مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۸- شماره ۶ - سال ۱۴۰۲

www.ElitesJournal.ir

# طراحی و ساخت حسگر خازنی رطوبت خاک بر مبنای ثابت دی الکتریک آب

**محمدرضا رئیسی آهوان*[1]، محمدجعفرهمتی[2]**

**۱-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه شاهد تهران، تهران، ایران**

**۲-عضوهیئت علمی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سیرجان،کرمان، ایران**

*mraeisi203@gmail.com

ارسال: آذر ماه ۱۴۰۲ پذیرش: بهمن ماه ۱۴۰۲

## چکیده

در سرزمین خشکی مانند ایران مدیریت آب و رطوبت خاک در اراضی کشاورزی یکی از ضروریات این حوزه به شمار می‌رود. اندازه‌گیری رطوبت خاک معمولا فرآیندی هزینه بر و زمان‌بر می‌باشد. با ورود حسگرهای مختلف اندازه‌گیری رطوبت، اندازه-گیری راحت‌تر و سریعتر رطوبت، زمینه افزایش تولید و صرفه‌جویی در هزینه‌ها به ویژه در بخش کشاورزی فراهم گردید. یکی از حسگرهای مورد استفاده در بخش کشاورزی، حسگر اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد که در مکانیزه شدن آبیاری، صرفه-جویی در میزان آب مورد نیاز و کاهش هزینه‌ها بسیار موثر بوده است. در این مقاله یک حسگر رطوبت خاک الکتریکی جدید با دقت بالا و میزان خطای کم معرفی می‌شود. حسگر طراحی شده شامل یک نوسان‌گر موج مربعی از نوع مولتی ویبراتور آستابل است که فرکانس خروجی آن وابسته به ظرفیت خازنی سر حسگر است که در خاک قرار می‌گیرد. به این صورت که با تغییرات رطوبت خاک ظرفیت خازنی سر حسگر تغییر کرده و به دنبال آن، فرکانس نوسان‌گر تغییر می‌کند. بر اساس تغییرات فرکانس نوسان‌گر، میزان رطوبت خاک گزارش می‌شود. به عبارت دیگر، سر حسگر که یک خازن با دی‌الکتریک آب است، تغییرات رطوبت خاک را به یک کمیت الکتریکی از نوع خازنی تبدیل کرده و این نیز فرکانس خروجی مولتی ویبراتور را تعیین می‌کند. حسگر طراحی شده می‌تواند با دقت بالا و در خاک‌های با بافت‌های متفاوت و در اعماق مختلف میزان رطوبت را بسنجد. به طوری که رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و روش وزنی دارای همبستگی۹۹٪ می‌باشد.

**واژگان کلیدی: حسگر رطوبت خاک، نوسان گر، خازن، مولتی ویبراتور استابل، دی الکتریک.**

## ۱– مقدمه

با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک واقع گردیده است، بنابراین صرفه‌جویی در مصرف آب از دیرباز تاکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در صنعت کشاورزی، آبیاری به روش سنتی به دلیل مصرف زیاد آب جای خود را به روش‌های نوین امروزی داده است. مدیریت آب برای حداقل کردن نیازهای سرمایه‌ایی و کارگری به ویژه آبیاری با حفظ شرایط رشد مناسب برای گیاهان انجام می‌شود. در همین راستا برای کنترل شرایط مناسب برای رشد گیاه، دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک یا همان حسگرهای رطوبت خاک مد نظر قرار گرفته است. حسگرها نقش بسیار موثری در کاهش مصرف بی‌رویه آب دارند. به طوری که با استفاده از حسگرهای مختلف، آبیاری به صورت هوشمند ممکن شده و عصر جدیدی در صنعت کشاورزی بوجود

آمده است. سنجش رطوبت خاک عمدتا به سه روش وزنی، حجمی و اندازه‌گیری پتانسیل خاک صورت می‌گیرد [۱] که حسگرهای ساخته شده به طور عمده از این سه روش پیروی می‌کنند. یکی از روش‌های دیگر که مرسوم است سنجش رطوبت به صورت آزمایشگاهی است. روش‌های آزمایشگاهی وقت‌گیر و زمان بر بوده و نمونه برداری موجب تخریب ساختمان خاک و به هم خوردگی خاک می‌شود و از طرفی دیگر فقط مناطق محدودی را پوشش می دهد [۲]. حسگرها انواع مختلفی دارند که نمونه‌های مقاومتی، خازنی و القایی آنها در اندازه‌گیری‌های رطوبت کاربرد قابل توجهی یافته‌اند [ ۳-۵]. خواص الکتریکی خاک با توجه به خصوصیات فیزیکی و الکتریکی خاک از جمله پتانسیل الکتریکی، رسانایی و ثابت دی‌الکتریک آن بیان می‌شود [۴]. این حسگرها بسته به نوع عملکردشان دارای مزایا و معایبی هستند که در سنجش میزان رطوبت تاثیر گذارند.

حسگرهای مقاومتی دارای دو پایه هستند که عملا وقتی وارد خاک می‌شوند، بر اساس میزان آب موجود در خاک و مقاومت خاک، جریان بین پایه‌ها برقرار می‌شود. هر اندازه آب موجود در خاک بیشتر باشد، مقاومت خاک کمتر شده و جریان بیشتری برقرار می‌شود و از این طریق میزان رطوبت را می‌توان مشخص کرد [۶]. البته با توجه به اینکه مقاومت خاک با کوچکترین تغییر در شوری خاک و یا دما ممکن است به میزان قابل توجهی تغییر کند، در طراحی این نوع حسگرها لازم است به این مساله توجه داشت. حسگرهای خازنی رطوبت به دلیل مشخصه‌های حسگری مناسب، کاربرد بسیار زیادی در اندازه‌گیری‌های رطوبت دارند. از اینرو بیشترین درصد تولیدات حسگرهای تجاری رطوبت از نوع خازنی است. از دلایل عمده این کاربرد، بالا بودن پایداری حرارتی، قابلیت اندازه‌گیری در محدوده وسیعی از رطوبت و دما، عملکرد خطی، حساسیت بالا، مقاوم بودن آن‌ها در برابر خوردگی‌های شیمیایی و تولید آسان آن‌هاست [۳-۴]. البته در برخی از این نمونه حسگرها که از ظرفیت خازنی خاک برای اندازه‌گیری استفاده می‌کنند، به دلیل نشتی بین صفحات خازن، اختلالاتی در اندازه‌گیری بوجود می‌آید.

حسگرهای خازنی بر اساس تغییر ظرفیت خازن عمل می‌کنند که خاک از عوامل تاثیر گذار روی دی الکتریک خازن است. بر اساس رطوبت خاک، دی الکتریک خازن تغییر کرده و باعث تغییر ظرفیت خازن می‌شود [۷]. این نوع از حسگرها نیز دارای معایبی مشابه حسگرهای مقاومتی هستند. به این‌صورت که بافت‌ها و املاح مختلف خاک بر دی‌الکتریک خازن تاثیرگذار بوده و نتایج را دچار خطا می‌کنند.

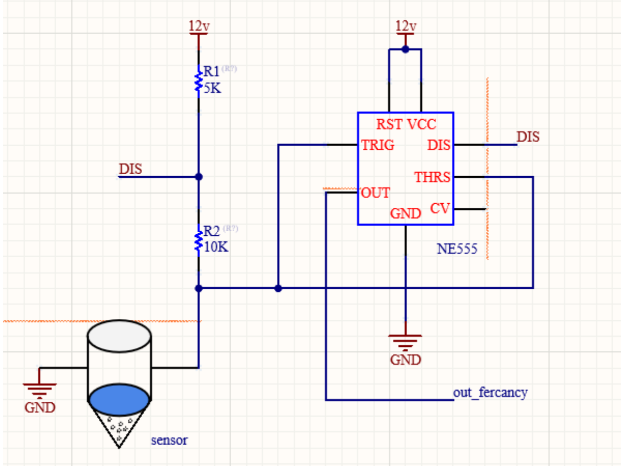
تانسیومترها نمونه‌ای از دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک هستندکه بر اساس مکش خاک کار می‌کنند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته آنالوگ و دیجیتال طبقه‌بندی کرد. تانسیومتر شامل یک لوله با جنس پلاگسی گلاس حاوی آب و سر سرامیکی متصل در پایین آن است که در خاک قرار می‌گیرند. همچنین در بالای لوله یک خلاسنج برای سنجش میزان مکش داخلی لوله قرار داده شده است. بر اساس میزان رطوبت خاک، آب از سر سرامیکی وارد خاک شده و ارتفاع آب داخل لوله تانسیومتر تغییر می‌کند. با سنجش میزان مکش موجود داخل لوله تانسیومتر می‌توان میزان مکش خاک را سنجید. هر انداره رطوبت کمتر باشد، خاک آب بیشتری از لوله تانسیومتر مکش می‌کند. تانسیومترها در پتانسیل بالاتر از ۱ اتمسفر به دلیل ورود حباب‌های هوا به داخل تانسیومتر، دقت مناسبی ندارند.

یک روش نوین برای سنجش رطوبت خاک استفاده از خط مایکرواستریپ است که یک خط انتقال فرکانسی به شمار می‌رود. این خط انتقال از خاک عبور می‌کند. فرکانسی که از این خط انتقال می‌گذرد بر اساس رطوبت خاک دچار تغییر می‌شود. به دلیل دوقطبی بودن آب بخشی از فرکانسی که از خط انتقال می‌گذرد، جذب آب موجود در خاک شده و فرکانس نهایی تغییر می‌کند. بر اساس این تغییرات میزان رطوبت خاک سنجیده می‌شود. این فرکانس از امواج مایکروویو است[۸].

همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، در بیشتر این حسگرها خاک نقش اصلی را در عمل اندازه‌گیری دارد. در این مقاله با طراحی و ساخت حسگر جدیدی آشنا خواهیم شد که قادر است رطوبت خاک را در همه انواع خاک (رس، شنی، شور و خاک زراعی و...) با خطای بسیار کمی نمایش بدهد.

## ۲- حسگر رطوبت خاک خازنی طراحی شده

ساختار کلی حسگر طراحی شده در شکل ۱ ترسیم شده است. حسگر طراحی شده شامل دو بخش "آشکارساز خازنی حسگر" و "مدار الکترونیکی و پردازش‌گر اطلاعات" است. هر یک از این بخش‌ها در ادامه به طور کامل تشریح می‌شوند. بخش الکترونیکی حسگر، شامل یک مولد موج مربعی است که توسط آی‌سی ۵۵۵ طراحی شده است. فرکانس نوسان خروجی توسط مقاومت‌های ۱۰ $k\Omega$ و ۵ $k\Omega$ و خازن سر حسگر قابل تنظیم است. در این طراحی خازن به عنوان سر حسگر استفاده شده است. در حسگر طراحی شده، با تغییر رطوبت خاک، ظرفیت خازن تغییر کرده و به دنبال آن فرکانس تغییر می‌کند.

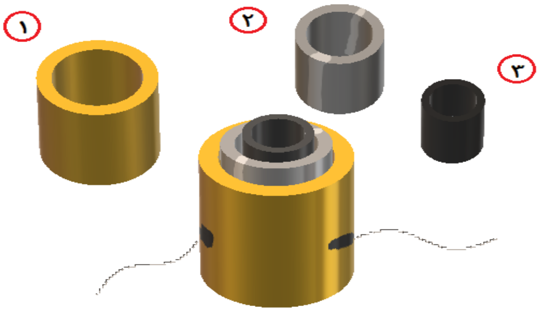



**شکل ۱- مدار کلی مربوط به حسگر ساخته شده**

**شکل ۲- حسگر طراحی شده همراه با مدار پردازشگر**

سر حسگر پیشنهادی طوری طراحی شده است که از یک خازن استوانه‌ای به شعاع ۲/۵ cm و ارتفاع ۱۱ cm بالای لوله انتقال آب به خاک نصب شده است. مطابق شکل ۲ عملیات اصلی در تشخیص میزان رطوبت را انجام می‌دهد. خازن دارای دی الکتریک آب، خلا و شیشه است که در شرایط متفاوت دی الکتریک تغییر می‌کند. دی الکتریک شیشه به این منظور بین صفحات خازن قرار گرفته که به دلیل دوقطبی شدن آب و ولتاژ شکست پایین آن به تنهایی نمی‌توان به عنوان دی الکتریک در بین صفحات خازن مورد استفاده قرار داد. به همین دلیل برای رفع این مشکل، شیشه هم جزئی از دی الکتریک در نظر گرفته شده است. در واقع دی‌الکتریک آب و شیشه بصورت سری هستند. در ارتفاع‌های مختلف آب در لوله شیشه‌ای، دی الکتریک خلا هم جزئی از دی الکتریک خازن محسوب می‌شود. چون با نفوذ آب از بخش پایین لوله استوانه‌ای به خاک، بخش بالایی لوله را خلا پر می‌کند. با انجام تست‌های مختلف، ظرفیت خازنی حسگر مورد نظر از ۱ pF تا ۱۰۰ pF تغییر می‌کند. در شکل ۳ اجزای تشکیل دهنده خازن نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل داریم، قسمت ۱ از پوشش عایق تشکیل شده است. پوشش عایق که از جنس پلاستیکی است برای محافظت خازن در برابر عوامل تاثیرگذار بیرونی بر عملکرد خازن بکار برده است. قسمت ۲ از دو صفحه آلومینیومی جدا از هم تشکیل شده است که بین شیشه و پوشش عایق قرار می‌گیرد. قسمت ۳ به عنوان یکی از سه دی الکتریک خازن است که جنس آن از شیشه و به شکل استوانه توخالی است که آب از آن عبور می‌کند. در حالت‌های مختلف دی الکتریک خازن تغییر می‌کند. همانطور که در بالا نیز اشاره شد، سه دی الکتریک برای خازن وجود دارد که متناسب با جابجایی آب تغییر می‌کند. سه دی‌التریک از آب و شیشه و خلا تشکیل شده است. دو رشته سیم از پوشش عایق عبور کرده و به صفحات آلومینیومی متصل شده‌اند.




**شکل ۳- اجزای خازن طراحی شده حسگر**

### ۳- نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی برای ارزیابی دستگاه

تست حسگر و داده کاوی مطابق تست دستگاه REC-P55 [۱۰] و به روش وزنی صورت گرفته است. به این ترتیب که در یک زمین کشاورزی ۵ کرت مشخص شده و کرت‌ها به صورت جداگانه در زمان‌های متفاوت آبیاری شده‌اند. با گذشت ۵ روز از هر کرت، ۱۰ قسمت با عمق‌های متفاوت خاک‌برداری شده و برای آزمایش به داخل ظروف با وزن مشخص ریخته شد. در مجموع ۵۰ نمونه خاک در آزمایشگاه خاک دانشگاه صنعتی سیرجان مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۴ بخشی از مراحل تست را نشان می‌دهد.

چگونگی آزمایش به شرح زیر است:

در مرحله‌ی اول یکی از نمونه خاک‌هایی که در ظروف موجود است در یک ظرف مخصوص اندازگیری ریخته و با ترازوی دقت ۰/۰۱ گرم وزن آن اندازه‌گیری می‌شود. نکته قابل توجه در مرحله اول، ثبت وزن خالی ظرف مخصوص اندازه‌گیری است. در مرحله‌ی دوم حسگر را در ظرف خاک قرار داده و آن را پر از آب کرده و با گذشت ۵ دقیقه میزان آبی که از حسگر خارج شده ثبت می‌شود. در مرحله‌ی سوم برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک، ظرف حاوی خاک داخل دستگاه آون با دمای $110\ C^{o}$ و به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. در مرحله‌ی بعد، با گذشت تقریبا ۲۴ ساعت، تمامی نمونه‌ها را از داخل دستگاه آون برداشته و با وزن کردن آن‌ها، درصد رطوبت وزنی به دست می‌آید. تعدادی از داده‌های ثبت شده در جدول ۱ آورده شده است.

**شکل ۴- اندازه‌گیری وزن خاک**

**جدول۱– داده‌های مربوط به تست آزمایشگاهی**

| نوع خاک | درصد رطوبت وزنی خاک | حجم آب خارج شده از حسگر (mL) |
|---|---|---|
| ۱ | ۱۰/۲۱ | ۲۰۰ |
| ۲ | ۱۸/۰۱ | ۱۸۵ |
| ۳ | ۲۴/۳۲ | ۱۴۲ |
| ۴ | ۳۶/۴۹ | ۱۰۰ |
| ۵ | ۵۴/۰۳ | ۹۵ |
| ۶ | ۸۱/۰۴ | ۲۵ |
| ۷ | ۹۵/۰۱ | ۱۰ |
| ۸ | ۹۹/۶۰ | ۰ |

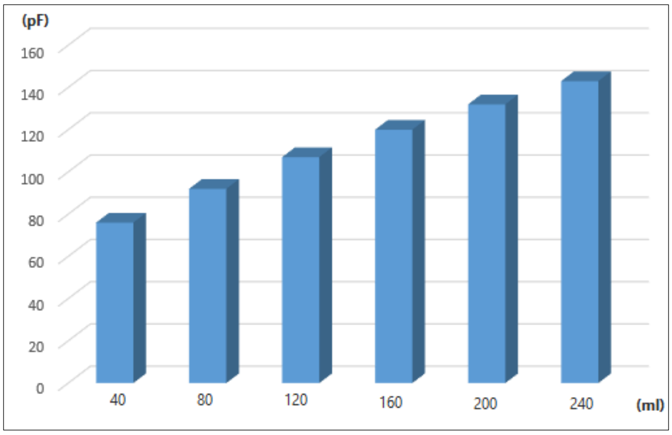
طبق  جدول ۱، ۸ نمونه خاک را از بین ۵۰ نمونه خاک که در آزمایشگاه مورد تست قرار داده شده، انتخاب می‌کنیم و تغییرات آنها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با تغییر درصد رطوبت خاک، میزان آب خارج شده از حسگر نیز تغییر می‌کند. بنابراین با تغییر ظرفیت خازنی حسگر، فرکانس نوسان‌گر طبق جدول ۲ تغییر می‌کند. مطابق این جدول، هر اندازه میزان آب حسگر کمتر می‌شود، فرکانس نیز کم می‌گردد. با استفاده از برد آردینو، داده‌های فرکانسی به رطوبت خاک تبدیل می‌شود. برای بررسی بیشتر، تغییرات ظرفیت خازنی با حجم آب تخلیه شده از حسگر در جدول ۲ نشان داده شده است. این تغییرات در شکل ۵ به صورت نمودار میله‌ای نیز نشان داده شده است.

**جدول ۲– نحوه تغییر فرکانس با تغییرات حجم آب درون حسگر**

| حجم آب حسگر (mL) | ۰ | ۱۰ | ۲۵ | ۴۲ | ۸۴ | ۹۵ | ۱۰۰ | ۱۲۶ | ۱۴۲ | ۱۶۸ | ۱۸۵ | ۲۰۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| فرکانس نوسان‌گر (KHz) | ۷۴ | ۷۸ | ۸۲ | ۱۱۰ | ۱۵۵ | ۱۶۰ | ۱۶۶ | ۱۷۰ | ۱۸۵ | ۲۱۵ | ۲۲۰ | ۲۳۰ |

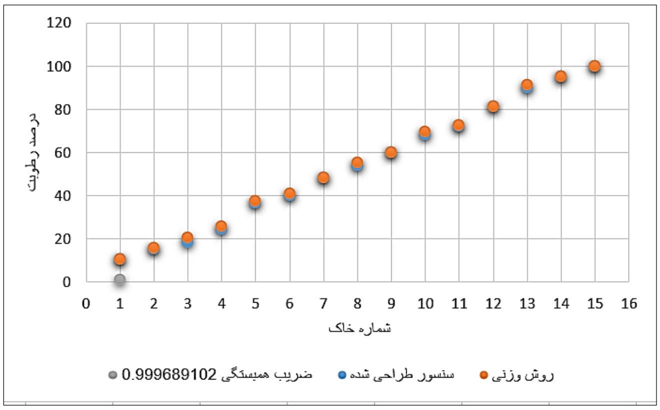
**جدول۳– تغییرات خازن متناسب با تغییر حجم آب**

| حجم آب حسگر (mL) | ۴۰ | ۸۰ | ۱۲۰ | ۱۶۰ | ۲۰۰ | ۲۴۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| تغییرات ظرفیت خازن (pF) | ۷۶ | ۹۲ | ۱۰۷ | ۱۲۰ | ۱۳۲ | ۱۴۳ |



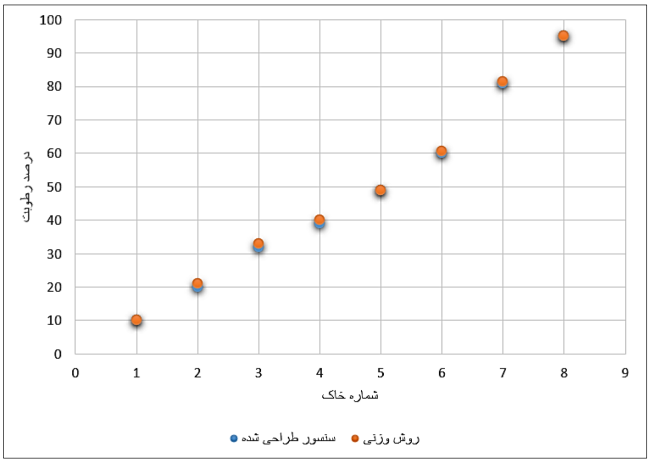

**شکل ۵– منحنی تغییرات ظرفیت خازن متناسب با حجم آب داخل خازن**

همانگونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، حسگر طراحی و ساخته شده در ۵۰ نمونه خاک مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن با روش وزنی مقایسه شده است. تعدادی از نمونه‌ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۶ درصد رطوبت بدست آمده خاک توسط حسگر طراحی شده و روش وزنی در ۱۵ نوع خاک متفاوت که شماره گذاری شده اند را نشان می‌دهد. از این مقایسه، همبستگی ۹۹ درصدی بین نتایج حاصل شد که در این شکل نیز قابل مشاهده است.

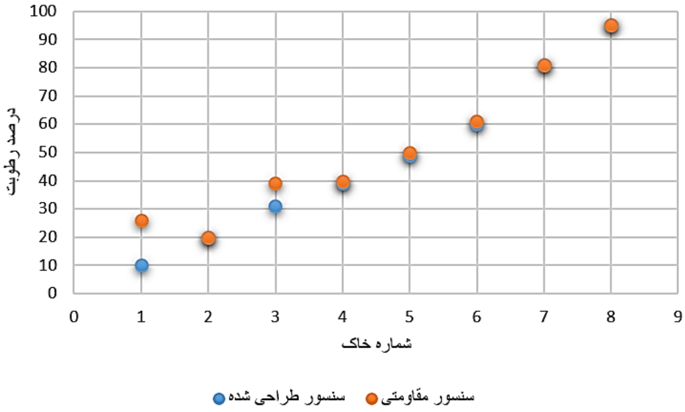



**شکل ۶- مقایسه درصد رطوبت بدست آمده خاک توسط حسگر و روش وزنی در ۱۵ نوع خاک متفاوت**

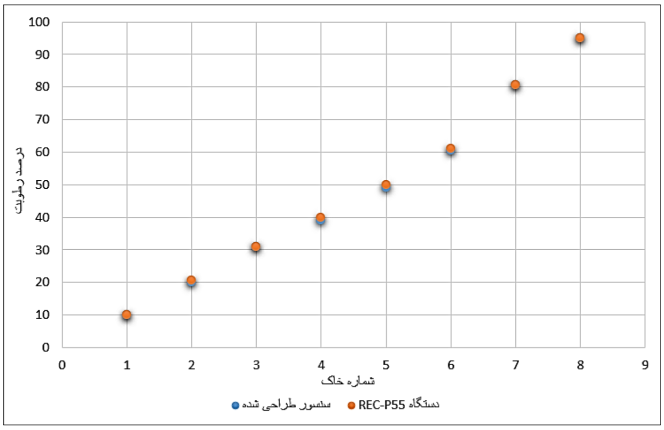
برای کالیبراسیون و صحت داده‌های حسگر، ۱۷ درصد از نمونه‌ها به طور تصادفی برای تست انتخاب شده است. این داده‌ها در سه روش مورد مقایسه گرفته‌اند. در شکل ۷، داده‌هایی که به صورت تصادفی برای تست انتخاب شده‌اند، با میزان درصد رطوبت به روش وزنی مقایسه شده‌اند. در این مقایسه، نتایج خیلی نزدیک به هم هستند و ضریب همبستگی میان داده‌های وزنی و ثبت شده توسط حسگر تقریبا ۹۹٪ بوده است. در شکل ۸ داده‌های حسگر طراحی شده با حسگر مقاومتی مقایسه شده‌اند. داده‌های حسگر مقاومتی با داده‌های حسگر طراحی شده همبستگی متوسطی دارند. به دلیل وجود خاک‌های با بافت‌های متفاوت، حسگر مقاومتی نمی‌تواند به درستی میزان درصد رطوبت را تشخیص دهد. طبق داده‌های بدست آمده در شکل ۹، حسگر پیشنهادی نتایجی بسیار شبیه به دستگاه REC-P55 دارد. به طوری‌که همبستگی ۹۹ درصدی بین داده‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین حسگر طراحی شده نسبت به حسگر مقاومتی بسیار دقیق‌تر عمل کرده و همبستگی بیشتری با داده‌های روش وزنی و دستگاه REC-P55 دارد.




**شکل ۷- مقایسه داده‌های بدست آمده حسگر طراحی شده با روش وزنی**




**شکل ۸- مقایسه داده‌های حسگر طراحی شده با حسگر مقاومتی**




**شکل ۹- مقایسه داده های بدست آمده حسگر طراحی شده با دستگاهREC-P55**

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار جدیدی از حسگر رطوبت خاک مبتنی بر خازن الکتریکی معرفی شد. اساس عملکرد حسگر طراحی شده مبتنی بر تغییرات ثابت دی الکتریک آن است. با تغییرات ارتفاع آب درون لوله حسگر، ثابت دی الکتریک خازن تغییر کرده و ظرفیت خازنی حسگر نیز تغییر می‌کند. مدار پردازشگر حسگر، تغییرات ظرفیت خازنی را به فرکانس تبدیل کرده و مقدار رطوبت خاک بر اساس آن مشخص می‌شود. در بخش الکترونیکی حسگر، یک نوسان‌گر موج مربعی مبتنی بر آی سی ۵۵۵ در نظر گرفته شده است. تست حسگر ساخته شده در ۵۰ نمونه خاک به روش وزنی و مطابق تست دستگاه REC-P55 انجام گرفته است. بر اساس اندازه-گیری‌های انجام گرفته، حسگر خازنی ارائه شده می‌تواند در خاک‌های با بافت‌های متفاوت و در اعماق مختلف میزان رطوبت را با دقت بالا بسنجد. به طوری که رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و روش وزنی دارای همبستگی ۹۹٪ می‌باشد. میزان همبستگی بالا در اندازه‌گیری‌ها، نشانگر این است که حسگر خازنی با دی الکتریک آب می‌تواند در بافت‌های مختلف خاک نتایج خوبی را ارائه کند.

## ۵- مراجع


1. Erbach DC. Measurement of soil bulk density and moisture. Transactions of the ASAE. 1987; 30(4):922-0931.
2. Lunt IA, Hubbard SS, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. Journal of hydrology. 2005 Jun 9;307(1-4):254-69.
3. Dunn, W., Introduction to instrumentation, sensors, and process control, Artech House Inc., British, 2006.
4. Yu L, Gao W, R Shamshiri R, Tao S, Ren Y, Zhang Y, Su G. Review of research progress on soil moisture sensor technology.
5. Basterrechea DA, Rocher J, Parra M, Parra L, Marin JF, Mauri PV, Lloret J. Design and Calibration of Moisture Sensor Based on Electromagnetic Field Measurement for Irrigation Monitoring. Chemosensors. 2021 Sep 6;9(9):251.
6. Saleh M, Elhajj IH, Asmar D, Bashour I, Kidess S. Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors. In2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET) 2016 Nov 2 (pp. 179-184). IEEE.
7. Muzdrikah FS, Nuha MS, Rizqi FA. Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU: SEN0193). In2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST) 2018 Aug 7 (pp. 1-6). IEEE.
8. Rezaei M, Ebrahimi E, Naseh S, Mohajerpour M. A new 1.4-GHz soil moisture sensor. Measurement. 2012 Aug 1;45(7):1723-8.
9. Bell DA. Solid state pulse circuits 4Th Ed. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2006.

۱۰. انصاری, ح., & حسن پور, م. (۱۳۹۴). طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری داده‌های محیطی خاک به ویژه رطوبت، دما و شوری با نام تجاری REC-P55.