

## ارزیابی کارایی آون مزرعه‌ای برای اندازه‌گیری سریع مقدار رطوبت جرمی خاک

فرزاد غلامزاده<sup>۱</sup>، حسین عسگرزاده<sup>۱\*</sup>، حبیب خداوردیلو<sup>۱</sup> و محمدرضا مصدقی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۶)

### چکیده

این پژوهش تابستان سال ۱۴۰۰ به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آون مزرعه‌ای انجام شد. برای این کار ده نوع خاک با شوری عصاره اشباع کمتر از  $4 \text{ dS m}^{-1}$  (غیرشور) و سه نوع خاک شور در محدوده‌ی دریاچه ارومیه بررسی شدند. برای هر خاک کرتی با ابعاد  $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  آماده شد و ثبت داده‌های رطوبت جرمی و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در آن انجام شد. مقادیر رطوبت جرمی ( $\theta_m$ ) اندازه‌گیری شده با آون مزرعه‌ای ( $\theta_{mFO}$ ) با مقادیر رطوبت جرمی اندازه‌گیری شده با آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ) در دمای  $105^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت (به عنوان روش مرجع) مقایسه شد. دماهای  $120^\circ\text{C}$ ،  $140^\circ\text{C}$  و  $160^\circ\text{C}$  با سه مدت زمان  $10$ ،  $15$  و  $20$  دقیقه برای خشک کردن نمونه‌های خاک در آون مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. در هر سه دما، مقادیر  $\theta_{mFO}$  زمانی که نمونه خاک به مدت  $15$  یا  $20$  دقیقه در کوره آون مزرعه‌ای قرار می‌گرفت، هم‌خوانی نزدیکی با مقادیر  $\theta_{mLO}$  داشت. روابط خطی معنی‌داری بین مقادیر  $\theta_{mFO}$  و  $\theta_{mLO}$  استخراج شد که شیب آن‌ها بسیار نزدیک به ۱ بود، مقادیر عرض از مبدا روابط قابل چشم‌پوشی بوده و پراکنش داده‌ها اطراف خط یک به یک به صورت متقارن بود. تأثیرپذیری اندک اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به این روش از مقدار ماده آلی، مقدار رس، شوری و چگالی ظاهری خاک، مزیتی کاربردی برای روش آون مزرعه‌ای است. یافته‌های این پژوهش مؤید کارآمدی آون مزرعه‌ای برای اندازه‌گیری سریع و قابل اطمینان مقدار رطوبت در خاک‌های مختلف است.

واژه‌های کلیدی: آون مزرعه‌ای، دمای خشک کردن، رس، رطوبت جرمی خاک، ماده آلی

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h.asgarzadeh@urmia.ac.ir, asgarzadeh8688@gmail.com

## مقدمه

مقدار آب خاک رشد گیاه (فتوستتوز) و پوشش گیاهی در کره زمین را تحت تأثیر قراد داده و در چرخه کربن نقش مهمی ایفا می‌کند (۱). فرایندهای مهمی مانند ایجاد رواناب، فعالیت میکروبی و تنوع زیستی وابسته به مقدار آب خاک است (۲). آگاهی از مقدار رطوبت خاک و توزیع مکانی و تغییرات زمانی آن در پژوهش‌های مربوط به علوم خاک، محیط‌زیست، آبیاری و زهکشی به‌منظور بهبود کارایی مصرف آب از موضوعات مهم است (۳). کمبود آب در خاک به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک یک محدودیت عمده برای تولید محصولات کشاورزی است (۴). در این مناطق با افزایش مقدار آب قابل استفاده در خاک شرایط رشد گیاه بهبود می‌یابد (۵). مقدار آب خاک با تأثیر بر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک، بر رشد گیاه و مقدار محصول اثر می‌گذارد. با کاهش کیفیت فیزیکی خاک مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه کاهش می‌یابد (۶). کاهش کیفیت فیزیکی خاک که همراه با تغییر توزیع اندازه منافذ خاک است باعث محدود شدن جذب آب توسط گیاه در رطوبت‌های زیاد (در اثر تهویه کم) و رطوبت‌های کم (در اثر مقاومت فروروی زیاد خاک)، شده و عملاً دامنه‌ی رطوبتی را که در آن گیاه به راحتی آب را جذب می‌کند باریک می‌کند. این کاهش عوامل محدود کننده، رشد ریشه گیاه را مختل کرده و متعاقب آن رشد بخش هوایی و عملکرد گیاه کاهش می‌یابد (۷ و ۸).

هرچند مقدار آب قابل استفاده خاک هم‌بستگی قوی با رشد گیاه دارد اما این انرژی مورد نیاز برای جذب واحد جرم آب از خاک است که آسانی جذب آب توسط گیاه را تعیین می‌کند (۹). از این رو مفهوم انرژی انتگرالی ( $E_I$ ) (Integral energy) برای کمی‌سازی انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب واحد جرم آب از خاک در محدوده آب قابل استفاده و یا یک دامنه رطوبتی (مکش ماتریک) معین توسط میناسنی و مکبرانتنی (۹) پیشنهاد شد. مقدار انرژی مورد نیاز برای جذب واحد جرم آب از خاک در رطوبت‌های کم بسیار بیشتر از مقدار آن در

رطوبت‌های زیاد است (۱۰). از این رو اندازه‌گیری و کنترل مقدار آب خاک می‌تواند به مدیریت آب خاک و کاهش صرف انرژی برای جذب آب توسط گیاه مفید باشد.

کمبود منابع آب و نیازهای روزافزون بشر به آب باعث ایجاد و ابداع روش‌هایی برای کاهش مصرف آب و افزایش کارایی استفاده از آن شده است. برای ایجاد شرایط مناسب رطوبتی برای گیاه و مدیریت کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه-خشک، برنامه‌ریزی آبیاری بسیار اهمیت دارد زیرا در صورت استفاده درست از روش‌ها و ابزار برنامه‌ریزی آبیاری، افزایش قابل توجهی در کارایی مصرف آب حاصل می‌شود (۱۱). از این رو تعیین سریع و دقیق زمان آبیاری که می‌تواند بر اساس اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک باشد، یکی از مهم‌ترین مسائل مدیریت پایدار آب به‌منظور جلوگیری از تنش آبی در گیاه استفاده بهینه از آب آبیاری است (۱۲).

روش‌های غیرمستقیم بسیاری برای تعیین مقدار رطوبت خاک وجود دارند. انتخاب هر یک از روش‌های اندازه‌گیری بستگی به هزینه، دقت اندازه‌گیری، زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری، چگونگی نصب تجهیزات، کاربرد داده‌های مورد نظر، مدیریت و دوام تجهیزات دارد. نوترون‌متری (۱۳ و ۱۴) و انعکاس سنخ حوزه زمانی (Time domain reflectometry) یا TDR (۱۵ و ۱۶) از جمله روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک هستند که به‌طور گسترده‌ای در کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال دقت اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با این تکنیک‌ها بستگی به ویژگی‌های خاک، واسنجی دقیق و تجربه کاربر دارد. اندازه‌گیری مقدار آب خاک با استفاده از خشک‌کردن آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به جرم ثابت به‌عنوان تنها روش مستقیم اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک، دقیق‌ترین روش تعیین مقدار آب خاک بوده و به‌عنوان روش مرجع برای واسنجی و اعتبارسنجی دیگر روش‌های تعیین مقدار رطوبت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۷). در این روش مقدار رطوبت جرمی خاک به‌طور مستقیم از تقسیم جرم آب به جرم خاک خشک محاسبه می‌شود. با وجود دقت زیاد، این روش

تنظیم و تغییر زمان و دمای مورد نظر است. این تنظیمات از طریق کلید SET و کلیدهای Up و Down انجام می‌شود.

کوره القائی این دستگاه دارای یک سلف (سیم‌پیچ) بدون هسته و یک مدار رزوناتور (نوسان‌کننده) قدرتی است که در صورت اعمال ولتاژ با فرکانس ۱۵ الی ۲۰ کیلوهرتز شروع به تولید میدان در سلف دستگاه می‌کند. عملکرد این سیستم به طریقی است که تنها با ورود اجسام فلزی و رسانا به درون سلف و قطع جریان میدان توسط این اجسام منجر به گرم‌شدن آن‌ها می‌شود. اجسام نارسانا و عایق در این میدان هیچ تأثیری نمی‌پذیرند. از آنجایی که تولید گرما در این سیستم توسط ایجاد میدان القای آن به اجسام رسانا بدون تماس فیزیکی انجام می‌شود این گونه کوره‌ها را کوره القائی می‌نامند.

کارایی این آون مزرعه‌ای در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف (مانند بافت و ساختمان مختلف) بررسی نشده است. از این رو ارزیابی کارایی و صحت اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک توسط دستگاه آون مزرعه‌ای می‌تواند در برطرف کردن خطاهای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک توسط این دستگاه و رفع کاستی‌های احتمالی آن مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین مقایسه مقادیر رطوبت جرمی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آون مزرعه‌ای با آون آزمایشگاهی (مرجع)، و بررسی تأثیر ویژگی‌هایی مانند بافت، ماده آلی، فشردگی و شوری خاک بر صحت مقادیر رطوبت جرمی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آون مزرعه‌ای از اهداف این پژوهش است.

### مواد و روش‌ها

محل مطالعه، جاده نازلو محدوده‌ی دانشگاه ارومیه (۳۷ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی، ۴۴ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی) و همچنین خاک‌های محدوده‌ی دریاچه ارومیه (۳۷ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی، ۴۵ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی) بود. برای این پژوهش خاک‌هایی با بافت، ساختمان، مقدار ماده آلی و هدایت الکتریکی متفاوت انتخاب شد. ۱۳ کرت با ابعاد  $1\text{ m} \times 2\text{ m}$  برای ثبت داده‌های رطوبت جرمی و نمونه‌برداری از آن‌ها انتخاب شد.

وقت‌گیر بوده، اندازه‌گیری آن در زمان واقعی (Real time) نبوده و نیازمند انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه است. به عبارت دیگر یک تا دو روز پس از نمونه‌برداری، مقدار رطوبت خاک در زمان نمونه‌برداری تعیین می‌شود.

یک آون مزرعه‌ای با قابلیت توزین برای اندازه‌گیری رطوبت جرمی خاک در ایران طراحی و تولید شده است که قابل حمل بوده و در مزرعه بدون نیاز به برق شهری و تنها با استفاده از کابل تغذیه رابط مخصوص فن‌دک خودرو، انرژی لازم برای ایجاد گرما را ایجاد می‌کند (شکل ۱). این دستگاه قابلیت انطباق برای استفاده از انرژی باتری یا پنل خورشیدی را نیز دارد. هرچند هدف اصلی این دستگاه اندازه‌گیری مقدار رطوبت جرمی خاک در مزرعه است اما به آسانی در آزمایشگاه نیز قابل استفاده است. این دستگاه مجهز به سیستم توزین با دقت ۰/۰۱ گرم است. بنابراین برای مراحل توزین که مبنای اندازه‌گیری رطوبت جرمی خاک است نیازمند ترازوی دیگر نیست. این آون با ایجاد دمایی تا ۱۶۰ درجه سلسیوس که قابل تنظیم توسط کاربر است، می‌تواند نمونه‌ی خاک با جرم حدود ۲۰ گرم را با دقت زیادی در زمان کمتر از ۲۰ دقیقه خشک کند. این امکانات، سبب می‌شود آون مزرعه‌ای ساخته‌شده دستگاهی بسیار مفید برای اندازه‌گیری سریع (در زمان واقعی) مقدار رطوبت جرمی خاک در مزرعه و بدون نیاز به برق باشد. برای کار با دستگاه بایستی ابتدا اتصال به باتری خودرو انجام شود. پس از روشن کردن دستگاه، سیستم با فشار کلید Start شروع به کار می‌کند. زمان آزمایش توسط زمان‌سنج (تایمر) کنترل شده و در صورت خاتمه زمان عملیات گرم‌کردن نمونه خاک در کوره متوقف شده و کوره خاموش می‌شود. در طول زمان اندازه‌گیری رطوبت خاک، چنانچه دمای کوره از حد تنظیم‌شده بیشتر شود سیستم کنترل دما موقتاً کوره را خاموش کرده و در صورت کاهش دما دوباره آن را روشن می‌کند. در طول مدت فعالیت کوره برای گرم‌کردن خاک و تبخیر رطوبت خاک، سیستم توزین خاموش بوده و تنها پیش از شروع و یا پس از اتمام عملیات گرمایش قابل استفاده است. دستگاه دارای تجهیزات تنظیمی برای



شکل ۱. دستگاه آون مزرعه‌ای با قابلیت توزین

برای راه اندازی و استفاده از دستگاه آون مزرعه‌ای به ترتیب زیر عمل می‌شود:

- ۱ - انتقال دستگاه به مزرعه یا آزمایشگاه
- ۲ - قرار دادن دستگاه در جایی صاف و به دور از لرزش و جریان شدید هوا
- ۳ - وصل کردن کابل تغذیه مخصوص فنلندی خودرو: در صورت استفاده در آزمایشگاه، اتصال کابل برق دستگاه به پریز برق آزمایشگاه
- ۴ - روشن کردن دستگاه توسط کلید POWER
- ۵ - استفاده از کلید Tare برای صفر کردن ترازو در صورت نیاز
- ۶ - توزین جرم ظرف خالی مخصوص نمونه برداری خاک
- ۷ - توزین جرم ظرف نمونه برداری همراه با خاک مرطوب نمونه
- ۸ - قرار دادن ظرف محتوی نمونه خاک در کوره گرمایی
- ۹ - تنظیم زمان کل گرمادهی توسط کلیدهای پانل: برای این منظور با فشردن کلید SET اعداد مربوط به نشانگر عددی تایمر شروع به چشمک زدن می‌کنند که با فشردن کلیدهای ▲ ▼ زمان گرمادهی تنظیم می‌شود.
- ۱۰ - تنظیم دمای کوره توسط کلیدهای پانل: برای این منظور با فشردن مجدد کلید SET اعداد مربوط به نشانگر عددی دما شروع به چشمک زدن می‌کنند که با فشردن کلیدهای ▲ ▼ میزان حرارت مجاز تنظیم می‌شود.

در تابستان سال ۱۴۰۰، از لایه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ cm هر کرت در سه رطوبت زیاد، متوسط و کم نمونه‌برداری انجام شد. در مجموع تعداد نمونه‌برداری از خاک‌های مختلف برابر ۱۵۶ بار بود.

#### چگونگی نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک

اندازه‌گیری مقدار رطوبت با استفاده از نمونه‌های خاک تهیه شده از هر چهار لایه خاک (لایه‌های ۱۰ سانتی متری) و توسط آون مزرعه‌ای در دماهای ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ درجه سلسیوس و آون آزمایشگاهی در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس انجام شد. جرم نمونه‌های دست‌خورده برداشته شده برای آون آزمایشگاهی ۱۰۰ تا ۱۲۰ گرم و برای آون مزرعه‌ای ۲۵ تا ۳۰ گرم بود. سه مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در آون مزرعه‌ای برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه بود. برای آون آزمایشگاهی از مدت زمان استاندارد ۲۴ ساعت استفاده شد (۱۷). همچنین از هر لایه نمونه‌های خاک برای تعیین بافت، مقدار ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی و پ هاش برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شد. چگالی ظاهری خاک (BD) با استفاده از سیلندرها با حجم درونی ۱۰۰ سانتی متر مکعب (قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۵/۱ سانتی متر) اندازه‌گیری شد.

از ۱۳ خاک مورد بررسی، ۱۰ خاک غیرشور با هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع ( $EC_e$ ) کمتر از  $4 \text{ dS m}^{-1}$  و سه خاک شور بودند. کمترین هدایت الکتریکی ( $0.49 \text{ dS m}^{-1}$ ) در لایه ۳۰-۴۰ سانتی‌متری خاک ۳ و بیشترین هدایت الکتریکی ( $30/7 \text{ dS m}^{-1}$ ) در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک ۱۳ به‌دست آمد. کمترین چگالی ظاهری با  $BD (0.91 \text{ Mg m}^{-3})$  در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک ۱ و بیشترین  $BD (1/81 \text{ Mg m}^{-3})$  در لایه ۳۰-۲۰ سانتی‌متری خاک ۹ مشاهده شد. انتخاب خاک‌های مورد بررسی با در نظر گرفتن گسترده‌ی زیاد دامنه تغییرات ویژگی‌های مؤثر بر اندازه‌گیری رطوبت خاک انجام شد. دامنه رس خاک‌های مورد بررسی از  $4/2$  تا  $47/5$  متغیر بود و کلاس‌های بافتی گسترده‌ای در عمق‌های مختلف مورد بررسی وجود داشت. شکل ۲ پراکنش کلاس بافت خاک‌های مورد بررسی را روی مثلث بافت خاک نشان می‌دهد. کلاس‌های بافتی رسی، لوم رسی، لوم رس شنی، و لوم شنی دارای بیشترین فراوانی در بین نمونه‌های خاک مورد بررسی هستند.

#### روابط بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای با آون آزمایشگاهی

دماهای ۱۲۰، ۱۴۰ و  $160^\circ \text{C}$  با سه مدت زمان ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه برای خشک کردن نمونه‌های خاک در آون مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای ( $\theta_{mFO}$ ) حساسیت کمی به تغییرات شوری خاک دارد، داده‌های همه‌ی ۱۳ خاک شور و غیرشور همزمان با مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ) مقایسه شدند.

#### روابط بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط آون

##### مزرعه‌ای (زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی) با آون آزمایشگاهی

روابط بین مقادیر  $\theta_{mFO}$  با  $\theta_{mLO}$  برای ۱۳ خاک مورد بررسی در دماهای ۱۲۰ ( $\theta_{mFO120}$ )، ۱۴۰ ( $\theta_{mFO140}$ ) و  $160^\circ \text{C}$  ( $\theta_{mFO160}$ ) برای زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی در آون مزرعه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است.

۱۱ - فشار دوباره کلید SET برای ذخیره کردن مقادیر داده شده و خروج از تنظیم‌ها

۱۲ - روشن کردن سیستم گرمادهی دستگاه با فشردن کلید START:

در صورت اتمام زمان تنظیمی، سیستم گرمادهی دستگاه به‌طور خودکار خاموش خواهد شد. در صورت تمایل به توقف گرمادهی می‌توان از کلید STOP استفاده کرد.

۱۳ - توزین مجدد ظرف محتوی نمونه خاک خشک بعد از اتمام زمان گرمادهی:

لازم به ذکر است که از برداشتن ظرف حاوی نمونه خاک در حین گرمادهی اجتناب شود. بهتر است با پنس یا دستگیره، ظرف گرم شده برداشته شده و بعد از حدود یک دقیقه (خنک شدن نسبی ظرف) روی صفحه توزین دستگاه گذاشته شود.

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۸)، هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی در عصاره گل اشباع (۱۹)، پهناس با دستگاه pH متر در عصاره گل اشباع و چگالی ظاهری از تقسیم جرم خشک نمونه‌های دست‌نخورده بر حجم آن‌ها (۲۰) اندازه‌گیری شد.

#### تجزیه و تحلیل آماری

بررسی روابط بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای و آون آزمایشگاهی و تأثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک بر اختلاف آن‌ها و همچنین رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد.

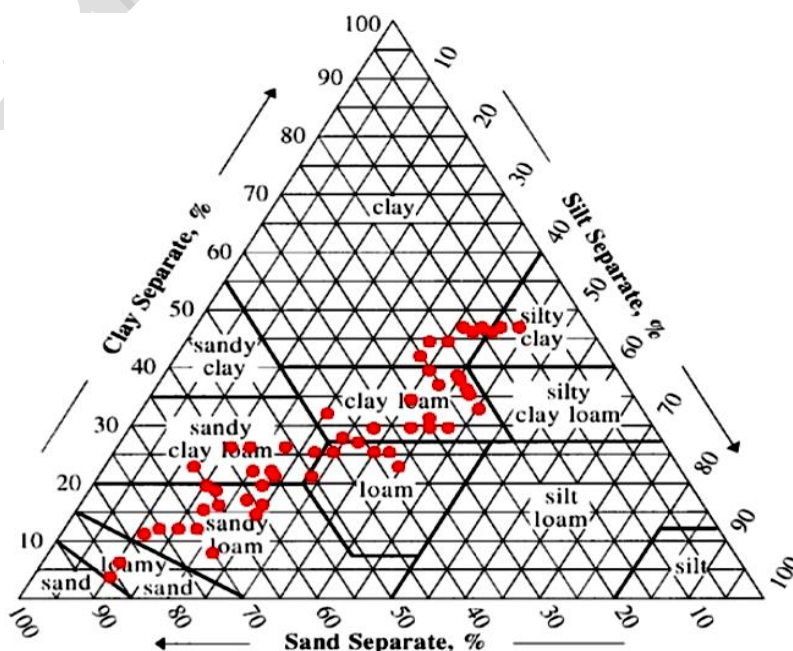
#### نتایج و بحث

مقادیر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (میانگین چهار لایه) برای ۱۳ خاک مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

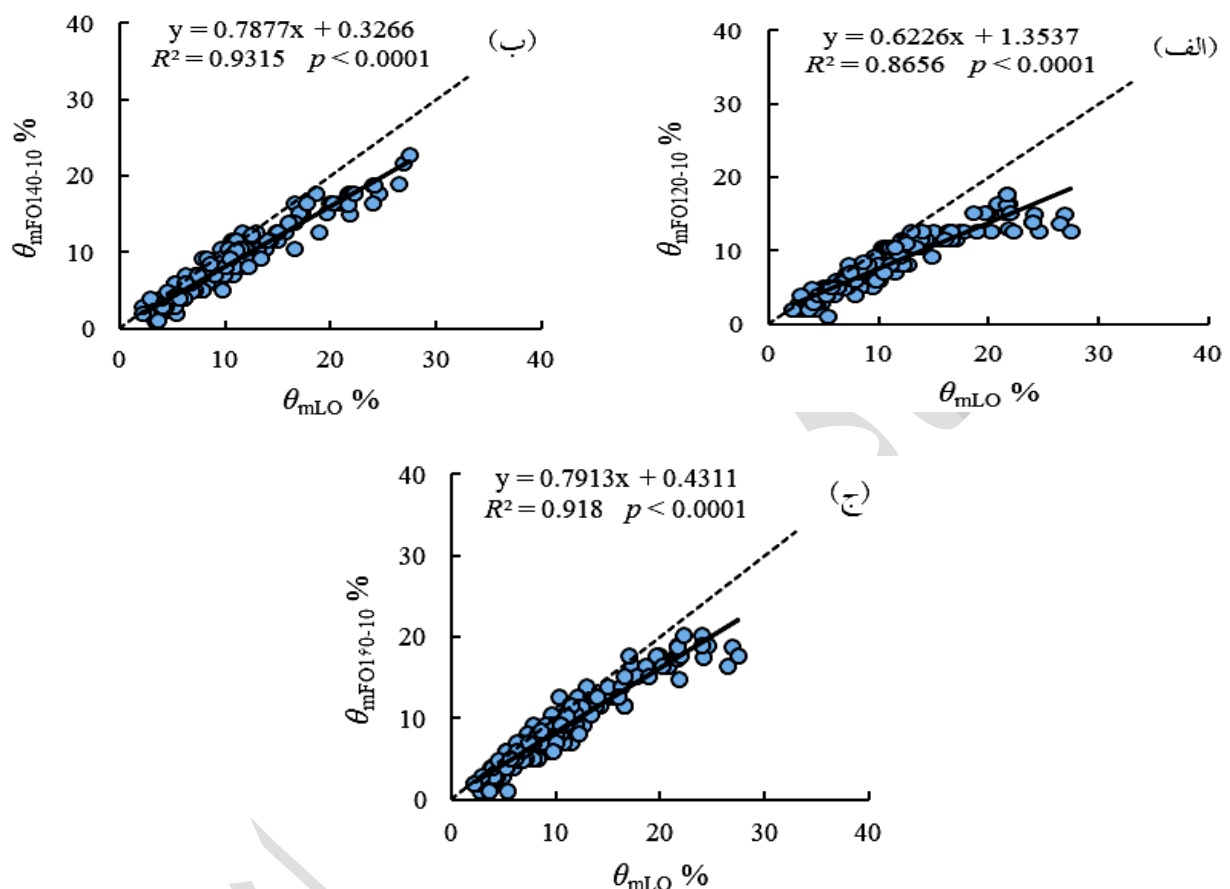
جدول ۱. میانگین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی\*

شماره خاک	شن	سیلت	رس	OM	کلاس بافت	BD Mg m <sup>-3</sup>	EC <sub>e</sub> dS m <sup>-1</sup>	pH <sub>e</sub>
۱	۲۲/۵	۴۱/۱	۳۶/۴	۲/۱۶	CL	۱/۲۷	۰/۹۸	۸/۸۰
۲	۱۳/۷	۳۸/۷	۴۷/۴	۳/۱۵	C	۱/۳۷	۰/۹۰	۷/۹۵
۳	۱۶/۱	۳۷/۲	۴۶/۷	۱/۸۱	C	۱/۱۲	۰/۶۰	۷/۹۴
۴	۲۳/۹	۳۴/۲	۴۱/۹	۱/۸۲	C	۱/۴۰	۱/۰۰	۷/۱۰
۵	۵۰/۸	۲۳/۳	۲۵/۹	۰/۸۲	SCL	۱/۴۳	۰/۵۷	۶/۸۶
۶	۳۰/۷	۳۹/۲	۳۰/۱	۱/۹۲	CL	۱/۱۴	۱/۴۶	۸/۵۷
۷	۵۶/۶	۱۶/۷	۲۶/۷	۱/۳۴	SCL	۱/۳۹	۰/۸۸	۸/۴۹
۸	۸۴/۷	۹/۲	۶/۱	۰/۲۵	LS	۱/۳۷	۰/۸۲	۸/۱۸
۹	۵۳/۸	۲۱/۷	۲۴/۵	۱/۲۲	SCL	۱/۶۰	۱/۰۴	۸/۷۴
۱۰	۷۱/۴	۱۴/۲	۱۴/۴	۱/۴۴	SL	۱/۲۷	۲/۵۳	۸/۵۷
۱۱	۵۶/۶	۲۴/۶	۱۸/۸	۱/۴۱	SL	۱/۳۹	۶/۸۸	۸/۲۵
۱۲	۴۴/۳	۲۹/۶	۲۶/۱	۱/۴۶	L	۱/۴۰	۱۰/۸۶	۸/۲۶
۱۳	۵۳/۹	۲۷/۸	۱۸/۳	۱/۳۸	SL	۱/۳۲	۱۸/۲۹	۷/۴
کمیته	۱۰/۰	۹/۲	۴/۲	۰/۰۰	—	۰/۹۱	۰/۴۹	۵/۴۲
میانگین	۴۴/۵	۲۷/۵	۲۸/۰	۱/۵۶	—	۱/۳۵	۳/۶۱	۸/۰۹
بیشینه	۸۶/۶	۴۴/۲	۴۷/۵	۳/۸۲	—	۱/۸۱	۳۰/۷	۹/۱۷

\* مقدار ماده آلی (OM)، چگالی ظاهری (BD)، واکنش خاک (pH<sub>e</sub>) و هدایت الکتریکی (EC<sub>e</sub>) در عصاره گل اشباع



شکل ۲. وضعیت پراکنش بافت خاک‌های مورد بررسی روی مثلث بافت خاک

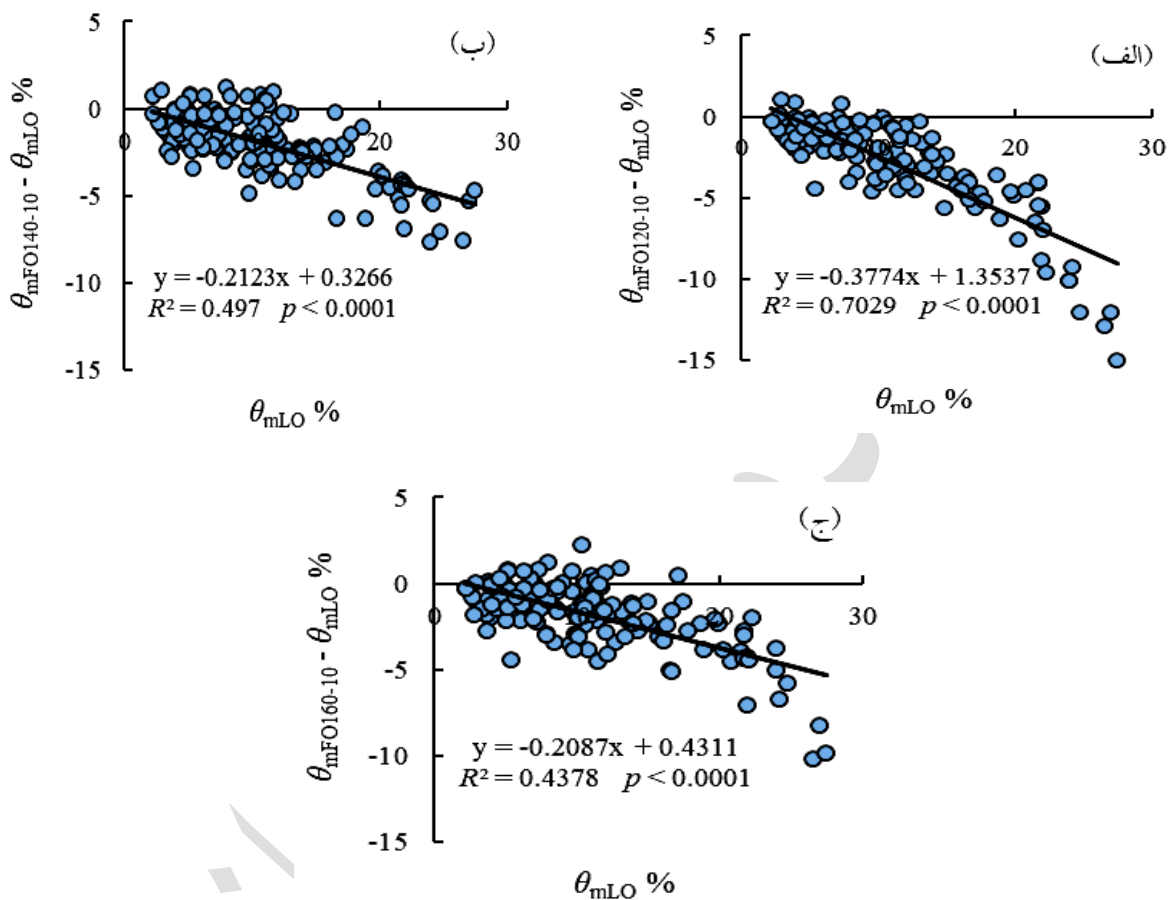


شکل ۳. روابط خطی بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای ( $\theta_{mFO}$ ) با مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ): گرمادهی نمونه‌های خاک در آون مزرعه‌ای به مدت ۱۰ دقیقه در دماهای (الف) ۱۲۰، (ب) ۱۴۰ و (ج) ۱۶۰ °C بود

این مدت زمان کم (۱۰ دقیقه) به ویژه برای خشک کردن کامل نمونه‌های مرطوب خاک کافی نیست. تأثیر افزایش مقدار رطوبت خاک بر افزایش خطا در اندازه‌گیری آن در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به معادله خطی برازش یافته بر اختلاف بین مقادیر  $\theta_{mFO120}$ ،  $\theta_{mFO140}$  و  $\theta_{mFO160}$  با  $\theta_{mLO}$  در شکل ۴، در روش آون مزرعه‌ای ۱۰ دقیقه گرمادهی با دمای ۱۲۰ °C نمونه خاک با رطوبت ۲۰ درصد جرمی (شکل ۴-الف)، ۶/۱ درصد و همین مدت گرمادهی در دماهای ۱۴۰ (شکل ۴-ب) و ۱۶۰ °C (شکل ۴-ج)، به ترتیب ۳/۹ و ۳/۷ درصد، رطوبت جرمی خاک را کمتر از روش مرجع اندازه‌گیری کرد. این نتایج نشان می‌دهد که ۱۰ دقیقه مدت زمان کافی برای خشک کردن نمونه‌های خاک (به ویژه نمونه‌های مرطوب) در روش آون مزرعه‌ای نیست.

تأثیر مقدار رطوبت جرمی خاک بر اختلاف بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای در دماهای مختلف شامل  $\theta_{mFO120}$ ،  $\theta_{mFO140}$  و  $\theta_{mFO160}$  با  $\theta_{mLO}$  برای مدت زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی در آون مزرعه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است.

روابط خطی بین مقادیر  $\theta_{mFO}$  با  $\theta_{mLO}$  (شکل ۳) نشان داد که هیچ یک از دماهای ۱۲۰ (شکل ۳-الف)، ۱۴۰ (شکل ۳-ب) و ۱۶۰ °C (شکل ۳-ج) توانایی خشک کردن کامل نمونه‌های خاک را در مدت زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی نداشتند و مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با آون مزرعه‌ای کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده با روش مرجع بودند. هر چند با افزایش مقدار دما از ۱۲۰ به ۱۴۰ یا ۱۶۰ °C، ضریب معادله خطی به عدد ۱ (خط ۱:۱) نزدیک‌تر شد اما



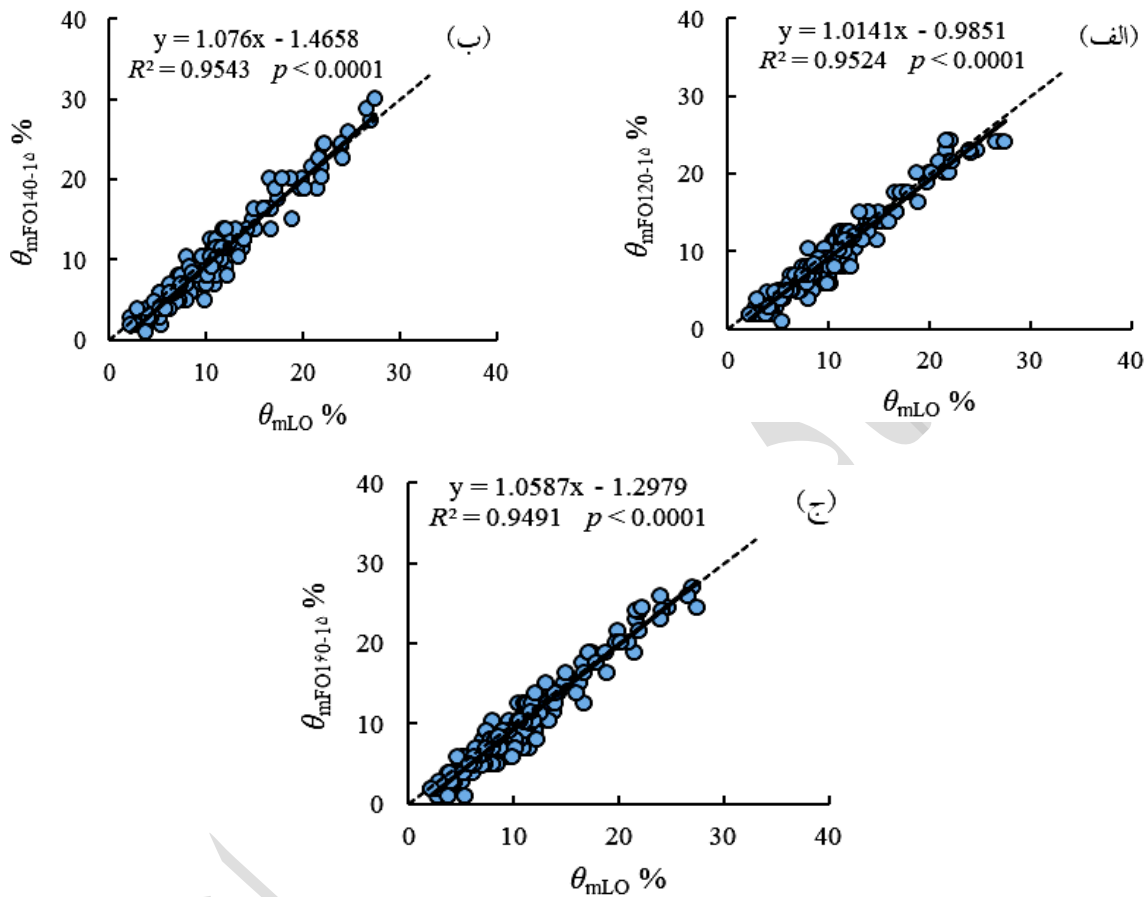
شکل ۴. تأثیر مقدار رطوبت جرمی خاک بر اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون مزرعه‌ای (زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی) در دماهای مختلف شامل (الف) ۱۲۰ (الف) ۱۲۰ ( $\theta_{mFO120}$ )، (ب) ۱۴۰ ( $\theta_{mFO140}$ ) و (ج) ۱۶۰ ( $\theta_{mFO160}$ ) و مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ).

هر سه دمای مورد بررسی، مقدار شیب خط استخراج شده نزدیک به ۱ بوده و مقدار عرض از مبدا کوچک بود. داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با آون مزرعه‌ای و آون آزمایشگاهی (روش مرجع) پراکنش متقارن (ناریب) اطراف خط یک به یک داشتند که نشان‌دهنده هم‌خوانی این دو روش برای تعیین مقدار رطوبت خاک است. پراکنش متقارن داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با آون مزرعه‌ای و آون آزمایشگاهی نشان می‌دهد که خطای نمونه‌برداری خاک بر روی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری با دو آون مؤثر است.

روابط بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای (زمان ۱۵ دقیقه گرمادهی) با آون آزمایشگاهی روابط بین مقادیر  $\theta_{mFO}$  و  $\theta_{mLO}$  برای خاک‌های مورد بررسی در دماهای ۱۲۰ ( $\theta_{mFO120}$ )، ۱۴۰ ( $\theta_{mFO140}$ ) و ۱۶۰ ( $\theta_{mFO160}$ ) برای زمان ۱۵ دقیقه گرمادهی در آون مزرعه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است.

روابط خطی قوی بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده با روش آون مزرعه‌ای در مدت زمان ۱۵ دقیقه گرمادهی در دماهای ۱۲۰ ( $\theta_{mFO120-15}$ )، ۱۴۰ ( $\theta_{mFO140-15}$ ) و ۱۶۰ ( $\theta_{mFO160-15}$ ) با مقادیر  $\theta_{mLO}$  به دست آمد (شکل ۵). در



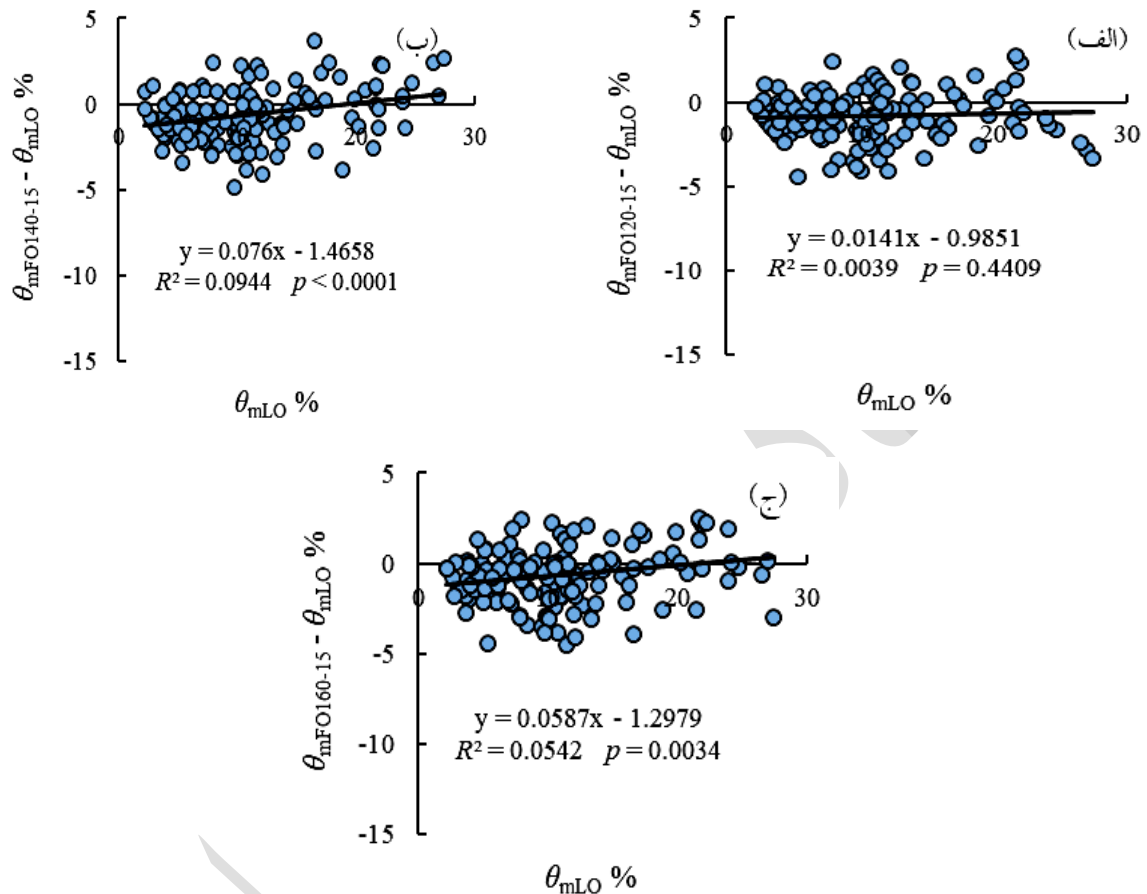


شکل ۵. روابط خطی بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرعه‌ای ( $\theta_{mFO}$ ) با مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ): گرمادهی نمونه‌های خاک در آون مزرعه‌ای به مدت ۱۵ دقیقه در دماهای (الف) ۱۲۰، (ب) ۱۴۰ و (ج) ۱۶۰ °C بود.

می‌شوند. به نظر می‌رسد برای مقادیر رطوبت خاک بیشتر از حدود ۲۰ درصد جرمی، روش آون مزرعه‌ای رطوبت خاک را بیشتر از مقادیر واقعی (روش آون آزمایشگاهی) اندازه‌گیری می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شد، مدت زمان کوتاه گرمادهی (۱۰ دقیقه) باعث خشک‌نشدن کامل نمونه‌های مرطوب خاک می‌شود.

در کوره القایی به کار رفته در آون مزرعه‌ای گرمای ایجادشده از طریق جدار لیوان به نمونه خاک انتقال یافته و این گرما در نهایت به مرکز نمونه خاک می‌رسد. از آنجایی که هدایت گرمایی خاک مرطوب بیشتر از هدایت گرمایی خاک خشک است (۲۱)، انتظار بر این است که این گرما در خاک مرطوب‌تر سریعتر به بخش مرکزی نمونه خاک هدایت شود. به نظر می‌رسد

تأثیر افزایش مقدار رطوبت جرمی خاک بر خطای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به رابطه خطی برازش داده‌شده بر اختلاف بین مقادیر  $\theta_{mFO120-15}$ ،  $\theta_{mFO140-15}$  و  $\theta_{mFO160-15}$  با  $\theta_{mLO}$  در شکل ۶، در زمان ۱۵ دقیقه گرمادهی، تنها برای دمای ۱۲۰ °C (شکل ۶-الف) خط برازش به‌طور کامل زیر محور افقی (اختلاف برابر صفر) قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، به‌طور کلی مقادیر  $\theta_{mFO120-15}$  اندکی (۸ درصد) کمتر از مقادیر واقعی ( $\theta_{mLO}$ ) هستند. با افزایش دما به مقادیر ۱۴۰ (شکل ۶-ب) و ۱۶۰ °C (شکل ۶-ج)، خطوط برازش محور افقی را قطع می‌کنند. مقادیر  $\theta_{mFO140-15}$  و  $\theta_{mFO160-15}$  به‌ترتیب در مقادیر رطوبت خاک بیشتر از ۱۹ و ۲۲ درصد جرمی بزرگ‌تر از  $\theta_{mLO}$

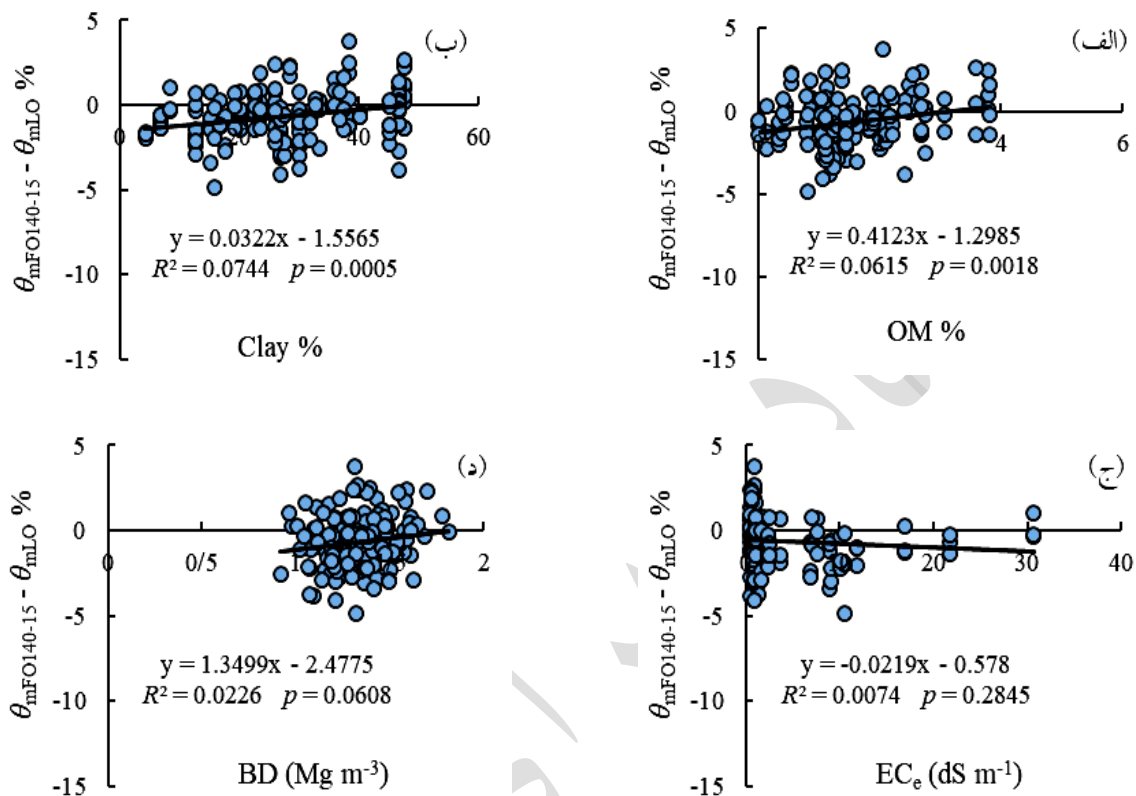


شکل ۶. تأثیر مقدار رطوبت جرمی خاک بر اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون مزرعه‌ای (زمان ۱۵ دقیقه گرمادی) در دماهای مختلف شامل (الف) ۱۲۰ (θmFO120)، (ب) ۱۴۰ (θmFO140) و (ج) ۱۶۰ °C (θmFO160) و مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی (θmLO).

برای خاک لوم رسی بیشتر از ۷ درصد است. این خطا برای خاک‌های با بافت متوسط کاهش می‌یابد. کوش و همکاران (۲۴) با بررسی حسگرهای قابل حمل که بر اساس اندازه‌گیری دی‌الکتریک خاک مقدار رطوبت خاک را تخمین می‌زدند دریافتند که با واسنجی این دستگاه‌ها میتوان خطای اندازه‌گیری را از بیش از ۵ درصد حجمی به کمتر از ۴ درصد حجمی کاهش داد. مقایسه خطای مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده آون مزرعه‌ای با دستگاه TDR نشان‌دهنده کارایی بالای آون مزرعه‌ای است. نتایج اندازه‌گیری مقادیر رطوبت خاک در مدت زمان ۲۰ دقیقه گرمادی به روش آون مزرعه‌ای مشابه نتایج آن در زمان ۱۵ دقیقه بود. از این‌رو نتایج مربوط به آن آورده نشد زیرا حداقل دما و

در مدت زمان ۱۵ دقیقه گرمای کافی به بخش مرکزی نمونه خاک رسیده و خاک را خشک می‌کند. عامل مؤثر دیگر کاهش جرم خشک نمونه خاک در دماهای زیاد به دلیل از بین رفتن ماده آلی خاک است که سبب ایجاد خطا و افزایش مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده می‌شود.

سی و سه مرده و همکاران (۲۲) گزارش کردند که TDR مقدار رطوبت خاک را در مقایسه با روش جرمی برای خاک‌های رسی به‌طور متوسط ۳ درصد حجمی کمتر و برای خاک‌های شنی ۲/۵ درصد حجمی بیشتر اندازه‌گیری می‌کند. با بررسی نتایج نیکنژاد و همکاران (۲۳) می‌توان دریافت که مقدار خطای مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه TDR



شکل ۷. تأثیر درصد ماده آلی (OM)، درصد رس (Clay)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع ( $EC_e$ ) و چگالی ظاهری (BD) خاک بر اختلاف مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده به روش آون مزرعه‌ای (۱۵ دقیقه گرمادهی) در دمای  $140^{\circ}C$  ( $\theta_{mFO140-15}$ ) با مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ).

به‌دست نیامد. عدم وابستگی مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش آون مزرعه‌ای به شوری و درجه تراکم خاک می‌تواند مزیتی کاربردی برای این دستگاه باشد زیرا مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک با روش‌های رایجی مانند TDR تحت تأثیر بافت خاک (۲۲ و ۲۳)، تراکم (۲۵) و شوری خاک (۲۶ و ۲۷) قرار می‌گیرند. با وجود معنی‌داری روابط بین OM (شکل ۷-الف) و Clay (شکل ۷-ب) با اختلاف مقادیر  $\theta_{mFO140-15}$  با  $\theta_{mLO}$  مقدار  $R^2$  این روابط کوچک بود و عملاً این ویژگی‌ها تأثیر اندکی بر مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با آون مزرعه‌ای داشتند. مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با TDR، با افزایش مقدار رس و ماده آلی خاک کمتر از مقدار واقعی به‌دست می‌آید. رس و ماده آلی با سطح ویژه زیاد دارای

زمان گرمادهی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با این روش مطلوب است. از این رو با توجه به نتایج قابل اعتماد برای مدت زمان ۱۵ دقیقه و دمای  $140^{\circ}C$  درجه سلسیوس این شرایط برای آون مزرعه‌ای بهینه خواهد بود.

#### تأثیر ویژگی‌های خاک بر دقت اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به روش آون مزرعه‌ای

تأثیر مقدار ماده آلی (OM)، درصد رس (Clay)، هدایت الکتریکی ( $EC_e$ ) و چگالی ظاهری (BD) خاک بر اختلاف مقادیر  $\theta_{mFO140-15}$  با  $\theta_{mLO}$  (خطای اندازه‌گیری) در شکل ۷ نشان داده شده است. رابطه معنی‌داری بین  $EC_e$  (شکل ۷-ج) و BD (شکل ۷-د) با اختلاف مقادیر  $\theta_{mFO140-15}$  با  $\theta_{mLO}$

سه دما، مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرع‌های بسیار نزدیک به مقادیر آن به روش آون آزمایشگاهی شد. به طوری که روابط خطی قوی به دست آمده بین  $\theta_{mFO}$  با  $\theta_{mLO}$  دارای شیب نزدیک به ۱ بوده و مقدار عرض از مبدا قابل چشم‌پوشی بود. همچنین داده‌ها پراکنش متقارن (ناریب) اطراف خط یک به یک داشتند که نشان‌دهنده هم‌خوانی این دو روش برای تعیین مقدار رطوبت خاک بود. عدم تأثیرپذیری یا تأثیرپذیری کم  $\theta_{mFO}$  از ویژگی‌هایی مانند مقدار ماده آلی، مقدار رس، شوری و درجه تراکم خاک، مزیتی کاربردی برای آون مزرع‌های است. این یافته‌ها کارآمدی روش آون مزرع‌های برای اندازه‌گیری سریع و قابل اطمینان مقدار رطوبت در خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

مقادیر قابل توجهی آب پیوندی با ضریب دی‌الکتریک کمتر از آب آزاد است که باعث خطا در اندازه‌گیری توسط دستگاه TDR می‌شود (۲۸ و ۲۹). این نتایج کارآمدی آون مزرع‌های برای اندازه‌گیری سریع و قابل اطمینان مقدار رطوبت در خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

روابط بین مقادیر رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری شده توسط آون مزرع‌های ( $\theta_{mFO}$ ) در دماهای ۱۲۰ ( $\theta_{vFO120}$ )، ۱۴۰ ( $\theta_{mFO140}$ ) و ۱۶۰ °C ( $\theta_{mFO160}$ ) با مقادیر اندازه‌گیری شده آن توسط آون آزمایشگاهی ( $\theta_{mLO}$ ) نشان داد که هیچ یک از این دماها توانایی خشک‌کردن کامل نمونه‌های خاک را در مدت زمان ۱۰ دقیقه گرمادهی نداشتند و مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با آون مزرع‌های کمتر از مقادیر آن به روش مرجع بودند. با افزایش مدت زمان گرمادهی به ۱۵ دقیقه، در هر

## منابع مورد استفاده

1. Stocker, B. D., J. Zscheischler, T. F. Keenan, I. C. Prentice, S. I. Seneviratne and J. Penuelas. 2019. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 12, 264–270. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0318-6>
2. Robinson, D. A., C. S. Campbell, J. W. Hopmans, B. K. Hornbuckle, S. B. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker and O. Wendroth. 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358–389. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
3. Pan, X., J. Zhang, P. Huang and K. Roth. 2012. Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 8027–8062. <https://doi:10.5194/hessd-9-8027-2012>
4. Badr, M. A., W. A. El-Tohamy, and A. M. Zaghoul. 2012. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. *Agricultural Water Management*, 110, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.008>
5. Koureh, H., H. Asgarzadeh, M. R. Mosaddeghi and H. Khodaverdiloo. 2020. Critical values of soil physical quality indicators based on vegetative growth characteristics of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 493–506. <https://doi:10.1007/s42729-019-00134-8>
6. Asgarzadeh, H., M. R. Mosaddeghi, A. A. Mahboubi, A. Nosrati and A. R. Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil*, 335 (1-2), 229–244. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0410-6>
7. Aghaei, S., S. Nazari, H. Asgarzadeh and H. Khodaverdiloo. 2020. Optimal range of relative bulk density obtained using proctor and axial stress of 200 kPa for sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51 (8), 1937–1945. doi:10.22059/ijswr.2020.293912.668426 (In Farsi)
8. Kazemi, Z., M. R. Neyshabouri, D. Z. Haghi, H. Asgarzadeh, A. O. Milani, M. Irani and A. D. Mohammadi Nasab. 2021. Revisiting integral water capacity on the basis of stomatal conductance at various soil and root length densities in sunflower plant. *Agricultural Water Management*, 243, 106451. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106451>
9. Minasny, B. and A. B. McBratney. 2003. Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*,

- 249,253–262. <https://doi.org/10.1023/A:1022825732324>
10. Asgarzadeh, H., M. R. Mosaddeghi, A. A. Mahboubi, A. Nosrati and A. R. Dexter. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009>
  11. Khorsand, A., V. Rezaverdinejad, H. Asgarzadeh, A. Majnooni-Heris, A. Rahimi and S. Besharat. 2019. Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 224, 105740. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105740>
  12. Khorsand, A., V. Rezaverdinejad, H. Asgarzadeh, A. Majnooni-Heris, A. Rahimi and S. Besharat and A. A. Sadraddini. 2021. Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. *Scientific Reports*, 11(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79516-3>
  13. Elder, A. N. and T. C. Rasmussen. 1994. Neutron probe calibration in unsaturated tuff. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (5), 1301–1307. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050004x>
  14. Amoozegar, A., K. C. Martin and M. T. Hoover. 1989. Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalization. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 330–335. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020003x>
  15. Topp, G. C., and W. D. Reynolds. 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil & Tillage Research*, 47(1–2), 125–132. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00083-X)
  16. Ledieu, J., P. D. Ridder, P. D. Clerck and S. Dautrebande. 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88(3–4), 319–328. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)
  17. Schmugge, T.J., T. J. Jackson and H. L. Mckim. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16(6), 961–979. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p00961>
  18. Gee, G. W. and D. Or. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI*, pp. 255–293.
  19. Rhoades J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solid. In: Sparks, D. L. A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabataba, C. T. Johnston and M. E Sumner (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA*, pp 417–436.
  20. Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*, second ed. ASA/SSSA, Monograph 9, Madison, WI, pp. 374–380.
  21. Cosenza, P., R. Guérin and A. Tabbagh. 2003. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modeling. *European Journal of Soil Science*. 54 (3), 581–588. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00539.x>
  22. Siosemarde, M., M. Byzed and A. Siosemardeh. 2014. The studding of accuracy of soil moisture measurement by time domain reflectometry (TDR). *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(2), 519-523. <https://doi.org/10.1139/t94-075>
  23. Niknezhad, D., A. Kalantari and K. Kammali. 2018. Calibration of buriable soil moisture sensors made inside the country for TDR system in different soil textures. *Water Management in Agriculture*, 5 (1), 47–58. (In Farsi).
  24. Cosh, M. H., T. J. Jackson, R. Bindlish, J. S. Famiglietti and D. Ryu. 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. *Journal of Hydrology*. 311, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.003>
  25. Gong, Y., Q. Cao, and Z. Sun. 2003. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrological Processes*. 17, 3601–3614. <https://doi.org/10.1002/hyp.1358>
  26. Sun, Z. J., G. D. Young, R. A. McFarlane and B. M. Chambers. 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. <https://doi.org/10.4141/S98-089>
  27. Wyseure, G. C. L., M. A. Mojidi and M. A. Malik. 1997. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *European Journal of Soil Science*, 48(2), 347–354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00555.x>
  28. Roth, K., R. Schulin, H. Flüher and W. Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26, 2267-2273. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>
  29. Shang, J. Q., K. Y. Lo and R. M. Quigley. 1994. Quantitative determination of potential distribution in Stern-Gouy double-layer model. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(5): 624-636. <https://doi.org/10.1139/t94-075>