طراحی، ساخت و ارزیابی حسگرخازنی اندازه گیر رطوبت خاک به صورت بلادرنگ(۴۳۰)

آذر خورسندی[۱] ، عباس همت[۲] ، امین الله معصومی[۳] ، رسول امیر فتاحی[۴]

چکیده

تراکم و محتوای رطوبتی خاک، دو خصوصیت فیزیکی تاثیر گذار بر روی عملکرد محصول در مزرعه می باشند. استفاده از حسگرهای خازنی، وسیله ای حساس برای تخمین محتوای رطوبت خاک می باشد. در این روش، خاک به عنوان بخشی از دی الکتریک یک خازن محسوب می شود. در این تحقیق، یک حسگر اندازه گیر رطوبت مبناء،خازنی ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. این حسگر از دو بخش تشکیل شده است: ۳ الکترود و یک مدار الکترونیکی. الکترودها تیغه های فلزی هستند که مورد عملیات حرارتی قرا گرفته و سخت شده اند و در نتیجه سطح آنها در برابر سایش بسیار مقاوم است. این تیغه ها در داخل یک قطعه فیبر استخوانی ثابت شده اند. لبه های این فیبر به صورت گوه ای شکل ساخته شده تا حرکت آن در خاک، راحت تر انجام گیرد. تیغه ها توسط کابل های هم محور به مدار الکترونیکی متصل شده اند. ولتاژ تحریک مدار برابر ۱۲ ولت می باشد و خروجی آن فرکانس است. حسگر تحت شرایط استاتیکی آزمایشگاه و در خاکی با بافت لوم رسی سیلتی واسنجی شد. با استفاده از نتایج این آزمون، آزمون مزرعه ای انجام گرفت. تحلیل داده ها نشان داد که رابطه بین محتوای رطوبت خاک و فرکانس خروجی حسگر را می توان به صورت یک رابطه درجه دو نشان داد. نتایج نشان داد که داده های خروجی حسگر علاوه بر محتوای رطوبت خاک، به درجه حرارت محیط نیز بستگی دارند. اگرچه بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر رطوبت و به 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.

کلیدواژه: اندازه گیری بلادرنگ، حسگر اندازه گیری رطوبت، کشاورزی دقیق

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، پست الکترونیک: Farazesh@yahoo.co.nz
۲- استاد گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- استادیار گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴- استادیار گروه ماشین های کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۱- مقدمه

یکی از مهمترین عوامل مدیریت مزرعه، مدیریت آب می‌باشد. از ازه‌گیری و نمایش محتوای رطوبتی خاک یکی از ضروری‌ترین مباحث مدیریت جهت بهبود بازده در کشاورزی است. محتوای رطوبتی خاک را می‌توان بر دو مبنای وزنی و حجمی بیان کرد. محتوای رطوبت وزنی می‌تواند با استفاده از تفاوت وزن قبل و بعد از خشک شدن نمونه خاک، تعیین گردد. این روش مستقیم روش حرارتی- وزنی(یا روش ساده-وزنی) خوانده می‌شود. اگرچه روش مستقیم روش ارزانی می‌باشد، جزء آزمایش‌های مخرب و وقت‌گیر است و امکان تکرار آزمایش در یک مکان وجود ندارد [۳].

در حال حاضر دامنه وسیعی از حسگرهای تجاری وجود دارند که با استفاده از اصول فیزیکی مختلف قادر به اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌طور مستقیم هستند. برای مثال می‌توان بلوک گچی[۱]، جستجوگر نوترونی[۲] ، باز تاب سنج دامنه زمانی [۳](TDR) و تکنیک‌های طیف‌سنجی مانند باز تاب سنجی امواج نزدیک مادون‌قرمز [۴](NIR) را نام برد [۳]. به‌طور معمول این ابزارها برای اندازه‌گیری نقطه‌ای محتوای رطوبتی خاک و به‌طور استاتیک استفاده می‌شوند.

یکی از مرسوم ترین روش غیرمستقیم تعیین محتوای رطوبتی حجمی خاک با استفاده از حسگرهای خازنی می‌باشد. اساس کار این نوع حسگرها عبارتند از قرار دادن خاک در یک مدار ارتعاشی و اندازه گیری فرکانس تشدید است. [۳]. دو روش معمول برای اندازه‌گیری پیوسته ظرفیت خازنی خاک وجود دارد. یک روش بر اساس تکنیک اندازه‌گیری فرکانس می‌باشد که فرکانس با مقدار ظرفیت خازنی که عمدتاً به خصوصیت دی‌الکتریک خاک برمی‌گردد، تغییر می‌کند [۴]. روش دیگر، تعیین امپدانس خاک در یک فرکانس تحریک داده شده، می‌باشد. در هر دو روش فرکانس باید به اندازه‌ای بالا باشد که تأثیر شوری خاک را کاهش دهد در غیر این‌صورت خروجی این حسگرها تحت تأثیر مقدار نمک خاک نیز می‌باشد [۵].

لیو[۵] و همکاران (۱۹۹۶) یک حسگر رطوبتی دی‌الکتریک- مبنا تحت شرایط دینامیکی ساخت و آن را داخل یک بلوک نایلونی قرار داد تا بتواند آن را به ابزار متصل کند. نتایج آنها، سهولت دست‌یابی به داده با استفاده از کاربرد بلادرنگ را نشان داد. به علاوه، آزمون‌های تکمیلی توسط آندرد و همکاران (۲۰۰۱) انجام شد و نشان داد که این حسگر رطوبتی نه تنها به رطوبت پاسخ می‌دهد بلکه به مقدار نمک، درجه حرارت و بافت خاک نیز عکس‌العمل نشان می‌دهد. رودس[۶] و همکاران نیز (۱۹۸۹) به نتایج مشابهی دست یافتند. محاسبه اثر حرارت نسبتاً ساده است زیرا اثر خطی آن بر روی خازن، به سادگی با از ازه‌گیری حرارت جبران می‌شود. علاوه بر آن بافت خاک، یک خاصیت استاتیکی است. اگر نقشه مزرعه از نظر بافت خاک در دسترس باشد، اثرات بافت خاک بر روی اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک قابل تخمین زدن می‌باشد. بنابراین، ملاحظات مربوط به حررات و بافت خاک به سادگی بر روی داده‌ها انجام می‌شود و فقط دو فاکتورمحتوای رطوبتی و نمک بر روی داده‌های خازن تأثیرگذار می‌باشند [۳]. اهداف

۲- مواد و روش ها

۲-۱- حسگر اندازه گیر رطوبت خاک

برای طراحی حسگر اندازه گیر رطوبت خاک به‌صورت پیوسته، یکسری آ مایش‌های اولیه در آزمایشگاه روش‌ها و ابزار اندازه-گیری دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. هدف از انجام آزمایش‌ها، ساخت نمونه‌های اولیه حسگر اندازه-گیری رطوبت و ارزیابی آن‌ها به‌صورت استاتیکی و مقایسه منحنی‌های رفتاری مقاومت الکتریکی خاک-محتوای رطوبتی خاک و ضریب دی‌الکتریک خاک-محتوای رطوبتی خاک بود.

حسگر مبنا-خازن بر اساس اندازه‌گیری تغییرات فرکانس با تغییرثابت دی‌الکتریک خاک (ε_s) پایه ریزی شده است. با تغ یر رطوبت خاک، به‌دلیل تغییر در ثابت دی‌الکتریک خاک، ظرفیت خازنی تغییر می کند. حسگر در واقع یک مدار تشدید است که می تواند فرکانس تشدید محیط (خاک) را آشکار سازد. یک مدار تشدید به صورت زیر مدل می‌شود:

1- Gypsum block
2- Neutron probe
3- Time domain reflectometry
4- Near-in-frared reflectance
5-Liu
6-Rhoades

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۱)$$

که در آن:

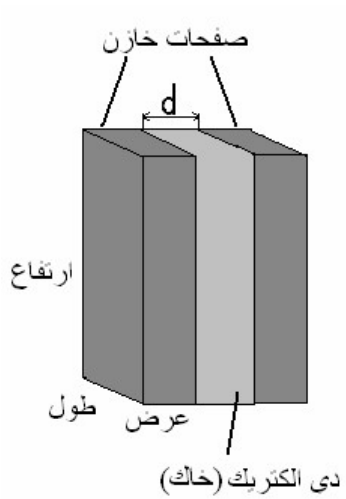
f = فرکانس (MHz)

L= ضریب القاء ($\propto$H)

C= ظرفیت خازنی ($\propto$F)

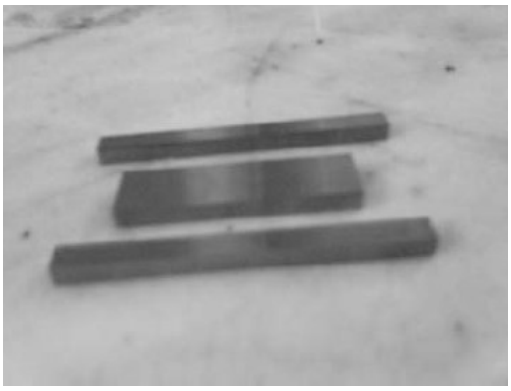
با توجه باینکه ضریب القاء در مدار تشدید دارای مقداری ثابت است، لذا معادله فوق پیشنهاد می کند که فرکانس خروجی حسگر فقط با ظرفیت خازنی تغییر می کند.

برای ساخت حسگر اندازه‌گیر رطوبت، از خواص خازن‌ها استفاده شد. حسگرهای مبناء-خازنی به‌دلیل هزینه ساخت پایین و حساسیت بالا در برابر تغییرات رطوبت در خاک، نسبت به سایر حسگرها در جایگاه بهتری قرار گرفته‌اند. اساس کار حسگرهای خازنی استاتیکی، همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، معمولاً به این صورت است که دو یا چند صفحه فلزی با فاصله ای معین از هم (d) بر روی یک پایه ثابت می‌شوند. این حسگرها در حالت عادی بسته به طول، عرض و ارتفاعی که دارند، دارای یک ظرفیت خازنی مشخص (ماده بین صفحات آن هوا است) می‌باشند. با فرو کردن حسگر در خاک (یا قرار دادن خاک بین صفحات خازن)، ثابت دی‌الکتریک خازن که قبلاً هوا بود، تغییر می‌کند و در نتیجه ظرفیت خازنی آن نیز تغییر می‌کند. عدد نشان داده شده در این حالت به عنوان ظرفیت خازنی، بستگی به محتوای رطوبت، بافت و درجه حرارت خاک دارد. با انجام آزمایش در خاکی با بافت همگن و در شرایط یکسان از نظر درجه حرارت، خروجی حسگر فقط وابسته به مقدار رطوبت موجود در خاک می‌شود و از این طریق می‌توان حسگر را واسنجی کرد. نکته حائز اهمیت در اینجا آن است که اگر از این شیوه برای حسگرهای دینامیکی (در حین حرکت) نیز استفاده شود دو مسئله پیش می‌آید؛ اول اینکه حرکت آن در زیر خاک به سختی انجام می‌گیرد ودوم اینکه، ممکن است قرار گرفتن سنگی در بین دو صفحه خازن در حین حرکت، باعث جلوگیری از جایگزین شدن خاک جدید با خاک قبلی در بین صفحات شود. برای رفع این مشکل، در حسگر ساخته شده، از خازن مسطح استفاده شد.



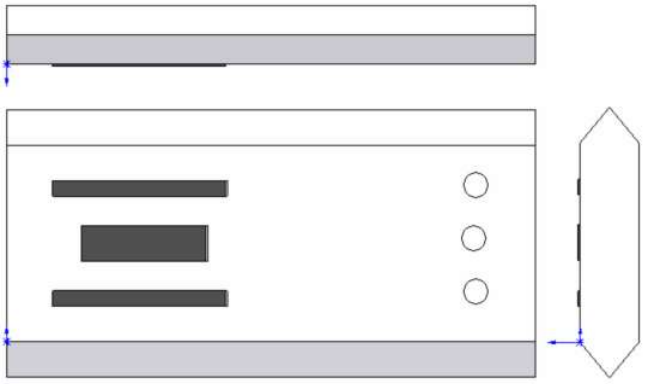
شکل ۱- شمای کلی از حسگر خازن- مبناء در حالی که خاک در بین صفحات آن قرار گرفته است

برای ساخت صفحات خازن، سه تیغه فلزی به عنوان صفحات الکترود (شکل ۲) از شمش فولاد تهیه شد. سپس این قطعات با عملیات حرارتی کاملاً مقاوم شدند.



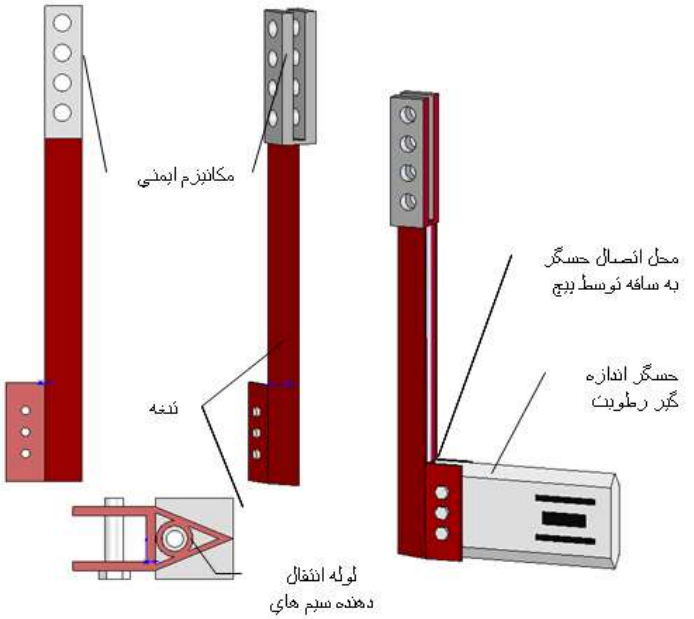
شکل ۲- تصویر واقعی از تیغه‌های تشکیل دهنده صفحات خازن (همان‌طور که مشاهده می‌شود سطوح این تیغه‌ها کاملاً صیقلی است).

حسگرهای تماسی اندازه گیر خصوصیت‌های مختلف خاک به صورت پیوسته، باید دارای استحکام بالایی باشند تا بتوانند فشار ناشی از کشیده شدن در خاک را تحمل کنند. بنابراین، جهت ثابت کردن فاصله الکترودها نسبت به هم و همچنین ایجاد ابزارحاملی که بتواند به راحتی الکترودها را در خاک جابه‌جا کند، از یک قطعه فیبر استخوانی استفاده شد. برای سهولت حرکت ابزار حامل در زیر خاک، لبه‌های این ابزار به‌صورت گوه ای شکل با زاویه ۴۵ درجه درآمد. شکل ۳ تصویری از حسگر اندازه گیر رطوبت خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویری از سه نمای ابزار حمل کننده الکترودها (صفحات خازن) در حالی که الکترودها در داخل آن قرار گرفته اند.

برای اتصال حسگر به قاب از یک گیره نگه‌دارنده استفاده شد. این گیره در قسمت پایین دارای یک بست می‌باشد که در فواصل هم‌مرکز با سوراخ‌های قسمت انتهایی ابزار حامل، دارای سوراخ‌هایی می‌باشد. با قرار دادن ابزار حامل در داخل بست و پیچ کردن آن‌ها، ابزار حامل نسبت به بست کاملاً ثابت می‌شود. برای سهولت حرکت حسگر در خاک، گیره نگه‌دارنده حسگر رطوبت در جلو به یک تیغه مجهز شد. در داخل این تیغه لوله ای قرار گرفته است که سیم‌های خارج شده از صفحات خازن (الکترودها) را از زیر به سطح خاک منتقل می‌کند. (شکل های ۴ و ۵).

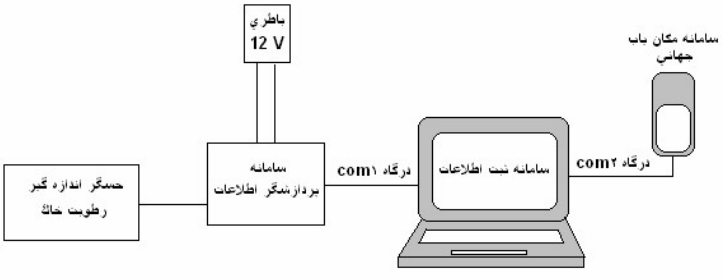


شکل ۴- گیره نگه‌دارنده حسگر اندازه گیره رطوبت برای اتصال به قاب (در سمت راست شکل، حسگر اندازه گیر رطوبت در داخل گیره نگه‌دارنده قرار گرفته است).

شکل۵- تصویر واقعی از حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک در حالی‌که در گیره نگه‌دارنده ثابت شده است.

۲-۲- سامانه جمع آوری داده‌ها

نحوه ارتباط اجزاء مکانیکی با منابع تغذیه، سامانه پردازش و سامانه جمع آوری اطلاعات و سامانه مکان یاب جهانی در شکل ۶ آورده شده است.



شکل۶- طرحواره ارتباط حسگرها با سامانه پردازش و ثبت اطلاعات.

برای انتقال سیگنال به کامپیوتر نیاز به یک واسط می‌باشد که حداقل دو کار را انجام دهد: یکی تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و دوم ارسال آن با نرخ مشخص به کامپیوتر. برای این منظور از میکروکنترلراستفاده شد

۲-۳- آزمایش‌های واسنجی

برای به دست آوردن منحنی های واسنجی این حسگر، آزمایش واسنجی حسگر به‌صورت از خاکی با بافت لوم رسی سیلتی[۱] و۲۰ نمونه با سطوح رطوبتی متفاوت ساخته شد و با اندازه گیری محتوای رطوبتی به روش وزنی و اندازه گیری خروجی حسگر در این سطوح رطوبتی، منحنی های واسنجی حسگر به دست آمد.

۲-٤- آزمایش های مزرعه ای

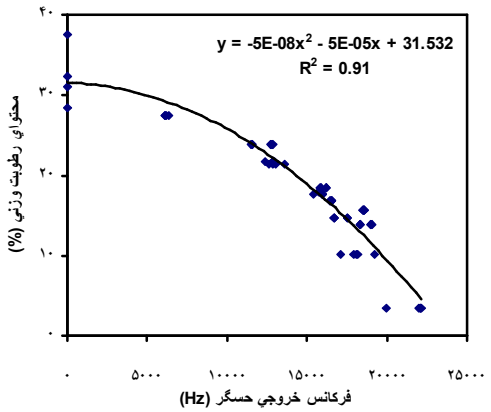
در این آزمایش، قطعه‌ای از زمین بافت لوم رسی سیلتی به ابعاد ۱۰×۹ متر به قطعاتی مساوی به ابعاد ۱×۱۰ متر برای ۹ عبور ۱۰ متری حسگر و ثبت خروجی، تقسیم گردید آزمایش به این صورت انجام شد که ابتدا قبل از هر عبور با استفاده از روش نمونه برداری ، نقاط مش بندی شده برای تعیین محتوای رطوبت وزنی مورد نمونه برداری قرار گرفت.

۱-Silty clay loam (SiCL)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی حسگر اندازه گیر رطوبت خاک

تغییرات فرکانس خروجی حسگر اندازه گیر رطوبت با رطوبت وزنی خاک رابطه درجه دو داشت (شکل ۷)



شکل ۷- منحنی واسنجی حسگر رطوبت خاک (رطوبت بر پایه وزنی).

این رابطه درجه دو در زیر نشان داده شده است:

$$Mc(\%) = 31.532 - 5\cdot 10^{-8}\cdot f^2 - 5\cdot 10^{-5}\cdot f \qquad (۲)$$

که در آن:

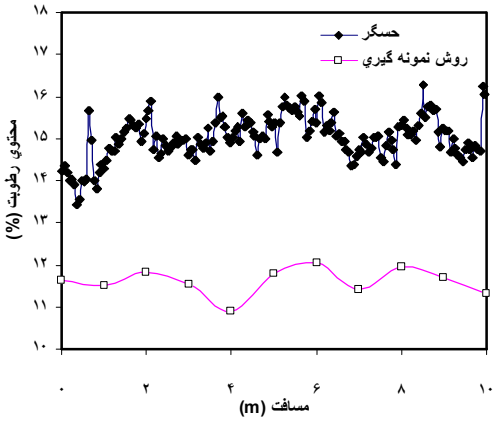
Mc= درصد وزنی رطوبت خاک

f = فرکانس خروجی حسگر اندازه گیر رطوبت خاک (Hz)

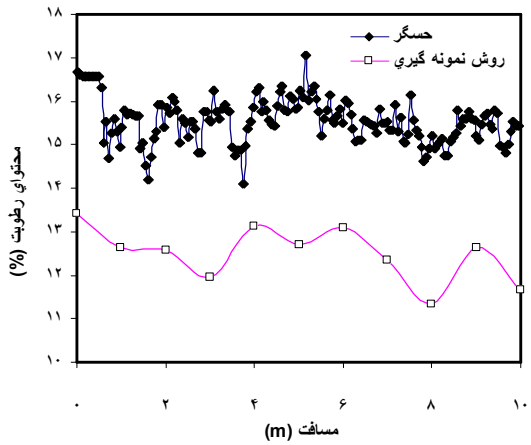
این رابطه با ضریب تبیین R^2=۰/۹۱ معنی دار می‌باشد.

۳-۲- ارزیابی حسگر اندازه گیر رطوبت

برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و روش نمونه‌گیری، تغییرات رطوبت خاک از ازه‌گیری شده با هر دو روش با مسافت در دو عمق ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

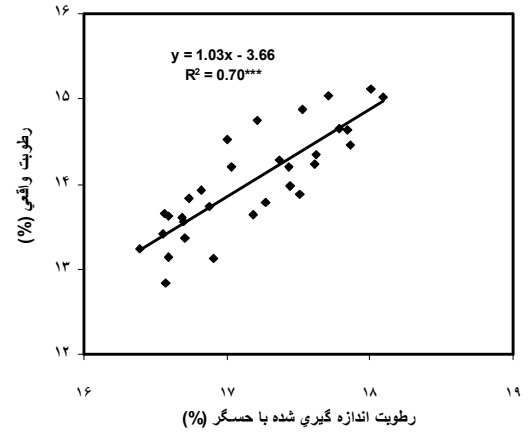


شکل ۸- تغییرات درصد رطوبت وزنی خاک، اندازه‌گیری شده با حسگر رطوبت و روش نمونه‌گیری درعمق ۲۰ سانتی‌متر.



شکل۹ – تغییرات درصد رطوبت وزنی خاک، اندازه‌گیری شده با حسگر رطوبت و روش نمونه‌گیری درعمق ۳۰ سانتی‌متر.

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو منحنی در شکل‌های ۸ و ۹ دارای افت و خیزهای مشابهی هستند. رابطه بین میاز ین غلتان مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی مربوط به هر دو عمق در شکل۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰– رابطه بین میانگین غلتان رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با میانگین رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده به روش نمونه گیری.

رابطه زیر نشان می‌دهد، مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با درصد رطوبت خاک رابطه معنی داری با ضریب تبیین R^2=۰/۷۰ دارد.

$$Mc = (1.03 \cdot M_S) - 3.66 \qquad (۳)$$

که در آن:

MC = درصد رطوبت واقعی خاک

M_s = درصد رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر اندازه گیر رطوبت

شیب منحنی برازش شده نزدیک به یک است، ولی عرض از مبدا آن ۳/۷ درصد است. بنابراین مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر اندازه گیر رطوبت ۳/۷ درصد بیشتر از مقادیر رطوبت واقعی خاک است. طبق تحقیقات سایر محققان[۳] می‌توان گفت این اختلاف، احتمالا به‌دلیل تفاوت در درجه حرارت خاک در آزمون مزرعه و تعیین منحنی واسنجی حسگر در آزمایش ه می‌باشد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از ارزیابی حسگر رطوبت نشان داد که مقادیر به‌دست آمده از حسگر رابطه معنی داری با ضریب تبیین ۷۰ درصد با مقادیر به دست آمده از رطوبت واقعی خاک با روش وزنی در نقاط مشابه از زمین داشته اند. با بررسی منحنی رفتاری رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با رطوبت واقعی خاک که به روش وزنی به‌دست آمده است، مشاهده شد که بین این دو مقدار یک اختلاف خطی برابر ۳/۷ درصد وجود دارد که ناشی از اختلاف درجه حرارت در زمان انجام آزمون در مزرعه و زمان واسنجی حسگر در آزمایشگاه می‌باشد.

تشکر و قدردانی

با تشکر از جناب آقای مهندس جاوید و مهندس دزفولی از دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان، که در ساخت مدارهای الکترونیکی نقش بسزایی داشتند.

منابع

[۱] لغوی، م.، ۱۳۸۲. *راهنمای کشاورزی دقیق*(ترجمه)، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، تهران.

[2] Adamchuk, V. I., J. W. Hummel, M. T. Morgan and S. K. Upadhyaya. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agr.* 44: 71-91.

[3] Andrade, P. and S.K. Upadhayaya, and J. Aguera and B.M. Jenkins. 2004. Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. *Transactions of the ASAE*. 47: 1281-1287.

[4] Chung, S. O., A. S. Kenneth and T. Jinglu. 2005. Variability structure of on-the-go soil strength sensor data. Paper No. 051039. *ASAE St. Joseph, MI.: USA.*

[5] Glancey, J. L., S.K. Upadhyaya, W.J. Chancellor, and J. W. Rumsey. 1989. An instrumented chisel for the study of soil tillage dynamics. *Soil Till. Res.* 44: 14-24.

[6] Mouazen, A. M., J. D. Baerdemaeker and H. Ramon. 2004. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fiber-type NIR spectrophotometer. *Soil Till. Res.* 80: 171-183.

[7] Newman, S. C., and J. W. Hummel. 1999. Soil penetration resistance with moisture correction. Paper No. 99-3028. *ASAE St. Joseph, MI.: USA*.

[8] Slaughter, D. C., M. G. Pellretier, and S. K. Upadhyaya. 2001. Sensing soil moisture using NIR spectroscopy. *Appl. Eng. Agric.* 17: 241-247.

[9] Sun,Y., D. Ma, P. Schulze Lammers, O. Schmittmann and M. Rose, 2005.On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Till. Res.* 86: 209-217.

[10] Upadhyaya, S. K., U. A. Rosa, M. Ehsani, M. Koller, M. Josiah, and T. Shikanai. 1999. Precision farming in a tomato production system. ASAE Paper No. 991147. *ASAE St. Joseph, MI.: USA*

[11] Whalley, W. R. 1991. Development and evaluation of a microwave soil moisture sensor incorporation in a narrow cultivator tine. *J. Agr. Eng. Res*. 50: 25-33.

[12] Young, G. D., Adams, B. A., and G. C. Topp. 2000. A portable data collection system for simultaneous cone penetrometer force and volumetric soil water content measurements. *Can. J. Soil Sci.* 80, 23–31.