

تعیین مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از فیلترهای فاز محلی

کمال علمدار^{۱*} و عبدالحمید انصاری^۲

^۱ کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

^۲ عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: ۸۷/۶/۳، پذیرش نهایی: ۸۸/۲/۲۲)

چکیده

یکی از روش‌های تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل اندازه‌گیری تغییرات فاز محلی داده‌های میدان پتانسیل است. با استفاده از این فیلترها مرز و حدود منابع مولد بی‌هنجاری تعیین می‌شود. در این راستا روش‌های متفاوتی چون اندازه‌گیری زاویه تیلت و مشتق افقی کل زاویه تیلت وجود دارد. این فیلترها در حالت رویارویی با منابع عمیق کارایی خود را از دست می‌دهند. برای بهبود نتایج حاصل از کاربرد این فیلترها، تعدادی فیلتر جدید فازپایه چون مشتق قائم زاویه تیلت و زاویه تیلت هذلولوی (هایپربولیک) معرفی شده است. در این مقاله نتایج کاربرد فیلترهای متداول فازپایه و همچنین چندین فیلتر جدید فاز پایه با فیلترهای گرادیان افقی، قائم و سیگنال تحلیلی مقایسه شده است. این فیلترها روی داده‌های مغناطیسی مدل و همچنین روی داده‌های مغناطیس هوایی چهارگوش آباد به کار برده شده است.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، فاز محلی، زاویه تیلت، زاویه تیلت هذلولوی، مشتق افقی کل، سیگنال تحلیلی.

Edge detection of potential field anomalies using local phase filters

Alamdard, K.¹, Ansari, A. H.²

¹M.Sc. Student in mineral exploration, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

²Ph.D. in exploration geophysics, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 24 Aug 2008, Accepted: 12 May 2009)

Abstract

Potential fields are due to complex distribution of sources related to susceptibility and mass density variations for magnetic and gravity field respectively. In researching the lateral heterogeneous of different geological bodies, in particular their edge location potential field has some advantages. We mainly refer to linear features such as fault, folding axis, dyke, trend and border of the geological units as well as to circular features such as craters and buried voids when mentioning geological bodies.

Usually, the edge detection and edge enhancement techniques are used to distinguish between geological bodies with different depths and sizes. Edge detection methods are based on the position of the maximum or zero-crossing points associated with vertical derivative, horizontal derivative and analytic signal filters. These methods which are famed to derivative-based filters use different orders, but some instability may occur in high-order derivatives since any kind of noise or non-harmonic signal will be correspondingly enhanced with desired signals simultaneously. Another difficulty is that in the filtered image, the smaller amplitude features (which may be of considerable importance) may be hard to discern.

Other edge detection methods are local phase filters (edge enhancement methods) based on the phase variation of the derivative quantities. The advantage of these filters is their flexibility to produce new filters with most applicability just with partial variation. The edge enhancement methods mainly include Tilt angle (TA), Total Horizontal derivative of the tilt angle (THDR), theta map, Hyperbolic Tilt Angle (HTA) and normalized horizontal derivative.

The tilt angle filter did not serve as a very accurate method of locating deep sources. A much improved result came from using the second vertical derivative of the tilt angle in the space domain. Equations (1) to (4) are the local phase filters.

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

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

$$Theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \right) \quad (3)$$

$$HTA = \Re \left(\tanh^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial z}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \right) \quad (4)$$

where, f is potential field data, T is tilt angle and x, y, z are three Cartesian components. In the above equation \Re denote real part of function.

In this paper we applied these filters on synthetic magnetic data from a cylinder model as well as on real magnetic data from the Abadeh quadrangle. According to the obtained results the Dehshir-Baft fault in the northeast of the studied and ophiolite outcrops in the southeast are enhanced.

Key words: Potential field, Derivative filters, Local phase, Abadeh quadrangle, Tilt angle, Theta angle.

۱ مقدمه

می‌مانند. لذا برای استخراج جزئیات موجود در نقشه و برجسته‌سازی پدیده‌ها و ساختارهای مولد بی‌هنجاری‌هایی با شدت‌های متفاوت از فن فیلتر کردن استفاده می‌شود. هنگام کاربرد فیلترهای متفاوت روی داده‌های میدان

نقشه‌های به دست آمده از برداشت‌های میدان پتانسیل ابزاری مفیدی در برنامه‌های اکتشاف منابع معدنی هستند. تصاویر حاصل، متشکل از بی‌هنجاری‌هایی با شدت‌های متفاوت‌اند که در بیشتر موارد با نوفه‌های موجود در تصویر پوشیده

منابع عمیق است که در این موارد مرز مشخص شده، حالت پخش و هاله مانند به خود می‌گیرد. برای رفع این مشکل از تعدادی فیلترهای جدید فازپایه مانند مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت یا مشتق افقی نرمال شده استفاده می‌شود. ممکن است در برخی موارد که در محاسبات مربوط به فیلترهای فازپایه از مشتق‌های مرتبه بالا استفاده می‌شود مشکل برجسته شدن نوفه‌ها نیز وجود داشته باشد. در این بررسی انواع فیلترهای متداول فازپایه و همچنین تعدادی از جدیدترین فیلترهای مشتق شده از آنها معرفی می‌شود و کاربرد آنها، هم روی داده‌های مغناطیسی مدل فرضی و هم روی داده‌های مغناطیس هوایی چهارگوش آبداده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ فیلتر زاویه تیلت

یکی از فیلترهای فازپایه متداول برای برجسته‌سازی ساختارهای موجود در تصاویر میدان پتانسیل، فیلتر زاویه تیلت است. این فیلتر که اولین بار (میلر و ساین، ۱۹۹۴) معرفی کرد، به صورت نسبت مشتق قائم به اندازه مشتق افقی کل داده‌های میدان پتانسیل برداشت شده تعریف می‌شود. زاویه تیلت طبق رابطه زیر، هم در حوزه بسامد و هم در حوزه مکان به راحتی قابل محاسبه است. (میلر و ساین، ۱۹۹۴).

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

که در آن T مقدار زاویه تیلت و f میدان پتانسیل برداشت شده (مغناطیس یا گرانی) است. تغییرات زاویه تیلت در بالای توده‌های معدنی و همچنین بدون بعد بودن آن مهم‌ترین دلیل کاربرد این فیلتر است. در ضمن اینکه نتایج آن را می‌توان با نتایج فیلترهای مشتق قائم و مشتق افقی نیز مقایسه کرد.

از ویژگی‌های مهم زاویه تیلت می‌توان به موارد زیر

پتانسیل، بیشترین تلاش برای ایجاد تعادل بین نوفه و سیگنال‌های موجود در تصویر فیلتر شده صورت می‌گیرد (کوپر، ۲۰۰۶). با توجه به ماهیت داده‌ها و دامنه تغییرات شدت بی‌هنجاری‌های موجود در تصویر و همچنین هدف از عملیات فیلتر کردن، انواع متفاوتی از فیلترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از کاربردی‌ترین این فیلترها فیلترهای بالا گذر هستند که خود به انواع گوناگونی چون فیلتر مشتق قائم، فیلتر ادامه فراسو و غیره تقسیم می‌شوند (کوپر، ۲۰۰۶). استفاده از فیلترهایی با ماهیت‌های متفاوت، معایب و مزایایی دارد. برای مثال فیلتر مشتق قائم که در تفسیرهای مغناطیس‌سنجی در حکم ابزاری برای برجسته‌سازی و برآورد موقعیت و مرز توده‌ها به کار می‌رود در مرتبه‌های بالاتر مشتق، کارایی خود را از دست می‌دهد چرا که همزمان با بی‌هنجاری‌ها، نوفه‌های موجود در تصویر نیز برجسته می‌شوند و در بعضی موارد نقشه فیلتر شده فقط از نوفه تشکیل می‌شود و در تفسیر نقشی نخواهد داشت (کوان و کوپر، ۲۰۰۵a). فیلترهای ادامه فراسو و فرسوسو نیز در وهله اول برای تشخیص بی‌هنجاری‌های کاذب و حقیقی و در وهله دوم به منظور تعیین گسترش افقی و قائم ماده معدنی کاربرد گسترده‌ای در تفسیرها دارند.

نوع دیگری از فیلترها که امروزه به طور گسترده در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل از آنها استفاده می‌شود، فیلترهای فاز محلی (Local Phase - filters) هستند. از مهم‌ترین مزایای این فیلترها انعطاف‌پذیری آنها است. بدین ترتیب که با تغییری جزئی در فرمول مربوط به یک فیلتر و در واقع نرمال‌سازی آنها می‌توان فیلترهای جدیدی حتی با کارایی بیشتر تولید کرد. در مقایسه با فیلترهای بالاگذر، وابستگی این فیلترها به نوفه کمتر است. از انواع متداول فیلترهای فازپایه می‌توان به زاویه تیلت (tilt angle) (زاویه انحراف)، زاویه تتا (theta angle) (زاویه بین گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی) و مشتق افقی زاویه تیلت اشاره کرد. مشکل استفاده از فیلترهای متداول فازپایه در مورد

اشاره کرد:

- مقدار زاویه تیلت مستقیماً در بالای توده‌های زیرسطحی مثبت است.

- در نزدیکی لبه‌های توده، جایی که مقدار مشتق افقی حداکثر و میزان مشتق قائم صفر است، مقدار زاویه تیلت صفر می‌شود.

- در نواحی خارج از توده زیرسطحی، مقدار زاویه تیلت منفی خواهد بود.

- زاویه تیلت در بازه $+90$ تا -90 درجه تغییر می‌کند و در مقایسه با فیلتر سیگنال تحلیلی (گرادیان کل) تفسیر نتایج این فیلتر آسان‌تر است.

- در این فیلتر اندازه مشتق قائم نسبت به اندازه مشتق افقی نرمال‌سازی شده است.

- یکی از معایب زاویه تیلت، کارایی نداشتن آن در هنگام حضور منابع عمیق است که این مشکل با مشتق‌گیری از زاویه تیلت برطرف می‌شود و در قسمت‌های بعدی بدان اشاره خواهد شد.

۳ فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت (Total horizontal derivative of tilt angle)

این فیلتر که با THDR نشان داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید (وردوزو و همکاران، ۲۰۰۴).

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

در این رابطه T زاویه تیلت محاسبه شده از رابطه (۱) است.

از کاربردهای مهم این فیلتر تعیین مرز توده‌ها است اما از آنجا که برای محاسبه این فیلتر باید مشتق دوم زاویه تیلت محاسبه شود، با توجه به تغییرات شدت داده‌های برداشت شده، ممکن است تصویر فیلتر شده با نوفه زیادی همراه

باشد.

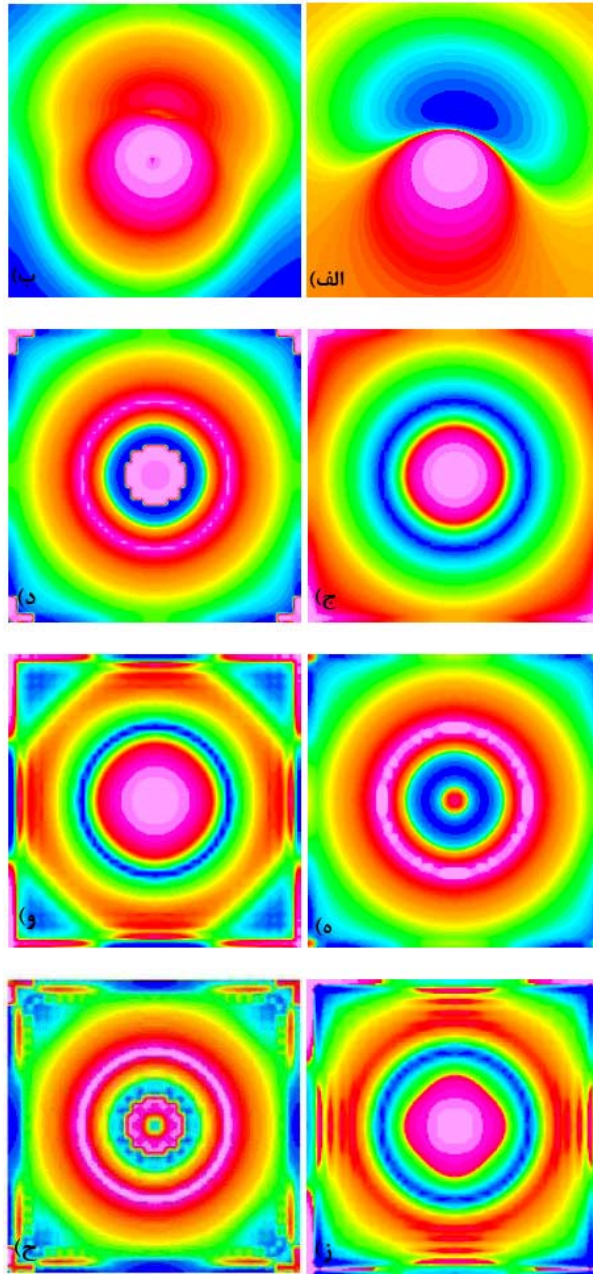
۴ فیلتر تنا

این فیلتر به صورت نسبت بین اندازه گرادیان افقی به اندازه سیگنال تحلیلی داده‌های میدان پتانسیل تعریف می‌شود. مقدار این فیلتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود (وینز و همکاران، ۲۰۰۵).

$$\cos \theta = \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \right) \quad (3)$$

در این رابطه f میدان پتانسیل برداشت شده و صورت کسر بیانگر گرادیان افقی کل و مخرج کسر معادل سیگنال تحلیلی (Analytic Signal) (گرادیان کامل) است. در واقع در این فیلتر اندازه گرادیان افقی کل با اندازه سیگنال تحلیلی نرمال شده است. این فیلتر منجر به برآورد مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری میدان پتانسیل می‌شود. محدودیت استفاده از این فیلتر در مورد داده‌های مغناطیسی این است که ابتدا داده‌ها باید به قطب یا استوا منتقل شوند تا ماهیت دوقطبی داده‌ها حذف شود.

در شکل ۱، کاربرد فیلترهای متفاوت روی داده‌های مغناطیسی مدل استوانه قائم با یکدیگر مقایسه شده است. مدل استوانه قائم با شعاع ۱۰۰ متر و ضخامت ۵۰ متر در عمق ۲۵۰ متری قرار گرفته است و داده‌ها در یک شبکه 100×100 متر تولید شده‌اند. زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس توده به ترتیب برابر با ۶۰ و ۱۵ درجه، شدت مغناطیس شدن توده برابر با ۴۶۰۰۰ نانوتسلا و توده بدون مغناطیس باقی‌مانده در نظر گرفته شده است. در شکل (۱-الف) تصویر مغناطیسی مدل استوانه قائم نشان داده شده که در قسمت‌های ب، ج، د و ه به منظور مقایسه نتایج، به ترتیب فیلترهای مشتق افقی کل، زاویه تیلت، فیلتر THDR و فیلتر تنا روی آن آزمایش شده است.



شکل ۱. مقایسه نتایج فیلترهای متفاوت بر روی داده‌های مغناطیسی مدل استوانه قائم. (الف) داده‌های مغناطیسی مدل استوانه قائم با شعاع ۱۰۰ متر و ضخامت ۵۰ متر که در عمق ۲۵۰ متری قرار دارد. بی‌هنجاری مغناطیسی توده مدل به ازای زاویه انحراف و میل به ترتیب برابر با ۶۰ و ۱۵ درجه و با شدت مغناطیس شدن ۴۶۰۰۰ نانوتسلا تولید شده است. رنگ‌های گرم (سرخ، نارنجی) بیانگر مقادیر با شدت زیاد و رنگ‌های سرد (آبی، سبز) بیانگر مقادیر کم هستند. (ب) تصویر مشتق افقی کل داده‌های قسمت (الف) بیشینه مقدار مشتق افقی کل روی مرزها قرار گرفته که به دلیل تأثیر گرفتن از زاویه میل و انحراف مغناطیس‌شدگی توده مدل، دقت برآورد زیاد نیست. (ج) تصویر زاویه تیلت داده‌های قسمت (الف)، مقادیر کمینه (آبی رنگ) بیانگر مرز مدل است که به دلیل عمق زیاد توده مرز توده به صورت پخش و هاله برآورده شده است. (د) تصویر مشتق افقی کل زاویه تیلت (THDR)، مقادیر بیشینه روی مرزها قرار گرفته است. (ه) تصویر فیلتر تا داده‌های قسمت (الف)، بیشینه مقدار زاویه تا بیانگر مرزهای توده است. (و) تصویر فیلتر زاویه تیلت هذلولوی داده‌های قسمت (الف)، کمینه مقدار زاویه تیلت هذلولوی (رنگ آبی) بیانگر توده است و مشکل پخش بودن مرز در قسمت (ج) برطرف شده است. (ز) تصویر مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت، کمینه مقدار (آبی رنگ) روی مرزها قرار می‌گیرد و مشکل پخش بودن مرز برطرف شده است. (ح) تصویر مشتق افقی کل نرمال‌شده داده‌های قسمت (الف) (در مقایسه با قسمت (ب) دقت برآورد مرز به مراتب بهتر است).

می شود (کوپر، ۲۰۰۶).

$$HTA = \Re \left(\tanh^{-1} \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right] \right) \quad (۴)$$

که در آن f میدان پتانسیل و \Re بیانگر قسمت حقیقی تابع است. تابع تانژانت هذلولوی نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Z = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{\sinh x}{\cosh x}$$

بعد از محاسبه HTA، کمینه مقدار آن درست در بالای لبه‌ها و مرزهای توده قرار خواهد گرفت. کاربرد این فیلتر روی مدل مغناطیسی شکل ۱ در قسمت و آمده است. در این شکل مرز مدل با مقادیر کمینه زاویه تیلت هذلولوی مشخص شده است و در ضمن در مقایسه با فیلتر زاویه تیلت، مرز مدل تیزتر (sharp) مشخص شده است.

از مزایای بسیار مهم این فیلتر حساسیت نداشتن آن به نوفه‌های موجود و همچنین نوفه‌های القاء شده در تصویر فیلتر شده است. در مقابل فیلتر THDR به شدت تحت تأثیر این نوفه‌ها قرار می گیرد. علت این امر آن است که در محاسبه فیلتر HTA از مشتقات مرتبه اول استفاده می شود در حالی که در محاسبه THDR مشتقات مرتبه دوم به کار می رود.

۲-۵ مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت

همان‌طور که گفته شد، با افزایش عمق توده، کارایی فیلتر زاویه تیلت در مشخص کردن لبه‌های توده کاهش خواهد یافت، به همین دلیل از فیلتر مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت استفاده می شود (کوپر، ۲۰۰۶).

شکل ۱-ز، کاربرد این فیلتر را روی داده‌های مغناطیسی مدل نشان می دهد. مقایسه این شکل با قسمت ج که کاربرد زاویه تیلت معمولی را نشان می دهد، مشخص است که در قسمت ز مرز توده مدل تیزتر و واضح تر شده است.

در شکل ۱-ب تصویر مشتق افقی کل داده‌های مغناطیسی قسمت الف آمده است. در این تصویر مرز مدل استوانه به دلیل متأثر شدن از زاویه میل و انحراف مغناطیس‌شدگی توده، مشخص نیست. در شکل ۱-ج کاربرد فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های مغناطیسی مدل نشان داده شده است، در این شکل نتایج زاویه تیلت، متأثر از مقادیر زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس‌شدگی توده نیست و مقادیر کمینه (آبی رنگ) روی مرز مدل قرار گرفته ولی به خاطر عمق توده مرز به صورت هاله مشخص شده است.

شکل ۱-د، کاربرد فیلتر THDR را روی مدل نشان می دهد. در این شکل بیشینه مقدار فیلتر THDR روی مرز مدل قرار گرفته و در مقایسه با قسمت (ج) برآورد مرز، با دقت بیشتری صورت گرفته است. در شکل ۱-ه، کاربرد فیلتر تتا روی مدل نشان داده شده است که در این شکل مقادیر بیشینه زاویه تتا روی مرز توده مدل قرار گرفته است. یکی از مشکلات این فیلتر در مورد داده‌های مغناطیس‌سنجی، لزوم تبدیل به قطب داده‌های مغناطیسی است. به همین خاطر در عمل، کمتر از این فیلتر استفاده می شود.

۵ فیلترهای جدید مشتق شده از فیلترهای فاز محلی

۱-۵ زاویه تیلت هذلولوی

کاربرد زاویه تیلت روی نقشه‌های گوناگون میدان پتانسیل و بررسی نتایج حاصل از آن نشان داده که اگر در محاسبات مربوط به زاویه تیلت به جای استفاده از تابع تانژانت از قسمت حقیقی تابع تانژانت هذلولوی استفاده شود نتایج برآورد مرز و لبه توده‌های زیرسطحی نسبت به انواع فیلترهای گفته شده بهتر خواهد بود و بی‌هنجاری‌ها با شدت بیشتری برجسته خواهند شد. این فیلتر، زاویه تیلت هذلولوی (HTA) (hyperbolic tilt angle) نام دارد و از رابطه زیر محاسبه

در جهت شرق و محور y آن در جهت شمال جهت‌دار شده و محاسبه TX و TY طبق روابط بالا در حکم مشتق افقی زاویه تیلت، پدیده‌ها و عوارض موجود در تصاویر به ترتیب در جهت‌های x و y برجسته می‌شوند. توابع جهتی زاویه تیلت در هر جهت انتخابی مثلاً (E-W) با مشتقات افقی در آن جهت و در جهت عمود بر آن محاسبه می‌شود.

۴-۵ اندازه گرادیان افقی

اندازه گرادیان افقی که مشتق افقی کل نیز نامیده می‌شود یکی دیگر از فیلترهای مفید برای پردازش تصاویر میدان پتانسیل و تعیین مرز بی‌هنجاری‌های احتمالی آنها است. با کاربرد این فیلتر، ساختارهای موجود در تصویر با هر امتدادی برجسته خواهند شد. این فیلتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کوان و کوپر، ۲۰۰۵b).

$$f_{x_{tot}} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2\right)} \quad (7)$$

بیشینه مقدار این فیلتر روی لبه‌های توده زیر سطحی قرار می‌گیرد و بدین ترتیب باعث مشخص و برجسته شدن مرز بی‌هنجاری‌ها می‌شود. اما چون در محاسبات این فیلتر از مشتق دوم استفاده می‌شود بسته به ماهیت داده‌ها ممکن است نوفه القاشده زیاد باشد. علاوه بر این، استفاده از فیلترهای مشتق افقی اعم از مشتقات جهتی و یا مشتق افقی کل که از ترکیب مشتقات جهتی به دست می‌آید در مواردی که توزیع بی‌هنجاری‌ها در سرتاسر نقشه یکسان نیست، به عبارت دیگر، هنگامی که دامنه تغییرات شدت بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه زیاد است، باعث حذف ناخواسته بی‌هنجاری‌های دارای شدت متوسط و یا کم خواهد شد که در مورد مشتقات جهتی از فیلترهای زاویه تیلت جهتی در حکم فیلتر جایگزین استفاده می‌شود. برای رفع مشکل فیلتر مشتق افقی کل از شکل نرمال شده این فیلتر استفاده می‌شود که در زیر توضیح داده خواهد شد.

برای محاسبه مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت دو راه وجود دارد: (۱) با استفاده از تفاوت بین دو زاویه تیلت به دست آمده از داده‌های میدان پتانسیل اولیه، در دو ارتفاع متفاوت (روش اختلاف محدود، finite - difference) (کوان و کوپر، ۲۰۰۵a، ۲) استفاده مستقیم از تبدیل فوریه زاویه تیلت محاسبه شده از داده‌های پتانسیل اولیه که ممکن است نتایج با نوفه همراه باشد (شکل ۱-ز).

۳-۵ زاویه تیلت جهتی (directional tilt angle)

مشتق جهتی به طور گسترده در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که فیلتر مشتق جهتی در یک جهت (آزیموت) محاسبه می‌شود، ساختارهای موجود در تصویر با امتداد عمود بر امتداد محاسبه مشتق جهتی برجسته می‌شوند.

همین ایده را می‌توان در محاسبه زاویه تیلت به کاربرد و زاویه تیلت جهتی را محاسبه کرد. در محاسبه زاویه تیلت با استفاده از رابطه (۱)، مشتق قائم نسبت به مشتقات افقی نرمال‌سازی می‌شود و در نهایت زاویه تیلت در حکم مشتق قائم با اندازه نرمال‌سازی شده در نظر گرفته می‌شود. به طور مشابه می‌توان دو فیلتر زاویه تیلت دیگر با عنوان فیلتر افقی با اندازه نرمال‌سازی شده تعریف کرد که زاویه تیلت جهتی نام دارد و از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$T_x = \tan^{-1} = \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (5)$$

$$T_y = \tan^{-1} = \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2}} \right) \quad (6)$$

با انتخاب یک دستگاه مختصات دکارتی که محور x آن

قسمت الف نشان داده شده است. در این تصویر مرز و حدود ساختارها و عوارض موجود مشخص شده است اما به دلیل عمق زیاد منابع مولد بی‌هنجاری، مرزها حالت هاله به خود گرفته‌اند. در شکل ۲-ج تصویر زاویه تیلت هذلولوی داده‌های شکل ۲-الف آمده که مرزها با دقت بیشتری مشخص شده است. یکی از ساختارهای مهم تعیین شده گسل دهشیر با روند شمال غربی - جنوب شرقی است که در بخش‌های شرقی دوشاخه شده است که این پدیده با شواهد صحرائی نیز مطابقت دارد (مشرقی فر و همکاران، ۱۳۸۵). در شکل ۲-د تصویر مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت نشان داده شده است که نتایج آن شکل ۲-ج را تأیید می‌کند. در شکل ۲-ه تصویر مشتق افقی کل نرمال شده داده‌های قسمت الف نشان داده شده است که با فرمول (۸) محاسبه شده است. در این شکل نیز مرزهای تعیین شده با دیگر شکل‌ها تطابق خوبی دارد. در مجموع نتایج حاصل از همه این شکل‌ها، یکدیگر و همچنین شواهد موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه را تأیید می‌کند. در شکل‌های ۲-و و ز فیلترهای مشتق جهتی به ترتیب در جهت‌های شمالی - جنوبی و شرقی - غربی نشان داده شده است. در هر تصویر ساختارهای عمود بر جهت محاسبه مشتق برجسته شده‌اند. در شکل ۲-ز که در آن مشتق جهتی در امتداد شرق - غرب محاسبه شده است گسل دهشیر و رخنمون افیولیت‌ها در جنوب شرقی منطقه (با امتداد تقریبی شمالی - جنوبی) مشخص شده است. در نهایت به منظور مقایسه تصویر فیلتر زاویه تیلت جهتی در امتدادهای شمالی - جنوبی و شرقی - غربی در شکل‌های ۲-ح و ط آمده است. در شکل‌های ۲-ح و ط نسبت به فیلترهای مشتق جهتی پدیده‌های بیشتری برجسته شده است که گویای دقت زیاد این فیلتر است و در این خصوص می‌توان به مشخص شدن رسوب‌های بخش مرکزی منطقه مورد بررسی اشاره کرد. در شکل‌های ۲-ی و ک) به منظور مقایسه به ترتیب فیلترهای مشتق قائم مرتبه دوم و فیلتر مشتق افقی کل غیر نرمال نشان داده شده است.

شکل نرمال شده این فیلتر نسبت به مشتق قائم، طبق رابطه زیر به دست می‌آید که با مقایسه با فیلتر زاویه تیلت که در واقع مشتق قائم نرمال شده نسبت به مشتق افقی است، جای صورت و مخرج کسر عوض شده است. این فیلتر با TDX نشان داده می‌شود. در شکل ۱-ح کاربرد این فیلتر روی داده‌های مغناطیسی مدل نشان داده شده است. در مقایسه با شکل ۱-ب که تصویر فیلتر مشتق افقی کل غیر نرمال را نشان می‌دهد، زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس‌شدگی توده، تأثیری بر نتایج این فیلتر ندارد و مرز توده مدل با دقت بیشتری مشخص می‌شود.

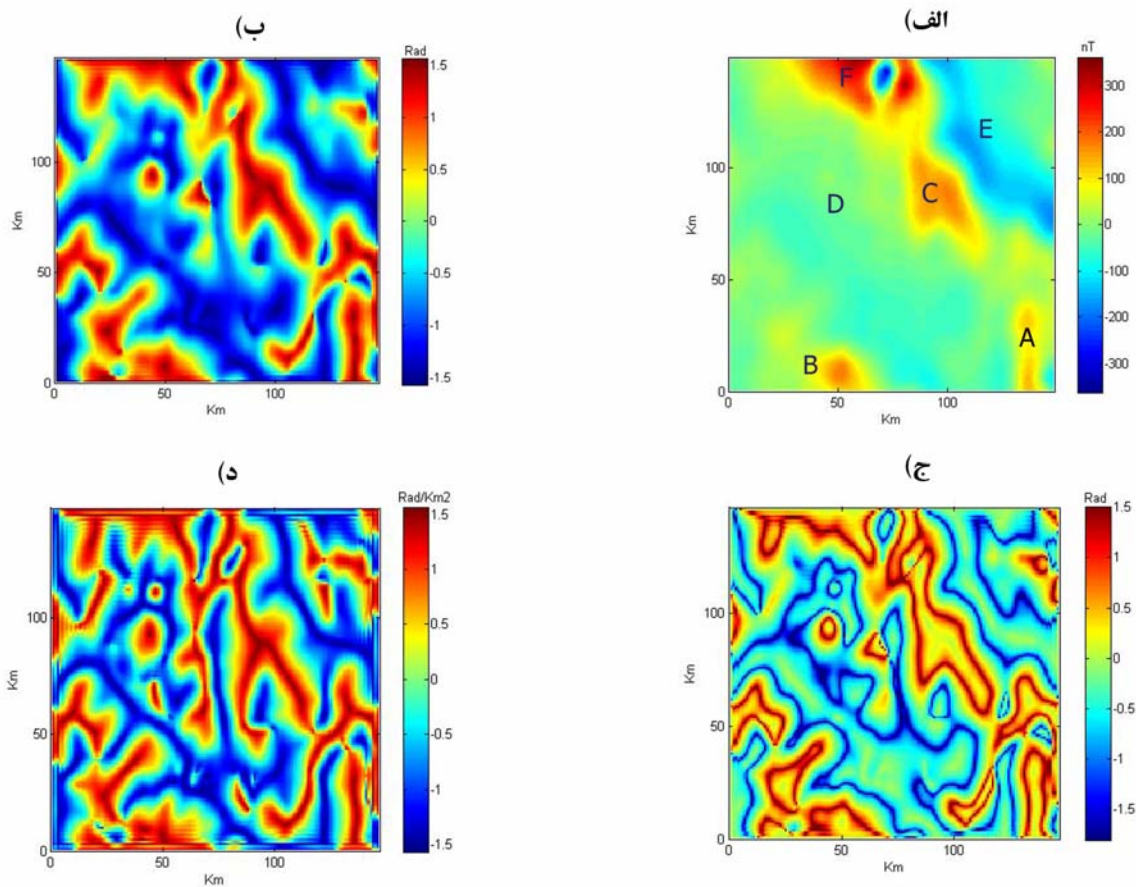
$$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|} \right) \quad (8)$$

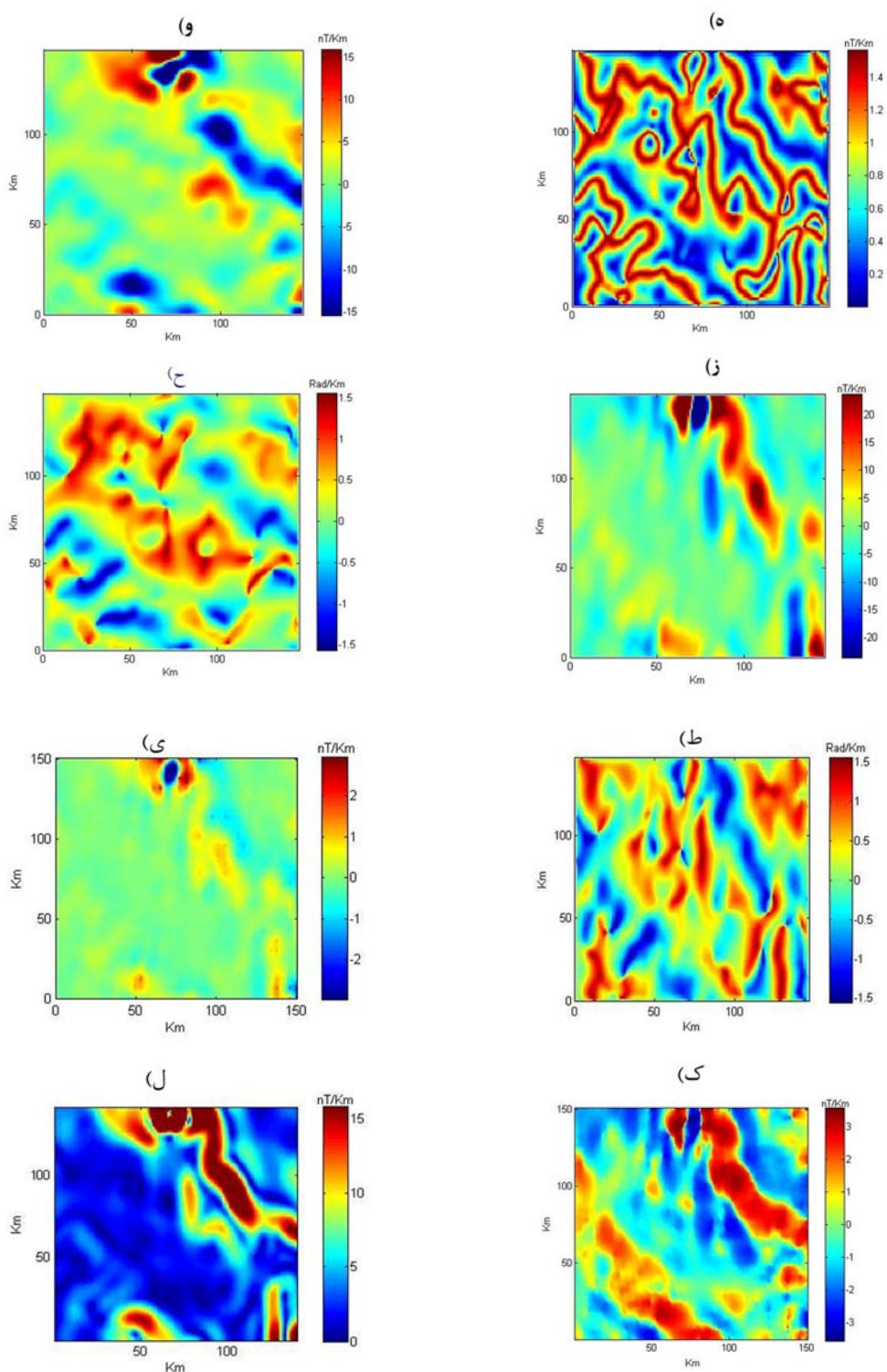
۶ کاربرد روی داده‌های مغناطیس‌هوایی منطقه آباده ساختمان اصلی موجود در چهارگوش آباده، گسل دهشیر با روند شمال غرب - جنوب شرق است که گرانتیت شیرکوه در شمال شرق منطقه را از کفه طاقستان و کفه ابرکوه در بخش‌های جنوبی و مرکزی جدا می‌کند. مساحت منطقه مورد بررسی ۲۰۰۰۰ کیلومتر مربع است که از نظر تقسیمات کشوری، بخش غرب و جنوب غرب آن در استان فارس و بخش شمال و شمال شرق آن در استان یزد قرار گرفته است. عملیات مغناطیس‌سنجی هوایی را سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و با مغناطیس‌سنج بخار سزیم و در ارتفاع ۱۹۵۰ متر به انجام رسانده است. خطوط پیمایش پرواز با فاصله ۷۵ کیلومتر و با زوایای ۴۵ درجه و ۲۲۵ درجه صورت گرفته است. خطوط گره (رابط) با فاصله ۴۰ کیلومتر عمود بر مسیر پیمایش مشخص است.

در شکل ۲ کاربرد فیلترهای فاز پایه روی داده‌های مغناطیس‌هوایی چهارگوش آباده آزمایش شده است. در شکل ۲-الف نقشه هم مقدار مغناطیسی چهارگوش آباده آمده است. در شکل ۲-ب تصویر فیلتر زاویه تیلت داده‌های

ناخواسته حذف شده‌اند. در شکل ۲-ل نقشه فیلتر سیگنال تحلیلی یا گرادیان کامل آمده است در این شکل فقط موقعیت گسل دهشیر و آندزیت‌های در امتداد آن، افیولیت‌های جنوب شرق منطقه و قسمتی از گدازه‌های بازیک جنوب منطقه مشخص شده است. به‌طور کلی مقایسه نتایج حاصل از فیلترهای فاز محلی با فیلترهای مشتق شامل فیلتر مشتق افقی کل غیرنرمال، مشتق قائم و سیگنال تحلیلی نشان می‌دهد که فیلترهای فاز محلی موقعیت و مرز توده‌ها را با دقت و وضوح بیشتری مشخص می‌کنند و در ضمن جزئیات تصویر فیلتر شده آنها نیز حداکثر است. لذا با توجه به کاربرد فیلترهای گوناگون، پاسخ زمین‌شناسی بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه مغناطیس منطقه در شکل ۲-الف را می‌توان مطابق با جدول ۱ دانست.

در شکل ۲-ی موقعیت گسل دهشیر و رخنمون آندزیت‌ها در امتداد آن و رخنمون افیولیت‌ها در جنوب شرق منطقه مشخص شده است. چون فیلترهای مشتق از نوع فیلترهای بالاگذر هستند، همزمان با بی‌هنجاری، نوفه‌ها نیز برجسته می‌شوند که در این مورد بخش‌های مرکزی منطقه مورد بررسی که بی‌هنجاری مغناطیس‌سنجی آنها شدت پایینی دارد، به دلیل پوشیده شدن با نوفه برجسته نشده‌اند. در شکل ۲-ک موقعیت گدازه‌های بازیک در جنوب و جنوب غرب منطقه و موقعیت گسل دهشیر به‌خوبی مشخص شده است اما جزئیات این شکل در مقایسه با شکل ۲-ه که نقشه فیلتر مشتق افقی کل نرمال شده را نشان می‌دهد کمتر است که این به دلیل یکنواخت نبودن توزیع بی‌هنجاری‌ها در سرتاسر نقشه مغناطیس‌سنجی است و بعضی از بی‌هنجاری‌ها به‌طور





شکل ۲. الف) نقشه هم‌مقدار مغناطیسی چهارگوش آباده. ابعاد نقشه 150×150 کیلومتر. ب) تصویر فیلتر زاویه تیلت داده‌های قسمت (الف). ج) تصویر زاویه تیلت هذلولوی داده‌های قسمت (الف). د) تصویر مشتق قائم مرتبه دوم زاویه تیلت. ه) تصویر مشتق افقی کل داده‌های قسمت (الف). و) تصویر مشتق جهتی داده‌های قسمت (الف) در امتداد شمال - جنوب (ساختارهای با امتداد شرقی - غربی برجسته شده‌اند). ز) تصویر مشتق جهتی داده‌های قسمت (الف) در امتداد شرق - غرب (ساختارهای با امتداد شمالی جنوبی برجسته شده‌اند). ح) تصویر فیلتر زاویه تیلت جهتی در امتداد شمال - جنوب. ط) تصویر فیلتر زاویه تیلت جهتی در امتداد شرق - غرب. ی) تصویر فیلتر مشتق قائم مرتبه دوم داده‌های قسمت (الف). ک) تصویر فیلتر مشتق افقی کل غیر نرمال داده‌های قسمت (الف). ل) تصویر فیلتر سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (الف).

جدول ۱. موقعیت بی‌هنجاری‌های موجود در چهارگوش زمین‌شناسی آباده همراه با تفسیر زمین‌شناسی آنها.

تفسیر زمین‌شناسی	موقعیت	بی‌هنجاری مغناطیسی
رخنمون افیولیت‌ها	جنوب شرق منطقه	(High)A
بالا آمدگی پی‌سنگ و گدازه‌های دیاباز	جنوب و جنوب غرب منطقه	(High)B
نفوذ آندزیت‌ها در امتداد گسل دهشیر	شمال شرق منطقه (امتداد گسل دهشیر)	(High)C
وجود رسوبات و همچنین پی‌سنگ عمیق	بخش مرکزی منطقه (کفه طاقستان)	(Low)D
گرانیت نسبتاً غیرمغناطیسی	شمال شرق منطقه (گرانیت شیرکوه)	(Low)E
لیتولوژی متنوع از سنگ‌های آذرین	غرب گسل دهشیر	(High)F

۷ نتیجه‌گیری

نکته قابل توجه این که در نتایج این فیلترها دو شاخه شدن گسل دهشیر- بافت در بخش‌های شرقی منطقه به خوبی مشخص شده است. جهت مقایسه نتایج فیلترهای فاز محلی، کاربرد فیلترهای مشتق افقی، مشتق قائم مرتبه دوم و سیگنال تحلیلی نیز روی داده‌های پیش‌گفته آمده است که از مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که مشکل اساسی فیلتر مشتق قائم افقی و سیگنال تحلیلی نتایج قابل قبولی را به دست می‌دهد. در مجموع در بین فیلترهای فاز محلی، فیلتر مشتق دوم زاویه تیلت، فیلتر زاویه تیلت هذلولوی و فیلتر زاویه تیلت جهتی بیشترین دقت و کمترین وابستگی به نوفه را دارند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه یزد به خاطر فراهم آوردن امکانات مورد نیاز این مقاله و همچنین از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی آباده تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

مشرقی‌فر، م. ر.، علوی، ا.، محجل، م. و دهقانی فیروزآبادی، ج.، ۱۳۸۵، بررسی گسل دهشیر بر روی نقشه مغناطیس

فیلترهای فازپایه نقش مهمی در پردازش تصاویر میدان پتانسیل و برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌های احتمالی موجود در آن دارد. از انواع فیلترهای فازپایه می‌توان به فیلتر زاویه تیلت، فیلتر زاویه تیلت هذلولوی، فیلتر تتا، فیلتر مشتق قائم زاویه تیلت، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت، فیلتر زاویه تیلت جهتی اشاره کرد. یکی از عوامل مهم کاربرد گسترده این فیلترها انعطاف‌پذیری آنها است. فیلتر زاویه تیلت برای منابع عمیق کارایی خود را از دست می‌دهد که با محاسبه مشتق قائم مرتبه دوم از این فیلتر این مشکل برطرف خواهد شد. همچنین می‌توان با محاسبه مشتق افقی کل از زاویه تیلت به دقت زاویه تیلت افزود البته با توجه به ماهیت داده‌ها ممکن است این فیلتر نوفه زیادی تولید کند. می‌توان با محاسبه زاویه تیلت جهتی در امتداد دلخواه، ساختارهای عمود بر این امتداد را برجسته کرد. در این مقاله کاربرد فیلترهای فاز محلی روی داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی چهار گوش آباده ایران به کار رفته و نتایج با فیلترهای گرادیان افقی و گرادیان قائم و سیگنال تحلیلی مقایسه شده است.

در نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی چهارگوش آباده، پدیده زمین‌شناسی مهم گسل دهشیر- بافت در شمال غرب منطقه و رخنمون افیولیت‌ها و مواد آتشفشانی است که با کاربرد فیلترهای فاز محلی این ساختارها به خوبی برجسته شده‌اند.

آباده. بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.

- Cooper, G.R.J., 2006, Enhancement potential field data using local phase filters. *Comput. Geosci.*, **29**(8), 941 –948.
- Cowan, D.R and Cooper, G.R.J., 2005a, Separation filtering using fractional order derivatives. *Exp. Geophys* **36**(4), 393 - 396.
- Cowan, D.R. and Cooper, G.R.J., 2005b, Enhancement of magnetic signatures of impact structure . In: Kenkmann, T.,Horze, F., Deutsch, A. The Geological society of America, Special Paper 348,pp 51- 66.
- Gibson, R.L. & Reimold, W.U., 2001, The Vredefort Impact Structure. Council for Geoscience.
- Miller, H.G. and Singh , V., 1994, Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *J. Appl. Geophys.*, **32**, 213- 217.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D, and Green, C.M., 2004, New insights in to magnetic derivatives for structural mapping. *Lead Edg* **23**(2), 116 – 119.
- Wijns, C., Perez, C. And Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, **70** (4), 39 – 43.