شناسایی موقعیت‌های نشت با استفاده از اثر تغییرات رطوبت خاک بر شکل موج‌های TDR

کمال گنجعلی پور[۱*]، سید محمود فاطمی عقدا [۲]، کمال نبی اللهی [۳]

۱. رئیس گروه مطالعات آب زیرزمینی، شرکت آب منطقه‌ای مرکزی، اراک، ایران
۲. استاد تمام، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین ،دانشگاه خوارزمی،تهران، ایران
۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

چکیده

روش‌های الکترومغناطیس در ژئوفیزیک کاربردی به سرعت در حال پیشرفت هستند. از زمانی که روش بازتاب سنجی در حوزه زمان برای امواج رادار هدایت شده (TDR) رشد کرده است استفاده از آن منجر به کاربرد خلاقانه و مقایسه آن با سایر روش‌های اندازه‌گیری قبلی شده است. یک سیستم TDR از یک دریافت کننده و تولید کننده موج رادار (الکترومغناطیس)، یک خط انتقال و موج بر تشکیل شده است. پالس الکترومغناطیس تولید شده از درون کابل هادی به سمت موج‌بر حرکت می‌کند و از طریق موج بر وارد محیط تحت آزمایش می‌شود هدف از این تحقیق این است که با انجام آزمون‌هایی بر روی کابل‌های مخابراتی دو رشته‌ای به عنوان سنسور TDR، توانایی و دقت روش بازتاب سنجی زمان در تشخیص موقعیت‌های نشت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق کابل دو رشته‌ای در زیر مصالح رس گراولی GC مدفون شد و با افزایش درصد رطوبت خاک به صورت پله‌ای در دو نقطه، حساسیت روش TDR نسبت تغییرات رطوبت در اطراف کابل، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس شکل موج‌های TDR نقاط تغییرات ثابت انعکاس در فاصله‌های ۹-۹/۵ و ۴/۵ متری قرار دارد که کاملاً با فاصله واقعی نقاط آزمایش انطباق دارد. در این پژوهش از دستگاه رطوبت سنج TDR ساخت شرکت soil moisture مدل ۶۰۵۰ x1 استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش TDR توانایی آن را دارد به عنوان یک سیستم مانیتورینگ برای تشخیص محل نشت در سدها، دایک‌ها و سایر سازه‌های ژئوتکنیکی به کار برده شود.

کلید واژه‌ها: بازتاب سنجی دامنه زمان، پالس TDR، کابل دو رشته‌ای، نشت

مقدمه

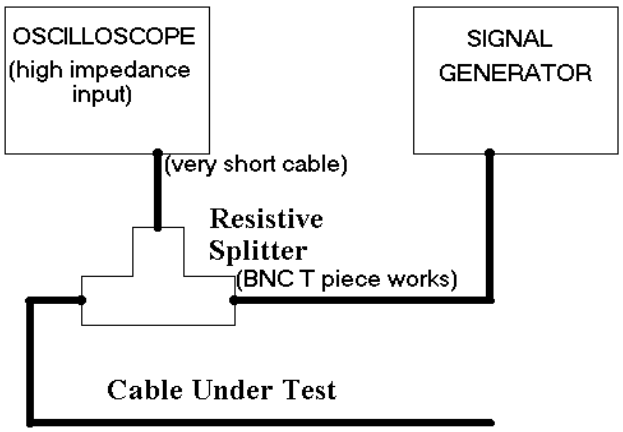
نشت از بدنه سدها پی و تکیه‌گاه‌ها جزو مهم‌ترین مسائلی است که اگر به صورت مداوم تحت نظر گرفته نشود ممکن است با مکانیسم‌های متفاوتی منجر به شکست و خرابی سدها گردد. همیشه برای علاج بخشی موقعیت‌های نشتی فشارهای زیادی

* نویسنده مسئول: k.ganjalipour@gmail.com
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.3.1010691

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

بر عوامل اجرایی وجود دارد. نبود یک سیستم ارزیابی و مانیتورینگ مناسب می‌تواند باعث عدم موفقیت در عملیات کنترل و کاهش و نشت گردد، در دهه‌های اخیر تکنیک‌های زیادی برای ارزیابی و شناسایی موقعیت نشت در سدها به کار برده شده است. در این پژوهش نویسندگان سعی دارند توانایی روش بازتاب سنجی دامنه زمان را در شناسایی موقعیت‌های نشت ارزیابی کنند.

در دو دهه اخیر تکنولوژی بازتاب سنجی در دامنه زمان جهت کاربردهای خلاقانه در ارزیابی‌های ژئوتکنیکی مورد توجه قرار گرفته است. بررسی جامع کاربرد بازتاب سنجی حوزه زمان در فعالیت‌های ژئوتکنیکی توسط اُکانر و داودینگ (O'Connor and Dowding ,1999) انجام شده است یک سیستم TDR از فرستنده و دریافت کننده پالس، خط انتقال و موجبر تشکیل شده است. تولید کننده پالس یک موج الکترومغناطیس به درون کابل هادی می‌فرستد و موج بر آن را به درون مصالح و محیطی که باید تحت آزمایش قرار گیرد، هدایت می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. نمای تیپیک یک سیستم TDR.
Fig.1. Typical view of a TDR system.

روش TDR در سال ۱۹۳۰ جهت عیب‌یابی کابل‌های انتقال برق استفاده شد. در سال‌های دهه ۱۹۶۰ در کشور ایالت متحده آمریکا تحقیق درباره استفاده از این تکنولوژی برای کنترل رفتار زمین لغزش شروع شد. تا سال ۱۹۹۰ استفاده از این روش موردی و بسیار محدود بود اما در سال‌های دهه ۱۹۹۰ استفاده از این روش جهت شناسایی سطوح لغزش توسعه پیدا کرد (O'Connor and Dowding, 1999; Dowding, and O'Connor, 2000a) .

کین و بک، میکلسن، اُکانر و داودینگ از روش بازتاب سنجی در حوزه زمان برای مانیتورینگ حرکات شیب‌ها استفاده کردند (Kane and Beck, 1996; Mikkelsen, 1996;O ,Connor and Dowding, 1999). از تحقیقات نوین در زمینه کاربرد این روش برای شناسایی سطوح لغزش توسط فاطمی عقدا و همکاران در سال ۲۰۱۸ منتشر شده است. (Fatemi Aghda et al., 2018). در سال ۲۰۱۲ کاتالدو و همکاران با انجام یک سری آزمایش توانایی روش TDR را در شناسایی نقاط نشت آب در لوله‌های فلزی موجود در زیر زمین را اعتبار سنجی نمودند نتایج گزارش شده از کارهای انجام شده آنان بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی نشان دادند که TDR موقعیت‌های نشتی را شناسایی می‌نماید (Cataldo et al., 2007).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

همچنین در سال ۲۰۱۳ کاتالدو و همکاران بار دیگر نیز با انجام یک سری آزمایش توانایی روش TDR را در شناسایی نقاط نشت آب در لوله‌های غیر فلزی تازه نصب شده در زیرزمین مورد بررسی قرار دادند (Cataldo et al., 2013).

بازتاب سنجی زمان یک تکنیک مانیتورینگ است که برای کاربردهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان مثال برای ارزیابی ویژگی‌های دی‌الکتریک و اسپکتروسکوپیک مواد (Cataldo et al., 2007; Hager,1994; Moradi and Abdipour, 2007; Nozaki and Bose, 1990) ، برای کنترل کمی و کیفی مایعات (Cataldo et al., 2009; Piuzzi et al., 2009)، بررسی روغن‌های گیاهی (Cataldo et al., 2010; Cataldo et al., 2009)، اندازه‌گیری امپدانس (Bishop, 2011)، عیب‌یابی کابل‌ها (Schuet et al.,2011; Grifiths et al.,2006)، اندازه‌گیری رطوبت خاک (O ,Connor and Dowding ,1999; Cataldo et al.,2009; Cataldo et al.,2008; Serdyuk, 2008) و غیره.

در این پژوهش سعی شده است تا با طراحی و انجام چند سری آزمون‌های آزمایشگاهی تأثیر تغییرات رطوبت در اطراف کابل‌های دو رشته‌ای به عنوان سنسور TDR بر روی شکل موج‌های TDR ارزیابی گردد و همچنین نشان داده شود که آیا این روش در زمینه شناسایی موقعیت‌های نشت در مصالح خاکی کارایی دارد یا خیر؟.

مواد و روش‌ها

اساساً تکینک TDR بر اساس آنالیز سیگنال منعکس شده استوار است. این سیگنال، یک سیگنال الکترومغناطیس است (یک سیگنال پله‌ای ولتاژ با زمان rise time خیلی سریع) که در طول سنجنده منتشر می‌گردد و وارد محیط تحت آزمون می‌شود. سیگنال منعکس شده اطلاعات بسیار مفیدی از ویژگی‌های دی‌الکتریک مصالحی که سنجنده در آن فرو برده شده است را بیان می‌کند. بنابراین با پردازش مناسب داده‌ها می‌توان به ویژگی‌های کمی و کیفی مصالح مورد نظر پی برد(Cataldo and De Benedetto, 2011).

در اندازه‌گیری‌های TDR، دستگاه مولد پالس یک ولتاژ پله‌ای با دامنه Vi ارسال می‌کند وقتی به هر دلیلی بخشی از ولتاژ، منعکس می‌شود. ولتاژ منعکس شده به صورت ثابت انعکاس ρ در نمایشگر TDR نمایش داده می‌شود. ثابت انعکاس به صورت نسبت ولتاژ منعکس شده به ولتاژ ارسال شده توسط دستگاه TDR تعریف می‌شود (Dyer, 2001).

$$\rho = \frac{V_R}{V_I} \qquad (۱)$$

V_I ولتاژ ارسال شده است و V_R ولتاژ منعکس شده می‌باشد.

انعکاسی که به وسیله دستگاه TDR قابل مشاهده است به عوامل مختلفی از جمله نوع کابل بستگی دارد. مهم‌ترین فایده TDR این است که محل انعکاس با استفاده از زمان سیر، و دلیل آن با استفاده از ویژگی‌های انعکاس قابل تشخیص است (Dowding and O'Connor, 2000b) ثابت دی‌الکتریک مصالح در گیرنده سیم دو رشته‌ای تابعی از سرعت انتشار موج است. این سرعت معمولاً به صورت درصدی از سرعت نور در محیط خلأ بیان می‌شود که VOP نامیده می‌شود و معمولاً یکی از مشخصات کابل است (Mohamed, 2006).

$$V_{\mathrm{CABLE}} = \frac{2l}{T} \qquad (۲)$$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

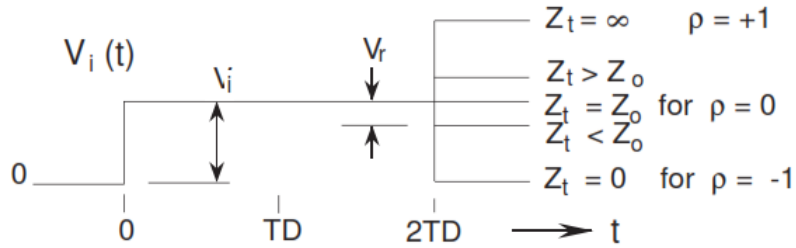
$$VOP = \frac{(2L/_T)}{C} \quad (۳)$$

$$\varepsilon = (\frac{1}{VOP})^2 \quad (۴)$$

L طول کابل است و بکار بردن دو برابر طول به دلیل رفت و برگشت موج منعکس شده در طول سنجنده است. T زمان لازم برای رفت و برگشت موج از ابتدا تا انتهای سنجنده است. C سرعت نور در محیط خلأ است و ε ثابت دی‌الکتریک محیط در برگیرنده کابل می‌باشد.

انعکاس پالس الکترومغناطیس در محل تغییر دی‌الکتریک رخ می‌دهد و سیستم اندازه‌گیری TDR توان تشخیص این موقعیت‌ها را دارد. و با استفاده از روابط فوق می‌توان محل تغییر دی‌الکتریک را اندازه‌گیری نمود. گراف‌های TDR معمولاً به شکل زمان در برابر ثابت انعکاس(نسبت ولتاژ بازتابی به ولتاژ ارسالی) نمایش داده می‌شود.

زمانی که کابل‌های کواکسیال یا دو رشته‌ای به عنوان سنسور استفاده می‌شود دستگاه TDR یک ولتاژ پله‌ای با دامنه V_I ارسال می‌کند وقتی این پالس به انتهای کابل می‌رسد بخشی از ولتاژ منعکس V_R می‌شود. ولتاژ منعکس شده به صورت ثابت انعکاس در دستگاه TDR نمایش داده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. رد پالس TDR برای مقاومت‌های انتهایی متغیر، TD زمان سیر موج در کابل است.

Fig.2. TDR pulse trace for variable termination resistances, TD is the time of wave travel in the cable.

اگر تئوری امواج الکترومغناطیس برای رسیدن به پارامترهای خط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان رابطه ۱ را به شکل ذیل نوشت.

$$\rho = \frac{(Z_t - Z_0)}{(Z_t + Z_0)} \quad (۵)$$

Z_t امپدانس انتهای کابل و Z_0 امپدانس کابل است.

انعکاس TDR برای مقاومت‌های انتهایی متفاوت در شکل b نشان داده شده است (Andrews, 1994). اگر مقاومت انتهایی ۵۰ اهم باشد و کابل ۵۰ اهم باشد در نتیجه $\rho = 0$ و $Z_t = Z_0$ برای مدار باز $Z_t = \infty$ و $\rho = +1$ و برای اتصال کوتاه $Z_t = 0$ و $\rho = -1$ اگر مقاومت انتهایی بزرگ‌تر از مقاومت کابل باشد یک پله مثبت و برای مقاومت‌های کوچک‌تر یک پله منفی مشاهده می‌شود. مقدار مقاومت انتهایی از طریق ثابت انعکاس دستگاه TDR قابل محاسبه است. پس با ارسال پیوسته پالس‌های الکترومغناطیس می‌توان حساسیت و دقت این روش را در برابر تغییرات دی‌الکتریک محیط اطراف سنسور TDR (مانند تغییرات رطوبت) ارزیابی نمود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

تجهیزات استفاده شده

تجهیزات آزمایش در این پژوهش شامل یک دستگاه اندازه‌گیری TDR ساخت شرکت Soil moisture مدل 6050x1 و کابل دو رشته‌ای مخابراتی که به عنوان سنسور TDR می‌باشد. این دستگاه یک پالس پله‌ای با دامنه ۱/۵ ولت با زمان rise time در حدود ۱۲۰ پیکوثانیه تولید می‌کند. خروجی دستگاه به صورت پورت BNC می‌باشد و امپدانس خروجی آن ۵۰ اهم است (شکل ۳).

شکل ۳. دستگاه رطوبت سنج TDR شرکت Soil moisture مدل 6050x1.
Fig. 3. TDR moisture meter of Soil moisture company, model 6050x1.

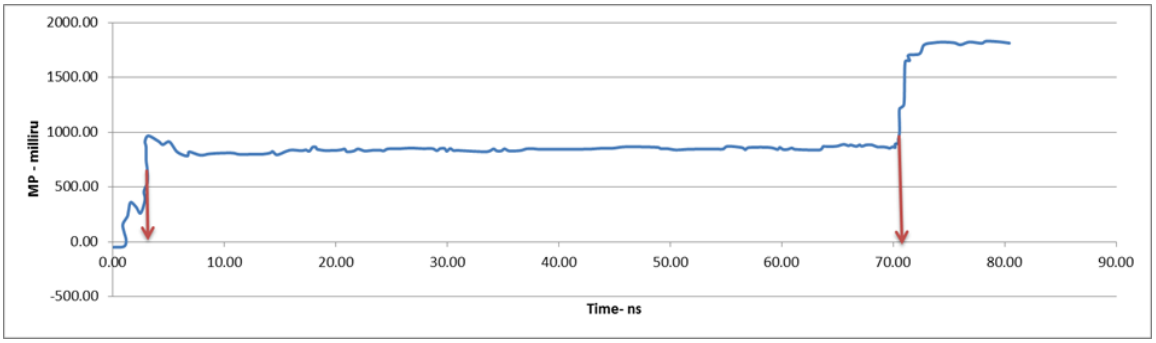
در این تحقیق از کابل دو رشته‌ای با مهار فولادی استفاده شد (شکل ۴). البته از آنجا که سرعت سیر موج الکترومغناطیس در کابل مذکور نامشخص بود در ابتدا با اتصال ۱۳/۶۵ متر از کابل مذکور به وسیله رابط تبدیل دو رشته‌ای به BNC به دستگاه TDR و ارسال پالس الکترومغناطیس شاخص VOP کابل تعیین شد .در همین راستا شکل موج TDR مربوط به ارسال پالس درون کابل مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل تغییرات ثابت انعکاس در برابر زمان بر حسب نانو ثانیه نشان داده شده است.

ابتدا و انتهای کابل در این شکل مشخص شده است. زمان سیر موج از ابتدا تا انتهای کابل حدود ۶۷/۴۶ نانوثانیه است. با توجه به طول ۱۳/۶۵ متری کابل، سرعت موج الکترومغناطیس در کابل مورد استفاده در این تحقیق حدود ۲۰/۲۳۴ سانتی‌متر بر نانوثانیه است. و با استفاده رابطه ۳ شاخص VOP این کابل ۰/۶۷ می‌باشد که بدین معنی است که موج الکترومغناطیس در این کابل با ۶۷ درصد سرعت نور ($c= 3 * 10^8\ ms^{-1}$) سیر می‌کند (جدول ۱).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

شکل ۴. کابل دو رشته‌ای مخابراتی و تبدیل پورت دو رشته‌ای به BNC
Fig. 4. Bi-wire telecommunication cable and conversion of Bi-wire port to BNC



شکل ۵. موج TDR برای کابل دو رشته‌ای مخابراتی و تعیین ابتدا و انتهای کابل.
Fig. 5. TDR wave for Bi-wire telecommunication cable and determining the beginning and end of the cable.

جدول ۱. تعیین شاخص V.O.P برای کابل تحت آزمایش
Table 1. Determining the V.O.P index for the cable under test

Cable length	The time interval between the beginning and the end of the cable in nanoseconds	The speed of the electromagnetic wave in the double-stranded cable under test in centimeters per nanosecond	Determining the V.O. P
13.65	67.46	20.23421	67%

روش آزمون

از آنجا که هدف این پژوهش شناسایی نشت در مصالح خاکی است لذا نویسندگان با طراحی آزمونی سعی در بازسازی شرایط نشت در مصالح خاکی نمودند. در این آزمایش کابل ۱۳/۶۵ متر کابل دو رشته‌ای توسط مصالح رس گراولی(GC) پوشانده شد و در دو نقطه در فاصله ۴/۵ و ۹/۴ متری شرایط نشت درون مصالح GC با افزایش پله‌ای درصد رطوبت بازسازی شد

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

(شکل ۶) در ابتدا درصد رطوبت خاک در هر دو نقطه تعیین شد. رطوبت نقطه اول (در فاصله ۹/۴) حدود ۵/۴ درصد و رطوبت نقطه دوم (در فاصله۴/۵) حدود ۷/۵ درصد است شکل موج TDR این شرایط ثبت گردید تا به عنوان قرائت صفر مورد استفاده قرار گیرد. سپس رطوبت خاک در نقطه اول با افزودن آب طی چهار مرحله از ۵/۴ درصد تا ۱۸/۷ درصد افزایش داده شد و شکل موج TDR مربوط به هرکدام از مراحل ثبت گردید در طول هر چهار مرحله تغییری در رطوبت نقطه دوم داده نشد. سپس با ثابت نگه داشتن رطوبت نقطه اول در حدود ۱۸/۷ درصد رطوبت نقطه دوم طی ۴ مرحله تا ۲۹/۳ درصد افزایش داده شد و شکل موج TDR مربوط به همه مراحل ثبت گردید. در جدول شماره ۲ شرایط مراحل مختلف آزمایش به صورت خلاصه نشان داده شده است.

شکل ۶. تصویر آزمایش ارزیابی تأثیر رطوبت خاک اطراف سنسور TDR بر شکل موج آن و موقعیت نقاطی که رطوبت خاک به صورت پله‌ای افزایش داده شد.

Fig. 6. Image of the test to evaluate the effect of soil moisture around the TDR sensor on its waveform and the position of the points where the soil moisture was increased in steps.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.10010691]

جدول ۲. مشخصات نقاط اول و دوم در هر مرحله از آزمایش.
Table 2. Specifications of the first and second points in each step of the experiment.

	The amount of water added to the sample in terms of CC		Moisture content (%)	
			First point	Second point
1	Base reading		5.4	7.5
2	First point	750	6.9	7.5
3		1500	13.9	7.5
4		2250	15.6	7.5
5		3000	18.7	7.5
6	Second point	750	18.7	13.2
7		1500	18.7	18.3
8		2250	18.7	23.8
9		3000	18.7	29.3

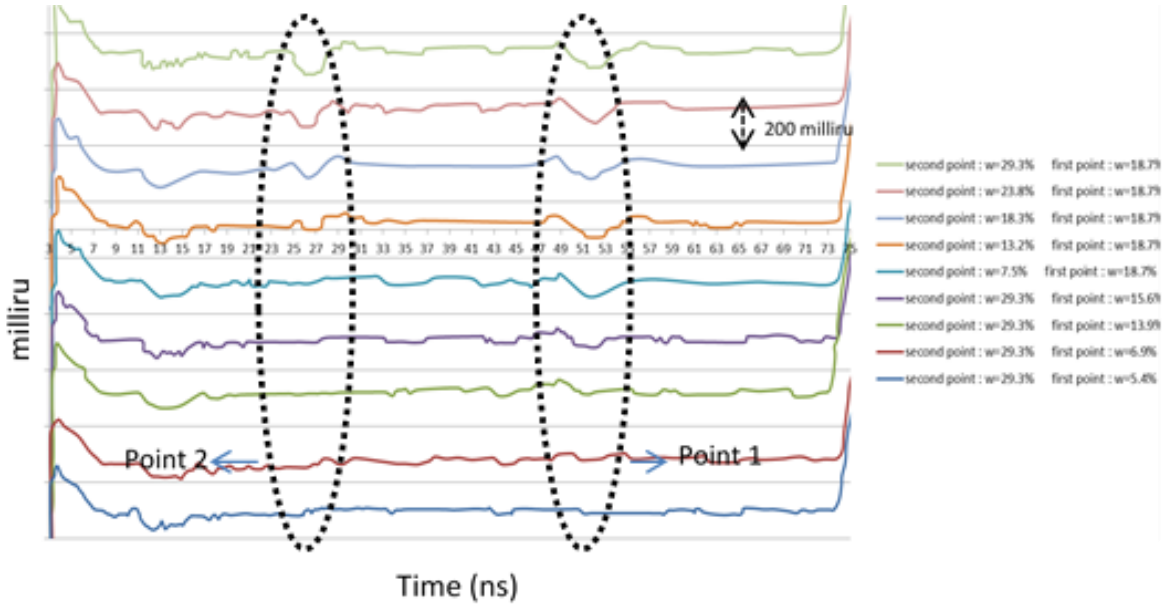
نتایج و بحث

در شکل ۷ شکل موج‌های TDR در مراحل مختلف آزمایش نمایش داده شده است. بر اساس این شکل موج‌ها ابتدا با افزایش میزان رطوبت در نقطه اول در مراحل ۱ -۵ آزمایش، در فاصله زمانی ۴۹-۵۳ نانوثانیه تغییرات ثابت انعکاس نسبت به قرائت صفر افزایش پیدا کرد و سپس با افزایش درصد رطوبت نقطه دوم در مراحل ۶- ۹ آزمایش در فاصله زمانی ۲۵- ۲۷/۵ نانو ثانیه، تغییرات ثابت انعکاس این نقطه نیز نسبت به قرائت صفر افزایش یافت. برای تبدیل فاصله‌های زمانی به فاصله طولی بر حسب متر کلیه اعداد مربوط به فاصله‌های زمانی در سرعت موج الکترومغناطیس در کابل مذکور ضرب می‌شود.

در این آزمایش به جای هوا مصالح خاکی GC اطراف کابل دو رشته‌ای را گرفته است. از آنجا که ثابت دی‌الکتریک خاک GC و هوا با همدیگر متفاوت است لذا سرعت حرکت موج الکترومغناطیس در کابل دو رشته‌ای برای این شرایط بایستی مجدداً محاسبه گردد. با استفاده از شکل موج TDR مربوط به قرائت صفر سرعت حرکت موج الکترومغناطیس برای کابل مدفون در مصالح خاکی حدود ۱۹/۳۳۸ سانتی‌متر بر نانو ثانیه برآورد گردید.

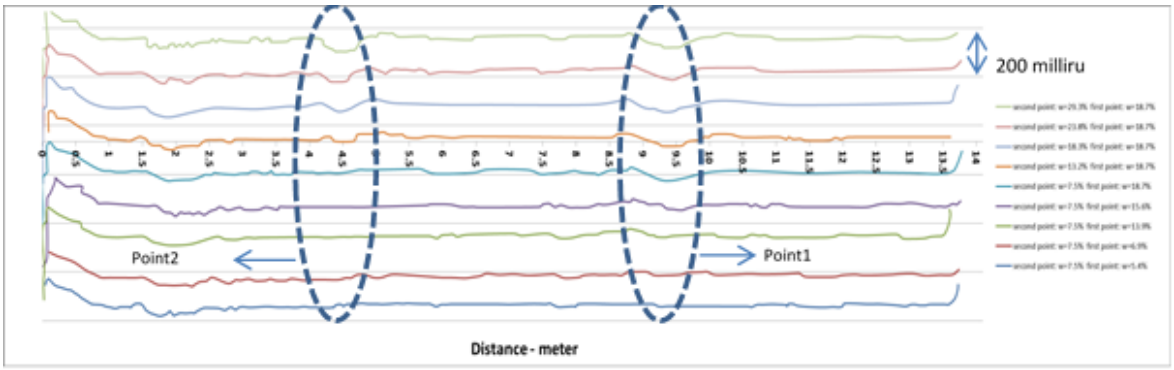
در تمام قرائت‌ها حدود ۳/۲ نانو ثانیه در ابتدای هر شکل موج مدت زمانی است که نیاز است تا پالس الکترومغناطیس وارد کابل دو رشته‌ای شود لذا از تمام داده‌های خام مربوط به فاصله‌های زمانی،۳/۲ نانوثانیه بایستی کم گردد. در شکل ۸ شکل موج‌های TDR با داده‌های پردازش شده (تبدیل فاصله‌های زمانی به فاصله‌های طولی) نمایش داده شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت در مصالح خاکی تغییرات ثابت انعکاس بیشتر می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]



شکل ۷. شکل موج‌های TDR (زمان در برابر ثابت انعکاس) برای رطوبت‌های مختلف در نقاط ۱ و ۲.

Fig. 7. TDR (time versus reflection coefficient) waveforms for different moisture content at points 1 and 2.



شکل ۸. شکل موج‌های TDR با داده‌های پردازش شده (تبدیل فاصله زمانی به فاصله طولی بر حسب متر) – ارزیابی اثر رطوبت خاک پیرامون سنسور TDR بر شکل موج آن در مراحل مختلف آزمون از مرحله ۱-۹ مطابق جدول ۳.

Fig. 8. TDR waveforms with processed data (transformation of time interval into longitudinal distance in meters) - evaluation of the effect of soil moisture around the TDR sensor on its waveform in different stages of the test from stage 1-9 according to Table 3.

همچنین بر اساس این شکل موج‌ها نقاط تغییرات ثابت انعکاس در فاصله‌های ۹-۹/۵ و ۴/۵ متری قرار دارد که کاملاً با فاصله واقعی نقاط آزمایش انطباق دارد. تماس کابل TDR با آب، سرعت موج TDR را کاهش می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد برای محاسبه موقعیت نقطه نشت بر اساس TDR ، با فرض ثابت بودن سرعت حرکت موج در کل طول کابل از رابطه ذیل استفاده می‌شود.

$$D = \frac{V_{CABLE} \times t}{2} \qquad (۶)$$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

t زمان لازم برای رفت و برگشت موج از ابتدا تا نقطه نشت می‌باشد.

استفاده از این رابطه تنها زمانی منجر به محاسبه دقیق نقطه نشت می‌گردد که سنسور TDR فقط در یک نقطه و با طول کم با رطوبت در تماس باشد پس اگر کابل در چند نقطه با رطوبت در تماس باشد محاسبه موقعیت‌های بعد از نزدیک‌ترین نقطه نشت به تولید کننده پالس با خطا همراه بود. برای بهبود دقت سیستم نشت‌یاب TDR نویسندگان این مقاله در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که با ایجاد تغییراتی در هندسه کابل دو رشته‌ای در چند نقطه می‌توان نقاطی را به عنوان رفرنس ایجاد نمود به گونه‌ای که انعکاس مربوط به آن به آسانی در شکل موج TDR قابل تشخیص باشد. آن‌ها عملاً کابل را به چند قسمت مشخص تقسیم کردند و در صورتی که در هر کدام از قطعات نشتی ظاهر شود با استفاده از نقطه رفرنس آن قطعه می‌توان موقعیت نشت در آن قطعه را مستقل از سایر قطعات محاسبه نمود (Fatemi Aghda et al., 2018). در هر صورت می‌توان گفت که TDR قادر است به صورت کیفی تغییرات رطوبت در خاک را در طول مشخصی مانیتور کند البته کمی کردن آن نیاز به استانداردسازی و کالیبراسیون دقیق دارد. همچنین محققین نشان دادند که این تکنیک توانایی تشخیص اولین لحظات شروع نشت و نحوه گسترش آن در امتداد کابل را دارد اما زمانی که نشت کل کابل را در بربگیرد وضعیت دشوار و پیچیده می‌گردد.

نتیجه‌گیری

بازتاب سنجی حوزه زمان در امواج الکترومغناطیس هدایت شده یک تکنیک مانیتورینگ بر اساس تئوری خط انتقال است که در آن سنجنده جزئی از این خط انتقال است. یک دستگاه TDR یک موج الکترومغناطیس به درون خط انتقال گسیل می‌دهد و انعکاس‌های آن را دریافت می‌کند. این انعکاس‌ها تحت تأثیر پارامترهای خط انتقال و محیط اطراف آن قرار دارند. در این مقاله سعی شد تا از فواید تکنولوژی TDR برای بررسی یکی از مهم‌ترین معضلات ژئوتکنیک یعنی تشخیص محل نشت استفاده شود.

در این تحقیق کابل دو شته‌ای در زیر مصالح خاکی GC مدفون شد. با ارسال پالس TDR به درون کابل و طبق روابط موجود سرعت سیر پالس درون کابل برابر ۱۹/۳ سانتی‌متر بر نانو ثانیه تعیین شد و شکل موج آن به عنوان قرائت صفر برای مقایسه تغییرات در مراحل بعدی، مبنا قرار داده شد. سپس در دو نقطه با فواصل مشخص رطوبت خاک در چندین مرحله افزایش داده شد. همزمان با افزایش رطوبت میزان تغییرات ثابت انعکاس در این نقاط نیز تشدید شد. با ثبت فاصله زمانی نقاط تغییرات ثابت انعکاس نسبت به قرائت صفر و با استفاده سرعت سیر محاسبه شده پالس، فاصله طولی این نقاط محاسبه گردید. بر اساس شکل موج‌های TDR و پس از انجام پردازش‌های ذکر شده توسط محققین نقاط تغییرات ثابت انعکاس در فاصله‌های ۹-۹/۵ و ۴/۵ متری قرار دارد که کاملاً با فاصله واقعی نقاط آزمایش انطباق دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش بازتاب سنجی در حوزه زمان برای امواج الکترومغناطیس هدایت شده توانایی آن را دارد به عنوان یک سیستم مانیتورینگ برای تشخیص محل نشت در سدها، دایک‌ها و سایر سازه‌های ژئوتکنیکی به کار برده شود. TDR قادر است تغییرات رطوبت را مانیتور کند اما نیاز به استانداردسازی و کالیبراسیون دقیق دارد. همچنین محققین نشان دادند که این تکنیک توانایی تشخیص اولین لحظات شروع نشت و نحوه گسترش آن در امتداد کابل را دارد اما زمانی که نشت کل کابل را در بربگیرد وضعیت دشوار و پیچیده می‌گردد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

منابع

Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., Giaquinto, N., Savino, M., 2013. An inverse validation for detecting pipe leaks with a TDR-based method. In 4th IMEKO TC19 Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements 2013: Protection Environment, Climate Changes and Pollution Control (pp. 104-108). imeko.

Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E. and Giaquinto, N., 2012. Experimental validation of a TDR-based system for measuring leak distances in buried metal pipes. Progress In Electromagnetics Research, 132, 71-90.

Cataldo, A., Piuzzi, E., Cannazza, G., De Benedetto, E., 2012. Classification and adulteration control of vegetable oils based on microwave reflectometry analysis. Journal of food engineering, 112(4), 338-345.

Cataldo, A., Piuzzi, E., Cannazza, G. and De Benedetto, E., 2009. Dielectric spectroscopy of liquids through a combined approach: Evaluation of the metrological performance and feasibility study on vegetable oils. IEEE sensors journal, 9(10), 1226-1233.

Cataldo, A., Piuzzi, E., Cannazza, G., De Benedetto, E., Tarricone, L., 2010. Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy. Measurement, 43(8), 1031-1039.

Cataldo, A., Monti, G., De Benedetto, E., Cannazza, G., Tarricone, L., 2009. A noninvasive resonance-based method for moisture content evaluation through microstrip antennas. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58(5), 1420-1426.

Cataldo, A., Monti, G., Cannazza, G., De Benedetto, E., Tarricone, L., Cipressa, M., 2008. A non-invasive approach for moisture measurements through patch antennas. In 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (pp. 1012-1015). IEEE.

Cataldo, A., Catarinucci, L., Tarricone, L., Attivissimo, F., Trotta, A., 2007. A frequency-domain method for extending TDR performance in quality determination of fluids. Measurement science and technology, 18(3), 675-688.

Cataldo, A., Catarinucci, L., Tarricone, L., Attivissimo, F., Piuzzi, E., 2009. A combined TD–FD method for enhanced reflectometry measurements in liquid quality monitoring. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 58(10), 3534-3543.

Dowding, C. H., O'Connor K. M., 2000. Comparison of TDR and Inclinometer for Slope Monitoring in Geotechnical Measurement Proceedings. Denver, CO 2000, vol 80-81, (2000a).

Dowding, C. H., O'Connor K. M., 2000. Real Time Monitoring of Infrastructure using TDR Technology. Structural Material Technology NDT Confference 2000, (2000b).

Dyer, S. A., 2001. Survey of Instrumentation and Measurement. John Wiley & Sons Inc., USA.

Grifiths, L. A., Parakh, R., Furse, C., Baker, B., 2006. The invisible fray: A critical analysis of the use of reflectometry for fray location. IEEE Sensors Journal, 6(3), 697-706.

Hager, N.E., 1994. Broadband time-domain-reflectometry dielectric spectroscopy using variable-time-scale sampling. Review of Scientific Instruments, 65(4), 887-891.

Kane, W.F., Beck, T.J., 1996. An alternative monitoring system for unstable slopes. Geotechnical news. 143, 24-26.

Mikkelsen, P.E., 1996. Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 11-Field instrumentation. Transportation Research Board Special Report, 247 p.

Mohamed, A.M.O., 2006. Principles and applications of time domain electrometry in geoenvironmental engineering, CRC Press. VOL 5.

Moradi, G., Abdipour, A., 2007. Measuring the permittivity of dielectric materials using STDR approach. Progress In Electromagnetics Research, 77, 357-365.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

Nozaki, R., Bose, T.K., 1990. Broadband complex permittivity measurements by time-domain spectroscopy. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 39(6), 945-951.

Dowding, C. H., O'Connor K. M., 2000. GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes. CRC Press, UK.

Okhovvat, M., Fallahi, R., 2006. Measurement of antenna reflection coefficient in time domain, Proc. 11th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 328-330, Kharkiv, Ukraine.

Piuzzi, E., Cataldo, A., Catarinucci, L., 2009. Enhanced reflectometry measurements of permittivities and levels in layered petrochemical liquids using an “in-situ” coaxial probe. Measurement, 42(5), 685-696.

Schuet, S., Timucin, D., Wheeler, K., 2011. A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60(5), 1654-1663.

Aghda, S.F., Ganjalipour, K., Nabiollahi, K., 2018. Comparison of performance of inclinometer casing and TDR technique. Journal of Applied Geophysics, 150, 182-194.

Aghda, S.F., GanjaliPour, K., Nabiollahi, K., 2018. Assessing the accuracy of TDR-based water leak detection system. Results in physics, 8, 939-948.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

Identifying leakage situations using the effect of soil moisture changes on TDR waveforms

Kamal ganjalipour[1]*, Seyyed Mahmoud Fatemi aghda[2], Kamal nabiollhi[3]

1. Head of Groundwater Studies Department, Markazi province regional Water Company, Arak, Iran
2. Full Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
3 .Associate Professor, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 10 Oct 2022 Accepted: 12 Dec 2022

Abstract

Electromagnetic methods in applied geophysics are advancing rapidly. Since the TDR system has grown, its use has led to innovative applications and comparisons with other previous measurement methods. A TDR system consists of a radar (electromagnetic) receiver and generator, a transmission line, and a waveguide. The electromagnetic pulse generated from inside the conductor cable moves towards the waveguide and is tested through the waveguide into the environment under test. In the last few years, the use of the TDR system to identify water leakage situations has been expanding. In this article, by performing tests on two-strand telecommunication cables as TDR sensors, the ability and accuracy of the time domain reflectometry method in detecting leakage situations has been evaluated. In this research, the two-stranded cable was buried under GC gravel clay material, and by increasing the percentage of soil moisture stepwise at two points, the sensitivity of the TDR method to the changes in moisture around the cable was investigated. Based on the TDR waveforms, the points of reflection coefficient changes are located at the distances of 9.5-9 and 4.5 meters, which is completely consistent with the actual distance of the test points. In this research, TDR moisture meter made by soil moisture company model 6050x1 was used. The results of this research show that the TDR method has the ability to be used as a monitoring system to detect leakage in dams, dikes and other geotechnical structures.

Keywords: Double Strand Cable, leakage, TDR Pulse, Time Domain Reflectometry, TDR.

Introduction

In recent decades, many techniques have been used to evaluate and identify the location of leakage in dams. In this research, the authors are trying to evaluate the ability of the time domain reflectometry method in identifying leakage situations. A TDR system consists of a pulse transmitter and receiver, a transmission line and a waveguide. The pulse generator sends an electromagnetic wave into the conductor cable and directs the wave into the material and the environment to be tested. In this research, an attempt has been made to evaluate the effect of humidity changes around two-stranded cables as a TDR sensor on TDR waveforms by designing and conducting several series of laboratory tests, and also to show whether this method is effective in identifying leakage situations in soil materials. Does it work or not?

*Corresponding author: k.ganjalipour@gmail.com
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.3.1010691

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

Materials and Methods

Subtitle

In TDR measurements, the TDR device sends out a step voltage of amplitude Vi. For some reason, part of the voltage may be reflected (Vr). The reflected voltage is represented in the TDR as the reflection constant ρ . The reflection constant is defined as the ratio of the reflected voltage to the voltage transmitted by the TDR (Dyer, 2001).

$$\rho = \frac{V_R}{V_I} \quad (1)$$

The test equipment used in this research includes a Soil Moisture Company model 6050x1 TDR meter and a two-wire telecommunication cable as the TDR sensor. The wave travel time from the beginning to the end of the cable is about 67.46 nanoseconds. Considering the cable length of 13.65 meters, the speed of the electromagnetic wave in the cable used in this research is about 20.234 cm/ns. And the VOP index of this cable is 0.67, which means that the electromagnetic wave in this cable travels at 67% of the speed of light (c = 3 * 108 ms-1).

In this test, the aforementioned cable was covered with gravel clay (GC) and, at two points 4.5 and 9.4 meters apart, the leakage conditions within the GC material were modelled by gradually increasing the percentage of moisture.

Results and Discussion

The TDR waveforms show that as the moisture content of the soil materials increases, the constant changes in reflection increase at the 9.5-9 and 4.5 meter distances of the cable, which is entirely consistent with the actual distance of the test points. Contact of the TDR cable with water slows down the TDR wave velocity. As mentioned above, the following relationship is used to calculate the location of the leak based on TDR, assuming that the speed of the wave motion is constant along the length of the cable.

$$D = \frac{V_{CABLE} \times t}{2} \quad (2)$$

Using this relationship will only give an accurate calculation of the leakage point if the TDR sensor is only in contact with moisture at one point and for a short length, so if the cable is in contact with moisture at several points, calculate the positions after the closest leakage point to the manufacturer. The pulse was accompanied by an error. To improve the accuracy of the TDR leak detection system, the authors of this article showed in another research in (2018) that by changing the geometry of the double-stranded cable at several points, it is possible to create reference points in such a way that the corresponding reflection is easily reflected in the TDR waveform. In effect, they have divided the cable into several distinct parts for detection. If a leak appears in one of the parts, the reference point of that part can be used to calculate the location of the leak in that part independently of the other parts (Fatemi Aqda et al., 2018). In any case, it can be said that TDR is capable of qualitatively monitoring soil moisture changes over a period of time, although its quantification requires accurate standardization and calibration. The researchers also showed that this technique has the ability to detect the first moments of leakage and how it spreads along the cable, but when the leakage covers the entire cable, the situation becomes difficult and complicated.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]

Conclusions

In this paper an attempt has been made to use the advantages of TDR technology to investigate one of the most important geotechnical problems, the location of leaks. In this investigation, two aphid cables were buried under GC soil material. By sending the TDR pulse into the cable and according to the existing relations, the speed of the pulse inside the cable was determined to be 19.3 cm/ns and its waveform was used as a zero value to compare the changes in the next steps. The soil moisture was then increased in several steps at two points at set intervals. At the same time as the moisture increased, the amount of constant reflection changes at these points also increased. By recording the time interval of the constant change points of reflection compared to the zero reading and using the calculated pulse velocity, the longitudinal distance of these points was calculated, which is exactly the same as the measured distance. The results of this research show that the TDR method can be used as a monitoring system to detect leakage in dams, embankments and other geotechnical structures.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1010691]