

مدل سازی معکوس سه بُعدی مدل های گرانی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه ها

میترا محمدزاده شادمهری^۱، محمدعلی شریفی^۱، وحید ابراهیمزاده اردستانی^{۲*}، عبدالرضا صفری^۱ و امین باغانی^۳

^۱گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۲مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۱۶)

چکیده

هدف از این پژوهش، مدل سازی معکوس سه بُعدی بی هنجاری های گرانی به منظور دستیابی به مدل چگالی در مقاطع عمقی متفاوت است. در این تحقیق، از روش جدیدی بر مبنای روش های تصادفی در حل مسائل بهینه سازی معکوس در ژئوفیزیک استفاده شده است. الگوریتم های تکاملی از جمله روش های تصادفی ای هستند که می توان به کار گرفت. الگوریتم کلونی مورچگان از این دسته الگوریتم ها است، که از رفتار مورچه ها در طبیعت، برای یافتن کوتاه ترین مسیر از لانه تا غذا الهام گرفته است. با تعمیم این رفتار مورچه ها به مسئله های معکوس در ژئوفیزیک، به منظور یافتن مدلی که به بهترین وجه به داده های مشاهده ای برازش داده شده باشد، می توان از این الگوریتم استفاده کرد. برای پیاده سازی این الگوریتم برنامه ای به زبان مَتَلَب (MATLAB) نوشته شده است. به منظور بررسی کارایی روش، سه مدل مصنوعی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. ساختار مدل های مصنوعی مورد نظر به صورت ترکیبی از مکعب های سه بُعدی در نظر گرفته شده است، تا بتوان هر ساختار نامشخص هندسی را با استفاده از آن مدل کرد. در مثال اول، هدف، بررسی بی هنجاری حاصل از دو مدل ساده با تباین چگالی متفاوت است که در عمق های متفاوتی قرار دارند. در مثال دوم، به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم در معکوس سازی بی هنجاری هایی با مقادیر کوچک، مدلی با هندسه پلکانی در عمق های گوناگون با تباین چگالی ثابت مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت در مثال سوم، به بررسی بی هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه پیچیده T و L و تباین چگالی متفاوت پرداخته شده است. این روش برای مدل های مصنوعی بدون نوفه و با نوفه ۵٪ آزمایش شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان می توان بی هنجاری حاصل از مدل هایی با هندسه پیچیده و جهت دار را به خوبی مدل سازی کرد و همچنین این روش برای ترکیبی از مدل ها با تباین چگالی گوناگون که در عمق های متفاوتی قرار گرفته اند نیز، قابل استفاده است. علاوه بر این، این الگوریتم توانایی معکوس سازی بی هنجاری هایی در حدود 10^{-3} MGAL را دارد.

واژه های کلیدی: الگوریتم کلونی مورچگان، مدل سازی معکوس، مدل مصنوعی، داده گرانی

Inverse modeling of three-dimensional gravity models using the ant colony optimization algorithm

Mitra Mohammadzade Shadmehri¹, Mohammad Ali Sharifi¹, Vahid Ebrahimzade Ardestani^{2*}, Abdolreza Safari¹ and Amin Baghani³

¹Department of Surveying Engineering, University of Tehran, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Department of Photogrammetry Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Iran

(Received: 24 December 2012, accepted: 7 December 2013)

Summary

The objective of this study is the 3D modeling inversion of gravity anomalies in order to obtain a density model in different depth sections. We used a new method based on stochastic methods. Among the stochastic methods that can be applied for solving inverse optimization problems in geophysics are meta-heuristic algorithms which are based on artificial intelligence. The ant colony algorithm is categorized in this group of algorithms. It works on the basis of probability and trial and error and follows ants' behavior in finding the shortest distance between the nest and the food. This behavior of ants is closely similar to the inverse problems in geophysics which try to find the best solution for the unknowns in observation model. Therefore, this idea is applied for solving linear inverse problems. A MATLAB-based inversion code for the presented method was prepared. To examine the performance of this method, three different artificial models were assayed. The structure of these models was considered as a combination of 3-dimensional cubes so as to model every unknown geometrical structure. In the first example, our purpose was to investigate interferential anomalies resulting from two simple models with different density contrasts located in different depths. In the second example, to show the ability of the algorithm in an inversion using small anomalies, a model of an irregular geometry was assessed in different depths. Finally, in the third example, an interferential anomaly resulting from two models of complicated geometry, namely T and L and of different density contrasts was assessed. This method was applied for artificial models with and without noise. The results show that for an inversion by the use of the ant colony algorithm, there is no need to separate the interferential anomaly and it is possible to use it for a combination of density contrasts. Also, this algorithm is able to inverse anomalies of an order of 10^{-3} MGAL.

These anomalies belong to very small causative bodies such as: cavities and small ore-bodies. These anomalies are the main object of environmental or engineering geophysics.

The algorithm is semi-automatic and search the best results without comprehensive pre-conditions. The method is well designed to consider the multiple anomalies in complex conditions. This character enables us to use it for interpretation of complex anomalies caused by geological sources where most of the semi-automatic methods are useless.

On the other hand, the inversion algorithm can be applied for different density contrasts. Relative positive or negative anomalies could be obtained by applying this method. This means that all different anomalies regarding their density contrasts can be detected and modelled through this method. Therefore we are not forced to isolate the object anomalies for inversion and this makes its application fast and easy for the whole surface of the Bougure residual anomalies. This character is very rarely obtainable in the published inversion algorithms. This character is particularly helpful when we would like to invert the precise data in the case of engineering geophysics.

Another advantage of this method is its velocity due to its usage of probability and trial and error theory. This advantage is very important when we are facing with a large set of data and parameters to invert. The high number of parameters is a major problem in linear inversion methods, but can be treated by this method very properly.

Keywords: Ant colony algorithm, modeling inversion, artificial model, gravity data

۱ مقدمه

مدل‌سازی معکوس بی‌هنجاری‌گرانی، به فرایند عددی‌ساختن یک مدل از ساختار توده جرمی در زیر زمین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده روی سطح زمین و یک سری اطلاعات اولیه اطلاق می‌شود. سپس از مدل به دست آمده می‌توان تفسیرهایی از ساختار زمین‌شناسی عرضه کرد، در واقع مدل‌سازی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل تفسیر داده‌ها است (نینگ و همکاران، ۲۰۰۹).

هدف اصلی مسائل معکوس در گرانی‌سنجی، دستیابی به اطلاعاتی در ارتباط با ساختار درونی زمین است که از راه اندازه‌گیری‌هایی روی سطح زمین صورت می‌گیرد. اما مشکل اساسی در حل این دسته از مسائل، نبود یکتایی جواب است (بارباروسا و جوآ، ۱۹۹۴). به منظور فائق آمدن بر این مشکل می‌توان از اطلاعات اضافه‌ای در ارتباط با پارامترهای مدل (ساختار زیرسطحی) و یا پارامترهای داده‌ها (ویژگی‌های آماری داده‌ها نظیر توزیع گاوسی) در فرایند مدل‌سازی معکوس استفاده کرد (جکسون، ۱۹۷۹؛ مونتیسون و همکاران، ۲۰۰۵).

در مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی، با توجه به هدف مسئله که تعیین‌کننده نوع پارامترهای مدل است، از دو نوع عملگر متفاوت استفاده می‌کنند. در حالت اول اگر هدف تعیین توزیع چگالی باشد، باید هندسه را ثابت فرض و از عملگر خطی استفاده کرد. در حالت دوم اگر هدف تعیین پارامترهای هندسی منبع باشد، باید تباین چگالی را ثابت فرض و از عملگر غیرخطی استفاده کرد. معمولاً برای تبدیل این دستگاه به یک دستگاه معادلات خطی، باید از تقریب‌های متداول نظیر بسط تیلور استفاده کرد (منکه، ۲۰۱۲؛ مونتیسون و همکاران، ۲۰۰۵).

به‌طور کلی روش‌های حل مسائل معکوس را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم کرد: (۱) روش‌های جست‌وجوی محلی، این روش‌ها بر مبنای دیفرانسیل‌گیری، مسائل

معکوس را به صورت تحلیلی حل می‌کنند. شرط استفاده از این روش‌ها در اختیار داشتن اطلاعات گرادیان تابع هدف است. این روش‌ها سرعت همگرایی زیادی در برآورد پارامترهای مدل دارند اما مناسب بودن آنها برای تابع هدف‌هایی که فقط یک کمینه محلی دارند، از محدودیت‌های آن به‌شمار می‌رود (سانایی و همکاران، ۲۰۰۸؛ بارباروسا و جوآ، ۱۹۹۴؛ سانایی و همکاران، ۲۰۰۹). (۲) روش‌های جست‌وجوی کلی، در صورتی که تابع هدف چندین کمینه محلی داشته باشد بایستی از روش‌های بهینه کلی استفاده شود. از جمله این روش‌ها می‌توان شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های تکاملی را نام برد که برای حل مسائل معکوس گرانی‌سنجی به علت نبود یکتایی جواب و همچنین امکان موجود بودن چندین کمینه محلی، بسیار مناسب است. علاوه بر این، با استفاده از این روش‌ها به آسانی می‌توان اطلاعات اضافه را وارد مسئله کرد (اسنوپک، ۲۰۰۵).

در این راستا، برای مدل‌سازی معکوس غیرخطی، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک GA (مونتیسون و همکاران، ۲۰۰۵)، الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات PSO (سانایی و همکاران، ۲۰۰۹) و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان ACO (سانایی و همکاران، ۲۰۰۸) استفاده شده است. مقایسه بین این سه الگوریتم و همچنین الگوریتم تاب‌کاری شبیه‌سازی شده (SA) نشان می‌دهد که الگوریتم‌های ACO و PSO دارای دقت و سرعت همگرایی بیشتری نسبت به GA و SA هستند (سانایی و همکاران، ۲۰۰۹). همان‌طور که پیش‌تر گفته شد در صورتی که هدف از معکوس‌سازی تعیین تباین چگالی باشد، با یک مسئله خطی روبه‌رو هستیم، و لازم است در حل مسائل معکوس خطی، از این دسته الگوریتم‌ها استفاده کرد.

در حال حاضر در زمینه بهینه‌سازی، الگوریتم کلونی مورچه‌ها روی مسائل بهینه‌سازی گوناگونی، به صورت

۱-۲ انتخاب مدل

مدلی که در اینجا به کار رفته است، یکی از معروف‌ترین مدل‌هایی است که پلوف (۱۹۷۶) برای مدل‌سازی سه‌بُعدی بی‌هنجاری گرانی بیان کرده است. در این مدل، مجموعه‌ای از بلوک‌های مکعبی برای تقریب شکل فرضیه به کار می‌رود. این تقریب سه‌بُعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. هریک از این بلوک‌ها می‌توانند اختلاف چگالی دلخواهی با محیط اطراف داشته باشند؛ بنابراین طبق اصل جمع‌پذیری اثر داده‌های گرانی، بی‌هنجاری گرانی در هر نقطه را می‌توان به صورت تقریبی از مجموع اثر هر کدام از بلوک‌ها دانست (بلکلی، ۱۹۹۶). یک منشور شش‌وجهی با چگالی یکنواخت ρ و با ابعاد مشخص شده در محدوده $x_1 \leq x \leq x_2$ ، $y_1 \leq y \leq y_2$ و $z_1 \leq z \leq z_2$ در مرکز مختصات، دارای گرانی قائم به صورت رابطه (۱) است:

$$g = G\rho \frac{z'}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx' dy' dz', \quad (1)$$

که پلوف (۱۹۷۶) با محاسبه عددی انتگرال بالا، رابطه (۲) را عرضه کرد (بلکلی ۱۹۹۶):

$$g = G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 u_{ijk} \begin{bmatrix} z_k \arctan \frac{x_i y_i}{z_k R_{ijk}} \\ -x_i \log(R_{ijk} + y_i) \\ -y_i \log(R_{ijk} + x_i) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

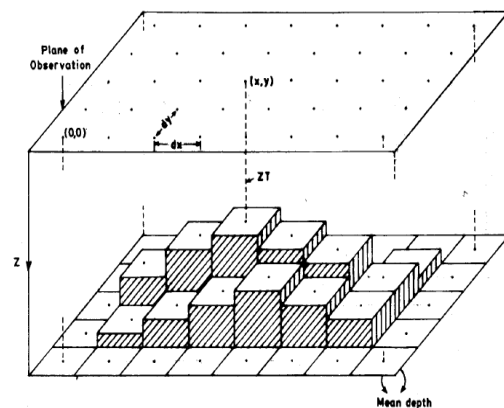
که: $u_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$ و $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ در این رابطه i, j, k هریک ممکن است مقادیر یک و دو داشته باشند که به ترتیب ابتدا و انتهای هر ضلع از بلوک مکعبی را در راستای x, y, z نشان می‌دهد. در حالت کلی می‌توان اثر بلوک‌های تولیدکننده بی‌هنجاری گرانی را به صورت ضرب ماتریسی در رابطه (۳) نشان داد:

$$g_p^{Calculate} = \sum_{q=1}^M A_{pq} \rho_q, \quad (3)$$

که $g_p^{Calculate}$ گرانی قائم در نقطه مشاهده‌ای p و A_{pq} ماتریسی است که شامل ضرایب هندسی وابسته به

موفقیت‌آمیز پیاده‌سازی و اجرا شده است. این الگوریتم برگرفته از زندگی واقعی مورچه‌ها است که در ۱۹۹۲ مارکو دوریگو عرضه کرد. از ویژگی‌های مثبت این الگوریتم می‌توان سرعت همگرایی زیاد و همچنین به‌کارگیری ساده و راحت آن در حل مسائل نام برد (دوریگو و بلام، ۲۰۰۵؛ دوریگو و دی‌کارو، ۱۹۹۹).

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در حکم روشی جدید برای معکوس‌سازی خطی داده‌های گرانی‌سنجی در دستیابی به مدل سه‌بُعدی چگالی در مقاطع عمقی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای نمایش کارایی این روش از مدل‌های مصنوعی‌ای با شکل‌های پیچیده و جهت‌دار استفاده شده است.



شکل ۱. برآورد یک توده سه‌بُعدی با مجموعه‌ای از منشورها (راما راتو و همکاران، ۱۹۹۹).

در ادامه، در بخش دوم پس از معرفی مدل مورد استفاده در این زمینه، به معرفی الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان پرداخته شده است. در بخش سوم، چگونگی پیاده‌سازی الگوریتم ACO در مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی شرح داده شده است. در بخش چهارم، داده‌های مصنوعی مورد استفاده توصیف شده و نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم ACO، مورد تحلیل قرار گرفته است. در انتها نیز به جمع‌بندی نتایج حاصل از این تحقیق پرداخته شده است.

حساب می‌آید و در حقیقت با حس کردن آثار فرومون، مورچه‌های دیگر که در جست‌وجوی غذا هستند می‌توانند مسیر را به سمت منبع غذاهایی که دیگران کشف کرده‌اند پیدا کنند. همچنین آنها بدون آنکه از کلیت مسیر آگاهی داشته باشند، قادرند از اثرات فرومون استفاده کنند تا کوتاه‌ترین مسیر از بین مسیرهای موجود به سمت غذا را انتخاب کنند (دوریگو و بلام، ۲۰۰۰؛ دوریگو و همکاران، ۲۰۰۶).

۳ پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه‌ها به منظور مدل‌سازی معکوس

مدل‌سازی معکوس، در واقع یک فرایند بهینه‌سازی است برای پیدا کردن مدلی که به بهترین وجه به داده‌های مشاهده‌ای برازش داده شود تا خطای تابع هدف کمینه شود. در میان روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم کلونی مورچه‌ها تاکنون روی مسائل بهینه‌سازی گوناگونی، به‌صورت موفقیت‌آمیز پیاده‌سازی و اجرا شده است. ارتباط بین الگوریتم کلونی مورچه‌ها و مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی در جدول ۱ آمده است. به‌منظور مدل‌سازی معکوس با استفاده از الگوریتم ACO، پارامترهای مدل یعنی تباین چگالی هر بلوک مکعبی که مجهول است، بایستی تعیین شود. در واقع با به کارگیری

بلوک مکعبی q و نقطه مشاهده‌ای p است. ρ_q تباین چگالی بلوک مکعبی q است که مجهول است و بایستی با الگوریتم ACO تعیین شود. چگالی برحسب kg/m^3 و شتاب گرانی برحسب $mGal$ است.

۲-۲ الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها که برگرفته از زندگی واقعی مورچه‌ها در طبیعت است، در ۱۹۹۲ از سوی مارکو دوریگو عرضه شد. الگوریتم کلونی مورچه‌ها از هوش جمعی بهره برده و برای این اصل بنا نهاده شده است که تعاملات محلی، محدود و ساده اعضای یک دسته جمعیت با محیط، منتهی به یک رفتار جمعی هوشمندانه می‌شود. این تعاملات غریزی‌اند و بدون نظارت صورت می‌گیرند و نتیجه آنها اغلب یک رفتار پیچیده و هوشمندانه جمعی و به‌طور خاص صورت گرفته و برخی بهینه‌سازی‌های پیچیده است (دوریگو و دی‌کارو، ۱۹۹۹).

منشأ پیدایش این روش فراابتکاری، الهام گرفتن از اثری است که مورچه‌ها هنگام حرکت برجای می‌گذارند و رفتاری که مورچه‌ها در برخورد با این اثر نشان می‌دهند. بسیاری از گونه‌های مورچه در مسیر حرکت خود ماده‌ای به نام فرومون روی زمین به‌جای می‌گذارند و به این روش یک اثر ایجاد می‌کنند که از آن برای علامت‌گذاری مسیر طی شده استفاده می‌شود. این اثر، ابزار ارتباطی آنها به

جدول ۱. ارتباط بین الگوریتم کلونی مورچه‌ها و مدل‌سازی معکوس خطی داده‌های گرانی.

نوع	رفتار مورچه‌ها برای جست‌وجو غذا	مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی
فرایند	به دنبال کوتاه‌ترین مسیر از لانه به منبع غذا	به دنبال بهترین مدل بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های محاسبه‌ای
محیط	طبیعت	مکعب‌های شش‌وجهی
معیار کنترل	فرومون گذاشته شده روی مسیرهای متفاوت، تغییر مسیر را کنترل می‌کند	مقادیر شایستگی حاصل از مدل‌های مختلف که از تابع برازندگی به‌دست می‌آیند، الگوریتم را کنترل می‌کند
نتیجه	یافتن کوتاه‌ترین مسیر	یافتن مدلی که به بهترین وجه به داده‌های مشاهده‌ای برازش داده شده و خطای تابع هدف آن کمینه باشد

گراف هر ستون نشان‌دهنده یک بلوک مکعبی است، در واقع یک گره که مورچه باید آن را ببیند. برای هر بلوک مکعبی با توجه به طول بازه تباین چگالی آن منطقه، سطر وجود دارد و هر مورچه بایستی یکی از سطرها را که بیانگر تباین چگالی آن بلوک مکعبی است انتخاب کند.

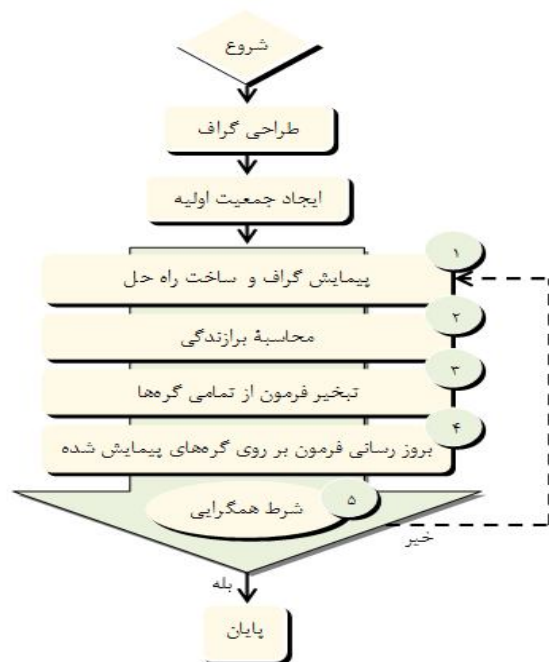
- ایجاد جمعیت اولیه: به منظور شروع الگوریتم بایستی روی هر گره از گراف مقدار فرومونی (ارزش) به مثابه مقدار اولیه (τ_0) به طور یکسان در نظر گرفته شود. τ_0 پارامتر مسئله است (دوریگو و استوتزل، ۲۰۰۳). به منظور افزایش سطح جست‌وجوی اکتشافی در شروع الگوریتم، فرومون‌های اولیه مسیر، ابتدا برآوردی دست بالا اتخاذ می‌شود. به این ترتیب، فاز جست‌وجوی اولیه بسیار اکتشافی خواهد بود و تا حدود زیادی از همگرایی زودرس یا محلی الگوریتم جلوگیری می‌شود، چرا که با وجود فرومون بالا، الگوریتم به اندازه کافی زمان خواهد داشت تا سطح وسیع‌تری از فضای احتمال را جست‌وجو کند.

- پیمایش گراف و ساخت راه حل: در اینجا به منظور تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مقدار تباین چگالی برای هر بلوک مکعبی، بایستی رابطه‌ای طراحی شود که نه فقط بر اساس احتمال کار کند بلکه بتوانیم انتخاب‌هایی بر اساس تصادف نیز داشته باشیم. بدین منظور رابطه (۴) متناسب با هدف مورد نظر طراحی شد. با استفاده از این رابطه مورچه‌ها می‌توانند بر اساس احتمال یا تصادف تصمیم بگیرند که کدام گره بایستی در حکم گره بعدی انتخاب شود (چه چگالی‌ای برای هر بلوک مکعبی انتخاب شود).

$$G_i = \begin{cases} \text{Max}\{ph_i(t)\} & \text{if } q_0 > q_i \\ J & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

که $ph_i(t)$ میزان فرومون موجود روی گره i در تکرار t ام است و $\text{Max}\{ph_i(t)\}$ نیز نشان‌دهنده انتخاب گره‌ای است که بیشترین فرومون انباشته شده روی خود را دارد.

این الگوریتم مورچه‌ها با عبور از هر بلوک مکعبی و اختصاص دادن مقداری به‌منزله تباین چگالی به آن مکعب، مجموعه‌ای از مدل‌های گوناگون را می‌سازند. با بررسی هریک از مدل‌ها در هر تکرار در نهایت بهترین مدل را در حکم جواب نهایی برمی‌گزینند. در ادامه، مدل ریاضی الگوریتم ACO طراحی شده برای مدلسازی معکوس داده‌های گرانی‌سنجی در یک نمودار گردشی مطابق شکل ۲ طراحی شده است.



شکل ۲. روند الگوریتم کلونی مورچه‌ها طراحی شده به منظور مدلسازی معکوس.

جزئیات اجزای شکل ۲ در زیر بررسی شده است:

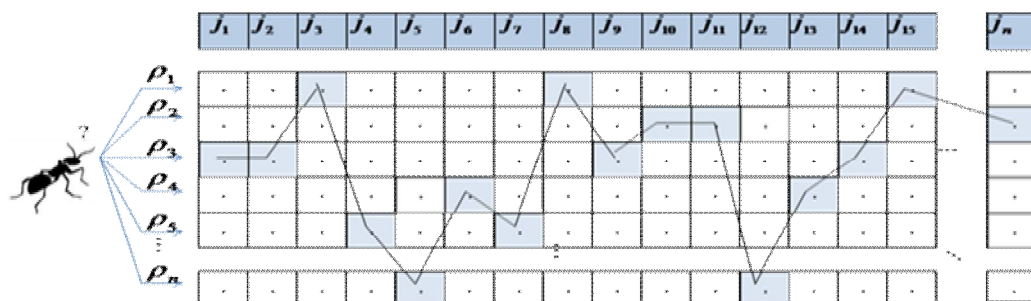
- طراحی گراف: به منظور حل یک مسئله بهینه‌سازی به روش کلونی مورچه‌ها، اولین قدم در مدلسازی مسئله طراحی گراف است. مدل‌ها نیز از راه پیمایش این گراف به توسط مورچه‌ها تولید می‌شود (تقوی فرد و همکاران، ۱۳۸۷). گراف ساخت راه حل برای این مسئله مطابق شکل ۳ طراحی شده است. در این

بی‌هنجاری گرانی برای همه ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه بایستی کیفیت جواب‌های به‌دست آمده مورچه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

محاسبه برازندگی (تابع ارزش): تابع برازندگی از اعمال تبدیل مناسب روی تابع هدف یعنی تابعی که قرار است بهینه شود به‌دست می‌آید. این تابع هر راه حل ساخته شده به‌واسطه یک مورچه را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آن را مشخص می‌سازد. هر چه کیفیت جواب بهتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت گره‌های مربوط به آن در مسیرهای ساخته شده مورچه‌ها در تکرارهای بعدی نیز افزایش خواهد یافت. بسته به اینکه مسئله موردنظر بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی باشد برازندگی بیشتر مترادف با بیشینه یا کمینه بودن تابع هدف خواهد بود، از آنجا که مسئله تعیین چگالی برای هر یک از بلوک‌های مکعبی به دنبال بیشینه تابع است، باید مسائل کمینه‌سازی به بیشینه‌سازی تبدیل شود. یعنی کمینه مجموع قدر مطلق خطاها (مجموع قدر مطلق اختلاف بی‌هنجاری محاسبه شده از بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده) در همه ایستگاه‌های مشاهداتی در روی سطح زمین، بایستی منجر به بیشینه فرمون (بیشینه برازندگی) متناسب به گره‌های حاضر (چگالی هر بلوک)

در رابطه بالا J یک تابع تصافی است، در واقع این تابع برداری است به ابعاد تعداد سطرهای گراف که هر کدام از درایه‌های این بردار متناسب به یکی از گره‌های یک ستون از گراف است. اعداد این بردار به نحوی به‌صورت کاملاً تصادفی پر می‌شوند که همه اعداد آن صفر و تنها یکی از درایه‌ها یک باشد. گره مربوط به درایه‌ای که عدد یک به آن منتسب می‌شود بایستی از سوی مورچه‌ها به‌منزله گره بعدی بازدید شود. در رابطه فوق، q_i یک مقدار تصادفی متعلق به بازه $[0, 1]$ است که برای هر بلوک مکعبی در هر تکرار تولید می‌شود و با q_0 که پارامتر مسئله است، مقایسه می‌شود. q_0 عددی است در بازه $[0, 1]$ که با توجه به شرایط مسئله به‌صورت آزمون و خطا تعیین می‌شود و در همه تکرارها ثابت باقی می‌ماند. در واقع با استفاده از این پارامتر می‌توان درصد دخیل بودن تصادف یا احتمال در انتخاب گره بعدی را تغییر داد، اتخاذ مقادیر زیاد این پارامتر (بیشتر از ۰/۵) منجر به انتخاب گره‌ای می‌شود که احتمال بالاتری نسبت به سایر گره‌ها را دارد (گره‌ای که فرمون بیشتری دارد) و مقادیر کوچک q_0 (کمتر از ۰/۵) باعث می‌شود که مورچه‌ها گره بعدی جهت پیمایش را به‌صورت تصادفی انتخاب کنند، در نتیجه نقش احتمال در این حالت کم‌رنگ خواهد شد.

هر مورچه با پیمایش کل گراف ماتریس ρ می‌سازد که با قرار دادن این ماتریس در رابطه (۳)،



شکل ۳. نحوه پیمایش مورچه‌ها در گراف ساخت حل مسئله.

$$ph_i(t) = (1 - v) ph_i(t-1), \quad \forall i \in G, \quad (6)$$

که $ph_i(t)$ فرمون گره‌اُم در تکرار اُم و $ph_i(t-1)$ فرمون گره‌اُم در تکرار 1-اُم است. $0 < v < 1$ نیز ضریب تبخیر است که آهنگ تبخیر فرمون از گره‌ها را مشخص می‌کند. پارامتر v به منظور جلوگیری از تجمع نامحدود فرمون روی یک گره به کار می‌رود و الگوریتم را قادر می‌سازد تا تصمیمات نامناسب گذشته را فراموش کند. استفاده از چنین رویه‌ای برای تبخیر فرمون‌ها، سبب اکتشافی شدن بیشتر الگوریتم خواهد شد چرا که با استفاده از این روش، تبخیر از گره‌هایی که فرمون بیشتری دارند به میزان بیشتری نسبت به گره‌هایی که فرمون کمتری دارند صورت می‌پذیرد.

- روزآمدسازی فرمون: پس از تبخیر فرمون از همه گره‌ها نوبت به روزآمدسازی فرمون در گره‌هایی می‌رسد که مورچه‌ها پیمایش کرده‌اند (رابطه ۷، دوریگو و استوتزل، ۲۰۰۳):

$$ph_i(t) = ph_i(t-1) + \sum_{k=1}^m \Delta ph_i^k, \quad \forall i \in G \quad (7)$$

که Δph_i^k مقدار فرمونی است که مورچه کُم از روی گره‌هایی که در طی مسیر خود از آنها عبور کرده است، به جای می‌گذارد و این مقدار متناسب با میزان شایستگی راهکار انتخابی از سوی مورچه کُم اتخاذ می‌شود که مستلزم تعریف یک تابع برازندگی برای مسئله مورد بهینه‌سازی است. Δph_i^k در رابطه (۷)، با رابطه (۵) تعیین می‌شود.

استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) برای تبخیر و فرمون‌ریزی باعث خواهد شد تا پس از مدتی، فرمون بیشتری روی گره‌های بهینه جمع شود و در نتیجه شانس بیشتری برای انتخاب مورچه‌های بعدی فراهم کنند؛ گره‌های نابهینه نیز دارای میزان فرمون کمتری شوند و متقابلاً شانس کمتری نیز برای انتخاب از سوی مورچه‌های بعدی داشته باشند.

در ساختار ماتریس ρ مربوط شود. در نهایت با اجرای آزمون‌های گوناگون و بررسی رابطه بین مجموع قدر مطلق خطاها و میزان فرمون انتسابی به گره‌ها، تابع برازندگی مورد استفاده در این تحقیق، مطابق رابطه (۵) طراحی شد:

$$\Delta ph_i^k = \frac{1}{(e^{Sum of Error^k})^{0.5}}, \quad (8)$$

که $Sum of Error = \sum_{i=1}^N |g^{observation} - g^{Calculate}|$ و N تعداد ایستگاه‌های مشاهده‌ای است.

که Δph_i^k میزان فرمون (برازندگی) متناسب به چگالی انتخاب شده برای بلوک‌های مکعبی از سوی کُمین مورچه را نشان می‌دهد. $g^{observation}$ بی‌هنجاری گرانی اندازه‌گیری شده با گرانی سنج است که در حکم مشاهده وارد الگوریتم می‌شود و $g^{Calculate}$ بی‌هنجاری گرانی محاسبه شده از رابطه (۳) را نشان می‌دهد. با استفاده از تابع برازندگی بالا هرچه میزان مجموع قدر مطلق خطای مسیر پیمایش شده یک مورچه کمتر باشد، میزان فرمون محاسبه شده برای تعلق گرفتن به مسیر پیموده شده آن مورچه بیشتر خواهد بود و برعکس.

مزیت استفاده از این تابع نسبت به سایر روش‌های ذکر شده این است که تابع برازندگی با یک رفتار نمایی، مورچه‌ها را به سمت پیمایش از راه گره‌هایی سوق می‌دهد که دقت زیادی را نتیجه دهند. یعنی رابطه بین مجموع قدر مطلق خطاها و میزان فرمون محاسبه شده با رابطه (۵) یک رابطه خطی نیست بلکه رابطه‌ای نمایی است و هرچه مقدار قدر مطلق خطا به سمت صفر نزدیک شود، میزان شایستگی محاسبه شده شدت، افزایش بیشتری دارد.

- تبخیر فرمون: تبخیر فرمون‌ها نیز در این الگوریتم، متناسب با فرمون موجود روی هر گره، از کلیه گره‌ها صورت می‌پذیرد (رابطه ۶، دوریگو و استوتزل، ۲۰۰۳):

تحت شرایط گوناگون تولید شدند. از آنجا که بی‌نهایت حالت متفاوت برای در نظر گرفتن مدل‌های مصنوعی وجود دارد، سعی شده است از مدل‌هایی با هندسه پیچیده که دارای تباین چگالی متفاوت هستند در مقاطع عمقی متفاوت استفاده شود، تا قابلیت الگوریتم ACO در مدل‌سازی معکوس به‌طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. در این داده‌ها تأثیر بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه ساده، بی‌هنجاری یک مدل پلکانی در اعماق گوناگون زمین و بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه پیچیده T و L برای حالت بدون نوفه و با نوفه مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۲ پارامترهای تنظیم شده الگوریتم ACO برای داده‌های مصنوعی را نشان می‌دهد.

مدل 600×600 متر و فواصل نقاط برداشت شده، 40 متر است. برای پیاده‌سازی این روش در همه مثال‌ها از بلوک‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 40 \times 40$ متر استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات دو مدل را در حالت‌های متفاوت به اختصار نشان می‌دهد. چون در مسائل معکوس با نایکنایی جواب روبه‌رو هستیم، بیشینه عمق و کمینه، بیشینه مقادیر تباین چگالی به منزله اطلاعات اولیه وارد مسئله می‌شوند. در همه حالت‌ها برای نوفه‌دار کردن داده‌ها تا ۵ درصد، از رابطه (۸) استفاده شده است.

• شرط همگرایی: در الگوریتم‌های فراابتکاری، حالت‌های بسیار متفاوتی را برای شرط همگرایی الگوریتم می‌توان در نظر گرفت و این شرط در هر کاربردی بسته به شرایط مسئله متفاوت است. در اینجا نیز شرط همگرایی در نظر گرفته شده برای الگوریتم بدین صورت است که، در هر تکرار چنانچه ۵۰٪ مورچه‌ها یک مسیر واحد را بپیمایند، و در آن تکرار نتیجه بهبود یافته‌ای نسبت به تکرارهای قبلی نداشته باشیم، مسیر منتخب از سوی حداقل ۵۰٪ از مورچه‌ها به منزله مسیر همگرایی مورد قبول قرار می‌گیرد. بنابراین الگوریتم تا زمانی که این شرط برقرار نشود، ادامه پیدا خواهد کرد و به محض برآورده شدن این شرط الگوریتم متوقف خواهد شد.

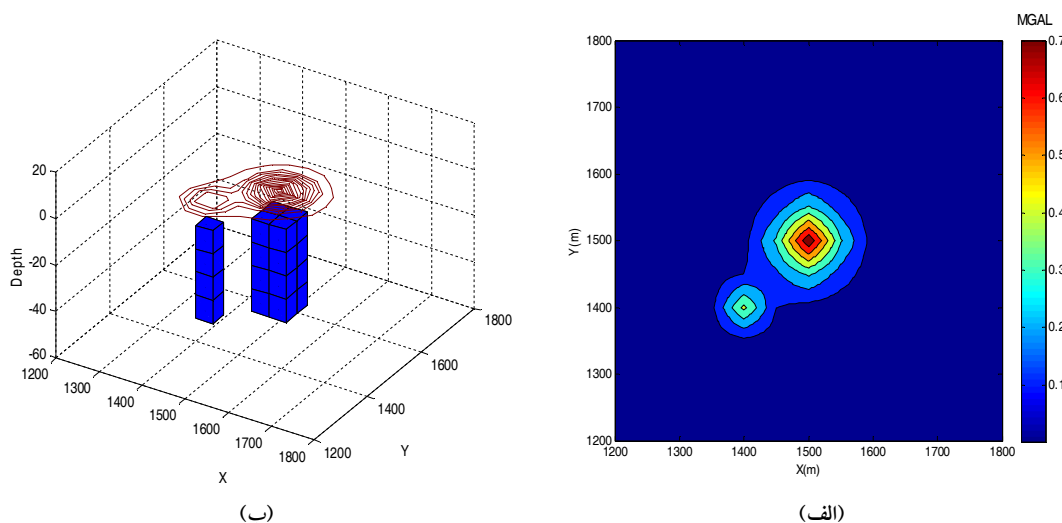
جدول ۲. پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در این تحقیق.

τ_0	q_0	ρ
0.5	0.6	0.08

۴ مدل‌سازی معکوس داده‌های مصنوعی با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن در این تحقیق، به منظور بررسی بیشتر کارایی الگوریتم ACO طراحی شده برای مدل‌سازی معکوس، داده‌های مصنوعی‌ای که در هر کدام هدف متفاوتی دنبال می‌شود،

جدول ۳. مشخصات دو مدل در مثال ۱ در حالت‌های متفاوت.

مثال ۱	حالت‌های متفاوت	مدل ۱			مدل ۲		
		اندازه (m)	عمق (m)	تباین چگالی (kg/m^3)	اندازه (m)	عمق (m)	تباین چگالی (kg/m^3)
بی‌هنجاری تداخلي حاصل از دو مدل با هندسه ساده	حالت ۱	40×40	10 – 50	1000	1000	10 – 50	1000
	حالت ۲	40×40	10 – 50	400	80×80	10 – 50	40×40
	حالت ۳	40×40	30 – 60	400	80×80	10 – 40	40×40



شکل ۴. الف) بی‌هنجاری گرانی حاصل از دو مدل با هندسه ساده در حالت اول و ب) دو مدل در نظر گرفته شده در حالت اول.

این دو مدل تحت شرایط با تباین چگالی یکسان، با تباین چگالی متفاوت و همچنین در عمق‌های گوناگون در نظر گرفته شده است. جدول ۳ مشخصات دو مدل را در حالت‌های متفاوت به صورت اختصار نشان می‌دهد.

• حالت اول

بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه ساده برای حالت اول در شکل ۴ آورده شده است. در این حالت دو مدل با تباین چگالی یکسان و در یک عمق قرار گرفته و فقط ابعاد دو مدل متفاوت است. بیشینه عمق ۶۰ متر و بیشترین و کمترین مقدار تباین چگالی منطقه kg/m^3 ۱۰۰۰ و ۰، در حکم اطلاعات اولیه از منطقه وارد مسئله شده است. بازه مقادیری که می‌توان به‌منزله تباین چگالی در نظر گرفت با فاصله kg/m^3 ۵۰ گسسته شده است. در نتیجه ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $20 \times 15 \times 15 = 27000$ است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نوفه با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این حالت در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، الگوریتم از تکرار ۱۵۳ به بعد کاملاً به ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده

(عابدی و همکاران، ۱۳۸۸):

(۸)

$$g_{noises}^{Calculate} = \pm (0.5 \times Rand \times g^{Calculate}) + g^{Calculate}$$

که $Rand$ دستوری است در نرم‌افزار *Matlab* که به صورت تصادفی اعدادی بین ۰ و ۱ تولید می‌کند و $g_{noises}^{Calculate}$ بی‌هنجاری نوفه‌دار حاصل از مدل بدون نوفه با بی‌هنجاری $g^{Calculate}$ است.

در ادامه، هریک از مدل‌ها به تفصیل شرح داده شده است و نتایج حاصل از معکوس‌سازی این دسته از داده‌ها که با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی می‌شود مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱ بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه ساده

از آنجا که توده‌های جرمی داخل زمین، در شرایط واقعی ممکن است در فواصل نزدیک به هم قرار داشته باشند، بنابراین مشاهدات گرانی حاصل از آن در روی سطح زمین تحت تأثیر همه این توده‌های جرمی است. از این رو در این قسمت، از بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه ساده در شرایط متفاوت استفاده شده است.

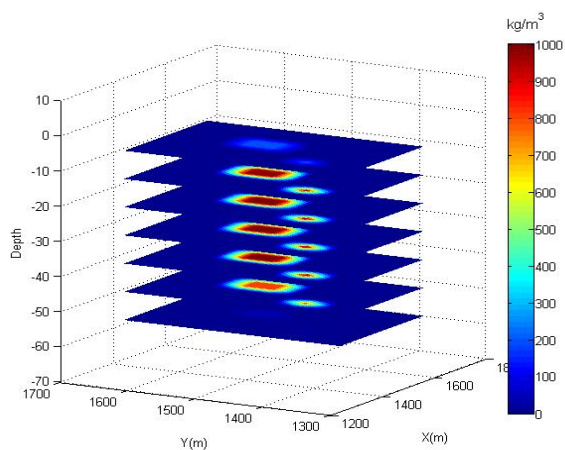
مقطع عمقی ۱۵ و ۲۵ و ۳۵ به طور کامل برآورد شده و فقط در مقطع آخر، مدل به درستی معکوس سازی نشده است و تفاوت بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به زیر $4 \pm$ سانتی متر رسیده است (شکل ۶-ج).

• حالت دوم

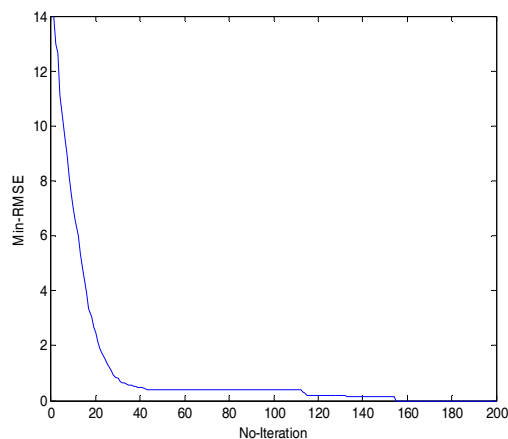
برای حالت دوم، دو مدل در یک عمق اما با تباين چگالي متفاوت در نظر گرفته شده است. مدل در نظر گرفته شده به همراه بی‌هنجاری حاصل از آن در شکل ۷ نشان داده شده است. اطلاعات اولیه در این حالت مانند حالت قبل

همگرا شده است. در شکل ۵-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس سازی به طور کامل برآورد شده است. شکل ۵-ج نیز، اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای که تقریباً به 10^{-6} متر رسیده را نشان می‌دهد.

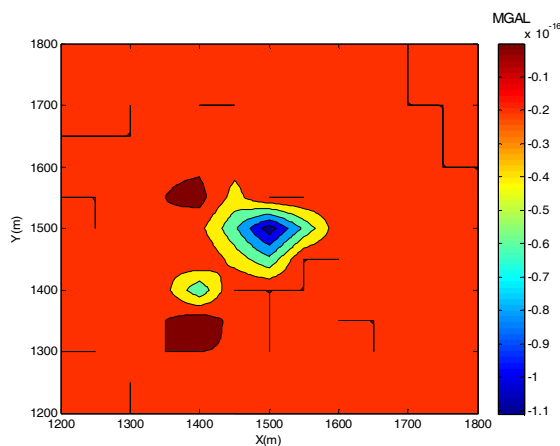
از آنجا که در داده‌های واقعی، نوفه وجود دارد، با استفاده از رابطه (۶) به همه داده‌های این حالت تا ۵ درصد نوفه اضافه می‌کنیم. نتایج در شکل ۶ آورده شده است. در شکل ۶-الف می‌بینید، الگوریتم از تکرار ۵۰ به بعد همگرا شده است. در شکل ۶-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس سازی آورده شده است که تباين چگالی در سه



(ب)

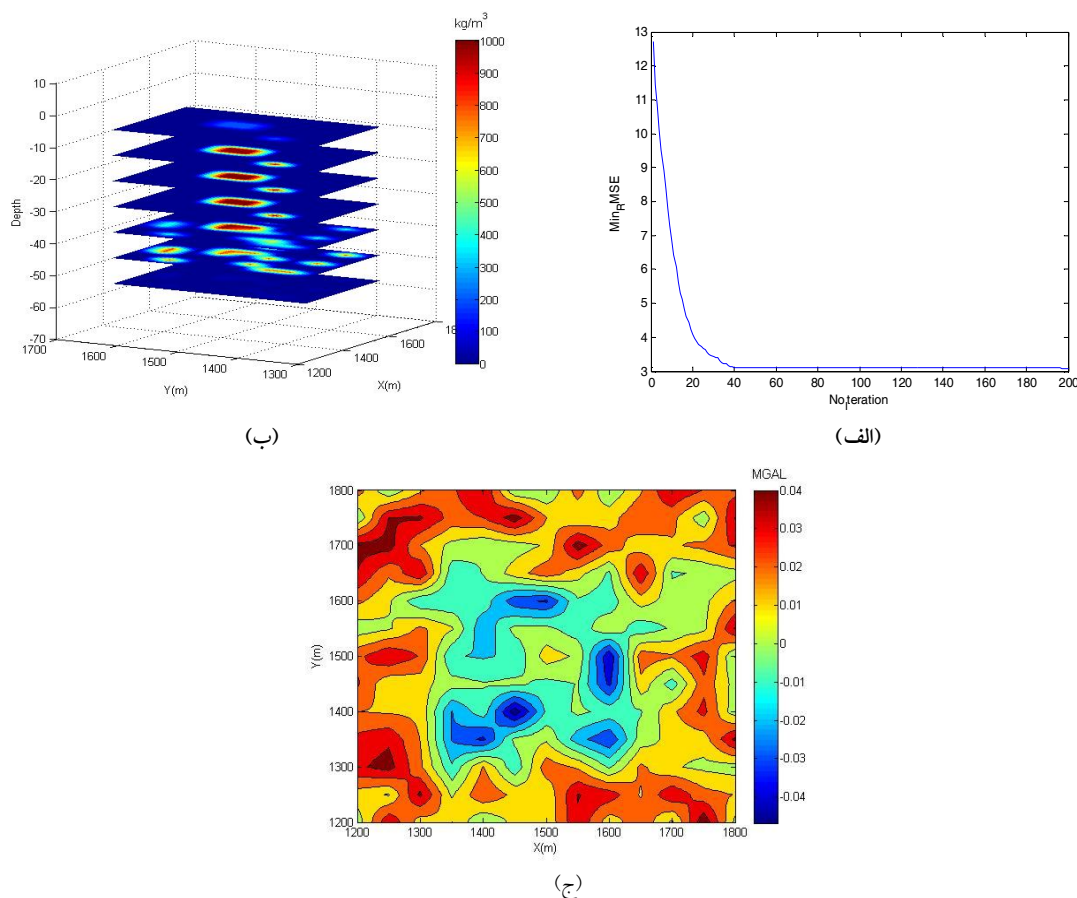


(الف)



(ج)

شکل ۵. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۱۵۳ به بعد همگرا شده است. (ب) تباين چگالی حاصل از مدل سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت اول برای داده‌های بدون نوفه و (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



شکل ۶. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۵۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت اول برای داده‌های نوفه‌دار (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.

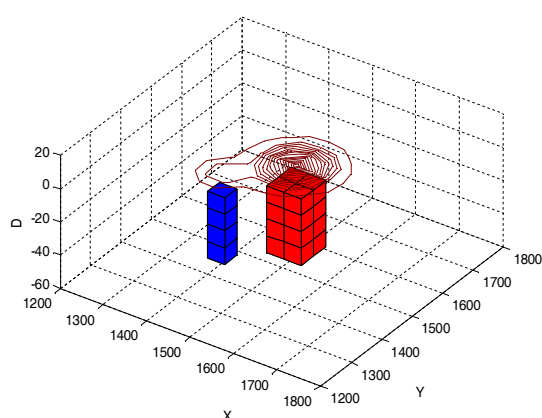
از معکوس‌سازی آورده شده است. تباین چگالی در سه مقطع عمقی ۱۵ و ۲۵ و ۳۵ به‌طور کامل برآورد شده و فقط در مقطع آخر، مدل به‌درستی معکوس‌سازی نشده است و در شکل ۹-ج، اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای که تقریباً به زیر $1 \pm$ سانتی‌متر رسیده است را نشان می‌دهد.

• حالت سوم

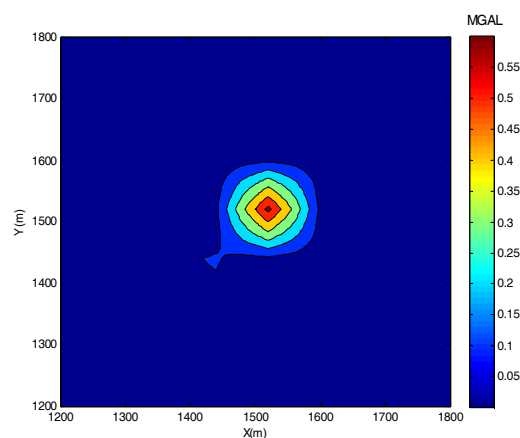
در حالت سوم، دو مدل با تباین چگالی متفاوت در عمق‌های متفاوت در نظر گرفته شده است، مدل در نظر گرفته شده به همراه بی‌هنجاری حاصل از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این حالت، بیشینه عمق ۷۰ متر و مقدار تباین چگالی مانند حالات پیشین در حکم اطلاعات

است. نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نوفه با استفاده از الگوریتم ACO طراحی شده در این حالت در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۸-الف می‌بینید، الگوریتم از تکرار ۶۰ به بعد کاملاً به ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده همگرا شده است. در شکل ۸-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی به‌طور کامل برآورد شده است و اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای، تقریباً به 10^{-17} متر رسیده است (شکل ۸-ج).

در ادامه به همه داده‌ها ۵ درصد نوفه اضافه شده است. در شکل ۹-الف می‌بینید، الگوریتم از تکرار ۱۰۰ به بعد همگرا شده است و شکل ۹-ب، مدل چگالی حاصل



(ب)



(الف)

شکل ۷. بی‌هنجاری گرانی حاصل از دو مدل با هندسه ساده در حالت دوم و (ب) دو مدل در نظر گرفته شده در حالت دوم.

چگالی، به خوبی به دست نیامده است (شکل ۱۲-ب) و در شکل ۱۲-ج، تفاوت بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به زیر $\pm 0/5$ سانتی‌متر رسیده است.

۴-۲ بی‌هنجاری حاصل از یک مدل پلکانی

هدف از طرح این مدل، بررسی توانایی الگوریتم ACO در این تحقیق، به منظور معکوس‌سازی مدلی جهت‌دار با بی‌هنجاری ضعیف است. در این راستا، مدلی پلکانی با تباين چگالی کم در نظر گرفته شده است، با بردن مدل به عمق‌های کم سیگنال‌های حاصل از آن روی سطح زمین، تحت عنوان مشاهدات بی‌هنجاری گرانی، ضعیف‌تر می‌شود.

در ادامه این مدل تحت شرایطی با تباين چگالی یکسان، اما در عمق‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. جدول ۴ مشخصات مدل پلکانی را در حالت‌های گوناگون به اختصار نشان می‌دهد.

• حالت اول

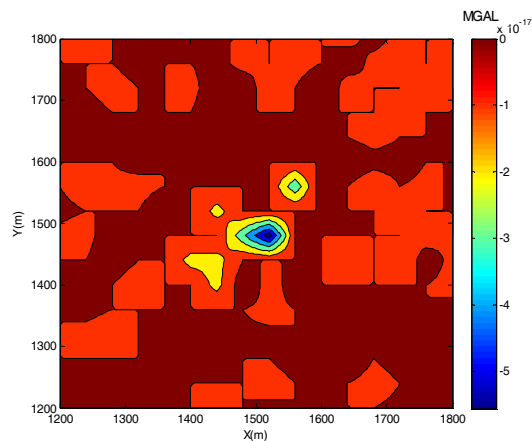
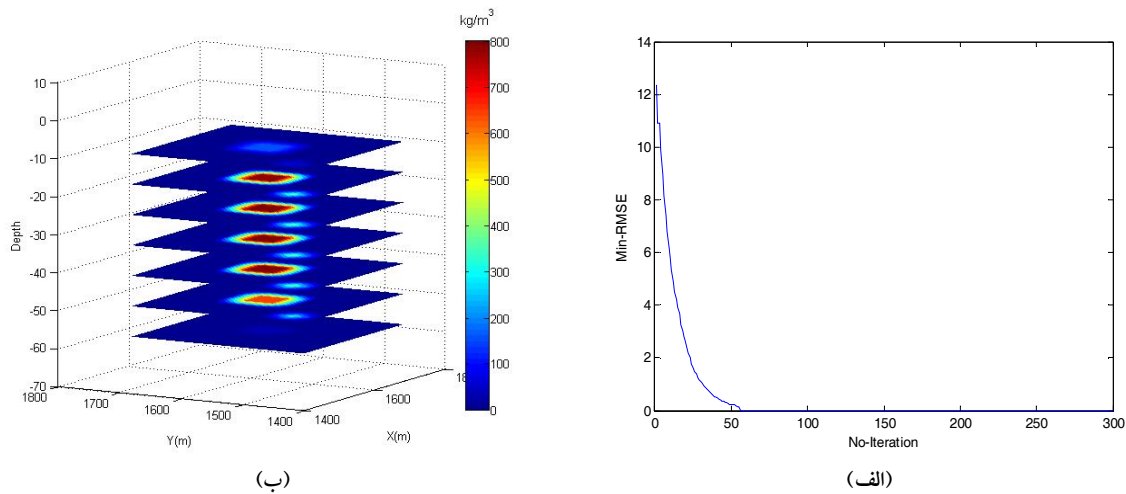
مدل در نظر گرفته شده برای عمق ۱۰ تا ۵۰ متر و بی‌هنجاری حاصل از آن در شکل ۱۳ آورده شده است. در اینجا، بیشینه عمق ۵۰ متر و بیشترین و کمترین

اولیه از منطقه وارد مسئله شده است. ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $3150 = 20 \times (7 \times 15 \times 15)$ است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نوفه با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این حالت در شکل ۱۱ آورده شده است.

در شکل ۱۱-الف می‌بینید، الگوریتم قادر است بی‌هنجاری‌هایی با چگالی متفاوت که در عمق‌های متفاوتی در کنار هم قرار دارند، از تکرار ۸۰ به بعد کاملاً با ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده همگرا شود. در شکل ۱۱-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی به‌طور کامل برآورد شده است و اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به 10^{-18} متر رسیده است (شکل ۱۱-ج).

در ادامه به همه داده‌ها ۵ درصد نوفه اضافه می‌کنیم، در شکل ۱۲-الف می‌بینید، الگوریتم از تکرار ۴۰ به بعد همگرا شده است. مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی آورده شده است. تباين چگالی در دو مقطع عمقی ۱۵ و ۲۵ به‌طور کامل برآورد شده و از مقطع عمقی ۳۵ به بعد مدل دوم برآورد شده اما به علت افزایش عمق و ضعیف بودن سیگنال‌های ناشی از مدل دوم، در بعضی نقاط تباين



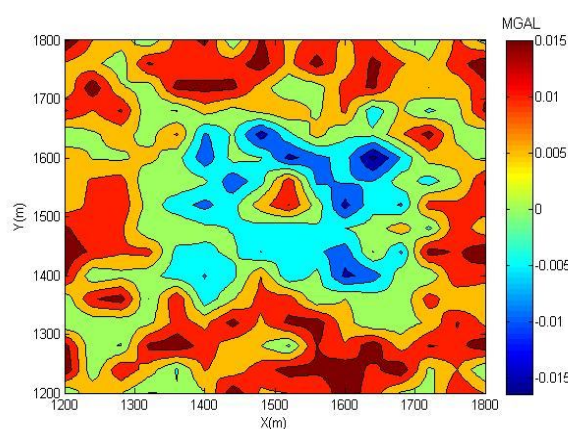
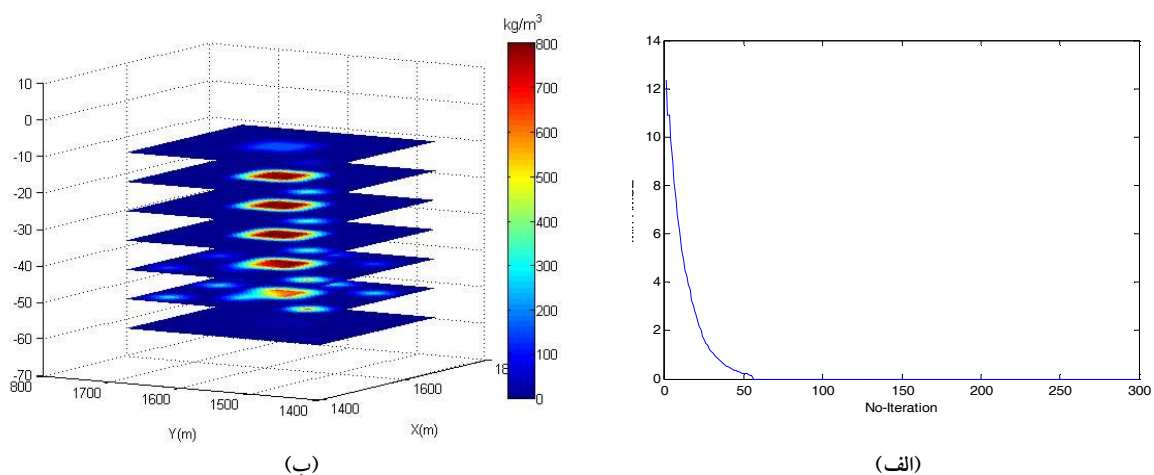
شکل ۸. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۶۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تبیین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت دوم برای داده‌های بدون نوفه و (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.

مقدار تبیین چگالی kg/m^3 ۵۰ و ۰ در حکم اطلاعات اولیه از منطقه وارد مسئله شده است. بازه مقادیری که می‌توان در حکم تبیین چگالی در نظر گرفت با فاصله kg/m^3 ۵ گسسته شده است، در نتیجه ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $10 \times (15 \times 15 \times 5) = 11250$ است.

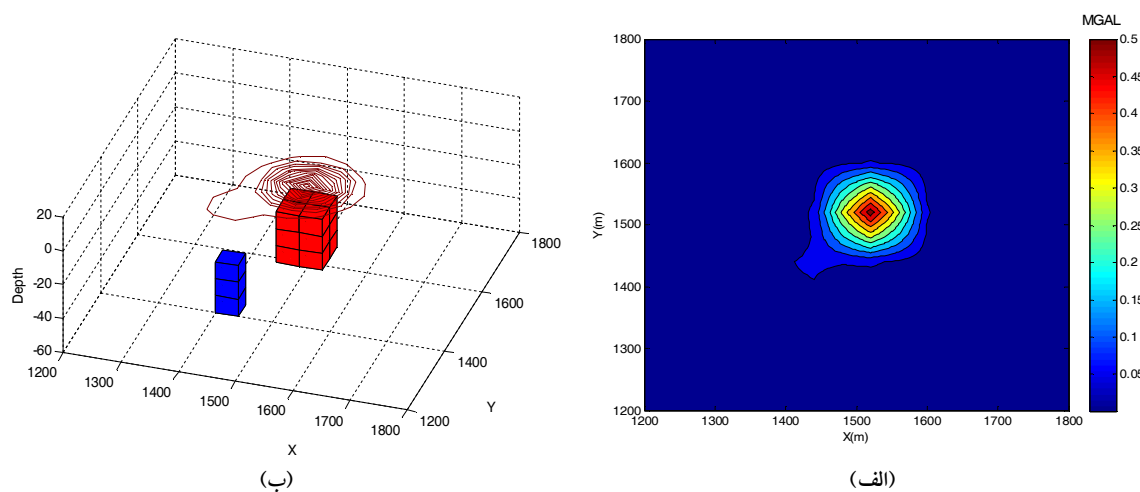
نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نوفه با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این حالت در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴-الف می‌بینید الگوریتم از تکرار ۱۲۰ به بعد

جدول ۴. مشخصات مدل پلکانی در حالت‌های متفاوت.

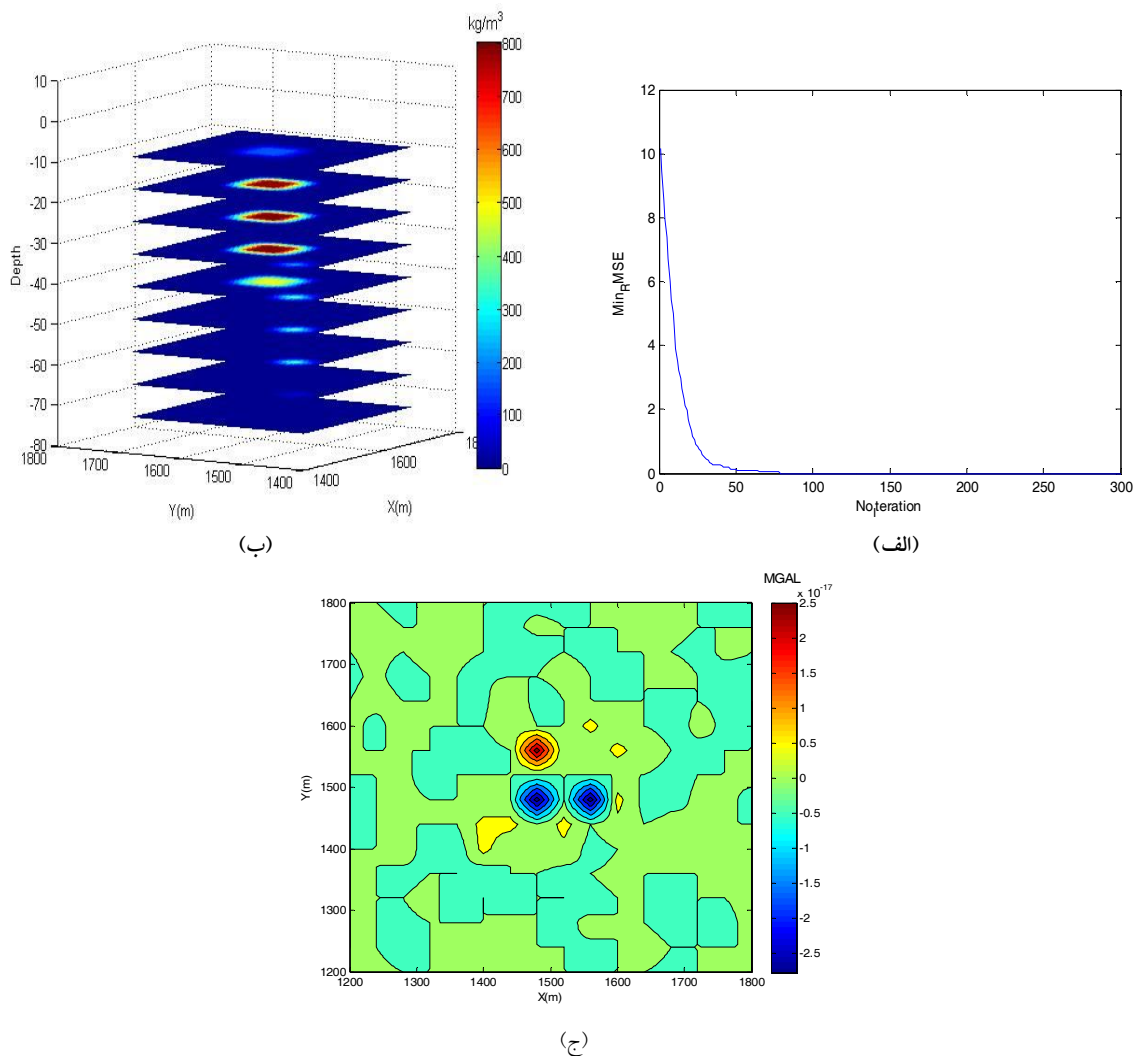
مثال ۲	حالت‌های متفاوت	مدل پلکانی	
		عمق (m)	تبیین چگالی (kg/m^3)
مدل پلکانی حاصل از یک بی‌هنجاری	حالت ۱	10-40	50
	حالت ۲	50-80	50
	حالت ۳	90-120	50



شکل ۹. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۱۰۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت دوم برای داده‌های بدون نوفه (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



شکل ۱۰. (الف) بی‌هنجاری گرانی حاصل از دو مدل با هندسه ساده در حالت سوم و (ب) دو مدل در نظر گرفته شده در حالت سوم.



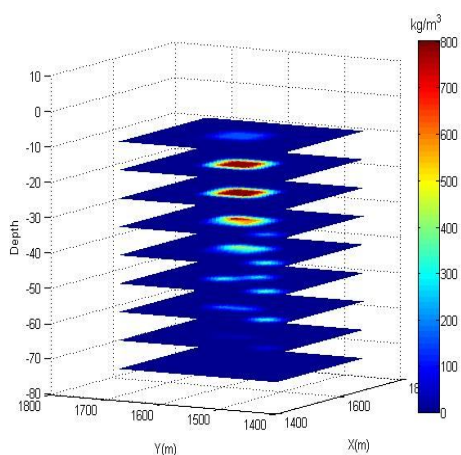
شکل ۱۱. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۶۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت سوم برای داده‌های بدون نوفه و (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.

شکل ۱۵ دید. برای این حالت، بیشینه عمق ۹۰ متر و مقدار تباین چگالی مانند حالت پیشین در حکم اطلاعات اولیه از منطقه وارد مسئله شده است. ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $20250 = 10 \times (15 \times 15 \times 9)$ است.

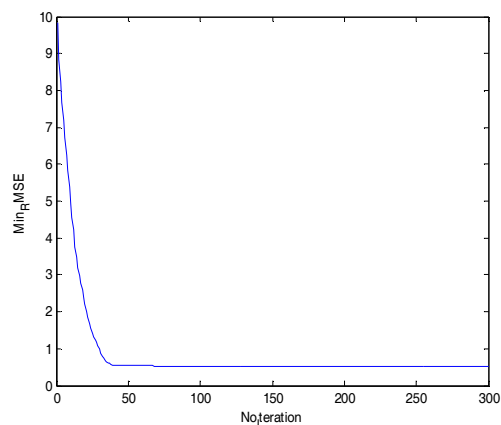
نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نوفه با استفاده از الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این حالت در شکل ۱۶ آورده شده است. شکل ۱۶ - الف نشان می‌دهد که، الگوریتم از تکرار ۴۰ به بعد کاملاً

کاملاً به ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده همگرا شده است. در شکل ۱۴-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی به‌طور کامل برآورد شده است و شکل ۱۴-ج، تفاوت بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای که تقریباً به 10^{-18} متر رسیده است را نشان می‌دهد.

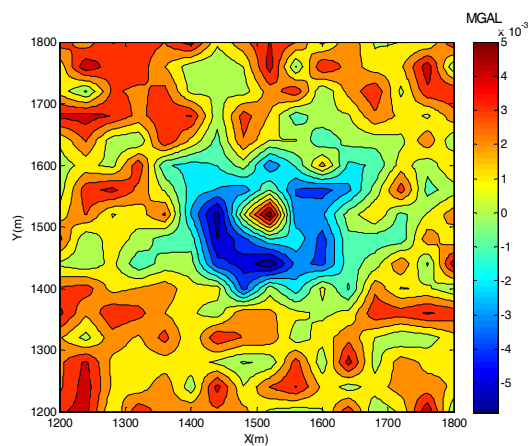
• حالت دوم
با بردن مدل به عمق ۵۰ تا ۸۰ سیگنال‌های حاصل از آن ضعیف‌تر می‌شود، بی‌هنجاری حاصل از آن را می‌توان در



(ب)

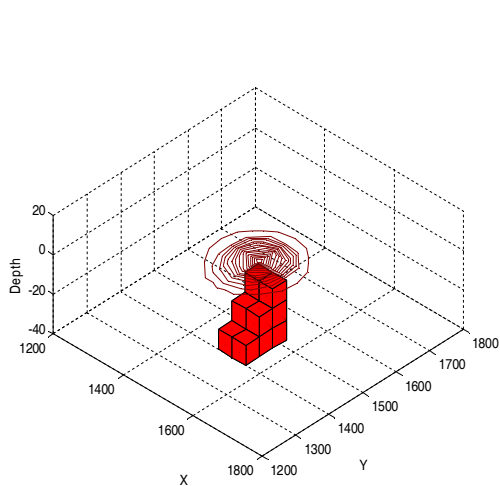


(الف)

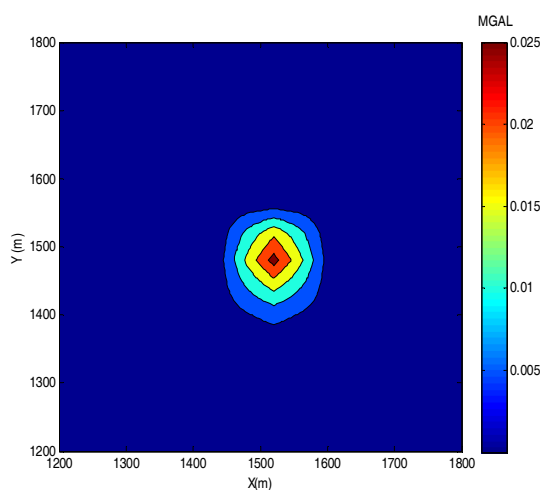


(ج)

شکل ۱۲. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۴۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل سازی معکوس دو مدل با هندسه ساده در حالت سوم برای داده های نوفه دار (ج) اختلاف بی هنجاری مشاهده ای و محاسبه ای.

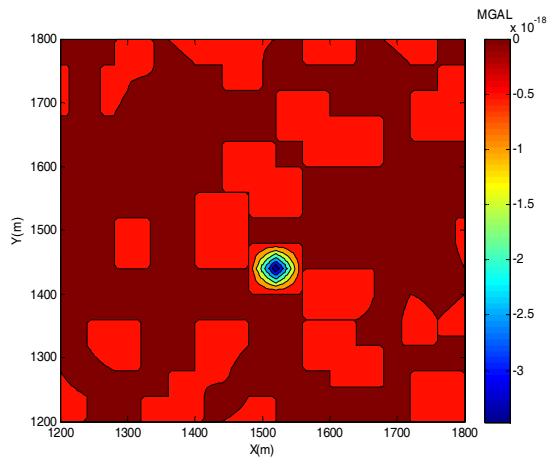
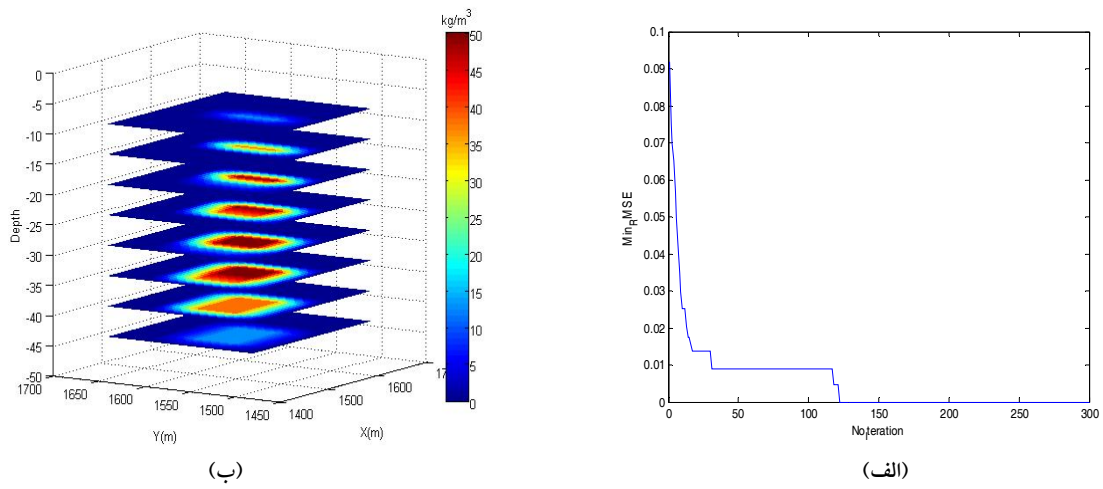


(ب)

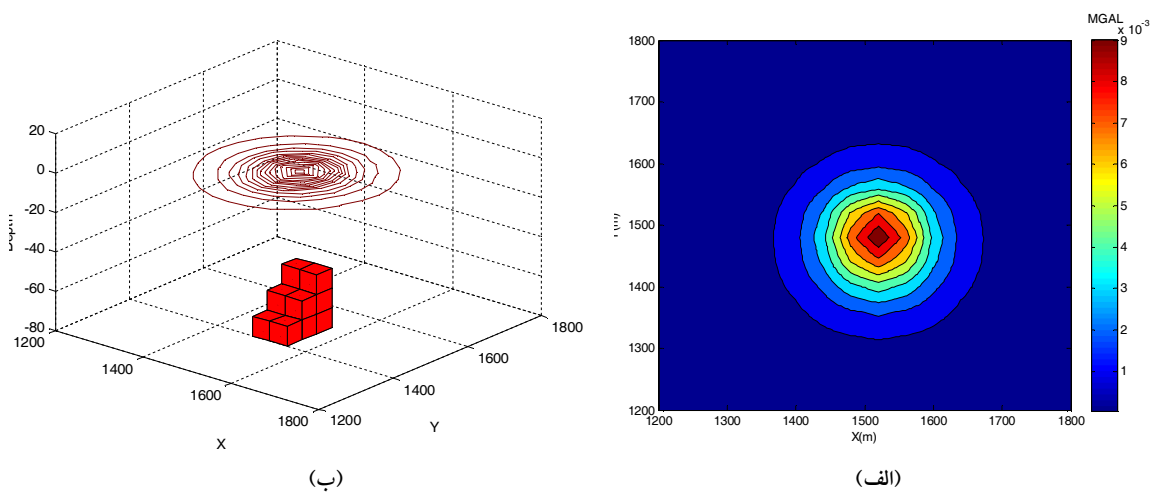


(الف)

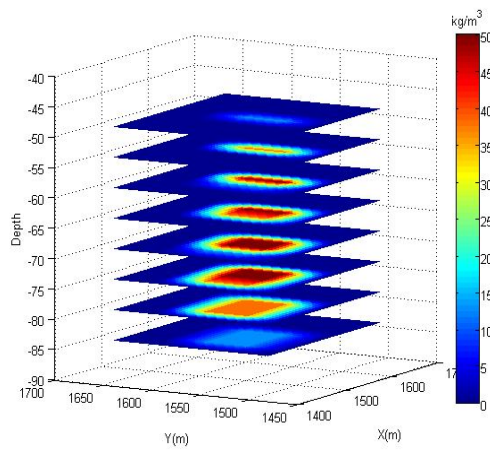
شکل ۱۳. (الف) بی هنجاری گرانی حاصل از مدل پلکانی در عمق ۱۰ تا ۴۰ و (ب) مدل پلکانی در عمق ۱۰ تا ۴۰.



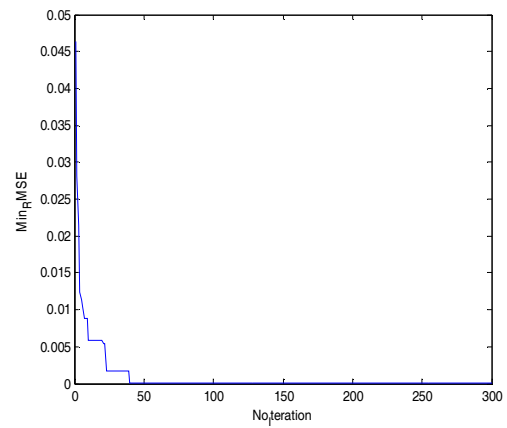
شکل ۱۴. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۱۳۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس مدل پلکانی در عمق ۱۰ تا ۴۰ (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



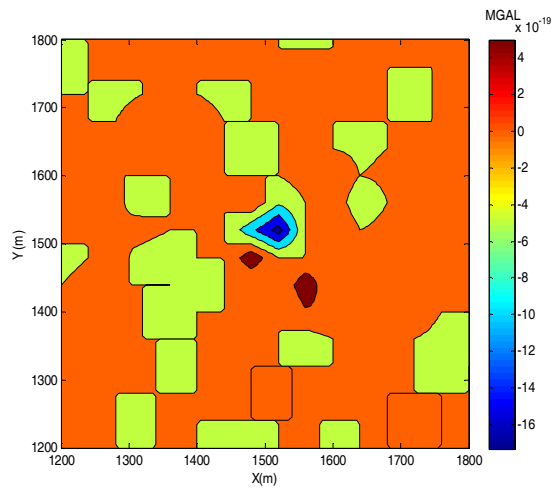
شکل ۱۵. (الف) بی‌هنجاری گرانی حاصل از مدل پلکانی در عمق ۵۰ تا ۸۰ و (ب) مدل پلکانی در عمق ۵۰ تا ۸۰.



(ب)

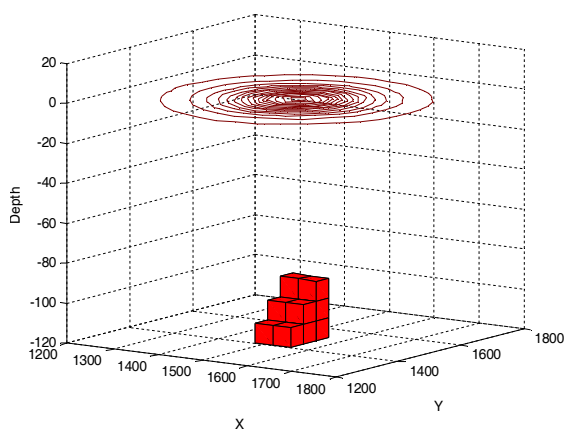


(الف)

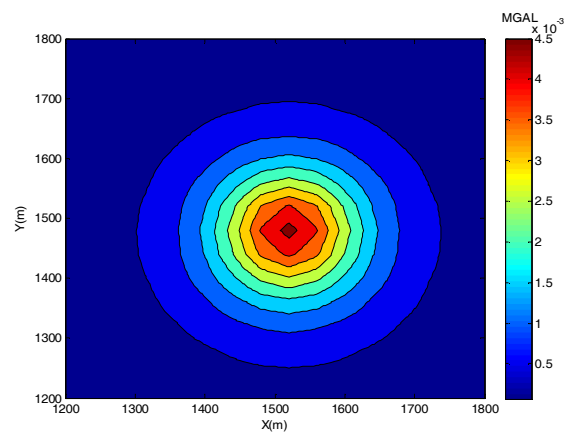


(ج)

شکل ۱۶. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۴۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل سازی معکوس مدل پلکانی در عمق ۵۰ تا ۸۰ و (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



(ب)



(الف)

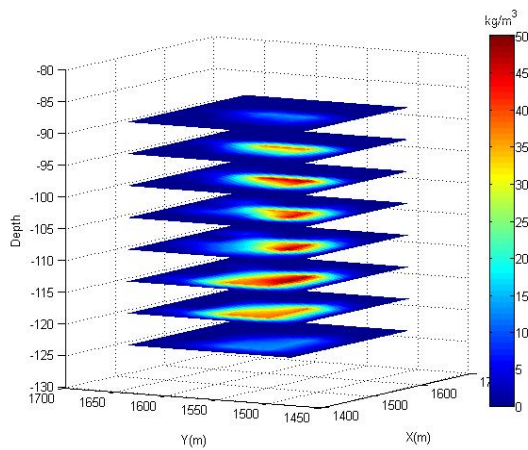
شکل ۱۷. (الف) بی‌هنجاری گرانی حاصل از مدل پلکانی در عمق ۹۰ تا ۱۲۰ و (ب) مدل پلکانی در عمق ۹۰ تا ۱۲۰.

اطلاعات اولیه در این حالت مانند قبل است، با این تفاوت که در اینجا بیشینه عمق را ۱۳۰ در نظر می‌گیریم. ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $10 \times (15 \times 15 \times 13) = 29250$ است. همان‌طور که در شکل ۱۸ می‌بینید، الگوریتم ACO قادر به معکوس‌سازی این بی‌هنجاری با چنین سیگنال‌های ضعیفی نیست.

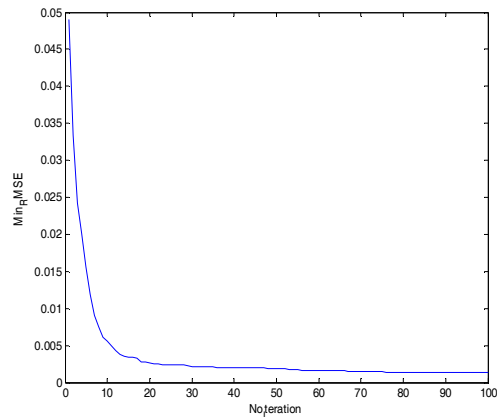
به ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده همگرا شده است. در شکل ۱۶-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی به‌طور کامل برآورد شده است. شکل ۱۶-ج نشان می‌دهد که اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به 10^{-19} متر رسیده است.

• حالت سوم

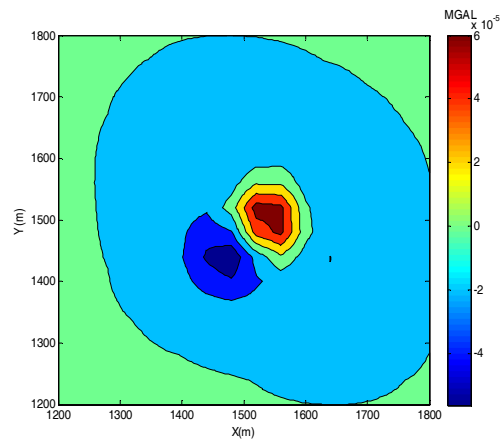
با بردن مدل به عمق ۹۰ تا ۱۲۰ سیگنال‌های حاصل از آن بسیار ضعیف شده، بی‌هنجاری حاصل از آن برای داده‌های بدون نوفه، در شکل ۱۷ آورده شده است.



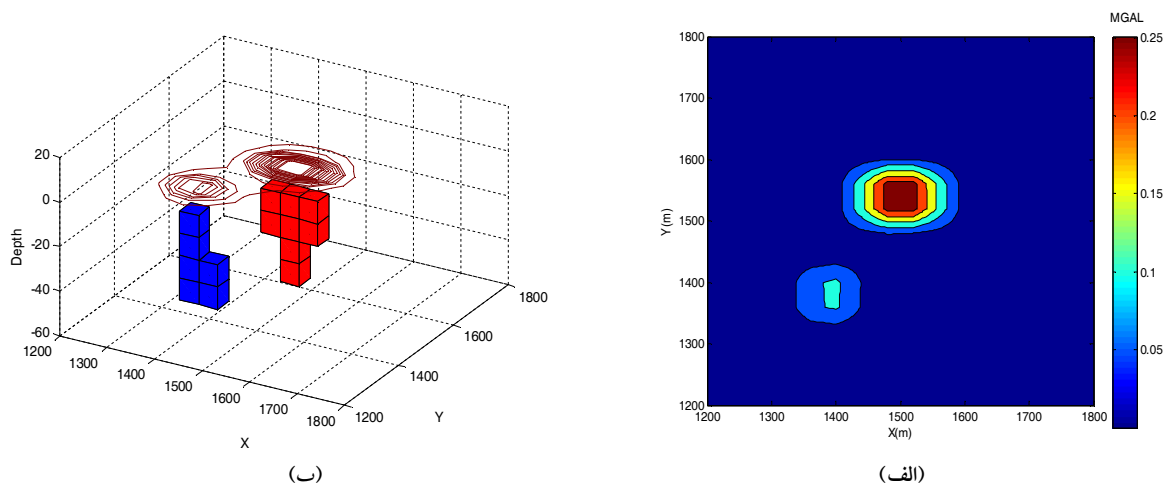
(ب)



(الف)



شکل ۱۸. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۶۸ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس مدل پلکانی در عمق ۹۰ تا ۱۲۰ و (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



شکل ۱۹. (الف) بی‌هنجاری گرانی حاصل از مدل T و L و (ب) مدل T و L.

جدول ۵. مشخصات مدل T و L.

مثال ۳	مدل T		مدل L	
	عمق (m)	تباين چگالی (kg/m^3)	عمق (m)	تباين چگالی (kg/m^3)
بی‌هنجاری تداخلی حاصل از دو مدل با هندسه پیچیده T و L	10-50	800	10-50	400

مقادیری که می‌تواند در حکم تباين چگالی در نظر گرفته شود با فاصله kg/m^3 ۵۰ گسسته شده است، در نتیجه ابعاد گراف در این حالت با توجه به ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $27000 = 20 \times 15 \times 6$ است.

نتایج حاصل از معکوس‌سازی این مدل با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۲۰ آمده است. همان‌طور که در شکل ۲۰-الف می‌بینید الگوریتم از تکرار ۲۴۰ به بعد کاملاً به ساختار مدل مصنوعی در نظر گرفته شده همگرا شده است و الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این تحقیق قادر است مدل‌هایی با هندسه پیچیده را به‌درستی معکوس‌سازی کند و مدل چگالی آن را به‌دست آورد (شکل ۲۰-ب). شکل ۲۰-ج نشان می‌دهد، اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به 10^{-17} متر رسیده است.

۳-۴ بررسی بی‌هنجاری حاصل از دو مدل با هندسه

پیچیده T و L

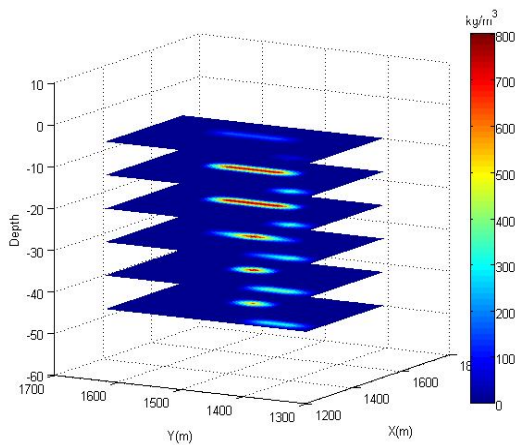
پس از ارزیابی الگوریتم ACO، به‌منظور مدل‌سازی معکوس برای مدل‌هایی با هندسه ساده که در عمق‌های گوناگون و با چگالی متفاوت در کنار هم قرار گرفته‌اند و همچنین مدلی پلکانی با سیگنال‌های ضعیف در ادامه، الگوریتم موردنظر را که برای مدل‌هایی با هندسه پیچیده در کنار هم قرار گرفته‌اند، مورد آزمایش قرار می‌دهیم. جدول ۵ مشخصات مدل T و L را به‌اختصار نشان می‌دهد.

مدل در نظر گرفته شده به همراه بی‌هنجاری حاصل از آن در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در این مثال اطلاعات اولیه، بیشینه عمق ۶۰ متر و بیشترین و کمترین مقدار تباين چگالی kg/m^3 ۱۰۰۰ و ۰ است. بازه

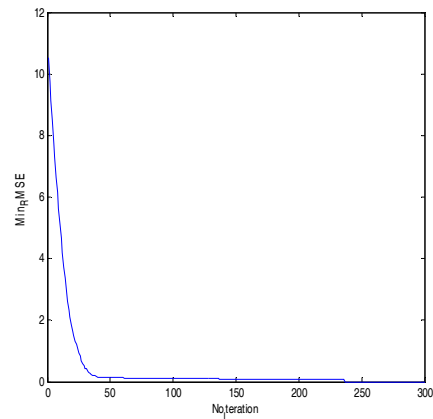
۵ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، الگوریتم کلونی مورچگان به منظور دستیابی به مدل چگالی در مقاطع عمقی متفاوت، اولین بار به خدمت گرفته شد. در این راستا الگوریتم کلونی مورچگان، به خوبی برای مدل‌سازی معکوس ویژه‌سازی شد و با ایجاد تغییراتی، کارایی آن در راستای عملکرد بهتر، افزایش یافت. نتایج نشان داد که با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان مدل‌هایی با هندسه پیچیده و نامنظم را با دقت زیادی معکوس‌سازی کرد. البته لازم به ذکر است

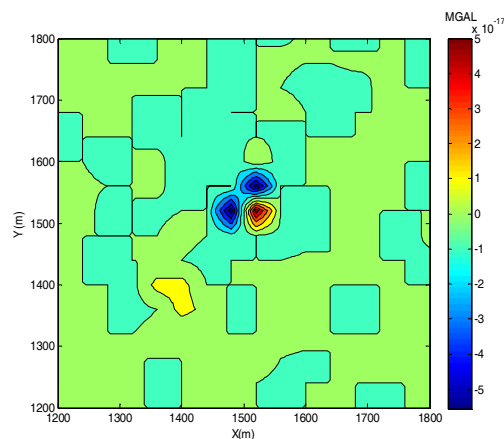
در ادامه به همه داده‌ها ۵ درصد نوفه اضافه می‌کنیم. نتایج حاصل از معکوس‌سازی در شکل ۲۱ آمده است. در شکل ۲۱-الف می‌بینید، الگوریتم از تکرار ۱۰۰ به بعد همگرا شده است و شکل ۲۱-ب، مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی آورده شده است، تباین چگالی در دو مقطع عمقی ۱۵ و ۲۵ به طور کامل برآورد شده اما در مقاطع عمقی دیگر با خطا همراه است. در شکل ۲۱-ج، اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای از بی‌هنجاری محاسبه‌ای تقریباً به زیر $2 \pm$ سانتی‌متر رسیده است.



(ب)



(الف)



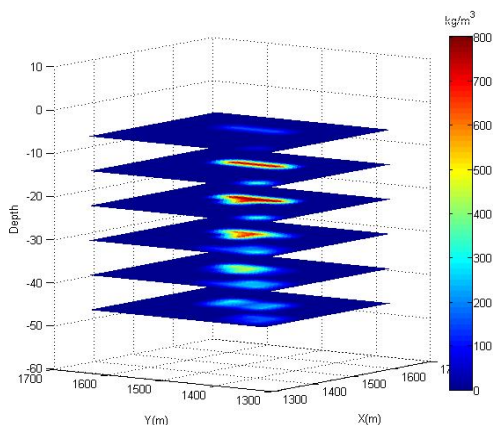
(ج)

شکل ۲۰. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۲۴۰ به بعد همگرا شده است. (ب) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس مدل T و L با داده‌های بدون نوفه (ج) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.

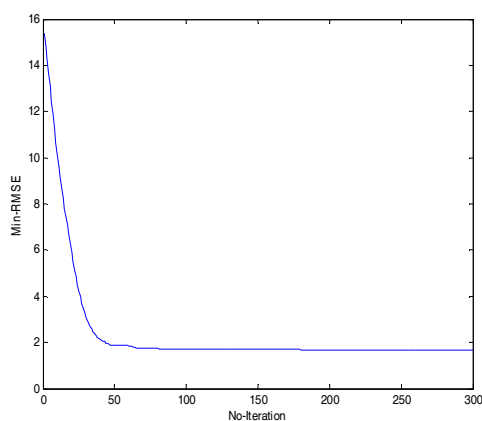
الگوریتم ACO در حل این مسئله افزایش می‌یابد و قادر خواهیم بود تا در مدت زمان کمتری به نتیجه قابل اعتمادی دست یابیم.

این روش روی سه مدل مصنوعی همراه با نوفه ۵٪ و بدون نوفه آزمایش شد و نتایج نسبتاً خوبی در تعیین تباین چگالی و مرزهای افقی و قائم به دست آمد. از جمله مزایای این الگوریتم همان‌طور که در مدل‌های ۱ و ۳ نشان داده شده این است که برای ترکیبی از مدل‌ها که با تباین چگالی متفاوت در کنار هم هستند و در عمق‌های متفاوتی قرار دارند، قابل استفاده است. از دیگر مزایای الگوریتم

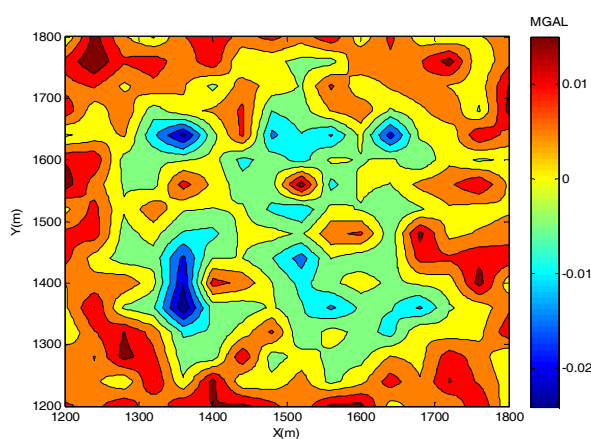
که داشتن اطلاعات اولیه‌ای از مدل، کمک شایانی در مدل‌سازی معکوس می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور برآورد دقیق‌تر از توزیع تباین چگالی با استفاده از این الگوریتم، از قیود عمق بیشینه بی‌هنجاری به‌منظور مقید کردن مسئله در عمق، که منجر به جواب‌های واقعی‌تری در عمق می‌شود و همچنین بیشینه و کمینه مقدار چگالی در آن منطقه با استفاده از اطلاعات قبلی به‌منظور تحقق یکتایی جواب‌ها، در حکم اطلاعات اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از این قیود، توانستیم فضای جست‌وجو را محدود سازیم و مسئله نبود یکتایی نتایج را نیز به میزان خوبی بهبود بخشیم. در نتیجه کارایی



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲۱. (الف) روند همگرایی الگوریتم در تکرار ۱ تا ۳۰۰ که از تکرار ۱۰۰ به بعد همگرا شده است. (ب) اختلاف بی‌هنجاری مشاهده‌ای و محاسبه‌ای (ج) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس مدل T و L با داده‌های نوفه دار.

- Dorigo, M., and Blum, C., 2005, Ant colony optimization theory: A survey: Theoretical Computer Science, **344**, 243–278.
- Dorigo, M., and Di Caro, G., 1999, Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In P. J. Angeline, Z. Michalewicz, M. Schoenauer, X. Yao, & A. Zalzala (Eds.), Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC'99) 1470–1477. Piscataway, NJ, IEEE Press
- Dorigo, M., Stützle, T., 2002, The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications and advances. In F. Glover & G. Kochenberger (Eds.), Handbook of Metaheuristics, vol. 57 of International Series in Operations Research & Management Science (pp. 251–285). Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers.
- Jackson, D. D., 1979, The use of priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion. Geophy. J. Roy. Astr. Soc., **57**, 137-157.
- Menke, W., 2012, Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory: 3rd ed., Academic Press.
- Montesinos, F. G., Armoso, J., and Vieira, R., 2005. Using a genetic algorithm for 3D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands). International Journal of Earth Sciences, **92**, 301-316.
- Ning, Q., and Al, e., 2009, Gravity Data Inversion Based Genetic Algorithm and Generalized Least Squares. IEEE.
- Plouff, D., 1976, Gravity and magnetic-field of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections: Geophysics, **41**, 727-741.
- Rama Rao, P., Swamy, K. V., and Radhakrishna Murthy, I., 1999, Inversion of gravity anomalies of three-dimensional density interfaces: Computers & Geosciences, **25**, 887-896.
- Sanyi, Y., Nan, T., Ye, Ch., Huafeng, L., and Zhipeng, L., 2008, Nonlinear Geophysical Inversion Based on ACO with Hybrid Techniques. Fourth International Conference on Natural Computation IEEE.
- Sanyi, Y., Shangxu, W., and Nan, T., 2009. Swarm intelligence optimization and its application in geophysical data inversion. Applied Geophysics, **6**, 166-174.
- Snopek, K., 2005, Inversion of Gravity Data with Application to Density Modeling of the Hellenic Subduction Zone: PhD Thesis, Department of Geosciences at the Ruhr University.
- ACO، توانایی آن در معکوس‌سازی مدل‌های جهت‌دار با بی‌هنجاری ضعیف در حدود 10^{-3} MGAL است، که در مدل ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت.
- در این تحقیق سعی شد ابعاد مکعب‌ها در حالت بهینه خود انتخاب شود. ابعاد مکعب‌ها باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا بتوان طول‌موج‌های کوتاه در داده‌های مشاهده شده را مدلسازی کرد و نیز به اندازه کافی بزرگ باشد تا مسئله ناپایداری، افزایش پارامترهای مدل و افزایش زمان اجرای برنامه رخ ندهد. این موارد به روش سعی و خطا عملی شد.
- ### تشکر و قدردانی
- از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به سبب در اختیار قرار دادن داده‌ها، کمال تشکر را داریم. در انتها از استادانی که زحمت داوری این مقاله را بر عهده داشته‌اند و با پیشنهادات اساسی باعث بهبود آن شده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنیم.
- ### منابع
- تقوی‌فرد، م. ت.، آریانزاد، م. ق.، و خلیلی دامغانی، ک.، ۱۳۸۷، بهینه‌سازی توسط کلونی مورچه‌گان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات.
- عابدی، م.، افشار، ا.، ابراهیم زاده اردستانی، و.، نوروزی، غ.، و لوکس، ک.، ۱۳۸۸، مدلسازی سه‌بُعدی بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی تحمیلی: مجله ژئوفیزیک ایران، **۳**(۲)، ۷۷–۹۰.
- Barbosa, V. C. F., and Joao, B., 1994, Generalized compact gravity inversion: Geophysics, **59**, 57-68.
- Blakely, R. J., 1995, Potential Theory in Gravity and Magnetic Application: Cambridge University Press.
- Dorigo, M., Birattari, M., and Stutzle, T., 2006. Ant colony optimization: Computational Intelligence Magazine, IEEE, 28–39.