علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۰، شماره‌ی۴، زمستان ۹۶، ص. ۳۰-۱۷

تأثیر بافت خاک، شوری و نسبت جذب سدیم آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک بوسیله‌ی دستگاه تتاپروب

حامد بلابادی[۱]، پیمان افراسیاب[۲*]، معصومه دلبری[۳] و سعید قائدی[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل.
۲*- نویسنده مسئول، دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک داشگاه زابل. p_afrasiab@yahoo.com
۳- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل.
۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۶

چکیده

اندازه‌گیری رطوبت خاک برای مدیریت بهتر سیستم‌های آبیاری بسیار مهم است. یکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک، استفاده از دستگاه تتاپروب می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بافت خاک، و شوری (EC) و نسبت جذب سدیم آب آبیاری (SAR) آب آبیاری بر دقت دستگاه تتاپروب بود. برای این منظور آزمایشی به‌صورت گلدانی و در قالب طرح فاکتوریل، با سه تیمار و سه تکرار شامل بافت خاک در سه سطح (لوم‌سیلتی، لوم و لوم‌شنی)، EC آب آبیاری در چهار سطح (۰/۵، ۳، ٦ و ۹ دسی زیمنس بر متر) و SAR آب آبیاری در چهار سطح (۲، ۸، ١٤ و ۲۰) انجام شد. گلدان‌ها پس از آماده‌سازی، تا حد اشباع آبیاری شدند. پس از آن میزان رطوبت خاک درمحدوده نقطه اشباع تا نقطه پژمردگی دائم، به روش وزنی و با استفاده از دستگاه تتاپروب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که هر سه عامل بافت، EC و SAR، از لحاظ آماری تأثیر معنی‌داری بر قرائت دستگاه تتاپروب دارد. میانگین مقادیر مجموع مربعات خطای تمامی روش‌های کالیبراسیونی نشان داد که دستگاه در بافت لوم‌شنی دارای دقت بیشتری ($RMSE=۰/۰٦\ cm^3/cm^3$) نسبت به بافت لومی ($RMSE=۰/۰۸۷\ cm^3/cm^3$) 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 ٦ دسی‌زیمنس بر متر، باعث افزایش دقت دستگاه شد. از بین توابع کالیبراسیونی، روش غیرخطی ویژه در هر سه بافت، از دقت به‌نسبت بالایی در برآورد رطوبت برخوردار بود ($RMSE=۰/۰۵۲\ cm^3/cm^3$). روش روت و همکاران بهترین روش در بافت لوم‌سیلتی ($RMSE=۰/۰۵۵\ cm^3/cm^3$) شناخته شد.

کلید واژه‌ها: رطوبت خاک، توابع کالیبراسیون، ثابت دی الکتریک، کیفیت آب، روش وزنی.

مقدمه

آگاهی از میزان رطوبت خاک و درصد آب قابل استفاده توسط گیاه، از مهم‌ترین موضوعات مورد بحث در روابط آب، خاک و گیاه است. روش‌های مختلفی برای تعیین رطوبت خاک وجود دارند که پرکاربردترین و دقیق‌ترین آن‌ها روش وزنی است. در سال‌های اخیر، روش‌ها و وسایل دیگری نیز برای این منظور توسعه یافته‌اند که یکی از معروف‌ترین آن‌ها روش اندازه‌گیری رطوبت حجمی با استفاده از دستگاه تتاپروب می‌باشد. اساس اندازه‌گیری رطوبت در دستگاه تتاپروب بر پایه‌ی تغییرات ثابت دی الکتریک خاک می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، دانشمندان به رابطه‌ی بین ثابت دی الکتریک مواد و رطوبت پی بردند. ثابت دی الکتریک معیاری برای تمایل مولکول‌های ماده جهت آرایش خود در هنگام قرارگرفتن در میدان نیروهای الکترواستاتیک می‌باشد (دوستی و بشارت، ۱۳۸۵). ویژگی خاص آب سبب گردیده است تا ثابت دی الکتریک آن نسبت به سایر مواد بسیار بالاتر باشد. لذا می‌توان گفت ثابت دی الکتریک خاک به‌طور عمده توسط مقدار آب آن کنترل می‌شود. یعنی با افزایش رطوبت، ثابت دی الکتریک افزایش و با کاهش آن، ثابت دی الکتریک کاهش می‌یابد (برزگر، ۱۳۸۷). تاپ و همکاران[1] (۱۹۸۰)، با توجه به این نکته که ثابت دی الکتریک خاک تحت کنترل آب خاک می‌باشد، با استفاده از دستگاه الکترونیکی که برای مصارف صنعتی تهیه شده بود، توانستند رطوبت خاک را اندازه‌گیری کنند و رابطه‌ای معروف به مدل تاپ و همکاران را ارائه دهند. روث و همکاران[2] (۱۹۹۰)، مدل دیگری را در این زمینه مطرح کردند که در آن از ثابت دی الکتریک خاک، آب و هوا استفاده شده است. این مدل که مدل ترکیبی نیز نام دارد، بر پایه‌ی خواص فیزیکی خاک استوار می‌باشد و لذا از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است (بیرچک و همکاران[3]، ۱۹۷۴؛ دابسون و همکاران[4]، ۱۹۸؛ فریدمن[5]، ۱۹۹۸ و روث و همکاران، ۱۹۹۰).

گرچه استفاده از دستگاه تتاپروب دارای مزایای بسیاری نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری رطوبت می‌باشد، اما با توجه به

1. Topp *et al.*
2. Roth *et al.*
3- Birchak *et al.*
4- Dobson *et al.*
5- Friedman

تحقیقاتی که در اکثر نقاط جهان صورت گرفته است، مشخص شده که تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و در مجموع، هرآنچه بر ثابت دی الکتریک خاک تأثیر داشته باشد، باعث ایجاد خطا در دقت اندازه‌گیری رطوبت با این دستگاه می‌شود. از میان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع بافت، میزان رس موجود در خاک و هدایت الکتریکی (EC) ، سه فاکتور اصلی و تأثیرگذار بر کالیبراسیون دستگاه تتاپروب می‌باشند (سارانی و افراسیاب[1]، ۲۰۱۲). از سوی دیگر به‌نظر می‌رسد با توجه به تأثیرات سدیم بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و درنتیجه مقدار آب موجود در خاک، این عامل نیز از عوامل مؤثر بر کالیبراسیون این دستگاه باشد. مقدار زیاد سدیم موجود در آب، باعث شکسته شدن خاکدانه‌ها، تورم رس‌ها و توسعه‌ی لایه‌ی دوگانه‌ی پخشیده می‌شود که درنتیجه، ساختمان خاک تخریب می‌شود و منافذ بزرگ خاک به منافذ کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. در چنین شرایطی، ذرات خاک بیشتر در معرض جذب آب قرارگرفته و ذرات رس پراکنده‌شده همراه با جریان آب در خاک حرکت کرده و در منافذ کوچک خاک ته‌نشین می‌شوند. به‌همین دلیل با افزایش نسبت جذب سدیم آب آبیاری (SAR)، قابلیت جذب آب در خاک افزایش یافته، و در عوض سرعت حرکت آب در خاک کند می‌شود (خزاعی و همکاران، ۱۳۹۲). لیاقت و همکاران به این نتیجه رسیدند که علاوه بر میزان آب موجود در خاک، ثابت دی الکتریک خاک به مقدار الکترولیت‌های محلول و میزان رس خاک بستگی دارد (لیاقت و همکاران[2]، ۱۹۹۸). علیزاده و همکاران با بررسی اثر بافت خاک و تراکم بر دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه تتاپروب به این نتیجه رسیدند که این دستگاه در خاک‌های شنی دارای بیشترین دقت است و با افزایش میزان رس خاک، از دقت دستگاه کاسته می‌شود. همچنین بیان کردند که اثر تراکم در خاک‌های شنی ناچیز بوده و با سنگین شدن بافت خاک، میزان تأثیر تراکم بر دقت این دستگاه افزایش می‌یابد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷). کوش و همکاران بیان نمودند که تتاپروب در اکثر خاک‌ها، مقدار رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و لذا برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، کالیبراسیون ویژه برای کاهش خطا ضروری است (کوش و همکاران[3]، ۲۰۰۵). لوکانو و ساویج بیان نمودند که در خاک لوم‌رسی، بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و رطوبت برآورد شده با استفاده از تتاپروب رابطه‌ای قوی وجود دارد (لوکان و ساواج[4]، ۲۰۰۶). کارگاس و کرکیدز به این نتیجه رسیدند که منحنی‌های کالیبراسیونی که سازندگان دستگاه تتاپروب ارائه کرده‌اند، در بیشتر موارد، از حدود پیش‌بینی شده برای رطوبت منحرف شده و کالیبراسیون ویژه برای هر خاک ضروری به‌نظر می‌رسد (کارگاس و کرکیدس[5]، ۲۰۰۸). مجموع تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی آب آبیاری، SAR آب آبیاری و بافت خاک، بر ثابت دی الکتریک خاک، قابلیت جذب آب در خاک و در نتیجه ظرفیت نگهداشت آب در خاک تأثیرگذارند. از طرفی در مورد کالیبراسیون دستگاه تتاپروب به‌ویژه براساس تغییرات توأمان هدایت الکتریکی آب آبیاری، SAR آب آبیاری و بافت خاک تحقیقات کمی صورت گرفته است. لذا هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر این سه عامل بر دقت اندازه‌گیری رطوبت به‌وسیله‌ی دستگاه تتاپروب در سه بافت مختلف و ارائه‌ی توابع کالیبراسیونی مناسب، به‌منظور بالابردن دقت اندازه‌گیری این دستگاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی آب و خاک دانشگاه زابل انجام گرفت. آزمایشات در قالب طرح فاکتوریل، با سه تیمار و در سه تکرار انجام شد. برای انجام آزمایش، سه نوع بافت خاک مختلف از اراضی زراعی پردیس دانشگاه زابل انتخاب شد. جدول (۱) مشخصات این خاک‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به چگالی ظاهری خاک‌های انتخاب شده، مقدار مشخصی از هر بافت خاک داخل ۴۸ گلدان به حجم ۱۱۶۰ میلی‌لیتر ریخته شد که در مجموع، ۱۴۴ گلدان این آزمایش را تشکیل داد.

مشخصات آب آبیاری

تیمارهای کیفیت آب شامل مقادیر شوری به‌ترتیب برابر با ۰/۵، ۳، ۶ و۹ دسی زیمنس بر متر و مقادیر SAR به‌ترتیب برابر با ۲، ۸، ۱۴ و۲۰ بودند که در مجموع ۱۶ آب با کیفیت متفاوت را برای این آزمایش تشکیل دادند. برای تهیه‌ی تیمارهای آبیاری از نمک‌های سدیم کلریدو کلسیم کلریدبه نسبت‌های مختلف استفاده شد. مقدار نمک برای تهیه‌ی هر تیمار از حل همزمان دو معادله و دو مجهول زیر به‌دست آمد (ختار و همکاران، ۱۳۹۱):

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{2}}} \qquad (۱)$$

$$[Na^+] + [Ca^{2+}] = 10EC \qquad (۲)$$

که در این فرمول‌ها، $[Na^+]$ و $[Ca^{2+}]$به‌ترتیب غلظت یون‌های سدیم و کلسیم بر حسب میلی‌اکی‌والان در لیتر، SAR و EC، رسانایی الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند. گلدان‌ها توسط آب با کیفیت‌های مختلف تا حد اشباع آبیاری شدند. پس از آبیاری گلدان‌ها، عمل اندازه‌گیری رطوبت به مدت ۳۶ روز با دو روش وزنی و با استفاده از دستگاه تتاپروب انجام شد. پس از هر بار اندازه‌گیری رطوبت، به‌منظور کاهش اثر تبخیر، روی گلدان‌ها با نایلون‌های پلاستیکی پوشانده شد. اندازه‌گیری‌ها تا رسیدن رطوبت خاک به نقطه پژمردگی دائم ادامه یافت.

1- Sarani and Afrasiab
2- Liaghat *et al.*
3- Cosh *et al.*
4- Lukanu and Savage
5- Kargas and Kerkides

جدول ۱- مشخصات بافت‌های مورد آزمایش

بافت خاک	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	چگالی ظاهری	ظرفیت زراعی	نقطه‌ی پژمردگی	شوری عصاره اشباع (Ds/m)
لوم سیلتی	۲۸/۸۰	۵۱/۸۸	۱۹/۳۲	۱/۴۰	۲۹/۸۰	۱۳/۱۰	۱/۱۸
لوم	۴۰/۰۴	۳۶/۸۸	۲۳/۰۸	۱/۴۳	۲۹/۲۰	۱۵/۳۰	۱/۲۵
لوم شنی	۶۳	۱۷/۸۸	۱۹/۱۲	۱/۴۹	۲۳	۱۳/۲۰	۱/۲۰

اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه تتاپروب

در این پژوهش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، از دستگاه تتاپروب استفاده گردید (میلر و گاسکین[1]، ۱۹۷۷). با قرار دادن میله‌های این دستگاه در داخل خاک و اتصال آن به قسمت ثبت داده و با تأمین انرژی ۵ تا ۱۵ ولت برق مستقیم با شدت جریان ۱۹ آمپر، رطوبت حجمی خاک در مدت ۱ تا ۵ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. دقت دستگاه تتاپروب ±۰/۰۲ مترمکعب بر مترمکعب است. در خاک‌هایی با شوری ۱۰۰ زیمنس بر متر، دقت بالایی داشته و می‌توان آن را تا شوری ۲۰۰۰ زیمنس بر متر واسنجی کرد (جعفری حقیقی، ۱۳۸۲). اساس اندازه‌گیری رطوبت در دستگاه تتاپروب بر پایه‌ی تغییرات دی الکتریک می‌باشد. این تغییرات قابل تبدیل به ولتاژ و رطوبت حجمی می‌باشد. سیگنال‌های تولید شده توسط این دستگاه، دارای فرکانس‌های ارسالی ۱۰۰ مگاهرتز هستند که به‌وسیله‌ی یک خط انتقال استوانه‌ای و از طریق ۴ میله به خاک انتقال داده می‌شوند. وقتی این سیگنال‌ها وارد خاک می‌شوند، محتوای دی الکتریک خاک و هدایت یونی خاک از جمله مقاومت‌هایی هستند که در سر راه این سیگنال‌ها قرار می‌گیرند. به‌علت اینکه در سیگنال‌های ارسالی با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز، هدایت یونی حداقل است، بنابراین تنها مقاومت موجود در سر راه این سیگنال‌ها، رطوبت خاک می‌باشد و چون ثابت دی الکتریک آب ۸۱، خاک ۴ و هوا ۱ است، بنابراین مقدار دی الکتریک خاک به‌شدت به مقدار رطوبت وابسته است (سارانی و افراسیاب، ۲۰۱۲).

اگر بین مقاومت میله‌ها با مقاومت خطوط انتقالی درون پروب تفاوت ایجاد شود، بخشی از سیگنال‌های ایجاد شده توسط دستگاه از محل اتصال میله‌های پروب از بدنه به داخل دستگاه باز می‌گردد. سیگنال‌های بازگشتی و ساطع شده باعث ایجاد اختلاف پتانسیل ثابتی در خط انتقال می‌شود و تغییرات ولتاژ توسط صفحه‌ی نمایش‌دهنده‌ی داده‌ها ثبت می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ مقاومت مربوطه، می‌توان از طریق روابط زیر ثابت دی الکتریک و مقدار رطوبت حجمی را تعیین کرد (گاسکین و میلر[2]، ۱۹۹۶؛ میلر و گاسکین[3]، ۱۹۷۷).

$$\theta = \frac{(\sqrt{\varepsilon}-\alpha_0)}{\alpha_1} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، α_0 و α_1 ثابت‌های وابسته به نوع خاک می‌باشند. رابطه‌ی بین ولتاژ خروجی سنجنده (V) و ریشه‌ی دوم ثابت دی الکتریک ($\sqrt{\varepsilon}$) از طریق روابط ۴ یا ۵ قابل محاسبه است:

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.07 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3 \qquad (۴)$$

$$\sqrt{\varepsilon} = 1.1 + 4.44V \qquad (۵)$$

کالیبراسیون ویژه‌ی دستگاه

برای واسنجی دستگاه تتاپروب، ابتدا یک نمونه خاک مرطوب انتخاب و با نصب دستگاه، ولتاژ اندازه‌گیری شده (V_W) قرائت شده و ($\sqrt{\varepsilon_W}$) با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود. سپس نمونه‌ی خاک به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شده تا خشک گردد. ضمن محاسبه‌ی رطوبت حجمی نمونه (θ_W) ، ولتاژ ورودی خاک خشک (V_0) نیز محاسبه شده و با استفاده از روابط ۴ و ۵، $\sqrt{\varepsilon_0}$ محاسبه می‌گردد.
در مرحله‌ی بعد با جایگزینی $\theta = 0$ در رابطه‌ی ۳، $\alpha_0 = \sqrt{\varepsilon_0}$ از روی نمونه‌ی خاک کاملا خشک به‌دست می‌آید.
در نهایت با جایگذاری $\sqrt{\varepsilon_W}$ و θ_W در رابطه‌ی ۳، α_1 محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_1 = \frac{(\sqrt{\varepsilon_w}-\sqrt{\varepsilon_0})}{\theta_v} \qquad (۶)$$

در نهایت، با مشخص شدن α_0 و α_1، از تلفیق رابطه‌ی ۱، با روابط ۲ و ۳، می‌توان رطوبت کالیبره‌شده را برای هر نقطه‌ی رطوبتی به‌دست آورد.

$$\theta_V = \frac{[(1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3)-\alpha_0]}{\alpha_1} \qquad (۷)$$

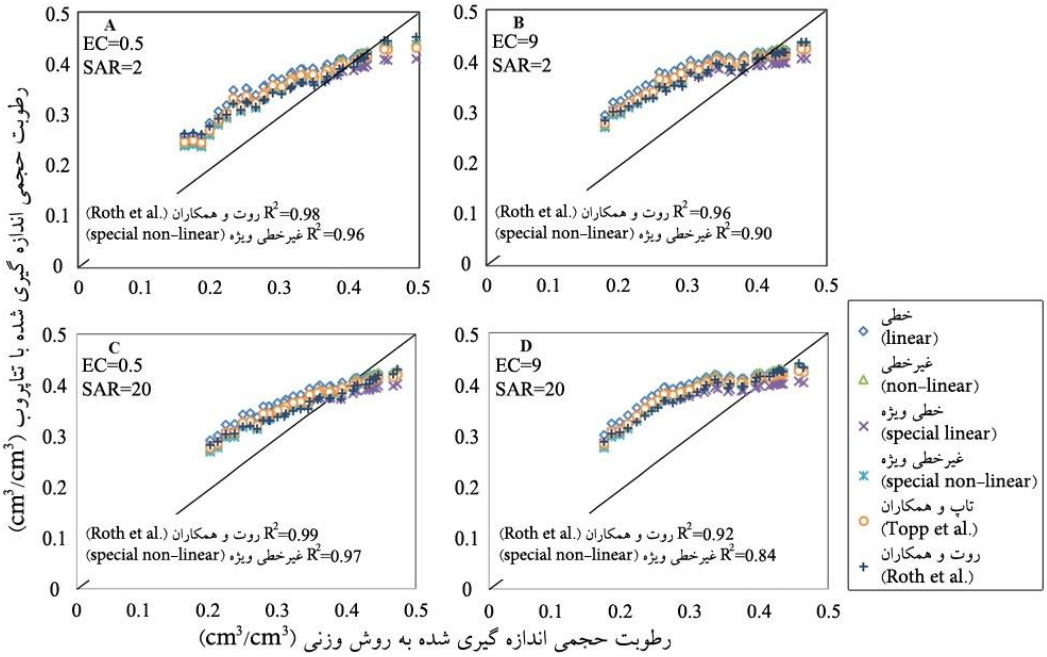
$$\theta_V = \frac{[(1.1+4.44V)-\alpha_0]}{\alpha_1} \qquad (۸)$$

رابطه‌ی ۷، حالت غیرخطی ویژه و رابطه‌ی ۸، حالت خطی ویژه است.

1- Miller and Gaskin
2- Gaskin and Miller
3- Miller and Gaskin

جدول۲- توابع کالیبراسیونی ارائه‌شده برای خاک‌های معدنی

منبع	تابع
روش خطی سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	θ=-0.19+0.119 (1.1+4.44V)
روش غیرخطی سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	θ=-0.19+0.119 (1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3)
روش تاپ و همکاران (۱۹۸۰)	θ=-0.053+0.0292ε-0.00055ε^2+0.0000043ε^3
روش روت و همکاران (۱۹۹۰)	θ=-0.0728+0.0448ε+0.00195ε^2+0.0000361ε^3



شکل۱- مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه تتاپروب در بافت لوم‌سیلتی تحت شرایط مختلف شوری و سدیمی

کالیبراسیون دستگاه

جدول (۲)، توابع کالیبراسیونی مختلفی که در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، برای بیان همسانی مدل‌های تخمین رطوبت با روش مستقیم اندازه‌گیری، از ریشه‌ی میانگین مربعات خطا مطابق رابطه‌ی زیر استفاده شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین از ضریب تبیین و خطای نسبی نیز برای این منظور استفاده شده است (کشاورزی و همکاران، ۱۳۹۲):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^{\,2}}{n}} \qquad (۹)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\theta_{TP} - \theta_V| / n}{\overline{\theta_V}} \times 100 \qquad (۱۰)$$

در روابط بالا، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، RE خطای نسبی، d_i اختلاف بین رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده به‌وسیله‌ی تتاپروب، n تعداد کل نمونه‌ها، θ_V رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی، $\overline{\theta_V}$ متوسط رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) و θ_{TP} رطوبت اندازه‌گیری شده با تتاپروب است.

نتایج و بحث

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و درصد خطای نسبی مربوط به توابع کالیبراسیونی مختلف دستگاه تتاپروب، تحت شرایط مختلف شوری و سدیم آب آبیاری در بافت‌های متفاوت در جداول (۳) تا (۵) ارائه شده است. همانگونه که در جدول (۳) قابل ملاحظه است، در بافت لوم‌سیلتی، در تمامی توابع کالیبراسیونی ارائه شده، افزایش شوری آب آبیاری موجب افزایش مقدار جذر میانگین مربعات خطاو خطای نسبی در این توابع شده است. شوری خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک می‌شود و در نتیجه‌ی آن، زمان برگشت امواج طولانی‌تر شده و باعث افزایش مقدار ضریب دی الکتریک در خاک شده، در نتیجه منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه می‌شود (نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰؛ هوک و لیوین‌سون[1]،

1- Hook, W.R. and Livingston

۱۹۹۵). در این بافت، افزایش SAR آب آبیاری (از ۲ به ۲۰) در شوری‌های کم (هدایت الکتریکی ۰/۵، ۳ و ۶ دسی‌زیمنس برمتر) موجب کاهش خطای برآورد و در نتیجه افزایش دقت قرائت دستگاه و در شوری‌های زیاد (هدایت الکتریکی ۹ دسی‌زیمنس برمتر)، موجب کاهش دقت قرائت دستگاه شده است. به‌عنوان مثال در روش غیرخطی ویژه و در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس برمتر، با افزایش SAR آب آبیاری از ۲ به ۲۰، مقدار جذر میانگین مربعات خطاو خطای نسبی به‌ترتیب از ۰/۰۵۰ و ۱۲/۶۹درصد به ۰/۰۴۵ و ۱۰/۷۹درصد کاهش یافته است، اما در شوری ۹ دسی‌زیمنس برمتر، این دو از ۰/۰۶۶ و ۱۶/۵۵ درصد به ۰/۰۷۷ و ۱۹/۲۰ درصد افزایش یافته است. در مقایسه‌ی روش‌های مختلف کالیبراسیونی در بافت لوم‌سیلتی، همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، به‌ترتیب روش‌های روت و همکاران و غیرخطی ویژه دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطاو خطای نسبی و بیشترین دقت در برآورد رطوبت هستند. تأثیر شوری و SAR بر دقت دستگاه تتاپروب در بافت لوم‌سیلتی در شکل (۱) به وضوح قابل رؤیت است.

همان‌گونه که در شکل (۱) (A و C) مشاهده می‌شود، در بافت لوم‌سیلتی، افزایش SAR در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس برمتر، موجب افزایش ضریب تبیین در دو روش روت و همکاران و غیرخطی ویژه شده است اما افزایش SAR در شوری ۹ دسی‌زیمنس برمتر (B و D)، موجب کاهش ضریب تبیین و درنتیجه کاهش دقت دستگاه شده است. ازطرفی در SAR ثابت، افزایش شوری از ۰/۵ به ۹ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش چشم‌گیر ضریب تبیین و افزایش خطای قرائت دستگاه در بافت لوم‌سیلتی شده است.

جدول ۳- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تتاپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم‌سیلتی

کیفیت آب		خطی		غیرخطی		خطی ویژه		غیرخطی ویژه		تاپ و همکاران		روت و همکاران	
EC (dS/m)	SAR	RMSE	RE	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)
۰/۵	۲	۰/۰۶۷	۱۷/۲۸	۰/۰۵۴	۱۳/۶۰	۰/۰۵۶	۱۴/۶۹	۰/۰۵	۱۲/۶۹	۰/۰۵۶	۱۴/۳۷	۰/۰۵۲	۱۲/۴۵
	۸	۰/۰۵۷	۱۴/۰۸	۰/۰۴۴	۱۰/۶۲	۰/۰۴۸	۱۲/۴۸	۰/۰۴۱	۹/۹۱	۰/۰۴۷	۱۱/۶۵	۰/۰۴۳	۹/۷۶
	۱۴	۰/۰۶۳	۱۵/۲۰	۰/۰۵۱	۱۲/۰۶	۰/۰۵۷	۱۳/۶۴	۰/۰۴۹	۱۱/۵۷	۰/۰۵۵	۱۳/۰۲	۰/۰۴۸	۱۱/۰۹
	۲۰	۰/۰۵۸	۱۳/۸۲	۰/۰۴۷	۱۱/۱۰	۰/۰۵۳	۱۲/۹۰	۰/۰۴۵	۱۰/۷۹	۰/۰۵۰	۱۲/۱۱	۰/۰۴۵	۱۰/۴۸
۳	۲	۰/۰۶۹	۱۸/۱۱	۰/۰۵۷	۱۴/۸۹	۰/۰۶۰	۱۶/۰۶	۰/۰۵۴	۱۴/۲۵	۰/۰۶۰	۱۵/۷۰	۰/۰۵۵	۱۴/۲۳
	۸	۰/۰۶۵	۱۵/۶۷	۰/۰۵۳	۱۲/۸۸	۰/۰۵۷	۱۴/۴۱	۰/۰۵۱	۱۲/۵۲	۰/۰۵۶	۱۳/۸۴	۰/۰۴۹	۱۲/۰۰
	۱۴	۰/۰۶۲	۱۴/۴۲	۰/۰۵۱	۱۱/۷۰	۰/۰۵۵	۱۳/۵۳	۰/۰۴۸	۱۱/۴۱	۰/۰۵۴	۱۲/۶۹	۰/۰۴۷	۱۱/۱۱
	۲۰	۰/۰۵۹	۱۳/۹۹	۰/۰۴۷	۱۱/۳۱	۰/۰۵۱	۱۲/۷۴	۰/۰۴۵	۱۰/۹۸	۰/۰۵۰	۱۲/۲۰	۰/۰۴۴	۱۰/۶۲
۶	۲	۰/۰۷۷	۱۹/۴۴	۰/۰۶۵	۱۶/۵۳	۰/۰۶۷	۱۷/۵۹	۰/۰۶۲	۱۶/۰۰	۰/۰۶۸	۱۷/۳۶	۰/۰۶۱	۱۵/۵۰
	۸	۰/۰۷۵	۱۸/۳۴	۰/۰۶۳	۱۵/۵۴	۰/۰۶۶	۱۶/۸۰	۰/۰۶۱	۱۵/۰۳	۰/۰۶۶	۱۶/۳۳	۰/۰۵۹	۱۴/۵۳
	۱۴	۰/۰۶۹	۱۶/۵۵	۰/۰۵۸	۱۳/۹۱	۰/۰۶۰	۱۵/۱۵	۰/۰۵۵	۱۳/۴۷	۰/۰۶۱	۱۴/۷۱	۰/۰۵۳	۱۲/۷۱
	۲۰	۰/۰۷۲	۱۷/۱۹	۰/۰۶	۱۴/۵۹	۰/۰۶۴	۱۶/۱۰	۰/۰۵۸	۱۴/۱۹	۰/۰۶۳	۱۵/۴۴	۰/۰۵۶	۱۳/۵۳
۹	۲	۰/۰۸۰	۱۹/۹۲	۰/۰۶۹	۱۷/۲۴	۰/۰۶۹	۱۷/۷۳	۰/۰۶۶	۱۶/۵۵	۰/۰۷۱	۱۷/۷۹	۰/۰۶۳	۱۵/۴۲
	۸	۰/۰۸۰	۱۸/۵۹	۰/۰۷۱	۱۶/۵۸	۰/۰۶۸	۱۶/۶۳	۰/۰۶۷	۱۵/۹۷	۰/۰۷۱	۱۶/۹۱	۰/۰۶۳	۱۴/۶۸
	۱۴	۰/۰۸۳	۲۰/۵۴	۰/۰۷۳	۱۸/۰۸	۰/۰۷۰	۱۷/۵۸	۰/۰۶۹	۱۷/۱۴	۰/۰۷۳	۱۸/۲۱	۰/۰۶۵	۱۵/۸۸
	۲۰	۰/۰۹۰	۲۲/۴۲	۰/۰۸۱	۲۰/۱۸	۰/۰۷۷	۱۹/۴۹	۰/۰۷۷	۱۹/۲۰	۰/۰۸۱	۲۰/۱۹	۰/۰۷۳	۱۸/۰۱
میانگین		۰/۰۷۱	۱۷/۲۲	۰/۰۵۹	۱۴/۴۲	۰/۰۶۱	۱۵/۴۷	۰/۰۵۶	۱۳/۸۵	۰/۰۶۱	۱۵/۱۶	۰/۰۵۵	۱۳/۲۵

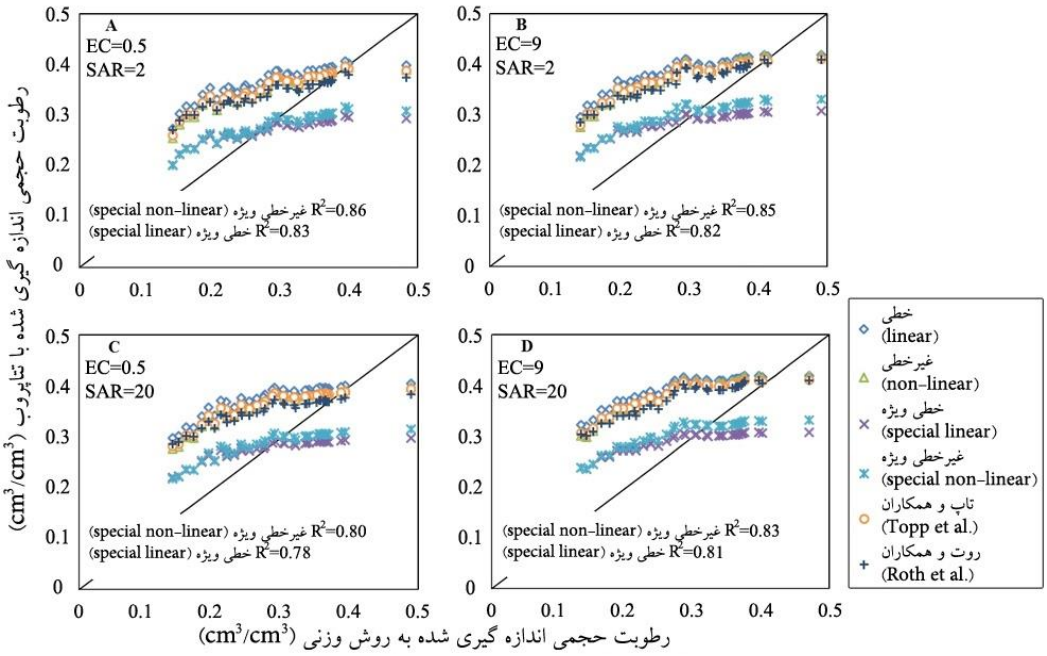
جدول٤- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تتاپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم.

کیفیت آب		خطی		غیرخطی		خطی ویژه		غیرخطی ویژه		تاپ و همکاران		روت و همکاران	
EC (dS/m)	SAR	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)
	۲	۰/۰۹۷	۲۹/۰۴	۰/۰۸۲	۲۳/۹۵	۰/۰۶۶	۱۸/۸۱	۰/۰۵۹	۱۶/۹۸	۰/۰۸۵	۲۴/۵۹	۰/۰۷۹	۲۱/۷۶
	۸	۰/۱۰۱	۳۰/۵۹	۰/۰۸۷	۲۵/۵۷	۰/۰۶۷	۱۹/۷۱	۰/۰۶۰	۱۷/۹۰	۰/۰۸۹	۲۶/۱۹	۰/۰۸۳	۲۳/۱۲
۰/۵	۱۴	۰/۱۰۱	۲۹/۸۰	۰/۰۸۶	۲۴/۹۶	۰/۰۶۲	۱۸/۶۶	۰/۰۵۶	۱۶/۸۲	۰/۰۸۸	۲۵/۴۹	۰/۰۸۰	۲۱/۹۹
	۲۰	۰/۱۰۸	۳۳/۸۹	۰/۰۹۴	۲۹/۰۹	۰/۰۶۴	۱۸/۹۲	۰/۰۵۹	۱۷/۶۹	۰/۰۹۶	۲۹/۴۷	۰/۰۸۸	۲۶/۰۴
	۲	۰/۰۹۷	۲۵/۷۰	۰/۰۸۵	۲۲/۱۳	۰/۰۷۲	۱۹/۰۹	۰/۰۶۴	۱۶/۹۷	۰/۰۸۶	۲۲/۳۸	۰/۰۷۷	۲۰/۰۷
	۸	۰/۱۰۵	۳۰/۳۶	۰/۰۹۲	۲۶/۱۹	۰/۰۷۱	۲۰/۲۱	۰/۰۶۴	۱۸/۶۵	۰/۰۹۴	۲۶/۵۲	۰/۰۸۶	۲۳/۷۲
۳	۱۴	۰/۱۰۶	۳۱/۴۱	۰/۰۹۳	۲۷/۱۰	۰/۰۷۰	۱۹/۵۸	۰/۰۶۴	۱۸/۱۰	۰/۰۹۵	۲۷/۳۸	۰/۰۸۷	۲۴/۱۸
	۲۰	۰/۱۰۹	۳۲/۹۷	۰/۰۹۶	۲۸/۷۸	۰/۰۶۶	۱۸/۶۸	۰/۰۶۰	۱۷/۱۳	۰/۰۹۷	۲۸/۸۷	۰/۰۸۸	۲۵/۲۴
	۲	۰/۱۰۵	۳۰/۰۴	۰/۰۹۲	۲۶/۳۳	۰/۰۶۸	۱۸/۸۴	۰/۰۶۰	۱۷/۰۱	۰/۰۹۳	۲۶/۲۸	۰/۰۸۴	۲۲/۹۰
	۸	۰/۱۰۷	۳۰/۰۶	۰/۰۹۵	۲۶/۵۳	۰/۰۷۲	۱۹/۷۹	۰/۰۶۴	۱۸/۰۷	۰/۰۹۶	۲۶/۴۸	۰/۰۸۷	۲۳/۳۶
۶	۱۴	۰/۱۱۴	۳۲/۳۹	۰/۱۰۳	۲۹/۲۴	۰/۰۷۴	۲۰/۷۷	۰/۰۶۷	۱۹/۴۷	۰/۱۰۴	۲۸/۹۸	۰/۰۹۴	۲۵/۸۳
	۲۰	۰/۱۱۹	۳۶/۳۶	۰/۱۰۸	۳۲/۹۱	۰/۰۶۸	۲۰/۱۸	۰/۰۶۴	۱۹/۱۳	۰/۱۰۸	۳۲/۵۶	۰/۰۹۹	۲۹/۳۰
	۲	۰/۱۱۴	۳۴/۸۹	۰/۱۰۲	۳۱/۱۶	۰/۰۶۸	۲۰/۱۵	۰/۰۶۱	۱۸/۵۵	۰/۱۰۳	۳۰/۹۵	۰/۰۹۵	۲۷/۸۰
	۸	۰/۱۱۱	۳۰/۷۸	۰/۱۰۲	۲۸/۲۵	۰/۰۷۱	۱۸/۹۸	۰/۰۶۳	۱۷/۵۹	۰/۱۰۱	۲۷/۵۸	۰/۰۹۲	۲۴/۸۴
۹	۱۴	۰/۱۲۳	۳۷/۳۳	۰/۱۱۲	۳۴/۱۶	۰/۰۷۱	۲۱/۱۲	۰/۰۶۷	۲۰/۲۱	۰/۱۱۲	۳۳/۶۳	۰/۱۰۳	۳۰/۷۳
	۲۰	۰/۱۲۵	۳۹/۹۴	۰/۱۱۵	۳۶/۶۰	۰/۰۶۷	۲۰/۵۰	۰/۰۶۴	۱۹/۶۱	۰/۱۱۴	۳۶/۰۵	۰/۱۰۶	۳۳/۱۳
میانگین		۰/۱۰۹	۳۲/۲۲	۰/۰۹۷	۲۸/۳۱	۰/۰۶۹	۱۹/۶۲	۰/۰۶۲	۱۸/۱۲	۰/۰۹۸	۲۸/۳۴	۰/۰۸۹	۲۵/۲۵

جدول (۴)، مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تتاپروب تحت شرایط مختلف شوری و سدیم آب آبیاری در بافت لوم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش شوری آب آبیاری در تمامی توابع کالیبراسیونی، موجب افزایش خطای قرائت دستگاه شده است. بهترین تابع در بین توابع کالیبراسیونی ارائه شده، روش غیرخطی ویژه و پس از آن روش خطی ویژه بود. روش‌های خطی و غیرخطی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه، دارای خطای بسیار زیادی بوده و استفاده از آن‌ها برای این بافت توصیه نمی‌شود. لذا کالیبراسیون ویژه برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر ضروری به‌نظر می‌رسد. این نتایج با نتایج کوش و همکاران و کارگاس و کرکیدز مطابقت دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که منحنی‌های کالیبراسیونی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه، در بیشتر موارد از حدود پیش‌بینی شده برای رطوبت انحراف داشته و کالیبراسیون ویژه‌ی دستگاه برای هر خاکی ضروری است (کوش و همکاران[1]، ۲۰۰۵؛ کارگاس و کرکیدس[2]، ۲۰۰۸).

شکل (۲)، انحراف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط تتاپروب با روش وزنی در بافت لوم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب تبیین در SAR برابر با ۲، بین دو سطح حداقل و حداکثر شوری (A و B)، متفاوت بوده و مقدار آن در شوری‌های کم، بیشتر از شوری‌های زیاد است. لذا در بافت لوم، با افزایش شوری آب آبیاری، از دقت دستگاه تتاپروب کاسته می‌شود. از طرفی در شوری‌های ثابت، با افزایش SAR آب آبیاری، مقدار ضریب تبیین به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد که این موضوع نشان دهنده‌ی کاهش شدید دقت دستگاه می‌باشد. سدیم موجود در آب باعث شکسته شدن خاکدانه‌ها، تورم رس‌ها و توسعه‌ی لایه‌ی دوگانه‌ی پخشیده می‌شود که در نتیجه، ساختمان خاک تخریب می‌شود و منافذ بزرگ خاک به منافذ کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. در چنین شرایطی، ذرات خاک بیشتر در معرض جذب آب قرار گرفته و ذرات رس پراکنده شده، همراه با جریان آب در خاک حرکت کرده و در منافذ کوچک خاک ته‌نشین می‌شوند. به همین دلیل، با افزایش SAR آب، قابلیت جذب آب در خاک افزایش یافته و در عوض، سرعت حرکت آب در خاک کند می‌شود (خزاعی و همکاران، ۱۳۹۲). همین عامل، باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری رطوبت به‌وسیله‌ی دستگاه تتاپروب می‌شود. جدول (۵)، مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تتاپروب تحت شرایط مختلف شوری و سدیم آب آبیاری را در بافت لوم‌شنی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطاو خطای نسبی برای تمامی توابع در بین سه بافت مورد آزمایش در بافت لوم‌شنی اتفاق افتاده است.

1- Cosh *et al.*
2- Kargas and Kerkides



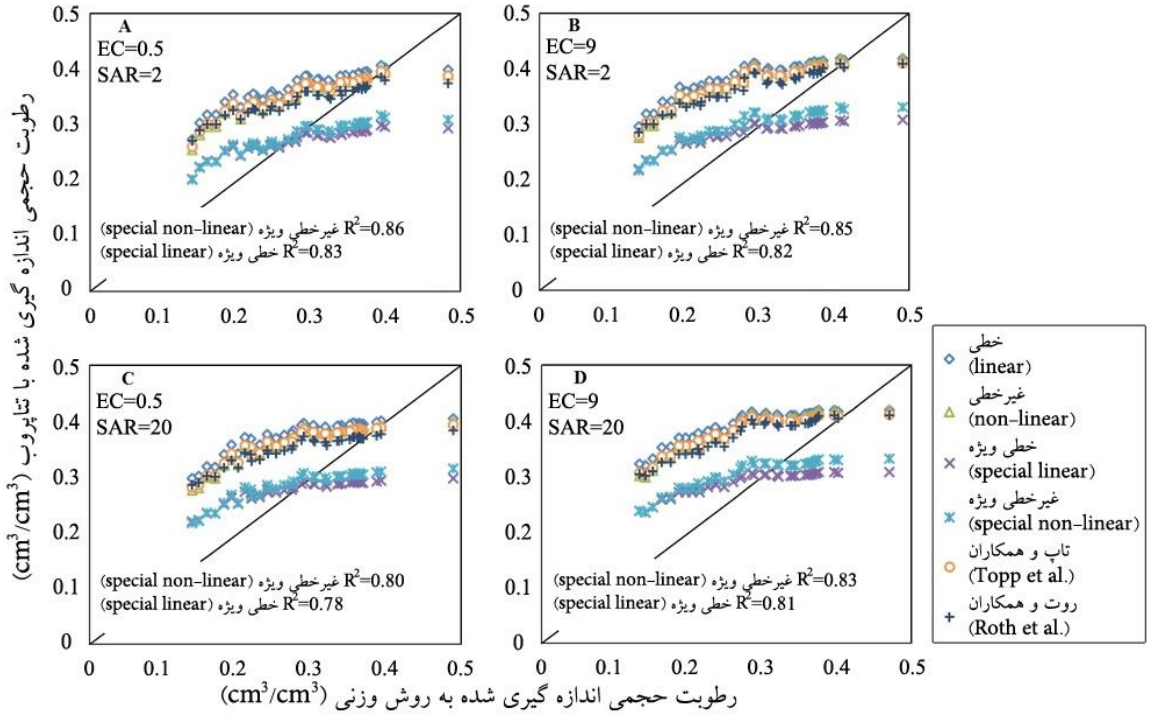
شکل۲- مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه تتاپروب در بافت لوم تحت شرایط مختلف شوری و سدیمی

در بافت لوم شنی دو روش غیرخطی ویژه و خطی ویژه دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی در بین توابع کالیبراسیونی بودند (جدول ۵). در این بافت مقدار جذر میانگین مربعات خطا در روش غیرخطی ویژه، در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و SAR=۲، کاهش چشم‌گیری نسبت به دو بافت دیگر داشته است. در دیگر شرایط شوری و سدیمی و توابع کالیبراسیونی دیگر نیز همین مقدار کاهش جذر میانگین مربعات خطا نسبت به دو بافت دیگر مشاهده شد. این موضوع متأثر از سبک شدن بافت و کاهش مقدار رس موجود در بافت لوم‌شنی نسبت به دو بافت دیگر بود. خاک‌های رسی معمولاً دارای شوری بالاتر از خاک‌های شنی و لومی است و این شوری کل خاک، ناشی از غلظت یون‌ها در محلول خاک و سطح ذرات خاک است. این مقدار شوری می‌تواند باعث تغییر میزان ضریب دی الکتریک خاک شود و در نتیجه باعث تخمین بیش از حد رطوبت خاک شود (سان‌ژی و همکاران[1]، ۲۰۰۰). همچنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده که با افزایش میزان رس، ضریب دی الکتریک آب پیوندی در اطراف ذرات، کمتر از مقدار آن در آب آزاد می‌گردد (نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۸۸؛ گانگ و همکاران[2]، ۲۰۰۳). مقدار رس با سطح ویژه‌ی زیاد، سبب آزادی کمتر مولکول‌های آب در اطراف ذرات جامد خاک و در نتیجه، کاهش ضریب دی الکتریک خاک در اطراف این ذرات نسبت به آب آزاد می‌گردد (روث و همکاران[3]، ۱۹۹۰). بنابراین، با سنگین‌تر شدن بافت خاک و افزایش میزان رس، از دقت دستگاه کاسته می‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷). در بافت لوم‌شنی، افزایش هر دو عامل شوری و SAR آب آبیاری موجب کاهش دقت قرائت دستگاه تتاپروب شد. شکل (۳)، همین مطالب را به نحو دیگری تصدیق می‌نماید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در SAR ثابت، افزایش شوری آب آبیاری (A و B)، موجب کاهش ضریب تبیین و در شوری ثابت، افزایش SAR باعث کاهش مقدار ضریب تبیین شد. با این تفاوت که شدت تأثیرگذاری شوری نسبت به SAR بسیار بیشتر بود. مقدار ضریب تبیین تحت SAR ثابت، با افزایش شوری از ۰/۵ به ۹ دسی‌زیمنس برمتر، از ۰/۹۷ به ۰/۸۸ در روش غیرخطی ویژه کاهش داشته است. اما تحت شرایط شوری ثابت ۰/۵ دسی‌زیمنس برمتر، افزایش SAR از ۲ به ۲۰ موجب کاهش ضریب تبیین از ۰/۹۷ به ۰/۹۴ در روش غیرخطی ویژه شده است. جدول (۶) تجزیه واریانس را برای توابع مختلف کالیبراسیونی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بافت خاک، شوری و اثر متقابل بافت و SAR ، در تمامی روش‌ها تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه داشت. SAR آب آبیاری در روش‌های کالیبراسیونی خطی و خطی ویژه، در سطح ۵ درصد و در روش‌های دیگر، در سطح ۱ درصد تأثیر معنی‌داری بر قرائت دستگاه داشتند. در تمامی روش‌های کالیبراسیونی، اثر متقابل بافت و شوری، SAR و شوری، و بافت، SAR و شوری تأثیر معنی‌داری بر رطوبت اندازه‌گیری شده با تتاپروب نداشتند.

1- Sun ZJ *et al.*
2- Gong *et al.*
3- Roth *et al.*

جدول۵- مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تتاپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم‌شنی

کیفیت آب		خطی		غیرخطی		خطی ویژه		غیرخطی ویژه		تاپ و همکاران		روت و همکاران	
EC (dS/m)	SAR	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)	RMSE	RE (%)
	۲	۰/۰۶۵	۲۶/۰۸	۰/۰۵۱	۲۰/۴۶	۰/۰۳۰	۸/۹۴	۰/۰۲۵	۷/۵۲	۰/۰۵۴	۲۱/۵۵	۰/۰۶۰	۲۲/۵۷
	۸	۰/۰۶۶	۲۵/۸۳	۰/۰۵۲	۲۰/۲۷	۰/۰۳۳	۹/۶۴	۰/۰۲۸	۸/۱۳	۰/۰۵۵	۲۱/۳۸	۰/۰۶۰	۲۲/۱۲
۰/۵	۱۴	۰/۰۶۱	۲۲/۸۶	۰/۰۴۶	۱۷/۲۰	۰/۰۳۵	۹/۲۴	۰/۰۲۹	۷/۷۸	۰/۰۴۹	۱۸/۲۸	۰/۰۵۴	۱۸/۴۹
	۲۰	۰/۰۶۹	۲۷/۲۳	۰/۰۵۵	۲۱/۴۹	۰/۰۳۴	۹/۳۵	۰/۰۲۹	۷/۷۳	۰/۰۵۸	۲۲/۶۰	۰/۰۶۲	۲۳/۰۶
	۲	۰/۰۶۹	۲۵/۷	۰/۰۵۴	۱۹/۶۷	۰/۰۳۶	۱۱/۵۰	۰/۰۳۱	۹/۹۰	۰/۰۵۷	۲۰/۸۰	۰/۰۶۱	۲۰/۵۵
	۸	۰/۰۶۸	۲۴/۱۱	۰/۰۵۳	۱۸/۲۱	۰/۰۴۲	۱۱/۹۱	۰/۰۳۷	۱۰/۳۷	۰/۰۵۶	۱۹/۳۰	۰/۰۶۰	۱۸/۷۵
۳	۱۴	۰/۰۷	۲۵/۲۶	۰/۰۵۵	۱۹/۲۱	۰/۰۴۱	۱۱/۵۵	۰/۰۳۶	۹/۹۹	۰/۰۵۸	۲۰/۳۳	۰/۰۶۱	۱۹/۵۳
	۲۰	۰/۰۷۷	۲۹/۴۰	۰/۰۶۲	۲۳/۱۲	۰/۰۴۱	۱۲/۰۴	۰/۰۳۷	۱۰/۵۱	۰/۰۶۵	۲۴/۳۲	۰/۰۶۸	۲۳/۸۵
	۲	۰/۰۸۱	۲۹/۳۳	۰/۰۶۶	۲۳/۲۸	۰/۰۴۷	۱۴/۸۸	۰/۰۴۱	۱۳/۱۹	۰/۰۶۹	۲۴/۳۷	۰/۰۷۱	۲۳/۵۱
	۸	۰/۰۸	۲۷/۹۹	۰/۰۶۴	۲۲/۱۵	۰/۰۴۶	۱۳/۷۳	۰/۰۴۰	۱۱/۹۴	۰/۰۶۷	۲۳/۰۹	۰/۰۶۸	۲۱/۶۸
۶	۱۴	۰/۰۸۲	۲۹/۵۶	۰/۰۶۷	۲۳/۷۱	۰/۰۴۵	۱۳/۷۲	۰/۰۳۹	۱۱/۸۸	۰/۰۷۰	۲۴/۶۵	۰/۰۷۰	۲۳/۲۷
	۲۰	۰/۰۸۸	۳۲/۹۶	۰/۰۷۲	۲۶/۷۴	۰/۰۴۵	۱۴/۱۶	۰/۰۴۱	۱۲/۵۳	۰/۰۷۵	۲۷/۸۱	۰/۰۷۶	۲۶/۳۹
	۲	۰/۰۹۴	۳۵/۵۷	۰/۰۷۹	۲۹/۶۶	۰/۰۴۹	۱۶/۱۲	۰/۰۴۵	۱۴/۵۳	۰/۰۸۲	۳۰/۵۸	۰/۰۸۱	۲۸/۹۳
	۸	۰/۰۹۳	۳۵/۷۶	۰/۰۷۸	۲۹/۸۷	۰/۰۴۸	۱۶/۵۶	۰/۰۴۴	۱۴/۸۷	۰/۰۸۱	۳۰/۸۱	۰/۰۸۲	۲۹/۶۰
۹	۱۴	۰/۰۹۹	۳۵/۵۷	۰/۰۸۴	۲۹/۹۷	۰/۰۵۱	۱۶/۷۵	۰/۰۴۷	۱۵/۰۹	۰/۰۸۶	۳۰/۶۷	۰/۰۸۳	۲۸/۲۴
	۲۰	۰/۱۰۳	۴۰/۰۹	۰/۰۸۸	۳۴/۴۳	۰/۰۵۳	۱۸/۲۱	۰/۰۵۰	۱۶/۷۷	۰/۰۹۱	۳۵/۱۹	۰/۰۹۰	۳۳/۷۸
میانگین		۰/۰۷۹	۲۹/۵۸	۰/۰۶۴	۲۳/۷۱	۰/۰۴۲	۱۳/۰۲	۰/۰۳۷	۱۱/۴۲	۰/۰۶۷	۲۴/۷۳	۰/۰۶۹	۲۴/۰۲



شکل۳- مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه تتاپروب در بافت لوم‌شنی تحت شرایط مختلف شوری و سدیمی

از آنجایی‌که در هر سه بافت، روش غیرخطی ویژه دارای دقت نسبتاً زیادی در برآورد رطوبت خاک بود، لذا در قالب جدول (۷)، معادلات پیشنهادی برای کالیبراسیون دستگاه تتاپروب به روش غیرخطی ویژه تحت شرایط شوری، SAR و بافت‌های مختلف ارائه شده است.

جدول٦- تجزیه واریانس برای توابع مختلف کالیبراسیونی

		مجموع مربعات خطا					
منبع تغییر	درجه‌ی آزادی	خطی	غیرخطی	خطی ویژه	غیرخطی ویژه	تاپ و همکاران	روت و همکاران
بافت	۲	۱/۶۸۵**	۱/۴۷۴**	۱/۱۲۳**	۱/۰۰۱**	۱/۶۰۵**	۱/۲۹۵**
SAR	۳	۰/۰۲۹*	۰/۰۳۱**	۰/۰۲۷*	۰/۰۳۰**	۰/۰۲۹**	۰/۰۲۸**
شوری	۳	۰/۳۵۹**	۰/۴۶۳**	۰/۲۳۵**	۰/۳۶۱**	۰/۳۹۰**	۰/۳۸۲**
بافت*SAR	۶	۰/۰۵۶**	۰/۰۵۵**	۰/۰۵۶**	۰/۰۵۳**	۰/۰۵۶**	۰/۰۶۳**
بافت*شوری	۶	۰/۰۱۹^{ns}	۰/۰۰۷^{ns}	۰/۰۱۴^{ns}	۰/۰۰۷^{ns}	۰/۰۱۱^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}
SAR*شوری	۹	۰/۰۲۴^{ns}	۰/۰۲۴^{ns}	۰/۰۲۶^{ns}	۰/۰۲۵^{ns}	۰/۰۲۴^{ns}	۰/۰۳۰^{ns}
بافت*SAR*شوری	۱۸	۰/۰۲۷^{ns}	۰/۰۲۴^{ns}	۰/۰۳۳^{ns}	۰/۰۲۸^{ns}	۰/۰۲۶^{ns}	۰/۰۲۹^{ns}

**، * و nsبه‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری

جدول۷- معادلات کالیبراسیون مدل غیرخطی ویژه برای برآورد رطوبت خاک تحت شرایط مختلف شوری و SAR

کیفیت آب		بافت خاک		
EC(dS/m)	SAR	لوم‌سیلتی	لوم	لوم‌شنی
0.5	۲	θ_{TP}=۰/۶۱۴۴θ_V+۰/۱۵۸۲	θ_{TP}=۰/۳۰۹۷θ_V+۰/۱۸۸۷	θ_{TP}=۰/۷۵۰۶θ_V+۰/۰۵۷۸
	۸	θ_{TP}=۰/۶۶۶۵θ_V+۰/۱۳۶۲	θ_{TP}=۰/۳۱۳۷θ_V+۰/۱۹۰۶	θ_{TP}=۰/۷۲۰۴θ_V+۰/۰۶۵۲
	۱۴	θ_{TP}=۰/۵۵۵۶θ_V+۰/۱۷۴۷	θ_{TP}=۰/۲۹۴۹θ_V+۰/۱۹۸۷	θ_{TP}=۰/۷۰۴۹θ_V+۰/۰۶۶
	۲۰	θ_{TP}=۰/۵۲۲θ_V+۰/۱۸۴۴	θ_{TP}=۰/۲۸۶۸θ_V+۰/۲۰۴	θ_{TP}=۰/۷۰۳۳θ_V+۰/۰۷۱۸
3	۲	θ_{TP}=۰/۵۵۶۵θ_V+۰/۱۷۵۵	θ_{TP}=۰/۲۲۱۸θ_V+۰/۲۲۶۳	θ_{TP}=۰/۶۶۶۸θ_V+۰/۰۸۱۱
	۸	θ_{TP}=۰/۵۰۲۳θ_V+۰/۱۹۶۷	θ_{TP}=۰/۲۶۷۶θ_V+۰/۲۱۰۷	θ_{TP}=۰/۵۹۸۷θ_V+۰/۰۹۷۳
	۱۴	θ_{TP}=۰/۴۸۹۷θ_V+۰/۱۹۸۳	θ_{TP}=۰/۲۶۵۲θ_V+۰/۲۱۱۲	θ_{TP}=۰/۵۹۳θ_V+۰/۱۰۰۴
	۲۰	θ_{TP}=۰/۵۲۶۵θ_V+۰/۱۸۵۹	θ_{TP}=۰/۲۷۳۱θ_V+۰/۲۱۳۲	θ_{TP}=۰/۵۹۱θ_V+۰/۱۰۴
6	۲	θ_{TP}=۰/۴۹۵۵θ_V+۰/۲۰۳۷	θ_{TP}=۰/۲۸θ_V+۰/۲۱۲۵	θ_{TP}=۰/۵۵۶۴θ_V+۰/۱۱۶۵
	۸	θ_{TP}=۰/۴۵۹۳θ_V+۰/۲۱۶	θ_{TP}=۰/۲۶۹۲θ_V+۰/۲۱۷۱	θ_{TP}=۰/۵۴۹۷θ_V+۰/۱۲۰۱
	۱۴	θ_{TP}=۰/۴۶۳۵θ_V+۰/۲۱۵۴	θ_{TP}=۰/۲۳۷۳θ_V+۰/۲۳۱۶	θ_{TP}=۰/۵۶۲۲θ_V+۰/۱۱۸۹
	۲۰	θ_{TP}=۰/۴۷۳۱θ_V+۰/۲۱۱۳	θ_{TP}=۰/۲۶۷۷θ_V+۰/۲۲۴	θ_{TP}=۰/۵۵۱۲θ_V+۰/۱۲۳۴
9	۲	θ_{TP}=۰/۴۴۶۷θ_V+۰/۲۲۸	θ_{TP}=۰/۳۱۴۹θ_V+۰/۲۰۶۴	θ_{TP}=۰/۵۶۱۷θ_V+۰/۱۲۵۷
	۸	θ_{TP}=۰/۳۶۸۷θ_V+۰/۲۶۱۵	θ_{TP}=۰/۲۳۱۴θ_V+۰/۲۳۹۱	θ_{TP}=۰/۵۸۵θ_V+۰/۱۱۸۷
	۱۴	θ_{TP}=۰/۴۲۱۹θ_V+۰/۲۴۱۸	θ_{TP}=۰/۲۷θ_V+۰/۲۲۶۴	θ_{TP}=۰/۵۲۲۶θ_V+۰/۱۴۲۵
	۲۰	θ_{TP}=۰/۴۱۱۴θ_V+۰/۲۴۹۹	θ_{TP}=۰/۳۰۲۴θ_V+۰/۲۱۷۹	θ_{TP}=۰/۵۸۴۳θ_V+۰/۱۲۶

θ_{TP} و θ_V به‌ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده با تتاپروب و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دستگاه تتاپروب در بافت‌های سبک‌تر، که میزان رس کمتری نسبت به بقیه دارند، در تمامی توابع کالیبراسیونی ارائه شده در این تحقیق، دارای دقت بیشتری بود. بیشترین انحراف از خط همسانی (۱:۱) بین مقادیر تخمینی به‌وسیله‌ی مدل‌های کالیبراسیونی با مقادیر مشاهده‌ای، در بافت لومی و کمترین انحراف در بافت لوم‌شنی دیده شد. از سوی دیگر، در تمامی بافت‌های ارائه شده در این پژوهش، افزایش شوری آب آبیاری موجب کاهش دقت قرائت دستگاه تتاپروب شد. افزایش SAR آب آبیاری نیز در بافت‌های لومی، لوم‌شنی، و در شوری بالا در بافت لوم‌سیلتی، باعث انحراف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده از مقادیر مشاهده‌ای شد.

در تمامی بافت‌های مورد مطالعه، مشاهده شد که توابع کالیبراسیونی ویژه‌ی دستگاه (خطی ویژه و غیرخطی ویژه)، نسبت به توابع کالیبراسیونی دیگر، دارای مقادیر جذر میانگین مربعات خطاو خطای نسبی کمتری بود، به‌جز بافت لوم‌سیلتی که روش-های روت و همکاران و غیرخطی ویژه دارای بیشترین دقت در برآورد رطوبت بودند.

پیشنهاد می‌گردد آزمایشات بیشتری با بافت‌های مختلف دیگر که دارای مقدار رس متفاوت با این پژوهش باشند به انجام برسد. همچنین در بافت لوم‌سیلتی، در محدوده‌ی شوری ۶ تا ۹ دسی‌زیمنس برمتر و بالاتر، آزمایش‌های دیگری تکرار شود.

منابع

۱- برزگر،ع. ۱۳۸۷. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

۲- جعفری حقیقی،م. ۱۳۸۲. روش‌های تجزیه خاک. چاپ اول، ساری، انتشارات ندای ضحی.

۳- ختار، م. مصدقی، م. ر. و محبوبی، ع. ا. ۱۳۹۱. اثر کیفیت آب آبیاری بر مقدار آب قابل استفاده برای گیاه و توزیع اندازه منافذ دو خاک آهکی با بافت متفاوت. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۶(۶۰): ۱۵۹-۱۷۲.

۴- خزاعی، س. انصاری، ح. و قهرمان، ب. ۱۳۹۲. بررسی تأثیر شوری و سدیم آب بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک و شاخص کیفیت فیزیکی خاک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ص۴۳-۳۵.

۵- دوستی، م. بشارت، س. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی مصرف آب در مزرعه جهت مدیریت بهتر و بهبود کیفیت با TDR. دومین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب اصفهان، زمستان ۸۵.

۶- علیزاده، ح. ع. نوری محمدی ه، م. و لیاقت، ع. ۱۳۸۷. اثر تراکم و بافت خاک بر دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه تتاپروب مدل ML2. مجله پژوهش آب ایران، ۳(۴): ۱۹-۲۹.

۷- کشاورزی حسن آباد، م. ناظمی، ا. ح. اشرف صدرالدینی، س. ع. نیشابوری، م. ر. ناصری، ا. فاخری فرد، ا. ۱۳۹۲. تأثیر بافت خاک بر دقت روش انعکاس سنجی حوزه زمانی در برآورد رطوبت خاک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره یازدهم.

۸- نامدار خجسته، د. شرفاء، م. اسکندری، ذ. ا. و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۸۸. تأثیر میزان رس و مینرالوژی بر ضریب دی‌الکتریک خاک برای اندازه‌گیری میزان رطوبت حجمی خاک با TDR. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۸۵-۱۰۰.

۹- نامدار خجسته، د. شرفاء، م. اسکندری، ذ. ا. و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۹۰. تأثیر میزان رس و شوری خاک در رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با انعکاس سنج زمانی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۱۰۰-۱۱۲.

10- Birchak, J. R. Gardner, D. G. Hipp, J. E. and Victor, J. M. 1974. High dielectric constant microwave for sensing moisture. Proceedings of the IEEE, 62: 93-98

11- Cosh, M. H. Jackson, T. J. Bindlish, R. Famiglietti, J. S. and Ryu, D. 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. Journal of Hydrology, 311(1), 49-58.

12- Dobson, M. C. Ulaby, F. T. Hallikainen, M. T. and El-Rayes, M. A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on(1), 35-46.

13- Friedman, S. P. 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric of unsaturated porous media. Water resources research, 34: 2994-2961.

14- Gaskin, G. and Miller, J. D. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedence measuring technique. J. of Agricultural Research, 63: 153-160.

15- Gong, Y. Cao, Q. and Sun, Z. 2003. The effects of soil bulk density, claycontent and temperature on soil water content measurement using time-domainreflectometry. Hydrol. Process. 17: 3601–3614.

16- Hook, W.R. and Livingston, N.J. 1995. Propagating Velocity Errors in Time DomainReflectometry Measurement of Soil Water. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:92-96.

17- Kargas, G. and Kerkides, P. 2008. Water content determination in mineral and organic porous media byML2 theta probe. Irrigation and Drainage, 57(4), 435-449.

18- Liaghat. A.M. Bonnel R.B. and Broughton S. 1998. Effect of Clay Consent and Bulk ElectricalConductivity on TDRMeasurement of WaterContent in the Soil. Journal of ICIID 47:37-44.

19- Lukanu, G. and Savage, M. 2006. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil- water content in a clay loam soil. Water SA, 32(1), P. 37-42.

20- Miller, J. D. and Gaskin, G. 1977. The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note.

21- Roth, K. Schulin, R. Flühler, H. and Attinger, W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research, 26(10), 2267-2273.

22- Sarani, N. and Afrasiab, P. 2012. Effect of soil texture on moisture measurement accuracy with Theta probe ML2 in Sistan region. International conferance on chemical, ecology and environmental sciences (ICEES'2012), march 17-18, 2012 bangkok.

23- Sun ZJ, Young GD, McFarlane R, Chambers BM. 2000. The effect of soil electricalconductivity on moisture determination using time domain reflectometry in sandysoil.Canadian Journal of Soil Science 80(1): 13–22.

24- Topp, G. C. Davis, J. L. and Annan, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil watercontent: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Researches, 16:574-582.

Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineering **Vol. 40, No. 4, Winter 2018, p. 17-30**

EXTENDED ABSTRACT

Effect of soil texture, irrigation water salinity, and sodium adsorption ratio on the soil moisture measurements acuracy by Theta Probe device

H. Balabadi[1], P. Afrasiab[2*], M. Delbari[3] and S. Ghaedi[4]

1- Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Uiversity of Zabol.
2*- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol. (*p_afrasiab@yahoo.com*)
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol.
4- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol.

Received:13 February 2016 Accepted:15 May 2016

Keywords: Soil moisture, Calibration functions, Dielectric constant, Water quality, Gravimetric method.

Introduction:

Soil moisture measurement is very important for better irrigation system management. One of the indirect methods for measuring the soil moisture content is to use Theta Probe device. Although the use of Theta Probe has many advantages over the other methods of measuring moisture content, but according to research conducted in most regions of the world, it has been shown that changes in the physical and chemical properties of the soil, and in general, all that affect the dielectric constant of the soil, cause an error in the accuracy of the measurement of moisture content with this device. Among the physical and chemical properties of the soil, the tissue type, the amount of clay contained in the soil, and electrical conductivity (EC) are the three main factors influencing the calibration of the Theta Probe system (Sarani and Afrasiab, 2012). The aim of this study was to investigate the effect of soil texture, irrigation water salinity (EC), and sodium absorption ratio (SAR) on the accuracy of Theta Probe device**.**

Methodology:

This research was carried out at the Hydrological Laboratory of the Faculty of Water and Soil of Zabol University. The experiments were carried out in a factorial arrangement with three treatments and three replications. Three different types of soil texture were selected from the agricultural lands of Zabul University campus. Water quality treatments including salinity values were equal to 0.5, 3, 6, and 9 dS / m respectively. SAR values were 2, 8, 14, and 20, respectively, which formed a total of 16 different quality water for this test. The pots were irrigated by water of varying quality for saturation. After irrigation of the pots, the moisture measurements were performed for 36 days using two methods of weighting and using the Theta Probe machine. The measurements continued until the moisture content reached to the point of permanent wilting. The moisture content measured by the device was estimated by the calibration function. Table 1 shows the various calibration functions evaluated in this paper. In this research, for the homogeneity of moisture estimation models by direct measurement method, the root mean square error, coefficient of explanation, and relative error were used.

Table 1- the various calibration functions evaluated

References	*Function*
Linear method of device makers (1999)	θ=-0.19+0.119 (1.1+4.44V)
Nonlinear method of device makers (1999)	θ=-0.19+0.119 (1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3)
Topp *et al*. method (1980)	θ=-0.053+0.0292ε-0.00055ε^2+0.0000043ε^3
Roth *et al*. method (1990)	θ=-0.0728+0.0448ε+0.00195ε^2+0.0000361ε^3

Results and Discussion:

For silty loam texture, in all calibration functions, by increasing of the salinity of irrigation water, the amount of root mean square error and relative error increased in these functions. Soil salinity disperses the reflected signal in the soil. Therefore, as a result, the wavelength of the waves is prolonged and increases the amount of dielectric coefficient in the soil. Consequently, it results in a higher estimate of the moisture content measured with the device. Compared to different calibration methods in silty loam, Rout et al. method and non-linear special methods have the least amount of root mean square error respectively, and relative error has the highest accuracy in estimating moisture content.

In the silty loam texture, increasing salinity of irrigation water in all calibration functions has increased the reading error of the device. The best function among the proposed calibration function was special nonlinear method, followed by a special linear method. Linear and nonlinear methods provided by the device makers have lots of different errors and their selection is not recommended for this texture. These results are consistent with the results of Cosh et al., (2005) and Kargas, and Kerkides (2008).

In the sandy loam, two nonlinear special and linear special methods had the least amount of root mean square, and relative error among the calibration functions. In this texture, the mean square error in the nonlinear special method, in salinity of 0.5 dS/m and SAR of 2, has significantly decreased compared to the other two tissues. In other conditions of salinity and sodium and other calibration functions, the same amount of root mean square error was observed compared to the other two tissues. This was influenced by tissue lameness and the reduction of clay content in the sandy loam texture compared to the other two tissues.

Clay soils usually have higher salinity than sandy and loamy soils, and this total salinity is due to the concentration of ions in the soil solution and the surface of the soil particles. This level of salinity can change the dielectric coefficient magnitude of soil resulting in an over-estimation of soil moisture. Therefore, with the soil's heavier texture and increased clay content, the precision of the device is reduced.

Conclusions:

The results of this study showed that the Theta probe device was more accurate in the lighter tissues, which had less clay content than the rest, in all of the calibration functions presented in this study. The most significant deviation from the line of equivalence between the estimated values by calibration models with observed values was seen in the lumens texture and the least deviation was observed in the sandy loam texture. On the other hand, in all the textures presented in this study, increasing irrigation water salinity reduced the readability of the Theta probe device Increasing the SAR of irrigation water in loamy, sandy-loam textures and in high salinity for silt-loam texture caused deviations of measured moisture content from observed values.

It is recommended that more experiments need to be carried out with different tissues that have a different clay content than this study. Also, in the silt-loam tissue, in the salinity range of 6 to 9 dS/m and above, further experiments are repeated.

References:

1- Cosh, M. H. Jackson, T. J. Bindlish, R. Famiglietti, J. S. and Ryu, D. 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. Journal of Hydrology, 311(1), 49-58.

2- Kargas, G. and Kerkides, P. 2008. Water content determination in mineral and organic porous media byML2 theta probe. Irrigation and Drainage, 57(4), 435-449.

3- Roth, K. Schulin, R. Flühler, H. and Attinger, W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research, 26(10), 2267-2273.

4- Sarani, N. and Afrasiab, P. 2012. Effect of soil texture on moisture measurement accuracy with Theta probe ML2 in Sistan region. International conferance on chemical, ecology and environmental sciences (ICEES'2012), march 17-18, 2012 bangkok.

5- Topp, G. C. Davis, J. L. and Annan, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil watercontent: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Researches, 16:574-582.