.J. Osborne. 1982. Tillage accomplishments and potential. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Spec. Pub.44, Madison, WI.

Lindstrom, M.J., W.B. Voorhees, and G.W. Randall. 1981. Long-term tillage effects on interrow runoff and infiltration. Soil Sci. Sco. Am. J. 45: 945-948.

Lovejoy, S.B., and T.L. Napier (eds.). 1986. Conserving soil: Insights from socioeconomic research. Soil Conservation Society of America, Ankeney, IA.

Meek, B.D., E.A. Rechel, L.M. Carter, and W.R. DeTar. 1988. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone production systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:232-236.

Mehuys, G.R. 1984. So~1 degradatio~ of agricultural land in Quebec. A review and Impact assessment. Science Council of Canada, Ottawa.

Mohammad, F. 1987. Sugarbeet development under conservation tillage. M.Sc. thesis, McGill University, Montreal, Canada.

Negi, S.C., E. McKyes, G.S.V. Raghavan, and F. Taylor. 1981. Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. I. Terramechanics 18(2):81-90.

Oldeman, L.R. et al. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation, An explanatory note. ISRIC, Wageningen.

Ohu, J.O., G.S.V. Raghavan, and E. McKyes. 1985a. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. Trans. ASAE, 28(2): 201-424.

Ohu, J.O., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, K.A. Stewart, and M.A. Fanous, 1985b. The effects of soil compaction and organic matter on the growth of bush beans. Trans. ASAE 28(4): 1056-1061.

Ohu, J.O., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and G. Mehuys. 1986. Shear strength prediction of compacted soils with varying organic matter content. Trans. ASAE 29(2):351-355.

Partridge, M. 1973. Farm tools through the ages. Osprey, Reading, Berk. United Kingdom.

Perumpral, J.V. 1987. Cone penetrometer applications-A review. Trans. ASAE 30(4):939-944.

Pollock, D., Jr., J. V. Perumpral, and T. Kuppusamy. 1986. Finite element analysis of multipass effects of vehicles on soil compaction. Trans. ASAE 29(1) :45-50.

Raghavan, G .S. V., P. Alvo and E. McKyes. 1990. Soil compaction in agriculture: A view toward managing the problem. In: Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). Advances in soil science, Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Raghavan, G.S. V. 1985. Methods of alleviating soil compaction. Soil Compaction Conf. (Ohio State Univ., Columbus, OH), April 1985.

Raghavan, G .S. V. , and E. McKyes. 1977. Laboratory study to determine the effect of slip-generated shear on soil compaction. Can. Agric. Eng. 19(1) : 40-42.

Raghavan, G .S. V. , and E. McKyes. 1978. Statistical models for predicting compaction by off-road vehicular traffic in different soil types. J. Terramechanics, 15(1) : 1-14.

Raghavan, G.S. V., and E. McKyes. 1983. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. J. Terramechanics 19(4) : 235-242.

Raghavan, G .S. V. , E. McKyes, M. Chasse, and F. Merineau. 1976a. Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil. Can. J. Plant Sci. 56 : 505-509.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, I. Amir, M. Chasse, and R.S. Broughton. 1976b. Prediction of soil compaction due to off-road vehicle traffic. Trans. ASAE 19:610-613.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, and B. Beaulieu. 1977a. Prediction of clay soil compaction. J. Terramechanics 14(1):31-38.

Raghavan, G .S. V. , E. McKyes, and M. Chasse. 1977b. Effect of wheel slip on soil compaction. J. Agric. Eng. Res. 22:79-83.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, G. Gendron, B. Borglum, and H.H. Le. 1978a. Effects of soil compaction on development and yield of corn (maize). Can. J. Plant Sci. 58: 435-443.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, and B. Beaulieu. 1978b. Clay soil compaction due to wheel slip. Trans. ASAE 21(4) : 646-649,653.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, F. Taylor, P. Richard, and A. Watson. 1979. The relationship between machinery traffic and corn yield reactions in successive years. Trans. ASAE 22: 1256-1259.

Raghavan, G.S. V., and J.O. Ohu. 1985. Prediction of equivalent pressure of Proctor compaction blows. Trans. ASAE 28(5) : 1398-1400.

Raghavan, G .S. V. , F. Taylor, B. Vigier, L. Gauthier, and E. McKyes. 1982. Effect of compaction and root rot disease on development and yield of peas. Can. J. Agric. Eng. 24(1) : 31-34.

Sheptukhov, V.N., A.I. Voronin, and M.A. Shipilov. 1982. Bulk density of the soil and its productivity. Soviet Soil Sci. 14(5) : 97-107.

Soane, B.D. 1985. Traction and transport systems as related to cropping systems. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 863-935.

Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson, and D.J. Painter. 1981a. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. Soil and Tillage Res. 1: 207-237.

Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson, and D.J. Painter. 1981b. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. Soil and Tillage Res. 1 :373-400.

Soane, B.D., and F.R. Bonne, 1986. The effects of tillage and traffic on soil structure. Soil and Tillage Res. 8: 303-306.

Soane, B.D. , J .W .Dickson, and D.J. Campbell. 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review. III. Incidence and control of compaction in crop production. Soil and Tillage Res. 2: 3-36.

Soehne, W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agric. Eng. 39: 276-281,290.
Taylor, J.H. 1985. ~ontrolled traffic: A spin-off of soil dynamics research. Int.Conf SoIl Dynamlcs Proc. 5: 1101-1111.

Taylor, J.H., and W .R. Gill. 1984. Soil compaction: State-of-the-art report. I. Terramechanics 21 (2) : 195-213.

Tisdall, J.M., and H.H. Adem. 1986. Effect of water content at tillage on size distribution of aggregates and infiltration. Aust. J. Exp. Agric. 26: 193-195.

Van Doren, D.M., R.R. Allmaras, D.R. Linden, and F.D. Whisler (Organ. Committee). 1982. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Pub. 44, Madison, WI.

Vepraskas, M.J. 1988. A method to estimate the probability that sub-soiling will increase tobacco yields. Soil Sci. Am. J. 52: 229-232.

Vigier, B., and G.S.V. Raghavan. 1980. Soil compaction effect in clay soils on common root rot in canning peas. Can. Plant Disease Survey 60(4) :43-45.

Voorhees, W.B. 1977. Soil compaction: Our newest natural resource. Crops Soils Mag. 29: 13-15.

Voorhees, W.B. 1980. Energy aspects of controlled wheel traffic in the Northern Corn Belt of the Unied States. Proc. Int. Soil Tillage Res. Organization, 8th Conf 1979 (Univ. of Hohenheim, Germany) 2: 333-338.

Voorhees, W.B., W. W. Nelson, and G. W. Randall. 1985. Soil and crop response to wheel traffic on highly productive soils of the northern corn belt. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 1120-1131.

Voronin, A.I. 1982. Bulk density of an irrigated Chestnut soil and its productivity. Soviet Soil Sci. 14(3) : 78-84.

Webb, R.H., J. W. Steiger, and H.G. Wilshire. 1986. Recovery of compacted soils in Mojave Desert ghost towns. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1341-1344.