

تأثیر کدورت آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری میزان رطوبت به‌وسیله‌ی دستگاه تتاپروب

سعید قائدی^۱، پیمان افراسیاب^{۲*}، معصومه دلبری^۳

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- دانشیار گروه آب دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- دانشیار گروه آب دانشگاه زابل، زابل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۴)

چکیده

یکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک، استفاده از دستگاه تتاپروب است. از آنجایی که اساس کار این دستگاه بر پایه‌ی ثابت دی‌الکتریک خاک استوار است، عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، تأثیر زیادی بر دقت قرائت این دستگاه دارند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر کدورت آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک به‌وسیله دستگاه تتاپروب می‌باشد. برای این منظور، سه بافت متفاوت خاک (لوم سیلتی، لومی و لوم شنی) تحت سطوح مختلف کدورت آب آبیاری قرار گرفتند. سطوح کدورت آب آبیاری شامل ۱۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ NTU بودند. نتایج نشان داد عامل بافت خاک و کدورت آب آبیاری در سطح معنی‌داری ($P < 0.01$) بر دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط دستگاه تتاپروب مدل ML2 تأثیر دارد. افزایش میزان کدورت آب آبیاری در هر سه نوع بافت خاک باعث کاهش دقت قرائت دستگاه تتاپروب شد و بیشترین مقدار خطا در بافت لوم مشاهده شد که دارای بیشترین درصد رس بود به طوری که مقدار RMSE در روش‌های غیرخطی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه، *Roth et al.* (1990) به ترتیب از ۰/۰۶۹ به ۰/۰۸۹، از ۰/۰۷۱ به ۰/۰۹۰ و از ۰/۰۶۷ به ۰/۰۸۳ افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که در بین توابع کالیبراسیونی مورد بررسی، توابع کالیبراسیونی ویژه‌ی دستگاه (خطی و ویژه و غیرخطی ویژه)، نسبت به توابع کالیبراسیونی دیگر، دارای دقت بیشتری است که نشان از ضرورت کالیبراسیون ویژه دستگاه برای تمامی خاک‌های مورد آزمایش دارد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری رطوبت، بافت خاک، ثابت دی‌الکتریک، دستگاه تتاپروب مدل ML2

مقدمه

دسترس خارج شده و با سرعت از بسیاری از موانع عبور کرده و در مسیر خود، مواد معلق را نیز با خود حمل می‌کند. مواد معلق حمل‌شده، به‌طور معمول دارای ذرات گیاهی با قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر، ذرات سیلت و رس بوده که حاصل فرسایش می‌باشند. مواد معلق کلئیدی همراه این آب، عامل تولید کدورت آب هستند (Salamati and Moazed, 2008).

از سویی، یکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت استفاده از دستگاه تتاپروب می‌باشد. اساس اندازه‌گیری رطوبت در دستگاه تتاپروب بر پایه‌ی تغییرات ثابت دی‌الکتریک خاک می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، دانشمندان به رابطه‌ی بین ثابت دی‌الکتریک مواد و رطوبت پی بردند. ثابت دی‌الکتریک معیاری برای تمایل مولکول‌های ماده برای آرایش خود در هنگام قرارگرفتن در میدان نیروهای الکترواستاتیک می‌باشد. ویژگی خاص آب، سبب گردیده است تا ثابت دی‌الکتریک آن نسبت به سایر مواد بسیار بالاتر باشد. لذا می‌توان گفت ثابت دی‌الکتریک خاک به‌طور عمده توسط مقدار آب آن کنترل می‌شود. یعنی با

کدورت آب، معیاری برای میزان جذب نور و یا پراکندگی نور توسط مواد معلق در آب است. قسمت عمده‌ی کدورت در آب-های سطحی، از فرسایش مواد کلئیدی نظیر خاک رس، لای، خرده سنگ‌ها و اکسیدهای فلزی از خاک حاصل می‌شود. فاضلاب‌های صنعتی و خانگی ممکن است حاوی تعداد متنوعی از مواد کدورت‌زا باشند. اگرچه اندازه‌گیری‌های مربوط به کدورت به‌طور متداول بر روی فاضلاب انجام نمی‌شود، اما تخلیه‌ی فاضلاب ممکن است موجب کدورت منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی شود. یکی از ویژگی‌های اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه بر نزولات اندک جوی، نزول بارش‌هایی با شدت نسبتاً زیاد در مدتی کوتاه می‌باشد که منجر به وقوع سیلاب‌هایی حجیم می‌گردد. از آنجا که این سیلاب‌ها به‌طور عمده در فصل غیر زراعی اتفاق می‌افتد، بدون استفاده از

و در نتیجه کدورت موجود در آب است. Christoph Hinz and Graham (2001) در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که مواد معلق کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر و مواد کربنی قابل حل کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر در یک خاک ماسه‌ای، بالاترین سرعت نفوذ را در خاک در طول تجمع سیلاب دارند. Butler and Karunaratne (1995) نشان دادند که در لایه‌های سطحی که تحت تأثیر رواناب‌ها قرار می‌گیرند، با پر شدن مجاری و فضاهای خالی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش می‌یابد.

همان‌طور که گفته شد، مواد کلئیدی و ذرات رس و سیلت، عامل تولید کدورت آب می‌باشند. پس می‌توان گفت، خاک‌های تحت آبیاری با آب‌های دارای کدورت، دارای مقدار رس بیشتری نسبت به خاک‌های هستند که با آب‌های فاقد کدورت آبیاری می‌شوند. از طرفی، میزان رس موجود در خاک، یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر دقت دستگاه تپاروب می‌باشد. بر اساس تحقیقات Sun *et al.* (2000)، خاک‌های رسی معمولاً دارای شوری بالاتر از خاک‌های شنی و لومی هستند که غلظت بیشتر یون‌ها در محلول خاک رسی و همچنین بیشتر بودن سطح ذرات خاک رسی نسبت به دو خاک دیگر، از دلایل اصلی آن است. این مقدار شوری می‌تواند باعث تغییر میزان ضریب دی‌الکتریک خاک شود و در نتیجه باعث تخمین بیش از حد رطوبت خاک شود. همچنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده که با افزایش میزان رس، ضریب دی‌الکتریک آب پیوندی در اطراف ذرات، کمتر از مقدار آن در آب آزاد می‌گردد (Namdar Khojasteh *et al.*, 2012; Gong *et al.*, 2003). مقدار رس با سطح ویژه‌ی زیاد، سبب آزادی کمتر مولکول‌های آب در اطراف ذرات جامد خاک و در نتیجه، کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک در اطراف این ذرات نسبت به آب آزاد می‌گردند (Roth *et al.*, 1990). از آنجایی که کدورت آب آبیاری، نتیجه‌ی حل شدن رس در آب است و نیز با توجه به تأثیرات میزان رس بر ثابت دی‌الکتریک خاک و دقت قرائت دستگاه تپاروب، بررسی تأثیر کدورت آب آبیاری بر دقت برآورد میزان رطوبت به‌وسیله‌ی این دستگاه ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، تأثیر میزان کدورت آب آبیاری، بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌وسیله‌ی دستگاه تپاروب مدل ML2 مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مشخصات بافت‌های مورد آزمایش

پژوهش حاضر در آزمایشگاه آبیاری دانشکده‌ی آب و خاک دانشگاه زابل انجام شد. آزمایش در قالب طرح فاکتوریل با چهار

افزایش رطوبت، ثابت دی‌الکتریک افزایش و با کاهش آن، ثابت دی‌الکتریک کاهش می‌یابد (Barzegar, 2008). Topp *et al.* (1980)، با توجه به این نکته که ثابت دی‌الکتریک 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 رابطه‌ی معروف به مدل Topp *et al.* (1980) را ارائه دهند. Roth *et al.* (1990)، مدل دیگری را در این زمینه مطرح کردند که در آن از ثابت دی‌الکتریک خاک، آب و هوا استفاده شده است. این مدل که از آن با نام مدل ترکیبی نیز یاد می‌شود، بر پایه‌ی خواص فیزیکی خاک استوار می‌باشد و لذا از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار است (Birchak *et al.*, 1974; Dobson *et al.*, 1985; Roth *et al.*, 1990; Friedman, 1998). اگر چه استفاده از دستگاه تپاروب دارای مزایای بسیاری نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری رطوبت می‌باشد، اما با توجه به تحقیقاتی که در اکثر نقاط جهان صورت گرفته است، مشخص شده که تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و در مجموع، هر آنچه بر ثابت دی‌الکتریک خاک تأثیر داشته باشد، باعث ایجاد خطا در دقت اندازه‌گیری میزان رطوبت توسط این دستگاه می‌شود. بنابراین، کالیبراسیون این دستگاه تحت شرایط مختلف خاک ضروری به نظر می‌رسد. Cosh *et al.* (2005) بیان نمودند که تپاروب 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. Kargas and Kerkides (2008) به این نتیجه رسیدند که منحنی‌های کالیبراسیونی که سازندگان دستگاه تپاروب ارائه کرده‌اند، در بیشتر موارد، از حدود پیش‌بینی شده برای رطوبت منحرف شده و کالیبراسیون ویژه برای هر خاک ضروری به نظر می‌رسد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که از میان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع بافت، میزان رس موجود در خاک و شوری، سه فاکتور اصلی و تأثیرگذار بر کالیبراسیون دستگاه تپاروب می‌باشند (sarani and afrasiab, 2012). از طرفی، به نظر می‌رسد که کدورت آب آبیاری با تأثیر بر برخی از خصوصیات خاک، از جمله هدایت هیدرولیکی، تخلخل و نفوذپذیری، بر دقت دستگاه تپاروب مؤثر باشد.

Salamati and Moazed (2008) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش کدورت آب آبیاری، سرعت نفوذ نهایی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل کل خاک کاهش می‌یابد و دلیل آن را نیز پر شدن مجاری و خلل و فرج خاک با مواد معلق و کلئیدی همراه آب آبیاری بیان نمودند. آزمایش‌های Fuchs *et al.* (1997) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین عامل نفوذپذیری آب در خاک، مقدار رس

های آب در ۴ سطح کدورت، مجدداً میزان کدورت آن با دستگاه کدورت سنج سنجیده و از صحت آن اطمینان حاصل شد. گلدان‌ها توسط آب با سطوح مختلف کدورت تا حد اشباع و فقط یکبار در شروع آزمایش آبیاری شدند. پس از آبیاری گلدان‌ها، عمل اندازه‌گیری رطوبت هر ۲۴ ساعت یکبار و با دو روش وزنی و با استفاده از دستگاه تترپروب انجام شد. گلدان‌ها به‌صورت هوا خشک رطوبت از دست دادند و اندازه‌گیری‌ها تا رسیدن رطوبت خاک به نقطه پژمردگی دائم (PWP) ادامه یافت. خاک گلدان‌ها در طول آزمایش دست‌نخورده باقی ماند و برای جلوگیری از تبخیر زود هنگام آب گلدان‌ها، سطح گلدان‌ها با نایلون پلاستیکی پوشانده شد.

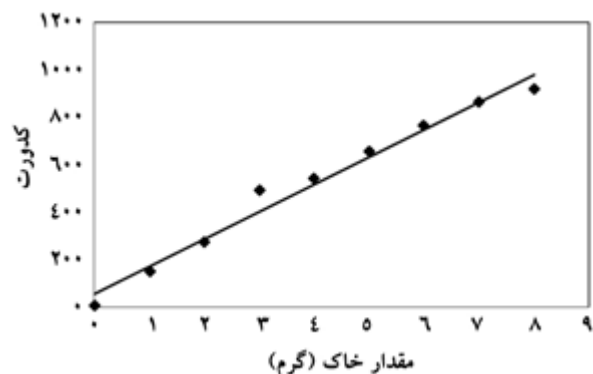
اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه تترپروب ML2

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از دستگاه تترپروب مدل ML2 (Miller and Gaskin, 1997) استفاده گردید. با قرار دادن میله‌های ۶۰ میلی‌متری 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 تترپروب $\pm 0.2\%$ است و در خاک‌هایی با شوری ۱۰۰ دسی‌زیمنس بر متر، دقت بالایی داشته و می‌توان آن را تا شوری ۲۰۰۰ دسی‌زیمنس بر متر واسنجی نمود (Jafari 2003). اساس اندازه‌گیری رطوبت در دستگاه تترپروب بر پایه‌ی تغییرات دی‌الکتریک می‌باشد. این تغییرات قابل تبدیل به ولتاژ و رطوبت حجمی می‌باشد. سیگنال‌های تولیدشده 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 دی‌الکتریک و هدایت یونی خاک از جمله مقاومت‌هایی هستند که در سر راه این سیگنال‌ها قرار می‌گیرند. 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 دی‌الکتریک آب ۸۱، خاک ۴ و هوا ۱ است، بنابراین مقدار دی‌الکتریک خاک به‌شدت به مقدار رطوبت وابسته است (sarani and afrasiab, 2012). اگر بین مقاومت میله‌ها با مقاومت خطوط انتقالی درون پروب تفاوت ایجاد شود، بخشی از سیگنال‌های ایجادشده توسط دستگاه از محل اتصال میله‌های پروب از بدنه به داخل دستگاه باز می‌گردد. سیگنال‌های بازگشتی و ساطع‌شده باعث ایجاد اختلاف پتانسیل ثابتی در

تیمار کدورت آب و سه تیمار بافت خاک در سه تکرار و به- صورت گلدانی در ۳۶ گلدان انجام شد. گلدان‌ها دارای حجمی معادل ۰/۰۰۱۱۶ مترمکعب و از جنس پلاستیک بودند که با توجه به چگالی ظاهری هر بافت، مقدار مشخصی خاک درون گلدان‌ها ریخته شد. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش، در جدول (۱) قابل ملاحظه است. تیمارهای کدورت آب شامل مقادیر کدورت ۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰ و کدورت ناچیز (۱۰) NTU بودند. برای ایجاد سطوح مختلف کدورت در آب آبیاری، حاکی لومی با مشخصات موجود در جدول (۱) از الک دو میلی- متری عبور داده شد و چندین نمونه با وزن‌های مختلف آماده گردید. نمونه خاک‌های با وزن‌های متفاوت در یک لیتر آب حل و به مدت سه دقیقه در حالت سکون قرار داده شد. در این مدت، مواد سنگین از جمله شن موجود در خاک ته‌نشین گردید. سپس از محلول تهیه‌شده (قسمت بدون مواد ته‌نشین شده)، نمونه آب گرفته شد و با دستگاه کدورت سنج، کدورت محلول قرائت گردید. این کار برای نمونه‌های بیشتری تکرار و منحنی کدورت ایجاد شده در برابر مقدار خاک مورد نیاز رسم گردید (Salamati and Moazed, 2008). شکل (۱)، مقدار خاک مورد نیاز برای تهیه‌ی کدورت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	چگالی ظاهری ($\frac{g}{cm^3}$)
لوم سیلنتی	۱۹/۳۲	۵۱/۸۸	۲۸/۸۰	۱/۴۰
لوم	۲۳/۰۸	۳۶/۸۸	۴۰/۰۴	۱/۴۳
لوم شنی	۱۴/۲۰	۳۱/۰۰	۵۴/۸۰	۱/۵۹



شکل ۱. مقدار خاک مورد نیاز در یک لیتر آب برای ایجاد سطوح مختلف کدورت

بر اساس شکل (۱)، مقدار خاک مورد نیاز برای تهیه‌ی هر لیتر آب با کدورت‌های ۱۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ NTU به ترتیب ۰/۰۸، ۸، ۱۶ و ۲۵ گرم به‌دست آمد. پس از تهیه نمونه-

$$\sqrt{\varepsilon}=1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3 \quad (\text{رابطه ۲})$$

و یا رابطه‌ی خطی:

$$\sqrt{\varepsilon}=1.1+4. \quad (\text{رابطه ۳})$$

کالیبراسیون دستگاه

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

خط انتقال می‌شود و تغییرات ولتاژ توسط صفحه‌ی نمایش- دهنده‌ی داده‌ها ثبت می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ مقاومت مربوطه، می‌توان از طریق روابط (۲) و (۳) ثابت دی-الکتریک و رابطه (۱) مقدار رطوبت حجمی را تعیین کرد (Gaskin and Miller, 1996; Miller and Gaskin, 1977)

$$\theta = \frac{(\sqrt{\varepsilon}-\alpha_0)}{\alpha_1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

و ریشه‌ی دوم ثابت دی‌الکتریک ($\sqrt{\varepsilon}$) به صورت رابطه (۲) ارائه می‌شود:

جدول ۲. توابع کالیبراسیون ارائه‌شده برای خاک‌های معدنی

منبع	تابع
روش خطی سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	$\theta=0.19+0.119(1.1+4.44V)$
روش غیرخطی سازندگان دستگاه (۱۹۹۹)	$\theta=0.19+0.119(1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3)$
روش Topp <i>et al.</i> (1980)	$\theta=0.053+0.0292\varepsilon-0.00055\varepsilon^2+0.0000043\varepsilon^3$
روش Roth <i>et al.</i> (1990)	$\theta=0.0728+0.0448\varepsilon+0.00195\varepsilon^2+0.0000361\varepsilon^3$

مربعات خطا (RMSE)، میزان خطای نسبی (RE) به ترتیب به شرح روابط (۷) و (۸) و همچنین ضریب تعیین (R^2) استفاده شد (Alizadeh *et al.*, 2009)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{TP}-\theta)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{TP}-\theta|/n}{\bar{\theta}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این روابط، θ رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی (cm^3/cm^3)، θ_{TP} رطوبت اندازه‌گیری شده به وسیله تئاپروب (cm^3/cm^3)، $\bar{\theta}$ متوسط رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی (cm^3/cm^3) و n تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

سازندگان دستگاه تئاپروب دو معادله برای آن ارائه کردند و با استفاده از کالیبراسیون ویژه نیز دو معادله‌ی دیگر برای دستگاه به دست آمد. تاپ و همکاران در سال ۱۹۸۰ و روت و همکاران در سال ۱۹۹۰ نیز معادلات دیگری ارائه کردند که مقدار رطوبت خاک را با استفاده از ثابت دی‌الکتریک خاک محاسبه می‌نماید. برای مقایسه شش روش فوق از مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی (RE) مربوط به توابع کالیبراسیونی مذکور، تحت میزان مختلف کدورت آب آبیاری در بافت‌های متفاوت استفاده شد که نتایج آن در جدول‌های (۳) تا (۵) قابل ملاحظه می‌باشد.

کالیبراسیون ویژه‌ی دستگاه

برای واسنجی دستگاه تئاپروب، 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 ۲ و ۳ محاسبه می‌شود. سپس نمونه‌ی خاک به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده می‌شود تا خشک گردد. ضمن محاسبه‌ی رطوبت حجمی نمونه (θ_W)، ولتاژ ورودی خاک خشک (V_0) نیز محاسبه شده و با استفاده از روابط ۲ و ۳، $\sqrt{\varepsilon_0}$ محاسبه می‌گردد.

در مرحله‌ی بعد با جایگزینی $\theta=0$ در رابطه‌ی ۱، $\alpha_0 = \sqrt{\varepsilon_0}$ از روی نمونه‌ی خاک کاملاً خشک به دست می‌آید. در نهایت با جایگذاری $\sqrt{\varepsilon_W}$ و θ_W در رابطه‌ی ۴، α_1 محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_1 = \frac{(\sqrt{\varepsilon_W}-\sqrt{\varepsilon_0})}{\theta_v} \quad (\text{رابطه ۴})$$

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 به دست آورد.

$$\theta_v = \frac{[(1.07+6.4V-6.4V^2+4.7V^3)-\alpha_0]}{\alpha_1} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\theta_v = \frac{[(1.1+4.44V)-\alpha_0]}{\alpha_1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

رابطه‌ی ۵، حالت غیرخطی ویژه و رابطه‌ی ۶، حالت خطی ویژه است.

در این پژوهش، برای بررسی میزان همسانی مدل‌های تخمین رطوبت با روش مستقیم اندازه‌گیری، از ریشه‌ی میانگین

جدول ۳. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی تخمین رطوبت خاک توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تناپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم-

سیلتی													کدورت (NTU)
Roth <i>et al.</i> (1990)		Topp <i>et al.</i> (1980)		غیرخطی ویژه		خطی ویژه		غیرخطی		خطی			
RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE		
۱۱/۹۷	۰/۰۴۵	۱۲/۸۶	۰/۰۴۸	۱۱/۲۶	۰/۰۴۲	۱۳/۸۸	۰/۰۵	۱۱/۶۴	۰/۰۴۴	۱۵/۰۲	۰/۰۵۶	۱۰	
۱۳/۰۹	۰/۰۴۸	۱۴/۰۳	۰/۰۵۱	۱۲/۶۷	۰/۰۴۶	۱۴/۹۲	۰/۰۵۳	۱۲/۹۸	۰/۰۴۷	۱۶/۰۸	۰/۰۵۹	۱۰۰۰	
۱۴/۹۲	۰/۰۵۵	۱۶/۴	۰/۰۶	۱۵/۱۱	۰/۰۵۵	۱۷/۰۹	۰/۰۶۲	۱۵/۳۵	۰/۰۵۷	۱۸/۰۸	۰/۰۶۸	۲۰۰۰	
۱۴/۹۵	۰/۰۵۶	۱۶/۹۷	۰/۰۶۱	۱۵/۷۰	۰/۰۵۶	۱۷/۴۳	۰/۰۶۴	۱۵/۴۲	۰/۰۵۸	۱۸/۷	۰/۰۶۹	۳۰۰۰	
۱۳/۷۳	۰/۰۵۱	۱۵/۰۷	۰/۰۵۵	۱۳/۶۹	۰/۰۵	۱۵/۸۳	۰/۰۵۷	۱۳/۸۵	۰/۰۵۲	۱۶/۹۷	۰/۰۶۳	میانگین	

جدول ۴. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تناپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم

سیلتی													کدورت (NTU)
Roth <i>et al.</i> (1990)		Topp <i>et al.</i> (1980)		غیرخطی ویژه		خطی ویژه		غیرخطی		خطی			
RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE		
۱۹/۳۴	۰/۰۶۷	۲۰/۲۶	۰/۰۷۱	۱۶/۸۱	۰/۰۵۶	۱۸/۹۷	۰/۰۶۳	۱۹/۴۷	۰/۰۶۹	۲۳/۷۷	۰/۰۸۲	۱۰	
۱۸/۲	۰/۰۶۷	۱۹/۸	۰/۰۷۴	۱۷/۲۸	۰/۰۶۳	۱۹/۷۴	۰/۰۷۳	۱۹/۳۷	۰/۰۷۲	۲۴/۸۸	۰/۰۸۳	۱۰۰۰	
۲۰	۰/۰۷۳	۲۲/۲۶	۰/۰۸۱	۱۶/۹۴	۰/۰۵۸	۱۹/۴۳	۰/۰۶۷	۲۱/۹۷	۰/۰۸	۲۵/۴۶	۰/۰۹۱	۲۰۰۰	
۲۳/۸۷	۰/۰۸۳	۲۶/۶۹	۰/۰۹	۱۷/۸۴	۰/۰۵۵	۱۹/۴۱	۰/۰۶۳	۲۶/۸۳	۰/۰۸۹	۳۰/۴۵	۰/۱۰۱	۳۰۰۰	
۲۰/۳۵	۰/۰۷۲	۲۲/۲۵	۰/۰۷۹	۱۷/۲۲	۰/۰۵۸	۱۹/۳۹	۰/۰۶۶	۲۱/۹۱	۰/۰۷۷	۲۵/۳۹	۰/۰۸۹	میانگین	

جدول ۵. مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی توابع مختلف کالیبراسیونی دستگاه تناپروب، در تیمارهای مختلف، در بافت لوم شنی

سیلتی													کدورت (NTU)
Roth <i>et al.</i> (1990)		Topp <i>et al.</i> (1980)		غیرخطی ویژه		خطی ویژه		غیرخطی		خطی			
RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE	RE(%)	RMSE		
۱۷/۲۶	۰/۰۴۸	۱۶/۱	۰/۰۴	۷/۹۴	۰/۰۲۳	۸/۸۵	۰/۰۲۸	۱۵/۰۳	۰/۰۳۷	۲۰/۶	۰/۰۵۱	۱۰	
۱۶/۰۷	۰/۰۵	۱۵/۱	۰/۰۴۳	۱۰/۱۷	۰/۰۳۱	۱۱/۵۱	۰/۰۳۶	۱۴	۰/۰۴	۱۹/۹۱	۰/۰۵۴	۱۰۰۰	
۱۹/۲۴	۰/۰۶	۱۹/۰۴	۰/۰۵۶	۱۲/۶۹	۰/۰۳۷	۱۴/۳۳	۰/۰۴۲	۱۷/۸۹	۰/۰۵۲	۲۳/۶۷	۰/۰۶۷	۲۰۰۰	
۲۴/۴۲	۰/۰۷۱	۲۵/۹۶	۰/۰۷	۱۴/۰۴	۰/۰۳۶	۱۵/۵	۰/۰۴۱	۲۵/۰۶	۰/۰۶۸	۳۱/۱	۰/۰۸۲	۳۰۰۰	
۱۹/۲۵	۰/۰۵۷	۱۹/۰۵	۰/۰۵۲	۱۱/۲۱	۰/۰۳۲	۱۲/۵۵	۰/۰۳۷	۱۸	۰/۰۴۹	۲۳/۸۲	۰/۰۶۳	میانگین	

دلیل افزایش کدورت به وضوح قابل مشاهده است. در این بافت کمترین مقدار خطا در هر چهار سطح کدورت در بین توابع کالیبراسیونی ارائه شده مربوط به روش غیرخطی ویژه و بیشترین خطا مربوط به روش خطی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه بود، لذا در این نوع بافت خاک، کالیبراسیون ویژه دستگاه الزامی به نظر می رسد. با افزایش کدورت آب آبیاری در بافت لومی (جدول ۴)، مقدار RMSE در روش های خطی ویژه و غیرخطی ویژه روند افزایشی یا کاهش ثابتی را نشان نداد این در حالی است که در همین بافت، با افزایش کدورت آب آبیاری، دقت قرائت دستگاه در توابع کالیبراسیونی دیگر به شدت کاهش

همان گونه که در جدول (۳) قابل ملاحظه است، در بافت لوم سیلتی، در تمامی توابع کالیبراسیونی ارائه شده، افزایش کدورت آب آبیاری موجب افزایش مقدار RMSE و RE و کاهش دقت دستگاه شده است. به عنوان مثال در روش خطی ویژه، افزایش کدورت آب آبیاری از ۱۰ به ۳۰۰۰ (NTU)، موجب افزایش مقدار RMSE و RE به ترتیب از ۰/۰۵ به ۰/۰۶۴ و از ۱۳/۸۸ به ۱۷/۴۳ شد. همچنین در روش غیرخطی ویژه افزایش کدورت موجب افزایش مقدار RMSE و RE به ترتیب از ۰/۰۴۲ به ۰/۰۵۶ و از ۱۱/۲۶ به ۱۵/۷۰ شد. این در حالی است که در دیگر روش های ارائه شده نیز افزایش خطای دقت دستگاه به

از طرفی در تمامی بافت‌های مورد آزمایش، افزایش کدورت آب آبیاری موجب کاهش دقت قرائت دستگاه تناپروب شد که می‌توان آن را به مقدار رس موجود در آب آبیاری تیمارهای مختلف نسبت داد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک در اثر افزایش رس، موجب قرائت بیشتر از واقع دستگاه تناپروب خواهد شد. تأثیر کدورت آب آبیاری بر دقت دستگاه تناپروب در بافت لوم سیلتی در شکل (۱) قابل مشاهده است.

در بافت لوم سیلتی دو روش غیرخطی ویژه و Roth *et al.* (1990) دارای کمترین مقدار RMSE و RE در مقایسه با دیگر توابع ارائه شده بودند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش کدورت آب آبیاری در بافت لوم سیلتی، باعث کاهش ضریب تعیین (R^2) و کاهش دقت دستگاه شده است. افزایش کدورت از ۱۰ به ۳۰۰۰ (NTU) موجب کاهش ضریب تعیین از ۰/۹۵۴۵ به ۰/۹۱۵۷ در روش غیرخطی ویژه شده است، این در حالی است که ضریب تعیین روش Roth *et al.* (1990) در بافت لوم سیلتی، با افزایش کدورت تغییر چندانی نکرده است.

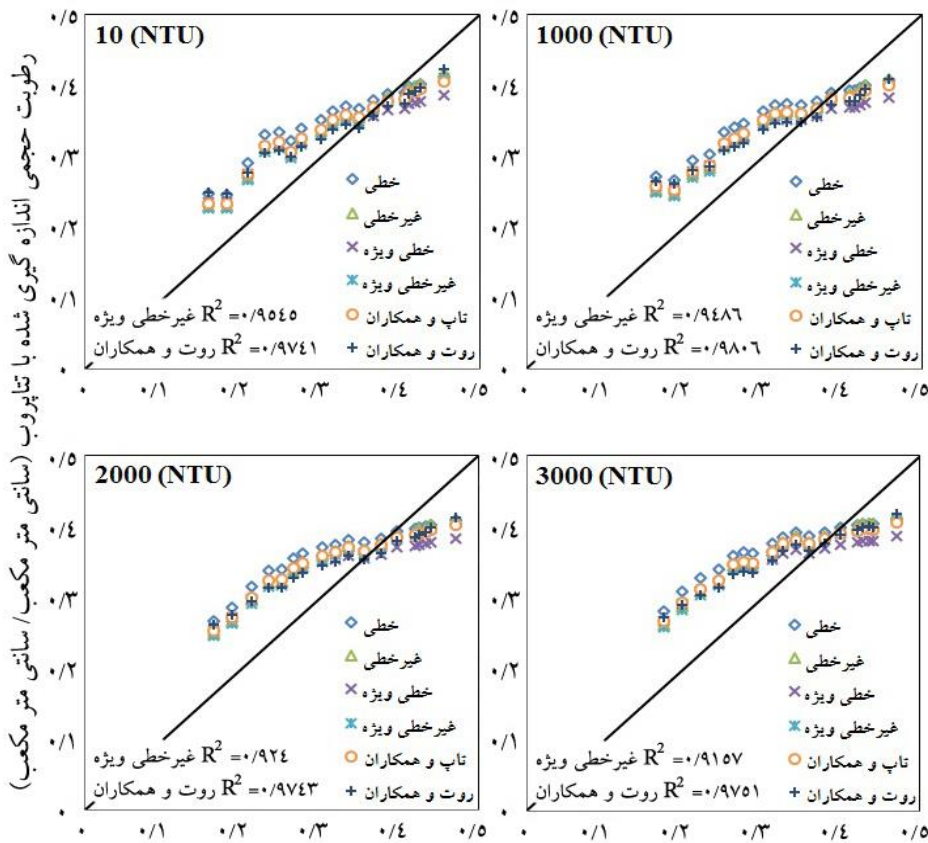
شکل (۲)، انحراف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط تناپروب با روش وزنی در بافت لوم را نشان می‌دهد. در این بافت دو روش غیرخطی ویژه و خطی ویژه به ترتیب دارای کمترین مقدار RMSE و RE در مقایسه با دیگر توابع ارائه شده بودند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش کدورت آب آبیاری در هر دو روش کالیبراسیونی غیرخطی ویژه و خطی ویژه، باعث کاهش ضریب تعیین و کاهش دقت دستگاه تناپروب شده است. Sun *et al.* (2000) گزارش دادند که خاک‌های رسی به‌طور معمول دارای شوری بالاتر از خاک‌های شنی و لومی است که دلیل آن غلظت یون‌ها در محلول خاک و سطح ذرات خاک است. این مقدار شوری می‌تواند باعث تغییر میزان ضریب دی‌الکتریک خاک شود و در نتیجه باعث تخمین بیش از حد رطوبت خاک شود.

شکل (۳)، انحراف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط تناپروب با روش وزنی در بافت لوم را نشان می‌دهد. در این بافت نیز همانند بافت لومی دو روش غیرخطی ویژه و خطی ویژه به ترتیب دارای کمترین مقدار RMSE و RE در مقایسه با دیگر توابع ارائه شده بودند.

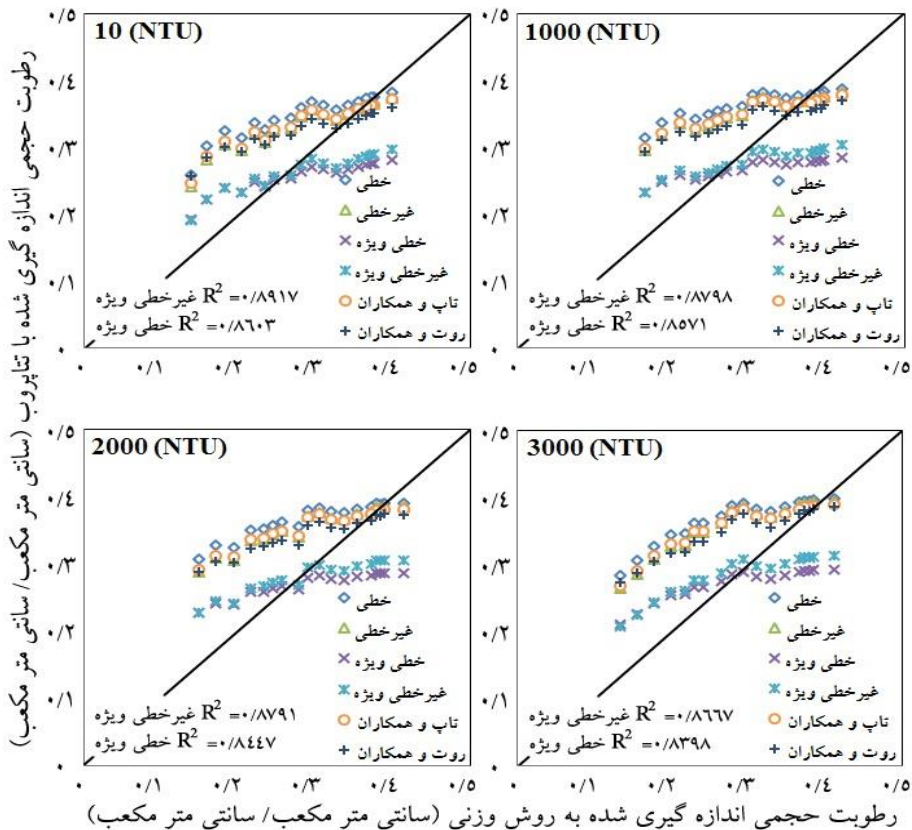
همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، افزایش کدورت آب آبیاری موجب کاهش ضریب تعیین در هر دو روش خطی ویژه و غیرخطی ویژه شده است. در بافت لوم شنی، افزایش میزان کدورت از ۱۰ به ۳۰۰۰ NTU، باعث کاهش ضریب تعیین از ۰/۹۸۹۸ به ۰/۹۳۴۷ در روش غیرخطی ویژه و از ۰/۹۷۵۵ به ۰/۸۹۶۹ در روش خطی ویژه گردیده است.

نشان داد به نحوی که در روش خطی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه، مقدار RMSE از ۰/۰۸۲ به ۰/۱۰۱ افزایش یافت. این مقدار در روش‌های غیرخطی ارائه شده توسط سازندگان دستگاه، Roth *et al.* (1980) و Roth *et al.* (1990)، به ترتیب از ۰/۰۶۹ به ۰/۰۸۹، از ۰/۰۷۱ به ۰/۰۹۰ و از ۰/۰۶۷ به ۰/۰۸۳ افزایش یافت. لذا در بافت لومی نیز، کالیبراسیون ویژه دستگاه الزامی به نظر می‌رسد. در بافت لوم شنی (جدول ۵) نیز افزایش کدورت آب آبیاری از ۱۰ به ۳۰۰۰ (NTU)، موجب افزایش مقدار RMSE و RE در تمامی توابع کالیبراسیونی ارائه شده، گردید. در این بافت نیز، کمترین مقدار خطا در هر چهار سطح کدورت در بین توابع کالیبراسیونی ارائه‌شده مربوط به روش غیرخطی ویژه و بیشترین خطا مربوط به روش خطی ارائه‌شده توسط سازندگان دستگاه بود، لذا در این نوع بافت خاک نیز همانند دو بافت دیگر پیشنهاد به کالیبراسیون ویژه دستگاه می‌گردد. این نتایج با نتایج Cosh *et al.* (2005) و Kargas and Kerkides (2008) مطابقت دارد. آن‌ها گزارش دادند که منحنی‌های کالیبراسیونی ارائه‌شده توسط سازندگان دستگاه، در بیشتر موارد از حدود پیش‌بینی شده برای رطوبت انحراف داشته و کالیبراسیون ویژه‌ی دستگاه تناپروب برای هر خاکی ضروری است.

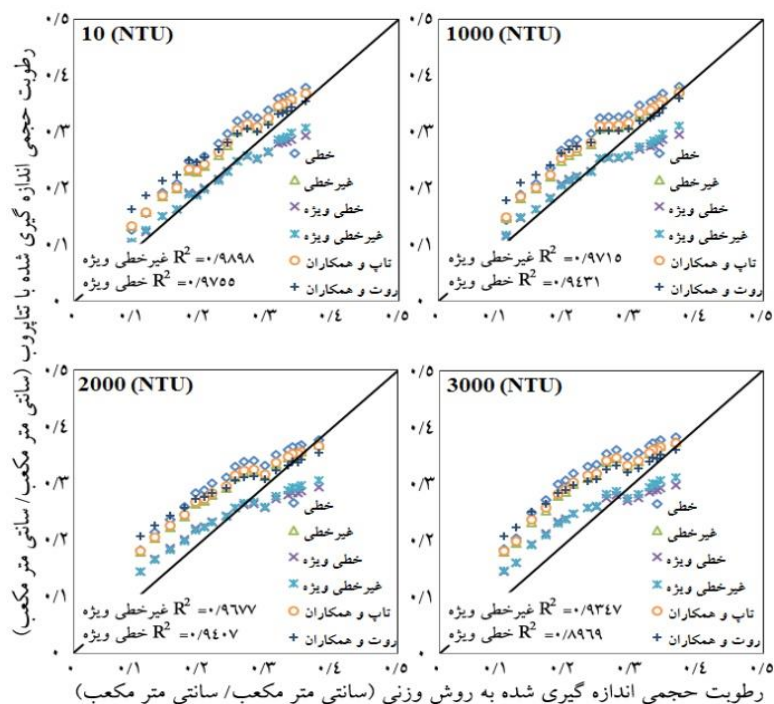
کمترین مقدار RMSE و RE برای تمامی توابع در بین سه بافت مورد آزمایش در بافت لوم شنی اتفاق افتاد. در این بافت، دو روش غیرخطی ویژه و خطی ویژه دارای کمترین مقدار RMSE و RE در بین توابع کالیبراسیونی بودند. مقدار RMSE در روش غیرخطی ویژه، در کدورت ۱۰ NTU کاهش چشم‌گیری نسبت به مقدار RMSE تحت همین مقدار کدورت در دو بافت دیگر داشته است. در کدورت‌های دیگر و روش‌های کالیبراسیونی دیگر نیز همین مقدار کاهش نسبت به دو بافت دیگر مشاهده شد. این موضوع را می‌توان متأثر از سبک شدن بافت و کاهش مقدار رس موجود در بافت لوم شنی نسبت به دو بافت دیگر دانست. Roth *et al.* (1990) گزارش دادند که مقدار رس با سطح ویژه‌ی زیاد، سبب آزادی کمتر مولکول‌های آب در اطراف ذرات جامد خاک و در نتیجه کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک در اطراف این ذرات، نسبت به آب آزاد می‌گردد که در نهایت موجب خطا در قرائت مقدار رطوبت واقعی توسط دستگاه تناپروب خواهد شد. همچنین نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز نشان داده که با افزایش میزان رس، ضریب دی‌الکتریک آب پیوندی در اطراف ذرات، کمتر از مقدار آن در آب آزاد می‌گردد (Namdar Khojasteh *et al.*, 2009; Gong *et al.*, 2003). بنابراین با سنگین‌تر شدن بافت خاک و افزایش میزان رس خاک، از دقت دستگاه کاسته می‌شود (Alizadeh *et al.*, 2009).



شکل ۱. مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه تترپروب در بافت لوم سیلنتی تحت میزان مختلف کدورت.



شکل ۲. مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه تترپروب در بافت لوم سیلنتی تحت میزان مختلف کدورت.



شکل ۳. مقایسه‌ی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه تتاپروب در بافت لوم شنی تحت میزان مختلف کدورت.

شده با تتاپروب نداشت.

با توجه به مقایسه توابع کالیبراسیونی ارائه‌شده بر اساس میانگین مربعات خطا (RMSE)، میزان خطای نسبی (RE) و ضریب تعیین (R^2) در جدول‌های (۳، ۴ و ۵) و همچنین شکل-های (۱، ۲ و ۳)، روش غیرخطی ویژه دارای بیشترین دقت - نسبت به سایر توابع در هر سه بافت خاک بود، لذا در قالب جدول (۷)، معادلات پیشنهادی برای کالیبراسیون دستگاه تتاپروب به روش غیرخطی ویژه تحت مقادیر مختلف کدورت آب آبیاری ارائه شده است.

جدول (۶)، نتایج تجزیه واریانس را برای توابع مختلف کالیبراسیونی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بافت خاک در تمامی روش‌های کالیبراسیونی، تأثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه تتاپروب داشت. عامل کدورت آب آبیاری در روش کالیبراسیونی خطی ویژه در سطح ۵ درصد و در سایر روش‌ها، در سطح ۱ درصد تأثیر معنی‌داری بر قرائت دستگاه تتاپروب داشت. همچنین قابل‌ذکر است در تمامی روش‌های کالیبراسیونی، اثر متقابل بافت و کدورت، تأثیر معنی‌داری بر رطوبت اندازه‌گیری

جدول ۶. تجزیه واریانس برای توابع مختلف کالیبراسیونی

		مجموع مربعات خطا					
(1990) Roth et al.	(1980) Topp et al.	غیرخطی ویژه	خطی ویژه	غیرخطی	خطی	درجه‌ی آزادی	منبع تغییر
۰/۰۹۶**	۰/۱۱۵**	۰/۱۵۸**	۰/۱۸۹**	۰/۱۰۳**	۰/۱۲۲**	۲	بافت
۰/۰۳۳**	۰/۰۳۶**	۰/۰۳۳**	۰/۰۲۴*	۰/۰۴۱**	۰/۰۳۵**	۳	کدورت
۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۱۱ ^{ns}	۶	بافت × کدورت

^{ns}، ^{*}، ^{**} به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری

جدول ۷. معادلات کالیبراسیون مدل غیرخطی ویژه برای برآورد رطوبت خاک تحت شرایط مختلف کدورت

بافت خاک		کدورت (NTU)	
لوم شنی	لوم	لوم سیلتی	
$\theta_{TP} = 0.7558\theta_V + 0.462$	$\theta_{TP} = 0.3327\theta_V + 0.1685$	$\theta_{TP} = 0.5999\theta_V + 0.146$	۱۰
$\theta_{TP} = 0.6682\theta_V + 0.685$	$\theta_{TP} = 0.2361\theta_V + 0.2073$	$\theta_{TP} = 0.5484\theta_V + 0.164$	۱۰۰۰
$\theta_{TP} = 0.5666\theta_V + 0.1021$	$\theta_{TP} = 0.2881\theta_V + 0.1962$	$\theta_{TP} = 0.474\theta_V + 0.1947$	۲۰۰۰
$\theta_{TP} = 0.5882\theta_V + 0.1101$	$\theta_{TP} = 0.3465\theta_V + 0.1848$	$\theta_{TP} = 0.4647\theta_V + 0.2042$	۳۰۰۰

θ_V و θ_{TP} به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده به وسیله تتاپروب و به روش وزنی می‌باشند.

کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک در اطراف این ذرات می‌شود که در نهایت موجب خطا در قرائت مقدار رطوبت واقعی توسط دستگاه تتاپروب خواهد شد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که کاهش ضریب دی‌الکتریک خاک در اثر افزایش رس، موجب قرائت بیشتر از واقع دستگاه تتاپروب خواهد شد. همچنین نتایج نشان داد که توابع کالیبراسیونی ویژه‌ی دستگاه (خطی ویژه و غیرخطی ویژه)، نسبت به توابع کالیبراسیونی دیگر، دارای دقت بیشتری است که نشان از ضرورت کالیبراسیون ویژه دستگاه برای تمامی خاک‌های مورد آزمایش دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد عامل بافت خاک و کدورت آب آبیاری در سطح معنی‌داری ($P < 0.01$) بر دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط دستگاه تتاپروب مدل ML2 تأثیر دارد. نتایج نشان داد افزایش میزان کدورت آب آبیاری در هر سه نوع بافت خاک (لوم سیلتی، لوم و لوم شنی) باعث کاهش دقت قرائت دستگاه تتاپروب می‌شود. بیشترین مقدار خطا در بافت لوم مشاهده شد که دارای بیشترین درصد رس بود و کمترین مقدار خطا در بافت لوم شنی رخ داد که دارای کمترین مقدار رس نسبت به دو بافت دیگر بود. افزایش میزان رس باعث آزادی کمتر مولکول‌های آب در اطراف ذرات جامد خاک و در نتیجه

REFERENCES

- Alizadeh, H., Nouri-mohamadi, M., and Liaghat, A. M. (2009) Evaluation of the effect of soil texture and compaction on the precision of water content measurement by Theta Probe (model ML2). *Iranian Water Research Journal*. 3(4): 19-29. (In Farsi)
- Barzegar, A. (2008) *Advanced soil physics* (3th ed.). Ahvaz: shahid chamran university press (In Farsi).
- 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.
- Butler, D. and Karunaratne, N. (1995) The suspended solids trap efficiency of the roadside gully pot. *Water Research*, 29:2, 719-729.
- 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.
- Namdar Khojasteh, D., Shorafa, M., and Fazeli, M. (2012) The effects of amount and type of clay minerals on soil dielectric constant for measuring water content with Time Domain Reflectometry. *Journal of Water and Soil Conservation*. 18(3): 85-101. (In Farsi)
- 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.
- 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.
- Fuchs, S., Haritopoulou, T., Schaefer, M., and Wilhelm, M. (1997) Heavy metals in freshwater ecosystems introduced by urban rainwater runoff – monitoring of suspended solids, river sediments and biofilms. *Water Science and Technology*, 36:8-9, 277-282.
- Gaskin, G. and Miller, J. D. (1996) Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Research*, 63: 153-160.
- Gong, Y., Cao, Q., and Sun, Z. (2003) The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrol Process*. 17: 3601–3614.
- Jafari Haghghi, M. (2003) *Methods of soil analysis* (1th ed.). Tehran: Zoha press (In Farsi).
- Kargas, G. and Kerkides, P. (2008) Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe. *Journal of Irrigation and Drainage*, 57(4), 435-449.
- Miller, J. D. and Gaskin, G. (1977) The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note.
- Roth, K., Schulin, R., Flüher, 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.
- Salamati, N. and Moazed, H. (2008) Study of the effects of irrigation water turbidity on physical and hydraulic properties of soils. *Scientific Journal Management System*, 9(2): 113-125. (In Farsi)
- Sarani, N. and Afrasiab, P. (2012) Effect of soil texture on moisture measurement accuracy with Theta probe ML2 in Sistan region. *International conference on chemical, ecology and environmental sciences (ICEES'2012)*, March 17-18, 2012 Bangkok.
- Sun, Z. J., Young, G. D., McFarlane, R., and Chambers, B. M. (2000) The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain- reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science* 80(1): 13–22.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16:574-582.