

# فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، ششم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، (سپتامبر ۳۲): صص ۲۸-۱۷

## آشکارسازی تونل‌ها و سازه‌های امن پدافندی با استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین (GPR) با رویکرد پدافند غیر عامل

ایمان خاکی<sup>۱</sup>، صفا خزایی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

### چکیده

یکی از اصولی‌ترین اقدامات دفاعی هر کشور استفاده از سازه‌های زیرزمینی، به‌خصوص تونل‌ها و پناهگاه زیرزمینی است. با این وجود، بررسی احتمال آشکارسازی این سازه‌های زیرزمینی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل در حوزه پدافند غیرعامل می‌باشد. امروزه، روش‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین (GPR) در شناسایی سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی توسعه فراوانی یافته‌اند. در این تحقیق قابلیت این روش‌ها برای کشف تونل با انجام مطالعه موردی بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش ناهنجاری‌هایی را بر روی تونل نشان می‌دهند. با این وجود، تخمین محل تونل‌ها با ترکیب نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش نتایج قابل اعتمادتری ارائه می‌دهد. همچنین در این تحقیق، ناهنجاری‌های ژئوالکتریکی حاصل از یک بلوک مستطیلی با انجام شبیه‌سازی‌های متنوع مورد بررسی قرار گرفته است و راه‌کارهای پدافندی برای کاهش احتمال کشف این سازه‌های مدفون ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی، مقاومت‌ویژه الکتریکی، رادار نفوذی زمین، ناهنجاری ژئوالکتریکی، پدافند غیرعامل

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، (skhazai@ihu.ac.ir) نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

می‌توان اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی را با صرف هزینه و زمانی اندک، از زیر زمین به دست آورد. ژئوفیزیک مانند بسیاری از علوم، به دو بخش محض و کاربردی تقسیم می‌شود. ژئوفیزیک محض، مطالعه فیزیکی تمام یا بخش وسیعی از زمین را شامل می‌شود و ژئوفیزیک کاربردی مباحث گسترده‌ای از تعیین ضخامت پوسته (که در اکتشافات هیدروکربن‌ها بسیار اهمیت دارد) گرفته تا مطالعه ساختارهای کم عمق برای بررسی مهندسی مناطق، اکتشاف آب‌های زیرزمینی، اکتشاف مواد معدنی، حفره‌های مدفون، تونل‌های زیرزمینی، برداشت بقایای باستان‌شناسی، تعیین محل لوله‌ها و کابل‌های مدفون و ... را شامل می‌شود [۴].

در دهه گذشته پیشرفت روش‌های ژئوفیزیکی بسیار سریع بوده است؛ این امر به دلیل پیشرفت علوم و فناوری، توسعه تجهیزات صحرایی و همچنین حساسگرهای رقومی که در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی کاربرد فراوانی دارند، می‌باشد. 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 فناوری‌های ژئوفیزیکی را در دستور کار قرار داده است؛ که این موضوع اهمیت و کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مباحث نظامی را نشان می‌دهد.

برای اینکه یک روش ژئوفیزیکی در آشکارسازی هدف مورد نظر موفق عمل کند؛ بایستی پارامتر فیزیکی مربوط به این روش تباین کافی نسبت به محیط اطراف داشته باشد. به‌عنوان مثال، در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین (GPR<sup>۱</sup>) بایستی به ترتیب رسانندگی الکتریکی و ثابت دی الکتریک هدف مورد بررسی با محیط اطراف تفاوت کافی داشته باشد؛ تا بتواند اطلاعاتی در مورد ساختارهای زیرزمینی به‌دست دهد و ژئوفیزیکدانان را در تعیین محل‌های مناسب برای جستجوی کانسارهای معدنی، اهداف اکتشافی و یا شناسایی سازه‌های زیرزمینی یاری کند [۵]. از آنجایی که تباین ثابت دی الکتریک و مقاومت الکتریکی بین تونل و محیط اطراف اغلب قابل توجه است، از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و GPR به‌منظور اکتشاف تونل استفاده شده است. در سی سال گذشته تحقیقات بسیاری پیرامون راه‌های تعیین محل تونل‌های زیرزمینی انجام شده است. از جمله راه‌هایی که برای اکتشاف و تعیین محل تونل‌های زیرزمینی می‌توان نام برد عبارت‌اند از: روش لرزه‌ای انکساری، الکترومغناطیس، مقاومت‌ویژه الکتریک، گراویتی و روش رادار نفوذی به زمین [۶]. کرافورد [۷] در مطالعات خود استفاده از روش‌های میکروگراویتی و مقاومت‌ویژه الکتریکی را

استفاده از تونل‌های زیرزمینی از اواسط قرن بیستم به‌عنوان یک ابزار تعیین کننده در مباحث دفاعی مورد توجه قرار گرفت؛ زیرا این تونل‌ها امنیت لازم جهت مخفی نگه‌داشتن تجهیزات در برابر سلاح‌های دشمن را فراهم می‌کنند. با توسعه جنگ‌افزارهای ضد اهداف مدفون که دارای قدرت نفوذ و تخریب بالا هستند؛ فرماندهان نظامی بایستی حداکثر اقدامات استتاری را بر روی این سازه‌ها انجام دهند. با استتار این تأسیسات زیرزمینی، شناسایی آن‌ها با استفاده از سنسورهای مرئی و حرارتی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، شناسایی این اهداف به یکی از چالش‌های نظامی بزرگ و مهم قرن حاضر تبدیل شده است [۱]. تاکنون هیچ روش قطعی جهت شناسایی این‌گونه تأسیسات مدفون زیرزمینی ارائه نشده است. با ترکیب روش‌های مختلف شناسایی مانند روش‌های ژئوفیزیکی، ماهواره‌ها، سنجش حرارتی و صوتی و ... احتمال آشکارسازی این تأسیسات زیرزمینی وجود دارد [۲].

آگاهی از روش‌ها و فنون علمی که دشمن می‌تواند به‌کار گیرد و سازه‌های زیرزمینی امن، به خصوص تونل‌های زیرزمینی را شناسایی کند، یک امر ضروری است. پس از شناسایی این روش‌ها می‌توان به‌صورت کارشناسانه و علمی راه‌کارهایی برای عدم شناسایی این سازه‌ها توسط دشمن ارائه کرد؛ یا در صورت لزوم می‌توان با به‌کارگیری این روش‌ها سازه‌های زیرزمینی حفرشده توسط دشمن را شناسایی کرد.

با تعیین تقریبی محل سازه زیرزمینی مورد نظر، راحت‌تر و سریع‌تر می‌توان آن را شناسایی کرد. واضح است که این کار نیازمند استفاده از ابزارهای شناسایی است؛ که بتوانند موقعیت نسبی و در صورت امکان ابعاد سازه مدفون را تعیین کنند. محل تقریبی سازه زیرزمینی می‌تواند به‌عنوان یک هدف اولیه برای دیگر روش‌های شناسایی به‌منظور بررسی دقیق‌تر به کار رود. بدین ترتیب می‌توان بر روی یک مکان و یا یک نقطه خاص متمرکز شد و اطلاعات کامل‌تر همراه با جزئیات بیشتر در مورد هدف مورد نظر کسب کرد [۳]. در این مقاله از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده شده است.

ژئوفیزیک به معنای عام، کاربرد فیزیک در بررسی و شناخت زمین و محیط اطراف آن است؛ به عبارت دیگر، ژئوفیزیک به مطالعه کمی خواص مختلف فیزیکی زمین می‌پردازد. با استفاده از این نتایج کمی می‌توان به مطالعه خصوصیت‌های فیزیکی و رفتار پوسته زمین پرداخت. لذا می‌توان این علم را پلی بین فیزیک و زمین‌شناسی دانست که از فنون و تئوری‌های ریاضیات و علوم کامپیوتر استفاده می‌کند. با برداشت‌های نسبتاً ساده و به دنبال آن تفسیرهای اصولی

## ۲- مدل سازی معکوس روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین

هدف از مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده‌های صحرایی داشته باشد. مدلی که با تعداد محدودی پارامتر قابل کنترل باشد؛ تا بتوان با تغییر این پارامترها بهترین مدلی را که با داده‌های صحرایی و خصوصیات زمین‌شناسی و دیگر اطلاعات منطقه هم‌خوانی داشته باشد، به‌دست آورد [۱۲]. در مدل‌سازی، قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز می‌باشد [۱۲]. روش‌های مدل‌سازی معکوس معمولاً از یک روش بهینه‌سازی غیرخطی برای بهبود بخشیدن به این مدل ساده اولیه استفاده می‌کنند [۱۳].

از آنجایی که روابط مدل‌سازی معکوس بسیار پیچیده است، ابتدا مدل‌سازی مستقیم بررسی می‌شود. به‌عنوان مثال، مدل‌سازی مستقیم یک زمین لایه‌ای با یک بی‌هنجاری درون زمین بررسی می‌شود. تمامی مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی در نهایت به یک معادله دیفرانسیلی ختم می‌شوند. برای یافتن پاسخ مدل بایستی این معادله دیفرانسیلی حل شود. معادله دیفرانسیل حاکم بر یک زمین لایه‌ای با حضور بی‌هنجاری به شکل زیر است:

$$\nabla^2 V = \frac{-I}{\sigma} \delta(r, r'_s) - \frac{\nabla \sigma \cdot \nabla V}{\sigma} \quad (1)$$

در این رابطه  $\delta(r, r'_s) = \begin{cases} 0 & r \neq r'_s \\ 1 & r = r'_s \end{cases}$  می‌باشد.

حل معادله دیفرانسیلی نشان داده شده در رابطه (۱) به‌صورت زیر امکان‌پذیر است:

$$V(r) = \frac{1}{2\pi} \int_V \frac{I}{\sigma R} \delta(r, r'_s) dv' + \frac{1}{2\pi} \int_V \frac{\nabla \sigma \cdot \nabla V}{\sigma R} dv' \quad (2)$$

در این رابطه،  $R = \sqrt{(x - x'_s)^2 + (y - y'_s)^2 + (z - z'_s)^2}$  است و نقطه  $s$ ، محل چشمه نقطه‌ای جریان می‌باشد. انتگرال بالا به‌صورت تحلیلی قابل حل نیست. برای حل این معادله بایستی از روش‌های عددی مانند اجزاء محدود، تفاضل محدود و یا روش معادلات انتگرالی استفاده کرد. تفاوت این سه روش، متفاوت بودن حل معادله مورد نظر است. مثلاً در روش معادلات انتگرالی، توابع پتانسیل با توابع گرین جایگزین می‌شوند. بنابراین، معادله دیفرانسیلی نشان داده شده.

در رابطه (۲)، می‌توان با استفاده از روش معادلات انتگرالی به‌صورت زیر نوشت:

$$V(r) = \frac{1}{2\pi} \int_V \frac{I}{\sigma} \delta(r, r'_s) G(r, r'_s) dv' + \quad (3)$$

به‌منظور شناسایی تونل‌ها و غارها پیشنهاد کرد. نتایج تحقیقات کرافورد نشان دادند که داده‌های گرانی و مقاومت ویژه بر روی یک غار به ترتیب بی‌هنجاری با مقادیر گراویتی پایین و مقاومت ویژه بالا نشان می‌دهند و بدین ترتیب توانستند محل غار را مشخص کنند. همچنین در پژوهشی دیگر از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری انکساری برای آشکارسازی غارهای مدفون استفاده شد [۸]. پژوهشگران در این تحقیق موفق شدند با تلفیق این دو روش محل غار، ابعاد و عمق هدف را با دقت قابل قبولی تعیین کنند. در تحقیقی دیگر مطالعاتی بر روی لوله‌های مدفون به روش GPR انجام شده است [۹]. در مقاله‌ای دیگر از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین به‌منظور اکتشاف تونل استفاده شده است [۱۰]. محققان در این پژوهش موفق شدند با تلفیق این دو روش محل تونل را با دقت بالایی مشخص کنند. علاوه بر این موارد، در تحقیق دیگری روش‌های مختلف ژئوفیزیکی اعم از لرزه‌ای انکساری، الکترومغناطیس، GPR، گرانی‌سنجی و مقاومت ویژه الکتریکی برای شناسایی سازه‌های زیرزمینی به‌طور اجمالی معرفی شده و برای هر کدام یک شبیه‌سازی ساده انجام شده است [۱۱].

روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های مناسب و مؤثر و تنها روش‌های غیر مخرب با بالاترین سرعت و دقت به‌منظور اکتشاف تونل‌های زیرزمینی هستند. هر یک از این روش‌ها نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند. حال با تلفیق دو یا چند روش ژئوفیزیکی و استفاده از نقاط قوت هر یک از این روش‌ها می‌توان به تفسیری دقیق‌تر با اعتبار بالاتری رسید. در این تحقیق از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و GPR برای آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی استفاده شده است. هدف این پژوهش تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR و بررسی نتایج حاصل از تفسیر این دو روش برای شناسایی تونل‌های زیرزمینی و سازه‌های امن پدافندی همچنین بررسی پارامترهای مؤثر بر نتایج به‌دست‌آمده از این روش‌ها به‌منظور ارائه راه‌کارهای فنی جهت عدم شناسایی این سازه‌ها توسط دشمن می‌باشد. بدین منظور ابتدا جایگاه روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و GPR در آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی بررسی شد. سپس یک مطالعه موردی با استفاده از داده‌های GPR و یک مطالعه موردی توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی بر روی یک تونل واقعی انجام شد؛ و در نهایت با شبیه‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه حاصل از یک بلوک مستطیلی، اثر پارامترهای مختلف مانند عمق تونل، رسانندگی روباره، ضخامت روباره و ... بر شناسایی اهداف مدفون به‌منظور ارائه راه-کارهایی برای کاهش احتمال آشکارسازی آن‌ها توسط دشمن، بررسی شد.

روش‌های تفاضل محدود و یا اجزاء محدود استفاده شده است. مقدار اولیه فاکتور تعدیل به سطح منطقه بستگی دارد. هر چه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. در هر بار تکرار، خطای RMS محاسبه شده و سعی شد که مقدار آن کاهش یابد؛ بنابراین باید گفت که برای محاسبه پاسخ پتانسیل الکتریکی زمین در روش مقاومت‌ویژه از طریق ورود جریان الکتریکی به زمین، الگوریتم معکوس سازی آن قدر تکرار می‌شود تا بهترین توزیع مقاومت‌ویژه در سطح که بیشترین تطبیق را با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد به دست آید [۱۶]. در این مقاله برای مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی از نرم‌افزار Res2Dinv استفاده شده است.

## ۲-۱- روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

روش‌های ژئوالکتریکی بر مبنای مطالعه میدان‌های الکتریکی زمین یا ویژگی‌های الکتریکی ساختارهای زمین‌شناسی و معدنی استوارند و کاربرد فراوانی در شناسایی اهداف زیرزمینی دارند [۱۹]. توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی، یکی از روش‌های ژئوالکتریکی است که به بررسی ساختارهای زیرسطحی می‌پردازد. مزیت اصلی این روش، بررسی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی هم به صورت جانبی و هم به صورت قائم در فضا است. از عمده‌ترین محدودیت‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی زمان‌بر بودن برداشت داده‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از این روش در اکتشاف اجسام مدفون در نزدیکی سطح زمین بسیار مورد توجه واقع شده است. بر همین اساس روش توموگرافی مقاومت ویژه به عنوان ابزاری برای شناسایی فضاهای زیرزمینی مدفون شناخته می‌شود [۲۰].

مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین ارائه می‌دهد. هدف از برداشت‌های الکتریکی تخمین چگونگی توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح زمین به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های سطحی می‌باشد. مقاومت ویژه زمین به عوامل مختلفی همچون کانی‌ها، آب محتوی، تخلخل و درجه اشباع آب در سنگ بستگی دارد [۱۶].

روش مقاومت ویژه از جریان مستقیم یا جریان متناوب با فرکانس پایین برای بررسی خواص الکتریکی مواد زیر سطح استفاده می‌کند. در این روش، جریان الکتریکی مصنوعی به وسیله الکترودهای جریان به درون زمین فرستاده شده و اختلاف پتانسیل در سطح، به وسیله الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود؛ شکل (۱). این اختلاف پتانسیل، اطلاعاتی در مورد نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح ارائه می‌دهد. روش مقاومت ویژه به دلیل تغییرات وسیع مقاومت ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها، به طور مؤثری برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی، بررسی آلودگی‌های زیست‌محیطی،

$$\frac{1}{2\pi} \int_V \frac{\nabla \sigma \cdot \nabla V}{\sigma} G(r, r'_s) dv'$$

با توجه به قانون اهم و روابط  $\rho = \frac{q}{t}$  و  $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$  می‌توان نتیجه گرفت که برای مدل‌سازی پتانسیل الکتریکی بایستی مقدار  $q$  را روی هر المان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$V(r) = \frac{I}{2\pi\sigma} G(r_p, r'_s) + \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{\epsilon_0} \int_{s_n} G(r_p, r'_s) ds' \quad (۴)$$

بدین ترتیب پتانسیل الکتریکی مدل‌سازی می‌شود.

معادله عمومی مدل‌سازی پیشرو را به صورت معادله (۱۲)

می‌باشد:

$$d = Gm \quad (۵)$$

در این رابطه،  $d$  پاسخ مدل،  $G$  تابع کرنل و  $m$  بیانگر پارامترهای مدل است. فرآیند مدل‌سازی معکوس، عکس مدل‌سازی پیشرو است. مسائل خطی معکوس به کمک معادله ماتریسی تعمیم‌یافته حاصل از معادله (۵) به صورت معادله (۶) حل می‌شوند:

$$m = G^{-1}d \quad (۶)$$

در این تحقیق برای مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی از روش کمترین مربعات غیرخطی استفاده شده است. محاسبات عددی با روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود انجام شده است. مدل مورد استفاده به عنوان مدل اولیه در این تحقیق شامل یک سری بلوک‌های مستطیلی دوبعدی است؛ که تعداد بلوک‌ها با تعداد نقاط داده‌ها در شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر است [۱۴]. مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه به روش هموار انجام شد. در مدل‌سازی معکوس هموار، از روش بهینه‌یابی حداقل مربعات استفاده شد و یک زمین تک لایه‌ی همگن به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته شده است [۱۵]. معادله‌ی این روش به صورت معادله (۷) می‌باشد:

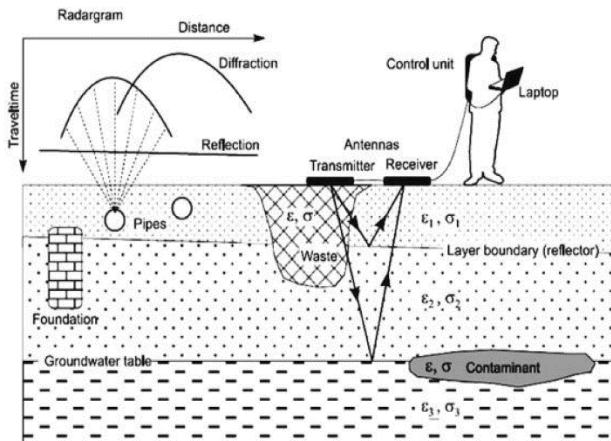
$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (۷)$$

در این رابطه،  $\lambda$  فاکتور تعدیل،  $J$  ماتریس ژاکوبین،  $d$  بردار آشفته‌گی مدل و  $g$  بردار همگرایی می‌باشد و  $F$  از معادله (۸) به دست می‌آید:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۸)$$

در این رابطه،  $f_x$  فیلتر هموارساز افقی و  $f_z$  فیلتر هموارساز عمودی می‌باشد. می‌توان فاکتور تعدیل و فیلترهای هموارسازی را برای انواع مختلف داده‌ها تنظیم نمود. برای انجام محاسبات فوق از

- گودال‌های منفرد و گروهی
- تونل‌های حفر شده زیر بانک، زندان‌ها، مغازه‌ها، گالری‌ها، موزه‌ها و انبارها و ساختمان‌هایی برای سرقت یا فرار از زندان
- سلاح و موشک‌های مخفی دفن شده، مهمات، مواد پر خطر و سایر دستگاه‌های شنود.
- آزمایش غیر مخرب ارزیابی و نظارت بر وضعیت اشیاء، موضوع تحقیقاتی جنایی یا اقدامات امنیتی ویژه.
- مکان اجساد به خاک سپرده شده
- تعیین بقایای انسانی و ... در یک سنگر
- حفره‌ها و خندق زیر زمین

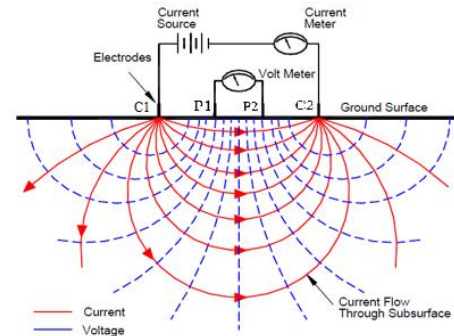


شکل ۲- نحوه برداشت صحرائی داده‌های رادار نفوذی زمین و نمایش بعضی کاربردهای GPR [۲۳].

### ۳- نتایج تجربی شناسایی تونل با استفاده از داده‌های واقعی

رادار نفوذی زمین GPR و مقاومت ویژه الکتریکی از قدرتمندترین و مهم‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی ساختارهای زیرزمینی از جمله تونل‌های زیرزمینی می‌باشند. روش GPR به تغییرات ثابت دی‌الکتریک سنگ‌ها و مواد زیرسطحی حساس هستند؛ در حالی که پاسخ الکتریکی به مقاومت ویژه الکتریکی سنگ وابسته است. در این تحقیق یک مطالعه موردی با استفاده از داده‌های GPR و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی بر روی تونلی که از قبل شناخته شده بود انجام شد. اگر چه تباین ثابت دی‌الکتریک و یا نفوذپذیری نسبی مغناطیس مواد و مقاومت الکتریکی بین تونل و محیط اطراف اغلب قابل توجه است، اما اکتشاف تونل به دلیل کاهش قدرت تفکیک این روش‌ها با اندازه تونل و ناهمگنی محیط همچنان دشوار باقی‌مانده است. با توجه به این که تونل‌ها معمولاً ساختارهای مشخصی دارند و

اکتشاف کانسارهای معدنی، بررسی مسائل مهندسی برای تعیین محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از روش مقاومت ویژه اغلب به‌منظور اکتشاف تونل و غار استفاده می‌شود [۲۱].



شکل ۱- نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی [۲۲]

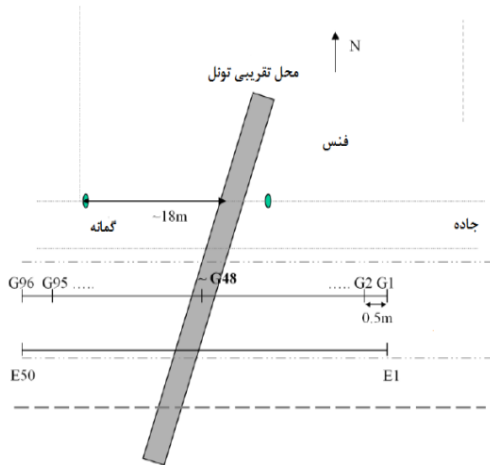
### ۲-۲- روش رادار نفوذی زمین

روش رادار نفوذی زمین یا GPR یکی از روش‌های پیشرفته ژئوفیزیکی است که قادر به کاوش و شناسایی لایه‌های نزدیک به سطح زمین می‌باشد. در این روش یک موج الکترومغناطیس با فرکانس بالا به درون زمین ارسال می‌شود. این موج در برخورد با مرز دو ماده که خواص الکتریکی متفاوتی دارند، بازتاب می‌شود. پس از انجام عملیات پردازش بر روی داده‌های حاصل از برداشت این امواج بازتابی، با بررسی ویژگی‌هایی از موج مانند دامنه، فرکانس، سرعت و ... می‌توان اطلاعاتی مانند موقعیت مرز لایه‌های درون زمین، عمق مواد مدفون، ابعاد عوارض موجود و ... را به‌دست آورد [۲۴]. (شکل ۲).

از کاربردهای نظامی رادار نفوذی زمین GPR موقعیت‌یابی غیرمخرب، تعیین عمق و نقشه‌برداری از:

- زاغه مهمات، پناهگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی، تونل‌های و غارها و دیگر مکان‌های استراتژیکی زیرزمینی
  - مین‌های ضد پیاده و ضد تانک، پوکه فشنگ، گلوله و نارنجک‌های منفجر نشده
  - نقص در زاغه مهمات، تونل‌ها، جاده‌ها، باند فرودگاه‌ها، پل‌ها و دیگر مکان‌های استراتژیکی
  - کابل‌ها، خطوط لوله و تونل‌ها و دیگر ارتباطات دشمن و ...
- همچنین در جرم‌شناسی، پزشک قانونی و برنامه‌های امنیتی
- حفاظ و مخفیگاه‌ها

بهره های مختلف سعی شده تا در این مطالعه بر روی هر نیمرخ از بهره ای متفاوت با دیگر نیمرخ ها استفاده شود. داده های GPR توسط نرم افزار Win\_Ekko\_Pro پردازش شده و خروجی آن ها توسط نرم افزار Transfor به نمایش درآمده است.



شکل ۳- موقعیت قرارگیری پروفیل های مقاومت ویژه الکتریکی

### ۳-۲- نتایج به دست آمده از مدل سازی معکوس داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین

داده های حاصل از برداشت صحرائی توموگرافی مقاومت ویژه توسط نرم افزار Res2Dinv مورد مدل سازی معکوس قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از داده های مقاومت ویژه بعد از سومین تکرار در شکل (۴) آورده شده است. شکل های (۴-الف) و (۴-ب)، به ترتیب شبه مقطع حاصل از داده های خام مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده به وسیله نرم افزار Res2Dinv و شکل (۴-ج)، مقطع حاصل از مدل سازی معکوس هموار داده های توموگرافی مقاومت ویژه را نشان می دهد؛ که نشان دهنده توزیع نهایی مقاومت ویژه می باشد. به دلیل تعداد کم داده ها در عمق های بالاتر، مدل دوزنقه ای حاصل از مدل سازی پیش رو به روش اجزاء محدود قابل قبول است. همچنین داده هایی که در فاصله ۴۰m از ابتدای پروفیل برداشت شده اند؛ به دلیل این که از انحراف معیار ده برابر بزرگتر هستند، حذف شده اند. با حذف داده های بد، ناهنجاری را بهتر و راحت تر می توان مشخص کرد. همان طور که در شکل (۴-ج) مشاهده می شود، مقادیر مقاومت ویژه بین ۳۰ Ωm تا ۱۰۰ Ωm متغیر است. دو ناهنجاری با مقادیر مقاومت ویژه بالا در حدود ۷۰ Ωm در فواصل ۲۰m و ۲۶m از ابتدای پروفیل، به ترتیب در عمق های تقریبی ۲m و ۶m مشاهده می شوند. این دو ناهنجاری می توانند مربوط به حفره مدفون در یک سنگ هوازه با رسانایی بالا باشند. بی هنجاری اول که با A<sub>1</sub> نشان داده شده تقریباً در عمق ۶m

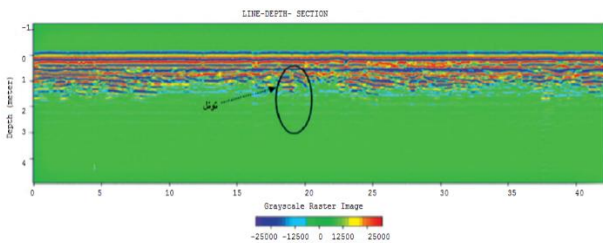
اغلب به شکل استوانه ای ساخته می شوند، اکتشاف تونل ها در مقایسه با سایر حفرات زیرزمینی آسان تر است. ژئوفیزیکدان ها برای کاهش ابهام در تفسیرهای ژئوفیزیکی در کاربردهای مختلف مانند کاربردهای ژئوتکنیکی، اکتشاف نفت و اکتشافات معدنی از چند روش ژئوفیزیکی استفاده می کنند. با تفسیر داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و یا GPR در یک منطقه، می توان جنس زمین شناسی لایه ها، عمق و ابعاد ساختارهای زیرزمینی و ... را تعیین کرد.

### ۳-۱- برداشت صحرائی

بررسی های میدانی بر روی یک تونل با ابعاد ۱/۶ × ۱m ، طول ۸m ، با دسترسی سطحی خوب که تقریباً ۱۳m زیر سطح زمین قرار دارد انجام شد. داده ها تقریباً در مرکز و عمود بر راستای تونل، جایی که تونل در عمق ۶m قرار دارد برداشت شد؛ تا بیشترین داده ها در نزدیکی تونل برداشت شده باشد (شکل ۳). برای برداشت داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی از ۵۰ الکتروود با فاصله الکتروودی ۱m و آرایش دوقطبی- دوقطبی استفاده شد. طول خط برداشت ۴۹m می باشد. علت انتخاب آرایش دوقطبی- دوقطبی در این تحقیق، بالا بودن قدرت تفکیک جانبی، پوشش افقی و عمودی محیط بررسی و همچنین عمق نفوذ بالای این آرایش می باشد [۱۲]. عمق بررسی روش مقاومت ویژه به فاصله الکتروودی وابسته است. به گونه ای که هر اندازه فاصله بین الکتروودهای جریان و پتانسیل افزایش یابد، عمق بررسی نیز افزایش می یابد. با این وجود، با افزایش فاصله الکتروودی، جریان بیشتری لازم است تا ولتاژ قابل اندازه گیری باشد.

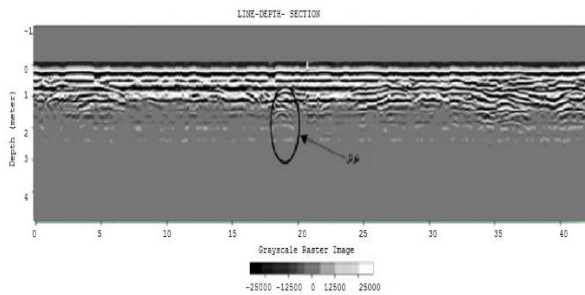
داده های GPR در این پژوهش توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شده است. این دستگاه از آنتن پوششی ۲۵۰ MHz برای ارسال پالس های الکترومغناطیسی استفاده می کند. داده ها به روش ممتد و نیمرخ زنی با فواصل ایستگاهی ۵cm و پنجره زمانی ۱۰۰ns بر روی تونل دیگری برداشت شد. برای حذف نوفه های پیشای محیطی و همچنین به دلیل بالا بودن زمان برداشت، تعداد ردها<sup>۱</sup> مقدار پایین ۳۲ رد در نظر گرفته شده است. فاصله میان آنتن های فرستنده و گیرنده ثابت و برابر با ۲۷۹۴m /۰ بوده است. برای تبدیل مقاطع بر حسب زمان به مقاطع بر حسب ژرفا نیز با بررسی زمین شناسی منطقه و همچنین مشخص بودن تقریبی ژرفای تونل در برخی نیمرخ ها که سبب ایجاد هذلولی های مشخص در این نیمرخ ها شده و با استفاده از برازش هذلولی مدل با هذلولی ناشی از اهداف زیرسطحی، سرعت در محیط زیرسطحی برابر ۰/۱m بر نانوثانیه به دست آمد. برای پرهیز از یکنواختی بررسی بر روی هر نیمرخ و نمایش اثرات پردازش با

مقطع GPR نیم‌رخ ۱ نیز در شکل (۵) دیده می‌شود. در این نیم‌رخ بر روی داده‌ها فیلتر Dewow و بهره AGC با بیشینه تقویت ۵۰۰ اعمال شده است. به‌گونه‌ای که تونل در پیش از ۲۰ m نیم‌رخ و از ژرفای ۰/۵m شروع می‌شود. ژرفای نفوذ کمتر امواج در سمت راست تونل نسبت به سمت چپ آن نشان دهنده نفوذ بیشتر آب و یا وجود مقادیر بالاتر رس در این بخش است. نکته دیگر ژرفای نفوذ بالای امواج GPR در ابتدای نیم‌رخ بوده که تا حدود ۲m می‌رسد که نشان از دانه‌بندی بزرگ‌تر ذرات و کمتر بودن میزان رس در این بخش دارد.



شکل ۵- ژرفای عمقی GPR نیم‌رخ ۱ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC

داده‌های برداشت GPR نیم‌رخ ۲ در شکل (۶) نشان داده شده است. بر روی داده‌های مقطع ژرفایی این نیم‌رخ به ترتیب فیلتر Dewow و بهره AGC با بیشینه تقویت ۳۰۰ اعمال شده است. تونل در این نیم‌رخ در موقعیت ۲۰m و در ژرفای ۰/۵ m اثر خود را به روشنی نشان می‌دهد.

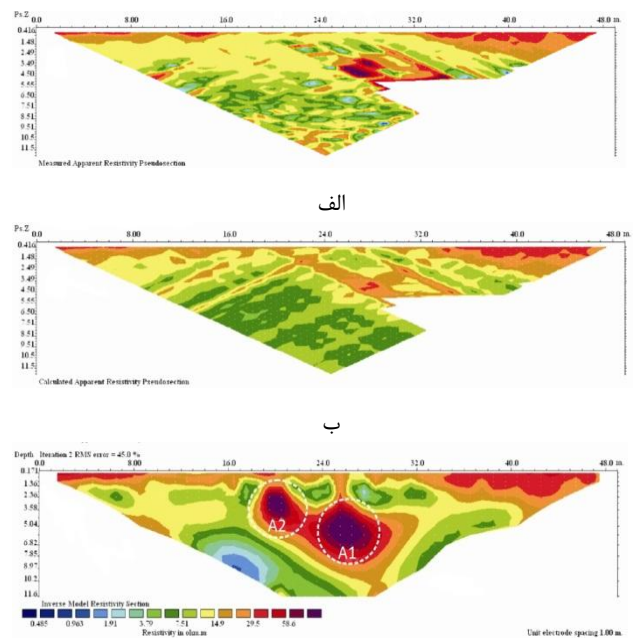


شکل ۶- مقطع عمقی GPR نیم‌رخ ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC

#### ۴- تحلیل شناسایی تونل با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه حاصل از یک بلوک مستطیلی

برای بررسی دقیق‌تر مسئله آشکارسازی اهداف مدفون از جمله تونل‌های زیرزمینی، سازه‌های امن پدافندی، پناهگاه‌ها، زاغه مهمات و... بایستی اثر پارامترهای مختلف بر روی شناسایی هدف مورد نظر بررسی شود. پارامترهای متفاوتی بر روی آشکارسازی یک تونل

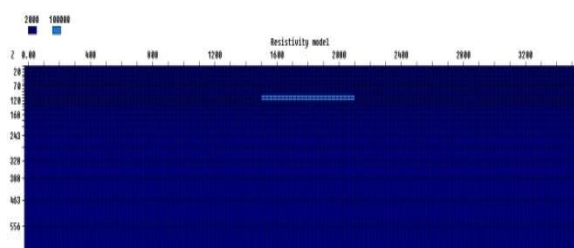
و در فاصله ۲۶ m از ابتدای پروفیل قرار گرفته و با توجه به عمق تونل در این ناحیه (عمق تونل ۶ m است) احتمالاً مربوط به تونل زیرزمینی است. بی‌هنجاری دوم که با A<sub>2</sub> نشان داده شده، در عمق ۲ m و در فاصله ۲۰ m از ابتدای پروفیل قرار دارد و با توجه به اطلاعاتی که از منطقه در دسترس می‌باشد، مبهم بوده و به بررسی بیشتر نیاز دارد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تونل‌های زیرزمینی بایستی مقادیر مقاومت‌ویژه بالایی از خود نشان بدهند (به دلیل تراکم بالا، وجود فضای خالی که با هوا پر شده و مقاومت ویژه بسیار بالایی دارد و...)؛ در حالی که ناهنجاری مرتبط با تونل در این تحقیق مقاومت ویژه چندان بالایی ندارد. این امر به دلیل نزدیک بودن سطح آب زیرزمینی به تونل و همچنین ورود آب زیرزمینی به داخل تونل در بعضی مواقع از سال می‌باشد؛ که نواحی با مقاومت ویژه پایین درست در بالا و پایین هر دو ناهنجاری این موضوع را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که روند همواری که در مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در لبه‌ها مشاهده می‌شود، باید در هنگام تفسیر نادیده گرفته شود؛ زیرا به احتمال زیاد متأثر از نوع شرایط مرزی شبکه‌بندی در گوشه‌ها است؛ که پارامترهای این ناهنجاری به دلیل بزرگی سلول و دقت کمتر مدل‌سازی با اغراق نشان داده شده است.



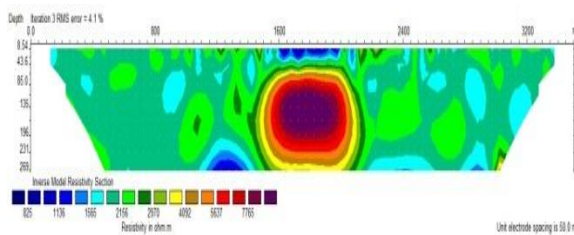
ج

شکل ۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه (الف) شبه‌مقطع به دست آمده از داده‌های مشاهده‌ای، (ب) شبه‌مقطع به دست آمده از داده‌های محاسبه شده و (ج) مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس توسط نرم‌افزار Res2Dinv



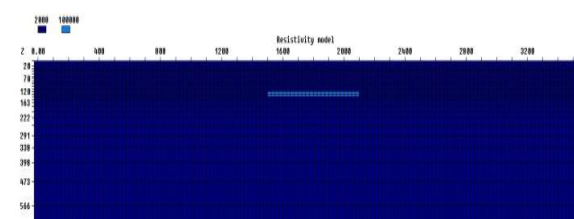


الف

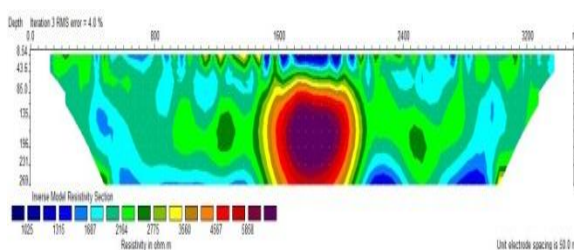


ب

شکل ۷- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $۶۰۰ \times ۲۰$  در عمق  $۱۰۰$  m، ساخته شده در نرم افزار Res2Dmod. ب) مقطع به دست آمده از مدل سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم افزار Res2Dinv



الف



ب

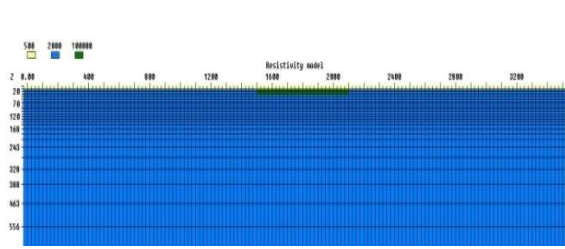
شکل ۸- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $۶۰۰ \times ۲۰$  در عمق  $۱۲۰$  m، ساخته شده در نرم افزار Res2Dmod. ب) مقطع به دست آمده از مدل سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم افزار Res2Dinv

زیرزمینی با روش مقاومت ویژه اثرگذار هستند. از جمله این پارامترها می توان به عمق تونل، ضخامت روباره و رسانندگی روباره اشاره کرد. اثر هر کدام از این پارامترها بر آشکارسازی تونل بررسی شد؛ تا مشخص شود که تونل مورد نظر بایستی در چه عمقی ساخته شود تا قابلیت آشکارسازی نداشته باشد. بدین منظور با در نظر گرفتن اختلاف رسانندگی هدف مورد نظر با محیط اطراف، ابعاد هدف و تغییر پارامترهای عمق، ضخامت روباره و رسانندگی روباره می توان به شبیه سازی داده های مقاومت ویژه پرداخت و احتمال آشکارسازی یک تونل زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد؛ تا بتوان راه کارهای پدافندی مناسبی را برای کاهش احتمال کشف این سازه های مدفون توسط دشمن ارائه داد. جهت نزدیکی داده های شبیه سازی شده به واقعیت ۵٪ نوفه اضافی به داده ها اضافه شد. بدین منظور مدل های زمین شناسی (بلوک مستطیلی) که می توانند یک هدف زیرزمینی مانند یک تونل زیرزمینی باشند در نرم افزار Res2Dmod تولید شدند. این مدل های مصنوعی ارائه شده با نرم افزار Res2Dinv مورد مدل سازی معکوس قرار گرفتند. به طور کلی، بی هنجاری مشاهده شده بر روی مقطع مقاومت ویژه از ابعاد واقعی هدف مورد نظر بزرگ تر است. مقاطع مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی معکوس هموار در ادامه ارائه شده است. در نهایت روش هایی برای کاهش احتمال آشکارسازی این سازه ها توسط دشمن ارائه شده است.

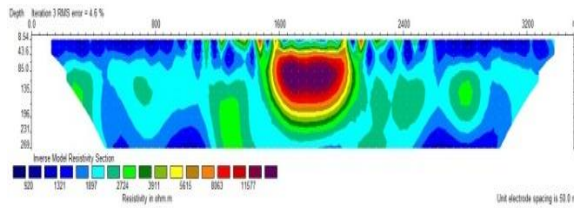
#### ۴-۱- تأثیر عمق بر آشکارسازی اهداف مدفون

مدل ارائه شده یک بلوک مستطیلی به عرض  $۶۰۰$  m و ارتفاع  $۲۰$  m با مقاومت ویژه  $۱۰۰۰۰ \Omega m$  (مقاومت ویژه فضای خالی) می باشد؛ که در بستری با مقاومت ویژه  $۲۰۰۰ \Omega m$  قرار گرفته است. بلوک مستطیلی به ترتیب در عمق های  $۱۰۰$  m،  $۱۲۰$  m و  $۱۴۰$  m قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل سازی معکوس همواره با نرم افزار Res2Dinv در شکل های (۷-۹) ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که در عمق  $۱۰۰$  m عرض بلوک و محدوده قرارگیری آن به خوبی مشخص شده است (کمی به سمت چپ شیفت پیدا کرده است)؛ و در کل هدف در این عمق به خوبی شناسایی شده است. در عمق  $۱۲۰$  m، محدوده بلوک به خوبی مشخص شده و فقط کمی به سمت پایین کشیدگی پیدا کرده است. در این عمق، بلوک با دقت کمتری نسبت به حالت قبل قابل شناسایی است؛ اما بلوکی با این ابعاد در عمق  $۱۴۰$  m دیگر قابل شناسایی نیست؛ بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که یک هدف زیرزمینی با ابعاد و مشخصات بیان شده حداکثر تا عمق  $۱۲۰$  m قابل شناسایی می باشد.



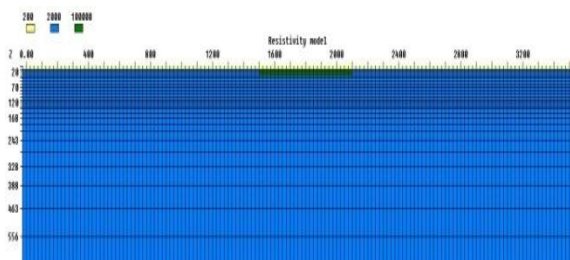


الف

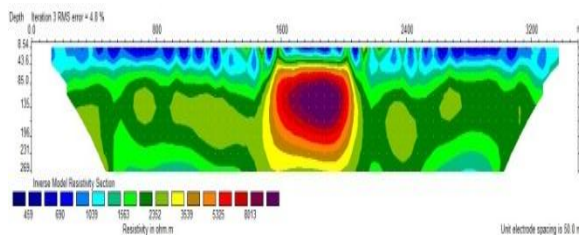


ب

شکل ۱۰- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $600 \times 200$  m با روباره‌ای به ضخامت ۱۰ m و مقاومت ویژه  $500 \Omega m$  بر روی آن، ساخته شده در نرم‌افزار Res2Dmod. ب) مقطع به‌دست‌آمده از مدل‌سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم‌افزار Res2Dinv

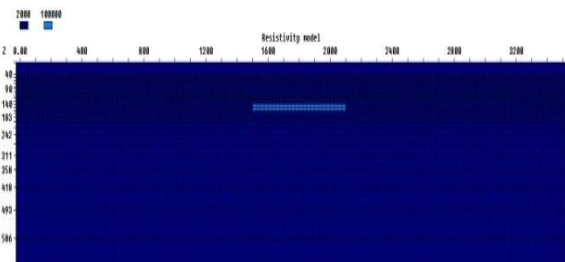


الف

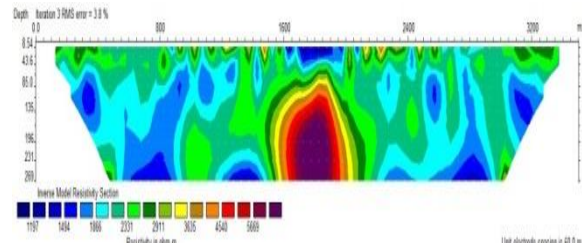


ب

شکل ۱۱- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $600 \times 200$  m با روباره‌ای به ضخامت ۱۰ m و مقاومت ویژه  $200 \Omega m$  بر روی آن، ساخته شده در نرم‌افزار Res2Dmod. ب) مقطع به‌دست‌آمده از مدل‌سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم‌افزار Res2Dinv



الف

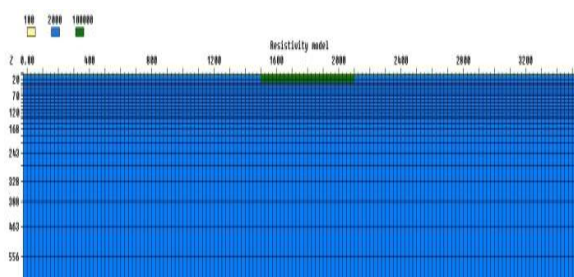


ب

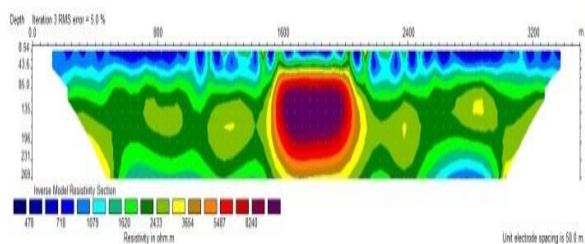
شکل ۹- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $600 \times 200$  m در عمق ۱۴۰ m، ساخته شده در نرم‌افزار Res2Dmod. ب) مقطع به‌دست‌آمده از مدل‌سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم‌افزار Res2Dinv

#### ۴-۲- تأثیر رسانندگی روباره بر آشکارسازی اهداف مدفون

مدل ارائه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ m و ارتفاع ۲۰ m با مقاومت ویژه  $10000 \Omega m$  در بستری با مقاومت ویژه  $2000 \Omega m$  است؛ که روباره‌ای به ضخامت ۱۰ m و با مقاومت ویژه به ترتیب  $500 \Omega m$ ،  $200 \Omega m$  و  $50 \Omega m$  بر روی آن قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی معکوس هموار نشان می‌دهد که در حالتی که مقاومت ویژه روباره  $500 \Omega m$  است، عرض بلوک و محدوده آن با دقت قابل قبولی مشخص شده است و بلوک به راحتی قابل شناسایی است. با کاهش مقاومت ویژه روباره به  $200 \Omega m$  بلوک باز هم قابل شناسایی است؛ با این تفاوت که با دقت پایین‌تری نسبت به حالت قبل می‌توان ابعاد بلوک را تعیین کرد. در حالتی که مقاومت ویژه بلوک  $50 \Omega m$  است، یک ناهنجاری بر روی مقطع مدل‌سازی مشاهده می‌شود؛ که بررسی‌های بیشتری باید انجام شود و نمی‌توان آن را به هدف مورد نظر نسبت داد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کمترین مقاومت ویژه روباره‌ای که هدف مورد نظر می‌تواند توسط روش مقاومت ویژه شناسایی شود،  $200 \Omega m$  می‌باشد (شکل‌های ۱۰-۱۲).

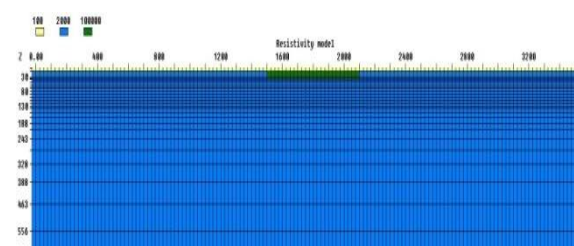


الف

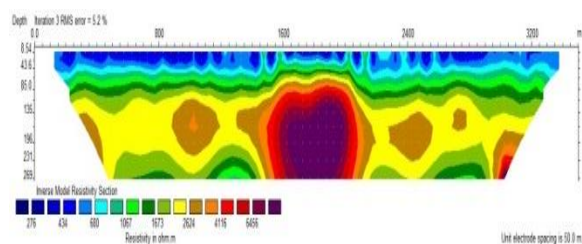


ب

شکل ۱۳- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $60 \times 20$  m با روباره‌ای با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  و به ضخامت  $5 m$  و بر روی آن، ساخته شده در نرم افزار Res2Dmod. ب) مقطع به-دست آمده از مدل سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم افزار Res2Dinv

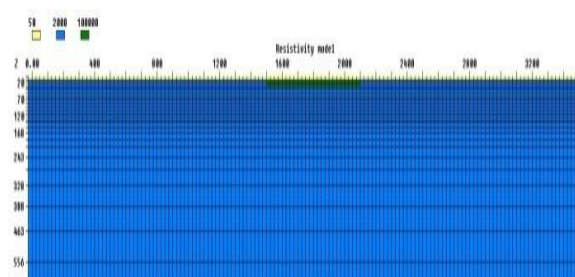


الف

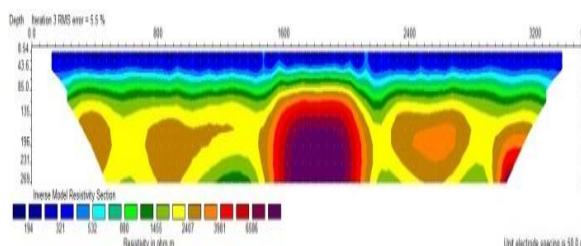


ب

شکل ۱۴- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $60 \times 20$  m با روباره‌ای با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  و به ضخامت  $10 m$  بر روی آن، ساخته شده در نرم افزار Res2Dmod. ب) مقطع به-دست آمده از مدل سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم افزار Res2Dinv



الف



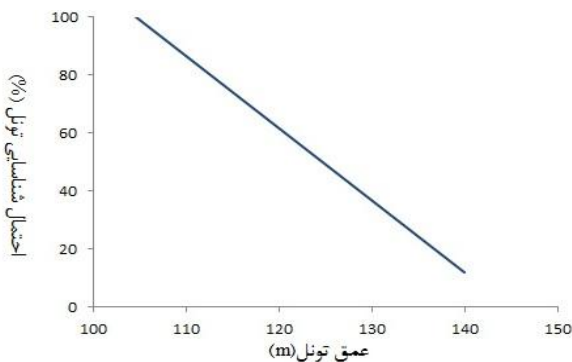
ب

شکل ۱۲- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد  $60 \times 20$  m با روباره‌ای به ضخامت  $10 m$  و مقاومت ویژه  $50 \Omega m$  بر روی آن، ساخته شده در نرم افزار Res2Dmod. ب) مقطع به-دست آمده از مدل سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم افزار Res2Dinv

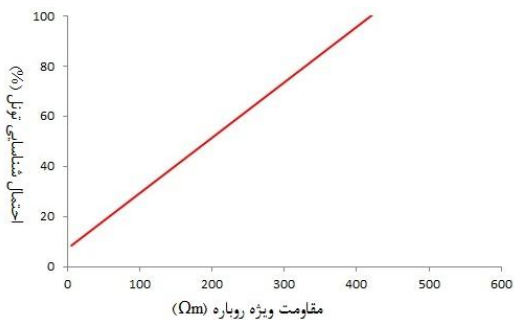
۴-۳- تأثیر ضخامت روباره بر آشکار سازی اهداف مدفون  
مدل ارائه شده یک بلوک مستطیلی به عرض  $60 m$  و ارتفاع  $5 m$  با مقاومت ویژه  $20 \Omega m$  در بستری با مقاومت ویژه  $10000 \Omega m$  است، که روباره‌ای با مقاومت ویژه  $100 \Omega m$  و با ضخامت‌های به ترتیب  $5 m$ ،  $10 m$  و  $20 m$  بر روی آن قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با روباره‌ای به ضخامت  $5 m$  می‌توان ابعاد بلوک را با دقت بالایی تعیین کرد؛ و بلوک به راحتی با روش مقامت ویژه قابل شناسایی است. زمانی که ضخامت روباره به  $10 m$  و  $20 m$  افزایش یافت، ناهنجاری‌هایی با مقاومت ویژه بالا در مقاطع حاصل از مدل سازی مشاهده شده است؛ اما نمی‌توان این بی‌هنجاری‌ها را به هدف مورد نظر نسبت داد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده بیشترین ضخامت روباره‌ای که هدف مورد نظر می‌تواند توسط روش مقامت ویژه شناسایی شود  $5 m$  می‌باشد. (شکل‌های (۱۵-۱۳)).

گمراه می‌کند؛ زیرا شناسایی تونل‌های زیرزمینی در روش مقاومت ویژه در صورتی امکان‌پذیر است که بین تونل و محیط اطراف تباين کافی مقاومت ویژه وجود داشته باشد. همچنین، در صورتی که به تونل مورد نظر را به چند تونل با ابعاد کوچک‌تر تقسیم کرد، راه-کارهای ذکر شده تأثیر بیشتری خواهند داشت.

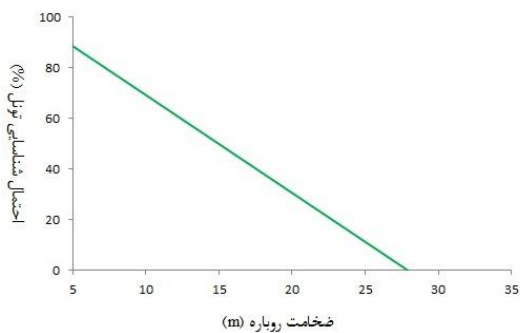
لازم به ذکر است که برای کاهش احتمال شناسایی تونل، افزایش رسانندگی روباره (استفاده از روباره رساناتر) و همچنین افزایش ضخامت روباره نسبت به افزایش عمق مقرون به‌صرفه‌تر است.



الف

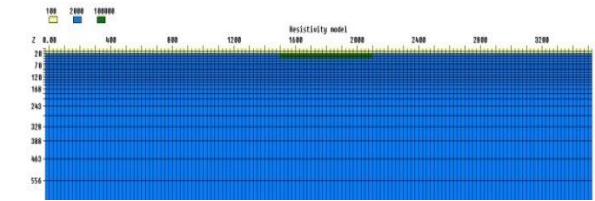


ب

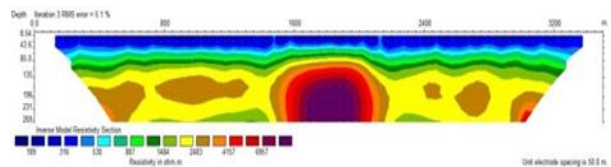


ج

شکل ۱۶- نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه مربوط به یک بلوک مستطیلی در شرایط متفاوت



الف



ب

شکل ۱۵- الف) مدل مصنوعی مربوط به یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ × ۲۰ m با روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ Ωm و به ضخامت ۲۰ m بر روی آن، ساخته شده در نرم‌افزار Res2Dmod، ب) مقطع به-دست‌آمده از مدل‌سازی معکوس هموار این مدل مصنوعی در نرم‌افزار Res2Dinv

### ۵- تحلیل کیفی راه‌کارهای پدافند

با در نظر گرفتن ابعاد و تباين مقاومت‌ویژه بین سازه‌های زیرزمینی با محیط اطراف و استفاده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه حاصل از این سازه‌های زیرزمینی، می‌توان احتمال کشف آن‌ها را تخمین زد و راه‌کارهای مناسبی جهت کاهش احتمال کشف این سازه‌ها توسط دشمن ارائه کرد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه مربوط به یک بلوک مستطیلی در شرایط متفاوت، در شکل‌های (الف-۱۵) و (ج-۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (الف-۱۵) مشاهده می‌شود؛ بلوک مستطیلی مورد نظر در عمق ۱۰۰ m به‌خوبی شناسایی شده است؛ در حالی که همین بلوک در عمق‌های بالاتر از ۱۴۰ m، دیگر قابل شناسایی نیست؛ بنابراین هر اندازه عمق تونل افزایش یابد، شناسایی آن توسط آشکارسازهای دشمن سخت‌تر است. شکل‌های (ب-۱۵) و (ج-۱۵)، به ترتیب تأثیر رسانندگی روباره و ضخامت روباره را بر آشکارسازی تونل نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که هر اندازه مقاومت ویژه روباره کاهش (افزایش رسانندگی روباره) و یا ضخامت روباره افزایش یابد، احتمال آشکارسازی اهداف مدفون کمتر می‌شود. به‌عنوان مثال روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ Ωm (مثلاً رس) و ضخامت ۱۰ m باعث می‌شود که آشکارسازی یک بلوک با عرض ۶۰۰ m و ارتفاع ۲۰ m با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰ Ωm در بستری با مقاومت ویژه ۲۰۰۰ Ωm با مشکل مواجه شود. علاوه بر موارد فوق، وجود نواحی با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت و اغلب نزدیک به مقاومت ویژه تونل، نویز تلقی شده و دشمن را در شناسایی هدف

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا از داده‌های واقعی برای شناسایی تونل زیرزمینی استفاده شد. سپس به منظور ارائه راه‌کارهایی در زمینه پدافند غیرعامل برای کاهش احتمال کشف تونل‌های زیرزمینی، داده‌های مقاومت ویژه حاصل از یک بلوک مستطیلی شبیه‌سازی شدند. نواحی با مقاومت ویژه بالا در مقاطع الکتریکی می‌توانند مرتبط با محل تونل باشند؛ زیرا مقاومت ویژه تونل و هوای داخل آن از سنگ‌های هوازه رسانا بیش‌تر است. از طرف دیگر، در روش GPR به‌واسطه افزایش ژرفای نفوذ قابل تشخیص است. مقاطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی دو ناهنجاری را نشان دادند؛ که بی‌هنجاری که در وسط خط برداشت مشاهده شد مرتبط با محل تونل است. همان‌طور که مشاهده شد، ناهنجاری مقاومت ویژه تونل از تونل واقعی بزرگ‌تر است. قدرت تفکیک بالاتر روش GPR و نیز سرعت برداشت نسبتاً بیشتر این روش نسبت به روش دیگر مزیت به حساب می‌آید و به‌خوبی توانسته است محل تونل را شناسایی کند، با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، راهکارهای مؤثری جهت کاهش احتمال شناسایی سازه‌های مدفون و بهبود فرآیند استتار ارائه شد. از مدل‌سازی‌ها و نتایج به‌دست آمده از آن می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هرچه هدف بزرگ‌تر و به سطح نزدیک‌تر باشد شناسایی آن راحت‌تر است. همچنین می‌توان از راه‌هایی مانند افزایش مقاومت ویژه محیط به‌منظور کاهش تباین مقاومت ویژه بین هدف و محیط اطراف، افزایش ضخامت و افزایش رسانندگی روباره استفاده کرد. به‌عنوان مثال، روباره‌ای به ضخامت ۱۰ m و از جنس رس باعث می‌شود که یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ m و ارتفاع ۲۰ m با مقاومت ویژه  $100000 \Omega m$  در بستری با مقاومت ویژه  $2000 \Omega m$  شناسایی نشود. البته هر اندازه هدف مورد نظر کوچک‌تر باشد تأثیر پارامترهای ذکر شده بیشتر بوده و شناسایی هدف مورد نظر سخت‌تر است.

## ۷- مراجع

- 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 5778, 2005.
- J. M. Sabatier and T.G. Muir, "Workshop on real-time detection of clandestine shallow tunnels," NCPA report HB0306-01 for US Army Research Office, University of Mississippi, 2006.
- N. C. Crawford, L. A. Croft, G. L. Cesin, and S. Wilson, "Microgravity and Electrical Resistivity Techniques for Detection of Caves and Clandestine Tunnels," American Geophysical Union, 2006.
- E. Cardarelli, M. Cercato, A. Cerreto, and G. Filippo, "Electrical Resistivity and Seismic Refraction Tomography to Detect Buried Cavities," Geophys. Prospect, vol. 58, no. 4, pp. 685-695, 2010.
- C. J. Hickey, D. J. Schmitt, J. M. Sabatier, and G. Riddle, "Seismic Measurements for Detecting Underground High-contrast Voids," Proc. of Symposium on Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, pp. 929-936, 2009.
- I. Grey, J. Caraig, and R. Douglas, "Subsurface tunnel detection using electrical resistivity tomography and seismic refractin tomography: A case study," In Proc. of 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2010.
- A. Madanchi Zare, H. Dehghani, K. Mousa Zade, and S. Taghavi, "Modelling the Ability of Geophysics Sensors for Underground Utility Detection and Some Solutions to Disable Them," Passive Defence Journal, vol. 16, pp. 63-76, 2013.
- M. H. Loke and R. D. Barker, "Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method," Geophys. Prospect, vol. 44, pp. 131-152, 1996.
- A. Samouelian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard, "Electrical resistivity survey in soil science: a review: Soil and Tillage Research," Elsevier, 2005.
- M. H. Loke, "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys," Tutorial, 2000.
- M. H. Loke and R.D. Barker, "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections," J. Geophys., vol. 60, pp. 1682-1690, 1995.
- M. H. Loke, "2-D and 3-D electrical imaging surveys," Tutorial, 2004.
- P. Aasha, J. G. Anderson, J. N. Louie, and K. Satish, "Measurement of shallow shear wave velocities at a rock site using the ReMi technique," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 28, no. 7, pp. 522-535, 2008.
- C. H. Shin, "Refraction Tomography parameterization," J. Seism. Explor, vol. 8, pp. 143-156, 1999.
- K. Manstein and I. E. Mikhail, "Subsurface permeability for groundwater study using electrokinetic phenomenon," Water Security in the Mediterranean Region, Springer Netherlands, pp. 87-95, 2011.
- G. Leucci, F. Greco, L. De Giorgi, and R. Mauceri, "Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola' (Sicily, Italy)," J. Archaeol. Sci., vol. 34, pp. 233-242, 2007.
- H. R. Burger, "Exploration Geophysics of Shallow Subsurface," Prentice-Hall, EaglewoodCliffs, NJ, vol. 489, 1992.
- O. R. Corvallis, "D. C. Resistivity methods," Northwest Geophysical Associates, Inc., 2000.
- Ground Penetrating Radar, www.tstengineering.com/en/ground-penetratingradar.
- A. P. Annan, "Electromagnetic principles of ground penetrating radar," vol. 1, Chapter 1, 2009.
- E. M. Sepp, "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations," Project Report No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.
- 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, pp. 333-342, 2002.
- A. Lance, M. Birrell, K. Borowski, S. Korth, N. Obermeyer, and E. Tesla, "Technologies for the Detection and Monitoring of Clandestine Underground Tunnels," Project 07-03, 2008.
- W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, "Applied Geophysics," 2nd edition, Cambridge University Press, 1990.

# Detection of Underground Tunnels and Defensive structures safe Using Electrical Resistivity and Ground Penetrating Radar (GPR) with Passive Defense Approach

I. Khaki, S. Khazaei\*

## Abstract

The use of underground structures, particularly tunnels and shelter, is one of the most basic defensive measures of each country. However, studying the possibility of detecting underground structures is one of the most complex issues in the field of passive defense. Today, electrical resistivity and ground-penetrating radar (GPR) geophysical methods have been greatly developed to identify structures and underground cavities. In this study, the ability of these methods to detect tunnels has been investigated by conducting a case study. The results of both methods show abnormalities in the tunnel under test. However, estimating the location of the tunnel by combining the results from both methods gives reliable results. Also, in this study, geo-electrical abnormalities of a rectangular block through various simulations have been examined and defensive strategies to reduce the probability detection of buried structures have been provided.

**Key Words:** *Detection of Underground Tunnels, Electrical Resistivity, Ground Penetrating Radar (GPR), Geoelectrical anomalies, Passive Defense.*

---

\* Shahid Beheshti University (skhazai@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge