

ارزیابی دستگاه خودکار آشکارساز جبهه رطوبتی برای پایش حرکت آب در خاک

آرش تافته، سعید غالبی و سینا ملاح

دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحات ۱-۱۲

Vol. 6(1), Spring 2020, 1 – 12

DOI: 10.22034/jewe.2020.218691.1345

Evaluating Automatic Detector of Wetting Front  
for Monitoring Water Movement in Soil

Tafteh A., Ghalebi S. and Mallah S.



[www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

تافته آ.، کازرونی ح.، غالبی س. و ملاح س. (۱۳۹۹). ارزیابی دستگاه خودکار آشکارساز جبهه رطوبتی برای پایش حرکت آب در خاک. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۱، صفحات: ۱-۱۲.

**Citing this paper:** Tafteh A., Ghalebi S. and Mallah S. (2020). Evaluating automatic detector of wetting front for monitoring water movement in soil. Environ. Water Eng., 6(1), 1-12. DOI: 10.22034/jewe.2020.218691.1345.



## ارزیابی دستگاه خودکار آشکارساز جبهه رطوبتی برای پایش حرکت آب در خاک

### آرش تافته<sup>۱</sup>، سعید غالبی<sup>۲</sup> و سینا ملاح<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

<sup>۲</sup>مربی پژوهشی بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

<sup>۳</sup>محقق بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

\*نویسنده مسئول: arash\_tafteh@yahoo.com

#### مقاله اصلی

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۱/۱۷]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۸/۱۲/۲۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۸/۱۱/۱۶]

#### چکیده

به منظور افزایش بهره‌وری آب در سطح مزارع و هوشمند سازی آبیاری یکی از فاکتورهای مهم ایجاد سامانه‌هایی است که بتوانند با دقت مناسب و قابل قبول مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری نمایند. در این ارتباط دستگاه اندازه‌گیری جبهه رطوبتی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات خاک و آب در سه بافت سبک (LT)، متوسط (MT) و سنگین (HT) و در سه سطح شوری آب آبیاری غیر شور ( $S_0$ )،  $S_1$  و  $S_2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از جمع‌آوری داده‌ها نسبت به تحلیل آماری و تفسیر اقدام و از نتایج آن در مزرعه استفاده شد. سپس برای ارزیابی و واسنجی دستگاه در شرایط مذکور، اقدام به اندازه‌گیری هم‌زمان اعداد دستگاه و نمونه‌گیری از خاک در اعماق معین به فواصل زمانی ۲۴ h شد. پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به زمان‌های رسیدن جبهه رطوبتی به اعماق خاک و تغییرات رطوبت خاک با نمونه‌گیری خاک و دستگاه آشکارساز جبهه رطوبتی خاک تجزیه آماری صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که دستگاه در بافت‌های مختلف و شوری‌های متفاوت واکنش نشان می‌دهد. همچنین حساسیت حسگرهای آن به تغییرات ناگهانی رطوبت خاک ناشی از رسیدن جبهه رطوبتی به عمق معینی از خاک دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. نتایج آماری نشان داد که دستگاه در تعیین رطوبت خاک در شرایط غیر شور حدود ۶ تا ۹٪، در شرایط استفاده از آب شور  $dS/m$  ۵، ۲۸ تا ۴۱٪ و در شرایط استفاده از آب شور  $dS/m$  ۱۰، ۳۱ تا ۳۷٪ دارای خطا می‌باشد. شاخص کارایی مدل نیز نشان داد که این دستگاه در شرایط غیرشور با کارایی متوسط ۰/۷۵ بسیار کاربردی بوده و در شرایط شور با شاخص کارایی منفی غیرقابل توصیه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بافت خاک؛ رطوبت خاک؛ سامانه؛ شوری آب آبیاری؛ عمق خاک.

و به طرف پایین حرکت می‌کند شیب ثابتی در سرتاسر نیمرخ خاک از لایه اشباع‌شده بالایی تا لایه در حال خیس شدن پایینی به وجود می‌آید. همچنین نیمرخ حرکت آب از ۵ منطقه تشکیل می‌شود: ۱- منطقه اشباع‌شده به ضخامت حداکثر ۱/۵ cm، ۲- منطقه عبور یا لایه کاهش سریع مقدار آب به ضخامت ۵ cm از سطح، ۳- منطقه انتقال اصلی که تغییرات مقدار آب در آن جزئی است، ۴- منطقه مرطوب شونده که تغییر مقدار آب در آن به سرعت صورت می‌گیرد، و ۵- جبهه رطوبتی که سرعت حرکت آب در آن بسیار سریع بوده و مرز نفوذ آب در آن قابل‌رؤیت است (Colman and Bodman 1944).

برای تعدادی از خاک‌ها، انتقال آب در خاک کاملاً مشخص است و می‌تواند به راحتی با چشم غیرمسلح دنبال شود. منطقه‌ای را که تغییرات رنگ در نتیجه افزایش مقدار آب صورت می‌گیرد را جبهه رطوبتی می‌نامند. از این جدایی بصری بین خاک روشن خشک و خاک مرطوب تیره، ممکن است یک استنباط شود که خاک در رأس جبهه رطوبتی در حالت اصلی خشک خود قرار دارد و خاک در پشت جبهه رطوبتی به صورتی است که آب به طور کامل فضاهای بین منفذی را که از هوا خالی شده را پر کرده است (Zare et al. 2020).

(Khorami 2013) در تحقیقاتی که بر روی خاک‌های شنی انجام داد، نتیجه گرفت که هنگام شروع جریان آب، نیروی مویبندی الگوی خیس‌شدگی را کنترل نموده و با افزایش عمق خیس‌شدگی تأثیر نیروی ثقل بیش‌تر می‌شود. در شروع جریان آب، شدت جریان افقی بیش‌تر از حرکت عمودی رطوبت برای تمام دبی‌های اعمال شده است ولی با گذشت زمان سرعت هر دو پیش روی کاهش می‌یابد و هنگام توقف آب‌دهی جریان متوقف نشده و میزان جریان عمودی بیش‌تر از جریان افقی می‌باشد. (Katyral et al. 1980) تحقیقاتی را بر روی خاک‌های شنی در شرایط مزرعه و آزمایشگاهی با منبع نقطه‌ای انجام دادند و مشاهده کردند که جبهه رطوبتی ناشی از یک منبع نقطه‌ای توسط مؤلفه افقی محدود می‌شود و در اوایل آزمایش حرکت افقی خاک بیش‌تر بوده و با گذشت زمان از میزان آن کاسته می‌شود.

در راستای اجرای سیاست‌های افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، ضروری است که مدیریت آب در سطح مزارع و باغات اصلاح و بهینه‌سازی شود. یکی از ارکان مهم و مدیریت پذیر در مدیریت آبیاری، اعمال صحیح برنامه‌ریزی آبیاری (دور و عمق آب آبیاری) بر مبنای اصول عملی شناخته‌شده شرایط خاک، آب، گیاه و اقلیم می‌باشد. در این میان شناخت و اندازه‌گیری وضعیت رطوبت خاک و حرکت آب در خاک از عوامل و شاخص‌های مهمی هستند که به تصمیم‌گیری و موفقیت یک برنامه‌ریزی آبیاری کمک می‌کنند. بدین منظور نیاز به وجود ادوات و ابزارهای دقیق صحرایی قابل حمل می‌باشد. از جمله این ابزارها، دستگاه‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت آب در خاک می‌باشد که یکی از کاربردهای آن اعلام خاتمه ساعت آبیاری در هر نوبت آبیاری است که با توجه به خصوصیت حرکت آب در پروفیل خاک و محدوده توسعه ریشه گیاهان مشخص می‌شود (Ebrahimi Pak and Tafteh 2017). در حال حاضر دستگاه‌های موجود وارداتی در کشور به صورت محدود وجود دارد. در صورتی که بتوان با امکانات موجود در داخل، این دستگاه برای کاربری آسان به صورت خودکار طراحی و ساخته شود و برای خاک‌های مختلف واسنجی گردد امکان توسعه کاربرد آن در سطح بهره‌برداران اعم از کشاورزان برای تنظیم ساعت آبیاری (قابل لمس و درک در سطح کشاورزان) و نهایتاً اصلاح و بهینه‌سازی مصرف آب در سطح مزارع و باغات با استفاده از جلوگیری از تلفات آب به صورت نفوذ عمقی و رواناب، قابل‌دستیابی خواهد بود (Ebrahimi Pak et al. 2019). برای این منظور لازم است برخی مفاهیم و جنبه‌های کاربردی جبهه رطوبتی، روش‌های تعیین، عوامل مؤثر بر آن و از طرفی ویژگی‌های مورد انتظار ابزاری اعم از سخت‌افزار و نرم‌افزار یک دستگاه پیشگر جبهه رطوبتی مناسب تشریح شود که در ذیل به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. نفوذ آب به داخل خاک یکی از عوامل مهم تغذیه خاک از آب باران یا آبیاری است.

مسیر حرکت نزولی آب در خاک که پس از آبیاری سطحی صورت می‌گیرد در مورد نیمرخ‌های یکسان و در مورد نیمرخ‌های ناهمسان به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. در یک خاک یکنواخت که آب از قسمت بالای آن وارد شده

در پژوهشی دیگر که بر روی شبیه‌سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک در آبیاری قطره‌ای توسط مدل Hydrus 2D/3D انجام شد، نتایج نشان داد که میزان RMSE درصد رطوبت حجمی خاک برای تمام بازه‌های زمانی و در تمام دبی‌ها کم‌تر از ۱۰٪ می‌باشد. نتایج همچنین نشان از قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. بیشترین میزان حداکثر خطا نیز ۵٪ حجمی رطوبت و میانگین مطلق خطا ۲/۰۵٪ حجمی رطوبت بوده است (Khorami et al. 2013). بررسی چهار روش تخمین پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری برای ۹ گروه از داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که گرچه دقت روش Katyal از روش stercove کم‌تر است ولی مختص آبیاری نواری بوده و دارای این قابلیت است که ضرایب نمایی معادلات پیشروی جبهه رطوبتی را به‌سادگی محاسبه کند (Katyal et al. 1980). بررسی مدل SWMS-2D برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی نشان داده است که این مدل تأثیر ارتفاع فشار آب، فشار پشتی و قطر منفذ قطره‌چکان بر روی جبهه رطوبتی را در نظر می‌گیرد که تخمین توزیع مقدار آب در خاک با مدل SWMS-2D در توافق خوبی با اطلاعات مشاهده‌ای است. همچنین، این مدل اطمینان می‌دهد که تخمین‌ها به تأثیرات فشار پشتی خیلی حساس نیستند (Yao et al. 2011).

عمق جبهه رطوبتی می‌تواند برای مدیریت زمان آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. نمونه رایج آشکارساز جبهه رطوبتی یک قیف کار گذاشته‌شده در خاک است که برای تشخیص عمق جبهه رطوبتی کمک گرفته می‌شود. فن‌های زیادی برای نظارت بر آبیاری محصولات باغی وجود دارد اما اغلب باغداران از آن‌ها استفاده نمی‌کنند. "آشکارساز جبهه رطوبتی خاک" یک دستگاه جدید است که ممکن است به بهره‌برداران کشاورز برای مدیریت بهتر آب و کود کمک نماید (Lobit et al. 2006).

Leib et al. (2003) با بررسی ۸ حس‌گر تولیدشده نشان دادند در شرایط عادی حس‌گرهای Watermark بهترین عملکرد را داشتند که به‌طور متوسط حدود ۱۴٪ خطا در تعیین رطوبت خاک خطادارند. در همین ارتباط Rahmani and Ghaemi (2014) با بررسی سه حس‌گر رطوبتی جدید Watermark 200ss، Watermark

همچنین روش‌هایی وجود دارند که با دانستن هدایت هیدرولیکی خاک، مقدار رطوبت اولیه و جبهه رطوبتی قادر است تا حداکثر عمق جبهه رطوبتی را در زیر نازل تنها با اندازه‌گیری شعاع جبهه در سطح خاک سیلنتی محاسبه نماید. به‌منظور آزمون آن نیز از روش تفاوت محدود ADI برای حل معادله ریچارد برای نفوذ متقارن آب به‌صورت نقطه‌ای از سطح خاک استفاده می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که مقادیر تخمینی، اندازه‌گیری و محاسبه‌شده مطابقت خوبی دارند (Moncef et al. 2002).

برخلاف روش‌های قبلی همچون گرین و آمپت که از سعی و خطا استفاده می‌کردند، پژوهش‌گران از معادله‌ای استفاده نمودند که هیچ محدودیتی برای زمان نفوذ و عمق ماندابی نداشته باشد. مقادیر جبهانی ضرایب مدل با استفاده از مدل گرین-امپت و با آزمایش‌ها عددی تعیین شد. صحت این روش نیز با اطلاعات آزمایشگاهی مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که جواب‌ها شبیه به مدل گرین-امپت اما با خطای نسبی ۰/۵٪ برای طول جبهه رطوبتی و ۱/۲٪ برای تخمین نفوذ بالقوه به‌دست‌آمده است (Ali et al. 2013). بررسی الگوی خیس‌شدگی جبهه رطوبتی با استفاده از آبیاری قطره‌ای در دو نوع خاک شنی و رسی، دو سرعت تخلیه، دو پروفیل خاک (مطبق و همگن) نشان داده است که مدلی تجربی برای تخمین پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی در زمان‌های کاربرد مختلف قابل توسعه است. مدل تجربی جدیدی که می‌توانست ابعاد خاک خیس شده در اطراف قطره‌چکان را تخمین بزند را ارائه دادند. ضرایب با استفاده از آنالیز رگرسیون به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌ها مزرعه‌ای به‌دست آمدند. این اطلاعات همچنین به‌منظور ارزیابی مدل شبه تجربی Zur و Schwartzman، مدل تجربی Amin و Ekhmaj و مدل تحلیلی WetUp استفاده شدند. نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی می‌تواند برای محدوده وسیعی از سرعت‌های تخلیه و انواع خاک‌ها مورد بهره‌برداری قرار گیرد. همچنین، کم‌ترین میزان خطا برای خاک‌های خیس شده به‌ترتیب با شعاع و عمق ۸/۲۱ و ۸/۶۲ به‌دست آمدند (Malek and Troy Peters, 2011).

الکتروود و دریافت آن توسط یک الکتروود دیگر و اندازه‌گیری مقاومت موجود در بین الکتروودها اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد. مقدار رطوبت موجود در خاک رابطه مستقیم با هدایت الکتریکی و رابطه معکوس با مقاومت الکتریکی آن دارد.

بدین معنی که به هر میزان که رطوبت خاک افزایش یابد مقاومت الکتریکی بین الکتروودها کاهش یافته و هدایت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. با توجه به اصل موضوع هرگونه تغییر در مقدار رطوبت به‌وسیله الکتروودها اندازه‌گیری شده و مقدار جریان که به‌صورت آنالوگ به‌وسیله مدار دستگاه دریافت می‌شود به‌صورت دیجیتال تبدیل شده و به‌صورت عدد نمایش داده می‌شود. در صورتی که هدف صرفاً پایش رطوبت در اعماق مختلف خاک باشد، تغییر اعداد نمایش داده‌شده بیانگر افزایش یا کاهش مقدار رطوبت خواهد بود. همچنین در صورتی که تخمین مقدار رطوبت موردنظر باشد می‌بایستی واسنجی در خاک موردنظر صورت گرفته تا تخمین مقدار رطوبت میسر گردد. از این‌رو در سال ۱۳۹۵ مراحل اندازه‌گیری و واسنجی دستگاه در موسسه تحقیقات خاک و آب انجام شد.

## ۲-۲ صحت‌سنجی دستگاه

پس از اطمینان از کارکرد دستگاه در تأمین انتظارات پیش‌بینی‌شده در راستای پایش جبهه رطوبتی در رطوبت‌های مختلف اولیه خاک، مراحل واسنجی با شرایط زیر ادامه یافت. در این مرحله سه خاک با بافت‌های سبک، متوسط و سنگین به محل آزمایش آورده شد که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

بعد از آماده شدن خاک‌ها با رطوبت‌های معین نوبت به کالیبره نمودن دستگاه رسید. برای خاک با بافت سبک چهار نقطه درجه‌بندی با رطوبت‌های ۰، ۴، ۱۰، و ۲۰٪ در نظر گرفته شد. با توجه به دستورالعمل کاربری دستگاه اقدام به درجه‌بندی دستگاه شد. درجه‌بندی برای بافت متوسط در شش نقطه با رطوبت‌های ۰، ۴، ۱۰، ۲۰، ۲۵، و ۳۰٪ و برای بافت سنگین در هفت نقطه با رطوبت‌های ۰، ۴، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰، و ۴۰٪ (مشابه روش اشاره‌شده برای بافت سبک) صورت گرفت.

200ss-v و ICS 9001 نشان دادند که این حس‌گرها در تعیین رطوبت در بهترین حالت حدود ۶٪ خطا دارند. et al. (2013) Nolz با بررسی حس‌گرهای جدید Watermark با عنوان MPS-1 نشان دادند که در بافت‌های مختلف این حس‌گرها به‌طور متوسط ۱۴٪ خطا دارند. در همین راستا Jabro et al. (2020) نشان دادند که بدون واسنجی درست حس‌گرها در خاک نمی‌توان نتایج مناسبی از آن‌ها دریافت نمود و برنامه‌ریزی آبیاری انجام داد.

بر اساس آنچه گفته شد حس‌گرهای بین‌المللی همچون Watermark دارای خطای حدود ۶ تا ۱۴٪ در تعیین رطوبت خاک هستند. از این‌رو، در این پژوهش دستگاه آشکارساز جبهه رطوبتی خاک در موسسه تحقیقات خاک و آب ساخته و مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین دقت و کارایی آن در شرایط آب‌شور مورد بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- ساخت دستگاه

دستگاه آشکارساز رطوبتی در سال ۱۳۹۴ در موسسه تحقیقات خاک و آب مبتنی بر فرآیند اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از مقاومت الکتریکی ساخته شد (شکل ۱).



شکل ۱- دستگاه اندازه‌گیری جبهه رطوبتی آب در خاک  
Fig.1 Soil moisture front measurement instrument

اصول کار این دستگاه به بیان ساده بدین صورت می‌باشد که با ارسال یک جریان الکتریکی با ولتاژ مشخص از یک

جدول ۱ - خصوصیات خاک‌ها در این مطالعه

Table 1 Properties of the soils in this study

Pb Kg/m <sup>3</sup>	PWP %	FC %	EC ds/m	Sand %	Silt %	Clay %	کلاس	نوع بافت
1.44	7	12	1.5	72	18	10	sandy loam	سبک
1.36	13	18	1.9	45	35	20	Loam	متوسط
1.24	17	24	1.8	22	44	34	Clay Loam	سنگین

۳/۷ در سوراخ مرکز پلکسی جاگذاری و چسب کاری شد. همچنین از نفوذ سریع آب از جداره الکتروود و جداره گلدان جلوگیری شد. بررسی صحت کارکرد اجزاء مختلف دستگاه ساخته شده و عملکرد حسگرهای نصب شده در پروب، ثبت و نمایش داده‌های طبق برنامه ریزی و گزارش گیری در مراحل مختلف انجام و دستگاه مورد واسنجی قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه، خصوصاً حساسیت حسگرها در بافت‌های مختلف خاک و همچنین نسبت به شوری‌های متفاوت آب آبیاری، این فاز با سه بافت سبک (LT)، متوسط (MT) و سنگین (HT) در سه سطح شوری آب آبیاری شامل: غیر شور (S0)، (S1) ۵ و (S2) ۱۰ در شرایط گلدانی (سیلندر ستون خاک) و در شش تکرار انجام گرفت. سپس قرائت‌های انجام شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تطبیق داده شد و بر اساس شاخص‌های آماری میانگین ریشه مربعات خطای استاندارد (RMSE) (رابطه ۱)، میانگین ریشه مربعات خطای استاندارد نرمال شده (NRMSE) (رابطه ۲)، شاخص کارایی مدل (EF) (رابطه ۳)، شاخص توافق (d) (رابطه ۴)، شاخص انحراف از میانگین (MBE) (رابطه ۵) مورد ارزیابی قرار گرفت (Tafteh et al. 2018).

$$RSME = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2\right)} \quad (1)$$

$$NRSME = RMSE/O_{ave} \quad (2)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_{ave}| + |O_i - O_{ave}|)^2} \right] \quad (4)$$

برای ساخت گلدان (ستون خاک)، ورق پلی اتیلنی شفاف تهیه و با قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۷۰ cm به تعداد ۱۲ عدد بریده و لبه‌ها چسب کاری شدند. بر سطح گلدان‌ها به ترتیب علامت‌هایی از بالا به فاصله ۲۵، ۴۰، و ۵۵ cm گذاشته شد. علامت اول برای مشخص کردن سطح خاک درون گلدان و دو علامت دیگر برای مشخص کردن محل قرار گرفتن حسگرها می‌باشند. بر روی گلدان‌ها برش‌هایی به شکل مربع (۳ × ۳ cm) در فاصله ۴۰ و ۵۵ cm از بالا (مطابق با محل قرارگیری حسگرها) ایجاد شد. از این سوراخ‌ها برای برداشتن نمونه برای اندازه‌گیری درصد وزنی نیز استفاده شد.

تمام ۱۲ گلدان بعد از قرار دادن الکتروود در مرکز گلدان ابتدا با خاک سبک و پس از اتمام عملیات دوباره برای خاک متوسط و سپس برای خاک سنگین مورد استفاده قرار گرفتند. خاک در گلدان‌ها به صورت لایه‌های ۵ cm و اعمال ضربه با وزنه ۲ Kg از ارتفاع ۱۰ cm پر شدند. ارتفاع خاک درون گلدان‌ها ۴۵ cm تنظیم شد. وزنه به کاررفته دارای قطر ۱۹/۵ cm با یک سوراخ به قطر ۳۵ mm و دو میله آهنی به طول ۸۰ cm به صورت عمودی و متقارن به عنوان دسته به آن جوشکاری شده بود. برای توزیع یکنواخت آب در مرحله اضافه کردن آب به گلدان‌ها ابزار ویژه‌ای طراحی و ساخته شد. دو لوله به قطرهای ۱۵ و ۳/۷ cm به ارتفاع ۲۵ cm تهیه شد. یک دایره به قطر ۶ in و سوراخی به قطر ۳/۷ cm در مرکز از ورق پلکسی گلس به وسیله لیزر برش داده شد. تعدادی سوراخ با ترتیب متقارن و به صورت منظم به قطر ۳ mm بر روی ورق ایجاد شد. ورق پلکسی در پایین لوله ۶ in قرار داده و چسب کاری شد. لوله ۶ cm

همچنین از آنجا که انحراف معیار یک آماره، بیانگر دقت و منظم بودن یک آماره بوده و پراکندگی داده‌ها را حول میانگین نشان می‌دهد.

### ۳- یافته‌ها و بحث

#### ۳-۱- بررسی دقت تعیین جبهه رطوبتی

بررسی دقت دستگاه در تعیین زمان و مکان پیشروی آب انجام شد که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ - زمان رسیدن آب به اعماق ۱۵ و ۳۰ cm ثبت شده به وسیله دستگاه بر حسب دقیقه

Table 2 Time to reach the depths of 15 and 30 cm recorded by the apparatus in minutes

تکرار	1	2	3	4	5	6	میانگین
عمق خاک	15	15	15	15	15	15	30
خاک سبک	15	17	17	17	12	15	34.5
خاک متوسط	40	38	41	38	39	42	91.2
خاک سنگین	80	75	83	75	81	78	242

مقایسه دقت رطوبت اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه رطوبت‌سنج و رطوبت محاسبه شده به روش وزنی به کمک شاخص RMSE، NRMSE، و EF حاکی از این است که با سنگین‌تر شدن بافت خاک و همچنین با شورتر شدن خاک دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. همان‌طور که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد در بافت سبک، متوسط و سنگین در شرایط بدون شوری دستگاه با دقت متوسط ۷٪ خطای میانگین می‌تواند رطوبت خاک را تعیین نماید، در صورتی که در شوری ۵ dS/m در خاک سبک ۲۸٪ خطای اندازه‌گیری وجود دارد که در خاک متوسط و سنگین به‌طور متوسط به ۳۵٪ می‌رسد؛ بنابراین نتایج حاصل از دستگاه مورد قبول نمی‌باشد. همچنین در شوری ۱۰ dS/m در تمام بافت‌های خاک به‌طور متوسط ۳۵٪ خطا وجود دارد که نشان می‌دهد نتایج حاصل از دستگاه مورد قبول نمی‌باشد. Ghaemi and Rahmani (2014) نیز خطای حس‌گرهای رطوبتی را در بافت سنگین بین ۱۳ تا ۲۱٪ اعلام کردند که بازه خطای به‌دست‌آمده با گزارش ایشان منطبق است و نشان می‌دهد که این حس‌گرها نیاز به واسنجی و تفکیک بافت خاک دارند.

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

در روابط فوق،  $P_i$  مقدار برازش داده‌شده،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $O_{ave}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آن‌ها به صفر نزدیک شود.

همان‌طوری که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود در شش تکرار هر بافت به ترتیب در بافت سبک در عمق ۱۵ cm با میانگین ۱۵/۲ min و در عمق ۳۰ cm با میانگین ۳۴/۵ min زمان رسیدن آب به اعماق موردنظر به‌وسیله دستگاه ثبت شد. در بافت متوسط در عمق ۱۵ cm با میانگین ۴۰ min و در عمق ۳۰ cm با میانگین ۹۱/۲ min زمان رسیدن آب به اعماق موردنظر ثبت شد. در بافت سنگین در عمق ۱۵ cm با میانگین ۸۰/۳ min و در عمق ۳۰ cm با میانگین ۲۴۲/۳ min زمان رسیدن آب به اعماق موردنظر توسط دستگاه ثبت شد. با توجه به شفاف بودن دیواره ستون‌های خاک و مشاهده زمان رسیدن آب به اعماق موردنظر به‌صورت بصری، ثبت مشاهدات و قرائت دستگاه باهم تطابق کامل داشت. این موضوع نشان دهنده کارکرد مناسب دستگاه برای مقاصد ثبت سرعت حرکت آب در خاک خشک هست. به‌طور کلی مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های زمان رسیدن جبهه رطوبتی به اعماق ۱۵ و ۳۰ cm خاک در بافت‌های مختلف، توسط دستگاه نشان داد که در بافت‌های مختلف و شوری‌های متفاوت واکنش و حساسیت حسگرهای دستگاه به تغییرات ناگهانی رطوبت خاک دارای دقت بسیار بالا و قابل قبولی می‌باشد.



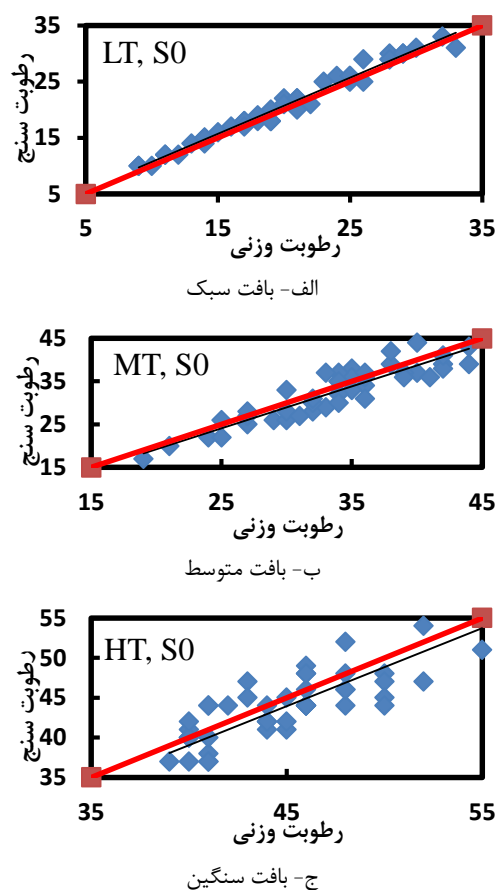
جدول ۳- مقایسه خطای مقادیر قرائت شده توسط دستگاه با مقادیر اندازه‌گیری شده

Table 3 Comparison of error values of readings by device with measured values

10 (dS/m)		5 (dS/m)		0 (dS/m)		شوری بافت
NRMSE	RMSE	NRMSE	RMSE	NRMSE	RMSE	
0.31	8.2	0.28	6.9	0.06	1.2	سبک (L)
0.37	11.9	0.41	11.7	0.09	2.8	متوسط (M)
0.34	13.1	0.31	12.5	0.06	2.8	سنگین (H)
0.34	11.09	0.33	10.38	0.07	2.3	میانگین

در شرایط غیر شور داشته باشد که این نتیجه با گزارش Rahmani and Ghaemi, 2014 منطبق است. به‌طور متوسط دستگاه ۰/۶۹٪ رطوبت را بیش‌تر برآورد نموده و دارای شاخص کارایی مدل بالایی (۰/۹۶) است. لذا استفاده از این دستگاه در این شرایط قابل توصیه و بسیار مناسب می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک و مقادیر قرائت‌شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج در شرایط غیر شور و خاک با بافت متوسط نسبت به خط یک‌به‌یک ارائه‌شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دستگاه رطوبت‌سنج دارای خطای ۹٪ بوده و به‌طور نسبی رطوبت را در شرایط غیرشور در بافت متوسط نیز خوب تخمین زده است که این نتیجه با گزارش Nolz et al. (2013) مطابقت دارد؛ بنابراین دستگاه برآوردی مناسبی از رطوبت وزنی خاک در شرایط غیرشور با بافت متوسط نیز دارد. به‌طور متوسط دستگاه ۱/۱٪ رطوبت را کم‌تر قرائت نموده و دارای شاخص کارایی مدل بالا (۰/۸۰) است؛ بنابراین استفاده از این دستگاه در شرایط غیر شور برای خاک متوسط قابل توصیه است.

مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت‌شده توسط دستگاه در شرایط آب آبیاری غیر شور و خاک سنگین نسبت به خط یک‌به‌یک نشان داده‌شده است. نتایج نشان داد که دستگاه با خطای ۶٪ توانسته است برآوردی مناسب از رطوبت وزنی خاک در شرایط غیر شور داشته باشد. به‌طور متوسط دستگاه ۱٪ رطوبت را کم‌تر برآورد نموده و دارای شاخص کارایی مدل متوسط (۰/۵) است. لذا استفاده از این دستگاه در این شرایط نیز قابل توصیه می‌باشد. ولی نسبت به دو بافت دیگر دارای خطای بیش‌تر و کارایی کم‌تر می‌باشد. در شکل (۳) مقادیر اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک با دستگاه در شرایط شوری ۵ dS/m و خاک سبک نسبت به خط یک‌به‌یک نشان داده‌شده است.

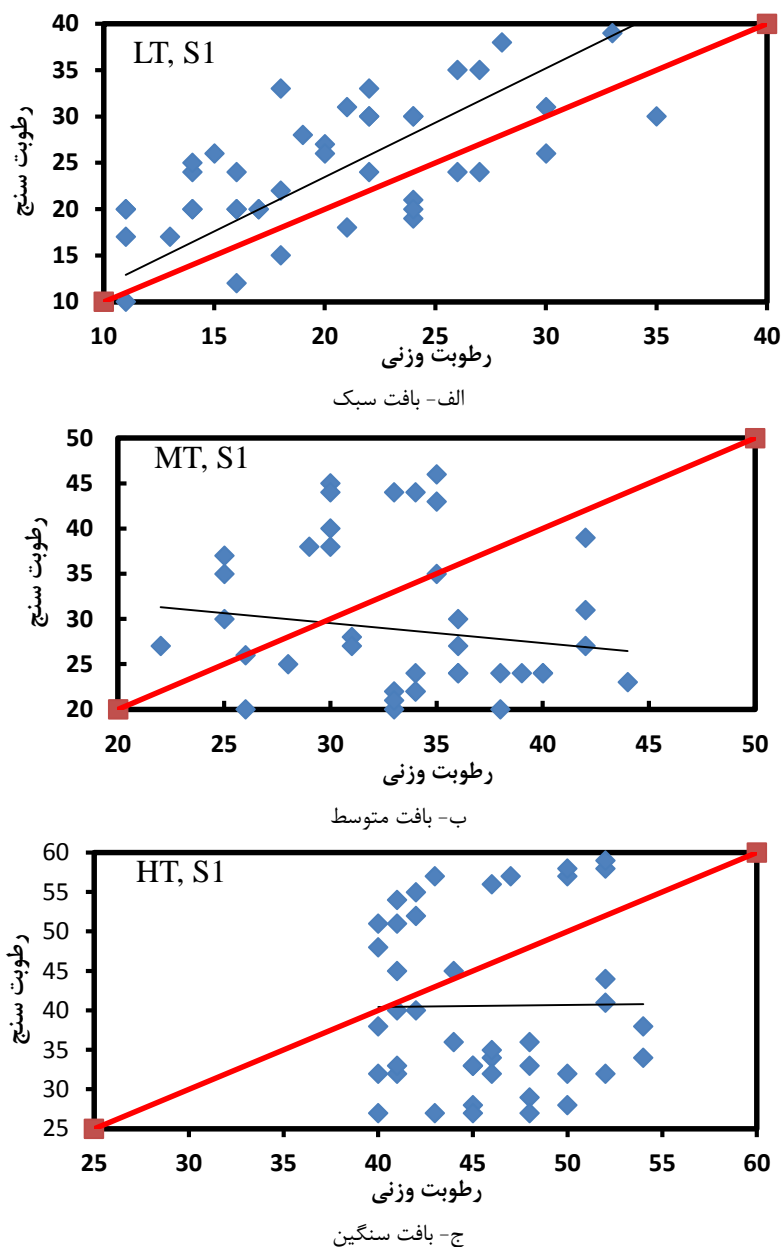


شکل ۲- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده و قرائت دستگاه رطوبت‌سنج در: الف- بافت سبک (LT)، ب- متوسط (MT) و ج- سنگین (HT) در شرایط غیر شور (S0)

Fig. 2 Comparison of measured humidity and moisture meter readings in a) light texture (LT), b) medium texture (MT) and c) heavy texture (HT) in non-saline (S0) conditions

### ۲-۲- بررسی دقت تعیین رطوبت خاک

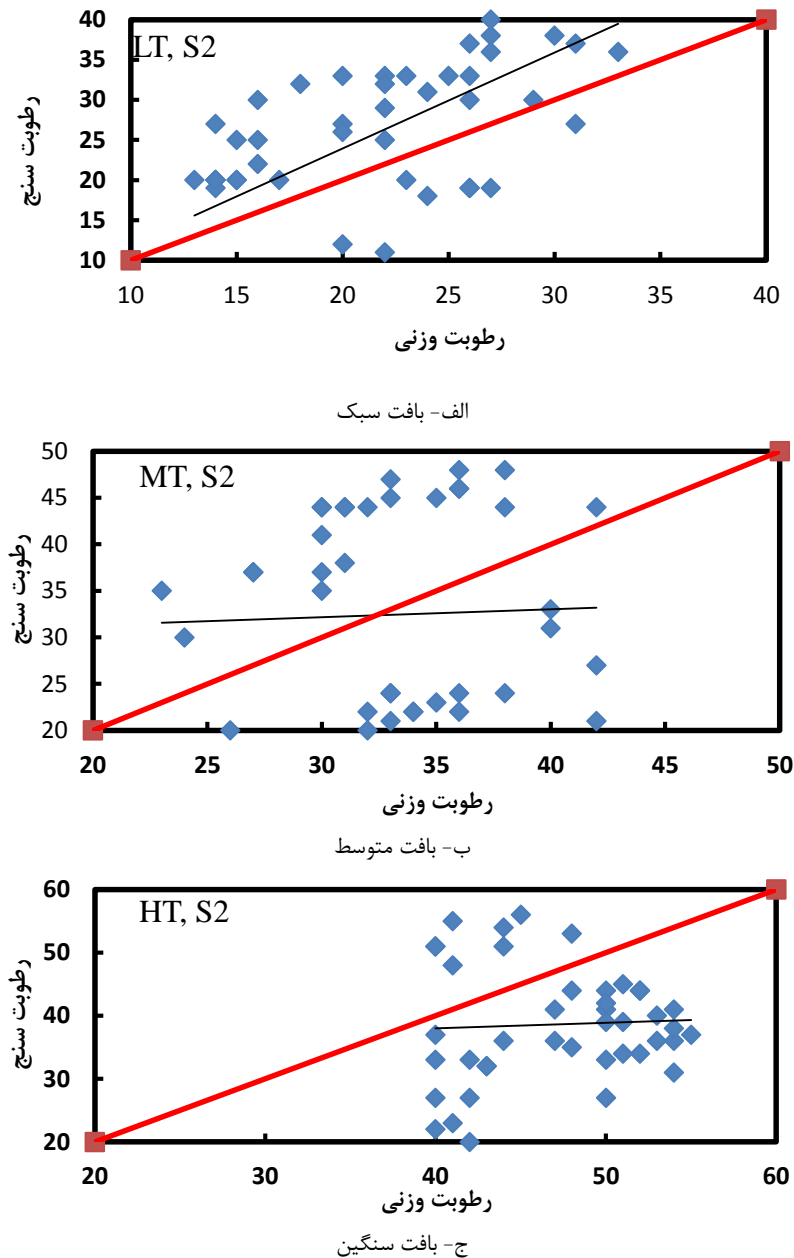
در شکل (۲) مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت‌شده توسط دستگاه در شرایط غیرشور و بافت‌های خاک مختلف نسبت به خط یک‌به‌یک ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای نرمال شده ۵/۱۷٪ توانسته است برآوردی مناسب از رطوبت وزنی خاک



شکل ۳- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده و قرائت دستگاه رطوبت‌سنج در: الف- بافت سبک (LT)، ب- متوسط (MT) و ج- سنگین (HT) در تیمار (S1)

Fig. 3 Comparison of measured humidity and moisture meter readings in: a) light texture (LT), b) medium texture (MT) and c) heavy texture (HT) in treatment (S1)

نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد که دستگاه با خطای ۰/۲۸٪ از قابلیت استناد بالایی نداشته و برآوردی مناسب از رطوبت وزنی خاک در این شرایط (شوری آب ۵ dS/m) ندارد. به‌طور متوسط دستگاه ۴۵/۴٪ رطوبت را بیش‌تر قرائت نموده و دارای شاخص کارایی مدل پایینی (۰/۰۷-) می‌باشد. لذا استفاده از این دستگاه در این شرایط قابل توصیه نبوده و در شرایط شور قابل‌اتکا نیست. همچنین مقادیر اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت شده از دستگاه در شرایط شوری ۵ dS/m و خاک متوسط نسبت به خط یک‌به‌یک مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای ۰/۴۱٪ نتایج مناسبی را از خود نشان نداده است و برآورد مناسبی از رطوبت وزنی خاک در شرایط شور ندارد. به‌طور متوسط دستگاه ۴/۵٪ رطوبت را کم‌تر قرائت نموده و دارای شاخص کارایی مدل پایین (۰/۷۵-) می‌باشد؛ بنابراین در شرایط خاک با بافت متوسط و شوری آب آبیاری ۵ dS/m دقت خود را از دست می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده و قرائت دستگاه رطوبت‌سنج در: الف- بافت سبک (LT)، ب- متوسط (MT) و ج- سنگین (HT) در تیمار (S2)

Fig. 5 Comparison of measured humidity and moisture meter readings in: a) light texture (L), b) medium texture (M) and c) heavy texture (H) in treatment (S2)

مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت وزنی خاک با دستگاه در شرایط شوری ۵ dS/m و بافت خاک سنگین در شکل (۴) نسبت به خط یک‌به‌یک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای ۳۱٪ قابلیت خود را جهت تعیین رطوبت خاک از دست داده و برآورد مناسبی از رطوبت وزنی خاک در شرایط شور ندارد. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه به‌طور متوسط ۵/۱٪ رطوبت را کم‌تر برآورد نموده و دارای شاخص کارایی مدل پایینی (۰/۳۸-) است. لذا در شرایط شوری آب آبیاری ۱۰ dS/m و خاک متوسط مقادیر

شور این دستگاه کاربردی نخواهد داشت. در شکل (۴) نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای ۳۱٪ قابلیت استناد بالایی نداشته و برآوردی مناسب از رطوبت وزنی خاک در شرایط شور ندارد. به‌طور متوسط دستگاه ۵٪ رطوبت را بیش‌تر برآورد نموده و دارای شاخص کارایی مدل پایینی (۰/۲۳-) است؛ بنابراین استفاده از این دستگاه در شرایط شور برای خاک سبک قابل توصیه نیست. در شرایط شوری آب آبیاری ۱۰ dS/m و خاک متوسط مقادیر

می‌باشد. همچنین عدم کارایی دستگاه در شوری‌های بالای  $5 \text{ dS/m}$  با نتایج Ghahreman et al. (2009) که گزارش نمودند در شوری‌های بالای  $6 \text{ dS/m}$  مقاومت الکتریکی کارایی خود را از دست داده و نیازمند واسنجی و اصلاح ضرایب تخمین می‌باشد کاملاً منطبق است همچنین پس از تصحیح تا  $15\%$  خطا وجود داشت که نتایج به دست آمده نیز بالا بودن خطا در شوری‌ها بالای  $5 \text{ dS/m}$  را تأیید می‌نماید. دلیل اصلی اختلال این سیستم کار کردن آن بر اساس مقاومت الکتریکی است و نمک وارد شده توسط آب آبیاری به شدت مقاومت خاک را تغییر می‌دهد. لذا پراکنش پالس‌های غلط به حدی بالا می‌رود که همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد رابطه معقولی نیز در این به هم ریختگی وجود ندارد تا بتوان آن را درجه‌بندی نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج نشان داد که در بافت‌های مختلف و شوری‌های متفاوت واکنش و حساسیت حسگرهای دستگاه به تغییرات ناگهانی رطوبت خاک ناشی از رسیدن جبهه رطوبتی به عمق معینی از خاک دارای دقت بسیار بالا و قابل قبولی است.

۲- قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک به وسیله دستگاه و مقایسه آن با اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک در هشت روز متوالی نشان داد در شرایط غیر شور در بافت خاک سبک، متوسط و سنگین، دستگاه عملکرد قابل قبولی دارد و خطایی حدود  $6\%$  تا  $9\%$  دارد.

۳- در شرایط شوری آب  $5 \text{ dS/m}$  و  $10 \text{ dS/m}$  به هیچ‌عنوان استفاده از دستگاه قابل توصیه نیست. لازم است جهت ارتقا و اصلاح پالس‌ها در مقامت خاک مطالعات بیش‌تری صورت پذیرد تا راهکاری برای پالایه کردن این اختلالات در شرایط شور حاصل شود.

اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج نسبت به خط یک‌به‌یک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای حدود  $37\%$  برآورد مناسبی از رطوبت وزنی خاک در شرایط شور نداشته و به‌طور متوسط  $73\%$  رطوبت را کم‌تر برآورد می‌نماید. بررسی شاخص کارایی مدل نیز نشان می‌دهد که کارایی دستگاه در این شرایط پایین ( $-0/15$ ) بوده و استفاده از این دستگاه در این شرایط غیرقابل قبول خواهد بود. در شرایط شوری آب آبیاری  $10 \text{ dS/m}$  و خاک متوسط مقادیر اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج نسبت به خط یک‌به‌یک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای حدود  $37\%$  برآورد مناسبی از رطوبت وزنی خاک در شرایط شور نداشته و به‌طور متوسط  $73\%$  رطوبت را کم‌تر برآورد می‌نماید. بررسی شاخص کارایی مدل نیز نشان می‌دهد که کارایی دستگاه در این شرایط پایین ( $-0/15$ ) بوده و استفاده از این دستگاه در این شرایط غیرقابل قبول خواهد بود. مقادیر اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک با مقادیر قرائت شده توسط دستگاه در شرایط شوری آب آبیاری حدود  $10 \text{ dS/m}$  و خاک سنگین نسبت به خط یک‌به‌یک مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه با خطای  $34\%$  برآوردی مناسبی از رطوبت وزنی خاک ندارد. لذا در شرایط شور به‌طور متوسط  $8/4\%$  رطوبت را کم‌تر برآورد می‌نماید. شاخص کارایی مدل پایین ( $-1/15$ ) نیز بر عدم قرائت مناسب این مدل در شرایط شور دلالت دارد.

با توجه به جمیع نتایج به دست آمده مشخص است که در تمامی بافت‌ها در شرایط غیر شور دستگاه عملکرد مناسبی داشته و می‌توان از آن در پایش تغییرات رطوبت خاک در شرایط غیر شور بهره برد. مقایسه نتایج این تحقیق در روش مقاومت الکتریکی مطابق با گزارش Davodi, (2002)

#### References

- Ali S., Ghosh N. C., Singh R. and Sethy B. K. (2013). Generalized explicit models for estimation of wetting front length and potential recharge. *Water Resour. Manage.*, 27, 2429–2445.
- Colman E. A. and Bodman G. B. (1944).
- Bravo Hernández and R. Cárdenas-Navarro. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 9, 3-11.
- Davodi M. H. (2002). Using capacity assessment and capability assessment, computer assessment capacity, third companion between Iran Geotechnical

- and Mexican University of Engineering, Tehran, Iran Soil Management and Preferred Programs. [https://www.civilica.com/Paper-ICGESM03-ICGESM03\\_028.html](https://www.civilica.com/Paper-ICGESM03-ICGESM03_028.html) [In Persian].
- Ebrahimi Pak N. A., Agdernejad A., Tafteh A. and Ahmadi M. (2019). Economical optimization of water distribution in Qazvin irrigation network under different water deficit conditions. *J. Environ. Sci. Tech.*, 21(1), 12-32 [In Persian].
- Ebrahimi Pak N. A. and Tafteh A. (2017). Determination of yield-water use function for sugar beet in Qazvin. *J. Sugar.*, 33(1), 47-63 [In Persian].
- Ghaemi A. and Rahmani Soghayeh, J. (2014). Investigation the performance of smart sensors as a new approach to determine soil moisture content. *Iran. J. Irrig. Drain.*, 8(1), 16-25 [In Persian].
- Gahreman B., Davari K., Astarayi A., Majidi. M. and Tamsaki S. (2009). Correction of gypsum block readings due to salinity effects for soil moisture content measurements. *J. Water Soil*, 23(1), 69-78.
- Jabro J. D., Stevens W. B., Iversen W. M., Allen B. L. and Sainju U. M. (2020). Irrigation scheduling based on wireless sensors output and soil-water characteristic curve in two soils. *Sensors*, 20, 1336, 2-11.
- Katyal A. K. and Kijne J. W. (1980). Prediction of the advancing wetting front in border strip irrigation. *Irrig. Sci.*, 1, 177-184.
- Khorami M. Alizadeh A. and Ansari H. (2013). Simulation of water movement and moisture redistribution under drip irrigation systems using hydrus 2D/3D. *J. Water Soil*, 27(4), 692-702.
- Leib B. G., Jabro J. D. and Matthews G. R. (2003). Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Sci.*, 168, 396-408.
- Lobit P., Stirzaker R., Bravo Hernández N. L. and Cárdenas-Navarro R. (2006). Using a wetting front detector to manage drip irrigation in strawberry. 6, 138-152. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/USING-A-WETTING-FRONT-DETECTOR-TO-MANAGE-DRIP-IN-Lobit-Stirzaker/866a01c316f17019fce061f4a9b6330386fe554f>.
- Malek K. and Peters R. T. (2011). Wetting pattern models for drip irrigation new empirical mode. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137(8), 530-536.
- Moncef H., Hedi D., Jelloul B. and Mohamed M. (2002). Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrig. Drain.*, 51, 347-360.
- Nolz R., Kammerer G. and Cepuder P. (2013). Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agri. Wat. Manage.*, 116, 12-20.
- Rahmani S. J. and Ghaemi A. A. (2014). Evaluation and comparison of smart soil moisture sensor performance with weight method in micro irrigation. The first National Conference on Water Crisis, Esfahan, Khorasgan Eslamic Azad University [In Persian].
- Tafteh A., Emdad M. E. And Ghalebi S. (2018). Determination of the best situation of border irrigation for increasing application Efficiency using SRFR model. *J. Irrig. Wat. Eng.*, 8(30), 200-210 [In Persian].
- Yao W. W., Ma X. Y., Li J. and Parkes M. (2011). Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.*, 29, 331-339.
- Zare Abyaneh H., Khosraie A., Ebrahimi Pak N. A., Tafteh A. and Jozi M. (2020). Selecting the optimal model of water infiltration into the soil (Case study: Jahad Nasr lands of Khuzestan province). *Water Irrig. Manage.*, 9(2), 291-304 [In Persian].

## Evaluating Automatic Detector of Wetting Front for Monitoring Water Movement in Soil

Arash Tafteh<sup>1\*</sup>, Saeed Ghalebi<sup>2</sup> and Sina Mallah<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Assist. Professor, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

<sup>2</sup>Lecturer, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

<sup>3</sup>Researcher, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

\*Corresponding author: [arash\\_tafteh@yahoo.com](mailto:arash_tafteh@yahoo.com)

### Original Paper

Received: February 05, 2020

Revised: March 18, 2020

Accepted: April 05, 2020

### Abstract

In order to increase water productivity at farm level and smart irrigation, appropriate systems are essential so that can measure the moisture content in a proper and acceptable accuracy. In this regard, the wetting front device was made at the Soil and Water Research Institute and was evaluated in 3 textures: light, medium, and heavy at 3 levels of water salinity: no salinity ( $S_0$ ), 5( $S_1$ ), and 10 ( $S_2$ ) dS/m. Then, to evaluate and measure the device in the mentioned conditions, it was tried to simultaneously measure the device numbers and soil sampling at certain depths at intervals of 24 h. After collecting data on the time of arrival of the moisture front to the soil depth and changes in soil moisture, statistical analysis was performed by soil sampling and soil detection device. The results showed that the device reacts in different textures and salinities. Moreover, the sensitivity of its sensors to sudden changes in soil moisture due to the arrival of the moisture front to a certain depth of soil has acceptable accuracy. Statistical results showed that the device has about 6 to 9% normal error in determining soil moisture in non-saline conditions, 28 to 41% in terms of using water with salinity of 5 dS/m, and 31-37% when a water with salinity of 10 dS/m was used. The model efficiency index also showed that the device is very useful in non-saline conditions with an average efficiency of 0.75 and is not recommended in saline conditions with negative efficiency index.

**Keywords:** Irrigation Water Salinity; Soil Depth; Soil Texture; System; Water Content.