بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده کشاورزی

گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی

مقایسه عملکرد دو نوع سیستم اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی افقی خاک

استاد راهنما:

دکتر یوسف عباسپور گیلانده

اساتید مشاور:

دکتر عزت الله عسکری اصلی ارده

دکتر غلامحسین شاهقلی

توسط:

فاطمه رحیمی اجدادی

دانشگاه محقق اردبیلی

زمستان ۸۸

الهی

ای مقصود وآرزوی من و ای روشنی بخش دل و دیده ام،
ای خدائیکه به هر که رو سوی تو آورد توجه واقبال کرده و با عطوفت و مهر ، فضل و احسان میکنی
و به آنها که از یاد تو غافلند نیز رئوف و مهربان هستی .
تورا سپاس می‌گویم که در مرحله ای دیگر از زندگیم نیز با لطف و رحمت همیشگیت، حامی و یاورم بودی .

پروردگار من،
لطف واحسانت را بر من تمام کن و بر بنده ناچیزت منّت گذار تا بتواند دانشی را که از تو دارد در راه تو و خدمت به بندگانت صرف کند .

تقدیم به

دریای صبر و شکیبایی

مادر دلسوز و بزرگوارم

و

مظهر مهربانی و گذشت

همسر عزیز و فداکارم

برای تمامی دلواپسیها و سختیهایی که به این دو عزیز عرضه داشتم و در عوض تمامی ایثارها و مهربانی هایی که از ایشان هدیه گرفتم.

باشد که قطره ای از دریای محبتشان جبران شود.

سپاسگزاری

پس ازحمد و سپاس پروردگار بر خود لازم می‌دانم از تمامی عزیزانی که در به ثمر رساندن این پایان‌نامه با حمایت‌های علمی و معنوی خود اینجانب را یاری داده‌اند تشکر نمایم.

از زحمات و فداکاری‌های خانواده عزیز خودم وهمسرم، بویژه همسرم جناب آقای مهندس عادل احمدی آرا که پشتوانه و مشوق اصلیم در ورود به این دوره بوده‌اند و در تمامی مراحل اجرای این پایان نامه اعم از طراحی و اجرای آزمایشات مزرعه‌ای همواره از مشورت و کمک ایشان بهره گرفته‌ام، سپاسگزاری می‌نمایم.

از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر عباسپور که علاوه بر بهره علمی، از ایشان درس صبر و گذشت و بزرگ‌منشی آموخته‌ام و در نهایت صمیمیت و جدّیت در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه با اینجانب همراه بوده و تکیه‌گاهی استوار و آرامش‌بخش بوده‌اند قدردانی می‌نمایم. برای ایشان در تمامی مراحل زندگی از پروردگار بزرگ سلامت و سعادت آرزومندم.

از جناب آقای دکتر عسکری، استاد مشاور گرامیم، که با تعهد و دلسوزی مثال‌زدنی اینجانب را مورد لطف خویش قرار داده‌اند صمیمانه سپاسگزارم. همچنین از جناب آقای دکتر غلامحسین شاهقلی قدردانی می‌کنم.

از جناب آقای دکتر منصور راسخ، هم به عنوان داور محترم داخلی و هم به عنوان یکی از محبوبترین اساتید دوره تحصیلم که بسیاری از معلومات امروزم را مدیون ایشان هستم سپاسگزارم. همچنین از جناب آقای دکتر اصغر محمودی اسحق، که با دقت و تعهد زحمت بازنگری پایان‌نامه را بر عهده داشتند، متشکرم.

از جناب آقای دکتر محمدرضا علیزاده که سهم بسزایی در تقویت توان علمی اینجانب داشته‌اند، بسیار سپاسگزارم.

از آقایان مهندس رنجبر، مهدیزاده، شایگانی و جلیل نژاد نهایت تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

از خواهران عزیزم خانم‌ها مهندس مریم خانی و معصومه اسعدی و همچنین دوستان ارزشمندم فرزانه دهقان‌زاده، زهرا توکلی، مریم جعفری و سمیه شهیدی که عزیزترین حامیان معنوی دوران تحصیلم بوده اند، صمیمانه سپاسگزارم. همچنین از همراهی دوستان عزیزم خانمها مهندس معصومه اسمعیلی، فرشته حسن خانی، سمیه سادات محسنی، خدیجه نصرنژاد، سحر حسن خانی، صدیقه شکربیگی، مریم بیرانوند، سهیلا یاوری، فریده رشیدی و تمامی عزیزانی که روزهای سخت دوری وغربت را برایم آسان نمودند، قدردانی می‌کنم.

فاطمه رحیمی اجدادی- زمستان ۸۸

نام خانوادگی دانشجو: رحیمی اجدادی **نام:** فاطمه

عنوان پایان‌نامه: مقایسه عملکرد دو نوع سیستم اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی افقی خاک

استاد راهنما: دکتر یوسف عباسپور گیلانده

استاد مشاور: دکتر عزت اله عسکری اصلی ارده و دکتر غلامحسین شاهقلی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی کشاورزی **گرایش:** مکانیک ماشین‌های کشاورزی

دانشکده: کشاورزی **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۸۸/۱۱/۲۱ **تعداد صفحه:** ۱۳۵

کلید واژه: فشردگی خاک، خاک‌ورزی دقیق، مقاومت مکانیکی خاک، سیستم اندازه‌گیری پیوسته.

چکیده: تعیین مقاومت مکانیکی خاک اساس تعیین عمق خاک‌ورزی در سیستم خاک‌ورزی دقیق را تشکیل می‌دهد. استفاده از نفوذسنج مخروطی استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک کاری زمان-بر و خسته کننده است. به این دلیل، رویکردهای اخیر به سمت ساخت حسگرهای در حال حرکت گسترش یافته است. در این تحقیق، اقدام به طراحی و ساخت یک حسگر مقاومت مکانیکی خاک گردید که در آن نیروی مقاومت مکانیکی خاک به‌طور پیوسته توسط ۴ مجموعه مستقل مخروط و شافت به چهار بارسنج مینیاتوری نصب شده داخل یک بازو، انتقال یافته و جهت پردازش داده و ذخیره، به دیتالاگر و رایانه قابل حمل انتقال می‌یافت و بدین ترتیب مقادیر مقاومت مکانیکی خاک در چهار عمق حاصل می‌گردید. سپس اثر پارامترهای مؤثر بر عملکرد دستگاه شامل رطوبت، عمق و سرعت پیشروی بر عملکرد دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم تحقیق به مقایسه عملکرد این سیستم اندازه‌گیری با سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک مجهز به تیغه‌های چندگانه پرداخته شد. آزمایشات مزرعه‌ای در مزرعه تحقیقاتی و آموزشی دانشگاه محقق اردبیلی، در زمینی با بافت سیلتی لومی، با دو سطح رطوبتی (نسبتاً خشک و مرطوب) و در سه سطح سرعت پیشروی(۱/۷۸ و ۲/۶۸ و ۳/۵۷ کیلومتر بر ساعت) انجام شد. آزمایشات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که اثرات اصلی رطوبت و عمق، بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم اندازه‌گیری تک‌تیغه‌ای معنی‌دار بودند. به‌طوری‌که افزایش رطوبت سبب کاهش این شاخص و افزایش عمق سبب افزایش مقادیر اندازه‌گیری شده گردید. سرعت پیشروی تأثیری بر مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این سیستم نداشت. نتایج مشابهی در مورد اثرات پارامترهای رطوبت، عمق و سرعت پیشروی بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه بدست آمد. همبستگی بالایی بین داده‌های دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه و نفوذسنج مخروطی نسبت به دستگاه تک تیغه‌ای بدست آمد. بهم‌خوردگی کمتر خاک در جریان گسیختگی، بالا بودن ضریب تبیین مدل بین داده‌های دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه و نفوذسنج مخروطی و همچنین نوسانات کمتر در داده‌های اندازه‌گیری شده مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک از جمله مزایایی هستند که استفاده از این دستگاه را نسبت به دستگاه اندازه‌گیری تک‌تیغه‌ای ساده در اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک ارجحیت داده است.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ کلیات ۶

۱-۲-۱ رابطه خاک-گیاه ٦

۱-۲-۲ فشردگی و تراکم خاک ۷

۱-۲-۳ خصوصیات مکانیکی خاک مرتبط با فشردگی ۷

۱-۲-٤ تأثیرات سوء فشردگی خاک ۹

۱-۳ دلایل و عوامل مؤثّر بر ایجاد فشردگی خاک در مزرعه ۱۱

۱-۳-۱ فشار و دفعات بارگذاری ۱۱

۱-۳-۲ تأثیر رطوبت ۱۲

۱-۳-۳ تأثیر نیروی برشی(بکسوات) ۱۲

۱-۴ ارزیابی استحکام خاک ۱۳

۱-٤-۱ روش‌های آزمایشگاهی ۱٤

۱-٤-۲ روش‌های مزرعه‌ای ۱۵

۱-۵ نفوذسنج‌های مخروطی و اندازه‌گیری مقاومت نفوذ ۱۶

۱-۶ سخت‌لایه، علل ایجاد و تأثیر آن بر رشد گیاه ۱۹

۱-۷ روش‌های مقابله با سخت‌لایه در خاک‌های کشاورزی و لزوم اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک ۲۰

۱-۷-۱ خاک‌ورزی با عمق یکنواخت به‌منظور شکستن سخت‌لایه ۲۰

۱-۷-۲خاک‌ورزی دقیق– خاک‌ورزی با عمق متغیر ۲۰

۱-۸ اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک ۲۲

۱-۹ گسیختگی خاک در برابر یک تیغه باریک ۳٤

فصل دوم- مواد و روش تحقیق ۴۰

۲-۱ کلیات ٤۱

۲-۲ طراحی و ساخت کاوشگر اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت ۴۱

۲-۲-۱ طراحی و ساخت بخش مکانیکی ۴۲

۲-۲-۱-۱ انتخاب جنس کاوشگر ٤۲
۲-۲-۱-۲ طراحی شکل ظاهری و ابعاد کاوشگر ٤۲
۲-۲-۱-۲-۱ ابعاد تیغه ٤۲
۲-۲-۱-۲-۲ آنالیز تنش تیغه ٤٤
۲-۲-۱-۲-۳ ابعاد شافت و مخروط افقی ٤٦
۲-۲-۱-۲-٤ تحلیل کمانش در شافت مخروط‌ها ٤۷
۲-۲-۱-۲-٥ آنالیز تنش شافت ٤۸
۲-۲-۱-۳ طراحی مکانیسم ایمنی ٤۹
۲-۲-۱-٤ طراحی شاسی دستگاه ٥۱
۲-۲-۲ بخش الکترونیکی ٥۳
۲-۲-۲-۱ انتخاب بارسنج ٥۳
۲-۲-۲-۲ کالیبراسیون بارسنج ٥٤
۲-۲-۲-۳ سیستم جمع‌آوری و ذخیره داده ٥٦
۲-۳ دستگاه اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک مجهز به تیغه‌های چندگانه ٥۸
۲-۳-۱ کالیبراسیون مکانیسم اندازه‌گیری ٦۰
۲-۳-۲ جعبه سیم‌ها ٦۳
۲-۴ نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری ۶۴
۲-٥ پروفیل‌متر ۶۷
۲-۶ تراکتور ۶۹
۲-۷ آزمون مقدماتی آزمایشگاهی برای هر یک از دستگاه‌ها ۶۹
۲-۸ ارزیابی عملکرد و آزمون‌های مزرعه‌ای ۶۹
۲-۸-۱ کلیات طرح آزمایشی ٦۹
۲-۹ مراحل اجرای آزمایشات مزرعه‌ای ۷۰
۲-۹-۱ آماده‌سازی زمین برای انجام آزمایشات مزرعه‌ای ۷۰
۲-۹-۲ آماده‌سازی وسایل و تجهیزات ۷۱
۲-۹-۳ به‌دست آوردن سرعت‌های مورد نظر ۷۱
۲-۹-٤ اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری ۷۲

۲-۹-۵ اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک ۷۲
۲-۹-٦ اندازه‌گیری شاخص مخروطی ۷۳
۲-۹-۷ اجرای آزمون ۷۳
۲-۹-۸ نمونه برداری از شکل پروفیل خاک ۷٤
۲-۱۰ ثبت نهایی داده‌ها و تحلیل‌های آماری ۷٤
فصل سوم - نتایج و بحث ۷۵
۳-۲ بخش اول- ارزیابی عملکرد دستگاه تک تیغه‌ای ۷۶
۳-۲-۱ پارامترهای اندازه‌گیری شده ۷٦
۳-۲-۱-۱ نتایج اندازه‌گیری رطوبت ۷۷
۳-۲-۱-۲ نتایج اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک ۸۰
۳-۲-۱-۳ نتایج اندازه‌گیری‌های شاخص مخروطی ۸۲
۳-۲-۲ آزمون تجزیه واریانس برای ارزیابی عملکرد دستگاه تک تیغه‌ای ۸٦
۳-۲-۳ مقایسه میانگین اثرات اصلی بر شاخص CSRI1 ..... ۸۸
۳-۲-۳-۱ تأثیر رطوبت ۸۸
۳-۲-۳-۲ تأثیر عمق ۸۹
۳-۲-۳-۳ تأثیر سرعت پیشروی ۹۱
۳-۳ بخش دوم- مقایسه عملکرد دستگاه تک تیغه‌ای با سیستم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی افقی خاک مجهز به تیغه‌های چندگانه ۹۲
۳-۳-۱ معیارهای مقایسه ۹۲
۳-۳-۲ تجزیه واریانس داده‌های حاصل از دو حسگر پیوسته در قالب یک طرح آزمایشی ۹۳
۳-۳-۳ مقایسه میانگین‌های مقاومت مکانیکی حاصل از دو حسگر پیوسته در قالب یک طرح آزمایشی ۹۵
۳-۳-۳-۱ اثر نوع دستگاه بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۵
۳-۳-۳-۱ اثر رطوبت بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹٦
۳-۳-۳-۳ اثر عمق بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۷
۳-۳-۳-٤ اثر سرعت پیشروی بر میانگین مقاومت خاک ۹۸
۳-۳-۳-۵ اثرات متقابل دوتایی رطوبت در عمق بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۸
۳-۳-٤ مقایسه CSRI1 و CI ۱۰۰

۳-۳-٤-۱ تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه گیریCI ۱۰۰
۳-۳-٤-۲ تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری CSRI1 ..... ۱۰۱
۳-۳-٤-۳ مقایسه نتایج تجزیه واریانس دستگاه تک تیغه‌ای و نفوذسنج ۱۰۲
۳-۳-۵ مقایسه CSRI4 و CI ۱۰۲
۳-۳-۵-۱ تجزیه واریانس داده‌های CSRI4 ..... ۱۰۲
۳-۳-۵-۲ مقایسه نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از CSRI4 با CI ۱۰۳
۳-۳-٦ تجزیه واریانس هر یک از حسگرها با نفوذسنج مخروطی ۱۰٤
۳-۳-۷ بررسی میزان نوسانات داده‌برداری هر یک از سه دستگاه ۱۰٤
۳-۳-۸ بررسی ارتباط بین داده‌های دو حسگر با شاخص مخروطی از طریق آنالیز رگرسیونی ۱۰٦
۳-۳-۸-۱ تأثیر الگوی گسیختگی خاک بر اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی حسگرهای پیوسته ۱۰۸
۳-۳-۸-۲ نتایج رگرسیون خطی ۱۰۸
۳-۳-۸-۲-۱ دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه و شاخص مخروطی ۱۰۸
۳-۳-۸-۲-۲ دستگاه تک تیغه‌ای و شاخص مخروطی ۱۰۹
فصل چهارم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۳
۴-۱ نتیجه‌گیری ۱۱۴
٤-۲ پیشنهادات ۱۱۷
منابع ۱۱۸
پیوست ها ۱۲۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ رشد ریشه‌های جو دوسر در ۱- خاک نرم و ۲- متراکم ۱۱

شکل ۱-۲ نقطه A در خاک تحت فشار محوری ۱۵

شکل ۱-۳ مخروط‌های استاندارد ۱۷

شکل ۱-۴ نفوذسنج با نوک منشوری افقی طراحی شده بوسیله علی‌همسیاه(۱۹۹۰) ۲۴

شکل ۱-۵ گسیختگی خاک در اندازه‌گیری‌های افقی نوک مخروطی ۲۵

شکل ۱-۶ ساختمان حسگر پروفیل خاک ۲۸

شکل ۱-۷ (الف) مدل AD(ب) ساختار حسگر مقاومت مکانیکی خاک ساخته شده توسط همت و همکاران(۲۰۰۹) .. ۳۲

شکل ۱-۸ نمای عقب از آشفتگی خاک ۳۲

شکل ۱-۹ (الف) طرحواره و(ب) شکل واقعی یکی از تیغه‌های چندگانه مجهز به مکانیزم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک ۳۳

شکل ۱-۱۰ سطح گسیختگی رو به جلوی خاک- هیتاراتچی و ریس(۱۹۶۷)، گادوین و اسپور(۱۹۷۷)، روش مارپیچ لگاریتمی(بالا)، مک‌کایز و علی(۱۹۷۷)، روش دو- گوه‌ای(وسط) و مک‌کایز و علی(۱۹۷۷) و پرومپارال و همکاران(۱۹۸۳) روش تک گوه‌ای(پایین) ۳۶

شکل ۱-۱۱ جهت حرکت خاک در بالا و پایین عمق بحرانی ۳۷

شکل ۱-۱۲ مدل‌های گسیختگی خاک تحت پایه‌های عمیق ارائه شده توسط ترزاقی(۱۹۴۳، سمت چپ)، مایرهاف(۱۹۵۱، وسط) و هیو(۱۹۶۵، سمت راست) ۳۷

شکل ۱-۱۳ مکانیسم گسیختگی ارائه شده برای نفوذسنج گوه‌ای در عمق نسبتاً زیاد بوسیله هیو(۱۹٦۵)هیو(۱۹٦۵)..۳۹

شکل ۲-۱ (الف) طرح‌واره تیغه کاوشگر اندازه گیری مقاومت مکانیکی خاک (ب) تیغه بدون درپوش به همراه بارسنج‌ها و سیم‌های بارسنج قرار گرفته در درون آن ۴۳

شکل ۲-۲ نحوه اتصال به شاسی توسط دو صفحه میانی ۴۴

شکل ۲-۳ تحلیل تنش در تیغه توسط نرم‌افزار Solidwork Simulation(Cosmoswork) ۴۵

شکل ۲-۴ تحلیل کرنش در تیغه توسط نرم‌افزار Solidworks Simulation(Cosmoswork) ۴۶

شکل ۲-۵ (الف) شکل واقعی مخروط به همراه شافت آن، بکار رفته در سیستم اندازه‌گیری (ب) طرح‌واره ۴۷

شکل ۲-۶ نتایج تحلیل تنش شافت و مخروط کاوشگر مقاومت مکانیکی پیوسته ۴۸

شکل ۲-۷ طرح‌واره تیغه به همراه نیروهای اعمالی ۵۰

شکل ۲-۸ طرح‌واره شاسی کاوشگر ۵۲
شکل ۲-۹ نمای جانبی دستگاه مقاومت مکانیکی پیوسته به همراه چرخ تثبیت عمق در حالت حمل و نقل ۵۲
شکل ۲-۱۰ نمودار روندنمای بخش الکترونیکی ۵۳
شکل ۲-۱۱ (الف) طرح بارسنج (ب) شکل واقعی بارسنج مینیاتوری ساخت شرکت Tokyo Sokki(ابعاد در جدول۲-۱ پیوست) ۵۴
شکل ۲-۱۲ کالیبراسیون بارسنج توسط دستگاه STM-20 ۵۵
شکل ۲-۱۳ نمودار کالیبراسیون بارسنج مربوط به دستگاه تک تیغه‌ای(بارسنج ۱) ۵۶
شکل۲-۱۴ دیتالاگر مدل DT800 ۵۷
شکل ۲-۱۵ نقشه پل وتسون و کانال مرتبط- توسط نرم‌افزار دیتالاگر ۵۷
شکل ۲-۱۶ (الف) طرح‌واره و (ب) شکل واقعی یکی از تیغه‌های چندگانه مجهز به مکانیزم اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک ۵۹
شکل ۲-۱۷ (الف) طرح‌واره و (ب) شکل واقعی مکانیزم اندازه‌گیری برای سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه ۶۰
شکل۲-۱۸ نمای جانبی از سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه ۶۰
شکل ۲-۱۹ کالیبراسیون مکانیزم اندازه‌گیری سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه ۶۱
شکل ۲-۲۰ نمودار کالیبراسیون برای مکانیزم اندازه‌گیری مربوط به بازوی اول(عمق ۱۰ سانتی‌متری) ۶۱
شکل ۲-۲۱ نمودار کالیبراسیون برای مکانیزم اندازه‌گیری مربوط به بازوی دوم(عمق ۲۰ سانتی‌متری) ۶۲
شکل ۲-۲۲ نمودار کالیبراسیون برای مکانیزم اندازهگیری مربوط به بازوی سوم(عمق ۳۰ سانتی‌متری) ۶۲
شکل ۲-۲۳ نمودار کالیبراسیون برای مکانیزم اندازه‌گیری مربوط به بازوی چهارم(عمق ۴۰ سانتی‌متری) ۶۲
شکل ۲-۲۴ جعبه سیم‌ها متشکل از مقاومت‌ها و سیم‌های خروجی ۶۳
شکل ۲-۲۵ نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری با میله‌های نفوذ چندگانه قابل تنظیم ۶۵
شکل ۲-۲۶ الف- شیر کنترل فشار به‌کار رفته در سیستم هیدرولیکی ب- شیر کنترل جریان و فشارسنج ۶۶
شکل ۲-۲۷ مدار هیدرولیکی سیستم ۶۶
شکل ۲-۲۸ تصویر دستگاه پروفیل‌متر ۶۸
شکل ۲-۲۹ دیاگرام طرح آزمایشی ۷۰
شکل۳-۱ آزمون مزرعه‌ای دستگاه تک تیغه‌ای ۷۷
شکل ۳-۲ پروفیل میانگین رطوبت خاک در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۷۹

شکل ۳-۳ پروفیل میانگین چگالی ظاهری خشک خاک در زمان آزمایش ۸۲
شکل ۳-۴ میانگین شاخص مخروطی خاک در زمان آزمایش در عمق‌های مختلف ۸۵
شکل ۳-۵ نمودار شاخص CSRI1 در شرایط مرطوب ۸۹
شکل۳-۶ نمودار تغییرات CSRI1 در عمق‌های مختلف(شرایط نسبتاً خشک) ۹۰
شکل ۳-۷ نمودار ستونی چگالی ظاهری در شرایط نسبتاً خشک نسبت به شرایط مرطوب ۹۰
شکل ۳-۸ تأثیر سرعت پیشروی‌های مختلف بر روی شاخص CSRI1 ..... ۹۱
شکل ۳-۹ دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه حین انجام آزمایشات مزرعه‌ای ۹۲
شکل ۳-۱۰ اثر نوع دستگاه بر میانگین مقاومت مکانیکی ۹۶
شکل ۳-۱۱ نتایج مقایسه میانگین اثر رطوبت بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۷
شکل ۳-۱۲ نتایج مقایسه میانگین اثر عمق بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۸
شکل ۳-۱۳ نتایج مقایسه میانگین اثر سرعت پیشروی بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۸
شکل ۳-۱۴ نتایج مقایسه میانگین اثر عمق بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۹
شکل ۳-۱۵ نمودار مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک نسبت به زمان برای سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه ۱۰۵
شکل ۳-۱۶ نمودار مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک نسبت به زمان برای سیستم اندازه‌گیری تک تیغه‌ای ۱۰۵
شکل ۳-۱۷ نمای پشت از بهم خوردگی خاک - دستگاه مجهز به تیغه‌های چندگانه ۱۰۹
شکل ۳-۱۸ روند تغییرات شاخص مخروطی با عمق ۱۱۰
شکل ۳-۱۹ نمای پشتی بهم خوردگی خاک-دستگاه تک تیغه ای ۱۱۱

فهرست جداول

جدول ۲–۱ مشخصات تراکتور به‌کار رفته برای اجرای آزمایشات ۶۸
جدول ۲–۲ بافت خاک مزرعه آزمایشی ۷۱
جدول ۳–۱ میانگین رطوبت‌های خاک برای هر عمق کاری در سطح نسبتاً خشک در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۷۸
جدول ۳–۲ میانگین رطوبت‌های خاک برای هر عمق کاری در سطح رطوبتی مرطوب در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۷۹
جدول ۳– ۳ میانگین داده‌های چگالی ظاهری برای هر عمق کاری در سطح نسبتاً خشک در زمان آزمایشات مزرعه‌ای مزرعه‌ای ۸۰
جدول۳–۴ میانگین داده‌های چگالی ظاهری برای هر عمق کاری در سطح مرطوب در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۸۱
جدول ۳–۵ نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اندازه‌گیری چگالی ظاهری ۸۳
جدول ۳–۶ میانگین داده‌های شاخص مخروطی خاک در سطح رطوبتی نسبتاً خشک در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۸۴
جدول ۳–۷ میانگین داده‌های شاخص مخروطی(CI) خاک در سطح رطوبتی مرطوب در زمان آزمایشات مزرعه‌ای ۸۵
جدول ۳–۸ نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اندازه‌گیری CSRI1 ..... ۸۷
جدول ۳–۹ نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر CSRI1 ..... ۸۸
جدول ۳–۱۰ نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقایسه آزمون‌های به عمل آمده از دو دستگاه ۹۴
جدول ۳–۱۱ نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر میانگین مقاومت مکانیکی خاک ۹۵
جدول ۳–۱۲ نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اندازه‌گیری شاخص مخروطی ۱۰۱
جدول ۳–۱۳ نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر CSRI4 ..... ۱۰۳
جدول ۳–۱۴ همبستگی بین مقادیر مقاومت مکانیکی افقی اندازه‌گیری شده توسط سیستم اندازه‌گیری مجهز به تیغه‌های چندگانه و شاخص مخروطی خاک ۱۰۶
جدول ۳–۱۵ همبستگی بین مقادیر مقاومت مکانیکی افقی اندازه‌گیری شده توسط سیستم اندازه‌گیری تک تیغه‌ای و شاخص مخروطی خاک ۱۰۷

فهرست علائم ونمادها

نماد	توضیحات	واحد
A	ثابتی وابسته به نوع خاک و رطوبت	-
A	مساحت مقطع پین برشی	mm^2
ASAE S313.3	استاندارد ۳۱۳/۳ انجمن مهندسین کشاورزی آمریکا	-
B	وزن نفوذسنج	kg
C	چسبندگی خاک	kPa
CI	شاخص مخروطی	MPa
CSRI1	شاخص مقاومت مکانیکی پیوسته خاک دستگاه تک تیغه‌ای	MPa
CSRI4	شاخص مقاومت مکانیکی پیوسته خاک کاوشگرمجهز به تیغه‌های چندگانه	MPa
D	عمق نفوذ	cm
D_1	فاصله قسمت انتهایی تیغه تا پیچ محوری	mm
D_2	فاصله پیچ محوری از پین برشی	mm
d_c	عمق بحرانی	cm
D_β	عمق بحرانی	cm
DGPS	سیستم موقعیت سنج جهانی تفاضلی	-
D_{max}	حداکثر عمق کاری تیغه	mm
d_s	جرم مخصوص ظاهری خاک خشک	gr/cm^3
E	مدول الاستیسیته	MPa
EC_a	قابلیت هدایت الکتریکی	mS/m
F	برآیند بار گسترده	N
F_x	نیروی کششی	N
F_z	نیروی عمودی	N
F_s	نیروی برشی وارده روی پین برشی	kN
HRI	شاخص مقاومت خاک	MPa
I	گشتاور دوم سطح	m^4
L	طول شافت به علاوه ارتفاع مخروط	m
MC	درصد رطوبت خاک بر اساس خاک خشک	-
M_y	گشتاور	N.m
n	ضریب اطمینان	-
N_c	فاکتور ظرفیت تحمل چسبندگی	-
N_q	فاکتور سربار	-

N_γ	فاکتور جاذبه	
$N_{\gamma g}$	فاکتور برای خاک‌های چسبنده-اصطکاکی	-
P_1& P_2	نیروی موجود در لایه سربار	N
P_{cr}	مقدار نیروی بحرانی	N
P_{max}	نیروی ماکسیموم	N
P_o	فشار سربار	kPa
PSSI	شاخص منشوری خاک	MPa
q	ظرفیت تحمل خاک در برابر نفوذسنج مخروطی	MPa
r	ضریب همبستگی	-
R^2	ضریب تعیین	-
S	عرض بیشینه از هلال کناری	cm
S_u	تنش نهایی	MPa
S_y	تنش تسلیم	MPa
t	ضخامت تیغه	mm
T	گشتاور	kN.m
V	حجم کل نمونه خاک	cm^3
w	عرض تیغه	mm
w_1& w_1	نیروی خاک در ناحیه گسیختگی	N
W_d	وزن خاک خشک	gr
W_s	وزن خشک نمونه خاک	gr
W_w	وزن خاک مرطوب	gr
β	تعیین کننده محل E	rad
β	شیب صفحه گسیختگی	-
$\bar{\varepsilon}_s$	بیشینه تغییر شکل برشی خاک	-
ϕ	زاویه اصطکاک خاک	rad
γ	وزن واحد خاک	$kg\ m^{-3}$
γ_d	جرم مخصوص خاک بعد از فشردگی	gr/cm^3
γ_0	جرم مخصوص اولیه خاک	gr/cm^3
σ_m	متوسط تنش نرمال	kPa
σ_0	متوسط تنش نرمال حد پایین ایجاد کننده فشردگی کوچک	kPa

فصل اول

مقدمه

و

مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱ مقدمه

استفاده از ماشین به عنوان ابزار تولید در کشاورزی از مراحل برجسته تکامل کشاورزی و افزایش عملکرد محصول در طول قرن گذشته بوده است و این امر لزوم بهره‌گیری از مدیریت صحیح جهت بهره‌گیری از امکانات و استفاده بهینه از نهاده‌های کشاورزی در امر تولید را ایجاب خواهد کرد. همچنین به تبع آن تصمیم‌گیری‌های درستی در ارتباط با ادوات، آب، زمین و سایر نهاده‌های کشاورزی را نیاز خواهد داشت که لازمه آن داشتن اطلاعات صحیح و دقیق در مورد آن‌ها می‌باشد. در این بین در اختیار داشتن داده‌های خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا در طراحی وسایلی که به نوعی با خاک در تماس هستند، از یک‌سو ارتباط ماشین و خاک مطرح می‌شود و از سوی دیگر خاک به دلیل ایجاد محیطی برای تغذیه گیاه اهمیت می‌یابد. وجود تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و شرایط محیطی، عمده‌ترین دلیل نوسان عملکرد محصولات کشاورزی در نقاط مختلف دنیا می‌باشد.

یکی از خصوصیات مهمّ خاک که در بحث رابطه بین خاک و گیاه و همچنین در مطالعه اثر متقابل خاک- ماشین مطرح می‌باشد، استحکام خاک[1] یا به عبارت دیگر مقاومت مکانیکی خاک می‌باشد. مقاومت مکانیکی خاک به‌صورت مقاومت در برابر تغییر شکل خاک توصیف می‌گردد. مقاومت مکانیکی خاک نقش مهمی را در رشد و توسعه ریشه گیاه ایفا می‌کند. زیرا اگر مقاومت خاک[2] خیلی کم باشد گیاه نمی‌تواند ایستادگی خود را حفظ کند، چون ساختار ضعیف خاک قادر به مهار گیاه نمی‌باشد. از طرف دیگر زمانی‌که مقاومت خاک خیلی زیاد باشد، ریشه گیاه نمی‌تواند در داخل خاک نفوذ کند. عوامل بسیار زیادی مقاومت مکانیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از جمله آن‌ها می‌توان به پدیده

1- Soil strength 2- Soil strength impedance

خشـــــک و فشردگی[1] خاک‌های زراعی اشاره کرد.

فشردگی خاک از مسائل و مشکلات جدّی بسیاری از خاک‌ها در نقاط مختلف دنیا می‌باشد. در بسیاری از این مناطق که عامل اصلی در جلوگیری از رشد مؤثر ریشه محصول فشردگی خاک تشخیص داده شده است، خاک دارای سخت‌لایه[2] یا لایه فشرده شده‌ای می‌باشد، که این لایه دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از لایه بالایی و پایینی خود است. تشخیص و از بین بردن این لایه که معمولاً دارای مقاومت مکانیکی بالایی می‌باشد، تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است. همچنین تحقیقات بسیار زیادی وجود دارد که روی یافتن مقادیر مقاومتی خاک که از رشد ریشه گیاه و نفوذ آن در داخل خاک جلوگیری می‌کنند، متمرکز شده است(گارنر[3] و همکاران،۱۹۸۶؛ گروچو[4] وهمکاران،۲۰۰۱).

امروزه در اکثر نقاط مختلف دنیا از خاک‌ورزی در عمق یکنواخت(زیرشکنی در عمق ثابت) به‌منظور مدیریت فشردگی خاک و از بین بردن لایه سخت خاک استفاده می‌شود. نتایج تحقیقات در بسیاری از مناطق نشان داده است که این عملیات موجب افزایش عملکرد محصول می‌شود. با وجود این در برخی مناطق تغییرات عمق استقرار و ضخامت این لایه سخت به میزان بسیار زیادی حتّی در داخل یک مزرعه هم مشاهده می‌شود(کلارک[5] ،۱۹۹۹؛ گروچو وهمکاران،۲۰۰۱؛ ریپر[6]،۱۹۹۹ و۲۰۰۵) و کشاورزان در بسیاری از مناطق نمی‌دانند که آیا مزرعه آنها سالیانه به خاک‌ورزی عمیق نیاز دارد یا خیر؟ و همچنین چه قسمت‌هایی از مزرعه و در چه عمقی نیازمند شخم می‌باشد. امّا نکته‌ای که در این‌جا وجود دارد این است که خاک‌ورزی در عمق پایین‌تر از عمق لایه فشرده شده، تنها موجب افزایش عملکرد محصول به میزان بسیار کم می‌شود و در برخی موارد به دلیل بهم خوردن لایه رسی یا لایه آهکی زیر لایه فشرده شده، این عملیات می‌تواند مضر باشد(گارنر و همکاران،۱۹۸۶). بنابراین استفاده از خاک‌ورزی در عمق یکنواخت در سرتاسر مزرعه ممکن است بسیار عمیق‌تر از حدّ نیاز و یا این‌که بسیار سطحی باشد.

1- Compaction 2- Hardpan 3- Garner 4- Gorucu 5- Clark 6- Raper

یکی از مهـــم‌ترین دلایل تعیین مقاومـــــت مکانیکـــی خاک تعیین عمق خاک‌ورزی بهینه بر حسـب نـــوع محصول مورد کشت می‌باشد به طوری که رشد مؤثر ریشه در داخل خاک انجام شود. استفاده از خاک‌ورزی دقیق(خاک‌ورزی در عمق متغیر[1] و بر اساس نیاز یک ناحیه خاص) می‌تواند صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را در مصرف سوخت و انرژی در مدیریت فشردگی خاک ایجاد نماید. خاک‌ورزی دقیق، خصوصیات فیزیکی و مقاومت مکانیکی خاک را تنها در نقاطی اصلاح می‌نماید که در آن نقاط عملیات خاک‌ورزی به‌منظور رشد مؤثّر ریشه محصول، مورد نیاز می‌باشد. بنابراین تعیین مقاومت مکانیکی خاک اساس تعیین عمق در سیستم خاک‌ورزی دقیق را تشکیل می‌دهد.

همراه با افزایش اطّلاعات در واحد کوچکی از سطح مزرعه و با رقم خوردن فن‌آوری جدیدی تحت عنوان کشاورزی دقیق، تولیدکنندگان محصولات کشاورزی با استفاده از سیستم موقعیت‌سنج جهانی[2] که به اختصار GPS معرفی می‌شود، توانایی جمع‌آوری داده‌های متغیّرهای مؤثر در تولید محصول، از قبیل داده‌های پارامترهای خاک در نقاط مختلف مزرعه را دارند که این داده‌ها می‌تواند در مدیریت فشردگی خاک از طریق خاک‌ورزی دقیق مورد استفاده قرار گیرند(عباسپور گیلانده،۱۳۸۴).

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای اشاره کرد. محققان معمولاً روش مزرعه‌ای را به دلیل سریع‌تر و ارزان‌تر بودن اندازه‌گیری استحکام خاک در شرایط طبیعی و امکان تعداد اندازه‌گیری بیشتر نسبت به روش آزمایشگاهی، ترجیح می‌دهند. اندازه‌گیری مزرعه‌ای مقاومت مکانیکی خاک به دو روش ایستایی و در حال حرکت[3] انجام می‌شود. در روش ایستایی در هر بار اندازه‌گیری، باید وسیله در خاک فرو برده شده و پس از اندازه‌گیری از خاک خارج گردد(رونقی،۱۳۷۴). با داشتن حسگرهای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک می‌توان شرایط مقاومت لایه‌های مختلف را در حال حرکت حس کرده و مقدار مقاومت مکانیکی را در عمق‌های مختلف و به صورت پیوسته اندازه‌گیری کرد.

1- Variable-depth tillage 2- Global positioning system 3- On-the-go