بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده کشاورزی

# طراحی، ساخت و ارزیابی حسگرهای اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی و رطوبت خاک به‌صورت بلادرنگ

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی

**آذر خورسندی**

اساتید راهنما
**دکتر عباس همت**
**دکتر امین اله معصومی**

**۱۳۸۶**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده کشاورزی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک ماشین های کشاورزی خانم آذر خورسندی

تحت عنوان

# طراحی، ساخت و ارزیابی حسگرهای اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی و رطوبت خاک به‌صورت بلادرنگ

در تاریخ ۱۳۸۶/۱۲/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر عباس همت |
| ۲- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر امین ا... معصومی |
| ۳- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر مرتضی صادقی |
| ۴- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر رسول امیر فتاحی |
| ۵- استاد داور پایان‌نامه | دکتر سید جلیل رضوی |
| ۶- استاد داور پایان‌نامه | دکترشمس ا... ایوبی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی | دکتر فرشید نوربخش |

# تشکر و قدردانی

خدای مهربان را سپاسگذارم که فرصت کسب علم را ارزانیم داشت. آفریدگار آب و خاک را برای بخشیدن فرصتی مناسب و توانی بسنده در انجام این تحقیق ستایش می کنم و از خداوند هستی بخش، توفیق روز افزون و سلامتی عزیزانی که در این راه یاریم دادند را خواهانم.

از پدر و مادر عزیزم که عمرشان را توشه راهم کردند سپاسگزارم. از همسر مهربانم سپاسگذارم که در طی این سالها بسیار مرا یاری نمود. از خواهران عزیزم که همیشه پشتیبان لحظه لحظه زندگیم بودند بی‌نهایت سپاسگذارم.

از زحمات اساتید راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر عباس همّت و جناب آقای دکتر امین اله معصومی که با راهنمایی های ارزشمندشان مرا در انجام این تحقیق یاری کردند سپاسگذارم. از اساتید مشاور گرامی خود جناب آقای دکتر مرتضی صادقی و جناب آقای دکتر رسول امیرفتاحی تشکر می کنم. از جناب آقای دکتر رضوی و جناب آقای دکتر ایوبی که زحمت بازخوانی و داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند سپاسگزارم.

از اساتید و کارشناسان محترم گروه مکانیک ماشین های کشاورزی که در طول دوران تحصیل مرا مورد لطف و محبت خود قرار داده اند کمال تشکر را دارم. از پرسنل محترم کارگاه ماشین‌های کشاورزی آقایان هاشمی ، عزیزی و موسوی و کارشناس فنی کارگاه ها آقای شفیع زاده به خاطر همکاریشان در انجام این تحقیق تشکر می‌کنم.

از آقایان مهندس جاوید، مهندس دزفولی، مهندس قاسمی، مهندس افضل وخانم مهندس جعفری که در انجام این تحقیق مرا را یاری کردند سپاسگذارم.

در پایان از دوستان عزیزم خانم‌ها مهندس شجاعی، فقیری، حسن زاده، عقیلی، قربانی و آقایان مهندس ترکی، کردانی و حسینیان متشکرم.

آذر خورسندی

اسفند ماه ۱۳۸۶

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

به پاس قلب های بزرگی

که دریای بیکران معرفتند

و آسمان منور فرزانگی

و به پاس اندیشه و درایتشان در رهنمون ساختن راهم

به سر منزل مقصود

تقدیم به

**پدر و مادر عزیزم**

**و همسر مهربانم**

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب.....هشت

فهرست اشکال.....ده

فهرست جداول.....چهارده

چکیده..... ۱

**فصل اول: مقدمه و بررسی منابع**

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲-بررسی منابع..... ٤

۱-۲-۱- تراکم خاک..... ٤

۱-۲-۲- مقاومت مکانیکی خاک..... ٦

۱-۲-۳- روش‌های اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک..... ۱۷

**فصل دوم: طراحی و ساخت**

۲-۱- حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک..... ۲٦

۲-۱-۱- طراحی و ساخت فروسنج سنج افقی جهت اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک..... ۲۷

۲-۱-۲- مشخصات لودسل مورد استفاده..... ۲۸

۲-۱-۳- طراحی مکانیزم انتقال نیرو از واحد حس کننده مقاومت مکانیکی خاک به لودسل..... ۳۰

۲-۱-۴- مکانیزم ایمنی..... ۳۵

۲-۱-۵- اتصال حسگر به قاب..... ۳۷

۲-۱-۶- چرخ تنظیم عمق..... ۳۹

۲-۲- حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک..... ٤۰

۲-۲-۱- ساخت الکترودهای خازن..... ٤۱

۲-۲-۲- ساخت ابزار حامل الکترودها در خاک..... ٤٤

۲-۲-۳- اتصال حسگر به قاب..... ٤٥

۲-۳- سامانه جمع آوری داده‌ها..... ٤۷

**فصل سوم: مواد و روش‌ها**

۳-۱- آزمایش‌های واسنجی..... ٥٤

۳-۱-۱- واسنجی لودسل S- شکل..... ٥٤

۳-۱-۲- واسنجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی مجهز به سامانه داده برداری..... ٥٦

۳-۱-۳-آزمایش واسنجی حسگر اندازه گیر رطوبت خاک..... ٥۷

۳-۲- ارزیابی حسگرها و تهیه نقشه تغییر پذیری مکانی مقاومت خاک به‌صورت بلادرنگ..... ٥۹

۳-۲-۱- ارزیابی اولیه حسگرها..... ٥۹

۳-۲-۲- ارزیابی اصلی حسگرها..... ٦١
۳-۳- آزمایش تعیین نوع گسیختگی..... ٦٣
۳-۳-۱- تعیین اثر فروسنج منشوری و تیغه در گسیختگی خاک..... ٦٣
۳-۳-۲- تعیین مسافت گیسختگی در جلوی تیغه ..... ٦٤
۳-۳-۳- آزمایش یافتن پروفیل عرضی خاک درمسیر حرکت حسگر ..... ٦٤
**فصل چهارم: نتایج و بحث**
۴-۱- واسنجی لودسل S- شکل ..... ٦٦
۴-۱-۱- بارگذاری ناپیوسته با وزنه..... ٦٦
۴-۱-۲- بارگذاری پیوسته با دستگاه جیوه ای..... ٦٧
۴-۱-۳- بارگذاری پیوسته با دستگاه جامع کشش و فشار..... ٦٨
٤-۲- واسنجی حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی مجهز به سامانه داده برداری..... ٦٩
۴-۳- واسنجی حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک..... ٧٠
۴-۴- ارزیابی حسگر مقاومت مکانیکی خاک ..... ٧٢
۴-۵- تأثیر نوک منشوری و ساقه حسگر مقاومت مکانیکی خاک در نوع گسیختگی خاک..... ٧٦
۴-۶- تحلیل سیگنال حسگر مقاومت مکانیکی خاک..... ٨٤
۴-۷- ارزیابی حسگر اندازه‌گیر رطوبت..... ٨٦
٤-۸- نقشه‌های تغییر پذیری مقاومت مکانیکی افقی و رطوبت خاک ..... ٨٩
**فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها**
۵-۱- نتیجه‌گیری ..... ٩٤
۵-۲- پیشنهادها ..... ٩٥
منابع ..... ١٠٤
چکیده انگلیسی ..... ١٠٨

## فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل۱-۱- نمونه ای از مخروط‌های تحت استاندارد ASAE ..... ۸
شکل۱-۲- نمایی از حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک ساخته شده توسط هنکوییت و همکاران[اقتباس از ۲۸]. ۱۰
شکل۱-۳- طرحواره از فروسنج افقی ساخته شده توسط علیهمسیه[اقتباس از ۱۰] ..... ۱۱
شکل۱-۴- شکست خاک با استفاده از فروسنج افقی نوک مخروطی در عمق کم[اقتباس از ۱۰]..... ۱۲
شکل ۱-۵- نمونه هایی از حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک در یک عمق مشخص از خاک (ساخته شده توسط هال و ریپر) ..... ۱۳
شکل۱-۶- نمایی از حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک در سه عمق[اقتباس از ۱۷] ..... ۱۳
شکل ۱-۷- حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک دارای چند نوک حس کننده مجزا[اقتباس از ۶]..... ۱۴
شکل ۱-۸- طرحوارهای از حسگر اندازه‌گیر مقاومت خاک شامل ۸ المان[اقتباس از ۱۴] ..... ۱۵
شکل۱-۹- تیغه مجهز به کرنش سنج برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک[اقتباس از ۹] ..... ۱۵
شکل۱-۱۰- اجزاء اصلی ابزار ساخته شده توسط آدامچاک را نشان می‌دهد[اقتباس از ۷]..... ۱۶
شکل۱-۱۱- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک ..... ۱۷
شکل ۱-۱۲- نمایی از بلوک گچی که برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک از آن استفاده می‌شود ..... ۱۸
شکل ۱-۱۳نمونه‌های از جستجوگر نوترونی در حال اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌صورت استاتیکی ..... ۱۸
شکل ۱-۱۴- نمونه‌های تجهیزات TDR..... ۱۸
شکل ۱-۱۵- نمونه‌هایی از حسگرهای خازنی اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌صورت استاتیکی ..... ۲۰
شکل۱-۱۶- نمایی از حسگر خازنی اندازه‌گیری محتوای رطوبت ..... ۲۱
شکل۱-۱۷- حسگر اندازه‌گیر محتوای رطوبتی خاک به صورت پیوسته، ساخته شده توسط آندرد[اقتباس از ۱۲]..... ۲۲
شکل ۱-۱۸- فروسنج افقی ترکیبی برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی و رطوبت خاک به‌صورت بلادرنگ [اقتباس از ۱۴] ..... ۲۳
شکل ۱-۱۹- دیاگرام حسگر اندازه گیر رطوبت ساخته شده توسط سان و همکاران[اقتباس از ۱۴]..... ۲۳
شکل ۲-۱ لودسل استفاده شده در حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک ..... ۲۹
شکل ۲-۲- اطلاعات مربوط به ابعاد لودسل S-شکل مورد استفاده در حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک ..... ۲۹
شکل ۲-۳- دو طرح پیشنهادی برای مکانیزم فروسنج افقی، الف) انتقال نیرو به‌صورت غیر مستقیم از نوک فروسنج افقی به لودسل و ب) انتقال نیرو به‌صورت مستقیم از نوک فروسنج افقی به لودسل ..... ۳۰
شکل۲-۴- نوک فروسنج مخروطی و میله رابطه آن از نمای کلی، نمای جانبی و از نمای پایین ..... ۳۱
شکل۲-۵- نفوذ سنج منشوری و میله رابطه آن از نمای کلی، نمای جانبی و از نمای پایین ..... ۳۱
شکل۲-۶ - تیغه یا پیشانی از نمای روبرو، نمای جانبی، نمای پایین ونمای کلی به همراه بوش موجود در تیغه ..... ۳۲
شکل ۲-۷- چگونگی اتصال نوک و میله فروسنج منشوری به لودسل ..... ۳۳
شکل ۲-۸- نمای کلی و نمای جانبی ساقه در حالی‌که پیشانی به جلو آن جوش خورده است..... ۳۳
شکل ۲-۹- اجزاء مختلف حسگر ..... ۳۴

شکل۲-۱۰- نمای واقعی از اجزائ حسگر شامل ریل و پیچ ثابت کننده لودسل .....۳۴
شکل۲-۱۱- مکانیزم کلی حسگر بدون سیستم ایمنی از نمای جانب و سه بعدی (در سمت راست شکل، مکانیزم به‌طور کامل توسط درپوشهایی پوشانده شده است).....۳۵
شکل ۲-۱۲- شمای کلی از نیروهای وارد به نوک فروسنج وساقه .....۳۶
شکل ۲-۱۳- نمای کلی، جانبی و از بالا حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک در حالتی که هنوز به قاب تراکتور متصل نشده است.....۳۸
شکل ۲-۱۴- تصویر واقعی از حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک در حالتی که هنوز به قاب تراکتور متصل نشده است.....۳۸
شکل۲-۱۵- نمایی از بست اتصال حسگر به قاب.....۳۹
شکل ۲-۱۶- نمایی واقعی از بست اتصال به قاب.....۳۹
شکل۲-۱۷- تصاویری از چرخ تنظیم عمق که در دو طرف قاب نصب می‌شوند .....۴۰
شکل ۲-۱۸- شمای کلی از حسگر خازن- مبناء در حالی که خاک در بین صفحات آن قرار گرفته است .....۴۲
شکل ۲-۱۹- نقشه ابعاد تیغه‌های تشکیل دهنده صفحات خازن که بعد از عملیات حرارتی، کاملاً صیقلی شده‌اند .....۴۳
شکل ۲-۲۰- تصویر واقعی از تیغه‌های تشکیل دهنده صفحات خازن ( همانطور که مشاهده می‌شود سطوح این تیغه‌ها کاملاً صیقلی است).....۴۳
شکل ۲-۲۱- تصویری از سه نمای ابزار حمل کننده الکترودها (صفحات خازن) در حالی که الکترودها در داخل آن قرار گرفته اند.....۴۵
شکل ۲-۲۲- تصویر واقعی از حسگر اندازه گیر رطوبت خاک به‌صورت پیوسته.....۴۵
شکل ۲-۲۳- گیره نگه‌دارنده حسگر اندازه گیره رطوبت برای اتصال به قاب (در سمت راست شکل، حسگر اندازه گیر رطوبت در داخل گیره نگه‌دارنده قرار گرفته است).....۴۶
شکل۲-۲۴- تصویر واقعی از حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک در حالی‌که در گیره نگه‌دارنده ثابت شده است .....۴۷
شکل۲-۲۵- طرحواره ارتباط حسگرها با سامانه پردازش و ثبت اطلاعات.....۴۷
شکل ۲-۲۶- تقویت کننده دیفرانسیلی چهار طبقه استفاده شده جهت تقویت سیگنال خروجی لودسل.....۴۸
شکل۲-۲۷- طرحواره مدار مجتمع ۴۰۴۶ و چگونگی اتصال پایه‌های آن .....۴۹
شکل ۲-۲۸- پنجره مربوط به تنظیمات برنامه Hyperterminal برای ثبت خروجی حسگر ها به‌صورت بلادرنگ ....۵۱
شکل ۲-۲۹- جعبه محاوره ای برنامه ثبت خروجی حسگر ها به‌صورت بلادرنگ.....۵۲
شکل ۳-۱- مولتی متر دیجیتال استفاده شده برای واسنجی لودسل .....۵۵
شکل۳-۲- دستگاه جامع کشش و فشار الف) مانیتور دستگاه، ب) فک‌های دستگاه.....۵۶
شکل۳-۳- تصویری از الف) حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی در حین آزمایش بارگذار ی و ب) سامانه داده برداری و منابع تغذیه و کامپیوتر در حال ثبت داده‌ها .....۵۷
شکل ۳-۴- نمای کلی از چگونگی اتصال حسگرها به قاب پشت تراکتور .....۶۰
شکل۳-۵- و حرکت حسگر اندازه گیر مقاومت و رطوبت در داخل خاک.....۶۱
شکل۳-۶- تصویری از عبور انجام شده و اثر آن بر سطح خاک .....۶۱
شکل۳-۷- چگونگی تقسیم بندی زمین مورد آزمایش و انجام آزمایش‌ها در آن .....۶۲

شکل ۴-۱- منحنی واسنجی لودسل به روش قرار دادن وزنه ..... ۶۷
شکل ۴-۲- منحنی واسنجی لودسل با استفاده از دستگاه جیوه ای ..... ۶۷
شکل ۴-۳- منحنی واسنجی لودسل با استفاده از دستگاه جامع فشار و کشش ..... ۶۸
شکل۴-۴- منحنی واسنجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی مجهز به سامانه داده برداری برحسب کیلو نیوتن ..... ۶۹
شکل۴-۵- منحنی واسنجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی مجهز به سامانه داده برداری بر حسب مگاپاسکال ..... ۶۹
شکل ۴-۶- منحنی واسنجی حسگر رطوبت خاک (رطوبت بر پایه وزنی) ..... ۷۰
شکل ۴-۷- منحنی واسنجی حسگر رطوبت (رطوبت بر پایه حجمی) ..... ۷۱
شکل ۴-۸- تغییرات شاخص مقاومت مکانیکی افقی (HRI) با شاخص مخروطی (CI) در عمق ۲۰ سانتی‌متر (رطوبت وزنی خاک ۱۱/۶٪) ..... ۷۲
شکل ۴-۹- تغییرات شاخص مقاومت مکانیکی افقی (HRI) با شاخص مخروطی (CI) در عمق ۲۵ سانتی‌متر (رطوبت وزنی خاک ۱۴/۷٪) ..... ۷۳
شکل ۴-۱۰- تغییرات شاخص مقاومت مکانیکی افقی (HRI) با شاخص مخروطی (CI) در عمق ۳۰ سانتی‌متر (رطوبت وزنی خاک ۱۲/۶٪) ..... ۷۳
شکل ۴- ۱۱- نمودار تغییرات شاخص مخروطی با عمق در طول یک عبور حسگر (مقدار مقاومت در هر عمق میانگین ۱۱ مشاهده می‌باشد) ..... ۷۵
شکل ۴-۱۲- رابطه شاخص مقاومت مکانیکی افقی خاک با شاخص مخروطی برای عمق ۳۰ سانتی‌متر ..... ۷۵
شکل ۴-۱۳- رابطه شاخص مقاومت مکانیکی افقی با شاخص مخروطی برای عمق ۲۰ سانتی‌متر ..... ۷۶
شکل ۴- ۱۴- گسیختگی ترد ایجاد شده در اثر عبور نوک منشوری حسگر در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک (نما از پشت)۷۷
شکل ۴-۱۵- به‌هم‌خوردگی خاک زمانی که نوک منشوری در بالای عمق بحرانی حرکت می‌کند: الف) نمای روبرو و ب) نمای بالا ..... ۷۸
شکل ۴-۱۶- مقطع کناری خاک زمانی که نوک منشور حسگر در عمق ۲۰ سانتی‌متر کار می‌کرد. ..... ۷۹
شکل ۴- ۱۷- مقطع کناری خاک زمانی که نوک منشوری با کلوخه موجود در خاک به‌هم‌خورده برخورد کرده و در داخل آن فرو میرود (نوک منشوری در عمق ۲۰ سانتی‌متر است)..... ۷۹
شکل ۴- ۱۸- گسیختگی ایجاد شده در اثر عبور نوک منشوری حسگر در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک (نما از پشت) .... ۸۰
شکل ۴-۱۹- کانال ایجاد شده به پهنای ساقه حسگر و به عمق۶ تا ۸ سانتی‌متر ایجاد شده در انتهای محل عبور حسگر در خاک در حالی که نوک منشور حسگر در عمق ۳۰ سانتی‌متری کار کرده است. ..... ۸۱
شکل ۴-۲۰- به‌هم‌خوردگی خاک زمانی که نوک منشوری در زیر عمق بحرانی کار میکند: الف) نمای روبرو و ب) نما ازبالا ..... ۸۱
شکل ۴-۲۱- قرار گرفتن نوک منشوری حسگر در خاک به‌هم‌خورده. ..... ۸۲
شکل ۴-۲۲ – اثر پیشانی ساقه و نوک منشوری حسگر در خاک، در حالی که نوک منشوری حسگر در عمق ۳۰ سانتی‌متر کار می‌کند(نما از پشت). ..... ۸۳
شکل ۴- ۲۳- به‌هم‌خوردگی خاک در جلو حسگر در حالی که نوک منشوری: الف) در عمق ۲۰ سانتی‌متر و ب) درعمق ۳۰ سانتی‌متر، کار می‌کند ..... ۸۴
شکل ۴-۲۴- نمودار تغییرات خروجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک با فرکانس که در عمق ۲۰ سانتی‌متر کار

می‌کرد ..... ۸۵
شکل ۴-۲۵- نمودار تغییرات خروجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک با فرکانس که در عمق ۲۵ سانتی‌متر کار می‌کرد. ..... ۸۵
شکل ۴-۲۶- نمودار تغییرات خروجی حسگر اندازه گیر مقاومت مکانیکی خاک با فرکانس که در عمق ۳۰ سانتی‌متر کار می‌کرد. ..... ۸۶
شکل ۴- ۲۷- تغییرات درصد رطوبت وزنی خاک، اندازه‌گیری شده با حسگر رطوبت و روش نمونه‌گیری درعمق ۲۰ سانتی‌متر. ..... ۸۷
شکل ۴- ۲۸- تغییرات درصد رطوبت وزنی خاک، اندازه‌گیری شده با حسگر رطوبت و روش نمونه‌گیری درعمق ۳۰ سانتی‌متر ..... ۸۷
شکل ۴-۲۹- رابطه بین میانگین غلتان رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با میانگین رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده به روش نمونه گیری ..... ۸۸
شکل ۴- ۳۰- نقشه تغییری پذیری مکانی الف) شاخص مخروطی و ب) شاخص مقاومت مکانیکی افقی خاک مربوط به عمق کارکرد ۳۰ سانتی‌متری نوک منشوری حسگر. ..... ۸۹
شکل ۴-۳۱- نقشه تغییری پذیری مکانی مقاومت مکانیکی افقی خاک الف) در عمق ۲۵ سانتی‌متر و ب) در عمق ۳۰ سانتی‌متر. ..... ۹۰
شکل ۴- ۳۲- نقشه تغییری پذیری مکانی رطوبت خاک الف) اندازه‌گیری شده به روش وزنی و ب) اندازه‌گیری شده توسط حسگر اندازه گیر رطوبت در عمق ۲۵ سانتی‌متر. ..... ۹۱
شکل ٤-۳۳- نقشه تغییری پذیری مکانی الف) رطوبت خاک و ب) شاخص مقاومت مکانیکی افقی، زمانی که حسگرها در عمق ۳۰ سانتی‌متر کار می‌کردند. ..... ۹۲

## فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**

جدول ۲-۱- اطلاعات مربوط به لودسل S-شکل مورد استفاده در حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک.....۲۸
جدول ۲-۲- اطلاعات مربوط به ابعاد لودسل S-شکل مورد استفاده در حسگر اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خا.....۲۹
جدول۲-۳-عناصر تشکیل دهنده فولاد بوهلر.....۴۲

## چکیده

یکی از دلایل عمده تغییر پذیری مکانی عملکرد محصول در نواحی مختلف یک مزرعه، تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی خاک از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر می‌باشد. تراکم یا مقاومت خاک عامل تأثیر گذار بر رشد گیاه و عملکرد محصولات کشاورزی شناخته شده است. در کشاورزی دقیق با اندازه‌گیری پیوسته تغییرات مکانی مقاومت خاک می‌توان نقشه تغییرپذیری مکانی تراکم یا مقاومت خاک در مزرعه را تهیه نمود. برای تعیین درجه تراکم خاک می‌توان مقاومت مکانیکی خاک را اندازه‌گیری نمود. یکی از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک، استفاده از فروسنج مخروطی و تعیین شاخصی با عنوان شاخص مخروطی می‌باشد. تهیه نقشه تغییرپذیری مقاومت خاک با استفاده از فروسنج مخروطی، یک روش ایستگاهی، ناپیوسته، زمان‌بر و کارگربر است. برای رفع این مشکل و به‌دست آوردن اطلاعات پیوسته از تغییرپذیری مقاومت مکانیکی خاک در مزرعه، در این تحقیق حسگری طراحی و ساخته شد که قادر به اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک به‌طور پیوسته در جهت افقی می‌باشد. با تعیین رابطه‌ای بین مقاومت افقی و شاخص مخروطی خاک، می‌توان مقاومت مکانیکی عمودی خاک را تخمین زد. حسگر، مجهز به منشوری با زاویه ۳۰ درجه و سطح مقطع ۳۲۴ میلی‌مترمربع است و می‌تواند به‌صورت افقی در خاک حرکت کند. نیروی وارد به نوک منشور توسط میله رابط به یک لودسل S-شکل که در پشت منشور و در داخل محفظه بسته‌ای قرار گرفته، منتقل می‌شود. نرخ تغییرات نیروی وارد به لودسل با سرعت ۱۰ نمونه بر ثانیه در یک ثبت کننده اطلاعات ثبت می‌شود. از طرف دیگر، مقاومت مکانیکی با محتوای رطوبتی خاک رابطه معکوس دارد. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک به‌طور هم‌زمان، یک حسگر رطوبت خازن-مبناء طراحی و ساخته شد. با استفاده از این دو حسگر می‌توان نقشه تغییر پذیری مکانی رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک مزرعه را تهیه نمود. حسگرها در مزرعه‌ای با بافت لوم رسی سیلتی در سه عمق ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر ارزیابی شدند. مقادیر شاخص مخروطی و محتوای رطوبتی خاک به روش وزنی از همان مزرعه، تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقادیر مقاومت مکانیکی افقی خاک، اندازه‌گیری شده توسط حسگر علاوه بر درجه تراکم خاک به نوع گسیختگی که حسگر در خاک اعمال می‌کند بستگی دارد. میانگین مقاومت خاک در دو عمق ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متری خاک به‌علت تشابه در نوع گسیختگی اعمال شده در خاک، مشابه بود. ولی در عمق ۳۰ سانتی‌متری به‌علت تغییر نوع گسیختگی از ترد به فشاری، میانگین مقاومت افقی خاک نسبت به دو عمق دیگر ۳ برابر بود. همبستگی معنی‌داری ($R^2$=۰/۷۵) بین مقادیر شاخص مقاومت افقی و شاخص مخروطی در عمق ۳۰ سانتی‌متر وجود داشت، ولی رابطه معنی‌داری بین این مقادیر در عمق ۲۰ سانتی‌متری مشاهده نشد. اگرچه بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر رطوبت و روش وزنی به‌علت تأثیر درجه حرارت بر ظرفیت خازنی خاک تفاوت وجود داشت، ولی همبستگی معنی‌داری ($R^2$=۰/۷۰) بین مقادیر اندازه‌گیری شده با این دو روش مشاهده شد.

# فصل اول
# مقدمه و بررسی منابع

## ۱-۱- مقدمه

با رشد روز افزون جمعیت انسانی، بشر روز به روز بیشتر در پی راه‌هایی برای تهیه غذای مورد نیاز این جمعیت می‌باشد. ابداع و توسعه فنآوری جدید جمع‌آوری و انتقال داده‌های مربوط به تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک و گیاه و متعاقب آن تخصیص بهینه نهاده‌ها بر اساس ظرفیت و نیاز مکانی نقاط مختلف مزرعه، مدیریت جدیدی را به نام کشاورزی دقیق[۱] بنا نهاده است[۳]. به‌کارگیری مدیریت کشاورزی دقیق در مزرعه می‌تواند باعث افزایش کمیت و کیفیت محصول و همچنین حفظ محیط زیست شود[۸]. فرآیند تصمیم‌گیری در این فنآوری، نیاز به اطلاعاتی در خصوص تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک دارد[۳].

پیشرفت در زمینه کشاورزی دقیق به حدی رسیده است که به کشاورز اجازه می‌دهد که تغییرات درون مزرعه که وجود آن از قبل شناخته شده ولی قابل اداره نبود را سنجش، تحلیل و مدیریت نماید. توانایی در اداره تغییرات حاصلخیزی درون مزرعه و بیشینه نمودن محصول همواره مدنظر و مطلوب کشاورز، به‌ویژه کشاورز با منابع ارضی محدود بوده است. ابداع و توسعه ریز پردازنده‌ها و دیگر فن

---

۱-Precision agriculture

آوری‌های الکترونیک در سال‌های اخیر، ابزاری جدید را فراهم ساخته است تا کشاورزان را در رسیدن به این هدف یاری رساند[۳].

تهیه نقشه[۱] تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک مزرعه، یکی از ملزومات کشاورزی دقیق در مزرعه می‌باشد. در گذشته به‌دلیل ناتوانی در به‌دست آوردن سریع اطلاعات مربوط به خاک و گیاه و همچنین زیاد بودن هزینه‌ها، محدودیت‌های زیادی بر سر راه تهیه نقشه تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک مزرعه، وجود داشت. با گسترش روز افزون فنآوری اطلاعات و ارتباطات، تهیه نقشه از ویژگی-های خاک و محصول در مزرعه امکان پذیر و کم هزینه‌تر شده است. ویژگی‌هایی که موجب تغییرپذیری حاصلخیزی خاک در مزرعه می‌شود شامل بافت، عناصر غذایی، مواد آلی، درجه تراکم یا مقاومت مکانیکی و درصد رطوبت خاک می‌باشد[۱۰]. با تهیه نقشه تغییر پذیری ویژگی‌های خاک در مزرعه، می‌توان با استفاده از فنآوری نرخ متغیر در مصرف نهاده و انرژی صرف جوئی نمود.

برای کاهش مصرف انرژی در مرحله خاک‌ورزی، می‌توان از خاک‌ورزی عمق متغیر استفاده نمود. برای این منظور باید نقشه تغییرپذیری مقاومت خاک در لایه‌های مختلف را تهیه نمود. مطالعات برروی لایه‌های مختلف خاک نشان داده است که عمق لایه‌های محدود کننده ریشه گیاه از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر در مزرعه تغییر می‌کند. به عبارت دیگر عمق سخت لایه[۲] تغییراتی بین ۱۵ تا ۳۵ سانتی‌متر دارد[۷]. این مطالعات همچنین نشان می‌دهد که عمق و مقاومت سخت لایه خاک می‌تواند در دو بعد عمودی و افقی در یک فاصله کوتاه تغییر کند. این فاصله کوتاه می‌تواند بین ردیف‌های کشت و فاصله بین ردیفی که محل عبور چرخ‌ها است، باشد[۸ و ٦].

در گذشته، کشاورزان به‌دلیل بی‌اطلاعی از تغییرپذیری مکانی عمق لایه‌های متراکم خاک (سخت لایه)، ناچار به خاک‌ورزی عمق ثابت بودند. خاک‌ورزی عمق ثابت بسته به هدف کشاورز، می‌تواند سطحی یا عمیق باشد، ولی در صورت عمیق بودن، خاک‌ورزی بسیار انرژی‌بر است. بنابراین، خاک-ورزی عمق متغیر[۳] می‌تواند بسیار سودمند و کم هزینه باشد. مبنای خاک‌ورزی عمق متغیر یا همان خاک-ورزی دقیق[٤]، بر اساس تغییر عمق کار ابزار متناسب با عمق لایه متراکم می‌باشد. اطلاعات مربوط به لایه متراکم خاک یا به صورت نقشه از پیش تعیین شده، مشخص گردیده و به ابزار دیکته می‌شود و یا با

---

۱-Soil mapping
۲-Hard pan
۳-Variable depth tillage
٤-Precision tillage

استفاده از حسگرهای اندازه‌گیر مقاومت خاک به‌صورت بلادرنگ[۱] تعیین گردیده و بر اساس این اطلاعات، عمق کار ابزار تغییر می‌کند.

مقاومت مکانیکی خاک شاخصی از تراکم خاک است و به دو روش می‌توان نقشه‌های تغییرپذیری مکانی مقاومت خاک زمین- مرجع[۲] را تهیه نمود: الف) روش ایستگاهی (توقف و حرکت)[۳] و ب) روش پیوسته. روش ایستگاهی توسط فروسنج‌های مخروطی عمودی اتوماتیکی که به‌صورت روش توقف و حرکت نقاط مختلفی از سطح مزرعه را مورد فروسنجی قرار داده و نقشه زمین را تهیه می‌کند، انجام می‌گیرد[۳۵]. با ثبت طول و عرض جغرافیایی هرنقطه توسط سامانه موقعیت یاب جهانی[٤] (GPS) می‌توان نقشه تغییرپذیری مکانی مقاومت خاک را برای هر لایه توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی[٥] (GIS)، به‌دست آورد. اندازه‌گیری با فروسنج‌ها بسیار وقت‌گیر و دارای تغییرات زیادی از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌باشد[۱۹]. در کشاورزی دقیق برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک به صورت بلادرنگ اغلب از فرو سنج‌های افقی استفاده می‌شود. این فرو سنج‌ها برای اندازه‌گیری تغییرپذیری مقاومت خاک در عمق‌های مختلف به وجود آمدند. از طرف دیگر، به دلیل وابسته بودن مقاومت مکانیکی به محتوای رطوبت خاک، نیاز به اندازه‌گیری هم‌زمان هر دو عامل احساس می‌شود[١٤]. بنابراین، اندازه‌گیری دو مشخصه مقاومت مکانیکی و محتوای رطوبتی خاک توسط حسگرهای بلادرنگ و همراه با سامانه مکان‌یاب جهانی (GPS)، ما را قادر به تهیه نقشه تغییر پذیری مکانی تراکم و رطوبت خاک می‌نماید.

### ۱-۲-بررسی منابع

#### ۱-۲-۱- تراکم خاک

تراکم خاک یک خصوصیت دینامکی خاک است و دارای علل مختلفی است که عوامل زیر از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند: ۱) خصوصیات ذاتی مربوط به تشکیل و ژنز خاک، ۲) انقباض طبیعی در اثر خشک شدن خاک، ۳) آبیاری سطحی که موجب باز شدن کلوخه‌ها و خاک دانه‌های ناپایدار خاک شده و موقعیت ذرات را نسبت به یکدیگر تغییر می‌دهد، ۴) فشردگی طبیعی و مجدد خاک در طول فصل زراعی و ۵) عبور تراکتور و سایر ماشین‌های کشاورزی روی سطح و یا در داخل خاک، به‌ویژه در حالتی

---

۱-On-the-go
۲-Geo-reference
۳-Stop-and-go
٤-Global Positioning System
٥-Geographical Information System

که مقاومت خاک به علت زیاد بودن رطوبت خاک، کم بوده و امکان صدمه به ساختمان خاک وجود دارد[۱۶].

شدت و عمق تراکم در خاک یک مزرعه از نقطه‌ای به نقطه دیگر بسیار متفاوت است. به‌طور مثال، در اثر عبور تراکتور و سایر ماشین‌های کشاورزی، شدت تراکم در هر نقطه بستگی به فشار در سطح تماس وسیله زمین گیرائی (چرخ لاستیکی یا چرخ زنجیری) با خاک، مقدار وزن بر هر اکسل تراکتور، فشار باد لاستیک، نوع ادوات، بافت و رطوبت و تنش پیش تراکمی[۱] خاک دارد[۴۰]. فشردگی ایجاد شده در خاک، بسته به شرایط می‌تواند محدود به لایه خاک سطحی بوده یا به لایه عمقی‌تر خاک (خاک تحت الارضی) نیز گسترش یابد[۳۳]. در بعضی از مواقع لایه‌های سخت شده موضعی به نام کفه شخم[۲] یا سخت لایه دیده می‌شوند. کفه شخم بیشتر در اثر حرکت ادوات خاک‌ورزی، به‌ویژه گاوآهن برگرداندار در خاک‌های سنگین بافت (رسی) و با وجود رطوبت زیاد در عمق کار ایجاد می‌شود. در حالی‌که سخت لایه در اثر مراحل خاک‌سازی وتشکیل خاک ایجاد می‌شود(مانند افق آرجیلیک)[۴].

تراکم خاک اغلب باعث کاهش و در نهایت متوقف شدن توسعه ریشه گیاه در خاک می‌شود و در نتیجه موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. افزایش جرم مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک، فعالیت‌های بیولوژیکی ریشه گیاه را کم کرده و باعث کاهش میکرواورگانیزم‌ها در خاک به‌دلیل کاهش تخلخل در خاک می‌شود. تراکم خاک همچنین باعث کاهش کیفیت هوا، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و به خطر افتادن اتمسفر به‌دلیل افزایش برخی از گازها از جمله دی‌اکسیدکربن و متان در جو می‌شود[۲۲].

آپادیایای[۳] و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که در سیستم تولید گوجه فرنگی آبی، تغییر در عملکرد محصول در سطح مزرعه، به‌دلیل تغییر رطوبت در دسترس گیاه در هر نقطه از مزرعه است. تحلیل‌های چند متغیری آن‌ها نشان داد که کمبود رطوبت خاک به‌دلیل رفتار ضعیف نفوذپذیری خاک است که دلیل اصلی کاهش محصول در مزرعه شده است. این کاهش نفوذپذیری آب در خاک، گاهاً با افزایش سطح تراکم خاک و یا با تغییرات ویژه در بافت خاک به‌وجود می‌آید. بافت خاک یک خصوصیت استاتیکی خاک است، ولی تراکم خاک یک خصوصیت دینامیکی خاک است که با گذشت زمان و بر اساس انجام عملیات مختلف و عوامل محیطی تغییر می‌کند[۱۴].

---

۱-Pre-compaction stress
۲-Plow pan
۳-Upadhyaya

تحقیقات انجام گرفته در زمینه تراکم خاک با رشد گیاه نشان داده است که بیشترین سطح عملکرد برای هر محصول، در یک سطح بهینه تراکم خاک اتفاق می‌افتد و بارگذاری بیش از این مقدار می‌تواند مضر باشد. برای مثال در مقاومت مکانیکی معادل ۷۰۰ کیلوپاسکال توسعه ریشه در گیاه پنبه به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد و به همین ترتیب در مقاومت ۱۱۰۰ کیلوپاسکال برای نخود فرنگی و در مقاومت ۲۰۰۰ کیلوپاسکال برای بادام زمینی. ازاین‌رو تراکم خاک باید به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در سیستم‌های مدیریت تولید محصول به حساب آورده شود[۳۳].

تعیین لایه‌های متراکم در خاک و یا به عبارت دیگر عمقی از خاک که فشردگی و یا به عبارت بهتر فشردگی بیش از حد مجاز در آنجا ایجاد شده، یکی از دغدغه‌های محققین و از اهداف تهیه نقشه مقاومت مکانیکی خاک در مزرعه بوده است. تاکنون چندین روش مستقیم و غیر مستقیم برای ارزیابی تراکم‌پذیری خاک پیشنهاد شده است. روش‌های مستقیم شامل اندازه‌گیری چگالی ظاهری خشک، حجم ویژه، نسبت پوکی و تخلخل می‌باشد. روش‌های غیرمستقیم اغلب به‌صورت اندازه‌گیری افزایش در مقاومت مکانیکی یا کاهش پیوستگی منافذ می‌باشد. این روش‌ها شامل تعیین مقاومت به فرورفتن مخروط یک فروسنج مخروطی (مقاومت مکانیکی خاک در برابر نفوذ یک جسم نفوذ کننده) و نفوذ پذیری هوا یا آب در خاک می‌باشد[۲۱].

در تعیین تراکم خاک با روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم باید همواره این نکته را مد نظر داشت که ممکن است تغییرات در شرایط خاک مانند افزایش در چگالی ظاهری، به درستی تفسیر نشود. برای مثال، افزایش مقاومت به نفوذ مخروط ممکن است از تغییرات در محتوای رطوبتی و تغییرات ساختار در پیوند خاک دانه‌ها حاصل شود، در حالی‌که حجم منافذ در خاک متراکم تغییر نکرده باشد[۳۱].

**۱-۲-۲- مقاومت مکانیکی خاک**

تهیه نقشه تغییرپذیری مکانی مقاومت مکانیکی خاک در راستای عمودی و افقی، امکان تعیین شرایط مختلف خاک مربوط به ظرفیت نگهداری آب، مقاومت به نفوذ ریشه و دیگر رفتارهای فیزیکی و مکانیکی خاک مزرعه را تأمین می‌کند[۶]. تاکنون محققین زیادی در پی یافتن راه‌هایی برای اندازه‌گیری مقاومت خاک در عمق‌های مختلف بوده‌اند و ابزارهای زیادی برای اندازه‌گیری مقاومت خاک چه به‌صورت استاتیکی و چه به‌صورت دینامیکی ساخته‌اند. یکی از ساده ترین روش‌ها استفاده از فروسنج مخروطی عمودی می‌باشد.

فروسنج‌ها انواع مختلفی دارند که به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور مثال، بعضی از انواع آن‌ها، دارای قابلیت ثبت پیوسته نتایج و رسم نمودار هستند. فروسنج‌های اولیه که بسیار ساده بودند، از سال‌های ۱۸۴۶ استفاده می‌شدند، زیرا از آن زمان کشاورزان ارزش این وسیله را در اندازه‌گیری تراکم خاک، که نتیجه عملیات خاک‌ورزی گذشته بود، دریافته بودند. انواع فروسنج‌های دستی دارای ثَبات، از دهه ۱۹۵۰ به بازار ارائه شده‌اند[۱۰].

برای تعیین مقاومت مکانیکی خاک با فروسنج‌های عمودی از شاخص مخروطی[۱]، که از تقسیم نیروی لازم برای فرو کردن مخروط تا عمق معین بر سطح مقطع مخروط محاسبه می‌شود، استفاده می‌شود[۲۸].

شاخص مخروطی یک معیار تجربی از شرایط خاک است و تأثیر چندین خصوصیت خاک را اندازه‌گیری می‌کند[۴۴]. بنابراین، شاخص مخروطی یک پارامتر ترکیبی، شامل اجزاء برشی، فشاری و اصطکاکی است که سهم نسبی هرکدام هنوز شناخته نشده است. از سوی دیگر، وقتی خاک‌های کشاورزی در حالت غیراشباع هستند، مقاومت برشی به مقدار زیادی متأثر از محتوای رطوبتی خاک می‌باشد. بنابراین، در تعیین تراکم خاک با روش غیرمستقیم، علاوه بر اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی، محتوای رطوبتی خاک نیز باید به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شود[۲۸].

مشخصات و مراحل آزمایش تعیین مقاومت مکانیکی خاک با یک فروسنج مخروطی(شکل ۱-۱) توسط جامعه مهندسین کشاورزی آمریکا[۲] استاندارد شده است. در اکثر این فروسنج‌ها از نوعی حسگر اندازه‌گیر نیرو یا لودسل[۳] برای نشان دادن نیرو استفاده می‌کنند. حفظ سرعت ثابت نفوذ در انواع دستی آن به‌سختی به‌دست می‌آید و به همین دلیل، محققان بسیاری ازانواع فروسنج‌های پشت‌تراکتوری استفاده کرده‌اند. انواع پشت‌تراکتوری هزینه کارگری کمتر و قدرت نفوذ بالاتری در زمین‌های سخت را دارند[۱۵].

محققان همچنین در مورد ارتباط بین مقاومت فروسنج مخروطی، چگالی ظاهری خاک و محتوای رطوبتی در شرایط مختلف خاک، مطالعاتی انجام داده‌اند. این تحقیقات نشان داده است که مقاومت به نفوذ پذیری خاک به طور معنی داری با تغییر رطوبت و چگالی ظاهری خاک رابطه دارد[۲۱].

---

۱-Cone Index
۲-The American Society of Agricultural Engineers
۳-Loadcell