

بررسی اندیس معدنی درح با استفاده از مدل سازی وارون داده های ژئوفیزیکی (IP، Rs و M)

فرشاد ژولیده سر^۱، غلامرضا نوروزی^{۱*} و مسلم جهان تیغ^۱

^۱ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲)

چکیده

وارون سازی داده های ژئوفیزیکی نقش مهمی در بررسی های زمین شناسی ایفا می کند. در محدوده معدنی درح داده های ژئوفیزیکی تصحیح شده مغناطیسی، مقاومت ویژه و قطبیدگی القایی، برای به دست آوردن شکل و دیگر پارامترهای توده های زیر سطحی مدل شده اند. بدین منظور داده های مغناطیسی ابتدا فیلتر و سپس به روش وارون سازی فشرده داده های مغناطیسی مدل سازی شدند. این روش وارون سازی، بر اساس اصول ابتدایی کمینه سازی سطح مقطع عبوری از منبع، در هر نیمرخ، توصیف شده است. کد این الگوریتم در نرم افزار متلب (Matlab) نوشته و بر روی داده های مغناطیس زمینی برداشت شده از محدوده مورد بررسی به کار برده شد که نتایج قابل قبولی به دست داد.

به منظور بررسی های بیشتر روی این محدوده پردازش های آماری روی داده های مقاومت ویژه ظاهری و قطبیدگی القایی صورت گرفت و چون پردازش های آماری به توزیع داده ها حساس اند، داده ها نرمال شدند. سپس ضریب همبستگی برای شناسایی میزان پراکندگی داده ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از پردازش های آماری، داده های مقاومت ویژه ظاهری و قطبیدگی القایی با نرم افزار RES2DINV مدل سازی شد. این نرم افزار یک برنامه رایانه ای است که به طور خودکار داده های مقاومت ویژه ظاهری و قطبیدگی القایی را مدل سازی دوبعدی می کند. در این نرم افزار یک مدل سازی پیشرو برای محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و روش بهینه سازی کمترین مربعات غیرخطی در فرایند وارون سازی به کار رفته است و برنامه، از هر دو روش مدل سازی پیشروی عنصر متناهی و تفاضل متناهی پشتیبانی می کند.

محدوده مورد بررسی در زون فیلیشی جنوب شرق شهر درح در استان خراسان جنوبی واقع است. نتایج بررسی های مغناطیسی، ۳ توده متراکم را نشان می دهد که گسترش عمقی آنها ۸۰-۱۰۰ متر است و شکل هندسی دایک مانند دارند. نتایج بررسی داده های مقاومت ویژه ظاهری و قطبیدگی القایی نشان دهنده بی هنجاری هایی در نزدیکی سطح است. تحلیل های آماری، توده غنی و متراکمی را، ناشی از همبستگی منفی، در زیر نیمرخ های برداشت، نشان می دهند. نتایج به دست آمده از بررسی های مغناطیسی و الکتریکی هم دیگر را تایید می کنند. در انتها به منظور بررسی های تفصیلی این محدوده، نقاطی برای حفاری پیشنهاد شده است.

واژه های کلیدی: اندیس معدنی درح، مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه، قطبیدگی القایی

Prospecting the Doroh mining Index using inverse modeling of geophysical data (M, Rs, IP)

Farshad Joulidehsar¹, Gholamreza Nowrouzi^{1*} and Moslem Jahantigh¹

¹Mine Eng. Dep., University of Birjan, Iran

(Received: 13 December 2011, accepted: 12 March 2013)

Summary

Geophysical data inversion has a prominent role in geo-structural investigations. In this study, the corrected geophysical data of Doroh mining area were modeled to obtain the underground body's shape and other parameters such as susceptibility. At first, magnetic data were filtered and then modeled by the magnetic compact inversion method (Last & Kubik) and properties including depth, susceptibility and the deposit shape were provided. This inversion can be described according to basic principles to minimize the cross-sectional area of the sources. The under-surface area was divided into horizontal prisms with an extreme length and fixed magnetic susceptibility. The simulation was performed using synthetic magnetic anomalies generated by compact bodies embedded in an inducing magnetic field. It was shown that this modeling was capable of solving underdetermined problems with good accuracy in the presence of moderate noise data. At first, a MATLAB code was employed to implement the algorithm. The output results from the synthetic model demonstrated the accuracy of the code. The code was then applied to real magnetic data. The results showed acceptable accuracy.

A statistical analysis was also carried out on the IP&Rs normalized data. Normalization was done because the statistical analysis was tender to data dispersion. Therefore, the outlier data was identified by a box plot of SPSS software and replaced using the Q method. Then the correlation coefficient was used to determine the dispersion extent. The statistical analysis showed a compact and rich body under the surveyed profiles. Then for providing more information on this area, apparent resistivity and induced polarization data were modeled by the RES2DINV software. RES2DINV is a computer program that automatically creates a two-dimensional resistivity model for the electrical data of the subsurface. In this software, the under-surface area is divided into horizontal prisms with an extreme length. In some situations, particularly where there are large resistivity variations near the ground surface, better results can be obtained by using narrower model cells. In almost all cases, this gives the optimum results. A forward modeling subroutine was used to calculate the apparent resistivity values, and a non-linear least-square optimization technique was used for the routine inversion. The program supports both finite-difference and finite-element forward modeling techniques.

The studied area is located in Flysch zone in the Southeast of Doroh City in Sarbishe in the South Khorasan Province. Lithology of this area includes shale, sandstone and thin layer limestone, here and there. In this area, magnetic surveys were done via 40 profiles with a north eastern-south western strike and 1200 survey points. Apparent resistivity and induced polarization surveys were done in five profiles with a dipole-dipole array and 700 survey points. The magnetic consideration results showed three compact bodies under the surveyed profiles which were named A, B and C. The depths of these bodies were 80 – 100 meters. The results of IP & Rs modeling showed that these anomalies were located near the surface and are dyke-shaped. The results of magnetic compact inversion methods and modeling are in agreement with IP & Rs inversion results. For an exact review of this body, a few point were eventually proposed for drilling.

Keywords: Doroh mining index, Compact inversion, Magnetometry, Resistivity, Induced polarization

۱ مقدمه

تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی شامل مشخص کردن موقعیت مکانی، شکل و خصوصیات منبع زیرسطحی است. بعضی از دست‌یافته‌ها و روش‌های موجود برای تفسیر کمی، شامل روندهای وارون‌سازی‌اند که توزیع پارامترهای توده بی‌هنجار در زیر زمین را با یک تحلیل خودکار یا نیمه‌خودکار به بهترین وجهی نمایش می‌دهد (استوک و همکاران، ۲۰۰۹). داده‌های پتانسیل (گرانی و مغناطیس)، معمولاً با استفاده از تبدیل‌های خطی، روش‌های طیفی، روش‌های معکوس (مدل‌سازی) و سیگنال‌تحلیلی پردازش می‌شوند (عابدی و همکاران، ۱۳۸۸). از آنجا که الگوریتم‌های مدل‌سازی دوئعدی به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ژئوفیزیک‌دان‌ها به دلیل سادگی، برای مقاصد گوناگونی از آنها استفاده می‌کنند (نمکی و همکاران، ۱۳۸۹). از جمله این الگوریتم‌ها، الگوریتم وارون فشرده داده‌های مغناطیسی است که در این روش سطح زیر نیم‌رخ برداشت (به‌منظور ساده‌سازی شکل توده مورد بررسی) به منشورهای افقی با گسترش بی‌نهایت تقسیم‌بندی می‌شود، به‌طوری‌که پارامترهای مغناطیسی در هر منشور ثابت ولی با منشور مجاور ممکن است متفاوت باشد. اصل این روش بر مبنای کمینه‌سازی سطح توده منبع یا همان بیشینه کردن فشرده‌گی آن، استوار است. (لاست و کویک، ۱۹۸۳). در بررسی‌های ژئوفیزیکی به‌منظور افزایش دقت و به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، از ترکیب چند روش استفاده می‌شود. بدین‌منظور، برداشت‌های مقاومت‌سنجی و قطبیدگی القایی و نیز مدل‌سازی روی آنها صورت گرفته است. برای تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و قطبیدگی القایی، دو نوع بررسی به‌کار رفته است (۱) تفسیر آماری (۲) مدل‌سازی. بدین‌صورت که قبل از رسم نقشه‌های بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری، بهتر است از راه محاسبه پارامترهای آماری داده‌ها، علاوه بر بررسی صحت

و دقت داده‌ها به پیش‌بینی وجود یا نبود مناطق امیدبخش پرداخت (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴) و سپس به‌منظور بررسی انطباق مدل‌های حاصل از وارون‌سازی مغناطیسی و مقاومت ویژه، اقدام به وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و قطبیدگی القایی کرد. این کار با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv که از روش وارون‌سازی هموار استفاده می‌کند (الدنبرگ و همکاران، ۱۹۹۴) صورت می‌گیرد. در این روش ابتدا زمین به تعدادی بلوک مستطیل‌شکل با مقاومت ویژه ثابت برای هر بلوک تقسیم می‌شود. از آنجا که تاثیر بر روند وارون‌سازی بلوک‌های عمیق نسبت به بلوک‌های سطحی کمتر است، ضخامت بلوک‌های نزدیک به سطح کمتر از بلوک‌های عمیق در نظر گرفته می‌شود (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴). در نهایت مقایسه و تطبیق نتایج حاصل از این بررسی‌ها باعث افزایش دقت تفسیر تحقیقات ژئوفیزیکی صورت گرفته در محدوده می‌شود.

محدوده مورد بررسی، از لحاظ توان معدنی، از مناطق بالقوه استان خراسان جنوبی است و به‌همین دلیل قسمت‌هایی از آن در قالب طرح‌های عمرانی سازمان صنایع و معادن استان خراسان جنوبی، مورد اکتشاف مقدماتی و نیمه تفضیلی قرار گرفته است. اطلاعات زمین‌شناسی و بررسی‌های صحرایی مقدماتی، نوع کانسار را اسکارنی تعیین کرده‌اند. به‌علت وجود پوشش آبرفتی محدوده و همچنین نوع کانسار، اجرای عملیات صحرایی ژئوفیزیکی با روش‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و قطبیدگی القایی، توجیه شده است. این داده‌ها با روش‌های وارون‌سازی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و نتایج قابل‌توجهی، از جمله عمق و هندسه کانسار را به‌دست داده‌اند که در این مقاله به آنها اشاره خواهد شد.

۲ روش تحقیق

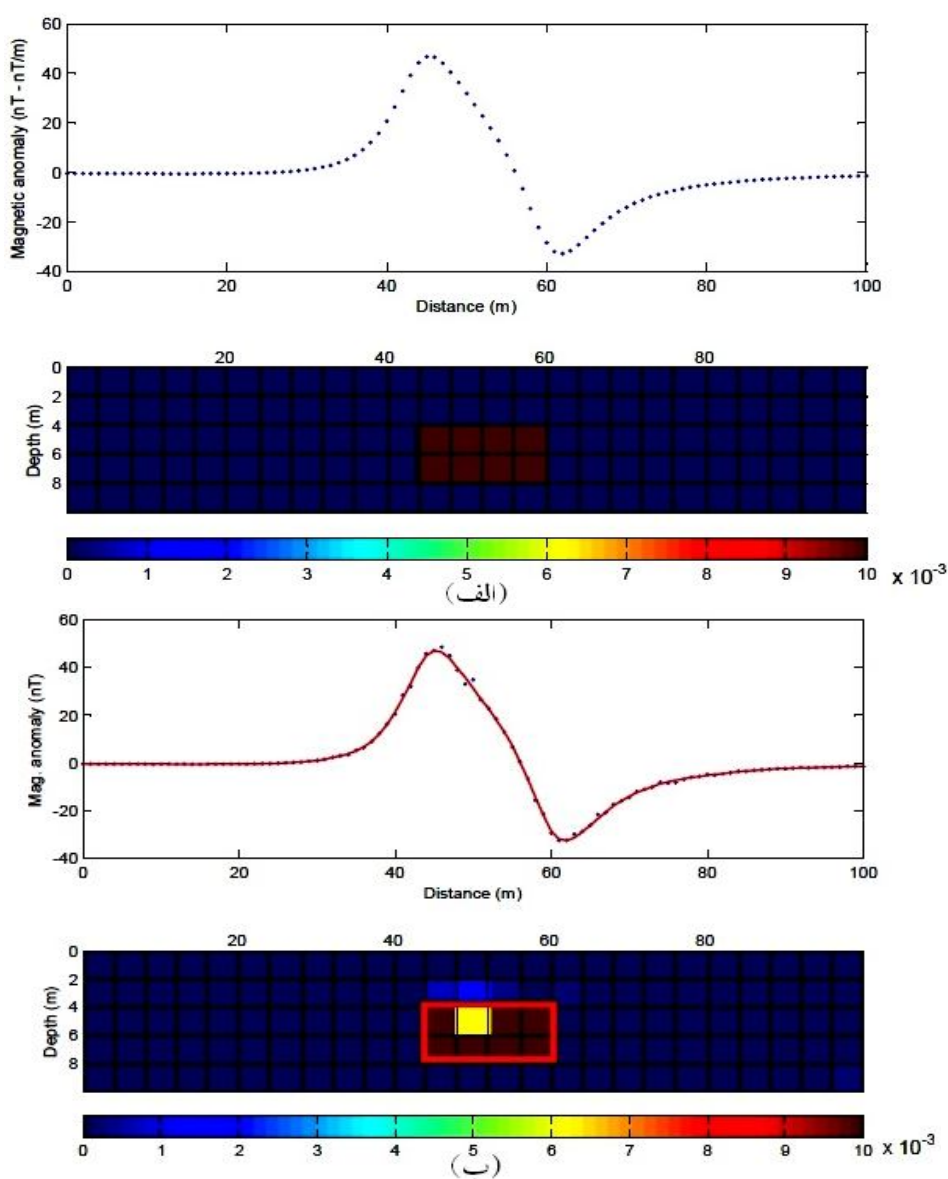
در این قسمت ابتدا روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی ژئوفیزیکی آورده شده و سپس به بررسی نتایج حاصل از آنها روی داده‌ها پرداخته شده است.

۱-۲ روش‌ها

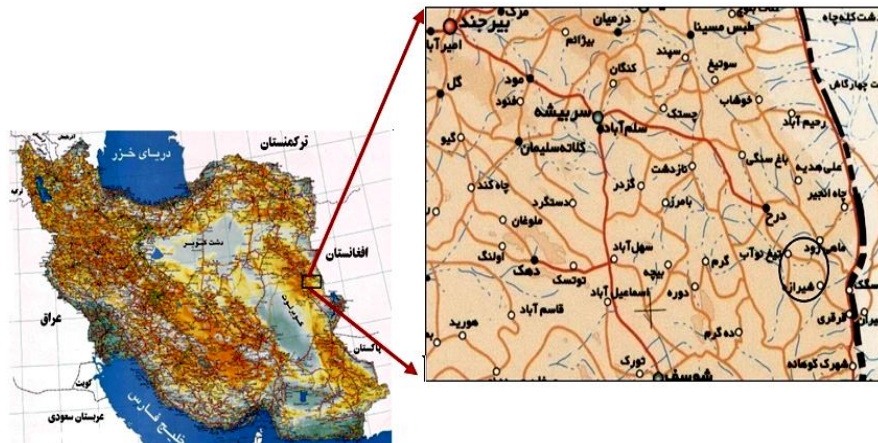
۱-۱-۲ مغناطیس‌سنجی

ترسیم ناهمگنی‌های زمین به‌نحو افزایشده‌ای با استفاده از

روش‌های گوناگون وارون صورت می‌گیرد. روش‌های وارون به‌دلیل آنکه جواب‌های کمی به‌دست می‌دهند، کارآمدتر از شیوه‌آزمون و خطا در مسئله پیشرو هستند و به این روش‌ها ترجیح داده می‌شوند (استوک و همکاران، ۲۰۰۹). در این مقاله ناهمگنی‌های زیرسطحی مغناطیسی با استفاده از روش مدل‌سازی وارون فشرده مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی مصنوعی میدان کل، (ب) نتیجه اعمال الگوریتم روی داده‌های مصنوعی.



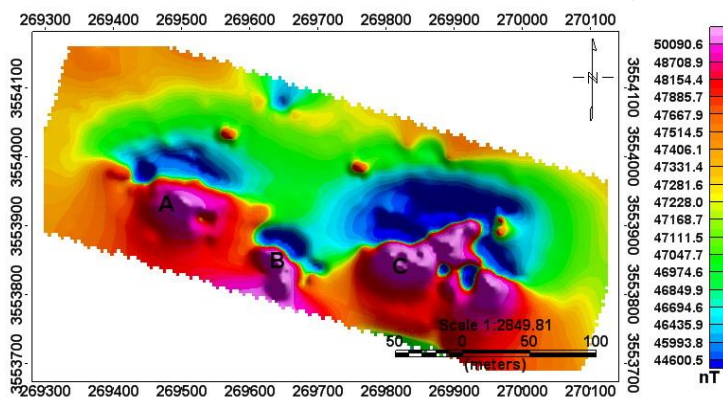
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد بررسی.

اندازه گیری، مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش ها با بهره گیری از روندهای بهینه سازی، برآوردی از توزیع خودپذیری مغناطیسی و شکل توده های مغناطیسی مدفون به دست می آید (نمکی و همکاران، ۱۳۸۹). یک توده مغناطیسی زمانی را می توان به صورت دو بُعدی بیان کرد که کشیدگی آن در راستای عمود بر نیم رخ، حداقل ۱۰ برابر عرض آن باشد (تلفورد، ۱۹۹۰).

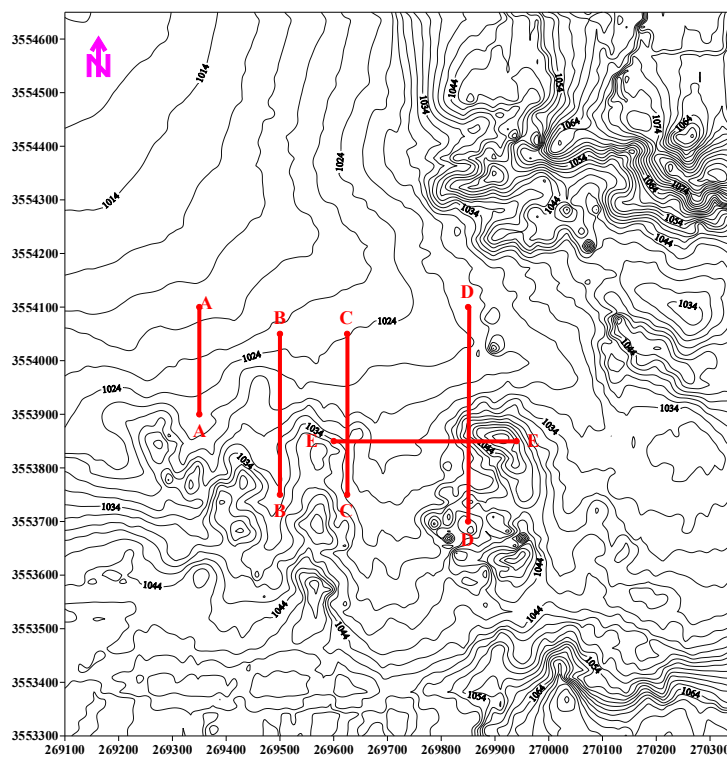
به منظور کاهش جواب های مسئله فرومغین که در مسائل وارون با آنها سروکار داریم و همچنین اثر هریک از منشورها که در بالا به آنها اشاره شد، از ماتریس وزنی خودپذیری مغناطیسی و ماتریس وزن دار خطاها استفاده شده است. این ماتریس ها به صورت روابط (۱) و (۲) بیان می شوند (ژولیده سر و همکاران، ۱۳۹۰a).

۲-۱-۱-۱ مدل سازی وارون فشرده داده های مغناطیسی

در این روش زمین زیر نیم رخ برداشت به منشورهای افقی با مقطع مربعی و گسترش بی نهایت تقسیم می شود که هریک از آنها دارای خودپذیری مغناطیسی ثابت اند ولی امکان اختلاف بین خودپذیری مغناطیسی منشورها وجود دارد. تفسیر داده های مغناطیسی معمولاً به صورت محاسبه مستقیم و حل وارون صورت می گیرد. مدل مستقیم اجازه می دهد که به طور نظری تاثیرات ناشی از توده های منبع مغناطیسی محاسبه شود و یک ارزیابی حدسی از شکل و سایر مشخصات توده در اختیار قرار گیرد. این نوع حل ها بیشتر برای توده هایی به کار می رود که دارای شکل هندسی ساده و منظم باشند. در روش های وارون سازی، داده های مشاهده شده حاصل از نیم رخ ها و شبکه بندی های



شکل ۳. بی هنجاری مغناطیسی کل.



شکل ۴. موقعیت نیم‌رخ‌های برداشت شده با آرایش دو-دوقطبی روی نقشه توپوگرافی محدودده.

که برای C_0 داریم:

$$C_0^{(k-1)} = \frac{\sum_i [e_i^{(k-1)}]^2 / [D_{ii}^{(k-2)} \{ [e_i^{(k-1)}]^2 + \eta \}]}{\sum_i [e_i^{(k-1)}] / D_{ii}^{(k-2)}}, \quad (5)$$

رابطه (۴) بر مبنای کمینه‌سازی (کمترین مربعات) خطاها بنا شده و رابطه (۵) زمانی به کار می‌رود که تعداد کمی از نقاط برداشت مدنظر باشد (اکهارت، ۱۹۸۰).

در تکرار اول معمول این است که:

$$[W_e^{(k-1)}]_{ii}^{-1} = l_0^2 D_{ii}^{(k-1)}, \quad (6)$$

در نظر گرفته شود. ماتریس وزنی W_e^{-1} با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در تکرار بعدی W_v با استفاده از رابطه (۲) و در نظر گرفتن نتایج تکرار اول محاسبه و مجدداً رابطه (۳) به کار برده می‌شود. با ادامه همین روند، فشردگی افزایش می‌یابد، تا آنجا که کمینه فضای مورد نظر به دست آید. فرایند، زمانی همگرا می‌شود که در تکرار بعدی، تغییر محسوسی در خودپذیری

$$[W_v^{(k-1)}]_{ii}^{-1} = [V_i^{(k-1)}]^2 + \varepsilon, \quad (1)$$

$$W_e^{-1} = \left(\frac{N}{S}\right) \text{diag}(GW_v^{-1}G^T), \quad (2)$$

که W_v ماتریس وزنی هدف، W_e ماتریس وزنی خطاها، V_i هدف مورد بررسی، ε میزان خطا در هر تکرار، G ماتریس کرنل، و N/S نسبت نوفه به سیگنال است. در روابط (۱) و (۲) می‌توان ملاحظه کرد که ماتریس‌های W_v^{-1} و W_e^{-1} ماتریس‌های ثابت وزنی نیستند. در الگوریتم وارون‌سازی در تکرار k م برای به دست آوردن بردار مغناطیسی می‌توان نوشت:

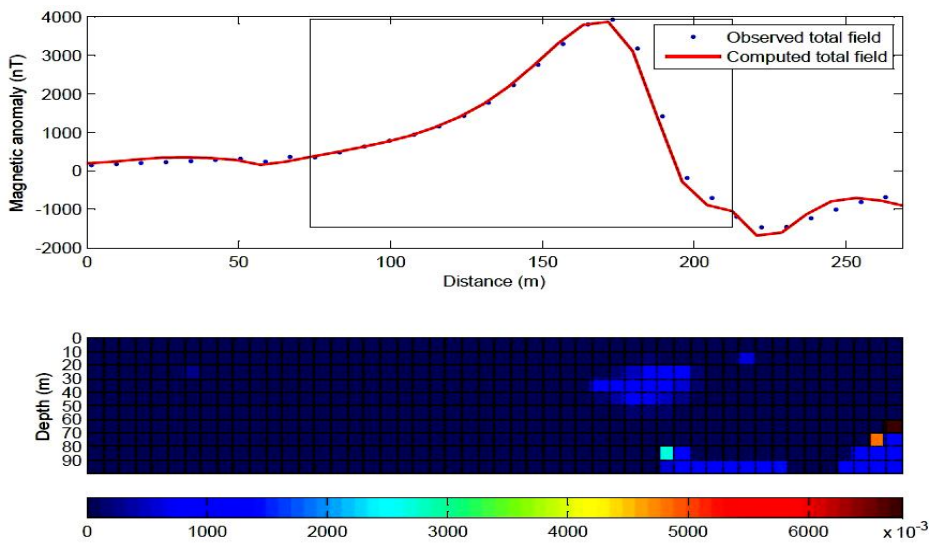
$$V^{(k)} = [W_v^{(k-1)}]^{-1} A^T \{ A [W_v^{(k-1)}]^{-1} A^T + [W_e^{(k-1)}]^{-1} \}^{-1} G, \quad (3)$$

در هر تکرار ماتریس‌های W_e و W_v با توجه به نتیجه تکرار قبلی، با رابطه‌های زیر داده می‌شوند:

$$[W_e^{(k-1)}]_{ii}^{-1} = l_0^2 D_{ii}^{(k-1)},$$

or

$$[W_e^{(k-1)}]_{ii}^{-1} = l_0^2 D_{ii}^{(k-1)} C_0^{(k-1)} \{ [e_i^{(k-1)}]^2 + \eta \}, \quad (4)$$



شکل ۵. اعمال مدل‌سازی روی نیم‌رخ B-B.

همگرایی نسبی صورت می‌گیرد (استوک و همکاران، ۲۰۰۹).

به منظور بررسی کارایی کد نوشته شده و حصول اطمینان از دقت آن، ابتدا الگوریتم مدل‌سازی روی داده‌های مصنوعی اعمال شده است. خصوصیات داده‌های مصنوعی عبارت است از:

تعداد داده‌ها: ۱۰۱

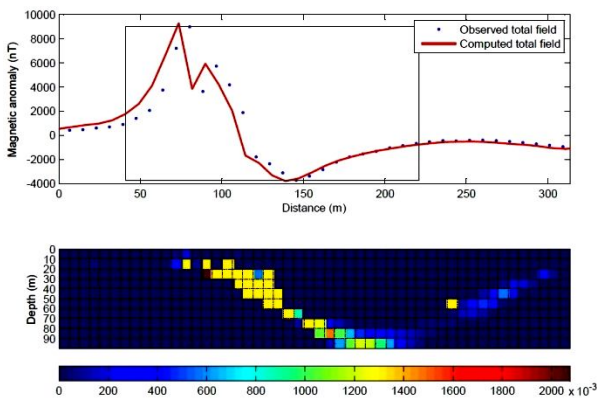
طول نیم‌رخ: ۱۰۰ متر

میدان مغناطیسی کل: ۴۶۰۰۰ نانوتسلا

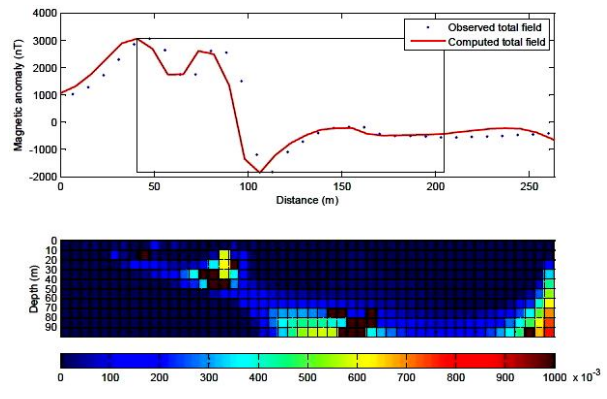
میل مغناطیسی: ۶۰ درجه

مغناطیسی به وجود نیاید. در اکثر موارد روش عرضه شده بعد از حدود ۱۰ تکرار به همگرایی نسبی خواهد رسید. ثابت‌های η و ϵ باید کمترین مقدار ممکن را در حد پایین‌ترین دقت دستگاه داشته باشند. معمولاً مقادیر η و ϵ را از مرتبه 10^{-11} انتخاب می‌کنند (لاست و کویک، ۱۹۸۳).

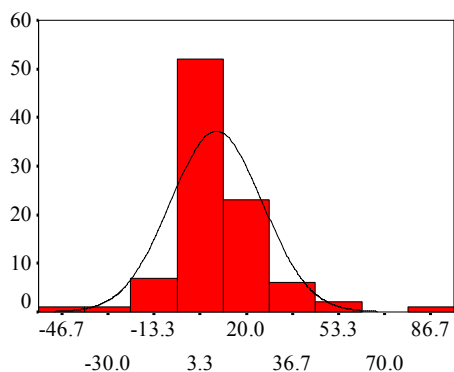
زمانی که نوفه داده‌ها دارای توزیع نرمال باشد، از رابطه (۴) برای محاسبه ماتریس وزنی خطاها استفاده می‌شود و در صورتی که توزیع نوفه نرمال نباشد برای محاسبه ماتریس وزنی خطاها از رابطه (۵) استفاده می‌شود. این عمل بعد از ۴ یا ۵ تکرار اولیه و رسیدن مدل به



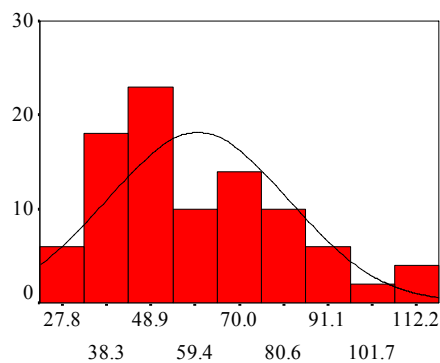
شکل ۷. اعمال مدل‌سازی روی نیم‌رخ D-D.



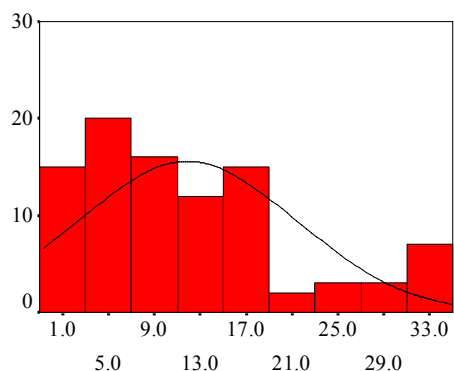
شکل ۶. اعمال مدل‌سازی روی نیم‌رخ C-C.



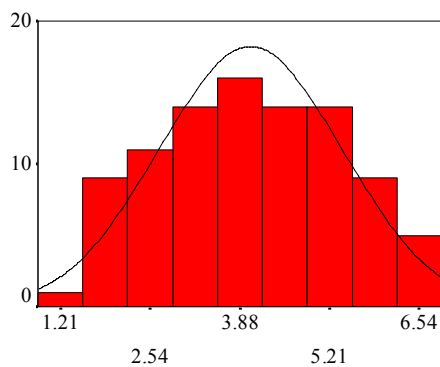
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸. نمودار بافت‌نما نیم‌رخ A-A (الف) مقاومت ویژه قبل از نرمال‌سازی (ب) بارپذیری قبل از نرمال‌سازی (ج) مقاومت ویژه بعد از نرمال‌سازی (د) بارپذیری بعد از نرمال‌سازی.

داده‌های مصنوعی (شکل ۱-الف) نشان‌دهنده کارایی و دقت زیاد این روش است.

۲-۱-۲ روش‌های ژئوالکتریک

روش‌های ژئوالکتریک از فنون متنوع و گوناگونی تشکیل شده‌اند که در آنها از میدان‌های موجود طبیعی زمین و همچنین از تزریق میدان‌های مصنوعی استفاده می‌شود. روش‌های ژئوالکتریک کاربرد زیادی در اکتشافات معدنی و به‌خصوص کانسارهای فلزی دارند (ژولیده‌سر و همکاران، ۱۳۹۰b). در این تحقیق، از دو روش RS و IP برای شناسایی بهتر خصوصیات و همچنین موقعیت

انحراف مغناطیسی: ۰ درجه

تعداد منشورها در راستای X: ۲۵

تعداد منشورها در راستای Y: ۵

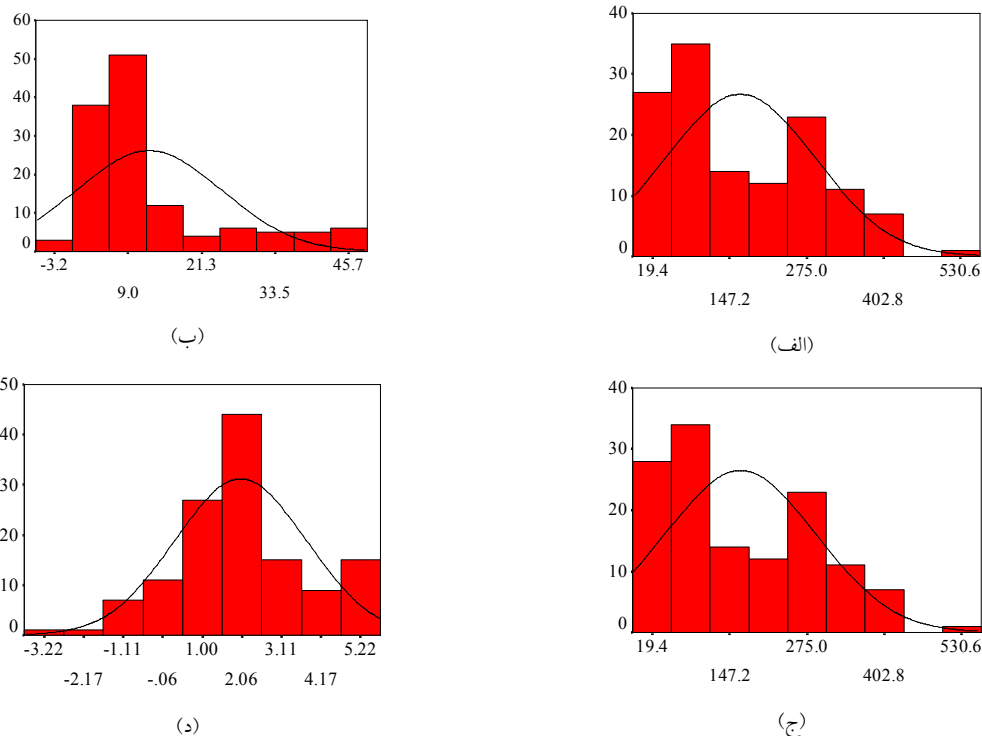
خوب‌پذیری مغناطیسی: ۰/۰۱

نوفه: ۵ درصد

نسبت نوفه به سیگنال: ۰/۰۵

تعداد تکرار: ۲۰

شکل ۱-الف نشان‌دهنده بی‌هنجاری میدان کلی حاصل از داده‌های مصنوعی است. با اعمال الگوریتم بر داده‌های تولید شده شکل ۱-ب حاصل شده است. انطباق نتایج حاصل از اعمال الگوریتم روی داده‌ها (شکل ۱-ب) و



شکل ۹. نمودار بافت‌نما نیم‌رخ B-B (الف) مقاومت ویژه قبل از نرمال‌سازی (ب) بارپذیری قبل از نرمال‌سازی (ج) مقاومت ویژه بعد از نرمال‌سازی (د) بارپذیری بعد از نرمال‌سازی.

قرارگیری بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است. تصحیح داده‌های خارج از رده، پس از مرتب‌سازی، با نرم‌افزار SPSS و با رسم نمودارهای باکس پلات به‌منظور مشخص کردن داده‌های خارج از رده و سپس استفاده از روش Q برای جایگزین کردن داده‌های خارج از رده، صورت گرفته است. در این روش ابتدا داده‌ها برای هر نیم‌رخ به‌صورت صعودی مرتب شده است و سپس با استفاده از رابطه (۷) مقدار Q برای هر یک از داده‌های موجود تشکیل می‌شود و میانگین و انحراف معیار Q ها، به‌صورت روابط (۸) و (۹) به‌دست می‌آید:

$$Q = \frac{x_i - x_{i-1}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (8)$$

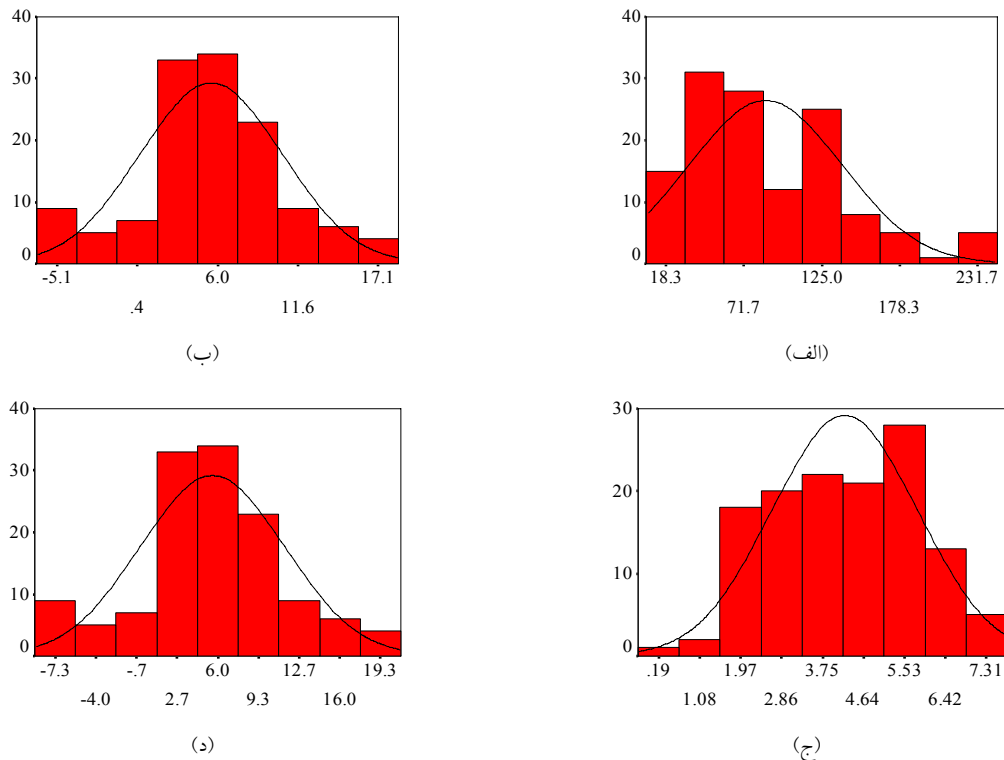
قرارگیری بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است.

۱-۲-۱-۲ تحلیل‌های آماری داده‌های IP و RS

به‌منظور شناسایی مقادیر بی‌هنجار داده‌های IP و RS، تحلیل‌های آماری صورت گرفته است. چون تحلیل‌های آماری به توزیع داده‌ها حساس‌اند، پردازش‌های آماری اولیه، شامل: تصحیح داده‌های خارج از رده و نرمال‌سازی داده‌ها صورت گرفته است. وجود داده‌های خارج از رده، بین مجموعه‌ای از داده می‌تواند بررسی‌های آماری را دچار اختلال کند زیرا:

(الف) روش‌های آماری نیاز به مجموعه کاملی از داده‌های غیر سنسورد دارد.

(ب) در مواردی که سنجش‌های نسبی صورت می‌گیرد، مانند جداسازی زمینه از بی‌هنجاری، وجود داده‌های سنسورد، موجب ارزیابی‌های غیر دقیق می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار بافت‌نما نیم‌رخ C-C (الف) مقاومت ویژه قبل از نرمال‌سازی (ب) بارپذیری قبل از نرمال‌سازی (ج) مقاومت ویژه بعد از نرمال‌سازی (د) بارپذیری بعد از نرمال‌سازی.

بی‌هنجار از زمینه، از حد آستانه‌ای با رابطه $\bar{X} \pm S$ استفاده شد (حسینی‌پاک، ۱۳۸۴). در ضمن به مقادیر نیم‌رخ A-A که تقریباً در خارج از محدوده بی‌هنجار است توجه شده و در نهایت مقادیر خارج از این محدوده، به‌منزله مقادیر بی‌هنجار تلقی شده است.

۲-۲-۱-۲ مدل‌سازی وارون داده‌های IP و RS

در تفسیر نتایج، از مدل‌سازی معکوس دو‌بُعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری و نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. این نرم‌افزار زمین زیر نیم‌رخ برداشت را به بلوک‌هایی در راستاهای افقی و قائم تقسیم‌بندی می‌کند و چون حساسیت بلوک‌هایی که در عمق هستند کمتر از بلوک‌های سطحی است، اندازه بلوک‌های سطحی را کوچک‌تر از بلوک‌های عمیق در نظر می‌گیرد. این نرم‌افزار شامل برنامه‌ای است که قادر

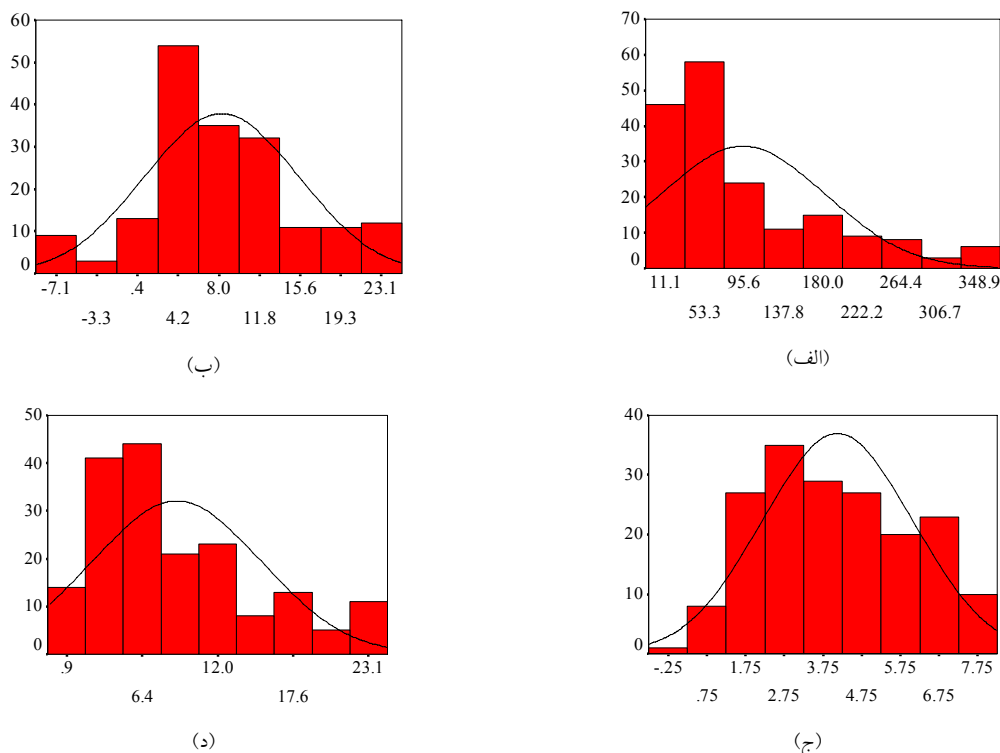
$$S_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}, \quad (9)$$

در روابط فوق X_{max} : بیشینه مقدار، X_{min} : کمینه مقدار، n : تعداد داده‌های برداشت شده، \bar{Q} : میانگین Q و S_Q : انحراف معیارها است.

بعد از محاسبات فوق، داده‌های مربوط به هر یک از Q ها را که از نامساوی رابطه (۱۰) تبعیت نمی‌کنند حذف و آخرین مقدار دنباله صعودی داده‌ها که قبل از مقدار حذف شده قرار دارد را جایگزین آن می‌کنیم.

$$\bar{Q} - 2S_Q \leq Q_i \leq \bar{Q} + 2S_Q, \quad (10)$$

برای نرمال‌سازی، نمودار بافت‌نما (هیستوگرام) داده‌ها رسم شده است. آنجا که توزیع داده‌ها تفاوت زیادی با توزیع نرمال داشته، از روش‌های تبدیل لگاریتمی برای نرمال‌سازی استفاده شده است. به‌منظور تفکیک داده‌های



شکل ۱۱. نمودار بافت‌نما نیم‌رخ D-D (الف) مقاومت ویژه قبل از نرمال‌سازی (ب) بارپذیری قبل از نرمال‌سازی (ج) مقاومت ویژه بعد از نرمال‌سازی (د) بارپذیری بعد از نرمال‌سازی.

توده در سنگ‌های میزبان، باعث ایجاد دگرگونی مجاورتی و همبندی شده است. محدوده مورد بررسی به‌صورت غالب از تپه‌های کم‌ارتفاع تشکیل شده است که با مناطق پست از یکدیگر جدا شده‌اند (نوروزی و ضیا، ۱۳۹۰).

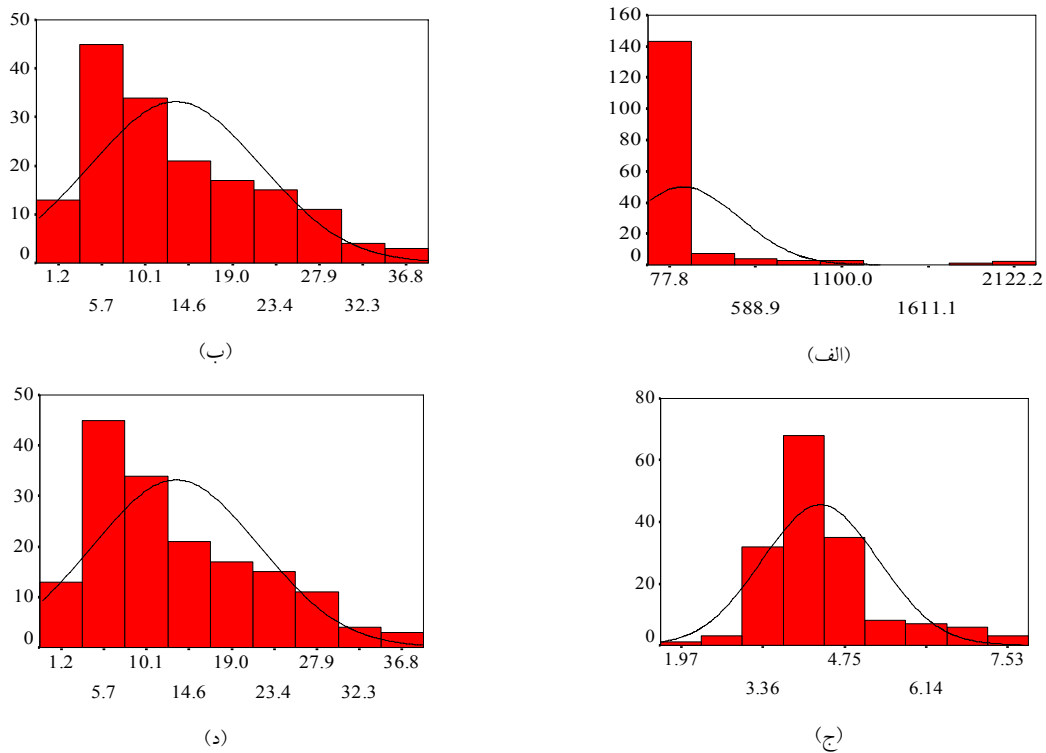
به‌منظور بررسی‌های نیمه تفصیلی، یک شبکه برداشت منظم شامل ۴۰ نیم‌رخ شمال‌شرقی- جنوب‌غربی در محدوده‌ای به مساحت ۸۲۴۰ متر مربع طراحی شده و عملیات برداشت مغناطیسی در ۱۲۳۱ ایستگاه صورت گرفته است. شبکه برداشت انتخاب شده برای این محدوده یک شبکه ۲۰×۱۰ است که فاصله ایستگاه‌های برداشت ۱۰ متر و فاصله نیم‌رخ‌ها از هم ۲۰ متر است.

در ضمن برداشت‌های ژئوالکتریکی در راستای ۵ نیم‌رخ صورت گرفته است. این ۵ نیم‌رخ که به نام‌های A-A، B-B، C-C، D-D و E-E شناخته می‌شوند، از نظر

به مدل‌سازی معکوس دو بُعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری با روش کمترین مربعات غیرخطی است و برای محاسبات نیز از روش‌های عنصر متناهی و تفاضل متناهی استفاده می‌کند (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴).

۲-۲ محدوده مورد بررسی:

محدوده مورد بررسی در استان خراسان جنوبی، شهرستان سریشه در جنوب شرقی درح در نزدیکی روستای تیغ‌نوب‌آب واقع شده است (شکل ۲). مختصات میانی این ناحیه در ۶۰ ۳۲ ۵۶ طول شرقی و ۳۲ ۶ ۲۱ عرض شمالی قرار دارد. محدوده مورد بررسی از لحاظ ساختاری در زون فلیشی شرق ایران قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در این محدوده شامل سنگ‌های رسوبی نظیر شیل، ماسه‌سنگ و بعضاً آهک‌های نازک لایه و همچنین سنگ‌های کوارتز دیوریت است که نفوذ این



شکل ۱۲. نمودار بافت‌نما نیم‌رخ E-E (الف) مقاومت ویژه قبل از نرمال‌سازی (ب) بارپذیری قبل از نرمال‌سازی (ج) مقاومت ویژه بعد از نرمال‌سازی (د) بارپذیری بعد از نرمال‌سازی.

براساس موقعیت جغرافیایی محدوده مورد بررسی پارامترهای مغناطیسی زمین که از نرم‌افزار ژئوسافت به‌دست آمده‌اند عبارت‌اند از: میدان مغناطیسی کل ۴۷۴۹۳، زاویه میل ۵۰ درجه، زاویه انحراف مغناطیسی ۲/۷ درجه.

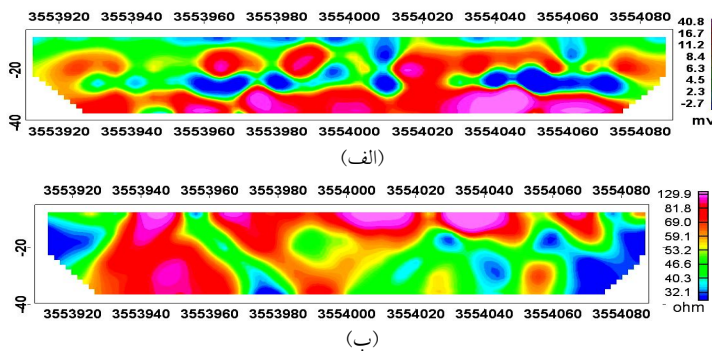
شکل ۳ نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی کل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، دو بی‌هنجاری اصلی در

موقعیت جغرافیایی بر نیم‌رخ‌هایی که در مدل‌سازی مغناطیسی مورد تحلیل قرار گرفتند، منطبق‌اند و موقعیت جغرافیایی آنها روی نقشه توپوگرافی محدوده در شکل ۴ نشان داده شده است.

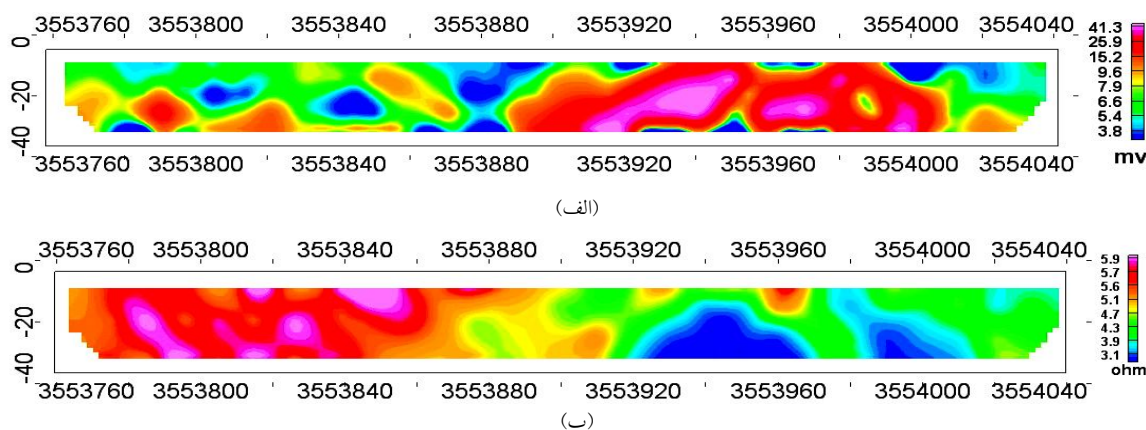
۳-۲ نتایج

۱-۳-۲ مدل‌سازی دو بُعدی داده‌های مغناطیسی

محدوده مورد بررسی



شکل ۱۳. شبه‌مقطع‌های به‌دست آمده از بارپذیری (الف) و مقاومت ویژه ظاهری (ب) نیم‌رخ A-A.

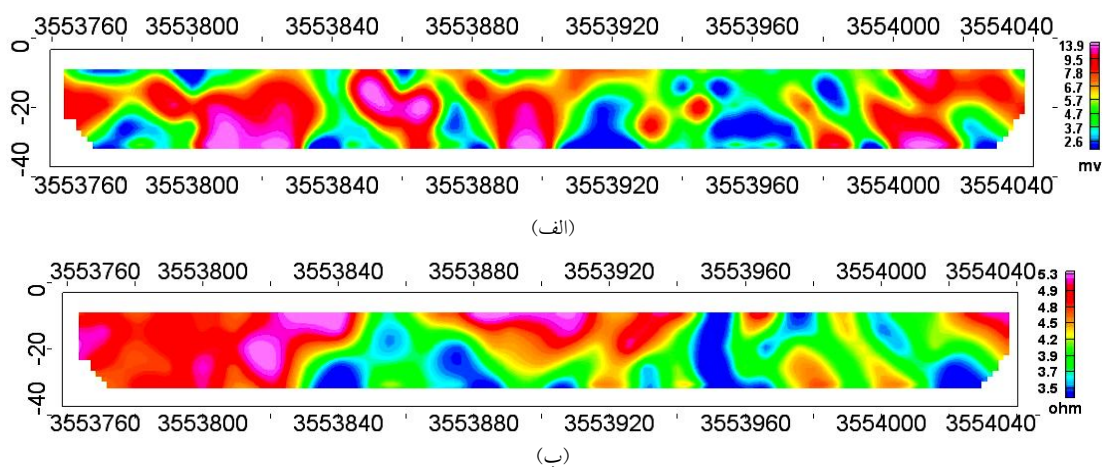


شکل ۱۴. شبه‌مقطع‌های به‌دست آمده از بارپذیری (الف) و مقاومت ویژه ظاهری (ب) نیم‌رخ B-B.

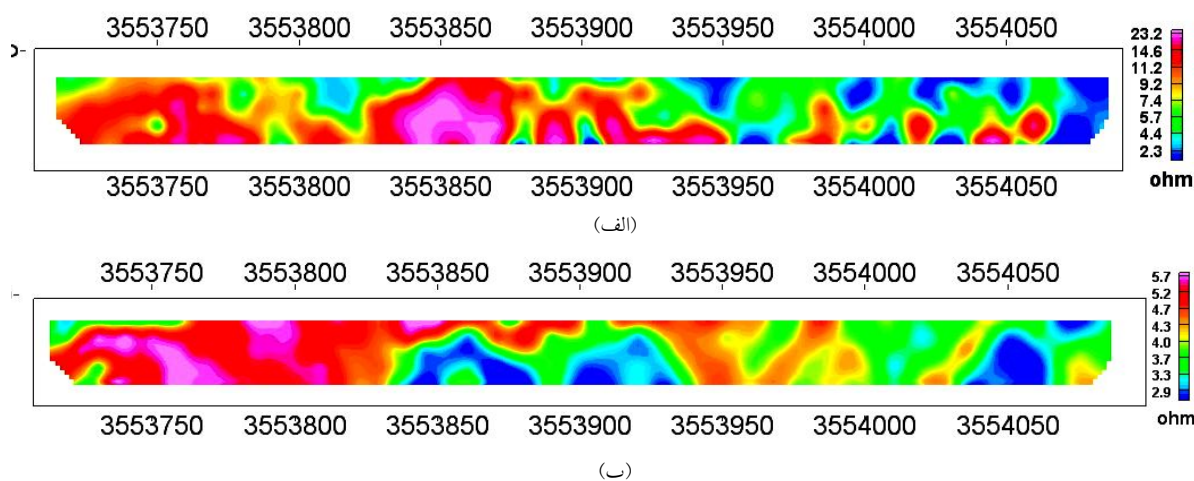
الگوریتم مدل‌سازی در محیط مت‌کب گدنیسی شده است. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نتایج حاصل از این الگوریتم در امتداد نیم‌رخ‌های B-B، C-C و D-D را نشان می‌دهند. از آنجا که نیم‌رخ A-A خارج محدوده بی‌هنجار از لحاظ برداشت‌های مغناطیسی و نیم‌رخ E-E نیز دارای امتداد شرقی - غربی بوده است، این نیم‌رخ‌ها مورد مدل‌سازی مغناطیسی قرار نگرفته‌اند. با توجه به این شکل‌ها، گسترش عمقی توده تعیین شده است. (ضخامت هر منشور ۱۰ متر در نظر گرفته شده است). در شکل ۵ عمق بالای توده کمتر از ۱۰ متر و گسترش عمقی آن حدود ۱۰۰ متر برای نیم‌رخ B-B برآورد شده است.

محدوده دیده می‌شود. برای بررسی این بی‌هنجاری‌ها از روش مدل‌سازی وارون فشرده داده‌های مغناطیسی استفاده شده است. با رسم نقشه‌های هم‌میزان مقادیر گوناگون میدان مغناطیسی که برای نمونه، نقشه میدان کلی در شکل ۳ آورده شده، دو بی‌هنجاری مغناطیسی تشخیص داده شده است. برای به‌دست آوردن دقیق‌تر مشخصه‌های هندسی توده‌های بی‌هنجار، مدل‌سازی دو بُعدی فشرده روی ۳ نیم‌رخ B-B، C-C و D-D، که موقعیتشان در شکل ۴ مشخص شده، صورت گرفته است.

برای این منظور ابتدا تصحیحات و فیلترهای لازم روی داده‌ها اعمال و سپس اقدام به مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۵. شبه‌مقطع‌های به‌دست آمده از بارپذیری (الف) و مقاومت ویژه ظاهری (ب) نیم‌رخ C-C.



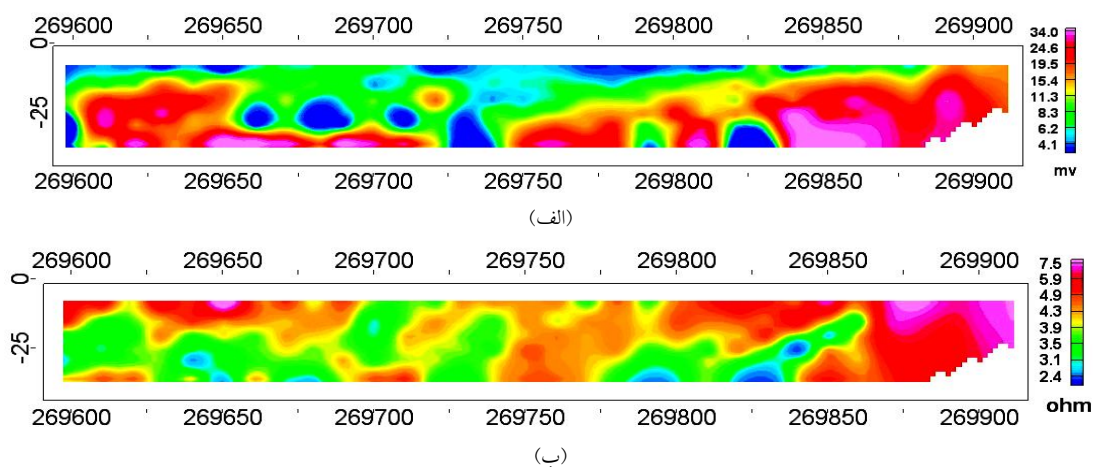
شکل ۱۶. شبه‌مقطع‌های به‌دست آمده از بارپذیری (الف) و مقاومت ویژه ظاهری (ب) نیم‌رخ D-D.

بی‌هنجاری حدود ۹۰ متر است.

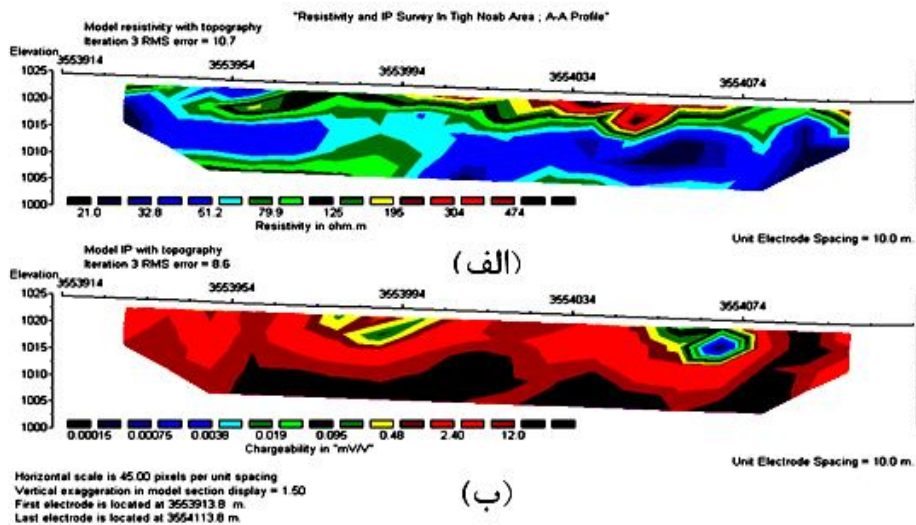
۲-۳-۲ تحلیل‌های آماری داده‌های مقاومت‌سنجی و بارپذیری

بافت‌نگارهای فراوانی برای هر ۵ نیم‌رخ، قبل و بعد از نرمال‌سازی در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند. شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان‌دهنده این هستند که داده‌ها به‌نحو مناسبی نرمال شده‌اند. برای مقایسه این دو دسته داده در هر نیم‌رخ، از ضریب همبستگی استفاده شده است.

شکل ۶ مدل‌سازی اعمال شده روی نیم‌رخ C-C را نشان می‌دهد. در این شکل دو توده که در عمق حدود ۶۰ متری به‌صورت پیوسته در آمده‌اند، مشخص‌اند، توده واقع در سمت چپ شکل دارای عمق ۲۰ متر و توده سمت راست تقریباً در سطح واقع شده است. توده بی‌هنجار زیر نیم‌رخ C-C گسترش عمقی بیش از ۱۰۰ متر دارد. شکل ۷ مدل به‌دست آمده از اعمال الگوریتم مدل‌سازی روی داده‌های نیم‌رخ D-D را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دو توده بی‌هنجار که مجزا از هم هستند نمایش داده شده است که بی‌هنجاری اصلی در سمت راست شکل و در نزدیک سطح واقع شده است. گسترش عمقی این



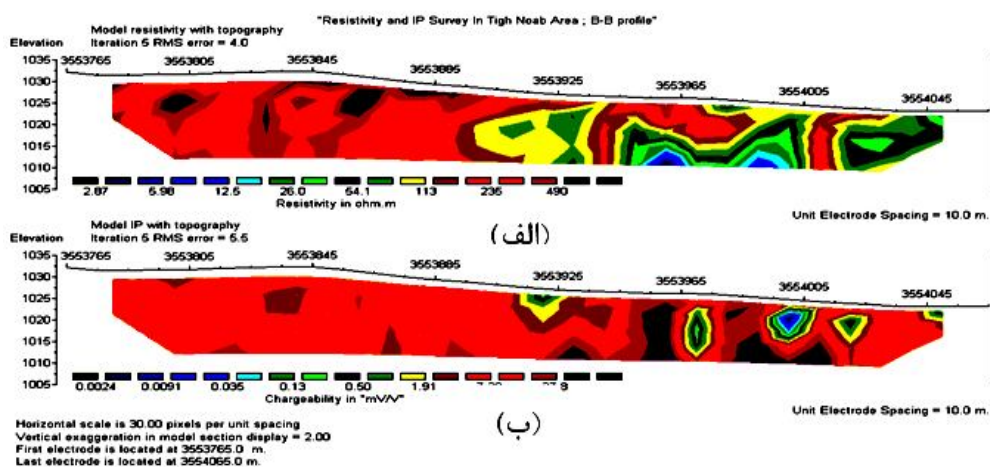
شکل ۱۷. شبه‌مقطع‌های به‌دست آمده از بارپذیری (الف) و مقاومت ویژه ظاهری (ب) نیم‌رخ E-E.



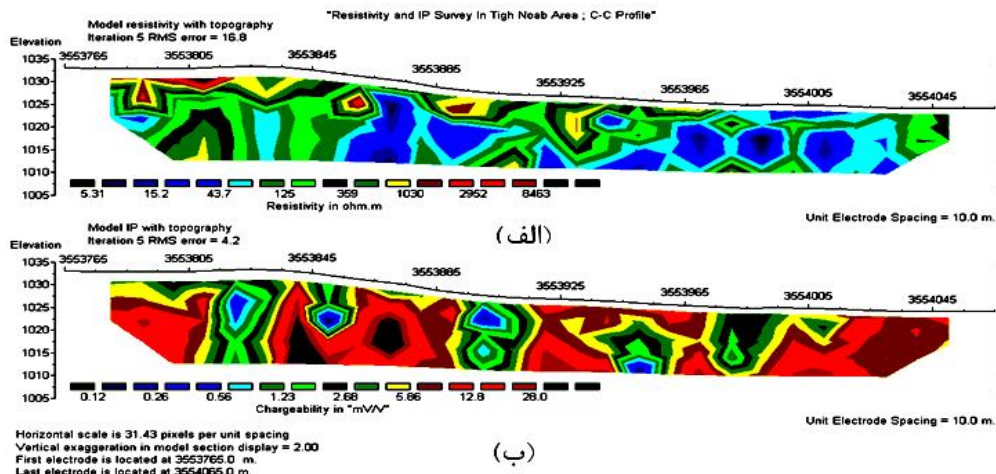
شکل ۱۸. مدل‌سازی وارون صورت گرفته روی نیم‌رخ A-A شکل (الف) مربوط به مقاومت ویژه ظاهری و (ب) مربوط به بارپذیری است.

هستند استفاده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ دیده می‌شود و از تحلیل‌های آماری به‌دست آمده است، نمی‌توان محدوده بی‌هنجار خاصی روی نیم‌رخ A-A که در خارج محدوده بی‌هنجار واقع است، مشخص کرد. در نیم‌رخ B-B محدوده بی‌هنجار برای مقاومت ویژه ظاهری بین (۲۶۹۵۰۰، ۳۵۵۳۹۲۰) تا (۳۵۵۴۰۲۰، ۳۵۵۳۹۰۰) و برای بارپذیری بین نقاط (۲۶۹۵۰۰، ۳۵۵۳۹۰۰) تا (۲۶۹۵۰۰، ۳۵۵۴۰۱۰) است.

جدول ۱ ضریب همبستگی بین این دو دسته داده را نشان می‌دهد. در جدول ۱ دیده می‌شود که ضریب همبستگی بین RS و IP، برای هر ۵ نیم‌رخ، منفی است و این امر می‌تواند نشان‌دهنده توده‌هایی با عیار بالا و پراکندگی کم در منطقه باشد (نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴). و همان‌طور که در تفسیر داده‌های مغناطیسی گفته شد، در این محدوده ۳ بی‌هنجاری مغناطیسی وجود دارد. برای مشخص کردن محدوده بی‌هنجار روی هر دو مقطع، از داده‌هایی که بیشتر از $\bar{x} + s$ و یا کمتر از $\bar{x} - s$



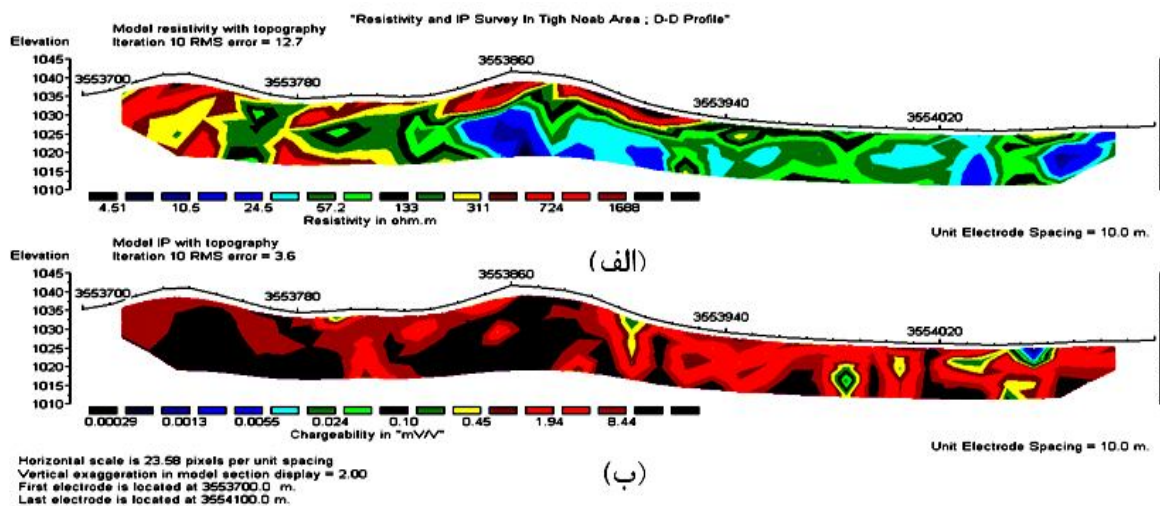
شکل ۱۹. مدل‌سازی وارون صورت گرفته روی نیم‌رخ B-B شکل (الف) مربوط به مقاومت ویژه ظاهری و (ب) مربوط به بارپذیری است.



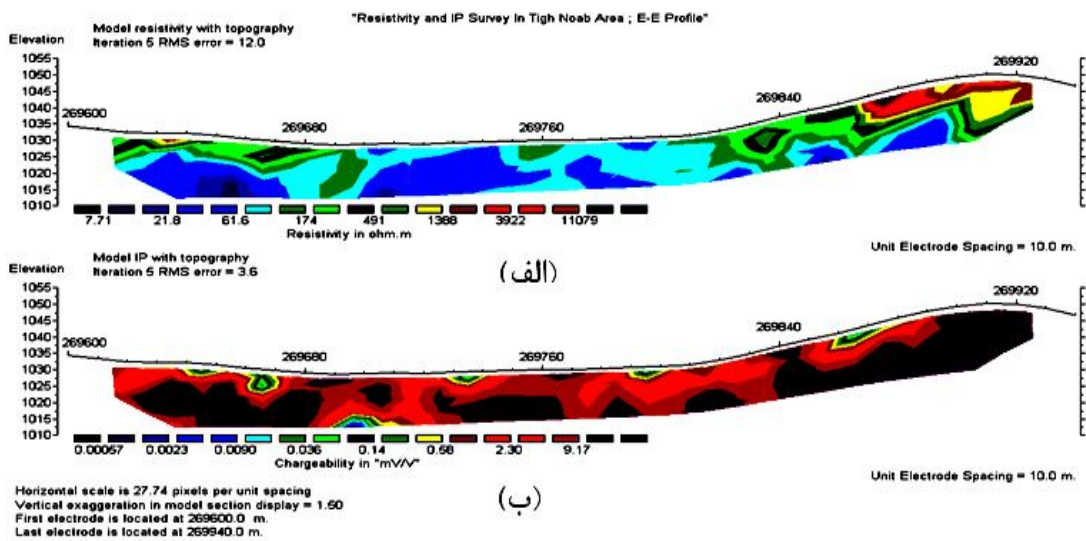
شکل ۲۰. مدل‌سازی وارون صورت گرفته روی نیم‌رخ C-C، شکل (الف) مربوط به مقاومت ویژه ظاهری و (ب) مربوط به بارپذیری است.

در نیم‌رخ C-C برای مقاومت ویژه بین (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۸۰) تا (۳۵۵۳۸۳۰، ۲۶۹۶۲۵) و برای بارپذیری بین (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۴۵) تا (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۶۰)، و در نیم‌رخ D-D برای مقاومت ویژه ظاهری بین (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۹۴۰) تا (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۸۴۰) و بارپذیری مابین نقاط (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۸۲۵) تا (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۹۵۰) است و نیم‌رخ E-E، چون به صورت شرقی-غربی روی بی‌هنجاری برداشت شده، در همه نقاط بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.

در نیم‌رخ C-C برای مقاومت ویژه بین (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۸۰) تا (۳۵۵۳۸۳۰، ۲۶۹۶۲۵) و برای بارپذیری بین (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۴۵) تا (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۶۰)، و در نیم‌رخ D-D برای مقاومت ویژه ظاهری بین (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۹۴۰) تا (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۸۴۰) و بارپذیری مابین نقاط (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۸۲۵) تا (۲۶۹۸۵۰، ۳۵۵۳۹۵۰) است و نیم‌رخ E-E، چون به صورت شرقی-غربی روی بی‌هنجاری برداشت شده، در همه نقاط بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱. مدل‌سازی وارون صورت گرفته روی نیم‌رخ D-D، شکل (الف) مربوط به مقاومت ویژه ظاهری و (ب) مربوط به بارپذیری است.



شکل ۲۲. مدل سازی وارون صورت گرفته روی نیمرخ E-E، شکل (الف) مربوط به مقاومت ویژه ظاهری و (ب) مربوط به بارپذیری است.

کم مقاومت ویژه مشخص شده است. این بی‌هنجاری حدود ۱۰۰ متر گسترش دارد و ادامه آن در نیمه شمالی نیمرخ A-A قابل پیگیری است. عمق این بی‌هنجاری حدود ۱۵ تا ۲۰ متر برآورد می‌شود. حال اگر منظور از این بررسی‌ها یافتن نقطه‌ای برای حفاری باشد، می‌توان نقطه (۲۶۹۵۰۰، ۳۵۵۳۹۶۰) را برای محل حفاری پیشنهاد داد. شکل ۲۰ مدل سازی IP و Rs روی نیمرخ C-C را نمایش می‌دهد. یک بی‌هنجاری مشخص در مرکز نیمرخ بین نقطه (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۴۵) تا (۲۶۹۶۲۵، ۳۵۵۳۸۸۵) وجود دارد که با مقادیر زیاد بارپذیری و مقادیر به نسبت کم مقاومت ویژه مشخص شده است. این بی‌هنجاری حدود ۵۰ متر گسترش دارد و سیمای ظاهری شبه‌مقاطع حاصل از این نیمرخ، تداعی‌کننده شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌هایی در محدوده پیرامون نیمرخ است.

۲-۳-۳ مدل سازی وارون داده‌های IP و Rs

در این قسمت به مدل سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری پرداخته شده است. شکل ۱۸ نتیجه اعمال مدل سازی روی نیمرخ A-A است. در این نیمرخ با توجه به شواهد سطحی، انتظار بی‌هنجاری وجود ندارد و به نوعی برای تعیین مقادیر زمینه، هر یک از پارامترهای مقاومت ویژه و بارپذیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به شبه‌مقاطع حاصل از این نیمرخ، بارپذیری ۱۰ میلی‌ولت بر ولت می‌تواند به منزله مقدار زمینه، مورد توجه قرار گیرد. در قسمت‌های شمالی نیمرخ، در عمق حدود ۱۵ تا ۲۰ متری، مقادیر بارپذیری قابل توجه‌اند. شکل ۱۹ مدل سازی صورت گرفته روی نیمرخ B-B را نمایش می‌دهد. یک بی‌هنجاری مشخص در نیمه شمالی نیمرخ وجود دارد که با مقادیر زیاد بارپذیری و مقادیر به نسبت

جدول ۱. ضریب همبستگی بین داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری در نیمرخ‌ها.

	نیمرخ A-A	نیمرخ B-B	نیمرخ C-C	نیمرخ D-D
ضریب همبستگی	-۰.۴۰۷	-۰.۷۳۶	-۰.۰۵۹	-۰.۰۱۹

آهک‌های نازک لایه با خودپذیری مغناطیسی کم است، برداشت‌های مغناطیسی را می‌توان به‌مثابه روشی مناسب در تعیین محدوده‌های بی‌هنجار در این منطقه به کار گرفت.

۳) مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی روی نیم‌رخ B-B بالای توده کمتر از ۱۰ متر و گسترش عمقی ۱۰۰ متر برآورد شده است، بی‌هنجاری اصلی در زیر نیم‌رخ C-C عمقی حدود ۲۰ متری و گسترش عمقی ۱۰۰ متری دارد و همچنین توده بی‌هنجار در زیر نیم‌رخ D-D با گسترش عمقی ۹۰ متری، در نزدیکی سطح واقع است که با توجه به تحقیقات قبلی، نتایج حاصل مورد تایید قرار می‌گیرد (جهان‌تیغ و همکاران، ۱۳۸۹ و جهان‌تیغ و همکاران، ۱۳۹۰).

۴) با توجه به بررسی ۳ نوع داده برداشت شده، هرگاه بخواهیم نقطه‌ای را برای حفاری پیشنهاد دهیم، می‌توان به نقاطی با مختصات (۳۵۵۳۹۶۰، ۲۶۹۵۰۰) با استفاده از نیم‌رخ B-B، به مختصات (۳۵۵۳۸۶۰، ۲۶۹۶۲۵) با استفاده از نیم‌رخ C-C و به مختصات (۳۵۵۳۸۶۰، ۲۶۹۸۵۰) با استفاده از نیم‌رخ D-D اشاره کرد.

۵) پیشنهاد می‌شود به‌منظور حصول اطمینان از نتایج این تحلیل‌ها و تعمیم آنها به کل محدوده مورد بررسی، حفاری در نقاط پیشنهادی صورت گیرد و از داده‌های حفاری، در مقایسه و تعدیل نتایج استفاده و سپس نقاط بیشتری برای حفاری مشخص شود.

منابع

جهان‌تیغ، م.، نوروزی، غ. ر.، ژولیده‌سر، ف.، حمزه‌لو، ا. و تکنیک و.، ۱۳۸۹، کاربرد روش‌های زاویه تیلت، سیگنال تحلیلی و گرادیان، برای تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی درح: بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

جهان‌تیغ، م.، نوروزی، غ. ر.، آریافر، ا. و ژولیده‌سر، ف.، ۱۳۹۰، بررسی ویژگی‌های هندسی کانسار درح با

احتمالاً این بی‌هنجاری‌ها ادامه جنوب شرقی بی‌هنجاری‌های نیم‌رخ‌های A-A و B-B هستند. با ملاحظه مدل‌های به‌دست آمده از داده‌های مغناطیسی و تحلیل‌های آماری برای این نیم‌رخ، انطباق خوب بین آنها را می‌توان مشاهده کرد. اگر بخواهیم نقطه‌ای برای حفاری روی این نیم‌رخ پیشنهاد کنیم، می‌توان به نقطه با مختصات (۳۵۵۳۸۴۰، ۲۶۹۶۲۵) اشاره کرد.

مدل‌سازی نیم‌رخ D-D در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در این نیم‌رخ یک بی‌هنجاری مشخص در بین نقاط (۳۵۵۳۸۴۰، ۲۶۹۸۵۰) تا (۳۵۵۳۹۲۰، ۲۶۹۸۵۰) وجود دارد که با مقادیر زیاد بارپذیری و مقادیر به‌نسبت کم مقاومت ویژه مشخص شده است و حدود ۸۰ متر گسترش دارد. با بررسی تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی مغناطیسی نقطه (۳۵۵۳۸۶۰، ۲۶۹۸۵۰) به‌منزله بی‌هنجاری تایید، و درحکم نقطه‌ای برای حفاری پیشنهاد شده است. شکل ۲۲ مدل‌سازی صورت گرفته روی نیم‌رخ E-E را نشان می‌دهد.

این نیم‌رخ در امتداد شرقی-غربی و به منظور کنترل بی‌هنجاری‌های نیم‌رخ‌های D-D و C-C بررسی شده است. با توجه به مدل‌سازی مقاومت ویژه و بارپذیری این نیم‌رخ، می‌توان انتظار داشت که در عمق حدود ۲۰ متری، بی‌هنجاری‌ها به هم متصل باشند. محدوده‌های بی‌هنجاری در نیم‌رخ‌های D-D و C-C در این نیم‌رخ نیز بارز شده‌اند. در این نیم‌رخ نیز، بی‌هنجاری با مقادیر زیاد بارپذیری و مقادیر به‌نسبت کم مقاومت ویژه مشخص شده است.

۳ نتیجه‌گیری

با مقایسه مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های آماری، نتایج زیر به‌دست آمده است:

- ۱) نتایج حاصل از ۳ برداشت، انطباق خوبی با هم دارند.
- ۲) با توجه به اینکه منطقه پوشیده از ماسه‌سنگ و بعضاً

- جنوب شرق ایران: مجله فیزیک زمین و فضا، ۱۳۶(۱)، ۱۲۷-۱۳۷.
- نوروزی، غ. ح. و غلامی، س.، ۱۳۸۴، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M) در محل اندیس معدنی سوناجیل: نشریه دانشکده فنی، ۳۹(۲)، ۲۵۳-۲۶۵.
- نوروزی، غ. ح. ر.، ضیاء، ح.، ۱۳۹۰، بررسی بی‌هنجاری مس تیغ نوآب با استفاده از مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی: اولین همایش ملی مس، دانشگاه باهنر کرمان.
- Eckhart, U., 1980, Weber's problem and Weiszfeld's algorithm in general spaces: *Math. Programming*, **18**, 186-196.
- Last, B. J., and Kubik, K., 1983, Compact gravity inversion: *Geophysics*, **1(6)**, 713-721.
- Oldenburg Douglas, W., and Yaoguo, Li., 1994, Inversion of induced polarization data: *Geophysics*, **59(9)**, 1327-1341.
- Stocco, S., Godio, A., and Sambuelli, L., 2009, Modelling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code: *Computers & Geosciences*, **35**, 2111-2118.
- Telford, W. M., Gedart, L. p., and Sheriff, R. E., 1990, *Applied Geophysics*: Cambridge University Press.
- اعمال فیلترهای مختلف مغناطیسی و تخمین عمق آن به روش زاویه تیلت: اولین همایش ملی مس، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- حسینی‌پاک، ع. ا.، ۱۳۸۴، تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- ژولیده‌سر، ف.، نوروزی، غ. ر.، جهان‌تیغ، م. و حسینیان، ش.، ۱۳۹۰، a، تفسیر کیفی و مدل‌سازی داده‌های میدان مغناطیسی کل به منظور شناسایی محدوده و گسترش عمقی توده آنومال، دومین کنفرانس زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه لرستان.
- ژولیده‌سر، ف.، نوروزی، غ. ق.، جهان‌تیغ، م. و حسینیان، ش.، ۱۳۹۰، b، بررسی اندیس معدنی درح با استفاده از مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M): اولین همایش ملی مس، دانشگاه باهنر کرمان.
- عابدی، م.، افشار، ا.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، نوروزی، غ. و لوکس، ک.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی سه‌بعدی بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی تحمیلی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۲)، ۷۷-۹۰.
- نمکی، ل.، حفیظی، م. ک. و میرزایی، م.، ۱۳۸۹، معرفی روشی برای مدل‌سازی دو‌بعدی اتوماتیک داده‌های مغناطیس‌سنجی با بررسی موردی منطقه مکران در