تاثیر بافت خاک بر دقت روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی در برآورد رطوبت خاک

مجتبی کشاورزی حسن آباد[۱]، امیر حسین ناظمی[۲]، سید علی اشرف صدرلدینی[۲]، محمد رضا نیشابوری[۳]، ابوالفضل ناصری[۴]، احمد فاخری فرد[۲]

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۰۲

مقاله برگرفته از پایان نامه

چکیده

رطوبت موجود در خاک به عنوان یکی از فاکتورهای مهم مدیریتی در کشاورزی، با استفاده از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برآورد می‌شود. یکی از جدیدترین و سریع‌ترین روش‌های غیرمستقیم که اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک خاک با توجه به سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در آن، اساس این روش است، روش انعکاس سنجی حوزه زمانی (TDR) است. در این میان روابط تجربی متعددی بین ثابت دی‌الکتریک دستگاه و رطوبت حجمی منتشر شده که این معادلات بدون در نظر گرفتن تمامی خصوصیات خاک هستند. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر بافت خاک بر روی دقت اندازه‌گیری رطوبت حجمی توسط دستگاه TDR است. آزمایش بر روی پنج نوع بافت (شنی، لوم شنی، لومی، لوم شنی رسی و لوم رسی) در سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. به منظور ارزیابی و واسنجی نتایج حاصل از دستگاه TDR، رطوبت خاک به روش وزنی نیز اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از مقادیر تخمین زده شده ثابت دی‌الکتریک توسط دستگاه TDR، مدل‌های تاپ و همکاران (۱۹۸۰) و ترکیبی با مقادیر رطوبت TDR مقایسه شد. نتایج نشان داد که دقت مقادیر رطوبت حجمی بدست آمده از دستگاه TDR، با سنگین شدن بافت خاک کاهش می‌یابد، بطوریکه میزان درصد خطای نسبی (RE) در بافت‌های شنی، لوم شنی، لومی، لوم شنی رسی و لوم رسی بترتیب برابر با ۴/۰۷، ۸/۹، ۸/۰۳، ۹/۱۳ و ۱۱/۴ بوده است. مقایسه رطوبت در مدل‌ها نشان داد که در کلیه بافت‌ها مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) بیشترین ضریب همبستگی را با رطوبت TDR داشته و همچنین دقت مدل تاپ بیشتر از مدل ترکیبی است. در نهایت، روابط واسنجی شده‌ای با ضریب همبستگی بالا بین رطوبت اندازه‌گیری شده به روش وزنی و TDR ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: انعکاس سنجی حوزه زمانی، ثابت دی‌الکتریک، رطوبت خاک، مدل ترکیبی، TDR.

[۱]کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ۰۹۱۸۷۹۵۹۴۸۵ M.Keshavarz6@Gmail.com
[۲]دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۳]استاد، گروه خاک شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۴]دانشیار، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، تهران، ایران

مقدمه

اگر چه رطوبت خاک سهم ناچیزی از مقدار آب موجود در جهان را تشکیل می‌دهد، اما تقریباً همه فرایندهای هیدرولوژی اتفاق افتاده در خاک را کنترل کرده به طوری که فرایند بارش را به دو قسمت رواناب و ذخیره زیرزمینی تفکیک می‌کند. رطوبت خاک همچنین اجزاء انرژی قابل دسترس در سطح زمین که شامل دو قسمت گرمای نهان و آشکار (محسوس) می‌باشد را در مبادله با اتمسفر تنظیم می‌کند از این رو رطوبت خاک بر روی تبخیر و تعرق و در ادامه بر روی موفقیت کشاورزی تاثیر می‌گذارد. درصد رطوبت به عنوان یک واژهٔ کلیدی در مطالعات محیطی، هیدرولوژی، علم هواشناسی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (سیلبراستین و همکاران، ۱۹۹۹ ؛ واکر، ۱۹۹۹). روش های مختلفی برای تعیین رطوبت خاک وجود دارند که پرکاربردترین و دقیق‌ترین آن‌ها روش وزنی است. به طورکلی اندازه‌گیری رطوبت به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری حجمی رطوبت تکنیک دی‌الکتریک است، این تکنیک رطوبت موجود در خاک را با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک (k) خاک که سرعت حرکت امواج یا پالس[5]های الکترومغناطیسی در خاک است، نشان می‌دهد. این روش برای اولین بار توسط تاپ (۱۹۸۰) بر روی چندین نوع بافت خاک مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها یک رابطه واسنجی شده چند جمله‌ای را برای خاک‌های معدنی و آلی ارائه دادند.

در ایران تاکنون تحقیقات محدودی درباره واسنجی دستگاه TDR صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات سلطانی محمدی (۱۳۸۴) بر روی تأثیر بافت خاک در شرایط خاک‌های استان خوزستان و سالاری (۱۳۸۷) بر روی تأثیر شوری خاک در مکش‌های مختلف اشاره کرد. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که با افزایش میزان رس و افزایش شوری (بیش از پنج دسی زیمنس بر متر)، صحت دستگاه در برآورد رطوبت حجمی خاک کاهش می‌یابد. ژاکوبسن و اسچونینگ (۱۹۹۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی به منظور واسنجی TDR و تأثیر بافت خاک و چگالی ظاهری روی منحنی واسنجی، از نمونه‌های خاک در پنج منطقه در دانمارک استفاده کردند. نمونه‌های خاک در محدوده خاک شن تا خاک شن رسی لومی با جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) $۱/۳۵ \times ۱۰^{۳}$ تا $۱/۵۵ \times ۱۰^{۳}$ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در نهایت رابطه‌ای درجه سه را به صورت زیر بین رطوبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک ظاهری برای واسنجی ارائه کردند:

$$\theta_v = -۳.۴۱\times۱۰^{-۲} + ۳.۴۵\times۱۰^{-۲}\varepsilon_a - ۱۱.۴\times۱۰^{-۴}\varepsilon_a^{۲} + ۱۷.۱\times۱۰^{-۶}\varepsilon_a^{۳} - ۳.۷\times۱۰^{-۲}\rho_b + ۷.۳۶\times۱۰^{-۴}\%clay + ۴۷.۷\times۱۰^{-۴}\%OM \quad (۱)$$

OM ٪= درصد وزنی ماده آلی اندازه‌گیری شده در خاک،
ε_a= ثابت دی الکتریک حاک

نادلر و همکاران (۱۹۹۱) با مطالعه آزمایشگاهی بر روی ستون‌هایی از خاک رابطه زیر را برای تخمین رطوبت حجمی ارائه دادند:

$$\theta_v = -۷۲۵ + ۳۶۷k_a - ۱۲.۳\varepsilon_a^{۲} + ۰.۱۵\varepsilon_a^{۳} \quad (۲)$$

اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) معادلات واسنجی را برای انواع پیت در دره بیبرزا[6] واقع در هلند انجام دادند. در این تحقیق از نمونه‌های دست نخورده استفاده شد. هدف از این تحقیق تعیین سهم چگالی ظاهری برای توابعی است که ثابت دی‌الکتریک را به رطوبت حجمی برای انواع مختلف پیت با درصدهای مختلف ماده آلی ارتباط می‌دهد. آن‌ها نشان دادند که چگالی ظاهری به طور اساسی بر رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی در خاک‌های پیت تأثیر دارد. آن‌ها رابطه(۳) را برای این خاک‌هاپیشنهاد کردند. در این رابطه چگالی ظاهری را به عنوان یک عبارت مؤثر بر منحنی کالیبراسیون ارائه دادند. پایین، مقدار رطوبت را به خوبی تخمین می‌زند.

$$\sqrt{k_a} = a + b\theta_v \quad (۳)$$

در تحقیقات مختلف مشخص شده که این دستگاه علی‌رغم مزیت‌های فراوانش، در بعضی شرایط و خاک‌ها (رسی، سنگین بافت، خاک‌های حاوی مواد آلی و شور) مقدار رطوبت خاک را به طور دقیق اندازه‌گیری نمی‌کند. TDR استفاده وسیعی برای تعیین رطوبت خاک دارد. به

[5] - Pulse
6- Bibreza

دلیل تفاوت در چگالی ظاهری و سطح ویژه، رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی در خاک‌های آلی نسبت به خاک‌های معدنی متفاوت است (پومپانن و همکاران، ۲۰۰۵).

در این پژوهش اثر بافت خاک را به دلیل اختلاف در سطح ویژه ذرات خاک روی دقت رطوبت تخمین زده شده با استفاده از روش انعکاس سنجی حوزه زمانی بررسی شد، لذا تعیین میزان دقت مدل های انعکاس سنجی حوزه زمانی برای بافت‌های مختلف و ارایه ضریب تصحیح مناسب در صورت لزوم، از اهداف اصلی این تحقیق است. علیرغم مشکلات در تعیین رطوبت به روش وزنی، این روش به عنوان روشی استاندارد برای چنین واسنجی‌هایی است.

مواد وروش ها

با توجه به اینکه روش انعکاس سنجی حوزه زمانی بر پایه ارسال امواج الکترومغناطیسی در طول کابل و دریافت موج بازتابیده شده استوار است، لذا سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در امتداد یک میله به طول L بر اساس زمان رفت و برگشت موج توسط کابل گیرنده دستگاه TDR تعیین شد و با توجه به وجود رابطه معکوس بین ثابت دی‌الکتریک و سرعت انتشار امواج مقدار ثابت دی‌الکتریک با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\varepsilon_b = (\frac{c}{v})^2 = \left(\frac{ct}{2l}\right)^2 \qquad (۴)$$

که در آن

c: سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی در خلاء(3×10^8 ثانیه/متر)

l: طول میله (متر)

v: سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی در میله (ثانیه/متر)

t: زمان رفت و برگشت پالس عبوری از میله (ثانیه) می باشند.

دو روش عمده برای بیان رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی خاک وجود دارد. روش اول روشی تجربی است که بر اساس رابطه ریاضی ساده‌ای بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شده است. نمونه‌ای از این روش که به مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) معروف است، به صورت زیر بیان گردیده است:

$$\theta_v = 5.3\times10^{-2} + 2.92\times10^{-2}\varepsilon_b - 5.5\times10^{-4}(\varepsilon_b)^2 + 4.3\times10^{-6}(\varepsilon_b)^3 \qquad (۵)$$

که در آن:

θ_v رطوبت حجمی خاک بر حسب (مترمکعب/ مترمکعب)

ε_b ثابت دی الکتریک خاک است.

روش دوم که پایه فیزیکی دارد، بر اساس ترکیبی از ثابت دی‌الکتریک سه فاز تشکیل دهنده خاک استوار است. این مدل تحت عنوان مدل ترکیبی نامیده می‌شود و توسط دابسون و همکاران (۱۹۸۵) و راس و همکاران (۱۹۹۰) ارائه شده است. طبق این روش ثابت دی‌الکتریک حجم خاک به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\theta_v = \frac{\varepsilon_b^\beta - (1-\eta)\varepsilon_s^\beta - \eta\varepsilon_a^\beta}{\varepsilon_w^\beta - \varepsilon_a^\beta} \qquad (۶)$$

که در آن η: تخلخل خاک (مترمکعب/مترمکعب)،

ε_a، ε_s، ε_w: به ترتیب ثابت دی‌الکتریک هوا، خاک و آب می باشند.

β: پارامترهندسی است که به نحوه قرار گیری پروب دستگاه در خاک بستگی دارد و محدوده تغییرات آن بین ۱ (پروب موازی با لایه های خاک) و ۱- (حالت عمودی) است. مقدار این پارامتر را می‌توان برای یک محیط دو فازی برابر با نیم در نظر گرفت.

سطح ویژه ذرات خاک از مهم‌ترین عواملی است که در اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک در خاک تأثیر می‌گذارد. وجود این خصوصیت باعث افزایش یون‌های جذب شده بر روی کلوئیدهای خاک و در نتیجه افزایش لایه دوگانه می‌شود (با توجه به اینکه توزیع یونی مجاور یک سطح باردار می‌تواند به صورت یک محیط پخشیده بار و یا به صورت یک لایه متراکم از بار پیوندی به انضمام یک محیط پخشیده بار باشد، بار سطح و زیر لایه‌های متراکم و پخشیده یون‌های با بار مخالف تشکیل حالتی را می‌دهد که به طور معمول لایه دو گانه نامیده می‌شود). گوی

(۱۹۱۰) و چاپمن (۱۹۱۳) رابطه‌ای را بین عکس ضخامت لایه دو گانه (d) و ضریب ثابت دی‌الکتریک ارائه دادند:

$$d = \left(\frac{1000 e^2 N_A \sum_i Z_i^2 M_i}{\varepsilon k T}\right)^{1/2} \quad (7)$$

که درآن:

N_A: عدد آووگادرو ($6/02 \times 10^{23}$)

Z_i : ظرفیت یون i بر حسب مولار

M_i: غلظت یون i بر حسب مولار

ε: ثابت دی الکتریک

k: ثابت بولتزمن ($1/38 \times 10^{-23}$)

T: دمای مطلق بر حسب کلوین (۲۹۸)

با توجه به آن که افزایش سطح ویژه ذرات، کاهش لایه دوگانه را به همراه دارد. اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از دستگاه TDR مدل TRASE(6050X1) انجام شد. موج بر[6]های استفاده شده از نوع دفنی دو شاخه‌ای با طول ۱۵ سانتی‌متر بودند. این دستگاه دارای سه پنجره اندازه‌گیری رطوبت با طول موج‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه می‌باشد که اندازه‌گیری رطوبت در هر یک از این پنجره‌ها انجام گرفت. آزمایشات با پنج نوع خاک با بافت‌های شنی، لوم شنی، لومی، لوم شنی رسی و لوم رسی و در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار SAS انجام شد. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در جدول(۱) آورده شده است. نمونه‌های خاک مورد نظر در گلدان‌های پلاستیکی به قطر و ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر با تراکم یکسان ریخته شدند. در مرحله بعدی گلدان‌ها اشباع شده و سپس در روزهای متوالی (هر ۲ روز ۲ مرتبه)، اندازه‌گیری رطوبت خاک هر گلدان بوسیله دستگاه TDR و بطور مستقیم با روش وزنی صورت گرفت. لازم به ذکر است که رطوبت حجمی مورد نظر با ضرب رطوبت وزنی در مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک ثبت می شد. در هر بار اندازه‌گیری با دستگاه، مقادیر ثابت دی‌الکتریک خاک نیز ثبت گردید. به منظور تعیین رطوبت براساس مدل تاپ مقادیر ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده برای هر قرائت رطوبت، در مدل قرار داده شد و برای استفاده از مدل ترکیبی لازم است که مقادیر ثابت دی‌الکتریک خاک خشک، آب و هوا مشخص باشد. با بررسی تحقیقات مختلف مقادیر ۱، ۸۱ و ۴ به ترتیب برای ثابت دی‌الکتریک هوا، آب در نظر گرفته شد (بالانیس، ۱۹۸۹). به منظور ارزیابی هر یک از مدل‌ها در تخمین رطوبت حجمی خاک، پارامترهای جذر متوسط مربع خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) با استفاده از روابط زیر تعیین گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n di^2}{n}} \quad (8)$$

$$RE = \frac{\sum_i^n |\theta_v - \theta_{TDR}| / n}{\bar{\theta}_v} \times 100 \quad (9)$$

که در آن ها:

RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا (مترمکعب / مترمکعب)

RE: خطای مطلق، di اختلاف بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و روش TDR در هر رطوبت

n: تعداد کل نمونه‌ها

θ_v: رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی (مترمکعب/مترمکعب)

$\bar{\theta}_v$: متوسط رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی (مترمکعب/مترمکعب)

θ_{TDR}: رطوبت اندازه گیری شده با TDR (مترمکعب/مترمکعب) می‌باشد.

جدول (۱): برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	جرم مخصوص حقیقی (gr/cm^3)	EC (µs/cm)	PH
شنی	۲/۷۲	۹۵۰	۷/۵
لوم	۲/۶۳	۱۹۹۰	۷/۷
لوم شنی	۲/۴۶	۲۴۰۰	۷/۳
لوم شنی رسی	۲/۳	۱۸۷۰	۸/۴۱
لوم رسی	۲/۱۵	۲۰۰۰	۸/۳

[6] - Waveguide

نتایج و بحث

۱. مقایسه دقت برآورد رطوبت حجمی با پنجره‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانو ثانیه

نتایج حاصل نشان داد که در کلیه بافت‌ها، مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده در پنجره اندازه‌گیری ۱۰ نانو ثانیه از دقت بالاتری برخوردار است. اختلاف بین نتایج در دو پنجره ۱۰ و ۲۰ نانوثانیه زیاد نبود که این تفاوت را می‌توان به علت خطای ابزار دانست اما در محاسبات از پنجره‌هایی استفاده شد که دارای بیشترین دقت بوده است. پنجره اندازه‌گیری ۴۰ نانو ثانیه در هر پنج بافت دارای خطای بالاتری بود. علت بالا بودن خطا را می‌توان به عدم تطبیق طول زمان رفت و برگشتی موج اندازه گیری شده توسط دستگاه به طول پنجره اندازه‌گیری شده نسبت داد.

سلطانی محمدی (۱۳۸۴) در تحقیق خود نتیجه گرفت که بهترین پنجره برداشت در بافت‌های لوم رسی و رس سیلتی با موج بر دفنی به طول ۲۰ سانتیمتر، پنجره ۲۰ نانو ثانیه و برای بافت‌های شن ریز، شن لومی، لوم شنی و لوم سیلتی، پنجره ۱۰ نانو ثانیه است. همچنین کمالی و مهدیان (۱۳۸۴) نتیجه گرفتند که بهترین پنجره برداشت با طول پروب ۲۰ سانتیمتر، پنجره ۱۰ نانو ثانیه است. از پنجره ۴۰ نانو ثانیه برای اندازه‌گیری زمان بازتاب در موج برهای با طول زیاد استفاده می‌شود. و با توجه به اینکه برای موج برهای با طول ۱۵ یا ۳۰ سانتی‌متری، پنجره ۱۰ نانو ثانیه دقت بالایی دارد، لذا این دستگاه در کارخانه براساس این پنجره تنظیم می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه بین رطوبت اندازه‌گیری شده توسط ابن پنجره‌ها در جدول(۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر RE و RMSE در پنجره ۱۰ نانوثانیه دارای کم‌ترین مقدار است.

۲. مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه **TDR** در هر پنج بافت

برای مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR و روش وزنی پنج بافت مورد نظر، از میانگین مقادیر رطوبتی استفاده شد. در بافت شنی و لوم شنی تقریباً در کل محدوده رطوبتی اندازه‌گیری شده رطوبت سنج TDR رطوبت را بیشتر از رطوبت وزنی تخمین می‌زند، لازم به ذکر است که اختلاف بین این دو مقدار با کاهش رطوبت خاک کاهش می‌یابد، اختلاف بین این مقادیر بین ۰/۵ الی ۱ درصد می‌باشد. در بافت لوم در رطوبت‌های بالا (تقریباً بالای ۱۹ درصد)، رطوبت‌سنج TDR رطوبت را بیشتر از رطوبت وزنی تخمین می‌زند و با کاهش رطوبت دستگاه تخمین کمتری نسبت به روش وزنی نشان می‌دهد. اختلاف بین این دو روش در بافت لوم در حدود ۱- ۲ درصد می‌باشد. در خاک‌های با بافت سنگین (لوم شنی رسی، لوم رسی) در کل محدوده رطوبتی دستگاه رطوبت را بیشتر از روش وزنی تخمین می‌زند. این اختلاف در بافت‌های سنگین به بیش از ۳ درصد نیز می‌رسید. به طور کلی می‌توان گفت که با سنگین شدن بافت خاک و افزایش درصد رس خاک سطح ویژه ذرات موجود در نمونه خاک افزایش یافته که این موضوع به ترتیب باعث کاهش لایه دوگانه حجم خاک و افزایش ثابت دی‌الکتریک و در نتیجه افزایش رطوبت اندازه‌گیری شده خواهد شد که مقایسه پارامترهای RMSE و RE در جدول(۳) نیز این موضوع را تایید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود این مقادیر با سنگین شدن بافت خاک افزایش می‌یابند. البته نوع رس در اینجا مورد بررسی قرار نگرفته است.

۳. تحلیل آماری نتایج بدست آمده رطوبت حجمی توسط دستگاه TDR

نتایج آنالیز واریانس در سطح ۵ درصد برای کلیه تیمارها نشان داد که که بین واریانس و میانگین تیمارهای مختلف در هر پنج بافت تفاوت معنی‌داری وجود ندارد ($p < ۰/۰۵$) (جدول۳).

جدول (۳): نتایج تجزیه واریانس در پنج بافت

منابع تغییر	درجه آزادی	MS	
		RE	RMSE
بافت خاک	۴	۵۴۰/۷۳	۰/۰۰۳۹۲
بلوک	۲	۲/۲۶۸	۰/۰۰۰۰۸۷
اشتباه	۳۸	۸/۹۲	۰/۰۰۰۰۶۸
کل	۴۴		

۴. بررسی دقت معادله‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی

با برازش داده‌های رطوبتی مدل‌ها و ثابت دی‌الکتریک دستگاه و مقایسه آن با رطوبت حجمی به دست آمده از روش وزنی، مشخص شد که مقادیر برآورد شده با مدل

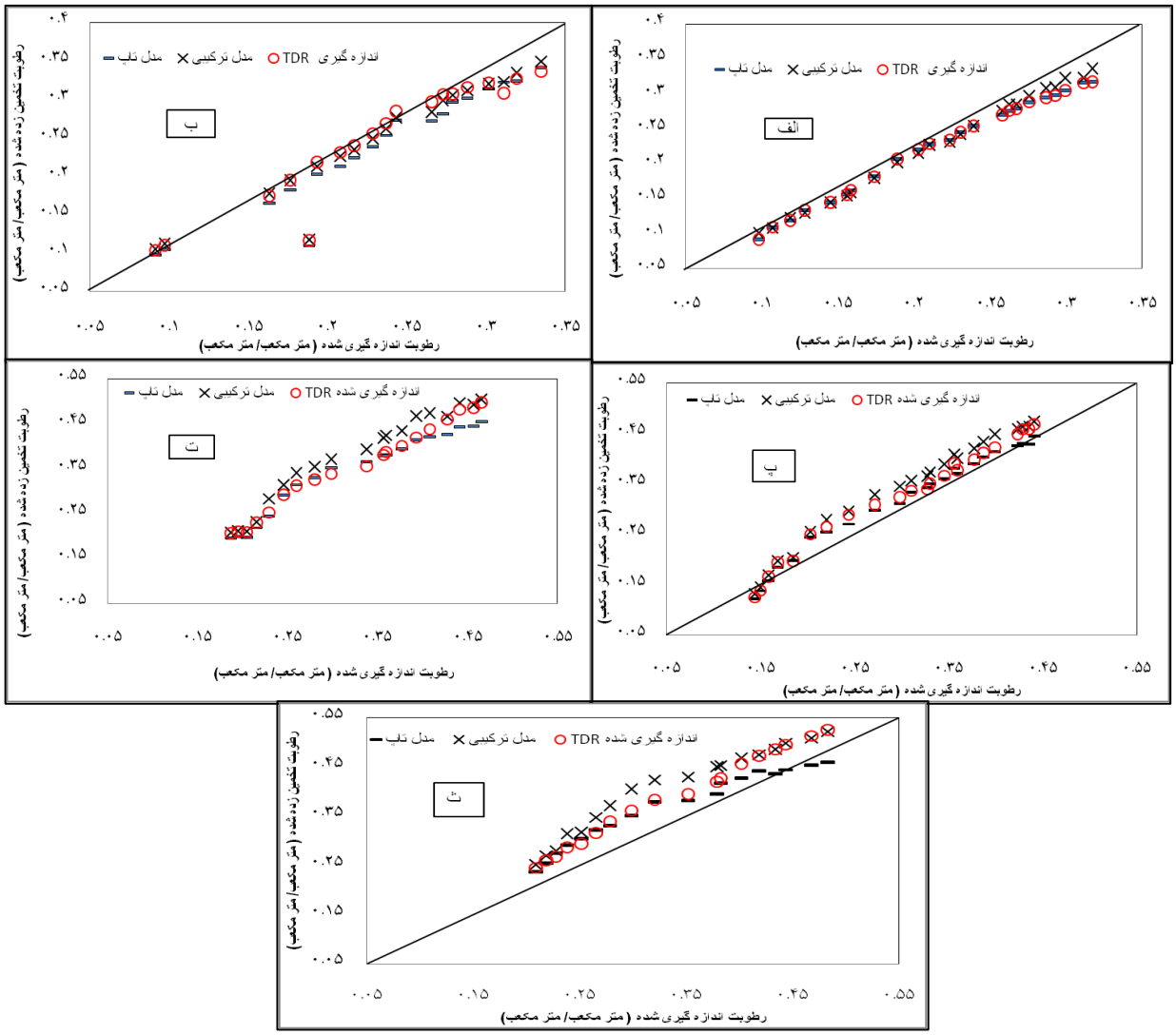
تاپ و همکاران (۱۹۸۰) در کلیه بافت‌ها به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۹۹۲ ، ۰/۹۶۶، ۰/۹۴، ۰/۹۴ و ۰/۹۷ از دقت و همبستگی بیشتری نسبت به مدل ترکیبی (۱۹۹۰) با ضرایب همبستگی ۰/۹۹۱، ۰/۹۹۴، ۰/۹۲۱، ۰/۹۱۵ و ۰/۹۵۳ برخوردار است. این مقایسه برای هر پنج نوع بافت خاک در شکل(۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با سنگین شدن بافت (افزایش درصد رس) اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از هر سه مدل افزایش می‌یابد. در هر پنج بافت، مدل ترکیبی رطوبت را بیشتر از TDR برآورد می‌کند. اختلاف بین مقادیر برآورد شده با مدل تاپ و اندازه‌گیری شده با TDR در بافت‌های شنی و لوم شنی در حدود یک درصد است و در بافت‌های لوم، لوم شنی رسی و لوم رسی بیشتر از دو درصد است. با محاسبه پارامترهای ریشه متوسط مربعات خطا RMSE و خطای نسبی RE با استفاده از معادلات (۷) و (۸) و مقایسه آن‌ها مشاهده شد که مدل تاپ نسبت به مدل ترکیبی از دقت بالاتری در تخمین رطوبت خاک برخوردار است. بطور کلی می‌توان گفت که با سنگین تر شدن بافت خاک دقت مدل تاپ و ترکیبی در تخمین رطوبت حجمی کاهش می‌یابد.

جدول(۲): مقادیر RE و RMSE برای مقایسه پنجره‌های اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانو ثانیه

منابع تغییر	درجه آزادی	MS	
		RE	RMSE
بافت خاک	۴	۵۴۰/۷۳	۰/۰۰۳۹۲
بلوک	۲	۲/۲۶۸	۰/۰۰۰۰۸۷
اشتباه	۳۸	۸/۹۲	۰/۰۰۰۰۶۸
کل	۴۴		

جدول(۳): مقادیر RE و RMSE حاصل از مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده توسط TDR و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل‌ها

نوع خاک	TDR		مدل تاپ		مدل ترکیبی	
	RMSE	RE%	RMSE	RE%	RMSE	RE%
شنی	۰/۰۱۰	۴/۰۷	۰/۰۰۸	۲/۹۸	۰/۰۱۵	۶/۱۱
لوم شنی	۰/۰۲۳	۸/۹۱	۰/۰۲۴	۸/۱۹	۰/۰۳۸	۱۴/۳۶
لوم	۰/۰۲۸	۸/۰۴	۰/۰۲۷	۷/۷۸	۰/۰۴۷	۱۴/۶۳
لوم شنی رسی	۰/۰۳۳	۹/۱۳	۰/۰۳۰	۷/۶۰	۰/۰۵۳	۱۵/۰۱
لوم رسی	۰/۰۴۰	۱۱/۴۰	۰/۰۳۶	۹/۲۸	۰/۰۶۰	۱۷/۵۳



شکل(۱): مقایسه رطوبت حجمی اندازه گیری شده با مقادیر تخمین زده شده توسط مدل های تاپ، ترکیبی و معادله کالیبره TDRبرای خاک های مختلف الف) شنی ب) لوم شنی پ) لوم ت) لوم شنی رسی ث) لوم رسی

با برازش داده‌های رطوبت تخمین زده شده توسط دستگاه TDR و ثابت دی‌الکتریک برای هر پنج نوع بافت خاک در این تحقیق، معادلات درجه سه‌ای به صورت $\theta_{TDR}= A\times\varepsilon^3 +B\times\varepsilon^2 +C\times\varepsilon +D$ بدست آمد. (جدول۴). لازم به ذکر است که علت استفاده معادلات چند جمله‌ای درجه سه ضریب همبستگی بالایی است که محققین مختلف در تحقیقات خود به آن دست یافته‌اند. همچنین روابطی بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به روش وزنی و مقادیر تخمین زده شده رطوبت توسط دستگاه TDR برازش داده شد که معادلات آن‌ها در جدول(۵) آورده شده است.

جدول(۴): ضرایب رگرسیونی خطوط برازش یافته بر منحنی رطوبتی **TDR** و ثابت دی‌الکتریک در بافت های خاک

بافت خاک	A	B	C	D	R^2
شنی	۵×۱۰^{-۵}	-۰/۰۰۲	۰/۹۹۹	-۰/۱۵۵	0.99
لوم شنی	۷×۱۰^{-۵}	-۰/۰۰۳	۰/۹۹۹	-۰/۲۰۵	0.98
لوم	۴×۱۰^{-۵}	-۰/۰۰۲	۰/۹۹۸	-۰/۱۴	0.97
لوم شنی رسی	۹×۱۰^{-۶}	-۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۷	۰/۰۱۱	0.95
لوم رسی	۳×۱۰^{-۷}	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۱۲۳	0.94

جدول(۵): معادلات خط برازش یافته بر منحنی حاصل از رطوبت تخمین زده شده با دستگاه **TDR** و رطوبت حجمی در بافت های خاک

بافت خاک	معادله خط	$R^۲$
شنی	$\theta_v = ۰/۹۶۵\theta_{TDR} + ۰/۰۰۵$	۰/۹۸۷
لوم شنی	$\theta_v = ۰/۸۷۳\theta_{TDR} + ۰/۰۱۶$	۰/ ۸۹۹
لوم	$\theta_v = ۰/۹۴۷\theta_{TDR} - ۰/۰۰۲$	۰/۹۷۷
لوم شنی رسی	$\theta_v = ۰/۹۵۱\theta_{TDR} - ۰/۰۱۱$	۰/۹۷۴
لوم رسی	$\theta_v = ۱/۰۲۹\theta_{TDR} - ۰/۰۴۹$	۰/۹۹۵

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که با افزایش رس در خاک، به علت افزایش سطح ویژه خاک و در نتیجه کاهش لایه مرزی، ثابت دی‌الکتریک افزایش یافته که در اثر آن میزان دقت دستگاه با کاهش چشمگیری همراه بوده است که این میزان خطا در کلیه بافت‌ها در رطوبت‌های پایین بیشتر از رطوبت‌های بالا می‌باشد. همچنین در بافت‌های سنگین در کل محدوده رطوبتی دستگاه TDR رطوبت را بیشتر از روش وزنی نشان می‌دهد ولی در بافت‌های سبک در رطوبت‌های بالا این اتفاق می‌افتد. مدل تاپ بهتر از مدل ترکیبی در هر پنج نوع بافت خاک توانسته رطوبت را تخمین بزند. مدل تاپ و مدل ترکیبی در خاک‌های با بافت سبک‌تر، دارای بیشترین دقت بوده اند و نیز با کاهش رطوبت در هر بافت، دستگاه TDR رطوبت خاک را با دقت بیشتری اندازه‌گیری می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری با نتایج تخمین زده شده از سه مدل مختلف نشان می‌دهد که در هر پنج نوع بافت خاک بطور تقریب مقادیر تخمین زده شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این تحقیق معادلاتی برای تخمین رطوبت واقعی خاک بر اساس رطوبت قرائت شده از دستگاه و ثابت دی‌الکتریک تخمین زده شده ارائه گردید.

منابع

۱. سالاری ا. ۱۳۸۷. بررسی اثر شوری بر واسنجی دستگاه TDR در مکشهای مختلف خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زهکشی.

۲. سلطانی محمدی، ا. ۱۳۸۴. تاثیر بافت خاک روی واسنجی TDR برای اندازه‌گیری رطوبت در شرایط خاک‌های خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ، ۱۹۲ ص.

3. Balanis, C.A. 1989. Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons, Inc., New York.

4. Chapman, d. l. 1913. Contribution to the theory of electrocapillarity, philos. Mag. 23(6): 475-481.

5. Dobson, M.C., F.T. Ulaby, M.T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes. 1985. Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II: Dielectric mixing models. Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geosciexce and Remote Sensing. 23:35-46.

6. Gardner W. 1986. Water content methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, Agronomy Monographs. 9:493-544.

7. Gouy, g. 1910. Sur la constitution de la charge electrique a la surface dun electrolyte. Ann. Phys. (paris). [iv]9: 457-468.

8. Jacobsen, O. H. and Schjonning, P. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. Hydrology Journal. 151: 147-157.

9. Oleszczuk, R., Brandyk, T., Gnatowski, T., and Szatyowicz, J. 2004. Calibration of TDR for moisture determination in peat deposits. Int. Agrophysics. 18: 145-151.

10. Pumpanen, J. and Luvesniemi, H. 2005. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. Boreal Environment Res. 10: 589.595.

11. Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H. and Attinger, W. 1990. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach . Water Resour Res. 26(10): 2267– 2273.

12. Silberstein, R. P., Sivapalan, M. and Wyllie, A. 1999. On the validation of coupled water and energy balance model at small catchment scales. Journal of Hydrology. 220: 149 – 168.

13. Topp, G.C., Davis, J.L., and A. P.Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurment in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16:574-582.

14. Walker, J. P. 1999. Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data. Ph.D thesis. The University of Newcastle: New South Wales, Australia.

Effect of Soil Texture on accuracy of Time Domain Reflectometry methods for Measurement of Soil Moisture Content

Mojtaba Keshavarzi[1], Amir Hosain Nazemi[2], Sayed Ali Ashraf Sadradini[2], Mohamad Reza Nayshabori[3], Abolfazl Naseri[4]

Abstract

Soil moisture as an important factor in agricultural management which is measured or estimated using direct and indirect methods. Time domain reflectometry (TDR) method is One of the newest and fastest ways to measure the soil dielectric constant, indirectly which is based on the measurement of soil dielectric constant regarding the velocity of the electromagnetic waves propagation. In this paper, several experimental relations between dielectric constants and volumetric water content have been presented, but all soil properties is not considered in these methods. The main purpose of this research is the investigation of the effect of soil texture on the accuracy of volumetric water content measurement by use of TDR system. The experiments have been carried out on 5 types of texture (sandy, sandy loam, loam, sandy clay loam and clay loam) in three repetitions under quite random conditions. In addition to assessment of soil moisture using TDR, soil volumetric water content has been measured in direct (weight) method. Also, Estimated Values of soil moisture by the TDR system were compared with topp et al (1980) and mixed models. The results showed that the volumetric water content values obtained from TDR system decreased with The heavier soil texture, As the percent relative error (RE) in textures sandy, sandy loam, loam, sandy clay loam and clay loam have been Respectively equal to 4.07, 8.9, 8.03, 9.13 and 11.4. comparision of estimated moisture using models showed that in all textures, topp et al (1980) models had the highest Correlation coefficient and also The accuracy of topp models is more of mixed models. Finally, Relations have been calibrated with a high correlation (R^2) between weight and TDR moisture measurements were presented.

keywords: Time Domain Reflectometry, Dielectric Constant, Soil Moisture, Soil Texture, Mixed model.

[1] Msc. Student, Department of Irrigation and Reclamation, Tabriz University, Tabriz, Iran
[2] Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation, Tabriz University, Tabriz, Iran
[3] Professor, Department of Soil Science, Tabriz University, Tabriz, Iran
[4] Assistant Professor, Agricultural and Natural Resource Institute of Azarbayjane sharghi, Tabriz, Iran