

تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از مشتق افقی متعادل و

مشتق کل افقی مرتبه دوم نرمال‌سازی شده

مصطفی موسی‌پور^۱ و صفا خزائی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، مرکز تحقیقات عمران و سازندگی، دانشگاه جامع امام حسین^ع، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۷/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

روش‌های متعدد عرضه شده برای افزایش توان تفکیک لبه‌ها، اکثراً مبتنی بر مشتقات افقی یا عمودی میدان پتانسیل هستند. فیلتری مانند مشتق کل افقی (THD) در تعیین لبه منابع عمیق کارایی کمتری دارد و یا فیلترهایی مانند TDX و Theta حساسیت کمتری به عمق بی‌هنجاری و همچنین دقت بیشتری در تشخیص لبه‌ها، نسبت به فیلتر THD دارند. در این تحقیق، روش مشتق افقی متعادل (BHD) و مشتق کل افقی مرتبه دوم به صورت نرمال‌سازی شده (TDX₂) برای تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل به کار رفته است. همچنین، روی داده‌های یک مدل مصنوعی بدون نوفه، کارایی فیلترهای مورد استفاده بررسی شده و سپس روی داده‌های مدل با نوفه اتفاقی ۲٪ مقایسه بین فیلترها صورت گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مختصات افقی لبه به دست آمده از فیلترهای BHD و TDX₂، در مقایسه با فیلترهای TDX و Theta، به مختصات لبه مدل نزدیک‌تر است. همچنین، فیلترهای BHD و TDX₂ لبه بی‌هنجاری‌های حاصل از تداخل جسم‌های مجزا با دامنه‌های متفاوت را از دیگر فیلترها بهتر تفکیک می‌کنند. همچنین در این تحقیق، فیلترهای پیش‌گفته روی داده‌های گرانی قنات موسسه ژئوفیزیک به کار برده شده است. براساس نتایج حاصل، فیلترهای TDX₂ و BHD با تفکیک لبه‌های بی‌هنجاری قنات و سایر بی‌هنجاری‌های موجود، روند کلی قنات را به خوبی نشان می‌دهند. لبه به دست آمده از این فیلترها حدوداً ۱/۲۷ متر است، در حالی که این لبه برای فیلترهای TDX و Theta، ۲/۷ متر است که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه احتمال وجود قناتی با این عرض بعید است.

واژه‌های کلیدی: فیلتر مشتق افقی متعادل، تعیین لبه، فیلتر مشتق کل افقی مرتبه دوم نرمال‌سازی شده، میدان پتانسیل.

۱. مقدمه

و همکاران (۲۰۰۵) فیلتر زاویه تا (Theta angle) را معرفی کرده‌اند. کوپر و کوان (۲۰۰۶) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده (TDX) را عرضه کرده‌اند. این دو فیلتر می‌توانند لبه بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی را هم‌زمان محاسبه کنند. افراد دیگری نیز فیلترهای تعیین لبه متعادل را که می‌توانند لبه چشمه عمیق و سطحی را هم‌زمان محاسبه کنند، عرضه کرده‌اند (راجاگوپلان و میلیگان، ۱۹۹۵؛ وردوزکو و همکاران، ۲۰۰۴؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۸؛ ما و لی، ۲۰۱۲؛ ما، ۲۰۱۳a,b).

فیلترهای متداول فاز محلی THD، Theta و TDX هستند. همه فیلترها براساس مشتق افقی و قائم، مختصات لبه بی‌هنجاری را تعیین می‌کنند (بلکلی، ۱۹۹۵؛ کوردل و گروچ، ۱۹۸۵؛ روست و همکاران، ۱۹۹۲؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۶؛ فدی و فلوریو، ۲۰۰۱). در این فیلترها،

تعیین لبه، یک کار مشترک در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است. فیلترهایی که امروزه به طور گسترده در تشخیص لبه داده‌های میدان پتانسیل از آنها استفاده می‌شود، فیلترهای فاز محلی هستند. از مهم‌ترین مزایای این فیلترها، انعطاف‌پذیری آنها است. با تغییر جزئی در رابطه مربوط به یک فیلتر و در واقع نرمال‌سازی آنها می‌توان فیلترهای جدیدی حتی با کارایی بیشتر تولید کرد (علمدار و انصاری، ۱۳۸۹). فیلترهای فاز محلی گوناگونی برای تشخیص مرز بی‌هنجاری‌ها معرفی شده‌اند. میلر و سینگ (۱۹۹۴) فیلتر زاویه تیل (Tilt angle) را معرفی کرده‌اند. نتایج حاصل از این فیلتر برای بی‌هنجاری عمیق، کمتر قابل ملاحظه است. کوپر و کوان (۲۰۰۶) فیلتر مشتق کل افقی (THD) را معرفی کرده‌اند که در تعیین مرز بی‌هنجاری عمیق ناکارآمد است. ویجنز

$$THD = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

در این رابطه f معرف داده‌های میدان پتانسیل است. بیشینه مقدار این فیلتر روی لبه‌های بی‌هنجاری قرار می‌گیرد. در مواردی که توزیع بی‌هنجاری‌ها در سرتاسر نقشه یکسان نیست، به عبارت دیگر؛ هنگامی که دامنه تغییرات شدت بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه زیاد است، اعمال این فیلتر باعث حذف ناخواسته بی‌هنجاری‌های دارای شدت متوسط و یا کم خواهد شد (علمدار و انصاری ۱۳۸۹). شکل نرمال شده این فیلتر، TDX است، که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

۲.۲. فیلتر زاویه تیل

میلر و سینگ (۱۹۹۴) فیلتر زاویه تیل را معرفی کردند که نسبت مشتق قائم به مشتق کل افقی (THD) بود، این فیلتر می‌تواند تعادل موثری بین دامنه بی‌هنجاری تولید شده با چشمه در عمق‌های متفاوت ایجاد کند.

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

که در این رابطه f داده‌های میدان پتانسیل است. این زاویه در بالای چشمه گرانی، مثبت است و در نزدیکی لبه چشمه به صفر نزدیک می‌شود. در این فیلتر مقدار مشتق قائم با اندازه مشتق افقی، نرمال شده است. عرض محاسبه شده با این فیلتر همواره کمتر و یا مساوی عرض واقعی است (ابراهیم‌زاده اردستانی و متولی عنبران، ۱۳۸۶). نتایج این فیلتر برای مدل‌های عمیق‌تر کمتر قابل ملاحظه است.

۲.۳. فیلتر زاویه تتا

وینجز و همکاران (۲۰۰۵) بردار یکه‌ای را در راستای افقی سیگنال تحلیلی در نظر گرفتند و زاویه بین این بردار یکه و سیگنال تحلیلی را به منزله یک مشخص‌کننده مرزها و لبه‌ها معرفی کردند.

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

لبه بی‌هنجاری، با صفر گرادیان قائم و بیشینه گرادیان‌های افقی در ارتباط است (اون، ۱۹۳۶؛ هود و تسکد، ۱۹۸۹؛ کوردل، ۱۹۷۹).

اثبات می‌شود که مختصات افقی به دست آمده از بیشینه مشتق کل افقی و صفر مشتق قائم، بزرگ‌تر از مختصات واقعی لبه‌ها است؛ و همچنین مختصات افقی به دست آمده از بیشینه مشتق کل افقی به واقعیت نزدیک‌تر است. در این تحقیق روشن خواهیم ساخت که نسبت مشتق کل افقی به مشتق مرتبه دوم قائم می‌تواند تعیین لبه دقیق‌تری به دست دهد.

در این تحقیق، روش مشتق افقی متعادل (BHD) و مشتق کل افقی مرتبه دوم به صورت نرمال‌سازی شده (TDX₂) برای تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل به کار می‌رود. در فیلتر BHD از نسبت مشتق افقی مرتبه اول به مشتق افقی مرتبه دوم و در فیلتر TDX₂ از نسبت مشتق افقی کل مرتبه اول قائم به مشتق مرتبه دوم قائم استفاده می‌شود. این فیلترها در لبه بی‌هنجاری‌ها، بیشینه مقدار را دارند. مشکل استفاده از مشتق مرتبه دوم قائم، برجسته شدن نوفه‌ها است. با کمک معادله لاپلاس و جمع مشتق‌های دوم افقی، مشتق دوم قائم را حساب می‌کنیم. این روش محاسبه مشتق دوم قائم به طور چشمگیری از افزایش نوفه جلوگیری می‌کند (ما و همکاران، ۲۰۱۴). در این تحقیق برای بررسی قابلیت فیلترهای BHD و TDX₂، نتایج حاصل از این فیلترها با THD، TDX و Theta، روی داده‌های مصنوعی و داده‌های میکروگروایتی قنات موسسه ژئوفیزیک، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در ادامه فیلترهای متداول فاز محلی و فیلترهای جدید تشریح شده است و ارزیابی فیلترها روی داده‌های مصنوعی و داده‌های واقعی عرضه خواهد شد.

۲. فیلترهای تعیین لبه

۲.۱. فیلتر مشتق افقی کل

کوپر و کوان (۲۰۰۶) مشتق کل افقی را به صورت رابطه (۱) تعریف کرده‌اند:

مشتق افقی از منشور قائم دُوبعدی را نیز می‌توان به‌صورت رابطه (۷) نوشت (ما و همکاران، ۲۰۱۴):

$$V_{zx} = G\rho \ln \frac{[(x+a)^2+H^2][(x-a)^2+h^2]}{[(x+a)^2+h^2][(x-a)^2+H^2]} \quad (7)$$

لبه‌ای که از فیلترها به دست می‌آید با مقدار بیشینه مشتق افقی در ارتباط است. مقدار بیشینه مشتق افقی برابر است با:

$$x_m = \pm \sqrt{\frac{1}{6} \left\{ \sqrt{[4a^2 + (h^2 + H^2)]^2 + 12h^2H^2} + 2a^2 - (h^2 + H^2) \right\}} \quad (8)$$

ما و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که رابطه بین مختصات لبه محاسباتی از بیشینه مشتق افقی و صفر مشتق قائم به‌صورت رابطه (۹) است:

$$|x_1| > |x_m| > a \quad (9)$$

مختصات به دست آمده از بیشینه مشتق افقی (x_m) بزرگ‌تر از مختصات واقعی لبه، اما کوچک‌تر از مختصات به دست آمده از صفر مشتق اول قائم (x_1) است. مشتق مرتبه دوم قائم برای منشور قائم دُوبعدی به‌صورت رابطه (۱۰) است:

$$V_{zzz} = 2G\rho \left[\frac{x+a}{(x+a)^2+h^2} - \frac{x+a}{(x+a)^2+H^2} - \frac{x-a}{(x-a)^2+h^2} + \frac{x-a}{(x-a)^2+H^2} \right] \quad (10)$$

مختصات لبه به کمک صفر مشتق دوم قائم (x_2) برابر است با:

$$x_2 = \pm \sqrt{\frac{1}{6} \left\{ \sqrt{[4a^2 + (h^2 + H^2)]^2 + 12h^2H^2} + 2a^2 - (h^2 + H^2) \right\}} \quad (11)$$

مختصاتی که از صفر مشتق دوم قائم به دست می‌آید، همان مختصاتی است که از بیشینه مشتق کل افقی به دست می‌آید ($x_2 = x_m$). بنابراین اگر به جای استفاده از مشتق مرتبه اول قائم از مشتق مرتبه دوم قائم در فیلترها استفاده شود، مختصاتی که از این راه به دست می‌آید می‌تواند به مختصات لبه بی‌هنجاری نزدیک‌تر باشد. ما و همکاران (۲۰۱۴) فیلتر مشتق افقی متعادل را به‌صورت رابطه (۱۲) تعریف کرده‌اند:

$$BHD = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{k \times \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)} \right) \quad (12)$$

در رابطه (۳)، صورت کسر بیانگر مشتق کل افقی و مخرج کسر معادل سیگنال تحلیلی (گرادیان کامل) است. در این فیلتر مقدار مشتق کل افقی با اندازه سیگنال تحلیلی نرمال شده است. دقت تشخیص لبه با استفاده از این روش از فیلتر زاویه تیلت و مشتق کل افقی بیشتر است. حساسیت این روش به عمق بی‌هنجاری نسبت به دو روش قبلی کمتر است (نجاتی کلاته و روشندل کاهو، ۱۳۹۲).

۴.۲. فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده (TDX)

کوپر و کوان (۲۰۰۶) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده را به‌صورت رابطه (۴) معرفی کردند:

$$TDX = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|} \right) \quad (4)$$

این فیلتر در واقع شکل نرمال شده THD است که در مقایسه با فیلتر زاویه تیلت، جای صورت و مخرج کسر عوض شده است. مقدار بیشینه TDX، لبه بی‌هنجاری زیرسطحی را می‌دهد. این فیلتر مانند Theta عمل می‌کند. در ادامه نشان خواهیم داد که مشخصات لبه به دست آمده از این فیلتر از مشخصات واقعی لبه بزرگ‌تر است.

۵.۲. فیلتر مشتق افقی متعادل (BHD)

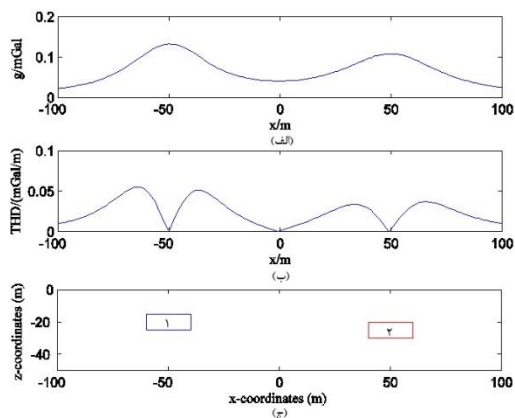
از منشور درحکم مدلی رایج در تفسیر داده‌های واقعی استفاده می‌شود. مشتق مرتبه اول قائم برای منشور قائم دُوبعدی را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) نوشت (بلکلی، ۱۹۹۵؛ ما و همکاران، ۲۰۱۴):

$$V_{zz} = 2G\rho \left(\tan^{-1} \frac{H}{x+a} - \tan^{-1} \frac{h}{x+a} - \tan^{-1} \frac{H}{x-a} + \tan^{-1} \frac{h}{x-a} \right) \quad (5)$$

که در آن، G ثابت جهانی گرانش، ρ تباین چگالی منشور، $2a$ عرض منشور، h و H به ترتیب عمق بالا و پایین منشور هستند. با توجه به اینکه لبه به دست آمده از فیلترها با صفر مشتق قائم در ارتباط است، لذا با مساوی صفر قرار دادن رابطه (۵)، مختصات لبه به دست آمده از صفر مشتق اول قائم (x_1)، برابر خواهد شد با:

$$x_1 = \pm \sqrt{a^2 + Hh} \quad (6)$$

ابعاد ۲۰ در ۱۰ متر و چگالی ۱ گرم بر سانتی متر مکعب که در فاصله ۸۰ متری از یکدیگر قرار دارند، برای تولید اثر گرانی در راستای یک نیم‌رخ به طول ۲۰۰ متر و فاصله نمونه برداری ۱ متر، استفاده شده است. شکل ۱-ج، شکل ۲-ج و شکل ۳-ج مختصات مدل را نشان می‌دهد. اثر گرانی مدل مصنوعی تولید شده با این مدل در شکل ۱-الف نشان داده شده است. شکل ۱-ب مشتق کل افقی داده‌های شکل ۱-الف را نشان می‌دهد که در تشخیص دقیق لبه‌های بی‌هنجاری ناتوان است. شکل ۲-الف و شکل ۲-ب به ترتیب نتایج فیلتر Theta و TDX را روی شکل ۱-الف نشان می‌دهد. این فیلترها در تشخیص مرز بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی کارایی بهتری نسبت به فیلتر مشتق کل افقی دارند، اما لبه تشخیص داده شده با این فیلترها از لبه واقعی بزرگ‌تر است. شکل ۳-الف از فیلتر BHD روی شکل ۱-الف به دست آمده است. مختصات لبه به دست آمده از مختصات واقعی لبه بزرگ‌تر است اما در مقایسه با TDX و Theta به مختصات لبه مدل نزدیک‌تر است.



شکل ۱. (الف) اثر گرانی دو مکعب در عمق ۱۵ و ۲۰ متر، (ب) مشتق کل افقی قسمت (الف) که در تعیین مرز بی‌هنجاری عملکرد ضعیفی دارد و (ج) مختصات مدل

که در آن، $\frac{\partial f}{\partial x}$ ، $\frac{\partial f}{\partial y}$ و $\frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$ مشتق داده‌های میدان پتانسیل f و $K = \frac{\text{mean}(\frac{\partial f}{\partial z})}{\text{mean}(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2})}$ مقدار متوسط تابع داخل پراکنش است. مقدار بیشینه BHD لبه چشمه را به دست می‌دهد. این فیلتر برای نرمال کردن مشتق کل افقی، از مشتق دوم قائم استفاده می‌کند. در فیلتر TDX از مشتق مرتبه اول قائم برای نرمال کردن مشتق کل افقی استفاده شده است. در نتیجه طبق رابطه (۱۱)، لبه به دست آمده از BHD در مقایسه با TDX، باید به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

برای کاهش اثرات نوفه از معادله لاپلاس (بلکلی، ۱۹۹۵) برای محاسبه مشتق دوم قائم استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

۲.۶. فیلتر مشتق کل افقی مرتبه دوم نرمال‌سازی شده مشتق دوم قائم با اهمیت دادن به منسایهای کم عمق کمک می‌کند تا لبه‌های بی‌هنجاری گرانی را تعیین کنیم (بلکلی، ۱۹۹۵). ما و همکاران (۲۰۱۴) مشتق کل افقی مرتبه دوم نرمال‌سازی شده را به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌کنند:

$$TDX_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial^2 f}{\partial z^2}\right|} \right) \quad (14)$$

که در آن، f_z مشتق مرتبه اول قائم داده‌های میدان پتانسیل f است. مقدار بیشینه TDX_2 لبه چشمه بی‌هنجاری را به دست می‌دهد.

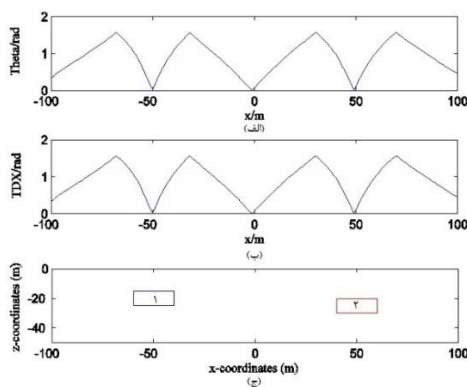
۳. ارزیابی فیلترها روی داده‌های مصنوعی

در این تحقیق داده‌های مصنوعی دوبعدی با استفاده از فرمول ریاضی تالوانی (گرکنز، ۱۹۸۹) تولید شده است. در این بررسی از دو منشور با عمق بالای ۱۵ و ۲۰ متر به

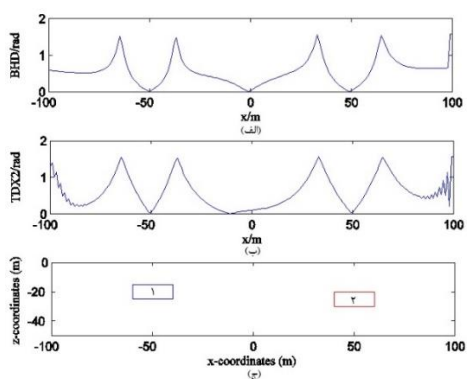
جدول ۱. مشخصات مدل مورد استفاده برای شکل‌های ۱ تا ۴

شماره	عرض (متر)	عمق بالا (متر)	عمق پایین (متر)	چگالی (g/cm^3)
۱	۲۰	۱۵	۲۵	۱
۲	۲۰	۲۰	۳۰	۱

تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با...



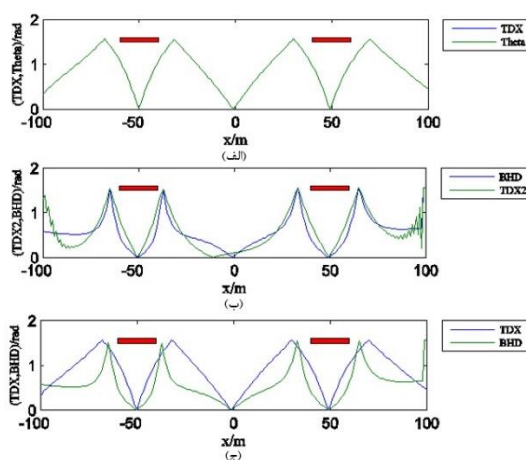
شکل ۲. الف) نقشه TDX روی شکل ۱-الف، ب) نقشه Theta روی شکل ۱-الف و ج) مختصات مدل



شکل ۳. الف) نقشه BHD روی شکل ۱-الف، ب) نقشه TDX2 روی شکل ۱-الف و ج) مختصات مدل

نشان می‌دهد این دو فیلتر کاملاً شبیه به هم عمل کرده‌اند. شکل ۴-ب مقایسه بین BHD و TDX2 است. این دو فیلتر مختصات لبه برابری را می‌دهند. شکل ۴-ج مقایسه بین TDX و BHD است. لبه تشخیص داده شده با BHD در مقایسه با TDX به مختصات لبه مدل نزدیک‌تر است.

شکل ۳-ب فیلتر TDX2 را روی شکل ۱-الف نشان می‌دهد، این فیلتر برای بی‌هنجاری عمیق و سطحی کارکرد خوبی دارد و لبه تشخیص داده شده با آن در مقایسه با TDX و Theta به لبه مدل نزدیک‌تر است. در شکل ۴-الف مقایسه بین فیلتر Theta و TDX است که



شکل ۴. مقایسه بین فیلترهای گوناگون، الف) مقایسه بین TDX و Theta که این دو فیلتر کاملاً شبیه به هم عمل می‌کنند. ب) مقایسه بین فیلترهای BHD و TDX2، این دو فیلتر مختصات لبه برابری می‌دهند. ج) مقایسه بین TDX و BHD که اختلاف این دو فیلتر را در تعیین لبه نشان می‌دهد، لبه تشخیص داده شده با BHD در مقایسه با TDX به مختصات لبه مدل نزدیک‌تر است. مکعب نشان داده شده در تصویر، تفاوت بین لبه تشخیص داده شده با فیلترها را با لبه واقعی نمایش می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه بین تعیین لیه‌های به‌دست آمده از فیلترهای TDX، Theta، BHD و TDX2 برای یک منشور دو بُعدی به ابعاد ثابت ۵۰ متر، با عمق بالایی ۱ تا ۳۰ متر، چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و محاسبه درصد خطا برای TDX و BHD.

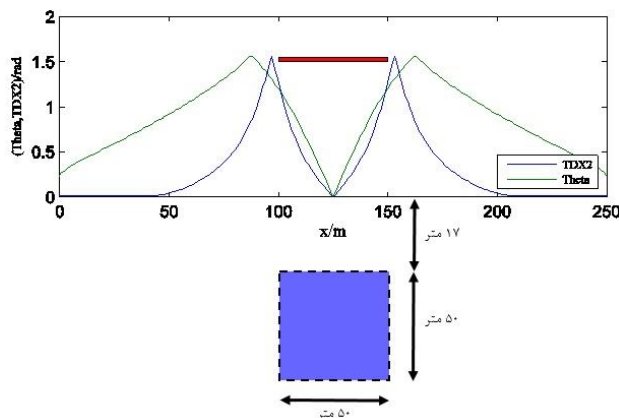
عمق بالایی (متر)	عرض مدل (متر)	نسبت عمق به عرض	عرض محاسبه‌ای از TDX	عرض محاسبه‌ای از Theta	عرض محاسبه‌ای از TDX ₂	عرض محاسبه‌ای از BHD	درصد خطا برای TDX	درصد خطا برای BHD
۱	۵۰	۰/۰۲	۵۲	۵۲	۵۰	۵۰	۴	۰
۲	۵۰	۰/۰۴	۵۳	۵۳	۵۰	۵۰	۶	۰
۳	۵۰	۰/۰۶	۵۳	۵۳	۵۰	۵۰	۶	۰
۴	۵۰	۰/۰۸	۵۶	۵۶	۵۰	۵۰	۱۲	۰
۵	۵۰	۰/۱۰	۵۸	۵۸	۵۰	۵۰	۱۶	۰
۶	۵۰	۰/۱۲	۶۰	۶۰	۵۰	۵۰	۲۰	۰
۷	۵۰	۰/۱۴	۶۰	۶۰	۵۲	۵۲	۲۰	۴
۸	۵۰	۰/۱۶	۶۲	۶۲	۵۲	۵۲	۲۴	۴
۹	۵۰	۰/۱۸	۶۴	۶۴	۵۲	۵۲	۲۸	۴
۱۰	۵۰	۰/۲۰	۶۶	۶۶	۵۲	۵۲	۳۲	۴
۱۱	۵۰	۰/۲۲	۶۸	۶۸	۵۲	۵۲	۳۶	۴
۱۲	۵۰	۰/۲۴	۶۸	۶۸	۵۴	۵۴	۳۶	۸
۱۳	۵۰	۰/۲۶	۷۰	۷۰	۵۴	۵۴	۴۰	۸
۱۴	۵۰	۰/۲۸	۷۰	۷۰	۵۴	۵۴	۴۰	۸
۱۵	۵۰	۰/۳۰	۷۲	۷۲	۵۴	۵۴	۴۴	۸
۱۶	۵۰	۰/۳۲	۷۴	۷۴	۵۶	۵۶	۴۸	۱۲
۱۷	۵۰	۰/۳۴	۷۴	۷۴	۵۶	۵۶	۴۸	۱۲
۱۸	۵۰	۰/۳۶	۷۶	۷۶	۵۸	۵۸	۵۲	۱۶
۱۹	۵۰	۰/۳۸	۷۸	۷۸	۵۸	۵۸	۵۶	۱۶
۲۰	۵۰	۰/۴۰	۷۸	۷۸	۵۸	۵۸	۵۶	۱۶
۲۱	۵۰	۰/۴۲	۸۰	۸۰	۶۰	۶۰	۶۰	۲۰
۲۲	۵۰	۰/۴۴	۸۰	۸۰	۶۰	۶۰	۶۰	۲۰
۲۳	۵۰	۰/۴۶	۸۲	۸۲	۶۰	۶۰	۶۴	۲۰
۲۴	۵۰	۰/۴۸	۸۴	۸۴	۶۲	۶۲	۶۸	۲۴
۲۵	۵۰	۰/۵۰	۸۴	۸۴	۶۲	۶۲	۶۸	۲۴
۲۶	۵۰	۰/۵۲	۸۶	۸۶	۶۴	۶۴	۷۲	۲۸
۲۷	۵۰	۰/۵۴	۸۸	۸۸	۶۴	۶۴	۷۶	۲۸
۲۸	۵۰	۰/۵۶	۹۰	۹۰	۶۶	۶۶	۸۰	۳۲
۲۹	۵۰	۰/۵۸	۹۰	۹۰	۶۶	۶۶	۸۰	۳۲
۳۰	۵۰	۰/۶۰	۹۲	۹۲	۶۸	۶۸	۸۴	۳۶

در صورتی که عرض محاسباتی TDX تا عمق ۶ متر درصد خطایی صعودی از ۴ تا ۲۰ درصد دارد. از عمق ۷ متر به بعد عرض بی‌هنجاری محاسباتی از روش BHD به تدریج بزرگ‌تر از مقدار واقعی است و در عمق حدود ۱۷ متر مقدار خطا به حدود ۱۲ درصد می‌رسد که در مقایسه با همین عمق (از عمق ۷ تا ۱۲ متر) درصد خطای محاسباتی از روش TDX در روندی افزایشی از ۲۰ به ۴۸ می‌رسد. این روند افزایشی مقدار خطا ادامه می‌یابد. نرخ افزایش نیز تقریباً خطی است. در عمق ۳۰ متر عرض بی‌هنجاری محاسباتی از روش BHD خطای ۳۶ درصدی دارد در حالی که درصد خطای ۳۶ برای فیلتر TDX، در عمق ۱۱ متر بوده است و خطای محاسبه شده برای آن در عمق ۳۰ متر، به ۸۴ درصد می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق بی‌هنجاری، دقت در تعیین لبه‌های بی‌هنجاری که از محل قله‌ها حاصل می‌شود، برای هر دو فیلتر کم شده است اما درصد خطای محاسباتی نشان می‌دهد که فیلتر BHD در تعیین لبه، به مراتب دقت بیشتری از فیلتر TDX دارد.

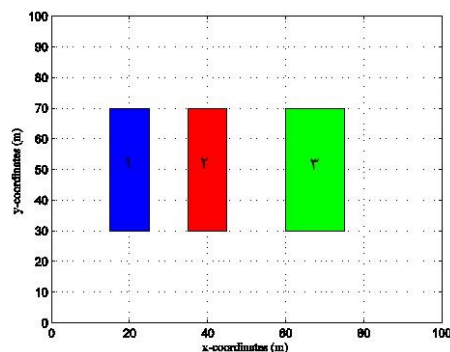
در جدول ۳ مقایسه بین تعیین لبه‌های به دست آمده از فیلترهای TDX، Theta، BHD و TDX₂ برای یک منشور دُو بُعدی به ابعاد ۵۰ متر با عمق بالایی ۱ تا ۳۰ متر و چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب صورت گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ستون اول مربوط به عمق بالای مدل، ستون دوم مقدار عرض واقعی مدل که به طور ثابت ۵۰ متر در نظر گرفته شده است، ستون سوم نسبت عمق به عرض واقعی مدل، ستون چهارم مربوط به عرض محاسباتی از روش TDX، ستون پنجم عرض محاسباتی از روش Theta، ستون ششم عرض محاسباتی از روش TDX₂، ستون هفتم عرض محاسباتی از روش BHD، درصد خطای مقدار محاسبه شده از روش TDX با مقدار واقعی در ستون هشتم و در نهایت در ستون نهم درصد خطای مقدار محاسبه شده از روش BHD با مقدار واقعی، قرار داده شده است. فیلترهای TDX، Theta و فیلترهای BHD، TDX₂ نتایج کاملاً مشابهی نشان می‌دهند. با نگاهی به جدول، مشاهده می‌شود که تا عمق ۶ متر عرض محاسبه شده از BHD، همان ۵۰ متر مدل است؛

جدول ۴. مشخصات مدل مصنوعی سوم

شماره	عرض (متر)	طول (متر)	عمق بالا (متر)	عمق پایین (متر)	چگالی (g/cm ³)
۱	۱۰	۴۰	۳	۱۳	۱
۲	۱۰	۴۰	۷	۱۷	۱/۲
۳	۱۵	۴۰	۱۲	۲۷	۱/۵



شکل ۵. مقایسه بین فیلتر Theta و TDX₂ برای مدل منشور در عمق ۱۷ متر، درصد خطای TDX₂ با مقدار واقعی حدوداً ۱۲ است. مقدار خطای برآوردی با مقدار واقعی از روش Theta، ۴۸ درصد است. برای بهتر نمایش دادن میزان تفاوت بین لبه برآورد شده با فیلترها و مقدار واقعی لبه، مکعب کوچکی در تصویر رسم شده است.



شکل ۶. مختصات مدل مصنوعی سوم

لبه واقعی نزدیک شده است اما برای بی‌هنجاری عمیق‌تر لبه تشخیص داده شده از لبه واقعی بزرگ‌تر است. علاوه بر آن، این فیلتر در تفکیک مرز بی‌هنجاری‌های عمیق ناکارآمد بوده است. شکل ۷-د فیلتر TD_X را برای شکل ۷-الف به نمایش می‌گذارد. این فیلتر مانند Theta عمل کرده است با این فرق که لبه تشخیص داده شده با این فیلتر تیزتر است. شکل ۷-ه اعمال فیلتر BHD روی شکل ۷-الف است. لبه‌های تشخیص داده شده با این فیلتر برای بی‌هنجاری سطحی، منطبق بر مرز واقعی لبه است. برای مکعب نیمه عمیق، این فیلتر با قدرت تفکیک زیاد مرز بی‌هنجاری را به‌طور مجزا نشان داده و لبه تقریباً منطقی بر لبه واقعی به‌دست آورده است. برای بی‌هنجاری عمیق، لبه تشخیص داده شده کمی از واقعیت دور شده است اما خطای تعیین لبه در این روش بسیار کمتر از Theta و TD_X است. شکل ۷-و عملکرد فیلتر TD_{X2} را روی شکل ۷-الف نشان می‌دهد. عملکرد این فیلتر مانند BHD است. در ادامه داده‌های گرانی را با نوفه ۲٪ تصادفی آلوده کرده‌ایم. برای این کار، به کمک نرم‌افزار مت‌کب عددهای تصادفی مثبت و منفی را در یک بازه تولید می‌کنیم (با استفاده از دستور randn) و این بازه را به بازه نوفه مورد نظر (در اینجا ۲ درصد) منتقل و سپس نوفه را به سیگنال اضافه می‌کنیم. مقایسه فیلترها، با داده‌های آلوده به نوفه در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸-الف اثر گرانی ناشی از مدل مصنوعی با مختصات جدول ۴ را که با نوفه آلوده شده است نشان می‌دهد. شکل ۸-ب و شکل ۸-ج به ترتیب از اعمال فیلتر Theta و TD_X روی شکل ۸-الف به‌دست

برای بهتر نشان دادن کارایی فیلترهای BHD و TD_{X2} و مقایسه این دو فیلتر با فیلترهای دیگری که در متن آمده است، اثر گرانی سه منشور را که به صورت مکعب مستطیل هستند با رابطه ریاضی پلوف (رابطه ۱۵) (گرکنز، ۱۹۸۹) تولید کرده‌ایم:

$$g = G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[Z_k \arctan \frac{x_i y_j}{Z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (15)$$

که در آن،

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + Z_k^2} \quad (16)$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k}$$

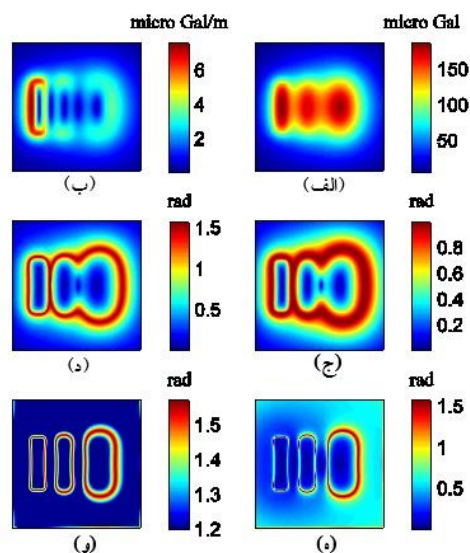
و ρ تباین چگالی بلوک با چگالی محیط در بر گیرنده آن، G ثابت جهانی گرانش و x_1 ، x_2 ، y_1 ، y_2 و Z_1 ، Z_2 محدوده بلوک است.

مکعب‌ها به عمق بالایی ۳، ۷ و ۱۲ متر، عرض ۱۰، ۱۰ و ۱۵ متر و چگالی ۱، ۱/۲ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به ترتیب در فاصله‌های ۱۰ و ۱۵ متر از یکدیگر قرار دارند. مختصات به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که بی‌هنجاری حاصل از تداخل سه جسم مجزا با دامنه‌های متفاوت تشکیل شده باشد. کارایی این فیلترها ابتدا روی داده‌های گرانی بدون نوفه، مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۷ مربوط به این مقایسه است. شکل ۷-الف اثر گرانی مصنوعی تولید شده را نشان می‌دهد. شکل ۷-ب مشتق کل افقی از شکل ۷-الف است که در تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌های سطحی و عمیق ناتوان است. شکل ۷-ج فیلتر Theta را برای شکل ۷-الف نشان می‌دهد. لبه تشخیص داده شده با این فیلتر برای بی‌هنجاری سطحی به

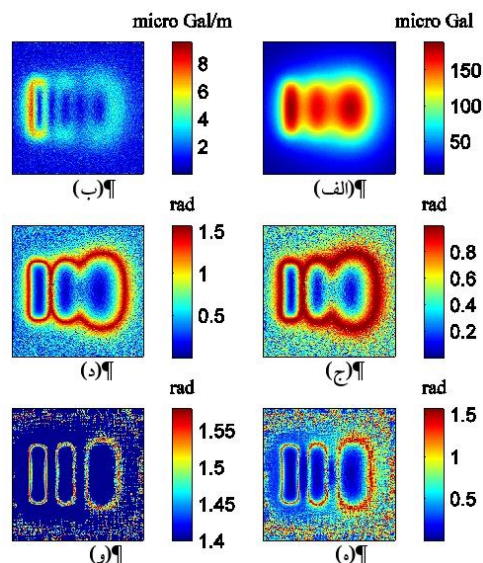
۴. ارزیابی فیلترها روی داده‌های واقعی

داده‌های واقعی مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های برداشت شده در امتداد یک نیم‌رخ است که به‌طور عمود بر امتداد یک قنات واقع در محوطه موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران واقع است. شکل ۹-الف نقشه گرانی باقی‌مانده بی‌هنجاری بوگه قنات است. شکل ۹-ب مشتق کل افقی (THD) روی گرانی باقی‌مانده قنات است. که در تعیین لبه قنات ناتوان است. شکل ۹-ج و شکل ۹-د نقشه Theta و TDX روی شکل ۹-الف است. نتایج این دو نقشه مانند هم است. این فیلترها برای چگالی مثبت و منفی، لبه را به‌صورت بیشینه نشان می‌دهند. پیچ‌خوردگی لبه قنات در این تصویرها ناشی از تداخل لبه بی‌هنجاری قنات و لبه بی‌هنجاری‌های دیگر موجود در نزدیکی قنات است. عرض قنات (در جایی که لبه قنات پیچ‌خورده نیست) با این فیلترها، ۲/۷ متر برآورد شده است. شکل ۹-ه و شکل ۹-و به ترتیب نقشه BHD و TDX₂ روی شکل ۹-الف است. لبه به‌دست آمده از این فیلترها حدود ۱/۲۷ متر است. هدف، پیدا کردن لبه قنات است که به لبه واقعی قنات نزدیک‌تر باشد و علاوه بر آن بتوان تفکیک بهتری از لبه به‌دست آورد. به علت اینکه داده برداشت شده روی قنات فقط بی‌هنجاری قنات را ثبت نکرده و بی‌هنجاری‌های دیگری هم ثبت شده است (همان‌طور که در تصویر بی‌هنجاری باقی‌مانده قنات مشخص است) در نتیجه در تشخیص لبه داده شده با فیلترهای Theta و TDX، لبه‌های بی‌هنجاری غیراز قنات هم سهمیه بوده است. با پیوستگی این لبه‌ها، لبه قنات شکلی پیچ‌خورده به خود گرفته است که ممکن است مفسر را دچار مشکل کند. اما فیلترهای TDX₂ و BHD با تفکیک لبه‌های بی‌هنجاری قنات و سایر بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه باقی‌مانده قنات، روند کلی قنات را به‌خوبی نشان داده‌اند. علاوه بر آن به کمک اطلاعات زمین‌شناسی منطقه می‌توان گفت که احتمال وجود قنات به عرض ۲/۷ متر در این منطقه بعید است. همچنین می‌توان گفت عرض حساب شده از روش‌های TDX₂ و BHD به واقعیت نزدیک‌تر است.

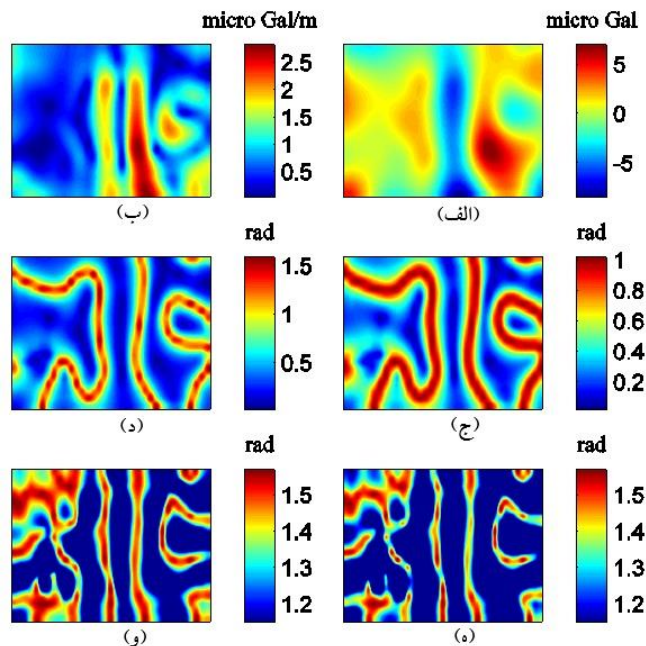
آمده‌اند، که نتایج داده‌های بدون نوفه تکرار شده است. شکل ۸-ه و شکل ۸-و به ترتیب از اعمال فیلتر BHD و TDX₂ روی شکل ۸-الف به‌دست آمده‌اند. دقت فیلترهای جدید مورد استفاده برای داده‌های آلوده به نوفه نیز قابل قبول است.



شکل ۷. نتایج تشخیص لبه برای سه مکعب مستطیل که در عمق ۳، ۷، ۱۲ متر قرار دارند. (الف) اثر گرانی ناشی از سه مکعب، (ب) روش THD، (ج) روش Theta، (د) روش TDX، (ه) روش BHD و (و) روش TDX₂



شکل ۸. نتایج تشخیص لبه برای سه مکعب همراه با نوفه اتفاقی ۲ درصد، (الف) اثر گرانی ناشی از سه مکعب، (ب) روش THD، (ج) روش Theta، (د) روش TDX، (ه) روش BHD و (و) روش TDX₂



شکل ۹. مقایسه لبه قنات حساب شده با روش‌های گوناگون، (الف) بی‌هنجاری باقی‌مانده قنات، (ب) نقشه THD قنات، (ج) نقشه Theta قنات، (د) نقشه TDX قنات، (ه) نقشه BHD قنات و (و) نقشه TDX_2 قنات

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فیلتر مشتق افقی متعادل (BHD) و مشتق کل افقی مرتبه دوم نرمال‌سازی شده (TDX_2) برای تشخیص دقیق‌تر لبه‌های بی‌هنجاری مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی این فیلترها برای تعیین لبه چند مدل مصنوعی متفاوت، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از اعمال فیلترهای گوناگون روی داده‌های مصنوعی تولید شده نشان می‌دهد که فیلترهای BHD و TDX_2 در مقایسه با فیلترهای Theta و TDX لبه دقیق‌تری را برآورد کرده‌اند. درصد خطای محاسباتی از روش BHD و TDX_2 برای منشور به ابعاد ۵۰ متر و عمق بالای ۳۰ متر، به ترتیب ۳۶ و ۸۴ درصد است. فیلتر BHD بهبود ۴۸ درصدی در تعیین لبه، نسبت به TDX_2 ، برای این مدل را نشان می‌دهد. برای بی‌هنجاری حاصل از تداخل سه جسم مجزا، فیلترهای BHD و TDX_2 مرز بی‌هنجاری‌ها را بهتر از Theta و TDX تفکیک کرده‌اند. و لبه بی‌هنجاری‌های کم‌عمق را، به نحو دقیق برآورد کرده‌اند. در مورد داده‌های آلوده به نوفه، نتایج به دست آمده از فیلترهای BHD و TDX_2 ، کیفیت لازم برای تفسیر را دارد. در مورد منطقه مورد بررسی، فیلترهای

BHD و TDX_2 لبه بی‌هنجاری قنات را از سایر بی‌هنجاری‌های موجود در نقشه باقی‌مانده قنات بهتر تفکیک کرده‌اند. عرض به‌دست آمده برای قنات از روش TDX_2 ، ۲/۷ متر و از روش BHD، ۱/۲۷ متر است. با توجه به اینکه برای بی‌هنجاری کم‌عمق لبه به‌دست آمده از فیلتر BHD با مختصات مدل تطابق بهتری دارد و با کمک اطلاعات زمین‌شناسی منطقه می‌توان گفت، عرض محاسباتی بدست آمده از BHD به واقعیت نزدیک‌تر است.

مراجع

ابراهیم‌زاده اردستانی، و. و متولی عنبران، س. ه.، ۱۳۸۶، محدودیت‌های روش سیگنال تحلیلی در تعیین عرض بی‌هنجاری‌های گرانی، م.، ۳۳(۲)، ۷۷-۸۳.

علمدار، ک. و انصاری، ع.، ۱۳۸۹، تعیین مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از فیلترهای فاز محلی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۱)، ۴۷-۵۸.

نجاتی‌کلاته، ع. و روش‌سندل کاهو، ا.، ۱۳۹۲، تعیین مرز داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از تصویرسازی زاویه تنا، م. ژئوفیزیک ایران، ۷(۱)، ۲۴-۳۳.

- resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies: an enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, 61, 373-386.
- Ma, G., 2013a, Edge detection of potential field data using improved local phase filter, *Explor. Geophys.*, 44, 36-41.
- Ma, G., 2013b, Combination of horizontal gradient ratio and Euler (HGR-EUL) methods for the interpretation of potential field data, *Geophysics*, 78, J53-J60.
- Ma, G., Liu, C. and Li, L., 2014, Balanced horizontal derivative of potential field data to recognize the edges and estimate location parameters of the source, *J. Appl. Geophys.*, 108, 12-18.
- Ma, G., Li, L., 2012, Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative., *Comput. Geosci.*, 41, 83-87.
- 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.
- Rajagopalan, S. and Milligan, P., 1995, Image enhancement of aeromagnetic data using automatic gain control, *Explor. Geophys.*, 25, 173-178.
- 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, *Lead. Edge.*, 23, 116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data, *Geophysics*, 70, 39-43.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic application*, Cambridge University Press.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Comput. Geosci.*, 32, 1585-1591.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics, *Geophysics*, 73, H1-H4.
- Cordell, L., 1979, Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin, New Mexico, *New Mexico Geol. Soc. Guidebook*, 30th Field Conf, 59-64.
- Cordell, L. and Grauch, V. J. S., 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinz, W. J. (Ed.), *the utility of regional gravity and magnetic anomaly*, Society of Exploration Geophysicists, 181-197.
- Even, H. M., 1936, The place of the vertical gradient in gravitational interpretations, *Geophysics*, 1, 127-136.
- Fedi, M. and Florio, G., 2001, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method, *Geophys. Prospect.*, 49, 40-58.
- Gerkens, A. J. C., 1989, *Foundation of exploration Geophysics*.
- Hood, P. J. and Tasked, D. J., 1989, Aeromagnetic gradiometer program of the Geological Survey of Canada, *Geophysics*, 54, 1012-1022.
- Hsu, S., Sibuet, J. C. and Shyu, C., 1996, High-