

## طراحی، ساخت و ارزیابی حسگر خازنی اندازه گیر پیوسته رطوبت خاک بصورت بلادرنگ

آذر خورسندی<sup>۱</sup>، عباس همت<sup>۲\*</sup>، امین‌اله معصومی<sup>۳</sup> و رسول امیرفتاحی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، <sup>۲</sup> استاد و <sup>۳</sup> استادیار، گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی

اصفهان <sup>۴</sup> استادیار دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۱/۲۵)

### چکیده

تراکم و محتوای رطوبتی خاک، دو ویژگی فیزیکی تاثیر گذار بر عملکرد محصول در مزرعه می‌باشند. استفاده از حسگرهای خازنی، روشی دقیق برای تخمین محتوای رطوبت خاک می‌باشند. در این روش، خاک به عنوان بخشی از دی‌الکتریک حسگر خازنی محسوب می‌شود. در این تحقیق، یک حسگر اندازه گیر رطوبت خازن-مبنا که می‌تواند رطوبت خاک را به طور پیوسته اندازه گیری کند، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. این حسگر از دو بخش تشکیل شده است: سه الکتروود و یک مدار الکترونیکی. الکتروودها تیغه‌های فلزی هستند که مورد عملیات حرارتی قرار گرفته و سخت شده‌اند. این تیغه‌ها در داخل یک قطعه فیبر استخوانی ثابت شده‌اند. ولتاژ تحریک مدار برابر ۱۲ ولت می‌باشد و خروجی آن بسامد است. حسگر تحت شرایط استاتیکی و در خاکی با بافت لوم رسی سیلتی در آزمایشگاه واسنجی شد. با بهره‌گیری از نتایج این آزمون، حسگر ساخته شده در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل داده‌ها نشان داد که رابطه بین محتوای رطوبت خاک و بسامد خروجی حسگر را می‌توان به صورت یک رابطه درجه دو نشان داد. خطای حسگر برابر ۱/۵۵٪ برآورد شد و بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و تعیین شده با روش وزنی رابطه خطی و معنی‌داری ( $R^2=0/70$ ) مشاهده شد. نتایج نشان داد که داده‌های خروجی حسگر علاوه بر محتوای رطوبت، به درجه حرارت خاک نیز وابسته است.

**واژه‌های کلیدی:** اندازه‌گیری بلادرنگ، کشاورزی دقیق، روش دی‌الکتریک.

### مقدمه

در کشاورزی دقیق به منظور مصرف بهینه نهاده‌ها، نیاز به ثبت پیوسته، تحلیل و مدیریت تغییرات درون مزرعه‌ای عوامل موثر بر عملکرد محصول می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، طراحی، ساخت و ارزیابی حسگرهای بلادرنگ یکی از الزامات است. یکی از مهمترین عوامل مدیریت تولید محصول در مزرعه به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، مدیریت آب می‌باشد. اندازه‌گیری و ثبت تغییرات رطوبتی خاک در مزرعه جهت مدیریت و افزایش بازده مصرف آب یک ضرورت است.

در حال حاضر دامنه وسیعی از حسگرهای تجاری وجود دارند که با استفاده از اصول فیزیکی مختلف قادر به اندازه‌گیری غیرمستقیم محتوای رطوبتی خاک هستند. بیشتر این حسگرها، محتوای رطوبتی خاک را به صورت ایستگاهی اندازه‌گیری می‌کنند. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم محتوای رطوبتی حجمی خاک، روش دی‌الکتریک می‌باشد. در این روش، محتوای رطوبتی خاک با اندازه‌گیری قابلیت انتشار

ظاهری<sup>۱</sup> خاک (ثابت دی‌الکتریک،  $Ka_b$ ) که تعیین کننده سرعت امواج الکترومغناطیس در خاک می‌باشد، تخمین زده می‌شود (Munoz-Carpena, 2004).

در مواد مرکب مانند خاک که از اجزاء متفاوتی شامل مواد معدنی، هوا و آب تشکیل شده، مقدار ثابت دی‌الکتریک آن متناسب با توزیع اجزاء آن در حجم خاک می‌باشد. ضریب دی‌الکتریک آب مایع ( $Ka_w=81$ ) بسیار بزرگ‌تر از ضریب دی‌الکتریک سایر اجزاء خاک می‌باشد ( $Ka_s=25$ ) برای مواد معدنی و برای هوا  $Ka_a=1$  می‌باشد. بنابراین، ضریب دی‌الکتریک ظاهری خاک با محتوای رطوبت تغییر می‌کند. یک رابطه‌ی معمول بین ضریب دی‌الکتریک ظاهری و رطوبت حجمی خاک، رابطه‌ی تجربی Topp & Annan (1980) می‌باشد.

(۱)

$$WVC = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.29 \cdot 10^{-2} \cdot Ka_b - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot Ka_b^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot Ka_b^3$$
 که در آن  $WVC$  و  $Ka_b$ ، به ترتیب محتوای رطوبت حجمی خاک و ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک می‌باشد. این رابطه برای بیشتر خاک‌های معدنی (مستقل از بافت و ساختار) و

1. Bulk permittivity

\* نویسنده مسئول: ahemmat@cc.iut.ac.ir

ظرفیت خازن، به سادگی با اندازه‌گیری درجه حرارت جبران می‌شود. علاوه بر آن، بافت خاک یک خاصیت استاتیکی است. اگر نقشه مزرعه از نظر بافت خاک در دسترس باشد، اثر بافت خاک بر مقدار دی‌الکتریک قابل تخمین می‌باشد (Andrade et al., 2004). بنابراین، اثر درجه حرارت و بافت خاک به سادگی بر روی داده‌ها قابل اعمال بوده و فقط اثر دو عامل محتوای رطوبتی و نمک بر روی داده‌های خازن تأثیرگذار می‌باشند (Andrade et al., 2004). هدف از این تحقیق طراحی، ساخت و ارزیابی یک حسگر خازن-مینا قادر به اندازه‌گیری پیوسته و بلادرنگ محتوای رطوبتی خاک در مزرعه، بود.

## مواد و روش‌ها

### اصول نظری کارکرد حسگر خازن-مینا

حسگر خازن - مینا بر اساس اندازه‌گیری تغییرات بسامد با تغییر ثابت دی‌الکتریک خاک ( $\epsilon_s$ ) پایه ریزی شده است. با تغییر رطوبت خاک، به دلیل تغییر در ثابت دی‌الکتریک خاک، ظرفیت خازنی تغییر می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که خواص دی‌الکتریک خاک مرطوب به وسیله تابع پاسخ مختلط دی‌الکتریک ( $\epsilon$ ) وابسته به بسامد به صورت زیر نشان داده می‌شود (Andrade et al., 2001):

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_r(\omega) + j\epsilon_i(\omega) \quad (2)$$

که در آن  $\epsilon_r$ ،  $\epsilon_i$ ،  $\omega$  و  $j$  به ترتیب جزء حقیقی  $\epsilon$ ، جزء مجازی  $\epsilon$ ، بسامد زاویه ای و  $\sqrt{-1}$  می‌باشند.

جزء حقیقی تابع پاسخ دی‌الکتریک ( $\epsilon_r$ ) مربوط به اندازه‌گیری انرژی ذخیره شده در مولکول‌های دو قطبی آب مرتب شده در میدان الکترو مغناطیس می‌باشد و بنابراین مقدار آن تحت تاثیر مقدار میانگین رطوبت است. جزء مجازی مربوط به اندازه‌گیری میانگین نرخ اتلاف انرژی در خاک می‌باشد و بنابراین مرتبط به ضریب هدایت خاک است. اگرچه هر دو این اجزاء تحت تاثیر مقدار محتوای رطوبتی خاک هستند، جزء حقیقی ( $\epsilon_r$ ) مربوط به رفتار قابل پیشگویی رطوبت خاک است، در حالی که جزء مجازی ( $\epsilon_i$ ) این طور نیست. حسگر خازن - مینا در واقع یک مدار تشدید است که می‌تواند بسامد تشدید محیط (خاک) را آشکار سازد. یک مدار تشدید به صورت زیر مدل می‌شود:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

که در آن  $f$ ،  $L$  و  $C$  به ترتیب بسامد (MHz)، ضریب القاء ( $\mu H$ ) و ظرفیت خازنی ( $\mu F$ ) می‌باشند. با توجه به اینکه ضریب القاء در مدار تشدید دارای مقداری ثابت است، لذا معادله فوق نشان

محتوای رطوبت زیر ۵۰٪ صادق می‌باشد. برای خاک‌هایی با محتوای رطوبت بالاتر، خاک‌های آلی و آذرین، فرآیند واسنجی روی رابطه‌ی (۱) باید انجام گیرد. رابطه‌ی (۱) وابسته به بسامد موج الکترومغناطیس ساطع شده به وسیله‌ی دستگاه اندازه‌گیر می‌باشد (Munoz-Carpena, 2004).

حسگرهای اندازه‌گیر بلادرنگ محتوای رطوبتی خاک که برای استفاده در کشاورزی دقیق طراحی و ساخته شده‌اند شامل فناوری‌های طیف‌سنجی مانند بازتاب‌سنجی امواج نزدیک فروسرخ<sup>۱</sup> (NIR) و حسگرهای خازن - مینا می‌باشند (Andrade et al., 2004; Mouazen et al., 2001; Mouazen et al., 2004). با استفاده از یک طیف‌سنج نزدیک فروسرخ و با محاسبه‌ی بازتاب نور توانست درصد رطوبت خاک را در طول عملیات مزرعه‌ای اندازه‌گیری کنند.

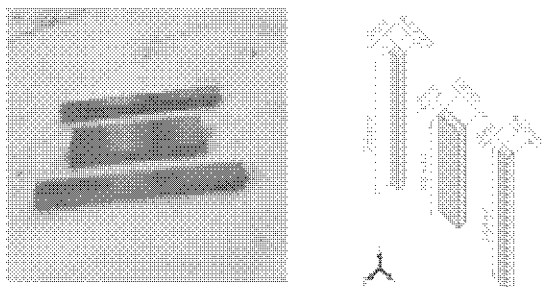
حسگرهای خازن - مینا به دلیل هزینه ساخت پایین و حساسیت بالا در برابر تغییرات رطوبت در خاک، وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت بلادرنگ می‌باشند. دو روش معمول برای اندازه‌گیری پیوسته ظرفیت خازنی خاک وجود دارد. یک روش بر اساس فناوری اندازه‌گیری بسامد می‌باشد. بسامد با مقدار ظرفیت خازنی که عمدتاً با مقدار دی‌الکتریک خاک متناسب است، تغییر می‌کند (Whalley et al., 1992b). روش دیگر، تعیین امپدانس خاک در یک بسامد تحریک مشخص می‌باشد. در هر دو روش، بسامد باید به اندازه‌ای بالا باشد که تأثیر شوری خاک روی مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده به حداقل رسانده شود (Sun et al., 2005). در حسگرهای خازنی دو یا چند صفحه فلزی به وسیله صفحات عایق از هم جدا می‌شوند. صفحات فلزی به‌عنوان الکتروده حسگر خازنی عمل می‌کنند. حساسیت رطوبت سنجی حسگرها به میدان مغناطیسی ایجاد شده بین الکترودها بستگی دارد (Whalley et al., 1992a).

Liu et al. (1996) یک حسگر اندازه‌گیر رطوبت مینا-دی‌الکتریک را تحت شرایط دینامیکی ارزیابی کرد. نتایج آزمایشات نشان داد که امکان استفاده از حسگر به صورت بلادرنگ وجود دارد، ولی در خصوص مسائل مهمی همچون موقعیت الکترودها و تماس خاک الکترودها تأکید نمود. آزمون‌های تکمیلی 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 (Andrade et al., 2001). Rhoades et al. (1989) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

محاسبه اثر حرارت نسبتاً ساده است، زیرا اثر خطی آن بر

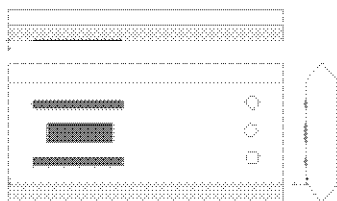
1. Near-in-fared reflectance

طور کامل مقاوم به سایش شدند. در نهایت دو قطعه به ابعاد  $۵ \times ۶/۵ \times ۷۶$  میلی‌متر و یک قطعه به ابعاد  $۵ \times ۱۵ \times ۵۵$  میلی‌متر به عنوان الکترودهای خازن به دست آمد.



شکل ۲- تصویری از تیغه‌های تشکیل دهنده صفحات خازن (همان‌طور که مشاهده می‌شود سطوح این تیغه‌ها به طور کامل صیقلی است)

حسگرهای تماسی اندازه‌گیر 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 به صورت گوه‌ای شکل با زاویه  $۴۵$  درجه درآمد. شکل (۳) تصویری از حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک را نشان می‌دهد.



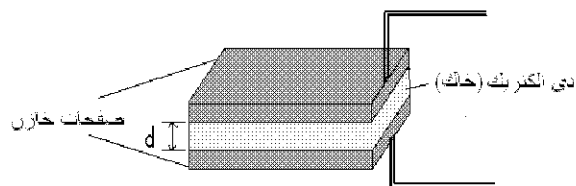
شکل ۳- تصویری از سه نمای ابزار حمل کننده الکترودها (صفحات خازن) در حالی که الکترودها در داخل آن قرار گرفته اند

برای اتصال حسگر به قاب از یک ساقه نگه‌دارنده استفاده شد. این ساقه در قسمت پایین دارای یک بست است 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 به طور کامل ثابت می‌شود. برای سهولت حرکت حسگر در خاک، ساقه نگه‌دارنده حسگر رطوبت در جلو به یک پیشانی ۷- شکل مجهز شد. در داخل این ساقه لوله‌ای قرار گرفته است که سیم‌های خارج شده از صفحات خازن (الکترودها) را از زیر به سطح خاک منتقل می‌کند (شکل‌های ۴ و ۵). برای ثابت نگه داشتن عمق حسگر در حین حرکت، از دو چرخ تنظیم عمق در دو طرف قاب تراکتور استفاده شد که قابلیت تنظیم در هر عمقی را دارد.

می‌دهد که بسامد خروجی حسگر فقط با ظرفیت خازنی تغییر می‌کند (Andrade et al., 2001 & 2004).

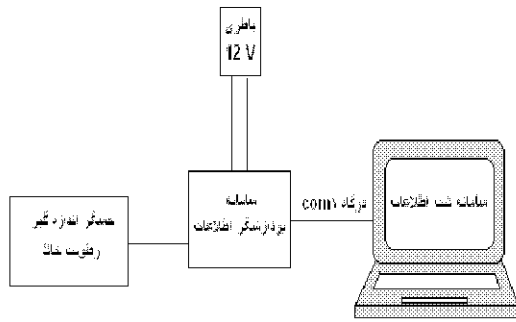
### طراحی حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک

برای طراحی حسگر اندازه‌گیر پیوسته رطوبت خاک، آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه انجام گرفت. هدف از انجام آزمایش‌ها، ساخت نمونه‌های اولیه حسگر اندازه‌گیری رطوبت و ارزیابی آن‌ها به صورت استاتیکی و مقایسه منحنی‌های رفتاری مقاومت الکتریکی محتوای رطوبتی خاک و ضریب دی‌الکتریک - محتوای رطوبتی خاک بود. اساس کار حسگرهای خازنی استاتیکی، همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، معمولاً به این صورت است که دو یا چند صفحه فلزی با فاصله‌ای معین از هم (d) بر روی یک پایه ثابت می‌شوند. این حسگرها در حالت عادی بسته به طول، عرض و ارتفاع صفحات خازن، دارای یک ظرفیت خازنی مشخص (ماده بین صفحات آن هوا است) می‌باشند. با فرو کردن حسگر در خاک (یا قرارگیری خاک بین صفحات خازن)، ثابت دی‌الکتریک خازن که قبلاً هوا بود، تغییر می‌کند و در نتیجه ظرفیت خازنی آن تغییر می‌کند. عدد نشان داده شده در این حالت به عنوان ظرفیت خازنی، بستگی به محتوای رطوبت، بافت، مقدار نمک و درجه حرارت خاک دارد (Andrade et al., 2001 & 2004). با انجام آزمایش در خاک همگن از نظر بافت و مقدار نمک 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 این 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 و دوم 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- طرحواره حسگر خازن- مبنا در حالی که خاک در بین صفحات آن قرار گرفته است

برای ساخت صفحات خازن، سه تیغه فلزی به عنوان صفحات الکتروده (شکل ۲) از شمش فولاد ضد سایش و سرد کار  $۱/۲۰۸۰$ ، استفاده شد. سپس این قطعات با عملیات حرارتی به



شکل ۶- طرحواره ارتباط حسگرها با سامانه پردازش و ثبت اطلاعات

برای اندازه‌گیری رطوبت باید تغییرات ظرفیت خازن به تغییرات بسامد تبدیل شود. بدین منظور از یک مدار اسیلاتور<sup>۱</sup> (VCO) استفاده شد. حسگر نقش خازن این مدار معادل را دارد و یک مقاومت به همراه آن برای تولید بسامد آزاد به کار می‌رود. با تغییرات رطوبت، ظرفیت خازن تغییر کرده و با تغییر ظرفیت خازنی، بسامد آزاد تغییر می‌کند. بسامد نوسان مدار VCO همیشه بسامد آزاد می‌باشد که همان‌طور که گفته شد، متناسب با رطوبت خاک تغییر خواهد کرد. سپس خروجی VCO به یک میکروکنترلر متصل شد تا بسامد آن را اندازه‌گیری کند و به رایانه ارسال نماید.

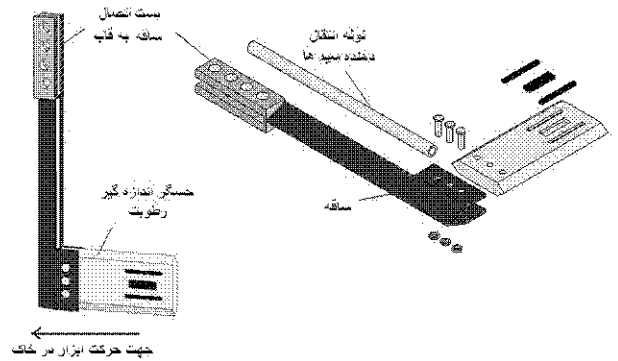
برای تشخیص ظرفیت این خازن از مدار مجتمع ۴۰۴۶ استفاده شد. ورودی این مدار مجتمع، ظرفیت خازنی حسگر است و خروجی آن یک موج مربعی با بسامد مشخص می‌باشد. با اندازه‌گیری این بسامد توسط میکروکنترلر، می‌توان ظرفیت خازنی را اندازه‌گیری نمود.

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 ده نمونه در ثانیه به رایانه. برای این منظور از میکروکنترلر AVR (مدل Atmega 16) استفاده شد.

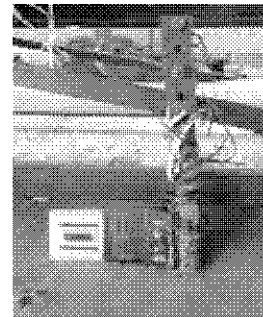
با استفاده از زبان برنامه نویسی (Visual Basic) به سادگی می‌توان خروجی سامانه پردازشگر اطلاعات را با نرخ مشخص و فرمتی معین در حین نمایش در کامپیوتر ثبت کرد. در این برنامه ابتدا قسمتی جهت تنظیمات درگاه سریال پیش‌بینی شد و سپس داده‌ها با ترتیب خاص طبق قالب نوشته شده، در رایانه ثبت گردید.

#### آزمایش‌های واسنجی

برای به دست آوردن منحنی واسنجی این حسگر از خاکی با بافت لوم رسی سیلتی استفاده شد. ابتدا ۲۰ سطح رطوبتی



شکل ۴- ساقه نگه‌دارنده حسگر اندازه، گیره رطوبت برای اتصال به قاب به همراه حسگر اندازه‌گیر رطوبت را نشان می‌دهد. (تصویر شامل تصویر پرسپکتیو در سمت چپ و نمای انفجاری در سمت راست است.)



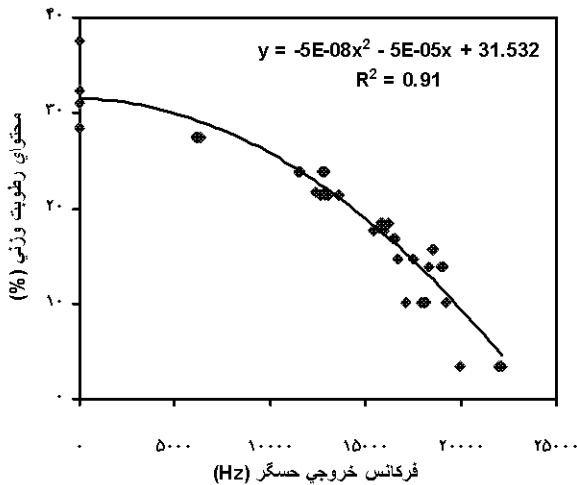
شکل ۵- تصویر واقعی از حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک در حالی که به ساقه نگه‌دارنده ثابت شده است

طرز کار حسگر اندازه‌گیر رطوبت به این صورت است که زمانی که حسگر در عمق مورد نظر در خاک با سرعت پیشروی ثابت شروع به حرکت می‌کند، خاک به طور مرتب از روی صفحات خازنی حسگر حرکت کرده و خاک جدید جایگزین آن می‌شود. با تغییر در محتوای رطوبتی خاک‌های جایگزین شده بر روی صفحات خازن، دی الکتریک خازن مرتباً تغییر کرده و در نتیجه ظرفیت خازنی حسگر تغییر می‌کند. تغییرات ظرفیت خازنی به تغییرات بسامد تبدیل شده و با نرخ ۱۰ نمونه در ثانیه، ثبت می‌شود. با استفاده از تغییرات بسامد ثبت شده و منحنی واسنجی حسگر، می‌توان محتوای رطوبت خاک را در هر لحظه تعیین نمود.

#### سامانه جمع‌آوری داده‌ها

نحوه ارتباط اجزاء مکانیکی با منابع تغذیه، سامانه پردازش و سامانه جمع‌آوری اطلاعات در شکل (۶) آورده شده است. سامانه جمع‌آوری داده از دو بخش اصلی سامانه پردازش‌گر داده و سامانه ثبت‌کننده داده تشکیل شده است. خروجی حسگر ابتدا به سامانه پردازش‌گر اطلاعات وارد می‌شود. در این سامانه، بر روی داده‌های خروجی از حسگر تغییراتی اعمال می‌شود تا عملیات ثبت داده آسان‌تر انجام گیرد.

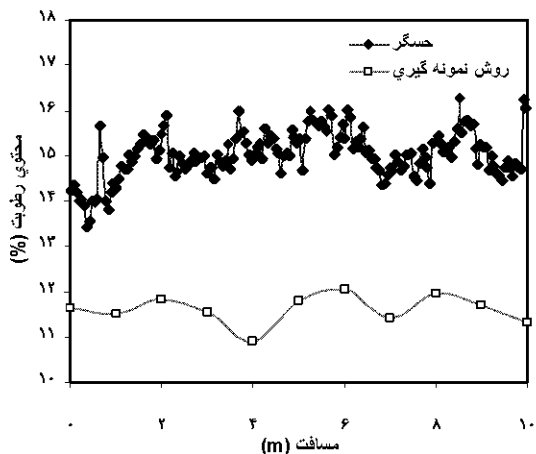
1. Voltage-Controlled Oscillator



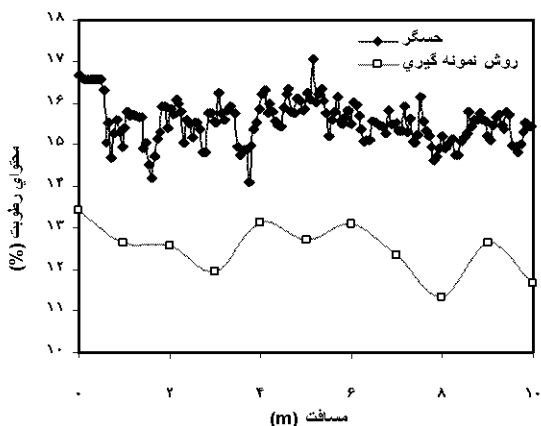
شکل ۷- منحنی واسنجی حسگر رطوبت خاک (رطوبت بر پایه وزنی)

### ارزیابی حسگر اندازه‌گیر رطوبت

برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و روش نمونه‌گیری، تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری 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 در عمق ۲۰ سانتی‌متر



شکل ۹ - تغییرات درصد رطوبت وزنی خاک، اندازه‌گیری شده با حسگر رطوبت و روش نمونه‌گیری در عمق ۳۰ سانتی‌متر

مجزاء با رطوبت‌های وزنی در دامنه یک تا ۳۸٪ ساخته شد. این محدوده رطوبتی، از خاک نسبتاً خشک تا خاک نزدیک به اشباع را در برداشت. با ثبت محتوای رطوبت وزنی هر نمونه و اندازه‌گیری خروجی حسگر در این سطح رطوبتی، منحنی واسنجی حسگر، با استفاده از نرم افزار Excel به دست آمد.

### آزمایش‌های مزرعه‌ای

در این آزمایش، قطعه‌ای از زمین با بافت لوم رسی سیلتی به ابعاد ۹×۱۰ متر به قطعاتی مساوی به ابعاد ۱۰×۱ 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 نمونه‌برداری، نقاط مش‌بندی شده برای تعیین محتوای رطوبت وزنی مورد نمونه برداری قرار گرفت. سپس با حرکت تراکتور با سرعت پیشروی ۰/۵ متر بر ثانیه از روی خطوط، خروجی حسگر در عمق‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر با نرخ نمونه‌برداری ۱۰ نمونه در ثانیه، در این نقاط ثبت شد. در پایان با استفاده از روش میانگین‌گلتان<sup>۱</sup> از مقادیر ثبت شده در هر یک متر، میانگین‌گیری شد. با توجه به اینکه هدف تعیین همبستگی بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و مقادیر به دست آمده به روش وزنی در همان نقاط می‌باشد، در این تحقیق از تحلیل رگرسیون خطی بین میانگین‌گلتان مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر و مقادیر اندازه‌گیری شده به روش نمونه‌برداری به عنوان روش آماری استفاده شد. برای به دست آوردن درصد خطای دستگاه از رابطه زیر استفاده شد:

$$\%err = \frac{|X_{mes} - X_{true}|}{X_{true}} (100) \quad (4)$$

که در آن  $X_{mes}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و  $X_{true}$  میانگین مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به روش وزنی می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### واسنجی حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک

تغییرات بسامد خروجی حسگر اندازه‌گیر رطوبت با رطوبت وزنی خاک رابطه درجه دو داشت (شکل ۷). این رابطه درجه دو در زیر نشان داده شده است:

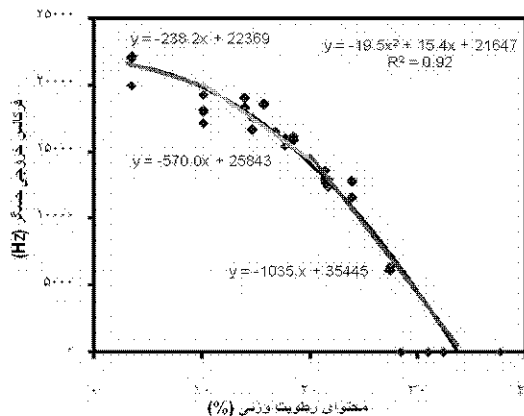
$$MC(\%) = 31.532 - 5 \times 10^{-8} \times f^2 - 5 \times 10^{-5} \times f \quad (5)$$

که در آن  $MC$  و  $f$  به ترتیب درصد وزنی رطوبت خاک (%) و بسامد خروجی حسگر اندازه‌گیر رطوبت خاک (Hz) می‌باشند. این رابطه با ضریب تبیین  $R^2 = 0.91$  معنی‌دار می‌باشد.

1. Moving Average

سلسیوس بود. نتایج مشابهی در مورد این رانش حرارتی در مطالعات دیگران (Lee et al., 2007; Yu et al., 1999; Andrade et al., 2001) نیز به دست آمده است. Yu et al. (1999) گزارش نمود که با افزایش درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد. در نتیجه رطوبت اندازه‌گیری شده در درجه حرارت بالا کمتر از درجه حرارت پایین می‌باشد. برای به دست آوردن درصد خطای دستگاه، ابتدا مقدار رانش حرارتی که یک مقدار ثابت است، از مقادیر خروجی حسگر کم شد. سپس درصد خطای دستگاه از رابطه (۴) به دست آمد. این مقدار برابر ۱/۵۵٪ تخمین زده شد که با توجه به تغییرپذیری شدید شرایط خاک، عدد قابل قبولی می‌باشد.

برای تعیین میزان حساسیت دستگاه، منحنی تغییرات فرکانس خروجی حسگر با محتوای رطوبت وزنی تعیین شده، خطی گردید (شکل ۱۱). همان طور که در شکل مشاهده می‌شود شیب منحنی (حساسیت حسگر) با درصد وزنی رطوبت خاک تغییر می‌کند. بنابراین، حساسیت دستگاه مقدار ثابتی نبوده و وابسته به درصد رطوبت وزنی خاک تغییر می‌کند. برای تعیین تقریبی حساسیت دستگاه، محدوده رطوبتی کار حسگر، به سه بازه رطوبتی (۱-۱۰)٪، (۱۰-۲۰)٪ و (۲۰-۳۸)٪ تقسیم شد و سه رابطه خطی بر منحنی برازش شد. حساسیت تقریبی حسگر در بازه رطوبتی (۱-۱۰)٪ برابر ۲۳۸ و در بازه رطوبتی (۱۰-۲۰)٪ برابر ۵۷۰ و نهایتاً در بازه رطوبتی (۲۰-۳۸)٪ برابر ۱۰۳۵ هرگز کاهش به ازاء هر درصد افزایش در رطوبت خاک تخمین زده شد.

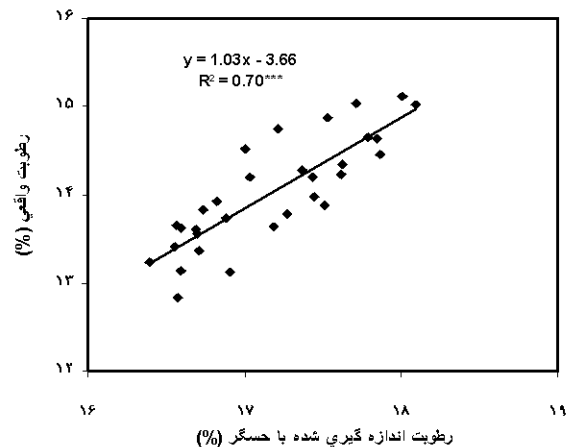


شکل ۱۱- منحنی تغییرات فرکانس خروجی حسگر با رطوبت خاک (رطوبت بر پایه وزنی)

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از ارزیابی حسگر رطوبت نشان داد که بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با حسگر و روش وزنی رابطه خطی معنی‌داری با ضریب تبیین ۷۰ درصد به دست آمد. با بررسی منحنی رفتاری رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو منحنی در شکل‌های (۸) و (۹) دارای افت و خیزهای مشابهی هستند ولی بین میانگین غلطان مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی یک اختلاف تقریباً ثابتی وجود دارد. برای بررسی بهتر این اختلاف رابطه بین میانگین غلطان مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر و میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی مربوط به هر دو عمق در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- رابطه بین میانگین غلطان رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با میانگین رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده به روش نمونه‌گیری

مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر با درصد رطوبت خاک رابطه معنی‌داری با ضریب تبیین  $R^2 = 0.70$  دارد.

$$MC = (1.03 \times M_s) - 3.66 \quad (6)$$

که در آن  $MC$  و  $M_s$  به ترتیب درصد رطوبت واقعی خاک و درصد رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر اندازه‌گیر رطوبت می‌باشند. شیب منحنی برازش شده برابر ۱/۰۳ است که می‌توان آن را برابر ۱ فرض نمود، ولی در صورت بالا بودن مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگر، مقدار ۰/۰۳ نیز می‌تواند قابل ملاحظه باشد. بنابراین باید در توسعه و تکمیل حسگر، دقت حسگر افزایش یابد تا این مقدار به یک نزدیکتر شود. عرض از مبدا منحنی برازش شده برابر ۳/۶۶ می‌باشد. این عرض از مبدا نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده با حسگر اندازه‌گیر رطوبت تقریباً ۳/۶۶ درصد بیشتر از مقادیر رطوبت واقعی خاک است. به مقدار ۳/۶۶٪ در اصطلاح رانش حرارتی گفته می‌شود که به دلیل اختلاف در درجه حرارت در زمان واسنجی حسگر در آزمایشگاه و درجه حرارت در زمان آزمایش حسگر در مزرعه اتفاق می‌افتد. درجه حرارت خاک در زمان واسنجی حسگر در آزمایشگاه ۲۵ درجه سلسیوس بود و منحنی واسنجی حسگر در این دما به دست آمده است، در صورتی که درجه حرارت هوا در بهمن ماه ۱۳۸۶ در زمان آزمون مزرعه‌ای حدود ۳ درجه

عدد قابل قبولی می باشد.

### سپاسگزاری

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

رطوبت واقعی خاک مشاهده شد که بین این دو مقدار یک اختلاف ثابتی برابر ۳/۶۶ درصد وجود دارد که در اصطلاح به آن رانش حرارتی گفته می شود و ناشی از اختلاف درجه حرارت در زمان انجام آزمون در مزرعه و زمان واسنجی حسگر در آزمایشگاه می باشد. خطای حسگر اندازه گیر رطوبت برابر ۱/۵۵٪ تخمین زده شد که با توجه به تغییرپذیری شدید شرایط خاک،

### REFERENCES

- Andrade, P., Aguera, J., Upadhyaya, S., Jenkins, B., Rosa, U. & Josiah, M. (2001). Evaluation of a dielectric-based moisture and salinity sensor for in-situ applications. *ASAE Paper No. 011010*. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Andrade, P., Upadhyaya, S.K., Aguera, J. & Jenkins, B.M. (2004). Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. *Transactions of the ASAE*, 47, 1281-1287.
- Lee, K.H., Zhang, N., Kuhn, W.B. & Kluitenberg, G.J. (2007). A frequency-response permittivity sensor for simultaneous measurement of multiple soil properties: Part I. the frequency-response method. *Transactions of the ASABE*, 50(6), 2315-2326.
- Liu, W., Upadhyaya, S.K., Kataoka, T. & Shibusawa, S. (1996). Development of a texture/soil compaction sensor. In *Proceedings of 3rd International Conference on Precision Agriculture*, 617-630. Minneapolis, Minn., University of Minnesota, Precision Agriculture Center.
- Mouazen, A. M., Baerdemaeker, J. D. & Ramon, H. (2004). Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fiber-type NIR spectrophotometer. *Soil and Tillage Research*, 80, 171-183.
- Munoz-Carpena, R. (2004). *Field devices for monitoring soil water content*. IFAS Extension, University of Florida, Bul 343.
- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J. & Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity, New formulations and calibrations. *SSSA Journal*, 53(2), 433-439.
- Sun, Y., Ma, D., Schulze Lammers, P., Schmittmann, O. & Rose, M. (2005). On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil and Tillage Research*, 86, 209-217.
- Topp, G. C., D Davis, J. L. & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582.
- Whalley, W. R. & Stafford, J. V. (1992a). Real-time sensing of soil water content from mobile machinery: Options for sensor design. *Computers and Electronics in Agriculture*, 7, 269-284.
- Whalley, W. R., Dean, T. J. & Izzard, P. (1992b). Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 52, 147-155.
- Yu, C., Warrick, A. W. & Conklin, M. H. (1999). Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurement. *Water Resources Research*, 35(6), 1789 - 1796.

