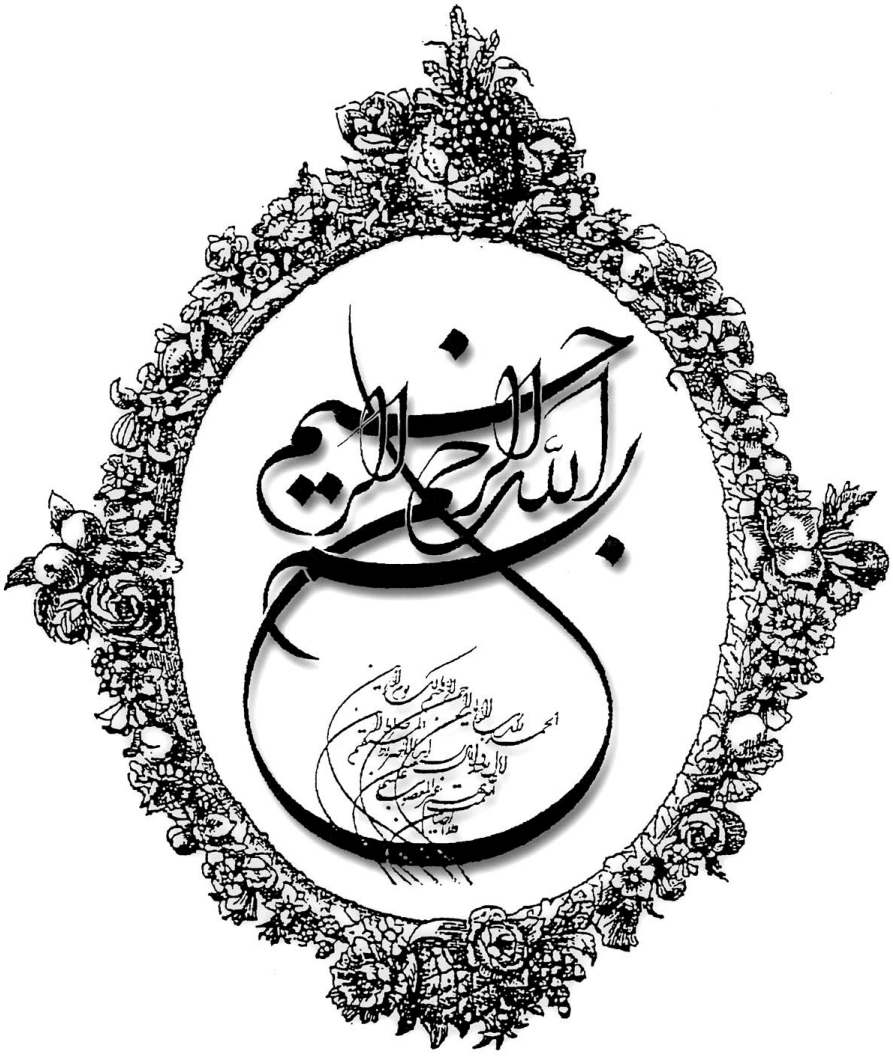

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده کشاورزی

رابطه نشست زیر چرخ‌های تراکتور با خواص فشردگی و شاخص مخروط دینامیکی خاک در شرایط رطوبتی مختلف

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی

مرتضی یعقوبی طاسکوه

اساتید راهنما
دکتر عباس همت
دکتر امین اله معصومی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک ماشین‌های کشاورزی آقای مرتضی یعقوبی طاسکوه

تحت عنوان

رابطه نشست زیر چرخ‌های تراکتور با خواص فشردگی و شاخص‌های مقاومت مکانیکی خاک در شرایط رطوبتی مختلف

در تاریخ ۹۰/۱۱/۱۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر عباس همت
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر امین‌اله معصومی
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمدرضا مصدقی
۴- استاد داور	دکتر علی اسحق بیگی
۵- استاد داور	دکتر منوچهر حیدرپور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر احمد ریاسی

تشکر و قدردانی

خداوند بزرگ را شاکرم که به من سزاواری شاگردی اساتید بزرگی را در طول زندگی‌ام عطا فرمود.

بر دستان پرمهر و با عطوفت پدر و مادر مهربانم که همواره در مسیر زندگی روشن‌گر راه زندگی‌ام بودند، بوسه می‌زنم و برای آنان طول عمر و سلامتی در سایه توجه خداوند بزرگ آرزومندم.

بر خود لازم می‌دانم بی‌نهایت قدردانی و تشکر خویش را به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند و زحمات بی‌دریغ استاد فرزانه‌ام جناب آقای پروفسور عباس همت ابراز نمایم، که علاوه بر رهنمون‌های علمی، درس زندگی نیز به من آموختند. از خداوند منان توفیق روز افزون و موفقیت‌های بیشتر در تمام مراحل زندگیشان را آرزومندم.

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر امین‌اله معصومی بابت راهنمایی‌های ارزنده شان بی‌نهایت سپاسگزارم.

شایسته است از جناب آقای دکتر محمدرضا مصدقی که مشاورت پایان نامه را بر عهده داشتند و تلمذ در محضرشان موجب رشد علمی بنده گردیده است سپاسگذاری نمایم و از خداوند بزرگ موفقیت‌های روز افزون در تمام مراحل زندگی‌شان را خواهانم.

از جناب آقای پروفسور منوچهر حیدرپور و آقای دکتر علی اسحق‌بیگی که زحمت داوری و بازخوانی پایان‌نامه را متقبل شدند، کمال قدردانی را می نمایم.

در پایان از آقایان مهندس منوچهر یعقوبی و مهندس حسن کاظمی که محبت و لطفشان، انجام این پژوهش را میسر نمود، صمیمانه تشکر می‌کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و گرانقدرم که همواره روشنگر راه زندگانی‌ام بودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده..... ۱

فصل اول: مقدمه..... ۳

۱- ۱- مقدمه..... ۳

۱-۲- اهداف پژوهش..... ۴

فصل دوم: بررسی منابع..... ۵

۲-۱- تراکم خاک..... ۵

۲-۲- شاخص‌های تعیین تراکم‌پذیری خاک..... ۶

۲-۳- عوامل ماشینی موثر بر نشست خاک زیر وسیله زمین گیرائی..... ۸

۲-۳-۱- بار محوری..... ۹

۲-۳-۲ – فشار تماسی..... ۱۰

۲-۳-۳-فشار بادلاستیک ۱۱

۲-۳-۴-ابعاد نوع لاستیک..... ۱۲

۲-۳-۵- پیکربندی چرخ (تک-چرخ، جفت-چرخ و جفت محور..... ۱۳

۲-۳-۶- تعداد تردد..... ۱۴

۲-۴- ویژگی‌ها و شرایط خاکی موثر بر نشست خاک زیر وسایل زمین گیرائی ۱۵

۲-۴- ۱- بافت خاک..... ۱۶

۲-۴-۲- رطوبت خاک..... ۱۶

۲-۴-۳- سیستم خاک‌ورزی..... ۱۷

۲-۵- شاخص‌های ظرفیت باربری و حساسیت به تراکم خاک..... ۱۷

۲-۶- پارامترهای موثر بر σ_{pc}، C_c و C_s..... ۱۹

۲-۷- روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی تعیین منحنی فشردگی خاک..... ۱۹

۲-۷-۱- آزمایش فشاری تک محوری (ادومتر)..... ۱۹

۲-۷-۲- آزمایش فشردگی محصور..... ۲۰

۲-۷-۳- آزمایش نشست صفحه‌ای ۲۰

۲-۸- روش‌های تعیین σ_{pc}، C_c و C_s با استفاده از منحنی فشردگی خاک..... ۲۰

۲-۹- توابع انتقالی..... ۲۴

فصل سوم: مواد و روش ها..... ۲۶

۳-۱- مشخصه‌های عمومی ایستگاه تحقیقاتی و محل آزمایش..... ۲۷
۳-۲- عملیات تهیه زمین..... ۲۷
۳-۳- آزمایش‌های مقدماتی..... ۲۷
۳-۳-۱- بافت خاک..... ۲۷
۳-۳-۲- حد خمیری خاک..... ۲۷
۳-۳-۳- چگالی ظاهری و مقدار رطوبت اولیه ۲۸
۳-۴- آزمایش‌های اصلی..... ۲۸
۳-۴-۱- تیمارهای آزمایش..... ۲۸
۳-۴-۲-روش اجرای آزمایش..... ۳۲
۳-۴-۳- اندازه‌گیری عمق و پهنای نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور..... ۳۳
۳-۴-۴- اندازه‌گیری شاخص مخروط شبه استاتیکی..... ۳۳
۳-۴-۵- اندازه گیری شاخص مخروط دینامیکی..... ۳۴
۳-۴-۶- نمونه برداری خاک در مزرعه..... ۳۷
۳-۴-۷- تهیه نمونه‌های کوچک از سیلندرهای بزرگ نمونه برداری ۳۷
۳-۴-۸- آزمایش نشست صفحه‌ای..... ۳۸
۳-۴-۹- آزمایش فشردگی محصور..... ۳۸
۳-۵- روش تعیین تنش پیش- تراکمی خاک در آزمایش‌های فشردگی محصور و نشست صفحه‌ای..... ۳۹
۳-۶-استخراج پارامترهای مکانیکی خاک با استفاده از روش‌های برازش توابع ریاضی..... ۴۱
۳-۶-۱- روش برازش توابع ریاضی..... ۴۱
الف- آزمایش نشست صفحه‌ای..... ۴۱
ب) آزمایش فشردگی محصور..... ۴۲
۳ -۶-۲- روش عددی..... ۴۲
۳-۷- تجزیه و تحلیل آماری..... ۴۴
فصل چهارم: نتایج و بحث..... ۴۶
۴-۱- بافت و حدپایداری خاک..... ۴۶
۴-۲- نشست خاک زیر چرخ..... ۴۶
۴-۳- مقاومت شبه استاتیکی خاک..... ۵۵
۴-۴- چگالی ظاهری خاک..... ۶۵
۴-۵- مقاومت دینامیکی خاک..... ۷۰
۴-۶- تنش پیش‌تراکمی در آزمایش فشردگی محصور..... ۷۵
۴-۷- شاخص تراکم خاک..... ۸۵
۴-۸- تنش پیش‌تراکمی در آزمایش نشست صفحه‌ای ۹۰
۴-۹- ضریب تغییر شکل‌پذیری..... ۹۹
۴-۱۰- مقایسه روش‌های مختلف تعیین σ_{pc} در آزمایش CCT..... ۱۰۳
۴-۱۱- مقایسه روش‌های مختلف تعیین σ_{pc} در آزمایش PST..... ۱۰۵
۴-۱۲- رابطه بین σ_{pc} در آزمایش‌های CCT و PST..... ۱۰۸

۴-۱۳-تعیین رابطه بین شاخص تراکم و ضریب تغییر شکل‌پذیری خاک ۱۰۹
۴-۱۴- رابطه بین تنش پیش-تراکمی با شاخص فشردگی، چگالی ظاهری، مقاومت شبه استاتیکی و دینامیکی خاک ۱۰۹
۴-۱۵- رابطه بین نشست خاک با تنش پیش تراکمی، چگالی ظاهری، مقاومت شبه استاتیکی و دینامیکی خاک ۱۱۴
۴-۱۶- رابطه بین چگالی ظاهری و مقاومت شبه استاتیکی و مقاومت دینامیکی خاک ۱۲۰
۴-۱۷- تاثیر سطوح متفاوت رطوبت و ترکیب نوع تراکتور، حالت خاک و تعداد تردد بر نشست، تنش پیش-ترکمی، مقاومت شبه استاتیکی و دینامیکی خاک ۱۲۳
۴-۱۸- رابطه رگرسیونی بین پارامترهای رطوبت، چگالی ظاهری، مقاومت شبه استاتیکی و دینامیکی با خواص فشردگی ۱۲۵
۴-۱۹- رابطه رگرسیونی بین پارامترهای تنش پیش- تراکمی، شاخص فشردگی، رطوبت، چگالی ظاهری، مقاومت شبه استاتیکی و دینامیکی با نشست خاک زیر چرخ تراکتور ۱۲۸
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۳۰
۵-۱- نتیجه گیری کلی ۱۳۰
۵-۲- پیشنهادها ۱۳۲
پیوست ۱۳۳
منابع ۱۴۰

چکیده

خاک یک محیط کشت پیچیده و یک منبع تجدیدناپذیر و باارزش می‌باشد. بنابراین نیاز است تا با مدیریت مناسب از تخریب فیزیکی آن به وسیله فرسایش یا تراکم جلوگیری شود. شدت، عمق و مکان پیدایش تراکم در خاک به پارامترهای ماشینی (شامل: بار محوری، فشار تماسی، فشار باد لاستیک، نوع و ابعاد لاستیک، پیکربندی چرخ (تک-چرخ، جفت-چرخ و جفت-محور)، نوع ادوات، سرعت و تعداد تردد ماشین‌ها بر سطح خاک) و ویژگی‌های خاکی (شامل: ساختمان ، بافت، کانی‌های خاک، چگالی ظاهری، رطوبت، ترکیبات معدنی، ماده آلی) بستگی دارد. اهداف انجام این پژوهش عبارت بودند از: الف) بررسی ارتباط نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور با چگالی ظاهری (BD) ، مقاومت شبه استاتیکی (CI) و مقاومت دینامیکی(DCI)، ب) تعیین تنش پیش- تراکمی (σ_{pc}) خاک (با دو روش فشردگی محصور (CCT) و نشست صفحه‌ای (PST)) در مسیر عبور تراکتور و ج) بررسی ارتباط بین مقدار نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور در رطوبت‌های مختلف و تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc}) و در راستای این اهداف، طرحی با چندین حالت تردد (۰، ۱، ۲ و ۳ بار عبور) با دو نوع تراکتور (سبک، MF285 و نیمه‌سنگین، MF6290) در دو حالت خاک (شخم‌خورده و شخم‌نخورده) و در سه سطح رطوبتی (۰/۹PL، PL و ۱/۱PL ، PL = حد خمیری خاک) در یک خاک لوم رسی در مزرعه پژوهشی لورک دانشگاه صنعتی اصفهان اجرا گردید. پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک شامل: عمق نشست خاک (d_R)،σ_{pc}، شاخص تراکم (C_c)، BD، CI و DCI بود. مقادیر σ_{pc} ، C_c با تهیه نمونه‌های دست‌نخورده تحت شرایط مختلف آزمایشی در خط مرکزی اثر چرخ تراکتور و انتقال به آزمایشگاه با دو روش CCT و PST بدست آمد و همچنین مقادیر چگالی ظاهری و رطوبت خاک نیز همزمان اندازه گیری شد. d_R ، CI و DCI نیز در محل تهیه نمونه خاک، اندازه‌گیری گردید. برای استخراج ویژگی‌های فشردگی خاک از روی منحنی‌های تنش-نشست در آزمایش PST و تنش-کرنش در آزمایش CCT از روش‌های کاساگراند عددی و ریاضی، بیشینه انحنا و تقاطع خط فشردگی بکر با محور X ها استفاده شد. نتایج نشان داد که با تغییر حالت خاک از شخم‌خورده به شخم‌نخورده، مقادیر d_R و C_c به ترتیب ۳۳/۹ و ۹/۹ درصدکاهش و مقادیر BD، CI، DCI و σ_{pc} به ترتیب ۱/۶، ۸/۷ ، ۲۳/۱ و ۱۹/۱ درصد افزایش یافت. با افزایش رطوبت از ۰/۹PL به PL مقادیر d_R و BD به ترتیب ۱۱/۲ و ۱۸/۳ درصد افزایش و مقادیرDCI ، CI، σ_{pc} و C_c به ترتیب ۵، ۸، ۱۶/۵ و ۳٪ کاهش یافت. همچنین با افزایش رطوبت از PL به ۱/۱PL مقادیر d_R و BD به ترتیب ۵ و ۴/۴ درصد افزایش و مقادیرDCI ، CI، σ_{pc} و C_c به ترتیب۷/۷، ۵، ۷/۲ و ۲ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد که روابط خطی مشابهی بین σ_{pc}، CI و DCI با چگالی ظاهری و رطوبت خاک وجود دارد. همچنین روابط خطی بین σ_{pc} (حاصل از PST و CCT) با CI و DCI استخراج گردید. بنابراین با استفاده از فروسنج (شبه استاتیکی یا دینامیکی) می‌توان ظرفیت باربری خاک را بدون انجام آزمایش‌های تراکم‌پذیری تخمین زد. از میانگین شاخص مخروط لایه ۱۵-۰ سانتی‌متری خاک می‌توان به عنوان شاخص مقاومت مکانیکی خاک به جای σ_{pc} استفاده نمود. نتایج نشان داد که در صورتی که فشار تماسی بیشتر از σ_{pc} خاک باشد، نشست قابل ملاحظه ای در خاک ایجاد می‌گردد و بنابراین، مقاومت فشردگی (σ_{pc}) اندازه‌گیری شده با CCT یا PST می‌تواند به عنوان تنش در آستانه تراکم خاک‌های مناطق مرکزی ایران استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، تراکتور، تنش پیش- تراکمی، نشست خاک، مقاومت دینامیکی

فصل‌اول
مقدمه و اهداف

۱-۱- مقدمه

تراکم خاک به‌طور گسترده در طول یک قرن اخیر بررسی شده است، اما پژوهش‌ها و بررسی‌ها در این زمینه جهت ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش آن هم‌چنان ادامه دارد. خاک هنگامی متراکم می‌شود که نیروهای درونی یا بیرونی وارده به آن بیش‌تر از مقاومت مکانیکی خاک باشد. تراکم روی بسیاری از ویژگی‌ها و فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تاثیر می‌گذارد و منجر به دشواری‌های محیطی (فرسایش بادی و آبی) و کشاورزی (کاهش رشد ریشه و عملکرد محصول) می‌شود [۳۹].

دلیل اصلی تراکم خاک، که یکی از مشکلات اصلی پیش‌روی کشاورزی مدرن است و خاک و محصولات کشاورزی را تهدید می‌کند و باعث نگرانی‌هایی در سطح جهانی شده است، تردد ماشین‌های سنگین (به علت نیاز به توان بیشتر جهت عملیات کشاورزی) در شرایط نامناسب رطوبتی می‌باشد. عمق نشست و تغییرشکل خاک

حاصل از تردد ماشین‌های کشاورزی که اولین شاخصه قابل روئیت برای ارزیابی تراکم خاک محسوب می‌شود، نتیجه‌ی مقاومت مکانیکی کم خاک و بنابراین ظرفیت باربری کم خاک می‌باشد.

تراکم خاک حاصل از عبور تراکتور روی سطح مزرعه به صورت سه ناحیه در نیم‌رخ خاک قابل مشاهده می‌باشد: ۱) تراکم خاک رویین، که تنها به فشار تماسی وسیله زمین- گیرائی بستگی دارد، ۲) تراکم بخش فوقانی خاک زیرین (تراکم خاک زیرین فوقانی) که به بار محوری تراکتور و فشار تماسی وسیله زمین- گیرائی مرتبط است و ۳) تراکم بخش تحتانی خاک زیرین (تراکم خاک زیرین تحتانی) که تنها به بار محوری بستگی دارد [۶۶].

تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک، نیازمند ارائه شاخصی است که مقدار تغییر در ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی ظاهری، تخلخل و نسبت پوکی خاک و ویژگی‌های مکانیکی برای تعیین حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک شامل شاخص مخروط ایستائی، دینامیکی، تنش پیش- تراکمی و شاخص فشردگی را نشان دهد. همچنین نشست خاک زیر چرخ‌های تراکتور نیز فاکتوری موثر جهت ارزیابی تراکم‌پذیری خاک می-باشد.

۲-۲- اهداف پژوهش

افزایش پیوسته وزن و اندازه ماشین‌های کشاورزی و تاثیر منفی آن‌ها بر ساختار خاک و رشد و عملکرد محصول باعث نگرانی‌هایی در دهه‌های اخیر شده است. در کشاورزی مدرن، تولید کشاورزی وابسته به تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه می‌باشد، به گونه‌ای که عملیات خاک‌ورزی،کاشت، داشت و برداشت بدون تراکتور و کمباین غیرقابل‌تصور است. استفاده پی در پی از ماشین‌های کشاورزی سنگین در شرایط نامطلوب خاک تراکم خاک را افزایش می‌دهد.

در این پژوهش علاوه بر خواص فیزیکی (BD) و مکانیکی (شاخص مخروط، CI)، از شاخص مخروط دینامیکی (DCI) و خواص فشردگی خاک (تنش پیش-تراکمی (σ_{pc}) وشاخص تراکم (C_c)) نیز استفاده شد. اهداف ویژه این پژوهش عبارت بودند از:

بررسی رابطه نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور با چگالی ظاهری (BD) اولیه خاک و شاخص مخروط (CI)،

طراحی و ساخت یک دستگاه فروسنج دینامیکی،

بررسی ارتباط نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور با شاخص مخروط دینامیکی (DCI)،

تعیین خواص فشردگی خاک (σ_{pc} و C_c)، با استفاده از آزمایش‌های فشردگی محصور (CCT) و نشست صفحه‌ای (PST) قبل و بعد از عبور تراکتور

بررسی ارتباط بین مقدار نشست خاک در زیر چرخ‌های تراکتور با تنش پیش تراکمی(σ_{pc}).

فصل دوم
بررسی منابع

۲-۱- تراکم خاک

خاک یک محیط کشت پیچیده و یک منبع تجدید ناپذیر و باارزش می‌باشد که در معرض یک سری از فرآیندها یا تهدیدهای تخریبی می‌باشد که تراکم خاک یکی از آنهاست[۶۶]. تراکم خاک عبارت است از کاهش تخلخل خاک همراه با خروج هوا از آن [۴]. خاک هنگامی متراکم می‌شود که نیروهای درونی یا بیرونی وارده به آن بیش‌تر از مقاومت مکانیکی خاک باشد. تراکم بر بسیاری از ویژگی‌ها و فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تاثیر می‌گذارد و منجر به مشکلات محیطی (فرسایش بادی و آبی) و کشاورزی (کاهش رشد ریشه و عملکرد محصول) می‌شود [۳۹]. فشردگی خاک یکی از عوامل محدودکننده رشد گیاه و عملکرد

محصول در شرایط دیم (کم باران و پر باران) است. تراکم خاک بر نرخ حرکت آب و هوا در خاک و دسترسی ریشه به عناصر غذایی اثر می‌گذارد. بنابراین، در خاک متراکم رشد ریشه گیاه محدود شده و ریشه برای رشد طولی و عرضی خود نیاز به صرف انرژی بیش‌تری نسبت به خاک بدون تراکم دارد [۶۹].

تراکم خاک ممکن است موجب کاهش در تخلخل، تغییر شکل منافذ و تغییر توزیع اندازه منافذ خاک[۲۷]گردد و در نتیجه باعث کاهش نرخ نفوذ هوا [۶۴] و آب به خاک [۳۹] شود. بنابراین، تراکم می‌تواند موجب افزایش روان آب همراه با فرسایش خاک گردد [۲۷]. هم‌چنین تراکم خاک موجب کاهش هدایت هیدرولیکی [۴۴]، افزایش چگالی ظاهری [۳۹]، مقاومت مکانیکی و تخریب بخشی از ساختمان خاک [۴۱] و در نتیجه منجر به کاهش نفوذپذیری ریشه و عملکرد محصول [۶۹] و افزایش فرسایش ادوات کشاورزی و توان مورد نیاز جهت خاک‌ورزی [۶۶] می‌شود.

تراکم حاصل از عبور تراکتور روی سطح مزرعه در سه ناحیه در نیم‌رخ خاک قابل مشاهده می‌باشد: ۱) تراکم خاک رویین، که تنها به فشار تماسی وسیله زمین -گیرائی بستگی دارد، ۲) تراکم در بخش فوقانی خاک زیرین (تراکم خاک زیرین فوقانی) که به بار محوری تراکتور و فشارتماسی وسیله زمین- گیرائی مرتبط است و ۳) تراکم در بخش تحتانی خاک زیرین (تراکم خاک زیرین تحتانی) که فقط به بار محوری بستگی دارد [۶۶].

۲-۲- شاخص‌های ارزیابی تراکم‌پذیری خاک

تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک، نیازمند ارائه شاخصی است که مقدار تغییر در ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی ظاهری، تخلخل و نسبت پوکی خاک و ویژگی‌های مکانیکی برای تعیین حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک شامل شاخص مخروط شبه ایستائی، دینامیکی، تنش پیش- تراکمی و شاخص فشردگی را نشان دهد. همچنین نشست خاک زیر چرخ‌های تراکتور نیز فاکتوری موثر جهت ارزیابی تراکم-پذیری خاک می‌باشد.

از روش‌های متفاوتی برای ارزیابی تراکم‌پذیری خاک‌ها تاکنون استفاده شده است. پارامترهایی که بطور گسترده استفاده می‌شود شامل چگالی ظاهری خاک (هاکانسون، ۱۹۸۸)، مقاومت مکانیکی خاک (پاگلیای، ۱۹۹۸)، نرخ نفوذپذیری هوایی به خاک (بال، ۱۹۸۱)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (آلکاکو، ۱۹۹۶)، تغییرات در تخلخل (سوئن، ۱۹۵۸)، توزیع اندازه منافذ (اریکسون، ۱۹۸۲)، نسبت پوکی (کولن، ۱۹۷۴) و تنش پیش- تراکمی (هورن، ۱۹۸۱) می‌باشند.

برای تعیین درجه تراکم خاک می‌توان مقاومت مکانیکی خاک را اندازه‌گیری کرد. یکی از روش‌های معمول اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در مزارع، استفاده از فروسنج مخروطی شبه ایستائی که شاخصی تحت عنوان شاخص مخروط ارائه می‌کند. شاخص مخروط خاک میزان مقاومتی است که خاک در مقابل نفوذ یک جسم مخروطی، با ابعاد استاندارد از خود نشان می‌دهد و معیاری برای سنجش فشردگی عمودی خاک می-باشد در واقع شاخص مخروطی شاخصی از استحکام و تغییرشکل‌پذیری خاک است. یکی دیگر از روش‌های

معمول اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در مزارع استفاده از فروسنج مخروطی دینامیکی (افتان) است که یک جایگزین مناسب و ساده برای دستگاه پره برشی جهت دستیابی سریع به مقاومت مکانیکی خاک می‌باشد [۳۷].

تخلخل و توزیع اندازه منافذ خاک شاخصی از شرایط ساختاری خاک است. توزیع اندازه منافذ خاک اندازه، شکل و پیوستگی منافذ خاک که بر فرایندهای خاک موثرند را بیان می‌کند، از این‌رو کیفیت ساختمان خاک را بیان می‌کند [۵۹].

تهویه خاک یک جنبه مهم از کیفیت فیزیکی خاک است که در خاک‌های متراکم توسعه ریشه و رشد گیاه و تولید محصول را محدود می‌کند. هوادهی خاک فعالیت زیستی در خاک را با تامین اکسیژن کافی برای ارگانیسم‌های خاک فراهم می‌کند [۷۱].

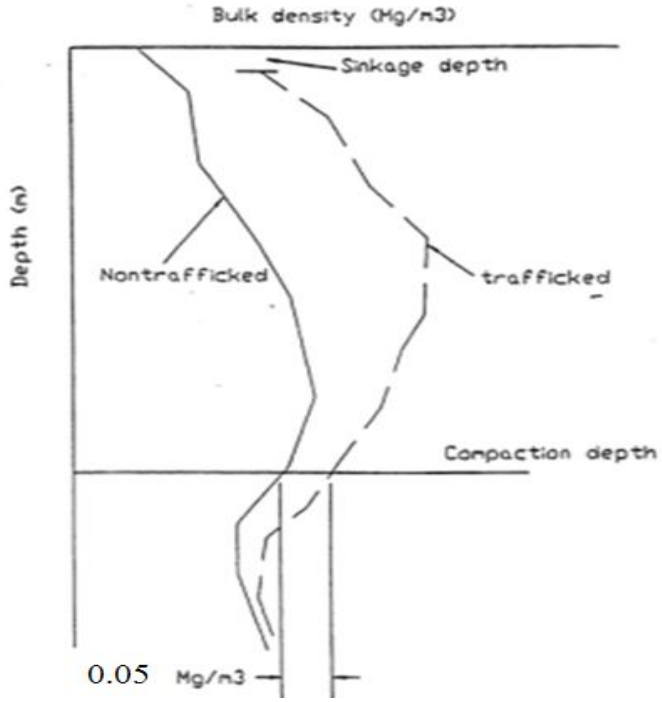
افزایش چگالی ظاهری خاک بعنوان شاخص تراکم و تراکم‌پذیری خاک معرفی می‌شود. شاخص مخروطی دو مزیت عمده نسبت به چگالی ظاهری دارد: ۱) مقادیر شاخص مخروطی با صرف وقت کم‌تر و آسان‌تر بدست می‌آیند و ۲) مقادیر شاخص مخروط را می‌توان در میان خاک‌های مختلف، آسان‌تر از چگالی ظاهری با هم مقایسه کرد [۶۶] و ۳) مقاومت یا شاخص مخروط تابع رطوبت، چگالی ظاهری و ... است و اثر ترکیبی آنها را بر رشد گیاه می‌تواند بیان کند.

از شاخص‌های مهمی که اغلب بعنوان معیاری برای ارزیابی فشردگی‌پذیری خاک استفاده می‌شود تنش پیش-تراکمی می‌باشد. هدف اصلی از تعیین تنش پیش-تراکمی خاک، ارزیابی تنش در آستانه تراکم در برابر تنش‌های وارده بر آن می‌باشد که به مدیریت مناسب و پایدار خاک کمک می‌کند [۴۷].

یکی دیگر از شاخص‌های بررسی تراکم‌پذیری خاک رویین، میزان نشست یا شیار ناشی از تردد چرخ‌های تراکتور و ماشین‌های کشاورزی است، که به شرایط اولیه خاک، بار محوری، فشار باد تایر و تعداد تردد بستگی دارد (). نشست خاک هنگامی رخ می‌دهد که مقاومت خاک بوسیله عملیات خاک‌ورزی یا افزایش رطوبت، کاهش یابد.

ارباک (۱۹۹۵) بیان کرد عمق تراکم در نقطه‌ای است که تفاوت جرم مخصوص ظاهری(BD) در خاک بدون تردد و با تردد به $\frac{Mg}{m^3}$ ۰/۰۵ برسد (شکل۲-۱). بنابراین خاک‌ورزی تا زیر این عمق نیاز است تا اثر تردد ماشین‌ها بر تراکم خاک را بهبود بخشد. همچنین عمق تراکم در نقطه‌ای تعریف می‌شود که مقاومت مکانیکی خاک بزرگ‌تر از ۲ مگاپاسکال گردد که یک مقدار بحرانی برای نفوذ ریشه در خاک می‌باشد[۱۱]. آدام و ارباک (۱۹۹۵) بیان نمودند که بر اساس پژوهش‌های پیشین و مطابق با پژوهش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، عمق تراکم (Y) مرتبط با عمق نشست (X) خاک زیر چرخ را می‌توان با معادله تجربی $Y = b\ X^m$ بیان نمودکه b و m ثابت‌های رگرسیون می‌باشند. عمق تراکم و عمق نشست با افزایش رطوبت و بار اعمالی، افزایش می‌یابند.

در کشاورزی مکانیزه، شدت تراکم خاک به دو فاکتور بستگی دارد: ۱) بار اعمالی، که به مشخصه‌های ماشین‌های کشاورزی بستگی دارد و ۲) مقاومت مکانیکی خاک، که به ویژگی‌های ذاتی (بافت و ماده آلی خاک) و مشخصه‌های گذار خاک همچون رطوبت، چگالی ظاهری و ریز ساختار خاک بستگی دارد [۶۹].



شکل ۲-۱- چگونگی تغییرات چگالی ظاهری در نیم‌رخ خاک پیش و پس از تردد یک ماشین و استفاده از تفاوت آن‌ها جهت تعیین عمق تراکم خاک [۱۱].

۲-۳- عوامل ماشینی موثر بر نشست خاک زیر وسیله زمین- گیرائی

در کشاورزی مدرن، تولید کشاورزی وابسته به تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه می‌باشد، به گونه‌ای که عملیات خاک‌ورزی،کاشت، داشت و برداشت بدون تراکتور و کمباین غیرقابل‌تصور است. آسیب ناشی از تردد ممکن است به صورت قابل مشاهده در سطح خاک و یا به صورت غیرقابل‌مشاهده در لایه های زیرین خاک رخ داده باشد که در هر دو صورت آثار منفی بر تولید محصول می‌گذارد [۱۱].

استفاده از ماشین‌های سنگین در کشاورزی در حال افزایش است که خطر ناشی از تراکم خاک رویین و زیرین را افزایش می‌دهد. از این رو جهت حفظ حاصلخیزی فیزیکی خاک، به راه حل‌های فنی برای کاهش اثر تراکم خاک تحت بارهای سنگین و در رطوبت‌های نامناسب خاک نیاز است. برای حل مشکل فشردگی خاک مدیریت پارامترهای موثر ماشین که اولین و کم هزینه‌ترین روش کاهش فشردگی خاک می‌باشد، مورد نیاز است. از جمله راهکارهای کاهش فشردگی خاک عبارتند از: ۱) کاهش بار روی چرخ‌های محرک، ۲) کاهش فشار تماسی (با استفاده از چرخ‌های عریض یا افزایش تعداد چرخ) و ۳) کاهش سطحی از مزرعه که در آن تردد رخ می‌دهد، به ویژه هنگامی که خاک خیس باشد (کنترل ترافیک) [۶۹].

از آن‌جا که ماشین‌ها عامل اصلی ایجاد فشردگی خاک به شمار می‌روند، کنترل عواملی مانند بار محوری، فشار تماسی، فشار باد لاستیک، نوع و ابعاد لاستیک، تعداد تردد، پیکربندی چرخ (تک-چرخ، جفت-چرخ و جفت-محور) اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

۲-۳-۱- بار محوری

افزایش پیوسته توان، وزن و اندازه ماشین‌های کشاورزی و تاثیر منفی آن‌ها بر ساختار خاک و رشد و عملکرد محصول باعث نگرانی‌هایی در دهه‌های اخیر شده است. استفاده پی در پی از ماشین‌های کشاورزی سنگین در شرایط نامطلوب خاک تراکم خاک زیرین را افزایش می‌دهد.

بار محوری اولین و مهم‌ترین مشخصه‌ای است که بر تراکم خاک تاثیر می‌گذارد [۶۹]. کانیلاس و سالوخ (۲۰۰۱) با انجام پژوهشی در باره فاکتورهای موثر بر تراکم خاک، دریافتند که چگالی ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک بعد از تردد اول، با بار محوری ۳ کیلونیوتن به ترتیب ۱۲ و ۱۳ درصد نسبت به قبل از تردد افزایش می‌یابند، در حالی که با بار محوری ۱ کیلونیوتن افزایش به ترتیب ۵ و ۴ درصد مشاهده گردید [۲۲].

تولون و همکاران (۲۰۱۰) گزارش نمودند که افزایش وزن تراکتور تراکم خاک زیرین را افزایش می‌دهد و آن-ها همچنین دریافتند که بین وزن تراکتور و تراکم خاک زیرین رابطه مستقیمی وجود دارد [۱۶]. جسی (۲۰۰۱) با مطالعه اثریک بار تردد ماشین برداشت نیشکر بر ویژگی‌های خاک با دو بار محوری ۱۰۷ و ۱۰۸ کیلونیوتن دریافتند که چگالی ظاهری، تخلخل کل و تنش پیش-تراکمی تغییر کرد که موجب تراکم خاک زیرین شد در حالی که بر تراکم خاک رویین تاثیری نداشت [۴۰].

لامانده و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی اثر بار محوری و سطح تماس بر ویژگی‌های مکانیکی خاک گزارش نمودند که با افزایش بار محوری در سطح تماس ثابت، تنش عمودی اندازه‌گیری شده در عمق‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متر افزایش نشان می‌دهد [۵۶]. وای و همکاران (۱۹۹۷) با بررسی اثر بارهای دینامیکی (۱۷ و ۳۱ کیلونیوتن) و فشار باد چرخ (۴۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال) برای لاستیک ۳۸ R۷۰/ ۵۸۰ به این نتیجه رسیدند که با افزایش بار در فشار باد ثابت تنش‌های برشی و نرمال اکتاهدرال افزایش می‌یابد و در مرکز آج لاستیک این مقادیر بیشتر از لبه آج بود [۷۴].

بوتا و همکاران (۲۰۰۲) دریافتند که برای کاهش تراکم خاک زیرین می‌توان از جفت-چرخ روی محور عقب تراکتور استفاده کرد. آن‌ها همچنین دریافتند که تراکم خاک زیرین (در لایه ۶۰-۲۰ سانتی‌متر) بطور مستقیم با بارمحوری مرتبط بوده و با افزایش بار محوری افزایش یافته و مستقل از فشار تماسی است [۱۹]. کلر و آرویدسون (۲۰۰۴) گزارش کردند که با کاهش بار محوری و افزایش تعداد محور (استفاده از جفت-محور) می-توان تراکم خاک زیرین را کاهش داد [۱۳].

ابوحمده و آل ویدان (۱۹۹۹) با تاثیر دو بار محوری ۵ و ۱۵ تن در فشار باد چرخ ثابت و در دو سیستم بی خاک‌ورزی و خاک‌ورزی (با دیسک و روتاری تیلر) در لایه ۲۰-۰ سانتی‌متر دریافتند که نسبت تخلخل خاک پس از تردد به ترتیب ۱۶/۳۶ و ۱۲/۷۵درصد در سیستم بی خاک‌ورزی و ۱۰/۶۳ و ۲/۲۷ درصد به ترتیب در سیستم خاک‌ورزی شده کاهش یافت [۵].

۲-۳-۲- فشار تماسی

فشار تماسی، مقدار فشاری است که به‌وسیله چرخ لاستیکی یا زنجیری به سطح خاک اعمال می‌شود. فشار تماسی از تقسیم وزن محور عقب (یا جلوی) تراکتور بر سطح تماس چرخ عقب (یا جلوی) تراکتور با خاک بدست می‌آید [۲۰].

فشار تماسی در زیر چرخ تراکتور به دلیل سفتی کناره لاستیک به طور یکنواخت توزیع نمی‌شود. بیشترین تنش-های تماسی در فشار باد کم لاستیک نزدیک لبه آج لاستیک متمرکز می‌شوند در حالی که در فشار باد زیاد لاستیک تنش‌های تماسی در مرکز آج لاستیک متمرکز می‌شوند [۶۹].

بسرا و همکاران (۲۰۱۰) تاثیر دو نوع تراکتور سبک و سنگین در تردد‌های متفاوت بر تراکم خاک را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که تراکم خاک رویین فقط به فشار تماسی بستگی دارد [۱۶]. این نتایج گزارش بوتا و همکاران (۲۰۰۲) را مبنی بر استفاده از پیکربندی جفت-چرخ در عقب تراکتور و تطابق اندازه چرخ‌ها با وزن صحیح محور برای کاهش تراکم خاک رویین، تایید می‌کند [۱۹].

جسی و همکاران (۱۹۹۹) در پژوهشی نشان دادند که در خاک مرطوب توزیع فشار خاک تا عمق ۵۵ سانتی-متر بود، در حالی که در خاک خشک توزیع فشار در راستای افقی می‌باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که فشار خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متر بزرگتر از فشار تماسی محاسبه شده، بدست آمد که این نشان می‌دهد که فشار بصورت یکنواخت در سرتاسر سطح تماس چرخ- خاک توزیع نمی‌شود [۴۱].

۲-۳-۳- فشار باد لاستیک

فشار باد لاستیک باید همیشه در مقدار مجاز و قابل قبول خود به منظور حصول ظرفیت باربری زیاد خاک، سرعت و نیروی کششی حداکثر، باشد [۶۹]. فشار باد لاستیک بطور مشخص بر توزیع تنش عمودی خاک رویین و زیرین تاثیر می‌گذارد [۱۳]. آرویدسون و همکاران (۲۰۰۲) تنش عمودی خاک را در عمق ۱۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتندکه تنش عمودی بطور یکنواخت در راستای حرکت و عمود بر جهت حرکت چرخ تراکتور توزیع نمی‌شود. در فشار باد لاستیک ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲، ۱/۷ و ۱/۱ برابر فشار باد لاستیک‌ها اندازه‌گیری شد [۹]. چوانش و همکاران (۱۹۹۱) با بررسی چهار نوع لاستیک با ابعاد مختلف در بارهای محوری ۳۲، ۲۵، ۱۷/۹ و ۱۱/۸ کیلونیوتن و فشارهای باد لاستیک به ترتیب ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان دادند که رابطه خطی بین فشار باد لاستیک و فشار تماسی وجود دارد.

مقادیر چگالی ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک با کاهش فشار باد لاستیک کاهش می‌یابد (۳۴). وای و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر فشارهای باد لاستیک ۴۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال را در بار دینامیکی ثابت ۱۷/۲ کیلونیوتن با دو نوع لاستیک با نسبت مقاطع ۰/۷۵۶ و ۰/۸۰۴ را بر تراکم خاک مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار باد لاستیک، چگالی ظاهری در مرکز آج لاستیک با نسبت مقطع ۰/۷۵۶ به ترتیب ۱/۵۵ و ۱/۶۶ و در لبه‌های آج ۱/۳۶ و ۱/۴۱ و در لاستیک با نسبت مقطع ۰/۸۰۴ به ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۶ در مرکز آج و ۱/۳۴ و ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در لبه آج بدست آمد [۷۵]. افزایش فشار باد لاستیک سطح تماس چرخ-خاک و پهنای شیار چرخ را کاهش، در حالی که عمق نشست چرخ را افزایش می‌دهد .

۲-۳-٤- ابعاد و نوع لاستیک

لاستیک‌های رادیال سطح تماس بیش‌تری نسبت به لاستیک‌های معمولی (بایاس) دارند. بنابراین لاستیک-های رادیال تراکم خاک رویین و عمق نشست را نسبت به لاستیک‌های معمولی (بایاس) کاهش می‌دهند (شکل ۲-۲). بوتا و همکاران (۲۰۰۸) تراکم خاک ناشی از دو نوع لاستیک رادیال و بایاس را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها گزارش نمودند که چگالی ظاهری خاک ناشی از لاستیک‌های بایاس با ابعاد ۳۰ – ۲۳/۱، ۳۸ – ۱۸/۴ و ۳۴× ۱۸/۴ به ترتیب ۳.۱، ۱/۴۵ و $\frac{Mg}{m^3}$ ۱/۵۱ و لاستیک‌های رادیال با ابعاد ۳۰ R۲۳/۱، R۳۸ ۱۸/۴ و R۳۴ ۱۸/۴ به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۳۷ و $\frac{Mg}{m^3}$ ۱/۴بود [۲۰].

وای و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردندکه عمق شیار و تنش برشی اکتاهدرال، که در زیر خط مرکزی چرخ و در لبه‌های تایر اندازه‌گیری شده بودند، برای دو نوع چرخ با اندازه‌های با نسبت مقاطع ۰/۷۵۶ و ۰/۸۰۴ تفاوت قابل توجهی نداشتند. تنش های خاک و عمق شیار با افزایش بار دینامیکی در فشار باد چرخ ثابت، افزایش یافتند. همچنین در بار دینامیکی ثابت با افزایش فشار باد چرخ، تنش و عمق شیار افزایش نشان دادند. تنش خاک اندازه گیری شده در زیر لبه‌های چرخ خیلی کمتر از خط مرکزی چرخ بود. نسبت تنش نرمال اکتاهدرال در زیر خط مرکزی چرخ به تنش نرمال اکتاهدرال در زیر لبه‌های چرخ (برای چهار ترکیب بار دینامیکی و فشار باد چرخ kN 40kPa -17.2kN، ۱۲۰ kPa –17.2kN، ۴۰ kPa – 30.9 kN و ۱۲۰ kPa – 30.9kN) از ۲/۱۸ به ۳/۷۷ تغییر کرد. برای تنش برشی اکتاهدرال این نسبت از ۱/۷۶ به ۳/۱۸ کرد. همچنین نسبت عمق شیار در خط مرکزی تایر به مقدار آن در لبه‌ها از ۱/۰۴ به ۱/۴۹ تغییر یافت. نتیجتا برای ۲ چرخ مذکور با تفاوت ناچیز در نسبت مقاطع آنها، تفاوت‌هایی وجود نداشت تا بتوان نشان داد که یک چرخ نسبت به دیگری برتری دارد. تنش برشی اکتاهدرال در خاک در بالای سخت لایه و عمق شیار از نسبت مقاطع و ابعاد دو چرخ مذکور متاثر نشد. تراکم خاک در بالای سخت لایه و در زیر خط مرکزی چرخ، با افزایش بار دینامیکی و فشار باد چرخ، افزایش یافت [۷۴].

وای و همکاران (۱۹۹۷) دریافتند که عمق نشست لاستیک‌های ۳۸ R۵۸۰/۷۰ و ۳۲ R۶۵۰/ ۷۵ در مرکزآج لاستیک در فشار باد ۴۰ کیلوپاسکال و بار دینامیکی ۲/ ۱۷کیلونیوتن به ترتیب ۱۱۹ و ۱۲۶میلی‌متر و در فشار باد ۱۲۰ کیلوپاسکال و بار دینامیکی۱۷/۲کیلونیوتن به ترتیب برابر ۱۴۶ و ۱۳۴ میلی متر به دست آمد [۷۴].

بوتا و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی تاثیر وزن تراکتور و پیکربندی و ابعاد چرخ‌ها روی تراکم خاک گزارش نمودند که برای لاستیک‌های ۳۰ ×۲۳/۱، ۳۸ – ۱۸/۴ و ۳۴×۱۸/۴ به ترتیب با فشار تماسی ۷۵/۳، ۹۹/۷ و ۱۰۷/۳ کیلوپاسکال مقاومت مکانیکی اندازه گیری شده در لایه سطحی به ترتیب برابر با ۱۲۴، ۲۰۶ و ۵۶۶ کیلوپاسکال در اثر یک بار تردد تراکتور بود [۱۹].