

تبادل در تخمین مرز توده‌ها و ساختارهای خطی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل

کمال علمدار^{۱*} و مصطفی گلایی^۲

^۱استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۲۰)

چکیده

گرداب‌های افقی و قائم و صافی‌هایی که از ترکیب آنها تولید می‌شوند (مانند سیگنال تحلیلی) از متداول‌ترین صافی‌ها برای برجسته‌سازی جزئیات موجود در داده‌های مغناطیس‌سنجی هستند. هنگامی که دامنه تغییرات شدت بی‌هنجاری‌ها در سرتاسر نقشه زیاد باشد، خروجی این صافی‌ها نیز به‌طور مشابه دارای بی‌هنجاری‌هایی با شدت‌های مختلف خواهد بود که هیچ‌گونه تعادلی بین آنها وجود ندارد. این مسئله باعث می‌شود تا بی‌هنجاری‌های کم‌شدت در میان بی‌هنجاری‌های با شدت بالاتر پنهان شوند. در این مقاله صافی‌هایی با خروجی متعادل معرفی می‌شود. این دو صافی شامل سیگنال تحلیلی متعادل و صافی انحنای پروفیل است. این صافی‌ها بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی معدن سنگ‌آهن سورک یزد و همچنین داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپیما کراتون بیلگران استرالیایی غربی به کار برده شده است. کاربرد این صافی در محدوده معدن سنگ‌آهن سورک سبب تعیین توده زیرسطحی جدیدی شد که این موضوع با حفاری‌های اکتشافی نیز اثبات شده است.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، انحنای پروفیل، سیگنال تحلیلی متعادل، سورک، بیلگران

۱ مقدمه

تشخیص آنها دشوار باشد. این پدیده به‌ویژه هنگامی که توده مولد بی‌هنجاری بدون رخنمون است، برجسته‌تر است. صافی‌های AGC (Automatic Gain Control) به منظور ایجاد تعادل در تصاویر میدان پتانسیل از یک پنجره متحرک استفاده می‌کنند که روی داده‌ها حرکت می‌کند و در هر نقطه که مرکز پنجره روی آن قرار گرفته، مقدار نقطه مرکزی بر میانگین داده‌های پنجره تقسیم می‌شود. این صافی تصویر متعادل‌شده‌ای تولید می‌کند که در آن بی‌هنجاری‌ها دارای شدت یکسان هستند. با این حال نتایج این صافی به اندازه پنجره مورد استفاده وابسته است (راجاگوپلان و میلیگان، ۱۹۹۵). این امر باعث می‌شود تا

تصاویر به‌دست آمده از برداشت‌های میدان پتانسیل اغلب حاوی بی‌هنجاری‌هایی است که دامنه تغییرات شدت آنها در سرتاسر نقشه زیاد است. هنگامی که در تفسیر و پردازش داده‌های میدان پتانسیل از صافی‌های گوناگون مانند مشتق افقی و قائم استفاده می‌شود، نتایج این صافی‌ها بسته به شدت بی‌هنجاری‌های اولیه بسیار متغیر است و به اصطلاح تعادلی بین خروجی صافی‌ها وجود ندارد. این عامل باعث می‌شود تا بی‌هنجاری‌های با شدت کمتر که ممکن است از لحاظ زمین‌شناختی هم قابل توجه باشند، در بین بی‌هنجاری‌های با شدت بالا پوشیده بماند و

*Corresponding author:

kamal.alamdar@gmail.com

نگارنده رابط:

- در این صافی اندازه مشتق قائم نسبت به اندازه مشتق افقی بهنجار شده است.

وردوزو و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه مشتق افقی کل زاویه تیلت موسوم به THDR (Total Horizontal Derivative of tilt angle) را پیشنهاد کرده و رابطه زیر را برای این منظور ارائه دادند:

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (۲)$$

در این رابطه T زاویه تیلت محاسبه شده از رابطه (۱) می باشد. البته به دلیل استفاده از مشتق زاویه تیلت در این صافی خروجی آن به نوفه حساس است. اما باید توجه داشت که در این رابطه از مشتق های افقی در جهات x و y استفاده شده و نسبت به حالتی که از مشتق قائم استفاده می شود میزان برجسته شدن نوفه ها به مراتب کمتر است. وینز و همکاران (۲۰۰۵) صافی تتا را معرفی کردند که در آن مشتق افقی کل نسبت به گرادیان کل (سیگنال تحلیلی) متعادل شده است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \quad (۳)$$

کوپر و کوان (۲۰۰۶، ۲۰۰۸) به ترتیب صافی زاویه تیلت هذلولوی (هایپربولیک) و صافی انحراف استاندارد بهنجار شده را ارائه کردند. صافی های سیگنال تحلیلی و انحنای پروفیل دو تا از پرکاربردترین صافی ها در پردازش داده های میدان پتانسیل محسوب می شوند. تاکنون کاربردهای گوناگونی از این دو صافی ارائه شده است. معمولاً در نقشه های میدان پتانسیل که با هدف اکتشاف معدن تهیه می شوند، دو دسته بی هنجاری را می توان مشاهده کرد. دسته اول بی هنجاری های مربوط به توده

نتایج این صافی در مواردی که روی داده های مغناطیس هوایی با شدت های مختلف به کار برده می شود، ناپایدار باشد.

در سال های اخیر تلاش های زیادی برای توسعه روش های گرادیان میدان پتانسیل، به ویژه داده های مغناطیس سنجی، به عمل آمده تا ضمن متعادل بودن خروجی صافی ها، نتایج آنها نیز به اندازه پنجره وابسته نباشد. اولین صافی با این ویژگی صافی زاویه تیلت است که میلر و سینگ (۱۹۹۴) آن را به شکل زیر معرفی کردند:

$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (۱)$$

که در آن T مقدار زاویه تیلت و f میدان پتانسیل برداشت شده (مغناطیس یا گرانی) است. تغییرات زاویه تیلت در بالای توده های معدنی و همچنین بدون بُعد بودن آن مهمترین دلیل کاربرد این صافی است. در ضمن، نتایج آن را می توان با نتایج صافی های مشتق قائم و مشتق افقی نیز مقایسه کرد. اخیراً از صافی زاویه تیلت برای تخمین عمق توده ها نیز استفاده شده است (سالم و همکاران، ۲۰۰۷).

از ویژگی های مهم زاویه تیلت می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مقدار زاویه تیلت مستقیماً در بالای توده های زیرسطحی مثبت است.
- در نزدیکی لبه های توده جایی که مقدار مشتق افقی بیشینه و مشتق قائم صفر است مقدار زاویه تیلت صفر است.
- در نواحی خارج از توده زیرسطحی مقدار زاویه تیلت منفی خواهد بود.
- زاویه تیلت در بازه $+90$ تا -90 درجه تغییر می کند و در مقایسه با صافی مشتق قائم، تفسیر نتایج این صافی آسان تر است.

$$F_I(x) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x')}{x-x'} dx'. \quad (۴)$$

وارون این تبدیل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f(x') = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_I(x)}{x'-x} dx. \quad (۵)$$

اگر از دو طرف رابطه (۴) تبدیل فوریه گرفته شود رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$\Im(F_I) = i \operatorname{sgn}(k) \Im(f), \quad (۶)$$

که در این رابطه نماد \Im بیانگر تبدیل فوریه، k عدد موج، $i = \sqrt{-1}$ و تابع علامت چنین است:

$$\operatorname{sgn}(k) = \begin{cases} 1 & \text{for } k > 0 \\ 0 & \text{for } k = 0 \\ -1 & \text{for } k < 0 \end{cases}$$

سیگنال تحلیلی تابع $f(x)$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$a(x) = f(x) - iF_I(x), \quad (۷)$$

که در آن $a(x)$ سیگنال تحلیلی تابع $f(x)$ و $F_I(x)$ تبدیل هیلبرت تابع $f(x)$ می‌باشد.

سیگنال تحلیلی (یا گرادیان کامل) یکی از صافی‌های متداول در پردازش تصاویر میدان پتانسیل است که تابع زنگوله شکلی را درست در بالای توده‌های زیرسطحی ایجاد می‌کند (نیقان، ۱۹۷۲). در حالت دو بُعدی اندازه سیگنال تحلیلی به زوایای بردار مغناطیس‌شدگی بستگی ندارد؛ درحالی‌که این ویژگی در مورد داده‌های سه بُعدی صادق نیست (لی، ۲۰۰۶). سیگنال تحلیلی کمیتی مختلط است که اندازه آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کوپر و کوان، ۲۰۰۶):

$$|AS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}. \quad (۸)$$

زیرسطحی است که هدف اصلی برداشت را نیز شامل می‌شود. این توده‌ها به جز در شرایط خاص، اکثراً به صورت توده‌ای (دارای بعد) هستند و تولید بی‌هنجاری‌هایی دارای پهنا می‌کنند. برای چنین توده‌هایی بیشتر از صافی سیگنال تحلیلی استفاده می‌شود.

دسته دوم بی‌هنجاری‌ها مربوط به ساختارهای خطی اطراف بی‌هنجاری توده‌ای است. در مورد اکثر این بی‌هنجاری‌ها پارامتر پهنا تعریف نمی‌شود، لذا برای برجسته‌سازی این ساختارها باید از صافی‌های تخمین مرز جهتی بهره برد که از میان آنها می‌توان به صافی‌های انحنای پروفیل یا تراس‌بندی اشاره کرد (انصاری و همکاران، ۱۳۹۱). از مشکلات این دو صافی، عدم کارایی آنها در مواجهه با توده‌های عمیق است. کوپر (۲۰۰۹) با استفاده از تبدیل هیلبرت سه بُعدی نتایج این دو صافی را متعادل کرده است. لاتی و کارینن (۲۰۱۰) با استفاده از ادامه فراسوی داده‌های زاویه تیلت، روشی را برای تخمین شیب و امتداد توده‌های دو بُعدی ارائه کردند. انصاری و علمدار (۲۰۱۱) با تلفیق سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت کارایی آن را در تخمین مرز توده‌های معدنی بهبود دادند. ما و دُو (۲۰۱۲) با استفاده از مشتق قائم و افقی سیگنال تحلیلی روشی برای تخمین عمق توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی ارائه کردند. هدف از این مقاله، کاربرد این روش روی داده‌های مدل مصنوعی و همچنین داده‌های مغناطیسی زمینی معدن سورک و داده‌های مغناطیس‌هوایی کراتون ییلگران استرالیا است.

۲ ایجاد تعادل در خروجی صافی‌های سیگنال تحلیلی

و انحنای پروفیل

الف) سیگنال تحلیلی

تبدیل هیلبرت در محاسبات مربوط به سیگنال تحلیلی نقش اساسی دارد. تبدیل هیلبرت تابع $f(x)$ از رابطه زیر به دست می‌آید (بلیکلی، ۱۹۹۵):

$$ASB = \frac{|AS|}{k + \sqrt{((H_x(|AS|))^2 + (H_y(|AS|))^2 + (|AS|)^2)}}, \quad (9)$$

استفاده شده است. در رابطه (۹)، H_x و H_y به ترتیب تبدیل هیلبرت سیگنال تحلیلی در امتدادهای x و y و k پارامتر ثابتی است که کارایی صافی را کنترل می‌کند. هنگامی که k بزرگ باشد، دامنه نسبی بی‌هنجاری‌های سیگنال تحلیلی بدون تغییر باقی خواهد ماند. اما هنگامی که این پارامتر کوچک انتخاب شود، بیشینه مقدار تعادل ممکن در خروجی سیگنال تحلیلی اعمال می‌شود. به‌طور کلی مقادیر غیرصفر پارامتر k باعث پایداری و بهبود نتایج سیگنال تحلیلی می‌شود. این موضوع به ویژه در مواردی که هر دو جفت تبدیل هیلبرت به سمت صفر میل می‌کنند و اندازه سیگنال تحلیلی نیز غیرصفر است، سبب پایداری نتایج خواهد شد. تبدیل هیلبرت دو بُعدی در حوزه بسامد از رابطه زیر نتیجه می‌شود (مون و همکاران، ۱۹۹۸):

$$H(u, v) = -i \operatorname{sign}(u, v). \quad (10)$$

که در آن

$$\operatorname{sign}(u, v) = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \hat{e}_x + \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \hat{e}_y. \quad (11)$$

u و v عدد موج فوریه و \hat{e}_x و \hat{e}_y بردار یکانی به ترتیب در امتدادهای x و y هستند. علت استفاده از تبدیل هیلبرت در رابطه (۴) این است که اندازه‌های آنها (مخرج کسر رابطه (۴)) به پوش محلی داده‌ها در اطراف هر بی‌هنجاری بسیار نزدیک است (تقریب بسیار خوبی برای آن است) و در نتیجه عامل مناسبی برای متعادل کردن آنها است. شکل ۱-ج کاربرد صافی سیگنال تحلیلی متعادل داده‌های مغناطیسی شکل ۱-الف را نشان می‌دهد که در آن مرز توده‌ها به ویژه توده عمیق با دقت بالاتری برجسته است. در این مثال مقدار k برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

شکل ۱ داده‌های مغناطیسی مصنوعی ناشی از ۳ مدل منشوری در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. سطح مقطع توده‌ها در شکل با مستطیل‌های سیاه‌رنگ ۱ تا ۳ نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات مدل‌ها ارائه شده است. در ضمن در کل مدل‌سازی‌های انجام شده، ۱٪ نوفه به مدل‌ها اضافه شده است تا به مدل‌های واقعی نزدیک‌تر باشد.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل مصنوعی مثال اول.

نوع توده	عمق (متر)	عرض (متر)	طول (متر)	ضخامت (متر)
منشور شماره ۱	۳۰	۷۵	۲۵	۱۰
منشور شماره ۲	۵۰	۶۵	۳۵	۱۵
منشور شماره ۳	۷۰	۶۰	۱۰۰	۲۰

شکل ۱-الف پاسخ مغناطیسی مدل‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ب صافی سیگنال تحلیلی متداول داده‌های قسمت الف آمده است. هرچند بی‌هنجاری مربوط به توده کم‌عمق در شمال شکل به خوبی برجسته شده است، اما در مورد توده‌های عمیق‌تر در جنوب، موقعیت توده‌ها همچنان پخش و دارای وضوح پایین است. دلیل این امر این است که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به مدل‌ها دارای شدت‌های مختلف هستند و این ویژگی باعث بروز این عدم تعادل در تصویر سیگنال تحلیلی شده است. لازم به ذکر است که در این بررسی زاویه میل و انحراف توده‌ها به ترتیب ۴۵ و ۵ درجه انتخاب شده است که این مسئله خود یکی از عوامل ناپایداری نتایج است. در این مدل‌سازی خودپذیری مغناطیسی توده‌ها یکسان و برابر ۰/۰۱ در واحد SI در نظر گرفته شده است.

برای بهبود پاسخ سیگنال تحلیلی و برجسته کردن جزئیات بیشتر تصاویر میدان پتانسیل، به‌ویژه در مورد بی‌هنجاری‌های با شدت کمتر، از صافی سیگنال تحلیلی متعادل (Balanced Analytic Signal) با رابطه زیر (کوپر، ۲۰۰۹):

که در عمق کمتری نسبت به دو توده دیگر قرار دارد، با دقت بالاتری نسبت به دو توده دیگر نشان داده است. با این وجود دو توده ۲ و ۳ که در عمق بیشتری قرار دارند دارای گوشه‌های گرد شده هستند و وضوح کمتری نسبت به توده ۱ دارند. در شکل ۱-۱ نتیجه کاربست صافی متعادل انحنای پروفیل ارائه شده که هر سه توده را به صورت کاملاً مجزا و با کیفیت عالی نشان داده است.

در مثال دوم کاربرد صافی‌های پیش‌گفته‌شده روی داده‌های مغناطیسی مدل مصنوعی شامل دو توده منشوری با قاعده مستطیل که در داخل یکدیگر قرار دارند، نشان داده شده است. پارامترهای فیزیکی مربوط به توده‌ها در جدول ۲ آمده است. نوفه تصادفی با توزیع نرمال معادل ۱۵ درصد داده‌های مغناطیسی به آن اضافه شده است. مغناطیس‌شدگی توده‌ها ۱/۵ (A/m) و زاویه میل و انحراف بردار مغناطیسی به ترتیب ۴۵ و ۶ درجه فرض شده است.

شکل ۲-الف پاسخ مغناطیسی توده‌های منشوری و شکل ۲-ب نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی قسمت الف را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی مرز توده‌ها را مشخص می‌کند.

همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال تحلیلی متعادل، توده ۱ را مشخص کرده اما در این شکل حدود توده عمیق‌تر شماره ۲ همچنان نسبت به اطراف مخفی است. به علاوه، در گوشه‌های توده‌ها حالت گردش‌دگی دیده می‌شود. شکل ۲-ج نقشه سیگنال تحلیلی متعادل شده را نشان می‌دهد که با رابطه (۹) تهیه شده است. در این شکل کاملاً مشهود است که دو مشکل صافی‌های قبلی از بین رفته و حدود توده با دقت بالایی نسبت به اطراف برجسته شده است، اما حدود توده کوچک‌تر به کلی از بین رفته است.

ب) صافی انحنای پروفیل

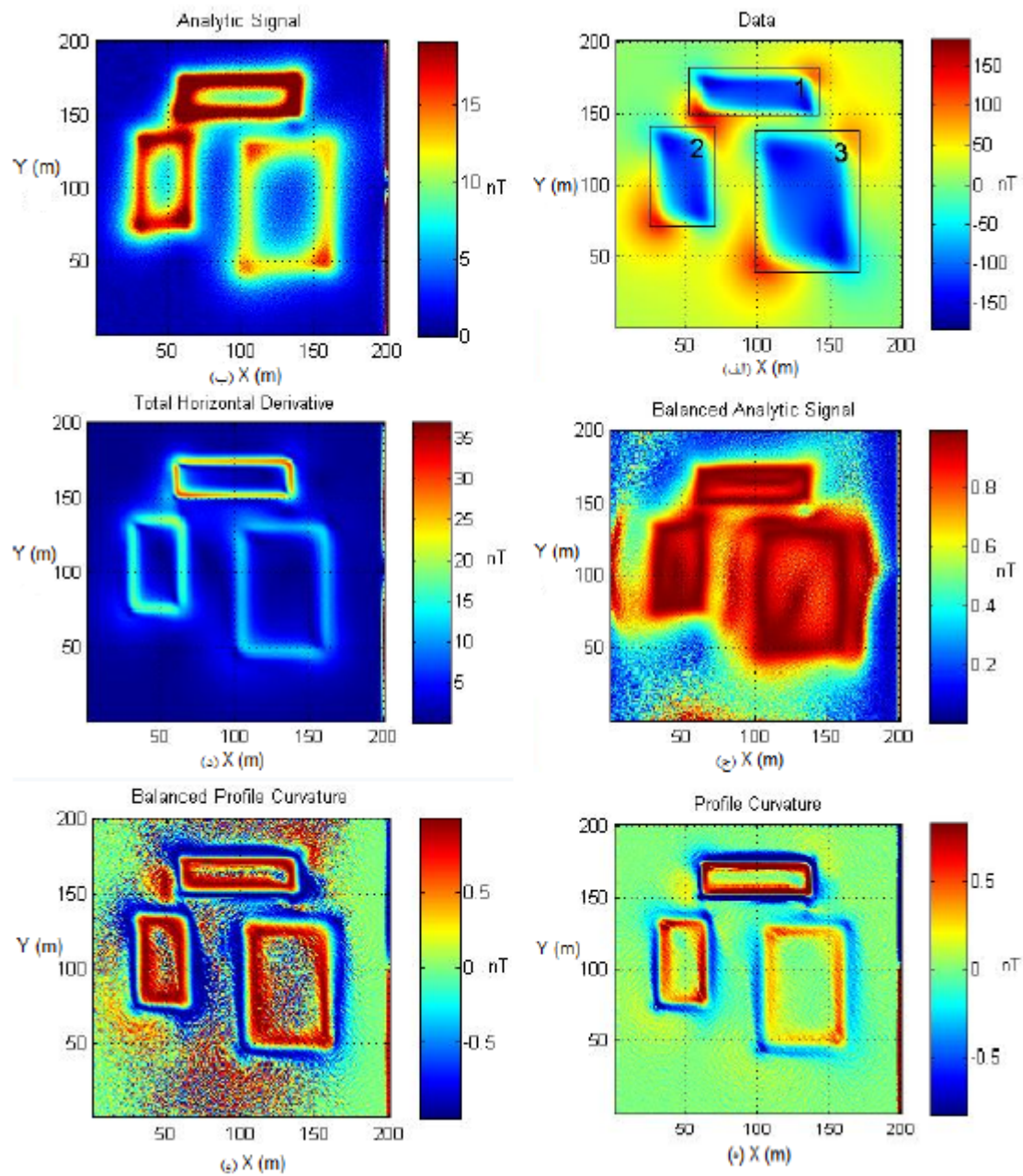
انحنای داده‌های ژئوفیزیکی نشانگر مناسبی است که در گذشته بر روی داده‌های میدان پتانسیل (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷) و داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی (بلامتریت و همکاران، ۲۰۰۶) به کار برده شده است. برای داده‌های سه‌بعدی (داده‌های شبکه‌بندی‌شده) این کمیت از راه‌های مختلفی محاسبه می‌شود. در این مقاله انحنای پروفیل از رابطه زیر محاسبه می‌شود (میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۳):

$$C_{PR} = \frac{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}{pq^{1.5}} \quad (12)$$

در این رابطه، $p = (\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2$ ، $q = p + 1$ ، f داده‌های میدان پتانسیل و C_{PR} انحنای داده‌ها پس از استفاده از روش "انحنای پروفیل" است. صافی انحنای پروفیل در نمایش ساختارهای خطی شکل مانند گسل‌ها و دایک‌ها کاربرد بیشتری دارد.

تاکنون این روش برای تخمین مرز توده‌های مولد بی-هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی هوایی و بزرگ‌مقیاس استفاده شده است (کوپر و کوان، ۲۰۰۶، کوپر، ۲۰۰۹؛ ما و دُو، ۲۰۱۲). در این مقاله این روش روی داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی و در مقیاس توده‌های معدنی به کار برده خواهد شد. به عبارت دیگر با استفاده از نتایج این صافی‌ها در تعیین حدود توده معدنی، محل‌های حفاری اکتشافی پیشنهاد و بدین ترتیب نتایج آنها اعتبارسنجی می‌شود. در این راستا از کدهای برنامه‌نویسی به زبان متلب استفاده خواهد شد.

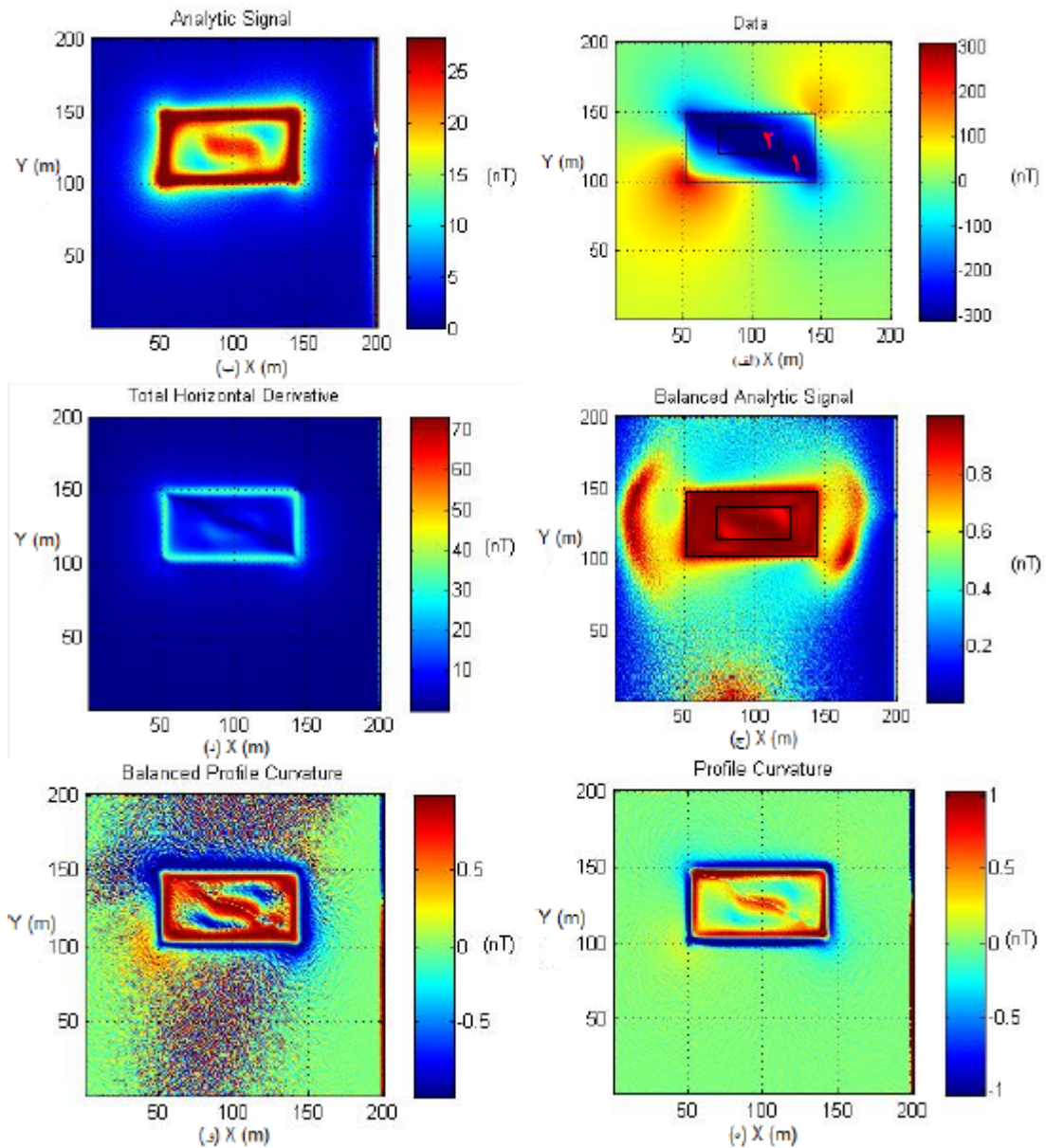
شکل ۱-د مشتق افقی میدان کل میدان را نشان می‌دهد. شکل ۱-ه کاربرد صافی انحنای پروفیل را روی داده‌های قسمت الف نشان می‌دهد. این صافی توده ۱ را



شکل ۱. کاربرد صافی‌های مختلف بر روی داده‌های مغناطیس مصنوعی در عمق‌های متفاوت. الف) پاسخ مغناطیسی سه توده که سطح مقطع آنها در شکل نشان داده شده است. زاویه میل و انحراف بردار مغناطیسی به ترتیب ۴۵ و ۶ درجه فرض شده است. ب) سیگنال تحلیلی متداول داده‌های قسمت الف. ج) سیگنال تحلیلی متعادل داده‌های قسمت الف. د) صافی مشتق افقی بر روی داده‌های قسمت الف. ه) انحنا ی پروفیل متداول بر روی داده‌های قسمت الف. و) انحنا ی پروفیل متعادل بر روی داده‌های قسمت الف.

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل مصنوعی مثال دوم.

نوع توده	عمق (متر)	عرض (متر)	طول (متر)	ضخامت (متر)
منشور شماره ۱	۳۰	۵۰	۹۰	۱۰
منشور شماره ۲	۸۰	۱۰	۴۰	۱۰



شکل ۲. کاربرد صافی‌های مختلف بر روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل به صورت مضاعف در داخل یکدیگر. الف) پاسخ مغناطیسی دو توده که سطح مقطع آنها در شکل نشان داده شده است. توده سطحی ۳۰ متر و توده عمیق‌تر ۸۰ متر عمق دارد. مغناطیس‌شدگی توده‌ها ۱/۵ (A/m) و زاویه میل و انحراف بردار مغناطیسی به ترتیب ۴۵ و ۶ درجه فرض شده است. ب) سیگنال تحلیلی متداول داده‌های قسمت الف. ج) سیگنال تحلیلی متعادل داده‌های قسمت الف. د) صافی مشتق افقی داده‌های قسمت الف. ه) انحنای پروفیل داده‌های مغناطیسی قسمت الف. و) انحنای پروفیل متعادل داده‌های مغناطیسی قسمت الف.

توده ۲ قرار دارد نشان داده شده است ولی اثری از توده ۲ نیست. در شکل ۲-و صافی متعادل انحنای پروفیل بر روی مدل‌ها اعمال شده است. به دلیل این‌که صافی انحنای

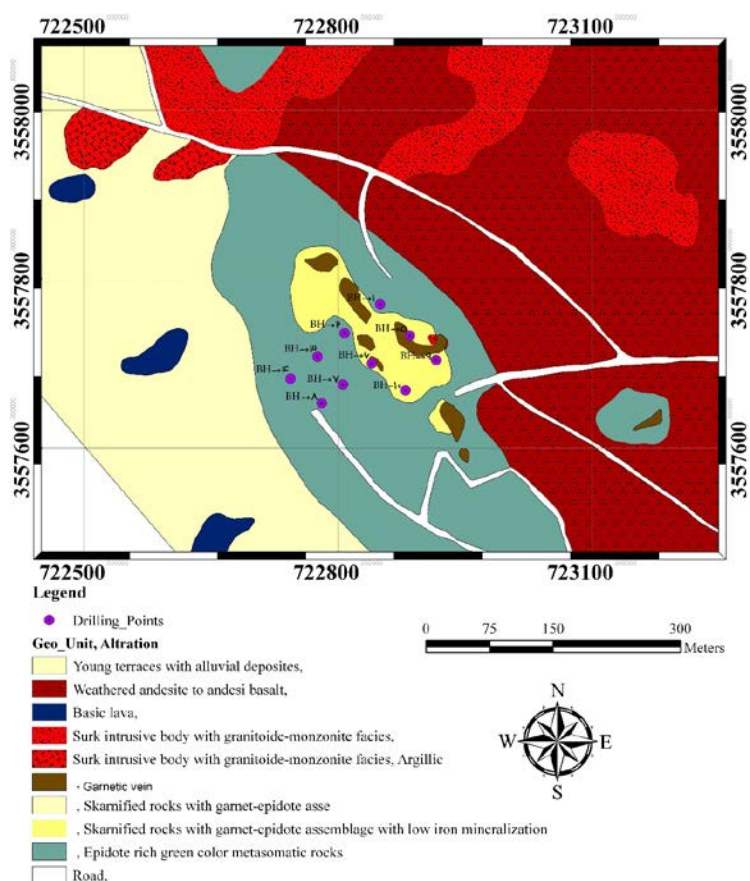
شکل ۲-د مشتق افقی میدان کل را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ه که صافی انحنای پروفیل متداول بر روی مدل‌ها اعمال شده است، توده ۱ که در عمق کمتری نسبت به

دیده می‌شود. دایک‌ها بیشتر از جنس بازیک و فوق بازیک هستند. یک گسل بزرگ با روند شمال غربی - جنوب شرقی بلوک‌های ماده معدنی را از شمال احاطه می‌کند. طبق IGRF مدل ۲۰۱۲ پارامترهای زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی زمین در این منطقه ۴۸، ۵ درجه و ۴۶۵۰۰ نانوتسلا است. در این منطقه توده‌های مولد بی-هنجاری مغناطیسی پوشیده هستند و اثری از آنها در سطح مشاهده نمی‌شود (شکل ۳).

پروفیل بر روی ساختارهای خطی بهتر جواب می‌دهد نتوانسته حدود توده ۲ را که در درون توده ۱ قرار دارد، به وضوح نشان دهد.

۳ کاربرد بر روی داده‌های مغناطیس معدن سنگ آهن سورک یزد

معدن سنگ آهن سورک در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری غرب یزد و ۳۰ کیلومتری شمال غرب آبادی ندوشن قرار دارد. در این منطقه علاوه بر توده‌های مغناطیسی، ساختارهای خطی شکل مانند گسل و دایک بسیار فراوان



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده شده مربوط به معدن سنگ آهن سورک. این نقشه منطبق بر محدوده توده جدید 2b است که حفاری‌های مغزه‌گیری در آن انجام شده است.

اعمال شده است که موفق به نمایش برخی از ساختارها شده است. در شکل ۴-و صافی انحنای پروفیل متعادل با استفاده از رابطه (۱۲) بر روی داده‌های منطقه اعمال شده که به‌طور واضح و مشخص تمامی ساختارهای خطی شکل را نشان داده است. البته در این نقشه پدیده‌های بسیار دیده می‌شود که اکثراً در اثر حضور ذخایر پلاسی است. شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی ساده شده مربوط به منطقه است که بر روی آن محل حفاری‌ها نشان داده شده است. تمامی حفاری‌های انجام شده به ماده معدنی آهن برخورد کرده است.

۴ کاربرد بر روی داده‌های مغناطیس‌هوایی کراتون ییلگران استرالیا

به منظور بررسی کاربرد صافی متعادل انحنای پروفیل، داده‌های مغناطیسی هوایی مربوط به کراتون ییلگران استرالیا انتخاب شده است. این منطقه بیشتر به دلیل وجود دایک‌هایی با روند شرقی-غربی با مغناطیس-شدگی مثبت و منفی در کنار یکدیگر در جهان شهرت دارد.

زاویه میل بردار مغناطیس زمین در این ناحیه ۶۵- درجه گزارش شده است. وجود دایک‌های خطی و همچنین زاویه میل منفی این منطقه را به نوعی‌ترین مورد مطالعاتی تبدیل کرده است.

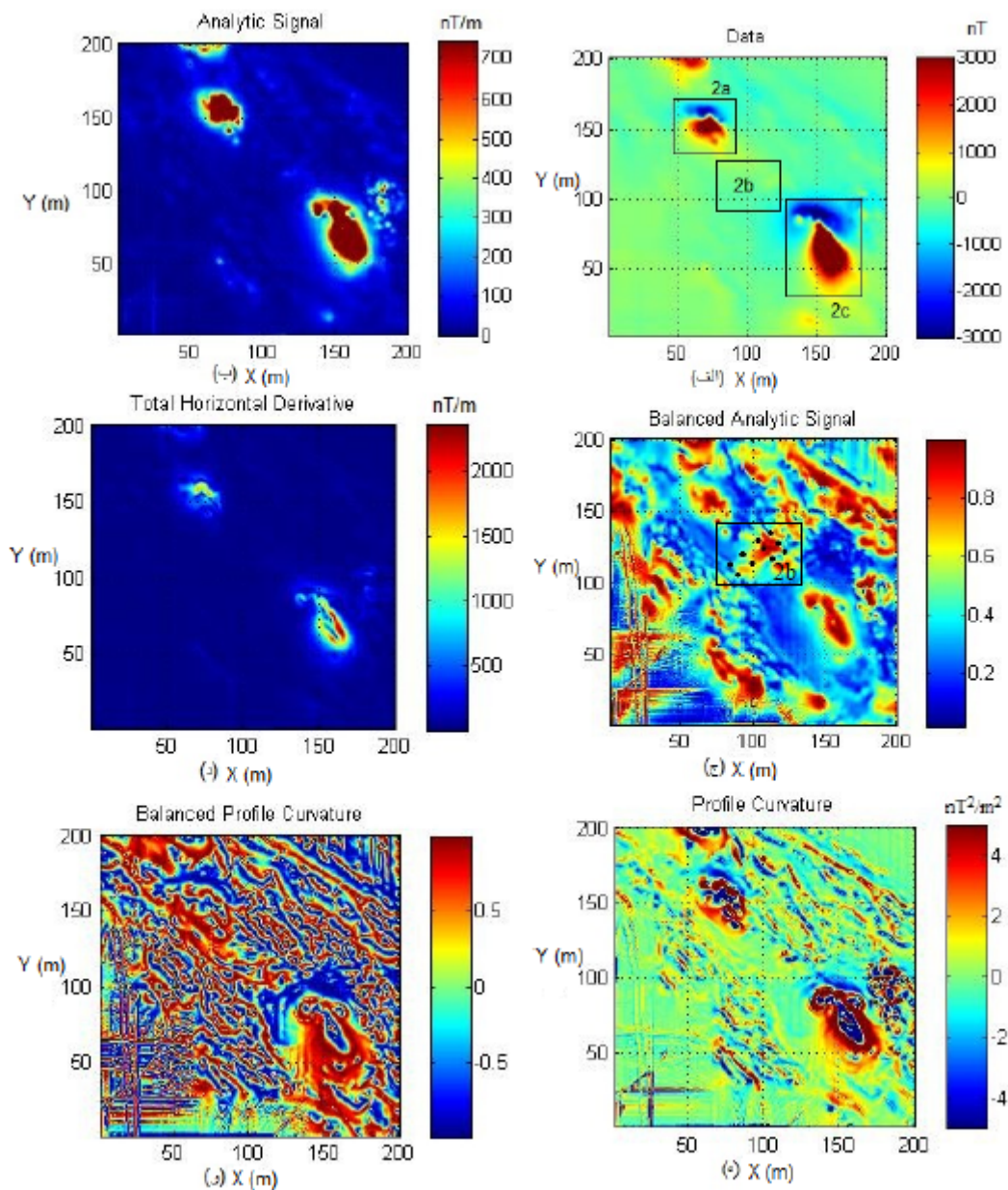
شکل ۵-الف بی‌هنجاری مغناطیس‌سنجی هوایی این ناحیه را نشان می‌دهد. هدف از کاربرد صافی‌های مشتق، تخمین حدود گسل و دایک‌های (ساختارهای خطی) موجود در این ناحیه است. در شکل ۵-ب صافی سیگنال تحلیلی متداول با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده است. در این صافی به دلیل عدم تعادل بین نتایج خروجی، تنها ساختارهای خطی با شدت بالا برجسته شده‌اند و ساختارهای با شدت کمتر همچنان پوشیده هستند. شکل ۵-ج مربوط به سیگنال تحلیلی متعادل

شکل ۴-الف بی‌هنجاری مغناطیس‌سنجی ناحیه را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با روند شمال غرب - جنوب شرق و در امتداد گسلی با همین امتداد و به صورت توده‌های جدا از هم مشخص هستند. بی‌هنجاری که در گوشه جنوب شرقی منطقه وجود دارد به نام 2c و توده شمال غربی به نام 2a نام گذاری شده است. در شکل ۴-ب صافی سیگنال تحلیلی متداول بر روی داده‌ها اعمال شده است که دو توده مغناطیسی با شدت مغناطیس‌شدگی زیاد را نشان می‌دهد. شکل ۴-ج مربوط به صافی سیگنال تحلیلی متعادل است که دقت بالاتری در تخمین مرز توده‌ها دارد و علاوه بر توده‌های اصلی 2a و 2c قسمت ب، یک توده دیگر نیز در بین دو محدوده اصلی تعیین شده که با نام 2b در شکل مشخص شده است. نقشه زمین‌شناسی مربوط به محدوده بی‌هنجاری جدید 2b در شکل ۳ نشان داده شده است. محدوده برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی دقیقاً منطبق بر محدوده نقشه زمین‌شناسی است. با حفاری‌های مغزه‌گیری که در این محدوده انجام شد وجود ماده معدنی در عمق تایید شده است. در این شکل علاوه بر موقعیت مربوط به سه توده معدنی (مگنتیتی) محدوده‌های بیشینه دیگری نیز به چشم می‌خورد که طبق زمین‌شناسی منطقه در اثر رخنمون سنگ-های بازیک و همچنین ذخایر پلاسی ایجاد شده است. همچنین در گوشه شمال غربی منطقه رخنمون افیولیت‌ها که به شدت گسل خورده هستند نیز مشخص شده است. در پیوست مقاله مشخصات مربوط به یکی از لاگ‌های گمانه‌های حفر شده، آورده شده است. در این نقطه گمانه در ۱۲۵ متری به توده مگنتیتی برخورد کرده است. شکل ۴-د مربوط به مشتق افقی کل داده‌های مغناطیسی است.

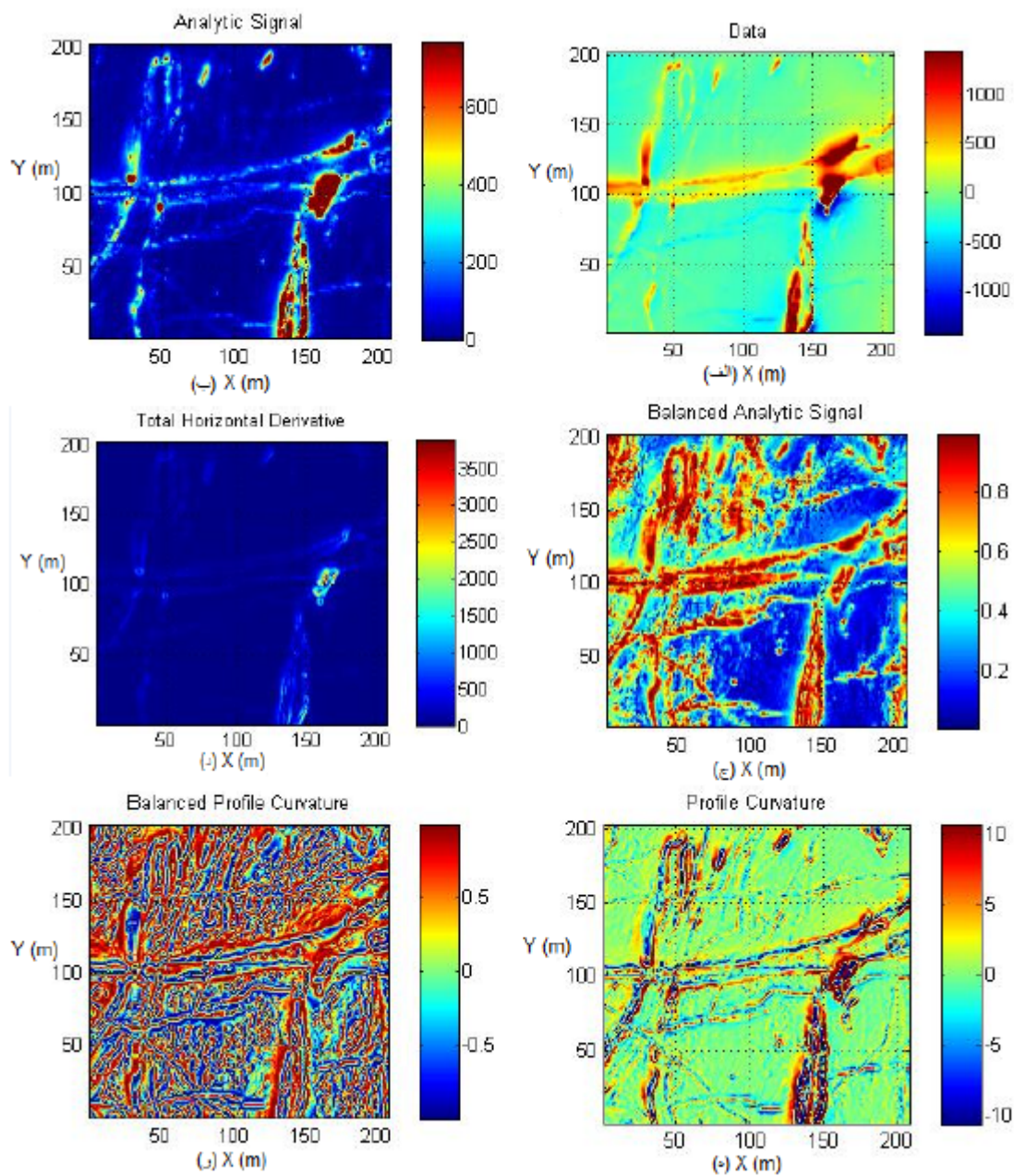
در این شکل نیز تنها دو توده تعیین شده است. در شکل ۴-ه صافی انحنای پروفیل متداول بر روی داده‌ها

جزئیات بیشتری از ساختارهای خطی را نمایان کرده است.

است که با استفاده از رابطه (۹) و با پارامتر $k = 1$ محاسبه شده است. در این صافی دقت تخمین نسبت به صافی سیگنال تحلیلی متداول به مراتب بالاتر است و



شکل ۴. کاربرد صافی‌های مختلف بر روی داده‌های مغناطیس معدن سنگ آهن سورک یزد. الف) پاسخ مغناطیسی توده‌های منطقه مورد مطالعه. ب) سیگنال تحلیلی متداول داده‌های منطقه. ج) سیگنال تحلیلی متداول داده‌های منطقه. دایره‌های سیاه‌رنگ موقعیت گمانه‌های اکتشافی مربوط به توده جدید 2b را نشان می‌دهد. د) صافی مشتق افقی داده‌های قسمت الف. ه) انحناى پروفیل داده‌های مغناطیسی قسمت الف. و) انحناى پروفیل متعادل داده‌های مغناطیسی قسمت الف.



شکل ۵. کاربرد صافی‌های مختلف روی داده‌های مغناطیس هوایی کراتون ییلکران استرالیا. الف) پاسخ مغناطیسی هوایی توده‌های منطقه مورد مطالعه. ب) سیگنال تحلیلی متداول داده‌های قسمت الف. ج) سیگنال تحلیلی متبادل داده‌های قسمت الف. د) صافی مشتق افقی داده‌های قسمت الف. ه) انحنای پروفیل داده‌های مغناطیسی هوایی قسمت الف. و) انحنای پروفیل متبادل داده‌های مغناطیسی هوایی قسمت الف.

در شکل ۵-و که صافی انحنای پروفیل متبادل روی داده‌های هوایی اعمال شده، به‌طور کامل تمام ساختارهای خطی اعم از دایک، گسل و شکستگی‌های موجود در منطقه نمایش داده شده‌اند.

شکل ۵-د مربوط به صافی مشتق افقی است که در این منطقه پاسخ قابل قبولی تولید نکرده است. شکل ۵-ه مربوط به صافی انحنای پروفیل متداول می‌باشد که تا حدودی در نمایاندن ساختارهای خطی موفق بوده است.

۵ بحث و نتیجه گیری

تخمین مرز و حدود توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی یکی از مهمترین مباحث مطرح در این زمینه است. روابط مربوط به صافی‌های تخمین مرز حاوی گرادیان داده‌های مغناطیس برداشت شده است که این خود سبب برجسته شدن نوفه‌های مزاحم خواهد شد. این مشکل به‌ویژه هنگامی که از مشتق مرتبه‌های بالا استفاده می‌شود، نمود بیشتری دارد. معمولاً راهکار حل این مشکل در ابتدا برداشت گرادیان‌های داده‌ها به جای محاسبه عددی آنها است. در مرحله بعد می‌توان با اعمال صافی ادامه فراسو روی داده‌ها تا حد مطلوبی میزان نوفه را کاهش داد. یکی دیگر از مشکلات صافی‌های تخمین مرز عدم تعادل بین نتایج خروجی است، بدین معنی که بی‌هنجاری‌هایی با شدت متوسط و کم بین بی‌هنجاری‌های با شدت بالا پوشیده می‌شوند. در این مقاله دو صافی با خروجی متعادل برای برجسته‌سازی جزئیات موجود در تصاویر میدان پتانسیل، به‌ویژه تصاویر مغناطیس‌سنجی، ارائه شده است. این دو صافی شامل سیگنال تحلیلی متعادل و انحنای پروفیل هستند و مزیت استفاده از آنها این است که بین بی‌هنجاری‌های مختلف در تصویری که بر آن صافی اعمال شده، تعادل برقرار می‌شود. این امر باعث دقت بالای تعیین حدود توده‌های زمین‌شناختی خواهد شد. این دو صافی روی داده‌های مغناطیس زمینی معدن سنگ آهن سورک و همچنین داده‌های مغناطیس هوایی کراتون ییلگران استرالیا به کار برده شده است. کاربرد صافی سیگنال تحلیلی متعادل روی داده‌های معدن سنگ آهن سورک سبب تعیین محدوده‌ای شد که سیگنال تحلیلی متداول قادر به تعیین آن نیست. در واقع در این محدوده، دو توده زیرسطحی در مجاورت یکدیگر قرار دارند که با نام‌های 2a و 2c مشخص می‌شوند. این دو توده در نقشه سیگنال تحلیلی متداول نیز برجسته شده‌اند. با

کاربرد صافی سیگنال تحلیلی متعادل روی داده‌های مغناطیسی، علاوه بر دو توده 2a و 2c، توده سومی (2b) نیز در بین دو محدوده مشخص شد که در حفاری‌های اکتشافی نیز وجود توده زیرسطحی به اثبات رسید.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از شرکت معدنی جنوب شرق ایران به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های استفاده شده در مقاله تقدیم می‌دارند.

منابع

- انصاری، ع.ح.، علمدار، ک.، و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۱، تراس‌بندی در تفسیر داده‌های پتانسیل: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۲)، ۱۵۷-۱۶۶.
- Ansari, A. H., and Alamdar, K., 2011, A new edge detection method based on the analytic signal of tilt angle (ASTA) for magnetic and gravity anomalies: Iranian Journal of Science and Technology, **A2**, 81-88.
- Blakely, R., 1995, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications: Cambridge University Press.
- Blumentritt, C. H., Marfurt, K. J., and Sullivan, E. C., 2006, Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations — Early to mid-Paleozoic, Central Basin Platform, west Texas: Geophysics, **71(5)**, B159-B166.
- Cooper, G. R. J., 2009, Balancing images of potential-field data: Computers & Geosciences, **64**, 17-20.
- 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.
- perCoo G. R. J., and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential-field

- Nabighian, M. N., 1972, The analytical signal of 2D magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, **37**, 507–517.
- Phillips, J. D., Hansen, R. O., and Blakely, R. J., 2007, The use of curvature in potential-field interpretation: *Exploration Geophysics*, **38**, 111–119.
- Rajagopalan, S., and Milligan, P., 1995, Image enhancement of aeromagnetic data using automatic gain control: *Exploration Geophysics*, **25**, 173–178.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., and Smith, R., 2007, Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives: *The Leading Edge*, **26**, 1502–1505.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., and MacKenzie, C., 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**(4), L39–L43.
- data using normalized statistics: *Geophysics*, **73**(3), H1–H4.
- Lahti, I., and Karinen, T., 2010, Tilt derivative multiscale edges of magnetic data: *The Leading Edge*, **29**, 24–29.
- Li, X., 2006, Understanding 3D analytic signal amplitude: *Geophysics*, **71**(2), B13–B16.
- Ma, G., and Du, X., 2012, An improved analytic signal technique for the depth and structural index from 2D magnetic anomaly data: *Pure and Applied Geophysics*, **169**, 2193–2200.
- Miller, H. G., and Singh, V., 1994, Potential field tilt—A new concept for location of potential field sources: *J. Applied Geophysics*, **32**, 213–217.
- Mitasova, H., and H. Jaroslav, 1993, Interpolation by regularized spline with tension: II—Application to terrain modeling and surface geometry analysis: *Mathematical Geology*, **25**, 657–669.
- Moon, W. M., A. Ushah, V. Singh, and B. Bruce, 1988, Application of 2-D Hilbert transform in geophysical imaging with potential field data: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26**, 502–510.

