



Imam Khomeini International University  
Vol. 8, No. 1, Spring 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی  
Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## Research Paper

# Estimating the Mineral Mass Volume of the Ileh Region by Magnetic Field Analysis and Pseudo-Gravity Data Inversion Using the Improved Global Particle Swarm Optimization Algorithm

Heidari M.<sup>1</sup>, Meshinchi Asl M.<sup>2\*</sup>, Mehramuz M.<sup>2</sup>, Heidari R.<sup>2</sup>

1- Ph.D Student, Dept. of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
2- Assistant Professor, Dept. of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 08 Sep. 2021

Accepted: 12 Jan. 2022

**Abstract:** In the current research, the buried causative body of a magnetic field anomaly was modeled using Encom ModelVision software and its depth was estimated using deconvolution Euler and energy power spectrum methods. The magnetic data of Ileh region of Taybad city was used for modeling. In addition, an optimization algorithm was explained as the Improved Global Particle Swarm Optimization (IGPSO). The obtained results showed IGPSO is acceptably resistant to the corrupted synthetic gravity data by noise. Using this optimization algorithm, the pseudo-gravity data of Ileh region was analyzed to determine the structural parameters of the causative body of the anomaly such as depth, radius, density contrast, origin point coordinate and shape factor. The determined shape of the causative body of the anomaly was a sphere with a radius of 56.2 m and a density contrast of 1.93 gr/cm<sup>3</sup>. The estimated depths of the center of the sphere by Encom ModelVision software and IGPSO method were 120 m and 111.8 m, respectively. While the drilling results in this area shows an average depth of 103.2 m for the center of the iron mineral body. This indicates the introduced IGPSO method obtained better results.

**Keywords:** Ileh, Improved global particle swarm optimization algorithm, Magnetic field, Model vision, Pseudo-gravity.

### How to cite this article

Heidari, M., Meshinchi Asl, M., Mehramuz, M., and Heidari, R. (2023). "Estimating the Mineral mass volume of the Ileh region by magnetic field analysis and pseudo-gravity data inversion using the improved global particle swarm optimization algorithm". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(1): 35-54.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16201.1543

\*Corresponding Author Email: [m.meshinchi@srbiau.ac.ir](mailto:m.meshinchi@srbiau.ac.ir)

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## INTRODUCTION

The interpretation of magnetic field data is widely used in underground mineral bodies exploration with various depths, shapes, volumes and magnetic susceptibilities. Different magnetic and gravity interpretation methods are proposed by researchers to determine the physical properties and the geometry of underground causative bodies. One of these methods is the simplex algorithm for estimating the magnetic parameters of simple geometric structures [1]. Abdelrahman et al. developed a method to simultaneously determine the depth and shape of causative body from second moving average residual magnetic anomalies [2]. Essa and Elhussein applied Particle Swarm Optimization (PSO) for the interpretation of magnetic anomalies caused by simple geometrical structures [3]. The PSO is a stochastic, population-based algorithm that simulates some features of the social learning process as sharing information and evaluation of behavior [4]. In this research, the Improved Global Particle Swarm Optimization (IGPSO) method is described and used to interpret the pseudo-gravity data.

## METHODS

The IGPSO is an optimization technique based on stochastic population, inspired from the social behavior of a swarm of birds, flocking bees, and fish schooling. The fundamental concept of the IGPSO algorithm is that the potential solutions tended toward the best solutions. Assigning the search ranges for unknown parameters, the initial populations (groups) are set stochastically (initial  $P_{best}$ ). The IGPSO algorithm chooses the best population based on the obtained minimum error through checking the solutions of the groups (initial  $G_{best}$ ). IGPSO improves the best region in the group which is known as  $G_{best}$  (best value in the group or global best value) among the  $P_{best}$ , during an iterative process, as successfully leads to a global optimum.

Two properties, position  $x$  and velocity  $v$ , are associated with each particle. The next position of the  $i$ th particle (parameter) from  $j$ th model  $x_{i,j}^{k+1}$  is determined by the current position of the parameter  $x_{i,j}^k$  and the its velocity at the  $k+1$  iteration,

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (1)$$

The next velocity of the  $i$ th particle (parameter) from  $j$ th model  $v_{i,j}^{k+1}$  is estimated by the current velocity  $v_{i,j}^k$  and position  $x_{i,j}^k$  of the parameter, the best position of parameter which has been experienced up until now  $p_{i,pbest}^k$  and the best position of parameter among the group  $p_{i,gbest}^k$ ,

$$v_{i,j}^{k+1} = A[1 + (r \times \delta)] \quad (2)$$

Here

$$A = \left[ wv_{i,j}^k + c_1 r_{1,j}^k \frac{(p_{i,pbest}^k - x_{i,j}^k)}{rms} + c_2 r_{2,j}^k \frac{(p_{i,gbest}^k - x_{i,j}^k)}{rms} \right] \quad (3)$$

If the value of  $A$  is larger or smaller than the upper or lower range of the investigated parameter, the value of  $\delta$  is given as -1 and 1, respectively, otherwise  $\delta=0$ . Each one of the  $r_{1,j}^k$  and  $r_{2,j}^k$  produces a random number between 0 and 1,  $c_1$  and  $c_2$  (learning factors) are positive constant numbers known as cognitive coefficient and social coefficient, respectively, which control the individual and the social behavior and  $w$  is an inertial coefficient whose value is usually slightly less than 1 [3].

## FINDINGS AND ARGUMENT

Considering the the density contrast of 1.8 gr/cm<sup>3</sup> and magnetization of 14 A/m, the pseudo-gravity map of the studied area was generated to determine the depth of the center of the causative body (Figure 1). The pseudo-gravity data were sampled as 65 stations with an interval of 2 m.

The variations of the observed pseudo-gravity data and those computed using the obtained model via the IGPSO inversion are shown by the red cross marks and the blue curve, respectively (Figure 2A).

The curve in Figure 2B shows the difference between the observed pseudo-gravity data and the computed ones at the measuring points. The maximum difference is about 0.082 mGal. One can infer from the estimated shape factor  $q=1.463$  that the underground structure can be geometrically analogized to the sphere with a radius of 56.2 m (Figure 2C).

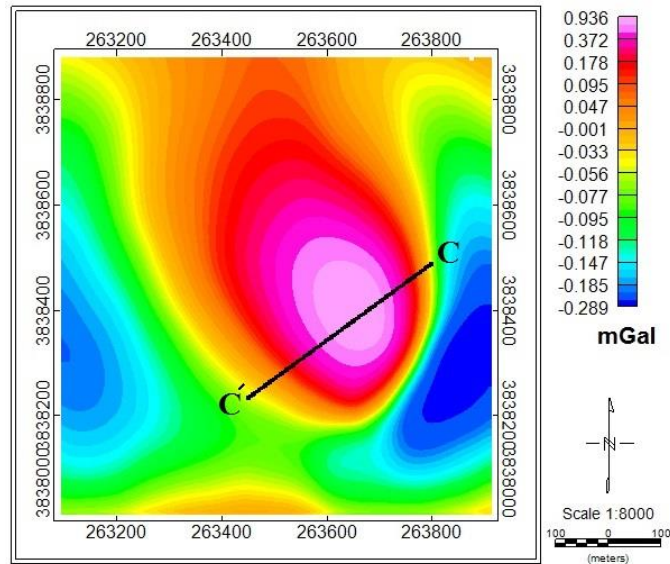


Figure 1. The pseudo gravity map of the area under investigation

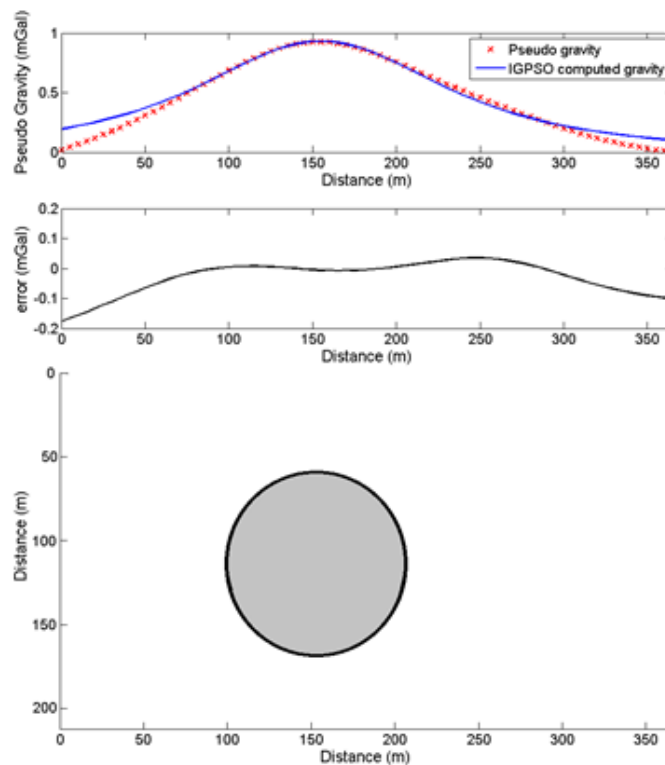


Figure 2. A: The pseudo gravity data along the profile (red dots) and computed gravity data using the IGPSO inversion (blue curve) B: The difference between the observed and computed gravity data C: Inferred structure

## CONCLUSIONS

Using the drilling results of Iileh region, we demonstrated the IGPSO gives better results than Encom ModelVision software for a pseudo-gravity inversion. The determined shape factor for the causative body of the magnetic anomaly was 1.463 corresponded to a sphere. The obtained depth of the center of the sphere was 111.8 m.

## REFERENCES

- [1] Tlas, M., and Asfahani, J. (2015). "*The simplex algorithm for best estimate of magnetic parameters related to simple geometric shaped structures*". *Mathematical Geosciences*, 47: 301-316.
- [2] Abdelrahman, E. M., Essa, K. S., El-Araby, T., and Abo-Ezz, E. R. (2016). "*Depth and shape solutions from second moving average residual magnetic anomalies*". *Exploration Geophysics*, 47: 58-66.
- [3] Essa, K. S., and Elhusein, M. (2018). "*PSO (Particle Swarm Optimization) for Interpretation of Magnetic Anomalies Caused by Simple Geometrical Structures*". *Pure and Applied Geophysics*, 175: 3539-3553.
- [4] Monteiro Santos, F. A. (2010). "*Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization*". *Computers & Geosciences*, 36: 1185-1190.



## تخمین حجم توده معدنی منطقه ایله با تحلیل میدان مغناطیسی و وارون سازی داده گرانی کاذب بوسیله الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته

مهديه حیدری<sup>۱</sup>، میرستار مشین چی اصل<sup>۲\*</sup>، محمود مهرآموز<sup>۲</sup>، رضا حیدری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲- استادیار، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

### چکیده

در این مقاله، چشمه مولد بی‌هنجاری میدان مغناطیسی محدوده مطالعاتی در منطقه ایله شهرستان تایباد که از نظر وجود کانی‌های آهنی مورد توجه است، با استفاده از نرم‌افزار مدل ویزن مدل‌سازی شده و عمق توده مدفون با استفاده از روش‌های مرسوم اویلر دی کانولوشن و طیف توان انرژی تخمین زده می‌شود. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت به نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته (IGPSO) تشریح می‌شود. کارآیی روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته با استفاده از داده گرانی مصنوعی آغشته به نوفه بررسی شد که نتایج، عملکرد قابل قبول روش یاد شده را نشان می‌دهد. با استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی، داده گرانی کاذب منطقه ایله، تجزیه و تحلیل شده و پارامترهای ساختاری توده مولد بی‌هنجاری که شامل عمق، شعاع، تباین چگالی، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل است، تخمین زده می‌شود. بر اساس تحلیل انجام شده به وسیله IGPSO شکل توده مولد بی‌هنجاری کروی با یک شعاع ۵۶/۲ متر و تباین چگالی ۱/۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. حفاری در محدوده مورد مطالعه عمق میانگین مرکز توده معدنی را در حدود ۱۰۳/۲ متر نشان می‌دهد. عمق مرکز به دست آمده برای چشمه بی‌هنجاری از وارون‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مدل ویزن و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته به ترتیب ۱۲۰ متر و ۱۱۱/۸ متر است که به ترتیب خطایی برابر ۱۴٪ و ۷/۷٪ را نشان می‌دهد. حجم تقریبی توده زیرسطحی در حدود  $10^4 \times 74$  متر مکعب برآورد شده است.

### کلمات کلیدی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته، ایله، گرانی کاذب، مدل ویزن، میدان مغناطیسی.

### استناد به این مقاله

حیدری، م.، مشین چی اصل، م.، مهرآموز، م.، حیدری، ر.؛ ۱۴۰۲؛ "تخمین حجم توده معدنی منطقه ایله با تحلیل میدان مغناطیسی و وارون‌سازی داده گرانی کاذب بوسیله الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۱، ص ۵۴-۳۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16201.1543



## ۱- مقدمه

[۹] استفاده شده‌اند.

يکسري از روش‌های مرسوم برای تحليل داده‌های مغناطیسی و گرانی از جمله واهمامیخت ورنر (کیو و شارپ [۳۴])، واهمامیخت اویلر (تامپسون [۳۵])، روش منحنی‌های پارامتریک (عبدالرحمن و همکاران [۳۶])، وارون‌سازی مدل لایه‌ای (پیلکینگتون [۳۷])، روش‌های گرادیان (عبدالرحمن و همکاران [۳۸])؛ عیسی و الحسین [۳۹]؛ اسحق زاده و همکاران [۴۰])، روش کمینه تابع مناسب (تلاس و اصفهانی [۴۱])، DEXP (فدی [۴۲])، روش کمترین مربعات خطی (عبدالرحمن و همکاران [۴۳])؛ ابواض و عیسی [۴۴]؛ اسحق زاده و همکاران [۴۵]) و الگوریتم سیمپلکس (تلاس و اصفهانی [۴۶])، الگوریتم مارکوارت (اسحق زاده و همکاران [۴۷]) وجود دارد که در دهه‌های گذشته بسیار استفاده شده‌اند.

روش PSO در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات ارایه شد [۴۸]. از این روش و نیز روش‌های بهبودیافته آن بیشتر در شاخه‌های هوش مصنوعی و کامپیوتر استفاده شده است. در چند سال اخیر، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO در شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک مورد استفاده قرار گرفته است و محققان برای بهبود عملکرد این الگوریتم، تدابیر مختلفی به کار برده‌اند (مونتریوسانتو [۴۹]؛ توش مالانی [۵۰، ۵۱]؛ پالرو و همکاران [۵۲]؛ سینگ و بیسواس [۵۳]؛ سینگ و سینگ [۵۴]؛ عیسی و الحسین [۱۹]؛ روشن و سینگ [۵۵]؛ عیسی و الحسین [۵۶، ۵۷]؛ اسحق زاده و صاحباری [۲۰]؛ اسحق زاده و حاجیان [۲۱]).

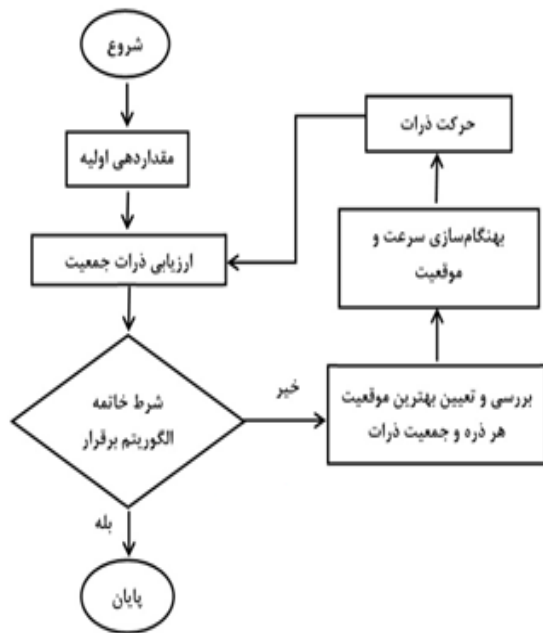
## ۲- بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های تکامل یافته هوش مصنوعی، مبتنی بر هوش جمعی است که بر اساس روند تکاملی ذرات موجود در یک دسته برای رسیدن به هدف بهینه طراحی شده است. در سال ۱۹۹۵ ابرهات و کنیدی برای اولین بار PSO را به عنوان یک روش جستجوی غیرقطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح کردند [۴۸]. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگان که به دنبال غذا هستند، الهام گرفته شده است. گروهی از پرندگان در فضایی به صورت تصادفی دنبال غذا می‌گردند و تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد. هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها می‌تواند دنبال کردن پرنده‌ای باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع

یکی از اهداف بسیار مهم در تفسیر داده مغناطیسی‌سنجی، تعیین ویژگی‌هایی مانند اندازه، شکل و موقعیت انواع مختلف ساختارهای زیرسطحی برای اهداف مختلف مانند اکتشاف، معدن و مطالعات زمین‌شناسی زیرسطحی است. ساختارهای زمین‌شناختی زیرسطحی را می‌توان به وسیله داده‌های مغناطیسی به طور قابل قبولی به صورت اشکال ساده هندسی مانند کره، استوانه یا ساختارهای صفحه‌ای مدل‌سازی کرد. پارامترهایی مانند عمق، طول و شعاع که شکل و موقعیت مدل‌های هندسی را کنترل می‌کنند، محاسبه و پارامترهایی که برای یک مدل بهترین میدان مغناطیسی را منتج می‌کنند، به عنوان بهترین مدل در نظر گرفته می‌شوند.

تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی به طور قابل ملاحظه‌ای در مناطق اکتشافی با اهداف زیرسطحی مهم است (نبیقیان و همکاران [۱]؛ عبدالرحمن و همکاران [۲]؛ اکینچی و همکاران [۳]). همچنین روش مغناطیسی‌سنجی را می‌توان در اکتشاف هیدروکربنی (ابوبکر و همکاران [۴]؛ ایواخنکوآ و همکاران [۵])، اکتشاف معدن (فارکوهارسون و کراون [۶]؛ عابدی و همکاران [۷]؛ عبدالرحمن و همکاران [۸]؛ اسحق زاده و صاحباری [۹]؛ اسحق زاده و همکاران [۱۰])، در کاربردهای مهندسی (دونگ و همکاران [۱۱]) و در فعالیت‌های زمین‌گرایی (بکتاس و همکاران [۱۱]؛ نیاز و گواواوا [۱۲])، در بررسی‌های مکان‌های باستان‌شناسی (گاندوگدا و همکاران [۱۳]) و در اکتشاف آب‌های زیرزمینی (الغرنی [۱۴]؛ آرافا و همکاران [۱۵]) به کار برد.

همچنین در دو دهه اخیر، روش‌های بهینه‌سازی کلی در بسیاری از زمینه‌ها به عنوان مثال روش‌های وارون‌سازی ژئوفیزیکی مانند الگوریتم ژنتیک (بوسچتی و همکاران [۱۶]؛ کافان [۱۷])، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (وان دن برگ و انگلبريچت [۱۸]؛ عیسی و الحسین [۱۹]؛ اسحق زاده و صاحباری [۲۰]؛ اسحق زاده و حاجیان [۲۱]؛ فتحی و همکاران [۲۲])، واگشت تفریقی یا مشتق (ایکینچی و همکاران [۲۳]؛ بالکایا و همکاران [۲۴])، شبیه‌سازی تبرید (بیسواس [۲۵])، شبکه‌های عصبی (الغرنی [۲۶]؛ اسحق زاده و حاجیان [۲۷]؛ اسحق زاده و همکاران [۲۸])، بهینه‌سازی کلونی مورچگان (کولورنی و همکاران [۲۹]؛ اسریواستاوا و همکاران [۳۰])، الگوریتم ارزش ژنتیک هیبرید (برسکو و همکاران [۳۱]؛ دی مایو و همکاران [۳۲]) و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (اسحق زاده و حاجیان [۳۳]؛ اسحق زاده و صاحباری



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

### ۳- بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته

در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته IGPSO برای افزایش سرعت همگرایی و به حداقل رساندن گیرافتادن در بهینه های محلی سرعت تغییر هر پارامتر را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$v_{i,j}^{k+1} = A[1 + (r \times \delta)] \quad (3)$$

به طوری که:

(۴)

$$A = \left[ wv_{i,j}^k + c_1 r_{1,j}^k \frac{(p_{i,pbest}^k - m_{i,j}^k)}{rms^{-1}} + c_2 r_{2,j}^k \frac{(p_{i,gbest}^k - m_{i,j}^k)}{rms} \right]$$

که در آن ها:

rms: خطای مغناطیس مشاهده ای و محاسبه ای

$v_{i,j}^k$ : سرعت موجود در تکرار kام

$m_{i,j}^k$ : موقعیت در تکرار kام است.

در الگوریتم IGPSO برای مقدار سرعت  $v_{i,j}^{k+1}$  نیز یک حد بالا در نظر می گیریم. اگر مقدار A از حدود تعریف شده بیشتر یا کمتر شد، مقدار دلتای  $\delta$  به ترتیب برابر ۱ و -۱ در نظر گرفته شده و در غیراینصورت مقدار دلتا صفر فرض می شود.  $\tau$  یک عدد رندوم بین صفر و ۱ است.

جانمایه الگوریتم است. هر راه حل (پارامتر) که به آن یک ذره گفته می شود، در الگوریتم PSO معادل یک پرنده در الگوریتم حرکت جمعی پرندگان است. هر ذره مقداری شایستگی دارد که به وسیله یک تابع شایستگی محاسبه می شود. هرچه ذره در فضای جستجو به هدف (غذا در مدل حرکت پرندگان) نزدیک تر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مساله ادامه می دهد.

در الگوریتم PSO استاندارد، هر ذره  $i$  (پارامتر مورد بررسی) دارای دو قسمت اصلی شامل موقعیت فعلی ذره ( $x_i$ ) (مقدار پارامتر) و سرعت فعلی ذره ( $v_i$ ) (سرعت تغییر مقدار پارامتر) است. موقعیت بعدی هر ذره در فضای جستجو با موقعیت فعلی و سرعت بعدی آن تعیین می شود. سرعت بعدی هر ذره با استفاده از چهار عامل اصلی یعنی موقعیت فعلی ذره، سرعت فعلی ذره، بهترین موقعیت ذره که تاکنون تجربه و در حافظه آن ذخیره شده است ( $pbest$ ) و بهترین موقعیت در میان ذرات گروه که در حکم تجربه گروهی یاد می شود ( $gbest$ )، تعیین می شود. با توجه به تعاریف یاد شده، سرعت بعدی هر ذره (پارامتر مدل)  $i$  با رابطه ۱ بیان می شود [۵۸]:

(۱)

$$v_i(t+1) = Wv_i(t) + c_1 rand(pbest(t) - x_i(t)) + c_2 rand(gbest(t) - x_i(t))$$

که در آن:

W: ضریب وزن اینرسی است که اثر سرعت در مرحله

(تکرار) قبل را کنترل می کند.

$c_1, c_2$ : ضرایب شتاب یا ضرایب یادگیری فردی و گروهی

ذره اند.

دستور rand: عددی تصادفی در بازه صفر و یک تولید

می کند.

$v_i(t)$ : سرعت ذره (پارامتر)  $i$ ام در تکرار  $t$

$x_i(t)$ : مقدار ذره (پارامتر)  $i$ ام در تکرار  $t$  است.

با تعیین سرعت بعدی هر ذره، موقعیت بعدی (مقدار

پارامتر) آن از رابطه ۲ به دست می آید:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

فلوچارت الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در شکل ۱

قابل مشاهده است.

ضريب  $rms^{-1}$  باعث بهبود جستجوی محلی می‌شود. از طرفی با افزایش تعداد تکرار،  $c_2$  افزایش می‌یابد.  $c_2$  ضريب gbest یا بهترین موقعیت کل ذرات است، بنابراین جستجو به صورت سراسری (global) انجام می‌شود. در نهایت با افزایش تعداد تکرار، توانایی جستجو به صورت سراسری افزایش می‌یابد و به یافتن بهینگی سراسری کمک خواهد کرد. برای جمله سوم معادله ۳-۷، ضريب  $rms$  باعث بهبود جستجوی سراسری می‌شود.

با استفاده از تغییرات اعمال شده در الگوریتم PSO، می‌توان الگوریتم PSO را بهبود داده و مشکلات آن را برطرف کرده و به جواب اصلی که بهینگی سراسری (مطلق) است، دست یافت.

مقدار خطا بین داده‌های مغناطیسی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای از رابطه ۸ به دست می‌آید:

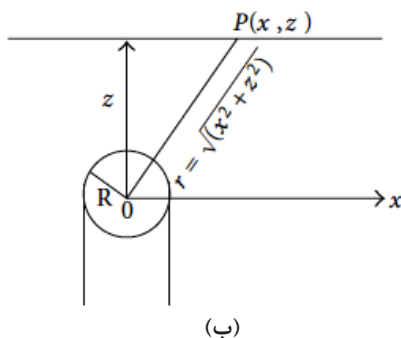
$$Q = \frac{2 \sum_i^N |T_i^o - T_i^c|}{\sum_i^N |T_i^o - T_i^c| + \sum_i^N |T_i^o + T_i^c|} \quad (۸)$$

که در آن:

$T_i^o$ : مغناطیس مشاهده‌ای (برداشت شده)  
 $T_i^c$ : مغناطیس محاسبه‌ای است.

#### ۴- تئوری روش

مولفه عمودی کل بی‌هنجاری گرانی تولید شده به وسیله یک کره (سه بعدی)، یک استوانه افقی طویل نامحدود (دو بعدی) و یک استوانه عمودی نیمه نامحدود (سه بعدی) توسط عبدالرحمن ارایه شده است [۵۹] (شکل ۲):



(ب)

همچنین در الگوریتم پیشنهادی، ضرایب شتاب را به صورت پویا در نظر می‌گیریم. به طوری که:

$$c_1 = 2.5 - \frac{0.5t_{it}}{T_{max}} \quad (۵)$$

$$c_2 = 1.5 + \frac{0.5t_{it}}{T_{max}} \quad (۶)$$

که در آن:

$t_{iter}$ : تکرار فعلی

$T_{max}$ : تعداد بیشینه تکرار است.

مقدار  $C_1 + C_2$  همواره کوچکتر یا مساوی ۴ است. همچنین ضريب وزن اینرسی به صورت رابطه ۷ تغییر می‌کند:

$$w_{k+1} = (w_{max} - w_{min}) \cdot (rand() - 0.5) + w_{mean} \quad (۷)$$

if ...  $w_{k+1} < w_{min} \rightarrow w_{k+1} = w_{min}$   
 if ...  $w_{k+1} > w_{max} \rightarrow w_{k+1} = w_{max}$

در حالی که:

$$0 < w_{max}, w_{min} < 1$$

که در آن:

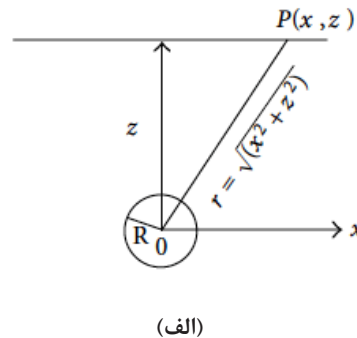
$W_{min}$ : حد پایین وزن

$W_{max}$ : حد بالای وزن

$W_{mean}$ : میانگین وزن

$Rand()$ : یک عدد رندوم بین صفر و یک است.

همان‌طور که از روابط بالا مشخص است، با تمهیدات در نظر گرفته شده با افزایش تعداد تکرار،  $c_1$  کاهش می‌یابد.  $c_1$  ضريب pbest یا بهترین موقعیتی که ذره تاکنون تجربه کرده است. پس جستجو به صورت محلی است و با کاهش  $c_1$ ، جستجوی محلی (local) هم کاهش می‌یابد. همچنین وجود



(الف)

شکل ۲: الف) مدل کره و استوانه افقی، ب) مدل استوانه قائم



$$F[g_m] = -\frac{\gamma}{C_m} \frac{\rho}{M} F[V] \quad (12)$$

این تساوی، ناهنجاری میدان کلی را به یک مولفه میدان گرانی، مولفه موازی مغناطیدگی مربوط می‌کند. به هر حال، بیشتر به مولفه قائم ناهنجاری گرانی علاقه داریم، بنابراین با نشان دادن ناهنجاری شبه گرانی با  $\Delta T_{psg}$  داریم [۶۰]:

$$F[\Delta T_{psg}] = F[\Delta T] F[\psi_{psg}] \quad (13)$$

که:

$$F[\psi_{psg}] = \frac{\gamma}{C_m} \frac{\rho}{|k| \theta_m \theta_f} \frac{1}{M}, |k| \neq 0 \quad (14)$$

که در آن:

تابع  $F[\psi_{psg}]$ : یک فیلتر است که یک ناهنجاری میدان کلی اندازه‌گیری شده در روی سطح افقی را به ناهنجاری شبه گرانی تبدیل می‌کند.

T: میدان مغناطیسی

$\theta_f$  و  $\theta_m$ : متغیرهایی‌اند که به جهت میدان مغناطیسی و پخش‌شدگی سه بعدی مغناطیدگی بستگی دارند. به طوری که:

$$\theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x k_x + \hat{f}_y k_y}{|k|}, |k| \neq 0 \quad (15)$$

$$\theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x k_x + \hat{m}_y k_y}{|k|}, |k| \neq 0 \quad (16)$$

$$|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (17)$$

در معادلات اخیر  $k_x$  و  $k_y$  عدد موج در راستای X و Y است.

#### ۶- مدل مصنوعی

دایره‌های مشکی رنگ در شکل ۳-الف تغییرات اثر گرانی یک کره در عمق ۲۵ متر با شعاع ۱۰ متر و تباین چگالی ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، در راستای یک پروفیل به طول ۱۰۰ متر و فاصله داده‌برداری ۵ را نشان می‌دهد که به آن بر اساس رابطه ۱۸٪۱۵ نوفه تصادفی اضافه شده است،

$$g_{nois}(x_i) = g_{obs}(x_i) [1 + (RAN(i) - 0.5) \times 0.15] \quad (18)$$

$$g(x_i, z, q) = A \frac{z^m}{(x_i^2 + z^2)^q} \quad (9)$$

به طوری که برای ضریب دامنه A کره، استوانه افقی و استوانه عمودی به ترتیب داریم:

$$A = \begin{cases} \frac{4}{3} \pi G \sigma R^3 \\ 2 \pi G \sigma R^2 \\ \pi G \sigma R^2 \end{cases} \quad m = \begin{cases} 1 \\ 1 \\ 0 \end{cases} \quad (10)$$

و مقدار عامل شکل q برای کره، استوانه افقی و استوانه عمودی به ترتیب برابر ۱، ۱،۵ و ۰،۵ است.

عامل شکل q برای صفحات تقریب افقی به سمت صفر میل می‌کند و برای شکل‌های کاملاً کروی ۱،۵ است. در رابطه ۹، z معرف عمق و  $x_i$  مختصات نقطه است. همچنین در رابطه ۱۰،  $\sigma$  تباین چگالی، G ثابت جهانی گرانش و R شعاع است.

#### ۵- گرانی کاذب

پتانسیل مغناطیسی V و پتانسیل گرانشی U ایجاد شده به وسیله یک جسم سخت که به طور یکنواخت مغناطیس شده است با مشتقات جهت‌دار مربوط‌اند، یعنی [۶۰]:

$$V = -\frac{C_m}{\gamma} \frac{M}{\rho} \hat{m} \cdot \nabla_p U = -\frac{C_m}{\gamma} \frac{M}{\rho} g_m \quad (11)$$

که در آن:

$\rho$ : چگالی

M: شدت مغناطیدگی

$\hat{m}$ : جهت مغناطیدگی

$\gamma$ : ثابت جاذبه

$g_m$ : مولفه میدان گرانی در جهت مغناطیدگی است.

در سیستم emu داریم  $C_m=1$  و بدون واحد است، در صورتی که در سیستم واحدهای SI داریم هنری بر متر  $C_m = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$  و  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلا است. در محاسبه رابطه پواسون، فرض می‌کنیم که M و  $\rho$  ثابت‌اند.

تبدیل شبه گرانی در حوزه فوریه آسان‌تر درک شده و کاربرد بیشتری دارد. فرض می‌کنیم که نسبت  $\frac{M}{\rho}$  در هر نقطه، یک ثابت است، تبدیل فوریه تساوی ۲-۱۷ با رابطه ۱۲ داده شده است [۶۰].

که در آن:

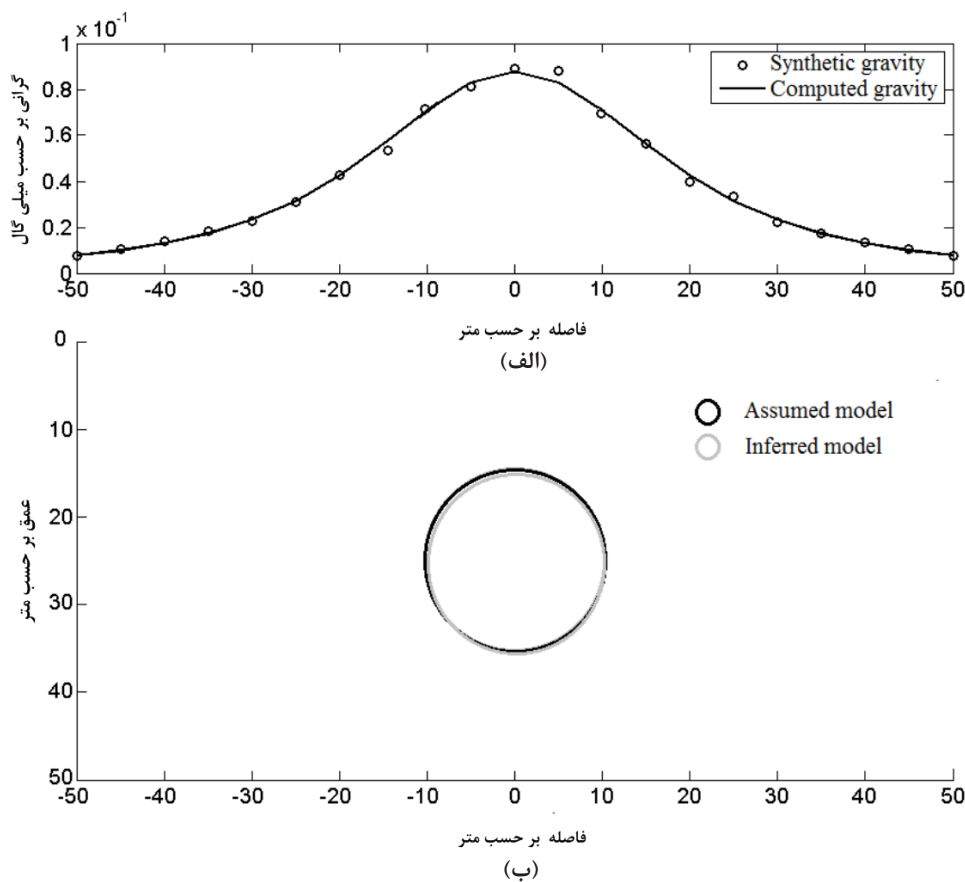
$g_{obs}(x_i)$  و  $g_{nois}(x_i)$ : به ترتیب گرانی اندازه‌گیری شده و نوفه‌دار شده در هر نقطه محاسباتی

$RAN(i)$ : یک عدد رندوم بین صفر و یک است.

برای مدل‌سازی میدان گرانی کاذب با روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته ۸۰ مدل اولیه با توجه به گستره در نظر گرفته شده برای پارامترهای عمق،

شعاع، مختصات نقطه مبدا، چگالی و فاکتور شکل تولید می‌شود (جدول ۱). کمترین خطای در نظر گرفته شده برای توقف تکرار الگوریتم IGPSO بر اساس تابع هدف (رابطه ۹) ۰٫۰۱ است.

تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای هر بار اجرای برنامه ۲۰ تکرار است که مقادیر نهایی به دست آمده برای هر پارامتر ذخیره می‌شود. همچنین تعداد تکرار مستقل برای مدل‌سازی



شکل ۳: الف) میدان گرانی تئوری نوفه‌دار مربوط به مدل مصنوعی دایره‌ای واقع در عمق ۲۵ متر با شعاع ۱۰ متر و تباین چگالی ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب (دایره‌های مشکی رنگ) و میدان گرانی محاسبه شده به وسیله روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته (منحنی مشکی)، ب) مدل کروی فرض و تخمین زده شده

جدول ۱: گستره در نظر گرفته شده و مقادیر به دست آمده از تحلیل میدان گرانی مدل مصنوعی

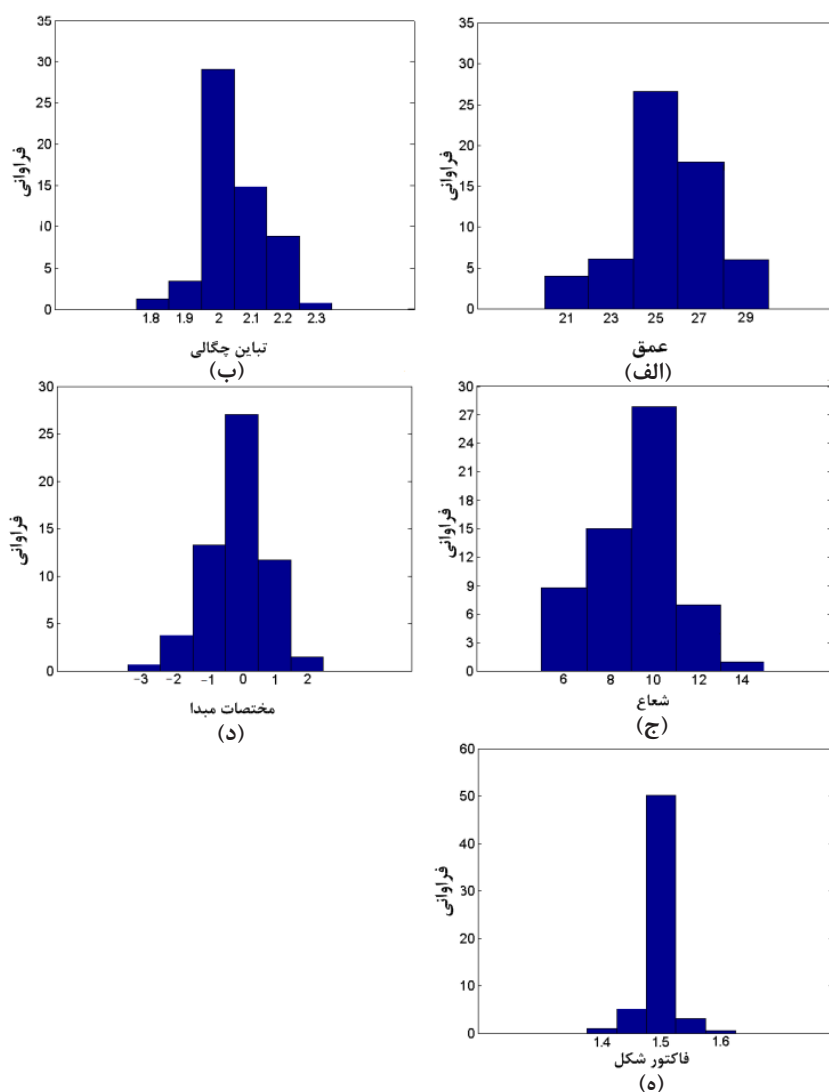
خطا (misfit)	فاکتور شکل (q)	نقطه مبدا (x0) (متر)	چگالی (σ) (گرم بر سانتیمتر مکعب)	شعاع (R) (متر)	عمق (Z) (متر)	پارامتر
-	۱٫۵	۰	۲	۱۰	۲۵	مقدار فرض شده
-	۰٫۱ تا ۲	۵ تا -۵	۱ تا ۳	۵ تا ۱۵	۱۰ تا ۳۵	گستره
-	۱٫۵۲۵ تا ۱٫۴۷۵	۰٫۵ تا -۰٫۵	۱٫۹۵ تا ۲٫۰۵	۹ تا ۱۱	۲۴ تا ۲۶	گستره بیشینه
۰٫۰۹۳	۱٫۵۱۷	۰٫۱۷	۲٫۰۳۶	۹٫۸۶	۲۵٫۳۴	مقادیر محاسبه شده

مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل ۲۵/۳۴ متر، ۲،۰۳۶ گرم بر سانتی متر مکعب، ۹،۸۶ متر، ۰،۱۷ متر و ۱،۵۱۷ هستند (جدول ۱). میدان گرانی متناظر با پارامترهای ساختاری محاسبه شده در شکل ۳-الف (منحنی مشکی رنگ) و ساختار مدل سازی شده در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

خطای بین میدان گرانی تئوری نوفه دار و میدان گرانی محاسبه شده به وسیله IGPSO، ۰،۰۹۳ برآورد شده است. نتایج به دست آمده، کارایی و عملکرد قابل قبول الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته در وارون سازی داده گرانی را نشان می دهند. بر همین اساس، از این روش برای تحلیل میدان گرانی کاذب منطقه ایله استفاده خواهد شد.

وارون میدان گرانی کاذب ۶۰ تکرار در نظر گرفته شده است. شکل ۴-الف تا شکل ۴-ه نمودار فراوانی متناظر با مقادیر به دست آمده برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل را نشان می دهد.

با توجه به شکل های اخیر بیشترین مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل به ترتیب در بازه های ۲۴ تا ۲۶ متر، ۱،۹۵ تا ۲،۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب، ۹ تا ۱۱ متر، ۵ تا ۵- متر و ۱،۴۷۵ تا ۱،۵۲۵ قرار دارند. میانگین مقادیر واقع در این بازه ها به عنوان مقادیر نهایی برای پارامترهای توده مدفون در نظر گرفته می شوند که به ترتیب برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع،



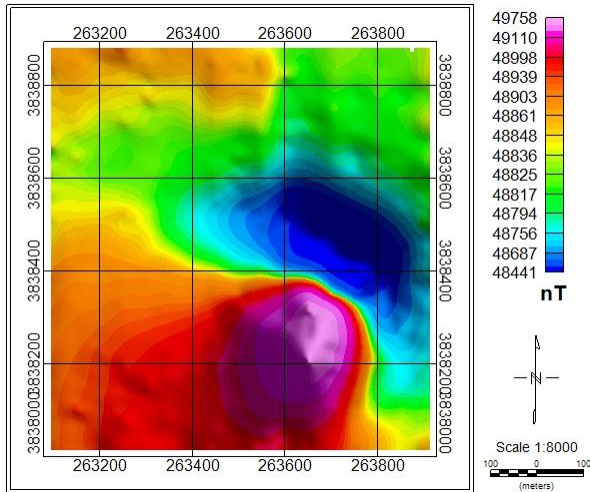
شکل ۴: نمودار فراوانی متناظر با مقادیر به دست آمده برای پارامترهای الف) عمق، ب) تباين چگالی، ج) شعاع، د) مختصات نقطه مبدا و ه) فاکتور شکل با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات سراسری بهبود یافته برای داده گرانی تئوری نوفه دار

### ۷- موقعيت جغرافيايي و زمين شناسي منطقه ايله

از نظر موقعيت جغرافيايي محدوده مورد مطالعه در استان خراسان رضوي، شهرستان تايباد و روستايي به نام ايله قرار دارد که اين محدوده از نظر ذخاير آهن قابل توجه است. اندازه گيري هاي مغناطيس سنجي محدوده مورد نظر در نقشه زمين شناسي ۱:۲۵۰۰۰۰ تايباد قرار دارد.

عمده رخنمون واحدهاي زمين شناسي در اين محدوده، واحد تفکيک نشده ولکانيکي- رسوبي است که عمدتاً توفی- شيلي است. سن اين واحد پروتروزوئیک پسين است که دگرگوني ناحيه اي متمايزي را تحمل کرده اند و اين واحد گسترشي با روند شمال شرق- جنوب غرب داشته و داراي رنگي روشن است (شکل ۵).

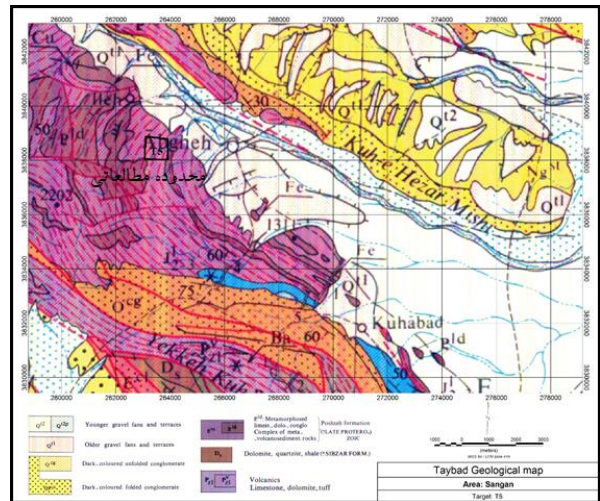
مغناطيسي در اين منطقه برداشت شد. شکل ۶ ميدان مغناطيسي کل محدوده مورد مطالعه را نشان مي دهد. در بخش جنوب شرقي اين منطقه، یک بي هنجاري مغناطيسي دو قطبي با بيشينه ۴۹۷۵۸ نانوتسلا و کمينه ۴۸۴۴۱ نانوتسلا مشاهده مي شود.



شکل ۶: ميدان مغناطيسي کل محدوده مورد مطالعه در منطقه ايله

ميدان مغناطيسي شکل ۶، در واقع ميدان هاي مغناطيسي حاصل از ساختارهاي منطقه اي و محلي موجود در منطقه مورد مطالعه را نيز در بر دارد، بنابراين نياز است تا اثر ميدان مغناطيسي منطقه اي از روی داده هاي ميدان مغناطيسي باقي مانده که بعد از تصحيح IGRF حاصل مي شود، حذف شود تا در نهايت نقشه ميدان مغناطيسي محلي که مطلوب ما است، حاصل گردد. اگر ميدان منطقه اي غالبی در منطقه داده برداري وجود نداشته باشد، ميدان محلي حاصل از فیلتر روند سطحي، با ميدان حاصل از تصحيح IGRF تفاوتی نخواهد داشت.

شکل ۷ ميدان مغناطيس باقي مانده (محلي) محدوده مورد مطالعه برای روند سطحي درجه یک را نشان مي دهد. بعد از حذف اثر ميدان مغناطيسي منطقه اي، مقادير بيشينه و کمينه ميدان مغناطيسي تغيير مي کند. نقشه ميدان مغناطيسي محلي، مناسب برای انجام تحليل هاي کمی است، چرا که دقيقاً مقادير ميدان مغناطيسي توليد شده به وسيله چشمه مغناطيسي موجود در محدوده مطالعاتي را نشان مي دهد.

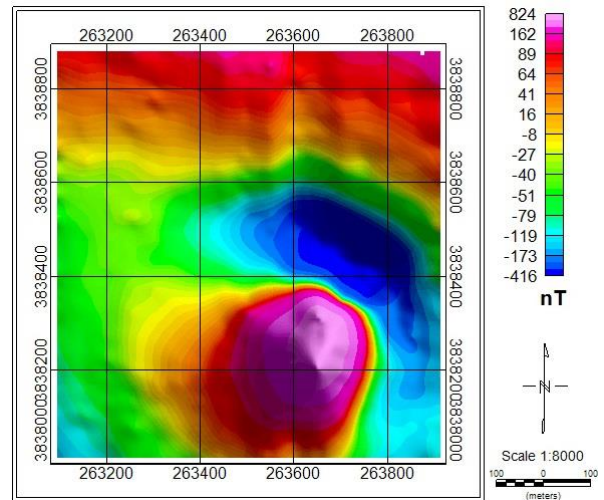


شکل ۵: نقشه زمين شناسي منطقه مورد مطالعه (ايله)

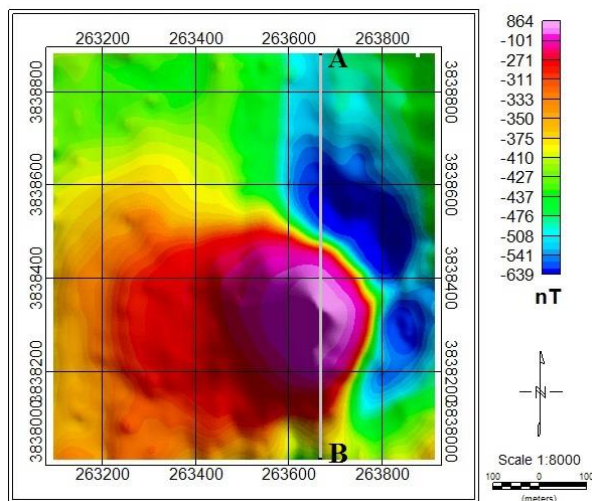
### ۸- ميدان مغناطيسي منطقه ايله

برداشت داده مغناطيسي در منطقه ايله با سه دستگاه همزمان و یک دستگاه نيز در منطقه به عنوان ايستگاه مينا برای تصحيح روزانه داده ها، انجام پذيرفته است. در اين محدوده، فواصل پروفيل ها ۵۰ متر در جهت شمال- جنوب و فاصله ايستگاه ها ۲۰ متر انتخاب شده است و در بعضی نواحی با فواصل ۱۰ متر نيز برداشت انجام گرفته است. ابعاد محدوده مطالعاتي ۸۳۰×۸۳۰ متر با وسعتی در حدود ۶۸۸۹۰۰ متر مربع که در مجموع ۱۷ پروفيل و تعداد ۵۸۹ داده ميدان

شده با استفاده از نرم افزار مدل ویژن را نشان می دهند. با توجه به شکل وارون سازی شده برای چشمه بی هنجاری می توان نتیجه گرفت که عمق بخش شمالی توده، تاحدودی کمتر از بخش جنوبی است، به طوری که عمق کمینه، بیشینه و مرکز توده به ترتیب در حدود ۷۵، ۱۷۵ و ۱۲۰ متر است. همچنین طول چشمه در راستای پروفیل AB، در حدود ۱۶۰ متر و بیشترین ضخامت در جهت افزایش عمق، در حدود ۹۰ متر است.



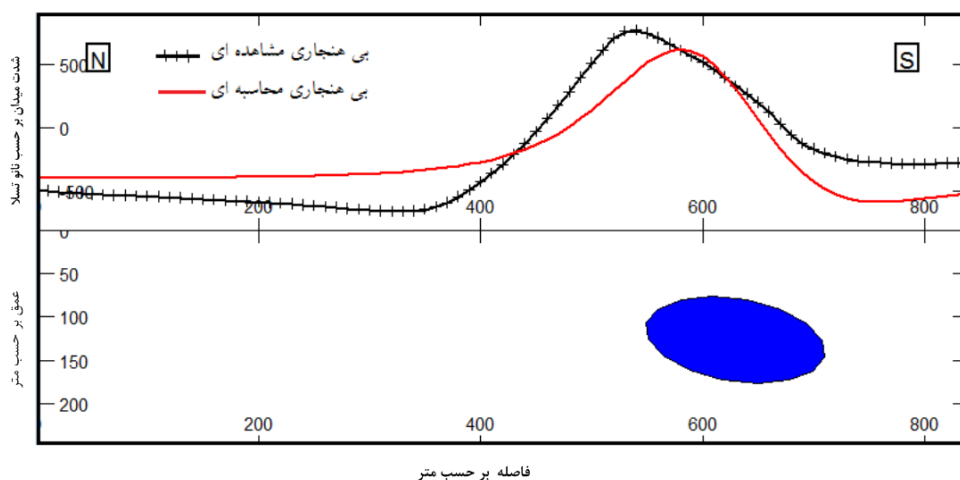
شکل ۷: میدان مغناطیس باقی مانده (محلی) محدوده مورد مطالعه



شکل ۸: موقعیت و راستای پروفیل AB در روی نقشه میدان مغناطیسی تبدیل به قطب شده منطقه ایله

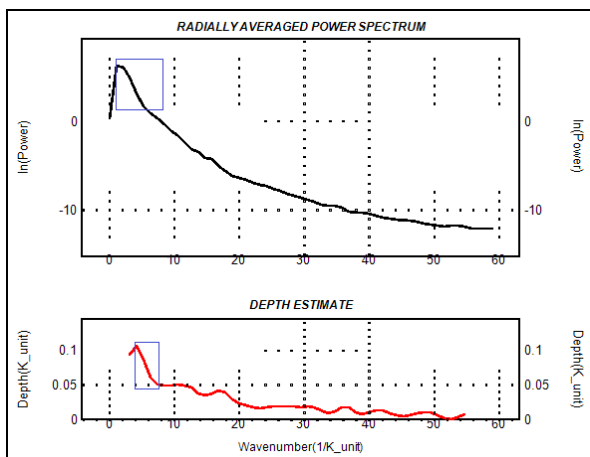
#### ۸-۱- مدل سازی چشمه بی هنجاری مغناطیسی منطقه ایله با استفاده از نرم افزار مدل ویژن

برای مدل سازی با نرم افزار مدل ویژن، داده برداری در راستای پروفیل AB به طول ۸۴۰ متر و فاصله داده برداری ۱۰ متر با راستای شمالی- جنوبی بر روی میدان مغناطیسی تبدیل به قطب شده، انجام پذیرفت (شکل ۸). منحنی مشکی رنگ در شکل ۹، تغییرات میدان مغناطیسی در راستای پروفیل AB را نشان می دهد. همچنین در شکل ۹، بیضی آبی رنگ و منحنی قرمز رنگ به ترتیب توده مدل سازی شده در راستای پروفیل AB و میدان مغناطیسی محاسبه شده برای توده مدل سازی



شکل ۹: تغییرات بی هنجاری مشاهده ای (منحنی مشکی) و محاسبه ای (منحنی قرمز) مربوط به توده مدل سازی شده برای منطقه ایله در راستای پروفیل AB

روش از تمامی طول موج‌های موجود در داده‌ها برای تخمین عمق متوسط سطح بالای توده مولد بی‌هنجاری و یا تعیین تعداد لایه و عمق حدودی بالا و پایین آنها استفاده می‌کند. با توجه به منحنی تخمین عمق در برابر عدد موج (منحنی قرمز رنگ در شکل ۱۱) که از تفسیر منحنی تغییرات لگاریتم طیف توان در مقابل عدد موج (منحنی مشکی رنگ در شکل ۱۱) حاصل شده است، می‌توان بیشترین عمق توده زیر سطحی را در حدود ۱۱۰ متر تخمین زد. همچنین بر اساس بیشترین شیب طیف توان (بخش مشخص شده با مستطیل آبی در شکل ۱۱) که معرف چشمه عمیق است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۲)، عمق تقریبی سطح بالای توده مولد بی‌هنجاری بین ۵۰ تا ۱۱۰ متر برآورد می‌شود.



شکل ۱۱: تخمین عمق با روش طیف توان برای منطقه ایله

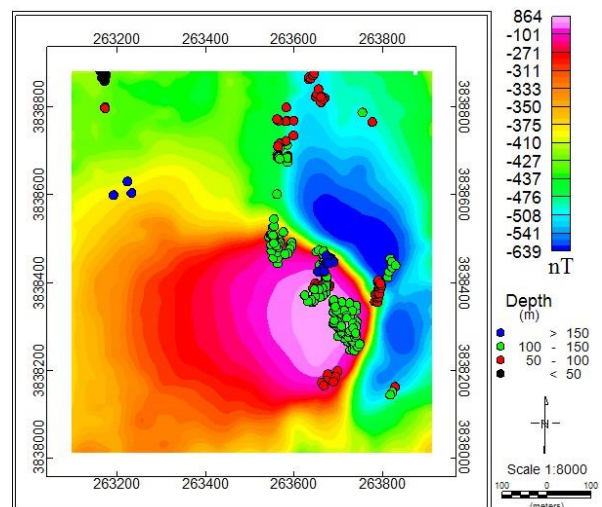
#### ۸-۴- استفاده از روش IGPSO برای تحلیل میدان گرانی کاذب منطقه ایله

برای اینکه بتوانیم تخمینی از محدوده توده معدنی آرایه کنیم، با تبدیل میدان مغناطیسی به میدان گرانی کاذب و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته، شکل، عمق، تباین چگالی و نیز حدود ساختار مدفون به دست خواهد آمد. برای تبدیل میدان مغناطیسی به میدان گرانی کاذب، تباین چگالی بین توده معدنی و محیط اطراف حدود  $1/8 \text{ gr/cm}^3$  و مغناطیدگی منطقه بر اساس میدان مغناطیسی کل کره زمین در محدوده مورد مطالعه و با در نظر گرفتن حساسیت مغناطیسی میانگین در حدود  $0.28$

#### ۸-۲- تخمین عمق با استفاده از روش دی کانوولوشن اویلر

با توجه به مدل‌سازی انجام گرفته با نرم‌افزار مدل ویژن (شکل ۹)، شکل توده زیرسطحی، بیضوی شکل است که آن را می‌توان شکلی بین کره و استوانه افقی در نظر گرفت. بر این اساس، ضریب ساختاری برای تخمین عمق با روش اویلر، میانگین ضریب ساختاری برای استوانه افقی و کره یعنی  $2/5$  در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۰ موقعیت نقاط تخمین عمق‌های انجام گرفته با روش اویلر با طول پنجره متحرک  $9 \times 9$  روی نقشه میدان مغناطیسی تبدیل به قطب شده محدوده مطالعاتی در منطقه ایله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل اخیر، گستره عمقی سطح بالای چشمه بی‌هنجاری مغناطیسی، بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، بر اساس دایره‌های سبز رنگ که بیشتر بر روی گوشه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی مورد نظر پراکنده و غالب هستند، قابل تخمین است.



شکل ۱۰: تخمین‌های عمقی به دست آمده از روش اویلر که بر روی نقشه میدان مغناطیسی تبدیل به قطب شده محدوده مورد مطالعه در منطقه ایله ترسیم شده است

#### ۸-۳- تخمین عمق با استفاده از روش طیف چگالی انرژی (طیف توان)

شکل ۱۱ تحلیل انجام شده بر روی داده میدان مغناطیسی برای تعیین عمق با روش طیف توان برای محدوده مطالعاتی در منطقه ایله با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت را نشان می‌دهد. این

می‌شود. کمترین خطای در نظر گرفته شده برای توقف تکرار الگوریتم IGPSO بر اساس تابع هدف ۰٫۰۵ است.

تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای هر بار اجرای برنامه ۳۰ تکرار است که مقادیر نهایی به دست آمده برای هر پارامتر ذخیره می‌شود. همچنین تعداد تکرار مستقل که برای مدل سازی وارون میدان گرانی کاذب ۶۰ تکرار در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴-الف تا شکل ۱۴-ه نمودار فراوانی متناظر با مقادیر به دست آمده برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل را نشان می‌دهد.

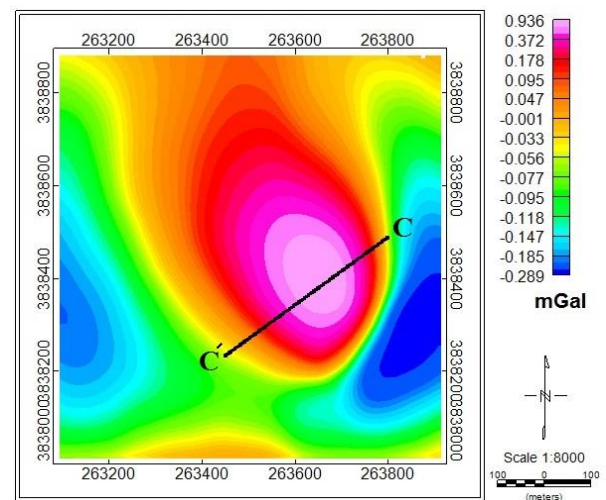
با توجه به شکل‌های اخیر بیشترین مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل به ترتیب در بازه‌های ۱۰۷٫۵ تا ۱۱۲٫۵ متر، ۱٫۸۵ تا ۱٫۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۵۳٫۵ تا ۵۶٫۶ متر، ۱۵۰ تا ۱۵۵ متر و ۱٫۴۳ تا ۱٫۴۸ قرار دارند. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شده است، میانگین مقادیر واقع در این بازه‌ها به عنوان مقادیر نهایی برای پارامترهای توده مدفون در نظر گرفته می‌شوند که به ترتیب برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل ۱۱۱٫۸ متر، ۱٫۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۵۶٫۲ متر، ۱۵۳٫۷ متر و ۱٫۴۶۳ هستند (جدول ۲). بر اساس فاکتور شکل محاسبه شده، شکل هندسی چشمه به شکل هندسی کره نزدیکتر است. خطای بین میدان گرانی تئوری نوفه‌دار و میدان گرانی محاسبه شده به وسیله IGPSO، ۰٫۰۸۲ برآورد شده است.

شکل ۱۵-الف داده گرانی کاذب در طول پروفیل  $CC'$  و نیز میدان گرانی محاسبه شده متناسب با پارامترهای تخمین زده شده با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته و شکل ۱۵-ب اختلاف بین میدان گرانی کاذب و نیز میدان گرانی محاسبه‌ای در نقاط اندازه‌گیری متناظر را نشان می‌دهد.

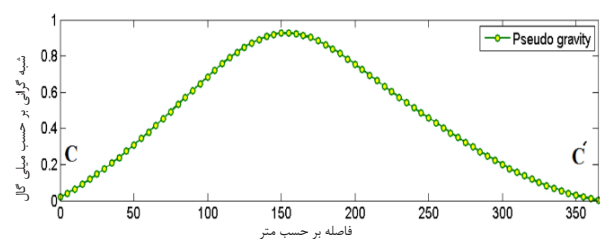
همچنین شکل ۱۵-ج مقطع دوبعدی از ساختار زیر سطحی منتج شده از وارون‌سازی روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته برای بی‌هنجاری گرانی کاذب محدوده مطالعاتی در ایله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵-ج می‌توان عمق سطح بالای توده را در گستره ۵۵ (در وسط توده) تا ۱۱۱ متر (در حاشیه توده) در نظر گرفت.

در واحد CGS، ۱۴ آمپر بر متر یا ۰٫۱۴ در واحد گوسی (CGS) تعیین شده است.

شکل ۱۲ نقشه میدان گرانی کاذب محدوده مطالعاتی در منطقه ایله را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی توده زیر سطحی، پروفیل  $CC'$  بر روی بی‌هنجاری گرانی کاذب به طول ۳۶۵ متر و فاصله داده‌برداری ۵ متر زده شده است، بنابراین در ۷۴ نقطه داده گرانی کاذب برداشت شده است. شکل ۱۳ تغییرات میدان گرانی کاذب در طول پروفیل  $CC'$  را نشان می‌دهد.

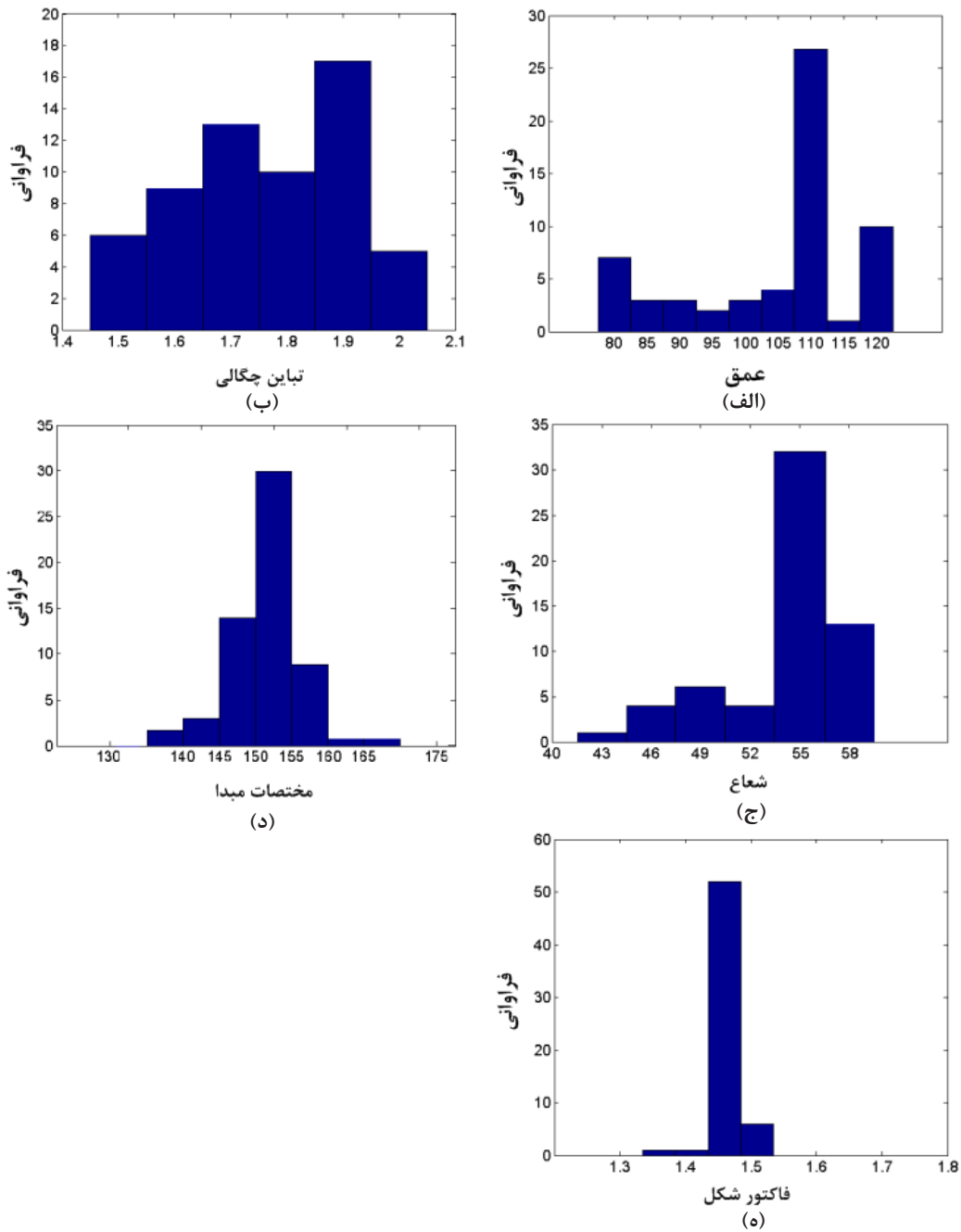


شکل ۱۲: نقشه میدان گرانی کاذب محدوده مطالعاتی در منطقه ایله



شکل ۱۳: تغییرات میدان گرانی کاذب در طول پروفیل  $CC'$

برای مدل‌سازی میدان گرانی کاذب با روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته IGPSO صد مدل اولیه با توجه به گستره در نظر گرفته شده برای پارامترهای عمق، چگالی، شعاع، مختصات نقطه مبدا و فاکتور شکل تولید

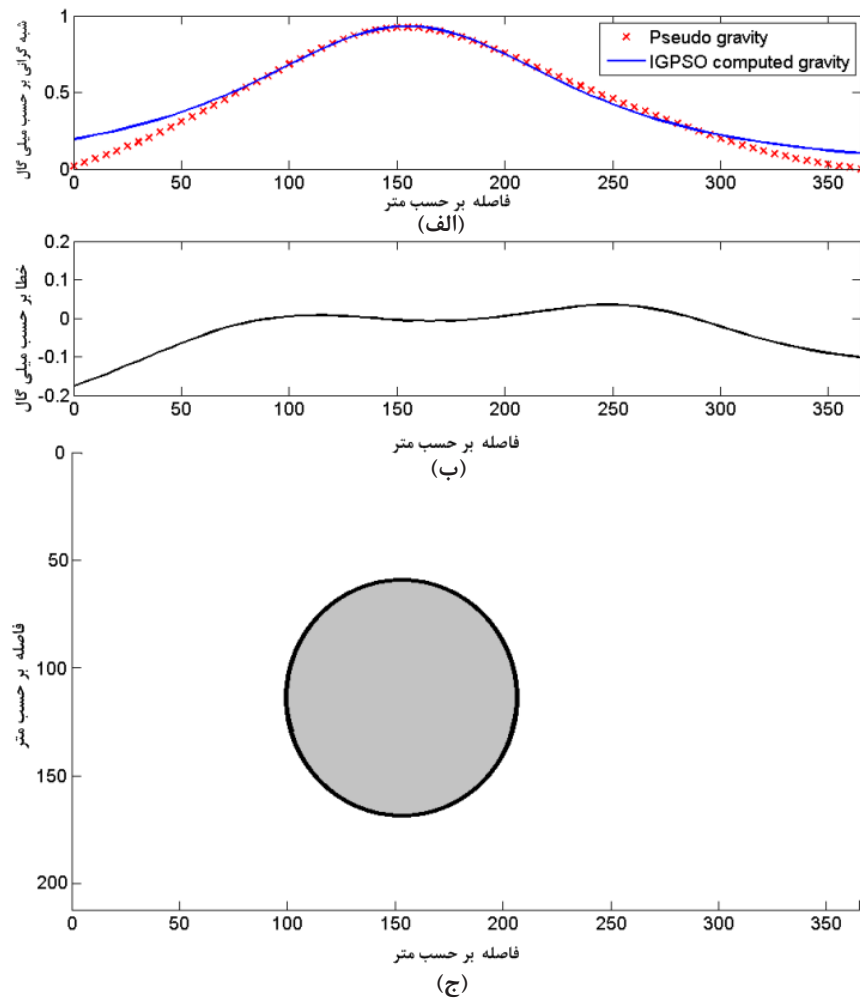


شكل ۱۴: نمودار فراواني متناظر با مقادير به دست آمده براي پارامترهاي (الف) عمق، (ب) تباين چگالي، (ج) شعاع، (د) مختصات مبدا و (ه) فاكتور شكل با استفاده از الگوريتم بهينه سازي ازدحام ذرات سراسري بهبود يافته براي داده گراني كاذب منطقه ايله

جدول ۲: گستره در نظر گرفته شده و مقادير به دست آمده از تحليل ميدان گراني كاذب منطقه ايله

خطا (misfit)	فاكتور شكل (q)	نقطه مبدا ( $x_0$ ) (متر)	چگالي ( $\sigma$ ) (گرم بر سانتيمتر مكعب)	شعاع (R) (متر)	عمق (z) (متر)	پارامتر
-	۰٫۱ تا ۲	۱۰۰ تا ۲۰۰	۰٫۷ تا ۳	۳۰ تا ۸۰	۷۰ تا ۱۴۰	گستره
-	۱٫۴۳ تا ۱٫۴۸	۱۵۰ تا ۱۵۵	۱٫۸۵ تا ۱٫۹۵	۵۳٫۵ تا ۵۶٫۶	۱۰۷٫۵ تا ۱۱۲٫۵	گستره بيشينه
۰٫۰۸۲	۱٫۴۶۳	۱۵۳٫۷	۱٫۹۳	۵۶٫۲	۱۱۱٫۸	مقادير محاسبه شده





شکل ۱۵: الف) میدان گرانی کاذب در طول پروفیل  $CC'$  و میدان گرانی محاسبه شده با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته، ب) اختلاف بین میدان گرانی کاذب و نیز میدان گرانی محاسبه‌ای در نقاط اندازه‌گیری متناظر، ج) مقطع دو بعدی ساختار مدفون مدل‌سازی شده بر اساس پارامترهای تخمین زده شده با روش IGPSO برای منطقه ایله

## ۹- نتیجه‌گیری

با توجه به مقدار فاکتور شکل محاسبه شده ( $q=1/463$ ) به وسیله روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته با استفاده از داده گرانی کاذب، شکل هندسی توده به کره قابل تشبیه است؛ به طوری که عمق مرکز توده ۱۱۱٫۸ متر و شعاع توده ۵۶٫۲ متر تخمین زده شده است، بنابراین IGPSO عمق سطح بالای مولد بی‌هنجاری را در گستره ۵۵٫۶ متر در بالاترین نقطه توده تا ۱۱۱٫۸ متر در لبه‌های آن برآورد کرده است. تمامی روش‌ها، گستره تقریباً یکسانی برای عمق سطح بالای توده مدفون تخمین زده‌اند. حفاری‌های انجام گرفته در محدوده مطالعاتی، عمق میانگین مرکز توده را ۱۰۳٫۲ متر نشان می‌دهد. عمق به دست آمده برای مرکز توده با استفاده از وارون‌سازی انجام گرفته با نرم‌افزار مدل ویزن ۱۲۰ متر

به دلیل ناهمگنی زمین و وجود نوفه در داده‌های میدان پتانسیل، وجود خطا در نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها با روش‌های مختلف امری اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله، میدان مغناطیسی و نیز میدان گرانی کاذب محدوده مطالعاتی در ایله با روش‌های مختلفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. وارون‌سازی میدان مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار مدل ویزن عمق سطح بالای توده را بین ۷۵ متر در بالاترین نقطه توده تا ۱۰۰ متر در مرز شمالی و ۱۳۵ متر در مرز جنوبی برآورد کرده است. روش‌های مرسوم اوپلر و طیف توان نیز عمق سطح بالای توده را با استفاده از داده میدان مغناطیسی در گستره ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر و ۵۰ تا ۱۱۰ متر تخمین زده‌اند.

Geofizika, 37(2): 213-235.

- [10] Eshaghzadeh, A., Sahebari, S. S., and Kalantari, R. A. (2020). "Determination of sheet-like geological structures parameters using Marquardt inversion of the magnetic data". *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 49: 450-457.
- [11] Bektas, O., Ravat, D., Bu"yu"ksarac, A., Bilim, F., and Ates, A. (2007). "Regional geothermal characterisation of East Anatolia from aeromagnetic, heat flow and gravity data". *Pure and Applied Geophysics*, 164: 976-986.
- [12] Nyabeze, P. K., and Gwavava, O. (2016). "Investigating heat and magnetic source depths in the Soutpansberg Basin, South Africa: Exploring the Soutpansberg Basin Geothermal Field". *Geothermal Energy*, 4(8): 1-22.
- [13] Gu"ndog"du, N. Y., Candansayar, M. E., and Genc, E. (2017). "Rescue archaeology application: Investigation of Kuriki mound archaeological area (Batman, SE Turkey) by using direct current resistivity and magnetic methods". *Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG)*, 22(2): 177-189.
- [14] Al-Garni, M. A. (2011). "Magnetic and DC resistivity investigation for groundwater in a complex subsurface terrain". *Arabian Journal of Geosciences*, 4: 385-400.
- [15] Araffa, S. A. S., Helaly, A. S., Khozium, A., Lala, A. M. S., Soliman, S. A., and Hassan, N. M. (2015). "Delineating groundwater and subsurface structures by using 2D resistivity, gravity and 3D magnetic data interpretation around Cairo-Belbies Desert road, Egypt". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 4: 134-146.
- [16] Boschetti, F., Denith, M. C., and List, R. D. (1997). "Inversion of potential field data by genetic algorithms". *Geophysical Prospecting*, 45: 461-478.
- [17] Kaftan, I. (2017). "Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm". *Acta Geophysica*, 65: 627-634.
- [18] van den Bergh, F., and Engelbrecht, A. P. (2004). "A Cooperative approach to particle swarm optimization". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8: 225-239.
- [19] Essa, K. S., and Elhussein, M. (2017b). "2D dipping dike magnetic data interpretation using a robust particle swarm optimization". *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, Discuss*.
- [20] Eshaghzadeh, A., and Sahebari, S. S. (2020). "Application of PSO Algorithm based on the mean value of maximum frequency distribution for 2-D inverse modeling of gravity data due to a finite vertical cylinder
- است، بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده، خطای تخمین عمق مرکز توده با استفاده از نرم‌افزار مدل ویتن و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سراسری بهبودیافته به ترتیب ۱۴٪ و ۷۷٪ است که موید عملکرد بهتر الگوریتم بهینه‌سازی است.
- ۱۰- مراجع**
- [1] Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., and Peirce, J. W. (2005). "The historical development of the magnetic method in exploration". *Geophysics*, 70(6): 33-61.
- [2] Abdelrahman, E. M., Soliman, K. S., El-Araby, T. M., Abo-Ezz, E. R., and Essa, K. S. (2009). "A least-squares standard deviation method to interpret magnetic anomalies due to thin dikes". *Near Surface Geophysics*, 7: 41-46.
- [3] Ekinci, Y. L., Balkaya, C. S., Eren, A., Kaya, M. A., and Lightfoot, C. S. (2014). "Geomagnetic and geoelectrical prospecting for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine City in Midwestern Turkey". *Journal of Geophysics and Engineering*, 11: 015012.
- [4] Abubakar, R., Muxworthy, A. R., Sephton, M. A., Southern, P., Watson, J. S., and Fraser, A. J. (2015). "Formation of magnetic minerals at hydrocarbon-generation conditions". *Marine and Petroleum Geology*, 68: 509-519.
- [5] Ivakhnenkoa, O. P., Abirova, R., and Logvinenok, A. (2015). "New method for characterisation of petroleum reservoir fluid mineral deposits using magnetic analysis". *Energy Procedia*, 76: 454-462.
- [6] Farquharson, C. G., and Craven, J. A. (2009). "Three-dimensional inversion of magnetotelluric data for mineral exploration: An example from the McArthur River uranium deposit, Saskatchewan, Canada". *Journal of Applied Geophysics*, 68: 450-458.
- [7] Abedi, M., Gholami, A., and Norouzi, G. H. (2013). "A stable downward continuation of airborne magnetic data: A case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran". *Computers and Geosciences*, 52: 269-280.
- [8] Abdelrahman, E. M., Essa, K. S., El-Araby, T., and Abo-Ezz, E. R. (2016). "Depth and shape solutions from second moving average residual magnetic anomalies". *Exploration Geophysics*, 47: 58-66.
- [9] Eshaghzadeh, A., and Sahebari, S. S. (2020). "Multivariable teaching-learning-based optimization (MTLBO) algorithm for estimating the structural parameters of the buried mass by magnetic data".

- Computing, 9: 525-535.
- [32] Di Maio, R., Rani, P., Piegari, E., and Milano, L. (2016). "Selfpotential data inversion through a genetic-price algorithm". Computers and Geosciences, 94: 86-95.
- [33] Eshaghzadeh, A., and Hajian, A. (2020). "Multivariable Modified Teaching Learning Based Optimization (MM-TLBO) Algorithm for Inverse Modeling of Residual Gravity Anomaly Generated by Simple Geometric Shapes". Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 25(4): 463-476.
- [34] Ku, C. C., and Sharp, J. A. (1983). "Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling". Geophysics, 48: 754-774.
- [35] Thompson, D. T. (1982). "EULDPH—A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data". Geophysics, 47: 31-37.
- [36] Abdelrahman, E. M., Abo-ezz, E. R., and Essa, K. S. (2012). "Parametric inversion of residual magnetic anomalies due to simple geometric bodies". Exploration Geophysics, 43: 178-189.
- [37] Pilkington, M., and Keating, P. (2006). "The relationship between local wavenumber and analytic signal in magnetic interpretation". Geophysics, 71: L1-L3.
- [38] Abdelrahman, E. M., El-Araby, H. M., El-Araby, T. M., and Essa, K. S. (2003). "A least-squares minimization approach to depth determination from magnetic data". Pure and Applied Geophysics, 160: 1259-1271.
- [39] Essa, K. S., and Elhussein, M. (2017a). "A new approach for the interpretation of magnetic data by a 2-D dipping dike". Journal of Applied Geophysics, 136: 431-443.
- [40] Eshaghzadeh, A., Sahebari, S. S., and Kalantari, R. A. (2019). "Inverse modeling of gravity field data due to finite vertical cylinder using modular neural network and least-squares standard deviation method". Iranian Journal of Earth Sciences, 11(4): 267-276
- [41] Tlas, M., and Asfahani, J. (2011). "Fair function minimization for interpretation of magnetic anomalies due to thin dikes, sphere and faults". Journal of Applied Geophysics, 75: 237-243.
- [42] Fedi, M. (2007). "DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources". Geophysics, 72: I1-I11.
- [43] Abdelrahman, E. M., Abo-Ezz, E. R., Essa, K. S., El-Araby, T. M., and Soliman, K. S. (2007). "A new least-squares minimization approach to depth and shape determination from magnetic data". Geophysical shape". Quaderni di Geofisica, 162: 1-22.
- [21] Eshaghzadeh, A., and Hajian, A. (2021). "2-D gravity inverse modelling of anticlinal structure using improved particle swarm optimization (IPSO)". Arabian Journal of Geosciences, 14: 1378.
- [22] Fathi, M., Alimoradi, A., and Hemati, H. (2021). "Optimizing Extreme Learning Machine Algorithm using Particle Swarm Optimization to Estimate Iron Ore Grade". Journal of Mining and Environment (JME), 2: 397-411
- [23] Ekinici, Y. L., Balkaya, C., Go"ktu"rkler, G., and Turan, S. (2016). "Model parameter estimations from residual gravity anomalies due to simple-shaped sources using differential evolution algorithm". Journal of Applied Geophysics, 129: 133-147.
- [24] Balkaya, C., Ekinici, Y. L., Go"ktu"rkler, G., and Turan, S. (2017). "3D non-linear inversion of magnetic anomalies caused by prismatic bodies using differential evolution algorithm". Journal of Applied Geophysics, 136: 372-386.
- [25] Biswas, A. (2015). "Interpretation of residual gravity anomaly caused by a simple shaped body using very fast simulated annealing global optimization". Geoscience Frontiers, 6: 875-893.
- [26] Al-Garni, M. A. (2013). "Inversion of residual gravity anomalies using neural network". Arabian Journal of Geosciences, 6: 1509-1516.
- [27] Eshaghzadeh, A., and Hajian, A. (2018). "2D inverse modeling of residual gravity anomalies from Simple geometric shapes using Modular Feed-forward Neural Network". Annals of Geophysics, 61: SE115.
- [28] Eshaghzadeh, A., Sahebari, S. S., and Kalantari, R. A. (2021). "2-D Anticlinal Structure Modeling Using Feed-Forward Neural Network (FNN) Inversion of Profile Gravity Data: A Case Study from Iran". Journal of the Earth and Space Physics, 46: 79-91.
- [29] Colomi, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V. (1991). "Distributed optimization by ant colonies". In Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, 134-142.
- [30] Srivastava, S., Datta, D., Agarwal, B. N. P., and Mehta, S. (2014). "Applications of ant colony optimization in determination of source parameters from total gradient of potential fields". Near Surface Geophysics, 12: 373-389.
- [31] Bresco, M., Raiconi, G., Barone, F., DeRosa, R., and Milano, L. (2005). "Genetic approach helps to speed classical Price algorithm for global optimization". Soft

- [53] Singh, A., and Biswas, A. (2016). "Application of global particle swarm optimization for inversion of residual gravity anomalies over geological bodies with idealized geometries". *Natural Resources Research*, 25: 297-314.
- [54] Singh, K. K., and Singh, U. K. (2017). "Application of particle swarm optimization for gravity inversion of 2.5-D sedimentary basins using variable density contrast". *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6: 193-198.
- [55] Roshan, R., and Singh, U. K. (2017). "Inversion of residual gravity anomalies using tuned PSO". *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6: 71-79.
- [56] Essa, K. S., and Elhoussein, M. (2018). "Gravity Data Interpretation Using Different New Algorithms: A Comparative Study. Gravity-Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect". Licensee InTech. DOI: 10.5772/intechopen.71086.
- [57] Essa, K. S., and Elhoussein, M. (2018). "PSO (Particle Swarm Optimization) for Interpretation of Magnetic Anomalies Caused by Simple Geometrical Structures". *Pure and Applied Geophysics*, 175: 3539-3553.
- [58] Sweilam, N. H., El-Metwally, K., and Abdelazeem, M. (2007). "Selfpotential signal inversion to simple polarized bodies using the particle swarm optimization method: A visibility study". *Journal of Applied Geophysics*, 6: 195-208.
- [59] Abdelrahman, E. M., Bayoumi, A. I., Abdelhady, Y. E., Gobash, M. M., and EL-Araby, H. M. (1989). "Gravity interpretation using correlation factors between successive leastsquares residual anomalies". *Geophysics*, 54: 1614-1621.
- [60] Blakely, R. J. (1995). "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications". Cambridge University Press.
- Prospecting, 55: 433-446.
- [44] Abo-Ezz, E. R., and Essa, K. S. (2016). "A least-squares minimization approach for model parameters estimate by using a new magnetic anomaly formula". *Pure and Applied Geophysics*, 173: 1265-1278.
- [45] Eshaghzadeh, A., Dehghanpour, A., and Sahebari, S. S. (2019). "Marquardt inverse modeling of the residual gravity anomalies due to simple geometric structures: A case study of chromite deposit". *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 49(2): 153-180.
- [46] Tlas, M., and Asfahani, J. (2015). "The simplex algorithm for best estimate of magnetic parameters related to simple geometric shaped structures". *Mathematical Geosciences*, 47: 301-316.
- [47] Eshaghzadeh, A., Sahebari, S. S., and Kalantari, R. A. (2020). "Determination of sheet-like geological structures parameters using Marquardt inversion of the magnetic data". *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 49: 450-457.
- [48] Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, 4: 1942-1948.
- [49] Monteiro Santos, F. A. (2010). "Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization". *Computers & Geosciences*, 36: 1185-1190.
- [50] Touthmalani, R. (2013a). "Comparison result of inversion of gravity data of a fault by particle swarm optimization and Levenberg-Marquardt methods". *SpringerPlus*, 2: 462.
- [51] Touthmalani, R. (2013b). "Gravity inversion of a fault by Particle Swarm Optimization (PSO)". *SpringerPlus*, 2: 315.
- [52] Pallero, J. L. G., Fernández-Martínez, J. L., Bonvalot, S., and Fudym, O. (2015). "Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization". *Journal of Applied Geophysics*, 116: 180-191.

---

<sup>1</sup> Simulated annealing