

## بررسی دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای برآورد رطوبت خاک

مریم مزیدی<sup>۱</sup>، عیسی معروف‌پور<sup>۲\*</sup> و بهمن بهرام‌نژاد<sup>۳</sup>

### چکیده

استفاده از روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی TDR اخیراً به عنوان روشی غیرمخرب و سریع در تعیین رطوبت حجمی خاک شناخته شده است. کاربرد TDR نیاز به کالیبراسیون بر اساس ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی ارائه شده به دستگاه دارد. 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 دقت مدل‌های ارائه شده برای خاک‌های حاوی ماده آلی است. این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی در سه نوع خاک با بافت سبک، متوسط و سنگین و پنج سطح ماده آلی (۰/۵، ۲، ۳/۵، ۵ و ۶/۵ درصد) شامل کود لاشبرگ و در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. در این تحقیق، از مدل‌های تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، ترکیبی (۱۹۹۰)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)، راس و همکاران (۱۹۹۲) و اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) استفاده شد. توانایی برآورد رطوبت حجمی هر یک از مدل‌ها با معیارهای جذر متوسط مربع خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)، و اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴)، به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۸۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۴ کمترین خطا و مدل ترکیبی (۱۹۹۰) و راس و همکاران (۱۹۹۲) بیشترین خطا را در برآورد رطوبت خاک داشتند. همچنین در این مدل‌ها با افزایش درصد ماده آلی و درصد رس، میزان خطای برآورد رطوبت خاک افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** TDR، ثابت دی‌الکتریک و رطوبت خاک.

ارجاع: مزیدی م. معروف‌پور ع. و بهرام‌نژاد ب. ۱۳۸۸. بررسی دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای برآورد رطوبت خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۵۲-۴۱: (۵)۳

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان  
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان  
۳- عضو هیأت علمی گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان  
\* نویسنده مسئول: Isamarofpoor@Yahoo.com  
تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۴

## مقدمه

تعیین رطوبت حجمی خاک و آب قابل دسترس برای گیاهان در زمینه‌های متعدد مانند کشاورزی، جنگل‌داری، هیدرولوژی و مهندسی آب بسیار مهم است. بنابراین بررسی متعدد رطوبت خاک و میزان قابل استفاده آن برای گیاه از مهمترین موضوعات در علم رابطه آب، خاک و گیاه است. روش‌های مختلفی برای تعیین رطوبت خاک وجود دارند که پرکاربردترین و دقیق‌ترین آن‌ها روش وزنی است. به‌طور کلی اندازه‌گیری رطوبت به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. در روش‌های مستقیم مقادیر جرمی و حجمی رطوبت به‌طور مشخص اندازه‌گیری می‌شوند، اما در روش‌های غیرمستقیم باید از اندازه‌گیری یک عامل که بر درصد رطوبت مؤثر است، استفاده کرد. اخیراً از خاصیت دی‌الکتریک خاک، برای تعیین رطوبت استفاده شده است. بر این اساس رطوبت حجمی خاک با استفاده از اندازه‌گیری میزان ثابت دی‌الکتریک به روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی<sup>۱</sup> (TDR) تخمین زده می‌شود. این روش اولین بار برای اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط تاپ و همکاران (۱۹۸۰) گزارش شده است. دقت بالا (حدود ۱ تا ۲ درصد حجمی)، عدم نیاز به کالیبراسیون دستگاه در اکثر خاک‌ها، نبودن خطر تشعشع در مقایسه با روش نوترون‌متری و روش اشعه گاما، کاربرد ساده، امکان اندازه‌گیری اتوماتیک و تکرارپذیری رطوبت از جمله مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک است.

تبدیل ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده به رطوبت حجمی نیاز به معادله کالیبراسیونی دارد. برای تعدادی از خاک‌ها، رابطه ثابت دی‌الکتریک و مقدار رطوبت حجمی ارائه شده، که به آنها اشاره شده است.

در ایران تاکنون تحقیقات محدودی درباره کالیبراسیون دستگاه TDR صورت گرفته است. تحقیقات سلطانی محمدی (۱۳۸۴) تأثیر بافت خاک در شرایط خاک‌های استان خوزستان، سالاری تأثیر شوری خاک در مکش‌های مختلف و معروف‌پور و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر بافت خاک بر کالیبراسیون دستگاه TDR را بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که با افزایش میزان رس، صحت

دستگاه در برآورد رطوبت حجمی خاک کاهش می‌یابد. به‌طوری که با سنگین‌تر شدن بافت خاک، دستگاه رطوبت خاک را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. اولین بار وابستگی بالای ثابت دی‌الکتریک به‌میزان آب حجمی خاک توسط تاپ (۱۹۸۰) و تاپ و دیویس (۱۹۸۵) برای تعدادی از خاک‌های آلی با ترکیب‌های متفاوت کشف شد (به نقل از سلطانی محمدی، ۱۳۸۵).

تاپ و همکاران (۱۹۸۰) معادله کالیبراسیونی را برای خاک‌های آلی ارائه دادند که کاربرد وسیع آن برای خاک‌های معدنی بوده و برای خاک‌های آلی صحت ندارد. این معادله که یک چند جمله‌ای درجه سه است، برای خاک‌های معدنی در محدوده رطوبت بین صفر تا ۵۵ درصد، دمای بین ۱۰ تا ۳۶ درجه و وزن مخصوص ظاهری ۱/۱۴ تا ۱/۴۴ میلی‌گرم بر متر مکعب مناسب است (اولسزوک و همکاران ۲۰۰۴). آنان با توجه به اینکه ثابت دی‌الکتریک خاک تحت کنترل آب خاک است، با استفاده از دستگاه الکترونیکی که برای مصارف صنعتی تهیه شده بود توانستند رطوبت خاک را اندازه‌گیری کنند و رابطه زیر را که معروف به مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) است، ارائه دهند.

$$\theta_v = -5/3 \times 10^{-2} + 2/9 \times 10^{-2} (\varepsilon) - 55 \times 10^{-4} (\varepsilon)^2 + 4/3 \times 10^{-6} (\varepsilon)^3 \quad (1)$$

که در آن،  $\varepsilon$  ثابت دی‌الکتریک خاک و  $\theta_v$  میزان رطوبت حجمی خاک است.

در مدل دیگری که به مدل ترکیبی یا سه فاز مشهور است و پایه فیزیکی دارد، خاک به عنوان محیطی مرکب از آب، خاک و هوا در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه بر اساس ترکیبی از ثابت دی‌الکتریک این اجزاء است. این مدل فرض می‌کند که تفاوت نسبی ثابت دی‌الکتریک در بخش‌های مختلف خاک کم است. بر طبق نظر راس و همکاران (۱۹۹۰)، ثابت دی‌الکتریک یک سیستم سه فازی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = [\theta_v \varepsilon_w^\alpha + (1-n) \varepsilon_s^\alpha + (n-\theta) \varepsilon_a^\alpha]^{1/\alpha} \quad (2)$$

که در آن  $n$  تخلخل خاک،  $\varepsilon_s$ ،  $\varepsilon_w$  و  $\varepsilon_a$  به ترتیب بیانگر ثابت دی‌الکتریک هوا، آب و خاک و  $\alpha$  پارامتر هندسی که مربوط به قرارگیری پروب در جهت عمود یا موازی لایه‌بندی خاک است، که به ترتیب برابر ۱- و ۱+ و مقدار آن برای یک محیط

1- Time domain Reflectometry (TDR)

معادلات، رابطه ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی به صورت معادله ۹ بیان می‌شود:

$$\theta_v = (-27/6 + 247/7\varepsilon - 3/15\varepsilon^2 + 0/02\varepsilon^3) \times 10^{-4} \quad (۹)$$

یکی از دلایل متفاوت بودن مدل‌ها، تفاوت حجم فضای خالی نمونه‌های خاکی بوده که مدل در آن شرایط به دست آمده است (اولسزوک و همکاران، ۲۰۰۴).

پومپانن و لوسنیمی (۲۰۰۵)، اساس اندازه‌گیری‌های TDR را ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک دانستند که با رطوبت حجمی خاک تغییر می‌کند. آنها کالیبراسیون‌هایی را برای لایه‌های هوموس دست‌نخورده و همگن ( $O_h + O_f$ ) ارائه دادند و سه مدل کالیبراسیون را با هم مقایسه کردند. در نهایت تأثیر تغییر در میزان چگالی ظاهری و حجم نمونه را بررسی کردند. در رطوبت‌های حجمی بالا، مقدار  $k_a$  برای نمونه هوموس دست‌نخورده بیشتر از نمونه‌های همگن در همان رطوبت حجمی بود. دلیل آن تفاوت فضای خالی دو نمونه است. همچنین نتایج آنها نشان داد که مدل لگاریتمی دارای بیشترین دقت است و بیشترین ضریب همبستگی را دارد. این مدل نسبت به دومدل دیگر هم در رطوبت‌های بالا و هم در رطوبت‌های پایین، مقدار رطوبت را به خوبی تخمین می‌زند.

از میان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد ماده آلی موجود در آن از عوامل تأثیرگذار بر روی معادله کالیبراسیونی TDR است. امروزه مطالعات فراوانی روی این موضوع در جهان در حال انجام است. در این پژوهش نیز اثر ماده آلی خاک روی دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی بررسی می‌شود. لذا تعیین میزان دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای بافت‌های مختلف با درصدهای مختلف ماده آلی و آرایه ضریب تصحیح مناسب در صورت لزوم، از اهداف اصلی این تحقیق است. علی‌رغم مشکلات در تعیین رطوبت حجمی به روش وزنی، این روش به عنوان روشی استاندارد برای چنین کالیبراسیون‌هایی است (گاردنر، ۱۹۸۶).

#### مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان در پاییز سال ۱۳۸۷ طی مدت ۳ ماه انجام

دو فاز برای برابر ۰/۵ است. با مرتب کردن معادله ۲، می‌توان رطوبت حجمی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\theta_v = \frac{\varepsilon^\alpha - (1-n)\varepsilon_s^\alpha - n\varepsilon_a^\alpha}{\varepsilon_w^\alpha - \varepsilon_a^\alpha} \quad (۳)$$

راس و همکاران (۱۹۹۲) نیز برای خاک‌های آلی معادله ۴ را ارائه دادند:

$$\varepsilon = 3/92 - 46/078\theta_v + 374\theta_v^2 - 320\theta_v^3 \quad (۴)$$

برای کالیبراسیون خاک‌های آلی محققان متعددی رابطه ارائه دادند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مالیکی و همکاران (۱۹۹۶) در خاک‌های جنگلی نشان دادند که منحنی تاپ و همکاران (۱۹۸۰) اغلب خطاهای بزرگی را در خاک‌های با ماده آلی دارد که این خطاها به چگالی ظاهری خاک بستگی دارد. آنان تأثیر وزن مخصوص و تخلخل را روی تعیین ثابت دی‌الکتریک بررسی کردند. همچنین با توجه به وزن مخصوص ظاهری، میزان رس و ماده آلی، معادله زیر را ارائه دادند.

$$\theta_v = -3/4 \times 10^{-2} + 3/45 \times 10^{-2} k_a - 1/14 \times 10^{-3} k_a^2 + 1/71 \times 10^{-5} k_a^3 - 3/71 \times 10^{-2} \rho_b + 7/36 \times 10^{-4} \%Clay + 4/77 \times 10^{-5} \%OM \quad (۵)$$

که در آن،  $K_a$  ثابت دی‌الکتریک خاک ( $\varepsilon$ )،  $\rho_b$  چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، Clay میزان رس خاک (درصد) و OM میزان ماده آلی خاک بر حسب درصد است.

اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴)، معادله کالیبراسیونی را برای انواع مختلف پیت ارائه دادند که به شکل زیر است.

$$\sqrt{k_a} = a + b\theta_v \quad (۶)$$

که در آن  $\sqrt{k_a}$  شاخص انکساری،  $a$  عرض از مبدأ،  $b$  شیب،  $\rho_b$  چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب) و  $\theta_v$  رطوبت حجمی (درصد) است. با توجه به رابطه ضرایب  $a$  و  $b$  با چگالی ظاهری خاک:

$$a = 18/6619\rho_b^2 + 13/8511\rho_b - 0/383943 \quad (۷)$$

$$b = 25/8000\rho_b^2 - 32/03021\rho_b + 11/5445 \quad (۸)$$

رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی در ذخایر پیت در محدوده چگالی ظاهری ۰/۲۵-۰/۰۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب و برای محدوده رطوبتی کمتر از ۷۰٪ می‌تواند توسط معادله ۷ تفسیر شود. در نهایت با جاگذاری

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_v - \theta_p| / n}{\bar{\theta}_v} \times 100 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n di^2}{n}} \quad (11)$$

که در آن RMSE ریشه متوسط مربعات خطا، RE خطای نسبی، di اختلاف رطوبت حجمی برآورد شده و روش وزنی نمونه‌آم، n تعداد کل نمونه‌ها،  $\bar{\theta}_v$  رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی،  $\bar{\theta}_v$  متوسط رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و  $\theta_p$  رطوبت محاسبه شده توسط مدل‌ها است.

### نتایج و بحث

#### ۱- مقایسه دقت برآورد رطوبت حجمی با پنجره‌های ۱۰،

#### ۲۰ و ۴۰ نانو ثانیه

نتایج این تحقیق برای سه بافت با درصد‌های مختلف ماده آلی نشان داد که در تمامی مدل‌ها و در هر سه بافت پنجره ۱۰ نانو ثانیه بیشترین دقت و پنجره ۴۰ نانو ثانیه کمترین دقت را دارد. جدول ۲ نتایج مقایسه بین پنجره‌های اندازه‌گیری برای مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) به عنوان نمونه آورده شده است. در کاتالوگ دستگاه، استفاده از پنجره ۱۰ نانو ثانیه برای پروب‌های دفنی (طول میله موج‌بر ۲۰ سانتی‌متر) توصیه شده است که با نتایج مدل‌ها هم‌دراین تحقیق، تطابق کامل دارد. در پنجره ۴۰ نانو ثانیه و رطوبت کمتر از ۲۰ درصد، دستگاه توانایی اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک را نداشت. سلطانی محمدی (۱۳۸۴) در تحقیق خود نتیجه گرفت که بهترین پنجره برداشت در بافت‌های لوم رسی و رس سیلتی با پروب 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. بنابراین در محاسبات بعدی در تحقیق حاضر از داده‌های رطوبت به‌دست آمده از پنجره ۱۰ نانو ثانیه برای هر سه بافت استفاده شد.

شد. دستگاه TDR مورد استفاده با مارک TRASE مدل 6050X1 و ساخت شرکت Soil Moisture، دارای پروب دفنی سه شاخه‌ای به طول ۲۰ سانتی‌متر است. این دستگاه دارای سه پنجره اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانو ثانیه است. تفسیر موج‌های مربوط به اندازه‌گیری زمان حرکت موج الکترومغناطیس در موج‌برها توسط نرم‌افزار WinTrase انجام گرفت (Soil moisture Equipment Corporation, 1996). توانایی برآورد رطوبت خاک با استفاده از معادلات مختلف کالیبراسیون شامل تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، ترکیبی (۱۹۹۰)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)، راس و همکاران (۱۹۹۲) و اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) بررسی شد. برای این منظور بافت خاک در سه سطح شامل سبک، متوسط و سنگین و ماده آلی (کود لاشبرگ) در پنج سطح ۰/۵، ۲، ۳/۵، ۵، ۶/۵ درصد استفاده شد و ۱۵ تیمار در ۳ تکرار بررسی شد. ویژگی‌های هر یک از خاک‌های نمونه شامل بافت خاک (روش هیدرومتری)، وزن مخصوص ظاهری نمونه‌ها (با محاسبه متوسط حجم نمونه‌ها در حالت اشباع و محاسبه وزن خاک خشک در انتهای آزمایش)، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی هر بافت (به وسیله دستگاه صفحات فشاری)، میزان اسیدیته و قلیائیت (PH) و هدایت الکتریکی (EC) هر بافت (توسط PH متر و EC سنج به روش عصاره اشباع) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های تهیه شده در گلدان‌هایی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر ۲۲/۵ سانتی‌متر ریخته شد. سپس نمونه‌ها اشباع شدند و حدود ۲۴ ساعت بعد از آن، اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک توسط TDR و درصد رطوبت به روش وزنی انجام گرفت. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

با استفاده از معادلات مورد بررسی مقادیر ثابت دی‌الکتریک به رطوبت تبدیل شد. رطوبت به‌دست آمده از روش وزنی مبنای بررسی توانایی مدل‌های موردنظر بود. توانایی هر مدل نیز از دو نظر شامل دقت<sup>۱</sup> و صحت<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. معیار بررسی دقت، جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE) و معیار بررسی صحت، خطای نسبی (RE) است.

جدول ۱- خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	سیلت (%)	شن (%)	رس (%)	ماده آلی (%)	وزن مخصوص حقیقی (gr/cm <sup>3</sup> )	PH	EC (ds/m)	(%)FC وزنی	(%)PWP وزنی
سیک (لوم شنی)	۱۴/۳	۷۶/۵	۹/۴	۰/۵	۲/۷	۷/۵	۰/۷	۹/۳	۶/۸
				۲/۰	۲/۶	۷/۰	۰/۷	۱۰/۱	۶/۵
				۳/۵	۲/۶	۷/۰	۰/۶	۹/۶	۶/۹
متوسط (لوم)				۵/۰	۲/۶	۷/۷	۰/۷	۹/۷	۷/۰
				۶/۵	۲/۶	۷/۶	۰/۷	۱۰/۱	۷/۸
				۰/۵	۲/۴	۷/۵	۰/۷	۱۴/۶	۷/۸
		۳۶/۴	۴۵	۱۸/۴	۲/۸	۷/۵	۰/۷	۱۵/۷	۸/۰
				۲/۰	۲/۴	۷/۵	۰/۷	۱۶/۵	۸/۲
				۳/۵	۲/۳	۷/۹	۰/۶	۱۴	۸/۸
سنگین (لوم شنی رسی)				۶/۵	۲/۴	۷/۰	۰/۷	۱۵/۹	۹/۳
				۰/۵	۲/۳	۷/۷	۰/۷	۲۶/۹	۱۳/۳
				۲/۰	۲/۴	۷/۳	۰/۶	۲۹/۴	۱۲/۸
				۳/۵	۲/۴	۷/۴	۰/۷	۲۵/۱	۱۲/۵
				۵/۰	۲/۲	۷/۰	۰/۷	۳۰/۱	۱۲/۶
			۶/۵	۲/۱	۷/۰	۰/۷	۲۸	۱۲/۹	

## ۲- بررسی دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای برآورد رطوبت حجمی خاک

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)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۶) و اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) در کلیه بافت‌ها با درصد‌های مختلف ماده آلی، به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۸۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۴ از دقت و همبستگی بیشتری نسبت به مدل ترکیبی (۱۹۹۰) و راس و همکاران (۱۹۹۲) با ضرایب ۰/۸۳ و ۰/۸۱ برخوردار است. با سنگین‌تر شدن بافت و افزایش مقدار رس خاک، مدل تاپ رطوبت را کمتر برآورد نموده است که در مقادیر رطوبتی بالاتر اختلاف بین مقادیر رطوبتی بیشتر می‌باشد. مدل تاپ به علت ماهیت تجربی و همچنین به دلیل اینکه هیچ کدام از پارامترها و خصوصیات خاک در آن دخالت داده نشده است و با توجه به اینکه با برازش بر داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده در خاک‌هایی با بافت سبک به دست آمده است، در خاک با بافت سبک، دقت بالاتری دارد.

نمودارهای مربوط به مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط مدل‌های انتخابی به صورت تابعی از ثابت دی‌الکتریک تخمین زده شده توسط دستگاه برای سه بافت در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ رسم شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که مدل به‌ازای یک ثابت دی‌الکتریک معین، مقدار رطوبت را نسبت به روش وزنی با چه دقتی و به صورت افزایشی و یا کاهش برآورد کرده است. مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که مدل ترکیبی به‌ازای یک ثابت دی‌الکتریک معین، مقدار رطوبت را نسبت به مدل تاپ و روش وزنی بیشتر برآورد کرده است. نتایج این تحقیق مشابه نتایج اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) و پومپان و لوسینمی (۲۰۰۵) است.

نتایج مقایسه مدل‌ها با روش وزنی در جدول ۳ آورده شده است. در این خاک‌ها در کلیه محدوده‌های رطوبتی مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) بیشترین تطابق را با روش وزنی داشته است. تفاوت بین نتایج مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) و روش وزنی در سه بافت سبک، متوسط و سنگین و با درصد‌های مختلف ماده آلی بیشتر از یک درصد است که با افزایش رس و سنگین‌تر شدن بافت خاک و همچنین با افزایش ماده آلی

کرده و تفاوت مقدار برآوردی با مقادیر اندازه‌گیری شده با روش وزنی روند رو به رشدی داشته است. سلطانی‌محمدی (۱۳۸۵) در تحقیق خود نشان داد که در مقایسه بین مقادیر رطوبتی توسط مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) و مدل ترکیبی با مدل TDR، مدل تاپ و همکاران از همبستگی بالایی برخوردار است. همچنین در تحقیقات اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴)، نتایجی مشابه با نتایج بالا مشاهده شد به طوری که مدل تاپ نسبت به دیگر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. معادلات کالیبراسیونی برازش یافته در هر یک از مدل‌ها برای سه بافت آزمایشی در جدول ۴ تا ۶ آورده شده است.

ضرایب رگرسیونی بین داده‌های مدل و داده‌های به‌دست آمده از روش وزنی در بافت سبک بیشترین همبستگی را دارد که با سنگین‌تر شدن بافت خاک میزان همبستگی کاهش می‌یابد. و در بین مدل‌ها، بیشترین همبستگی بین داده‌ها در مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) مشاهده می‌شود.

در خاک بیشتر می‌شود. درصد خطا برای مدل‌های راس و همکاران (۱۹۹۲) و ترکیبی (۱۹۹۰) بیشتر از ۲ درصد در بافت سبک، بیشتر از ۴ درصد در بافت متوسط و بیشتر از ۵ درصد در بافت سنگین است.

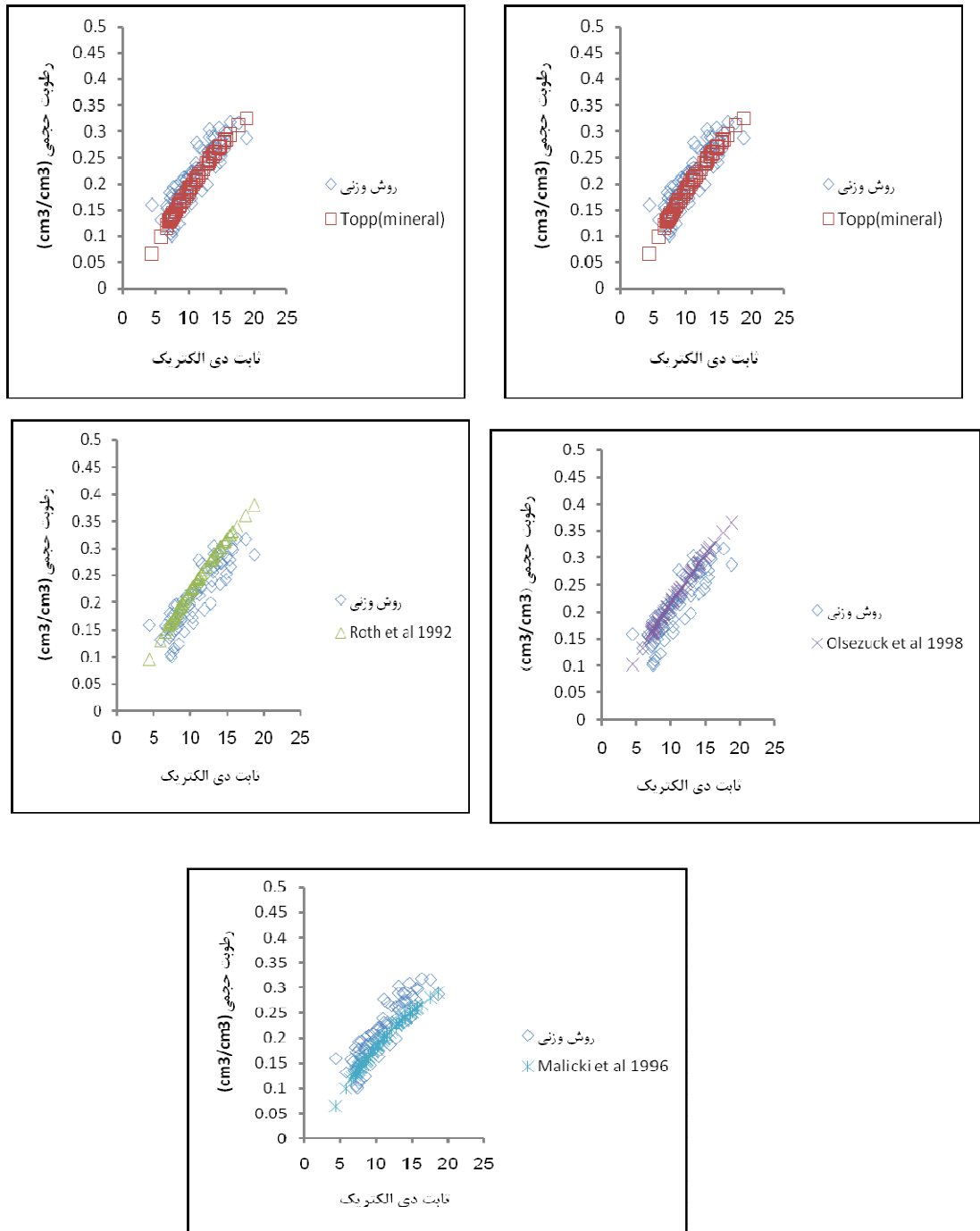
اسچاپ و همکاران (۱۹۹۶) در مقادیر ثابت دی‌الکتریک یکسان، رطوبت را با استفاده از مدل ترکیبی بیشتر از مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) به‌دست آوردند.

به‌منظور افزایش دقت مدل‌ها در برآورد رطوبت حجمی خاک، معادله کالیبراسیون آنها در هر بافت و برای هر مدل به‌دست آمد. به‌این ترتیب مشخص شد که کدام مدل مقادیر را بیشتر و کدام یک مقادیر را کمتر از روش وزنی تخمین می‌زند. نتایج حاصل از مقایسه بین رطوبت برآوردشده توسط مدل‌ها و روش وزنی نشان‌دهنده متفاوت بودن مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده با دو روش در محدوده رطوبتی مورد مطالعه بوده است.

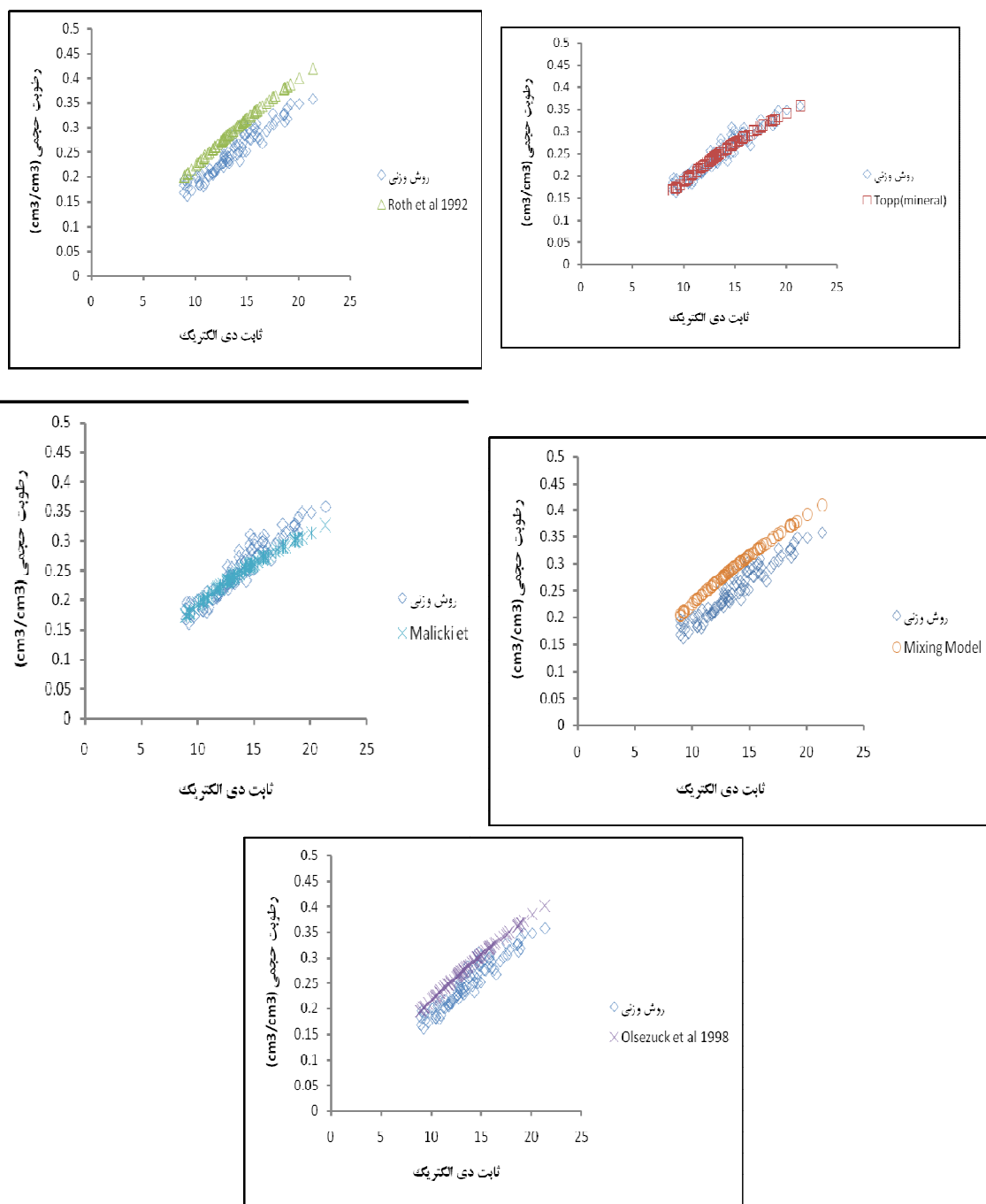
با افزایش ماده آلی در بافت‌های مختلف، مدل ترکیبی در رطوبت‌های بالاتر، رطوبت را بیشتر از روش وزنی برآورد

جدول (۲) - مقادیر RMSE و RE برای مقایسه پنجره‌های اندازه‌گیری در مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰)

پنجره اندازه‌گیری						درصد ماده آلی	بافت خاک
۴۰		۲۰		۱۰			
RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE		
۲۸/۰۶۱۱	۰/۰۶۰۲	۷/۲۶۵۹	۰/۰۲۵۲	۳/۲۲۵۶	۰/۰۱۰۷	۰/۵	سبک
۵۸/۵۲۷۰	۰/۱۰۵۷	۷/۱۹۷۶۳	۰/۰۲۹۸	۳/۳۸۴۲	۰/۰۱۰۹	۲	(لوم شنی)
۲۳/۸۶۲۲	۰/۰۵۵۱	۸/۱۲۴۷	۰/۰۳۹۶	۳/۵۲۷۴	۰/۰۱۲۳	۳/۵	
۲۳/۱۲۲۸	۰/۰۵۰۹	۷/۵۴۳۶	۰/۰۳۸۵	۳/۶۳۱۱	۰/۰۱۲۴	۵	
۱۸/۴۶۴۲	۰/۰۴۵۲	۶/۱۴۹۸	۰/۰۳۲۱	۳/۷۵۱۶	۰/۰۱۳۳	۶/۵	
۳۰/۴۱۴۳	۰/۰۶۵۴	۶/۲۱۳۷	۰/۰۲۳۵	۴/۰۷۶۲	۰/۰۱۳۴	۰/۵	متوسط
۵۹/۸۹۹۶	۰/۱۰۸۵	۸/۲۴۵۶	۰/۰۲۶۹	۴/۸۰۴۹	۰/۰۱۴۱	۲	(لوم)
۲۵/۸۹۹۳	۰/۰۵۹۹	۱۰/۶۵۳۵	۰/۰۳۸۲	۴/۸۹۱۵	۰/۰۱۵۱	۳/۵	
۲۴/۹۰۲۱	۰/۰۵۶۱	۱۱/۲۶۲۶	۰/۰۳۹۸	۵/۰۳۵۲	۰/۰۱۵۷	۵	
۱۴/۴۲۲۸	۰/۰۳۸۴	۱۱/۴۹۳۵	۰/۰۳۹۸	۵/۸۵۳۳	۰/۰۱۶۶	۶/۵	
۲۱/۵۴۸۸	۰/۰۴۷۴۸	۱۰/۲۵۴۹	۰/۰۳۸۹	۶/۱۸۹۵	۰/۰۱۷۷	۰/۵	سنگین
۱۴/۸۰۶۵	۰/۰۴۴۵۱	۱۱/۲۳۹۸	۰/۰۳۵۹	۶/۴۳۳۷	۰/۰۲۰۱	۲	(لوم رسی شنی)
۱۹/۰۱۲۲	۰/۰۴۷۳	۱۳/۶۴۲۸	۰/۰۳۱۲	۷/۱۳۵۶	۰/۰۲۱۳	۳/۵	
۱۹/۴۲۴۸	۰/۰۴۷۲۶	۱۲/۳۲۹۸	۰/۰۳۹۸	۷/۴۴۸۰	۰/۰۲۲۸	۵	
۲۶/۶۲۸۱	۰/۰۶۶۳	۱۹/۳۵۶۵	۰/۰۴۹۳	۱۳/۸۲۷۳	۰/۰۲۷۵	۶/۵	

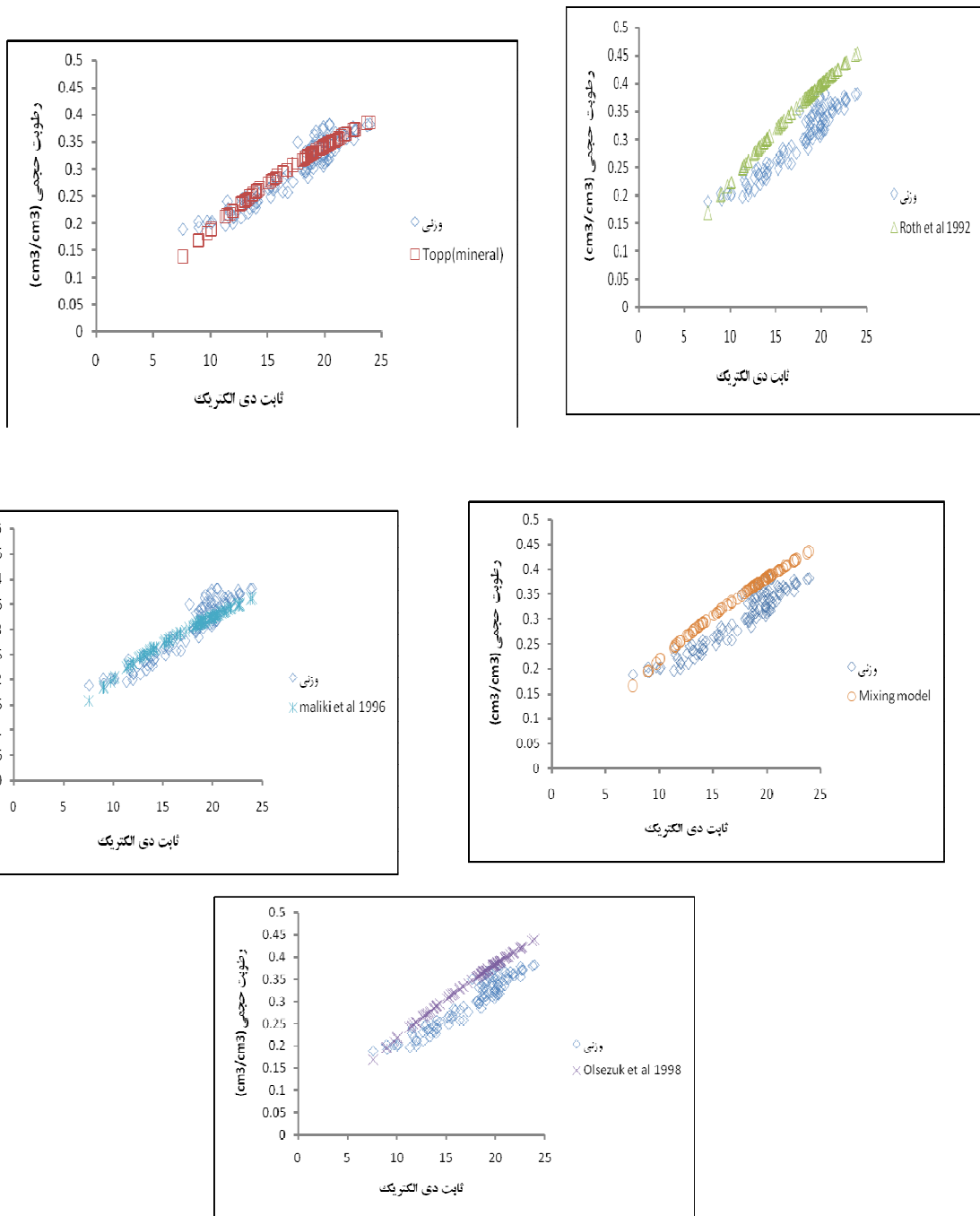


شکل (۱) - نمودار رطوبتی به دست آمده به روش وزنی و مدل‌ها به صورت تابعی از ثابت دی الکتریک در بافت سبک. اشکال a, b, c, d, e به ترتیب مقایسه روش وزنی با مدل‌های تاپ، راس، اولسزوک، مالیکی و ترکیبی است



شکل ۲- نمودار رطوبتی به دست آمده به روش وزنی و مدل‌ها به صورت تابعی از ثابت دی‌الکتریک در بافت متوسط، اشکال a, b, c, d, e به ترتیب مقایسه روش وزنی با مدل‌های تاپ، راس، اولسزوک، مالیکی و ترکیبی است





شکل ۳- نمودار رطوبتی به دست آمده به روش وزنی و مدل‌ها به صورت تابعی از ثابت دی الکتریک در بافت سنگین، اشکال a, b, c, d, e به ترتیب مقایسه روش وزنی با مدل‌های تاپ، راس، اولسزوک، مالیکی و ترکیبی است.

جدول ۳- مقادیر RMSE و RE حاصل از مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و محاسبه شده توسط مدل‌های ارائه شده در پنجره ۱۰ نانو ثانیه

مدل										درصد ماده آلی	بافت
اولسزوک (۱۹۹۸)		راس (۱۹۹۲)		مالیکی (۱۹۹۶)		ترکیبی (۱۹۹۰)		تاپ و همکاران (۱۹۸۰)			
RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE		
۵/۳۵۹۶	-/۰.۱۶۸	۹/۸۳۶۵	-/۰.۲۷	۳/۷۲۲	-/۰.۱۳۴	۶/۰.۷۳۶	-/۰.۲۳۴	۳/۲۲۵۶	-/۰.۱۰۷	۰/۵	سبک (لوم شنی)
۸/۱۰۹۹	-/۰.۱۹۷	۱۱/۲۷۲۲	-/۰.۲۹۷	۴/۱۷۰۸	-/۰.۱۴۴	۸/۵۹۰۸	-/۰.۲۴۴	۳/۳۸۴۲	-/۰.۱۰۹	۲	
۸/۲۶۵۴	-/۰.۱۲۲	۱۱/۴۸۳۳	-/۰.۳۵۳۱	۴/۲۳۸۶	-/۰.۱۴۵۱	۹/۳۰۵	-/۰.۲۴۵۱	۳/۵۲۷۴	-/۰.۱۲۳۴	۳/۵	
۸/۴۷۵	-/۰.۱۴۷	۱۲/۶۵۴۱	-/۰.۳۸	۵/۰۵۹۱	-/۰.۱۵۵۷	۱۰/۳۴۹۹	-/۰.۲۵۵۷	۳/۶۳۱۱	-/۰.۱۲۴	۵	
۹/۳۶۴۵	-/۰.۱۶۴	۱۳/۵۱۱۷	-/۰.۳۹۲	۵/۵۵۳	-/۰.۱۵۶	۱۰/۵۲۳	-/۰.۲۸۹	۳/۷۵۱۶	-/۰.۱۳۳	۶/۵	
۹/۷۷۹۵	-/۰.۲۷۳	۱۴/۰۱۵۹	-/۰.۴۰۷	۵/۹۰۷۷	-/۰.۱۸۹	۱۰/۹۳۷۱	-/۰.۲۹۴	۴/۰۷۶۳	-/۰.۱۳۴	۰/۵	متوسط (لوم)
۱۰/۱۹۹	-/۰.۲۷۵	۱۴/۷۱۶۳	-/۰.۴۲۱	۵/۹۶۲۲	-/۰.۱۹۴	۱۲/۱۵۲۴	-/۰.۳۰۹	۴/۸۰۴۹	-/۰.۱۴۱	۲	
۱۰/۸۴۸	-/۰.۲۲	۱۵/۴۲۸	-/۰.۴۳۷	۷/۰۶۲۳	-/۰.۲۰۹	۱۳/۲۲۹	-/۰.۳۱۳	۴/۸۹۱۵	-/۰.۱۵۱	۳/۵	
۱۱/۳۱۲۴	-/۰.۲۴۲	۱۶/۲۹۸	-/۰.۴۴۷	۷/۲۸۰۲	-/۰.۲۱۳	۱۳/۳۲۱	-/۰.۳۲۲	۵/۰۳۵۲	-/۰.۱۵۷	۵	
۱۱/۷۲۵	-/۰.۲۵۵	۱۶/۳۵۹	-/۰.۴۵۸	۷/۵۱۷	-/۰.۲۲۲	۱۳/۷۵۱۱	-/۰.۳۴۵	۵/۸۵۳۳	-/۰.۱۶۶	۶/۵	
۱۳/۲۹۲	-/۰.۳۹۲	۱۶/۴۷۵	-/۰.۵۰۳	۷/۹۰۵۵	-/۰.۲۴۵	۱۶/۵۲	-/۰.۵۴۷	۶/۱۸۹۵	-/۰.۱۷۷	۰/۵	سنگین (لوم شنی رسی)
۱۴/۷۴۷۵	-/۰.۳۲۹	۱۸/۲۳۳	-/۰.۵۵۱۱	۹/۲۰۷۸	-/۰.۲۴۷	۱۶/۷۶۶۲	-/۰.۵۷۵	۶/۴۳۳۷	-/۰.۲۰۱	۲	
۱۵/۸۵۷۱	-/۰.۳۹۶	۱۸/۹۸۳۱	-/۰.۶۱۱	۹/۵۶۷	-/۰.۲۷۵	۱۸/۵۸۵۵	-/۰.۵۵۳	۷/۱۳۵۶	-/۰.۲۱۳	۳/۵	
۱۸/۵۹۸	-/۰.۳۵۲	۲۳/۴۷۲	-/۰.۶۴۳	۱۳/۴۸۲	-/۰.۲۸۵۳	۱۹/۶۷۵	-/۰.۵۱۳	۷/۴۴۸	-/۰.۲۲۸	۵	
۳۲/۵۵۳۴	-/۰.۳۱۶	۳۶/۷۶۱۱	-/۰.۶۹	۱۵/۳۶۳۴	-/۰.۴۱۳	۳۵/۴۵۸۸	-/۰.۵۵۶	۱۳/۸۲۷۳	-/۰.۲۷۵	۶/۵	

جدول ۴- معادلات کالیبراسیون مدل‌ها برای برآورد رطوبت خاک در بافت سبک

R <sup>۲</sup>	معادله خط	مدل
۰/۹۸	$\theta_v = 0.189\theta_p + 0.036$	تاپ و همکاران (۱۹۸۰)
۰/۸۹	$\theta_v = 0.1815\theta_p + 0.021$	راس و همکاران (۱۹۹۲)
۰/۸۸	$\theta_v = 0.1883\theta_p + 0.047$	اولسزوک و همکاران (۱۹۹۸)
۰/۸۹	$\theta_v = 1.036\theta_p + 0.016$	مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)
۰/۸۷	$\theta_v = 0.185\theta_p + 0.021$	ترکیبی

جدول ۵- معادلات کالیبراسیون مدل‌ها برای برآورد رطوبت خاک در بافت متوسط

R <sup>۲</sup>	معادله خط	مدل
۰/۸۹	$\theta_v = 1.007\theta_p - 0.01$	تاپ و همکاران (۱۹۸۰)
۰/۸۸	$\theta_v = 0.1892\theta_p - 0.01$	راس و همکاران (۱۹۹۲)
۰/۸۷	$\theta_v = 0.948\theta_p - 0.016$	اولسزوک و همکاران (۱۹۹۸)
۰/۸۷	$\theta_v = 1.259\theta_p - 0.054$	مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)
۰/۸۶	$\theta_v = 0.985\theta_p - 0.027$	ترکیبی

جدول ۶- معادلات کالیبراسیون مدل‌ها برای برآورد رطوبت خاک در بافت سنگین

مدل	معادله خط	R <sup>۲</sup>
تاپ و همکاران (۱۹۸۰)	$\theta_v = 0.954\theta_p + 0.09$	۰/۷۸
راس و همکاران (۱۹۹۲)	$\theta_v = 0.828\theta_p + 0.05$	۰/۷۸
اولسزوک و همکاران (۱۹۹۸)	$\theta_v = 0.871\theta_p + 0.02$	۰/۷۸
مالیکی و همکاران (۱۹۹۶)	$\theta_v = 1.207\theta_p - 0.57$	۰/۷۷
ترکیبی	$\theta_v = 0.887\theta_p + 0.02$	۰/۷۷

۲- سلطانی‌محمدی ا. ۱۳۸۴. تأثیر بافت خاک روی کالیبراسیون TDR برای اندازه‌گیری رطوبت در شرایط خاک‌های خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زه‌کشی.

۳- کمالی ک. و مهدیان م. ح. ۱۳۸۴. ارزیابی عملکرد حسگرهای تدفینی ساخته شده برای دستگاه رطوبت‌سنج TDR. مجموعه مقالات فیزیک و روابط خاک، آب و گیاه.

- 4- 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.
- 5- Malicki m.A. Plagge R. and Roth C.H. 1996. Influence of matrix on TDR soil moisture readings and its elimination. Proc. of the Symp. on time domain reflectometry in environmental, Infra-structure, and Mining Applications. Evaston, IL., Bureau of Mines, 19:105-114.
- 6- Maroufpoor E. Emamgholizadeh S. Torabi H. and Behzadinasab, M. 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. Applied Science Journal. 9(16):2933-2940.
- 7- Oleszczuk R. Brandyk, T. Gnatowski T. and Szatylowicz J. 2004. Calibration of TDR for moisture determination in peat deposits. International Agrophysics Journal. 18:145-151.
- 8- Pumpanen L. and Ilvesniemi H. 2005. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. Boreal Environment Research Journal. 10:589-595.
- 9- Roth K. Schulin R., Fluhler H. and Attinger W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research Journal. 26:2267-2273.
- 10- Roth C.H. Malicki M.A. and Plagge R. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water

با توجه به معادلات پیشنهادی برای کالیبراسیون مدل‌های انتخابی، مشخص شد که میزان خطا به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. به‌طوری‌که تا قبل از انجام کالیبراسیون این میزان خطا در برآورد مقادیر واقعی رطوبت حجمی، در بافت سبک حدود ۲ درصد، در بافت متوسط ۴ درصد و در بافت سنگین ۵ درصد بوده است که با کالیبراسیون مدل‌ها میزان خطا در بافت سبک کمتر از ۱ درصد و در بافت متوسط و سنگین حدود ۳ درصد است.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در تمامی مدل‌ها و در هر سه بافت پنجره ۱۰ نانو ثانیه بیشترین دقت و پنجره ۴۰ نانو ثانیه کمترین دقت را دارد. همچنین مشخص شد که مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، مالیکی و همکاران (۱۹۹۶) و اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) در کلیه بافت‌ها با درصد‌های مختلف ماده آلی، از دقت و همبستگی بیشتری نسبت به مدل ترکیبی (۱۹۹۰) و رأس و همکاران (۱۹۹۲) برخوردار است. ضرایب رگرسیونی بین داده‌های مدل و داده‌های به‌دست آمده از روش وزنی در بافت سبک بیشترین همبستگی را دارد که با سنگین‌تر شدن بافت خاک میزان همبستگی کاهش می‌یابد و در بین مدل‌ها، بیشترین همبستگی بین داده‌ها در مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) مشاهده می‌شود.

#### 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.

- Soilmoisture. Equipment Corporation Incorporated, Santa Barbara CA, USA.
- 13- 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 Journal*. 16:574-582.
- 11- Schaap M.G. De Lange L. and Heimovaara T.J. 1996. TDR calibration of organic forest floor media. *Soil Technology Journal*. 11:205-217.
- 12- Soil Moisture Equipment Corporation. 1996. Trase system I operation instructions. content as the basis for calibration soil moisture measurements by TDR. *Soil Science Journal*. 43:1-13.