

## مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی به روش اجزای محدود در آرایش الکترودی مستطیلی

زهرا فلسفین<sup>۱</sup>، احمد قربانی<sup>۲\*</sup> و فاطمه رضوی راد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۶، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵)

### چکیده

آرایش مستطیلی یکی از آرایش‌های الکترودی است که کاربرد زیادی در تحقیقات ژئوالکتریک و قُطبش القایی دارد. هدف از این آرایش محدود کردن مناطق وسیع به‌خصوص در اکتشاف کانسارهای سولفیدی است. برخلاف کاربرد وسیع آن کمتر به مدل‌سازی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن پرداخته شده است.

یک مدل سه‌بعدی مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی برای برداشت‌های ژئوالکتریک با آرایش مستطیل و با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار کمسول اسکریپت (COMSOL Script) توسعه داده و به زبان مطلب (MATLAB) برنامه‌نویسی شد. مدل‌سازی قُطبش القایی در حوزه بسامد مستقیم با حل عددی معادلات ماکسول صورت پذیرفت. از مدل کل-کل (Cole-Cole) برای تعیین رابطه مقاومت ویژه الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی با بسامد استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد تفسیر کیفی که با استفاده از نقشه مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و درصد اثر بسامد به‌دست آمده، زمانی صحیح است که بی‌هنجاری زیرسطحی ابعاد بزرگ، عمق کم و رسانایی زیادی داشته باشد. تعیین ضخامت توده رسانا در جهت قائم و تشخیص جهت قرارگیری توده رسانا با نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری و قُطبش القایی به‌دست آمده از برداشت با آرایه مستطیل، امکان‌پذیر نیست. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که تفسیر کیفی روش مقاومت ویژه الکتریکی نتایج بهتری در ارتباط با هندسه بی‌هنجاری، نسبت به قُطبش القایی نمایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قُطبش القایی، اجزای محدود، مقاومت ویژه الکتریکی، آرایش الکترودی مستطیل، مدل‌سازی، کمسول اسکریپت، مدل کل-کل، درصد اثر بسامد

### 3D Modeling of resistivity and IP data for rectangle array using Finite Element Method

Zahra Falsafin<sup>1</sup>, Ahmad Ghorbani<sup>1\*</sup> and Fateme Razavi rad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran

(Received: 26 May 2011, accepted: 28 September 2011, available online: 15 March 2012)

#### Summary

Rectangle array is widely used in resistivity and induced polarization (IP) studies. The purpose of this array is to restrict the wide areas especially in the exploration of sulfide

\*Corresponding author:

aghorbani@yazduni.ac.ir

\*نگارنده رابط:

minerals. On the contrary to the wide application of this array, less attention has been paid to the results of modelling and true estimates. The interpretations are normally qualitative.

A 3D resistivity and IP model was developed for the geoelectric surveys with a rectangle array. We used the COMSOL environment to solve the DC-resistivity and Maxwell's equations by the finite element method. Codes were programmed in Matlab language.

A common geometry of the model space was used for both resistivity and IP modelling. In the rectangle array, two current electrodes were located in a large distance and different potentials were measured on the profiles parallel to the current electrodes. Our model was formed by a homogeneous half space (a large block with dimensions  $800 \times 800 \times 500 \text{ m}^3$ , with a resistivity of  $400 \text{ ohm.m}$ ). Two current electrodes with a 200-m distance were located on the surface. Non-polarizing electrodes were located in a 5-m distance. The two measuring electrodes were moved on the profiles (parallel to the current electrode direction). Nine parallel profiles were located symmetrically on each side of the current electrode direction. Each profile had a 40-m length. The distance between the profiles was 5 m. The electrode configuration could be changed in the model. IP and resistivity anomalies could be created from different blocked locations in the subsurface (into the half space). The blocks near the potential profiles had small dimensions. The block sizes increased as the depth increased. We calculated the geometrical factor for the half-space. Apparent resistivity for each dual potential electrode was calculated from different potentials measured during the code execution and its geometry factors.

We compared the results from different anomalies by sensitivity  $\Delta\rho_a/\Delta\rho_i$ , where  $\Delta\rho_a$  is the difference between the apparent resistivity of the anomaly and the homogeneous half-space ( $400 \text{ ohm.m}$ ) and  $\Delta\rho_i$  is the difference between the resistivity value of the half-space and the anomaly in block number  $i$ .

Frequency domain IP was calculated directly from Maxwell's equations. Block scheme of the model done in the modelling space resistivity were used here. There was a resistivity value for each subsurface block in the resistivity model while there were a resistivity and a dielectric value for each block in an IP model. Resistivity and dielectric values of each block are functions of the frequency. We used the Cole-Cole model in order to calculate the resistivity and dielectric values in each frequency. Four intrinsic Cole-Cole parameters (DC-resistivity, chargeability, time constant and frequency relaxation) were considered for each block. During the frequency changes, these parameters were constant. Finally, apparent resistivity and percentage frequency effect (PFE) maps were calculated in a frequency range of 0.1 to 12000 Hz.

In this research, we studied the effect of size, depth and overburden thickness of the subsurface anomalies. The geoelectrical effects of vertical and horizontal anomalies were investigated. The impact of the potential electrode separation was also verified. The results showed that the qualitative interpretation using the apparent resistivity and apparent percentage frequency effect (PFE) maps was correct when anomaly had remarkable dimensions, a small depth and a high conductivity. The apparent-resistivity map reflected the effect of conductive and polarisable anomalies better than the PFE map.

**Key words:** Induced polarization, electrical resistivity, finite element method, rectangle Array, modelling, COMSOL script, Cole-Cole model, percent frequency effect.

## ۱ مقدمه

تعیین نقطه هدف در پی‌جویی مواد معدنی پرهزینه است و مدت‌زمان زیادی لازم دارد، بنابراین در بسیاری از برداشت‌های مقاومت ویژه و قُطبش القایی از آرایش الکترونی مستطیل به منزله روش برداشت شناسایی در تعیین محل بی‌هنجاری احتمالی، با صرف زمان و هزینه کمتر استفاده می‌شود.

آرایش الکترونی مستطیل عبارت است از آرایشی که در آن جریان از راه دو الکتروود با فاصله نسبتاً زیاد از هم (برای مثال ۱۰۰۰ متر) به زمین تزریق شود و برداشت‌های پتانسیل روی نیم‌رخ‌های موازی با امتداد الکتروودهای جریان صورت گیرد. فرض بر این است که میدان الکتریکی در محدوده میانی فاصله بین نقاط تزریق جریان (محدوده اندازه‌گیری پتانسیل) افقی است.

این نوع آرایش کاربرد وسیعی در اکتشاف کانسارهای توده‌ای و پرفیری، به‌خصوص در پی‌جویی ژئوالکتریکی مناطق وسیع دارد (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴؛ باکالی و امرانی، ۲۰۰۵). به‌عبارتی با این آرایش الکترونی تنها با جابه‌جا کردن دو الکتروود پتانسیل، در مدت‌زمان کوتاهی می‌توان منطقه وسیعی را پوشش داد. معمولاً تفسیر نقشه‌های بارپذیری ظاهری و مقاومت ویژه ظاهری به‌دست آمده به کمک این آرایش به‌صورت کیفی است. بدین‌ترتیب محل بی‌هنجاری‌ها مشخص می‌شود و برداشت‌های ژئوالکتریکی دیگر (برای مثال تهیه مقاطع عمقی با استفاده از آرایش‌های دیگر مانند دوقطبی-دوقطبی) روی بی‌هنجاری‌های تفسیر شده به‌منظور تکمیل اطلاعات صورت می‌پذیرد. اما، نکته قابل ذکر این است که تاکنون مدل‌سازی مستقیم و معکوس روی داده‌های به‌دست آمده با آرایش الکترونی مستطیل، صورت نگرفته است. لذا، اعتبار، قدرت تفکیک و حساسیت این آرایش در تعیین بی‌هنجاری‌های احتمالی واضح نیست. آیا می‌توان از این آرایش به‌منزله یک آرایش مستقل (و نه

اولیه) برای تعیین ویژگی‌های هندسی و کیفی توده‌های هدف استفاده کرد؟ در این تحقیق اعتبار، قدرت تفکیک و حساسیت آرایش الکترونی مستطیل در تعیین بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی بررسی می‌شود.

در این تحقیق از روش اجزای محدود برای حل عددی معادله پواسون و معادلات ماکسول در سه‌بُعد استفاده شده است. بدین‌منظور نرم‌افزار کمسول (Comsol نسخه ۳/۵) به کار گرفته شده (کمسول، ۲۰۰۴) و درنهایت نقشه مقاومت ویژه ظاهری و درصد اثر بسامد به‌دست آمده از یک مدل مصنوعی نشان داده شده و حساسیت آرایش الکترونی مستطیل با مثال‌هایی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲ مدل‌سازی سه‌بُعدی مقاومت ویژه الکتریکی

## ۱-۲ معادلات حاکم

در هر مدل‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی، میدان پتانسیل  $V$  در یک محیط از حل معادله پواسون به‌دست می‌آید (ها و همکاران، ۲۰۰۶؛ مارسکو و همکاران، ۲۰۰۸ و لسم و مورگان ۲۰۰۱):

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = \sum I_q \delta(r - r_q) \quad (1)$$

که در آن،  $\delta$  تابع دیراک،  $I_q$  میزان جریان تزریقی در الکتروودهای جریان در موقعیت  $r_q$ ، تعداد الکتروودهای جریان و  $\sigma$  رسانایی الکتریکی ( $\sigma = 1/\rho$ ) است. شرط مرزی نیومن با:

$$-\sigma \nabla V \cdot n = J_n \quad (2)$$

و شرط مرزی دریکله با:

$$V = \bar{V} \quad (3)$$

نشان داده می‌شود.  $J_n$  بردار چگالی جریان عمود بر سطح و  $\bar{V}$  مقدار پتانسیل در مرز دریکله است.

## ۲-۲ مدل‌سازی عددی مقاومت ویژه الکتریکی با

به کار بردن کمسول اسکریپت (Comsol Script)

در این بخش نحوه مدل‌سازی عددی مقاومت ویژه الکتریکی سه‌بعدی برای آرایش الکترونی مستطیل بر پایه اجزای محدود عرضه شده است. اجرای مدل عددی مقاومت ویژه بحث شده در بخش ۲-۱، با نرم‌افزار کمسول اسکریپت صورت گرفت و به زبان مطلب برنامه‌نویسی شد. مدل‌سازی برای این نوع آرایش الکترونی بدین شکل صورت گرفته است که در ابتدا زمین به صورت یک بلوک بزرگ با ابعاد  $500 \times 800$  متر  $800 \times$  متر طراحی شده است که حالت نیم‌فضای همگن ایجاد شود. دو الکتروود جریان با فاصله  $200$  متر نسبت به مرکز بلوک قرار گرفته‌اند که جریان مستقیم  $1$  آمپر از آنها عبور می‌کند. محور  $Z$  به طرف پایین مثبت است. الکتروودهای پتانسیل به فاصله  $5$  متر از یکدیگر روی  $9$  نیم‌رخ موازی با امتداد الکتروودهای جریان، به پتانسیل اندازه‌گیری می‌کنند. طول هر نیم‌رخ  $40$  متر است. نیم‌رخ‌های ذکر شده  $5$  متر از یکدیگر فاصله دارند و به‌طور متقارن نسبت به امتداد الکتروودهای جریان واقع شده‌اند. چگالی جریان در نزدیکی الکتروودهای جریان بیشینه است و با افزایش فاصله از الکتروودهای جریان به تدریج کاهش می‌یابد. به‌منظور تصحیح مش‌بندی در اطراف نقاط تزریق جریان و در نتیجه انتقال صحیح جریان به محیط مدل، بلوک‌هایی در نزدیکی نقاط جریان در نظر گرفته شد. به‌عبارت‌دیگر در داخل بلوک بزرگ با ابعاد  $500 \times 800 \times 800$  متر بلوک‌های کوچک‌تری با همان مقاومت ویژه الکتریکی در نظر گرفته شد. به‌منظور ایجاد بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه و قُطُبش القایی زیرسطحی با ابعاد متفاوت و در مکان‌های دلخواه، نیم‌فضای پیش‌گفته به بلوک‌هایی تقسیم شدند (شکل ۱). بلوک‌های با ابعاد کوچک در زیر نیم‌رخ‌های برداشت پتانسیل قرار دارد به‌طوری‌که با افزایش عمق، ابعاد بلوک‌ها افزایش

برای بسیاری از آرایش‌های هندسی ساده، حل تحلیلی معادله فوق وجود دارد. در حالات پیچیده‌تر حل عددی با استفاده از روش اجزای محدود به کار می‌رود.

یک شکل از معادله پواسون در اجزای مرزی با معادله (مارسکو و همکاران، ۲۰۰۸ و ساساکی، ۱۹۹۴):

$$\int \sigma \nabla V \cdot \nabla \delta V dV + \int J q \delta V d\Gamma = \sum I q \delta V(r_q) \quad (4)$$

نشان داده می‌شود، که در آن،  $\Gamma_N$  شرط مرزی نیومن در فصل مشترک محیط مورد بررسی و هوا است ( $J_n=0$ ). شرط مرزی دریکله برای نقاط خیلی دور از الکتروودها در نظر گرفته می‌شود. روش اجزای محدود شکل گسسته معادله (۴) را حل می‌کند. فرایند گسسته‌سازی و جمع سهم همه اجزا به شکل دستگاه خطی زیر خلاصه می‌شود (مارسکو و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Kp = S \quad (5)$$

که در آن،  $k$  یک ماتریس بزرگ، اسپارس (sparse) متقارن حاوی اطلاعات هندسی و توزیع مقادیر رسانایی،  $p$  بردار محتوی مقادیر میدان پتانسیل محاسبه شده و  $S$  بردار منبع است. حل معادله (۵) مقادیر پتانسیل در همه گره‌های شبکه (بردار  $p$ ) را به‌دست می‌دهد. مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری از حاصل ضرب ضرب هندسی  $k$  در نسبت پتانسیل اندازه‌گیری شده به جریان الکتریکی تزریق شده، محاسبه می‌شود.

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (6)$$

ضریب هندسی  $k$  با این فرض که در یک محیط همگن با مقاومت ویژه،  $\rho_a = \rho$  است، به‌دست می‌آید. ابعاد بلوک‌ها در مدل‌سازی طوری طراحی شده‌اند که حالت نیم‌فضای همگن ایجاد شود، لذا، می‌توان برای محاسبه ضریب هندسی آرایش از روابط در نیم‌فضای همگن استفاده کرد.

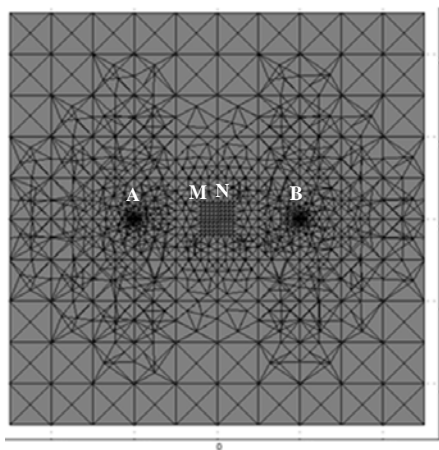
جفت‌الکترودهای پتانسیل به دست می‌آید. با استفاده از روابط نیم‌فضای همگن، مقادیر ضریب هندسی ( $K=$ )  $2\pi/(1/AM-1/AN-1/BM + 1/BN)$  و مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a=K\Delta V/I$ ) محاسبه و نقشه مقاومت ویژه ظاهری آن برای شبکه نقاط پتانسیل در نرم‌افزار سورفر (Surfer) آماده می‌شود (شکل ۲).

### ۲-۳ تعیین معیار حساسیت

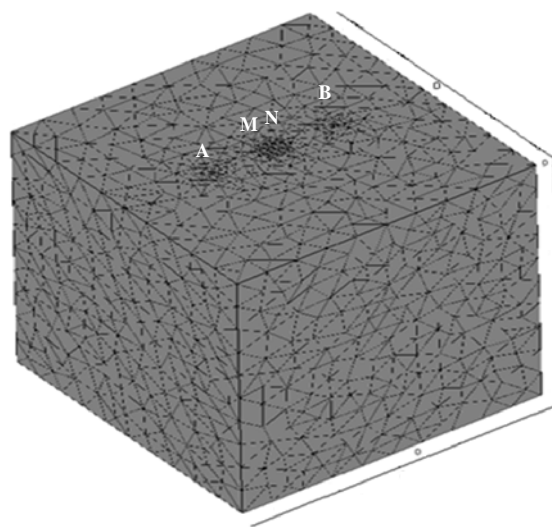
همان‌طور که می‌دانیم، نتیجه برداشت مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از آرایش الکترونی مستطیلی، نقشه مقاومت ویژه ظاهری در محل نیم‌رخ‌های الکترودهای پتانسیل است. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه گتفاوت برداشت شده با این آرایش الکترونی، از معیار حساسیت مطابق تعریف زیر استفاده شد.

می‌یابد. حل مسئله پواسون با بلوک‌بندی انتخاب شده و با مش ندی بهینه، برای نیم‌فضا، روشن ساخت که پتانسیل محاسبه شده در نقاط متفاوت دارای خطای کمتر از ۱٪ است.

به منظور ایجاد بی‌هنجاری در داخل نیم‌فضای همگن پیش‌گفته، بلوک‌های کوچک‌تری در نظر گرفته شد. بلوک‌بندی محیط تا جایی ادامه پیدا می‌کند که مش‌بندی منظم، اندازه اجزای ثابت و نتایج یک برنامه در دو بار اجرا یکسان شود (شکل ۱). برای ایجاد بی‌هنجاری رسانا نسبت به محیط (بلوک بزرگ) کافی است مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک یا تعدادی از بلوک‌های موردنظر را نسبت به محیط (بلوک بزرگ) تغییر داد و درحکم توده زیرسطحی در نظر گرفت. لازم به ذکر است که مشخصات توده‌ها و فواصل الکترونی قابل تغییرند. با اجرای این مدل، مقادیر اختلاف پتانسیل الکتریکی برای

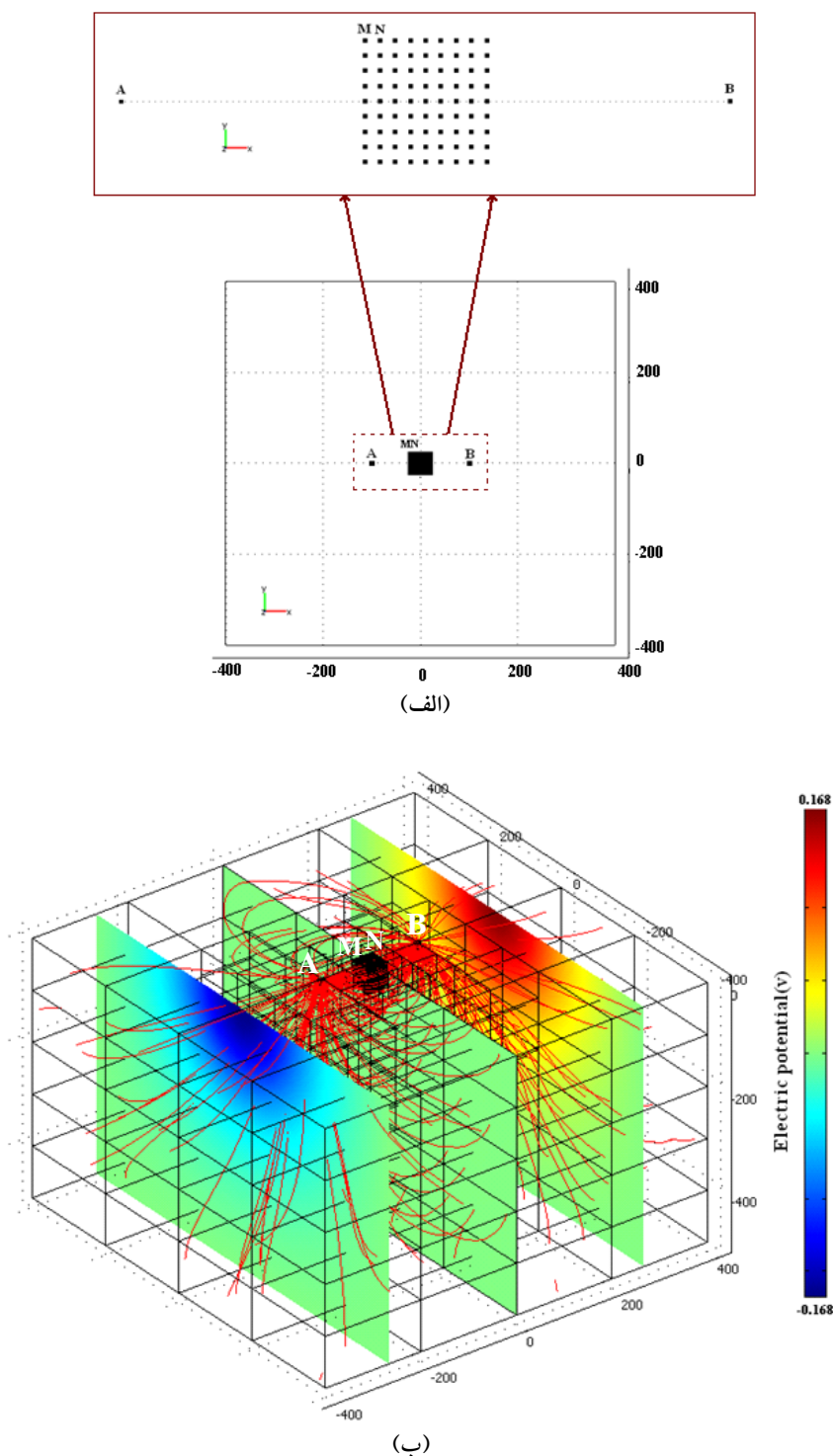


(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) مش‌بندی مدل قبل از تقسیم بلوک بزرگ به بلوک‌های کوچک و (ب) مش‌بندی مدل بعد از تقسیم بلوک بزرگ به بلوک‌های کوچک که به منظور نمایش بهتر اندازه و نظم اجزا، به صورت دو‌بعدی نمایش داده شده است. A و B محل الکترودهای جریان، M و N محل الکترودهای پتانسیل است. بلوک بزرگ دارای طول و عرض برابر ۸۰۰ متر و عمق ۵۰۰ متر است.



**شکل ۲.** (الف) طرح‌بندی مدل‌سازی سه‌بعدی شامل زمین به صورت یک بلوک بزرگ با ابعاد  $800 \times 800 \times 500$  متر. دو الکتروود جریان با فاصله ۲۰۰ متر نسبت به مرکز بلوک قرار گرفته‌اند. الکتروودهای پتانسیل به فاصله ۵ متر از یکدیگر روی ۹ نیم‌رخ موازی با امتداد الکتروودهای جریان، پتانسیل اندازه‌گیری می‌کنند. طول هر نیم‌رخ ۴۰ متر است. نیم‌رخ‌های ذکر شده ۵ متر از یکدیگر فاصله دارند و به طور متقارن نسبت به امتداد الکتروودهای جریان واقع شده‌اند. (ب) توزیع پتانسیل الکتریکی (سطوح رنگی) و خطوط میدان الکتریکی پس از حل مدل مقاومت ویژه برای مدل نیم‌فضا (۴۰۰ اهم متر) با آرایش الکتروودی مستطیل. A و B محل الکتروودهای جریان و M و N محل الکتروودهای پتانسیل است.

$$\Delta\rho_i = \rho_M - \rho_B \quad (۸)$$

قابل ذکر است هنگامی که توده‌ای با رسانایی زیاد و ابعاد مناسب نزدیک سطح زمین قرار گرفته باشد، نتایج حاصل از نتیجه برداشت مقاومت ویژه ظاهری بیشترین مقدار حساسیت را دارد (شکل ۳). به عبارت دیگر:

$$\left| \frac{\Delta\rho_a}{\Delta\rho_i} \right| = 1 \quad (۹)$$

### ۳ مدل‌سازی سه‌بُعدی قُطبش القایی

#### ۱-۳ معادلات حاکم

در این تحقیق مدل‌سازی سه‌بُعدی قُطبش القایی در حوزه بسامد، مستقیماً با حل معادلات ماکسول صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که به منظور مدل‌سازی قُطبش القایی در حوزه زمان باید از معادلات فوریه استفاده شود که می‌توان در ادامه این تحقیق عملی ساخت.

معادلات ماکسول مجموعه‌ای از معادلات هستند که به صورت‌های دیفرانسیلی یا انتگرالی نوشته می‌شوند. معادلات ماکسول روابط بین کمیت‌های اساسی الکترومغناطیس را بیان می‌کنند. این کمیت‌ها عبارت‌اند از:  $E$  شدت میدان الکتریکی،  $D$  جریان جابه‌جایی،  $H$  شدت میدان مغناطیسی،  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $J$  چگالی جریان و  $q$  چگالی بار الکتریکی. صورت دیفرانسیلی معادلات ماکسول به شکل زیر است (جکسون، ۱۹۹۸):

$$\nabla * H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۱۰)$$

$$\nabla * E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (۱۱)$$

$$\nabla . D = q \quad (۱۲)$$

$$\nabla . B = 0 \quad (۱۳)$$

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از بی‌هنجاری‌های متفاوت زیرسطحی، معیار حساسیت به صورت زیر تعریف شد. برای مثال اگر فقط عمق یک بی‌هنجاری زیرسطحی تغییر کند و دیگر شرایط محیط و بی‌هنجاری ثابت بماند، حساسیت طوری انتخاب شده است که بتواند معیار مناسبی برای تعیین تباین مقاومت ویژه الکتریکی باشد. در واقع این معیار، اختلاف بین مقاومت ویژه ظاهری ثبت شده در یک نقطه اندازه‌گیری برای محیط همگن و مقاومت ویژه ظاهری ثبت شده در همان نقطه و وقتی است که بی‌هنجاری رسانا در محیط همگن قرار دارد. اختلاف مقاومت ویژه‌های ظاهری موردنظر نسبت به اختلاف مقاومت ویژه محیط همگن و بی‌هنجاری رسانا، نرمال می‌شود. بدین صورت که برای تعیین معیار حساسیت دو حالت از وضعیت محیط مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. حالت اول محیط همگن با مقاومت ویژه الکتریکی  $\rho_M$  (محیطی با مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۰ اهم متر). در این حالت مقدار مقاومت ویژه ظاهری حاصل در هر نقطه از آرایش الکترونی مستطیل  $\rho_{a1}$  است. حالت دوم برای توده‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی  $\rho_B$  است که در یک محیط همگن با مقاومت ویژه الکتریکی  $\rho_M$  قرار گرفته است. در این حالت مقدار مقاومت ویژه ظاهری (اهم متر) حاصل در همان نقطه (حالت اول) از آرایش الکترونی مستطیل  $\rho_{a2}$  است. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در هر نقطه  $(\Delta\rho_a)$  از اختلاف  $\rho_{a1}$  و  $\rho_{a2}$  به دست آمده است. به منظور نرمال کردن، اختلاف مقاومت ویژه ظاهری  $(\Delta\rho_a)$  به اختلاف مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا  $(\Delta\rho_i)$  تقسیم شده است. در نهایت، معیار حساسیت به صورت  $\Delta\rho_a/\Delta\rho_i$  تعریف شده است.

$$\Delta\rho_a = \rho_{a2} - \rho_{a1} \quad (۷)$$

معادلات (۹) و (۱۰) به ترتیب قانون آمپر و قانون فارادی هستند. معادلات (۱۱) و (۱۲) به ترتیب قانون گاوس را برای حالت الکتریکی و مغناطیسی بیان می‌کنند.

عامل اساسی در مدل‌سازی قُطبش القایی در حوزه بسامد، جریان جابه‌جایی ( $\mathbf{D}$ ) است و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (14)$$

که در آن،  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  ثابت دی‌الکتریک خلا F/m است. بردار قُطبش الکتریکی  $\mathbf{P}$  چگونگی قُطبیده شدن مواد را در حضور میدان الکتریکی  $\mathbf{E}$  بیان می‌کند. برای مواد ناهمگن، قُطبش نسبت مستقیمی با میدان الکتریکی دارد و  $\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$  که  $\chi_e$  مغناطیس‌پذیری الکتریکی است.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (15)$$

که در آن،  $\varepsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک نسبی است.

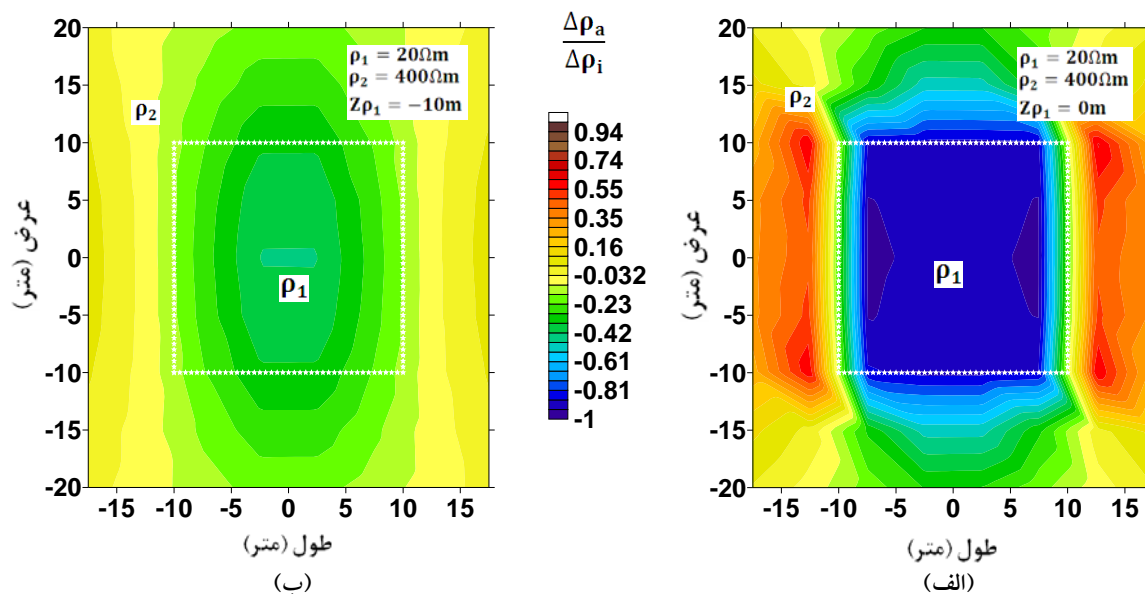
معادله کلی جریان جابه‌جایی به صورت زیر نوشته می‌شود (جکسون، ۱۹۹۸):

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{D}_r \quad (16)$$

که در آن،  $\mathbf{D}_r$  جابه‌جایی باقی‌مانده است که مقدار جابه‌جایی را هنگامی که میدان الکتریکی وجود نداشته باشد نشان می‌دهد.

اگر عمق پوسته‌ای در کل محدوده بزرگ‌تر از هندسه موردنظر باشد، می‌توان از جفت‌شدگی بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یا به عبارت دیگر از جریان القایی صرف‌نظر کرد. بنابراین، می‌توان معادله شبه‌پایا برای جریان الکتریکی را به صورت زیر بیان کرد (جکسون، ۱۹۹۸):

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\varepsilon_0)\nabla V - \mathbf{j}^c) = 0 \quad (17)$$



شکل ۳. نقشه حساسیت الکتریکی توده رسانا با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰ اهم‌متر در محیطی با مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۰ اهم‌متر. (الف) توده رسانا به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر در نزدیکی سطح زمین واقع شده است (دارای برون‌زدگی است). (ب) همان توده رسانا در عمق ۱۰ متری واقع شده است. مستطیل سفیدرنگ تصویر توده رسانا را نشان می‌دهد.



الکترونی (یا فلزی) بسیار بزرگ‌تر از قطبش سنگ‌ها و خاک‌های عقیم دربرگیرنده است (قطبش غشایی). مقادیر  $\rho$  و  $\epsilon_r$  محیط دربرگیرنده، حقیقی و به ترتیب برابر ۴۰۰ اهم متر و یک و مقادیر  $\rho$  و  $\epsilon_r$  توده زیرسطحی تابعی از بسامد در نظر گرفته شد. به منظور تعیین مقادیر  $\rho$  و  $\epsilon_r$  توده زیرسطحی لازم است رابطه  $\rho$  و  $\epsilon_r$  با بسامد تعیین شود. برای تعیین رابطه  $\rho$  و  $\epsilon_r$  با بسامد از مدل کل-کل (Cole-Cole) استفاده شده است (کل و کل، ۱۹۴۱؛ پلتون و همکاران ۱۹۷۸). فرمول کل-کل برای پارامترهای قطبش القایی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (20)$$

که در آن،  $\rho^*(\omega)$ : مقاومت ویژه مختلط (اهم)،  $m$  بارپذیری  $0 \leq m \leq 1$ ،  $\rho_0$  مقاومت الکتریکی در جریان DC است،  $\tau$  ثابت زمانی (ثانیه)،  $\omega = 2\pi f$  بسامد زاویه‌ای،  $f$  بسامد برحسب،  $c$  وابستگی بسامد  $1 \leq c < \infty$  و  $i^2 = -1$ .

لیما و شارما (۱۹۹۲) رسانایی مختلط را به صورت زیر بیان کردند:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) - i\sigma''(\omega) \quad (21)$$

$$= \sigma'(\omega) - i\omega\epsilon''(\omega)$$

که در آن،  $\sigma'$  و  $\sigma''$  به ترتیب بخش حقیقی و مجازی رسانایی و  $\epsilon'$  ثابت دی‌الکتریک حقیقی است. رابطه بین رسانایی مختلط و مقاومت ویژه مختلط را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma^*(\omega) = \frac{1}{\rho^*(\omega)} \quad (22)$$

رابطه (۲۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma^*(\omega) = \frac{1}{\rho'(\omega) + i\rho''(\omega)} \quad (23)$$

$$= \frac{\rho'(\omega)}{[\rho^*(\omega)]^2} - i \frac{\rho''(\omega)}{[\rho^*(\omega)]^2}$$

که در آن،  $J$  چگالی جریان خارجی برحسب آمپر بر متر مربع،  $\nabla V$  اختلاف پتانسیل برحسب ولت،  $\sigma$  رسانایی الکتریکی برحسب زیمنس بر متر،  $\theta$  بسامد زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه است. برای حل معادله (۱۶) شرایط مرزی نیومن و دریکله به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$-\sigma \nabla V \cdot n = J_n \quad (18)$$

$$V = \bar{V} \quad (19)$$

در نظر گرفته می‌شود که در آن،  $J_n$  بردار چگالی جریان عمود بر سطح و  $\bar{V}$  مقدار پتانسیل در مرز دریکله است.

### ۲-۳ مدل‌سازی عددی قطبش القایی با به کار بردن کمسول اسکریپت

مدل‌سازی در این بخش مانند مدل‌سازی بخش ۲-۲ است؛ با این تفاوت که در مدل‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی تنها لازم بود که مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ( $\rho$ ) محیط و توده زیرسطحی تعیین شود؛ اما، در مدل‌سازی قطبش القایی در حوزه بسامد لازم است مقاومت ویژه الکتریکی ( $\rho$ ) و ثابت دی‌الکتریک نسبی ( $\epsilon_r$ ) محیط و توده زیرسطحی تعیین شود. اغلب سنگ‌ها و خاک‌ها (کانسارها و سنگ و خاک شامل مواد رُسی) دارای مقاومت ویژه الکتریکی مختلط هستند (وکیه و همکاران، ۱۹۵۷؛ پلتون و همکاران، ۱۹۷۸؛ وانهاالا، ۱۹۹۷). به عبارت دیگر مقاومت ویژه الکتریکی مختلط (مقاومت ویژه الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک نسبی) آنها تابع بسامد است. در مدل‌سازی حاضر، مقاومت ویژه محیط دربرگیرنده بیهنجاری زیرسطحی (کانسار) حقیقی (غیروابسته به بسامد) و مقاومت ویژه کانسار عدد مختلط و وابسته به بسامد در نظر گرفته شد. این فرض از واقعیت دور نیست؛ زیرا مقادیر قطبش القایی کانسارها (قطبش

بنابراین، مقدار  $0.0381$  ثانیه برای  $\tau$  به دست می آید. مدل کل-کل برای مقادیر مشخص پارامترهای  $\rho_0$ ،  $m$ ،  $c$ ،  $\tau$  در محدوده بسامد  $0.0014 < f < 384000$  هرتز، مقادیر مقاومت ویژه مختلط  $(\rho^*(\omega))$  را محاسبه می کند. در نهایت، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی  $\rho(\omega)$  و ثابت دی الکتریک نسبی  $\epsilon_r(\omega)$  نیز با استفاده از روابط زیر:

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{1}{\omega \epsilon_0} \cdot \frac{\rho''(\omega)}{|\rho^*(\omega)|^2} \quad (26)$$

$$\rho(\omega) = \rho'(\omega) \quad (27)$$

محاسبه و در هر بسامد در مدل عرضه شده فراخوانی می شود. بنابراین، با اجرای این مدل با نرم افزار کمسول مقادیر پتانسیل الکتریکی در هر بسامد به دست می آید. در نتیجه می توان نقشه مقاومت ویژه ظاهری در هر بسامد، طیف مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری در هر نقطه از شبکه برداشت و درصد اثر بسامد را به دست آورد (شکل ۴).

درصد اثر بسامد (PFE) از مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده در دو بسامد  $0.1$  و  $12000$  هرتز محاسبه شد. نتایج نشان می دهد که مقدار درصد اثر بسامد به خوبی می تواند تغییرات مشخصات توده معدنی را نشان دهد (شکل ۵).

#### ۴ بررسی نتایج مدل سازی مقاومت ویژه و قُطبش القایی حاصل از آرایش الکترودی

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق، بررسی اثرات گوناگون مرتبط با بی هنجاری های زیرسطحی (اعم از ابعاد، عمق فوقانی، شیب و ضخامت توده بی هنجاری، تاثیر محل قرارگیری بی هنجاری نسبت به آرایش، جهت قرارگیری آن) و تاثیر فاصله بین الکترودهای پتانسیل است، لذا، اقدام به تعیین حساسیت آرایش الکترودی شد. به منظور بررسی حساسیت آرایش الکترودی مستطیل مدل عددی مقاومت ویژه الکتریکی سه بُعدی مورد بحث در

که در آن،  $|\rho^*| = \sqrt{\rho'^2 + \rho''^2(\omega)}$  دامنه مقاومت ویژه مختلط و  $\rho'$  و  $\rho''$  به ترتیب بخش حقیقی و مجازی امپدانس است. با ترکیب روابط (۲۱) و (۲۳) به سادگی می توان ثابت دی الکتریک نسبی را محاسبه کرد:

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\rho''(\omega)}{|\rho^*(\omega)|^2} \quad (24)$$

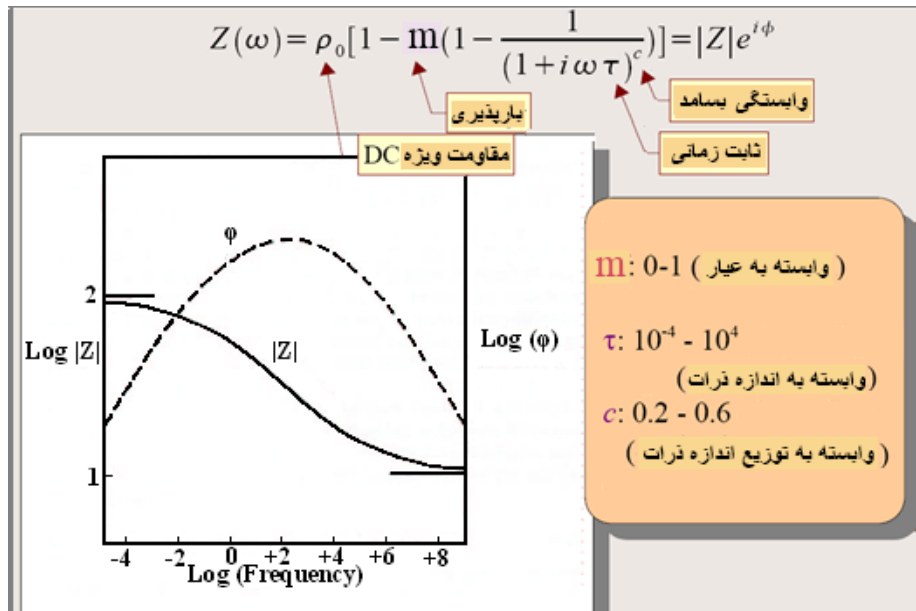
پلتون و همکاران (۱۹۷۸) از مدل کل-کل برای اکتشاف کانی سازی سولفوری، مگنتیت و گرافیت استفاده کردند. این مدل انطباق خوبی با برداشت های قُطبش القایی نشان داد. وانهالا (۱۹۹۷) برای بررسی آلودگی هیدروکربوری در آب های زیرزمینی از این رابطه استفاده کرد. تعیین پارامتر های مدل تجربی کل-کل، نقش اساسی در شناخت خواص کمی و کیفی بی هنجاری قُطبش القایی دارد. تحقیقات نشان داده است که در کانی سازی پرفیری، بارپذیری به کمیت ذرات قُطبش پذیر (عیار ماده معدنی)، ثابت زمانی تابع اندازه ذرات و وابستگی بسامد تابع توزیع اندازه ذرات (دانه بندی) است (پلتون، ۱۹۷۸). چهار پارامتر مدل کل-کل، در محدوده تغییرات بسامد، ثابت هستند. لذا، با داشتن چهار پارامتر رابطه تجربی کل-کل که در محدوده تغییرات بسامد ثابت می مانند، می توان مقاومت ویژه مختلط مورد نظر را ایجاد کرد و در نهایت پارامترهای  $\rho(\omega)$  و  $\epsilon_r(\omega)$  را محاسبه کرد. برای مثال، مقادیر این چهار پارامتر برای یک کانی سازی مناسب عبارت است از:  $\rho_0 = 100$  اهم متر،  $0.7$ ،  $m = 0.3$  و  $c = 0.3$ . برای محاسبه  $\tau$  از رابطه زیر استفاده شد (وانهالا، ۱۹۹۷):

$$f = \frac{1}{2\pi\tau(1-m)^{1/2c}} \quad (25)$$

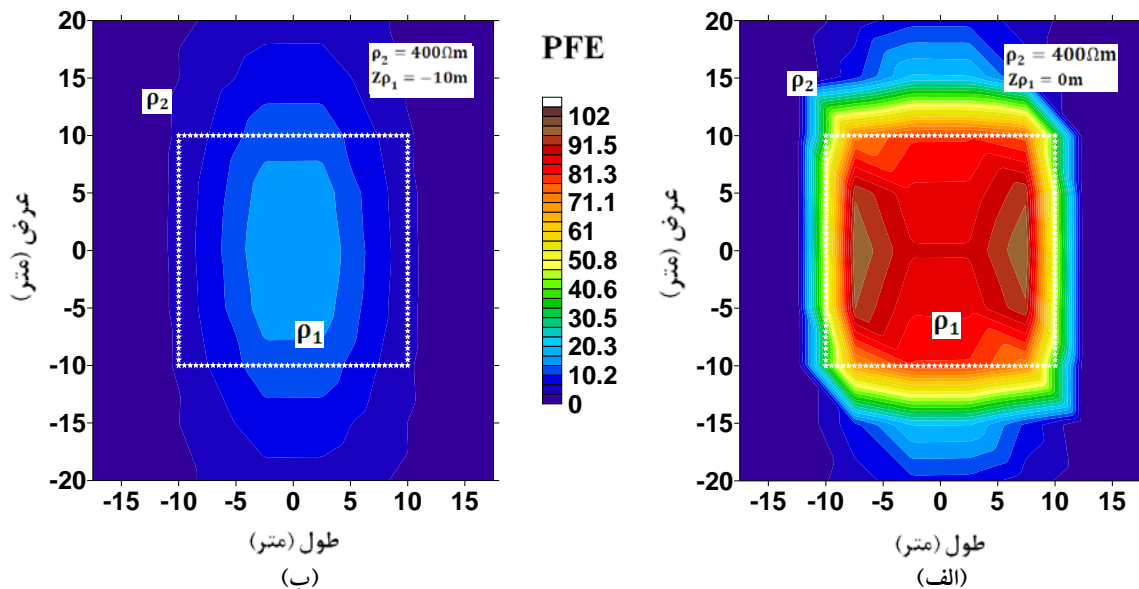
که در آن،  $f$ ، بسامدی است که بیشینه فاز اتفاق می افتد. مقدار  $f = 5$  هرتز انتخاب شد تا بیشینه فاز تقریباً در وسط طیف (۱ میلی هرتز تا ۱۰ کیلو هرتز) قرار گیرد.

مستطیل نسبت به این تغییرات بررسی شد. به عبارتی قدرت تفکیک و شناسایی آرایش الکترودی مستطیل با توجه به مشخصات توده زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت.

بخش ۳-۲ در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج حاصل از تغییرات مشخصات توده زیرسطحی (ابعاد، عمق، ضخامت و نظیر آن)، حساسیت آرایش الکترودی



شکل ۴. طیف مقاومت ویژه و اختلاف فاز ظاهری مشاهده‌ای برحسب بسامد برای مدل کل-کل (پلتون و همکاران، ۱۹۷۸). محدوده تغییرات پارامترها برای اکتشاف مواد معدنی اعمال شده است.



شکل ۵. نقشه درصد اثر بسامد توده رسانا با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰ اهم‌متر در محیطی با مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۰ اهم‌متر. (الف) توده رسانا به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ متر دارای برون‌زدگی است. (ب) همان توده رسانا دارای عمق سطح فوقانی ۱۰ متری است. مستطیل سفیدرنگ تصویر توده رسانا را نشان می‌دهد.

#### ۱-۴ تاثیر ابعاد توده رسانا بر قدرت تفکیک و شناسایی

به منظور بررسی تغییرات ابعاد توده رسانا ابتدا مختصری از چگونگی تغییرات مشخصات توده برای هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی شرح داده، و سپس به بررسی نتایج حاصل از آن پرداخته می شود.

در روش مقاومت ویژه الکتریکی به منظور بررسی تاثیر ابعاد توده رسانا بر قدرت تفکیک و شناسایی، مدل عرضه شده در بخش ۲-۲ در نظر گرفته شده است. در حالت اول یک توده رسانا به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم متر است. در حالت دوم با ثابت نگه داشتن همه شرایط، ابعاد توده رسانا به  $20 \times 20 \times 20$  متر افزایش داده شده است.

در روش قُطبش القایی به منظور بررسی تاثیر ابعاد توده رسانا بر قدرت تفکیک و شناسایی، مدل عرضه شده در بخش ۳-۲ در نظر گرفته شده است. در حالت اول یک توده رسانا با بارپذیری زیاد ( $m=0.7$ ) به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) ۴۰۰ اهم متر است. در حالت دوم با ثابت نگه داشتن همه شرایط، ابعاد توده رسانا به  $20 \times 20 \times 20$  متر افزایش داده شده است.

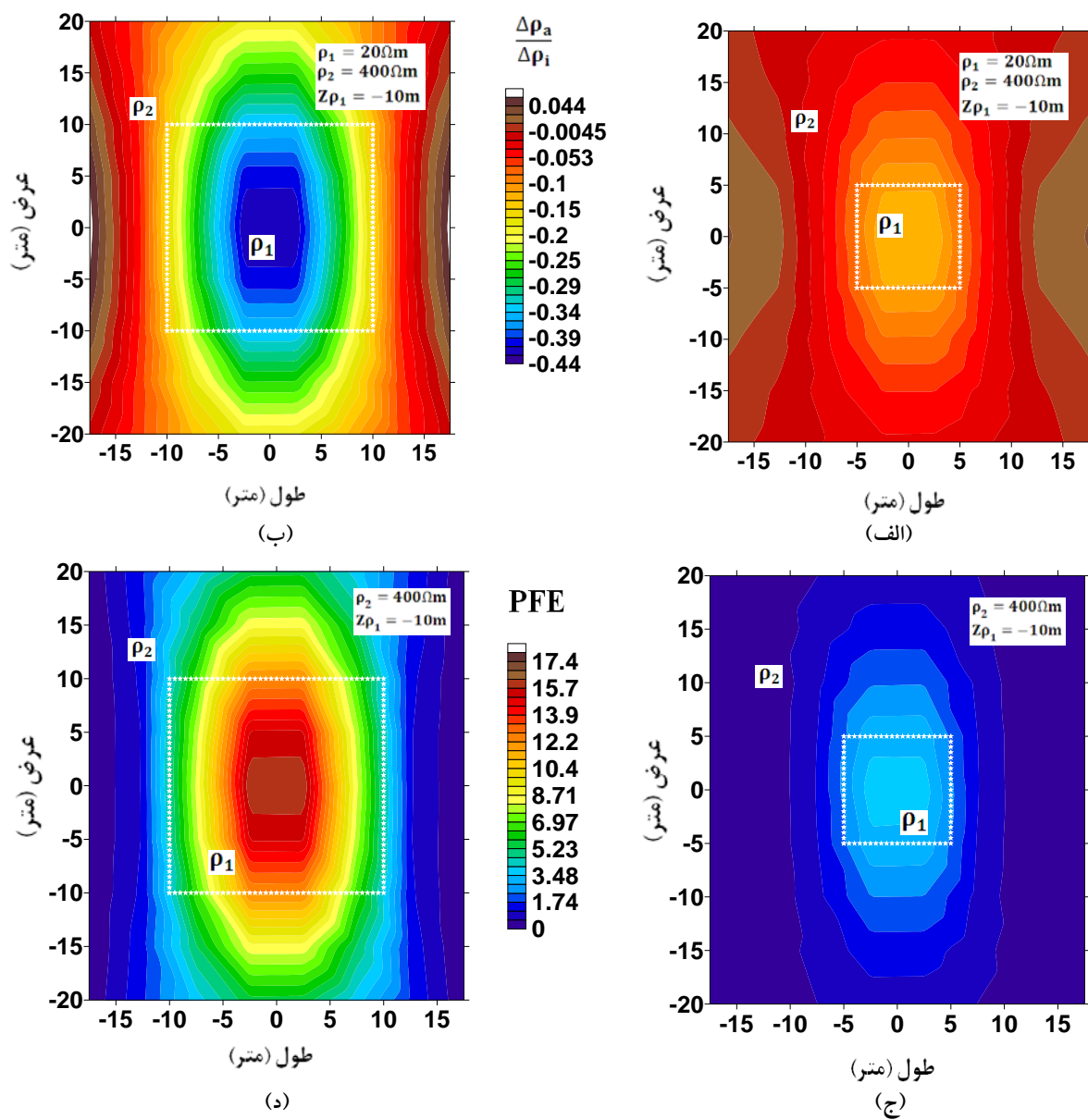
مطابق شکل ۶، به نظر می رسد که آرایش الکتروودی مستطیل در هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی در حوزه بسامد برای توده هایی با ابعاد کوچک حساسیت کمی دارد. نتایج قُطبش القایی در حوزه بسامد در آرایش الکتروودی مستطیل برای شناسایی توده هایی با ابعاد کوچک، حساسیت کمتری نسبت به نتایج مقاومت

ویژه الکتریکی دارد. به عبارتی روش مقاومت ویژه الکتریکی توده ای کوچک را بهتر از روش قُطبش القایی در حوزه بسامد شناسایی می کند.

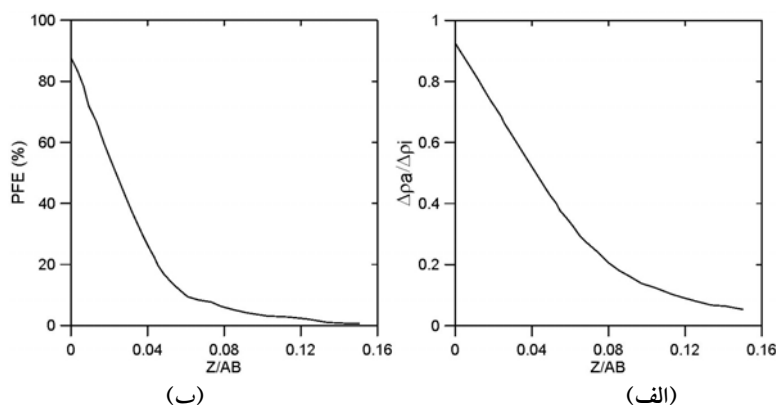
#### ۲-۴ تاثیر عمق فوقانی توده رسانا بر قدرت تفکیک و شناسایی

به منظور بررسی تاثیر عمق فوقانی، یک توده رسانا به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر در مرکز آرایش الکتروودی مستطیل در نظر گرفته شده است که در حالت اول توده دارای برون زدگی و در حالت دوم عمق فوقانی توده رسانا ۱۰ متری است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم متر است. همان طور که در شکل ۳ و ۵ به نظر می رسد با افزایش عمق فوقانی توده رسانا قدرت تفکیک و شناسایی به شدت کاهش می یابد.

همچنین، مطابق شکل ۷، به نظر می رسد که آرایش الکتروودی مستطیل در هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی در حوزه بسامد برای توده هایی که در عمق زیاد قرار گرفته اند حساسیت کمی دارد. با مقایسه منحنی تغییرات مقدار  $\rho_{\Delta a}/\rho_{\Delta i}$  نسبت به  $Z/AB$  (شکل ۷-الف) و منحنی تغییرات مقدار درصد اثر بسامد نسبت به  $Z/AB$  (شکل ۷-ب) چنین به نظر می رسد که قدرت تفکیک و شناسایی مقادیر درصد اثر بسامد در مقایسه با نتایج مقاومت ویژه ظاهری، اُفت شدیدتری نسبت به عمق دارد. بنابراین، روش مقاومت ویژه الکتریکی برای توده های عمیق نتایج بهتری را نسبت به روش قُطبش القایی در حوزه بسامد به دست می دهد.



شکل ۶. نقشه حساسیت الکتریکی توده رسانا در عمق ۱۰ متری (الف) به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر، (ب) به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر. نقشه درصد اثر بسامد توده رسانا در عمق ۱۰ متری، (ج) به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر و (د) به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر. مستطیل سفیدرنگ توده رسانا با ابعاد متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۷. (الف) نمودار حساسیت الکتریکی (تغییرات مقاومت ویژه ظاهری به تغییرات مقاومت ویژه در توده رسانای زیرسطحی نسبت به  $Z/AB$  در نقطه مرکز آرایش الکترودی مستطیل). (ب) تغییرات درصد اثر بسامد نسبت به  $Z/AB$  در نقطه مرکز آرایش الکترودی مستطیل.  $Z$  عمق بررسی و  $AB$  فاصله بین الکترودهای جریان است.

فاصله الکترودهای جریان ۲۰۰ متر و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در فواصل ۵ متری از یکدیگر روی ۱۳ نیم‌رخ موازی با امتداد الکترودهای جریان، صورت می‌گیرد. طول هر نیم‌رخ ۴۰ متر است. نیم‌رخ‌های ذکر شده ۵ متر از یکدیگر فاصله دارند و به‌طور متقارن نسبت به امتداد الکترودهای جریان واقع شده‌اند.

در حالت اول یک توده رسانا به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متر در مرکز آرایش مستطیل در نظر گرفته شده است. در حالت دوم با ثابت نگه داشتن همه شرایط، توده رسانا در گوشه‌ای از آرایش مستطیل در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم‌متر است.

مطابق شکل ۹، به‌نظر می‌رسد که روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش قُطبش القایی در آرایش الکترودی مستطیل با تغییر موقعیت توده رسانا نسبت به شبکه برداشت آرایش مستطیل، تغییر محسوسی در قدرت تفکیک و شناسایی توده رسانا ایجاد نمی‌کنند. به‌عبارتی روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش قُطبش القایی در حوزه بسامد تقریباً قدرت تفکیک و شناسایی یکسانی را در همه نقاط آرایش الکترودی مستطیل نشان می‌دهند. بنابراین، با

#### ۳-۴ تاثیر ضخامت توده رسانا بر قدرت تفکیک و

##### شناسایی

بدین‌منظور یک توده رسانا به ابعاد مسطحاتی  $10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متر در مرکز آرایش الکترودی مستطیل در نظر گرفته شده است. ضخامت توده رسانا در حالت اول ۲۰ متر و در حالت دوم به ۴۰ متر افزایش یافته است.

مطابق شکل ۸، به‌نظر می‌رسد که قدرت تفکیک و شناسایی توده رسانا در هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی در حوزه بسامد با افزایش ضخامت توده رسانا در جهت عمق، تقریباً ثابت است. بنابراین، روش مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی در حوزه بسامد در آرایش الکترودی مستطیل قادر به تشخیص ضخامت توده رسانا نیستند.

#### ۴-۴ تاثیر محل قرارگیری توده رسانا نسبت به شبکه

##### آرایش بر قدرت تفکیک و شناسایی

به‌منظور بررسی تاثیر محل قرارگیری توده رسانا نسبت به آرایش مستطیل بر قدرت تفکیک و شناسایی، مدل عرضه شده در بخش ۲-۲ (روش مقاومت ویژه الکتریکی) و بخش ۲-۳ (روش قُطبش القایی) در نظر گرفته شده است.

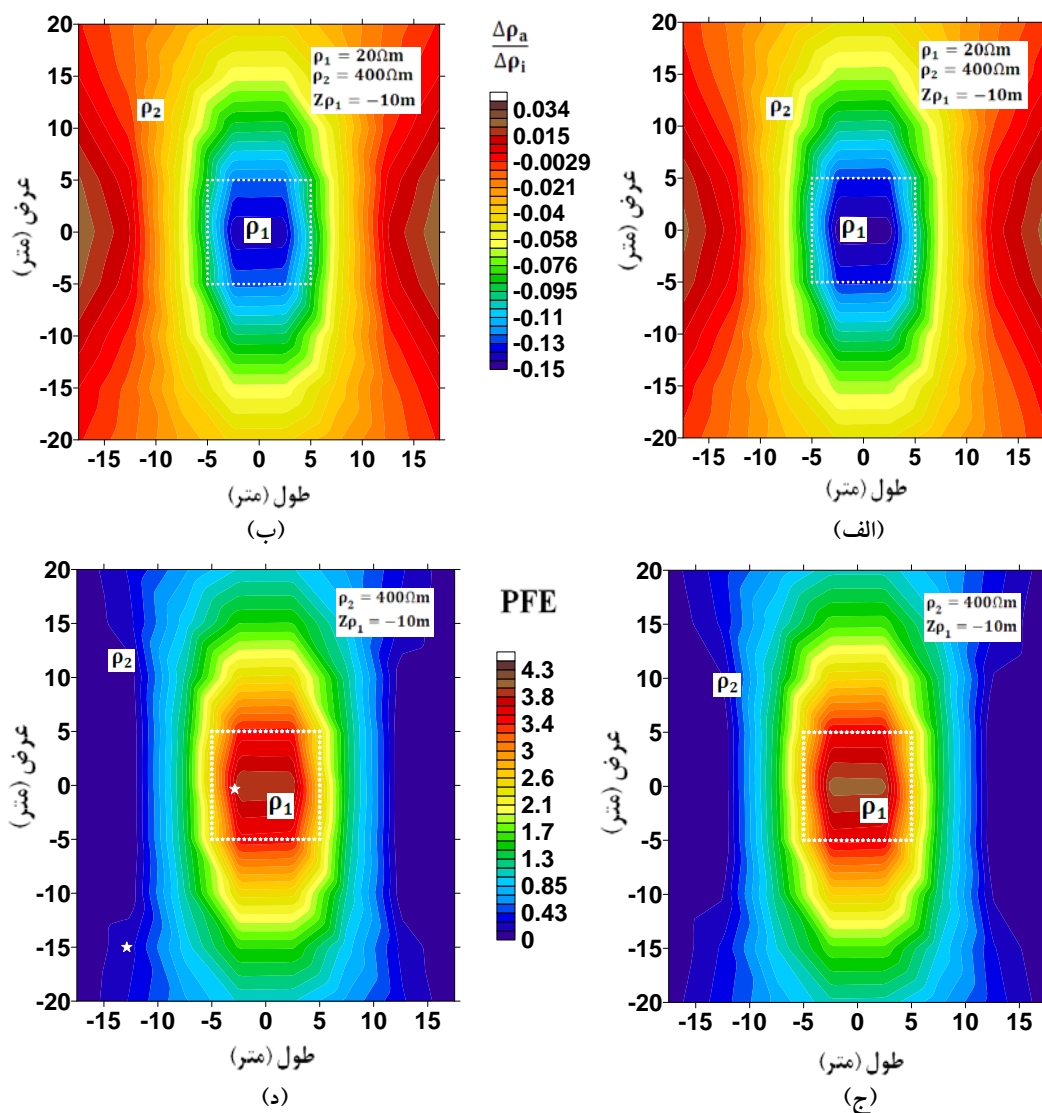
در حالت دوم توده رسانا به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  متر در عمق ۱۰ متری در راستای شرقی-غربی در نظر گرفته شده است.

تشخیص جهت‌داری توده رسانا با هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی کمتر امکان پذیر است. بنابراین، حساسیت آرایش الکترونی مستطیل نسبت به جهت قرارگیری توده رسانا بسیار کم است (شکل ۱۰).

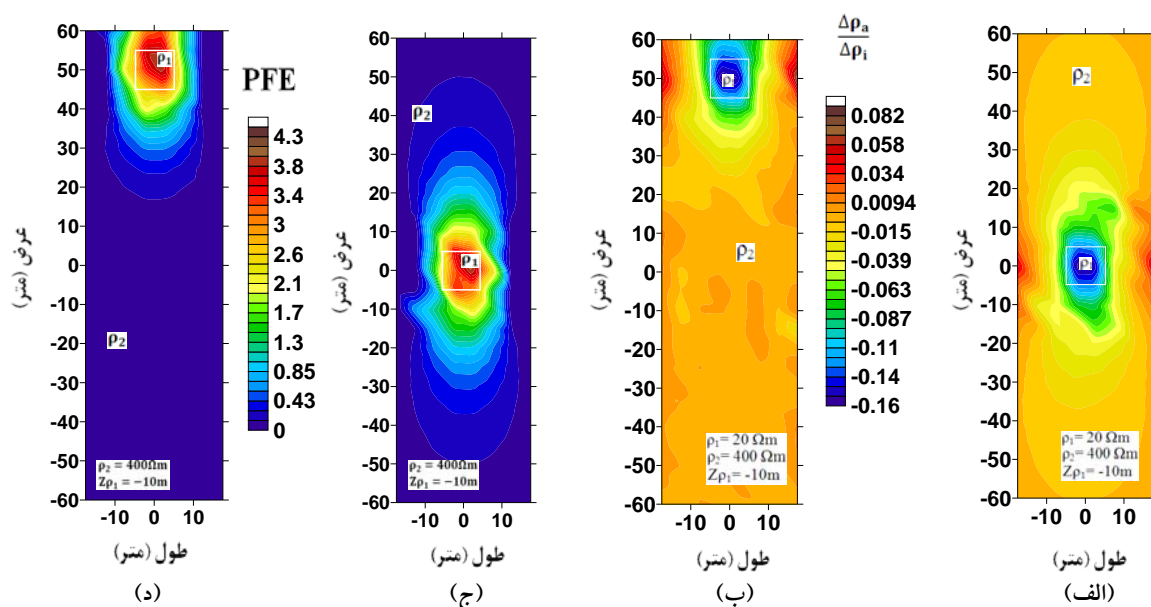
توجه به بررسی‌های صورت گرفته، می‌توان بیان کرد که ابعاد شبکه مستطیلی  $(\frac{AB}{3} \times \frac{AB}{2})$  مورد استفاده در برداشت‌های صحرائی، ابعاد مناسبی هستند.

۴-۵ تاثیر جهت قرارگیری توده رسانا نسبت به شبکه آرایش بر قدرت تفکیک و شناسایی

بدین منظور در حالت اول یک توده رسانا به ابعاد  $10 \times 20 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متری در راستای شمال-جنوب و



شکل ۸ نقشه حساسیت الکتریکی برای توده‌ای رسانا در عمق ۱۰ متر، (الف) به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  متر و (ب) به ابعاد  $10 \times 10 \times 40$  متر. نقشه درصد اثر بسامد (ج) به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  متر و (د) به ابعاد  $10 \times 10 \times 40$  متر. مستطیل سفیدرنگ تصویر توده رسانا را نشان می‌دهد.



شکل ۹. توده رسانا به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متری قرار گرفته است. نقشه حساسیت الکتریکی، (الف) توده رسانا واقع در مرکز آرایش مستطیل. (ب) توده رسانا واقع در گوشه‌ای در زیر نیم‌رخ‌های برداشت پتانسیل. نقشه درصد اثر بسامد، (ج) توده رسانا در مرکز آرایش مستطیل و (د) توده رسانا در گوشه‌ای در زیر نیم‌رخ‌های برداشت پتانسیل. مستطیل سفیدرنگ تصویر توده رسانا را نشان می‌دهد.

#### ۶-۴ بررسی قدرت تفکیک و شناسایی توده‌های

##### رسانای قائم و شیب‌دار

به منظور بررسی قدرت تفکیک و شناسایی توده‌های رسانای قائم و شیب‌دار، با در نظر گرفتن مدل‌های عرضه شده در بخش ۲-۲ و ۲-۳، در حالت اول یک توده رسانای قائم به ابعاد  $10 \times 10 \times 30$  متر در عمق ۵ متر در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم‌متر است. در حالت دوم با ثابت نگه داشتن همه شرایط، توده رسانای شیب‌داری به ابعاد مسطحاتی  $10 \times 10$  متر و با شیب ۴۵ درجه تا عمق ۳۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

مطابق شکل ۱۲، به نظر می‌رسد روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش قُطبش القایی در حوزه بسامد در آرایش الکترودی مستطیل، قادر به تعیین توده رسانای شیب‌دار و جهت شیب آن است.

#### ۷-۴ تاثیر اندازه فاصله الکترودهای پتانسیل (MN)

##### بر قدرت تفکیک و شناسایی

با توجه به مدل‌های عرضه شده در بخش ۲-۲ و ۲-۳، در حالت اول اختلاف پتانسیل در فواصل ۱۰ متر از یکدیگر روی ۵ نیم‌رخ موازی با امتداد الکترودهای جریان، پتانسیل اندازه‌گیری می‌کنند. طول هر نیم‌رخ ۴۰ متر است. نیم‌رخ‌های ذکر شده ۱۰ متر از یکدیگر فاصله دارند و به طور متقارن نسبت به امتداد الکترودهای جریان واقع شده‌اند.

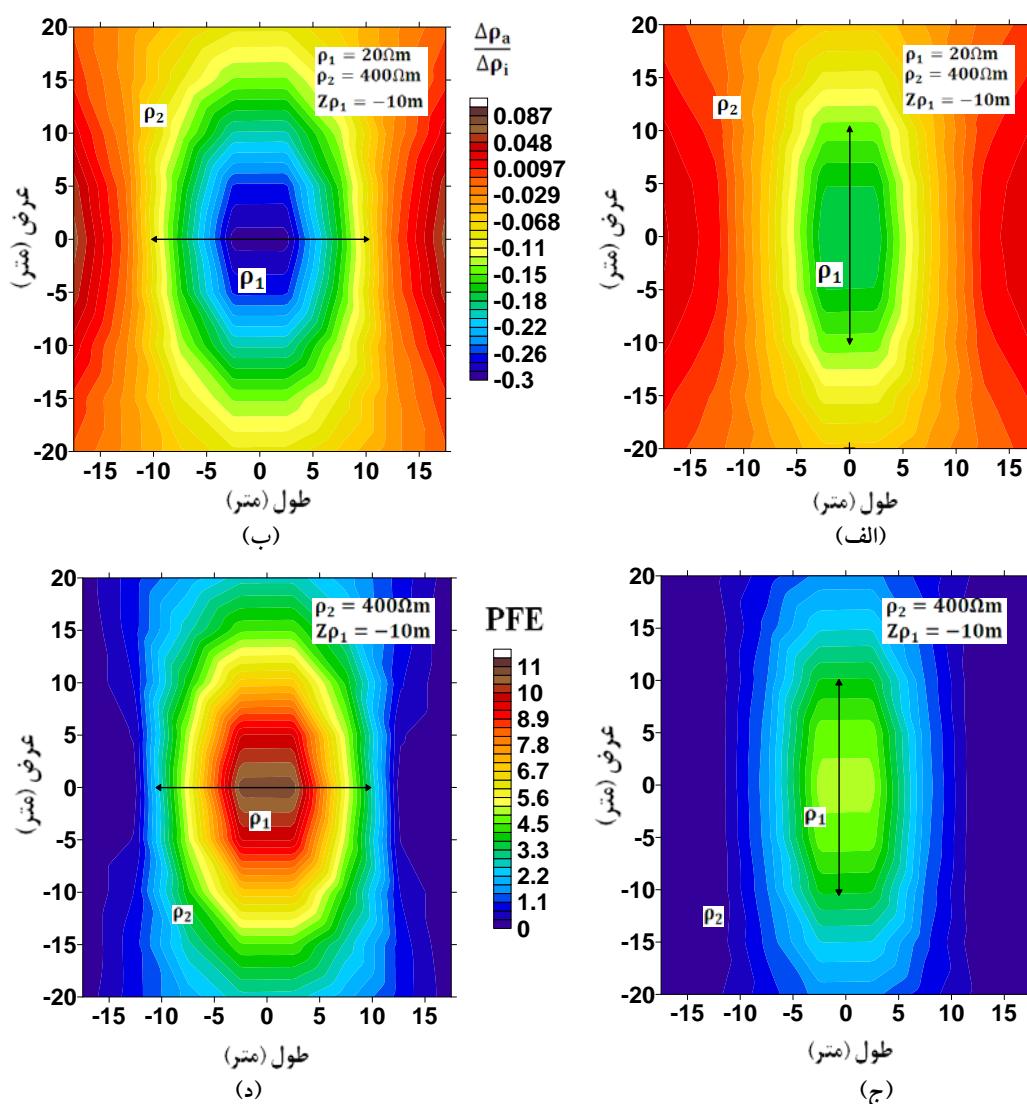
در حالت دوم الکترودهای پتانسیل به فاصله ۵ متر از یکدیگر روی ۹ نیم‌رخ موازی با امتداد الکترودهای جریان، پتانسیل اندازه‌گیری می‌کنند. طول هر نیم‌رخ ۴۰ متر است. نیم‌رخ‌های ذکر شده ۵ متر از یکدیگر فاصله دارند و به طور متقارن نسبت به امتداد الکترودهای جریان واقع شده‌اند.

یک توده رسانا به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر در عمق ۱۰

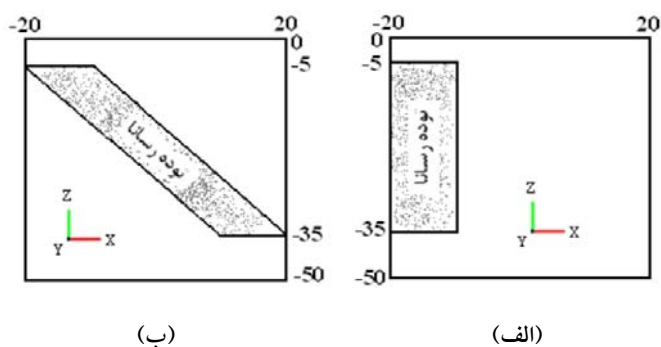


آرایش الکترودی مستطیل برای هر دو روش مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی در حوزه بسامد در صورتی در بهترین حالت از لحاظ قدرت تفکیک و شناسایی است که اندازه فاصله الکترودهای پتانسیل کمترین مقدار ممکن را با توجه به شرایط برداشت و دانسته‌های مربوط به توده زیرسطحی داشته باشد. در این صورت احتمال از دست دادن بی‌هنجاری‌های کوچک کاهش می‌یابد.

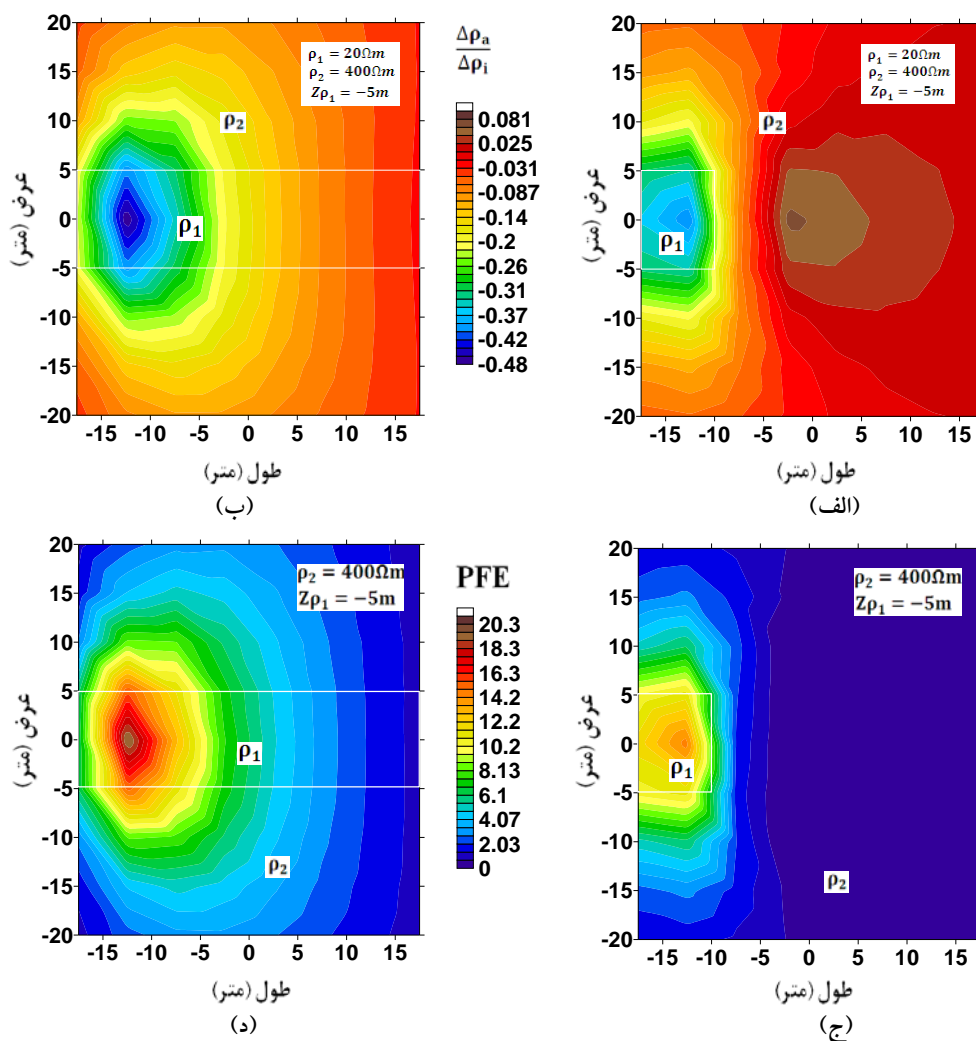
متر در مرکز آرایش الکترودی مستطیل در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم‌متر است. مطابق شکل ۱۳، به نظر می‌رسد که افزایش فاصله الکترودهای پتانسیل از ۵ متر به ۱۰ متر، تغییرات کمی را در مقدار مقاومت ویژه ظاهری و درصد اثر بسامد نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش فاصله الکترودهای پتانسیل، بی‌هنجاری‌های کوچک قابل شناسایی نیستند. بنابراین،



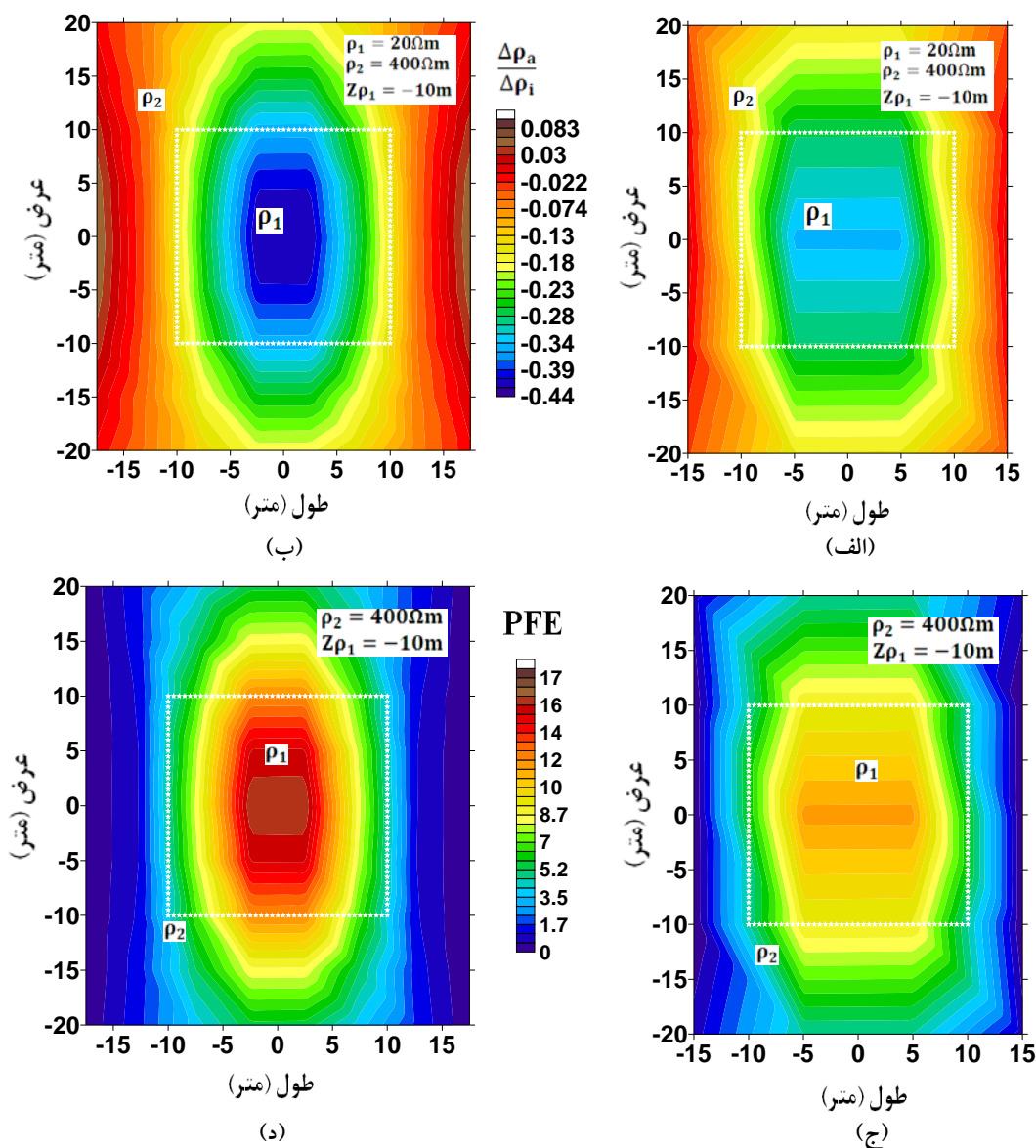
شکل ۱۰. نقشه‌های حساسیت الکتریکی و درصد اثر بسامد. (الف) و (ج) توده رسانا با ابعاد  $10 \times 20 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متری است، کشیدگی توده در راستای شمال-جنوب. (ب) و (د) توده رسانا با ابعاد  $20 \times 10 \times 10$  متر در عمق ۱۰ متری است، راستای کشیدگی توده شرقی-غربی است. پیکان روی نقشه، جهت کشیدگی توده رسانا را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. (الف) مقطع نشان‌دهنده موقعیت توده رسانای قائم به ابعاد  $10 \times 10 \times 30$  متر واقع در عمق ۵ متری. (ب) توده رسانای شیب‌دار با ابعاد مسطحاتی  $10 \times 10$  متر و با شیب ۴۵ درجه تا عمق ۳۵ متری. مقاومت ویژه الکتریکی محیط (بلوک بزرگ) و توده رسانا به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰ اهم‌متر است.



شکل ۱۲. (الف) و (ج) نقشه‌های حساسیت الکتریکی و درصد اثر بسامد توده رسانای قائم آورده شده در شکل (۱۱-الف). (ب) و (د) نقشه‌های حساسیت الکتریکی و درصد اثر بسامد توده رسانای شیب‌دار آورده شده در شکل (۱۱-ب). توده ایجادکننده بی‌هنجاری دارای پارامترهای  $\sigma = 0.0381 \text{ S}$  و  $\epsilon = 0.3 \text{ m}$ .  $\mu = 0.7$  است.



شکل ۱۳. توده رسانا با ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر واقع در عمق ۱۰ متری\_ نقشه حساسیت الکتریکی برای آرایش الکترونی مستطیلی با فاصله الکترودهای پتانسیل (الف) ۱۰ متری، (ب) ۵ متری و نقشه درصد اثر بسامد برای آرایش الکترونی مستطیلی با فاصله الکترودهای پتانسیل، (ج) ۱۰ متری و (د) ۵ متری.

## ۵ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی و قُطبش القایی در حوزه بسامد و معکوس‌سازی سه‌بُعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برای آرایش الکترونی مستطیل بدین صورت است:

۱. آرایش الکترونی مستطیل برای توده‌هایی با ابعاد کوچک و عمق زیاد حساسیت کمی دارد. بنابراین، با

توجه به حساسیت کم آرایش الکترونی مستطیل نسبت به تغییرات مشخصات توده زیرسطحی، این آرایش الکترونی زمانی می‌تواند توده را شناسایی کند که ابعاد بزرگ، عمق کم و رسانایی زیادی نسبت به محیط داشته باشد.

۲. آرایش الکترونی مستطیل قادر به تعیین ضخامت توده رسانا در جهت قائم نیست.

## منابع

- نوروزی، غ. و غلامی، س.، ۱۳۸۴، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP و RS) محل اندیس معدنی مس سوناچیل، نشریه دانشکده فنی، (۲) ۳۹، ۲۵۳-۲۶۵.
- Bakkali, S., and Amrani, M., 2005, Image processing optimization of 2D resistivity data for modelling anomalous zones of phosphate: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, **8**(16), 68-75.
- Cole, K. S., and Cole, R. H., 1941, Dispersion and adsorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics: *J. Chem. Phys.*, **9**, 341-351.
- COMSOLAB, 2004, FEMLAB Reference Manual, version 3.5: COMSOLAB.
- De Lima, O. A. L., and Sharma, M. M., 1992, A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands: *Geophysics*, **57**(3), 431-440.
- Ha, T., Pyun, S., and Shin, C., 2006, Efficient electric resistivity inversion using adjoint state of mixed finite-element method for Poisson equation: *Journal of Computational Physics*, **214**, 171-186.
- Jackson, J. D., 1998, *Classical Electrodynamics* (3rd ed.): Wiley. ISBN 0-471-30932-X.
- Lesmes, D. P., and Morgan, F. D., 2001, Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks: *Journal of Geophysical Research*, **106**, 13392-13346.
- Marescot, L., Lopes, S. P., Rigobert, S., and Green, A. G., 2008, Nonlinear inversion of geoelectric data acquired across 3D objects using a finite-element approach: *Geophysics*, **73**, F121-F133.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., and Nelson, P. H., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: *Geophysics*, **43**, 588-609.
- Sasaki, Y., 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method: *Geophysics*, **59**(11), 1839-1848.
- Vanhala, H., 1997, Laboratory and field studies of environmental and exploration applications of the spectral induced polarization (SIP) method: PhD. Dissertation, Helsinki University of Technology (ESPOO, Finland).
- Vacquier, V., Holmes, C. R., Kltzmgger, P., and Lavergne, M., 1957, Prospecting for groundwater by induced electrical polarization: *Geophysics*, **22**, 660-687.
۳. تغییر موقعیت توده رسانا نسبت به شبکه برداشت آرایش مستطیل، تغییر محسوسی در قدرت تفکیک و شناسایی توده رسانا ایجاد نمی‌کند. به عبارتی قدرت تفکیک و شناسایی در همه نقاط آرایش الکتروودی مستطیل تقریباً یکسان است.
۴. آرایش الکتروودی مستطیل قادر است توده رسانا شیب‌دار را تشخیص دهد و جهت شیب آن را تعیین کند.
۵. آرایش الکتروودی مستطیل قادر به تشخیص جهت قرارگیری توده رسانا نیست، مگر آنکه ابعاد توده رسانا بسیار بزرگ باشد و یا توده رسانا در عمق کمی از زمین قرار گرفته باشد.
۶. در آرایش الکتروودی مستطیل اندازه فاصله الکتروودهای پتانسیل باید کمترین مقدار ممکن را با توجه به شرایط برداشت و دانسته‌های مربوط به توده زیرسطحی داشته باشد. در این صورت آرایش الکتروودی مستطیل در بهترین حالت، از لحاظ قدرت تفکیک و شناسایی است و همچنین، احتمال از دست دادن بی‌هنجاری‌های کوچک کاهش می‌یابد.
۷. به‌طور کلی، روش مقاومت ویژه الکتریکی نتایج بهتری نسبت به قُطبش‌القایی در حوزه بسامد به‌دست می‌دهد.
۸. در مقایسه با آرایش‌های الکتروودی دیگر مانند دوقطبی-دوقطبی، آرایش الکتروودی مستطیل به تنهایی نمی‌تواند اطلاعات مناسبی از توده های زیرسطحی به‌دست دهد.
- با استفاده از مدل‌سازی مستقیم مقاومت ویژه و قُطبش‌القایی، صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان مدل‌سازی معکوس را طراحی کرد. در این صورت تفسیر کمی داده‌های مقاومت ویژه و قُطبش‌القایی با آرایه مستطیلی امکان‌پذیر می‌شود. همچنین، در ادامه پژوهش حاضر، می‌توان با استفاده از معادلات فوریه، به مدل‌سازی قُطبش‌القایی در حوزه زمان پرداخت.