پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۴۰۲، ۸(۱۳)، ۱۳۵-۱۴۷

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

طراحی، ساخت و ارزیابی سنسورخازنی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک

احسان قابلی [۱]، الهام موحد [*۲]، بهزاد محمدی الستی [۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندس مکانیک- ماشین آلات کشاورزی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب، آذربایجان شرقی

۲- کارشناسی ارشد مدیریت محیط زیست – اقتصاد محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب، آذربایجان شرقی

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۳/۰۷

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۲/۰۶/۳۱

کلید واژه‌ها:
الکترونیک،
سنسورهای خازنی،
حداکثر رطوبت،
درصد خطا،
رطوبت سنج.

چکیده

کشاورزی دقیق یک مفهوم جدید در کشاورزی امروزی است و بر مبنای وجود ناهمگونی در سطح مزرعه استوار است. یکی از دلایل رشد کشاورزی دقیق در میان دانشمندان و کشاورزان، پیشرفت تکنولوژی در سیستم‌های تعیین مختصات جغرافیایی (GPS) ، سنسورها، عکس‌های هوایی یا ماهواره‌ای (سنجش از دور) و تسهیلات مدیریت اطلاعات جغرافیایی است. وجود مشکلات تشخیص پارامتری در حوزه عملیات های آزمایشگاهی در بخش کشاورزی به خصوص تشخیص میزان رطوبت خاک، متخصصان را بر آن داشت است که همواره در تلاش برای بدست آوردن راهکار مناسب برای اندازه گیری میزان رطوبت مورد نیاز گیاه و منطقه مورد نظر باشند. از این رو، در این تحقیق سعی شده تا با طراحی و ساخت یک سنسور رطوبت سنج که در آن از خاصیت خازنی استفاده شده، بتوان رطوبت خاک را اندازه‌گیری کرد. این سنسور خازنی متشکل از دو صفحه آلومینیومی عایق بندی شده می‌باشد که با تغییر رطوبت خاک، ضریب دی‌الکتریک خازن و به طبع آن ظرفیت خازنی و فرکانس مدار خروجی در آن تغییر می کند. از ویژگیهای دستگاه مورد نظر می‌توان به تشخیص رطوبت همزمان در چندین نقطه از زمین و نیز استفاده در کنترل میزان آب دهی مورد نیاز گیاهان اشاره کرد. به علاوه، این دستگاه دارای یک ماژول فرستنده وگیرنده بیسیم با برد ۲۵۰ متر است. این دستگاه در شرایط آزمایشگاهی در ۸۰ نقطه مورد بررسی قرار گرفت و به منظور بررسی دقیق‌تر با سنسورهای متفاوت دیگری مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. میانگین درصد خطای بدست آمده از سنسور خازنی ساخته شده ۰/۰۶ درصد می‌باشد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e.movahed86@yahoo.com

Journal of Environmental Research and Technology, 8(13)2023. 135-147

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Patterns of Water Quality Changes, Invasive Aquatic Plant Identification and Environmentally Friendly Control Solutions in Drinking Water Dams of Mazandaran Province

Ehsan Ghabeli [1], Elham Movahed[*2], Behzad Mohammadi Alasati[3]

1- MSc in Mechanical Engineer - Agricultural Machinery, Islamic Azad University, Bonab Branch
2- MSc in Environmental Management - Environmental Economics, Islamic Azad University, Sciences and Research Branch, Tehran
3- Assistant professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Bonab Branch

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
22/11/2022
Accepted:
28/05/2023
Available online:
22/09/2023

Keywords:
Electronic,
Capacitive sensors,
Maximum moisture,
Error percentage,
Hygrometer

Abstract

Precision agriculture is a new concept in modern agriculture and it is based on heterogeneity at the farm level. One of the reasons of the precision agriculture's growth among scientists and farmers, is the technological advancement in the geographic path system (GPS), sensors, aerial or satellite photos (or Remote Sensing) and geographic information management facilities. The parametric detection problems in the field of laboratory operations in the agricultural sector, particularly the detection of soil moisture persuade the specialists trying to reach a suitable solution for the plant and interested areas' required amount of moisture. So, in this research, it is tried to measure the soil moisture by designing and manufacturing a hygrometer sensor which has been used capacitive property in it. This capacitive sensor consists of two insulated aluminum plates that changes by changing the soil moisture, index of dielectric capacitor and its capacitance and frequency of the output circuit. Among the characteristics of the device, it can be mentioned to simultaneously moisture detection at several points of the field and also usage in controlling the plants' required watering amount. Also, this device has a wireless transmitter and receiver module with a range of 250 meters.This machine was tested in laboratory conditions in 80 areas and by other different sensors for more exact tests. The mean error percentage received by the capacitive sensor is 0.60%.

* Corresponding author E-mail address: e.movahed86@yahoo.com

مقدمه

آب به عنوان اساسی ترین ماده حیات پر مصرف ترین ماده در طبیعت متضمن حیات بشری است و لازمه این ضمانت استفاده معقول و اساسی از منابع آبی و جلوگیری از آلوده شدن آن است. رسالت حفظ آن به عهده تمامی افراد است که در مصرف آب سهیم هستند آب برای زندگی حیاتی است و منبع کلیدی برای توسعه پایدار می‌باشد. امروزه، با گسترش مراکز صنعتی، افزایش جمعیت و عدم کنترل مناسب محیط زیست، خطرات زیادی از نظر آلودگی آبها وجود دارد. متاسفانه، در یک حوزه یا منطقه، بیش از همه محاسبات بیلان آبی مدنظر آلودگی آبها اغلب فراموش می‌شود در صورتی که وجود آب در کره زمین و همچنین حصول به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست و کیفت منابع آب، علاوه بر پرداختن به مسائل فنی و مهندسی به منظور حفاظت کمی و کیفی منابع آب در مقابل آلاینده‌های نقطه ای توجه به روش‌ها و تکنیک‌های مدیریتی همسو با موضوعات فنی نیز امری ضروری و مهم است. در این تحقیق، به روش‌ها و تکنیک‌های مدیریت در کنترل منابع غیر نقطه ای آلودگی آب پرداخته شده است.

تقسیمات رطوبتی خاک

آب هیگروسکوپیک[1]

خاکی که در معرض هوای آزاد، آب خود را از دست داده و به ظاهر کاملاً خشک به نظر می‌رسد همواره مقداری رطوبت به صورت قشری نازک در سطح ذرات خود تثبیت می کند این رطوبت که تحت نیروی جاذبه یی در خاک نگهداری می شود اصطلاحاً آب هیگروسکوپیک (آب جاذبه ای) نامیده می‌شود.

آب کاپیلاریته[2]

وقتی رطوبت خاک از قشر نازکی که به شدت جذب سطحی ذرات آن شده است تجاوز نموده مازاد رطوبت که در تماس با هوای خاک می باشد تحت تأثیر نیروی کاپیلاریته قرار می‌گیرد.

آب اشباع[3]

پس از آنکه خلل و فرج ریز خاک از آب پر شد اگر نفوذ آب در خاک ادامه داشته باشد به تدریج هوای موجود در خلل و فرج درشت نیز خارج و آب جانشین آن می شود. آب مازاد بر رطوبت کاپیلاریته تحت تأثیر نیروی ثقل قرار می‌گیرد و در صورت مناسب بودن شرایط زهکشی در جهت نیروی مزبور جریان می‌یابد (به همین دلیل آب اشباع را آب ثقلی نیز می‌نامند) در آزمایشی که خرسندی و همکاران (۱۳۸۸)، به منظور ارزیابی سنسور اندازه‌گیر پیوسته رطوبت خاک به صورت بلادرنگ انجام دادند، نتایج آزمون واسنجی سنسور نشان داد که رابطه بین محتوای رطوبت خاک و بسامد خروجی سنسور را می‌توان به صورت یک رابطه درجه دو نشان داد و سنسور طراحی شده دارای خطایی برابر ۱/۵۵ درصد بود. آندراد و همکاران (۱۹۹۸)، یک سنسور اندازه‌گیر رطوبت مبنا دی‌الکتریک را تحت شرایط دینامیک ارزیابی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که امکان استفاده از سنسور به صورت بلادرنگ وجود دارد، ولی در خصوص مسائل مهمی همچون موقعیت الکترودها و تماس خاک با الکترود تأکید نمود. آزمون‌های تکمیلی نشان داد که این سنسور رطوبتی نه تنها به رطوبت پاسخ می‌دهد، بلکه به مقدار نمک، درجه حرارت و بافت خاک نیز عکس‌العمل نشان می‌دهد. بوگنا (۲۰۰۷)، سنسور خازنی کم هزینه ECH2O EC5 را ارزیابی کرد و به این نتیجه رسید که این سنسور برای کاربردهای شبکه سنسور مناسب است. سنسور شناسایی ECH2O-TE علاوه بر مقدار آب خاک، امکان کنترل غلظت حل شونده و دما را نیز بوجود می‌آورد. سنسور ECH2O-TE اخیراً توسط کیزیتو (۲۰۰۸) ارزیابی شد.در تحقیقی که پلما و همکاران (۲۰۱۰)، به منظور طراحی سنسور بی‌سیم اندازه‌گیر رطوبت خاک به منظور مدیریت هرچه بهتر

1. Hygroscopicwater
2. Capillary water
3 .Gravitation water

باغات انگور (تاکستان) انجام شد، سنسور طراحی شده در دو نوع مختلف خاک مورد آزمایش و کالیبره شدن قرار گرفت و با روش دیگری که محتوای حجمی آب می‌باشد (VWC) مورد واسنجی قرار گرفت و نتایج آن با میزان خطای کمی مؤفقیت آمیز بود.

هدف اصلی از این تحقیق طراحی، ساخت و ارزیابی یک سنسور خازن- مبنا و کم هزینه، قادر به اندازه‌گیری ایستگاهی محتوای رطوبتی خاک در مزرعه، می‌باشد. از جمله اهدافی که در ارتباط با این تحقیق مد نظر قرار گرفته است، تنظیم درست زمان‌بندی آبیاری سنتی و صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری با استفاده از سنسور طراحی شده می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه ساوجبلاغ، با پهنای حدود ۲۲۵۳ کیلومتر مربع، در غرب استان البرز، واقع شده است. این منطقه از شمال به شهرستان طالقان، از غرب به شهرستان آبیک، از شرق به شهرستان کرج و از جنوب به شهرستان‌های کرج و نظرآباد محدود است. مجموعاً در این منطقه حدود ۱۸۰۰۰ هکتار از اراضی، زیر کشت محصولات زراعی قرار دارد که ۵۷ درصد این محصولات را گندم آبی، جو آبی و ذرت علوفه‌ای تشکیل داده‌اند. ۲۴۰۰ بهره‌بردار در این منطقه وجود دارد و در حدود ۱۹درصد از این منطقه به دام‌داری و باغداری به صورت سنتی اختصاص دارد.

مشخصات زمین مورد پژوهش

زمین مورد بررسی با مساحت ۱۷۳۴۵ مترمربع، در عرض جغرافیایی ″۴۴/۲۶، ′۴۰، ۳۵ تا ″۵۰/۴۱، ′۴۰، ۳۵ شمالی و طول جغرافیایی ″۳۲/۰۷، ′۵۶، ۵۰ تا ″۳۷/۲۶، ′۵۶، ۵۰ شرقی و در ارتفاع ۱۱۶۷ متر از سطح دریا در بخش چندار شهرستان ساوجبلاغ واقع شده است. با توجه به تحقیقاتی که کارشناسان اداره جهاد کشاورزی برای شناسایی جنس خاک زمین‌های منطقه انجام داده بودند مشخص شد جنس خاک زمین مورد پژوهش از نوع خاک‌های رسی سیلتی می‌باشد. با استفاده از دستگاه GPS مختصات جغرافیایی زمین را بدست آورده (در فوق اشاره شد) و نقشه هوایی این زمین برای شناسایی موقعیت آن با سایر زمین‌های مجاور تهیه شد.

مواد و روش ها

برای تعیین میزان رطوبت موجود در خاک، اولین مرحله طراحی یک سنسور مناسب است که بتواند رطوبت را اندازه گرفته و پارامترهای بدست آمده را به صورت بیسیم به یک سیستم مرکزی برای مانیتورینگ و ارسال دستورات کنترلی به منظور آبیاری ارسال کند. در مرحله بعد با توجه به نیاز ما از سنسور مورد نظر، اقدام به تهیه ابزار مورد نیاز برای ساخت سنسور شد و مراحل ساخت سنسور اندازه‌گیر رطوبت به پایان رسید. در مرحله بعد اقدام به طراحی و ساخت سنسور خازنی مناسب برای اندازه گیری رطوبت خاک شد. همچنین، از یک سنسور آماده در بازار برای سنجش رطوبت خاک برای تکمیل شدن آزمایش های خود استفاده شده است. برای ارزیابی سنسور ساخته شده و مقایسه دقت آن با سنسورهای دیگر لازم بود که مقادیر رطوبت تخمین زده شده توسط سنسور با مقادیر به‌دست آمده با سنسورهای موجود در بازار مقایسه شوند. به این منظور قطعه زمینی با بافت خاکی رسی سیلتی در نظر گرفته شد. این زمین به ۸۰ قطعه به اندازه های یکسان تقسیم‌بندی شد و در هر قطعه با هر سه سنسور موجود دستگاه رطوبت سنج MO750 تهیه شده از بازار سنسور خازنی تجاری HS1101 سنسور ساخته شده رطوبت خاک اندازه گیری شد. به عنوان مثال، ابتدا رطوبت خاک در قطعه اول توسط سنسور خازنی طراحی شده اندازه گیری شد. سپس در همان قطعه رطوبت خاک توسط سنسور کار گذاشته در مدار اندازه‌گیری و در آخر در همان قطعه رطوبت خاک توسط سنسور تهیه شده از بازار اندازه‌گیری شد. این کار برای مقایسه نتایج آزمایش سنسور طراحی شده توسط خودمان با سنسور های دیگر بود. تجزیه و تحلیل رطوبت خاک بدست آمده به روش میدانی و آزمایشگاهی بین طبقات مختلف بهره‌برداری زمین مورد آزمایش با استفاده از نرم افزار Matlab انجام گرفت. لازم به ذکر است که قبل از اینکه آزمایشات در زمین اصلی انجام گیرد،

یک قطعه زمین به ابعاد ۱×۱ متر مربع را انتخاب کرده و در چهار مرحله آبیاری با ایجاد درصدهای رطوبت خاک مختلف، رطوبت خاک را با سه سنسور اندازه گیری و نتایج تغییر رطوبت خاک ثبت شد.

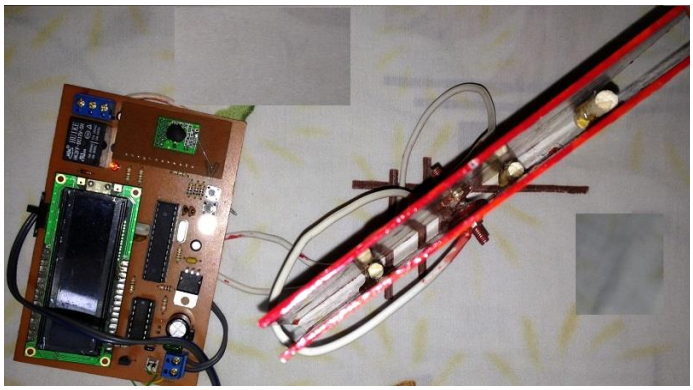
جدول (۱) مشخصات فنی دستگاه رطوبت سنج مدل MO750

۰ تا ۵۰٪	میزان رطوبت
٪ ۰/۱	حداکثر وضوح
۴۰*۴۰*۳۷۴ میلیمتر	ابعاد
۲۶۷ گرم	وزن

شکل (۱) سنسور رطوبت سنج تجاری HS1101 با مدار کامل شده

جدول (۲) مشخصات فنی سنسور تجاری HS1101

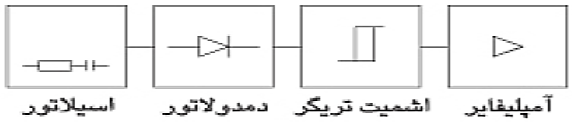
واحد	مقدار	نماد	رتبه بندی
`c	۴۰- تا ۱۰۰	Ta	دمای عملیاتی
`c	۴۰- تا ۱۲۵	Tstg	دمای ذخیره سازی
Vac	۱۰	Vs	ولتاژ تغذیه
RH%	۰ تا ۱۰۰	Rh	محدوده عملیاتی رطوبت
S	۱۰	T	لحیم کاری` c@T=260



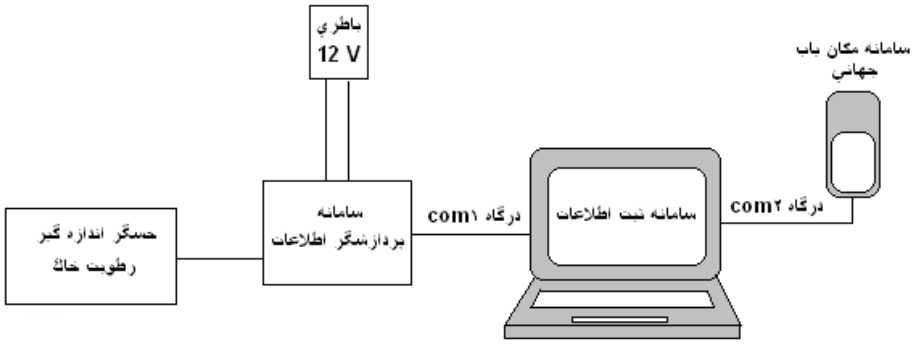
شکل(۲) سنسور ساخته شده به همراه مدار

طراحی سنسور خازنی اندازه گیر رطوبت خاک

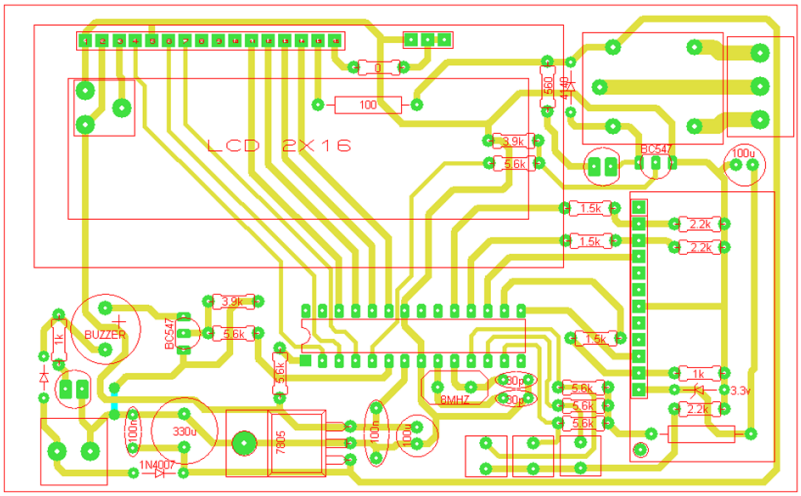
سنسورهای خازنی، سنسورهای بدون تماس و بدون کنتاکت الکتریکی هستند که در مقابل فلزات و اغلب غیر فلزات عمل می کنند. این سنسورها برای کنترل سطوح در مخازنی که از مواد پودری، مایع و یا دانه دانه پر شده‌اند، مناسب هستند. همچنین، از آن‌ها می‌توان به عنوان مولد پالس به منظور کنترل وضعیت برنامه ماشین‌آلات برای شمارنده‌ها و آشکارسازی تقریباً تمام مواد فلزی و غیرفلزی استفاده کرد. ساختمان اساسی این سنسورهای از چهار قسمت تشکیل شده است:



شکل (۳) ساختمان اساسی این سنسورها



شکل(۴) طرح واره ارتباط سنسورها با سامانه پردازش و ثبت اطلاعات



شکل (۵) نمای شماتیک مدار ساخته شده

قابلیت های دیگر این طراحی

این مدار شامل یک رله ۲۲۰/۵ ولت به همراه منبع تغذیه است شکل (۵) که از طریق آن می توان دستگاه‌هایی با تغذیه تا ۲۲۰ ولت را روشن و یا خاموش کرد. بوسیله این رله می توان مدار های جانبی را به طراحی اضافه کرد تا کارایی سیستم افزایش یابد.

همچنین، روی مدار فوق یک دما سنج محیطی نصب شد که بتوان با توجه به شرایط آب وهوائی میزان رطوبت خاک را از طریقه رله تنظیم کرد. این سنسور دارای ۳ پایه می‌باشد، در صورتی که سنسور روربروی شما باشد (بتوانید نوشته هایش را ببینید) اولین پایه سمت چپ vcc سنسور (متصل به ۵ ولت می‌شود)، پایه وسط ولتاژ خروجی (به میکرو متصل می‌شود) و پایه سوم گراند سنسور است. محدوده دمایی که این سنسور قادر به اندازه گیری آن است بین ۵۵- تا ۱۵۰ درجه است و این سنسور به ازای هر درجه سانتی گراد، ۱۰ میلی ولت ولتاژ خروجی را تغییر می‌دهد. یعنی به ازای دمای ۱ درجه ولتاژ خروجی سنسور ۱۰ میلی ولت و به ازای ۱۰۰ درجه خروجی سنسور ۱ ولت است.

با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Bascom 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 به منظور تنظیمات درگاه سریال پیش‌بینی شد و سپس داده ها با ترتیب خاص طبق قالب نوشته شده در رایانه ثبت شد.

کالیبراسیون سنسور ساخته شده

به منظور کالیبره کردن خازن ساخته شده به این شکل عمل گردید که در ۴ نقطه از زمین هر دو خازن تجاری و ساخته شده را با یکدیگر وارد خاک کرده و درصد رطوبت اعلامی از سنسور تجاری و فرکانس خروجی از سنسور ساخته شده را ثبت شد، برای هر یک از فرکانس‌های خروجی یک ضریب تقسیم بدست آوردیم، سپس با میانگیری از چهار ضریب تقسیم، به یک ضریب تقسیم نهایی رسیده که این ضریب تقسیم باعث می‌شود فرکانس خروجی به درصد رطوبت تبدیل شود و با استفاده از برنامه نویسی صورت گرفته کل مراحل فوق وارد ریز پردازنده شد .

آزمایش‌های مزرعه‌ای

برای ارزیابی سنسور ساخته شده لازم بود که مقادیر رطوبت بدست آمده از آن با مقادیر رطوبت سنسور تجاری HS1101 و دستگاه رطوبت سنج MO750 مقایسه شوند. به این منظور قطعه زمینی با بافت خاکی مشخص در نظر گرفته شد. این زمین به قطعات با ابعاد معین تقسیم بندی شد و در هر قطعه هر سنسور مورد آزمایش قرار گرفت و میزان رطوبت خاک ثبت خواهد شد. در پایان نیز با استفاده از روش میانگین‌گیری از مقادیر ثبت شده میانگین‌گیری شد. برای تعیین درصد خطای دستگاه نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

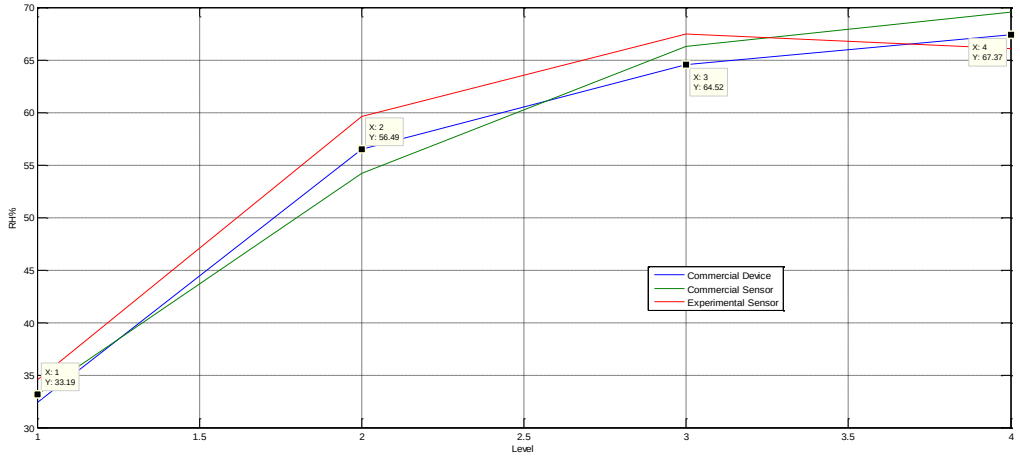
(۱-۳)

$$\%err = \frac{|X_{mes} - X_{true}|}{X_{true}} \times ۱۰۰$$

که در آن؛ X_{mes} مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسورساخته شده و X_{true} مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسور خریداری شده از بازار می‌باشد. در این آزمایش از زبان برنامه‌نویسی Bascom برای ثبت داده‌ها در کامپیوتر و نیز برای تحلیل داده ها از نرم افزار Spss استفاده شد.

یافته های پژوهش

داده های بدست آمده از دستگاه تجاری(rh)، سنسور تجاری(rh2) و سنسور ازمایشی(rh3) برای یک قطعه زمین ۱×۱ مترمربع طی چهار مرحله افزایش رطوبت خاک در شکل (۶) مشاهده می شود، در این شکل محور طولی بیانگر درصد رطوبت و محور عرضی بیانگر سطح زمین نمونه برداری شده می‌باشد، لازم به توضیح است که نمونه برداری در یک قطعه زمین یک متر مربعی و در چهار مرحله برداشته شد، به این صورت که در هر مرحله برداشت رطوبت خاک یک لیتر آب به خاک برای افزایش رطوبت اضافه، و سپس نمونه بعدی در همان محل برداشته شد.



شکل (۶) دستگاه تجاری (آبی)، سنسور تجاری (سبز) و سنسور آزمایشی (قرمز)

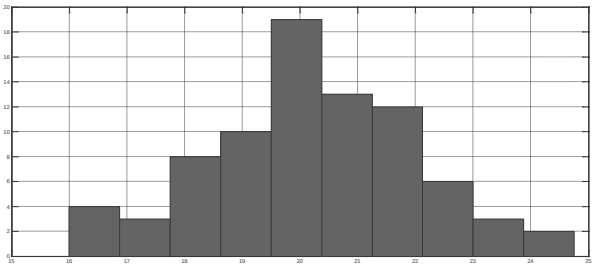
در جدول (۳) نتایج حاصل از نمونه برداری زمین یک متر مربعی مشخص شده است، در این جدول rh بیانگر نتایج رطوبت سنج تهیه شده از بازار، rh2 بیانگر سنسور تجاری و rh3 بیانگر سنسور ساخته شده و rh_rh2 اختلاف بین رطوبت سنج خریداری شده و سنسور تجاری، rh_rh3 اختلاف بین رطوبت سنج خریداری شده و سنسور ساخته شده است .

جدول(۳) نتایج درصد رطوبت بدست آمده در زمین یک مترمربع

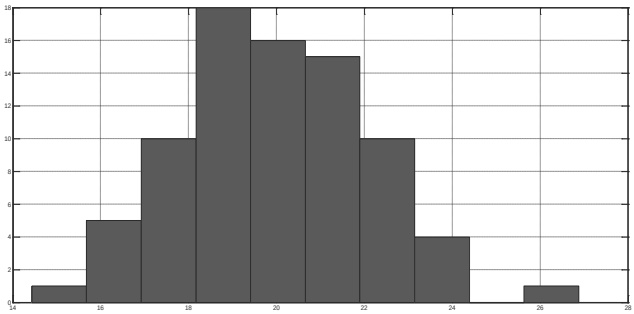
مراحل	rh	rh۲	rh۳	rh-rh۲	rh-rh۳	rh۲-rh۳
۱	۳۲.۴۱۴۵	۳۳.۱۹۳۲	۳۴.۵۵۹۳	-۰.۷۷۸۷	-۲.۱۴۴۸	-۱.۳۶۶۱
۲	۵۶.۴۹۳۵	۵۴.۱۷۲	۵۹.۵۸۶۴	۲.۳۲۱۴	-۳.۰۹۲۹	-۵.۴۱۴۳
۳	۶۴.۵۲۲۸	۶۶.۲۶۸۵	۶۷.۴۴۰۴	-۱.۷۴۵۶	-۲.۹۱۷۶	-۱.۱۷۱۹
۴	۶۷.۳۶۷	۶۹.۵۳۷	۶۶.۰۷۳۷	-۲.۱۷	۱.۲۹۳۳	۳.۴۶۳۲

پراکندگی داده‌ها

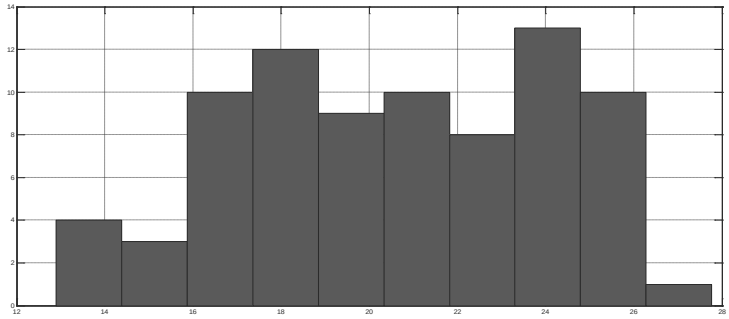
برای تامین اهداف این تحقیق از ۸۰ نقطه نمونه برداری شد، این نمونه ها توسط هر سه سنسور تهیه شده اندازه گیری و ثبت شد که شکل های ۷، ۸ و ۹ نشان دهنده پراکندگی رطوبت زمین مورد مطالعه می‌باشد.



شکل (۷) پراکندگی رطوبت به دست آمده از دستگاه رطوبت سنج تهیه شده از بازار



شکل (۸) پراکندگی رطوبت به دست آمده از سنسور تجاری



شکل (۹) پراکندگی رطوبت به دست آمده از سنسور آزمایشی.

همچنین، به منظور تحلیل دقیق‌تر سنسورهای موجود، درصد رطوبت خاک در ۱۰ نقطه و با سه مرتبه تکرار برای هر کدام از سنسورهای rh1، rh2 و rh3 انجام گرفت. پس در کل هر سنسور ۳۰ بار و در مجموع ۹۰ بار درصد رطوبت خاک با سنسورهای سه گانه فوق اندازه گیری شده است.

با استفاده از نرم افزار SPSS و آزمون کروسکال-والیس برای رتبه بندی میانگین داده های حاصل از سنسورهای rh1، rh2 و rh3 داریم :

جدول (۴) رتبه بندی میانگین داده های حاصل از سنسورهای rh1، rh2 و rh3 با استفاده از نرم افزار SPSS

رتبه میانگین	مرتبه	نوع	
۴۲/۲۹	۳۰	rh1	Rh
۳۷/۳۶	۳۰	rh2	
۴۷/۶۰	۳۰	rh3	
	۹۰	کل	
Test Statistics[a,b]			
Rh			
۰/۴۹۳		Chi-square	
۲		Df	
۰/۰۴۲		Asymp. Sig.	

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: type

همانگونه که از خروجی نرم افزار مشخص است، با توجه به ۹۰ مرتبه اندازه گیری درصد رطوبت خاک و در سطح اطمینان ۹۵ درصد (sig برابر با ۰/۰۴۲ و کوچکتر از ۰/۰۵ می باشد) مابین میانگین رتبه بندی درصد رطوبت خاک اندازه گیری شده توسط سنسورهای سه گانه تفاوت معناداری وجود دارد و سنسور شماره ۳ (سنسور ساخته شده) دارای بهترین عملکرد با میانگین رتبه ۴۷/۶۰، سنسور شماره ۱ (تهیه شده از بازار) دارای رتبه دوم با میانگین ۴۲/۲۹ و سنسور شماره ۲ (سنسور تجاری) دارای رتبه سوم با میانگین رتبه بندی ۳۷/۳۶ می‌باشد.

همچنین، به منظور اطمینان به داده های حاصل از آزمایش، از روش تکرار پذیری استفاده شده است (داده ها در هر نقطه سه بار تکرار شده اند) هر چه تکرار پذیری یک آزمایش بیشتر باشد، می توان به نتایج آن بیشتر اطمینان کرد. پس از تکرار هر کدام از آزمایشها در شرایط کاملاً یکسان، انحراف معیار نتایج مشخص می‌شود، هر چه انحراف معیار کوچکتر باشد، به معنای تکرارپذیری زیاد و اطمینان بالاتر و هر چه انحراف معیار بزرگتر باشد، به معنای تکرارپذیری کمتر و اطمینان پایین تر است.

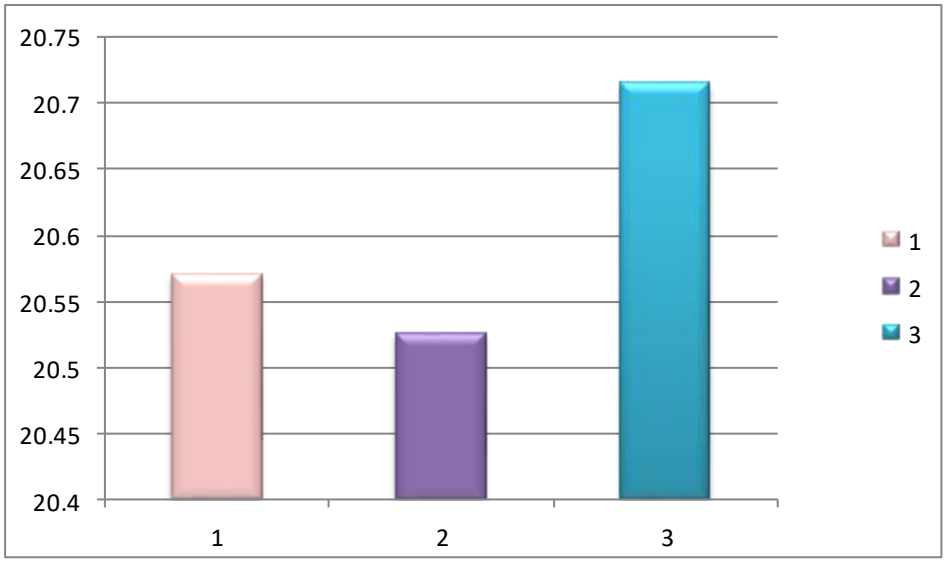
جدول انحراف معیار اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار SPSS برای هر کدام از سنسورهای سه گانه به شرح زیر می‌باشد:

جدول (۵) انحراف معیار سنسورهای سه گانه توسط نرم افزار SPSS

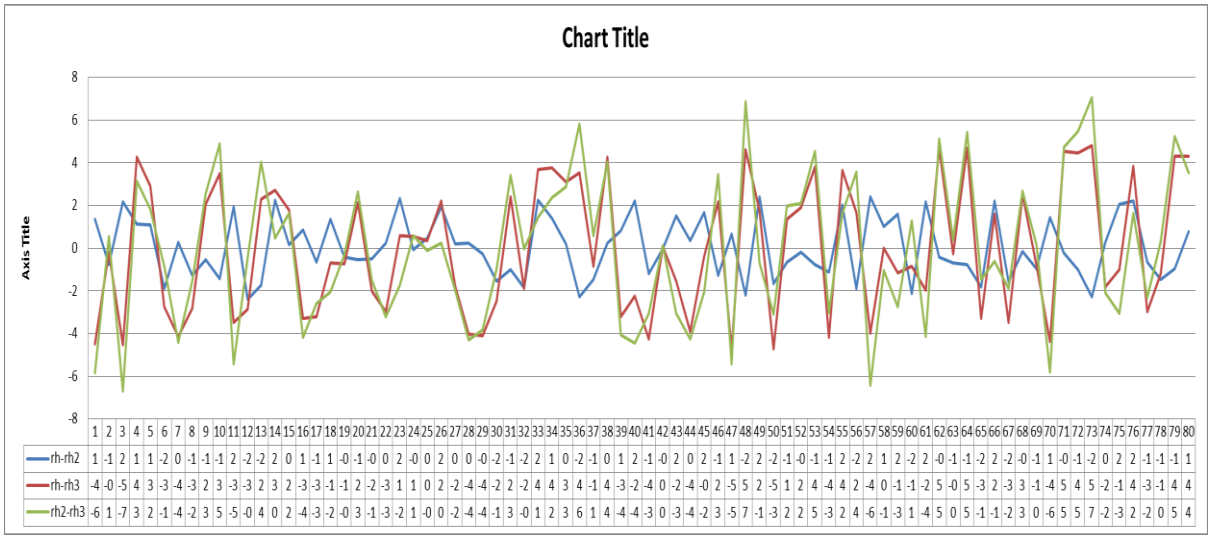
	مرتبه	انحراف معیار
Rh1	۳۰	**۱/۹۰۲۱۵۸۹**
Valid N (listwise)	۳۰	
Rh2	۳۰	**۳/۰۹۰۶۶۳۸**
Valid N (listwise)	۳۰	
Rh3	۳۰	**۱/۲۰۰۹۵۴۴**
Valid N (listwise)	۳۰	

همان‌گونه که از داده های جدول (۵) که در آنها انحراف معیار برای هر کدام از داده های حاصل از سنسورها، جداگانه مشخص شده است، نشان می دهد که، داده های اندازه گیری شده توسط سنسور شماره ۳ (سنسور ساخته شده) دارای کمترین انحراف معیار(۱/۲۰۰۹۵۴۴) می‌باشد. بنابراین، این سنسور دارای بالاترین خاصیت تکرارپذیری و بیشترین قابلیت اعتماد به داده‌های اندازه‌گیری است. سنسور شماره ۱ (تهیه شده از بازار) دارای انحراف معیار(۱/۹۰۲۱۵۸۹) که دارای رتبه دوم می‌باشد و این سنسور، در مرتبه دوم خاصیت تکرارپذیری و قابلیت اعتماد به داده‌های اندازه‌گیری و سنسور شماره ۲ (سنسور تجاری) دارای انحراف معیار(۳/۰۹۰۶۶۳۸) که دارای رتبه سوم و این سنسور ، در مرتبه سوم خاصیت تکرارپذیری و قابلیت اعتماد به داده‌های اندازه‌گیری است.

با توجه به نتایج تحقیق در شکل های (۱۰ و۱۱)، در سطح اطمینان ۹۵ درصد و با توجه به داده های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در۱۰ نقطه با ۳ مرتبه تکرار برای هر کدام از سنسورها، سنسور شماره ۳ (سنسور ساخته شده)، دارای بهترین عملکرد و رتبه‌بندی و همچنین دارای بالاترین قابلیت اطمینان و تکرارپذیری می‌باشد و در مرتبه های بعدی سنسورهای شماره ۱(تهیه شده از بازار) و سنسور شماره ۲ (سنسور تجاری)، قرار می‌گیرند.



شکل (۱۰) مقایسه میانگین داده های بدست آمده از سه سنسور، ۱) دستگاه خریداری شده، ۲) سنسور تجاری و ۳) سنسور ساخته شده



شکل (۱۱) مقایسه اختلاف سه سنسور مورد استفاده.آبی rh_rh2 اختلاف بین رطوبت‌سنج خریداری شده و سنسور تجاری، قرمز rh_rh3 اختلاف بین رطوبت‌سنج خریداری شده و سنسور ساخته شده، سبزrh2_rh3 اختلاف بین سنسور ساخته شده و سنسور تجاری

بحث و نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده، حداکثر رطوبت دقیق خاک تست شده توسط دستگاه تهیه شده از بازار بین ۱۵ الی ۲۵ درصد می‌باشد، در مقابل، سنسور تجاری میزان رطوبت دقیق خاک را بین ۱۳ تا ۲۶ درصد و سنسور ساخته شده بین ۱۲ تا ۲۸ درصد اندازه‌گیری می‌کند. همچنین، درصد خطای بدست آمده از سنسور خازنی ساخته شده بین ۳ تا ۸ درصد است.

در تحقیق میزوگوچی و همکاران (۲۰۱۴) حداکثر رطوبت دقیق خاک تست شده توسط سنسور خازنی با استفاده از روش فرکانس بین محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد بود، این نتیجه نشان می‌دهد که سنسور خازنی ساخته شده می‌تواند در محدوده رطوبت کمتری عمل کند و حساسیت بیشتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک داشته باشد. در مطالعه ای رحیمیان و همکاران (۱۴۰۱) با ارزیابی عملکرد سنسور خازنی

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط آب و هوایی مختلف به درصد خطای بین ۵ تا ۱۰ درصد دست پیدا کردند، این نتیجه نشان می‌دهد که سنسور خازنی ساخته شده نسبت به این تحقیق دقت بیشتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارد و خطای کمتری دارد.

در پژوهشی دیگر، مورگان و همکاران (۲۰۰۱) سنسورهای خازنی و مقاومتی در اندازه گیری رطوبت خاک را، مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که سنسور خازنی ساخته شده دقت بالاتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک نسبت به سنسورهای مقاومتی دارد. همچنین، درصد خطای سنسور خازنی ساخته شده بین ۳ تا ۸ درصد است، در حالی که در پژوهش مذکور این درصد مشابه است. این نتیجه نشان می‌دهد که سنسور خازنی ساخته شده قابلیت رقابت با سنسورهای مقاومتی را دارد و در دقت مشابهی عمل می‌کند.

با مقایسه این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که سنسور خازنی ساخته شده در محدوده رطوبت کمتری عمل کرده و دقت بیشتری را نسبت به برخی از سنسورهای مقاومتی و فرکانسی از خود نشان می‌دهد. همچنین، خطای سنسور خازنی ساخته شده نیز در محدوده قابل قبولی قرار دارد و با سایر تحقیقات همخوانی دارد. با این وجود، در هر مقایسه‌ای باید در نظر داشت که عوامل مختلفی می‌توانند باعث تفاوت در نتایج شود، از جمله شرایط آزمایشگاهی، روش‌های استفاده شده در ساخت سنسور، تراکم نمونه‌ها و غیره. بنابراین، برای یک مقایسه کاملتر، می‌توانید نتایج بیشتری را با تحقیقات دیگر در این زمینه مقایسه کرد و عوامل متغیر را در نظر گرفت.

منابع

خرسندی, آذر, همت, معصومی, امین اله, امیرفتاحی. (۱۳۹۰). طراحی، ساخت و ارزیابی حسگرخازنی اندازه گیر پیوسته رطوبت خاک بصورت بلادرنگ. مهندسی بیوسیستم ایران, ۴۲(۱), ۱-۷.

رحیمیان, آزادفر, سیدسعید, دهقانی, غلامی, حسن, بیرامی. (۱۴۰۱). کارایی حسگرهای نوری اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط شوری آب آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران, ۱۶(۱), ۱-۱۱.

منهاج. (۱۳۹۳). مبانی فیزیک خاک. سامانه مرکز نشر دانشگاه گیلان, (۱).

مرتضوی, سید متین, همت, میره ای, نادری بلداجی. (۱۳۹۷). طراحی، ساخت و آزمون استاتیکی حسگر خازنی رطوبتسنج خاک قابل نصب روی فروسنج افقی چندنوکی. مهندسی بیوسیستم ایران, ۴۹(۳), ۴۴۷-۴۵۸.

Andrade, P., Aguera, J., Upadhyaya, S., Jenkins, B., Rosa, U., & Josiah, M. (1998). Evaluation of a dielectric-based moisture and salinity sensor for in-situ applications. In 2001 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., & Hopmans, J. W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. Journal of Hydrology, 352(3-4), 367-378.

Bogena, H. R., Huisman, J. A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology, 344(1-2), 32-42.

Palma, D., Bencini, L., Collodi, G., Manes, G., Chiti, F., Fantacci, R., & Manes, A. (2010). Distributed monitoring systems for agriculture based on wireless sensor network technology. International Journal on Advances in Networks and Services, 3(1).

Morgan, K. T., Parsons, L. R., & Adair Wheaton, T. (2001). Comparison of laboratory-and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitance methods. Plant and Soil, 234, 153-157.

Mizuguchi, J., Piai, J. C., de França, J. A., de Morais França, M. B., Yamashita, K., & Mathias, L. C. (2014). Fringing field capacitive sensor for measuring soil water content: Design, manufacture, and testing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 64(1), 212-220.

Bencini, L., Chiti, F., Collodi, G., Di Palma, D., Fantacci, R., Manes, A., & Manes, G. (2009, June). Agricultural monitoring based on wireless sensor network technology: Real long life deployments for physiology and pathogens control. In 2009 third international conference on Sensor Technologies and Applications (pp. 372-377). IEEE.

Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., & Guerra, B. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. Computers and electronics in agriculture, 76(2), 252-265.