

کاربرد فیلتر فازی محلی تعمیم یافته در برآورد مرز بی‌هنجری‌های مغناطیسی، بررسی موردی: کانسار آهن تیغه نوآب (بیر جند)

مسلم فاتحی^{۱*}، غلامحسین نوروزی^۲ و میثم عابدی^۳

^۱ دانشجوی دکترا مهندسی معدن - اکتشاف، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکترا مهندسی معدن - اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۰/۴/۱۵، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

چکیده

برجسته‌سازی مرز یکی از مهم‌ترین مراحل و اهداف در تفسیر داده‌های مغناطیسی است. دو مورد از پیچیدگی‌های داده‌های مغناطیسی، ادغام اثر بی‌هنجری‌های مجاور و قرار گرفتن دو توده با عمق‌ها یا خواص مغناطیسی متفاوت که ایجاد یک بی‌هنجری ضعیف و یک بی‌هنجری قوی در کنار یکدیگر می‌کنند، است. بسیاری از روش‌هایی که برای برآورد و برجسته‌سازی مرز از آنها استفاده می‌شود در موارد پیش‌گفته با مشکل مواجه هستند و نمی‌توانند به خوبی مرز توده‌ها را برجسته کنند (از جمله مشتق افقی، سیگنال تحلیلی و مانند آن). برای برجسته‌سازی همزمان مرز بی‌هنجری‌های ضعیف و قوی، در سال‌های اخیر از فیلترهای کسری که حاصل از نسبت بین مشتق‌های افقی و قائم هستند، استفاده شده است. در این مقاله این روش‌ها که با عنوان روش‌های فازی شناخته می‌شوند (مانند زاویه تیلت، تتا و سایر موارد) مورد بررسی قرار گرفته است و با إعمال روی داده‌های مصنوعی محدودیت‌های آنها بررسی می‌شود. علاوه بر آن فیلترهای فاز محلی تعمیم یافته که نتایج بهتری نسبت به روش‌های فازی دارند معرفی شده‌اند. فیلترهای فاز محلی تعمیم یافته عملکرد قابل قبولی در تفکیک و برآورد مرز توده‌های مجاور هم دارند. در نهایت این روش‌ها روی داده‌های مغناطیسی کانسار تیغه نوآب إعمال و از گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در منطقه برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، پردازش داده، برجسته‌سازی مرز، نقشه تتا، فاز محلی پیوسته.

Application of improved local phase filter for edge detection of magnetic anomalies, A case study: Tighe Now Ab iron deposit (Byrjand)

Fatehi, M.¹, Norouzi, G. H.² and Abedi, M.³

¹Ph.D. Student of Mining Engineering – Exploration, Faculty of Mining Engineering, University of Isfahan, Iran

²Associate Professor of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

³Ph.D. Student, Faculty of Mining Engineering – Exploration, University of Tehran, Iran

(Received: 06 Jul 2011, Accepted: 08 Oct 2013)

Summary

Magnetic survey is nowadays the most efficient non-destructive geophysical method. This technique puts emphasis on the measurement of anomalies of the Earth's magnetic field, caused by the presence of archaeological remains in the ground. Magnetic survey is one of the oldest geophysical methods for airborne and land use. That is why there is a large volume of data that could be used for geological studies and deposits exploration.

In this method, the intensity of earth's magnetic field is measured. The method is used

for metal objects exploration in archeology, engineering investigations, metal mineral exploration, oil and gas exploration, as well as the regional geological studies for the study of igneous basement. The magnetic techniques in mineral exploration are used for both of the magnetic minerals and non-magnetic minerals exploration associated with magnetic ones.

Magnetic and gravity surveys are usually based on potential field methods. In potential field data processing the edge enhancement is an important issue. Edge enhancement of potential field data has been widely used as a tool in mineral exploration prospects. Vertical derivatives of potential field data are in current approach to enhance observed probable anomalies. A well-known method of enhancing boundaries of underground structures corresponds to the zero contour of the second vertical derivative of gravity or reduced-to-the-pole of magnetic fields. However, as is well known, the estimated boundaries acquired by such technique are systematically shifted from the true position even for vertical-sided sources, and application of this method produces fairly complicated results in multi-source cases (Fedi and Florio, 2001). Cordell and Grauch (1985) also showed that the maximum of horizontal derivative is applied to the gravity or pseudo gravity anomalies localized above abrupt changes of density or magnetization.

Potential field data often contains anomalies with a wide range of amplitude, and while the weak anomalies may be considered as useful geological phenomena, they can be difficult to recognize among the strong anomalies in the total horizontal derivative (THD) method (Ma, 2013). The other complexity in potential field data is the effect of adjacent anomalies. The THD method is not successful to enhance the boundary of these models. Analytic signal (Nabighian, 1972, 1974) is another method for processing and interpretation of magnetic field data. Analytical signal is combination of vertical and horizontal derivatives of magnetic field that can also be used to determine the location of the masses. The high values in this map indicate the location of the masses.

Recently, numerous edge-detection filters have been used which are based on the horizontal and vertical derivatives of potential field data and they display a balanced result. Miller and Singh (1994) proposed using the tilt angle to enhance the edges of the sources. Tilt angle is an effective method in balancing the amplitude of strong and weak anomalies, but it is not exactly an edge detection filter.

Wijns et al. (2005) introduced the theta map as an edge detection method that uses the amplitude of analytic signal relative to the total horizontal derivative. The maximum of the theta map are located over the edges of causative sources. The theta map displays the edges of the shallow and deep bodies simultaneously, but the edges of the sources are diffused.

In order to increase the resolution of theta map filter, Ma (2013) proposed second order of the theta map (STM). He also suggested a high resolution filter to enhance the edges of potential field data (improved local phase (ILP)), which consists of first order and second order horizontal derivatives.

In this paper we use and compare phase based methods (such as tilt angle and theta map) and improved local phase filters in magnetic data interpretation. To evaluate the capability of the methods, magnetic anomalies caused by synthetic bodies are examined. After acquiring satisfactory results, these techniques are applied on real data. Ultimately, magnetic anomaly of iron ore body belonged to Tighe Now Ab iron deposit located in the north-east of Iran is used. As a consequence, drilling borehole results are incorporated to validate the outcomes.

Keywords: Potential field, Data processing, Edge enhancement, Theta map, Impoved local phase (ILP)

۱ مقدمه

توانایی برجسته‌سازی بی‌هنگاری ضعیف قرار گرفته در کنار یک بی‌هنگاری قوی را ندارد.

در سال‌های اخیر برای آنکه بتوان یک روش کارا برای برجسته‌سازی هم‌زمان بی‌هنگاری‌های ضعیف مجاور بی‌هنگاری‌های قوی معرفی کرد، از نسبت‌های بین مشتق قائم و افقی در مرتبه‌های کسری استفاده شده است. میلر و سینگ (۱۹۹۴) زاویه تیلت را برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها معرفی کردند. این فیلتر برابر با معکوس تائزانت نسبت مشتق قائم به مشتق افقی است. زاویه تیلت یک فیلتر مناسب برای متعادل‌سازی دامنه بی‌هنگاری‌های قوی و ضعیف است، اما یک فیلتر برآورد مرز نیست. مشتق افقی زاویه تیلت نیز برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها معرفی شد (وردوکو و همکاران، ۲۰۰۴).

ویجنتز و همکاران (۲۰۰۵) فیلتر زاویه تتا را که برابر با نسبت مشتق افقی به سیگنال تحلیلی است، برای برآورد مرز توده‌ها معرفی کردند. بیشینه مقدار این فیلتر مرز توده را نشان می‌دهد. این فیلتر می‌تواند هم‌زمان مرز بی‌هنگاری‌های ضعیف و قوی را برجسته کند اما مشکل این فیلتر این است که مرز برآورده توده‌ها پخش شدگی دارد و معمولاً مرز برآورد شده بزرگ‌تر از واقعیت است. کوپر و کوان (۲۰۰۶) از فیلترهای بر مبنای فاز (فیلترهایی مانند: تتا، تیلت، تائزانت هایپربولیک زاویه تیلت و مانند آن) برای برآورد مرز توده‌ها استفاده کردند. این محققان از نسبت مشتق افقی متعامد نیز برای برآورد مرز استفاده کردند. همچنین کوپر و کوان (۲۰۰۸) از انحراف معیار نرمال شده برای برآورد مرز استفاده کردند. از مزیت‌های این روش برجسته‌سازی هم‌زمان مرز بی‌هنگاری‌های باشد قوی و ضعیف است و از معایب آن، این است که نتایج حاصل از این روش به طول پنجره انتخاب شده بستگی دارد.

ما و لی (۲۰۱۲) از مشتق افقی نرمال شده برای این

از برآورد مرز داده‌های میدان پتانسیل به طور گستردۀ در اکتشاف مواد معدنی استفاده شده است. معمولاً برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها از فیلترهای بالاگذر مانند مشتق افقی، مشتق قائم و ادامه فرسو استفاده می‌شود. داده‌های میدان پتانسیل معمولاً شامل بی‌هنگاری‌های متعددی هستند که ناشی از توده‌های متفاوت‌اند. گاهی چند توده در مجاور هم هستند و منجر به تداخل بی‌هنگاری‌ها می‌شوند. همچنین ممکن است دو توده در عمق‌های متفاوت قرار داشته باشند که این منجر به ایجاد یک بی‌هنگاری ضعیف در کنار یک بی‌هنگاری قوی می‌شود. سال‌ها است که در تعیین مرز توده‌ها از مشتق قائم استفاده می‌شود. یک روش شناخته شده برای تعیین مرز توده‌ها، در نظر گرفتن کنتور صفر مشتق قائم مرتبه دوم داده‌های گرانی یا تبدیل به قطب شده مغناطیسی است (فیدی و فلوریو، ۲۰۰۱). مشتق افقی یکی دیگر از فیلترهایی است که به طور گستردۀ برای برآورد مرز توده‌ها از آن استفاده شده است. کوردل و گراج (۱۹۸۵) روشن ساختند که بیشینه مشتق افقی، گرانی یا شبه گرانی مرز توده‌ها را نشان می‌دهد. از معایب این فیلتر این است که مرز برآورده پخش شدگی (diffused) دارد و نمی‌تواند مرز بی‌هنگاری‌های ضعیف قرار گرفته در مجاورت بی‌هنگاری‌های قوی را برجسته کند (گوکینگ ما، ۲۰۱۳) و همچنین قابلیت تفکیک توده‌های مجاور را نیز ندارد. سیگنال تحلیلی از جمله روش‌هایی است که نیقیان (۱۹۷۲) و روئست و همکاران (۱۹۹۲) معرفی کرده‌اند و به طور گستردۀ در تفسیر داده‌های مغناطیسی از آن استفاده شده است. بیان شده است که بیشینه مقدار سیگنال مرز توده‌ها را نشان می‌دهد که این نکته در همه جا صادق نیست و علاوه بر آن برای تفکیک توده‌های مجاور لازم است از سیگنال تحلیلی مرتبه‌های بالاتر (هسو و همکاران، ۱۹۹۸، ۱۹۹۶) استفاده کرد. سیگنال تحلیلی

همچنین پراکنده می‌شود (diffused). برای برطرف کردن این مشکل زاویه تنا، ما (۲۰۱۳) از مشتقهای مرتبه‌های بالاتر در زاویه تنا استفاده کرد که زاویه تنا مرتبه دوم نامیده می‌شود (STM):

$$STM = \frac{\sqrt{(\frac{\partial M_z}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M_z}{\partial y})^2}}{\sqrt{(\frac{\partial M_z}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M_z}{\partial y})^2 + (\frac{\partial M_z}{\partial z})^2}} \quad (3)$$

و در آن، M_z ، مشتق قائم مرتبه اول میدان پتانسیل است. از معایب این روش این است که به مشتق قائم مرتبه دوم میدان پتانسیل نیاز دارد و این باعث افزایش نوافه می‌شود.

ما (۲۰۱۳) فیلتر فاز محلی تعمیم‌یافته، که به مشتق افقی مرتبه اول و دوم نیاز دارد را به صورت رابطه (۴) معرفی کرد:

$$ILP1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\frac{\partial M}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M}{\partial y})^2}}{\sqrt{(\frac{\partial M}{\partial x})^2 + (\frac{\partial M}{\partial y})^2 + (\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2})^2}} \right) \quad (4)$$

بیشینه مقدار ILP1 مرز توده‌ها را برجسته می‌کند. با توجه به اینکه مقدار مشتق افقی مرتبه دوم نسبت به مشتق مرتبه اول ضعیف‌تر است، این فیلتر به طور واضح مرز توده را نشان نمی‌دهد. برای برطرف کردن این مشکل ILP2

به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$ILP2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\frac{\partial M / \partial x}{\max(\partial M / \partial x)})^2 + (\frac{\partial M / \partial y}{\max(\partial M / \partial y)})^2}}{\sqrt{(\frac{\partial M / \partial x}{\max(\partial M / \partial x)})^2 + (\frac{\partial M / \partial y}{\max(\partial M / \partial y)})^2 + (\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2})^2}} \right) \quad (5)$$

که در آن، \min و \max کمینه و بیشینه کلی مشتقهای گوناگون را نشان می‌دهد.

در ادامه فیلترهای بیان شده روی داده‌های مصنوعی بدون نوافه و نوافه‌دار اعمال و نتایج مقایسه شده‌اند.

منظور استفاده کردن. این روش نیز مانند روش کوپر و کوان (۲۰۰۸) به پنجره‌ای نیاز دارد و نتایج حاصل به طول پنجره وابسته است.

در این مقاله از فیلترهای فاز محلی تعمیم‌یافته که ما (۲۰۱۳) معرفی کرد برای برجسته‌سازی مرز بی‌亨جاری‌های تیغه نوآب استفاده و نتایج آن با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. برای اعتبارسنجی روش، علاوه بر استفاده از داده‌های مصنوعی، از گمانه‌های حفاری شده در منطقه مورد بررسی نیز استفاده شده است.

در این مقاله برای تهیه مدل‌های مصنوعی از نرم‌افزار Model Vision و برای تهیه نقشه‌ها از نرم‌افزار Montaj استفاده شده است. برای روش‌هایی که در این مقاله نیز ذکر می‌شوند در محیط مَتَلَب گُذنویسی شده است.

۲ نظریه روش

فیلترهای فازی به صورت ترکیبی از نسبت بین مشتق افقی و مشتق قائم می‌باشند. هدف عدمه فیلترهای فازی ایجاد تعادل (balance) در تصویر است. اولین فیلتر فازی، زاویه تیلت است که میلر و سینگ (۱۹۹۴) به صورت رابطه (۱) معرفی کردند.

$$Tilt = \frac{\partial M / \partial z}{\sqrt{(\partial M / \partial x)^2 + (\partial M / \partial y)^2}} \quad (1)$$

کاتور صفر این فیلتر مرز توده را مشخص می‌کند؛ با این حال، این فیلتر یک فیلتر برآورده مرز نیست. ویجنتر و همکاران (۲۰۰۵) فیلتر زاویه تنا را به صورت رابطه (۲) تعریف کردند:

$$\Theta = \frac{\sqrt{(\partial M / \partial x)^2 + (\partial M / \partial y)^2}}{\sqrt{(\partial M / \partial x)^2 + (\partial M / \partial y)^2 + (\partial M / \partial z)^2}} \quad (2)$$

این فیلتر می‌تواند هم‌زمان مرز بی‌亨جاری‌های ضعیف و قوی را برجسته کند اما از معایب این روش این است که عموماً مرز برآورده گسترده‌تر از واقعیت است و

برجسته کند و همچنین توده‌های مجاور یکدیگر نیز به خوبی تفکیک نشده‌اند. علاوه بر آن مرز توده‌های مجاور نیز پخش و پراکنده شده‌اند. شکل ۱-۱ زاویه تیلت میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده است. این فیلتر اثر توده عمیق را برجسته و تا حدودی توده‌های مجاور را نیز تفکیک کرده است. شکل ۱-۱ه فیلتر تبا است. این فیلتر نیز اثر توده عمیق را برجسته و تا حدودی توده‌های مجاور را هم تفکیک کرده است. هرچند مشکلات بیان شده در قبل در خصوص این فیلتر در این شکل نیز مشخص است. شکل ۱-۱و، فیلتر تبا مرتبه دوم است. این فیلتر به خوبی اثر توده عمیق را برجسته و توده‌های مجاور را نیز تفکیک کرده است. علاوه بر آن مرزهای تعیین شده مشکل پخش شدگی فیلتر تبا را نیز ندارد. شکل ۱-۱ز و شکل ۱-۱ح به ترتیب ILP1 و ILP2 هستند. این فیلترها علاوه بر اینکه اثر توده عمیق را برجسته کرده‌اند، توده‌های مجاور را تفکیک و مرز توده‌ها را نیز به خوبی مشخص کرده‌اند.

برای بررسی اثر نوفه در داده‌ها، به مدل شکل ۱-۱۰ درصد نوفه اضافه شد. فیلترهای اعمال شده روی این داده‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. با وجود نوفه در داده‌ها، فیلترهای تبا مرتبه دوم و ILP عملکرد خوبی داشته‌اند.

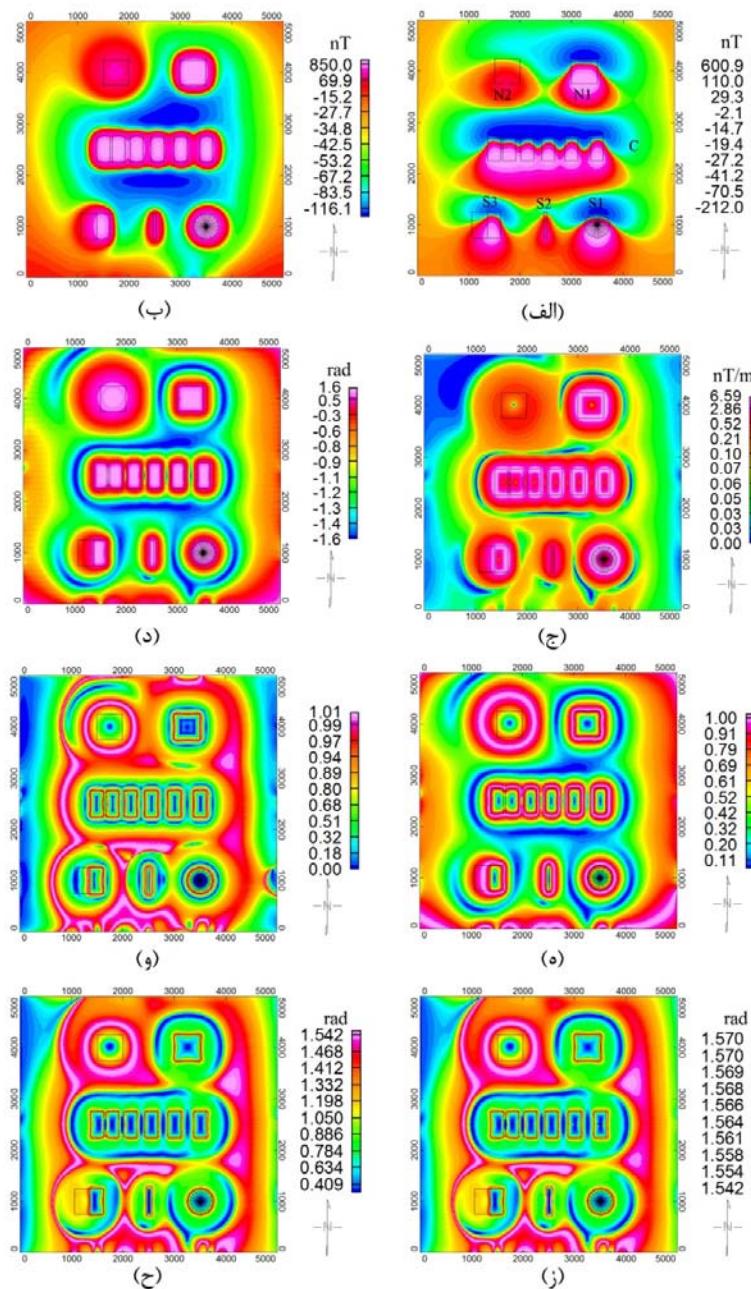
۲-۳ بررسی اثر شیب در نتایج فیلترهای تبا و ILP برای بررسی اثر شیب روی قابلیت فیلترهای بیان شده، دایکی با ضخامت ۵۰ متر، واقع در عمق ۵۰ متر با گسترش عمقی ۱۰۰ متر، با امتداد شمال-جنوب، و با خودپذیری SI ۰,۱ در نظر گرفته شده است (شکل ۳). شیب این توده‌ها از چپ به راست به ترتیب برابر با ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه به سمت شرق است.

مشخصات میدان مغناطیسی نیز مشابه با مشخصات میدان مغناطیسی مدل شکل ۱ است. در شکل ۳-الف

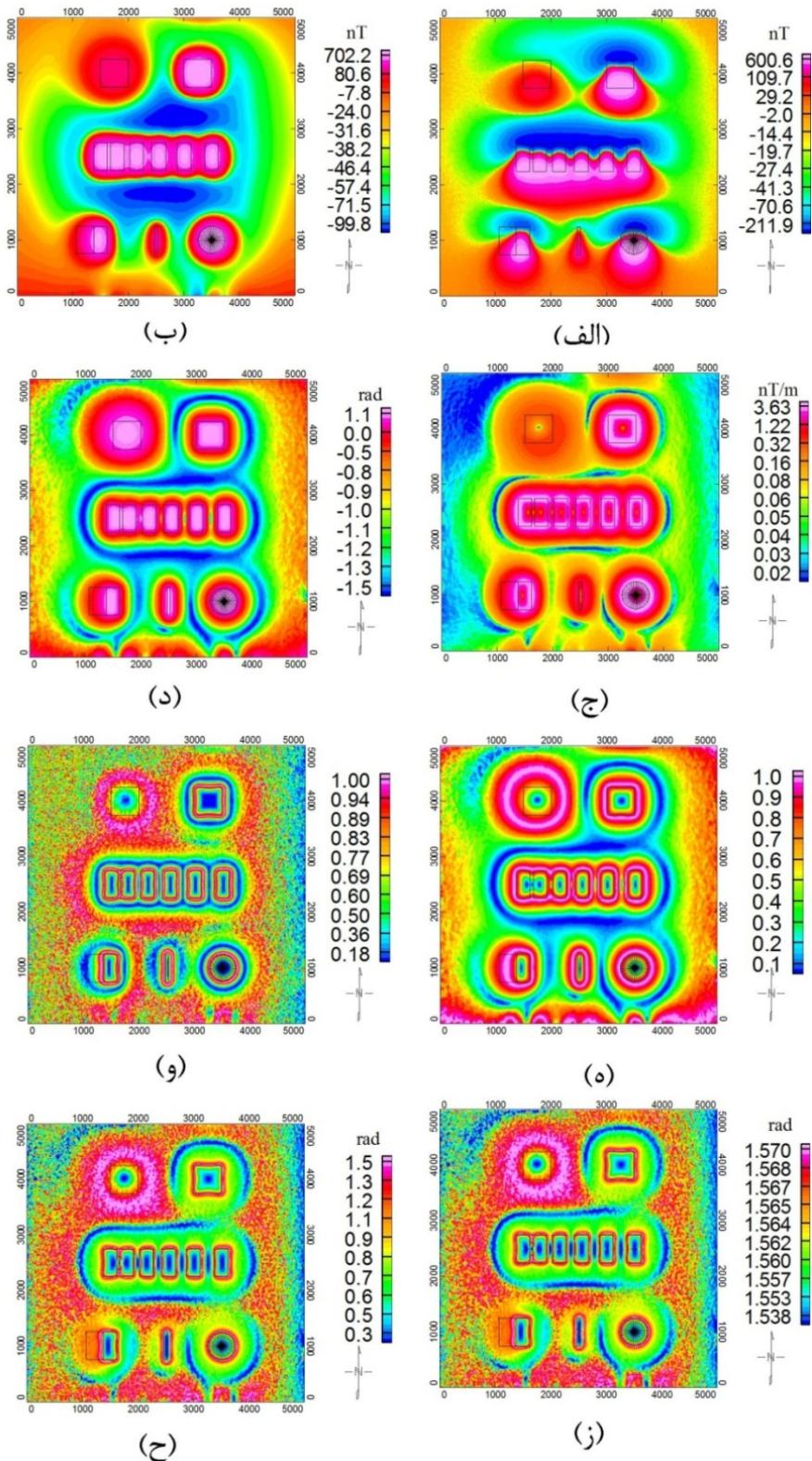
۳ اعمال فیلترهای بیان شده روی داده‌های مصنوعی ۳-۱-۱- تفکیک توده‌های مجاور با آنومالی ادغام شده برای بررسی توانایی فیلترهای بیان شده در برآورد مرز توده‌های مغناطیسی سه‌بعدی و همچنین تفکیک توده‌های مجاور، از داده‌های مصنوعی استفاده شده است. مدل‌سازی بهمنظور بررسی قابلیت‌ها و محدودیت‌های فیلترهای فازی در برجسته‌سازی دقیق مرز توده‌های مغناطیسی مجاور هم، توده‌های قرار گرفته در عمق‌های متفاوت و توده‌های با شکل‌های گوناگون صورت گرفته است. در این مدل سه مجموعه توده قرار گرفته است. مجموعه مدل‌های جنوبی شامل یک استوانه قائم، دایک نازک و یک توده شیبدار به سمت غرب است. مدل‌های مرکزی شامل ۶ مدل منشوری با ویژگی‌های هندسی یکسان هستند که در فواصل متفاوت از یکدیگر واقع شده‌اند. فاصله این توده‌ها از چپ به راست به ترتیب ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر است. در شمال این محدوده دو توده با مشخصات هندسی یکسان که در عمق‌های متفاوت واقع شده است. خودپذیری مغناطیسی همه توده‌ها برابر با $SI_{0,0}$ است. زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب برابر با ۵۰ و ۳ درجه در نظر گرفته شده است. میدان مغناطیسی حاصل از این مدل در شکل ۱-الف نشان داده شده است. خطوط مشگی‌رنگ روی این شکل‌ها نشان‌دهنده موقعیت مرز توده‌ها است. شکل ۱-ب برگردان به قطب میدان مغناطیسی است. در این شکل مدل‌های مرکزی روی یکدیگر اثر می‌گذارند و به راحتی قابل تفکیک نیستند. توده عمیق در مدل شمالی نیز یک بی‌هنجاری ضعیف در کنار یک بی‌هنجاری قوی حاصل از توده واقع در عمق ۱۰۰ متری ایجاد کرده است. هدف از فیلترهایی که در ادامه روی این داده‌ها اعمال می‌شوند، تعیین مرز توده‌ها و برجسته‌سازی اثر توده عمیق‌تر است. شکل ۱-ج مشتق افقی میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده است. مشتق افقی نتوانسته است اثر توده عمیق را

توده‌های شیبدار به سمت شیب توده منحرف شده است. علاوه بر آن مرز شرقی پخشش شدگی زیادی نیز دارد. در شکل‌های ۳-ج و ۳-د فیلترهای ILP1 و ILP2 نشان داده شده است. مرز شرقی بر جسته شده برای توده‌های شیبدار به مرز واقعی نزدیک‌تر و دقیق‌تر آن از نقشه تباشید.

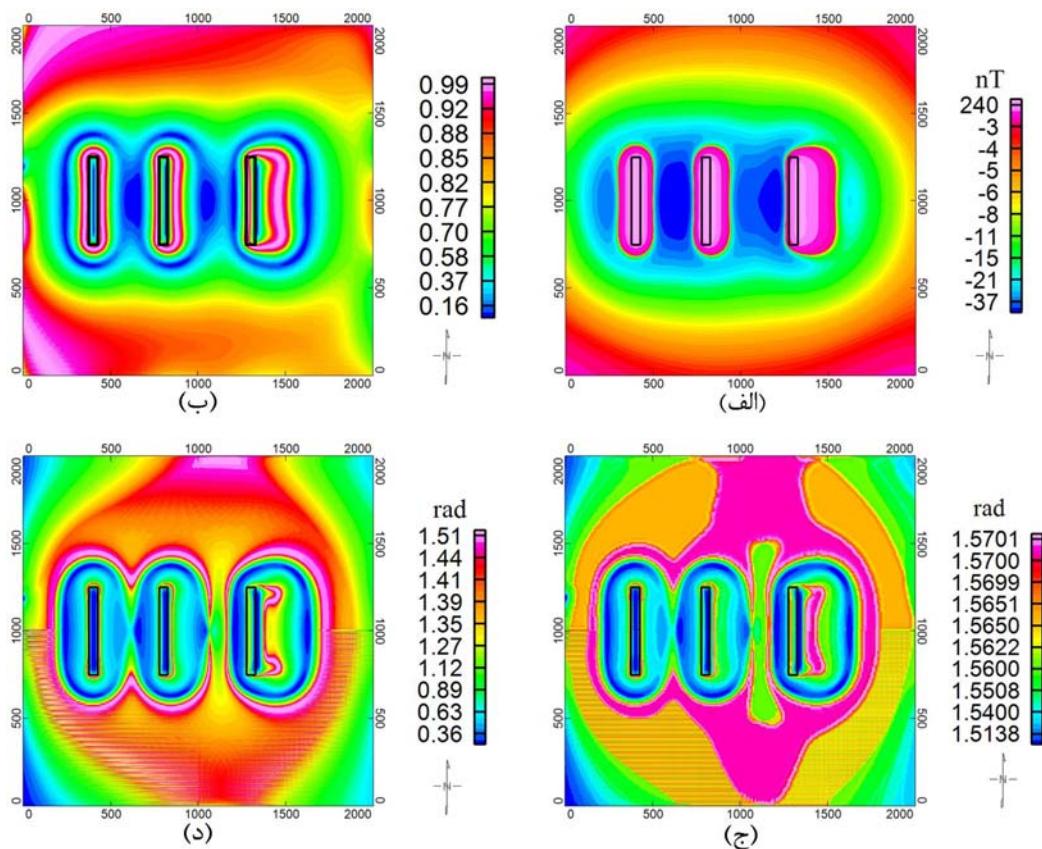
میدان مغناطیسی برگردان به قطب برای این مدل نشان داده شده است. مرز توده‌ها با چند ضلعی مشگر ننگ نشان داده شده است. شکل ۳-ب فیلتر زاویه تباشید که روی میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده اعمال شده است، را نشان می‌دهد. در این شکل مرز شرقی بر جسته شده برای



شکل ۱. (الف) میدان مغناطیسی باقیمانده حاصل از مدل‌های مصنوعی بدون نویه. خطوط مشگر ننگ، مرز توده‌ها را نشان می‌دهد، (ب) برگردان به قطب، (ج) مشتق افقی، (د) زاویه تیلت، (ه) تنا، (و) تابع مرتبه دوم، (ز) ILP1 و (ح) ILP2.



شکل ۲. (الف) میدان مغناطیسی باقیمانده حاصل از مدل‌های مصنوعی با 10° درصد نویه، خطوط مشکگرنگ، مرز توده‌ها را نشان می‌دهد، (ب) برگردان به قطب، (ج) مشتق افقی، (د) زاویه تیلت، (ه) تتا، (و) تای مرتبه دوم، (ز) ILP1 و (ح) ILP2



شکل ۳. مقایسه نتایج فیلترهای گوناگون معرفی شده با تغییرات شبیه دایک، (الف) میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده، (ب) تبا، (ج) ILP1 و (د) ILP2 مرز توده‌ها با چندضلعی‌های مشکگرینگ نشان داده شده است.

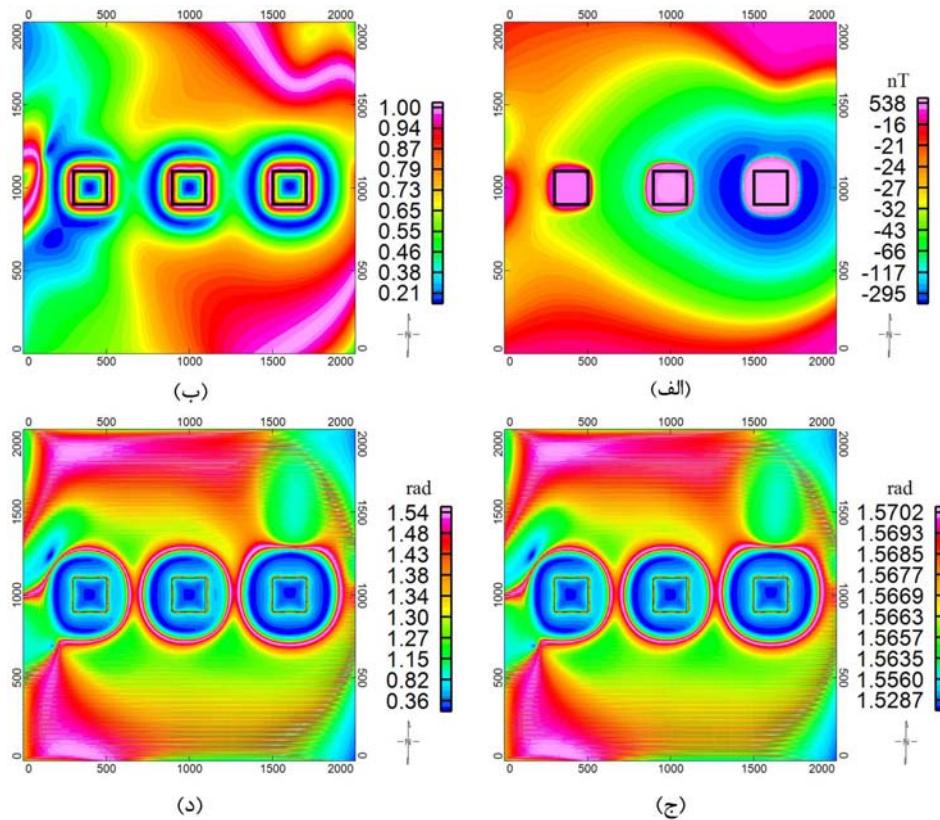
جدول ۱. مشخصات مدل‌های در نظر گرفته شده در شکل ۱ و ۲.

عمق	ضخامت عمقی	طول	عرض	مدل
۱۰۰	۵۰۰		شعاع: ۲۵۰ متر	استوانه قائم (S1)
۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰	دایک نازک (S2)
۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	دایک شبیبدار (S3) 60 W
۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰	مجموعه مدل‌های مرکزی (C)
۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	منشور شمال (N1)
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	منشور شمال (N2)

اشاره شد مشکل پخش شدگی در مرز در این شکل نیز به خوبی قابل مشاهده است. در شکل های ۴-ج و ۴-د فیلتر های ILP1 و ILP2 نشان داده شده است. این فیلتر ها به خوبی مرز توده ها را برجسته کرده اند و مشکلات تا را نیز ندارند.

۴ اعمال فیلتر های برآورده ری داده های واقعی منطقه تیغه نوآب

در این مقاله از فیلتر های ذکر شده برای برآورد مرز کانسوار تیغه نوآب استفاده شده است. کانسوار تیغه نوآب در ۴۰ کیلومتری شهر درح از شهرستان سریشه، در طول جغرافیایی $53^{\circ}32'50''$ و عرض جغرافیایی $33^{\circ}60'50''$ واقع شده است (مهندسين مشاور کان ایران، ۱۳۸۷).



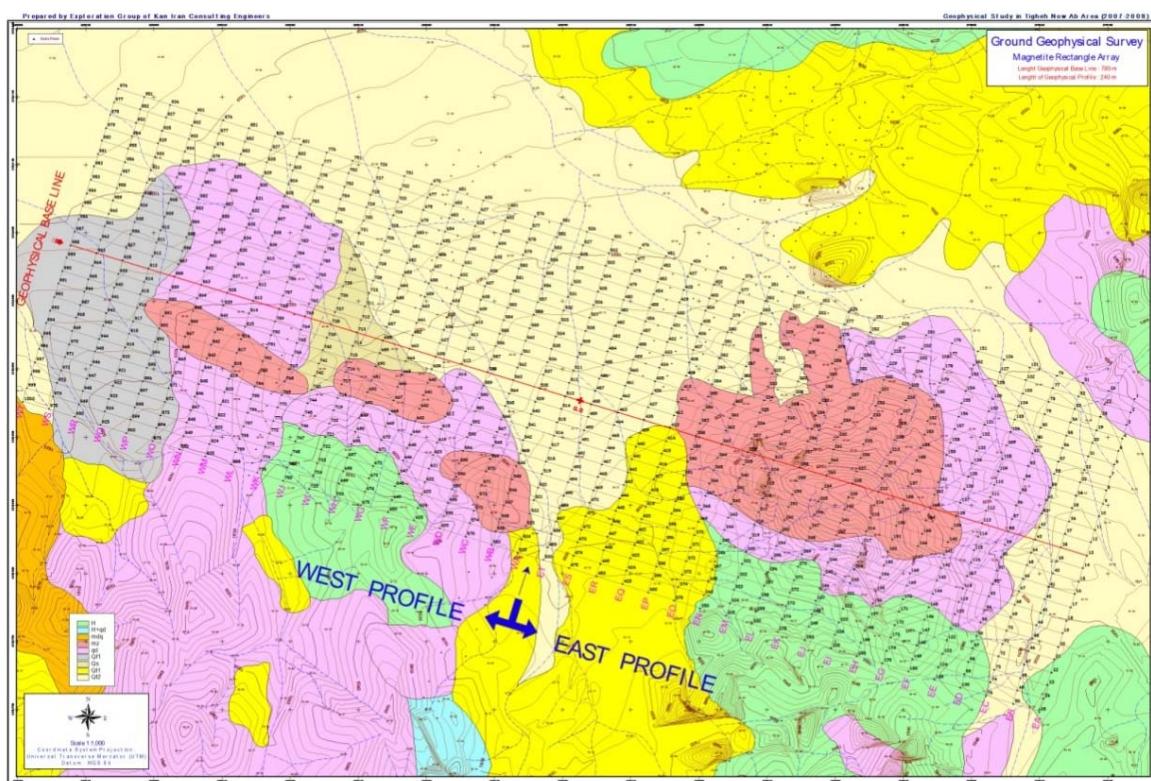
شکل ۴. بررسی اثر خودپذیری مغناطیسی در نتایج فیلتر های تتا و ILP: (الف) میدان مغناطیسی برگردان به قطب، (ب) تتا، (ج) ILP1 و (د) ILP2

۳-۳ بررسی اثر خودپذیری مغناطیسی در نتایج فیلتر های تتا و ILP

پاسخ فیلتر های گوناگون عرضه شده با تغییر خودپذیری مغناطیسی در مدل شکل ۴ بررسی شده است. در این مدل از سه مکعب با ابعاد ۲۰۰ متر و واقع در عمق ۵۰ متر استفاده شده است. خودپذیری مغناطیسی این سه مکعب از چپ به راست به ترتیب برابر با 1×10^{-1} و 1×10^{-1} است. مشخصات میدان مغناطیسی مفروض مشابه با مدل شکل ۱ است. در شکل ۴-الف میدان مغناطیسی برگردان به قطب برای این مدل نشان داده شده است. مرز توده ها با چند ضلعی مشگی رنگ نشان داده شده است. شکل ۴-ب فیلتر زاویه تتا که روی میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده اعمال شده است، را نشان می دهد. این فیلتر مرز توده را به خوبی آشکار می سازد؛ اگرچه همان طور که قبل نیز

برداشت‌ها روی ۴۰ نیم‌رخ با روند شمال شرقی – جنوب غربی صورت گرفته است. فاصله بین نیم‌رخ‌ها ۲۰ متر و فاصله بین ایستگاه‌های روی هر نیم‌رخ ۱۰ متر است. شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. زاویه میل و انحراف مغناطیسی در این منطقه به ترتیب برابر با 49° و 26° درجه و شدت میدان مغناطیسی متوسط زمین با $470\text{--}45$ نانوتسلا است. قبل از اعمال فیلترها روی داده‌ها، برای از بین بردن نویفه‌های سطحی، داده‌ها 13° متر به سمت بالا گسترش داده شده‌اند. سپس داده‌ها به قطب مغناطیسی منتقال یافته‌اند و فیلترهای شرح داده شده روی آنها اعمال شده است.

در این منطقه مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی دیده می‌شود که به نوعی مورد هجوم توده‌های نفوذی با ترکیب کوارتزدیوریت قرار گرفته‌اند. خاستگاه کانی‌سازی در منطقه تیپ اسکارن است و کانی‌سازی فلزی بیشتر در همبری توده نفوذی با واحد کربناتی صورت پذیرفته و بیشتر شامل آهن و کانه‌های مس اکسیده شامل مالاکیت و آزوریت و سولفوره همچون پیریت و کالکوپیریت است. عیار بدست آمده از آهن بیش از 50° درصد در نمونه‌های انتخابی و میانگین 30° درصد در مجموع نمونه‌های گرفته شده است. مقدار مس نیز در برخی نمونه‌ها بیش از یک درصد گزارش شده است. در این منطقه برداشت‌های مغناطیسی با شبکه مستطیلی صورت گرفته است.

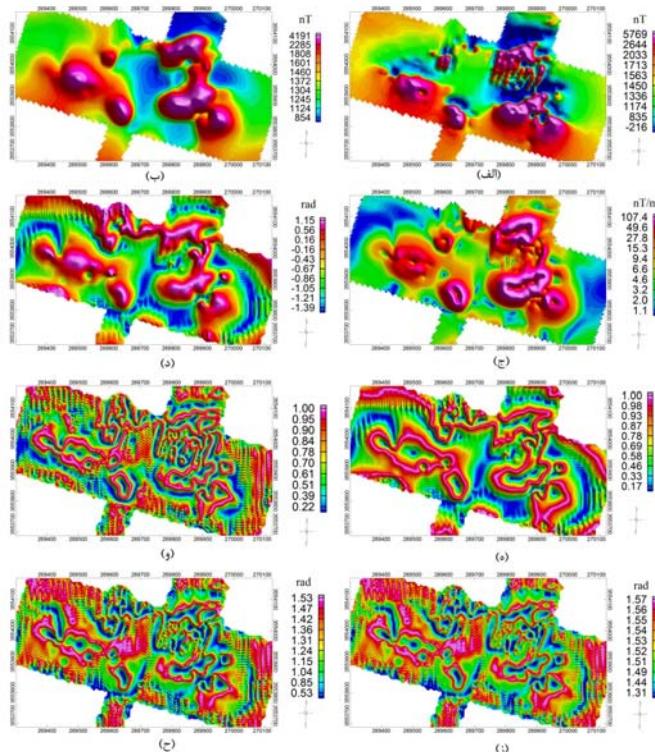


شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه تیغه نواب و موقعیت نیم‌رخ‌ها و ایستگاه‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی (مهندسین مشاور کان ایران، ۱۳۸۷).

مشتقات مرتبه‌های بالاتر، اثرات نویفه افزایش یافته است. با وجود این، مرز توده‌ها به خوبی برجسته شده است. در شکل‌های ۴-ز و ۴-ح به ترتیب ILP1 و ILP2 نشان داده شده است؛ که این تصاویر نیز تقریباً وضعیتی مشابه با یکدیگر و مشابه با تتابع مرتبه دوم دارند.

در این محدوده چند گمانه اکتشافی نیز حفر شده است که موقعیت آنها و ضخامت توده در هر کدام از گمانه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. موقعیت گمانه‌ها به همراه مرز برآورده شده، با استفاده از روش‌های بیان شده، در شکل ۵ نشان داده شده است. همه گمانه‌ها به جز گمانه BH8، نتیجه مطلوبی داشته‌اند و توده را قطع کرده‌اند. این گمانه نزدیک به مرز برآورده است. دیگر گمانه‌ها درون مرز تعیین شده قرار دارند و با توده نیز برخورد کرده‌اند.

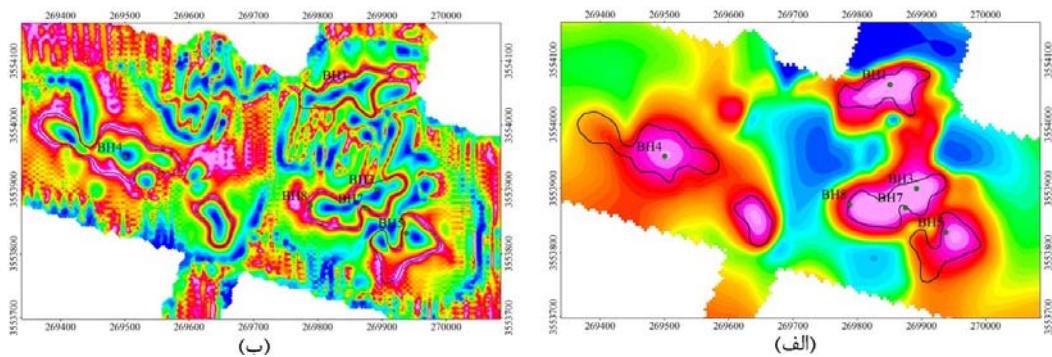
در شکل ۴ نقشه بی‌هنجری میدان مغناطیسی و پردازش‌های صورت گرفته روی آن نشان داده شده است. شکل ۴-الف، بی‌هنجری میدان مغناطیسی کل و شکل ۴-ب، میدان مغناطیسی برگردان به قطب را نشان می‌دهد. به کمک این نقشه می‌توان پنج توده را در این منطقه تشخیص داد. شکل ۴-ج، مشتق افقی کل میدان مغناطیسی است. مشتق افقی کل روی مرز توده مقادیر بیشینه نشان داده است. در این شکل مرز توده‌ها پخشیدگی دارد و علاوه بر آن، اثر توده غربی به خوبی بر جسته نشده است. شکل ۴-د زاویه تیلت است. این فیلتر در تصویر ایجاد تعادل می‌کند و اثر توده‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. شکل ۴-ه نقشه تتا است. در این شکل مرز توده‌ها با مقادیر بیشینه به خوبی قابل مشاهده است. شکل ۴-و تتابع مرتبه دوم است. در این شکل به سبب استفاده از



شکل ۴. تفسیر داده‌های مغناطیسی کانسوار تیغه نوآب. (الف) میدان مغناطیسی باقی‌مانده، (ب) برگردان به قطب، (ج) مشتق افقی، (د) زاویه تیلت، (ه) تتا، (و) تتابع مرتبه دوم، (ز) ILP1 و (ح) ILP2

جدول ۲. مختصات نقاط حفاری شده روی این کانسار.

شماره نقاط حفاری شده	x	y	مجموع ضخامت لایه‌های کانی‌سازی مگنتیت (متر)
BH1	۲۶۹۸۰۱	۳۵۵۴۰۶۲	۵,۰
BH3	۲۶۹۸۹۲	۳۵۵۳۹۰۰	۱۰
BH4	۲۶۹۵۰۰	۳۵۵۳۹۵۰	۲۰
BH5	۲۶۹۹۳۸	۳۵۵۲۸۳۲	۶
BH7	۲۶۹۸۷۵	۳۵۵۲۸۷۰	۲۴
BH8	۲۶۹۷۸۸	۳۵۵۲۸۷۵	*



شکل ۵. موقعیت گمانه‌های حفاری شده (دایره‌های سبزرنگ) و مرز برآورده شده با استفاده از روش‌های بیان شده (خطوط مشگی‌رنگ). نقشه زمینه: (الف) برگردان به قطب و (ب) ILP1 است.

به خوبی مرز توده‌های قرار گرفته در کنار هم و توده‌های واقع در عمق‌های متفاوت را بر جسته کند. برای بر جسته‌سازی اثر توده‌های عمق‌های متفاوت، روش‌های تعادل‌سازی تصویر که شامل زاویه تیلت، تتا، مشتق افقی نرمال شده و مانند آن توسعه داده شده است. در این تحقیق از روش‌های فاز محلی تعمیم یافته که شامل توابع مرتبه دوم و ILP است، برای تفکیک توده‌های مجاور و بر جسته‌سازی اثر توده‌های قرار گرفته در عمق‌های متفاوت استفاده شده است. این فیلترها فقط از مشتق‌های افقی مرتبه اول و مرتبه دوم استفاده می‌کنند. با توجه به اینکه از مشتق‌های مرتبه دوم استفاده می‌کنند، نسبت به نویه حساس‌تر و چون از مشتق قائم میدان مغناطیسی استفاده

۵ نتیجه‌گیری

روش‌های زیادی برای برآورد مرز توده‌های مغناطیسی توسعه داده شده است. یکی از مشکلات در تفسیر داده‌های مغناطیسی، وجود یک بی‌هنجری ضعیف در کنار یک بی‌هنجری قوی است. همچنین گاهی اثر توده‌های مجاور باعث پیچیدگی برآورد مرز می‌شود. برای تفکیک توده‌های مجاور روش‌های زیادی چون مشتق قائم، سیگنال تحلیلی تعمیم یافته و مانند آن توسعه داده شده است. این روش‌ها به محاسبه مشتق قائم نیاز دارند که از نظر محاسباتی وضعیت پایداری ندارد. مشتق افقی از دیگر روش‌هایی است که به طور گسترده در برآورد مرز توده‌ها به کار می‌رود. این روش نمی‌تواند

- Fedi, M. and Florio, G., 2001, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method, *Geophysical Prospecting*, **49**, 40-58.
- Hsu S. K., Coppens, D. and Shyu, C. T., 1998, Depth to magnetic source using the generalized analytic signal, *Geophysics*, **63**, 1947-1957.
- Hsu, S. K., Sibuet, J.C. and Shyu, C. T., 1996, High – resolution detection of geological boundaries from potential - field anomalies: An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Ma, G., 2013, Edge detection of potential field data using improved local phase filter, *Exploration Geophysics*, **44**, 36-41
- Ma, G. and Li, L., 2012, Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative, *Computers & Geosciences*, **41**, 83-87.
- Miller, H. G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 213-217.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, **37**, 507-517.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, **39**, 85-92.
- Roest, W. R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D. and Green, C. M., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, **23**, 116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data, *Geophysics*, **70**, L39-L43.

نمی‌کنند، از نظر محاسباتی پایدارترند. این روش‌ها روی داده‌های مصنوعی بدون نویه و نویه‌دار و روی داده‌های واقعی کانسار تیغه نوآب یعنی اعمال شد. مرز برآورد شده برای کانسار با نتایج حاصل از حفاری‌های اکتشافی صورت گرفته در منطقه مقایسه شد که نتایج، نشانگر کارایی این روش‌ها در برآورد مرز توده‌ها است. برای حفاری‌های تکمیلی پیشنهاد می‌شود که یک شبکه منظم درون مرز تعیین شود.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم که از شرکت مهندسین مشاور کان ایران به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های ژئوفیزیکی و اطلاعات گمانه‌های حفاری تشکر و قدردانی کنیم.

مراجع

مهندسین مشاور کان ایران، ۱۳۸۷، مطالعات ژئوفیزیکی منطقه تیغه نوآب بیرجند.

- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase, *Computers & Geosciences*, **32**, 1585-1591.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential field data using normalized statistics, *Geophysics*, **73**(3), H1-H4.
- Cordell, L. and Grauch, V. J. S., 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, in W. J. Hinze, ed., *The utility of regional gravity and magnetic anomaly*, Society of Exploration Geophysicists, 181-197.