



## Simulating the Detection of Tunnels Using the Electrical Resistance Method

S. Khzaei  \*

\* Associate Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 21/07/2023, Revised: 10/10/2023, Accepted: 28/01/2024, Published: 04/05/2024)

DOR:20.1001.1.20086849.1403.15.1.4.1

### ABSTRACT

*Today, the use of tunnels is one of the favorite strategies of armies as well as guerilla forces, and in many cases it is considered one of the important factors of victory. Due to the high contrast of the specific electrical resistance of tunnels with the host environment, the specific electrical resistance method can be called as the most powerful near-surface method for detecting such structures. In this study, conventional electrical tomography arrays have been simulated in order to detect tunnels using the forward modeling method. Based on the obtained results, the dipole-dipole, polar-dipole and Wenner-Schlumberger arrays have the best response in their sections to the presence of the tunnel, and the Wenner array has a weaker sensitivity than all of them. Also, in this study, based on the principle of changing the geometrical parameters (depth and size) of the tunnel as well as the conductive overburden, solutions have been proposed to hide the tunnels from the field of view of the arrays.*

**Keywords:** Passive Defense, Tunnel, Simulation, Resistivity

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: [skhazai@ihu.ac.ir](mailto:skhazai@ihu.ac.ir)



نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳ (پیاپی ۵۷): صص ۳۷-۴۵

علمی - پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰



## شبیه‌سازی آشکارسازی تونل‌ها با روش مقاومت ویژه الکتریکی

صفا خزائی\*

DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.1.4.1

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

### چکیده

امروزه، استفاده از تونل‌ها به‌عنوان یکی از راهبردهای موردعلاقه ارتش‌ها و همچنین نیروهای چریکی بوده و در بسیاری از موارد یکی از عوامل مهم پیروزی محسوب می‌شود. به علت تباین بالای مقاومت ویژه الکتریکی تونل‌ها با محیط میزبان، می‌توان روش مقاومت ویژه الکتریکی را به‌عنوان قوی‌ترین روش نزدیک سطحی برای شناسایی چنین ساختارهایی نام برد. در مطالعه حاضر با استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو، آرایه‌های متداول توموگرافی الکتریکی به‌منظور آشکارسازی تونل‌ها شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، آرایه‌های دوقطبی- دوقطبی، قطبی- دوقطبی و ونر- شلومبرژه بهترین پاسخ را در مقاطعشان نسبت به حضور تونل داشته و آرایه ونر نسبت به همه، حساسیت ضعیف‌تری دارد. همچنین در این تحقیق، بر اساس اصل تغییر پارامترهای هندسی (عمق و ابعاد) تونل و همچنین رولایه رسانا، راهکارهایی در جهت پنهان ماندن تونل‌ها در میدان دید آرایه‌های مذکور پیشنهاد گردیده است.

**کلیدواژه‌ها:** پدافند غیرعامل، تونل، شبیه‌سازی، مقاومت ویژه الکتریکی

:

\*دانشیار دانشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (skhazai @ ihu.ac.ir)-نویسنده مسئول

\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.



نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱- مقدمه

تونل‌ها از ظرفیت بالایی در بخش نظامی برخوردار هستند. قدمت استفاده از آنها در جریان جنگ‌ها، به گذشته‌های دور برمی‌گردد [۱]. از آن زمان تا جنگ‌های امروزی این شیوه به اشکال گوناگون توسط ارتش‌های کشورهای مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. حتی امروزه و با وجود تمام پیشرفت‌های به وجود آمده در بخش‌های نظامی، این شیوه همچنان به‌عنوان یکی از راهبردهای مورد علاقه برخی از ارتش‌ها و همچنین نیروهای چریکی بوده و در بسیاری از موارد به یکی از عوامل مهم پیروزی بدل شده است. این تونل‌ها، بقاء پذیری نیروهای خودی در برابر حملات دشمن را افزایش داده و در عین حال در جریان عملیات آفندی می‌توان از آن به‌عنوان یک اصل غافلگیرکننده استفاده کرد. در جریان جنگ ۳۳ روزه حزب‌الله و رژیم صهیونیستی، بحث شبکه تونل‌های به‌هم‌پیوسته حزب‌الله لبنان در جنوب این کشور، یکی از مشکلاتی بود که ارتش اسرائیل را شدیداً درگیر خود کرده بود [۱]. در بسیاری از اوقات سربازان اسرائیلی که به این مناطق نفوذ کرده بودند بدون هیچ‌گونه علائمی، ناگهان از چندین جهت مورد حمله واقع می‌شدند و تلفات سنگینی به آنها وارد می‌شد [۱]. امروزه ژئوفیزیک به‌عنوان یک روش غیر مخرب و دقیق برای شناسایی ساختارهای زیرزمینی شناخته می‌شود. از میان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، ژئوالکتریک و بالاخص روش مقاومت سنجی (مقاومت ویژه) برای مطالعات مهندسی به‌منظور شناسایی اهداف مدفون، محبوبیت خاصی پیدا کرده است [۲]. بنابراین می‌توان روش مقاومت سنجی را به‌عنوان قوی‌ترین روش نزدیک سطحی برای مطالعه چنین ساختارهایی، نام برد [۳]. از آنجاکه مبنای این روش تزریق جریان مستقیم الکتریکی به زمین و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل آن در عمق‌های مختلف هست، که نهایتاً تحت مراحل پردازشی مختلف یک مدل از توزیع مقاومت ویژه زیرسطحی تا عمق مورد مطالعه به‌دست می‌آید، لذا اهدافی که دارای تباین مقاومت ویژه بالایی می‌باشند، بر روی این مقاطع به‌وضوح خود را نشان می‌دهند [۴]. تونل‌ها یا حفاریات زیرزمینی در صورتی که مملو از هوا باشند به‌خوبی بر روی مقاطع مقاومت ویژه، خود را نشان خواهند داد. این بدین علت است که مقاومت ویژه هوا بی‌نهایت می‌باشد و همین امر موجب می‌شود که تباین خیلی بالایی میان فضای تونل و سنگ‌های اطراف از لحاظ مقاومت ویژه الکتریکی (رسانای الکتریکی) ایجاد گردد، که این دلیل واضح و مبرهن تشخیص تونل‌ها یا حفارات با استفاده از مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد [۴].

محقق پیش‌تاز در زمینه شناسایی حفارات زیرزمینی، بریستو<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) بود [۵]. وی با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی<sup>۲</sup> (هم به‌صورت پیش‌رو<sup>۳</sup> و هم به‌صورت معکوس<sup>۴</sup>) و داده‌ها را برداشت و با ایجاد کمان‌های متقاطع محل حفارات را تشخیص می‌داد، روش بریستو تا سال‌ها به‌عنوان یک روش خوب ژئوالکتریکی برای شناسایی حفارات استفاده شد، اما با پیشرفت در زمینه مدل‌سازی معکوس و همچنین گرافیکی تر شدن مقاطع ژئوفیزیکی، اهمیت این روش به‌تدریج رنگ باخت. مناطق گسترده‌ای از شهر روم، به علت ریزش حفارات و معابر زیرزمینی ناگهان نشست می‌کردند، این فرایند آن قدر مخرب بود که در سال ۲۰۱۳ مسئولان شهرداری شهر روم به این فکر افتادند که با استفاده از تلفیق مطالعات توموگرافی دو بعدی الکتریکی و زمین‌شناسی، این معابر را تعیین موقعیت نمایند. این گروه با استفاده از روش مذکور توانستند شبکه تونل‌ها را تعیین محل نموده و شناسایی کنند [۶].

در سال ۲۰۱۴، شاهی فردوس و همکاران به‌منظور احیای قنات‌ها در منطقه گستنچ واقع در شهرستان فردوس از روش ژئوالکتریک استفاده نمودند. آن‌ها ۳۶ سونداژ الکتریکی را در امتداد دو دره در نزدیکی مادر چاه‌ها اجرا نمودند. با توجه به نقشه‌های هم مقاومت ویژه در عمق‌های مختلف و همچنین مقاطع مقاومت ویژه ظاهری مشخص شد که ادامه پیش‌کاری برای قنات‌ها مناسب نیست و حفر گالری، مناسب‌ترین گزینه برای بهره‌برداری بیش‌تر از آن‌هاست [۷]. در سال ۲۰۱۴، اسحاقی و همکاران از دانشگاه شاهرود از روش‌های ژئوالکتریکی و رادار نفوذی زمین برای شناسایی اهداف نزدیک سطح استفاده نمودند [۸]. پوتسیکا و همکاران (۲۰۱۲) از روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه برای شناسایی حفارات زیرزمینی استفاده نمودند. در این مطالعه آنها در وهله اول با استفاده از مدلسازی پیش‌رو (شبیه سازی عملیات) آرایه‌های مختلف را برای این امر مقایسه نمودند، سپس اثر یک لایه نازک را در نزدیکی حفارات بررسی نمودند. نتایج آن‌ها بدین‌صورت بود که مناسب‌ترین آرایه‌ها، دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی بود، همچنین یک لایه نازک رسانا اثر حفره (حفره مملو از هوا که مقاومت ویژه آن تقریباً بی‌نهایت است) با مقاومت ویژه بالا را معکوس نموده و به‌صورت یک زون رسانا که هدایت الکتریکی آن بیشتر از محیط در برگیرنده آن است، بر روی مقاطع نشان داده می‌شود [۹].

لوپز و همکاران (۲۰۱۴) در نیجریه روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی را برای شناسایی یک مجرای زیرزمینی در محیط‌های گرانیته، فیلیتی و ماسه‌سنگی، که قبلاً ویژگی‌های این

<sup>1</sup> Bristow

<sup>2</sup> Pole-dipole

<sup>3</sup> Forward

<sup>4</sup> Inversion

فضاهای خالی بر روی مقاطع الکتریکی مشخص و واضح بودند [۱۷].

پروژه‌های ژئوتکنیکی از دیرباز نیازمند حفاری بوده است. از آنجاکه اجرای حفاری‌های متعدد (گمانه‌های متعدد) از لحاظ زمان و هزینه به صرفه نیست و از طرف دیگر به سازند زمین‌شناسی آسیب می‌زند، لذا برای داشتن اطلاعاتی پیوسته از زیر سطح، از روش‌های ژئوالکتریکی استفاده می‌شود. با داشتن نتایج به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی، می‌توان تحلیل‌های مناسبی را انجام داد. در این راستا بازین و همکاران (۲۰۱۳) در موسسه ژئوتکنیک نیرو، روش توموگرافی الکتریکی را برای مطالعه کلاهک‌های رسی دریایی و اثر آن بر روی مقاطع ژئوالکتریکی استفاده نمودند [۱۸]. این‌منه و همکاران (۲۰۱۳) نیز از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای یافتن درز و شکاف‌ها و همچنین حفرات احتمالی در محل پیشنهادی سد واقع در نزدیکی رودخانه اوجی واقع جنوب شرق نیجریه استفاده نمودند [۱۹].

در سطح کشور نیز تحقیقات محدودی در زمینه آشکارسازی تونل و اهداف زیرزمینی با روش مقاومت ویژه الکتریکی ارائه شده است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود. در تحقیق انجام‌شده توسط موسوی و همکاران (۱۳۹۵)، آشکارسازی تونل‌ها با روش مقاومت ویژه الکتریکی از طریق شبیه‌سازی یک بلوک مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با کاهش مقاومت ویژه روباره (افزایش رسانندگی روباره) و افزایش ضخامت روباره افزایش، احتمال آشکارسازی تونل کمتر می‌شود. همچنین بر اساس تحقیق انجام‌شده توسط خاکی نجف‌آبادی و خزائی (۱۳۹۶) نشان داده شده است که به‌عنوان یک راهکار پدافند غیرعامل، وجود نواحی با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت و اغلب نزدیک به مقاومت ویژه تونل، نوفه تلقی شده و دشمن را در شناسایی هدف گمراه می‌کند. در تحقیقی دیگر، شوکتی و همکاران (۱۴۰۰) کارایی روش مقاومت ویژه الکتریکی جهت شناسایی کارست مدفون در ناهمواری‌های شاهو را ارزیابی نموده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق، روش مقاومت ویژه الکتریکی علاوه بر تعیین موقعیت دقیق غار، بی‌هنجاری‌ها را خارج از محدوده غار (احتمالاً به دلیل وجود حفره‌های دیگر) شناسایی می‌کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

هدف از عملیات مقاومت ویژه الکتریکی تعیین توزیع مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی است. در این روش به‌صورت مصنوعی جریان مستقیم الکتریکی از طریق دو الکترود جریان (A,B) به داخل زمین فرستاده شده و با استفاده از دو پروب پتانسیل اختلاف پتانسیل ایجاد شده اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده، اطلاعاتی در مورد ناهمگنی‌های زیرسطحی از

محیط‌ها با استفاده از روش‌های مستقیم به‌دست آمده بود، به‌کار گرفتند. در این مطالعه آن‌ها از سه آرایه ونر، ونر شلومبرژه و دو قطبی- دو قطبی با فاصله الکترودهای مختلف استفاده نمودند. آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که روش ژئوالکتریکی یک روش ارزشمند در یافتن اهداف زیرسطحی می‌باشد. همچنین دریافتند که فاصله الکترودی باید کمتر از اندازه قطر حفره و نهایتاً به اندازه آن باشد؛ به‌علاوه با افزایش عمق دفن حفره، دقت تعیین موقعیت و همچنین شدت بی‌هنجاری نیز کاهش می‌یابد [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ مارتینز‌پاگان و همکاران، در منطقه غار ویکتوریا، گالری‌هایی که به‌واسطه معدنکاری ایجاد شده بودند را مطالعه نمودند. به‌علت خشک بودن گالری‌ها، این معابر به‌صورت زون‌هایی با مقاومت ویژه بالا بر روی مقاطع مشخص بودند [۱۱].

شرکت کیان کاوان در سال ۱۳۹۲، در پروژه آب‌رسانی الغدیر در دشت آزادگان، که در آن تعداد ۹ مخزن آب، قرار بود تأسیس شوند، با استفاده از روش‌های توموگرافی الکتریکی دوبعدی و لرزه‌نگاری انعکاسی به آشکارسازی حفرات و پدیده‌های مخرب پرداخت و نهایتاً نقاط پرخطر و نقاط امن معرفی گردیدند، که گمانه‌های ژئوتکنیکی نیز تأیید کننده نتایج ژئوفیزیکی بودند [۱۰]. در سال ۲۰۱۲ فاروق و همکاران در محیط‌های کارستی منطقه یانگول کره جنوبی، با استفاده از روش ژئوالکتریکی به آشکارسازی حفرات کارستی پرداختند [۱۲]. پانتولو و همکاران در سال ۲۰۰۱، مسیرهای نشت موجود در سد سام-کامل-امبا واقع در ایالت راجستان کشور هند را با استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی (ID) مطالعه کردند و نشان دادند که زون‌های نشتی دارای مقاومت ویژه پائین می‌باشند [۱۳].

در سال ۲۰۱۳ متوالی و همکاران به‌منظور گسترش توسعه شهری در منطقه الحسا، عربستان سعودی، از توموگرافی الکتریکی دوبعدی برای آشکارسازی حفرات کارستی زیرسطحی استفاده نمودند و مناطق پرخطر را معرفی نمودند [۱۴]. ساتروگاسا و همکاران (۲۰۰۴) در تایلند به‌منظور آشکارسازی فروچاله‌های ایجاد شده در مناطق کارستی از تصویرنگاری الکتریکی استفاده نمودند و مناطق زیرسطحی‌ای که در مدل‌های دوبعدی به‌صورت مقاومت‌ویژه بالا بود را به‌عنوان مناطق فروچاله معرفی نمودند [۱۵].

سایپوس و همکاران در سال ۲۰۰۸، با استفاده از توموگرافی دوبعدی الکتریکی به شبیه‌سازی بقایای مدفون در چیان- یونان پرداختند [۱۶]. همچنین گروه تحقیقاتی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۸ بنا بر درخواست سازمان میراث فرهنگی شهرستان نیشابور، با استفاده از توموگرافی دو بعدی الکتریکی در زمین‌های کشاورزی اطراف نیشابور به تعیین مرز کهن شهر نیشابور پرداختند؛ در این مطالعه دیوارها و همچنین

اختلاف پتانسیل میان الکترودهای M و N با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (5)$$

در این رابطه، AM، BM، AN و BN فواصل هندسی میان الکترودهای پتانسیل و جریان می‌باشند. مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به صورت ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\rho_a = \left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \frac{\Delta V}{I} \rightarrow \rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

در این رابطه، K ضریب هندسی است که به چیدمان الکترودی بستگی دارد و در آرایه‌های متفاوت، مختلف است. مقاومت ویژه الکتریکی از طیف وسیعی برخوردار است. خاک شور و مرطوب کمترین مقاومت ویژه، ۱ اهم‌متر و سنگ‌های آذرین و دگرگونی بیشترین مقاومت ویژه در حدود  $10^5$  اهم‌متر است (جدول ۱). پارامترهای فیزیکی مختلفی بر روی مقاومت ویژه سنگ‌ها و خاک‌ها مؤثر هستند (شکل ۲).

جدول (۱): مقاومت ویژه سنگ‌ها و مواد مختلف [۱۶]

مواد	بازه تغییر مقاومت ویژه الکتریکی (اهم متر)
رس	۱-۱۰۰
ماسه	$10^{-2}$ - $5 \times 10^{-2}$
گراول	$10^{-2}$ - $5 \times 10^{-2}$
گرانیت	$10^6$ - $5 \times 10^7$
گنایس	$10^3$ - $10^4$
شیست	$10^4$ - $10^5$
آب زیرزمینی	۳۰۰-۱۰
رسوبات منجمد	$10^6$ - $1 \times 10^7$
پرمافراست	$10^8$ - $10^6$
هوا	بینهایت

مقدار کلی های فیزی	تغییر (پرسیده از آب)					تغییر در خصوصیات فیزیکی
	میزان رس	دما	شوری آب	میزان آب	میزان آب	
↑	↑	↑	↑	↑	↑	مقاومت ویژه الکتریکی
↓	↓	↓	↓	↓	↓	

شکل (۲): تأثیر پارامترهای فیزیکی مختلف بر روی مقاومت ویژه الکتریکی [۲۳]

لحاظ مقاومت ویژه الکتریکی را ارائه می‌دهد [۲۳]. هرچه تباین میان بی‌هنجاری و محیط میزبان بالاتر باشد، شناسایی آن بی‌هنجاری توسط روش‌های ژئوفیزیکی آسان‌تر است. توزیع خطوط جریان انتشار یافته به ویژگی‌های الکتریکی محیط مورد مطالعه بستگی دارد؛ این خطوط در محیط‌های رسانا تمرکز بیشتری دارند. برای مثال یک جسم استوانه‌ای ساده با مقاومت ویژه  $\rho$  به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\rho = R \left( \frac{S}{L} \right) \quad (1)$$

در این رابطه، R مقاومت الکتریکی برحسب اهم، L طول استوانه برحسب متر و S سطح مقطع برحسب مترمربع می‌باشد. با استفاده از قانون اهم مقاومت الکتریکی، R استوانه به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

در این رابطه، V اختلاف پتانسیل برحسب ولت و I جریان الکتریکی عبوری برحسب آمپر است. هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر) به صورت عکس مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. بنابراین:

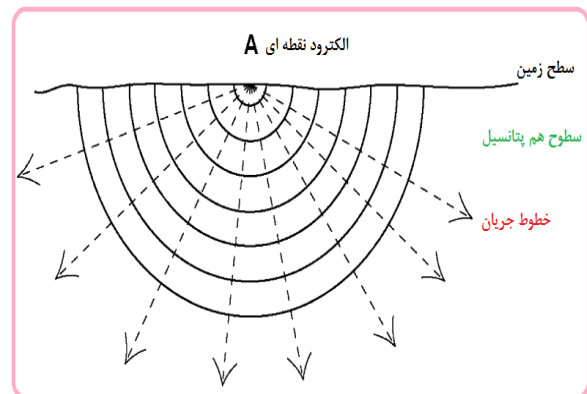
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

در محیط‌های همگن و همسانگرد هم‌پتانسیل‌ها به صورت نیم‌کره‌هایی هم‌مرکز هستند که مرکز آن‌ها تک الکترود جریان است (شکل ۱). چگالی جریان الکتریکی برحسب آمپر بر متر مربع است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4)$$

در این رابطه،  $2\pi r^2$  مساحت نیم‌کره‌ای به شعاع r است. پتانسیل v را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4)$$



شکل (۱): توزیع خطوط جریان و سطوح هم‌پتانسیل حاصل از تک الکترود جریان در یک نیم فضای همگن و همسانگرد [۲۳]

جدول (۲): محاسن آرایه‌های مختلف [۲۴]

آرایه‌های مختلف	وزن	وزیر شلومیرزه	دوقطبی-دوقطبی	قطبی-قطبی	دوقطبی
رزلوشن ساختارهای افقی	عالی	متوسط	ضعیف	متوسط	متوسط
رزلوشن ساختارهای قائم	ضعیف	متوسط	عالی	متوسط	ضعیف
عمق کاوش	ضعیف	متوسط	خوب	عالی	خوب
پوشش افقی داده‌ها	ضعیف	متوسط	خوب	عالی	متوسط
شدت سیگنال	عالی	خوب	ضعیف	عالی	متوسط

آرایه ونر (آرایه ونر آلفا که متداول است) در میان کل آرایه‌ها از قوی‌ترین نسبت سیگنال به نوفه برخوردار است. این آرایه برای آشکارسازی ساختارهای افقی مناسب‌ترین است و کم بودن عمق کاوش و همچنین احتیاج به تعداد نفرت بیشتر را می‌توان به‌عنوان معایب آن ذکر نمود. آرایه دوقطبی-دوقطبی نیز یکی از متداول‌ترین آرایه‌ها است. عمق کاوش بالا، مناسب جهت شناسایی ساختارهای قائم و همچنین سرعت بالای اجرای عملیات را می‌توان به‌عنوان محاسن این آرایه نام برد و از معایب آن می‌توان به ضعیف بودن سیگنال به نوفه اشاره نمود. معایب و مزایای دیگر آرایه‌ها در جدول (۲) آورده شده است [۷ و ۱۲].

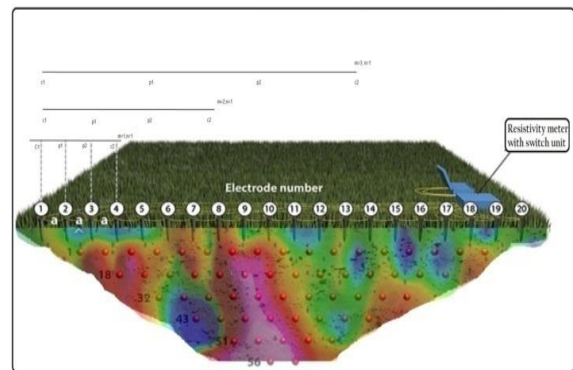
### ۲-۲- شبیه‌سازی پیشرو و نرم‌افزار مورد استفاده در شبیه‌سازی عملیات

شبیه‌سازی مصنوعی توسط نرم‌افزار RES2DMOD ساخت شرکت Geotomo Software انجام گرفته است. به‌علت ضعف این نرم‌افزار در شکل‌دهی نشان دادن نتایج، نتایج خروجی به نرم‌افزار Geosoft انتقال و در آن نشان داده شده‌اند. نرم‌افزار RES2DMOD ویژه مدل‌سازی پیشرو می‌باشد و شبه مقطع مقاومت‌ویژه در زیرزمین را محاسبه می‌کند. آرایه‌های تعریف شده در این نرم‌افزار عبارت‌اند از: ونر (آلفا، بتا، گاما)، قطبی-قطبی، گرادینت، دوقطبی-دوقطبی خطی، قطبی-دوقطبی، دوقطبی استوایی [۲۶].

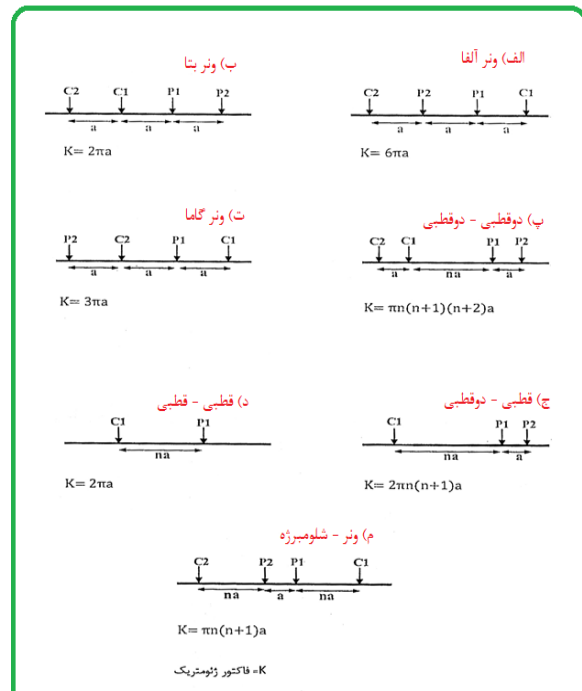
این نرم‌افزار جهت تعیین مقادیر مقاومت‌ویژه محاسباتی از دو روش تفاضلات متناهی و المان‌های محدود استفاده می‌نماید. روش‌های مذکور زیر سطح زمین را به هزاران سلول مختلف تقسیم می‌کنند

### ۱-۲- آرایه‌های دوبعدی الکتریکی

هر چیدمان از الکترودهای پتانسیل و جریان را یک آرایه گویند. منظور از آرایه‌های دوبعدی آرایه‌هایی است که مدل حاصله‌شان یک توزیع مقاومت ویژه دوبعدی زیرسطح زمین می‌باشد (شکل ۳). شکل (۴) آرایه‌های الکتریکی مختلف همراه با ضرایب هندسی‌شان را نشان می‌دهد. هر آرایه دارای یکسری محاسن و معایب است که بسته به نوع هدف مورد کاوش، از آرایه‌های مختلف استفاده می‌شود. قبل از انجام عملیات صحرایی با اطلاعاتی را در مورد هندسه و امتداد هدف داشت و با توجه به آن آرایه یا آرایه‌های مطلوب را انتخاب نمود.

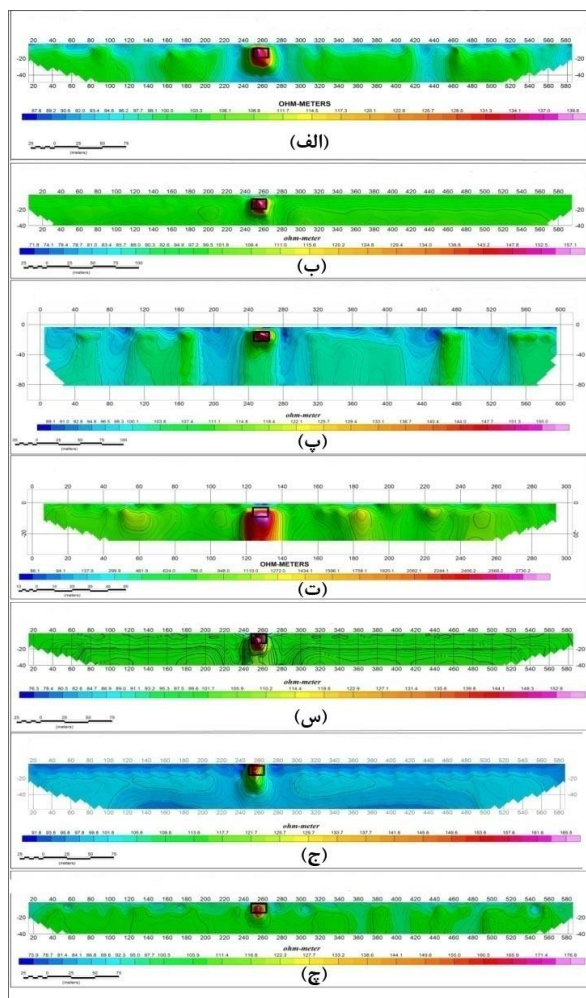


شکل (۳): مدل دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از آرایه ونر (با الهام از [۱۲])



شکل (۴): آرایه‌های الکتریکی دوبعدی مختلف همراه با ضرایب هندسی آنها [۲۵]

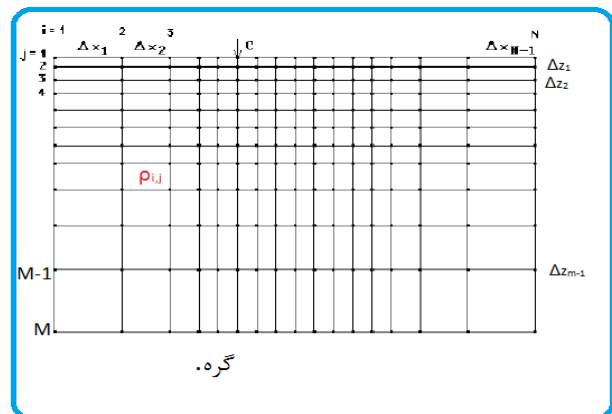
نیز ۲۰۰۰۰۰۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. بنابراین در مقاطع (شکل ۷) تونل به صورت یک پچ پنل<sup>۵</sup> با مقاومت ویژه بالا خود را نشان داده است. از آنجاکه در علم ژئوفیزیک همراه با افزایش عمق رزلوشن مقاطع و همچنین واضح بودن مرز لایه‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه در این مدل‌ها نیز مرز تونل به صورت واضح و مشخص نیست؛ بلکه همراه با یک هاله می‌باشد و با یک تقریب خوب می‌توان گفت که موقعیت و عمق تونل قابل تشخیص است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، کل آرایه‌ها به‌غیر از آرایه ونر آلفا به‌خوبی وجود تونل را در عمق‌های کم آشکار می‌کند. بدین جهت که آرایه ونر به ساختارهای قائم حساسیت پائینی دارد، در این مورد نتوانسته شکل تونل را بازسازی نماید و زون با مقاومت ویژه بالا تا پایان عمق کاوش کشیده شده است.



شکل ۷: پاسخ آرایه‌های مختلف در یک محیط همگن و همسانگرد حاوی یک تونل در عمق ۱۰ متری با ابعاد ۳×۲ متر. (الف): دوقطبی-دوقطبی، (ب): قطبی-دوقطبی، (پ): قطبی-قطبی، (ت): ورنر آلفا، (س): ورنر بتا، (ج): ورنر گاما (چ): ورنر شلومبرژه.

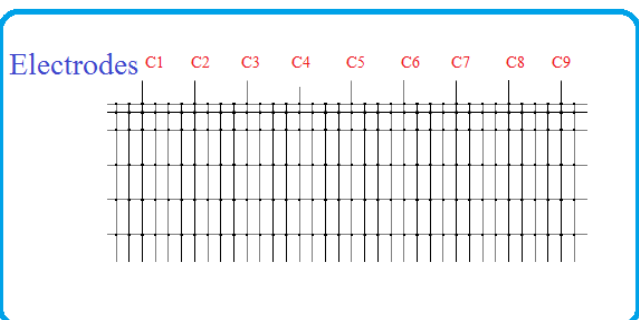
و کاربر به هرکدام از این سلول‌ها می‌تواند مقادیر مختلف مقاومت‌ویژه را تخصیص دهد (شکل ۵).

روش تفاضلات متناهی برای اولین بار به وسیله Morison و Dey سال ۱۹۷۹ مطرح شد. در این روش، مقاومت‌ویژه ظاهری محاسبه می‌گردد؛ اما در روش المان‌های محدود پتانسیل را در محل گره‌ها محاسبه می‌کند [۱۸].



شکل ۵: نمایش مش‌بندی زیر سطح زمین به وسیله نرم‌افزار RES2dMOD

هر مدل شامل M گره و M-1 بلوک (مش) قائم، و L گره و L-1 بلوک (مش) افقی است. با استفاده از این مش‌بندی ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی مدل می‌شوند. نرم‌افزار به ازای هر فاصله الکترودی ۲ یا ۴ گره را (بسته به نظر کاربر) در نظر می‌گیرد (شکل ۶).



شکل ۶: موقعیت الکترودها بر روی مدل مش‌بندی شده در نرم‌افزار RES2dMOD [۲۷].

### ۳- نتایج و بحث

۳-۱- آشکارسازی تونل با استفاده از آرایه‌های مختلف در این تحقیق یک تونل در عمق ۱۰ متری با ابعاد ۳×۲ متر در نظر گرفته شده است که به صورت پیشرو، پاسخ آرایه‌های دوبعدی متداول بر روی آن به دست آمده است. در مدل‌های اعمال شده در نرم‌افزار، محیط میزبان دارای مقاومت ۱۰۰ اهم متر و مقاومت تونل

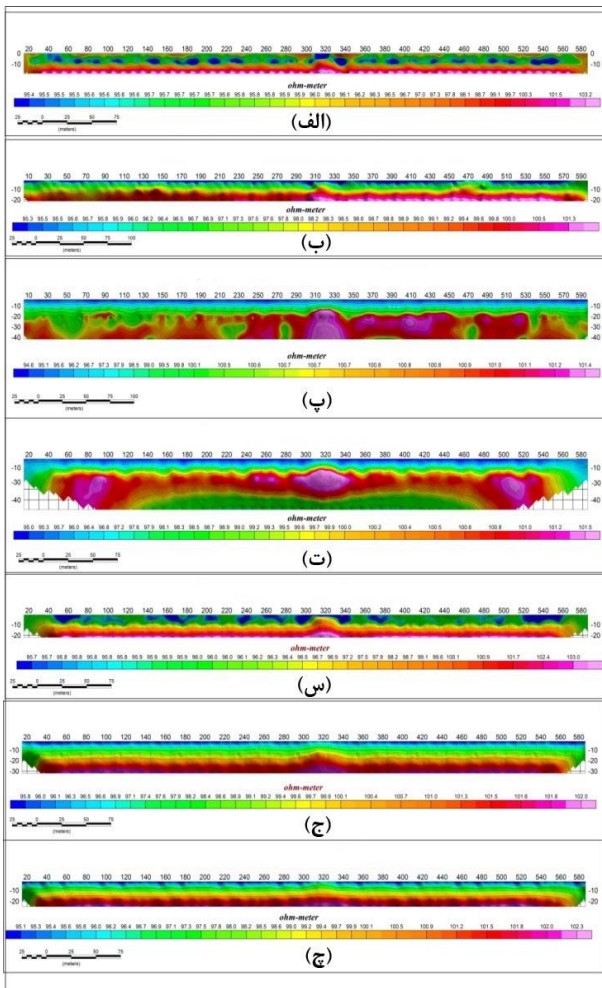
<sup>5</sup> patch panel

## ۳-۲- اثر عمق تونل در اختفاء اثر آن

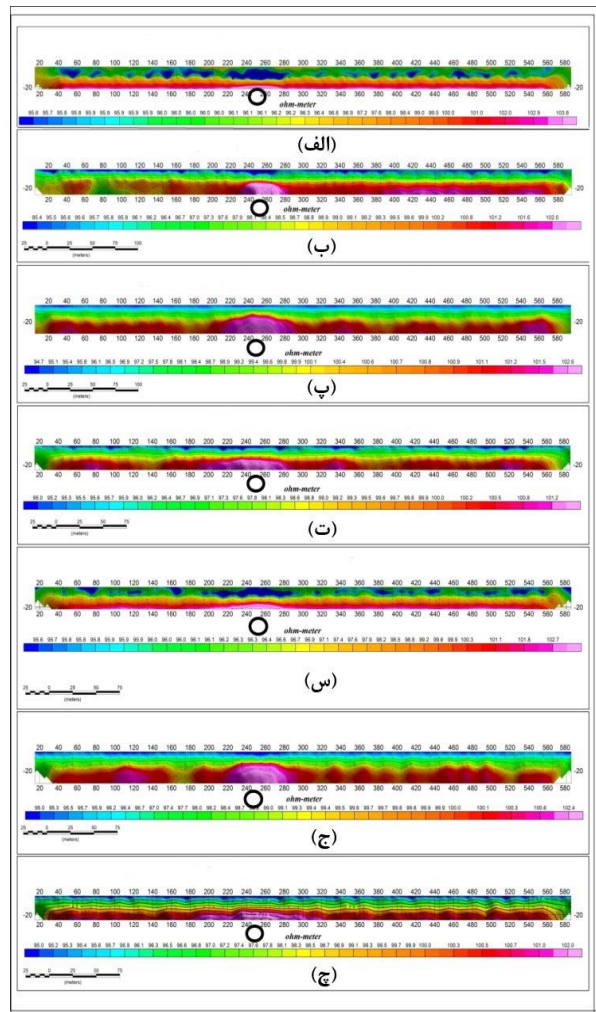
قبل از پرداختن به مدل‌ها لازم است که به‌طور خلاصه به اثر اختفاء پرداخته شود. لایه یا ساختاری که ضخامت آن نسبت به عمق دفن خیلی کوچک‌تر و همچنین کوچک‌تر از کوچک‌ترین فاصله الکترودی باشد، اثر آن بر روی مقاطع ژئوالکتریکی آشکار نمی‌گردد. در مدل‌ها کوچک‌ترین فاصله الکترودی ۱۰ متر در نظر گرفته شده، همچنین تونل با ابعاد ۳ متر پهنا و ۲ متر ارتفاع و عمق دفن آن ۴۰ متر است؛ پس بر طبق این اصل اثر تونل بر روی مقاطع ژئوالکتریکی محو شده است (شکل ۸). با توجه به شکل ۸، ملاحظه می‌شود که کل اختلاف مقاومت ویژه در حدود ۳ تا ۴ اهم متر است. پس نمی‌توان رنگ‌ها را به اثر تونل ربط داد، بلکه این تفاوت رنگ منشأ گرفته از شبکه‌گذاری نرم‌افزار می‌باشد و جنبه عینی ندارد.

## ۳-۳- اثر ابعاد تونل در اختفاء اثر تونل

اصولاً اگر عرض یک جسم مدفون (که در اینجا منظور تونل است)، خیلی کمتر از حداقل فاصله الکترودی باشد، اصل اختفاء رخ می‌دهد. بدین معنی که این کانال مدفون در مقاطع ژئوفیزیکی آشکار نمی‌شود. در این مرحله یک تونل با عرض ۱ متر و ارتفاع ۲ متر در مدل‌ها اعمال شده است. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، اثری از تونل بر روی کلیه مقاطع ژئوالکتریکی رؤیت نمی‌گردد. تغییر رنگ در مقاطع این بخش فقط مربوط به اختلاف ۲ تا ۵ اهم متری مقاومت ویژه است. در حیطه عمل تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی به‌صورت کمی انجام می‌پذیرد. بنابراین در این قسمت نیز تباین قابل قبولی در مقاطع حاصل از کلیه آرایه‌ها مشاهده نمی‌گردد. پس با این ترفند نیز می‌توان کانال‌ها و زیرگذرهای ساخته‌شده را از میدان دید ژئوالکتریک خارج نمود.



شکل (۹): پاسخ آرایه‌های مختلف برای یک تونل در عمق ۱۰ متری با ابعاد ۲×۱ متر. (الف): دوقطبی-دوقطبی، (ب): قطبی-دوقطبی، (پ): قطبی-قطبی، (ت): ورنر آلفا، (س): ورنر بتا، (ج): ورنر گاما (چ): ورنر شلومبرژه.

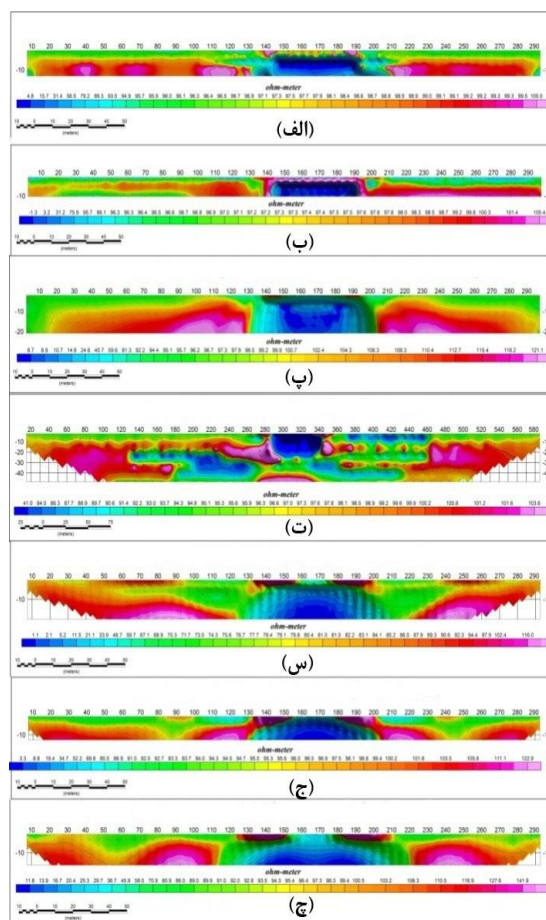


شکل (۸): پاسخ آرایه‌های مختلف برای یک تونل در عمق ۴۰ متری با ابعاد ۳×۲ متر. (الف): دوقطبی-دوقطبی، (ب): قطبی-دوقطبی، (پ): قطبی-قطبی، (ت): ورنر آلفا، (س): ورنر بتا، (ج): ورنر گاما (چ): ورنر شلومبرژه.



### ۳-۴- تأثیر رولایه رسانا در اختفای اثر تونل

در این بخش، مدل به صورت یک محیط میزبان همراه با یک لایه خیلی رسانا در عمق ۴۰ متری که در زیر آن یک تونل می باشد، در نظر گرفته شده است. اثر لایه رسانا، داده ها را تا شعاع ۵۰ متری تونل اطراف مخدوش نموده است. همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود در هیچ یک از مقاطع، اثر تونل دیده نمی شود. بنابراین می توان بیان نمود که، این ترفند نیز یکی از کاراترین روش ها در اختفای تونل ها از دید روش مقاومت ویژه است.



شکل (۱۰): پاسخ آرایه های مختلف برای یک تونل با رولایه رسانا در عمق ۴۰ متری و ابعاد ۲×۳ متر. (الف): دوقطبی-دوقطبی، (ب): قطبی-دوقطبی، (پ): قطبی-قطبی، (ت): ورنر آلفا، (س): ورنر بتا، (ج): ورنر گاما (چ): ورنر شلومبرژه.

### ۴- نتیجه گیری

روش مقاومت ویژه الکتریکی به سبب حساس بودن به تبیین مقاومت ویژه، مناسب ترین روش ژئوفیزیکی برای شناسایی حفاریات زیرزمینی است [۲۸]. در این تحقیق، توانایی روش مقاومت ویژه الکتریکی در آشکارسازی تونل ها بررسی گردید. در مطالعه حاضر در ابتدا به منظور تأیید قوی بودن این روش در

آشکارسازی تونل ها، یک تونل در عمق ۱۰ متری شبیه سازی شد و سپس پاسخ آرایه های مختلف الکتریکی بر روی تونل بررسی گردید. نتایج نشان داد که همه آرایه های ژئوالکتریکی می توانند اثر تونل را بر روی مقاطع، مدلسازی شده آشکار نمایند. در این میان آرایه های دوقطبی- دوقطبی، قطبی- دوقطبی و ورنر-شلومبرژه دارای مناسب ترین پاسخ می باشند و تا حد زیادی می توانند تونل را در موقعیت واقعی خود شناسایی نمایند؛ اما آرایه ورنر، تونل را به صورت یک بی هنجاری با مقاومت ویژه بالا که تا انتهای عمق آشکارسازی کشیده شده نشان می دهد، که نسبت به بقیه دارای ضعیف ترین پاسخ می باشد.

همچنین در این تحقیق، به منظور ارائه راهکارهای پدافند غیرعامل، جهت پنهان ماندن اثر تونل از میدان دید ژئوالکتریک، سه شیوه مدلسازی مورد توجه قرار گرفت. همان طور که بحث شد هر سه روش توانستند اثر اختفا را ایجاد نمایند و اثر تونل را بر روی مقاطع محو کنند. نتایج مهم به دست آمده که از دیدگاه اختفای تونل حائز اهمیت هستند، عبارتند از:

- با افزایش عمق تونل از ۱۰ به ۴۰ متر، اختلاف مقاومت ویژه در حدود ۳ تا ۴ اهم متر با توجه به حداقل فاصله الکترودی ۱۰ متر ایجاد می شود و اثر تونل بر روی مقاطع ژئوالکتریکی آشکار نمی گردد. افزایش عمق به عنوان یک راهکار پدافند غیرعامل از آن جهت قابل اجراست که اگر دشمن بخواهد فاصله الکترودی را افزایش دهد تا عمق نفوذش را بالطبع زیاد کند، نه تنها کلاً اثرات ساختارهای نزدیک سطحی را از دست می دهد، بلکه نسبت ابعاد تونل و فاصله الکترودی نیز زیاد می شود که این خود نیز منجر به ایجاد اثر اختفا می گردد.

- اگر عرض تونل، خیلی کمتر از حداقل فاصله الکترودی باشد، به دلیل ایجاد اختلاف ۲ تا ۵ اهم متری مقاومت ویژه، اثری از تونل بر روی مقاطع ژئوالکتریکی ایجاد نمی شود و لذا امکان آشکارسازی تونل به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. بنابراین، در حالت کاهش ابعاد تونل، اگر دشمن بخواهد تونل های کم عرض را آشکارسازی نماید، باید فاصله الکترودی را کاهش دهد، که این امر منجر به عمق نفوذ جریان و بالطبع کاهش عمق کاوش می گردد. پس این ترفند را می توان به عنوان یک راهکار مناسب پدافند غیرعامل در نظر گرفت.

- ایجاد یک لایه (پچ پنل) خیلی رسانا در زیر و اطراف تونل باعث می شود که در هیچ یک از مقاطع، اثر تونل بر روی مقاطع ژئوالکتریکی ایجاد نشود و لذا امکان آشکارسازی تونل به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. در واقع، این کار منجر به وارونه

- [11] M. Pagan, "The Electrical Resistivity Tomography (ERT) method in the detection of shallow mining cavities. A case study on Victoria Cave, Cartagena (SE, Spain)"; Eng. Geol., vol. 156, pp. 1-10, 2013. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.01.013
- [12] M. Farooq and M. Fozan, "Subsurface cavity detection in a karst environment using geoelectrical resistivity: a case study from yongweol-ri South Korea"; Earth science research journal, vol. 16(1), pp. 1-12, 2012.
- [۱۳] شرکت کیان کاوان، مطالعات ژئوالکتریک و لرزه‌نگاری انعکاسی جهت کشف حفره دشت آزادگان، ۱۳۹۳.
- [14] T. V. Panthulu, "Detection of seepage paths in earth dams using SP and electrical resistivity methods"; Eng. Geol., vol. 59, pp. 281-295, 2001.
- [15] M. Metwaly and A. Salman, "Application of 2D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in eastern part of Saudia Arabia"; Geosci. Front., vol. 4, pp. 469-476, 2001.
- [16] P. Satarugsa, "Applied 2D resistivity imaging for detection of subsurface cavities in northeastern Thailand: A case study at Ban Non Sa Bang- Ampho Ban Muang"; In Proc. of the International conference on applied Geophysics, pp. 44-49, 2004.
- [17] P. Soupios and M. Szali, "Reconstructing former urban environments by combining geophysical electrical methods and geotechnical investigations- an example from Chania- Greece"; J. Geophys. Eng., vol. 5(2), pp. 20-27, 2008.
- [۱۸] رنجی رودپشتی، هاشم، مطالعات باستان شناسی نیشابور با روشهای قطبش القایی و مقاومت‌ویژه، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- [19] S. Ibne and I. Fidan, "Geoelectrical assessment of a proposed dam site around Ehuhe area of Oji river- south eastern of Nigeria"; Journal of natural science research, vol. 3(13), pp. 12-18, 2013.
- [۲۰] موسوی، سید حسین، خزائی، صفا، آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۳، ص ۶۰۶-۵۸۷، ۱۳۹۵.
- [۲۱] خاکی نجف آبادی، ایمان، خزائی صفا، آشکارسازی تونل‌ها و سازه‌های امن پدافندی با استفاده از روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی زمین (GPR) با رویکرد پدافند غیر عامل، مجله پدافند غیر عامل، دوره ۸، شماره ۴، ص ۱۷-۲۸، ۱۳۹۶.
- [۲۲] شوکتی روناک، ملکی امجد، شیرزادی تبار فرزاد، ارزیابی روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین در شناسایی کارست مدفون در ناهمواری‌های شاهو (غار قوری‌قلعه)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۵۳، ص ۹۷-۱۱۷، ۱۴۰۰.
- [23] S. Bazin, "Mapping of quick clay by electrical resistivity tomography (ERT)"; J. Appl. Geophys., vol. 98, pp. 280-287, 2013.
- [24] P. Falco and M. H. Loke, "Fracture characterization using geoelectrical null- array"; J. Appl. Geophys., vol. 93, pp. 33-42, 2013. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.03.005
- [25] M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sherrif, and D. A. Keys, "Applied Geophysics", Cambridge University Press, 1986.
- [26] J. Milsom, "Field Geophysics", Wiley , University College London, 2003.
- [27] M. H. Loke, "Help of Res2dMod"; Geotomo software, 2002.
- [28] A. R. Zohdy, "Techniques of Water Resources" United States Geological Survey, pp. 25-27, 1974.

جلوه دادن مقاومت ویژه تونل می‌گردد و به‌واقع اثر تونل را می‌توان به‌صورت گسلی که در آن آب‌های زیرزمینی تجمع یافته‌اند، در نظر گرفت.

در پایان، لازم به ذکر است که تحلیل‌های این تحقیق بر اساس داده‌های تمیز (بدون نوفه) انجام گرفته‌اند. لذا، با توجه به اینکه داده‌های واقعی ژئوالکتریک همراه نوفه هستند، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی اثر نوفه بر روی عملکرد آرایه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. همچنین در این تحقیق جهت تحلیل اثر عمق، دو عمق ۱۰ و ۴۰ متر که از لحاظ کاربردی (دفاعی) به ترتیب عمق‌های متداول و بالا برای حفر تونل محسوب می‌شوند، مورد بررسی قرار گرفت. پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات بعدی اثر عمق‌های بیشتری جهت بررسی عملکرد آرایه‌های مختلف مورد تحلیل قرار گیرد.

## ۵- مراجع

- [1] R. Adwari, "Tunneling technique"; <http://www.mashreghnews.ir/fa/print/202808>, 2013.
- [2] P. W. McDowell, "Geophysics in engineering investigations", 2002.
- [3] C. H. Lin, C. P. Lin, Y. C. Hung, C. C. Chung, P. L. Wu, H. C. Liu, "Application of geophysical methods in a dam project: Life cycle perspective and Taiwan experience"; Journal of Applied Geophysics, 158, 82-92, 2018. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.07.012
- [4] J. M. Reynolds, "An Introduction to Applied and environmental Geophysics", Champan & Hall, 2011.
- [5] T. Lowrey, P. Schive, "An evaluation of bristow's method for the detection of subsurface cavities"; Geophys. J., vol. 55(5), pp. 5-14, 1990.
- [6] F. Binachi, G. Fasani, and H. Avat, "Underground cavity investigation within city of Rome (Italy): A multi-disciplinary approach combining geological and geophysical data"; Eng. Geol., vol. 15, pp. 109-121, 2013. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.10.006
- [۷] شاهی فردوس محمد، نوروزی غلامرضا، مقصودی عباس، استفاده از روش ژئوالکتریک به منظور احیای قنات‌ها: مطالعه موردی منطقه گسج، نشریه منابع آب و توسعه، شماره ۴، ۱۳۹۳.
- [۸] اسحاقی، اسماعیل، مقایسه و تلفیق نتایج پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR برای شناسایی اهداف و ساختارهای زیرسطحی کم‌زرفا، شماره ۳، ۱۰-۱۳، ۱۳۹۳.
- [9] R. Putsika and G. Kiota, "Determination of cavities using geoelectrical resistivity tomography", Cont. Geophys. Geodes., vol. 5, pp. 10-20, 2012.
- [10] M. Lopez and H. Jacob, "Electrical Tomography applied to the detection of subsurface cavities"; Journal of Cave and Karst studies, vol. 3, pp. 12-25, 2014. DOI: 10.4311/2011ES0242