

واسنجی دستگاه TDR با استفاده از محفظه‌های مکش آب جهت اندازه‌گیری غلظت املاح در دو خاک لومی و لوم ماسهای

فریبرز عباسی

عضو هیأت علمی (استادیار) مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
(تاریخ دریافت: 86/5/15 - تاریخ تصویب: 87/4/12)

چکیده

دستگاه TDR به ابزاری مؤثر و با ارزش در علوم خاک برای اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی توده خاک (ECa) تبدیل گردیده است. لیکن واسنجی آن بخصوص برای اندازه‌گیری غلظت املاح در مقیاس بزرگ و شرایط مزرعه چندان ساده نیست. معمولاً برای اندازه‌گیری غلظت املاح توسط TDR چند سری واسنجی نیاز است تا بتوان ابتدا مقاومت ظاهری را به ECa و سپس هدایت الکتریکی توده خاک را به هدایت الکتریکی آب خاک (ECw) مرتبط نمود. در این تحقیق نحوه واسنجی پروبهای TDR برای اندازه‌گیری غلظت املاح در لایسیمترهای بزرگ حاوی دو نمونه خاک لومی و لوم ماسهای دست نخورده بررسی و پدیده خاصی تحت عنوان پدیده پس ماند املاح که ممکن است هنگام واسنجی پروب های TDR برای اندازه‌گیری غلظت املاح اتفاق افتد، معرفی گردیده است. لایسیمترها دارای حجم تقریبی 0/5 متر مکعب و به وسایل اندازه‌گیری مختلف نظیر TDR برای اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی خاک، حسگرهای اندازه‌گیری درجه حرارت، محفظه‌های مکش برای تهیه نمونه آب خاک، باران سنج برای اندازه‌گیری شدت جریان خروجی و EC متر نیای تعیین EC آب خروجی از لایسیمترها، مجهز گردیدند. پس از آشنایی لایسیمترها، دو سری آزمایش برای واسنجی پروب‌ها انجام شد. ابتدا پروبها خارج از خاک در شش سری محلول KCl در بازه صفر تا 5 ds/m واسنجی گردیدند. در این واسنجی ثابت پروبها (Kp) و مقاومت کابل و اتصالات (Zcable) تعیین شدند. سپس، با انجام یک واسنجی دیگر در خاک، بین مقادیر ECa اندازه‌گیری شده بوسیله TDR و مقادیر ECw که بوسیله محفظه‌های مکش نمونه برداری شده بودند، ارتباط برقرار گردید. بدین منظور، یک آزمایش انتقال املاح در شرایط غیر اشباع ولی تقریباً پایدار رطوبتی بر روی هر یک از لایسیمترها اجراء گردید. مقادیر ثابت پروبها (Kp) و مقاومت کابل و اتصالات مربوطه (Zcable) از یک پروب تا پروب دیگر متفاوت بود. مقادیر Kp بین 1/009 تا 1/211 با ضریب تغییرات 25/2 درصد و مقادیر Zcable بین 0/009 تا 1/122 با ضریب تغییرات 61/7 درصد تغییر نمودند. هنگام ترسیم رابطه بین ECa و ECw رفتار خاصی شبیه پدیده پس ماند رطوبتی بین مقادیر اندازه‌گیری شده بوسیله TDR و محفظه‌های مکش مشاهده گردید. این پدیده به وضوح در هر دو خاک مورد مطالعه و در همه پروبها مشاهده گردید. در این مقاله، دلایل این پدیده بحث و راه حل واسنجی پروبها در چنین شرایطی ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: واسنجی TDR، محفظه‌های مکش، غلظت املاح، پسماند.

مقدمه

دستگاه TDR دارای استفاده وسیع در اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی توده خاک 1 (EC_a) بوده و به ابزاری مؤثر و با ارزش در علوم خاک تبدیل گردیده است. این دستگاه اولین بار توسط وارد و همکاران 2 (1994) برای اندازه‌گیری غلظت املاح در محیط‌های سه بعدی پیشنهاد گردید. دارای محاسن ویژه از جمله اندازه‌گیری توأمان رطوبت و غلظت املاح با کمترین تخریب ساختمان خاک است. لیکن واسنجی آن بخصوص برای اندازه‌گیری غلظت املاح در مقیاس بزرگ چندان ساده نیست. معمولاً برای اندازه‌گیری غلظت املاح توسط TDR چند سری واسنجی برای پروب‌های آن نیاز است تا بتوان ابتدا مقاومت ظاهری 3 (Z) را به EC_a و سپس آن را به هدایت الکتریکی آب خاک 4 (EC_w) و در ادامه EC_w را به غلظت املاح باقیمانده در خاک 5 (C) مرتبط نمود.

اساس کار TDR براساس انتشار امواج الکترومغناطیسی به داخل کابلی است که به چند قطعه میله استیل هادی امواج الکترومغناطیسی وصل است. امواج پس از عبور از میله ها و انتشار در محیط متخلخل اطراف خود مجدداً به سیستم بر می گردند. زمان رفت و برگشت امواج به ثابت دی الکتریک و کاهش امواج به هدایت الکتریکی خاک (EC) مرتبط می‌شود. محققین ابتدا برای اندازه گیری EC با استفاده از TDR از اولین مقدار کمی بازتاب امواج الکترومغناطیسی استفاده نمودند (3، 17 و 26). در مطالعات بعدی از اولین بازتاب پس از رسیدن امواج به حالت پایدار استفاده گردید (24 و 26). EC خاک، طول و مقاومت کابل از عوامل مهم در زمان رسیدن به شرایط پایدار است (9). طول و مقاومت بیشتر کابل موجب می‌شود که امواج الکترومغناطیسی برگشتی از محیط متخلخل دیرتر به شرایط پایدار برسند. عمده مطالعات قبلی از فرضیاتی همچون صرف نظر کردن از مقاومت کابل و انتشار دی‌الکتریک خاک رنج می‌برند. نادیده گرفتن طول، مقاومت

کابل و سایر اتصالات موجب می‌شود که TDR هدایت الکتریکی را کمتر برآورد نماید (6، 9، 13). اخیراً، لین و همکاران (2007) نشان دادند که زمان قرائت بازتاب امواج نقش مهمی در دقت TDR در اندازه‌گیری EC خاک دارد. سه روش مرسوم برای واسنجی پروب‌های TDR وجود دارد. مرسوم ترین روش، واسنجی پروب‌ها در یک آزمایش جابجایی اختلاط پذیر 6 با تزریق پیوسته 7 املاح تا رسیدن به شرایط پایدار املاح است. این روش بوسیله رودز (1981) و رودز و همکاران (1989) برای برقراری ارتباط بین EC_a - EC_w پیشنهاد شد. علی رغم دقت بالا، عیب اصلی این روش وقتگیر بودن و هزینه نسبتاً زیاد آن برای رسیدن به شرایط پایدار است (مالانتز و همکاران، 1994). روش دیگر، واسنجی پروب‌های TDR در آزمایش جابجایی اختلاط پذیر با تزریق یک پالس کوتاه 8 از نمک مورد نظر است (10). روش سوم نیز تعیین رابطه مستقل بین مقاومت ظاهری (Z) و غلظت باقیمانده املاح در خاک است. نتایج هر سه روش بخصوص در لایه های سطحی برای خاک های همگن ماسه ای رضایت بخش بوده است (8، 18، 22). لیکن در خاک‌های غیرهمگن به دلیل وجود خلل و فرج درشت (ماکروپورها) و نواحی با رطوبت ساکن 9 و یا هدایت هیدرولیکی پایین، معمولاً واسنجی پروب‌های TDR چندان ساده نیست (10).

واسنجی پروب‌های TDR به عوامل مختلفی از جمله بافت خاک، مقدار رس، رطوبت خاک، هدایت الکتریکی (شوری) و درجه حرارت خاک بستگی دارد. دقت اندازه گیری TDR در خاک های ریز بافت و شور چندان رضایت بخش گزارش نشده است (2). استفاده از پروب‌های کوتاه و یا پوششدار 10 کارایی آنها را در خاک های با شوری بالا افزایش می‌دهد (12 و 23). وارد و همکاران (1994) یک رابطه خطی بین Z و غلظت املاح (C) در رطوبت‌های مختلف پیشنهاد نمودند. هر چند رابطه مذکور در رطوبت‌های بالا و غلظت‌های پایین قدری رفتار غیرخطی از

6. Miscible displacement
7. Continuous
8. Short pulse
9. Immobile
10. Coated

1. Bulk soil electrical conductivity
2. Ward et al.
3. Impedance
4. Soil water electrical conductivity
5. Residual soil solute concentration

خود نشان داد. آنها یک رابطه خطی نیز بین غلظت املاح باقی مانده در خاک (C) و هدایت الکتریکی توده خاک (EC_a) گزارش نمودند.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی مشکلات واسنجی پروبهای TDR برای اندازه‌گیری غلظت املاح در خاک است. این مشکلات در لایسیمترهای بزرگ، حاوی دو نمونه خاک لومی و لوم ماسه‌ای دست نخورده ارائه و پدیده خاصی تحت عنوان پدیده پس ماند املاح که ممکن است هنگام واسنجی پروب های TDR برای اندازه گیری غلظت املاح اتفاق افتد، معرفی و در ادامه نیز نحوه واسنجی پروب ها در چنین شرایطی بحث شده است.

رطوبت خاک در لایسیمترهای مورد مطالعه اندک بود. تغییرات رطوبت خاک در اعماق و زمانهای مختلف کمتر از 5 درصد حجمی بود.

مقادیر EC_w با استفاده از رابطه $C = \beta EC_w$ به غلظت املاح (C بر حسب میلی گرم در لیتر) تبدیل شدند. β یک ثابت تجربی است که در این تحقیق برای یون کلر در نمک KCl در آزمایشگاه برابر 260/89 تعیین شد.

در این تحقیق، ثابت دی‌الکتریک (K_a) که بوسیله TDR اندازه‌گیری شده بود، با استفاده از رابطه تاپ و همکاران (1980) به رطوبت حجمی خاک تبدیل گردید. با توجه به اینکه درجه حرارت خاک طی مدت زمان آزمایش ها بیشتر از 10 درجه سانتی گراد اندازه گیری شده بود، تاثیر درجه حرارت روی مقادیر K_a ناچیز در نظر گرفته شد.

مطالعات تاپ و همکاران (1980) و همین طور زاگوسکی و همکاران (1982) نشان داد تاثیر درجه حرارت روی K_a زمانی که درجه حرارت خاک بیشتر از 5 درجه سانتی گراد باشد، ناچیز است.

شش لایسیمتر استوانه‌های شکل حاوی خاک دست نخورده (هریک دارای حجم تقریبی 0/5 مترمکعب) از دو نوع خاک در منطقه Louvain la Neuve کشور بلژیک تهیه شدند. سه لایسیمتر هر یک دارای 79 سانتی متر قطر و 105 سانتی متر ارتفاع از یک خاک لومی استخراج گردیدند. در ادامه از این لایسیمترها به عنوان لایسیمترهای لومی (L1, L2, L3) نام برده می‌شود. سه لایسیمتر دیگر به قطر 79 سانتی متر و ارتفاع 100 سانتی متر از یک خاک لوم ماسه‌ای استخراج که از این پس به عنوان لایسیمترهای لوم ماسه‌ای (P1, P2, P3) نام برده میشوند. این لایسیمترها با روش شرح داده شده بوسیله وان کلاستر و همکاران (1995) استخراج گردیدند. نمونه‌ای از لایسیمترهای تجهیز شده به وسایل مختلف اندازه‌گیری در شکل (1) نشان داده شده است. برخی مشخصات خاک لایسیمترهای مورد مطالعه در جدول (1) ارائه شده است.

هر یک از لایسیمترها به وسایل اندازه‌گیری مختلف نظیر TDR (12) پروب برای هر کدام از لایسیمترها TDR_1 تا TDR_{12} برای اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی توده خاک، حسگرهای اندازه‌گیری درجه حرارت خاک

در دستگاه TDR، مقاومت ظاهری (Z) با استفاده از رابطه ذیل به هدایت الکتریکی توده خاک (EC_a) تبدیل میشود (17):

مواد و روش‌ها

در آن، K_p ثابت پروب (L^{-1})، Z_{cable} مقاومت کابل و اتصالات مربوطه (اهم) و f_T فاکتور تصحیح درجه حرارت (-) است که از رابطه فرانسون¹ (1985) تعیین می‌گردد. رابطه فرانسون (1985) به‌صورت زیر است:

$$EC_a = \frac{K_p}{Z - Z_{cable}} f_T \quad (1)$$

که در آن، K_p ثابت پروب (L^{-1})، Z_{cable} مقاومت کابل و اتصالات مربوطه (اهم) و f_T فاکتور تصحیح درجه حرارت (-) است که از رابطه فرانسون¹ (1985) تعیین می‌گردد. رابطه فرانسون (1985) به‌صورت زیر است:

$$f_T = \frac{1}{1 + \alpha(T - 25)} \quad (2)$$

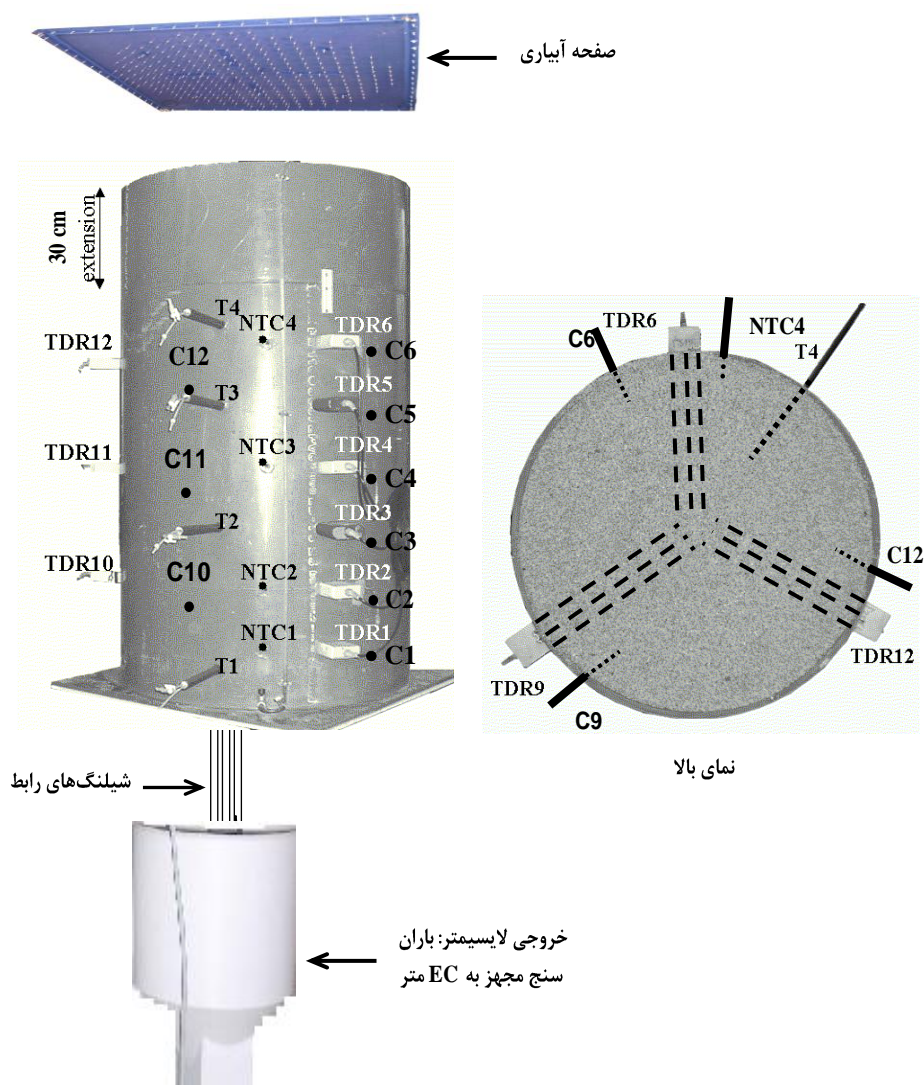
مدلهای خطی و غیرخطی زیادی برای ارتباط بین EC_a و هدایت الکتریکی محلول آب خاک (EC_w) و همین طور ارتباط بین EC_a و رطوبت خاک (θ) در منابع وجود دارد که هر کدام دارای معایب و محاسن خاص خود میباشد. یکی از روابط خطی معروف، به صورت ذیل است (20):

$$EC_a = a + bEC_w \quad (3)$$

a و b پارامترهای تجربی است که بطور خطی با رطوبت خاک ارتباط دارند (وگلر و همکاران، 1996). در این تحقیق، مقادیر a و b ثابت در نظر گرفته شد. زیرا تغییرات

جدول 1- برخی مشخصات خاک لایسیمترهای مورد مطالعه

pH	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	مواد آلی (%)	افق	بافت			کلاس بافت	عمق (cm)	لایسیمتر
				ماسه	سیلت	رس			
6/1	1/46	0/68	AP ₁	10/5	75/5	14	لومی	0-10	لومی
6/1	1/51	0/31	AP ₂	12	73	15	لومی	10-30	
6/1	1/51	0/31	Bt ₁	9	73	18	لومی	30-50	
6/1	1/51	0/28	Bt ₂	9/5	72	18/5	لومی	50-100	
5/3	1/50	2/07	AP	80	17	4	لوم ماسه‌ای	0-40	لوم ماسه‌ای
5/1	1/50	0/45	AC	76	19	5	لوم ماسه‌ای	40-60	
5/0	1/50	0/24	C	74	23	4	لوم ماسه‌ای	60-100	



شکل 1- نمونه‌ای از لایسیمترهای تجهیز شده به وسایل اندازه‌گیری (C) محفظه مکش، TDR پروب دستگاه TDR و NTC حسگر اندازه‌گیری درجه حرارت خاک است)

در 6 دستگاه لایسیمتر مورد مطالعه انجام شد. ابتدا، پروبها خارج از نیمرخ خاک در شش محلول KCl در بازه صفر تا 5 dS/m واسنجی گردیدند. بدین ترتیب که با قرار دادن هر یک از پروبها در محلولهای با هدایت الکتریکی (EC_a) مشخص، مقاومت ظاهری (Z) آنها با دستگاه TDR قرائت گردید. با برازش رابطه (I) به دادههای هر یک از پروبها، ثابت پروبها (K_p) و مقاومت کابل و اتصالات (Z_{cable}) تعیین شدند. سپس، برای انجام یک واسنجی دیگر در نیمرخ خاک، بین مقادیر EC_a محاسبه شده (معادله 1) از TDR و مقادیر EC_w که بوسیله محفظه های مکش نمونه برداری شده بودند، ارتباط برقرار گردید. بدین منظور، یک آزمایش آبشویی در شرایط غیراشباع ولی تقریباً پایدار رطوبتی بر روی هر یک از لایسیمترها اجراء گردید. در این آزمایش محلول KCl با هدایت الکتریکی 10 dS/m به مدت 32 تا 48 ساعت به صورت پالس به لایسیمترها تزریق گردید. در این مدت مقاومت ظاهری (Z) هر 15 دقیقه در عمقهای مختلف به وسیله دستگاه TDR و نمونه های آب خاک در همان عمقها به وسیله محفظه های مکش برداشت گردید. پس از اتمام تزریق پالس، مجدداً جریان آب به لایسیمترها با محلول 1 dS/m برقرار و نمونه گیری محلول آب خاک تا چند روز ادامه یافت. هدایت الکتریکی نمونه های آب خاک (EC_w) بلافاصله در آزمایشگاه بوسیله یک دستگاه EC متر واسنجی شده قرائت گردید. مقادیر مقاومت ظاهری پروبها نیز با استفاده از رابطه (I) که در مرحله قبلی واسنجی شده بود، به مقادیر EC_a تبدیل و سپس با برازش رابطه (3) به داده های EC_a-EC_w مقادیر پارامترهای تجربی a و b تعیین گردید.

نتایج و بحث

مقادیر ثابت پروبها (K_p) و مقاومت کابل و اتصالات مربوطه (Z_{cable}) از یک پروب تا پروب دیگر متفاوت بود. مقادیر K_p بین 1/009 تا 1/211 با ضریب تغییرات 25/2 درصد و مقادیر Z_{cable} بین 0/009 تا 1/122 با ضریب تغییرات 61/7 درصد تغییر نمودند. تغییرات بیشتر در مقادیر Z_{cable} علی رغم طول یکسان کابل برای همه پروبها

(NTC_1 تا NTC_4)، کپسول های مکش برای تهیه نمونه آب خاک (C_1 تا C_{12})، تانسیمتر برای اندازه گیری مکش ماتریک خاک (T_1 تا T_4)، باران سنج برای اندازه گیری شدت جریان خروجی و EC متر برای تعیین EC آب خروجی از لایسیمترها، مجهز گردیدند (شکل 1). پروب های دستگاه TDR در سه ردیف با فواصل 120 درجه در اعماق مختلف به طور افقی در لایسیمترها نصب شدند. 6 پروب در یک ردیف و در اعماق 10، 25، 40، 55، 70 و 85 سانتی متر و دو ردیف دیگر هر کدام با سه پروب در اعماق 10، 40 و 70 سانتیمتر (مجموعاً 12 پروب در هر لایسیمتر) نصب گردید (شکل 1). پروبها از نوع سه شاخه استیل، فواصل شاخه 2/5 سانتی با طول 42/5 سانتی متر و قطر 0/5 سانتیمتر بودند. محفظه های مکش به فواصل 10 سانتیمتر از پروب های TDR و در همان عمق ها نصب شدند. محفظه های مکش هنگام آزمایشها به یک پمپ خلاء متصل و نمونه های آب خاک در مکش 800 سانتیمتر جمع آوری شدند. در برخی از محفظه های مکش بخصوص در لایسیمترهای لوم شنی امکان تهیه عصاره آب خاک میسر نشد. برای توزیع یکنواخت جریان آب ورودی به لایسیمترها از یک مخزن بارانساز استفاده گردید (شکل 1). این وسیله شامل یک مخزن مکعبی به ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $80 \times 80 \times 1$ سانتی متر بود. در قسمت تحتانی مخزن 280 سوزن پزشکی به قطر 0/5 میلیمتر در شبکه ای 5 سانتی تعبیه شدند. قسمت فوقانی مخزن نیز با استفاده از شیلنگ رابط به یک پمپ کوچک متصل گردید. بدین ترتیب هنگام انجام آزمایشها با تنظیم پمپ برای یک شدت جریان ورودی ثابت، آب بطور یکنواخت توسط سوزنها از قسمت تحتانی مخزن روی سطح لایسیمترها پخش گردید. جزئیات بیشتر در خصوص نحوه تهیه و تجهیز لایسیمترها بوسیله عباسی و همکاران (2006) ارائه گردیده است.

پس از آبشویی همه لایسیمترها با محلول 1 dS/m کلرید پتاسیم و پس از رسیدن به شرایط رطوبتی و آبشویی پایدار، دو سری آزمایش برای واسنجی 72 پروب نصب شده

3) (متر) به خاطر آن بود که Multiplexer های مختلف هنگام ترسیم رابطه بین EC_w و EC_a برای یک پروب معین نصب شده در عمق معین، انتظار یک رابطه خطی بین آن دو می رفت. لیکن رفتار خاصی شبیه پدیده پسماند رطوبتی بین مقادیر محاسبه شده از TDR و محفظه‌های مکش مشاهده گردید (شکل 2). در طول مدت اعمال پالس کلرید کلسیم، با غلظت مشخص به لایسیمترها و اندازه‌گیری EC_w و EC_a در اعماق مختلف با TDR و محفظه‌های مکش، غلظت املاح از مقدار اولیه به تدریج افزایش و پس از قطع پالس ورودی غلظت املاح مجدداً شروع به کاهش می‌نماید. بدیهی است که به ازای مقادیر یکسان EC_a روی بال صعودی و نزولی منحنی رخنه، انتظار مقادیر مشابه نیز برای EC_w می‌رفت که چنین نشد (بالاهای صعودی و نزولی روی شکل 2 نشان داده شده‌اند). لذا، در این مقاله از این پدیده تحت عنوان پدیده پسماند املاح نام برده شده است. این پدیده به وضوح در هر دو خاک مورد مطالعه و در همه پروبها با درجات متفاوت مشاهده گردید. برای نمونه، فقط نتایج یکی از لایسیمترهای خاک لومی (L_2) در شکل (2) نشان داده شده است. قرائت پروبهای دستگاه TDR واکنش سریعتری نسبت به بال صعودی¹ منحنی رخنه² در مقایسه با داده‌های محفظه‌های مکش داشتند. اختلاف بین حجم خاک دیده شده با پروبهای TDR و محفظه‌های مکش، متفاوت بودن زمان عکس‌العمل آن دو به تغییر غلظت املاح و همین‌طور تفاوت بین ماهیت مقادیر غلظت محاسبه شده با TDR و محلولهای تهیه شده بوسیله محفظه‌های مکش از دلایل اصلی وقوع این پدیده است. حجم نمونه خاک که پروب TDR با توجه به مشخصات آن EC را اندازه‌گیری میکند حدود 800 سانتیمتر مکعب و در محفظه‌های مکش به مراتب کمتر است. غلظت های اندازه‌گیری شده بوسیله TDR معرف غلظت باقی مانده املاح در خاک است در حالی که غلظت های تعیین شده از روی نمونه محلولهای خارج شده بوسیله محفظه‌های مکش

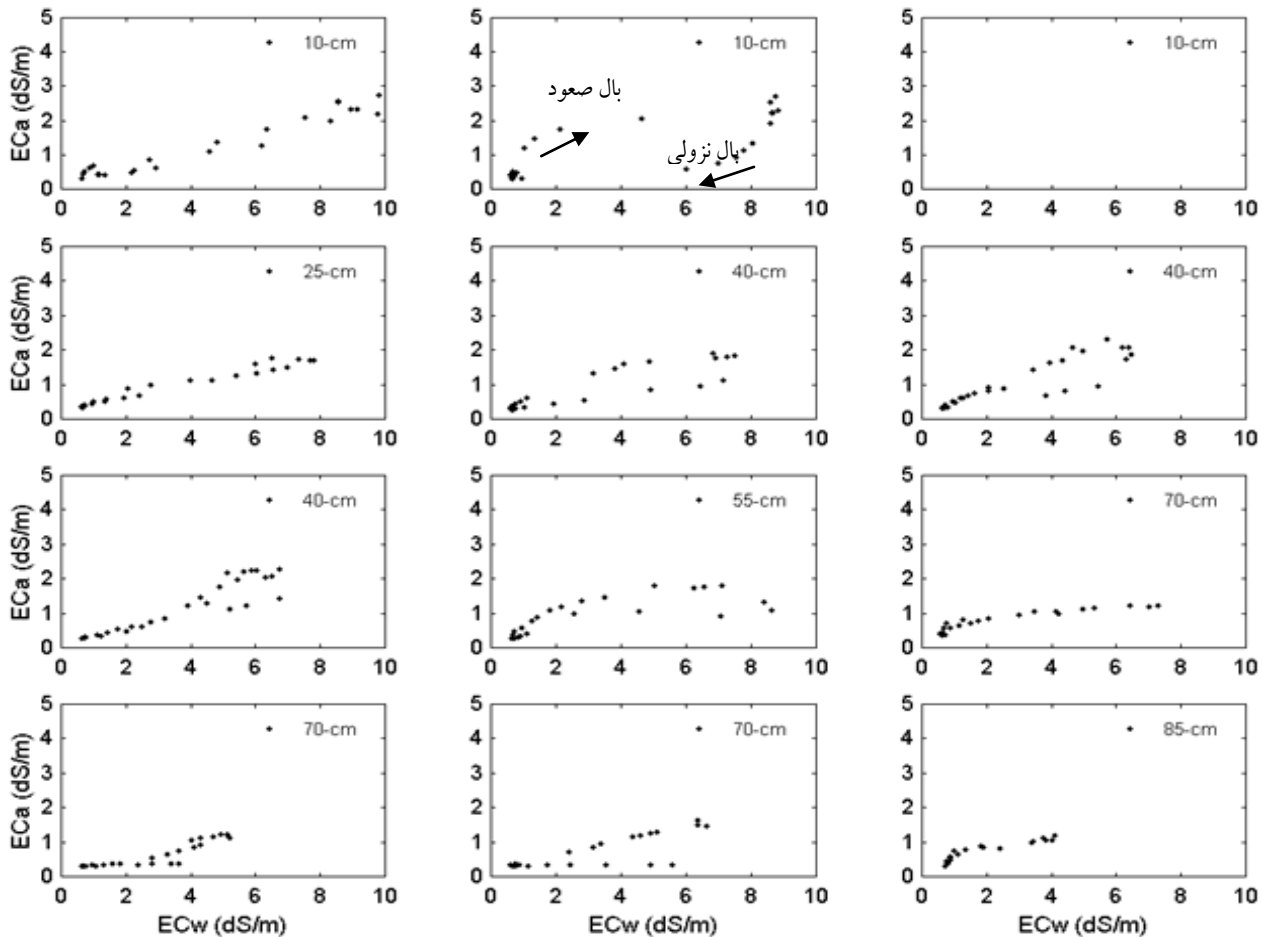
مقاومت‌های متفاوتی را ایجاد نمودند. از نوع غلظتهای شدت جریان³ میباشند (7). TDR غلظت توأم املاح را در نواحی ساکن⁴ و متحرک⁵ اندازه‌گیری می‌نماید. در صورتی که غلظت‌های مربوط به محفظه‌های مکش عمدتاً معرف نواحی متحرک هستند. علیرغم مطالعات نسبتاً زیاد در خصوص واسنجی پروبهای TDR برای اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی، این پدیده خاص در منابع قبلی گزارش نشده است. به دلیل مشاهده پدیده ذکر شده، امکان این که بتوان یک مدل منحصر به فرد را بین داده‌های EC_w و EC_a برازش داد، وجود نداشت. در حالت تعادل بین غلظت املاح در نواحی ساکن و متحرک، مقادیر غلظت های اندازه‌گیری شده بوسیله TDR به سمت مقادیر نمونه‌برداری شده بوسیله محفظه‌های مکش همگرا می‌شوند (6). لذا، در این تحقیق برای واسنجی پروبها و غلبه بر پدیده یاد شده فقط از داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط تعادل و یا نزدیک به تعادل استفاده گردید. از آنجائی که حالت تعادل بخصوص در زمان‌های اولیه پس از تزریق پالس در نیمرخ خاک برقرار نبوده و تاثیر زیادی روی واسنجی پروبها خواهد داشت، لذا، در بررسیهای بعدی از این دادهها صرف نظر و فقط داده‌های حالت تعادل و یا نزدیک شرایط تعادل منظور و مدل خطی رابطه (3) به داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد.

برای خاک لومی یک رابطه و برای خاک لوم ماسه‌ای دو رابطه برای اعماق 0-30 و 100-30 سانتیمتر پیشنهاد گردید (شکل 3). مقادیر a و b برای خاک لومی به ترتیب 0/161 و 0/224 با ضریب تبیین $R^2 = 0/935$ بدست آمد. در خاک لوم ماسه‌ای مقادیر $a = 0/135$ و $b = 0/301$ با $R^2 = 0/977$ برای لایه اول و $a = 0/065$ و $b = 0/191$ با $R^2 = 0/973$ برای لایه دوم تعیین گردیدند. حدود اطمینان 95 درصد برای خاک لومی نسبتاً کوچک لیکن برای خاک لوم ماسه‌ای بخصوص برای ضریب a قدری بزرگتر بود. این

3. Flux concentration
4. Immobile
5. Mobile

1. Rising limb
2. Breakthrough curve

بدان دلیل است که خاک لومی قدری همگن بوده و مدل خطی وگلر و همکاران (1996) بیشتر برای خاکهای همگن پیشنهاد شده است (4 و 20).

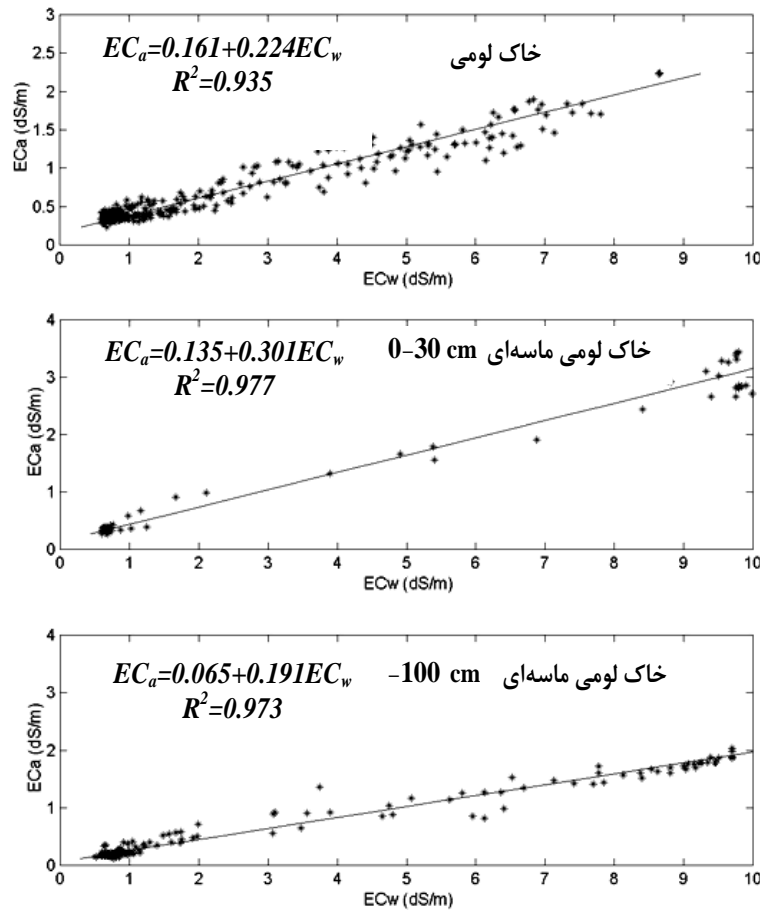


شکل 2- رابطه بین هدایت الکتریکی توده خاک (EC_a) محاسبه شده از TDR و هدایت الکتریکی محلول آب خاک (EC_w) نمونه‌گیری شده بوسیله محفظه‌های مکش در 12 نمونه از پروب های لایسیمتر L2. از یکی از محفظه‌های مکش نصب شده در عمق 10 سانتیمتری نمونه‌گیری آب خاک میسر نشد.

در یک آزمایش پله ای¹ غلظت محلول ورودی کلرید پتاسیم به 1 dS/m افزایش یافت. از داده های این آزمایش برای صحت سنجی پروب‌ها در لایسیمترهای لومی استفاده گردید. انتظار میرفت که در بخش ابتدا و انتهای منحنی رخنه مربوط به این آزمایش (شکل 4)، غلظت املاح محلول (EC_w) به ترتیب 0/5 و 1 dS/m باشد. همانطور که از شکل 4 ملاحظه می‌شود در عمده پروبها غلظت بخش ابتدایی و انتهای منحنی رخته دارای چنین شرایطی است.

دقت واسنجی پروبها برای چند نقطه از منحنی رخنه با EC_w مشخص صحت سنجی شد. بدین ترتیب که برای صحت‌سنجی پروب‌ها از داده‌هایی غیر از داده‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی استفاده گردید. در لایسیمترها دو آزمایش دیگر با محلول کلرید پتاسیم (علاوه بر آزمایش واسنجی پروبها) اجراء گردید. از یکی از این آزمایش‌ها برای صحت سنجی استفاده گردید. در لایسیمتر های لومی (L1, L2, L3) پس از آبخویی لایسیمترها با محلول dS/m 0/5 کلرید پتاسیم و بعد از رسیدن به شرایط پایدار آبخویی،

در لایسیمترهای لوم ماسهای (P1, P2, P3) نیز از آبشویی با کلرید پتاسیم برای صحت سنجی استفاده گردید. برای این منظور در یک آزمایش که در آن کلرید پتاسیم به صورت پالس¹ با غلظت 10 dS/m بمدت 24 ساعت تزریق شده بود، استفاده بعمل آمد.



شکل 3- رابطه بین هدایت الکتریکی توده خاک (EC_a) اندازه‌گیری شده با TDR و هدایت الکتریکی محلول آب خاک (EC_w) برای لایسیمترهای (a) لومی، (b) لوم ماسه‌ای عمق 0-30 سانتی‌متر و (c) لوم ماسه‌ای عمق 100-30 سانتی‌متر.

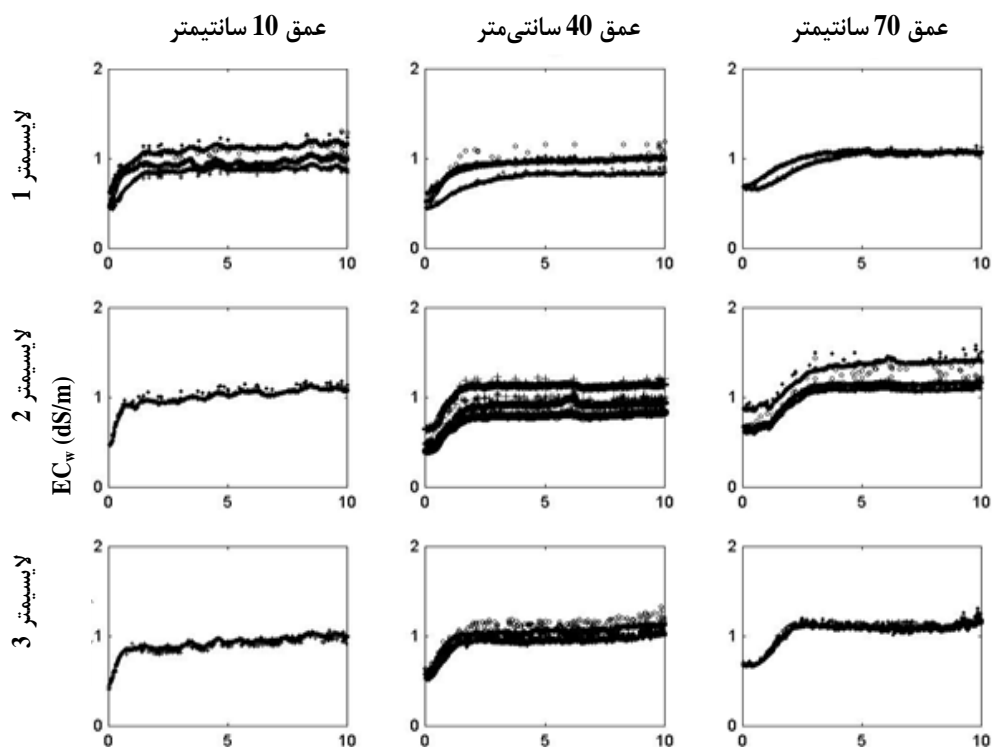
پروپ‌ها در خاک مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار هستند.

نتیجه‌گیری

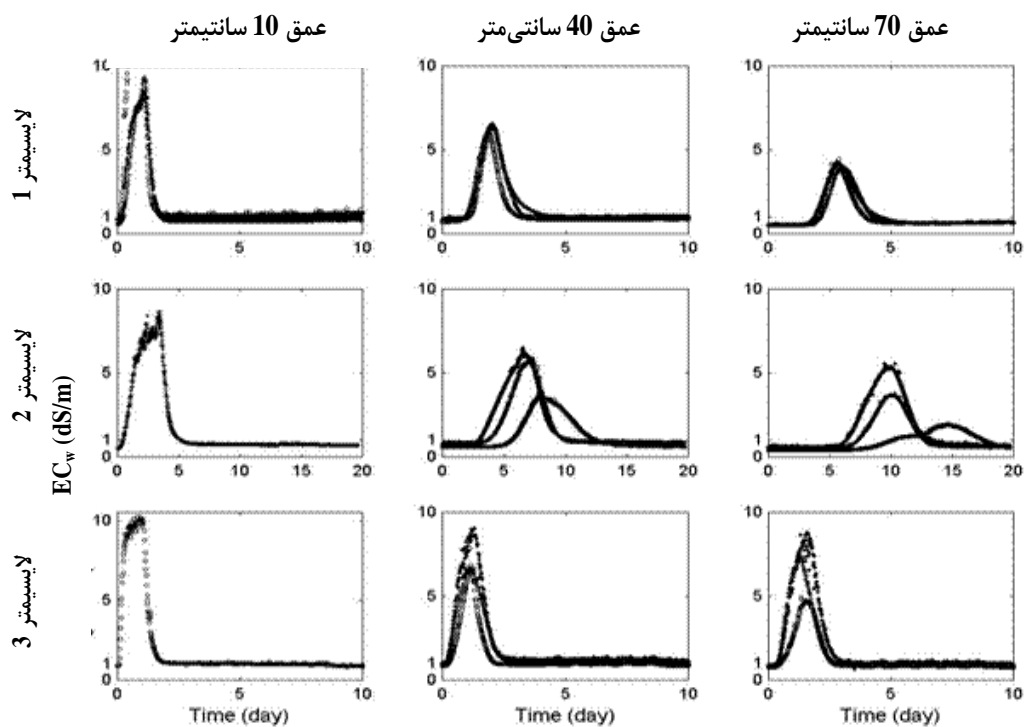
در این مقاله، نحوه واسنجی پروپ‌های TDR با استفاده از محفظه‌های مکش در لایسیمترهای بزرگ حاوی دو نمونه خاک لومی و لوم ماسه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت املاح و دشواریهای آن بحث گردید. برای اندازه‌گیری غلظت املاح توسط TDR سه سری واسنجی نیاز است تا بتوان غلظت املاح را در خاک برآورد نمود. بخشی از واسنجی خارج از نیمرخ خاک و در محلولهای با غلظت مشخص برای تعیین مشخصات پروپ‌ها و بخش دیگر در نیمرخ خاک برای تعیین رابطه بین مقاومت ظاهری-هدایت الکتریکی توده خاک (EC_a) و هدایت الکتریکی محلول آب خاک (EC_w) انجام میشود.

در پروپ‌های لایه سطحی (عمق 10 سانتیمتر) این لایسیمترها انتظار میرفت که مدت کوتاهی پس از تزریق پالس به لایسیمترها، غلظت املاح محلول به 10 dS/m برسد که چنین شرایطی در اکثر پروپ‌های لایه سطحی برقرار بود. پس از قطع پالس ورودی، آبشویی لایسیمترها با محلول 1 dS/m کلرید پتاسیم ادامه یافت. پس از رسیدن به شرایط تقریباً پایدار آبشویی، غلظت املاح محلول خاک به مقدار ورودی کاهش می‌یابد. چنین وضعیتی نیز در منحنی رخنه همه پروپ‌ها و در همه اعماق مشاهده می‌شود (شکل 5). کاهش نقطه اوج منحنی رخنه در لایه‌های زیرین به خاطر فرایند انتشار¹ و پراکندگی² در نیمرخ خاک است. علی‌رغم، کمبود نقاط اندازه‌گیری برای صحت سنجی پروپ‌ها، به نظر می‌رسد که روابط ارائه شده برای واسنجی

1. Dispersion
2. Diffusion



شکل 4- مقادیر پیش‌بینی شده هدایت الکتریکی محلول آب خاک از طریق TDR با استفاده از معادله واسنجی شده بین EC_w و EC_a در اعماق مختلف لایسیتراهی لومی (توجه شود که برخی از سه پروب نصب شده در سه عمق مشابه در حین آزمایش کار نمی‌کردند)



شکل 5- مقادیر پیش‌بینی شده هدایت الکتریکی محلول آب خاک از طریق TDR با استفاده از معادله واسنجی شده بین EC_a و EC_w در اعماق مختلف لایسیتراهی لوم ماسهای (توجه شود که برخی از سه پروب نصب شده در سه عمق مشابه در حین آزمایش کار نمی‌کردند)

نمونه‌های تهیه شده بوسیله محفظه های مکش مرتبط گردید. در شرایط تعادل مقادیر غلظت های اندازه گیری شده بوسیله TDR به سمت مقادیر نمونه برداری شده بوسیله محفظه‌های مکش همگرا میشوند. لذا برای غلبه بر پدیده ذکر شده و واسنجی پروپ های TDR با دقت قابل قبول، از داده‌های اندازه گیری شده در شرایط تعادل و با نزدیک به حالت تعادل استفاده و پروپ ها واسنجی گردیدند. برای این منظور روابط خطی بین EC_w و EC_a برازش داده شد. نتایج نشان داد که روابط پیشنهادی با دقت قابل قبولی غلظت املاح در نیمرخ خاک را برآورد می‌نماید.

EC_a با استفاده از TDR اندازه‌گیری و EC_w با کمک محفظه‌های مکش نمونه برداری و بوسیله یک دستگاه EC متر واسنجی شده در آزمایشگاه تعیین میشود. در این تحقیق، هنگام تعیین رابطه بین EC_w و EC_a رفتار خاصی تحت عنوان پدیده پسماند املاح مشاهده گردید. این پدیده در هر دو خاک مورد مطالعه و در همه پروپ ها با درجات مختلف مشاهده گردید. دلایل این پدیده به اختلاف حجم اشغال شده بین پروپهای TDR و حجم خاکی که بوسیله محفظه‌های مکش عصاره‌گیری میشود، متفاوت بودن زمان عکس العمل آن دو به تغییر غلظت املاح و تفاوت بین ماهیت غلظت محاسبه شده با TDR و

REFERENCES

1. Abbasi, F., M. Javaux, M. Vanclooster, J. Feyen, G. Wyseure, & G. Nziguheba, 2006. Experimental study of water flow and sulphate transport at monolith scale. *Agric. Water Management*, 79(1): 93-112.
2. Chandler, D.G., M. Seyfried, M. Murdock, & J.P. McNamara. 2004. Field calibration of water content reflectometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1501-1507.
3. Dalton, F. N., W.N. Herkelrath, D.S. Rawlins, & J.D. Rhoades, 1984. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224:989-990.
4. Ferre, P.A., J.D. Redman, D.L. Rudolph, & R.G. Kachanoski, 1998. The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand. *Water Resour. Res.*, 32: 271-279.
5. Franson, M.A.H., 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th ed. Am. Public Health Assoc., Washington, DC.
6. Heimovaara, T.J., A.G. Focke, W. Bouten, & J.M. Verstraeten, 1995. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 689-698.
7. Jury, W.A. & K.Roth. 1990. Transfer function and solute movement through soil. Birkhauser Verlag, Basel, 226.
8. Kachanoski, R.G., E. Pringle, & A. Ward. 1992. Field measurement of solute travel time using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:47-52.
9. Lin, C.P., C.C. Chung, & S.H. Tang, 2007. Accurate time domain reflectometry measurement of electrical conductivity accounting for cable resistance and recording time. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74(4):
10. Mallants, D., M. Vanclooster, M. Meddahi, & J. Feyen. 1994. Estimating solute transport parameters on undisturbed soil columns using time domain reflectometry. *J. Contam. Hydrol.*, 17:91-109.
11. Mallants, D., M. Vanclooster, N. Toride, J. Vanderborght, M.Th. van Genuchten, & J. Feyen, 1996. Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in undisturbed soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 747-754.
12. Nadler, A., 2005. Comments on "Field calibration of water content reflectometers". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1356-1357.
13. Reece, C.F. 1998. Simple method for determining cable length resistance in time domain reflectometry systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 314-317.

14. Rhoades, J.D. 1981. Predicting bulk soil electrical conductivity vs. saturation paste extract electrical conductivity calibrations from soil properties. *Soil. Soc. Am. J.*, 45:42-44.
15. Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, & W.L. Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 433-439.
16. Topp, G.C, J.L. Davis, & A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582.
17. Topp, G.C., M. Yanuka, W.D. Zebchuck, & S. Zegelin, 1988. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.*, 24: 945-952.
18. Vanclooster, M., D. Mallants, J. Diels, & J. Feyen. 1993. Determining local scale solute transport parameters using time domain reflectometry (TDR). *J. Hydrol.*, 148:93-107.
19. Vanclooster, M., D. Mallants, J. Vanderborght, J. Diels, J. Van Orshoven, & J. Feyen, 1995. Monitoring solute transport in a multilayered sandy lysimeter using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 337-344.
20. Vogeler, I., B.E. Clothier, S.R. Green, D.R. Scotter, & R.W. Tillman, 1996. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 5-12.
21. Ward, A.L., R.G. Kachanoski, A.P. von Bertoldi, I.J. van Wesenbeeck, & C.J. Hamlen, 1988. Solute transport during three-dimensional unsaturated water flow: axisymmetric measurements using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. Abstracts*, 1988, pp. 192.
22. Ward, A.L., R.G. Kachanoski, & D.E. Elrick. 1994. Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1031-1039.
23. Wyseure G.C.L., M.A. Mojid, & M.A. Malik. 1997. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *European J. Soil Sci.*, 48: 347-354.
24. Yanuka, M., G.C. Topp, S. Zegelin, & W.D. Zebchuk. 1988. Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: Theoretical consideration for application to soil and water. *Water Resour. Res.*, 24:939-944.
25. Zagorskii, V.V., V.M. Nesterov, E.A. Zamotrinskaya, & T.G. Miikhailova, 1982. Dependence of dielectric permittivity of moist disperse materials on the temperature. *Soil Phys. J. (Engl. Transl.)*, 25: 62-65.
26. Zegelin, S., L. Whire, & D.R. Jenkins. 1989. Improved filed probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, 25:2367-2376.