

مقاله علمی-پژوهشی

ساخت و ارزیابی حسگرهای پایش رطوبت خاک مبتنی بر سازه‌های الیافی

مریم نوابیان^{۱*}، مصطفی جمشیدی اوانکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

چکیده

کمبود منابع آب در پی خشکسالی‌ها و مدیریت نادرست مصرف آب، توجه به ارائه راهکارهای موثر در افزایش بهره‌وری آب به‌ویژه در بخش کشاورزی را بیش از پیش ضروری ساخته است. یکی از مهمترین راهکارها در این خصوص استفاده از سامانه‌های پایش رطوبت خاک است. در این گونه سامانه‌ها، راندمان عملکرد حسگرهای رطوبتی مورد استفاده در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش حسگرهای رطوبتی مبتنی بر سازه‌های الیافی شیشه در سال ۱۳۹۹ طراحی و ساخته شدند و عملکرد آن‌ها در ۱۰ بافت مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور حسگرها به شکل بلوک‌های متخلخل حاوی چهار نوع ساختمان بافت مختلف از الیاف شیشه به عنوان غشاء (P200، T281، P296 و P186) طراحی شدند. نتایج بررسی‌های آماری نشان داد ترتیب دقت حسگرها در برآورد رطوبت خاک، P200، T296، P281 و P186 است. بر اساس شاخص RMSE حسگر مجهز به غشاء P200 و P186 به ترتیب با خطای ۰/۰۵ و ۰/۰۶۵ کمترین و بالاترین دقت را در برآورد رطوبت داشتند. همچنین بررسی عملکرد حسگرهای طراحی شده در ۱۰ بافت خاک نشان داد، بالاترین دقت اندازه‌گیری در خاک‌های با بافت متوسط به سمت سبک است. به طوری که در حسگر P200 بافت خاک Sandy loam با nRMSE برابر ۰/۰۰۴، حسگر P186 بافت خاک Loam و Sandy Loam با nRMSE برابر ۰/۰۹۹-۰/۰۹۷، حسگر P296 بافت خاک Loam با nRMSE برابر ۰/۰۷۱ و حسگر T281 بافت خاک Silty Loam با nRMSE برابر ۰/۰۷ بالاترین دقت را داشتند. نتایج نشان داد که نوع غشاء بر کارایی حسگر موثر بوده و انتخاب غشاء بسته به بافت خاک پیشنهاد می‌شود. به غیر از غشاء P186، سایر غشاءها از دقت قابل قبول برخوردار بوده و هزینه کم، قابلیت ذخیره و ارسال داده‌های رطوبتی خاک به سامانه‌های پردازشی، استفاده از آن‌ها را در سامانه آبیاری هوشمند توصیه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، حسگر رطوبتی، رطوبت خاک، سازه‌های الیافی، سامانه‌های پایش رطوبت

مقدمه

مورد کشت و در نتیجه نیاز به استفاده از آبیاری در کشاورزی کشور، افزایش راندمان سیستم‌های آبیاری از طریق تعیین مقدار و زمان آبیاری می‌تواند تاثیر بسزایی در دستیابی به هدف داشته باشد. امید و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که بهبود راندمان آبیاری در دو منطقه درودزن و کربال استان فارس، به ترتیب منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۱۱/۲ و ۱۰/۸ درصد خواهد شد. در آمریکا نیز گزارش شده است که بهبود ۳۰-۶ درصدی در راندمان سامانه آبیاری می‌تواند کاهش ۱۱-۶ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی را به دنبال داشته باشد (Wang, 2019). اندازه‌گیری پیوسته و به روز رطوبت خاک از طریق تعیین زمان و مقدار بهینه آب آبیاری، نقش موثری در برنامه‌ریزی آبیاری دارد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد اما غالب آن‌ها گران قیمت و دارای محدودیت در قرائت عمق و تعداد نقاط و همچنین مضر برای سلامت انسان می‌باشند.

روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت آب خاک شامل روش

بحران آب پیش‌رو و نیاز به تولید مواد غذایی در حال حاضر و تضمین امکان تولید آن برای آیندگان ضرورت نیاز به برنامه‌ریزی اصولی استفاده از منابع آب را نشان می‌دهد. مطابق با گزارش فائو (۲۰۱۷) در قرن اخیر افزایش مصرف آب رشد ۱/۷ برابری نسبت به رشد جمعیت داشته است. این گزارش تاکید می‌کند برای فائق آمدن بر نیاز مواد غذایی در سال ۲۰۵۰، باید تولیدات کشاورزی ۶۰ درصد نسبت به تولید سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۵ بیشتر شود. با توجه به نقش کلیدی آب در عملکرد محصول، عدم تناسب باران با نیاز آبی گیاهان

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته گروه آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۲- استادیار مهندسی سازه‌های الیافی دانشکده فنی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: Navabian@guilan.ac.ir)

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد هر چه فاصله بین الکترودها بیشتر باشد عدد مقاومت خوانده شده مربوط به حجم بیشتری از بلوک است و اندازه‌گیری دقیق‌تری انجام می‌شود البته افزایش دقت ایجاد شده، معنی‌دار به دست نیامد. اسماعیلی‌زاده و نیشابوری (۱۳۸۰) توانستند با ارتقاء طراحی و ساخت بلوک‌های گچی با استفاده از افزایش الکترو، کارگذاری تصحیح کننده دما و افزایش بازه مقاومت‌سنجی بلوک، محدوده و دقت قرائت رطوبت خاک را افزایش دهند. قائمی و رحمانی ثقیه (۱۳۹۳) عملکرد چهار حسگر هوشمند شامل Watermark 200ss، Watermark، ICS 9001، ICS 9101، 200ss-v و بلوک‌های گچی به عنوان یک روش سریع را با چند روش متداول تعیین رطوبت خاک شامل روش وزنی، تانسیمتری، نوترون‌متر در روش آبیاری میکرو مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تمام حسگرهای هوشمند به‌جز حسگر ICS 9101 رطوبت خاک را به خوبی تخمین زدند. نتایج این پژوهش نشان داد تانسیمتر و حسگرهای Watermark 200ss و Watermark 200ss-v در مکش‌های بالا نسبت به مکش‌های پایین اندازه‌گیری دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک را نشان می‌دهند. انصاری و حسن‌پور (۱۳۹۴) کاربرد دستگاه REC-P را که بر اساس بلوک گچی ساخته بودند، مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که این بلوک دارای دقت ۰/۰۵ درصد و صحت ۰/۵ درصد رطوبت در خاک‌های با بافت متفاوت و نیز در اعماق مختلف بود. به طوری که مقایسه رطوبت ثبت شده توسط دستگاه و روش وزنی دارای همبستگی حدود ۹۹ درصد بود.

چاو و همکاران آزمایشی بر روی نه حسگر در یک خاک لوم شنی در مرکز تحقیقات گوجه‌فرنگی کانادا انجام دادند و داده‌های به‌دست آمده از این حسگرها را با روش وزنی مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد بین حسگرها از نظر دقت اختلاف معنی‌داری وجود دارد (Chow et al., 2009). کاردناس و دوکس چند حسگر رطوبتی خاک را از نظر دقت اندازه‌گیری تحت شرایط ECH2O میدانی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این مقایسه همبستگی معنی‌داری را بین داده‌های به دست آمده از حسگرهای رطوبتی خاک ECH2O نشان داد (Cardenas & Dukes, 2009). در یک آزمایشگاه با انجام آزمایشاتی توانایی چند حسگر از نظر دقت با اندازه‌گیری‌های مکرر در طول زمان و با رژیم‌های رطوبتی مختلف بعد از کالیبراسیون اولیه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست آمده تفاوت‌های معنی‌داری را در عملکرد حسگرها نشان داد (Boutraa et al., 2011). بایی و همکاران نشان دادند که اگرچه خصوصیات فیزیکی بلوک متخلخل بر هدایت الکتریکی تأثیرگذار است اما خصوصیات خاک شامل درصد تراکم خاک (جرم مخصوص ظاهری) و تعداد تر و خشک شدن خاک نیز بر روند مقادیر هدایت الکتریکی موثر است به طوری که با افزایش تراکم خاک، دقت بلوک افزایش یافته و بعد از چهار مرحله خشک و

پخش نوترونی (Charlesworth, 2005)، تانسیمتری (Prichard et al., 2004)، بلوک‌های گچی (McCann et al., 1992; Spaans and Baker, 1992)، حسگرهای با دانه‌بندی متخلخل (Leib, 2002; Leib et al., 1998) و روش وزنی (Campbell and Mulla, 1990; Gardnerr, 1986) می‌باشند. این روش‌ها از دیدگاه دقت، سهولت، زحمت انجام کار، خطر سلامتی و قیمت با یکدیگر متفاوت می‌باشند. از میان روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت، استفاده از حسگرهای رطوبتی در صورت دارا بودن دقت مطلوب به دلیل هزینه کمتر و قابلیت نصب آسان توصیه می‌شود (قنادزاده و همکاران، ۱۳۸۷).

یزدانی کچویی (۱۳۷۵) برخی روش‌های غیرمستقیم تعیین رطوبت خاک در مزرعه از جمله روش‌های نوترون‌متر، بلوک‌های گچی، تانسیمتری و روش جدید الکترومغناطیسی (TDR) را با روش مستقیم وزنی (شاخص معتبر) در مزرعه‌ای با بافت تقریباً یکنواخت مورد مقایسه قرار دادند. مقایسه نتایج میانگین‌ها نشان داد که روش‌های TDR و نوترون‌متر (به ترتیب با ۰/۲۴ و ۰/۵ درصد حجمی اختلاف رطوبت نسبت به روش وزنی) در مقایسه با روش بلوک‌های گچی (با حدود ۲ درصد حجمی اختلاف رطوبت نسبت به روش وزنی) نتایج بهتری داشته‌اند. در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که برای اکثر کاربردهای مزرعه‌ای همه روش‌های مورد آزمایش نتایج تقریباً قابل قبول داشته‌اند و بسته به میزان حدود رطوبت می‌توان از هر یک از روش‌های آزمایش شده استفاده کرد اگر چه در مجموع، روش TDR نسبت به سایر روش‌ها بدلیل میزان ضریب همبستگی بالاتر و نتایج قابل قبول‌تر ارجح تلقی شد. اما در روش TDR رطوبت قرائت شده معرف میانگین رطوبت از سطح خاک تا عمق معادل طول سیم است و در بافت خاک سبک و دارای قلوه سنگ امکان نصب و دریافت نتایج دقیق مقدور نیست. در پژوهشی دقت یک حسگر ساخته شده (Arduino board)، تانسیمتر و بلوک گچی با روش وزنی اندازه‌گیری رطوبت خاک مورد مقایسه قرار گرفت (Ezekiel et al., 2021). نتایج نشان داد که میانگین اختلاف میان روش وزنی با روش‌های بلوک گچی، تانسیمتر و حسگر طراحی شده به ترتیب ۳/۹۵، ۳/۰۲ و ۳/۰۲ درصد بود. در پژوهشی بلوک گچی کوچک مقیاس بر اساس اصلاحیه دمای خاک ساخته و دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک آن‌ها با روش وزنی مورد مقایسه قرار گرفت (Keyhani, 2001). نتایج نشان داد که تفاوت اندازه‌گیری بین این دو روش متأثر از عمق کارگذاری بلوک در خاک از ۶/۵ تا ۲/۴ درصد متغیر است و با افزایش عمق کارگذاری از میزان خطا کاسته شد. قنادزاده و همکاران (۱۳۸۷) ساختمان مختلف بلوک گچی شامل گچ کشته، گچ نیمه کشته، معمولی و ترکیبی از گچ و سیمان را برای تعیین رطوبت خاک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد بلوک گچی از جنس گچ و سیمان در بافت خاک لوم رسی از دقت بالاتری

رسانایی جریان برق، رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌نمایند. بلوک متخلخل طراحی شده (در سال ۱۳۹۹ در دانشگاه گیلان) شامل دو الکتروود پیچیده شده با ۱۰ سانتی‌متر غشاء مورد نظر و جاسازی شده در قالب مشبک مکعبی به ابعاد ۳ * ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر است (شکل ۱). نظر بر این‌که ساختمان بافت غشاء بر عملکرد بلوک تاثیرگذار است، از این رو چهار نوع ساختمان بافت مختلف از غشاء شیشه‌ای موجود در ایران مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۱) مشخصات غشاء‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. کدگذاری هر یک از بلوک‌ها بر اساس ساختمان بافت (P و T) و وزن واحد سطح صورت گرفت (۱۸۶، ۲۰۰، ۲۸۱ و ۲۹۶). تراکم بافت عبارت است از تعداد نخ‌های تار یا پود در واحد طول که معمولاً به صورت تعداد در ۱۰ سانتی‌متر در جهات تار یا پود بیان می‌شود. تعداد نخ تار در عرض غشاء، تراکم عرضی و تعداد نخ پود در طول غشاء، تراکم طولی است که می‌تواند بر خصوصیات غشاء تاثیرگذار باشد. تراکم طولی و عرضی غشاء‌های مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. صعود کاپیلاری در غشاء‌ها با آزمایش فیتیله‌ای اندازه‌گیری شد. در این آزمایش طول ۱۵ سانتی‌متری از هر غشاء انتخاب و داخل محلول رنگی (ERIONYL BRILLIANT BLUE RL 200%) نگه‌داشته شد. سپس روند صعود محلول رنگی در هر یک از غشاءها با گذشت زمان ثبت شد.

برای ارزیابی بلوک‌های ساخته شده، ۱۰ نمونه بافت خاک مختلف انتخاب و دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط بلوک‌ها در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در این راستا با استفاده از گزارش‌های موجود، مکان‌های دارای بافت خاک مشخص در اطراف شهرستان رشت انتخاب و برای نمونه‌برداری از آن نقاط اقدام شد. تعداد نقاط انتخاب شده بیشتر از ۱۰ نقطه بود تا بتوان پس از انجام آزمایش و اطمینان از بافت خاک آن، از آن خاک استفاده نمود. شکل (۲) موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. در این شکل نقاط آبی رنگ، نقاط نمونه‌برداری را مشخص می‌کند. با توجه به بافت خاک‌های به دست آمده، بلوک‌ها در ۱۰ بافت خاک Sandy، Loam، Loamy Sand، Silty Clay Loam، Clay Loam، Sandy، Silty Clay Loam، Clay Loam مورد بررسی قرار گرفتند.

تر شدن خاک تغییرات هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد (Bai et al., 2013). آجایی و همکاران طی آزمایشی بر روی ابعاد بلوک‌های گچی نشان دادند که ابعاد بلوک بر روی دقت آن تاثیرگذار است و بهترین ابعاد بلوک از میان سه تیپ مورد استفاده، ابعاد ۵/۵ (طول)، ۳/۷۵ (عرض) و ۲ (ضخامت) سانتی‌متر بود (Ajayi et al., 2019). مروج‌الاحکامی و باغشاهی (۱۳۹۹) یک حسگر بلوک گچی طراحی و دقت برآورد رطوبت خاک را با حسگر شرکت watermark در بافت‌های خاک لوم رسی شنی، لومی و رس سیلتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که حسگر watermark در بافت خاک لومی و لوم رسی شنی قادر به برآورد نسبتاً دقیق رطوبت وزنی خاک هستند. در حالی‌که در بافت خاک رس سیلتی هر دو حسگر دقت مناسبی در برآورد رطوبت خاک نداشتند. بر اساس نتایج هر دو حسگر در در رطوبت‌های کمتر از ۵۰ درصد کل آب قابل دسترس قادر به تخمین نسبتاً دقیق رطوبت خاک بودند و در رطوبت‌های بالاتر از ظرفیت زراعی دقت خوبی نداشتند. عزیز و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که تانسئومتر و بلوک گچی توانستند در اعماق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری خاک با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۸ برای تانسئومتر و ۰/۸۲ و ۰/۹۵ برای بلوک گچی، رطوبت خاک را برآورد نمایند. استفاده از این دو روش به ترتیب صرفه‌جویی ۱۷ و ۶ درصد را در سال زراعی ۲۰۱۸ در باغ زیتون به همراه داشت (Aziz et al., 2022).

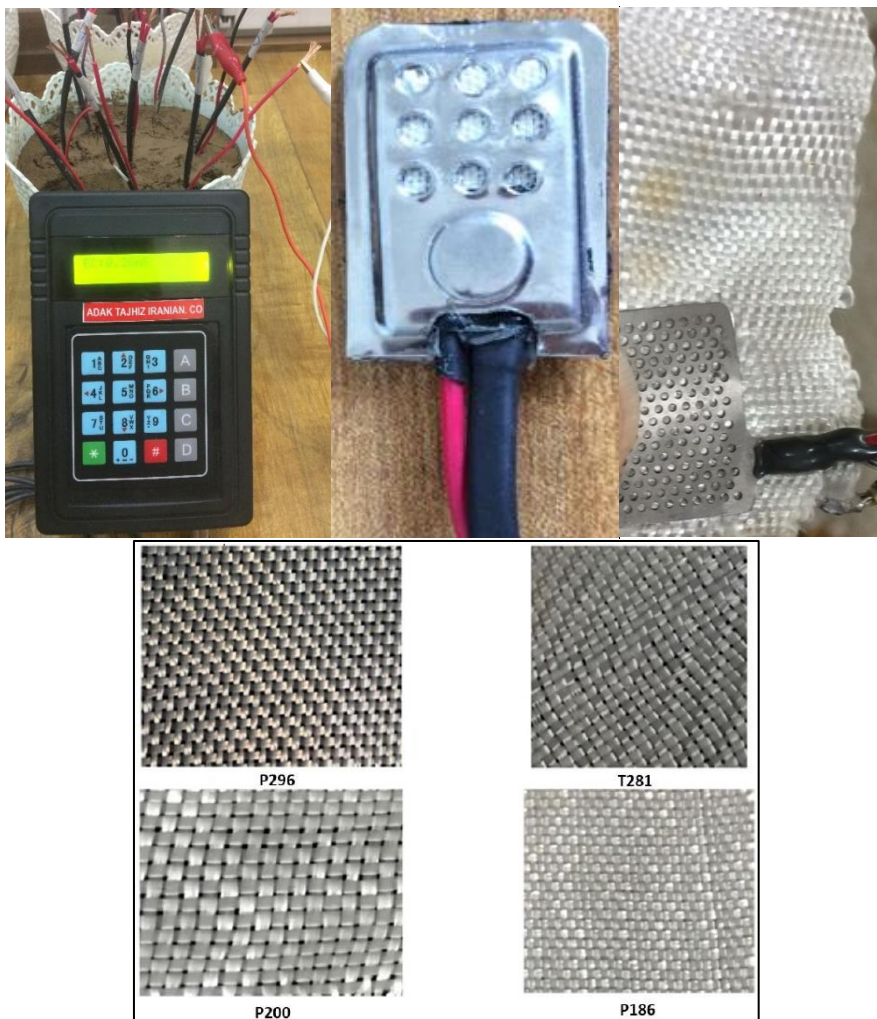
بررسی مطالعات پیشین نشان داد که بلوک‌های متخلخل نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری، نتایج قابل قبولی در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارند اگرچه بلوک‌های از جنس گچ محدودیت‌هایی مانند اثرپذیری از کیفیت خاک و گذر زمان دارد (Ganjegunte et al., 2012). سهولت کاربرد و هزینه کم بلوک‌های متخلخل، دلایل مهم در توصیه به توسعه دانش ساخت بلوک‌های متخلخل هستند. از آن‌جا که بلوک‌های مبتنی بر غشاء مانند بلوک‌های فایبرگلاس در ایران در دسترس نیستند، در این پژوهش ارتقاء دانش فنی ساخت حسگرهای رطوبتی بلوک متخلخل مبتنی بر سازه‌های الیافی (غشاء) برای دستیابی به حسگر با دقت و طول عمر بیشتر مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

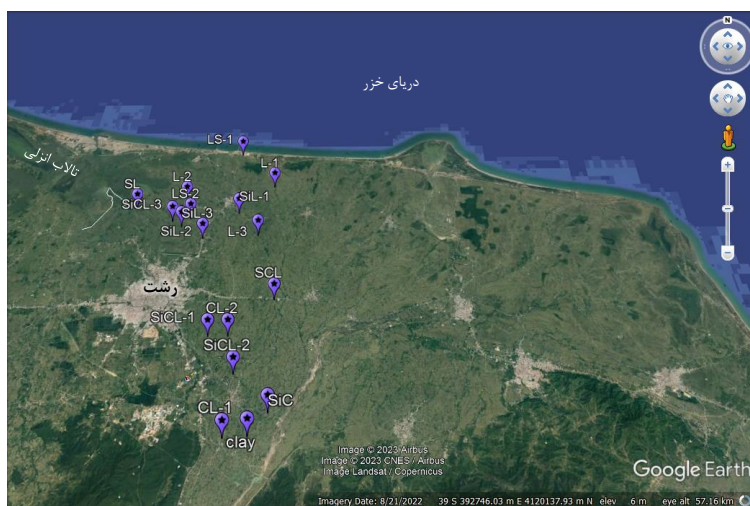
بلوک‌های متخلخل حسگرهای تخصصی هستند که بر اساس

جدول ۱- برخی ویژگی‌های مهم غشاءهای مورد بررسی

ردیف	کد نمونه	نوع الیاف	ساختمان بافت	تراکم طولی (1/cm)	تراکم عرضی (1/cm)	وزن واحد سطح (g/m ²)
۱	T281		Twil2/2	۶	۶	۲۸۱
۲	P296	شیشه	Plain	۶	۶	۲۹۶
۳	P200		Plain	۸	۸	۲۰۰
۴	P186		Plain	۲۰	۲۴	۱۸۶



شکل ۱- شمایی از غشاء و الکتروود (سمت راست)، بلوک متخلخل (وسط) و رسانایی سنج (سمت چپ) طراحی شده و چهار ساختمان بافت غشاء مورد استفاده



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه برداری برای تهیه بافت خاک مشخص

$$D-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

که در این روابط P_i مقادیر تخمین زده شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. به منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که هرچه این شاخص کم‌تر باشد بیان‌گر شبیه‌سازی بهتر مدل است (Savage, 1993). جامیسون و همکاران روشی را برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که در آن میانگین مربعات خطا به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات است که با nRMSE نمایش داده می‌شود (Jaemison et al., 1991). زمانی که این پارامتر در محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده کارایی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌گر کارایی بسیار خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بیان‌کننده کارایی متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده ضعیف بودن توانایی مدل در شبیه‌سازی است. این محدوده‌ها در بررسی‌هایی که بنایان و هوگنبوم (Bannayan and Hoogenboom, 2009). شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) براساس اندازه پراکندگی بین داده‌ها می‌باشد. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که مقدار یک بیان‌گر بهترین برازش و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد (Willmott, 1982). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد و هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

نتایج و بحث

رفتار فیتیله‌ای غشاءها در شکل (۳) آمده است. بر اساس نتایج بیشترین شیب صعود در غشاءها به ترتیب در P296، T281، P200 و P186 بود. شکل (۴) مقایسه دو نمونه غشای P186 که متراکم‌ترین ساختمان بافت را دارا است با نمونه P200 که دارای تراکم متوسط با وزن واحد سطح کمتری نسبت به T281 و P296 است را نشان می‌دهد. میانگین ارتفاع صعود محلول نسبت به زمان در غشاء P200 حدود ۱/۶ برابر بیشتر از غشاء P186 به دست آمد. همچنین شیب خطی و نمایی صعود محلول در غشاءها (شکل ۴) نشان می‌دهد که

برای ارزیابی دقت بلوک‌های ساخته شده در بافت‌های مختلف خاک، پس از هوا خشک، کوبیدن و گذراندن از الک دو میلی‌متری، خاک در گلدان‌ها (شکل ۱) پر و برای کارگذاری بلوک‌ها آماده شد. بدین منظور از هر غشاء (چهار نوع سازه الیافی انتخاب شده) سه بلوک برای جلوگیری از خطای ساخت بلوک، در گلدان‌های به قطر و ارتفاع ۲۰ و ۱۵ سانتی‌متر در عمق ۸ سانتی‌متری کار گذاشته شدند. سپس با قرار دادن گلدان‌ها در ظرف آب، خاک اشباع شد. در مرحله بعد گلدان‌ها از آب خارج شده و بلوک‌ها در گلدان‌ها کار گذاشته شدند. از آنجا که میزان رطوبت رسیده به غشاء بر میزان انتقال جریان برق بین دو الکترود داخل بلوک تاثیرگذار است، هر روز با تغییر رطوبت خاک، مبادرت به قرائت رسانایی بلوک‌ها و هم‌زمان اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی که دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک است (Rasheed et al., 2022)، شد. قرائت رسانایی و رطوبت تا زمان خشک شدن خاک ادامه داشت. این آزمایش چهار مرتبه تکرار شد تا داده‌های بیشتری برای ارزیابی بلوک‌ها جمع‌آوری شود. پس از جمع‌آوری داده‌های رسانایی بلوک‌ها و رطوبت خاک در هر کدام از بافت خاک‌ها، داده‌ها به دو سری تقسیم شد به طوری که دو تکرار اول و چهارم برای استخراج معادلات کالیبراسیون و دو تکرار دوم و سوم برای ارزیابی دقت معادلات استفاده شدند. در مرحله اول، با یک سری اولیه داده‌ها، معادلات کالیبراسیون بلوک‌ها استخراج شد و در مرحله بعد، دقت معادلات ایجاد شده با سری دوم داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. معادله کالیبراسیون برای تبدیل رسانایی به رطوبت خاک استفاده می‌شود. برای بیان دقت بلوک‌ها در اندازه‌گیری رطوبت، شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا ($RMSE^T$)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده ($nRMSE^T$)، شاخص توافق ویلموت ($D-index^A$) و میانگین خطای مطلق (MAE^A) به دست آمدند. روابط (۱) تا (۵) نحوه محاسبه هر کدام از آماره‌ها را نشان می‌دهند.

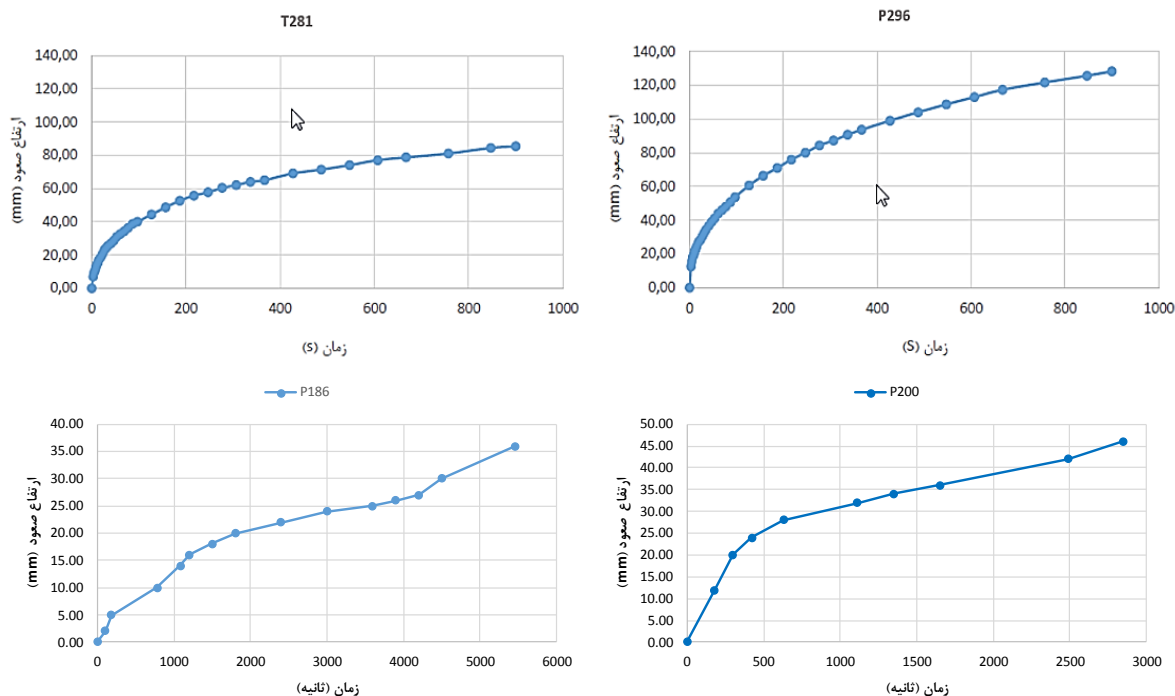
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (2)$$

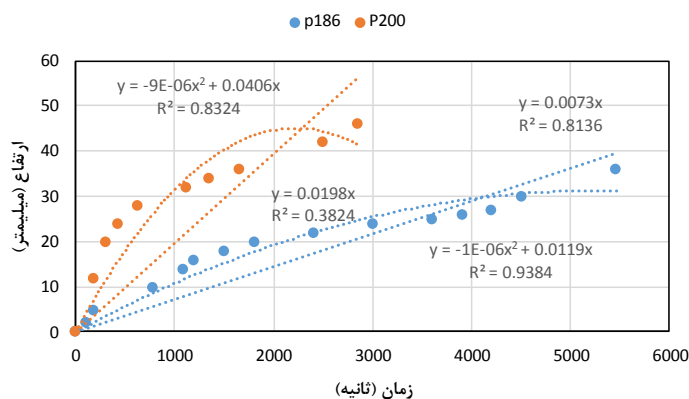
- 1- Determination Coefficient
- 2- Root Mean Square Error
- 3- Normalized Root Mean Square Error
- 4- Index of Agreement D
- 5- Mean Absolute Error

یک ویژگی مثبت در تبادل و تعادل رطوبت بین خاک و غشاء باشد که منجر به دستیابی به بلوک با عملکرد بهتر می‌شود.

روند صعود محلول در غشاء P200 به ترتیب ۲/۷ و ۹ برابر P186 است. این شاخص‌ها بیان‌گر سرعت بیشتر خیس شدن بلوک حاوی غشاء P200 در هنگام قرار گرفتن در خاک مرطوب است که می‌تواند



شکل ۳- روند صعود محلول نسبت به زمان در غشاءهای مورد بررسی



شکل ۴- مقایسه روند صعود محلول نسبت به زمان در غشاءهای P200 و P186

کمترین ضریب تبیین در معادله کالیبراسیون بر روی داده‌های رطوبت و رسانایی جریان برق متعلق به بلوک با غشاء P186 به دست آمد که این بدین معنی است که عملکرد این بلوک نسبت به بقیه کمتر است. شکل‌های (۳) و (۴) با نشان دادن سرعت کمتر جذب محلول توسط غشاء P186 نسبت به سایر غشاءها، می‌تواند دلیل این نتیجه را بیان کند.

از آنجا که اندازه منافذ غشاء و خاک بر تبادل آب میان خاک و

ضرایب معادلات کالیبراسیون شامل ضریب و نمای معادله برای چهار نوع غشاء در ۱۰ بافت خاک مورد بررسی در جداول (۲) تا (۵) آمده است. برای مقایسه عملکرد غشاءها مستقل از بافت خاک، ضرایب حداقل، حداکثر و متوسط معادلات کالیبراسیون و ضریب تبیین بلوک‌ها در ۱۰ بافت خاک در جدول (۶) ارائه شد. همانطور که در جدول مشخص است سه غشاء P200، T281 و P296 رفتار مشابهی با هم دارند در حالی که غشاء P186 دارای رفتاری متفاوتی بود.

به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۸۷) و لوم رسی شنی (ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۵) قادر به برآورد نسبتاً دقیق‌تر رطوبت وزنی خاک نسبت به بافت خاک رس سیلتی (ضریب تبیین به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۷۹) هستند. رحمانی و قائمی (۱۳۹۲) ضریب تبیین یک حسگر بلوک از جنس گچ را در دو عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری خاک لوم رسی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶ بیان کردند که در مقایسه با بلوک‌های این پژوهش از ضریب تبیین کمتری برخوردار بودند.

برای بررسی اعتبار دقت معادلات کالیبراسیون و ارزیابی دقت بلوک‌ها برای تعیین رطوبت خاک، بر روی سری دوم داده‌ها، مقادیر رطوبت با استفاده از معادلات محاسبه و دقت آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش وزنی مقایسه شد. برای تعیین دقت برآورد رطوبت بلوک‌ها، شاخص‌های آماری محاسبه شد که مقادیر آن‌ها در جدول (۸) تا (۱۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج (جدول ۸) بلوک دارای غشاء P200، با توجه به مقادیر میانگین شاخص‌های RMSE و MAE، بلوک توانست با دقت ۰/۰۵ رطوبت خاک را برآورد نماید. میانگین شاخص nRMSE نشان داد که این بلوک طبق طبقه‌بندی جامینسون، در طبقه بسیار خوب رطوبت را تخمین می‌زند.

بلوک تاثیرگذار است، اثر بافت خاک بر کارایی بلوک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه دقت معادلات کالیبراسیون در بافت خاک‌های مختلف نشان داد که بلوک‌ها به طور متوسط توانستند با دقت شاخص R^2 برابر با ۰/۹۰۴ رطوبت بافت خاک‌های Silty Clay Loam و Silty Clay و ۰/۹۶ در بافت خاک‌های Loamy Sand و Silty Loam را برآورد نمایند (جدول ۷). نتایج نشان داد بیشترین دقت معادله کالیبراسیون مربوط به بافت خاک Silty Loam و Silty Clay و کمترین دقت معادله مربوط به بافت خاک Silty Clay Loam بود. بنابراین غالب بلوک‌های مورد بررسی در بافت خاک متوسط رو به سبک دقت بیشتری نسبت به خاک‌های دارای سیلت و رس داشتند. لازم به ذکر است ایجاد درز و ترک با خشک شدن خاک می‌تواند در ایجاد کاهش دقت معادلات کالیبراسیون موثر باشد زیرا با ایجاد درز و ترک، احتمال فاصله گرفتن خاک از بلوک و در نتیجه کاهش دقت آن وجود خواهد داشت که این مسئله در خاک حاوی رس و سیلت بیشتر روی می‌دهد. مروج‌الاحکامی و باغشاهی (۱۳۹۹) نیز گزارش کردند که حسگر بلوک طراحی شده و watermark در بافت خاک لومی (ضریب تبیین

جدول ۲- ضرایب و دقت معادلات کالیبراسیون بلوک با غشاء P200

بافت خاک	ضریب معادله	توان معادله	ضریب تبیین معادله
Loamy Sand	۰/۴۳۹	۰/۲۱۰	۰/۹۸۱
Loam	۰/۶۴۶	۰/۱۰۵	۰/۹۵۲
Sandy Clay Loam	۰/۵۰۷	۰/۱۳۶	۰/۹۳۰
Sandy	۰/۴۴۸	۰/۲۷۴	۰/۹۵۸
Clay Loam	۰/۴۷۹	۰/۱۲۷	۰/۹۳۸
Silty Clay Loam	۰/۵۱۱	۰/۱۰۶	۰/۹۴۷
Sandy Loam	۰/۵۳۵	۰/۱۴۶	۰/۹۲۲
Clay	۰/۵۲۰	۰/۱۳۹	۰/۹۵۸
Silty Clay	۰/۴۷۰	۰/۰۹۷	۰/۹۰۴
Silty Loam	۰/۶۱۲	۰/۱۲۰	۰/۹۵۶

جدول ۳- ضرایب و دقت معادلات کالیبراسیون بلوک با غشاء P186

بافت خاک	ضریب معادله	توان معادله	ضریب تبیین معادله
Loamy Sand	۰/۴۵۹	۰/۳۱۶	۰/۹۱۵
Loam	۰/۷۳۶	۰/۲۵۷	۰/۹۱۷
Sandy Clay Loam	۰/۵۸۱	۰/۲۳۰	۰/۹۲۸
Sandy	۰/۴۵۹	۰/۳۰۹	۰/۸۵۷
Clay Loam	۰/۴۹۸	۰/۱۶۴	۰/۹۵۷
Silty Clay Loam	۰/۵۳۴	۰/۱۳۶	۰/۷۲۸
Sandy Loam	۰/۶۶۵	۰/۲۹۷	۰/۸۹۹
Clay	۰/۵۹۳	۰/۱۸۸	۰/۸۷۵
Silty Clay	۰/۶۰۳	۰/۲۶۵	۰/۷۹۶
Silty Loam	۰/۶۹۵	۰/۲۷۴	۰/۹۳۲

جدول ۴- ضرایب و دقت معادلات کالیبراسیون بلوک با غشاء T281

بافت خاک	ضریب معادله	توان معادله	ضریب تبیین معادله
Loamy Sand	۰/۴۵۶	۰/۲۰۹	۰/۹۴۹
Loam	۰/۶۸۴	۰/۱۴۹	۰/۹۳۷
Sandy Clay Laom	۰/۵۰۵	۰/۱۸۵	۰/۹۶۲
Sandy	۰/۳۹۶	۰/۲۲۸	۰/۹۷۵
Clay Loam	۰/۴۸۸	۰/۱۷۵	۰/۹۲۸
Silty Clay Loam	۰/۵۱۷	۰/۱۵۶	۰/۹۶۶
Sandy Loam	۰/۵۲۱	۰/۱۹۴	۰/۹۹۶
Clay	۰/۵۴۵	۰/۲۳۴	۰/۹۴۴
Silty Clay	۰/۵۱۹	۰/۱۱۸	۰/۹۴۴
Silty Loam	۰/۵۶۰	۰/۲۱۰	۰/۹۸۳

جدول ۵- ضرایب و دقت معادلات کالیبراسیون بلوک با غشاء P296

بافت خاک	ضریب معادله	توان معادله	ضریب تبیین معادله
Loamy Sand	۰/۴۵۲	۰/۲۰۹	۰/۹۶۰
Loam	۰/۶۸۴	۰/۱۴۹	۰/۹۷۵
Sandy Clay Laom	۰/۵۳۱	۰/۱۶۴	۰/۹۵۷
Sandy	۰/۴۲۱	۰/۲۰۳	۰/۹۵۶
Clay Loam	۰/۵۴۸	۰/۱۳۴	۰/۹۲۰
Silty Clay Loam	۰/۵۷۶	۰/۱۹۸	۰/۹۷۶
Sandy Loam	۰/۵۱۳	۰/۱۹۴	۰/۹۹۵
Clay	۰/۵۵۷	۰/۱۷۶	۰/۹۴۳
Silty Clay	۰/۴۹۴	۰/۱۳۶	۰/۹۸۲
Silty Loam	۰/۶۴۳	۰/۱۳۰	۰/۹۹۵

جدول ۶- حداقل، حداکثر و میانگین ضرایب کالیبراسیون در ۱۰ بافت خاک مورد بررسی

پارامتر	شاخص آماری	بلوک P200	بلوک P186	بلوک P296	بلوک T281
میانگین	۰/۵۱۵	۰/۵۸۲	۰/۵۴۱	۰/۵۱۶	
ضریب معادله	حداقل	۰/۴۳۹	۰/۴۵۹	۰/۴۲۱	۰/۳۶۹
	حداکثر	۰/۶۴۶	۰/۷۳۶	۰/۶۸۴	۰/۶۸۴
میانگین	۰/۱۴۶	۰/۲۴۳	۰/۱۶۹	۰/۱۸۵	
توان معادله	حداقل	۰/۰۹۷	۰/۱۳۶	۰/۱۳۰	۰/۱۱۸
	حداکثر	۰/۲۷۴	۰/۳۱۶	۰/۲۰۹	۰/۲۳۴
میانگین	۰/۹۴۴	۰/۸۸۰	۰/۹۶۵	۰/۹۵۸	
ضریب تبیین	حداقل	۰/۹۰۴	۰/۷۲۸	۰/۹۲۰	۰/۹۲۸
	حداکثر	۰/۹۸۱	۰/۹۵۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۶

مختلف خاک نشان داد که کمترین خطاها مربوط به بافت خاک Silty Loam و Sandy Loam است. شاخص nRMSE نشان داد که بافت خاک‌های Silty Loam، Loam، Sandy Clay Loam و Sandy Loam دارای دقت عالی و Clay Loam و Clay دارای دقت بسیار خوب و سایر بافت خاک‌ها دارای دقت متوسط در برآورد رطوبت خاک بود. بنابراین بافت خاک متوسط رو به سبک در این بلوک دارای دقت عالی تشخیص داده شد هر چند میانگین نتایج

میانگین شاخص ویلموت و ضریب تبیین (۰/۹۵ و ۰/۸۸ برای شاخص ویلموت و ضریب تبیین) نیز همبستگی خوبی میان مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده نشان داد. با توجه به برآورد شاخص‌های مختلف، بلوک با استفاده از غشاء P200، قابلیت خوبی در برآورد رطوبت خاک دارد. ساختمان بافت با تراکم متوسط ۸ بر سانتیمتر و وزن واحد سطح کمتر از تراکم غشاءهای P296 و T281 می‌تواند دلیل دقت بهتر غشاء P200 باشد. بررسی دقت بلوک در بافت‌های

شاخص‌های آماری، کارآمدی خوبی برای بلوک گزارش داد. به نظر می‌رسد ساختمان بافت غشاء P200 هماهنگی بیشتری با منافذ خاک با بافت متوسط داشته باشد به طوری که در تبادل رطوبت خاک با بلوک موفق‌تر عمل نموده است.

جدول ۷- میانگین، حداقل و حداکثر ضریب تبیین معادلات کالیبراسیون بلوک‌های طراحی شده در هر یک از بافت خاک مورد بررسی

بافت خاک	میانگین	حداکثر	حداقل
Loamy Sand	۰/۹۵۱	۰/۹۸۱	۰/۹۱۵
Loam	۰/۹۴۵	۰/۹۷۵	۰/۹۱۷
Sandy Clay Laom	۰/۹۴۴	۰/۹۶۲	۰/۹۲۸
Sandy	۰/۹۳۷	۰/۹۷۵	۰/۸۵۷
Clay Loam	۰/۹۳۶	۰/۹۵۷	۰/۹۲۰
Silty Clay Loam	۰/۹۰۴	۰/۹۷۶	۰/۷۲۸
Sandy Loam	۰/۹۵۳	۰/۹۹۶	۰/۸۹۹
Clay	۰/۹۳۰	۰/۹۵۸	۰/۸۷۵
Silty Clay	۰/۹۰۷	۰/۹۸۲	۰/۷۹۶
Silty Loam	۰/۹۶۷	۰/۹۹۵	۰/۹۳۲

خاک‌های Loam و Sandy Loam دارای دقت عالی، Clay Loam، Sandy Clay Loam و Silty Loam دارای دقت بسیار خوب، بافت خاک Silty Clay Loam دارای دقت متوسط و سایر بافت خاک‌ها دارای دقت ضعیف در برآورد رطوبت خاک بودند. بنابراین بافت خاک متوسط رو به سبک در این بلوک دارای دقت قابل قبول تشخیص داده شد اما در سایر بافت‌های خاک استفاده از این غشاء توصیه نمی‌شود. کم بودن رفتار فیتیله‌ای این غشاء نسبت به سایر غشاهای مورد بررسی می‌تواند دلیل دقت کم این بلوک باشد به طوری که خیس شدن این غشاء و تبادل رطوبتی با تاخیر انجام شده و این مسئله بر رسانایی جریان و دقت تشخیص رطوبت خاک تاثیرگذار است.

بر اساس نتایج (جدول ۹) بلوک دارای غشاء P186، با توجه به میانگین شاخص nRMSE و طبقه‌بندی جامینسون، می‌تواند رطوبت خاک را با دقت متوسط رطوبت تخمین می‌زند. ضریب تبیین نیز همبستگی کم (۰/۶۹۸) را میان مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده نشان داد. با توجه به شاخص‌های مختلف آماری، قابلیت غشاء P186 در برآورد رطوبت خاک مناسب نبود. ساختمان بافت بسیار متراکم (تراکم طولی و عرضی به ترتیب ۲۰ و ۲۴ بر سانتیمتر) نسبت به سایر غشاءها می‌تواند دلیل عدم کارایی مناسب این غشاء باشد. بررسی دقت بلوک در بافت‌های مختلف خاک نشان داد که کمترین خطاها مربوط به بافت خاک Loam، Clay Loam، Sandy Loam و Silty Loam است. شاخص nRMSE نشان داد که بافت

جدول ۸- شاخص‌های آماری دقت بلوک P200

بافت خاک	D-index	MAE	nRMSE	RMSE	R ²
loamy Sand	۰/۹۳۴	۰/۰۵۰	۰/۲۳۵	۰/۰۵۴	۰/۹۷۳
loam	۰/۹۹۸	۰/۰۴۳	۰/۰۹۹	۰/۰۴۴	۰/۹۵۹
sandy clay laom	۰/۹۵۱	۰/۰۴۴	۰/۰۹۵	۰/۰۲۹	۰/۸۸۰
Sandy	۰/۹۲۲	۰/۰۵۶	۰/۲۴۳	۰/۰۶۱	۰/۷۰۰
Clay loam	۰/۹۴۶	۰/۰۵۲	۰/۱۸۶	۰/۰۵۶	۰/۸۹۰
Silty Clay Loam	۰/۹۵۴	۰/۰۷۸	۰/۲۴۶	۰/۰۷۹	۰/۹۳۶
Sandy Loam	۰/۹۵۵	۰/۰۳۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۸۷۱
Clay	۰/۹۵۰	۰/۰۵۶	۰/۱۸۸	۰/۰۶۲	۰/۸۶۲
Silty Clay	۰/۹۵۰	۰/۰۶۹	۰/۲۳۳	۰/۰۷۱	۰/۸۸۳
Silty Loam	۰/۹۵۹	۰/۰۳۸	۰/۰۹۲	۰/۰۴۰	۰/۹۲۷
میانگین	۰/۹۵۲	۰/۰۵۲	۰/۱۶۲	۰/۰۵۰	۰/۸۸۸

جدول ۹- شاخص‌های آماری دقت بلوک P186

R ²	RMSE	nRMSE	MAE	D-index	بافت خاک
۰/۹۰۹	۰/۰۷۶	۰/۳۳۴	۰/۰۷۵	۰/۹۳۹	loamy Sand
۰/۸۰۵	۰/۰۴۳	۰/۰۹۷	۰/۰۳۶	۰/۹۵۱	loam
۰/۶۲۳	۰/۰۴۰	۰/۱۲۱	۰/۰۳۵	۰/۹۲۶	sandy clay loam
۰/۵۰۰	۰/۰۸۷	۰/۳۳۸	۰/۰۷۰	۰/۹۳۲	Sandy
۰/۵۱۷	۰/۰۴۲	۰/۱۴۳	۰/۰۳۶	۰/۹۰۷	Clay loam
۰/۶۸۱	۰/۰۸۳	۰/۲۶۶	۰/۰۷۷	۰/۹۵۲	Silty Clay Loam
۰/۷۲۹	۰/۰۳۸	۰/۰۹۹	۰/۰۳۳	۰/۹۴۵	Sandy Loam
۰/۹۵۴	۰/۱۰۱	۰/۳۰۸	۰/۰۹۹	۰/۹۵۶	Clay
۰/۷۷۸	۰/۰۹۲	۰/۳۰۳	۰/۰۹۰	۰/۹۴۹	Silty Clay
۰/۴۸۸	۰/۰۴۸	۰/۱۱۰	۰/۰۴۲	۰/۹۴۶	Silty Loam
۰/۶۹۸	۰/۰۶۵	۰/۲۱۲	۰/۰۵۹	۰/۹۴۰	میانگین

عملکرد غشاءها باشد. بررسی دقت بلوک در بافت‌های مختلف خاک نشان داد که در هر دو غشاء کمترین خطاها مربوط به بافت خاک nRMSE شاخص Loam و Silty Loam، Sandy Loam و Silty Loam نشان داد که بافت خاک‌های Loam، Silty Loam، Sandy Clay و Silty Clay Loam، Loam دارای دقت عالی، Loam و Loam دارای دقت بسیار خوب و سایر بافت خاک‌ها دارای دقت متوسط در برآورد رطوبت خاک بودند. بنابراین بافت خاک متوسط رو به سبک در این بلوک دارای دقت خوب تشخیص داده شد و میانگین نتایج شاخص‌های آماری، کارایی خوبی برای بلوک گزارش داد.

بر اساس نتایج (جدول ۱۰ و ۱۱) بلوک‌های دارای غشاء P296 و T281 کارایی مشابهی در برآورد رطوبت خاک داشتند، به طوری که میانگین خطای قابل انتظار از آن‌ها به ترتیب ۰/۰۴۸ و ۰/۰۵ به دست آمد. میانگین شاخص nRMSE و طبقه‌بندی جامینسون نشان داد که هر دو غشاء رطوبت را با دقت بسیار خوب تخمین می‌زنند. میانگین کمتر شاخص ویلموت و ضریب تبیین و میانگین بیشتر nRMSE در غشاء T281 نسبت به P296 نشان‌گر برتری غشاء P296 است هر چند تفاوت معنی‌داری بین شاخص‌های آماری وجود نداشت. وزن واحد سطح متفاوت علی‌رغم تراکم یکسان ساختمان بافت این دو غشاء بیان می‌کند که وزن واحد سطح هم می‌تواند عامل تفاوت در

جدول ۱۰- شاخص‌های آماری دقت بلوک P296

R ²	RMSE	nRMSE	MAE	D-index	بافت خاک
۰/۹۸۰	۰/۰۵۱	۰/۲۲۳	۰/۰۵۰	۰/۸۲۹	loamy Sand
۰/۹۸۰	۰/۰۳۱	۰/۰۷۱	۰/۰۲۹	۰/۸۹۳	loam
۰/۹۴۷	۰/۰۵۴	۰/۱۶۷	۰/۰۵۰	۰/۸۷۷	sandy clay loam
۰/۶۳۶	۰/۰۵۱	۰/۲۰۴	۰/۰۴۶	۰/۸۳۸	Sandy
۰/۹۸۴	۰/۰۷۷	۰/۲۵۷	۰/۰۷۷	۰/۸۷۰	Clay loam
۰/۹۳۳	۰/۰۴۷	۰/۱۵۱	۰/۰۴۲	۰/۸۶۳	Silty Clay Loam
۰/۹۱۱	۰/۰۳۱	۰/۰۷۷	۰/۰۲۴	۰/۸۸۳	Sandy Loam
۰/۹۲۶	۰/۰۶۸	۰/۲۰۶	۰/۰۶۴	۰/۸۷۶	Clay
۰/۹۴۶	۰/۰۷۱	۰/۲۳۳	۰/۰۶۸	۰/۸۷۰	Silty Clay
۰/۹۶۸	۰/۰۳۴	۰/۰۷۷	۰/۰۳۲	۰/۸۹۴	Silty Loam
۰/۹۲۱	۰/۰۵۱	۰/۱۶۷	۰/۰۴۸	۰/۸۶۹	میانگین

جدول ۱۱- شاخص‌های آماری دقت بلوک T281

R ²	RMSE	nRMSE	MAE	D-index	بافت خاک
۰/۹۶۳	۰/۰۵۳	۰/۲۳۲	۰/۰۵۰	۰/۸۳۰	loamy Sand
۰/۹۹۰	۰/۰۶۲	۰/۱۴۴	۰/۰۶۲	۰/۹۰۰	loam
۰/۹۳۰	۰/۰۴۱	۰/۱۲۴	۰/۰۳۵	۰/۸۷۱	sandy clay loam
۰/۳۴۲	۰/۰۶۲	۰/۲۴۴	۰/۰۵۵	۰/۸۴۲	Sandy
۰/۹۷۲	۰/۰۴۸	۰/۱۶۳	۰/۰۴۶	۰/۸۵۹	Clay loam
۰/۹۷۲	۰/۰۵۶	۰/۱۸۰	۰/۰۵۴	۰/۸۶۷	Silty Clay Loam
۰/۸۸۹	۰/۰۳۴	۰/۰۸۵	۰/۰۲۵	۰/۸۸۳	Sandy Loam
۰/۸۵۹	۰/۰۷۴	۰/۲۲۶	۰/۰۶۶	۰/۸۷۷	Clay
۰/۹۵۴	۰/۰۷۹	۰/۲۶۱	۰/۰۷۷	۰/۸۷۳	Silty Clay
۰/۸۱۱	۰/۰۳۰	۰/۰۷۰	۰/۰۲۶	۰/۸۸۴	Silty Loam
۰/۸۶۸	۰/۰۵۴	۰/۱۷۳	۰/۰۵۰	۰/۸۶۹	میانگین

می‌شود در چنین بافت خاک‌هایی عمق کاربرد بلوک‌ها بیشتر باشد تا عامل مضاعفی در کاهش دقت بلوک‌ها ایجاد نشود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از نتایج طرح به شماره قرارداد ۲۵۵۶۸۴۲ با پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان است. بدین وسیله از حمایت آن پژوهشکده محترم تقدیر بعمل می‌آید.

منابع

اسماعیلی‌زاده، م. و نیشابوری، م. ر. ۱۳۸۰. طراحی، ساخت و افزایش کارایی بلوک‌های گچی برای تعیین رطوبت خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۸ (۳): ۱۱-۳.

امید، ر.، پارس‌نژاد، م. و سهرابی، ت. ۱۳۹۸. اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی مرودشت - خرامه). نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۸ (۴): ۶۷-۸۵.

انصاری، ح. و حسن پور، م. ۱۳۹۴. طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری داده‌های محیطی خاک به ویژه رطوبت، دما و شوری با نام REC-P تجاری ۵۵. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱ (۹): ۳۳-۴۳.

رحمانی ثقیه، ج. و قائمی، ع. ۱۳۹۲. اثر شوری بر کاربرد حسگرهای هوشمند در تعیین رطوبت خاک. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۳ (۲): ۱۳۵-۱۴۶.

قائمی، ع. و رحمانی ثقیه، ج. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد حسگرهای

مقایسه ضریب تبیین حسگرهای ساخته شده با سایر پژوهش‌ها نشان داد که حسگرهای این پژوهش دارای قابلیت بهتری در برآورد رطوبت خاک هستند (مروج‌الاحکامی و باغشاهی، ۱۳۹۹ و رحمانی و قائمی، ۱۳۹۲). برای ارزیابی عملکرد غشاءها، میانگین شاخص‌های آماری برآورد دقت آن‌ها شامل R²، RMSE، nRMSE، MAE و D-index در نرم‌افزار SPSS مورد آزمون مقایسه میانگین یک طرفه قرار گرفت. نتایج نشان داد که به لحاظ شاخص‌های R²، nRMSE و D-index، غشاءها دارای اختلاف معنی‌داری نبودند اما به لحاظ شاخص‌های بیان خطا شامل MAE و RMSE اختلاف بین عملکرد غشاءها معنی‌دار بود.

نتیجه‌گیری

برای ارتقاء ساخت حسگرهای رطوبتی، بلوک متخلخل از جنس چهار غشاء مختلف ساخته و دقت آن در برآورد رطوبت خاک ارزیابی شد. آنالیز آماری بر روی شاخص‌های ارزیابی دقت غشاءها نشان داد که غشاءها در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارای خطای معنی‌داری هستند. بنابراین انتخاب نوع غشاءهای مورد بررسی توسط کاربر در برآورد رطوبت خاک دارای اهمیت خواهد بود. مقایسه دقت برآورد بلوک‌ها در بافت خاک‌های مختلف نشان داد که با اعتماد بیشتری می‌توان از برآورد رطوبت خاک توسط غشاءها در بافت خاک متوسط رو به سبک بهره برد. تفاوت دقت غشاءها در بافت خاک‌های مختلف نشان داد که در صورت نیاز به دقت بالاتر، انتخاب غشاء بلوک بر حسب بافت خاک مزرعه توصیه می‌شود. درز و ترک در خاک‌های دارای مقادیر سیلت و رس بالا طی فرآیند خشک شدن خاک منجر به فاصله بین بلوک و خاک می‌شود که می‌تواند بر تبادل رطوبت میان خاک و غشاء و در نتیجه عملکرد بلوک‌ها موثر باشد. بنابراین توصیه

- Chow, L., Xing, Z., Rees, H.W. Meng, F. and Monteith, J. 2009. Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in New Brunswick, maritime region, Canada. *Sensors*. 9: 9398-9413.
- Ezekiel, O., Danbaki, B.A. and Fabumi, G.T. 2021. Performance evaluation of gypsum block, tensiometer and moisture sensor for soil moisture content determination. *Journal of Agricultural Engineering and Technology*. 26 (2): 103-111.
- FAO. 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 33 pages.
- Jamieson, P. D., Poeter, J. R. and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand, *Field Crops Research*, 27:337-350.
- Ganjugunte, G. K., Sheng, Z. and Clark, J. 2012. Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater. *Applied Water Science*, 2:119-125.
- Keyhani, A. 2001. Development of Mini-Gypsum Blocks for Soil Moisture Measurement and their Calibration to Compensate for Temperature. *Journal of Agricultural Science Technology*. 3: 141-145.
- Leib, B. G. 1998. The 1998 survey of irrigation scheduling providers. *The Washington Irrigator News Letter*. Washington State University. Prosser, WA.
- Leib, B.G., Hattendorf, M., Elliott, T. and Matthews, G. 2002. Adoption and of 1998. *Agric. Water Manage.* 55:105-120. Adaptation of Scientific Irrigation Scheduling: Trend from Washington, USA as of 1998. *Agriculture Water Management*. 55: 105-120.
- Maughan, T., Niel Allen, L. and Dan, D. 2015. Soil Moisture Measurement and Sensors for Irrigation Management. Utah State University. AG/Irrigation/2015-01pr.
- McCann, I. R., Kincaid, D. C. and Wang, D. 1992. Operational characteristics of the Watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. *Applied Engineering in Agriculture*. 8 (5):605- 609.
- Prichard, T., Hanson, B., Schwankl, L., Verdegaal, P. and Smith, R. 2004. Deficit irrigation of quality wine grapes using micro-irrigation techniques. University of California Cooperative Extension, p. 91.
- Rasheed, M. W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R. R., Aziz, M. and Sultan, M. 2022. هوشمند رطوبت خاک با چند متداول تعیین رطوبت خاک در روش آبیاری میکرو. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱ (۸): ۲۵-۱۶.
- قنادزاده، م.ع.، داوری، ک. و قهرمان، ب. ۱۳۸۷. ارزیابی ساختمان مختلف بلوک‌های گچی برای تعیین رطوبت خاک. *مجله پژوهش آب ایران*. ۲ (۳): ۲۳-۳۲.
- مروج‌الاحکامی، ب. و باغشاهی، م. ۱۳۹۹. امکان‌سنجی ساخت و ارزیابی یک سنسور رطوبت‌سنج در بافتهای متفاوت خاک. *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۶ (۱): ۱۴۵-۱۳۵.
- یزدانی کچویی، م. ۱۳۷۵. مقایسه روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزرعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس.
- Ajayi, A. S., Eleta, P. O., Duweni, E. C. and Ehiomogoe, P. 2019. Fabrication and testing of gypsum blocks for soil moisture determination. *Journal of Natural Sciences Research*. 9 (3): 67-74.
- Aziz, M., Khan, M., Anjum, N., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Ibrahim S. M., Balasundram, S. K. and Aleem, M. 2022. Scientific Irrigation Scheduling for Sustainable Production in Olive Groves. *Agriculture*, 12 (564): 1-14.
- Bai, W., Kong, L. and GuoState, L. 2013. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 5: 406-411.
- Boutraa, T., Akhkha, A., Alshoabi, A., and Atta, R. 2011. Evaluation of the effectiveness of an automated irrigation system using wheat crops. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 2: 80-88.
- Campbell, G.S. and Mulla, D.J. 1990. Measurement of soil water content and potential. Chapter 6 In Stewart B.A. and Nielsen D.R. (co-editors). *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy. Madison, USA. 127-142.
- Cardenas-Lailhacar, B. and Dukes, M.D. 2009. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management*. 97: 666-672.
- Charlesworth, P. 2005. *Soil Water Monitoring, Irrigation Insights No. 1, Second Edition*. Coelho E.F. and D. Or. 1996. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 39 (6): 2007-2016.

- Wei, B., Lingwei, K. and Aiguo, G. 2013. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5: 406–411.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63: 395-409.
- .Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 14 (1153): 1-23.
- Spaans, E. J. A. and Baker, J.M. 1992. Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant and Soil*, 143: 213-217.
- Wang, H. 2019. Irrigation efficiency and water withdrawal in US agriculture. *Water Policy*, 21: 768–786.

Design and Evaluation of Fiber-Based Sensors Using in Soil Moisture Monitoring

M. Navabian^{1*}, M. Jamshidi Avanaki²

Received: Sep.25, 2023

Accepted: Apr.19, 2023

Abstract

Lack of water resources due to droughts and mismanagement of water consumption, has been paid more attention to provide effective solutions to increase water productivity, especially in the agricultural sector. One of the most important solutions in this regard is the use of soil moisture monitoring systems. In such systems, the performance efficiency of moisture sensors used in the soil possesses particular importance. In this study, moisture sensors based on fiberglass structures were designed and manufactured in 2021 and their performance was characterized. For this purpose, the sensors were designed in the form of porous blocks containing four types of fiberglass woven structures as membranes (P200, T281, P296, P186). The results of statistical studies showed that P200, P296, T281 and P186 sensors had acceptable accuracy for estimating soil moisture, respectively. Based on RMSE the sensor equipped with P200 and P186 membrane had 0.05 and 0.065 error that were the lower and highest accuracy in measuring soil moisture. Also, the performance of the designed sensors in ten soil textures showed that the highest measurement accuracy was in medium to light soil texture. So that in P200 sensor the Sandy loam soil texture (with nRMSE=0.004), P186 sensor the Loam and Sandy Loam soil texture (with nRMSE=0.097-0.099), P296 sensor the Loam soil texture (with nRMSE=0.071) and T281 sensor the Silty Loam soil texture (with nRMSE=0.07) had the highest accuracy. The results showed that the type of membrane is effective on the efficiency of the sensor and the choice of membrane is suggested depending on the soil texture. Except P186 membrane, other membranes have acceptable accuracy and their low cost, ability to store and send soil moisture data to processing systems, recommend their use in smart irrigation system.

Keywords: Soil Texture, Moisture Sensor, Soil Moisture, Fibrous Structures, Moisture Monitoring Systems.

1- Associated Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan and Department of Water Engineering and Environment, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Assistant Professor of Fibrous Structures and Process Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)