

آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی

سید حسین موسوی^۱ و صفا خزائی^{۲*}

۱. کارشناس، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۱۲/۱۰، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

روش‌های لرزه‌ای شکستی و مقاومت ویژه الکتریکی از توانمندترین روش‌های ژئوفیزیکی در آشکارسازی سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی از جمله تونل‌های زیرزمینی هستند. در این تحقیق براساس مدل‌سازی وارون، در مورد قابلیت این روش‌ها برای آشکارسازی تونل با یک بررسی موردی تحقیق شده است. در بررسی موردی، داده‌های مربوط به هر دو روش تقریباً هم‌زمان با آفست ۳ متر برداشت شد. نتایج به‌دست آمده از هر دو روش بی‌هنجاری‌هایی را در محل تونل موردنظر نشان داد. با وجود این، برآورد محل تونل با ترکیب نتایج به‌دست آمده از هر دو روش نتایج قابل‌اعتمادتری به‌دست داد. همچنین در این تحقیق، بی‌هنجاری‌های ژئوالکتریکی حاصل از یک بلوک مستطیلی با اجرای شبیه‌سازی‌های متنوع، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده، بلوک مستطیلی موردنظر در عمق‌های بالاتر از ۱۴۰ متر، قابل آشکارسازی نیست. همچنین، هر اندازه مقاومت ویژه روباره کاهش و یا ضخامت روباره افزایش یابد، احتمال آشکارسازی تونل کمتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش مقاومت ویژه الکتریکی یکی از توانمندترین روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی تونل‌های زیرزمینی است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی، تونل‌های زیرزمینی، مقاومت ویژه الکتریکی، لرزه‌نگاری شکستی.

۱. مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی مسئول تعیین خواص فیزیکی سنگ‌ها، لایه‌های زیر سطح زمین و شناسایی ساختارهای زیرسطحی هستند (گیری و همکاران، ۲۰۰۵). روش توموگرافی الکتریکی به‌نسبت روش جدیدی با برداشت بهینه است؛ که به‌منظور افزایش دقت و نیز بهبود قدرت تفکیک عمقی (قائم) و جانبی (افقی) در شناسایی هدف‌های زیرزمینی به کار می‌رود (لوک، ۲۰۰۴). امروزه این روش به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی هدف‌های دفن شده زیرزمینی مانند تونل‌های زیرزمینی به کار می‌رود (مک‌دونالد و دیویس، ۲۰۰۳). روش لرزه‌ای شکستی به سبب هزینه کم در بررسی‌های نزدیک به سطح، کاربرد فراوانی در شناسایی هدف‌های کم‌عمق دارد. مدل‌سازی مصنوعی و بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که روش توموگرافی لرزه‌ای روشی مناسب برای شناسایی تونل‌های زیرزمینی است (گرندجین، ۲۰۰۶).

خواص فیزیکی تونل‌ها، غارها و حفره‌های زیر سطحی به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به محیط اطراف متفاوت است. با وجود اینکه حفره‌ها تباین زیادی با محیط اطراف دارند، اما به علت نسبت بین قدرت تفکیک روش‌های ژئوفیزیکی با اندازه حفره‌ها، همچنین شکل‌های اغلب نامنظم و ناهمگنی مواد تشکیل دهنده حفره نسبت به محیط اطراف که می‌توانند چند بی‌هنجاری قابل توجه را نشان دهند، بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی مرتبط با این حفره‌ها به راحتی قابل آشکارسازی نیستند. از آنجا که تونل‌ها معمولاً ساختارهای مشخصی دارند و به شکل استوانه‌ای ساخته می‌شوند، نسبت به دیگر حفره‌ها و ساختارهای زیرزمینی راحت‌تر آشکارسازی می‌شوند. مشکل اصلی در مورد آشکارسازی تونل مربوط به کاهش قدرت تفکیک

روش ژئوفیزیکی با کاهش اندازه تونل و ناهمگنی مواد اطراف آن است.

برای اینکه یک روش ژئوفیزیکی در آشکارسازی هدف مورد نظر موفق عمل کند؛ باید پارامتر فیزیکی مربوط به این روش، تباین کافی نسبت به محیط اطراف داشته باشد. برای مثال، در روش مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی، باید به ترتیب رسانش الکتریکی و چگالی هدف مورد بررسی با محیط اطرافش تفاوت کافی داشته باشد؛ تا بتواند اطلاعاتی در مورد ساختارهای زیرزمینی به دست دهد و ژئوفیزیک‌دانان را در تعیین محل‌های مناسب برای جست‌وجوی کانسارهای معدنی، هدف‌های اکتشافی و یا شناسایی سازه‌های زیرزمینی یاری کند (استولارزیکا و همکاران، ۲۰۰۵). ساخت تونل و تخریب محیط، خواص فیزیکی محیط را تغییر می‌دهد که اثرات قابل توجهی روی ژئوفیزیک بر جای می‌گذارد. برای مثال، ساخت تونل محیطی با مدول حجمی پایین‌تر، سرعت لرزه‌ای کم و در اغلب موارد آب محتوی کمتر ایجاد می‌کند. از آنجا که مقاومت ویژه الکتریکی به شدت به میزان آب محتوی، شکستگی‌های حاوی رس و نمک‌های قابل حل وابسته است، تونل‌ها مقاومت ویژه زیادی آشکار می‌سازند. از طرف دیگر کشسانی خاک به شدت به تراکم و پیوستگی ذرات، درجهٔ سیمان‌شدگی و آب محتوی وابسته است؛ بنابراین، تونل مقادیر سرعت کم را آشکار می‌سازد. از آنجا که تباین سرعت لرزه‌ای و مقاومت ویژه الکتریکی بین تونل و محیط اطراف اغلب قابل توجه است، از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی به منظور آشکارسازی تونل استفاده شده است.

در سی سال گذشته تحقیقات بسیاری پیرامون راه‌های تعیین محل تونل‌های زیرزمینی صورت گرفته است. از جمله راه‌هایی که برای آشکارسازی و تعیین محل تونل‌های زیرزمینی می‌توان نام برد عبارت‌اند از: روش لرزه‌ای شکستی، الکترومغناطیس، مقاومت ویژه

الکتریکی، گرانی و روش رادار نفوذی به زمین (ساباتیر و مویر، ۲۰۰۶). کرافورد و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقات خود استفاده از روش‌های میکروگرانی و مقاومت ویژه الکتریکی را برای آشکارسازی تونل‌ها و غارها پیشنهاد کردند. نتایج تحقیقات کرافورد و دیگران روشن ساخت که داده‌های گرانی و مقاومت ویژه روی یک غار به ترتیب بی‌هنجاری با مقادیر گرانی کم و مقاومت ویژه زیاد نشان می‌دهد؛ و آنان بدین ترتیب توانستند محل غار را مشخص کنند. همچنین، در پژوهشی دیگر از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی برای آشکارسازی غارهای دفن شده، استفاده شد (کارداری و همکاران، ۲۰۱۰). 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، بررسی‌هایی روی لوله‌های دفن شده به روش لرزه‌نگاری شکستی صورت گرفت (هیکی و همکاران، ۲۰۰۹). در مقاله‌ای دیگر از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی به منظور آشکارسازی تونل استفاده شده است (گری و همکاران، ۲۰۱۰). محققان در این پژوهش موفق شدند با تلفیق این دو روش، محل تونل را با دقت زیاد مشخص کنند. علاوه بر این موارد، در تحقیق دیگری روش‌های گوناگون ژئوفیزیکی اعم از لرزه‌ای شکستی، الکترومغناطیس، گرانی سنجی و مقاومت ویژه الکتریکی برای آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی به‌طور اجمالی معرفی شده و برای هر کدام یک شبیه‌سازی ساده صورت گرفته است (معدنچی و همکاران، ۲۰۱۳).

روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های مناسب و مؤثر و تنها روش‌های غیر مخرب با بیشترین سرعت و دقت برای آشکارسازی 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 و معتبرتر رسید. در این تحقیق از روش‌های

از راه اندازه‌گیری‌های سطحی است. مقاومت ویژه زمین به عوامل گوناگونی همچون کانی‌ها، آب محتوی، تخلخل و درجه اشباع آب در سنگ بستگی دارد (لوک، ۲۰۰۴). توموگرافی مقاومت ویژه 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، قدرت تفکیک زیاد، قابلیت برداشت سریع داده‌ها و هزینه‌های اندک است. به علاوه روش‌های مدل‌سازی وارون پیشرفته نیز در این زمینه موجود است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). در سال‌های اخیر استفاده از این روش در آشکارسازی اجسام دفن شده در نزدیکی سطح زمین بسیار مورد توجه واقع شده است. بر همین اساس روش توموگرافی مقاومت ویژه، در حکم ابزاری برای آشکارسازی فضاهای زیرزمینی دفن شده شناخته می‌شود (لیوچی و همکاران، ۲۰۰۷). توموگرافی الکتریکی در واقع روشی است که می‌توان با آن گسترش فضایی یک خاصیت را از راه عبور یک جریان الکتریکی در همان فضا تعیین کرد. بنابراین اولین مرحله توموگرافی الکتریکی، فرستادن یک جریان الکتریکی به درون زمین و اندازه‌گیری پاسخ زمین به این جریان است که معمولاً برحسب ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود.

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

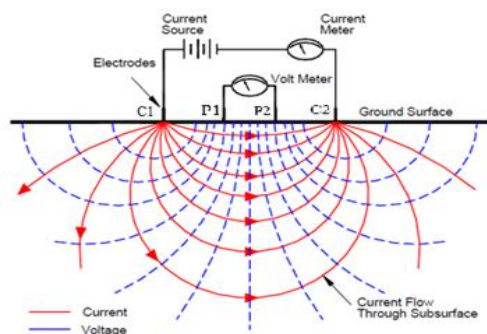
توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و توموگرافی لرزه‌نگاری شکستی برای آشکارسازی یک تونل زیرزمینی استفاده شده است. هدف این پژوهش تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی، مقایسه و ترکیب نتایج حاصل از تفسیر این دو روش برای آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی و همچنین بررسی پارامترهای مؤثر بر نتایج به دست آمده از داده‌های مقاومت ویژه به منظور بررسی توانمندی این روش در آشکارسازی حفره‌های زیرزمینی است. بدین منظور ابتدا جایگاه روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی در آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی بررسی شد. سپس یک بررسی موردی با استفاده از داده‌های توموگرافی لرزه‌نگاری شکستی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی روی یک تونل واقعی صورت گرفت (به علت دقت زیاد و همچنین بررسی تغییرات هم به صورت جانبی و هم به صورت قائم از توموگرافی لرزه‌ای و الکتریکی برای آشکارسازی تونل استفاده شد)؛ و در نهایت با شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه حاصل از یک بلوک مستطیلی، اثر پارامترهای گوناگون مانند عمق تونل، رسانش روباره، ضخامت روباره و مانند آن‌ها بر آشکارسازی هدف‌های دفن شده بررسی شد؛ تا جایگاه و توانمندی این روش در آشکارسازی حفره‌های زیرزمینی به طور دقیق‌تر مشخص شود.

۲. روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی

روش‌های ژئوالکتریکی بر مبنای بررسی میدان‌های الکتریکی زمین یا ویژگی‌های الکتریکی ساختارهای زمین‌شناسی و معدنی استوارند و کاربرد فراوانی در آشکارسازی هدف‌های زیرزمینی دارند (میکائیل، ۱۹۹۴). مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین به دست می‌دهد. هدف از برداشت‌های الکتریکی، برآورد چگونگی توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح زمین

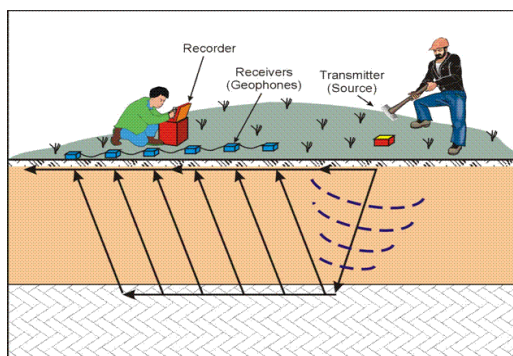
۲.

داده های خام لرزه‌ای از زمان سیر امواج از نقطه انفجار تا ژئوفون‌ها و فاصله بین نقطه انفجار تا ژئوفون‌ها تشکیل شده‌اند. این داده‌های زمان مسافت را پردازش می‌کنند و به صورت سرعت در برابر عمق در می‌آورند. بدین ترتیب با داشتن فاصله و زمان‌های سیر بین نقاط چشمه و ایستگاه‌های گیرنده می‌توان سرعت یک موج را در یک لایه خاص برآورد کرد. در واقع در روش لرزه‌ای شکستی، زمان سیر موج لرزه‌ای با ترکیبی از چند منبع و گیرنده ثبت می‌شود؛ تا مدل بهینه توزیع سرعت لرزه‌ای در سطح به دست آید؛ و از روی نقشه سرعت بتوان وجود تفاوت کافی در خواص کشسان مواد در سطح را مشاهده کرد. برتری این روش نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیکی، دقت و توان تفکیک زیاد آن است. این روش می‌تواند برای شناسایی هدف‌های زیرزمینی مؤثر باشد؛ اما به سبب اثرات جانبی و هزینه زیاد، کمتر مورد توجه است و اغلب در حکم روش ثانویه برای بالا بردن دقت نتایج به کار می‌رود.



شکل ۱. نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار

الکترودی (کروالیس، ۲۰۰۰)



شکل ۲. نحوه برداشت صحرایی داده‌های لرزه‌ای شکستی

اکتشاف کانسارهای معدنی، بررسی مسئله‌های مهندسی در تعیین محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از روش مقاومت ویژه اغلب به منظور آشکارسازی تونل و غار استفاده می‌شود (برگر، ۱۹۹۲). روش لرزه‌نگاری شکستی یکی از روش‌های اصلی ژئوفیزیکی در بررسی ساختارهای زیرزمینی و بی‌هنجاری‌های محلی است. این روش به طور گسترده‌ای در کاربردهای گوناگون مانند کاربردهای مهندسی، زیست‌محیطی، آب‌های زیرزمینی، هیدروکربن و آشکارسازی ساختارهای زیرزمینی کاربرد دارد (لنکستون، ۱۹۸۹).

توموگرافی لرزه‌ای از کارآمدترین روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشافات معدنی، تحقیقات زیست‌محیطی، اکتشاف مناطق کارستی و سازه‌های زیرزمینی است. در این روش، با اندازه‌گیری سرعت سیر امواج لرزه‌ای و رسم خم‌های هم سرعت که نشان‌دهنده نحوه توزیع سرعت امواج در حدفاصل فرستنده‌ها و گیرنده‌ها هستند، توده‌های خاک و سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش براساس تباین سرعت در لایه‌های گوناگون به بررسی ساختارهای زیرزمینی می‌پردازد. در این روش، انرژی مورد نیاز برای تولید امواج لرزه‌ای با ضربه پتک یا انداختن وزنه ایجاد می‌شود؛ و زمان رسیدن موج فشاری تولید شده با منبع انرژی، اندازه‌گیری می‌شود. امواج منتشر شده بعد از انتشار در زمین، در ایستگاه‌های گیرنده با کمک آشکارسازهای حساس به ارتعاش، ثبت می‌شوند (شکل

بالا به صورت تحلیلی قابل حل نیست. برای حل این معادله باید از روش‌های عددی مانند اجزای 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، تابع‌های پتانسیل با تابع‌های گرین جایگزین می‌شوند. بنابراین معادله دیفرانسیلی نشان داده شده در رابطه (۲) را می‌توان با استفاده از روش معادلات انتگرالی به صورت رابطه (۳) نوشت (کلر و فرینکنخت، ۱۹۶۶).

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

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

با توجه به قانون اهم و روابط $\rho = \frac{q}{t}$ و $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

همچنین با توجه به ثابت بودن جریان و رسانش الکتریکی می‌توان نتیجه گرفت که برای مدل‌سازی پتانسیل الکتریکی باید مقدار q را روی هر المان به صورت رابطه (۴) محاسبه کرد:

$$V(r) = \frac{1}{2\pi\sigma} G(r_p, r'_s) + \quad (4)$$

$$\frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{\epsilon_0} \int_{S_n} G(r_p, r'_s) ds'$$

بدین ترتیب پتانسیل الکتریکی مدل‌سازی می‌شود.

معادله عمومی مدل‌سازی پیشرو به صورت معادله (۵) است (مجو، ۱۹۹۴):

$$d = Gm \quad (5)$$

در این رابطه، d پاسخ مدل، G تابع کرنل و m بیانگر پارامترهای مدل است. فرایند مدل‌سازی وارون، عکس مدل‌سازی پیشرو است. مسئله‌های خطی وارون به کمک معادله ماتریسی تعمیم یافته حاصل از معادله (۵) به صورت معادله (۶) حل می‌شوند:

$$m = G^{-1}d \quad (6)$$

در این تحقیق برای مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت و ویژه الکتریکی از روش کمترین مربعات غیرخطی استفاده شده است. محاسبات عددی با روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود صورت گرفت. مدل مورد استفاده در حکم مدل اولیه در این تحقیق شامل مجموعه بلوک‌های مستطیلی دو بُعدی

۳. مدل‌سازی وارون داده‌های توموگرافی مقاومت

ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی

هدف از مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی، عرضه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده‌های صحرایی داشته باشد. مدلی که با تعداد محدودی پارامتر قابل اجرا باشد؛ تا بتوان با تغییر این پارامترها بهترین مدلی را که با داده‌های صحرایی و خصوصیات زمین شناسی و دیگر اطلاعات منطقه هم‌خوانی دارد، به دست آورد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). در مدل‌سازی، قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه در مدل‌سازی نیاز است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). روش‌های مدل‌سازی وارون معمولاً از یک روش بهینه‌سازی غیر خطی برای بهبود بخشیدن به این مدل ساده اولیه استفاده می‌کنند (ساموئلیان و همکاران، ۲۰۰۵).

از آنجا که روابط مدل‌سازی وارون بسیار پیچیده است، ابتدا مدل‌سازی مستقیم بررسی می‌شود. برای مثال، مدل‌سازی مستقیم یک زمین لایه‌ای با یک بی‌هنجاری درون زمین بررسی می‌شود. همه مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی در نهایت به یک معادله دیفرانسیلی ختم می‌شوند. برای یافتن پاسخ مدل باید این معادله دیفرانسیلی حل شود. معادله دیفرانسیل حاکم بر یک زمین لایه‌ای با حضور بی‌هنجاری به شکل زیر است (کلر و فرینکنخت، ۱۹۶۶):

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

در این رابطه، σ رسانش الکتریکی محیط، r فاصله بین نقطه اندازه‌گیری پتانسیل و بی‌هنجاری، r'_s فاصله بین محل منبع نقطه‌ای جریان و بی‌هنجاری و $\delta(r, r'_s) = \begin{cases} 0 & r \neq r'_s \\ 1 & r = r'_s \end{cases}$ می‌باشند. حل معادله دیفرانسیلی نشان داده شده در رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) امکان‌پذیر است (کلر و فرینکنخت، ۱۹۶۶):

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

در رابطه (۲)، $R = \sqrt{(x-x'_s)^2 + (y-y'_s)^2 + (z-z'_s)^2}$

و S معرف محل چشمه‌ی نقطه‌ای جریان است. انتگرال

در روش مقاومت ویژه، از طریق ورود جریان الکتریکی به زمین، الگوریتم وارون‌سازی آنقدر تکرار می‌شود تا بهترین توزیع مقاومت ویژه در سطح که بیشترین تطبیق را با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد به دست آید (لوک، ۲۰۰۴). در این تحقیق، برای مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی از نرم‌افزار Res2Dinv استفاده شده است.

معمولاً، مدل‌سازی وارون داده‌های لرزه‌ای شکستی برای محاسبه مدل عمق سرعت در اعماق کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای مدل‌سازی وارون داده‌های لرزه‌ای از روش کمترین مربعات استفاده شده است. در این روش، پارامترهای مدل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که میزان اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و محاسبات شده کمینه شود. در این مقاله، برای مدل‌سازی وارون داده‌های لرزه‌ای از نرم‌افزار Rayfract استفاده شده است. نرم‌افزار Rayfract برای توموگرافی داده‌های لرزه‌نگاری شکستی به کار می‌رود. توموگرافی روشی است که انرژی منتشر شده در یک محیط را اندازه‌گیری می‌کند؛ سپس از مؤلفه‌های این انرژی برای استنباط مشخصات محیطی که در آن پخش شده‌اند، استفاده می‌شود (پولامانا پالیل و لویی، ۱۹۹۴). این روش یکی از روش‌های تفسیر داده‌های لرزه‌ای است که در آن از روش‌های وارون روی یک شبکه، برای تعیین سرعت در سلول‌های دوبعدی در طول یک نیم‌رخ، برای به دست آوردن مدل سرعت استفاده می‌شود. در نتیجه توموگرافی لرزه‌ای در بسیاری از موارد مدلی به دست می‌دهد که از تفکیک پذیری و دقت زیادی دارد. توموگرافی لرزه‌ای بهترین برآزش مدل سرعت را با تکرار مقایسه اختلاف سرعت ساختارها با داده‌های مشاهده شده ایجاد می‌کند (شین، ۱۹۹۹). نرم‌افزار Rayfract مدل‌سازی وارون را با یک مدل گردان سرعت یک‌بعدی شروع می‌کند. سپس توزیع سرعت تا زمانی که بهترین انطباق با زمان‌های رسید به دست آید، تعیین می‌شود.

۴. برداشت صحرائی

در این تحقیق، بررسی‌های میدانی روی داده‌های تهیه شده

است؛ که تعداد بلوک‌ها با تعداد نقاط داده‌ها در شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر است (لوک، ۲۰۰۰). مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه به روش هموار صورت گرفت. در مدل‌سازی وارون هموار، از روش بهینه‌یابی حداقل مربعات استفاده شد و یک زمین تک‌لایه همگن در حکم مدل اولیه در نظر گرفته شد (لوک و بارکر، ۱۹۹۵). یک راه ساده برای به کار بردن روش وارون‌سازی بلوکی در معادلات حداقل مربعات، کاربرد روش حداقل مربعات دگربروزن داده شده به صورت تکراری است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). مدلی که بهترین برآزش را با داده‌های واقعی داشته باشد از راه یک روش بهینه‌سازی به دست می‌آید. معادله این روش بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶):

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d q - \lambda F_R q_k \quad (7)$$

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸)، Δq بردار تغییر پارامتر مدل و C_x ، C_y و C_z ماتریس‌های هموارکننده در جهت‌های X ، Y و Z هستند. α_x ، α_y و α_z نیز وزن‌های نسبی داده شده به فیلترهای هموارکننده در جهت‌های X ، Y و Z هستند. R_m و R_d ماتریس‌های وزن دهنده‌اند و طوری تعیین می‌شوند که در فرایند وارون‌سازی، مؤلفه‌های گوناگون بردارهای مدل ناهموار و داده‌های ناجور، وزن‌های مشابهی داشته باشند (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹). λ ضریب میرایی است و محدوده تغییراتی را که Δq می‌تواند داشته باشد، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹).

برای اجرای محاسبات فوق از روش‌های تفاضل محدود و یا اجزای محدود استفاده شده است. مقدار اولیه ضریب میرایی به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. هرچه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه ضریب میرایی هم بیشتر است. در هر بار تکرار، خطای RMS محاسبه شد و سعی بر آن بود که مقدار آن کاهش یابد. بنابراین باید گفت که برای محاسبه پاسخ پتانسیل الکتریکی زمین

آورده شده است. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، به ترتیب شبه‌مقطع حاصل از داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با نرم‌افزار Res2Dinv و شکل ۴-ج، مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون هموار داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه را نمایش می‌دهد؛ که نشان‌دهنده توزیع نهایی مقاومت ویژه است. به علت تعداد کم داده‌ها در عمق‌های بالاتر، مدل ذوزنقه‌ای حاصل از مدل‌سازی پیشرو به روش اجزای محدود قابل قبول است. همچنین داده‌هایی که در فاصله ۴۰ متری از ابتدای نیم‌رخ برداشت شده‌اند؛ به این علت که از انحراف معیار ده برابر بزرگ‌تر هستند، حذف شده‌اند. با حذف کردن داده‌های بد، بی‌هنجاری را بهتر و راحت‌تر می‌توان مشخص کرد. همان‌طور که در شکل ۴-ج مشاهده می‌شود، مقادیر مقاومت ویژه، بین ۳۰ اهم‌متر تا ۱۰۰ اهم‌متر متغیر است. دو بی‌هنجاری با مقادیر مقاومت ویژه زیاد در حدود ۷۰ اهم‌متر در فواصل ۲۰ متر و ۲۶ متر از ابتدای نیم‌رخ، به ترتیب در عمق‌های تقریبی ۲ متر و ۶ متر مشاهده می‌شود. این دو بی‌هنجاری ممکن است مربوط به حفرة دفن شده در یک سنگ هوازه با رسانایی زیاد باشند. بی‌هنجاری اول که با A₁ نشان داده شده، تقریباً در عمق ۶ متری و در فاصله ۲۶ متری از ابتدای نیم‌رخ قرار گرفته و با توجه به عمق تونل در این ناحیه (۶ متر) احتمالاً مربوط به تونل زیرزمینی است.

بی‌هنجاری دوم که با A₂ نشان داده شده، در عمق ۲ متری و در فاصله ۲۰ متری از ابتدای نیم‌رخ قرار دارد و با توجه به اطلاعاتی که از منطقه در دسترس است، مبهم است و به بررسی بیشتر نیاز دارد. بنابراین، باید در هنگام تفسیر نادیده گرفته شود؛ زیرا به احتمال زیاد، متأثر از نوع شرایط مرزی شبکه‌بندی در گوشه‌ها است؛ و پارامترهای این بی‌هنجاری به سبب بزرگی سلول و دقت کمتر مدل‌سازی، با اغراق نشان داده شده است.

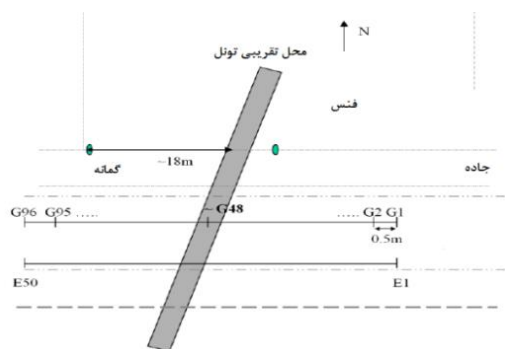
همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تونل‌های زیرزمینی باید مقادیر مقاومت ویژه زیادی آشکار کنند (به سبب تراکم زیاد، وجود فضای خالی که با هوا پر شده باشد، مقاومت ویژه بسیار زیادی دارد)؛ در حالی که بی‌هنجاری مرتبط با تونل در

در سال ۲۰۱۰، مربوط به تونلی واقع در شهر ادمنتون ایالت آلبرتا کشور کانادا با ابعاد $1 \times 1/6$ متر، طول ۸ متر و عمق تقریبی ۱۳ متر، صورت گرفته است. داده‌ها تقریباً در مرکز و عمود بر راستای تونل؛ یعنی جایی که تونل در عمق ۶ متری قرار دارد، برداشت شده است. برای برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی از ۵۰ الکتروود با فاصله الکتروودی ۱ متر و آرایش دوقطبی دوقطبی استفاده شده است. طول خط برداشت ۴۹ متر است. علت انتخاب آرایش دوقطبی دوقطبی در این تحقیق، زیاد بودن قدرت تفکیک جانبی، پوشش افقی و عمودی محیط بررسی و همچنین عمق نفوذ زیاد این آرایش است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). عمق بررسی روش مقاومت ویژه به فاصله الکتروودی وابسته است. به گونه‌ای که هر اندازه فاصله بین الکتروودهای جریان و پتانسیل افزایش یابد، عمق بررسی نیز افزایش می‌یابد. با وجود این، با افزایش فاصله الکتروودی، جریان بیشتری لازم است تا ولتاژ قابل اندازه‌گیری باشد. برای برداشت داده‌های توموگرافی لرزه‌ای از ۹۶ ژئوفون با فاصله ۰/۵ متر استفاده شد. طول خط برداشت ۴۷/۵ متر است. عمق بررسی در روش لرزه‌نگاری، به صورت یک قانون کلی تقریباً یک چهارم طول خط برداشت است؛ بنابراین وقتی که طول خط برداشت ۴۷/۵ است، عمق نفوذ باید ۱۰ تا ۱۲ متر باشد. عمق تونل حدود ۵ تا ۶ متر برآورد شده است. منبع مورد استفاده پتکی ۳/۷ کیلوگرمی است که روی صفحه آلومینیومی 10×10 سانتی‌متر مربع ضربه وارد می‌کند. محل هر شات بین ژئوفون‌ها با فاصله ۱ متر است. موقعیت داده‌های توموگرافی لرزه‌ای و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی وارون داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه و لرزه‌نگاری شکستی

در این تحقیق، مدل‌سازی وارون داده‌های حاصل از برداشت صحرائی توموگرافی مقاومت ویژه با نرم‌افزار Res2Dinv صورت گرفت. نتایج به دست آمده از داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه بعد از سومین تکرار در شکل ۴

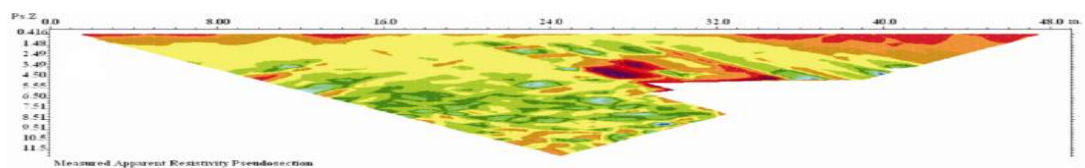
می‌یابد؛ که با توجه به افزایش تراکم سنگ‌ها با افزایش عمق، قابل انتظار است. همان‌طور که در نقشه پوشش موج مشاهده می‌شود، اکثریت موج‌های لرزه‌ای که با رنگ سرخ قابل مشاهده‌اند، بالاتر از عمق ۱۲ متر متمرکز شده‌اند. روی توموگرام سرعت و نقشه پوشش موج، دو بی‌هنجاری قابل مشاهده است. بی‌هنجاری مربوط به محل تونل با B₁ نشان داده شده است. مطابق انتظار، توموگرام سرعت یک خمیدگی رو به پایین در کنتور سرعت و نمودار پوشش موج یک زون با تراکم موج پایین در زون B₁ نشان می‌دهند. بی‌هنجاری B₂ به بررسی بیشتری نیاز دارد.



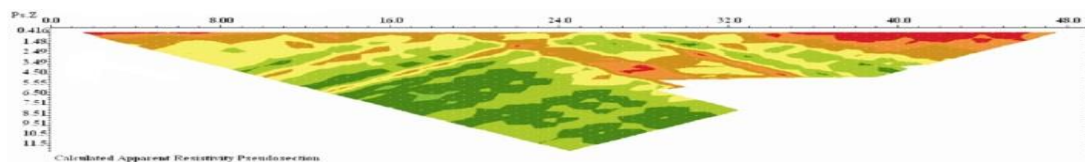
شکل ۳. موقعیت قرارگیری نیم‌رخ‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی

این تحقیق، مقاومت ویژه چندان زیادی ندارد. علت این امر نزدیک بودن سطح آب زیرزمینی به تونل و همچنین ورود آب زیرزمینی به داخل تونل در بعضی از مواقع از سال است؛ و نواحی با مقاومت ویژه کم، درست در بالا و پایین هر دو بی‌هنجاری، این موضوع را تأیید می‌کنند. لازم به ذکر است که روند همواری که در مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در لبه‌ها مشاهده می‌شود.

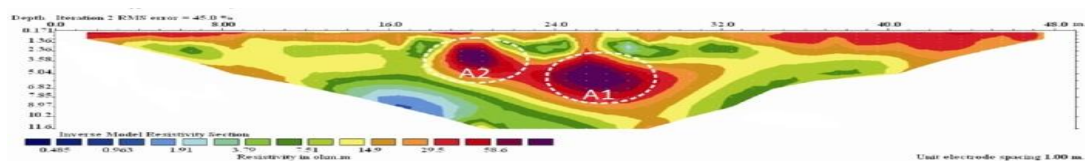
برای تفسیر داده‌های لرزه‌ای از نرم‌افزار Rayfract استفاده شد. اگرچه تباین سرعت لرزه‌ای بین حفره‌های زیرسطحی و محیط اطراف اغلب زیاد است، اما مقادیر سرعت لرزه‌ای اندازه‌گیری شده در توموگرام سرعت به صورت نامنظم تغییر می‌کند. هیکی و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهش خود روشن ساختند که با استفاده از توزیع فضایی یا پوشش شعاعی موج، می‌توان محل یک لوله دفن شده را با دقت قابل قبولی تعیین کرد. به صورت توموگرام سرعت و نمودار پوشش موج نشان داده شده است. توموگرام سرعت و نقشه پوشش موج مربوط به آن برای همه ۹۶ ژئوفون در تکرار بیستم به ترتیب در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. توموگرام سرعت نشان می‌دهد که سرعت با عمق افزایش



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه (الف) شبه‌مقطع به دست آمده از داده‌های مشاهده‌ای، (ب) شبه‌مقطع به دست آمده از داده‌های محاسبه شده و (ج) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون

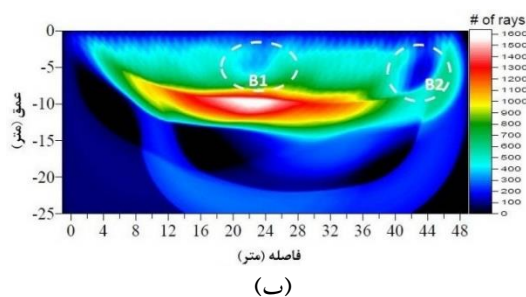
به عبارت دیگر غیرممکن است؛ اما روی نقشه پوشش موج، یک زون با تراکم کم موج لرزه‌ای مشاهده می‌شود (بی‌هنجاری B_1)؛ که با توجه به عمق و محل تونل مربوط به تونل زیرزمینی است. بنابراین، بی‌هنجاری B_1 مشاهده شده روی نقشه پوشش موج، با بی‌هنجاری A_1 مشاهده شده روی مقطع مقاومت ویژه متناظر است و مربوط به تونل مورد بررسی است؛ پس، نتایج به دست آمده از هر دو روش یکدیگر را تأیید می‌کنند. بی‌هنجاری دوم (A_2) که در عمق ۲ متری و در قسمت شرق مقطع مقاومت ویژه قرار گرفته، منشأ نامشخصی دارد و هیچ بی‌هنجاری لرزه‌ای مشابه با این بی‌هنجاری مشاهده نمی‌شود. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده از هر دو روش می‌توان با قطعیت گفت که بی‌هنجاری A_2 مرتبط با تونل نیست. همچنین، بی‌هنجاری دیگری در قسمت انتهایی خط برداشت لرزه‌ای در محل B_2 مشاهده می‌شود؛ که با توجه به محل تونل و نیز مقطع مقاومت ویژه که هیچ بی‌هنجاری‌ای مشابه با این بی‌هنجاری نشان نمی‌دهد؛ می‌توان نتیجه گرفت که بی‌هنجاری B_2 مربوط به تونل نیست. پیشنهاد می‌شود که برای تعیین محل تونل از هر دو روش توموگرافی لرزه‌نگاری شکستی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شود؛ زیرا بی‌هنجاری دوم (A_2) که در مقطع مقاومت ویژه مشاهده شد؛ با توجه به نتایج به دست آمده از توموگرافی لرزه‌ای، مربوط به تونل نیست (بی‌هنجاری B_2 نیز به همین ترتیب). بنابراین با استفاده از هر دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی می‌توان محل تونل را با دقت بالاتری تعیین کرد.

برای بررسی دقیق‌تر، زمان‌های رسید ژئوفون‌های ۲۴ تا ۷۲ مورد پردازش قرار گرفت (شکل ۶). کنتورهای سرعت مشاهده شده روی توموگرام سرعت در شکل ۶-الف در مقایسه با شکل ۵-الف خمیدگی کمتری در محل تونل نشان می‌دهند؛ که این یک بی‌هنجاری قوی مربوط به تونل نیست.

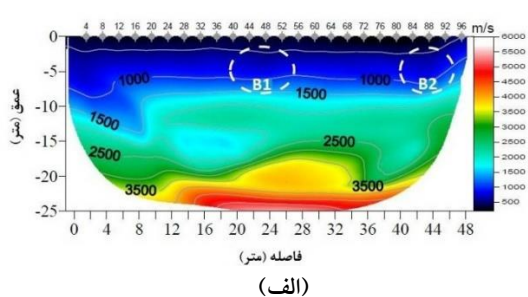
همان‌طور که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود، ناحیه با پوشش کم (تراکم کم موج لرزه‌ای) با ناحیه با پوشش بیشتر (تراکم زیاد موج لرزه‌ای) احاطه شده که دلیلی بر وجود تونل در این ناحیه است (B_1). کمترین پوشش موج در عمق ۶ متری و در ایستگاه سیزدهم مشاهده می‌شود که تطابق زیادی با محل تونل که از قبل برای ما مشخص است، دارد.

۵. ۱. تلفیق نتایج به دست آمده از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و توموگرافی لرزه‌نگاری شکستی

در روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، دو بی‌هنجاری با مقاومت ویژه زیاد مشاهده می‌شود؛ که با A_1 و A_2 نشان داده شده است. همچنین، توموگرام سرعت و نقشه پوشش موج مربوط، دو بی‌هنجاری B_1 و B_2 را نشان می‌دهند. بی‌هنجاری اول در مقطع مقاومت ویژه که با A_1 مشخص شده، در فاصله ۲۶ متری از ابتدای نیم‌رخ و در عمق ۶ متری قرار گرفته است که با توجه به عمق و محل دقیق تونل، مرتبط با تونل مورد نظر است. با وجود اینکه بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی‌های لرزه‌ای، تشخیص محدوده تونل از روی توموگرام سرعت مشکل، یا

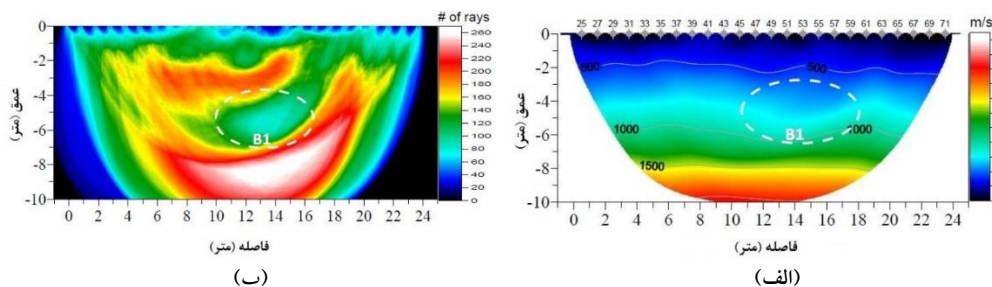


(ب)



(الف)

شکل ۵. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی داده‌های لرزه‌ای، (الف) توموگرام سرعت و (ب) نقشه پوشش موج مربوط به ۹۶ ژئوفون



شکل ۶. نتایج به دست آمده از مدل سازی داده های لرزه ای بین ژئوفون های ۲۴ تا ۷۵ با نرم افزار Rayfract. (الف) توموگرام سرعت و (ب) نقشه پوشش موج مربوط به این توموگرام

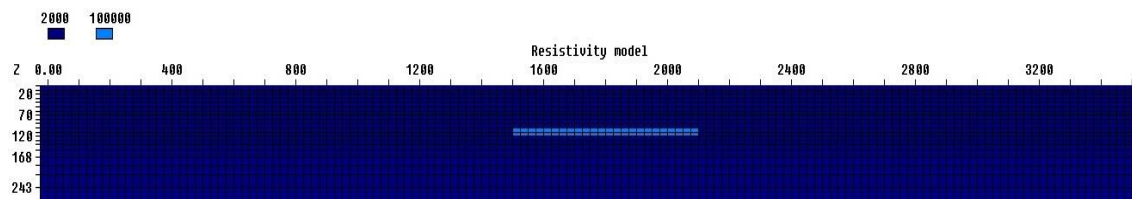
تولید شدند. این مدل های مصنوعی عرضه شده با نرم افزارهای Res2Dinv و SeisImager مورد مدل سازی وارون قرار گرفتند. به طور کلی، بی هنجاری مشاهده شده روی مقطع مقاومت ویژه، از ابعاد واقعی هدف مورد نظر بزرگ تر است. مقاطع مقاومت ویژه و سرعت حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و لرزه ای شکستی در ادامه عرضه شده است.

۶.۱. تأثیر عمق بر آشکار سازی تونل زیرزمینی به روش مقاومت ویژه

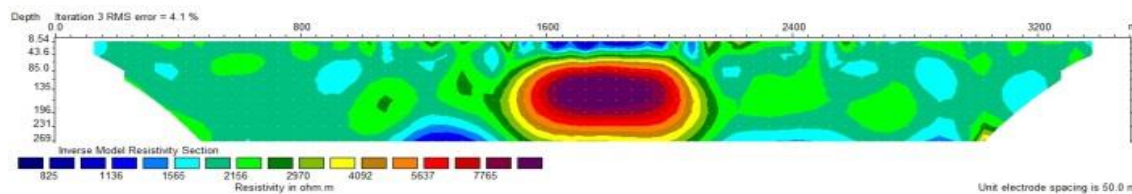
مدل ارائه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰۰ اهم متر (مقاومت ویژه فضای خالی) است؛ که در بستری با مقاومت ویژه ۲۰۰۰ اهم متر قرار گرفته است. بلوک مستطیلی به ترتیب در عمق های ۱۰۰ متر، ۱۲۰ متر و ۱۴۰ متر قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل سازی وارون هموار با نرم افزار Res2Dinv در شکل های ۷-۹ آمده است. نتایج نشان می دهد که در عمق ۱۰۰ متری، عرض بلوک و محدوده قرارگیری آن به خوبی مشخص شده است (کمی به سمت چپ انتقال پیدا کرده است)؛ و در کل هدف در این عمق به خوبی آشکار سازی شده است. در عمق ۱۲۰ متری، 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 آشکار سازی است. باین حال بلوک با این ابعاد در عمق ۱۴۰ متری، دیگر قابل آشکار سازی نیست. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که یک هدف زیرزمینی با ابعاد و مشخصات بیان شده حداکثر تا عمق ۱۲۰ متری قابل آشکار سازی است.

۶.۲. تحلیل آشکار سازی تونل با استفاده از شبیه سازی داده های مقاومت ویژه و لرزه ای شکستی حاصل از یک بلوک مستطیلی

برای بررسی دقیق تر مسئله آشکار سازی حفره های زیر سطحی از جمله تونل های زیرزمینی، باید اثر پارامترهای گوناگون روی آشکار سازی هدف مورد نظر بررسی شود. پارامترهای متفاوتی روی آشکار سازی یک تونل زیرزمینی با روش های مقاومت ویژه و لرزه نگاری شکستی اثر گذارند. از جمله این پارامترها در روش مقاومت ویژه می توان به عمق تونل، ضخامت روباره و رسانش روباره؛ و در روش لرزه نگاری شکستی می توان به عمق تونل و تباین سرعت تونل با محیط اشاره کرد. اثر هر کدام از این پارامترها بر آشکار سازی تونل بررسی شد؛ تا توانمندی روش های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه نگاری شکستی در آشکار سازی یک تونل زیرزمینی مشخص شود. بدین منظور، در روش مقاومت ویژه، با در نظر گرفتن اختلاف رسانش هدف مورد نظر با محیط اطراف، ابعاد هدف و تغییر پارامترهای عمق، ضخامت روباره و رسانش روباره و در روش لرزه نگاری شکستی با در نظر گرفتن ابعاد هدف و تغییر پارامترهای عمق، تباین سرعت تونل با محیط اطراف می توان به شبیه سازی داده های مقاومت ویژه و لرزه نگاری شکستی پرداخت و احتمال آشکار سازی یک تونل زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد. به منظور نزدیکی داده های شبیه سازی شده به واقعیت در روش مقاومت ویژه و لرزه نگاری شکستی، به ترتیب ۵٪ و ۱ms انوفه اضافی به داده ها اضافه شد. بدین منظور مدل های زمین شناسی (بلوک مستطیلی) که ممکن است هدفی زیرزمینی مانند یک تونل زیرزمینی باشند، در نرم افزارهای Res2Dmod و SeisImager

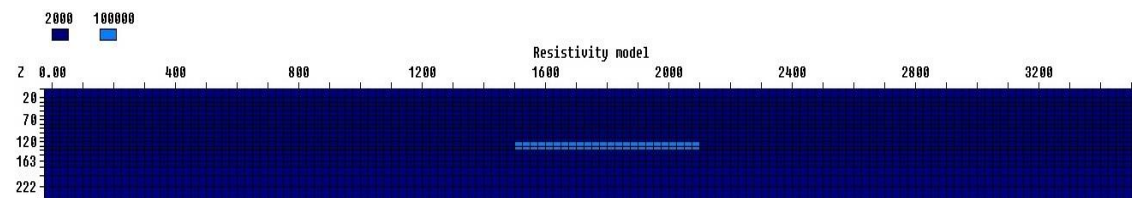


(الف)

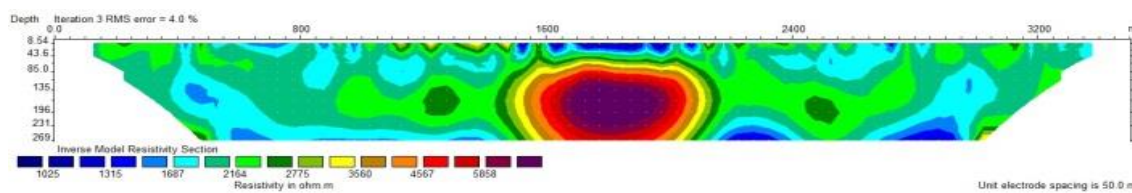


(ب)

شکل ۷. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۰۰ متری و (ب) مقطع به دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

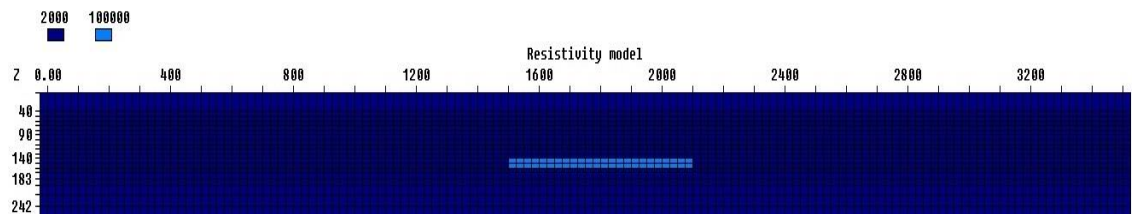


(الف)

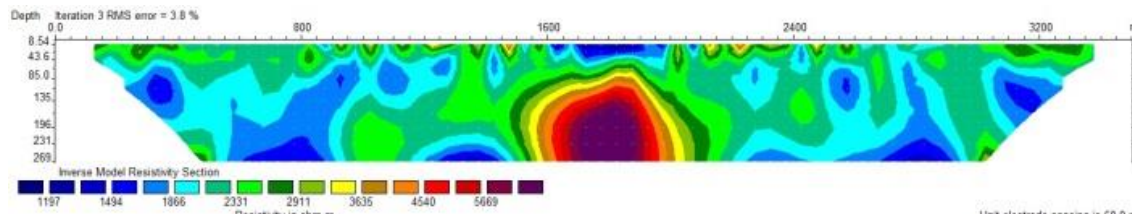


(ب)

شکل ۸. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۲۰ متری، (ب) مقطع به دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی



(الف)



(ب)

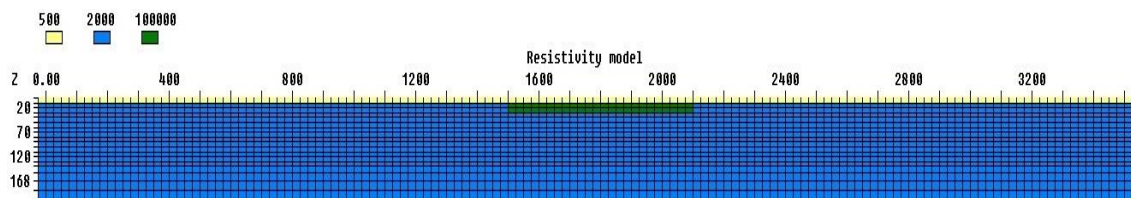
شکل ۹. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۴۰ متری و (ب) مقطع به دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

۲.۶. تأثیر رسانش روباره بر آشکارسازی تونل زیرزمینی

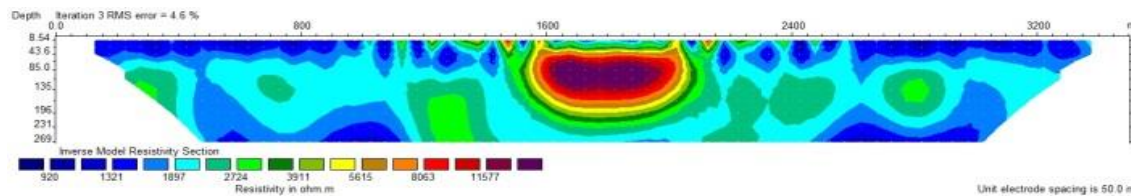
به روش مقاومت ویژه

مدل عرضه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰۰ اهم متر در بستری با مقاومت ویژه ۲۰۰۰ اهم متر است؛ که روباره‌ای به ضخامت ۱۰ متر و با مقاومت ویژه به ترتیب ۵۰۰ اهم متر، ۲۰۰ اهم متر و ۵۰ اهم متر روی آن قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از مدل سازی وارون هموار نشان می دهد که در حالتی که مقاومت ویژه روباره ۵۰۰ اهم متر است، عرض بلوک و محدوده آن با دقت قابل قبولی مشخص شده است و بلوک به راحتی قابل

آشکارسازی است. با کاهش مقاومت ویژه روباره به ۲۰۰ اهم متر بلوک باز هم قابل آشکارسازی است؛ با این تفاوت که با دقت کمتری نسبت به حالت قبل می توان ابعاد بلوک را تعیین کرد. در حالتی که مقاومت ویژه بلوک ۵۰ اهم متر است، یک بی هندجاری روی مقطع مدل سازی مشاهده می شود؛ که بررسی های بیشتری باید صورت گیرد و نمی توان آن را به هدف مورد نظر نسبت داد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که کمترین مقاومت ویژه روباره‌ای که هدف مورد نظر را می توان به روش مقاومت ویژه آشکارسازی کرد، ۲۰۰ اهم متر است (شکل های ۱۰-۱۲).

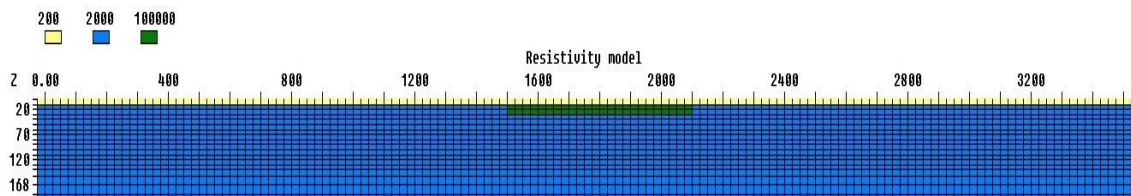


(الف)

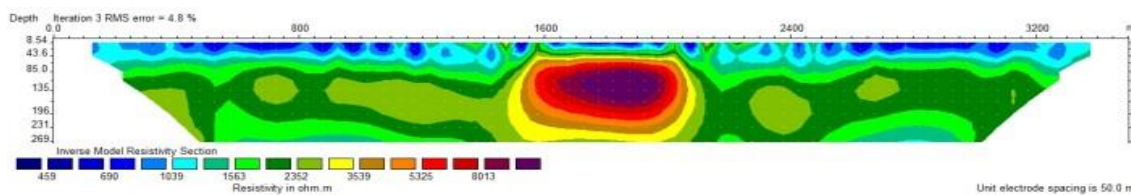


(ب)

شکل ۱۰. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای به ضخامت ۱۰ متر و مقاومت ویژه ۵۰۰ اهم متر روی آن و (ب) مقطع به دست آمده از مدل سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

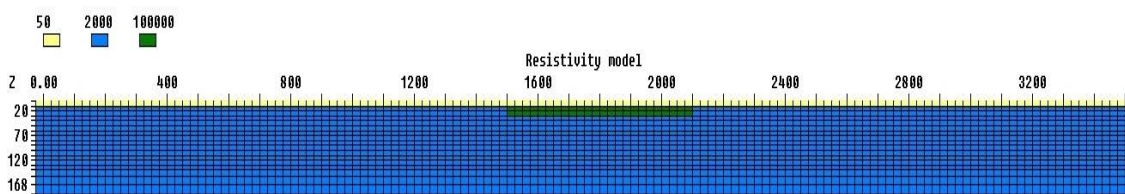


(الف)

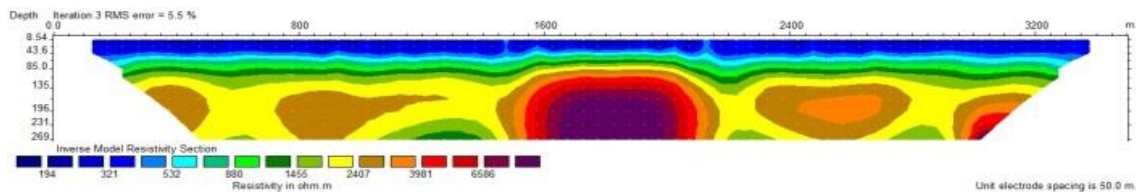


(ب)

شکل ۱۱. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای به ضخامت ۱۰ متر و مقاومت ویژه ۲۰۰ اهم متر روی آن و (ب) مقطع به دست آمده از مدل سازی وارون هموار این مدل مصنوعی



(الف)



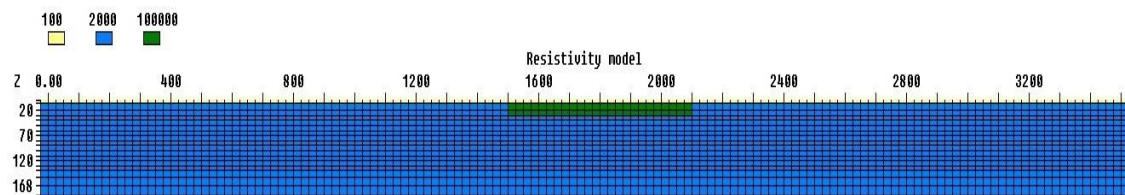
(ب)

شکل ۱۲. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای به ضخامت ۱۰ متر و مقاومت ویژه ۵۰ اهم‌متر روی آن و (ب) مقطع به‌دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

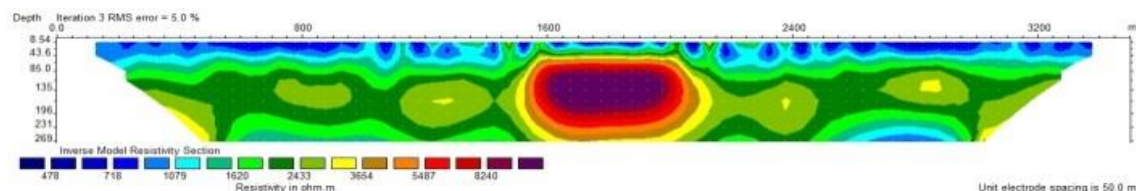
ابعاد بلوک را با دقت زیادی تعیین کرد؛ و بلوک به‌راحتی با روش مقاومت ویژه قابل آشکار سازی است. زمانی که ضخامت روباره به ۱۰ متر و ۲۰ متر افزایش یافت، بی‌هنجاری‌هایی با مقاومت ویژه زیاد در مقاطع حاصل از مدل‌سازی مشاهده شد؛ اما نمی‌توان این بی‌هنجاری‌ها را به هدف موردنظر نسبت داد. با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، بیشترین ضخامت روباره‌ای که می‌توان هدف موردنظر را به روش مقاومت ویژه آشکار سازی کرد، ۵ متر است (شکل‌های ۱۳-۱۵).

ع. ۳. تأثیر ضخامت روباره بر آشکار سازی تونل زیرزمینی به روش مقاومت ویژه

مدل عرضه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰۰ اهم‌متر در بستری با مقاومت ویژه ۲۰۰۰ اهم‌متر است، که روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر و با ضخامت‌های به ترتیب ۵ متر، ۱۰ متر و ۲۰ متر روی آن قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با روباره‌ای به ضخامت ۵ متر می‌توان

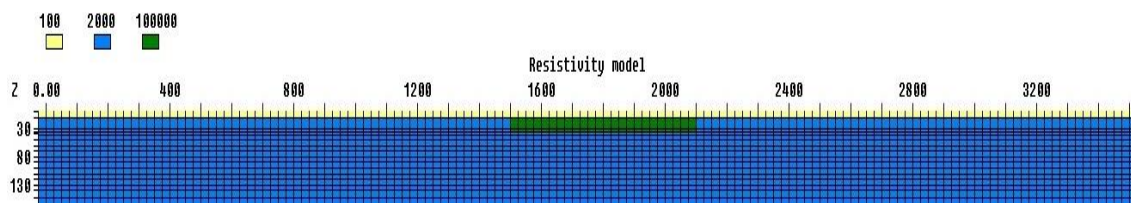


(الف)

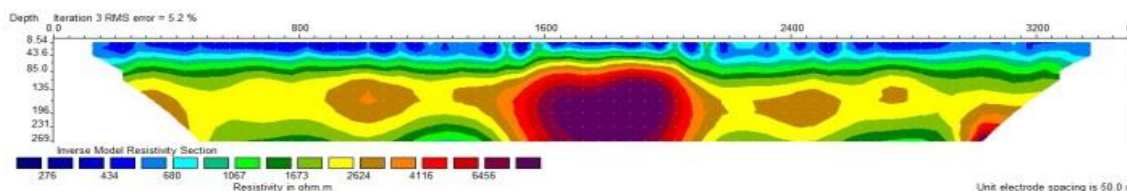


(ب)

شکل ۱۳. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر و به ضخامت ۵ متر و روی آن، (ب) مقطع به‌دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

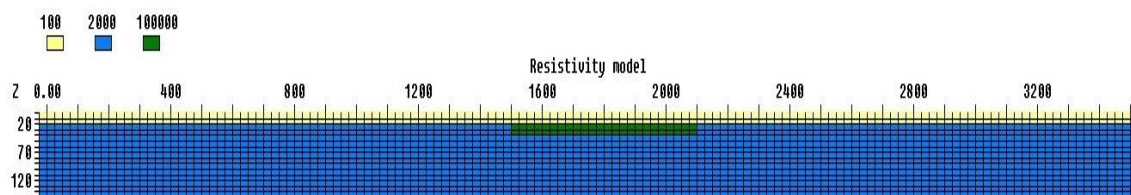


(الف)

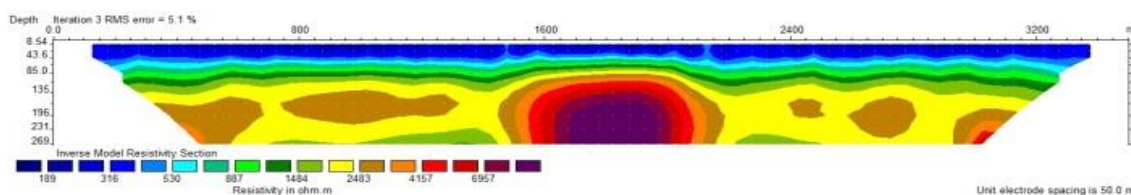


(ب)

شکل ۱۴. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر و به ضخامت ۱۰ متر روی آن و (ب) مقطع به‌دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی



(الف)



(ب)

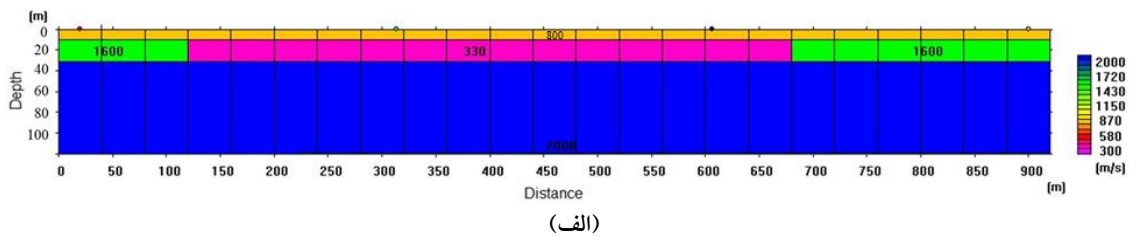
شکل ۱۵. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر با روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر و به ضخامت ۲۰ متر روی آن و (ب) مقطع به‌دست آمده از مدل‌سازی وارون هموار این مدل مصنوعی

قرار دارد، توموگرام سرعت یک خمیدگی رو به پایین در فاصله ۱۵۰ تا ۶۵۰ متر نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی با محل بلوک مستطیلی دارد و بلوک به‌خوبی شناسایی شده است. در حالتی که عمق بلوک ۲۰ متر است نیز توموگرام سرعت یک خمیدگی رو به پایین نشان می‌دهد؛ که در مقایسه با شکل ۱۶-ب میزان خمیدگی کمتر است و محدوده بلوک با دقت کمتری نسبت به حالت قبل شناسایی شده است (خمیدگی در فاصله ۲۰۰-۶۰۰ متر). با افزایش عمق بلوک به ۴۰ متر نوسان‌هایی در توموگرام سرعت مشاهده می‌شود اما به‌هیچ‌وجه نمی‌توان بلوک را شناسایی کرد.

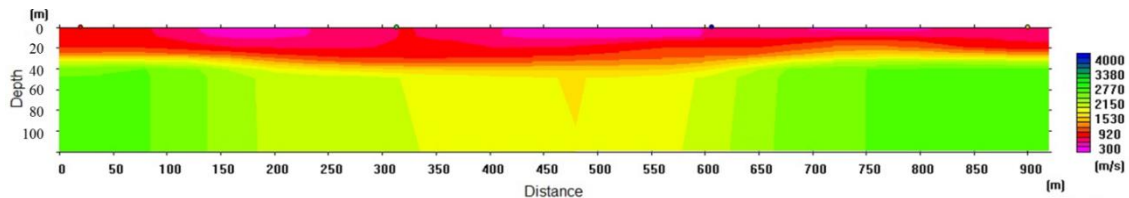
۴.۶. تأثیر عمق بر آشکارسازی تونل زیرزمینی به

روش لرزه‌نگاری شکستی

مدل عرضه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر در یک زمین سه‌لایه‌ای با سرعت‌های ۸۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه است؛ که به‌ترتیب در عمق‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متر قرار گرفته است. سرعت موج در بلوک مستطیلی ۳۳۰ متر بر ثانیه (سرعت موج طولی در هوا) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون با نرم‌افزار SeisImager در شکل‌های ۱۶-۱۸ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ در حالتی که بلوک در عمق ۱۰ متری

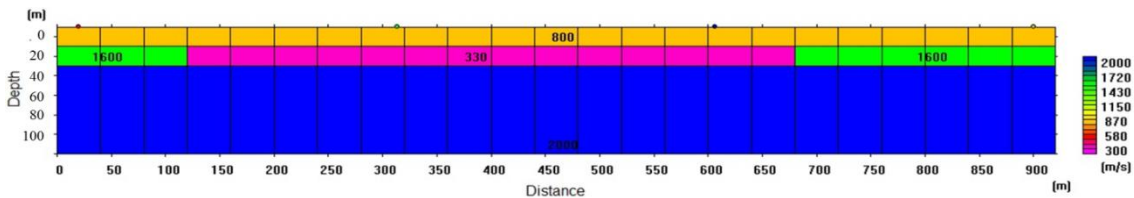


(الف)

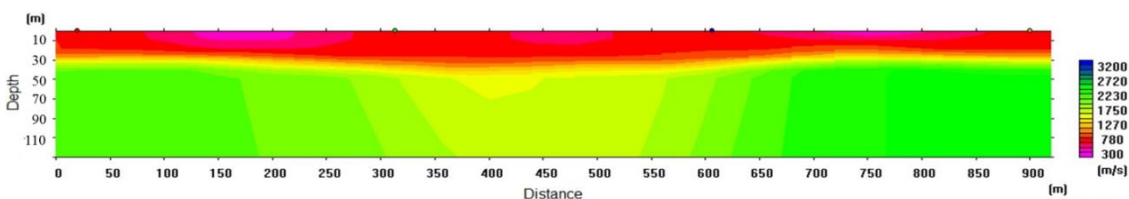


(ب)

شکل ۱۶. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۰ متری و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی

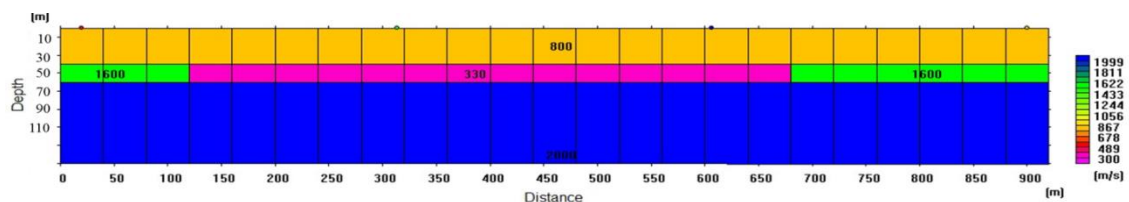


(الف)

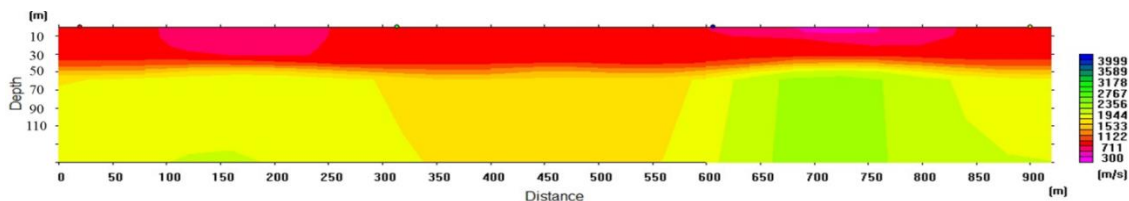


(ب)

شکل ۱۷. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۲۰ متری و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی



(الف)



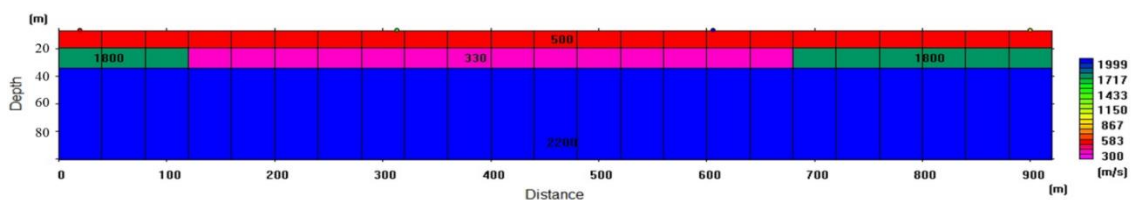
(ب)

شکل ۱۸. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۴۰ متری و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی

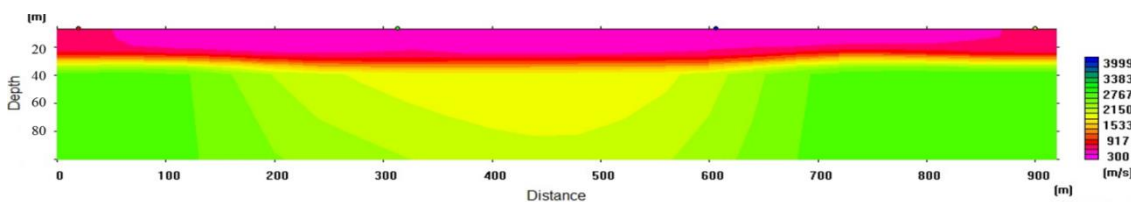
۵. ۶. تأثیر تباین سرعت بر آشکارسازی تونل زیرزمینی به روش لرزه‌نگاری شکستی

مدل عرضه شده یک بلوک مستطیلی به عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر در یک زمین سه‌لایه‌ای و سرعت در لایه اول و سوم ۵۰۰ و ۲۲۰۰ متر بر ثانیه است. بلوک مستطیلی در دومین لایه این مدل سه‌لایه‌ای و به ترتیب در سرعت‌های ۱۸۰۰ متر بر ثانیه، ۱۲۰۰ متر بر ثانیه و ۸۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل سازی وارون با نرم‌افزار SeisImager در شکل های ۱۹- ۲۱

آمده است. روی توموگرام سرعت نشان داده شده در شکل ۱۹- ب یک خمیدگی رو به پایین مشاهده می‌شود که تطابق زیادی با محل بلوک مستطیلی دارد و در این حالت بلوک به خوبی شناسایی شده است. با کاهش سرعت لایه دوم به ۱۲۰۰ متر بر ثانیه، خمیدگی در توموگرام سرعت تا حدودی مشهود است و بلوک تا حدودی قابل شناسایی است. در حالتی که سرعت در لایه دوم ۸۰۰ متر بر ثانیه است، توموگرام سرعت تقریباً هموار است و بلوک مستطیلی به هیچ وجه قابل شناسایی نیست.

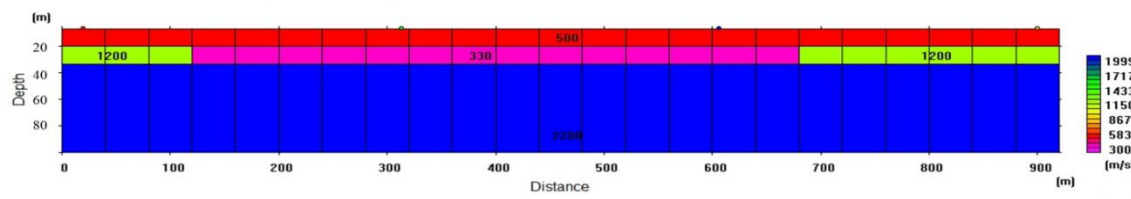


(الف)

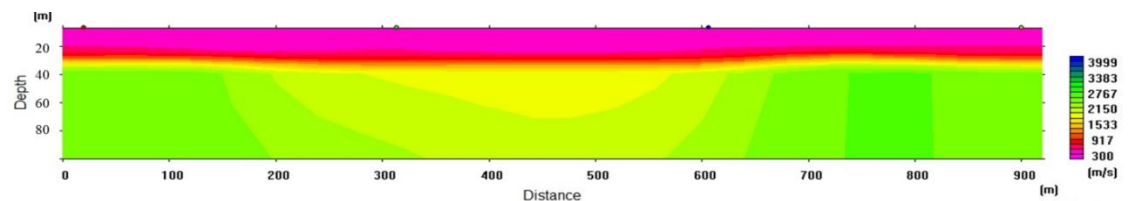


(ب)

شکل ۱۹. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در لایه با سرعت ۱۸۰۰ متر بر ثانیه و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی

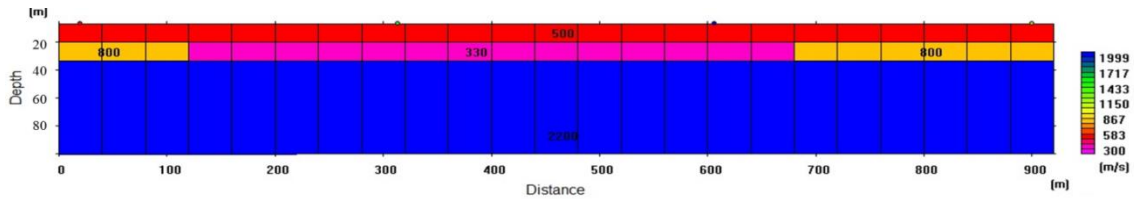


(الف)

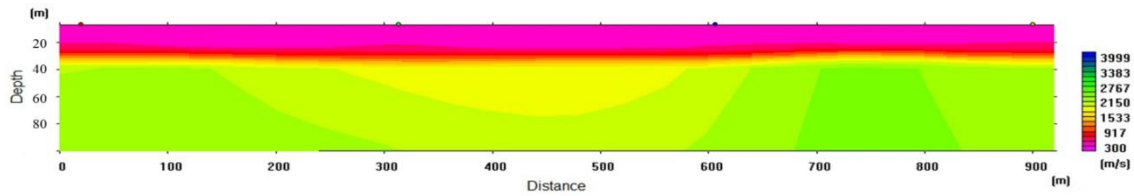


(ب)

شکل ۲۰. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در لایه با سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی



(الف)



(ب)

شکل ۲۱. (الف) مدل مصنوعی یک بلوک مستطیلی به ابعاد ۶۰۰ در ۲۰ متر در لایه با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه و (ب) توموگرام سرعت این مدل مصنوعی

۶.۶. تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های صورت

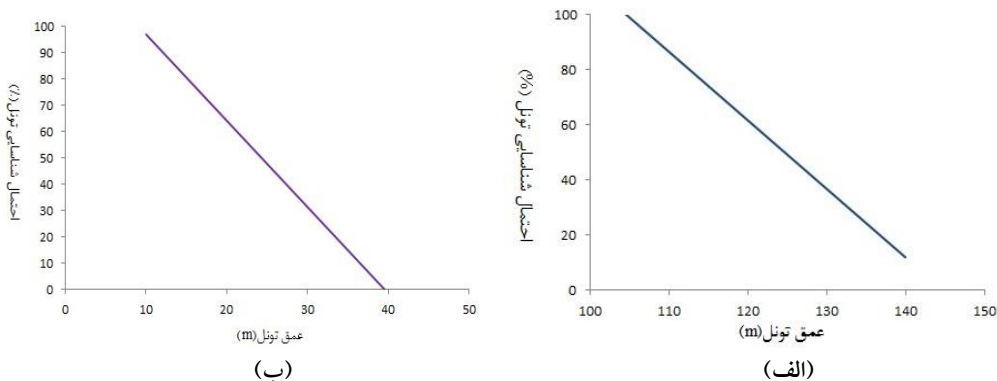
گرفته

با در نظر گرفتن ابعاد و تباین سرعت و مقاومت ویژه بین سازه‌های زیرزمینی با محیط اطراف و استفاده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی حاصل از این سازه‌های زیرزمینی، می‌توان احتمال آشکارسازی آنها را برآورد کرد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی مربوط به یک بلوک مستطیلی در شرایط متفاوت، در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۲-الف مشاهده می‌شود؛ در روش مقاومت ویژه بلوک مستطیلی موردنظر در عمق ۱۰۰ متری به خوبی آشکارسازی شده است و در عمق‌های بالاتر از ۱۴۰ متر، دیگر قابل آشکارسازی نیست؛ در حالی که روش لرزه‌نگاری شکستی، همین بلوک مستطیلی را در عمق ۱۰ متری با دقت قابل قبولی شناسایی کرده است و در عمق ۴۰ متر دیگر قادر به شناسایی آن نیست (شکل ۲۲-ب). بنابراین، می‌توان گفت که روش مقاومت ویژه در مقایسه با روش لرزه‌نگاری شکستی در شناسایی هدف‌های دفن شده در عمق‌های بیشتر، کارآمدتر است و توانایی روش لرزه‌ای شکستی با افزایش عمق هدف به شدت کاهش می‌یابد. در واقع، روش لرزه‌نگاری شکستی برای اکتشاف

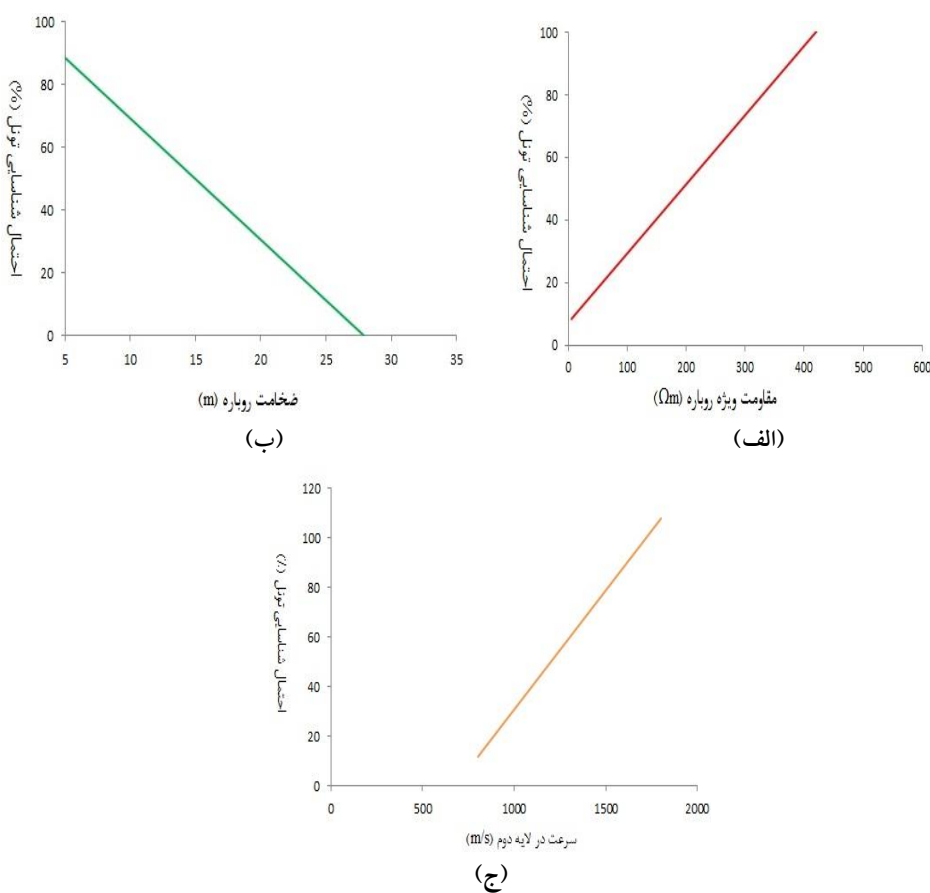
هدف‌های کم عمق روش کارآمدی است.

شکل‌های ۲۳-الف و ۲۳-ب، به ترتیب تأثیر رسانش و ضخامت روباره را بر آشکارسازی تونل نشان می‌دهند. نتایج روشن می‌سازد که هر اندازه مقاومت ویژه روباره کاهش (یعنی رسانش روباره افزایش) و یا ضخامت روباره افزایش یابد، احتمال آشکارسازی تونل کمتر می‌شود. برای مثال روباره‌ای با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر (مثلاً رُس) و ضخامت ۱۰ متر باعث می‌شود که آشکارسازی یک بلوک با عرض ۶۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰۰ اهم متر در بستری با مقاومت ویژه ۲۰۰۰ اهم متر با مشکل مواجه شود. از آنجا که شناسایی تونل‌های زیرزمینی در روش مقاومت ویژه در صورتی امکان‌پذیر است که بین تونل و محیط اطراف تباین کافی مقاومت ویژه وجود داشته باشد، بنابراین وجود نواحی با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت و اغلب نزدیک به مقاومت ویژه تونل، نوفه تلقی می‌شود و احتمال آشکارسازی تونل کاهش می‌یابد.

شکل ۲۳-د، تأثیر تباین سرعت موج در تونل و محیط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر اندازه تباین کاهش یابد شناسایی تونل سخت‌تر است، به گونه‌ای که وقتی بلوک مستطیلی در لایه‌ای با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه قرار گیرد دیگر قابل شناسایی نیست.



شکل ۲۲. تأثیر عمق بر آشکارسازی بلوک مستطیلی با شبیه‌سازی (الف) داده‌های مقاومت ویژه و (ب) داده‌های لرزه‌نگاری شکستی



شکل ۲۳. نتایج شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکستی یک بلوک مستطیلی، (الف) تأثیر رسانش روباره، (ب) تأثیر ضخامت روباره و (ج) تأثیر تباین سرعت موج در تونل و محیط

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا از داده‌های واقعی برای آشکارسازی تونل زیرزمینی استفاده شد. سپس برای بررسی توانمندی

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی در آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی، داده‌های مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکستی حاصل از یک بلوک مستطیلی شبیه‌سازی شد. نواحی با مقاومت ویژه زیاد در مقاطع الکتریکی می‌توانند مرتبط با محل تونل باشند؛ زیرا مقاومت ویژه تونل و هوای داخل آن از سنگ‌های

پوشش موج قابل مشاهده نبودند، مربوط به تونل زیرزمینی نیستند. این تحقیق روشن ساخت که با ترکیب نتایج به دست آمده از هر دو روش، محل تونل با دقت بیشتری تعیین می‌شود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و لرزه شکستی نیز نشان داد که روش مقاومت ویژه در شناسایی هدف‌های عمق‌های کمتر موفق‌تر عمل کرده است و توانمندی آن با افزایش عمق با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ضخامت و رسانش روباره در روش مقاومت ویژه و تباین سرعت بین تونل و محیط در روش لرزه‌نگاری شکستی، شناسایی هدف‌های دفن شده پیچیده‌تر و حتی غیر ممکن می‌شود.

مراجع

- Burger, H. R., 1992, Exploration geophysics of shallow subsurface, prentice-hall, Eaglewood Cliffs, NJ, 489.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A. and Di Filippo, G., 2010, Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities, *Geophys. Prospect.*, 58(4), 685-695.
- Corvallis, O. R., 2000, D.C. resistivity methods, Northwest Geophysical Associates. Inc.
- Crawford, N. C., Croft, L. A., Cesin, G. L. and Wilson, S., 2006, Microgravity and electrical resistivity techniques for detection of caves and clandestine tunnels, American Geophysical Union.
- Grandjean, G., 2006, Imaging subsurface objects by seismic P-wave tomography: Numerical and experimental validation, *Near Surface, Geophysics*, 4, 279-287.
- Grey, I., Caraig, J. and Douglas, R., 2010, Subsurface tunnel detection using electrical resistivity tomography and seismic refraction tomography: a case study, In Proc. of 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Hickey, C. J., Schmitt, D. J., Sabatier, J. M. and Riddle, G., 2009, Seismic measurements for detecting underground high-contrast voids, In Proc. of Symposium on Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, May 30, 929-936.
- Lankston, R. W., 1989, The seismic refraction method: a viable tool for mapping shallow targets into the 1990s, *J. Geophys.*, 54, 1535-1542.
- Leucci, G., Greco, F., De Giorgi, L. and Mauceri, R., 2007, Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola (Sicily, Italy), *J. Archaeol. Sci.*, 34, 233-242.
- Keary, P., Brooks, M. and Hill, I., 2005, An introduction to geophysical exploration, Blackwell Science, Berlin, Germany.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting, London: Pergamon.
- Loke, M. H., 1999, Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least squares method, Software manual.
- Loke, M. H., 2000, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D Surveys, available from <http://www.terraplus.com>.
- Loke, M. H., 2004, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, available from <http://www.geoelectrical.com>
- Loke, M. H. and Barker, R.D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, *J. Geophys.*, 60, 1682-1690.
- Loke, M. H. and Barker, R. D., 1996, Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a Quasi-Newton method, *Geophys. Prospect.*, 44, 131-152.
- McDonald, R. and Davies, R., 2003, Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging, *First Break*, 21, 32-35.
- Madanchi Zare, A., Dehghani, H., Mousa Zade, K. and Taghavi, S., 2013, Modelling the ability of geophysics sensors for underground utility detection and some solutions to disable them, *Passive Defence Journal*, 16, 63-76 (In Persian).

هوازده رسا نا بیشتر است. از طرف دیگر، به علت هموارسازی نتایج محاسباتی و در نتیجه تغییرات کم سرعت در نزدیکی تونل، توموگرام سرعت برای آشکارسازی تونل مناسب نیست. با این حال در مقابل، نقشه پوشش موج ناحیه کوچکی با تراکم موج کم را نشان می‌دهد که مرتبط با تونل است. مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی دو بی‌هنجاری را نشان دادند. نتایج روشن ساخت یک بی‌هنجاری (A_1) که در عمق ۶ متری در مقطع مقاومت ویژه و یک بی‌هنجاری (B_1) که در نقشه پوشش موج مشاهده شد، مربوط با تونل نیستند. همچنین، بی‌هنجاری‌های دیگری (A_2 و B_2) در مقطع مقاومت ویژه مشاهده شد؛ که با توجه به عمق تونل و اینکه روی توموگرام سرعت و نقشه

- Meju, M., 1994, Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice, Society of Exploration Geophysicists, United State of America.
- Mikhail, Z. S., 1994, The geoelectrical methods in geophysical exploration, Elsevier.
- Pullammanappallil, S. K. and Louie, J. N., 1994, A Generalized simulated-annealing optimization for inversion of first- arrival times, Bulletin of the Seismological Society of America, 84(5), 1397-1409.
- Sabatier, J. M. and Muir, T. G., 2006, Workshop on real-time detection of clandestine shallow tunnels, NCPA report HB0306-01 for US Army Research Office, University of Mississippi.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. and Richard, G., 2005, Electrical resistivity survey in soil science: a review: soil and tillage research, Elsevier.
- Stolarczyk, L. G., Troublefield, R. and Battis, J., 2005, Detection of underground tunnels with a synchronized electromagnetic wave gradiometer, In Proc. of Sensors and C3I Technologies for Homeland Security and Defense, 5778.
- Shin, C. H., 1999, Refraction tomography parameterization, J. Seism. Explor., 8, 143-156.

Detection of underground tunnels using electrical resistivity and refraction seismic tomography methods

Mousavi, H.¹ and Khazaei, S.^{2*}

1. M.Sc. Graduated, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

(Received: 29 Feb 2016, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

Geophysical techniques remain the only ways to remotely and non-destructively sense the earth's near subsurface and as such have the most promising prospect for rapid and accurate detection of underground tunnels. Today, electrical resistivity and seismic refraction 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 using a case study. Seismic methods are sensitive to velocity and density changes of the rock, while the electrical response is dependent upon the electrical resistivity of the rock. In this paper, we present a case study using electrical resistivity tomography (ERT) data and refraction seismic tomography (SRT) data of a tunnel site. Also, to evaluate the capabilities of resistivity method as the main method to detect buried structures in this paper, geo-electrical abnormalities of a rectangular block through various simulations are examined. Electrical resistivity methods utilize direct currents or low frequency alternating currents to investigate the electrical properties of the subsurface. In the resistivity method, the source is artificially-generated electric current introduced into the ground using electrodes. The potential differences are measured at the surface and the pattern of potential differences provides information on the distribution of subsurface electrical resistivity. In near-surface refraction tomography, the travel times of seismic energy recorded at the surface by multiple source-receiver combinations are used to generate an optimized model of the distribution of seismic velocities in the subsurface. In ERT, the forward problem uses the finite-element method to compute the electric potential response of the earth due to a given input electric current. The inverse algorithm iteratively finds the best distribution of subsurface resistivity that best fits the observed data. The purpose of this research is to determine the location of underground tunnel using inverse modeling of ERT and SRT data, and evaluate the capabilities of resistivity method to determine the location of underground tunnels using geo-electrical abnormalities of a rectangular block through various simulations. Geophysical field surveys were performed at a site with a known tunnel. The tunnel is a 1 m x 1.6 m concrete lined tunnel about 80m long. The data presented here was collected where the tunnel is at a depth of about 6m. Based on prior knowledge of the tunnel location the surveys are approximately perpendicular to the tunnel and were purposely centered on the approximate location of the tunnel in order to maximize the geophysical sampling in the vicinity of the tunnel. The seismic refraction survey was performed using 96 geophones. A geophone spacing of 0.5m was used for a total spread length of 47.5m. The electrode layout consisted of 50 electrodes in a 1m dipole-dipole configuration for a total 49m spread length. In this study, we chose to use the dipole-dipole configuration due to its good lateral resolution. In this research, to determine the exact location of the tunnel, data obtained from ERT and SRT survey were inverted using Res2Dinv software and Rayfract software, respectively. The results of both methods show abnormalities in the tunnel under test site. The tunnel shows up in the electrical imaging as regions of high resistivity since both the concrete and air of the tunnel are higher resistivity than the conductive weathered rock. In practice, the resistive abnormality of the tunnel gets smoothed out and is larger than the actual tunnel. Therefore, in the ERT, the tunnel coincides with one of the high resistivity anomalies, but a second, shallower resistive abnormality of unknown provenance appears just to the east. Based on the results of the seismic survey, the velocity tomographic image is inadequate for tunnel detection as the smoothing inherent to the tomographic calculations results in only slight changes in velocity near the tunnel location. Instead, the ray coverage density mapping associated with ray tracing displays small regions of low coverage associated with the tunnel. In this instance the use of both methods would suggest that this second ERT abnormality is not a tunnel and illustrates how the use of both seismic refraction and ERT can be used to increase the reliability of detecting tunnels. Finally, with the simulation of resistivity data obtained from a rectangular block, the effects of various parameters such as depth of the tunnel, overburden conductivity, thickness of overburden on identifying underground tunnel, were investigated; this is done to clarify the status and ability of this method in detecting underground cavities. To approximate simulated data to the fact, five percent extra noise was added to the data. To this end geological models, which can be a target in the ground like an underground tunnel, were produced in Res2Dmod software. These synthetic models were provided with reverse modeling using Res2Dinv software. The results of simulation and modeling show that the electrical resistivity method is most widely geophysical method used for detecting underground tunnels.

Keywords: Detection, Underground tunnels, Electrical resistivity, Seismic refraction.