



استفاده از TDR به عنوان روشی نوین در رفتارنگاری پایداری شیب

کاوه آهنگری^{*}، علی حق نژاد^{**}

چکیده

TDR (Time Domain Reflectometry) ابزاری نوین، جهت تعیین عمق صفحه برش یا محدوده لغزش زمین می‌باشد. TDR مانند یک رادار از تغییر فرکانس پالس‌های ولتاژ الکتریکی ارسال شده از محل‌های لغزشی در یک کابل هم‌محور استفاده می‌کند. برای کنترل جابجایی شیب، کابل‌های هم‌محور با دوغاب سیمان درون چاه قرار گرفته و اطلاعات به دست آمده توسط کابل‌ها به دستگاه آزمایشگر کابل ارسال می‌گردد. هدف از این مطالعه، معرفی ابزار TDR، قابلیت‌ها، مزایا و معایب آن در مقایسه با ابزار مشابه می‌باشد. نظر به جدید بودن این تکنولوژی و عدم استفاده از آن تا بحال در ایران و همچنین اهمیت روزافزون ابزاربندی و رفتارنگاری دیواره‌های معادن روباز، مطالعه مزبور می‌تواند نقش مهمی در معرفی این تکنولوژی داشته باشد. این تحقیق، نشان می‌دهد که TDR می‌تواند اطلاعات مفید رفتارنگاری را برای چندین ماه بعد از اینکه انحرافسنج‌های نصب شده معیوب می‌گردیدند، تهیه نموده و در عمل تفسیر پیشرفته اطلاعات رفتارنگاری TDR در تشخیص گسیختگی شیب، سریعتر از تفسیر مشاهدات اطلاعات خام می‌باشد.

کلمات کلیدی: ابزاربندی، رفتارنگاری، تغییر شکل، شیروانی، TDR

ABSTRACT

Time domain reflectometry (TDR) is a new method of locating the depth to a shear plane or zone in a landslide. TDR uses an electronic voltage pulse that is reflected like radar from a landslide location in a coaxial cable. To monitor slope movement, coaxial cables are grouted in boreholes and raised information send by cables to cable tester. The purpose of this study, is to introduce of TDR tool and its abilities, advantages and defects in respect of similar tool. Considering that TDR is a new and unused technology in Iran and also significant of instrumentation and open pit slopes monitoring, this study has important rule in introducing this technology. This study, TDR will prove can providing useful monitoring information for several months after inclinometer had failed and in operation, TDR monitoring data advanced processing indication of slope movement earlier than visually interpreted TDR.

Keywords: Instrumentation, Monitoring, Movement, Slope, TDR

۱- مقدمه

TDR یکی از انواع ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل می‌باشد. در میان ابزارهای اندازه‌گیری تغییر شکل، TDR دارای ساختار و روش کار قابل مقایسه با انحرافسنج شیب (Inclinometer) می‌باشد. TDR اصولاً توسط صنایع نیرو و ارتباطات برای تعیین گسیختگی و شکستگی در کابل‌ها توسعه یافت. بعدها در طی سال‌های ۱۹۷۰ الی ۱۹۸۰ اداره معادن ایالات متحده به‌طور وسیعی TDR را در مناطق شکسته سقف معادن زغال با دیواره بلند بکار برد. سایر کاربردهای فنی زمین‌شناسی آن، در طول این دوره، شامل کنترل تخریب سقف معدن فلزی به‌وسیله مرکز

^{*} عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.

Email: kaveh.ahangari@gmail.com

^{**} دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، حصارک، بونک



تکنولوژی مواد معدنی و انرژی کانادا (CANMET) و تلاش برای کنترل شیب دامنه مجاور به یک دراگ‌لاین توسط شرکت سینکروود کانادا (Syncrude) می‌باشد. بعد از آن، در دهه سال‌های ۱۹۹۰ دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا تحقیقات خود را بر روی کاربرد TDR برای کنترل لغزش زمین به صورت کنترل از راه دور از طریق پایگاه‌های محلی، گسترش داد. نتایج این بررسی و تلاش اداره کل معادن ایالات متحده، مهندسين زمین‌شناس و معدن را به استفاده بیشتر از TDR برای کنترل شیب سوق داد [۱].

در این مطالعه، ابتدا اصول TDR، اطلاعات کابل متناسب با جابجایی‌های زمین مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه، مزایا و معایب TDR نسبت به دیگر ابزار اندازه‌گیری جابجایی (انحرافسنج)، اجزای تشکیل‌دهنده این ابزار و چگونگی نصب آن بیان خواهد شد. سپس بررسی صحرائی نحوه عملکرد TDR و تحلیل و تفسیر پیشرفته نتایج ارائه و در پایان، بحث، نتیجه‌گیری، اشکال و جدول آورده می‌شود.

۲- اصول TDR

سیستم اندازه‌گیری TDR شامل قطعات نشان داده شده در شکل (۱) می‌باشد. یک کابل هم‌محور (Coaxial cable) در گمانه نصب می‌شود و با دوغاب سیمان پر می‌شود. سنجش دستگاه از طریق اتصال نوک کابل به یک آزمایش‌گر کابل (Cable tester) استاندارد UHF قابل حمل با منبع نیروی باتری، تهیه می‌شود. آزمایش‌گر کابل، برای بررسی علائم کابل ساخته شده است که می‌تواند از طریق یک پورت به کامپیوتر متصل و به اپراتور اجازه می‌دهد تا علائم کابل را به شکل دیجیتال (رقم‌های صفر و یک) به کامپیوتر انتقال دهد و در نهایت برای تفسیر اطلاعات به وسیله نرم‌افزارهای گوناگون ذخیره، آنالیز و ترسیم گردد [۴].

دستگاه آزمایش‌گر کابل، پالس‌های ولتاژ موجی شکلی را توسط کابلی که میان دوغاب سیمان یک چاه قرار دارد به طرف پایین چال ارسال می‌کند. اگر پالس با یک تغییر در مشخصات مقاومت ظاهری (Impedance) درون کابل مواجه شود در این صورت منعکس خواهد شد. همچنین وجود پیچ‌خوردگی، گره، آب و بریدگی در کابل نیز می‌تواند باعث این انعکاس شود. آزمایش‌گر کابل بر روی پالس منعکس شده با پالس منتقل شده، یک مقایسه انجام می‌دهد و ضریب انعکاس را در آن نقطه از کابل تعیین می‌کند [۱].

۳- اطلاعات کابل و تغییر مکان زمین

پیچ‌خوردگی یا برش کابل، مقاومت ظاهری کابل را کاهش داده و کشش کابل، باعث افزایش مقاومت آن خواهد شد. عمق جابجایی توسط منحنی TDR تعیین می‌شود. هرگونه تغییر شکل کابل در منحنی مربوطه ظاهر خواهد شد. یک برش یا پیچ‌خوردگی کابل به صورت سیگنال الکتریکی موقت کوچک منفی در منحنی کابل ظاهر می‌گردد. برش کامل کابل به صورت یک مدار باز در کابل TDR ظاهر می‌شود (شکل‌های (۲) و (۳) و (۴) [۵].



۴- مزایا و معایب

TDR دارای مزایای زیادی بر انحراف سنج‌های شیب مرسوم در کاربردهای ژئوتکنیکی می‌باشد که عمده‌ترین آنها عبارتند

از:

- ✓ هزینه کمتر و دسترسی از راه دور
- ✓ وسایل سنجش و تفسیر سریع کابل‌های TDR سنجش گماته‌های بیشتری را در زمان کمتر ممکن می‌سازند و موجب افزایش صرفه‌جویی در نفر-ساعت می‌گردند.
- ✓ اگر پوشش جداره انحراف‌سنج تغییر شکل زیادی نداشته باشد یک کابل TDR می‌تواند از طریق خم شدن به پایین پوشش جداره عبور کند.
- ✓ صفحه نمایش آزمایش‌گر کابل، علامت‌رسانی از کابل را به سرعت نمایش می‌دهد. با مقایسه کردن علامت کابل، میزان تغییر مکان را می‌توان تعیین نمود [۱].
- در مقایسه با انحراف‌سنج، TDR دارای معایبی نیز می‌باشد که لازم است در هنگام استفاده از آن مورد توجه قرار گیرد:
- ✓ کابل‌های هم‌محور مورد استفاده در TDR، اغلب توسط آسیب ناشی از تنش‌های برشی و کششی و یا هر دوی آنها عمل می‌کنند. به همین دلیل TDR نمی‌تواند در زون‌هایی که برش رخ نمی‌دهد، به کار رود.
- ✓ در حال حاضر، تلاش‌هایی برای ایجاد روابط میان تغییر مکان دامنه شیب با میزان تغییر شکل TDR در حال انجام است.
- ✓ TDR می‌تواند تنها محل صفحات برشی را تعیین نماید و قادر به تعیین جهت تغییر مکان نمی‌باشد.
- ✓ TDR نمی‌تواند میزان جابجایی واقعی را مشخص نماید و مقادیر جابجایی به صورت نسبی تخمین زده می‌شوند.
- ✓ نفوذ آب به داخل کابل TDR، باعث تغییر خواص الکتریکی کابل شده و ممکن است منجر به ایجاد مشکلاتی در تفسیر نتایج گردد [۱].

۴- نصب

برای نصب، انتهای کابل در پایین گماته، توسط برشکاری چهارگوش، آماده و با نوارچسب الکتریکی مایع، آب‌بندی می‌گردد. جابجا کردن آن در داخل چاه، توسط نصب لاستیکی محکم یا پوشش حفاظتی پلاستیکی بر روی انتهای آن می‌باشد. اتصالات می‌باید برای جلوگیری از نفوذ آب با نوارچسب الکتریکی محکم پوشانده شوند. بعد از انتقال کابل، دوغاب‌های سیمان ریخته شده باید کاملاً خشک شود تا بتوانند سبب تغییر شکل کابل گردند. دوغاب سیمان با ترکیب ۱۰ درصد ببتونیت و ۹۰ درصد دوغاب سیمان دارای عملکرد مناسب می‌باشد، اما می‌توان ۱۰۰ درصد آن را از دوغاب سیمان استفاده نمود. نصب کابل‌ها در گماته‌های بدون دوغاب سیمان یا پر شده با ماسه، احتمالاً دارای نتایج ضعیفی در هنگام اجرا و در نتیجه کاهش راندمان می‌باشد. پیچ خوردگی کابل، باعث کاهش انرژی، آشفته‌گی سیگنال الکتریکی و تغییر شکل واقعی روکش‌ها می‌گردد. بعلاوه پیچ‌خوردگی کابل سبب افزایش زمان آزمایش می‌گردد [۱].



۶- بررسی صحرائی عملکرد TDR

در یک پروژه تحقیقاتی در دبارتمان حمل و نقل ایالت ارکانزا در آمریکا در سال ۱۹۹۹ TDR به‌عنوان یک تکنولوژی، جهت ارزیابی تغییر شکل دیواره ترانشه‌های بزرگراه مورد استفاده قرار گرفت. ترانشه‌ای در ۵۰ مایلی منطقه مورد نظر که دارای شیب ۳ به ۱ و شامل ۳ تا ۵ متر از ترکیب رس بر روی شیل بود، انتخاب گردید. تمامی کابل‌ها و انحراف‌سنج‌ها درون جالی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر با دوغاب سیمان و بنتونیت نصب شد. در هر ردیف بین هر نصب ۳ متر فاصله وجود داشت و چاه‌ها نیز در ردیف‌های یکسان، ۳ متری حفر گردید. سیمان مورد استفاده شامل ۲ کیلوگرم بنتونیت و ۴۳ کیلوگرم سیمان پرتلند و ۱۵۰ لیتر آب می‌باشد و دارای مقاومت فشاری تقریبی ۱۲۰۰ کیلوپاوند (۱۷۵ psi) بود. بعد از تقریباً ۱۰ ماه رفتارنگاری کابل‌های TDR، سیگنال الکتریکی متناسب با یک سطح برش نمایان گردید. اطلاعات انحراف‌سنج نصب‌شده، محل سطح برش را تأیید نموده و موقعیت نشان‌داده‌شده در هر دو سیستم متناسب بود. خلاصه‌ای از علائم یکی از کابل‌ها در شکل (۵) نشان داده‌شده است [۲].

۷- تحلیل و تفسیر پیشرفته نتایج TDR

روش تفسیر مشاهده‌ای در گذشته نیازمند بررسی‌های بی‌دری منحنی علائم بود. به‌طوری که کاربر باید با چشم غیر مسلح به موقعیت این منحنی‌ها دقت می‌کرد. بنابراین برای افزایش کاربرد سیستم رفتارنگاری پایداری شیب در معادن و ترانشه‌های خاکی، روش تفسیر پیشرفته برای افزایش دقت و سرعت در بررسی علائم کابل TDR توسعه یافت. با توجه به اینکه تغییرات کوچک مقاومت ظاهری به سختی توسط چشم غیر مسلح از نمودار ضریب انعکاس- عمق در زمان‌های مختلف تشخیص داده می‌شود کاربرد تکنیک‌های تفسیر سیگنال، مقایسه بین تغییرات کوچک سیگنال با توجه به زمان (مثل زمان آزمایش) و مکان (مثل مبدأ انعکاس) را مورد تأکید قرار می‌دهد. در این روش، چندین منحنی تهیه شده، ضریب انعکاس بر حسب مکان- زمان رسم می‌شود و توسط نرم‌افزارهای تجاری و یا صفحه گستر موجود، مقایسه، تحلیل و آنالیز می‌گردد. این پردازش شامل فیلتر پارازیت و تفاضل زمانی و مکانی می‌باشد [۳].

برای مقایسه عملکرد رفتارنگاری TDR و انحراف‌سنج شیب، دبارتمان حمل و نقل اوهایو (ODAT) ۴ جفت کابل TDR را در ۴ سایت A و B و C و D نصب نمود. گمانه‌های TDR و انحراف‌سنج شیب بین ۳ تا ۶ فوت از لبه جاده و در شانه جاده قرار گرفت. ۱۷۰ میلی‌متر قطر ساقه مته اگر ایجادکننده گمانه کیسنگ‌های ۷۰ میلی‌متری PVC انحراف‌سنج و کابل‌های TDR می‌باشد.

جدول ۱ لیست نخستین جایجایی انحراف‌سنج، تفسیر مشاهده‌ای TDR و نتایج تفسیر پیشرفته TDR را مشخص می‌کند. در ۳ مورد از ۴ مورد، تفسیر پیشرفته TDR قادر به تعیین جایجایی زودتر از سایر روش‌ها بود و در چهارمین مورد، هم انحراف‌سنج و هم تفسیر پیشرفته TDR اولین جایجایی را در زمان مشابهی مشخص کرده‌اند. در تمام حالت‌ها شیوه جدید



تفسیر اطلاعات TDR به‌طور قابل توجهی قادر به تعیین جابجایی زودتر از تفسیر مشاهداتی هستند. کیسینگ‌های انحراف‌سنج در مقاطع C و B بعد از می ۲۰۰۳ قابل استفاده نبودند در حالیکه مابقی نتایج تا پایان بررسی از طریق TDR به‌دست آمد [۳].

۸- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌ها و استفاده موفقیت‌آمیز از TDR در رفتارنگاری جابجایی شیب، مهندسی زمین‌شناسی و معدن را به استفاده هر چه بیشتر از آن برای کنترل شیب سوق داده است. تحقیق صورت‌گرفته به‌طور کلی نشان می‌دهد که:

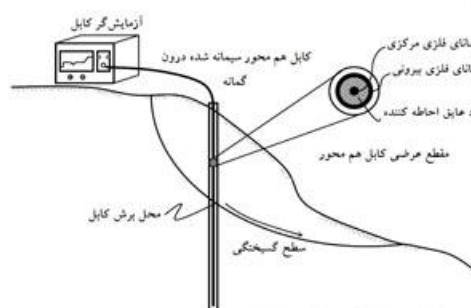
- ✓ TDR روش کاملاً مفیدی برای کنترل شیب می‌باشد. کابل‌های هم‌محور ارزان‌قیمت، بعنوان یک سنسور و مثل یک رادار در تعیین صفحات برشی یا زون‌های تغییر شکل یافته در دامنه شیب به‌کار می‌روند.
- ✓ یکی از مزایای برجسته TDR کاربرد کنترل از راه دور آن می‌باشد [۱].
- ✓ دوغاب سیمان باید دارای مقاومت کافی باشد تا باعث تغییر شکل در کابل شود.
- ✓ هزینه‌های نصب و راه‌اندازی یک سیستم کامل TDR از قیمت خرید یک کاوشگر نوع انحراف‌سنج و ثبت‌کننده اطلاعات، کمتر می‌باشد. اما کاوشگر انحراف‌سنج می‌تواند جهت جابجایی‌ها را نیز معین نماید [۳].
- ✓ TDR می‌تواند اطلاعات مفید رفتارنگاری را برای چندین ماه بعد از اینکه انحراف‌سنج‌های نصب شده معیوب گردیدند، ارائه کند. همچنین شیوه جدید تفسیر اطلاعات TDR به‌طور قابل توجهی قادر به تعیین جابجایی، زودتر از تفسیر مشاهداتی می‌باشد [۳ و ۵].

۹- منابع

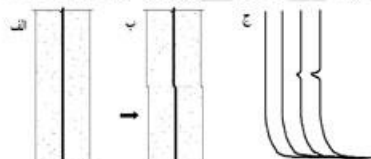
- [1]. Kane, W.F., 2000; "Monitoring Slope Movement with Time Domain Reflectometry"; presented at Geotechnical Field Instrumentation; <http://www.ascelibrary.org>.
- [2]. Dennis, N.D., Ooi, C.W., Wong, V.H., 2006; "Estimating Movement Of Shallow Slope Failure Using Time Domain Reflectometry", Purdue University, West Lafayette, USA; paper ID 41; <http://engineering.purdue.edu/TDR>
- [3]. Farrington, S.P., Sagand, S.M., 2006; "Advanced Processing Of Time Domain Reflectometry For Improved Slope Stability"; International Journal of American Society Of Civil Engineers (ASCE); <http://www.ascelibrary.org>.
- [4]. Turner, J. P., 2006; "Time Domain Reflectometry for Monitoring Slope Movement"; Department of Civil and Architectural Engineering University of Wyoming; Report No. FHWA-WY-06/03F
- [5]. Sargand, S.N., Sargent, L., Farrington, S.P., 2004; "Inclinometer-Time Domain Reflectometry Comparative Study"; Ohio Research Institute for Transportation and Environment; Report No. FHWA/OH-2004/010



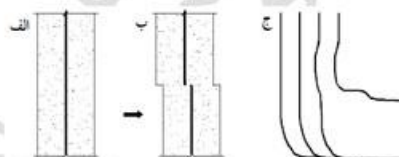
ضمیمه



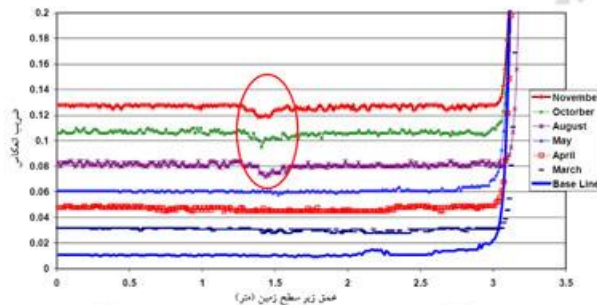
شکل (۱): قطعات سیستم TDR برای رفتارنگاری جایجایی شیب ۱۴



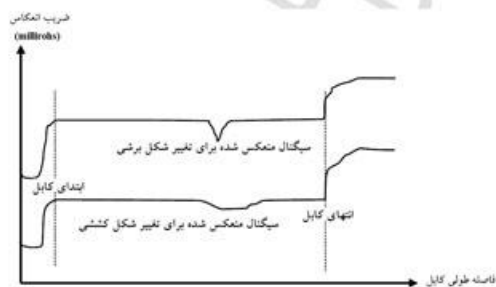
شکل (۲): برش کابل TDR الف: نمونه سالم، ب: تأثیر نیروی برشی، ج: منحنی تأثیر نیروی برشی ۱۵



شکل (۳): کشش کابل TDR الف: نمونه سالم، ب: تأثیر نیروی کششی، ج: منحنی تأثیر نیروی کششی ۱۵



شکل (۵): مقایسه علامه کابل TDR در ۵۰ مایلی قطعه ۱-۵۴۰ بزرگراه [۲]



شکل (۴): نمونه‌ای از منحنی‌های کابل TDR برای تغییر شکل برشی و کششی [۲]

جدول ۱- نتایج اولین جایجایی برای هر یک از سایت‌های رفتارنگاری. دو تاریخ لیست‌شده در یک ردیف نشانه جایجایی در ۲ عمق می‌باشد. [۳]

| سایت | انحراف‌سنج | روش مشاهده ای TDR | روش برداش پشرفته TDR |
|------|-------------|-------------------|----------------------|
| A | ژوئن ۲۰۰۳ | ژوئن / اگوست ۲۰۰۳ | دسامبر ۲۰۰۲ |
| B | نوامبر ۲۰۰۳ | ژوئن ۲۰۰۳ | دسامبر / دسامبر ۲۰۰۲ |
| C | نوامبر ۲۰۰۲ | فوریه / مارس ۲۰۰۳ | نوامبر ۲۰۰۲ |
| D | آوریل ۲۰۰۳ | مارس ۲۰۰۳ | ژانویه ۲۰۰۳ |