

# ارزیابی کاربرد تکنیک TDR در بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی - مطالعه موردی سد داریان

سید محمود فاطمی عقدا<sup>۱</sup>، کمال گنجعلی پور<sup>۲</sup> و کمال نبی‌اللهی<sup>۳</sup>

استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران  
 دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران  
 استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰

## چکیده

با توجه به گسترش و توسعه کاربرد تکنولوژی در زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک، مکانیک خاک و مکانیک سنگ، هر روزه امکان استفاده از روش‌های جدیدتر، سریع‌تر و ارزان‌تر در این زمینه‌ها فراهم می‌شود. یکی از این روش‌ها تکنولوژی TDR است. این تکنولوژی در ابتدا به وسیله صنعت مخابرات و برق برای تعیین محل عبور کابل‌ها توسعه پیدا کرد. رادار یک مثال ابتدایی از TDR است. اساس این تکنولوژی ارسال یک پالس کوتاه انرژی است که در اثر برخورد با برخی آنومالی‌ها منعکس می‌شود. محل این آنومالی‌ها در صورتی قابل تعیین است که سرعت و جهت پالس مشخص باشد. یک سیستم TDR از یک دریافت‌کننده و تولیدکننده موج رادار (الکترومغناطیس)، یک خط انتقال و موج‌بر تشکیل شده است. پالس الکترومغناطیس تولید شده از درون کابل هادی به سمت موج‌بر حرکت می‌کند و از طریق موج‌بر وارد محیط تحت آزمایش می‌شود. در پژوهش حاضر از این تکنیک در سد داریان و در چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰ برای تعیین سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. TDR به خوبی قادر به تشخیص سطح مشترک آب- هوا بوده و نتایج حاصل بر داده‌های اندازه‌گیری شده با روش‌های سنتی منطبق است. همچنین در یکی از ترانسه‌های مستعد لغزش در سد داریان کابل کوآکسیال به عنوان سنسور TDR نصب شد. نتایج نشان دادند که TDR زون‌های برشی و کششی کابل را که در نتیجه حرکات زمین به وجود آمده‌اند با موفقیت شناسایی می‌کند. در نهایت از آنجا که پردازش دستی داده‌های TDR بسیار مشکل و نیازمند دقت و زمان زیادی است؛ روشی را برای پردازش کامپیوتری این داده‌ها ابداع شد.

**کلیدواژه‌ها:** TDR، ثابت انعکاس، سطح آب، پالس الکترومغناطیس، زمین‌شناسی مهندسی.

\*نویسنده مسئول: سید محمود فاطمی عقدا

E-mail: fatemi@saba.tmu.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

پیرامون آن است؛ می‌توان از زمان سیر موج الکترومغناطیس در سنجنده برای تعیین ثابت دی‌الکتریک محیط زمین‌شناسی تحت بررسی استفاده کرد. ثابت دی‌الکتریک نشان می‌دهد که یک ماده تحت تأثیر میدان الکتریکی چقدر قطبی (پولاریزه) می‌شود. برای مثال، آب ثابت دی‌الکتریک بالایی دارد - حدود ۸۰- بدین سبب که مولکول‌های آب به راحتی در جهت میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. در مقابل، هوا و مصالح خاکی به دلیل اینکه به راحتی در جهت میدان الکتریکی قرار نمی‌گیرند؛ ثابت دی‌الکتریک پایین‌تری دارند.

تأثیر تغییرات ثابت دی‌الکتریک بر شکل موج‌های TDR را می‌توان به ویژگی‌های ژئوتکنیکی محیط تحت آزمایش، مربوط دانست. همچنین هدایت الکتریکی محیط پیرامون سنجنده یا سنجنده‌ها از طریق ویژگی‌های شکل موج قابل تشخیص است (Topp et al., 1980).

تکنولوژی TDR اساساً در مخابرات برای تشخیص محل عبور کابل‌های شبکه و خطوط تلفن مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع مختلفی از سنجنده‌های TDR برای کاربردهای ویژه، طراحی و ساخته شده‌اند. موج‌برهای استفاده شده برای کاربردهای ژئوتکنیکی به سه گروه تقسیم می‌شوند: (۱) نوع Crimp؛ (۲) نوع Interface؛ (۳) نوع دی‌الکتریک.

موج‌بر نوع Crimp برای مانیتورینگ و تعیین محل تغییر شکل‌های برشی کاربرد دارد. موج‌بر نوع Interface برای تعیین سطح مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از موج‌بر نوع دی‌الکتریک برای تعیین رطوبت خاک و یا تشخیص سایر ویژگی‌های آن نظیر هدایت الکتریکی، شوری و غیره استفاده می‌شود.

(Kane and Beck (1996)، (Mikkelsen (1996) و (O'Connor and Dowding (1999) از روش بازتاب‌سنجی در حوزه زمان، برای مانیتورینگ حرکات شیب‌ها استفاده کردند. Cataldo et al. (2012) با انجام یک سری آزمایش، توانایی روش TDR را در شناسایی نقاط نشست آب از لوله‌های فلزی مدفون در زیر زمین اعتبارسنجی کردند. نتایج گزارش شده از کارهای آنان روی نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی

TDR یک تکنیک الکترومغناطیس مشابه رادار است که در آن یک پالس الکترومغناطیس از فرستنده به درون موج‌بر ارسال می‌شود و به گیرنده بر می‌گردد. پالس برگشتی اطلاعاتی از محیط و یا موقعیت هدف مورد علاقه (نقطه عبور کابل، سطح آب و ...) ارائه می‌کند. زمان سیر موج الکترومغناطیس و سرعت پالس منعکس شده برای تعیین فاصله تا نقطه هدف، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در TDR منبع تولیدکننده پالس، پالس‌های الکتریکی را درون موج‌بر - که می‌تواند یک کابل کوآکسیال باشد - ارسال می‌کند. زمانی که پالس به موقعیتی در کابل می‌رسد که ویژگی‌های الکتریکی آن تغییر کرده است؛ بخشی از پالس به سمت منبع تولیدکننده منعکس می‌شود (Nissen and Moldrup, 1995). زمان سپری شده بین ارسال و بازگشت پالس به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد:

(۱) برای تعیین محلی در کابل که ویژگی‌های الکتریکی آن تغییر کرده است.

(۲) برای تعیین سرعت پالس.

تشخیص عبور در طول یک کابل، تعیین محل تغییر ویژگی‌های الکتریکی کابل را شامل می‌شود. در چنین کاربردهایی از تکنیک TDR، سرعت حرکت پالس به وسیله ویژگی‌های الکتریکی کابل کنترل می‌شود. بنابراین محل تغییر ویژگی‌های الکتریکی کابل از روی زمان رفت و برگشت پالس الکترومغناطیس قابل استخراج است.

بعنوان مثال وقتی در دامنه شیب‌داری که کابل TDR در آن نصب شده است حرکتی اتفاق می‌افتد؛ این حرکت باعث صدمه دیدن کابل می‌شود. پالس‌های الکترومغناطیس در محل آسیب، به منبع ارسال‌کننده پالس با سرعتی منعکس می‌شوند که به وسیله مواد تشکیل‌دهنده کابل کنترل می‌شود. زمان رفت و برگشت پالس و سرعت پالس در کابل برای تعیین موقعیت این سطح لغزش به کار برده می‌شوند.

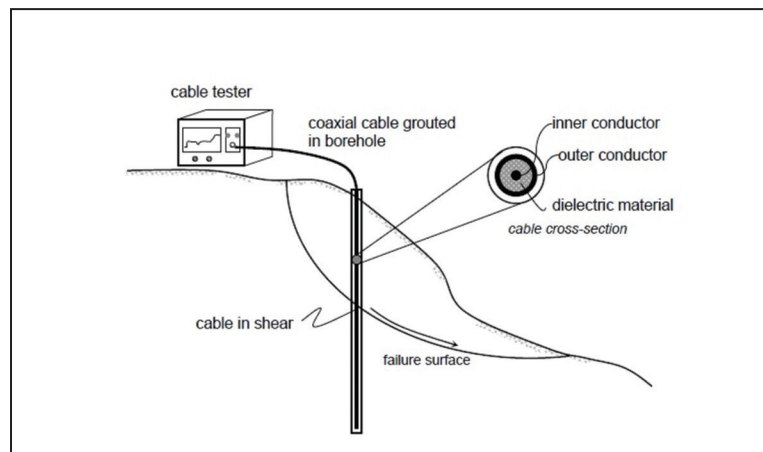
ویژگی‌های مهندسی مصالح ژئوتکنیکی با سرعت حرکت پالس در ارتباط هستند و با تعیین سرعت می‌توان این ویژگی‌ها را برآورد کرد. در این حالت یک سنجنده به انتهای کابل هادی متصل و در محیط زمین‌شناسی تحت بررسی فرو برده می‌شود. از آنجا که سرعت حرکت پالس در سنجنده کاملاً تحت تأثیر ثابت دی‌الکتریک محیط

مشخصات سیگنال منعکس شده TDR برای تعریف هدایت الکتریکی فرکانس پایین استفاده شود. تغییر شکل سیگنال پله‌ای منعکس شده در محل تغییر ظرفیت خازنی در فصل مشترک هوا و ماده دی‌الکتریک دیگری نظیر آب به دلیل تغییر در ثابت دی‌الکتریک رخ می‌دهد. ویژگی‌های کابل کوآکسیال نه تنها امکان تشخیص سطح آب، بلکه اجازه کاربردهای متنوع و گسترده دیگری را نیز می‌دهد؛ نظیر تشخیص محتوای رطوبت، تشخیص مصالح مسئله‌دار و مانیتورینگ تغییر شکل‌های انجام شده. (Ross (1974 and 1976) تجهیزات و روش‌هایی برای تشخیص سطح آب اختراع کرد. او از یک کابل کوآکسیال توخالی مغروق در مایع استفاده کرد که مایع، در فضای بین رسانای داخلی و خارجی نفوذ می‌کرد. سطح مایع منجر به تغییر در ظرفیت خازنی و انعکاس پالس ولتاژ می‌شود. علاوه بر کابل کوآکسیال، Ross در تحقیق دیگری از یک رشته سیم پوشیده با عایق و یک مخزن هادی به عنوان سنجنده TDR استفاده کرد.

محققین این پژوهش، سد داریان را برای انجام مطالعات میدانی انتخاب و با انتخاب کابل کوآکسیال RG59/U و کابل دورشته‌ای مخابراتی با مهار فولادی به عنوان موج‌بر، از این تکنیک برای تعیین سطح آب در یکی از چاه‌های مشاهده‌ای سد داریان و همچنین رفتارنگاری حرکات زمین در یک ترانشه مستعد لغزش استفاده کردند.

## ۲- پیشینه تحقیق

سیستم TDR برای کنترل پایداری شیب‌ها، مشکل از اجزای نشان داده شده در شکل ۱ است. یک کابل هم‌محور در یک گمانه نصب و با ملات سیمان پوشانده می‌شود. کابل هم‌محور یا کوآکسیال مورد استفاده در یک سیستم TDR یک مسیر تک‌بعدی برای انتشار موج الکترومغناطیس فراهم می‌کند. این موج توسط یک پالس ولتاژ از تستر کابل تولید می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده؛ این کابل مشکل از یک هادی بیرونی و یک هادی درونی است که با یک ماده عایق شناخته شده (معمولاً آن را با عنوان ماده‌ی دی‌الکتریک می‌شناسند) از هم جدا شده‌اند.



شکل ۱- اجزای سیستم TDR برای مانیتورینگ شیب.

اگر تئوری امواج الکترومغناطیس برای رسیدن به پارامترهای خط انتقال مورد استفاده قرار گیرد؛ مشخص می‌شود که انعکاس، به دلیل عدم تطبیق امپدانس رخ می‌دهد.

$$\rho = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2)$$

که در آن  $Z_1$  مقاومت ظاهری مشخصه بخش تغییر شکل یافته کابل و  $Z_0$  مقاومت ظاهری مشخصه کابل تغییر شکل نیافته هستند.

(Dowding et al., 1988) نشان دادند که حالت‌های مختلف تغییر شکل کابل را می‌توان تقریباً به صورت تغییرات ظرفیت خازنی و مقاومت ظاهری کابل مدلسازی کرد. برای تغییر شکل برشی، تغییر در ضریب انعکاس  $\rho$  به صورت تغییر موضعی در

نشان داد که TDR موقعیت‌های ناشی را به خوبی شناسایی می‌کند. همچنین Cataldo et al. (2013) بار دیگر با انجام یک سری آزمایش، توانایی روش TDR را در شناسایی نقاط نشست آب در لوله‌های غیر فلزی تازه نصب شده در زیر زمین مورد بررسی قرار دادند.

از دیگر کاربردهای متفاوت روش TDR می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ارزیابی ویژگی‌های دی‌الکتریک و اسپکتروسکوپیک مواد (Cataldo et al., 2007; Hager, 1994; Moradi and Abdipour, 2007; Nozaki and Bose, 1990)، کنترل کمی و کیفی مایعات (Cataldo et al., 2009a; Piuze et al., 2009)، بررسی روغن‌های گیاهی (Cataldo et al., 2009 and 2010)، اندازه‌گیری امپدانس (Schuet et al., 2011)، عیب‌یابی کابل‌ها (Bishop et al., 2011)، اندازه‌گیری رطوبت خاک (Griffiths et al., 2006; O'Connor and Dowding, 1999) و غیره. (Cataldo et al., 2008 and 2009b).

استفاده از تکنولوژی TDR برای تعیین سطح مشترک آب- هوا به ابتدای دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد (O'Connor and Dowding, 1999). استفاده از این روش برای اندازه‌گیری‌های صحرائی توسط Dowding and Huang (1994) انجام گرفت. در مطالعات بعدی وی کاربرد کابل‌های دورشته‌ای (twisted pair) و کابل‌های کوآکسیال با عایق هوا (air dielectric coaxial cable) را به عنوان سنجنده TDR با همدیگر مقایسه کرد (Dowding et al., 1996). نتایج کارهای Dowding نشان داد که کابل‌های کوآکسیال با دی‌الکتریک هوا افت سیگنال کمتری نسبت به کابل‌های دورشته‌ای دارند. بنابراین استفاده از آنها توانایی تشخیص محل عدم تطبیق امپدانس را، در شکل موج منعکس شده بالا می‌برد. همچنین کارهای انجام شده به وسیله واحد مهندسی ارتش آمریکا نیز استفاده از روش TDR را برای اندازه‌گیری سطح آب در چاه‌های مانیتورینگ به صورت ریموت (remote) بررسی کرده است (Nicholson et al., 1997).

(Fellner-Feldegg (1969) شاید اولین کسانی بودند که پیشنهاد دادند تا از

انعکاسی که به وسیله تستر کابل TDR قابل مشاهده است؛ به عوامل مختلفی از جمله نوع کابل بستگی دارد. مهم‌ترین فایده TDR این است که محل عیب با استفاده از زمان سیر و نوع عیب با استفاده از ویژگی‌های انعکاس، قابل تشخیص است. عیب، اساساً منجر به تغییر در ویژگی‌های خط انتقال و تغییر در امپدانس می‌شود که به وسیله‌ی دستگاه TDR قابل شناسایی هستند. فرض بر این است که دستگاه TDR یک ولتاژ پله‌ای با دامنه  $V_i$  ارسال می‌کند. با رسیدن این پالس به انتهای کابل، بخشی از ولتاژ منعکس می‌شود. ولتاژ منعکس شده به صورت ثابت انعکاس در دستگاه TDR نمایش داده می‌شود.

$$\rho = \frac{V_r}{V_t} \quad (1)$$

خوبی با تغییرات در مقاومت ظاهری مدلسازی می‌شود (رابطه ۲). تغییرات ایجاد شده در  $\rho$  که ناشی از تغییر شکل کششی است؛ به صورت یک فرورفتگی ظریف در شکل موج دیده می‌شود و تشخیص آنها نسبت به سیگنال ناشی از شکاف و برش مشکل‌تر است.

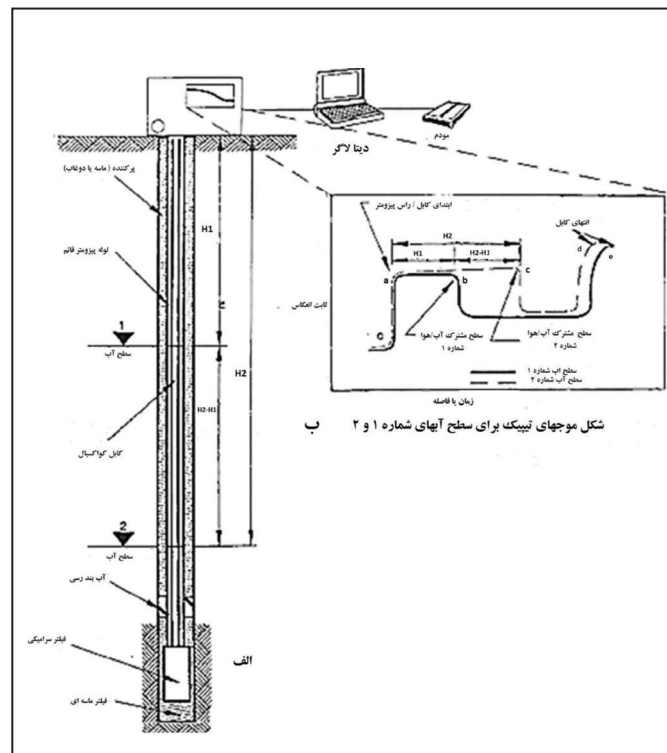
این مبانی برای مانتورینگ سطح آب نیز مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲- الف تصویر شماتیک یک پیزومتر را نمایش می‌دهد که کابل کواکسیال درون آن نصب شده و تولیدکننده پالس و sampler به آن متصل شده است. شکل ۲- ب شکل موج تیپیک پالس‌های منعکس شده از دو سطح آب در عمق‌های H1 و H2 را نشان می‌دهد (Dowding et al., 1996).

ظرفیت خازنی مدلسازی می‌شود و می‌توان آن را با رابطه زیر تخمین زد:

$$\rho = \Delta C \frac{Z_0}{2t_T} \quad (3)$$

که در آن  $\Delta C$  تغییر در ظرفیت خازنی در محل تغییر شکل کابل،  $Z_0$  مقاومت ظاهری مشخصه (امپدانس ویژه) کابل در شرایط بدون تغییر شکل و  $t_T$  زمان rise time ولتاژ، به‌طور معمول بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانوثانیه هستند.

تغییرات در  $\rho$  ناشی از برش به‌صورت مثلث‌های نوک تیز رو به پایین دیده می‌شود. دامنه این تغییر شکل‌های میخ‌مانند با میزان تغییر شکل برشی کابل، نسبت مستقیم دارد. تغییرات در ضریب انعکاس ناشی از تغییر شکل کششی کابل، به



شکل ۲- استفاده از TDR برای مانتورینگ آب زیرزمینی و شکل موج تیپیک آن.

### ۳- روش کار و تجهیزات

و آهک در موقعیت سرسره تخلیه‌کننده تحتانی سد داریان پتانسیل‌هایی برای لغزش ایجاد کرده است. به همین دلیل کارفرما و مشاور پروژه تصمیم به نصب لوله‌های انحراف‌سنج در این ترانشه‌ها گرفتند. پژوهشگران تصمیم گرفتند تا با نصب کابل کواکسیال RG-59/U به همراه لوله‌های انحراف‌سنج توانایی و قابلیت روش TDR را در تشخیص تغییر شکل‌های زیرسطحی ارزیابی کنند.

در خصوص انتخاب کابل RG-59/U در میان انبوه متنوع کابل‌های کواکسیال لازم است ذکر شود که محققان مختلف، نتایج متضادی در مورد استفاده از کابل RG-59/U در کاربردهای میدانی گزارش کرده‌اند. Kane (1998) کابل RG-59/U را در تعدادی از گمانه‌های یک سد خاکی نصب کرد. نتایج گرفته شده توسط وی نشان داد که این نوع کابل به خوبی نسبت به تغییر شکل‌های زمین واکنش نشان می‌دهد. در مقابل، محققان دانشگاه نورث وسترن نشان دادند که در مقایسه با انواع کابل‌های سخت‌تر و با قطر بزرگ‌تر، نتایج کابل RG-59/U و کابل‌های انعطاف‌پذیر مشابه با چنین قطر کوچکی قابل اعتماد نیست (O'Connor, 2001). اما با توجه به قیمت بسیار پایین و فراوانی این نوع کابل، محققین تصمیم گرفتند که از آن به عنوان سنسور TDR استفاده کنند.

تجهیزات آزمایش شامل یک دستگاه اندازه‌گیری TDR ساخت شرکت Soil moisture مدل 6050x1، کابل دورشته‌ای مخارباتی (برای اندازه‌گیری سطح آب) و کابل کواکسیال RG-59/U (برای مانتورینگ حرکات شیب) است که به عنوان سنسور TDR مورد استفاده قرار گرفتند. این دستگاه یک پالس پله‌ای با دامنه ۱/۵ ولت با زمان rise time ۱۲۰ پیکوثانیه تولید می‌کند. خروجی دستگاه به‌صورت پورت BNC است و امپدانس خروجی آن ۵۰ اهم است (شکل ۳).

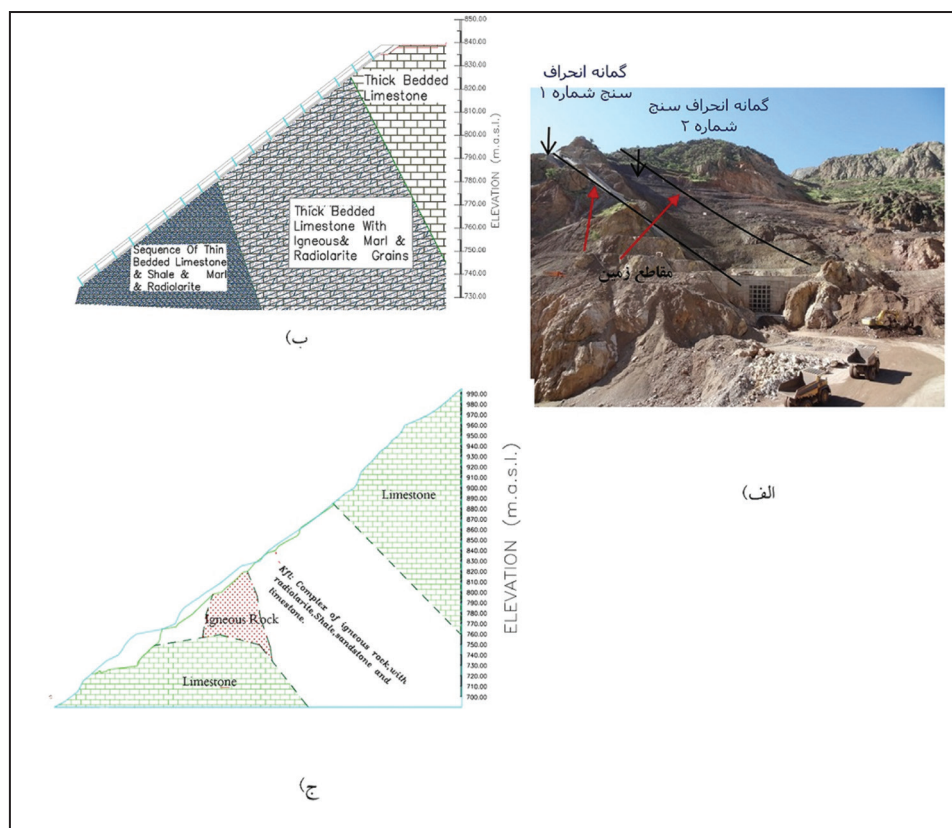
#### ۳-۱. روش نصب کابل‌های coaxial برای تشخیص تغییر شکل زمین

در این پژوهش کابل کواکسیال RG-59/U در مجاورت لوله‌های انحراف‌سنج سد داریان نصب شد. این لوله‌ها و کابل‌ها در یکی از مناطق مستعد لغزش در ساختگاه سد داریان نصب شده‌اند که موقعیت آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مراحل کار در این پژوهش به شرح زیر است:

گمانه‌هایی با قطر ۱۱۶ میلی‌متر برای نصب کابل‌های TDR حفاری شدند. این تحقیق کابل‌های TDR به‌صورت چسبیده یا attached به لوله‌های انحراف‌سنج نصب شدند. بعد از نصب لوله‌ها و کابل‌ها، گمانه‌ها با دوغاب سیمانی بتونیتی پر شدند. همانطور که در شکل ۴ نمایش داده شده است؛ تناوب لایه‌های رادیولاریتی



شکل ۳- دستگاه رطوبت سنج TDR شرکت Soil moisture مدل 6050x1.



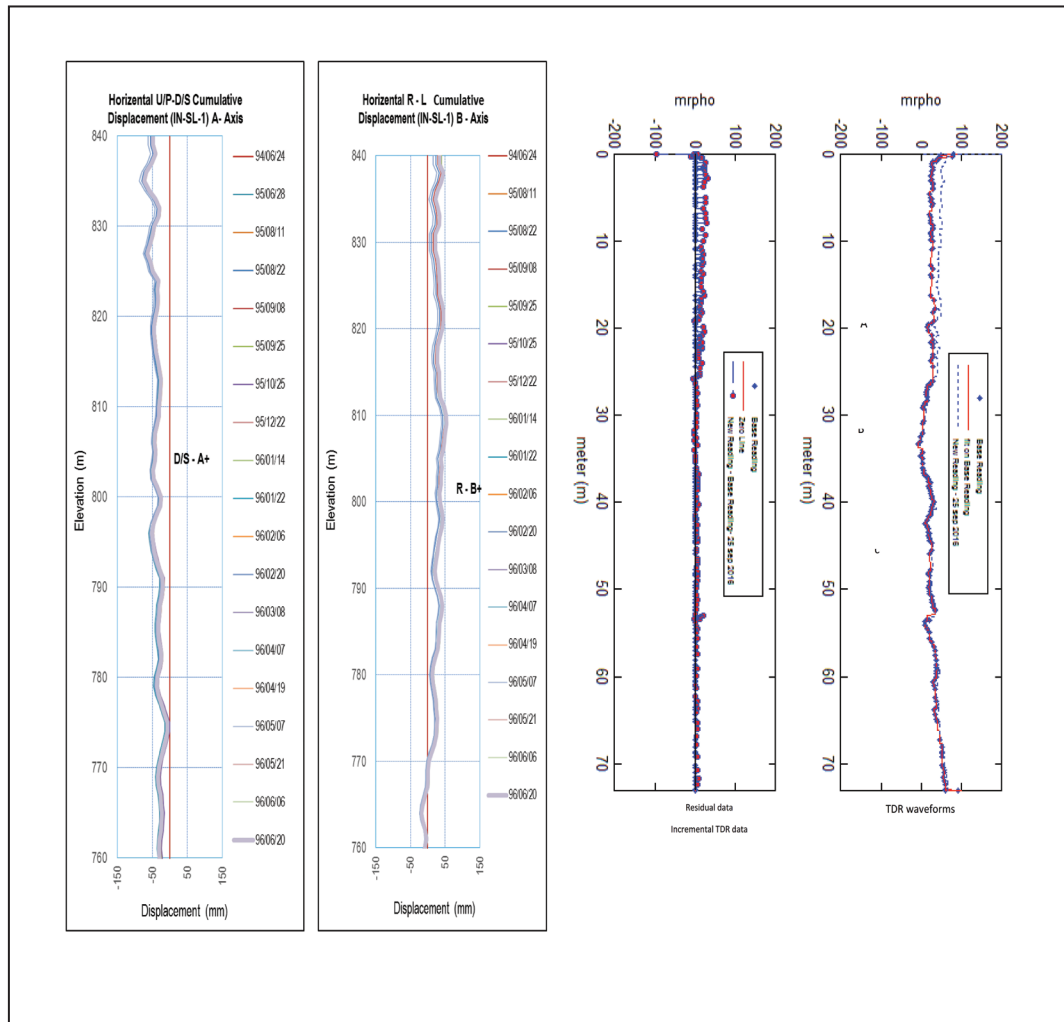
شکل ۴- الف) توده‌ی رادیولاریتی مشرف به تخلیه‌کننده‌ی تحتانی و محل گمانه‌های انحراف سنج؛ ب) نیمرخ زمین‌شناسی توده‌ی مورد مطالعه در محل گمانه INSL01؛ ج) مقطع زمین‌شناسی در محل گمانه INSL02.

مرداد و ۴ مهرماه ۱۳۹۵ انجام گرفته است. بنابراین قرائت ۱۵ مرداد ماه می‌تواند به عنوان قرائت صفر برای مقایسه تغییرات شکل موج TDR با گذشت زمان مورد استفاده قرار گیرد. نتایج قرائت‌های اخذ شده از کابل‌های کواکسیال و لوله‌های انحراف سنج در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. با توجه به مطالب بخش متون علمی، با اخذ شکل موج TDR از هر کدام کابل‌ها، تعیین ابتدا و انتهای کابل و تعیین سرعت موج (Vp) در کابل، می‌توان داده‌های زمانی را به فاصله تبدیل کرد.

در مطالعه حاضر دو گمانه انحراف سنج در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۴ حفاری شدند. انحراف سنج شماره ۱ با نام INSL01 در تاریخ ۹۴/۰۶/۲۴ نصب شد و انحراف سنج شماره ۲ با نام INSL02 در تاریخ ۹۴/۰۹/۰۸ نصب شد. در همان زمان نیز کابل‌های TDR به همراه لوله‌های انحراف سنج نصب شدند. قرائت لوله‌های انحراف سنج بعد از نصب آغاز شد؛ اما به دلیل در اختیار نبودن یونیت TDR اخذ قرائت‌های TDR با تأخیر انجام شد. تا کنون دو قرائت TDR در تاریخ‌های ۱۵

تغییر شکل‌های میخ مانند (spike) و بخش‌هایی نیز تغییراتی شبیه به فرورفتگی نشان می‌دهند (شکل ۵).

اصول انجام این عملیات در بخش ۳-۲ توضیح داده شده است. نتایج قرائت‌های اخذ شده برای گمانه INSL01 نشان می‌دهد که بخش‌هایی از شکل موج TDR

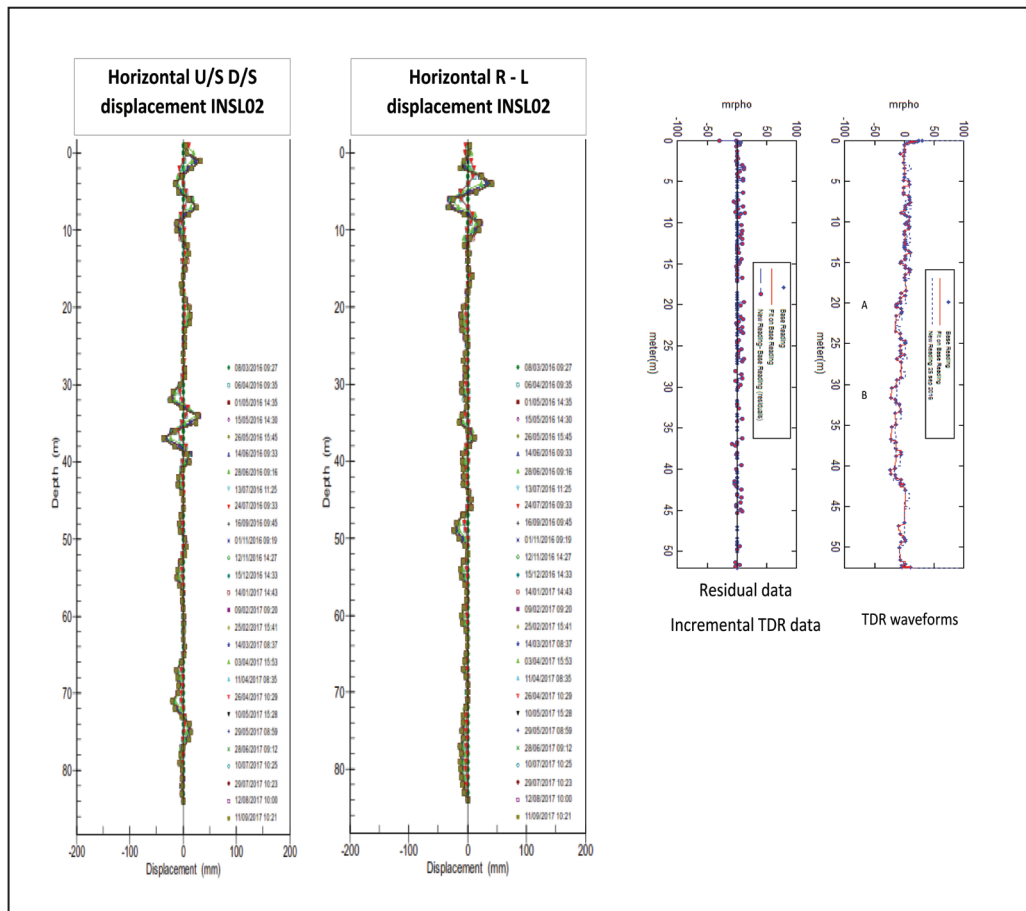


شکل ۵- مقایسه شکل موج‌های TDR داده‌های انحراف‌سنج برای انحراف‌سنج شماره ۱.

در این پژوهش، محققین با استفاده از تکنیک داده‌های باقیمانده (در بخش ۴ توضیح داده شده است) و با استفاده از یکی از جعبه ابزارهای نرم‌افزار متلب با نام curve fitting toolbox گراف‌هایی تولید کردند که حاصل کسر نمودن داده‌های گراف قرائت صفر از قرائت جدید و بیانگر میزان تغییرات ثابت انعکاس یک نقطه با عمق مشخص نسبت به قرائت مناسب است. نمونه‌ای از این گراف‌ها با در نظر گرفتن قرائت ۱۵ مرداد ماه به عنوان قرائت مبنا در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. این گراف‌ها تقریباً معادل گراف‌های جابجایی‌های جزئی (displacement incremental) لوله‌های انحراف‌سنج هستند.

در شکل ۶ نیز زون‌های A و B در شکل موج TDR در عمق‌های ۲۰ تا ۲۵ و ۳۰ تا ۴۰ متر بر گراف جابجایی‌های جزئی (incremental) منطبق است. البته برای درک بهتر و عمیق‌تر موضوع، باید قرائت‌های TDR در زمان‌های طولانی‌تری انجام شود تا توانایی این روش در تشخیص سطوح لغزش سنجیده شود. بدیهی است که چند قرائت انجام شده توسط این محققین، با توجه به تمامی محدودیت‌های پیش‌گفته، کفایت نمی‌کند.

تغییر شکل‌های میخ مانند (نقاط A و C) نشان‌دهنده برش و تغییرات تشد مانند (نقطه B) نشان‌دهنده کشش است. محل تغییر شکل‌های برشی A و C با جابه‌جایی‌های مشاهده شده در گراف جابجایی‌های تجمعی در عمق‌های ۲۳ و ۵۴ متر منطبق است. تغییرات شکل موج در زون B با تغییرات عمق ۳۰ تا ۴۰ متری در گراف جابجایی‌های تجمعی انطباق دارد. در این عمق، بزرگی منطقه تغییر شکل منجر به خمش و کشش کابل به جای برش شده است. البته از آنجا که شکل موج زمان نصب این کابل‌ها وجود ندارد؛ ممکن است برخی از این تغییرات بر اثر آسیب‌دیدگی کابل قبل از نصب و یا حین نصب به وجود آمده باشد که با توجه به انطباق این تغییرات با گراف جابجایی‌ها کمی دور از ذهن به نظر می‌رسد. از آنجا که با گذر زمان و افزایش تدریجی تغییر شکل‌های زمین، آسیب‌دیدگی‌های کابل و تغییرات شکل موج افزایش می‌یابد و یا ممکن است نقاط تغییر جدیدی به آن اضافه شود؛ بنابراین همیشه باید گراف‌های اخذ شده TDR را در زمان‌های مختلف با گراف قرائت صفر مقایسه کرد.

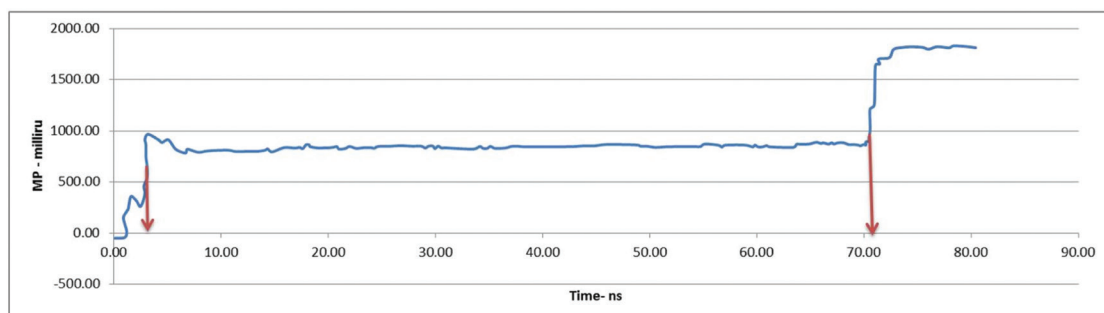


شکل ۶- مقایسه شکل موج‌های TDR و داده‌های انحراف سنج برای انحراف سنج شماره ۲.

### ۳-۲. روش کار در شناسایی سطح آب

حسب mrho 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 نانو ثانیه است. با توجه به طول ۱۳/۶۵ متری کابل، سرعت موج الکترومغناطیس در آن حدود ۲۰/۲۳۴ سانتی متر بر نانو ثانیه و بر اساس رابطه ۳ شاخص VOP این کابل ۰/۶۷ است؛ یعنی موج الکترومغناطیس در این کابل با سرعتی معادل ۶۷ درصد سرعت نور سیر می‌کند.

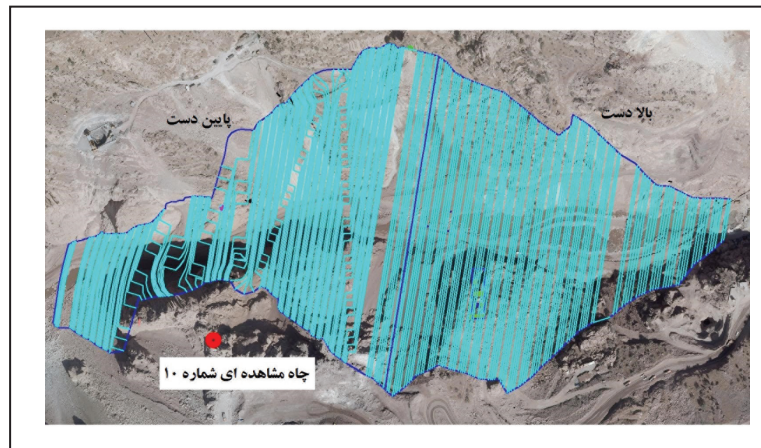
در این پژوهش برای تشخیص سطح آب از کابل دورشته‌ای با مهار فولادی به عنوان سنسور TDR استفاده شده است. از آنجا که سرعت سیر موج الکترومغناطیس در کابل مذکور نامشخص بود؛ ابتدا با اتصال ۱۳/۶۵ متر از کابل مذکور به وسیله رابط تبدیل دورشته‌ای به BNC به دستگاه TDR و ارسال پالس الکترومغناطیس، شاخص VOP کابل تعیین شد. در همین راستا شکل موج TDR مربوط به ارسال پالس درون کابل مذکور در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل تغییرات ثابت انعکاس بر



شکل ۷- موج TDR برای کابل دو رشته‌ای مخابراتی و تعیین ابتدا و انتهای کابل.

پس از آبیگری سد داریان، در تاریخ ۱۳۹۵/۲/۲۸ تراز آب در مخزن به تراز نرمال رسید. پس از مدت حدود دو ماه در تاریخ ۱۳۹۵/۴/۲۹ تخلیه مخزن شروع شد. در زمان تخلیه مخزن، سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای به صورت روزانه قرائت شد. در چاه مشاهده‌ای LOW 10 که موقعیت آن در شکل ۸ نمایش داده شده است؛ دو بار اندازه‌گیری سطح آب به روش TDR انجام پذیرفت. در هر قرائت، کابل دورشته‌ای داخل گمانه فرستاده می‌شود و با ارسال پالس الکترومغناطیس به درون کابل، شکل موج سیگنال برگشتی به صورت ثابت انعکاس بر حسب  $\rho_{mr}$  در برابر زمان بر حسب نانوثانیه ثبت می‌شود.

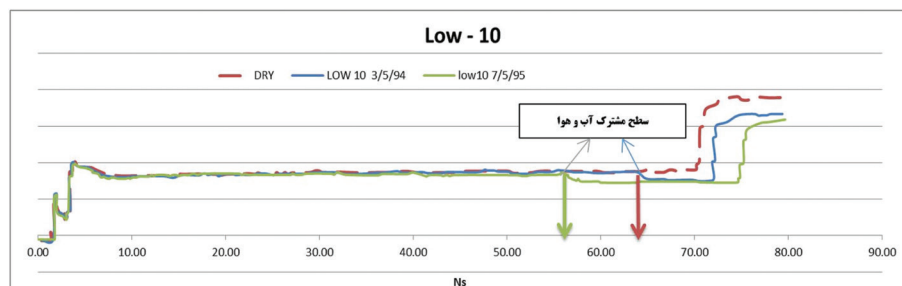
در این تحقیق، نخست یک حلقه از چاه‌های مشاهده‌ای سد داریان (چاه LOW 10) انتخاب شد که موقعیت آن در شکل ۸ نشان داده شده است. سپس دستگاه TDR و کابل ۱۳/۶۵ متری به صورت یک دستگاه اندازه‌گیر سطح آب مورد استفاده قرار گرفت و پس از فروبردن کابل در چاه، شکل موج TDR مربوط به زمان‌های مختلف استخراج شد. با توجه به تغییر ثابت انعکاس در سطح مشترک آب- هوا، این سطح به راحتی قابل شناسایی است (شکل ۳). پس از شناسایی سطح مشترک و استخراج فاصله زمانی مربوط به آن، با ضرب کردن زمان در سرعت مشخصه موج الکترومغناطیس در کابل دورشته‌ای، عمق سطح آب زیرزمینی قابل استخراج است.



شکل ۸- موقعیت چاه مشاهده‌ای مورد استفاده جهت اندازه‌گیری TDR.

از آن در تماس با آب باشد؛ شکل موج آن ثبت شد. این برداشت به عنوان قرائت شاهد یا قرائت صفر - مربوط به شرایط خشک - در شکل‌ها و نمودارها نمایش داده می‌شود.

در شکل ۹ شکل موج TDR برای چاه مشاهده‌ای LOW 10 نمایش داده شده است. قبل از شروع قرائت‌ها، کابل دورشته‌ای در خارج از چاه پهن شد و بدون آنکه نقطه‌ای



شکل ۹- شکل موج TDR برای چاه مشاهده‌ای LOW 10؛ داده‌های پردازش نشده.

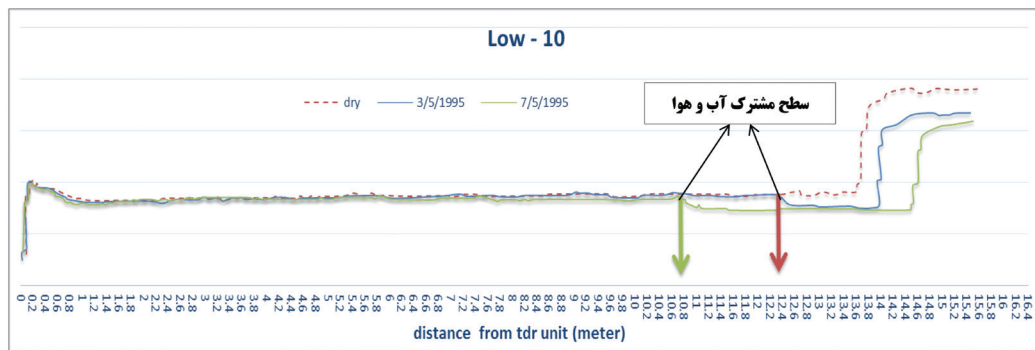
دارد. از آنجا که در این تحقیق فاصله طولی از سر گمانه تا سطح مشترک آب- هوا (سطح آب) مد نظر بوده و در این فاصله نیز اطراف کابل را هوا فرا گرفته است. از همان سرعت حرکت ۲۰/۲۳۴ سانتی‌متر بر نانوثانیه استفاده شده است.

بنابراین برای تبدیل فاصله‌های زمانی به فاصله طولی، کلیه زمان‌های ثبت شده در سرعت مشخصه موج الکترومغناطیس در کابل دورشته‌ای ضرب می‌شود. البته از کلیه زمان‌های مذکور حدود ۳ نانوثانیه کسر می‌شود. این مقدار، مدت زمانی است که از تولید پالس تا ورود آن به کابل طول می‌کشد. بر این اساس، برای چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰ در هر کدام از قرائت‌های انجام شده فاصله سطح مشترک آب- هوا از نقطه ورود موج به کابل (دستگاه TDR) محاسبه شده است. برای قرائت مورخه ۹۵/۵/۳ سطح آب در فاصله طولی ۱۲/۳ متری از یونیت TDR قرار دارد و در قرائت مورخه ۹۵/۵/۷ سطح آب در فاصله طولی ۱۰/۸۴ از یونیت TDR قرار دارد (شکل ۱۰). در

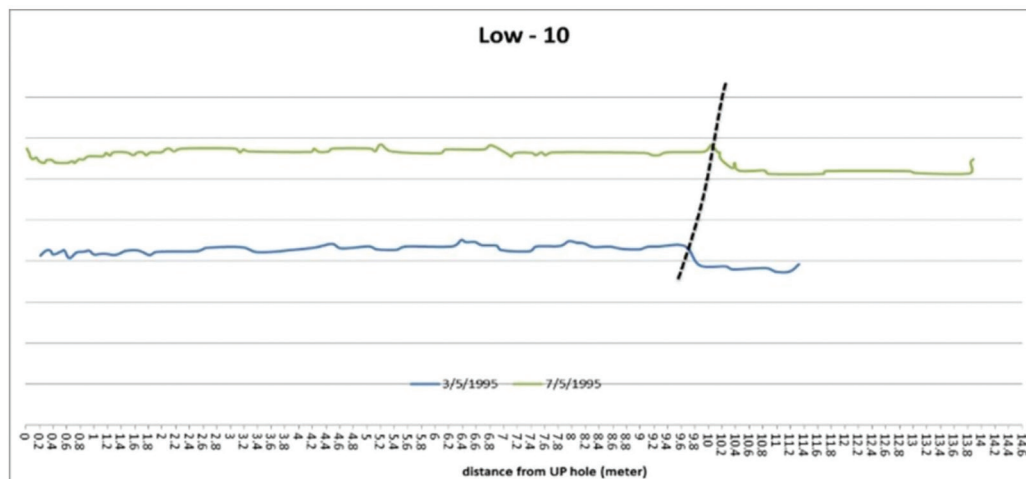
بر اساس شکل موج TDR چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰، در سطح مشترک آب- هوا به علت تغییر دی‌الکتریک مصالح دربرگیرنده کابل دورشته‌ای، تغییر محسوسی در ثابت انعکاس در مقایسه با قرائت صفر - شرایط خشک - رخ می‌دهد. برای قرائت مورخه ۹۵/۵/۳ تغییر محسوس ثابت انعکاس در فاصله زمانی ۵۶/۵۸ نانوثانیه رخ داده و در قرائت مورخه ۹۵/۵/۷ این تغییر در فاصله زمانی ۶۳/۸۱ نانوثانیه شده است. پالس الکترومغناطیس در طولی از کابل که محیط اطراف آن هواست؛ با سرعت تعیین شده در بخش ۳ یعنی ۲۰/۲۳۴ سانتی‌متر بر نانوثانیه حرکت می‌کند. در طولی از کابل که در آب فروخته است سرعت حرکت موج کاهش و طول ظاهری کابل در این بخش افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). برای رفع مشکل افزایش طول ظاهری کابل به دلیل ثابت فرض کردن سرعت حرکت موج و افزایش زمان حرکت آن در بخش مغروق کابل، بایستی سرعت واقعی موج در بخشی از کابل تعیین و اعمال شود که در زیر آب قرار

سطح آب در فاصله طولی ۹/۶۵ متری سر چاه قرار دارد و در قرائت مورخه ۹۵/۵/۷ سطح آب در فاصله طولی ۱۰/۰۴ از سر چاه قرار دارد (شکل ۱۱). این نتایج کاملاً با اندازه‌گیری‌های انجام شده با سوندهای الکتریکی مرسوم برابر است.

هر کدام از قرائت‌ها همیشه مقداری از طول کابل دورشته‌ای در فاصله بین یونیت TDR و سر چاه قرار دارد. با پردازش شکل موج‌های TDR و کسر مترآژ کابل مورد اشاره، سطح آب در چاه شماره ۱۰ استخراج خواهد شد. برای قرائت مورخه ۹۵/۵/۳



شکل ۱۰- شکل موج TDR برای چاه مشاهده‌ای Low 10؛ تبدیل داده‌های زمان به فاصله از یونیت TDR.



شکل ۱۱- تعیین سطح آب در چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰؛ داده‌های پردازش شده.

#### ۴- طراحی الگوریتم

##### ۴-۱. الگوریتم شناسایی نقاط تغییر شکل

در این تحقیق پژوهشگران الگوریتمی برای مقایسه اتوماتیک شکل موج گرفته شده از TDR در هر زمانی با قرائت مینا جهت شناسایی نقاط تغییر شکل کابل ارائه کردند که فرم کلی آن در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

مبانی این پژوهش، بر تحلیل داده‌های باقیمانده یا Residual Analysis استوار است. از دیدگاه علم ریاضی، باقیمانده به عنوان تفاوت بین مقادیر داده‌های پاسخ و مقادیر داده‌های پیش‌بینی شده برای پاسخ در یک سیستم تخمین و پیش‌بینی تعریف می‌شود.

$$R = f - f' \quad (4)$$

مفهوم باقیمانده در این پژوهش، اختلاف بین قرائت زمان‌های مختلف نسبت به منحنی برازش شده بر داده‌های قرائت مناسب است. گراف‌های TDR ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶ با این الگوریتم به دست آمده است. این کار با یکی از جعبه‌ابزارهای نرم‌افزار متلب انجام شد و در نهایت بعد از تنظیمات مناسب، کد مربوطه استخراج و با نام TDR جهت استفاده در قرائت‌های بعد ذخیره شد.

##### ۴-۲. الگوریتم شناسایی سطح آب

از آنجا که اساس کار تشخیص سطح آب بر مبنای TDR، تغییر محسوس ثابت

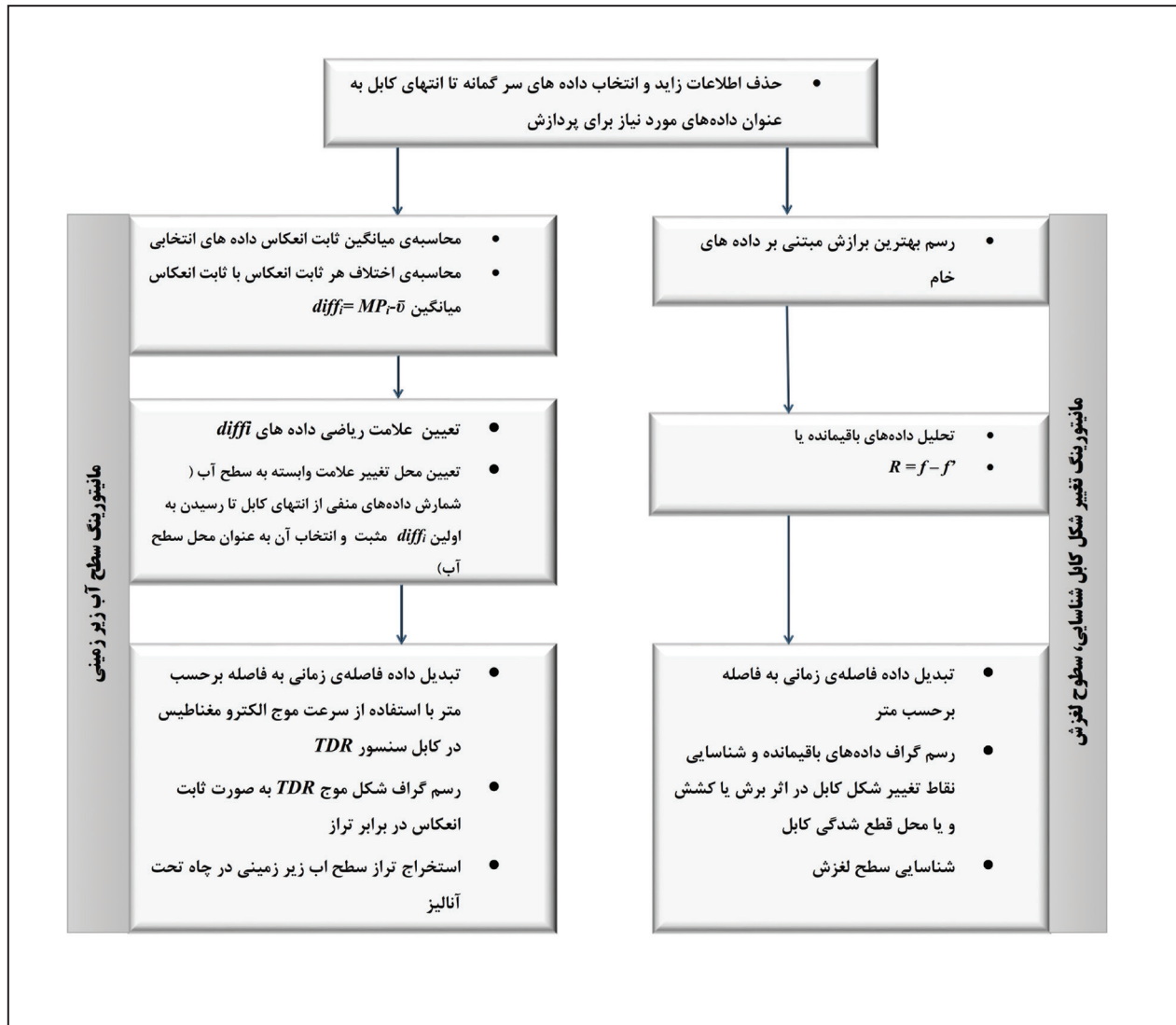
انعکاس در سطح مشترک آب- هواست؛ برای یافتن اتوماتیک این سطح مشترک، نویسندگان از اختلاف ثابت انعکاس داده‌های انتخاب شده با میانگین این داده‌ها استفاده کردند (رابطه ۵).

$$diff_i = MP_i - \bar{v} \quad (5)$$

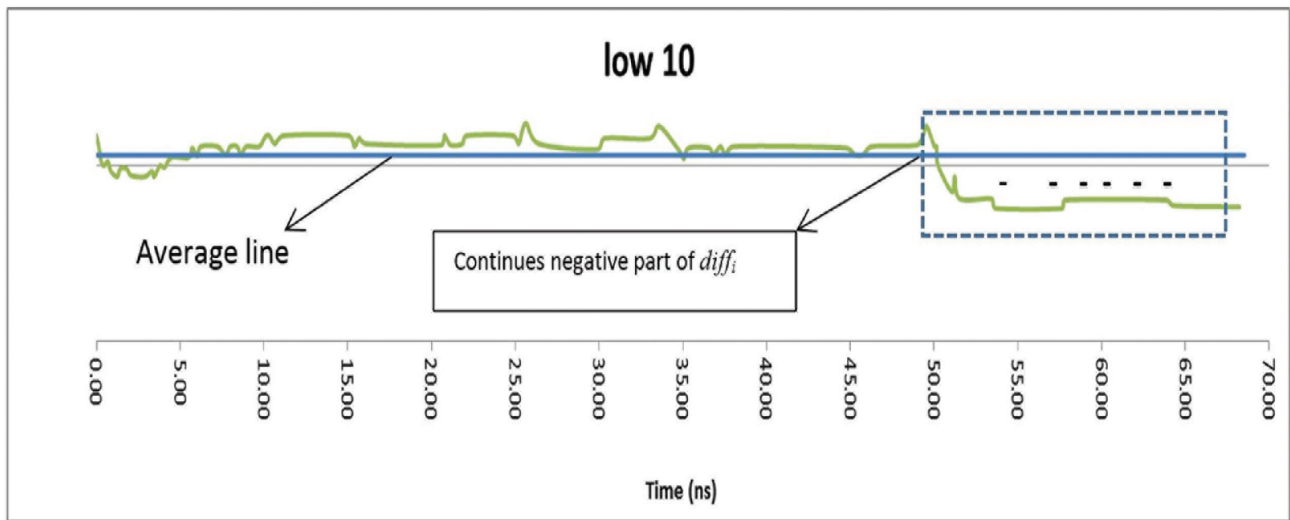
که در آن  $MP_i$  میزان ثابت انعکاس داده  $i$ ،  $\bar{v}$  میانگین ثابت انعکاس داده‌های انتخاب شده و  $diff_i$  اختلاف داده  $i$  با مقدار میانگین هستند.

علامت ریاضی  $diff_i$  در بخش‌هایی از کابل که درون آب قرار گرفته است؛ تحت تأثیر افت ثابت انعکاس منفی خواهد بود و در سایر بخش‌ها علامت آن عمدتاً مثبت خواهد شد (شکل ۱۳). به عبارت دیگر برای داده‌های انتخاب شده از سطح آب تا انتهای کابل، علامت ریاضی  $diff_i$  به صورت پیوسته منفی خواهد بود. با استفاده از این ویژگی می‌توان سطح مشترک آب- هوا را شناسایی کرد که همان نقطه تغییر است. پس از شناسایی سطح آب و استخراج زمان مربوط به آن، با استفاده از سرعت موج در کابل دورشته‌ای می‌توان عمق سطح آب در چاه را به دست آورد؛ کلیه داده‌های زمانی را به فاصله و تراز تبدیل کرد و شکل موج TDR را به صورت تغییرات ثابت انعکاس در برابر تراز نمایش داد (شکل ۱۴). فرم کلی این الگوریتم در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

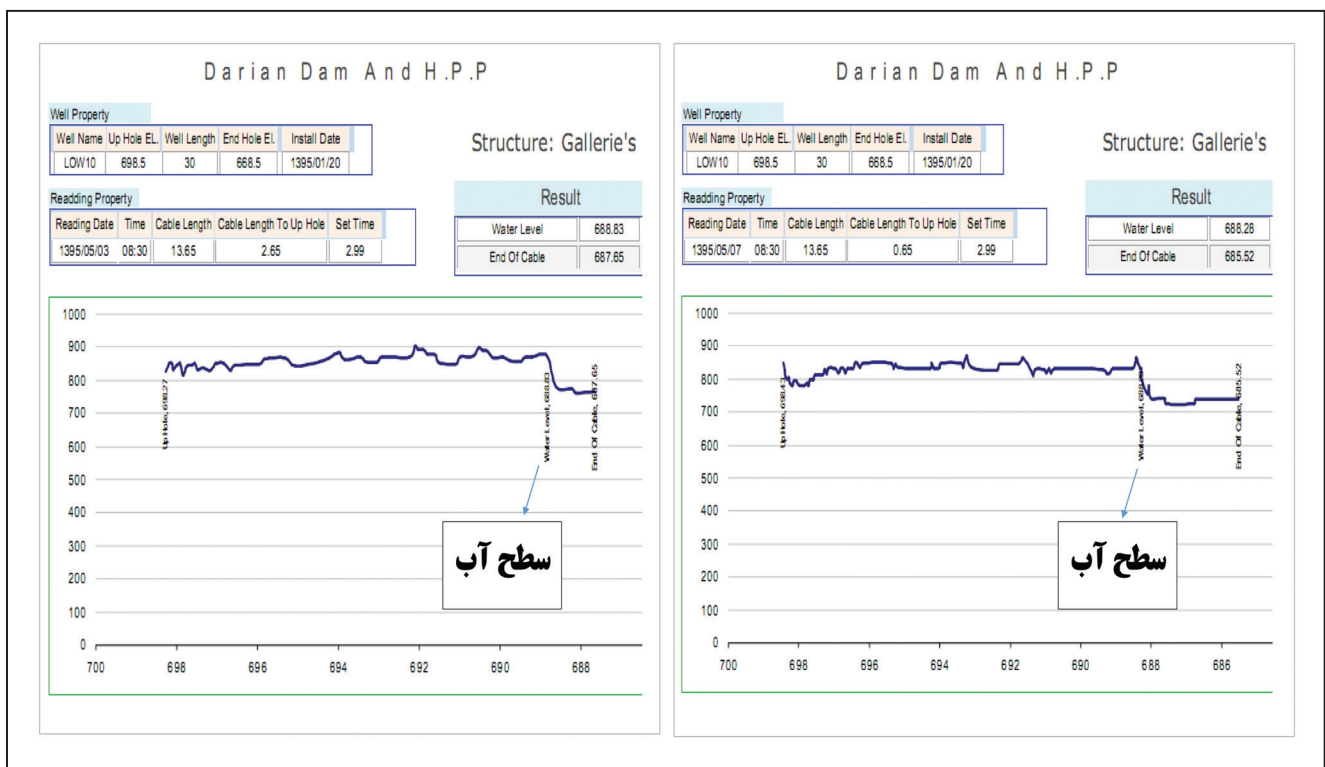




شکل ۱۲- الگوریتم طراحی شده توسط محققین برای شناسایی سطوح لغزش و سطح آب زیرزمینی.



شکل ۱۳- پردازش داده‌های انتخاب شده برای تعیین اتوماتیک سطح آب.



شکل ۱۴- پردازش داده‌های انتخاب شده چاه مشاهده‌ای LOW 10 برای تعیین اتوماتیک سطح آب با نرم‌افزار طراحی شده توسط نویسندگان بر اساس الگوریتم شکل ۱۳.

## ۵- بحث

تکتولوژی TDR به همراه کابل‌های کواکسیال و کابل‌های دورشته‌ای به خوبی برای تشخیص تغییر شکل‌های زمین و تعیین سطح مشترک آب- هوا در چاه‌های مشاهده‌ای سد داریان به کار گرفته شده است. استفاده از این روش میزان دخالت خطاهای انسانی در اندازه‌گیری‌ها را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد. نویسندگان در این طرح تحقیقاتی برای بررسی توانایی TDR در تشخیص تغییر شکل‌های زمین از کابل RG59/U به دلیل ارزانی و در دسترس بودن استفاده کردند.

در انحراف سنج شماره ۱ محل تغییر شکل‌های برشی A و C با حرکات مشاهده شده در گراف جابه‌جایی‌ها در عمق‌های ۲۳ و ۵۴ متر منطبق است و تغییرات شکل موج در زون B نیز با حرکات مشاهده شده در عمق ۳۰ تا ۴۰ متر گراف جابه‌جایی‌ها منطبق است. در زون B بزرگی منطقه تغییر شکل منجر به خمش و کشش کابل به جای برش شده است. از طرف دیگر، نصب همزمان کابل‌های کواکسیال و لوله‌های انحراف‌سنج در یک گمانه ممکن است موجب کاهش حساسیت سنسور TDR در برابر برش و تمایل به تغییر شکل خمشی و کششی، به جای برش شود. کابل کواکسیال در هنگام نصب به قسمت‌هایی از لوله چسبیده است. این لوله‌ها نسبتاً صلب هستند و واکنش آنها به حرکات برشی زمین در زون‌های برشی کوچک، به صورت خمش خواهد بود. اولین انعکاس کابل هنگامی رخ می‌دهد که میزان خمش آن از شعاع خمش مینیمم مجاز کابل بیشتر باشد. حداقل شعاع خمش کابل معمولاً یکی از ویژگی‌های کابل است که توسط کارخانه سازنده ارائه می‌شود. هنگامی که لوله‌های انحراف‌سنج در یک زون برشی دچار خمش می‌شوند میزان خمش لوله‌ها قطعاً از شعاع خمش کابل کمتر است. اما با توجه به آنکه کابل در مرزهای زون برشی فیکس (ثابت) است؛ خمش لوله‌های انحراف‌سنج در اثر جابه‌جایی‌های برشی منجر به کشش کابل می‌شود. البته از آنجا که شکل موج زمان نصب این کابل‌ها وجود ندارد (قرائت‌های TDR با تأخیری یک ساله پس از نصب کابل‌ها آغاز شد)؛ ممکن است برخی از این تغییرات در اثر آسیب دیدگی کابل قبل از نصب و یا حین نصب به وجود آمده باشد که البته با توجه به انطباق این تغییرات با گراف جابه‌جایی‌های جزئی (incremental) کمی دور از ذهن به نظر می‌رسد. در انحراف‌سنج شماره ۲ وضعیت همانند گمانه شماره ۱ است. به نظر می‌رسد تغییر شکل‌ها در سایت داریان هنوز به اندازه‌ای نیست که به صورت مشخص روی کابل‌ها تأثیرگذار باشد و منجر به تغییر بسیار عمده‌ای در میزان ثابت انعکاس شکل موج‌های TDR شود. بنابراین با گذر زمان و افزایش تدریجی تغییر شکل‌های زمین، آسیب‌دیدگی‌های کابل و تغییرات شکل موج TDR افزایش می‌یابد و یا نقاط تغییر یافته جدیدی اضافه می‌شود. بنابراین همیشه باید گراف‌های اخذ شده TDR را در زمان‌های مختلف با گراف قرائت صفر مقایسه کرد. به همین منظور محققین، الگوریتمی را طراحی کردند که استفاده از آن انجام این مقایسه را سریع‌تر و ساده‌تر می‌کند. هر چند روش TDR قادر به تشخیص جهت حرکت نیست و کمی کردن آن علیرغم تلاش‌های تعدادی از محققین هنوز در حاله‌ای از ابهام قرار دارد اما به نظر می‌رسد به صورت کیفی نیز بتواند روشی کارا و جایگزینی نسبتاً ارزان برای لوله‌های انحراف‌سنج باشد. در این تحقیق برای تعیین سطح آب از ۱۳/۶۵ متر کابل دورشته‌ای به عنوان سنسور TDR استفاده شد. ابتدا با ارسال پالس الکترومغناطیس درون این کابل در شرایط خشک

و تعیین زمان گذر موج از آن، شاخص VOP آن تعیین شد. سپس با پردازش شکل موج‌های TDR اخذ شده از چاه مشاهده‌ای شماره ۱۰ سد داریان سطح آب محاسبه شد. از آنجا که پردازش داده‌ها به صورت دستی نیاز به پرسنل با تجربه و متخصص دارد. برای سهولت کار، الگوریتمی برای محاسبه اتوماتیک سطح آب از شکل موج‌های TDR طراحی شد. از آنجا که روش TDR می‌تواند قابلیت ثبت اطلاعات سطح آب به صورت زمان-پیوسته را هم داشته باشد؛ استفاده از این روش و الگوریتم طراحی شده برای آن، می‌تواند به معنی استفاده از یک روش ارزان و بادوام‌تر به عنوان جایگزینی برای مبدل‌های فشار و لوله‌های انحراف‌سنج در سد داریان باشد. ساده‌ترین برتری TDR نسبت به مبدل‌های الکترونیکی فشار این است که در روش TDR دستگاه اندازه‌گیری در بالای گمانه قرار می‌گیرد و در صورت هرگونه خرابی، امکان تعمیر و تعویض آن وجود دارد. اما در مبدل‌های الکترونیکی فشار دستگاه اندازه‌گیری درون گمانه قرار می‌گیرد و در صورت خرابی امکان دسترسی به آن وجود ندارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

تکتولوژی TDR به همراه کابل‌های کواکسیال به خوبی برای تشخیص تغییر شکل‌های زمین در توده سنگ‌های مستعد لغزش در داریان مورد استفاده قرار گرفته است. این روش جایگزینی ارزان و دقیق برای لوله‌های انحراف‌سنج است. تکنیک TDR در شناسایی لغزش‌های برشی متمرکز و لوله‌های انحراف‌سنج در شناسایی لغزشی کلی و بزرگ، کارایی بهتری دارند.

تکتولوژی TDR برای تعیین سطح مشترک آب- هوا در چاه‌های مشاهده‌ای سد داریان به کار گرفته شده است و این به معنی روشی نسبتاً ارزان برای جایگزینی مبدل‌های فشار و سوندهای الکترونیکی است.

در این تحقیق برای تفسیر سریع و دقیق شکل موج‌های TDR در زمینه تشخیص تغییر شکل‌های زمین و تعیین سطح آب زیرزمینی، الگوریتم‌هایی کاملاً بومی طراحی شد که امکان دخالت عوامل انسانی را به حداقل می‌رساند.

روش TDR قابلیت ثبت اطلاعات تغییر شکل‌های زمین و سطح آب زیرزمینی را به صورت زمان-پیوسته دارد. همچنین در این روش کابل TDR به صورت یک سنسور پیوسته عمل می‌کند و دقت بین دو اندازه‌گیری تابع زمان  $rise\ time$  سیگنال است که کمتر از چند سانتی‌متر است.

روش TDR قادر به شناسایی جهت حرکات زمین نیست و تشخیص مقدار جابه‌جایی نیز به صورت کیفی و از روی مقدار تغییرات ثابت انعکاس انجام می‌پذیرد. اگر چه کاربرد TDR در زمینه شناسایی تغییر شکل‌های زمین هنوز کاملاً استاندارد نشده است و ابهاماتی دارد؛ اما در هر صورت جایگزینی ارزان و مناسب برای لوله‌ها و پروب گران‌قیمت انحراف‌سنج است.

کاربرد این روش اندازه‌گیری، روزه جدیدی در مقابل زمین‌شناسان و مهندسیین مکانیک خاک و سنگ می‌گشاید تا بتوانند در مقایسه با سایر ابزارهای اندازه‌گیری گران‌قیمت با هزینه نسبتاً پایین‌تری، به طراحی اندازه‌گیری‌های مورد نیاز خود در طرح‌های مطالعاتی و پژوهشی اقدام کنند.

## References

- Bishop, J., Pommerenke, D. and Chen, G., 2011- A rapid-acquisition electrical time-domain reflectometer for dynamic structure analysis, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (2), 655–661.
- Cataldo, A., Cannazza, G., Benedetto, E. D. and Giaquinto, N., 2012- Experimental validation of TDR-based system for measuring leak distances in buried metal pipes. *Journal of Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 132, 71-90.
- Cataldo, A., Cannazza, G., Benedetto, E. D., Giaquinto, N. and Savino, M., 2013- An inverse validation for detecting pipe leaks with a TDR based method” 4th Imeko TC19 Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements Protecting Environment, Climate Changes and Pollution Control, Lecce, Italy.
- Cataldo, A., Catarinucci, L., Tarricone, L., Attivissimo, F. and Piuze, E., 2009a- A combined TD-FD method for enhanced reflectometry measurements in liquid quality monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 10, 3534-3543.
- Cataldo, A., Monti, G., De Benedetto, E., Cannazza, G. and Tarricone, L., 2009b- A noninvasive resonance-based method for moisture content evaluation through micro strip antennas. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 5, 1420-1426.
- Cataldo, A., Monti, G., De Benedetto, E., Cannazza, G. and Tarricone, L., 2008- A non-invasive approach for moisture measurements through patch antennas," *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf.*, 1012-1015, Victoria, BC.
- Cataldo, A., Piuze, E., Cannazza, G. and De Benedetto, E., 2007- Dielectric spectroscopy of liquids through a combined approach: evaluation of the metrological performance and feasibility study on vegetable oils. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, No. 10, 1226-1233.
- Cataldo, A., Piuze, E., Cannazza, G. and De Benedetto, E., 2012- Classification and adulteration control of vegetable oils based on microwave reflectometry analysis. *Journal of Food Engineering*, Vol. 112, No. 4, 338-345.
- Cataldo, A., Piuze, E., Cannazza, G., De Benedetto, E. and Tarricone, L., 2010- Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy. *Measurement*, Vol. 43, No. 8, 1031-1039.
- Dowding, C. H. and Huang, F. C., 1994- Ground water pressure measurements with time domain reflectometry. *Proceedings, symposium and workshop on time domain reflectometry in environmental, infrastructure, and mining applications*. Northwestern University, Evanston, IL. Bureau of Mines, Special Publication, 19-94, 247-258.
- Dowding, C., Huang, F. and McComb, P., 1996- Water pressure measurement with time domain reflectometry cables. *Geotechnical Testing Journal*, 19(1), 58-64.
- Dowding, C. H., Su, M. B. and O'Connor, K. M., 1988- Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 25, 287-297.
- Fellner-Feldegg, H., 1969- The measurement of dielectrics in the time domain. *The Journal of Physical Chemistry* 73 (3), 616-623.
- Griffiths, L. A., Parakh, R., Furse, C. and Baker, B., 2006- The invisible fray: A critical analysis of the use of reflectometry for fraylocation. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6, No. 3, 697-706.
- Hager, III, N. E., 1994- Broadband time-domain-reflectometry dielectric spectroscopy using variable-time-scale sampling. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 64, No. 4, 887{891.
- Kane, W. F. and Beck, T. J., 1996- An alternative monitoring system for unstable slopes. *Geotechnical news*. 143:24-26.
- Mikkelsen, P. E., 1996- Field instrumentation. *Landslides. Investigation and mitigation*. Washington: Transportation Research Board.
- Moradi, G. and Abdipour, A., 2007- Measuring the permittivity of dielectric materials using STDR approach. *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 77, 357-365.
- Nicholson, G., Powell, A., J. F. and O'Connor, K. M., 1997- Monitoring Groundwater Levels Using a Time-Domain Reflectometry (TDR) Pulsar. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Technical Report CPAR-GL-97-
- Nissen, H. and Moldrup, P., 1995- Theoretical background for the TDR methodology," *Proceedings, Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science*. SP Report No. 11, Danish Institute of Plant and Soil Science, 9-24.
- Nozaki, R. and Bose, T. K., 1990- Broadband complex permittivity measurements by time-domain spectroscopy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 39, No. 6, 945-951.
- O'Connor, K. M. and Dowding, C. H., 1999- *GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*. CRC Press, UK, Jan..
- Piuze, E., Cataldo, A. and Catarinucci, L., 2009- Enhanced reflectometry measurements of permittivities and levels in layered petrochemical liquids using an 'in-situ' coaxial probe," *Measurement*, Vol. 42, No. 5, 685-696.
- Ross, G. F., 1974- Apparatus and method for measuring the level of a contained liquid," U.S. Patent No. 3,832,900.
- Ross, G. F., 1976- Apparatus and method for sensing a liquid with a single wire transmission line," U.S. Patent No. 3,995,212.
- Schuet, S., Timucin, D. and Wheeler, K., 2011- A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 5, 1654-1663.
- Topp, G., Davis, J. and Annan, A., 1980- Electromagnetic determination of soil water content," *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.

## Evaluation of TDR applications in engineering geological investigations -case study on Darian dam

S. M. Fatemi Aghda<sup>1\*</sup>, K. GanjaliPour<sup>2</sup> and K. Nabiollahi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of applied Geology, Faculty of Geological Science, Kharazmi University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>PhD student, Department of applied Geology, Faculty of Geological Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 2017 January 04

Accepted: 2017 November 11

### Abstract

Due to the expansion and application of technology in soil and rock mechanics, engineering geology and geotechnics, it is possible to use newer, faster and cheaper methods in these fields every day. TDR technology is one of these methods. This technology has been developed by the telecommunication and electricity industry to determine the location of cable faults. The radar is a prime example of the TDR. The basis of this technology is the sending of a short pulse of energy (electromagnetic pulse) that is reflected in the collision with some anomalies. The point location of these anomalies can be determined if the velocity and direction of the pulse can be determined. The electromagnetic pulse reaches the waveguide through the conductor cable and enters the test environment. In this research, this method was used to determine the groundwater level in the Darian dam. The TDR has the ability to detect the air-water interface, and the reported results are consistent with the measured data using traditional methods. Also in one of the situations that are prone to slide, coaxial cable was installed as TDR sensor. The results showed that the TDR recognizes the shearing and stretching zones in the cable as the result of the ground movement successfully. Finally, since manual processing of TDR data was very difficult and requires high accuracy and time, a method for computer processing of this data was provided by the authors.

**Keywords:** TDR, Reflection coefficient, Water table, Electromagnetic pulse, Engineering geology.

For Persian Version see pages 149 to 160

\*Corresponding author: S. M. Fatemi Aghda; E-mail: fatemi@saba.tmu.ac.ir