

آنالیز معکوس برداشت‌های مغناطیسی به منظور یافتن بی‌هنجاری‌های محلی با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

حسین ایزدی^{۱*}، غلامرضا نوروزی^۲، بیژن روشن روان^۳ و سیما شکیبا^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۵/۱۳، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

روش‌های ژئوفیزیکی، نقش مهمی در اکتشاف منابع زیرزمینی به‌ویژه اکتشاف کانی‌های فلزی و غیرفلزی، مخازن هیدروکربوری، آب‌های زیرزمینی و تحقیقات زمین‌شناسی و مهندسی بر عهده دارند. روش‌های مغناطیس‌سنجی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی هستند که کاربرد عمده‌ای در یافتن بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل از کانی‌های فلزی، به‌ویژه کانسارهای آهن دارند. در بررسی داده‌های مغناطیس‌سنجی، یکی از اهداف عمده، تفکیک بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در مقیاس‌های گوناگون، به‌ویژه تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای است. بدین منظور، می‌توان بی‌هنجاری ناحیه‌ای را درحکم یک صفحه در نظر گرفت و با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده روی زمین و مقادیر شبیه‌سازی شده از صفحه، بی‌هنجاری‌های محلی را تفکیک کرد. تعیین معادله بهترین صفحه‌ای که بتواند بر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای برازش داده شود، نقش بسیار مهمی در تعیین بی‌هنجاری‌های محلی دارد. به‌منظور برازش بهتر صفحه به بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای، می‌توان از روش‌های معکوس استفاده کرد، زیرا این روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی نیاز به زمان کمتری دارند و جواب نهایی نیز دقت بیشتری دارد. روش‌های معکوس مبتنی بر بهینه‌سازی، در مدل‌سازی و بررسی تابع‌های غیرخطی کاربرد ویژه‌ای دارد و با توجه به پیشرفت علوم رایانه، روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ای با الهام‌گیری از فرایندهای طبیعی طراحی شده‌اند که کاربرد گسترده‌تری دارند. در این مقاله، از روش آنالیز معکوس مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به‌منظور کمینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است. تابع هدف به‌صورت معادله صفحه درجه دوم $K = |Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F - z|$ است که بهینه کردن ضرایب A, B, C, D, E و F موضوع مورد بررسی مقاله حاضر است. نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده تفکیک صحیح بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از بی‌هنجاری‌های کلی است و نتایج بسیار امیدبخشی در شناسایی بی‌هنجاری‌های محلی و پیشنهاد نقاط مناسب به‌منظور عملیات حفاری، حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز معکوس، بی‌هنجاری مغناطیسی محلی، الگوریتم ژنتیک، کمینه‌سازی

Inverse analysis of geomagnetic investigations for local anomaly detection using genetic algorithm

Izadi, H.¹, Nowrouzi, GH.², Roshan Ravan, B.³ and Shakiba, S.⁴

¹ M.Sc. Student of Petroleum Exploration Engineering, Department of Petroleum Exploration, Faculty of Mining Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Iran

³ M.Sc. Student of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

⁴ M.Sc. Student of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 04 Aug 2013, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

One of the most important goals in geomagnetic investigations is detecting local anomaly locations. Regional anomaly can be simulating as a trend surface, and local anomalies will be detected by comparison of measured data and simulated trend surface. The problem is trying to find best coefficients of trend surface model using inverse methods based on modern optimization techniques, which are faster and more accurate than common methods. The main idea of inverse method based on modern optimization approach is to search for a model, which gives its predicted values that are as close as possible to the observed ones. Extensive advances in computational techniques allowed researchers to develop new search strategies for use in optimization problems.

Genetic Algorithm is one of the evolutionary optimization algorithms, based on the population of chromosomes, which is widely used in engineering optimization problems. Evolutionary algorithms are developed based on swarm intelligence and social behavior of individuals in nature. Besides, the populations in evolutionary algorithms called agents affected by neighbor agents and the best agent. At the end, optimum solution will be specified with respect to optimize objective function.

In this paper, genetic algorithm is used for minimizing the differences between real and simulated data. In order to study geomagnetic anomaly, first, forward model should be developed and then, using inverse method based on GA, regional anomaly trend surface will be simulated. The objective function is define as $= |Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F + T_0 - z|$, where, X and Y are positions of the field study locations that are measured by GPS and z is the magnetic value of the positions. Also, A, B, C, D, E and F are unknown coefficients that will be determined using inverse method. According to the objective function, a two-dimensional equation is proposed for simulating regional anomaly trend surface. Two-dimensional equations are better than one-dimensional and three-dimensional or higher dimensional equations. One-dimensional equations do not guarantee to cover all aspects of data. Besides, three or higher dimensional equations are also not recommended for modeling data; because, over fitting to the data may be occurred. Therefore, the two-dimensional equation is the best model for simulating the regional anomaly trend surface. It is important to note that the optimization technique will usually perform well in nonlinear forward models. The unknown coefficients of trend surface on regional magnetic anomaly in Doroh area in southeast of Iran were optimized using inverse analysis, and finally the local anomalies were detected. In order to find locations of local geomagnetic anomalies, total anomaly trend is subtracted from regional anomaly trend and then, the potential locations for drilling investigation are recognized.

Our experimental results demonstrate very promising results of the optimization technique for solving inverse problems using GA for detecting local geomagnetic anomaly trend surface, which is validating through drilling investigations. Besides, upward and reduce to pole filters and combination of them, which are common filters for detecting local geomagnetic anomaly locations, are used for conformation our results.

Keywords: Inverse analysis, Local magnetic anomaly, Genetic algorithm, Minimization

۱ مقدمه

از سنگ‌ها و مواد معدنی، خاصیت مغناطیسی قابل توجهی دارند و به همین منظور، برای بررسی آنها در زیر زمین می‌توان از روش‌های مغناطیس‌سنجی استفاده کرد (تلفورد

روش‌های ژئوفیزیکی، یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بررسی پتانسیل‌های معدنی، نفتی، آبی و زمین‌شناختی هستند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). تعدادی

بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از میدان مغناطیسی کل و یافتن بی‌هنجاری‌های محلی، اغلب از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک استفاده شده است و الگوریتم‌های تکاملی استفاده‌های محدودتری داشته‌اند.

در این مقاله، ارائه یک روش قوی‌تر به‌منظور آنالیز معکوس بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و یافتن بی‌هنجاری محلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مورد بحث قرار گرفته است. به‌منظور تعیین بی‌هنجاری‌های محلی و جداسازی آنها از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای، صفحه درجه دوم کاملی بر منطقه برازش داده می‌شود. این صفحه نشان‌دهنده بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای است و با کسر آن از میدان مغناطیسی کلی، بی‌هنجاری‌های محلی که نشان‌دهنده مناطق دارای پتانسیل معدنی هستند، مشخص خواهند شد. در بررسی‌های مغناطیس‌سنجی مقاله حاضر، خاصیت مغناطیسی تعداد ۱۰۰۰ نقطه اندازه‌گیری شده و هر نقطه دارای سه مقدار x ، y و z است که x نشان‌دهنده طول جغرافیایی، y نشان‌دهنده عرض جغرافیایی و z نشان‌دهنده مقادیر ثبت شده در دستگاه مغناطیس‌سنج است. صفحه درجه دوم، به‌ازای ورودی‌های x و y ، یک مقدار z را نتیجه خواهد داد. بنابراین یک مقدار z از صفحه به وجود خواهد آمد و یک مقدار دیگر برای z در بررسی‌های مغناطیس‌سنجی به‌دست آمده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ضرایب صفحه درجه دوم، به گونه‌ای بهینه‌سازی می‌شوند که اختلاف بین z واقعی و z شبیه‌سازی شده با صفحه درجه دوم، کمینه باشد. پس از به‌دست آوردن ضرایب معادله صفحه درجه دوم و تفاضل آن از میدان مغناطیسی کلی، مقادیر بی‌هنجاری‌های محلی به‌دست خواهد آمد.

در ادامه این مقاله، ابتدا در بخش ۲ روش اکتشافی مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها و فرایند جمع‌آوری پایگاه داده‌ای تشریح خواهد شد و در بخش ۳ به معرفی روش آنالیز معکوس و نحوه کاربرد آن در اکتشافات

و همکاران، ۱۹۹۰). در بررسی‌های مغناطیس‌سنجی پس از اندازه‌گیری مقادیر میدان، برای یافتن بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. داده‌های حاصل از بررسی‌های مغناطیس‌سنجی، داده‌های خام است و به‌منظور تشخیص بی‌هنجاری‌ها، بایستی پیش‌پردازش‌ها و تفسیرهایی روی آنها صورت گیرد. تفسیرهای گوناگونی به‌منظور یافتن بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نظیر روش‌های مبتنی بر گسترش داده‌ها به سمت بالا یا پایین، روش‌های مبتنی بر مشتقات قائم و افقی میدان، کاهش به قطب، سیگنال تحلیلی و مانند آن وجود دارد (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰) که الگوریتم پیشنهادی، رویکردی مبتنی بر آنالیز معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌منظور یافتن بی‌هنجاری‌های محلی مغناطیسی است.

تحقیقات متعددی در کاربرد روش‌های معکوس در بررسی‌های ژئوفیزیکی از جمله در تحقیقات مغناطیس‌سنجی و گرانش صورت گرفته است. در چند نمونه از آن، (بوت، ۱۹۷۳)، (پارکر و هووستیس، ۱۹۷۴)، (اسکالز و شنایدر، ۲۰۰۰) و (کارین و همکاران، ۲۰۰۶) در تحقیقات خود، با استفاده از روش‌های آنالیز معکوس، به تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی و گرانش که فلسفه و پایه تفسیر آن بسیار مشابه بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی است (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰)، پرداخته‌اند. روش‌های آنالیز معکوس غیرخطی که عمدتاً مبتنی بر روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی هستند، در بخش دیگری از تحقیقات ژئوفیزیکی و مغناطیس‌سنجی از سوی (الچلبی، ۱۹۷۲) مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته‌اند. با توجه به توانایی زیاد الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، (بوسچتی و همکاران، ۱۹۹۶) این الگوریتم‌ها را به‌منظور بررسی بی‌هنجاری‌های الکترومغناطیسی و لرزه‌ای مورد استفاده قرار داده‌اند. با این حال به‌منظور بررسی بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی، به‌ویژه در حذف

تفاوت‌ها در خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها) در هر نقطه باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌شود و این تغییرات نسبی با دستگاه‌های مغناطیس‌سنج که اکثراً تحت‌تاثیر میدان مغناطیسی کل قرار می‌گیرند، اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشخص خواهند شد (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰).

۲-۲ خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها

بیشتر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها نه فقط خاصیت مغناطیسی کمی دارند، بلکه تمایلی برای مغناطیسی شدن نیز آشکار نمی‌سازند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). اما کانی‌های دارای اکسیدهای آهن و تیتانیم مانند مگنتیت و اولواسپینل، به علت خاصیت فری مغناطیس (Ferrimagnetism)، عامل به‌وجود آورنده بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زیادی هستند و در بررسی‌های مغناطیس‌سنجی، به این علت که سنگ‌های دارای این کانی‌ها دارای خاصیت مغناطیسی ذاتی هستند، می‌توان آنها را با این روش مورد بررسی قرار داد (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰).

۳-۲ فرایند جمع‌آوری پایگاه داده‌ای

در تحقیقات ژئوفیزیکی، برای هر منطقه و هر روش اکتشافی، بایستی پایگاه داده‌ای جداگانه‌ای تهیه شود. به‌همین منظور، در تهیه پایگاه داده‌ای این مقاله، مقادیر میدان مغناطیسی تعداد ۱۰۰۰ نقطه در منطقه اکتشافی «درج» واقع در جنوب‌شرقی ایران اندازه‌گیری شده است که دقت بالای این اندازه‌گیری‌ها، از نقاط قوت پایگاه داده‌ای این مقاله است. منطقه درج از لحاظ ساختاری در زون فیلیشی شرق ایران قرار دارد و واحدهای سنگی رخنمون یافته در این محدوده شامل سنگ‌های رسوبی نظیر شیل، ماسه سنگ و آهک‌های نازک لایه است.

ژئوفیزیکی پرداخته می‌شود. الگوریتم‌های تکاملی هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در بخش ۴ تشریح خواهند شد و در بخش ۵ نتایج آزمایشگاهی حاصل از این مقاله عرضه خواهد شد. در نهایت، در بخش ۶ نتایج و پیشنهادات خواهد آمد.

۲ روش اکتشافی مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی

سنگ‌ها و فرایند جمع‌آوری پایگاه داده‌ای

روش مغناطیس‌سنجی، به‌منظور اکتشاف نوع خاصی از کانی‌ها قابل استفاده است، به‌گونه‌ای که کانی‌های موردنظر، بایستی دارای خاصیت مغناطیسی قابل‌توجهی باشند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). سنگ‌های دارای کانی مگنتیت و کانی‌های آهن‌دار، به‌طور ذاتی خاصیت مغناطیسی زیادی را از خود نشان می‌دهند و بنابراین گزینه‌های مطلوبی برای بررسی‌های مغناطیس‌سنجی به شمار می‌آیند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). در زیربخش‌های بعدی، اصول اولیه روش اکتشافی مغناطیس‌سنجی و خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها به‌طور خلاصه تشریح می‌شود و در زیربخش ۳-۳ نحوه تشکیل و جمع‌آوری پایگاه داده‌ای تشریح خواهد شد.

۱-۲ روش اکتشافی مغناطیس‌سنجی

اندازه‌گیری مقادیر میدان مغناطیسی روی زمین، نیازمند مهندسی قوی‌ای در روش‌های ژئوفیزیکی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ساختمانی منطقه، است. این کار بسیار طاقت‌فرسا است و نیاز به تخصص و تجربه زیادی دارد. این روش برای شناسایی تغییرات مغناطیسی سنگ‌های زیرین سطح زمین کاربرد دارد. با این روش می‌توان بی‌هنجاری مغناطیسی محلی در نقاط گوناگون زمین (در سطح زمین یا در چاه) را اندازه‌گیری کرد (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰). در واقع تفاوت نسبی تغییرات نیروی مغناطیسی (به علت

به طوری که نتایج حاصل از مدل، با نتایج واقعی کمترین اختلاف را داشته باشد. این در حالی است که در مسائل بهینه‌سازی، فقط یک مقدار در حکم جواب مسئله در نظر گرفته می‌شود و آن مقدار بهینه سراسری است.

۲-۳ نحوه کاربرد روش آنالیز معکوس در اکتشافات ژئوفیزیکی

استفاده از روش‌های معکوس در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی در مقیاس‌های بزرگ، نتایج بسیار با ارزشی را به دنبال دارد. آنالیز معکوس بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی، زیرمجموعه تفسیر غیرمستقیم بی‌هنجاری‌ها است. استفاده از روش‌های آنالیز معکوس در اکتشافات ژئوفیزیکی، اغلب در مواردی استفاده می‌شود که عامل ایجاد کننده بی‌هنجاری، یک میدان پتانسیل مانند میدان مغناطیسی یا میدان گرانشی زمین باشد (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰). به منظور شبیه‌سازی سطح روند بی‌هنجاری ناحیه‌ای، در نظر گرفتن یک معادله صفحه درجه دوم به منزله مدل فرضی منطقه، بدین سبب است که معادله درجه اول توانایی نشان دادن رابطه بین بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای را ندارد و معادله درجه سوم به بالا، ممکن است جزئیات بیشتر و اشتباهی را در حکم بی‌هنجاری ناحیه‌ای معرفی کند و به نوعی برازش زیادی داده‌ها را به دنبال داشته باشد (حسینی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰).

۴ الگوریتم‌های تکاملی هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

امروزه با بزرگ شدن مسائل و اهمیت سرعت رسیدن به جواب، بیشتر از الگوریتم‌های جست‌وجوی هوشمند و ابتکاری به جای جست‌وجوی همه‌جانبه فضای مسئله استفاده می‌شود. در همین راستا، استفاده از الگوریتم‌های جست‌وجوی ابتکاری و تکاملی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است (کوهن، ۱۹۹۶). الگوریتم ژنتیک،

۳ روش آنالیز معکوس و نحوه کاربرد آن در اکتشافات ژئوفیزیکی

روش حل مسائلی که به روش مستقیم قابل حل نیستند، در ابتدا روش‌های سنتی بهینه‌سازی نظیر کمینه‌سازی حداقل مربعات بوده‌اند (لیمز و تریتل، ۱۹۸۳؛ تاراتولا، ۱۹۸۷؛ منکه، ۱۹۸۹؛ آستر و همکاران، ۲۰۰۵) که امروزه از روش‌های معکوس مبتنی بر بهینه‌سازی هوشمند به صورت گسترده در حل چنین مسائلی استفاده می‌شود (فرناندز-مارتینز و همکاران، ۲۰۱۰؛ جوانشیر و همکاران، ۲۰۱۳). به طور کلی استفاده از این روش‌ها در اکتشافات ژئوفیزیکی بسیار مورد توجه است. در زیربخش‌های بعدی، روش‌های آنالیز معکوس و نحوه کاربرد آن در اکتشافات ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳ روش آنالیز معکوس

مسائل معکوس دارای چندین جواب و به شدت به خطای اندازه‌گیری داده‌ها حساس هستند. بنابراین مسائل معکوس جزء مسائل خوش‌رفتار نیستند و از روش‌های عددی مستقیم نمی‌توان برای حل آنها استفاده کرد (اوگاما و هاوول، ۱۹۹۵). در این مقاله، مسئله مورد بررسی، جزء مسائل تشخیصی روش‌های آنالیز معکوس است (ساباتیر، ۱۹۸۵). با توجه به معادله (۱)، مسائل تشخیصی بر مبنای کمینه‌سازی مجموع تفاضل‌های دو مقادیر شبیه‌سازی شده از معادله صفحه درجه دوم (H_S) و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با مغناطیس‌سنج (H_R) هستند (پارکر، ۱۹۷۷).

$$K = \sum_{i=1}^{1000} |H_{S_i} - H_{R_i}| \quad (1)$$

تفاوت اصلی روش آنالیز معکوس با بهینه‌سازی، در این است که در آنالیز معکوس، ورودی و خروجی فرایند، به‌ازای مقادیری معلوم است و هدف آن است معادله یا مدلی بر این ورودی و خروجی‌ها برازش داده شود

نمونه‌های دیگر این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم پخت شبیه‌سازی شده با الهام از مشاهدات ترمودینامیکی (کیرکپاتریک و همکاران، ۱۹۸۳)، الگوریتم جست‌وجوی جمعیتی مورچگان با شبیه‌سازی رفتار مورچه‌ها در جست‌وجوی غذا (دوریگو و همکاران، ۱۹۹۶)، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵) و الگوریتم جست‌وجوی گرانشی (راشیدی و همکاران، ۲۰۰۹) اشاره کرد.

۲-۴ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روش جست‌وجوی احتمالی فراگیری است که از فرایند تکامل زیست‌شناختی طبیعی پیروی می‌کند (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). الگوریتم ژنتیک بر جمعیت جواب‌های بالقوه عمل می‌کند و اصول تنازع بقا را در تولید تقریب‌های بهتر در به‌دست آوردن جواب مسئله به کار می‌گیرد (ملانی، ۱۹۹۹). در هر نسل، مجموعه جدیدی از تقریب‌ها، با فرایند احتمال بیشتر انتخاب بهترین عضو براساس میزان برازش آنها در دامنه مسئله و تکثیر با عملگرهای برگرفته شده از ژنتیک طبیعی ساخته می‌شود. این فرایند در نهایت به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌شود که نسبت به اعضای اولیه که در واقع والدین اصلی آنها هستند، با محیط سازگاری بهتری دارند (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). مبنای توسعه الگوریتم ژنتیک این است که جواب‌های ممکن در یک مسئله بهینه‌سازی را به‌صورت افرادی از جمعیت که از آنان با عنوان کروموزوم یاد می‌شود، در نظر می‌گیرد. این کروموزوم‌ها با شبیه‌سازی سیر تکاملی وراثتی انسان، به حل مسئله می‌پردازند (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). در ادامه، پارامترهای گوناگون الگوریتم ژنتیک از جمله کروموزوم‌ها، تابع برازش، انتخاب کروموزوم‌ها و تولید مثل و عملیات‌های تلفیق و جهش شرح داده خواهد شد.

یکی از الگوریتم‌های تکاملی هوش مصنوعی است که با الهام‌گیری از فرایند تولید مثل موجودات، مسائل پیچیده بهینه‌سازی را تحلیل می‌کند و کمینه یا بیشینه‌های آنها را مشخص می‌سازد.

۱-۴ الگوریتم‌های تکاملی هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم‌ها با الهام‌گیری از فرایندهای فیزیکی و بیولوژیکی طبیعت ایجاد شده‌اند و غالب آنها به‌صورت جمعیتی عمل می‌کنند (فرناندز-مارتینز و همکاران، ۲۰۱۰). چنین الگوریتم‌هایی برخلاف روش‌های کلاسیک، بر مبنای تضاد عمل می‌کنند و جست‌وجوی فضا را به‌صورت موازی عملی می‌سازند (کوهنن، ۱۹۹۶). تفاوت دیگر آنها در استفاده نکردن از اطلاعات گرادیان فضا است. این نوع روش‌ها فقط از تابع برازندگی برای هدایت جست‌وجو استفاده می‌کنند اما به علت دارا بودن هوشمندی جمعی، قادر به کشف جواب هستند (کوهنن، ۱۹۹۶). هوشمندی جمعی در مواردی ظاهر می‌شود که جمعیتی از عوامل غیر خبره موجود باشد. این عوامل هرکدام تحت شرایط معین، رفتارهای ساده‌ای بروز می‌دهند و به‌صورت محلی روی یکدیگر تاثیر دارند (تاراسویچ و مک مولن، ۲۰۰۲). تعاملات محلی اعضا باعث به‌وجود آمدن اثرات فرامحلی می‌شود و در نهایت، کل مجموعه قادر است بدون داشتن یک کنترل‌کننده مرکزی راه حل مسئله را کشف کند (کوهنن، ۱۹۹۶). رفتار اعضا با به‌وجود آمدن ویژگی‌هایی مانند بازخورد مثبت، بازخورد منفی، تعادل بین کاوش و بهره‌وری و تعاملات چندگانه، باعث سازماندهی دستگاه از درون می‌شود که به این اثر، خودسازمان‌دهی می‌گویند (تاراسویچ و مک مولن، ۲۰۰۲). در الگوریتم‌های گوناگون، تعاملات و تبادل اطلاعات بین اعضا از راه‌های گوناگون صورت می‌پذیرد. از

۴-۲-۱ کروموزوم‌ها

تعیین شود، اعضا را می‌توان با احتمالی متناسب با میزان سازگاری نسبی آنها برای تولید نسل بعدی انتخاب کرد. این مرحله اولین مرحله ایجاد نسل بعد است.

تعداد کروموزوم‌ها به صورت آزمون و خطا تعیین می‌شود (ملانی، ۱۹۹۹) و با توجه به پیچیدگی و نوع تابع هدف، تعداد آنها متغیر است. اعضای موجود جمعیت، یا به عبارت دیگر تقریب‌های جاری جواب‌های بهینه مسئله، هرکدام به صورت رشته‌ای همانند کروموزوم‌های ژنتیک با پشت سر قرار گرفتن متغیرهای مسئله به وجود می‌آیند. متغیرهای مسئله که در تابع هدف وجود دارند به منزله ژن‌های هر کروموزوم انتخاب می‌شوند. بنابراین جمعیتی از کروموزوم‌ها به وجود می‌آید که هر کروموزوم به اندازه تعداد متغیرهای تابع هدف، ژن خواهد داشت. مقادیر ژن‌های هر کروموزوم، در جمعیت اولیه به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و در مراحل بعدی اجرای الگوریتم، با استفاده از عملگرهای مخصوص ژنتیک به روز رسانی می‌شوند.

۴-۲-۳ تلفیق کردن یا تقاطع (crossover)

این عملگر ژنتیک، ژن‌های کروموزوم‌های انتخابی در مرحله قبل را با هم ترکیب می‌کند و در نهایت کروموزوم‌های سازگارتری به وجود می‌آید (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). در واقع این عملگر باعث تبادل اطلاعات ژنتیکی بین جفت‌ها، و به وجود آمدن کروموزوم‌های سازگارتر در جمعیت می‌شود. روش‌های گوناگونی برای تلفیق ژن‌های کروموزوم‌ها وجود دارد که هر کدام مزایا و ویژگی‌های خاصی را دارند. بنابراین تعدادی کروموزوم نیز در این مرحله تولید می‌شود. در تمام طول اجرای الگوریتم ژنتیک، مجموع کروموزوم‌های انتخابی و تلفیقی، معمولا مساوی با تعداد کروموزوم‌های اولیه است ولی به ندرت با توجه به شرایط مسئله ممکن است بیشتر نیز باشد. این عملگر، لزوماً بر همه کروموزوم‌های جمعیت عمل نمی‌کند.

۴-۲-۲ تابع برازش، انتخاب و تولید مثل

در این مرحله برازندگی و عملکرد هر عضو جمعیت (کروموزوم‌ها) در حل مسئله ارزیابی می‌شود (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). در جهان طبیعی، این تابع در واقع نشان‌دهنده قدرت و توانایی موجودات برای زنده ماندن در محیط اطراف خودشان است (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). بنابراین میزان خوب بودن کروموزوم‌ها در این مرحله با تابع برازش تعیین می‌شود. در مرحله انتخاب، فرایند انتخاب تعدادی از کروموزوم‌ها برای انتقال به نسل بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعداد کروموزوم‌هایی که از جمعیت فعلی به نسل بعدی انتقال خواهند یافت، با ضریب X_{rate} به صورت درصدی بیان می‌شوند. به طور کلی، اعضای که نسبت به دیگران سازگاری بیشتری دارند، احتمال بیشتری برای انتخاب خواهند داشت؛ در صورتی که، اعضای که سازگاری کمتری دارند به همان نسبت احتمال کمتری برای انتخاب دارند. هنگامی که میزان سازگاری هر عضو

۴-۲-۴ جهش (mutation)

جهش در کروموزوم‌ها که با ضریب μ به صورت درصدی بیان می‌شود، در واقع ایجاد نوعی تغییر تصادفی در آنها است و پس از تولید جمعیت جدید در مراحل انتخاب و تقاطع، به علت قرار نگرفتن در بهینه‌های محلی، عملگر جهش به کار گرفته می‌شود (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). همچنین جهش باعث می‌شود که نمایش ژنتیکی اعضای جمعیت بنا بر قاعده احتمالاتی تغییر کند (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). عملگر جهش، با احتمال معینی روی کروموزوم‌ها عمل می‌کند. برای ایجاد جهش، یک نرخ جهش وجود دارد که نشان‌دهنده این است که چه تعداد از اعضای جمعیت باید تحت عملگر جهش قرار گیرند. نحوه انتخاب کروموزوم‌ها برای جهش، تصادفی است.

۵ نتایج

صفر بهینه‌سازی می‌شود. بنابراین در حل این مسئله، هر عضو (کروموزوم) که دارای اختلاف کمتری با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با مغناطیس سنج باشد، دارای ارزش بیشتری خواهد بود. به منظور طراحی الگوریتم ژنتیک، چهار حالت متفاوت برای x_{rate} و μ آزمایش شده است (مسیبایی و همکاران، ۲۰۱۳) و با توجه به معادله (۳)، بهترین مقادیر پارامترهای کنترلی الگوریتم تعیین خواهد شد. این معادله به صورت تجربی به دست آمده است و یک مقیاس یکسان به منظور مقایسه حالت‌های گوناگون پارامترهای کنترلی الگوریتم ژنتیک است.

$$\begin{aligned} \text{Value} = & N_{E < 5\%} \times (4) + N_{5\% < E < 7\%} \times (2) + \\ & N_{7\% < E < 9\%} \times (-1) + N_{9\% < E < 11\%} \times (-3) + \\ & N_{11\% < E < 13\%} \times (-5) + N_{13\% < E < 15\%} \times (-7) \\ & + N_{E > 15\%} \times (-9) - (\text{Best value} / 1000) \end{aligned} \quad (3)$$

در این معادله، $N_{\alpha\% < E < \beta\%}$ نشان‌دهنده این است که در بین ۱۰۰۰ داده موجود، در جواب‌های مدل برازش داده شده، N تایی آن در مقایسه با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با مغناطیس سنج، به اندازه $\alpha\%$ تا $\beta\%$ اختلاف دارد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، در حالت اول تعداد ۹۰۹ داده کمتر از ۵٪ در مقادیر واقعی و مقادیر مدل‌سازی شده، در مقایسه با یکدیگر اختلاف دارند. در هر دوره تکرار الگوریتم، ۱۰۰۰ مقدار واقعی از ۱۰۰۰ مقدار شبیه‌سازی شده در همان دوره تکرار، کسر شده و مجموع قدر مطلق آنها ذخیره می‌شود. این مقدار در دوره تکرار نهایی در حکم مقدار پایه (Best Value) در نظر گرفته می‌شود که این مقدار در جدول ۱ نشان داده شده است. بنابراین در هر حالت، هر چقدر مقدار پایه کمتر باشد، آن حالت دارای احتمال بالاتری برای انتخاب شدن خواهد داشت.

بنابراین با استفاده از معادله (۳) و اطلاعات جدول ۱، هر یک از حالت‌های متفاوت پارامترهای کنترلی ارزش‌گذاری شده و نتایج آن در جدول ۲ آمده است. بنابراین از هر حالتی که ارزش بیشتری داشته باشد، در

پس از تشکیل پایگاه داده‌ای با دقت زیاد برای ۱۰۰۰ نقطه در محدوده اکتشافی درج واقع در جنوب شرقی ایران، در زیربخش ۵-۱ با استفاده از روش آنالیز معکوس و استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه کردن ضرایب تابع هدف (معادله (۲))، بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای تشخیص داده شده و در زیربخش ۵-۲ بی‌هنجاری ناحیه‌ای به دست آمده است که از مقادیر مغناطیسی کلی کسر خواهد شد و مقادیر نتیجه‌ی این تفاضل، نشان‌دهنده بی‌هنجاری‌های محلی خواهد بود.

۱-۵ کمینه‌سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این مقاله، به علت پیوسته بودن ماهیت داده‌ها، از نسخه پیوسته الگوریتم ژنتیک استفاده شده، و تعداد کروموزوم‌های هر نسل، به صورت آزمون و خطا برابر با ۲۰۰ کروموزوم در نظر گرفته شده است. همچنین از فرایند چرخ گردان به منظور تلفیق کروموزوم‌ها استفاده شده است؛ زیرا، این روش به همه کروموزوم‌ها به نسبت برابری آنها، احتمال انتخاب به منظور شرکت در عملیات تلفیق را می‌دهد. عملگر جهش، با توجه به نرخ جهش تعیین شده، تعدادی از کروموزوم‌ها را به طور تصادفی انتخاب می‌کند و تغییرات تصادفی‌ای را در آنها به وجود می‌آورد که در طی افزایش دوره تکرار، تاثیر این عملگر، کاهش پیدا می‌کند. با توجه به پارامترهای تعیین شده الگوریتم ژنتیک و اجرای آن، مقادیر ضرایب معادله (۲) بهینه‌سازی خواهد شد.

$$K = \left| \frac{A \times x^2 + B \times y^2 + C \times x \times y + D \times x + E \times y + F - z}{D \times x + E \times y + F - z} \right| \quad (2)$$

تابع برازش این مسئله، همان کمترین اختلاف با مقدار میدان مغناطیسی کلی است که در محدوده مورد بررسی اندازه‌گیری شده است. در واقع تابع هدف به‌ازای مقدار

آمد. شکل ۲ نشان‌دهنده منحنی کانتوری مقادیر کلی مغناطیسی بدون کاستن بی‌هنجاری ناحیه‌ای است و شکل ۳ نشان‌دهنده بی‌هنجاری‌های محلی است که حاصل تفاضل میدان کلی و بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای است که در نقشه‌های کانتوری زیر، وجود تراکم بالای خطوط در هر نقطه، به‌طور کلی نشان‌دهنده بی‌هنجاری است.

$$Z = \left| \frac{A \times x^2 + B \times y^2 + C \times x \times y + D \times x + E \times y + F}{D \times x + E \times y + F} \right| \quad (4)$$

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان متوجه شد که کسر کردن بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از میدان مغناطیسی کلی، تاثیر بسزایی در یافتن بی‌هنجاری‌های محلی دارد به‌طوری‌که تعدادی از نقاط شکل ۲ که به ظاهر نشان‌دهنده پتانسیل معدنی هستند، در شکل ۳ حذف شده‌اند و تقریباً ۳ نقطه در حکم بی‌هنجاری محلی درست در شکل ۳ مشخص شده است که این نقاط در مراحل بعدی اکتشاف، مورد توجه بیشتری قرار خواهند گرفت تا روشن شود که نقاط پیشنهادی این مقاله به منزله بی‌هنجاری‌های محلی، در چاه‌های اکتشافی مورد تایید قرار گرفته است یا خیر.

۳-۵ بررسی ژئوفیزیکی منطقه مورد بررسی
به منظور اطمینان حاصل کردن از صحت روند کار، از نرم‌افزار Oasis montaj و به کارگیری فیلترهای مناسب، به بررسی ژئوفیزیکی منطقه مورد تحقیق پرداخته شده است.

حکم پارامتر کنترلی در پیاده‌سازی الگوریتم استفاده خواهد شد. بنابراین حالت دوم ($\mu=0.2$ و $x_{rate}=0.57$) به منظور پیاده‌سازی الگوریتم انتخاب شده است.

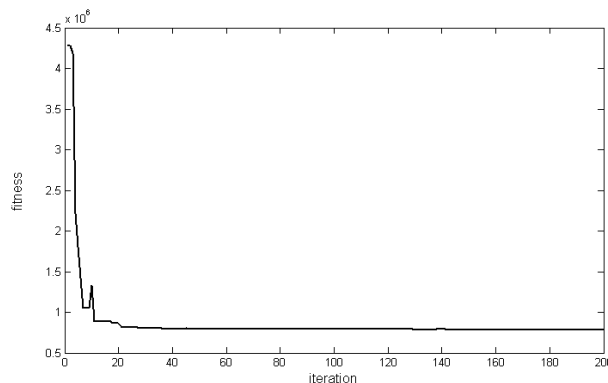
همگرا شدن الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است که همگرا شدن مقادیر به سمت صفر، نشان‌دهنده عمل کردن صحیح الگوریتم است. با توجه به اجرای الگوریتم در ۲۰۰ دوره تکرار، مقادیر بهینه به دست آمده برای ضرایب معادله (۲) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} A &= -8.58 \times 10^{-4} \\ B &= 3.53 \times 10^{-3} \\ C &= 4.17 \times 10^{-3} \\ D &= 8.85 \times 10^{-1} \\ E &= -2.19 \\ F &= 1.51 \times 10^2 \end{aligned}$$

با استفاده از ضرایب به دست آمده و قرار دادن آن در معادله (۴)، مقادیر صفحه شبیه‌سازی شده که معرف بی‌هنجاری ناحیه‌ای محدوده‌ی مورد بررسی است، به دست خواهد آمد.

۲-۵ یافتن بی‌هنجاری‌های محلی مغناطیسی

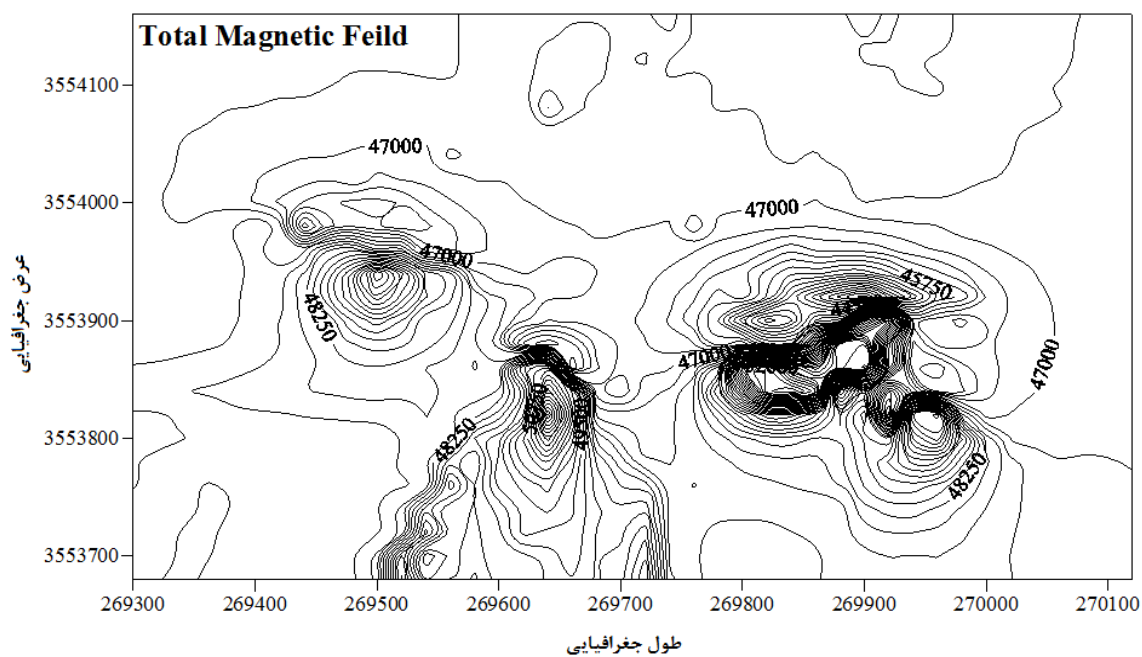
به منظور یافتن بی‌هنجاری‌های محلی، اختلاف مقادیر Z اندازه‌گیری شده با مغناطیس‌سنج (که بیانگر میدان مغناطیسی کلی است) و Z محاسبه شده با معادله (۴) (که بیانگر بی‌هنجاری ناحیه‌ای است) را محاسبه و توسط این مقدار، نقشه کانتوری بی‌هنجاری‌های محلی به دست خواهد



شکل ۱. فرایند کمینه سازی تابع هدف.

جدول ۱. $N_{\alpha\% < E < \beta\%}$ و مقدار پایه برای حالت‌های متفاوت پارامترهای کنترلی.

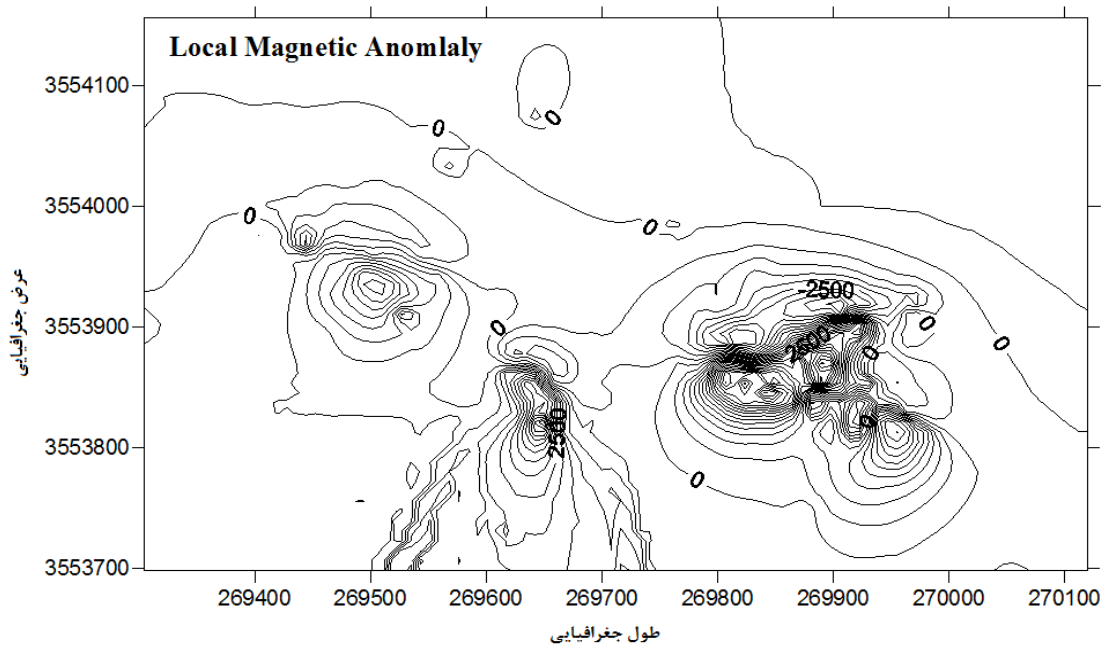
	$X_{rate}=0.5, \mu=0.15$	$X_{rate}=0.57, \mu=0.2$	$X_{rate}=0.57, \mu=0.15$	$X_{rate}=0.5, \mu=0.2$
Error<5%	909	907	909	904
5%<Error<7%	38	36	38	43
7%<Error<9%	21	24	21	21
9%<Error<11%	14	15	14	17
11%<Error<13%	11	11	10	7
13%<Error<15%	3	3	4	4
Error>15%	4	4	4	4
مقدار پایه	933089.225129583	892970.906667292	944322.306852567	1001646.91883506



شکل ۲. میدان کلی مغناطیسی.

جدول ۲. ارزش حالت‌های متفاوت پارامترهای کنترلی.

	$X_{rate}=0.5, \mu=0.15$	$X_{rate}=0.57, \mu=0.2$	$X_{rate}=0.57, \mu=0.15$	$X_{rate}=0.5, \mu=0.2$
مقدار	2603.910077487042	2626.02909333271	2590.67769314743	2529.35308116494



شکل ۳. بی‌هنجاری مغناطیسی محلی.

برگردان به قطب به زوایای میل و انحراف نیاز است که با توجه به تبدیل مختصات UTM در مدل IGRF استفاده می‌شود.

زوایای به دست آمده برابر با $I = 49.7^\circ$ (زاویه میل مغناطیسی) و $D = 2.6^\circ$ (زاویه انحراف) است. این زوایا باعث چرخش و پیچش بی‌هنجاری می‌شوند که با فیلتر برگردان به قطب تصحیح می‌شوند. این پردازش محل بی‌هنجاری مغناطیسی را نسبت به محل کانی‌سازی تصحیح می‌کند و بی‌هنجاری مغناطیسی در بالای محل کانسار قرار می‌گیرد. در واقع با برگردان بی‌هنجاری به قطب مغناطیسی می‌توان محل دقیق بی‌هنجاری برای حفاری را پیشنهاد کرد.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، اثر دوقطبی B کاهش یافته است و این نشان‌دهنده شیب زیاد بی‌هنجاری در این موقعیت است. در قسمت A نیز اثر دوقطبی نسبت به شکل ۴ کمتر شده است؛ اما همچنان دوقطبی دیده می‌شود.

۱-۳-۵ بررسی نقشه گسترش به سمت بالا

گسترش به بالا یک فرایند هموارساز است و میدان را در هر نقطه بالاتر از سطح زمین به دست می‌دهد. براین اساس نوفه‌های سطحی حذف می‌شود و اثر توپوگرافی را تا حدی کاهش می‌دهد؛ در نتیجه، امکان تشخیص بی‌هنجاری راحت‌تر می‌شود.

به علت اینکه میدان مغناطیسی با مجذور فاصله نسبت عکس دارد، استفاده از ارتفاع بیشتر در فیلتر گسترش به سمت بالا اثر بی‌هنجاری‌های کوچک و سطحی از بین می‌رود و بی‌هنجاری‌های بزرگ و پی سنگ نمایان می‌شود. در شکل ۴، با توجه به حذف بی‌هنجاری‌های سطحی، دوقطبی‌های A و B نشان داده شده‌اند.

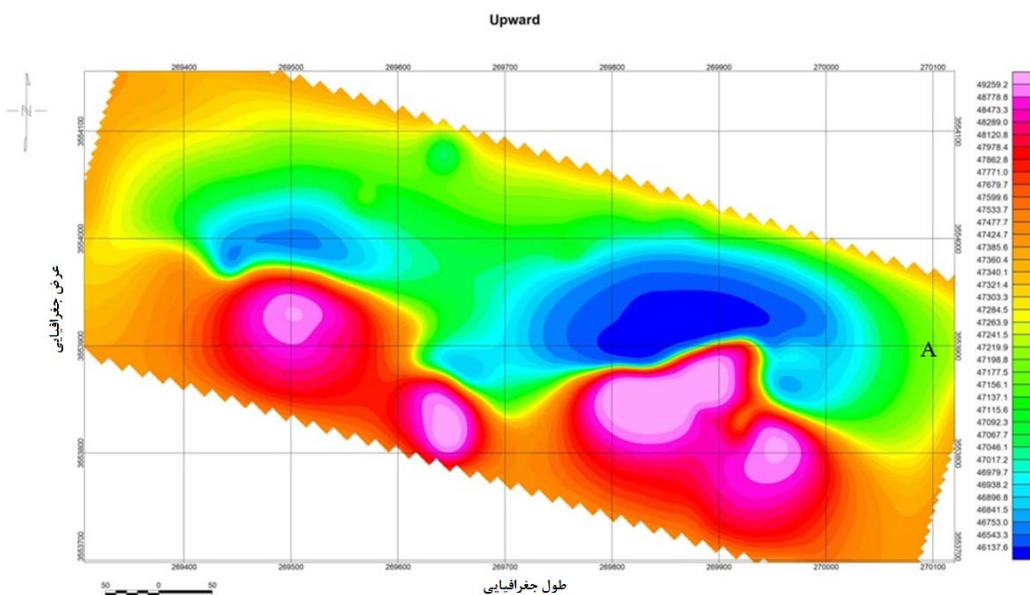
۲-۳-۵ بررسی نقشه برگردان به قطب

بردار میدان مغناطیسی در عرض‌های گوناگون دارای امتدادهای متفاوتی است، ولی دستگاه مغناطیس‌سنج فقط شدت بردار میدان را نشان می‌دهد. برای اجرای فیلتر

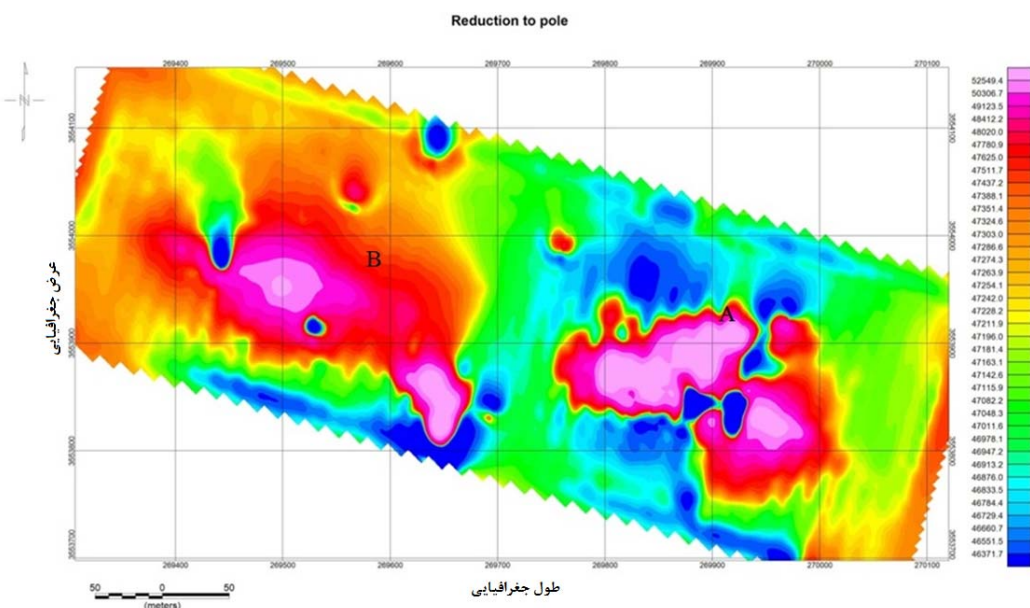
۳-۳-۵ تلفیق فیلترهای برگردان به قطب و ادامه فراسو

برای داشتن درک بهتر از تعداد و شیب و شکل بی‌هنجاری‌ها، فیلترهای گسترش به بالا و برگردان به قطب را تلفیق می‌کنیم. با توجه به شکل ۶، همان‌طور که مشخص

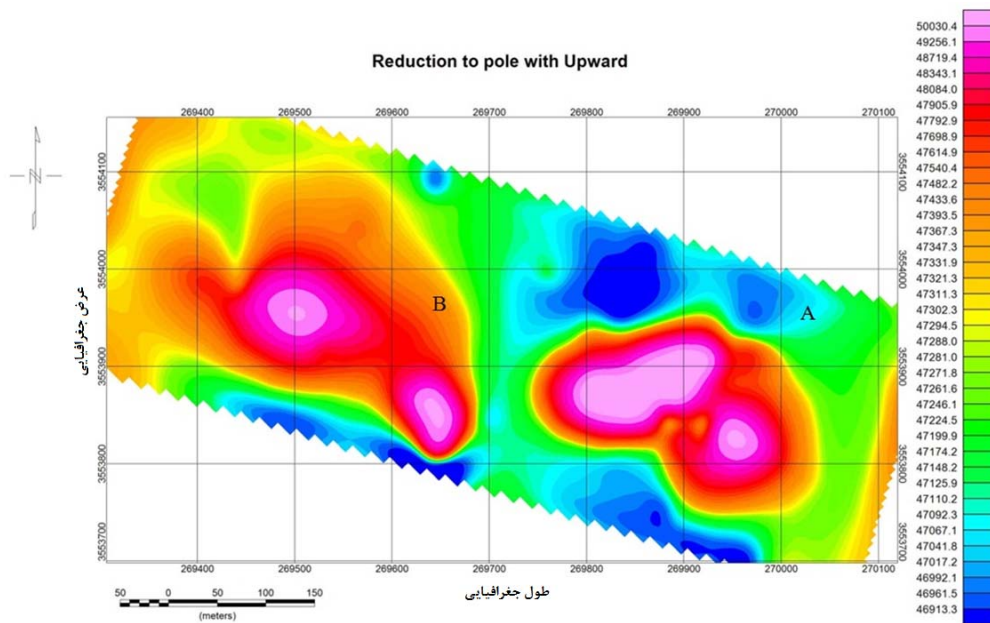
است دو بی‌هنجاری A و B وجود دارد. شیب دوقطبی A به طرف شمال است و نسبت به شکل ۴ به طرف شمال کشیده و اثر قطب مثبت بیشتر شده است. بی‌هنجاری B به صورت تک‌قطبی و شیب حدود ۹۰ درجه است.



شکل ۴. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با فیلتر گسترش به بالا.



شکل ۵. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با فیلتر برگردان به قطب.



شکل ۶. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با تلفیق فیلتر گسترش به بالا و برگردان به قطب.

محلی را با دقت بسیار زیادی از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای تفکیک کند، به گونه‌ای که درستی نتایج روش پیشنهادی، با استفاده از روش‌های برگردان به قطب، ادامه فراسو و تلفیق این دو ارزیابی شد، و همه نتایج نشان‌دهنده صحیح بودن روش پیشنهادی است. همچنین، نتایج روش پیشنهادی با عملیات حفاری و مغزه‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفته است که این نیز نشان‌دهنده عملکرد صحیح روش پیشنهادی است.

مراجع

حسینی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۰، تحلیل داده‌های اکتشافی، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
 قاسم‌العسکری، م. ک.، ۱۳۹۰، اصول ژئوفیزیک اکتشافی (روش‌های سنجش و چاه‌پیمایی ژئوفیزیک)، ویرایش دوم، تهران، انتشارات آبیژ.

Al-ghalabi, M., 1972, Interpretation of gravity and anomalies by non-Linear optimization, Geophys. Prosp., **20**, 1-16.

Aster, R. C., Brochers, B. and Thurber, C. H., 2005, Parameter estimation and inverse

با مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و بررسی ژئوفیزیکی منطقه با نرم‌افزار Oasis montaj به نتایج یکسان وجود دو بی‌هنجاری در منطقه می‌رسیم.

۶ نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های آنالیز معکوس و بهینه‌سازی در اکتشافات ژئوفیزیکی بسیار مورد توجه است که در این مقاله روشی مبتنی بر آنالیز معکوس و بهینه‌سازی هوشمند برای یافتن بی‌هنجاری‌های محلی مغناطیس‌سنجی عرضه شده است. در فرایند اجرای این تحقیق، پس از تهیه پایگاه داده‌ای از منطقه اکتشافی درح واقع در جنوب شرقی ایران با دقت زیاد که به مثابه قدمی اساسی و مهم تلقی می‌شود، با استفاده از الگوریتم ژنتیک سطح روند بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای به صورت یک معادله درجه دوم کامل شبیه‌سازی شد و با تفاضل مقادیر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از میدان مغناطیسی کلی، بی‌هنجاری‌های محلی که نشان‌دهنده پتانسیل‌های معدنی در منطقه هستند، به دست آمد. روش پیشنهادی در تحقیق حاضر قادر است بی‌هنجاری‌های

- Limes, L. R. and Treitel, S., 1983, Tutorial, a review of last-squares inversion and its application to geophysical problems, *Geophys. Prospect.*, **32**, 159-186.
- Oguma, M. and Howell, J. H., 1995, Solution of two-dimensional blackbody inverse radiation problem by inverse Monte Carlo method, Proc. ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conf., Maui, Hawaii.
- Massinaei, M., Falaghi, H. and Izadi, H., 2013, Optimization of metallurgical performance of industrial flotation column using neural network and gravitational search algorithm, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **52**(2), 115-122.
- Melanie, M., 1999, An introduction to genetic algorithms, MIT Press, Massachusetts, Fifth Printing.
- Menke, W., 1989, *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*, international geophysics Series, Academic Press, San Diego, Ca.
- Parker, R. L. and Huestis, S. P., 1974, The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1587-1593.
- Parker, R. L., 1977, Understanding inverse theory, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, **5**, 35-64.
- Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Saryazdi, S., 2009, GSA: a gravitational search algorithm, *Information Science*, **179**, 2232-2248.
- Sabatier, P., 1985, Inverse problems an introduction, *inverse problems*, **1**(1), 1-4.
- Scales, J. A. and Snieder, R., 2000, The anatomy of inverse problems, *Geophysics*, **65**(6), 1708-1710.
- Tarantola, A., 1987, *Inverse problem theory: methods for model parameter estimation*, society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- Tarasewich, P. and McMullen, P. R., 2002, Swarm intelligence: power in numbers, Appears in communication of ACM, **45**(8), 62-67.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990, *Applied geophysics*, 2nd edition, October, Cambridge University Press.
- problem, *International Geophysics Book Series*, Elsevier Academic Press, Amsterdam, **90**.
- Boot, M. H. P., 1973, Inverse methodes in the interpretation of magnetic and gravity anomalies, *Methodes in Computational Physics*, **13**, 62-133.
- Boschetti, F., Dentith, M. C. and List, R. D., 1996, Inversion of seismic refracting data using genetic algorithms, *Geophysics*, **61**(6), 1715-1727.
- Carbone, D., Currenti, G., Del Negro, C., Ganci, G. and Napoli, R., 2006, Inverse modeling in geophysical applications, VIII Conference SIMAI (Italian Society of Mathematics Applied to Industry), Baia Samuele (Ragusa), 22-26 May (oral Presentation).
- Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colomi, A., 1996, The Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics-part B*, **26**(1), 1-13.
- Fernandez-Martinez, J. L., Gonzalo, E. G., Fernandez Alvarez, J. O., Kuzma, H. A. and Menendez Prez, C. O., 2010, PSO: a powerful algorithm to solve geophysical inverse problems application to a 1D-DC resistivity case, *Journal of Applied Geophysics*, **71**, 13-25.
- Haupt, R. L., Haupt, S. E., 2004, *Practical genetic algorithm*, Second Edition, Wiley Interscience.
- Javanshir, S., Izadi, H., Tavakoli Mohammadi, M. R. and Sabeti, H., 2013, A modified correlation for drop size distributaio in a experimental mixer-settler using particle swarm optimization algorithm, *Separation Science and Technology Journal*, Taylor and Francis Publishing, In Press Paper.
- Kennedy, J., Eberhart, R. C., 1995, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942-1948.
- Kirkpatrick, S., Gelatto, C. D. and Vecchi, M. P., 1983, Optimization by simulated annealing, *Science*, **220** (4598), 671-680.
- Kohonen, T., 1996, *Self-organization and associative memory*, third ed., Springer, Berlin.