

مقاله علمی-پژوهشی

## کارایی حسگرهای نوری اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط شوری آب آبیاری

محمدحسن رحیمیان<sup>۱\*</sup>، سید سعید آزادفر<sup>۲</sup>، فرهاد دهقانی<sup>۳</sup>، حسن غلامی<sup>۴</sup> و حسین بیرامی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

### چکیده:

هدف این پژوهش ارزیابی حسگرهای نوری اندازه‌گیری رطوبت خاک تحت شرایط مختلف از نظر شوری آب آبیاری است. این حسگرها بر اساس تکنیک سنجش از نزدیک (از نوع فعال) بوده که بازتاب‌های ساطع‌شده توسط اجسام را در یک محدوده طول موج مشخص (۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری می‌کند. بدین منظور ۴ تیمار شوری آب آبیاری با شوری‌های ۲، ۶، ۱۰ و ۱۶ دسی زیمنس بر متر و با ۴ تکرار برای ایجاد محیط کنترل‌شده خاک مرطوب و انجام آزمایش در نظر گرفته شد. هم‌زمان با قرائت‌های سنسورها، رطوبت خاک تیمارهای آزمایشی با استفاده از ترازوی دقیق الکترونیکی اندازه‌گیری شدند و اقدام به برازش معادلات مناسب بین قرائت‌های سنسور و رطوبت حجمی خاک در هر تیمار شد و نهایتاً این معادلات مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین دقت حسگر مذکور در شوری ۲ دسی زیمنس بر متر اتفاق افتاده است. ضریب تبیین ۰/۹۲، جذر میانگین مربعات خطای ۰/۰۲ و ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۲ نشان‌دهنده دقت بالای حسگر در این تیمار نسبت به سایر تیمارهای آزمایشی است. برای سطوح شوری ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر نیز اگرچه دقت سنسورها نسبت به تیمار قبلی کاهش یافته، اما می‌توان از خطاهای موجود چشم‌پوشی کرد و این حسگر را برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک در شوری‌های مذکور مناسب دانست؛ اما در سطح شوری ۱۶ دسی زیمنس بر متر، دقت حسگر به شدت کاهش یافته و ضریب نش - ساتکلیف (NSE) به مقدار غیرقابل قبول ۰/۵۵ تنزل کرده است. بنابراین، با توجه به نتایج کسب‌شده از این پژوهش، حسگر مذکور با اطمینان برای پایش رطوبت خاک‌هایی که با شوری‌های کمتر از ۱۰ دسی زیمنس بر متر آبیاری می‌شوند، قابل توصیه بوده و کارایی لازم برای برنامه‌ریزی‌های آبیاری را دارد.

واژه‌های کلیدی: سنجنده (حسگر)، شوری، رطوبت حجمی خاک، واسنجی

### مقدمه

به رویکرد بهره‌برداری و استفاده بهینه از منابع آب شور در کشاورزی غیرقابل اجتناب است (رحیمیان و همکاران، ۱۳۹۷). آبیاری با آب شور سبب شور شدن تدریجی خاک و کاهش عملکرد گیاهان می‌شود و یکی از مؤلفه‌هایی که می‌تواند به برنامه‌ریزی مناسب‌تر منابع آبی بخش کشاورزی در شرایط شور و جلوگیری از بروز تنش بیشتر به گیاه کمک نماید، پایش رطوبت خاک است (انصاری و حسن‌پور، ۱۳۹۴ و George, 2006)، به‌طوری‌که پایش و کنترل مستمر رطوبت خاک در عرصه‌های زراعی و باغی، به‌ویژه روشی که بتواند رطوبت خاک را در شرایط طبیعی و بدون دست‌خوردگی با سرعت و دقت بالا به دست آورد (نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰)، ضمن کمک به بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش مصرف آب‌های شور برای آبیاری، می‌تواند در افزایش تولیدات کشاورزی در این عرصه‌ها نیز مؤثر باشد. بدیهی است که طراحی، ساخت و واسنجی سنسورهای پایش و اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های کشاورزی و همچنین توسعه و گسترش کاربرد آن‌ها در بین کشاورزان، گام مهمی در راستای افزایش تولید محصولات کشاورزی در سطح کشور و ارتقای شاخص بهره‌وری بوده

از آنجایی که حجم منابع آب غیر شور مورد استفاده در بخش کشاورزی محدود بوده و به دلیل تغییرات اقلیمی و استفاده بی‌رویه از این منابع، روز به روز شوری این آب‌ها نیز افزوده می‌شود، لذا توجه

- ۱- استادیار و عضو هیئت علمی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
- ۲- مشمول مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
- ۳- استادیار و عضو هیئت علمی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
- ۴- دانشجوی دکترای رشته علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۵- استادیار و عضو هیئت علمی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

(\* نویسنده مسئول: Email: mhrahimian@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.1.1.8

داده‌های خروجی حسگر علاوه بر محتوای رطوبت، به درجه حرارت خاک نیز وابسته است.

مهاجران و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی از هدایت سنج القای الکترومغناطیسی توسعه یافته به منظور تخمین محتوای رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری برای لایه‌ی بالایی خاک (۰/۳-۰ متر) استفاده کردند. در این پژوهش برای بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی ظاهری و محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش القای الکترومغناطیسی، هدایت الکتریکی ظاهری در ۱۶ نقطه برای خاکی دارای بافت لوم اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که هدایت سنج القای الکترومغناطیسی تغییرات در محتوای رطوبتی خاک را برای لایه‌ی بالایی خاک (۰/۳-۰ متر) در خاکی غیر شور که دارای بافت لوم می‌باشد می‌تواند به خوبی توضیح دهد.

بلابادی و همکاران (۱۳۹۶) تأثیر بافت خاک و شوری (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) آب آبیاری بر دقت دستگاه تترپروب را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که هر سه عامل بافت، EC و SAR، از لحاظ آماری تأثیر معنی‌داری بر قرائت دستگاه تترپروب دارد. دستگاه در بافت لوم‌شنی دارای دقت بیشتری ( $0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) است. شوری آب آبیاری در هر سه بافت، کاهش محسوس دقت دستگاه را در پی داشت. افزایش SAR آب آبیاری در دو بافت لوم و لوم‌شنی، باعث کاهش دقت دستگاه و در بافت لوم‌سیلتی و در شوری‌های کمتر از ۶ دسی‌زیمنس بر متر، باعث افزایش دقت دستگاه شد. برادران مطیع و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی اثر شکل الکتروود میله‌ای و صفحه‌ای و نوع جریان الکتریکی (مستقیم و متناوب) را در دقت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، برای طراحی دستگاه تهیه نقشه هدایت الکتریکی خاک، مورد بررسی قرار دادند. دستگاه به کمک یک طرح آزمایشی کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه متغیر اصلی میزان شوری خاک (پنج سطح) نوع الکتروود (دو سطح) و جریان الکتریکی (دو سطح) در اطراف شهر مشهد با میزان شوری و درصد رس متفاوت ارزیابی شد. ضریب همبستگی تغییرات هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده به روش تماس مستقیم با هدایت الکتریکی آزمایشگاهی در تیمارهای مختلف و خاک‌های مختلف بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۹ به دست آمد. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از الکتروود صفحه‌ای و جریان متناوب به منظور طراحی دستگاه تهیه نقشه هدایت الکتریکی مزرعه توصیه می‌شود.

این پژوهش درصدد است تا اقدام به ارزیابی حسگری نماید که اصول و طرز کار آن با انواع متداول مورد استفاده در کشاورزی اندکی متفاوت بوده و بر اساس مرور منابع تا حدودی جدید محسوب می‌شود. حسگر مورد بررسی ساخت داخل کشورمان بوده و از طریق ویژگی اپتیک (بر پایه روش AHFO) و ثبت بازتابش امواج در محدوده

(خورسندی و همکاران، ۱۳۹۰) و به دانش‌بنیان شدن کشاورزی، کمک زیادی خواهد کرد. استفاده از این قبیل حسگرها مزایای بسیاری از جمله کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری و نتیجه‌گیری به موقع نسبت به روش‌های اندازه‌گیری مرسوم را دارا می‌باشد (مهاجران و همکاران، ۱۳۹۵). همین‌طور دقت و اثربخشی کشاورزی دقیق تا حد زیادی به تحلیل مناسب و به موقع شرایط رطوبتی خاک وابسته است. نمایش وضعیت آب خاک به صورت پیوسته، روشی مناسب برای بهینه کردن آبیاری در کشاورزی است. همچنین سیستم‌های هوشمند آبیاری مبتنی بر کاربرد حسگرهای رطوبتی خاک می‌توانند بیشترین کارایی مصرف آب در مزرعه را با حفظ رطوبت خاک در سطح بهینه فراهم کنند.

تاکنون و به‌ویژه طی دو دهه اخیر حسگرهای مختلفی با هدف پایش رطوبت خاک‌های کشاورزی ساخته، معرفی و استفاده شده‌اند که عمدتاً بر پایه روش‌های انعکاس سنجی بازه زمانی<sup>۱</sup> یا TDR می‌باشند. درحالی‌که امروزه محدوده وسیعی از تکنیک‌ها برای این منظور شناسایی و استفاده شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به سنجنده‌های فیبر نوری حرارتی<sup>۲</sup> (AHFO)، تانسئومترهای ظرفیت بالا، روش‌های بر پایه امواج مایکروویو و راداری (GPR)، روش تشخیص فرکانس رادیویی<sup>۳</sup> (RFID)، هیدروژل‌ها و روش‌های مبتنی بر لرزه‌نگاری را نام برد (هاردی، ۲۰۲۰)؛ اما در شرایط آب و خاک شور، اندازه‌گیری رطوبت خاک به کمک ابزارها و حسگرهای پایش رطوبت همواره دارای چالش‌هایی بوده و هست؛ به طوری که دقت و کارایی این حسگرها در شرایط شور بعضاً کاهش یافته و یا موجب بلااستفاده شدن آن‌ها گردیده است (Hardie, 2020)؛ بنابراین توجه به مسئله دقت و کارایی سنسورهای پایش و کنترل رطوبت خاک در عرصه‌های زراعی و باغی شور امری ضروری و غیرقابل اجتناب خواهد بود.

در زمینه تأثیرگذاری شوری محلول خاک بر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای هوشمند مطالعاتی انجام شده است (رحمانی و قائمی، ۱۳۹۲). در تحقیقی که توسط خورسندی و همکاران (۱۳۹۰) انجام شد، حسگر اندازه‌گیر رطوبت خازن-مینا که می‌تواند رطوبت خاک را به طور پیوسته اندازه‌گیری کند، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. حسگر تحت شرایط ایستا و در خاکی با بافت لوم رسی سیلتی در آزمایشگاه واسنجی گردید. با تحلیل داده‌ها رابطه‌ی درجه دو بین محتوای رطوبت خاک و بسامد خروجی حسگر به دست آمد. خطای حسگر برابر ۱/۵۵ درصد بود و بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و تعیین شده با روش وزنی رابطه خطی و معنی‌داری ( $R^2 = 0.70$ ) وجود داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که

1-Time Domain Reflectometry (TDR)

2-Actively Heated Fiber Optics (AHFO)

3-Radio Frequency Identification (RFID)

اپتیک نیز در درون خاک به شکل مورب و در عمق تقریبی ۱۵ سانتی‌متری نصب گردیدند؛ به طوری که در هر گلدان یک عدد سنسور قرار گرفت. همچنین، برای ایجاد محیط خاک مرطوب و انجام آزمایش‌ها، از چهار تیمار شوری آب آبیاری شامل مقادیر هدایت الکتریکی ۲، ۶، ۱۰ و ۱۶ دسی زیمنس بر متر و هر کدام با چهار تکرار (جمعاً ۱۶ گلدان) استفاده گردید. تیمارهای مذکور از اختلاط دو منبع آبی شور (با شوری تقریبی ۲۵ دسی زیمنس بر متر) و غیر شور (با شوری تقریبی ۱ دسی زیمنس بر متر) ایجاد شده است. ویژگی‌های کاتیونی و آنیونی دو منبع آبی مذکور، به صورت جدول ۱ می‌باشد.

سپس آبیاری هر گلدان توسط آب با شوری‌های موردنظر انجام گردید. قبل از شروع قرائت‌ها، در چندین مرتبه برای حصول تعادل بین شوری آب آبیاری و شوری خاک گلدان‌ها، آبیاری‌ها تکرار شدند. سپس اقدام به شروع قرائت‌ها و ثبت وزن گلدان‌ها شده تا رطوبت وزنی و حجمی خاک در فواصل مختلف زمانی اندازه‌گیری شود. این فرآیند ۲۴ ساعت پس از آبیاری شروع و تا زمان خشک شدن خاک گلدان‌ها ادامه یافت. اندازه‌گیری‌ها در دو بازه زمانی متوالی به منظور تهیه داده‌های آموزش<sup>۲</sup> (برای استخراج مدل مناسب) و داده‌های آزمون<sup>۳</sup> (برای ارزیابی روابط حاصله و تعیین دقت آن‌ها) انجام شد. پس از اتمام اندازه‌گیری‌ها، ابتدا برازش معادلات مناسب بین قرائت‌های سنسور و رطوبت حجمی خاک هر گلدان توسط نرم-افزار Curve Expert انجام گردید و در سطوح مختلف شوری آب آبیاری، روابط بین قرائت‌های سنسور و رطوبت حجمی خاک استخراج گردیدند. سپس دقت هر کدام از این معادلات در برآورد رطوبت حجمی خاک مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. برای این کار از آماره‌های خطا استفاده گردید.

این آماره‌ها شامل میانگین خطای اریب<sup>۴</sup> ( $MBE$ )، ضریب همبستگی پیرسون<sup>۵</sup> ( $r$ )، ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۶</sup> ( $RMSE$ )، مقدار نسبی جذر میانگین مربعات خطا<sup>۷</sup> ( $RRMSE$ )، ضریب نش-ساتکلیف<sup>۸</sup> ( $NSE$ ) بودند که به کمک روابط ذیل محاسبه شدند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Wackerly et al., 2008).

طول موج معین، اقدام به پایش رطوبت خاک می‌نماید. بر اساس مرور منابع موجود، این گروه از حسگرها توسط افرادی نظیر کوماتسو و همکاران (Komatsu et al., 2012)، یئو و همکاران (Yeo et al., 2008)، لئون و همکاران (Leone et al., 2017)، ویدانا و همکاران (Vidana Gamage et al., 2018)، ژوبلزو و همکاران (Zubelzu et al., 2019)، کائو و همکاران (Cao et al., 2018) بنیتز و همکاران (Benítez-Buelga et al., 2014) معرفی و کارایی آن‌ها بررسی شده است. پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی قابلیت‌های آن در شرایط شور انجام شده و با نصب حسگر مذکور در شرایط کنترل شده از نظر رطوبت و شوری خاک، اقدام به ارزیابی و تعیین کارایی آن شده است.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش طی سال ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در آزمایشگاه مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در یزد انجام شد و در آن، اقدام به ارزیابی سنسورهای نوری (اپتیک) اندازه‌گیری رطوبت خاک تحت شرایط مختلف رطوبتی و سطوح مختلف شوری آب آبیاری گردید. حسگرهای نوری مورد استفاده ساخت داخل کشور بوده و اصول کاری آن بر پایه سنجش از نزدیک فعال<sup>۱</sup> می‌باشد که در آن‌ها، پس از تاباندن نور با طول موج معین، بازتابش ساطع شده از خاک را در همان محدوده طیفی اندازه‌گیری می‌کند. حسگرهای موردنظر در این پژوهش شامل یک لوله باریک شیشه‌ای (جاروبگر حسگر رطوبت) به طول ۱۰ سانتی‌متر و دو قطعه استوانه‌ای در طرفین آن می‌باشد که هر قطعه به یک کابل متصل بوده و برای قرائت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این دو قطعه استوانه‌ای بدنه نگهدارنده منبع نوری و دیگری، بدنه نگهدارنده آشکارساز محسوب می‌شوند. در یک طرف این لوله، منبع نوری اقدام به انتشار نور می‌نماید و در طرف دیگر، دستگاه آشکارساز نور ساطع شده از منبع را در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک (بین ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری می‌نماید. ابعاد روزنه آشکارسازی ۲×۲ میلی‌متر مربع می‌باشد. این وسیله دارای قرائت‌گر الکترونیکی برای پردازش و واسنجی اطلاعات آشکارساز و همچنین کابل تغذیه و انتقال داده می‌باشد (شکل ۱).

برای انجام این آزمایش از گلدان‌های پلاستیکی، هر یک با گنجایش تقریبی ۵ کیلوگرم خاک، به عنوان محیط کنترل شده و انجام ارزیابی و واسنجی حسگرها استفاده شده است. قبل از نصب حسگر و پر کردن گلدان‌ها با خاک، نسبت به تعبیه زهکش و ریختن گراول در کف آن‌ها اقدام شد. خاک مورد استفاده دارای بافت متوسط و از نوع لوم شنی (SL) انتخاب گردید. در حین پر کردن گلدان‌ها، سنسورهای

2-Train

3-Test

4- Mean Bias Error

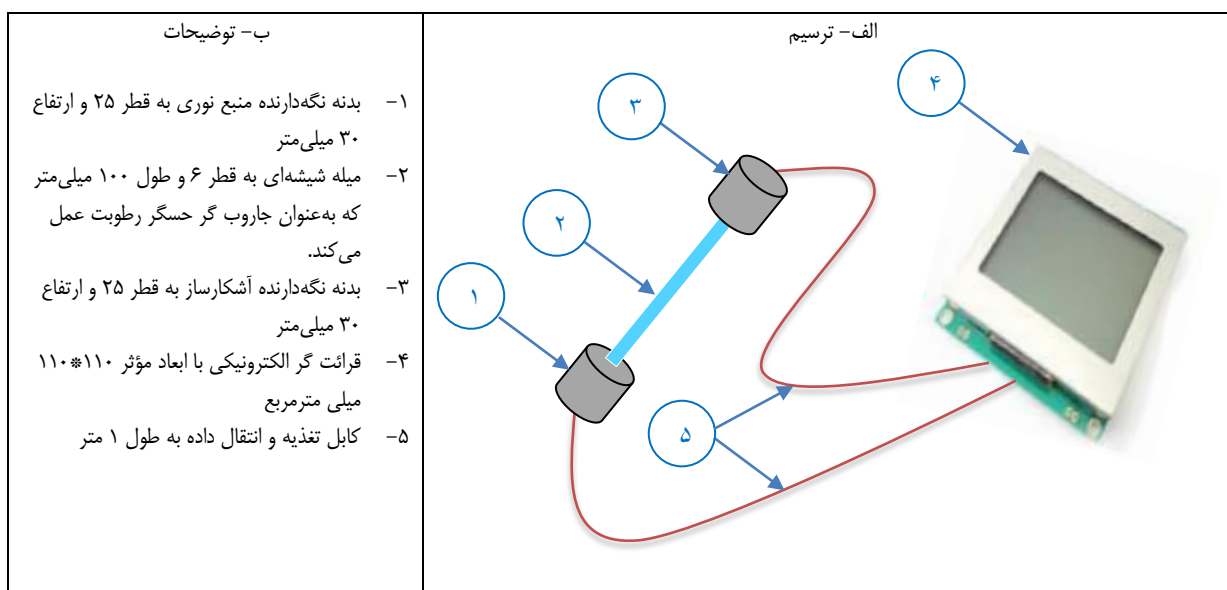
5- Pearson Correlation Coefficient

6-Root Mean Square Error

7-Relative Root Mean Square Error

8-Nash-Sutcliffe Efficiency

1-Active Proximal Sensing



شکل ۱- مشخصات فنی حسگر موردنظر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی منابع آب

| SAR   | کاتیون‌ها و آنیون‌ها (meq.L <sup>-1</sup> ) |                |                 |                  |                  |                 |                               |                               | pH   | EC (dS.m <sup>-1</sup> ) | نام منبع آبی |
|-------|---|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------|--------------------------|--------------|
|       | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>               | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> |      |                          |              |
| ۳/۴۲  | ۱/۴   | ۰/۰۸           | ۵/۷۲            | ۳/۵۵             | ۲/۰۵             | ۶/۵۸            | ۲/۸                           | ۰/۶                           | ۸/۳۵ | ۱                        | آب غیر شور   |
| ۵۱/۵۷ | ۱۹/۵  | ۰/۵۱           | ۲۱۱/۳           | ۴/۰۵             | ۲۹/۵۲            | ۲۲۳/۱۱          | ۲/۷۷                          | ۰                             | ۷/۹۴ | ۲۵                       | آب شور       |

محاسبه هر آماره اشاره شده است.

- ضریب همبستگی پیرسون (r): این عدد بین -۱ تا +۱ بوده و هر چه r به عدد ۱ ± نزدیک‌تر باشد، بیانگر همبستگی بالاتر مقادیر نمایش داده شده رطوبت خاک توسط حسگر (E<sub>i</sub>) با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به روش توزین مستقیم خاک (M<sub>i</sub>) است.

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n \{(M_i - M)(E_i - E)\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (M_i - M)^2 \times \sum_{i=0}^n (E_i - E)^2}} \quad (1)$$

- ضریب تبیین (R<sup>2</sup>): این آماره بین ۰ تا ۱ بوده و هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر همبستگی بالاتر مقادیر نمایش داده شده رطوبت خاک توسط حسگر (E<sub>i</sub>) با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به روش توزین مستقیم خاک (M<sub>i</sub>) است. محاسبه این شاخص بر اساس r صورت می‌گیرد.

$$R^2 = r^2 \quad (2)$$

- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE): دامنه این آماره نیز بین صفر تا بی‌نهایت بوده و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر همبستگی بالاتر مقادیر E و M می‌باشد. این شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شود.

مقادیر *MBE* و *RMSE* بر حسب پارامتر مورد ارزیابی (درصد رطوبت حجمی) و *r* و *RRMSE* به صورت درصد است. با توجه به فرمول تعریف شده برای محاسبه آماره *MBE*، در صورت بیش برآورد پارامتر رطوبت حجمی خاک توسط سنسورهای اپتیک نسبت به رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به روش توزین خاک، این آماره مثبت (+) و در صورت کم برآوردی، این آماره منفی (-) خواهد بود. آماره نش-ساتکلیف (NSE) که بین منفی بی‌نهایت تا یک می‌تواند قرار گیرد، هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد بهتر بوده و معرف بالا بودن دقت رطوبت خاک برآورد شده توسط حسگرها می‌باشد. چنانچه این عدد کمتر از ۰/۶۵ به دست آید، حسگر از دقت کافی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک برخوردار نخواهد بود و غیرقابل قبول محسوب می‌شود. چنانچه ضریب NSE بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ باشد دقت سنسورها قابل قبول بوده، چنانچه بین ۰/۸ تا ۰/۹ خوب و بالاتر از ۰/۹ عالی محسوب می‌شود. همچنین، مقادیر آماره‌های MAE<sup>۱</sup> و MSE<sup>۲</sup> هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، به معنی بالاتر بودن دقت اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک توسط حسگرهای مذکور خواهد بود. در زیر به روش

1- Mean absolute error  
2- Mean squared error

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |E_i - M_i| \quad (۷)$$

- میانگین مجذور خطا (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (E_i - M_i)^2 \quad (۸)$$

در روابط فوق منظور از  $E_i$  مقادیر نمایش داده‌شده رطوبت خاک توسط حسگر و منظور از  $M_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به روش توزین مستقیم خاک هر گلدان است. میانگین این مقادیر به صورت  $E$  و  $M$  نمایش داده‌شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

- مقدار نسبی جذر میانگین مربعات خطا (RRMSE):

$$RRMSE = \frac{RMSE}{M} \times 100 \quad (۴)$$

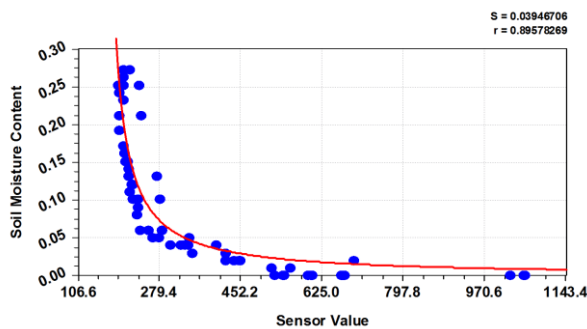
- میانگین خطای اریبی (MBE):

$$MBE = \frac{\sum_{i=0}^n (E_i - M_i)}{n} \quad (۵)$$

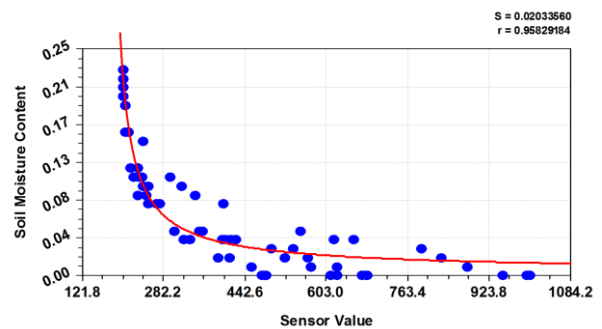
- شاخص کارایی نش - ساتکلیف (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=0}^n (M_i - M)^2} \quad (۶)$$

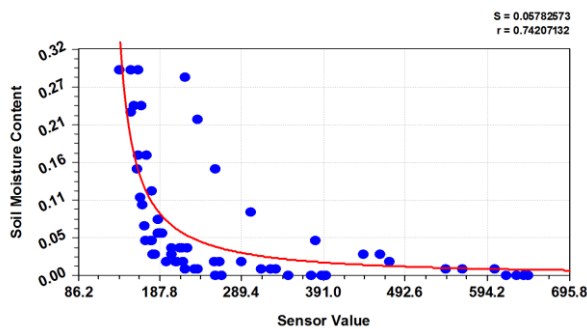
- میانگین قدر مطلق خطا (MAE):



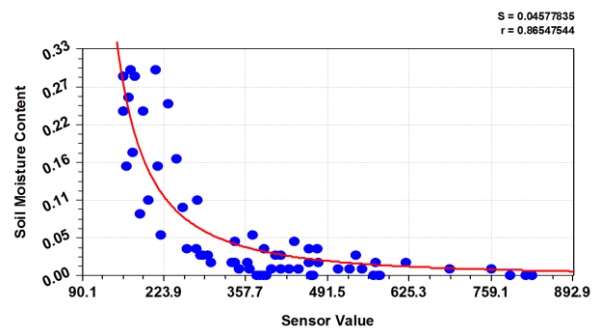
ب- شوری ۶ دسی زمینس بر متر



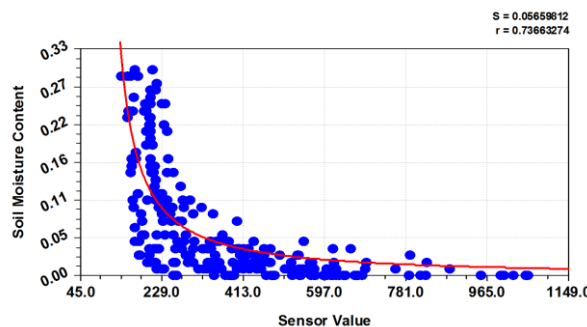
الف- شوری ۲ دسی زمینس بر متر



د- شوری ۱۶ دسی زمینس بر متر



ج- شوری ۱۰ دسی زمینس بر متر



ه- محدوده شوری ۲ تا ۱۶ دسی زمینس بر متر

شکل ۲- برازش مناسب‌ترین معادله بر قرائت‌های انجام‌شده توسط حسگرها به منظور برآورد رطوبت حجمی خاک در شرایط مختلف شوری آب آبیاری

## نتایج و بحث

داده‌های مذکور در تمامی سطوح شوری مورد آزمایش، به صورت معادله ۹ می‌باشد.

$$\theta_v = \frac{1}{(a + bS^c)} \quad (9)$$

در این معادله S عدد قرائت‌شده توسط حسگر،  $\theta_v$  رطوبت حجمی خاک (اعشار) و ضرایب a، b و c ثابت‌های این معادله می‌باشند. در جدول ۲، ضرایب مذکور برای سطوح مختلف شوری و آماره‌های ضریب همبستگی (r) و خطای استاندارد (SE) نیز ارائه گردیده است.

نتایج حاصل از برازش مناسب‌ترین معادله بر قرائت‌های انجام‌شده توسط حسگرها به منظور برآورد رطوبت حجمی خاک در شرایط مختلف شوری آب آبیاری در شکل ۲ نمایش داده شده است. این بخش از پژوهش توسط نرم‌افزار Curve Expert انجام گردید. توسط این نرم‌افزار و بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون (r) و خطای استاندارد (S)، مناسب‌ترین مدل‌هایی که قابل برازش بر داده‌ها بودند، شناسایی و انتخاب گردید.

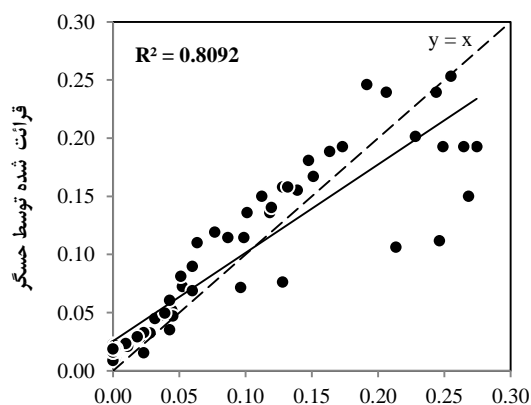
نتایج حاصله نشان داد که شکل عمومی معادله قابل برازش بر

جدول ۲- ضرایب به دست‌آمده برای واسنجی قرائت‌های حسگر مورد مطالعه در سطوح مختلف شوری آب آبیاری

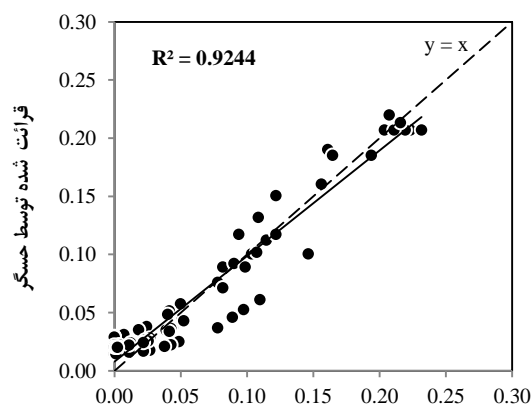
| شوری (دسی زیمنس بر متر) |             |               |             |            | ضریب معادله واسنجی         |
|-------------------------|-------------|---------------|-------------|------------|----------------------------|
| ۲-۱۶                    | ۱۶          | ۱۰            | ۶           | ۲          |                            |
| -۵/۲۸۵۱۱۰۱              | -۱۳/۶۶۶۷۹۶  | -۱/۵۱۸۶۸۲۱    | -۱۵/۶۹۸۶۱۱  | -۶۹/۷۹۳۲۱  | a                          |
| ۰/۰۲۵۰۹۱۰۳              | ۰/۰۲۳۳۱۰۵۴۱ | ۰/۰۰۰۲۵۷۷۰۸۸۵ | ۰/۰۵۸۱۱۹۳۲۷ | ۹/۴۸۳۴۹۶۸  | b                          |
| ۱/۱۸۱۵۰۹۲               | ۱/۳۳۴۴۳۵    | ۱/۹۵۷۲۳۷۲     | ۱/۱۰۴۳۵۹۱   | ۰/۳۸۷۹۷۵۰۸ | c                          |
| ۰/۷۳۷                   | ۰/۷۴۲       | ۰/۸۶۵         | ۰/۸۹۶       | ۰/۹۵۸      | ضریب همبستگی، r            |
| ۰/۵۴۳                   | ۰/۵۵۰       | ۰/۷۴۸         | ۰/۸۰۳       | ۰/۹۱۸      | ضریب تبیین، R <sup>2</sup> |
| ۰/۰۵۶۵۹۸۱               | ۰/۰۵۷۸۲۵۷   | ۰/۰۴۵۷۷۸۳     | ۰/۰۳۹۴۶۷۱   | ۰/۰۲۰۳۳۵۶  | خطای استاندارد، SE         |

شوری مورد نظر، از معادله مربوطه (ضرایب جدول ۲) استفاده و مقادیر قرائت‌شده توسط حسگرها (S) به رطوبت حجمی خاک ( $\theta_v$ ) تبدیل شده‌اند (شکل ۳).

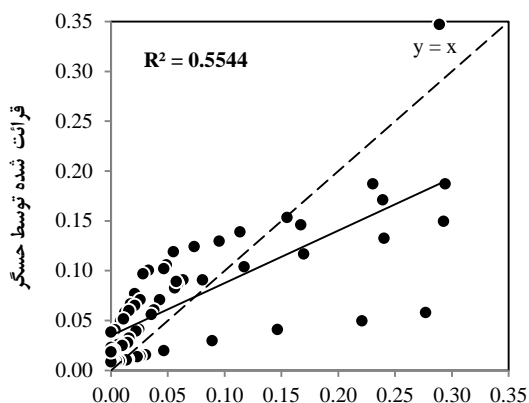
به منظور بررسی دقت هر یک از این معادلات در برآورد رطوبت حجمی خاک، مقایسه‌ای بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش توزین خاک و مقادیر به دست‌آمده از قرائت‌های حسگرها در شرایط مختلف شوری آب آبیاری صورت گرفت. در هر یک از سطوح



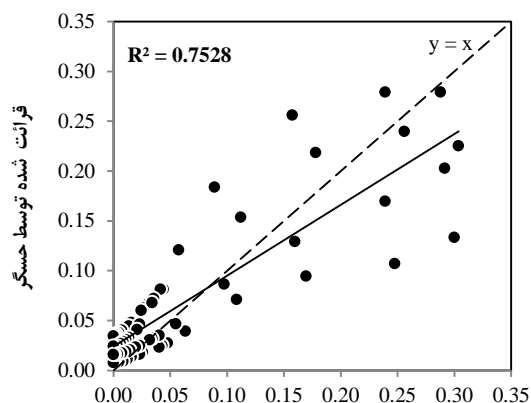
اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی  
ب- شوری ۶ دسی زیمنس بر متر



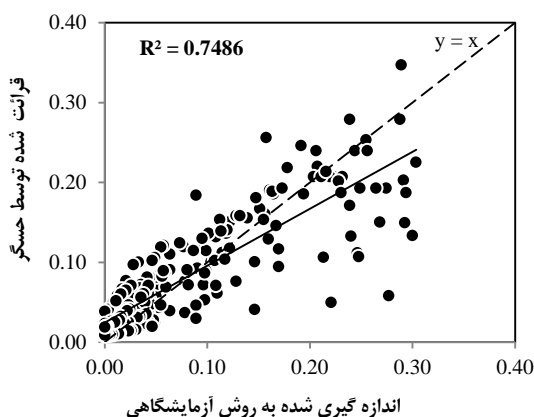
اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی  
الف- شوری ۲ دسی زیمنس بر متر



اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی  
د- شوری ۱۶ دسی زیمنس بر متر



اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی  
ج- شوری ۱۰ دسی زیمنس بر متر



ه- محدوده شوری ۲ تا ۱۶ دسی زیمنس بر متر

شکل ۳- مقایسه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و قرائت‌شده توسط حسگرهای موردنظر در شرایط مختلف شوری آب آبیاری (علامت ستاره در بالای ضرایب تبیین، نشان‌دهنده معنی‌دار بودن همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ است)

جدول ۳- آماره‌های خطا بین مقادیر رطوبت حجمی خاک به‌دست‌آمده در آزمایشگاه با رطوبت‌های قرائت‌شده توسط حسگر در شرایط مختلف شوری آب آبیاری

| آماره             |                      |                          |                    |                                   |                        |                |                     | شوری آب آبیاری<br>dS/m |
|-------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| میانگین مجذور خطا | میانگین قدر مطلق خطا | شاخص کارایی نش - ساتکلیف | میانگین خطای اریبی | مقدار نسبی جذر میانگین مربعات خطا | جذر میانگین مربعات خطا | ضریب تبیین     | ضریب همبستگی پیرسون |                        |
| MSE               | MAE                  | NSE                      | MBE                | RRMSE                             | RMSE                   | R <sup>2</sup> | r                   |                        |
| ۰/۰۰              | ۰/۰۲                 | ۰/۹۲                     | ۰/۰۰               | ۲۶/۱۴                             | ۰/۰۲                   | ۰/۹۲           | ۰/۹۶                | ۲                      |
| ۰/۰۰              | ۰/۰۳                 | ۰/۸۰                     | ۰/۰۰               | ۴۲/۳۰                             | ۰/۰۴                   | ۰/۸۱           | ۰/۹۰                | ۶                      |
| ۰/۰۰              | ۰/۰۳                 | ۰/۷۵                     | ۰/۰۱               | ۶۸/۰۶                             | ۰/۰۴                   | ۰/۷۵           | ۰/۸۷                | ۱۰                     |
| ۰/۰۰              | ۰/۰۴                 | ۰/۵۵                     | ۰/۰۰               | ۸۳/۳۴                             | ۰/۰۶                   | ۰/۵۵           | ۰/۷۴                | ۱۶                     |
| ۰/۰۰              | ۰/۰۳                 | ۰/۷۵                     | ۰/۰۰               | ۵۶/۶۸                             | ۰/۰۴                   | ۰/۷۵           | ۰/۸۷                | ۱۶ تا ۲                |

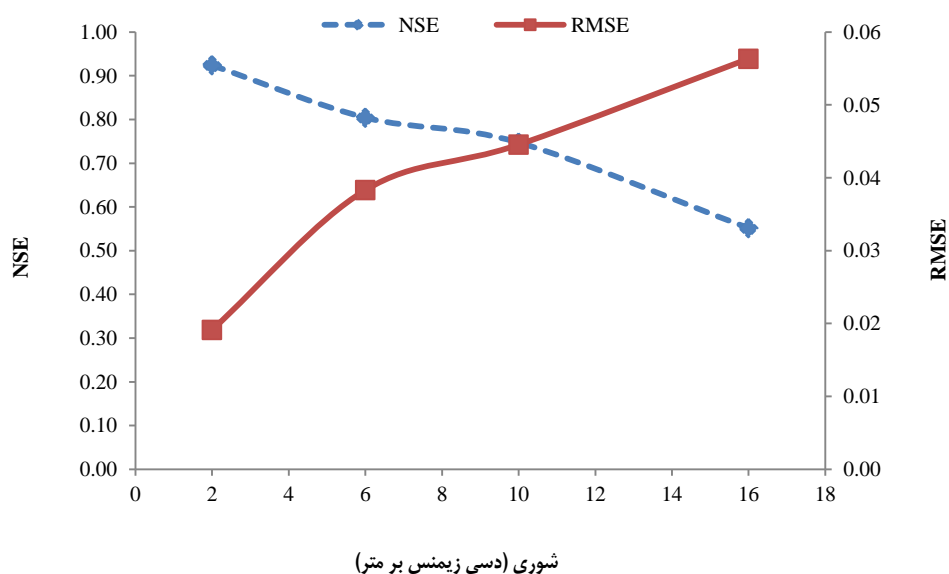
همان طوری که در این جدول ملاحظه می‌شود، بیشترین دقت حسگر مربوط به شوری ۲ دسی زیمنس بر متر بوده که با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) ۰/۹۲، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۲ و ضریب نش

در جدول ۳ آماره‌های خطا بین مقادیر رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با مقادیر رطوبت حاصل از قرائت‌های حسگر در شرایط مختلف شوری آب آبیاری ارائه گردیده است.

شوری بالاتر، قرائت‌ها با خطای بالا و غیرقابل قبول همراه خواهند بود. با توجه به اینکه در شوری‌های بالای آب آبیاری (بالاتر از ۱۰ دسی زیمنس بر متر)، امکان حصول دقت مناسب از معادله مربوطه برای این سطوح شوری وجود ندارد، پیشنهاد می‌گردد که از ضرایب معادله عمومی (ضرایب مربوط به شوری‌های ۲ تا ۱۶ دسی زیمنس بر متر) برای واسنجی قرائت‌های دستگاه و تبدیل آن‌ها به رطوبت حجمی خاک استفاده شود. از دلایل این موضوع، تأثیرپذیری رطوبت خاک از میزان شوری (Kumar et al, 2021)، تأثیرپذیری بازتابش خاک از میزان شوری (Metternicht and Zinck, 2003) و نهایتاً تأثیر شوری بر میزان بازتابش ثبت شده توسط حسگرهای مورد مطالعه می‌باشد.

سانتکلیف (NSE) ۰/۹۲، بالاترین دقت را در بین تیمارهای آزمایشی دارا بوده است. برای سطوح شوری ۶ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر نیز اگرچه دقت سنسورها کاهش یافته، اما خطاهای موجود قابل قبول بوده و این حسگر برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک در شوری‌های مذکور نیز مناسب می‌باشد. در سطح شوری ۱۶ دسی زیمنس بر متر، دقت حسگرها به شدت کاهش یافته و ضریب نش-سانتکلیف (NSE) به مقدار غیرقابل قبول ۰/۵۵ تنزل پیدا کرده است.

روند افزایشی خطا و کاهش دقت حسگرهای مورد مطالعه در اثر افزایش شوری آب آبیاری با توجه به آماره‌های نش-سانتکلیف (NSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، به نظر می‌رسد که دقت این حسگر در محدوده شوری ۲ تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر مناسب بوده ولی در سطوح



شکل ۴- تغییرات آماره‌های نش سانتکلیف (NSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) حسگرهای مورد مطالعه در اثر افزایش شوری آب آبیاری

در مورد تأثیر شوری خاک بر دقت قرائت رطوبت توسط سایر انواع حسگرهای رطوبتی، مطالعات متعددی انجام شده و بر اثرات منفی شوری بر دقت حسگرها تأکید شده است. مثلاً در مورد حسگرهای تی دی آر، شوری خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک می‌شود و در نتیجه آن، زمان برگشت امواج طولانی‌تر شده و باعث افزایش مقدار ضریب دی‌الکتریک در خاک شده و منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه می‌شود (Hook and Livingston, 1996؛ نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰). در مورد سنسورهای رطوبتی ساخته شده بر پایه بلوک گچی نیز نتایج مشابهی حاصل شده است؛ به طوری که با افزایش شوری ممکن است تفاوت معنی‌داری بین منحنی واسنجی اولیه بلوک گچی و منحنی واسنجی برای شرایط شوری محلول خاک

در مورد تأثیر شوری خاک بر دقت قرائت رطوبت توسط سایر انواع حسگرهای رطوبتی، مطالعات متعددی انجام شده و بر اثرات منفی شوری بر دقت حسگرها تأکید شده است. مثلاً در مورد حسگرهای تی دی آر، شوری خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک می‌شود و در نتیجه آن، زمان برگشت امواج طولانی‌تر شده و باعث افزایش مقدار ضریب دی‌الکتریک در خاک شده و منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه می‌شود (Hook and Livingston, 1996؛ نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰). برخی دیگر از مطالعات انجام شده در زمینه کارایی



انصاری. ج. و حسن‌پور، م. ۱۳۹۴. طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری داده‌های محیطی خاک به‌ویژه رطوبت. دما و شوری با نام تجاری REC-P55. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۹ (۱). ۳۲ - ۴۳

برادران مطیع، ج.، آق‌خانی، م. ح.، عباس‌پور فرد، م. ح. و لکزبان، ا. ۱۳۸۹. تعیین هدایت الکتریکی ظاهری خاک به روش تماس مستقیم. آب و خاک. ۲۴ (۵). ۹۶۵ - ۹۵۵.

بلابادی، ح.، افراسیاب، پ.، دلبری، م. و قائدی، س. ۱۳۹۶. تأثیر بافت خاک و شوری و نسبت جذب سدیم آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌وسیله‌ی دستگاه تترابروم. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰ (۴). ۳۰-۱۷.

خورشیدی، آ.، همت، ع.، معصومی، ا. ا. و امیرفتاحی، ر. ۱۳۹۰. طراحی، ساخت و ارزیابی حسگر خازنی اندازه‌گیر پیوسته رطوبت خاک به‌صورت بلادرنگ. مهندسی بیوسیستم ایران (علوم کشاورزی ایران). ۴۲ (۱). ۷-۱.

رحمانی ثقیه، ج.، قائمی ع. ا. ۱۳۹۲. اثر شوری بر کاربرد حسگرهای هوشمند در تعیین رطوبت خاک. مدیریت آب و آبیاری. دوره ۳، ش ۲، صص. ۱۴۶-۱۳۵.

رحیمیان، م. ح.، دهقانی، ف. و هاشمی‌نژاد، ی. ۱۳۹۷. نگاه تحلیلی به کیفیت (شوری) منابع آب مورد استفاده در بخش کشاورزی، گزارش علمی مرکز ملی تحقیقات شوری. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ص. ۲۰ (منتشر نشده).

سالاری، ا.، هوشمند، ع. ر. و برومند نسب، س. ۱۳۸۷. بررسی اثر شوری بر واسنجی دستگاه TDR در مکش‌های مختلف خاک. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. اهواز. ایران.

قهرمان، ب.، داوری، ک.، آستارایی، ع. ر.، مجیدی، م. و تمسکی، س. ۱۳۸۸. امکان تصحیح اثرات شوری بر قرائت بلوک گچی در اندازه‌گیری رطوبت خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳ (۱). ۷۸-۶۹.

مهاجران، م.، گلزاریان، م. ر.، خجسته پور، م. و آق‌خانی، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات در محتوای رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی ظاهری به روش القای الکترومغناطیسی. دهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران.

نامدار خجسته، د.، شرفا، م. و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۹۰. تأثیر میزان رس و مینرالوژی بر ضریب دی‌الکتریک خاک برای اندازه‌گیری میزان رطوبت حجمی خاک با TDR. پژوهش‌های حفاظت آب و

مزرعه ایجاد شود (قهرمان و همکاران، ۱۳۸۸). حتی عنوان گردیده که اگر شوری آب آبیاری از ۲ هزار قسمت در میلیون و یا شوری محلول خاک از ۶ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر شود، خطاها در قرائت رطوبت توسط بلوک گچی افزایش می‌یابد (Eldredge et al, 1993, Goodwin, 2000).

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش که به ارزیابی حسگرهای نوری اندازه‌گیری رطوبت خاک تحت شرایط مختلف از نظر شوری آب آبیاری پرداخته است، نشان داد که بیشترین دقت حسگر مذکور در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر اتفاق افتاده است. ضریب تبیین ( $R^2$ ) ۰/۹۲، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۲ و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) ۰/۹۲، نشان‌دهنده دقت بالای این حسگر در این تیمار نسبت به سایر تیمارهای آزمایش است. برای سطوح شوری ۶ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر نیز اگرچه دقت سنسورها نسبت به تیمار قبلی کاهش یافته، اما می‌توان از خطاهای موجود چشم‌پوشی کرد و این حسگر را برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک در شوری‌های مذکور مناسب دانست؛ اما در سطح شوری ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر، دقت حسگر به‌شدت کاهش یافته و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) به مقدار غیرقابل قبول ۰/۵۵ تنزل پیدا کرده است. بنابراین، با توجه به نتایج کسب‌شده از این پژوهش، حسگر مذکور برای پایش رطوبت خاک‌هایی که با شوری‌های کمتر از ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری می‌شوند، قابل توصیه بوده و کارایی لازم برای برنامه‌ریزی‌های آبیاری را دارد؛ اما در سطوح شوری بالاتر، به دلیل خطای بالا در قرائت رطوبت خاک، اعداد حاصله قابل اعتماد و کاربردی نخواهد بود. همچنین، انجام تحقیقات بیشتر بر روی این سنسور به‌ویژه در شوری‌های بالاتر، در بافت‌های متفاوت خاک و در شرایط مختلف مزرعه‌ای از موارد پیشنهادی برای تداوم این پژوهش در آینده و کاربردی‌تر شدن این حسگر در عرصه‌های کشاورزی می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت دانش‌بنیان پرتو الکترونیک پیشگام کویر به دلیل ارائه سنسور اپتیکی موردنظر به مرکز ملی تحقیقات شوری برای انجام پژوهش و ارزیابی کارایی آن در شرایط شور تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

احمدی، س. ع. ا.، نصیری، پ.، صالحی ع. و یارمحمدی، م. ۱۳۹۹. تحلیل آماری. انتشارات دانشگاه پیام نور. ۲۸۸ ص.

- optical fiber technique (Joint research). The Japan Atomic Energy Agency. Pp. 94.
- Kumar, S., Sonkar, I., Gupta, V., Prasad K.S.H. and Ojha, C.S.P. 2021. Effect of Salinity on Moisture Flow and Root Water Uptake in Sandy Loam Soil. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 25 (3). 1-191.
- Leone, M., Consales, M., Principe, S., Parente, R., Laudati, A., Caliro, S., Cutolo, A. and Cusano, A. 2017. Fiber Optic Thermo-Hygrometers for Soil Moisture Monitoring. *Sensors*. 17 (6): 1451.
- Metternicht, G. I. and Zinck, J. A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Review article. *Remote sensing of environment*. 85(1): 1-1-2020. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8)
- Vidana Gamage, D.N., Biswas, A., Strachan, I.B. and Adamchuk, V.I. 2018. Soil water measurement using actively heated fiber optics at field scale. *Sensors*, 18 (4): 1116.
- Wackerly, D., Mendenhall, W. and Scheaffer, R. L. 2008. *Mathematical Statistics with Applications* (7 Ed.). Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education. ISBN 0-495-38508-5.
- Yeo, T.L., Sun, T. and Grattan, K.T.V. 2008. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*. 144(2), 280-295.
- Zubelzu, S., Rodriguez-Sinobas, L., Saa-Requejo, A., Benitez, J., Tarquis, A.M. 2019. Assessing soil water content variability through active heat distributed fiber optic temperature sensing. *Agricultural Water Management*. 212, 193-202.
- Benítez-Buelga, J., Sayde, C., Rodríguez-Sinobas, L. and Selker, J.S. 2014. Heated fiber optic distributed temperature sensing: A dual-probe heat-pulse approach. *Vadose Zone Journal*. 13.
- Cao, D.F., Shi, B., Wei, G.Q., Chen, S.E. and Zhu, H.H. 2018. An improved distributed sensing method for monitoring soil moisture profile using heated carbon fibers. *Measurement*. 123: 175-184.
- Cao, D.F., Shi, B., Zhu, H.H., Inyang, H.I., Wei, G.Q. and Duan, C.Z. 2018. A soil moisture estimation method using actively heated fiber Bragg grating sensors. *Engineering geology*. 242: 142-149.
- Eldredge, E. P., Shock, C. C. and Stieber, T. D. 1993. Calibration of granular matrix sensors for irrigation management. *Agronomy Journal*. 85(6): 1228-1232.
- George, B. H. 2006. Comparison of techniques for measuring the water content of soil and other porous media. Department of agricultural chemistry and soil science. University of Sydney. Australia.
- Goodwin, I. T. 2000. Gypsum blocks for measuring the dryness of soil. *Agriculture notes*. AG0294.
- Hardie, M. 2020. Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture. *Sensors*. 20, 6934.
- Hook, W. R. and Livingston, N. J. 1996. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*. 60(1): 35-41.
- Komatsu, M., Nishigaki, M., Seno, Sh., Toida, M., Hirata, Y., Takenobu, K., Tagishi, H., Nakano, K., Kunimaru, T., Maekawa, K. and Yamamoto, Y. 2012. Developing the soil moisture sensor using

## Performance of Optical Sensors for Soil Water Content Measurement under Salinity of Irrigation Water Conditions

M.H. Rahimian<sup>1\*</sup>, S.S. Azadfar<sup>2</sup>, F. Dehqani<sup>3</sup>, H. Gholami<sup>4</sup> and H. Beyrami<sup>5</sup>

Received: May.15, 2021

Accepted: Oct.09, 2021

### Abstract:

The use of appropriate and reliable soil moisture sensors can greatly help the process of soil moisture monitoring and irrigation scheduling. The purpose of this study is to evaluate optical sensors for measurement of soil moisture under different conditions of irrigation water salinities. These sensors are based on the active proximal sensing techniques in which measure the reflections emitted by the objects in a specific range of the wavelength (300-1100 nm). In this study, four irrigation water salinity treatments (2, 6, 10 and 16 dS.m<sup>-1</sup>) were applied to the soil columns (or Lysimeters). Each Lysimeter have been equipped with an optical sensor, connected to a data logger and monitoring screen. Simultaneously, gravimetric and volumetric soil moisture of the Lysimeters have been measured to calibrate the readings of these sensors and to estimate the accuracy of calibration equations. The results showed that the highest accuracy of the sensors occurred at the salinity level of 2 dS.m<sup>-1</sup>, where the coefficients of R<sup>2</sup>, RMSE and NSE were to around 0.92, 0.02 and 0.92, respectively. In addition, declines in the accuracy of the sensors were observed for the salinities of 6 and 10 dS.m<sup>-1</sup>, but were in the acceptable range. While, for the salinity level of 16 dS.m<sup>-1</sup>, the accuracy of the sensors was drastically decreased and the NSE reduced to the unacceptable value of 0.55. According to the results of this study, these optical sensors can be confidently recommended for measurement of soil moisture and irrigation scheduling for salinities of less than 10 dS.m<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Calibration, Salinity, Sensor, Volumetric soil moisture

- 
- 1- Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
  - 2- National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
  - 3- Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
  - 4- PhD student of Irrigation and Drainage Engineering, Isfahan University of technology, Isfahan, Iran
  - 5- Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
- (\* - Corresponding Author Email: mbrahimian@gmail.com)