ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران (کرج)
۲٤ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹

توسعه و ارزیابی یک حسگر افقی برای اندازه‌گیری در حال حرکت رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک

مجتبی نادری بلداجی[۱]، احمد شریفی[۲]، بهاره جمشیدی[۲]، فریبرز عباسی[۲]، محمد یونسی[۲]، سعید مینایی[۳]

دانشجوی دکتری مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

اعضاء هیئت علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

رطوبت خاک یکی از عوامل مهم در رشد گیاه و مدیریت مزرعه است. میزان رطوبت خاک بر پارامترهایی مانند مقاومت مکانیکی، جرم مخصوص ظاهری خاک و غیره تاثیر بسزایی دارد و بنابراین نقش آن در عملکرد محصول بسیار مشهود است. روش معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک، روش وزنی است که روشی طاقت فرسا، هزینه‌بر و وقت-گیر است و اطلاعات غیر پیوسته‌ای از میزان رطوبت به دست می‌دهد. هم‌اکنون اندازه‌گیری پیوسته ویژگی های خاک یکی از موضوعات جذاب برای محققان و مهندسانی است که در حوزه تحقیقات کشاورزی دقیق فعالیت می‌کنند. در این تحقیق، یک حسگر خازنی مناسب به منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک به طور پیوسته در دو مرحله طراحی، ساخته و ارزیابی شد. مرحله اول شامل طراحی و ساخت حسگر خازنی، آزمون و ارزیابی آزمایشگاهی و مرحله دوم پیوسته-سازی و ترکیب حسگر رطوبت و مقاومت مکانیکی و بررسی امکان اندازه‌گیری این دو ویژگی خاک با حسگر ساخته شده در حال حرکت بود. در ارزیابی استاتیکی، از خاک لومی رسی موجود در مخزن خاک ۳۲ نمونه در گلدان های پلاستیکی تهیه شد که به وسیله آن حسگر رطوبت در ٤ سطح رطوبتی و۲ سطح جرم مخصوص ظاهری ۱/۲ و ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و هر کدام با ٤ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون استاتیکی نشان دادند که در خاک با جرم مخصوص ۱/۵ یک رابطه درجه دو با ضریب تعیین ۹٦/. بین محتوای حجمی رطوبت خاک و در خاک با جرم مخصوص ۱/۲ یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۸۹/. وجود دارد. در آزمون دینامیکی حسگر در مخزن خاک، ۳ نوع آزمایش انجام گرفت. ۱- اندازه گیری رطوبت و مقاومت مکانیکی در یک لایه با فشردگی و رطوبت تقریباً یکنواخت. ۲- اندازه گیری رطوبت و مقاومت مکانیکی در یک لایه با رطوبت متغیر در طول مخزن ۳- مقایسه مقاومت مکانیکی اندازه گیری شده با حسگر ترکیبی و حسگر مخروطی تنها. نتایج آزمون های مخزن خاک نشان دادند که قابلیت حسگر در اندازه گیری پیوسته رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک قابل قبول بوده و با استفاده از اندازه گیری همزمان می توان اثر متقابل بین این دو ویژگی را تشخیص داده و تفکیک نمود ولی نیاز به بهینه سازی در مدار الکترونیکی و اندازه گیری حسگر رطوبت می باشد.

واژگان کلیدی: حسگر، رطوبت خاک، مقاومت مکانیکی، خاک ورزی دقیق، اندازه گیری در حال حرکت

مقدمه

گیاه آب موردنیاز خود را از طریق ریشه‌ها از خاک جذب می‌کند. بنابراین، موجودیت و مهیا بودن آب در خاک از عوامل اصلی رشد گیاه است. علاوه بر این، بسیاری از خصوصیات خاک مانند پایداری، خمیرایی، استحکام، قابلیت فشرده شدن، نفوذپذیری و قابلیت تردد روی خاک بستگی به مقدار آب خاک دارد. به طور کلی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و محیطی خاک به عنوان عوامل اصلی تغییرات در عملکرد محصول به شمار می روند. یوپادهیایا و همکاران (Upadhyaya *et al.*, 1999) گزارش کردند که در تولید گوجه فرنگی، تغییرات در عملکرد موضعی مزرعه تحت تاثیر موجودیت رطوبت می باشد. به بیان دیگر کمبود رطوبت خاک به دلیل تهویه ضعیف خاک یا همان فشردگی و همچنین تغییرات در بافت خاک دلایل اصلی کاهش عملکرد می باشند. لذا جهت تشخیص این تغییرات موضعی در رطوبت و فشردگی نیاز به توسعه سامانه های حسگر در حال حرکت بوده تا به وسیله آن نقشه پیوسته این تغییرات تهیه گردد تا مدیریت موضعی مزرعه جهت افزایش بهره وری میسر گردد.

مقدار آب موجود در هر واحد جرم یا حجم خاک را محتوای رطوبت خاک[1] گویند (علیزاده، ۱۳۸۳). اغلب دستگاه‌های موجود برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت ایستگاهی و توسط نیروی انسانی قابل استفاده است. هم‌اکنون که بحث مدیریت مزرعه و کشاورزی دقیق هر چه پررنگ‌تر در حال نمود است، لزوم وجود ابزارهای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک از جمله رطوبت به طور پیوسته و همزمان با حرکت ابزار در خاک بسیار حائز اهمیت و مورد توجه محققان است. لذا در این تحقیق سعی بر آن بود تا ابزار مناسبی به منظور اندازه‌گیری رطوبت و مقاومت مکانیکی به طور پیوسته و همزمان با حرکت طراحی و ساخته شود. در این راستا به صرفه بودن اقتصادی نیز مد نظر بود.

رطوبت خاک به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های مستقیم، مقادیر جرمی یا حجمی رطوبت از طریق خشک‌کردن نمونه‌های خاک در آون و در مدت زمان معین به طور مشخص اندازه‌گیری می‌شوند. این روش‌ها با این‌که کاربری بیشتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم دارند اما بسیار گران و وقت‌گیر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دارد. لذا ترجیح داده می شود که از روش‌هایی استفاده شود که اندازه‌گیری رطوبت را در مزرعه انجام می‌دهند (علیزاده، ۱۳۸۳ ; Zazueta & Xin, 2005).

برخی از روش‌های غیرمستقیم عبارتند از : روش قالب یا بلوک گچی[2] ، روش تانسیومتری[3] ، روش نوترون پروب[4] (Bell *et al.*, 1969)، روش انعکاس‌سنجی زمانی[5] (TDR) (Vaz *et al.*, 2001)، روش خازنی[6]، روش-های نوری[7] (Mouazen *et al.*, 2005) و روش‌های از راه دور[8]، روش GPR[9] (Redman *et al.*, 2003).

1- Moisture content
2- Gypsum Block
3- Tensiometric

بررسی روش‌های موجود اندازه‌گیری رطوبت خاک و تحقیقات انجام شده در این زمینه، به ویژه روش‌های به کار رفته در اندازه‌گیری پیوسته رطوبت نشان می‌دهد که بین دو روش TDR و خازنی به دلیل مزایای ذکر شده از قبیل: قیمت مناسب، سرعت پاسخ‌دهی بالا و غیره، روش خازنی نسبت به TDR مناسب‌تر است. لذا در این تحقیق، طراحی و ساخت حسگر بر پایه روش خازنی مد نظر قرار گرفت.

تحقیقاتی به منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش خازنی و به صورت پیوسته و در حال حرکت تاکنون انجام شده که از آن جمله می‌توان به تحقیق سان و همکاران (Sun *et al.*, 2005) اشاره کرد. این محققین یک پنترومتر افقی برای اندازه‌گیری همزمان و پیوسته رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک طراحی کردند که در آن حسگر رطوبت شامل دو رینگ فلزی به عنوان دو الکترود خازن است که به وسیله سه رینگ عایق از هم جدا و همگی بر روی میله نفوذ افقی نصب شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که این پنترو متر افقی مرکب، ابزار مناسبی برای ایجاد اطلاعات مفید از خصوصیات فیزیکی خاک است. در یک تحقیق پیشرفته تر، زنگ و همکاران (Zeng *et al.*, 2008) حسگر ساخته شده توسط سان و همکاران را به حسگر اندازه گیری همزمان هدایت الکتریکی نیز مجهز کردند. در نتیجه سه ویژگی محتوای رطوبت، مقاومت مکانیکی و هدایت الکتریکی خاک به طور همزمان و در حال حرکت اندازه گیری شد.

اندراد و همکاران (Andrade *et al.*, 2001) نیز یک حسگر رطوبت خازنی ساخته شده توسط Retrokool Inc. را به منظور کاربردهای اندازه‌گیری پیوسته، با قرار دادن آن پشت یک تیغه و ساخت حسگر پیوسته ارزیابی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که حسگر به تغییرات بافت خاک غیرحساس و به تغییرات دما و شوری خاک حساس است.

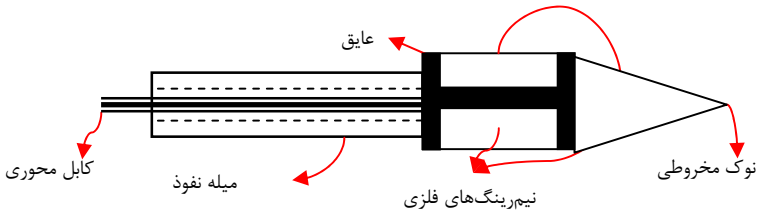
هدف از ترکیب حسگرها و اندازه گیری همزمان ویژگی های خاک تعیین و تفکیک اثرات متقابل بین این ویژگی ها است. به عنوان مثال در اندازه گیری مقاومت مکانیکی با یک حسگر مخروطی که فقط نیروی مقاومت مخروط اندازه گیری می شود، اگر در نقطه ای از خاک مقدار نیروی اندازه گیری شده با این حسگر کاهش یابد به طور قطع نمی توان نتیجه گرفت که فشردگی یا جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافته زیرا ممکن است رطوبت خاک در این نقطه بیشتر از جاهای دیگر بوده و چون مقدار نیروی مقاومت مخروط تحت تاثیر شدید محتوای رطوبت است، مقدار کمتری داشته است. لذا با اندازه گیری هم زمان این ویژگی ها می توان به پیش بینی دقیق تری از وضعیت فشردگی یا وزن مخصوص ظاهری بر پایه خشک رسید.

4- Neutron Probe
5- Time-Domain Reflectometry
6- Capacitance method
7- Spectroscopy
8- Remote Methods
9- Ground Penetrating Radar

مواد و روش ها

طراحی و ساخت حسگر خازنی

به منظور طراحی کاوشگر رطوبت خاک بر پایه اصول اولیه خازن‌ها، نیاز به دو الکترود فلزی درون خاک می باشد که خاک اطراف آن‌ها نقش دی‌الکتریک را دارد. لذا الکترودهای فلزی جزئی از یک پنترومتر افقی در نظر گرفته شد. ضمن این که وجود نوک مخروطی باعث نفوذ و پیشروی حسگر رطوبت در خاک نیز می‌شود. برای قرار دادن الکترودها روی میله نفوذ تا کنون دو روش پیشنهاد شده است: ۱- الکترودهای خازن شامل نوک مخروطی و یک رینگ فلزی هستند که رینگ روی میله نفوذ قرار می‌گیرد (Sun *et al.*, 2004). ۲- هر دو الکترود رینگ‌های فلزی هستند که روی میله نفوذ تعبیه می‌شوند (Sun *et al.*, 2005). در تحقیق حاضر یک شیوه کاملاً جدید برای قرار دادن الکترودها روی میله نفوذ به کارگرفته شد. در این شیوه از دو نیم رینگ مسی استفاده شد که با فاصله از یکدیگر روی میله نفوذ قرار گرفته و با عایق از یکدیگر جدا شدند. امتیاز این روش نسبت به دو روش به کار رفته تاکنون، می‌تواند کوتاه شدن طول میله و قرارگیری همزمان هر دو حسگر در یک موقعیت باشد. شماتیکی از کاوشگر مورد نظر در شکل ۱ آورده شده است.

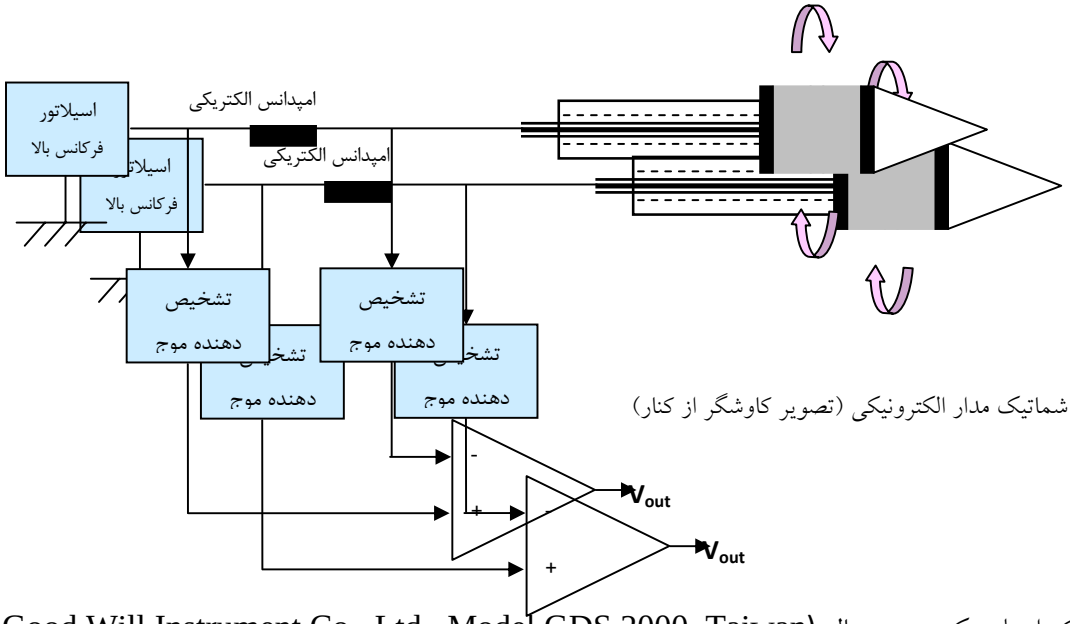


شکل ۱- شماتیک کاوشگر خازنی طراحی شده از بالا

میله نفوذ و نوک مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ و ابعاد مخروط مطابق استاندارد (ASAE,S313.3 2006) در نظر گرفته شد. به گونه‌ای که مخروط با قطر مقطع ۲۰/۲۷ میلی‌متر و زاویه راس ۳۰ درجه بوده و قطر میله نفوذ نیز ۱۶ میلی‌متر می باشد. نیم‌رینگ‌های الکترود از مس و عایق‌های بین آنها از تفلون انتخاب شد. قطر نیم‌رینگ‌های فلزی و عایق، هم قطر مقطع مخروط در نظر گرفته شد. به منظور عبور سیم انتقال دهنده سیگنال، سوراخی به قطر ۵ میلی متر در میله مخروط زده شد. سر این سیم با لحیم و از داخل به الکترودها متصل شدند.

از آنجا که در این تحقیق قرار شد تا علاوه بر رطوبت خاک، مقاومت مکانیکی آن نیز اندازه گیری شود لذا ابعاد تیغه مورد نیاز برای نصب پروب بر روی آن و اتصال به واحد کشنده مخزن خاک استخراج شد. طول تیغه ۵۵۰ میلی متر، پهنای آن ۱۰۰ میلی متر، ضخامت آن ۲۵، زاویه تیزی لبه آن ۳۰ درجه و زاویه مثلث پایین ۴۵ درجه می باشد.

دو روش رایج برای اندازه‌گیری پیوسته ظرفیت کاوشگرهای رطوبت خازنی خاک وجود دارد؛ یک روش عمومی بر پایه اندازه‌گیری فرکانس است (Dean *et al*., 1987) و چون فرکانس نوسانی با مقدار ظرفیت خازن تغییر می‌کند، بنابراین به خصوصیات دی‌الکتریک خاک اطراف بستگی دارد. روش دیگر، تعیین مقاومت الکتریکی کاوشگر خاک در یک فرکانس ثابت است (Gaskin & Miller, 1996). در هر دو روش، فرکانس کار به منظور کاهش اثر شوری خاک باید به اندازه کافی بالا باشد، چون شوری خاک به طور مستقیم بر رفتار دی‌الکتریک خاک اثر می‌گذارد، به ویژه در فرکانس‌های کمتر از ۳۰ MHz (Paltineanu,1997). پژوهشگران به منظور یافتن مدل ریاضی مناسب برای محاسبه مقاومت کاوشگرهای چندمیله‌ای، سه فرکانس ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز را بررسی نمودند (Sun & Kromer, 2003). در تحقیقات دیگری اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با یک فرکانس ثابت ٦٦ MHz (Sun *et al*., 2004) و ۱۰۰ MHz (Sun *et al*., 2005) انجام شده است. در تحقیق حاضر نیز به منظور تضعیف اثر شوری خاک بر اندازه‌گیری تا حد امکان، از روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و با فرکانس ثابت ۱۰۰ MHz استفاده شد. شکل ۲ شماتیک مدار الکترونیکی را نشان می‌دهد.



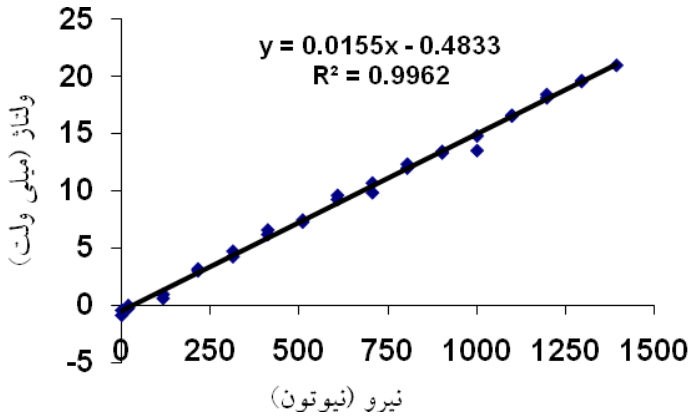
شکل ۲- شماتیک مدار الکترونیکی (تصویر کاوشگر از کنار)

از یک اسیلوسکوپ دیجیتال (Good Will Instrument Co., Ltd , Model GDS 2000, Taiwan) به منظور ثبت موج در این تحقیق استفاده گردید. همچنین به منظور تولید سیگنال ۱۰۰ مگا هرتز جهت تغذیه حسگر از دستگاه اسیلاتور یا مولد فرکانس (ARMA Co., Ltd, Model ASG- 150A) استفاده گردید که برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز را به سیگنال ۱۰۰ مگا هرتز تبدیل می کند.

پیوسته سازی حسگر ترکیبی رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک

به منظور اندازه گیری در حال حرکت، حسگر ساخته شده به همراه یک مبدل نیرو S شکل (لودسل) (Model DBBP, BONGSHINLOAD CELL CO., LTD, Korea) بر روی تیغه نصب گردید. ظرفیت مبدل نیرو

۲۰۰ کیلوگرم و حساسیت آن mV/V ۳ بود. شکل ۳ نمودار واسنجی لودسل را نشان می دهد. ضریب تعیین بالا نشانه دقت بالای اندازه گیری با معادله برازش شده می باشد. ولتاژ تغذیه لودسل در حین واسنجی ۱۰ ولت بوده و نیاز است تا در اندازه گیری های واقعی نیز از همین ولتاژ تغذیه استفاده شود. برای ثبت خروجی پل وتسون از یک دیتالاگر جدید پرتابل (IOtech, Personal Daq/50 Series, USA) و نرم افزار تحصیل داده DASY lab, 11 استفاده شد.



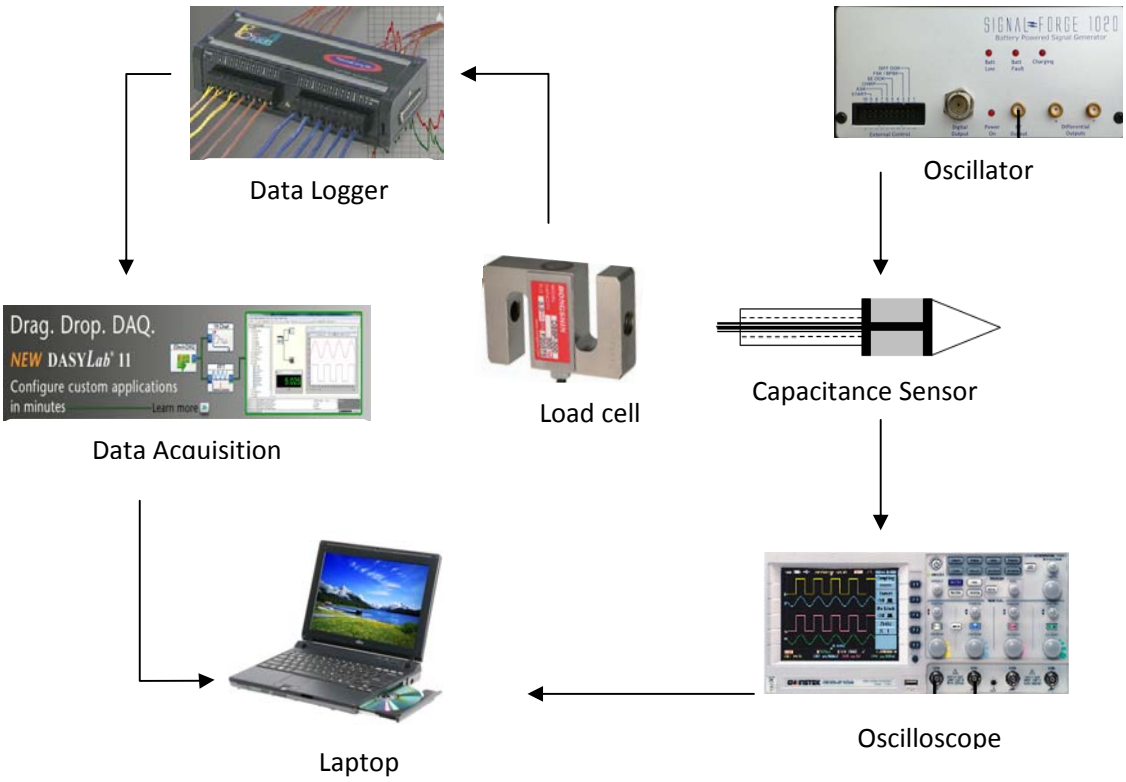
شکل ۳- نمودار واسنجی لودسل

در مرحله بعد مجموعه حسگرها و تیغه بر روی واحد کشنده مخزن خاک نصب گردید. که در شکل ٤ نشان داده شده است. از یک ورق فلزی تا شده که پشت تیغه بسته می شود برای تهیه تکیه گاه لودسل و همچنین محافظت سیم های خروجی استفاده شد. شکل ۵ مجموعه ابزارهای مورد استفاده این اندازه گیری را نشان می دهد.

شکل ٤- نصب حسگر مرکب بر روی واحد کشنده مخزن خاک

آزمون حسگر رطوبت در شرایط استاتیکی

به منظور آزمون و ارزیابی حسگر رطوبت ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی از ۳۲ ظرف پلاستیکی استوانه ای با قطر دهانه ۱۲۰ mm و ارتفاع ۱۷۰ mm استفاده شد. خاک در چهار سطح رطوبت متفاوت و در دو سطح وزن مخصوص ظاهری در این ظروف پر شدند. به منظور تهیه خاک در رطوبت های مختلف ابتدا از خاک درون مخزن خاک به مقدار کافی خارج کرده و با الک شماره ۵ با قطر سوراخ ٤ میلی متر سرند شد تا خاک با ابعاد دانه های یکنواخت به دست آمد. سپس خاک در یک محیط باز و در معرض نور خورشید پهن شد و تا چند روز باقی ماند تا کاملاً خشک شد. از آنجا که قرار بود خاک در ٤ سطح رطوبت حجمی متفاوت تهیه شود حد نهایی رطوبت یعنی رطوبت اشباع آن نیز به روش استاندارد اندازه گیری شد تا به عنوان یکی از سطوح رطوبت استفاده شود. در نهایت رطوبت اشباع خاک مورد آزمایش ٪۲۹/۲ وزنی بر پایه تر به دست آمد.



شکل ۵- مجموعه ابزار های مورد استفاده در اندازه گیری در حال حرکت

با اندازه گیری رطوبت اشباع به روش بالا قرار شد تا سه سطح رطوبت ٦، ١٣، ١٨ درصد وزنی نیز از خاک خشک تهیه گردد. از طرف دیگر برای هر سطح رطوبت دو سطح وزن مخصوص ظاهری ١/٥ و ١/٢ گرم بر سانتیمتر مکعب نیز در نظر گرفته شد. همچنین برای هر تیمار نیز ٤ تکرار پیش بینی شد که در مجموع ٣٢ ظرف تهیه گردید.

آزمون حسگر رطوبت در شرایط دینامیکی

به منظور آزمون و ارزیابی حسگر مرکب، سه نوع آزمون در مخزن خاک انجام گرفت که عبارتند از:

١- اندازه گیری رطوبت و مقاومت مکانیکی در لایه خاک تهیه شده با رطوبت و فشردگی تقریباً یکنواخت در طول مخزن
٢- مقایسه نیروی مقاومت مکانیکی اندازه گیری شده با حسگر مرکب و حسگر مخروطی تنها
٣- اندازه گیری رطوبت و مقاومت مکانیکی در لایه خاک تهیه شده با رطوبت متغیر در طول مخزن

آماده سازی مخزن خاک برای انجام آزمون های ١ و ٢

بدین منظور یک لایه فشرده و مرطوب در عمق ٢٠-١٥ سانتی متری به وسیله واحد آماده سازی خاک تهیه گردید. در خاک تهیه شده در دو خط با فاصله ٥٥ سانتی متر یک بار داده برداری با حسگر مرکب و بار دیگر با حسگر مخروطی تنها انجام گرفت. عمق حسگر در هر دو خط ١٨ سانتی متر تنظیم شد و سرعت پیشروی تراکتور در همه آزمون ها ٤/. متر بر ثانیه بود. بعد از عبور حسگر نمونه های خاک برای تعیین رطوبت و جرم مخصوص ظاهری به وسیله سیلندرهای استاندارد از میان دو خط و در ٨ نقطه تهیه شد.

آماده سازی مخزن خاک برای انجام آزمون ٣

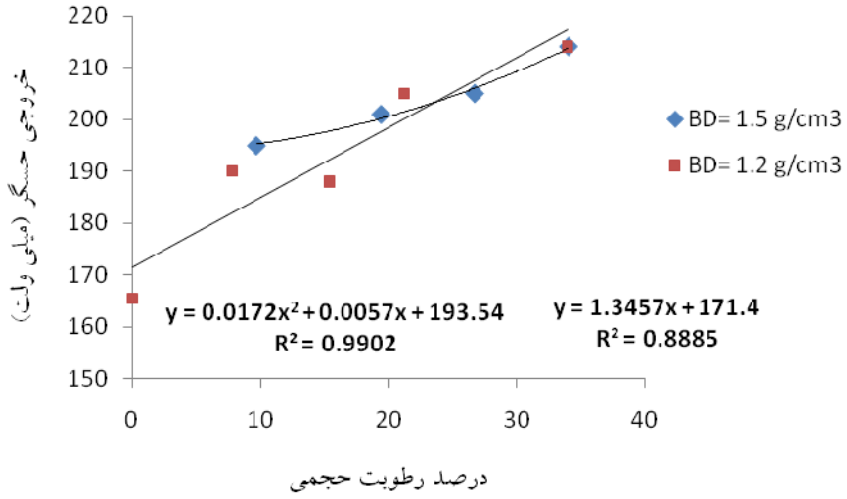
بدین منظور قسمت فعال خاک مخزن به طول ٨ متر به چهار قسمت مساوی تقسیم شد. در حین تهیه لایه خاک مورد نظر در عمق ٢٠-١٥ سانتی متر، و به منظور تهیه ٤ سطح رطوبت متفاوت و افزایشی در طول مخزن، لایه های خاک با ضخامت کم اضافه گردیده و به وسیله پمپ الکتریکی و لانس، آب با زمان های متفاوت اسپری شد. به نحوی که در لایه اول، پلات ١ بدون آب پاشی، پلات ٢ به مدت ٤٥ ثانیه، پلات ٣ به مدت ٩٠ ثانیه و پلات آخر ١٣٥ ثانیه آب پاشی شد و این کار در چهار مرحله افزایش ضخامت لایه انجام شد. سپس پوشش پلاستیکی مخزن خاک کشیده شد و ٢٤ ساعت جهت یکنواخت شدن رطوبت در لایه مورد نظر رها گردید.

آزمون ۳ در دو تکرار انجام گرفت و شرایط آزمون از نظر عمق حسگر و سرعت پیشروی تراکتور مانند آزمون ۱ بود. بعد از داده برداری نمونه های خاک از عمق ۱۸ سانتی متری برای تعیین رطوبت و وزن مخصوص ظاهری در چند نقطه بین دو خط برداشته شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون استاتیکی

پس از اندازه گیری در ۳۲ نمونه تهیه شده، نمودارهای زیر بین داده های ثبت شده برازش شد. همان طور که در شکل ٦ نشان داده شده، داده های حاصل از اندازه گیری در خاک فشرده تر بر روی یک سهمی قرار گرفته که ضریب تعیین این برازش نزدیک ۱۰۰ درصد می باشد. داده مربوط به هر نقطه میانگین چهار تکرار می باشد. در خاک با جرم مخصوص کمتر یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۸۸٪ بین درصد رطوبت حجمی و خروجی حسگر وجود داشت. سان و همکاران (Sun *et al.*, 2004) گزارش کردند که با حسگر دو رینگی، برازش های خطی بین درصد رطوبت حجمی و خروجی حسگر ضریب تعیین بالاتری نسبت به برازش های درجه ۲ داشته که با نتایج به دست آمده در این تحقیق تا حدودی متفاوت است. به هر حال چون نوع آرایش و شکل الکترودها در تحقیق حاضر با سان و همکاران متفاوت است لذا تفاوت در رفتار حسگر نیز دور از انتظار نمی باشد و البته به نظر می رسد که در خاک فشرده تر چون تماس الکترودها با خاک بهتر است برازش دقیق تری حاصل شده است.

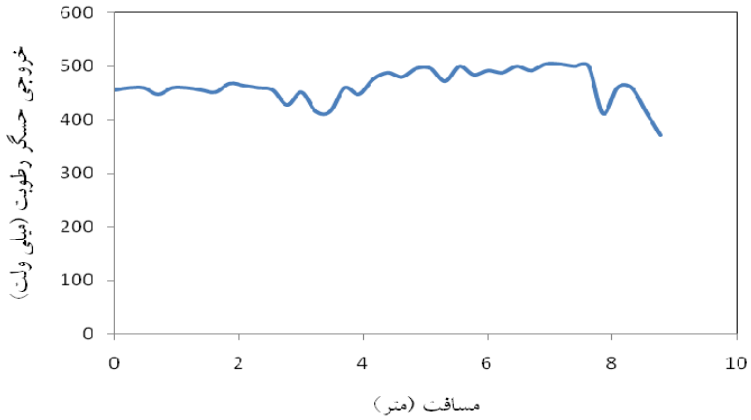


شکل ٦- نمودار آزمون حسگر در شرایط آزمایشگاهی

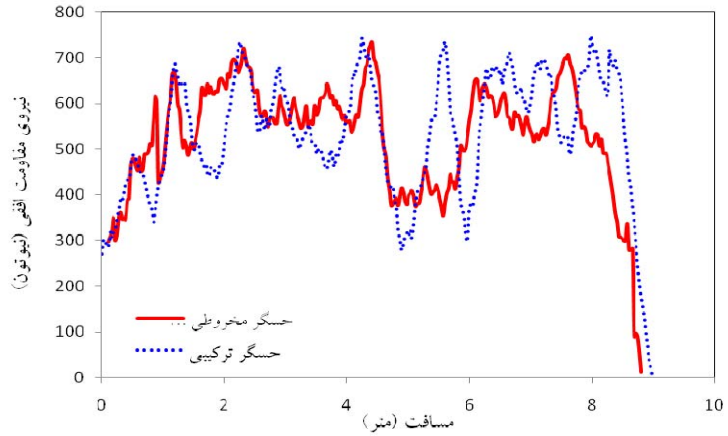
نتایج آزمون دینامیکی

شکل ۷ خروجی حسگر در آزمون دینامیکی ۱ در لایه با رطوبت تقریباً یکنواخت در طول مخزن را نشان می دهد. خروجی حسگر در طول مخزن ثابت بوده و بین ٤۰۰ تا ۵۰۰ میلی ولت متغیر است. میانگین رطوبت اندازه گیری شده با آون در این لایه ۸٪ وزنی بر پایه تر بوده است. میانگین جرم مخصوص اندازه گیری شده بر پایه تر در این لایه ۱/۷۵ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و لذا درصد رطوبت حجمی ١٤ می باشد. علت آنکه سطح سیگنال خروجی در آزمون های دینامیکی بالاتر از آزمون استاتیکی است، استفاده از ضریب تقویت ۱۰ در اندازه گیری با اسیلوسکوپ می باشد.

شکل ۸ نیروی افقی اندازه گیری شده با دو حسگر ترکیبی و مخروط تنها را در طول مخزن نشان می دهد. انتظار آن می رود که حسگر ترکیبی به دلیل داشتن سطح تماس زیاد تر با خاک مقاومت مکانیکی زیاد تری داشته باشد که البته این انتظار نیز تا حدی بر آورده شده و در بیشتر نقاط مقاومت حسگر ترکیبی زیاد تر است. ولی با این وجود نیاز است تا آزمایش های دقیق تری در این زمینه انجام گیرد. همچنین مورد دیگر همبستگی بین این نیروی افقی و شاخص مخروط عمودی است که باید بررسی شود.

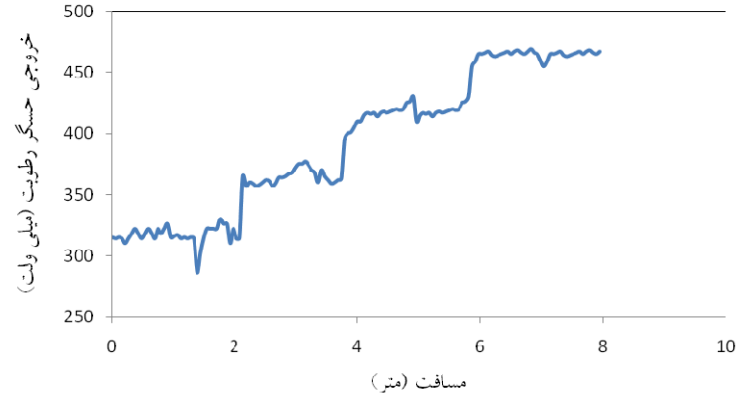


شکل ۷- خروجی حسگر خازنی در لایه با رطوبت یکنواخت ١٤٪ حجمی در طول مخزن



شکل ۸- نیروی مقاومت افقی اندازه گیری شده با حسگر ترکیبی و مخروط تنها در آزمون ۱

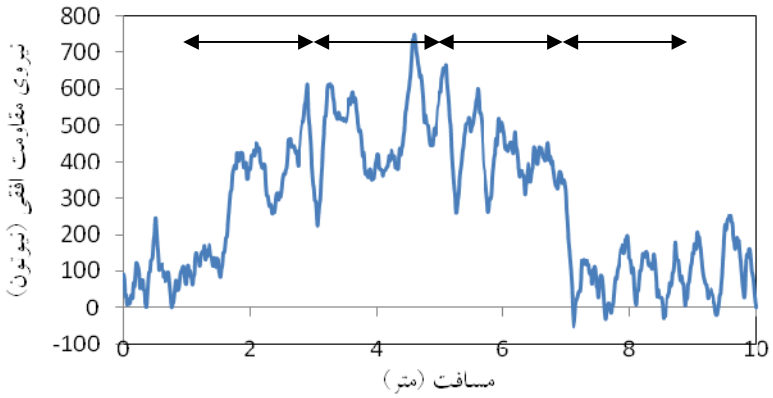
شکل ۹ خروجی حسگر خازنی در آزمون دینامیکی ۳ با رطوبت متغیر در طول مخزن را نشان می دهد. ٤ سطح رطوبتی ۸/۲، ۱۰، ۱۳/۹ و ۱۹ درصد حجمی از روی این شکل به خوبی قابل تشخیص می باشد. البته بعضی از داده های نویزی جهت یک نمایش بهتر از نتایج حذف شده و هر ۳ داده نیز میانگین گرفته شده است.



شکل ۹- خروجی حسگر خازنی در لایه با رطوبت متغیر در طول مخزن

شکل ۱۰ نیروی افقی اندازه گیری شده با حسگر ترکیبی را در لایه با رطوبت متغیر نشان می دهد. چهار محدوده نیرو بر روی شکل نشان داده شده که مربوط به چهار سطح رطوبتی ۸/۲، ۱۰، ۱۳/۹ و ۱۹ درصد حجمی می باشد. در دو قسمت اول چون خاک رطوبت کمتری داشته مقدار این نیرو زیادتر و با افزایش رطوبت مشاهده می شود که مقدار نیرو نیز کاهش یافته است. به طوری که در قسمت چهارم مقدار این نیرو به تقریباً ۱۰۰ نیوتون رسیده است. از

این نمودار به خوبی می توان اثر متقابل بین محتوی رطوبت و نیروی مقاومت افقی را تشخیص داده و بر ضرورت استفاده از حسگرهای ترکیبی برای اندازه گیری فشردگی خاک تاکید نمود.



شکل ۱۰- نیروی مقاومت افقی اندازه گیری شده با حسگر ترکیبی در آزمون ۳

نتیجه گیری و پیشنهاد ها

در این تحقیق، به منظور اندازه گیری همزمان رطوبت و مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت یک حسگر ترکیبی خازنی طراحی، ساخته و مورد ارزیابی استاتیکی و دینامیکی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که حسگر ترکیبی به خوبی هر دو ویژگی مذکور را اندازه گیری کرده به طوری که اثر متقابل بین آنها نیز قابل تشخیص می باشد. البته در حین اندازه گیری، تغییرات و نویز در سیگنال خروجی حسگر رطوبت زیاد بوده که نیاز به بهینه سازی مدار الکتریکی آن می باشد. به منظور کارایی بهتر این حسگر ترکیبی نیاز است تا آزمون های دینامیکی در سرعت های مختلف، عمق های مختلف و همچنین شرایط مزرعه ای انجام شود. همچنین بررسی اثر بافت و فشردگی خاک بر عملکرد این حسگر توصیه می گردد به نحوی که بتوان آن را برای هر بافت خاک و سطح فشردگی کالیبره نمود. از آنجایی که این حسگر در نهایت به عنوان حسگر تشخیص عمق خاک ورزی عمیق در حال حرکت به کار خواهد رفت لذا لازم است تا آزمون هایی جهت بررسی همبستگی بین شاخص مخروط افقی و عمودی انجام شود.

مراجع

۱ - علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. چاپ چهارم. دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. ٤٧٠ ص.

2 -Andrade, P., Aguera, J., Upadhyaya, S.K., Jenkins, B., Rosa, U. and Josiah, M. 2001. Evaluation of a dielectric-based moisture and salinity sensor for in–situ applications. ASAE Anuual International Meeting. Jul 28-Aug 1. Sacramento. California. USA.

3 -ASAE. 2006. Soil cone penetrometer. ASAE Standards S313. St Joseph,MI.

4 -Bell, J.P. 1969. A new design principle for neutron soil moisture gauges: ‘’The Wallingford’’ neutron probe. Soil Science, 108(3), 160.

5 -Dean, T. J., Bell, J. P. and Baty, A. J. B. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I: sensor design and performance. J. Hydrol. 93, 67-78.

6 -Gaskin, G. C. and Miller, J. D. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. J. Agric. Eng. Res. 63, 153-160.

7 -Mouazen, A. M., De Baerdemaeker, J. and Ramon, H. 2005. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer. Soil & Till. Res. 80, 171-183.

8 -Paltineanu, I. C. 1997. Real-time soil water dynamics using multi-sensor capacitance probes: laboratory calibration. Soil Sci. Soc. Am. J. 61, 1579-1584.

9 -Redman, D., Galagedara, L. and Parkin, G. 2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar surface reflectivity method: effects of spatial variability. Paper No: 032276, ASABE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA.

10 -Sun, Y. and Kromer, K. H. 2003. Relationship between the impedance of a multi-pin probe and soil water content. Int. Agrophysics. 17, 1-6.

11 -Sun, Y., Ma, D., Lin, J., Schulze Lammers, P. and Damerow, L. 2005. An improved FD-technique for determining soil water content. Pedosphere, 15(6), 1-8.

12 -Sun, Y., Ma, D., Schulze Lammers, P., Schmittmann, O. and Rose, M. 2005. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. Soil & Till. Res. 1-9.

13 -Sun, Y., Schulze lammers, P. and Ma, D. 2004. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content. J. Plant Nutr. Soil.Sci. 167, 745-751.

14 Upadhyaya, S.K., Rosa, U.A., Ehsani, M., Koller, M., Josiah, M and Shikanai, T. 1999. Precision farming in a tomato production system. Paper No: 991147, ASAE/CSAE Annual International Meeting.

15 -Vaz, C. M. P. and Hopmans, J. W. 2001. Simultaneous Measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer. TDR moisture probe. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 4-12.

16 -Zazueta, F. S. and Xin, J. 2005. Soil moisture sensors. Available on the: http://edis.ifas.ufl.edu/Eh226. Accessed on 24/01/2006

17 -Zeng, Q., Sun, Y., Schulze lammers, P., Ma, D., Lin, J., and Hueging, H. 2008. Improvement of a dual-sensor horizontal penetrometer by incorporating an EC sensor. Comp. and elect. in agri. 64, 333–337.