

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۳): صص ۵۶-۴۷

مدل سازی، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی تونل‌های دفاعی به همراه یک مطالعه موردی

ایمان خاکی^۱، محمدرضا سیف^{۲*}، صفا خزائی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۹

چکیده

اصولاً استفاده از تونل‌های دفاعی یکی از اصلی‌ترین اقدامات دفاعی هر کشور است. شناسایی این اهداف مدفون یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل در حوزه پدافند غیرعامل می‌باشد. روش رادار نفوذی زمین (GPR) یکی از سریع‌ترین و بهترین روش‌های آشکارسازی اهداف مدفون در حوزه روش‌های الکترومغناطیس می‌باشد. در این مطالعه، امکان آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی توسط روش GPR مورد بررسی و تحلیل میدانی قرار گرفته است. به این منظور، برداشت‌هایی در موقعیت چندین تونل واقع در محوطه یک کارخانه به صورت آزمایشی توسط دستگاه GPR ساخت شرکت سوئدی Mala انجام شده است. تحلیل عمق دقیق دفن‌شدگی تونل‌ها، با اعمال پردازش‌های متفاوت بر روی داده‌های GPR و بررسی پاسخ این تونل‌ها در محیط‌های مختلف صورت گرفته است. براساس نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق، GPR برای تخمین طول، عرض و ارتفاع تونل‌های زیرزمینی خصوصاً در عمق‌های کم روشی مناسب است.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازی تونل، رادار نفوذی به زمین، بی‌هنجاری فیزیکی، پدافند غیرعامل

۱- کارشناس ارشد

۲- مربی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، Email: m.r.seif@ut.ac.ir - نویسنده مسئول

۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

ژئوفیزیکی برای آشکارسازی موقعیت تونل‌های مدفون و همچنین به دست آوردن عمق دقیق دفن‌شدگی تونل‌ها می‌باشد. این اهداف با اعمال پردازش‌های متفاوت بر روی داده‌های GPR و بررسی و مدل‌سازی پاسخ تونل‌ها در محیط‌های مختلف حاصل خواهند شد. شناسایی و تفسیر کمی حفره‌های زیرزمینی نیز با انجام مدل‌سازی پیش‌روی داده‌های GPR انجام خواهد شد.

در یک تحقیق برس و همکارانش [۶] با استفاده از روش تفاضل محدود حفرات زیرسطحی و تونل‌ها را در یک کلیسا در ایتالیا را شناسایی کردند. در تحقیقی دیگر، کادی^۱ و همکارانش با استفاده از این روش فضاهای خالی زیرسطحی را در شهر العمل در کشور مصر شناسایی کردند [۸-۷]. همچنین، مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به منظور بررسی درزه و ترک‌ها در سازه‌های مختلف توسط هامروش^۲ و همکارانش [۹] انجام گرفت. در یک تحقیق نیز مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به منظور آشکارسازی و شناسایی مین‌های ضدنفوذ توسط هونیسی [۱۰] انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اسماعیل اسحاقی [۱۱] با این روش، لایه‌ها و قنات‌های زیرسطحی را در منطقه خانیاب مجن شاهرود شناسایی کرده‌اند؛ اما در رابطه با حوزه پدافند غیرعامل حبیب الله سهامی و همکاران [۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های ثقل‌سنجی سازه‌های مدفون زیرزمینی را شناسایی کردند و همچنین سیف و خزائی [۱۳] برپایه داده‌های گرادیان گرانی سازه‌های زیرزمینی را شناسایی کردند.

۲- مبانی نظری تحقیق

در این بخش کلیات روش رادار نفوذی و نحوه انتشار امواج الکترومغناطیس در زمین بیان می‌شود.

۲-۱- روش رادار نفوذی زمین (GPR)

یکی از جدیدترین روش‌های ژئوفیزیکی که امروزه کاربرد وسیعی در بسیاری از زمینه‌های کاوش‌های زیرسطحی دارد، روش رادار نفوذی زمین (GPR) می‌باشد. این روش یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا ($12/5\text{MHz}$ تا 2500MHz) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند [۱۴]. این روش در برداشت‌ها دارای چهار مزیت اساسی است: ساده، سریع، غیرمخرب و دقیق با قدرت تفکیک زیاد [۱۵]. در این روش، امواجی از دستگاه GPR ساطع شده و به داخل زمین نفوذ می‌کند، این امواج

امروزه با وجود تمام پیشرفت‌های به‌وجودآمده در بخش‌های نظامی، استفاده از تونل‌های دفاعی همچنان به‌عنوان یکی از استراتژی‌های مورد علاقه برخی از ارتش‌های جهان و همچنین نیروهای چریکی استفاده شده و در بسیاری از موارد به یکی از عوامل مهم پیروزی بدل شده است؛ چرا که این تونل‌ها امنیت لازم جهت مخفی نگه‌داشتن تجهیزات در برابر سلاح‌های دشمن را فراهم می‌کنند [۱]. بدیهی است با توسعه جنگ‌افزارهای ضد اهداف مدفون که دارای قدرت نفوذ و تخریب بالا هستند، لازم است فرماندهان نظامی حداکثر اقدامات استتاری را بر روی این سازه‌ها انجام دهند. از سوی دیگر، توسعه فن‌آوری‌های سنجشی در زمینه شناسایی اهداف مدفون، یکی از تهدیدات بالقوه محسوب می‌شود و لذا لازم است با شناسایی این روش‌ها راه‌کارهای مقابله با آن استخراج گردد؛ اما در واقع، راه‌حل تعیین‌کننده و قطعی در جهت شناسایی و رصد این گونه تأسیسات زیرزمینی وجود ندارد. به عبارت دیگر، ابزار مفید در این حوزه به‌کارگیری ترکیبی از منابع مختلف است که از جمله می‌توان به شناسایی تصویری (هواپایه و فضاپایه)، برداشت‌های ژئوفیزیکی، صوتی، شناسایی سیگنالی (نظیر سیگنال‌های رادیویی یا راداری) و نیز شناسایی از طریق عوامل انسانی (جاسوسی) اشاره نمود [۲].

شناسایی تأسیسات زیرزمینی زمانی آسان‌تر و سریع‌تر است که موقعیت تقریبی سازه موردنظر معلوم باشد. بدیهی است داشتن موقعیت تقریبی اهداف زیرزمینی، مستلزم برخورداری از ابزار شناسایی است تا بتوان موقعیت نسبی و در صورت امکان، ابعاد سازه مدفون را تعیین نمود. در واقع، این قابلیت باید از طریق استفاده از فن‌آوری‌های مختلف ژئوفیزیکی محقق گردد [۳]. در دهه گذشته، پیشرفت روش‌های ژئوفیزیکی بسیار سریع بوده است؛ این امر به دلیل پیشرفت علوم و فناوری، توسعه تجهیزات صحرایی و همچنین حسابگرهای رقومی که در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی کاربرد فراوانی دارند می‌باشد [۴]. امروزه روش‌های ژئوفیزیکی در عملیات‌های تعیین مکان و شناسایی با کاربرد نظامی و غیرنظامی کاربردهای فراوانی دارند. کشوری مانند آمریکا در راستای دستیابی به برتری اطلاعاتی و با اهداف نظامی روش‌ها و فن‌آوری‌های ژئوفیزیکی را در دستور کار قرار داده است که این موضوع اهمیت و کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مباحث نظامی را نشان می‌دهد [۵].

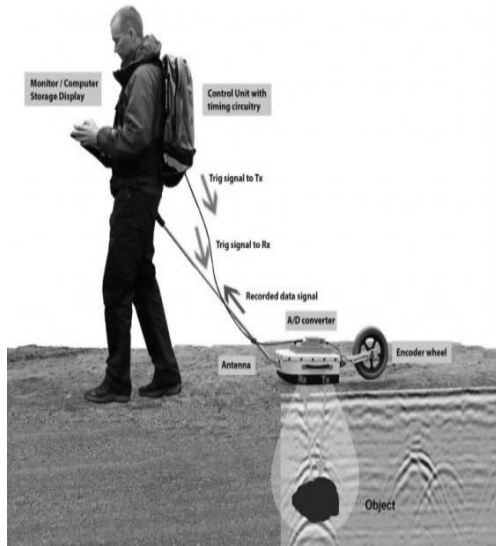
در حوزه ژئوفیزیک، معرفی یک روش مناسب، سریع و کم‌هزینه برای آشکارسازی موقعیت و عمق تونل‌های مدفون در زیرزمین چالشی اساسی محسوب می‌گردد. هدف این تحقیق بررسی روش رادار نفوذی زمین (GPR) به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های

1- Kadi.et al

2- Hamrouche. Et al

3- Ground Penetrating Radar

بیشتر سامانه‌های GPR از دو آنتن برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کنند. ساده‌ترین آنتن‌ها، دوقطبی‌های الکتریکی بوده که از یک میله فلزی به قطر چند میلی‌متر تا ۲ سانتی‌متر، ساخته شده‌اند



شکل (۱): اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم GPR. به همراه مقطع زمانی و مقطع تفسیر شده آن [۱۶].

معمولاً این میله‌ها از جنس آلومینیوم بوده و دارای روکشی از جنس نیکل می‌باشند. طول آنتن به مشخصات پالس فرستنده و از همه مهم‌تر به دوره یا پهنای پالس^۶ وابسته است. آنتن‌هایی به طول ۰/۹m تا ۱/۲m برای ساطع کردن پالس‌هایی با پهنای بین ۸ ns تا ns ۱۲ و آنتن‌هایی با طول ۰/۱۵ m تا ۰/۴ m برای تولید پالس‌هایی با پهنای تقریبی ns ۱ تا ns ۲ استفاده می‌شوند. در پهنای پالس ns ۱ تا ns ۱۰۰۰، طول آنتن مستقیماً با پهنای پالس متناسب است. از این‌رو، هرچه پالس موردنظر دارای پهنای بیشتری باشد بایستی طول آنتن به کاررفته بزرگ‌تر باشد.

در عمل آنتن‌های GPR تنها یک پالس منفرد ساطع نمی‌کنند، بلکه آن‌ها یک رشته پالس از یک پالس مشخص را در فواصل زمانی معین ساطع می‌کنند. معمولاً این فاصله زمانی بین ۲ μs تا ۵۰ μs می‌باشد و برعکس، زمان بین دو پالس متوالی، فرکانس تکرار^۷ می‌گویند. شکل (۲) یک پالس منفرد GPR را نشان می‌دهد که پهنای آن ۵ نانوثانیه می‌باشد. چنین پالسی متشکل استعدادی امواج سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌ها و فازهای مختلف است و مربع دامنه در هر فرکانس متناسب با انرژی ساطع‌شده در آن فرکانس می‌باشد. فرکانسی که بیشترین تمرکز انرژی در آن واقع است

در برخورد با ناپیوستگی‌ها، به دلیل تغییر در گذردهی الکتریکی در طرف مرز مشترک دو محیط، بازتاب می‌شوند، بازتابش‌ها توسط دستگاه دریافت شده و با توجه به سرعت این امواج که در محیط‌های مختلف متفاوت است، می‌توان اطلاعاتی مانند جنس محیط، عمق مواد مدفون، موقعیت مرز لایه‌های درون زمین و... به دست آورد.

اجزاء دستگاه GPR در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه GPR از یک مولد سیگنال، یک فرستنده (Tx) و یک گیرنده (Rx) تشکیل شده است. گیرنده ممکن است توانایی ذخیره و رقمی کردن^۱ داده‌ها، به همراه پردازش و نمایش آن‌ها را داشته باشد. بعضی دستگاه‌های پیشرفته GPR دارای یک رایانه همراه می‌باشند که پردازش داده‌ها به هنگام برداشت و بعد از آن را ممکن می‌سازد. سامانه‌های GPR در دو شیوه تک‌آنتن^۲ و دو آنتن^۳ به کار می‌روند [۱۶]. در مورد اول از یک آنتن و در مورد دوم از دو آنتن مجزا برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌شود.

برداشت‌های GPR هم از طریق پروفیل‌زنی پیوسته و هم از طریق برداشت در نقاط ثابت انجام می‌پذیرد. در پروفیل‌زنی پیوسته^۴ آنتن‌ها روی زمین در روی پروفیل موردنظر با سرعت ثابت کشیده می‌شوند و در مواقعی که سرعت بیشتری برای اکتساب داده‌ها موردنیاز است، آنتن‌ها در عقب یک وسیله نقلیه یدک می‌شوند.

زمانی که پالس الکترومغناطیس ساطع‌شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می‌شود. این امر ناشی از تغییر امپدانس^۵ امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو محیط می‌باشد [۱۶]. مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلافی بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو طرف فصل مشترک دارد که در ادامه به صورت مفصل بحث می‌شوند. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیس که از آنتن فرستنده ساطع و بعد از انعکاس از اهداف زیرسطحی به آنتن گیرنده باز می‌گردد را اندازه‌گیری کنیم، می‌توان عمق هدف موردنظر را تعیین کرد. این امر در صورتی امکان‌پذیر است که سرعت پالس (موج الکترومغناطیس) در محیط مشخص باشد.

زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چندین هزار نانوثانیه متغیر است. برای ثبت چنین زمان‌هایی به دستگاه‌هایی با دقت بسیار بالا نیاز است.

- 1- Digitization
- 2- Monostatic
- 3- Biostatic
- 4- Continuous Profiling
- 5- Impedance

- 6- Pulse Width
- 7- Repetition Frequency

که در آن، C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در هوا، μ_r نشان‌دهنده تراوایی مغناطیس نسبی و ϵ_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه‌ای موج GPR می‌باشند. عبارت $\sigma/\epsilon\omega$ که به پارامتر اتلاف^۶ معروف است، در محیط‌های کم‌اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص نزدیک به صفر بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشد (جدول ۱). همچنین، اثر μ_r در محیط‌های غیرمغناطیس و در محدوده فرکانس‌های GPR کوچک بوده و می‌توان آن را مطابق با محیط‌های غیرمغناطیس برابر ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب، رابطه (۱) به صورت زیر خلاصه می‌شود [۲۱-۲۰]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

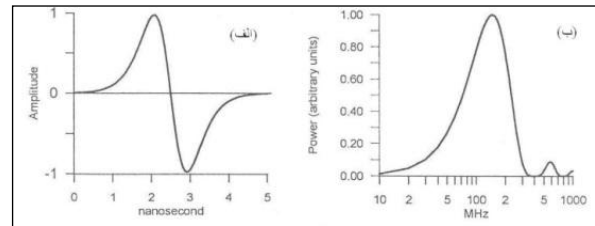
در استفاده از رابطه بالا باید این نکته را مدنظر قرار داد که در برخورد با مواد با رسانندگی بالا نظیر آب دریا و برخی از انواع رس‌ها و یا در برخورد با مواد مغناطیسی نظیر مگنتت و هماتیت این رابطه صحیح نیست [۱۹]. ولی خوشبختانه در اکثر کاربردهای GPR با تقریب خوبی می‌توان از این رابطه استفاده کرد. مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل‌دهنده و همچنین میزان آب موجود در آن‌ها بستگی دارد و هرکدام از این پارامترها دارای تأثیر به‌سزایی بر روی سرعت و اتلاف امواج GPR می‌باشند. برخی از مواد مانند یخ‌های قطبی، نسبت به امواج GPR شفاف بوده و این امواج بدون اتلاف زیاد می‌توانند از آن عبور کنند. لازم به توضیح است که فعالیت‌های اولیه در زمینه GPR در چنین محیط‌هایی صورت گرفته است [۱۹]. برخی دیگر از مواد مانند رس‌های اشباع از آب و همچنین آب دریا نسبت به این امواج کدر بوده و این امواج را بازتاب و یا جذب می‌کنند [۱۷]. از این رو، امواج GPR در فواصل کوتاهی تلف (میرا) می‌شوند و نمی‌توانند در این گونه محیط‌ها انتشار یابند (جدول ۱).

جدول (۱): مشخصات الکترومغناطیس برخی مواد

اتلاف (dB/M)	سرعت (M/nS)	رسانندگی (mS/M)	گذردهی نسبی (ϵ_r)	مواد معمول
۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۳-۵	ماسه خشک
-۰/۳ ۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱-۱	۲۰-۳۰	ماسه اشباع
۰/۴-۱	۰/۱۲	۰/۵-۲	۴-۸	سنگ آهک
۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۵-۱۵	شیل
۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۵-۳۰	لای‌ها
۱-۳۰۰	۰/۰۶	۲-۱۰۰۰	۵-۴۰	رس‌ها
۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۴-۶	گرانیت

6 - Loss Factor

فرکانس مرکزی نامیده می‌شود [۱۷]. فرکانس مرکزی برای پالس شکل (۲) در حدود ۱۲۰ Mhz می‌باشد.



شکل (۲): یک پالس منفرد GPR (الف) به همراه طیف فرکانس آن (ب)

در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی، گیرنده، میدان الکتریکی پالس‌های ورودی را به صورت آنالوگ^۱ (پیوسته) اندازه‌گیری می‌کند. این سیگنال در گیرنده تقویت شده و سپس به صورت رقومی در حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شود تا پردازش‌های بعدی روی آن‌ها صورت گیرد. برای این منظور، سیگنال دریافتی در گیرنده نمونه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی که سیگنال در آن نمونه‌گیری می‌شود را فاصله نمونه‌گیری^۲ و معکوس این فاصله زمانی را فرکانس نمونه‌گیری می‌نامند.

۲-۲- انتشار امواج GPR در زیرزمین

پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را تعیین می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک^۳ (ϵ)، رسانندگی الکتریکی^۴ (σ) و تراوایی مغناطیس^۵ (μ) می‌باشند [۱۸]. زمانی که یک میدان متناوب الکتریکی به ماده‌ای اعمال می‌شود، بارهای الکتریکی محصور در آن ماده به آزادی نمی‌توانند جابه‌جا شوند و به آن میدان متناوب با جابه‌جایی‌های کوچکی پاسخ می‌دهند و اصطلاحاً پلاریزه می‌شوند. پاسخ یون‌ها، الکترون‌ها و مولکول‌های دوقطبی به این میدان‌ها متفاوت می‌باشد.

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه‌بعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \epsilon\omega)}}{2}} \quad (1)$$

- 1- Analog
- 2- Sampling Interval
- 3- Dielectric Permittivity
- 4- Electric Conductivity
- 5- Magnetic Permeability

۳-۱- برداشت‌های صحرائی

جهت آشکارسازی و بررسی پاسخ امواج رادار نفوذی تونل‌های زیرزمینی مدفون، برداشت‌هایی در محوطه یک کارخانه به صورت آزمایشی توسط دستگاه GPR ساخت شرکت سوئدی Mala بر روی تونل‌های زیرسطحی آدمرو انجام شد که از آن داده‌ها سه خط برداشت مورد تجزیه و تحلیل در این مقاله قرار گرفته است. خطوط برداشت مذکور در این مقاله با نام‌های A، B و C مشخص شده‌اند. مشخصات این پروفیل‌ها به شرح جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات پروفیل‌های برداشت‌شده

odometer	عمق مقطع	طول پروفیل	پروفیل
Meas. Wheel 250-800	۳/۵	۱۹۰	A
Meas. Wheel 250-800	۴/۵	۱۴۵	B
Meas. Wheel 250-800	۵/۲	۲۱/۵	C

مطابق جدول (۲)، پروفیل A به طول ۱۹۰ m، پروفیل B به طول ۱۴۵ m و پروفیل C به طول ۲۱/۵ m، هر سه با آنتن ۲۵۰ MHz پوششی برداشت شده است که در شکل (۳) نمای برداشت داده آورده شده است.



شکل (۳): دستگاه برداشت داده‌های GPR

۳-۲- پردازش و تحلیل مقاطع راداری

به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی، دستیابی به تصویری واضح از اهداف زیرسطحی با حذف نوفه‌های ناخواسته و افزایش نسبت سیگنال به نوفه و در واقع تقویت سیگنال‌های مفید است. پردازش‌های مناسب به مفسر کمک می‌کند تا با اعتماد به نفس بیشتری به تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی بپردازد. دامنه پردازش‌های به‌کاررفته بر روی داده‌های GPR، با مقدار نوفه وارد شده بر روی

هنگامی که امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی انتشار می‌یابند عواملی در کاهش قدرت سیگنال این امواج تأثیرگذارند. از جمله این عوامل می‌توان به پراکندگی آن‌ها در اثر برخورد با اشیاء در اندازه طول موج GPR، انعکاس و عبور از هر فصل مشترک، اتلاف انرژی به صورت گرما و پخش هندسی امواج اشاره کرد؛ اما مسبب اصلی کاهش انرژی سیگنال، میرایی یا تضعیف (اتلاف) بوده که خود تابعی از مشخصات الکتریک و دی‌الکتریک محیط انتشار موج می‌باشد. اتلاف را با α نمایش داده و مقدار آن برابر $1/\delta$ می‌باشد. در این رابطه δ عمق پوست (پوسته) می‌باشد. به‌عنوان مثال عمق پوسته برای آب دریا تنها ۱ cm و برای رس مرطوب تنها ۰/۳ m می‌باشد. اتلاف توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha = \omega \left\{ \left(\frac{\mu \varepsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \Rightarrow \quad (3)$$

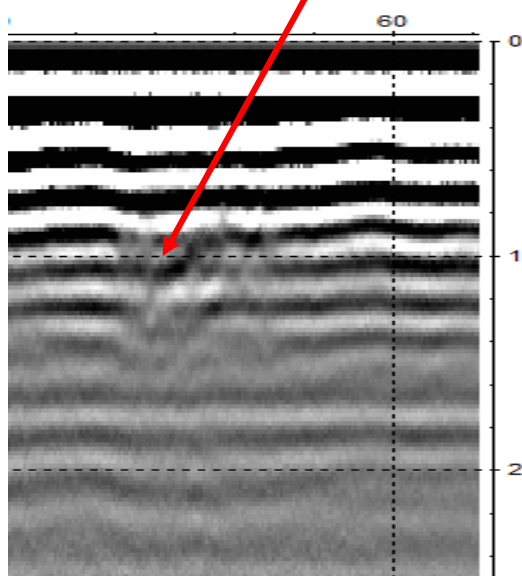
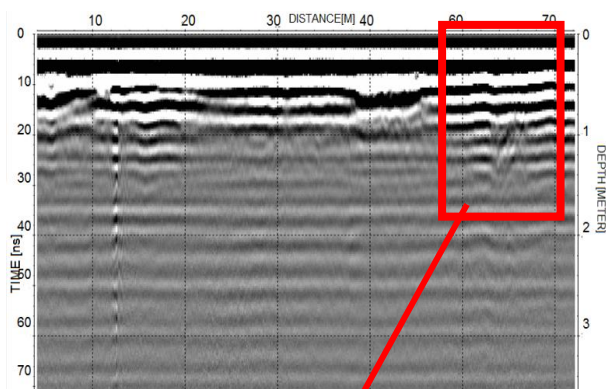
$$\delta = \frac{1}{\omega} \left\{ \left(\frac{\mu \varepsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{-1/2}$$

که در آن، μ تراوایی مغناطیسی، ε گذردهی دی‌الکتریک، σ رسانندگی و ω فرکانس زاویه‌ای موج می‌باشند. از رابطه بالا دیده می‌شود که اتلاف مستقیماً به فرکانس وابسته است؛ و نیز گذردهی نسبی و رسانندگی محیط روی آن تأثیرگذارند. لازم به ذکر است که در اغلب شرایط زمین‌شناسی و با در نظر گرفتن شرایطی که منجر به دست‌آوردن رابطه (۳) شد، رسانندگی دارای بیشترین تأثیر بر اتلاف امواج GPR می‌باشد [۱۸]. در مناطقی که سازندها اشباع می‌باشند، رسانندگی و گذردهی نسبی بالای مایع داخل سازند، اتلاف را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. وجود رس در سازند، به دلیل وجود آب در ساختار شبکه‌ای آن نیز چنین تأثیری بر اتلاف دارد [۱۷]. لازم به توضیح است که آب شیرین از مواد کم‌اتلاف بوده و وجود یون‌های محلول در قسمت اشباع سازند و به‌واسطه آن افزایش رسانندگی محیط، اتلاف امواج GPR را سبب می‌گردد.

۳- نتایج تجربی و بحث

در این بخش نحوه برداشت صحرائی داده‌ها بیان و سپس به تحلیل و پردازش داده‌های صحرائی پرداخته و در نهایت مدلسازی مربوطه انجام و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

کمتر از سرعت امواج در خاک‌های اطراف کانال است. سیمان‌شدگی حاشیه کانال تأسیسات و آجرچینی اطراف کانال نیز در ایجاد پیک و تغییرات طرفین کانال مؤثر بوده است. در مرکز این کانال، پدیده رینگینگ^۲ ناشی از به دام افتادن امواج الکترومغناطیسی در لوله فلزی (تأسیسات شوفاژ و لوله‌های آب) به چشم می‌خورد. عمق پوسته امواج GPR در فلزات بسیار پایین است. از این‌رو، این امواج به سرعت در اهداف فلزی، مستهلک می‌شوند. به همین دلیل، هیچ بازتابی از قسمت تحتانی لوله فلزی در مقطع دیده نمی‌شود. این حادثه در عمق تقریبی ۱/۳ m پیک مناسبی به نمایش گذاشته است.



شکل (۴): مقطع پروفیل A پس از اعمال تصحیحات dewow، div. Compensation gain و static correction

شکل (۵)، مقطع پروفیل B را پس از اعمال تصحیحات dewow، div. Compensation gain و static correction نشان می‌دهد. این پروفیل به طول ۱۴۵ m با آنتن ۲۵۰ MHz پوششی برداشت شده

داده‌ها و هدف مورد مطالعه تعیین می‌شود [۲۲]. نوع و دامنه پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR اعمال می‌گردد به مشخصات منطقه مورد بررسی، فرکانس آنتن GPR، نوع آنتن (پوششی یا غیرپوششی)، نرم‌افزارهای به کاررفته و همچنین اهداف کلی برداشت، وابسته است [۲۲].

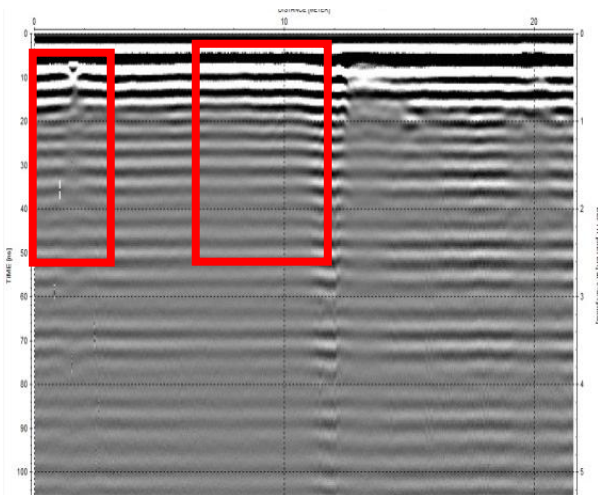
در تحلیل مقاطع راداری ذکر برخی نکات بسیار حائز اهمیت بوده و در امر تفسیر داده‌ها می‌تواند راه‌گشا باشد. پس از برخورد امواج الکترومغناطیسی ارسالی از فرستنده GPR به سطوح بازتابی (که از لحاظ گذردهی الکتریکی با محیط اطراف خود تباین قابل توجهی دارد)، امواج بازتاب می‌شوند و یک موجک با سه قسمت عمده در ردهای GPR ایجاد می‌کنند. با بررسی سه قسمت موجود در موجک می‌توان گذردهی دو طرف مرز بازتابی را مورد بررسی قرار داد. اگر موجک از محیط با گذردهی الکتریکی کمتر وارد محیط با گذردهی الکتریکی بیشتر شود، به ترتیب دارای قسمت‌های منفی - مثبت - منفی است و بالعکس، اگر موجک از محیط با گذردهی الکتریکی بیشتر وارد محیط با گذردهی الکتریکی کمتر شود؛ موجک به ترتیب دارای قسمت‌های مثبت - منفی - مثبت است [۲۳].

از سطح به عمق، مشاهده می‌گردد که امواج دچار تضعیف شده‌اند؛ که این تضعیف در لایه‌های رساناتر بیشتر است. برای جبران تضعیف امواج GPR می‌توان از بهره‌ها^۱ استفاده کرد. در نهایت با رعایت نکات ذکرشده فوق، در این پژوهش داده‌های GPR برداشت شده، توسط نرم‌افزار ReflexW پردازش و به نمایش درآمده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. از جمله پردازش‌های به کار گرفته شده در این پژوهش پس از تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های مورد بررسی می‌توان به تصحیحات dewow، div. Compensation gain و static correction اشاره کرد.

شکل (۴) مقطع پروفیل A را پس از اعمال تصحیحات dewow، div. Compensation gain و static correction نشان می‌دهد. پس از بررسی مقطع حاصل از این شکل نتایج ذیل قابل استنباط است. در فاصله ۵۴ m تا ۵۶m از ابتدای پروفیل بازتاب‌های مشخصی مربوط به کانال تأسیسات (شوفاژ، آب شرب و...) به قطر ۵ m / ۰ مشاهده می‌گردد.

پاسخ راداری طرفین کانال تأسیسات نسبت به مرکز کانال به سبب تغییر ماهیت فیزیکی متفاوت است. بدین سبب که سرعت امواج الکترومغناطیسی در مرکز کانال به سبب وجود فضای خالی

در فاصله ۲۰/۵ m از ابتدای پروفیل پاسخ کانال دیگری دیده می‌شود. مشخصات و پارامترهای هندسی کانال از قبیل عرض و عمق به‌وضوح در پروفیل مذکور قابل محاسبه است. از سطح به عمق نسبت سیگنال به نوفه کاهش یافته و از این‌رو، آشکارسازی کانال‌های زیرزمینی در عمق‌های کم از کیفیت و تفکیک‌پذیری بالاتری برخوردار است.



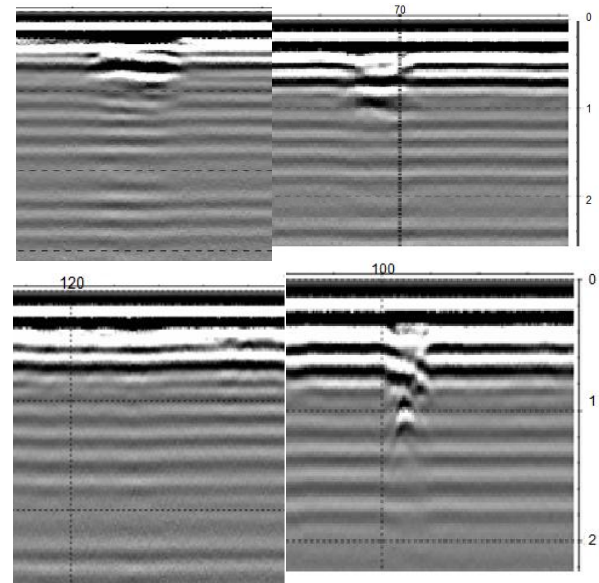
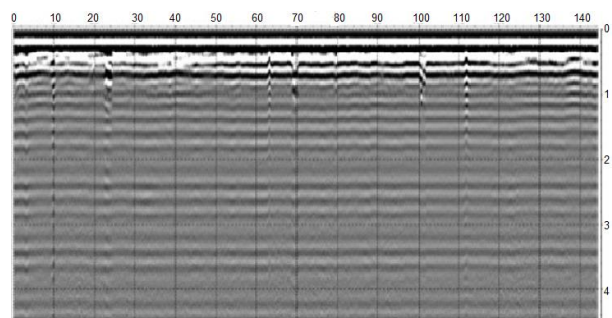
شکل (۶): مقطع پروفیل C پس از اعمال تصحیحات div. Compensation gain و static correction. dewow

۳-۳- مدل‌سازی پیش‌رو داده‌ها

در پژوهش حاضر از الگوریتم مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR به روش اختلاف محدود دوبعدی که توسط Knight [۲۶] انجام گرفته و توسط احمدی و همکاران [۲۷] بهبود یافته، استفاده شده است [۲۵]. در این تحقیق، الگوریتم اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی پاسخ GPR داده‌های برداشتی در چندین تونل زیرسطحی در یک کارخانه استفاده گردیده است. برای مدل‌سازی پاسخ GPR هدف مورد نظر لازم ابعاد مدل GPR، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی (ϵ ، μ و σ) محیط میزبان و هدف، فاصله‌های گسسته‌سازی مکانی و زمانی، نوع موجک مدل‌سازی و نیز فرکانس مرکزی آنتن، انتخاب گردد. ابتدا با استفاده از مدل‌سازی پیش‌رو و طراحی مدل براساس شرایط محیط مورد مطالعه، رفتار امواج الکترومغناطیسی و پاسخ محیط، بررسی گردید. همچنین، با تفسیر کیفی مقطع به‌دست‌آمده از برداشت داده‌های واقعی GPR نتایج به‌دست‌آمده، با شرایط واقعی زمین، مقایسه خواهد شد. در واقع، هدف از مدل‌سازی پیش‌رو پاسخ GPR یک ساختار زیرسطحی شناخته‌شده، بررسی تأثیر ویژگی‌های سنگ‌شناختی یا آب‌شناختی آن ساختار روی پاسخ GPR برداشت‌شده از آن است؛ بنابراین، مدل‌سازی‌های عددی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی با هندسه مشخص، می‌توانند در تعیین ارتباط بین ویژگی‌های زیرسطحی و

است. پس از بررسی مقطع حاصل از این شکل نتایج ذیل قابل استنباط است.

مطابق شکل (۵) در فاصله‌های ۲۳، ۶۳، ۱۰۰، ۱۱۲ و ۱۳۶ متری از نقطه ابتدایی این پروفیل، پاسخ کانال تأسیسات گره‌رو قابل پیگیری است. همچنین پاسخ کانال تأسیسات آدم‌رو در فاصله ۱۱۹-۱۲۰ متری و در عمق ۳ m مشاهده می‌گردد. پاسخ لوله‌های آب (پدیده رینگینگ ناشی از به دام افتادن امواج الکترومغناطیسی در لوله فلزی) داخل کانال‌های زیرزمینی در فواصل ۱۱۹ و ۱۲۰ متری از ابتدای پروفیل در عمق ۳ m قابل پیگیری است.



شکل (۵): مقطع پروفیل B پس از اعمال تصحیحات div. Compensation gain و static correction. dewow

شکل (۶) مقطع پروفیل C را پس از اعمال تصحیحات div. Compensation gain و static correction نشان می‌دهد. این پروفیل به طول ۲۱/۵ m با آنتن ۲۵۰ MHz پوششی برداشت شده است. پس از بررسی مقطع حاصل از این شکل نتایج ذیل قابل استنباط است. مطابق شکل (۶)، بازتاب ناشی از کانال تأسیسات آدم‌رو در فاصله ۱۲ m و در عمق ۲ m قابل پیگیری است. همچنین

می‌دهد که می‌توان روش رادار نفوذی به زمین را به‌عنوان یکی از سریع‌ترین و مطمئن‌ترین روش‌ها جهت آشکارسازی تونل‌ها و سازه‌های امن پدافندی استفاده کرد. این روش پارامترهای طول، عرض و ارتفاع تونل‌های زیرزمینی را خصوصاً در عمق‌های کم با تفکیک‌پذیری بسیار بالا به نمایش درمی‌آورد. با این وجود، موارد ذیل حائز اهمیت هستند:

- در این مطالعه موردی تونل‌های گریه‌رو به قطر ۰/۵ m در عمق تقریباً ۱ m را به‌خوبی به تصویر کشیده است، این امر در عملیات‌های شناسایی، جاسوسی، نظامی و تخریب بسیار با اهمیت می‌باشد، بدیهی است این قابلیت می‌تواند به‌عنوان سرخ برای دیگر منابع اطلاعاتی و جاسوسی به‌عنوان هدف قابل رصد تلقی گردیده تا به مکان و نقطه‌ای خاص متمرکز شوند و اطلاعات کامل‌تر و جزئیات بیشتر در مورد هدف موردنظر با استفاده از ابزار متعارف شناسایی کسب گردد.

- در برداشت‌های شبکه‌ای GPR باید دقت کرد فاصله پروفیل‌ها نسبت به عمق مورد بررسی طوری انتخاب شوند که با کمترین پروفیل برداشتی، بهترین هم‌پوشانی ایجاد شده و امکان آشکارسازی تمام بی‌هنجاری‌های زیرسطحی به وجود آید.

- مدل‌سازی پیش‌رو GPR در ارتباط با اهداف واقعی، تنها برای مواردی خاص و ساده ارزیابی شده است و کاربرد دارد، حال آن‌که الگوریتمی مناسب است که برای موارد مختلف برداشت‌های واقعی GPR که عمدتاً پیچیده هستند، عملکرد قابل قبولی از خود نشان دهد.

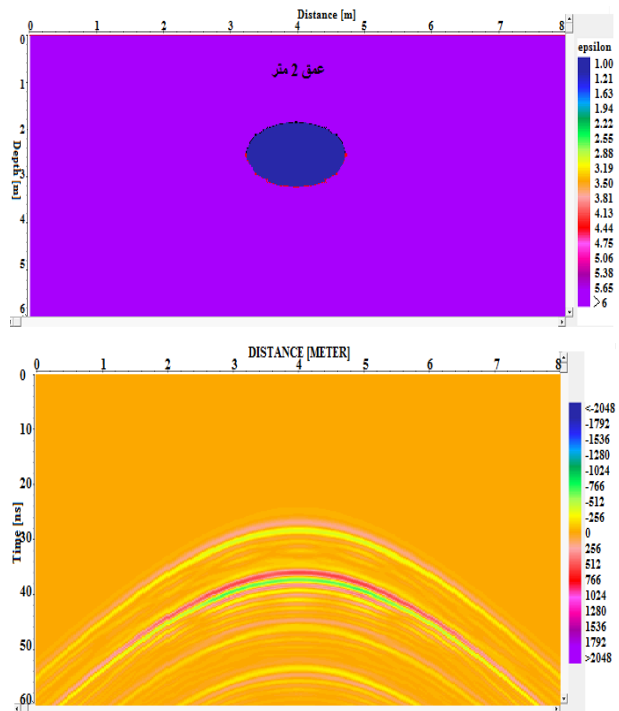
- تطابق خوب بین پاسخ مدل‌سازی پیش‌رو با نگاشت راداری GPR داده‌های واقعی منطبق بر پروفیل‌های برداشت‌شده حاکی از تفسیر درست زیرسطحی آن منطقه است؛ و اگر خطاهایی وجود دارد، علل آن را می‌توان وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیش‌رو و عدم امکان انجام مدل‌سازی پیش‌رو، دقیقاً مطابق با مدل‌های واقعی (به‌دلیل پیچیدگی‌های طبیعت زمین)، در نظر گرفتن شرایط همگن، کاملاً یکنواخت برای مدل‌سازی محیط میزبان و اهداف مدفون در محیط با وجود متنوع بودن زمین، متفاوت بودن مقادیر ویژگی‌های الکتریکی از سطح زمین تا عمق مشخص و همچنین وجود انواع نوفه‌ها در مدل واقعی زمین و دیگر عوامل برشمرد.

۵- مراجع

1. E. M. Sepp, "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations," Project Report No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.

داده‌های GPR مفید واقع شوند [۲۴].

به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های GPR برداشت‌شده در منطقه در شکل (۷) مدل هندسی و فیزیکی و پاسخ GPR متناظر با یکی از پروفیل‌های برداشت‌شده در این منطقه، نشان داده شده است. در این شکل، فقط بخشی از پروفیل که پاسخ هدف ناهنجاری در آن قرار دارد، مدنظر قرار گرفته است. پروفیل موردنظر در راستای عمود بر امتداد ناهمگنی‌های زیرسطحی، برداشت شده و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی محیط میزبان و هدف (ساختار) برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد، معرف تونل زیرسطحی که گذردهی الکتریکی ۱ و رسانندگی ۰ و محیط میزبان نیز ماسه خشک با گذردهی الکتریکی ۵ و رسانندگی ۰/۰۰۱ منظور شده است.



شکل (۷): پاسخ شبیه‌سازی شده GPR و مدل هندسی استوانه توخالی معرف تونل زیرسطحی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام یک مطالعه موردی و مدل‌سازی پیش‌رو قابلیت روش GPR برای کشف تونل‌های زیرسطحی و دفاعی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود به‌منظور شناسایی اهداف و مقایسه و تفسیر با مدل اولیه و تعیین ارتباط بین ویژگی‌های زیرسطحی و داده‌های GPR مورد بررسی و تحلیل میدانی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان

14. R. L. Van Dam and W. Schlager, "Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses," *Sedimentology*, vol. 47, pp. 435-449, 2000.
15. H. Z. M. Shafri, R. S. A. Abdollah, M. Roslee, and R. Numiandy, "Optimization for ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis," In proc. of Igarss, USA, 2008.
16. K. Knödel, G. Langem and H. J. Voigt, "Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies," Book part 4, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
17. J. M. Reynolds, "An introduction to applied and environmental geophysics," 1997.
18. A. Neal, "Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress," *Earth Science Review*, vol. 66, pp. 261-330, 2004.
19. A. P. Annan, "Ground penetrating radar," Workshop of Sensors and software, 2001.
20. D. S. Parasnis, "Principles of applied geophysics," fifth edition, John Wiley, 1997.
21. Sensors and software Inc., "EKKO Project User's Guide," Canada, 1999.
22. S. Parnow, "Processing, modeling and interpretation of GPR data to define the depth, thickness and extent of glaciers in the side of the mountain region of Mazandaran," MSc. thesis, Shahrood University of Technology, 2014.
23. M. Mohammadi Vije, "processing, modeling and interpretation of GPR data in the area anymore and comparing its results with Geoelectric," Shahrood University of Technology, 2006.
24. K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, 1966.
25. J. Irving and R. Knight, "Numerical Modeling of Ground-Penetrating Radar in 2-D Using MATLAB," *Computation Geosciences*, vol. 32, no. 9, pp. 1247-1258, 2006.
26. R. Knight, "Ground penetrating radar for environmental applications," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 29, pp. 229-255, 2001.
27. V. F. Ahmadi, N. Athiyan Poor, and GH. Norozi, "Improving Ground Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method," *Journal of Geophysical Iran*, vol. 8, no. 3, pp. 113-129, 2014.
2. D. A. Linger, G. H. Baker, and R. G. Little, "Application of Underground Structures for the Physical Protection of Critical Infrastructures," In Proc. of North American Tunneling, 2002.
3. A. Lance, M. Birrell, K. Borowski, S. Korth, N. Obermeyer, and E. Tesla, "Technologies for the Detection and Monitoring of Clandestine Underground Tunnels," Project 03- 07, 2008.
4. W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, "Applied Geophysics," Second edition, Cambridge University Press, 1990.
5. L. G. Stolarczyk, R. Troublefield, and J. Battis, "Detection of Underground Tunnels with a Synchronized Electromagnetic Wave Gradiometer," In proc. of Sensors and C3I Technologies for Homeland Security and Defense, 2005.
6. M. Beres, M. Luetscher, and R. Olivier, "Integration of Ground Penetrating Radar and Microgravimetric Methods to Map Shallow Caves," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 46, pp. 249-262, 2001.
7. A. Neal, "Ground Penetrating Radar and its Use in Sedimentology: principles, problems and progress," *Journal of Earth science reviews*, vol. 66, pp. 261-330, 2004.
8. J. M. Reynolds, "An introduction to applied end environmental geophysics," John Wiley & Sons Ltd, 1997.
9. R. Hamrouche, G. Klysz, J. P. Balayssac, S. Laurens, J. Rhazi, G. Ballivy, and G. Arliguie, "Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures," In proc. of Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, 2009.
10. M. A. G. Huici, "Accurate Ground Penetrating Radar Numerical Modeling for Automatic Detection and Recognition of Antipersonnel Landmines," Ph.D. Thesis, Universität Bonn, 2012.
11. A. Eshaghi, P. spiritually, and A. S. Rbamyry, "Compare and combine results processing, modeling and interpretation of electrical tomography and GPR data to identify targets and shallow subsurface structures," *Journal of EARTH science*, vol. 92, pp. 3-10, 2011.
12. H. Sahami, M. Y. Radan, D. Majidi, "Detecting Buried Underground Structures Using Simulation of Gravity Data," *The Scientific Journal of Advanced Defance Science and Tachnology*, vol. 1, pp. 81-94, 2012.
13. M. Saif and S. Khzai, "Detection of Underground Targets Based on the Gravity Gradient Data Using the Euler Deconvolution Method," *Journal of Civil Defense*, vol. 1, pp. 33-43, 2015.

Modeling, Processing And Interpreting Ground Penetrating Radar (GPR) Data for Detecting Tunnels with a Case Study

I. Khaki, M. R. Seif*, S. Khazaei

Abstract

Basically, the use of defense buried tunnels is one of the main defense actions of each country. Detecting these buried targets is one of the most important and complex issues in the field of passive defense. The GPR method is one of the fastest and best electromagnetic methods for detecting buried targets. In this study, the possibility of detecting underground tunnels by GPR method has been investigated and field analysis has been carried out. To this end, in a test case, observations were made on the location of several tunnels located within a factory area by the Swedish Manufacturing Company Mala GPR. Deepening depth analysis of tunnels has been done by applying different processing methods to GPR data and examining the response of these tunnels in different environments. Based on experimental results obtained in this study, GPR is an appropriate method to estimate the length, width and height of underground tunnels, especially at low depths.

Keywords: *Underground Tunnels, Ground Penetrating Radar (GPR), Physical Anomalies, Passive Defense.*

* Imam Hussein Comprehensive University (m.r.seif@ut.ac.ir)- Writer-in-Charge