



تفسیر داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از فیلتر تابع سیگموئید سریع - مطالعه موردی: معدن شماره دو سنگ آهن گل گهر کرمان

احمد الوندی^۱، وحید ابراهیم زاده اردستانی^۱ و روشنگر رجبلو^۲

۱- گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۲- اداره پژوهش و فناوری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، واحد استان همدان

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: sim.alvandi@gmail.com

چکیده

تعیین گوشه و مرز افقی ساختارهای زمین‌شناسی مانند دایک، گسل، گنبد نمکی و... یکی از اهداف مهم و اساسی در تفسیر داده‌های گرانی و مغناطیسی محسوب می‌شود. اگرچه در دهه‌های اخیر روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی بر اساس مشتقات افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل برای تعیین گوشه و مرز جانبی ساختارهای مدفون معرفی شده است، اما این فیلترها غالباً برای تعیین مرز ساختارهای زیرسطحی با چگالی‌های مختلف، توده‌های عمیق و حتی ساختارهای باریک نامناسب بوده و از توان تفکیک‌پذیری (resolution) و کیفیت لازم برخوردار نیستند. در این پژوهش یک فیلتر به منظور تعیین گوشه و مرز توده‌های مدفون زمین‌شناسی، با استفاده از ترکیب تابع سیگموئید سریع بهبود یافته و مشتقات افقی و قائم گرادیان افقی کل با تفکیک‌پذیری و دقت مناسب معرفی شده است. به همین منظور، در ابتدا کارآیی و توانمندی فیلتر تابع سیگموئید سریع (به اختصار FSF) بر روی مدل‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی پیچیده حاصل از چشمه‌های مدفون منشوری و مدل مصنوعی مغناطیسی بیشاپ (Bishop) با نوفه و بدون نوفه بررسی شده است. سپس توانمندی فیلتر در مقایسه با فیلترهای مرسوم و استاندارد مانند گرادیان افقی کل (THDR)، زاویه تیلت (TDR)، زاویه تنا (TM) و زاویه تیلت گرادیان افقی کل (TAHD) بر روی داده‌های گرانی و مغناطیسی میدانی معدن گل‌گهر سیرجان واقع در استان کرمان مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. برای هر دو مدل مصنوعی و واقعی، روش تعیین مرز افقی سیگموئید سریع، از کیفیت و تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به سایر فیلترهای تعیین گوشه برخوردار بوده و قادر است به طور همزمان مرزهای بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی با دامنه‌های کوچک و بزرگ را با جزئیات و دقت بیشتری تعیین نماید. بنابراین با اطمینان می‌توان از فیلتر FSF در تفسیر کیفی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل و شناسایی موقعیت افقی ساختارهای زیرسطحی استفاده کرد. کلیه الگوریتم‌های تعیین گوشه، تولید داده‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی و نقشه‌های تعیین مرز افقی ساختارهای مصنوعی و میدانی با استفاده از برنامه متلب انجام شده است.

واژگان کلیدی

داده‌های میدان پتانسیل
فیلتر تعیین گوشه
تابع سیگموئید سریع
معدن گل گهر

نشان می دهد (Alvandi et al., Pham, 2020; Prasad et al., 2022). مقادیر صفر دامنه در نقشه تیلت بر روی گوشه های چشمه یا نزدیک آن قرار می گیرند. اندازه دامنه زاویه تیلت بین ۱/۵- تا ۱/۵ رادیان تغییر می کند.

در سال ۲۰۰۵، Wijns و همکاران فیلتر دیگری با استفاده از آرک کسینوس نسبت گرادیان افقی کل و گرادیان کل (دامنه سیگنال تحلیلی) تحت عنوان فیلتر تتا (TM) معرفی کردند. مقادیر مینیمم دامنه در نقشه زاویه تتا بر روی گوشه های چشمه قرار می گیرد. این فیلتر به صورت رابطه (۳) تعریف می شود (Wijns et al. 2005).

$$TM = \arccos \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} \quad (3)$$

مهم ترین ضعف فیلتر تتا، ترسیم مرزهای کاذب در تصاویر خروجی است و همچنین لبه منابع عمیق تر تا حدودی به صورت پخش و هاله ای در نقشه ها نمایان می شوند که کار تفسیر نقشه ها را با مشکل مواجه می کند (Prasad et al., 2022; Pham et al., 2019; Alvandi et al., 2022a). اندازه دامنه فیلتر زاویه تتا بین ۰ تا ۱/۵ رادیان تغییر می کند. Ferreira و همکاران (۲۰۱۳) به منظور متعادل کردن سیگنال های حاصل از منابع کم عمق و عمیق و رفع نواقص فیلترهای فاز محلی مانند زاویه تیلت، تتا و... فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل (TAHD) را به عنوان فیلتر زاویه تیلت اصلاح شده برای تعیین گوشه ساختارهای زمین شناسی معرفی کردند. این فیلتر در مقایسه با سایر فیلترهای تعیین گوشه مانند گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تتا و... از کیفیت و دقت بالاتری برخوردار بوده و قادر است دامنه های کوچک و بزرگ را به صورت همزمان متعادل نماید (Ferreira et al., 2013). مقادیر ماکزیمم دامنه در نقشه TAHD بر روی مرزهای افقی چشمه قرار می گیرد و تغییرات دامنه بین ۱/۵- تا ۱/۵ رادیان است. این فیلتر به صورت رابطه (۴) تعریف می شود (Ferreira et al., 2013).

$$TAHD = \arctan \left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (4)$$

در این رابطه $\frac{\partial THDR}{\partial z}$ گرادیان قائم مشتق افقی کل، $\frac{\partial THDR}{\partial x}$ و $\frac{\partial THDR}{\partial y}$ گرادیان های افقی مشتق افقی کل هستند. مهم ترین ضعف فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل، توان تفکیک پذیری و کیفیت پایین تر نقشه خروجی در مقایسه با فیلترهای بر پایه تابع لجستیک است (Prasad et al., 2022; Alvandi et al., 2022a; Oksum et al. 2021). به منظور تعیین مرز جانبی و تعیین گوشه ساختارهای زمین شناسی، معمولاً از تابع آرک تانژانت مشتقات میدان پتانسیل مانند فیلتر زاویه تیلت، فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل و... استفاده می شود (Zhang et al., 2015). از طرفی به دلیل

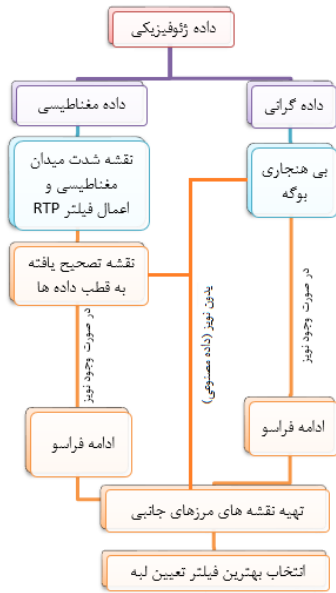
تعیین گوشه ساختارهای زمین شناسی یکی از فرآیندهای مهم در تفسیر داده های گرانی و مغناطیسی در نقشه برداری زمین شناسی، مطالعات مهندسی، اکتشافات نفتی و معدنی، مطالعات زیست محیطی، اکتشاف آب-های زیرزمینی، یافتن منابع زمین گرمایی و... محسوب می گردد (Hsu et al., 1996; Fedi and Florio, 2001; Alvandi et Zuo et al., 2014). در دهه های اخیر، روش های متعددی برای تعیین مرز افقی ساختارهای زمین شناسی با استفاده از داده های گرانی و مغناطیسی و بر مبنای مشتقات افقی و قائم و یا ترکیب مشتقات جهتی با توانمندی و فرمولاسیون متفاوت، معرفی و توسعه یافته است (ابراهیم زاده اردستانی، ۱۳۸۹؛ الوندی و همکاران، ۱۴۰۰). البته هر یک از فیلترهای تعیین گوشه مانند گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، زاویه تتا و... دارای ویژگی ها، معایب و توانمندی های مختص به خود در تعیین مرز جانبی ساختارهای زمین-شناسی هستند (Pham et al., 2020; Prasad et al., 2022). Nasuti and Nasuti, 2018, 2019). نخستین و محبوب ترین فیلتر تعیین گوشه با عنوان فیلتر گرادیان افقی کل (THDR)، توسط Cordell و Grauch (۱۹۸۵) به منظور تعیین مرز جانبی آنومالی های میدان پتانسیل با استفاده از مقادیر ماکزیمم مشتقات افقی میدان گرانی معرفی شد. فیلتر THDR به صورت رابطه (۱) تعریف می شود (Cordell and Grauch, 1985).

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

در این رابطه $\frac{\partial F}{\partial y}$ و $\frac{\partial F}{\partial x}$ گرادیان های افقی میدان گرانی یا مغناطیسی تبدیل یافته به قطب هستند. بزرگ ترین ضعف و مشکل فیلتر THDR عدم توانایی در تعیین مرز ساختارهای پیچیده (imposed) در نقشه های خروجی است. از این رو برای رفع این مشکل، در دهه های اخیر فیلترهای فاز محلی (local phase) معرفی و توسعه پیدا کرده است (Oksum et al., 2021). نخستین فیلتر تعیین گوشه فاز محلی، زاویه تیلت یا زاویه کجی (TDR) است (ابراهیم زاده اردستانی، ۱۳۸۹؛ الوندی و همکاران، ۱۴۰۰). این فیلتر نخستین بار توسط Miller و Singh (۱۹۹۴) معرفی شد. این فیلتر با استفاده از مقدار آرک تانژانت نسبت گرادیان قائم به گرادیان افقی کل میدان گرانی یا مغناطیسی تبدیل یافته به قطب، قادر است به صورت همزمان مرز افقی چشمه های بی هنجاری با دامنه های مختلف را متعادل نماید. فیلتر TDR به صورت رابطه (۲) تعریف می شود (Miller and Singh., 1994).

$$TDR = \arctan \left[\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (2)$$

در این رابطه $\frac{\partial F}{\partial z}$ گرادیان قائم میدان گرانی یا مغناطیسی تبدیل یافته به قطب است. البته این فیلتر در تعیین مرز ساختارهای عمیق دقت مناسبی ندارد و مرز چشمه ها را به صورت هاله ای و تار و یا دورتر از مقدار واقعی



شکل ۱: روندنمای استفاده از فیلترهای تعیین گوشه

۲- کاربرد بر روی مدل‌های مصنوعی

در این بخش توانایی فیلترهای پیشنهاد شده برای تعیین گوشه بی-هنجاری‌های مصنوعی گرانی و مغناطیسی با پارامترهای مختلف بررسی شده است.

۲-۱- مدل مصنوعی اول

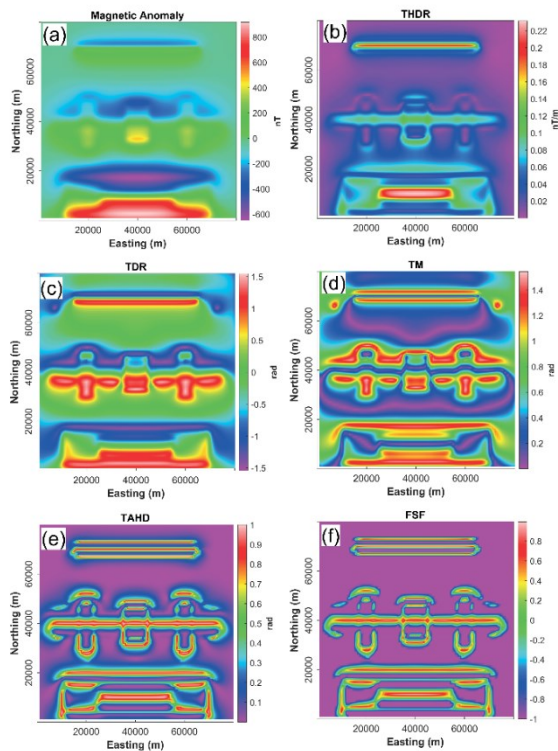
۲-۱-۱- مدل مغناطیسی بدون نوفه

در ابتدا یک مدل مغناطیسی مصنوعی پیچیده در نظر گرفته شده است. مدل دوبعدی و سه‌بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی مصنوعی در شکل (۲) نمایش داده شده است. پارامترهای وابسته به مدل مصنوعی اول نیز در جدول (۱) شرح داده شده است. مدل مصنوعی مغناطیسی با هفت منشور مدفون با عمق‌های متفاوت در یک شبکه منظم $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ در جهت شمال-جنوب و شرق-غرب با فاصله نمونه‌برداری 100 متر و با فرض میل مغناطیسی 45 درجه و انحراف مغناطیسی 10 درجه در محیط برنامه متلب تولید شده است. بزرگترین ضعف اکثر فیلترهای تعیین گوشه، حساسیت زیاد این فیلترها به زاویه میل و انحراف مغناطیسی است. از این‌رو قبل از استفاده از روش‌های تعیین لبه چشمه‌های مغناطیسی، باید از فیلتر تبدیل به قطب (reduction to the pole) یا همان RTP بر روی داده‌های مغناطیسی برای حذف ویژگی‌های مغناطیس‌شدگی توده استفاده کرد (Prasad et al., 2022). از این‌رو در مدل مصنوعی اول، ابتدا مدل بدون استفاده از فیلتر RTP بررسی و سپس برای تعیین مرز افقی توده‌های مدفون، از فیلتر تبدیل داده‌ها به قطب استفاده شده است.

شبهات فرم تابع سیگموئید به تابع آرک‌تانژانت، می‌توان از تابع سیگموئید برای تعیین لبه آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی استفاده کرد. از این‌رو به منظور افزایش توان تفکیک‌پذیری و دقت در تعیین گوشه‌های بی‌هنجاری-های گرانی و مغناطیسی، Oksum و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از تابع سیگموئید سریع، و مشتق اول قائم و مشتقات افقی گرادیان افقی کل، فیلتر تابع سیگموئید سریع (FSF) را به عنوان یک فیلتر مناسب و باکیفیت برای تعیین گوشه ساختارهای مدفون معرفی کردند. تابع سیگموئید سریع به صورت $S = W - 1/1 + |W|$ تعریف می‌شود. با قراردادن مقدار تابع سیگموئید سریع (S)، این فیلتر به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

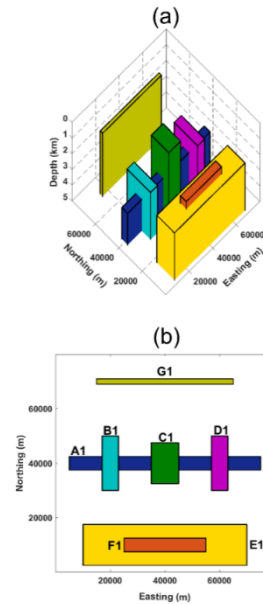
$$FSF = \frac{\left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right) - 1}{1 + \left| \frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right|} \quad (5)$$

فیلتر FSF با توجه به اینکه حساسیت کمتری نسبت به افزایش عمق چشمه دارد، قادر است به طور همزمان گوشه‌های آنومالی‌های عمیق و کم‌عمق را تعیین و از ترسیم مرزهای جعلی و کاذب اجتناب کند. در فیلتر FSF مقدار ماکزیمم دامنه بر روی مرز افقی چشمه قرار می‌گیرد و مقدار دامنه نیز بین ۱ تا ۱- متغیر است (Oksum et al., 2021). در این مقاله به منظور بررسی توانایی و قابلیت فیلترهای اشاره شده با اتکا بر مفاهیم مشتقات جهتی میدان، ابتدا ۳ مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی بررسی و در نهایت این فیلترها بر روی داده‌های واقعی معدن شماره دو گل‌گهر کرمان اعمال و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هدف اصلی این پژوهش ضمن معرفی فیلتر تابع سیگموئید سریع، مقایسه عملکرد فیلترهای استاندارد در تعیین گوشه است. روندنمای فیلترهای استفاده شده در این پژوهش در شکل (۱) ارائه شده است. مدل‌های مصنوعی، نقشه‌ها و الگوریتم فیلترهای مورد استفاده، در محیط برنامه متلب آماده و ترسیم شده است.



شکل ۳: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی مدل اول بر حسب nT و تعیین لبه مدل مغناطیسی بدون نوفه با فیلترهای مختلف بدون استفاده از فیلتر تصحیح داده به قطب، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

در این بخش ابتدا بر روی داده‌های مدل مغناطیسی فیلتر RTP و سپس روش‌های تعیین لبه اعمال شده‌اند. بی‌هنجاری مغناطیسی تبدیل یافته به قطب مدل مصنوعی اول (شکل ۴-ا) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل (THDR)، زاویه تیلت (TDR)، نقشه تتا (TM)، زاویه تیلت گرادیان افقی کل (TAHD)، و فیلتر تابع سیگموئید سریع (FSF) در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. در شکل ۴ (b) نتایج به‌دست‌آمده از روش THDR ترسیم شده است. در این روش، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن نیستند و مرز جانبی چشمه‌های عمیق به صورت هاله‌ای (diffused) نمایش داده شده‌اند. در شکل‌های ۴ (c) و (d) به ترتیب نتایج استفاده از فیلترهای TDR و TM را نمایش داده شده‌اند. هر چند فیلتر زاویه تیلت، دامنه‌های سیگنال را برجسته می‌کند، اما گوشه‌های چشمه F1 پهن‌تر از مقدار واقعی تعیین شده است. در نقشه تتا نیز مرز چشمه‌های F1 و E1 به طور صحیح نمایش داده نشده به نحوی که پربندهای جعلی و کاذب درون چشمه E1 رسم شده و مرز F1 نیز دور از واقعیت ترسیم شده است که کار تفسیر را با مشکل مواجه می‌کند. شکل ۴ (e) نتایج به‌دست‌آمده از فیلتر TAHD برای تعیین لبه چشمه‌های مدل اول را نشان می‌دهد. این فیلتر وابستگی کمتری به عمق دارد و مقدار ماکزیمم دامنه فیلتر، لبه‌های بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ (f)، نتایج به‌دست‌آمده از فیلتر تابع سیگموئید



شکل ۴: (a) مدل مصنوعی سه بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی با ۷ منشور دارای پارامترهای متفاوت، (b) مدل دوبعدی بی‌هنجاری مغناطیسی

در مدل مصنوعی اول، کمترین عمق مربوط به منشورهای C1 و G1 و بیشترین عمق مربوط به منشور A1 است و منشورها به صورت ادغام شده در یکدیگر با مقدار خودپذیری مغناطیسی مثبت و منفی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: پارامترهای مدل مصنوعی اول

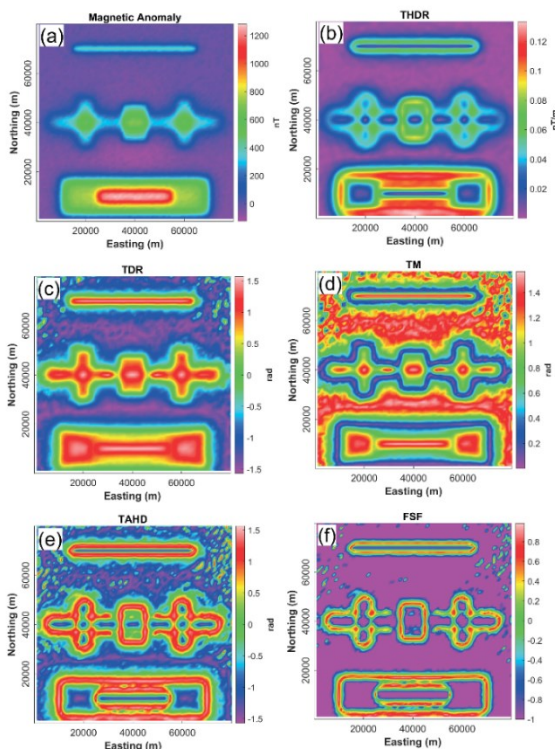
(خودپذیری مغناطیسی بر حسب SI)، آزمایشات امتداد بر حسب درجه و سایر پارامترها بر حسب کیلومتر فرض شده است)

پارامترها	G1	F1	E1	D1	C1	B1	A1
خودپذیری	-۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۰۳
عرض	۲	۵	۱۵	۶	۱۰	۶	۵
طول	۵۰	۳۰	۶۰	۲۰	۱۵	۲۰	۷۰
ضخامت	۳۰	۲۰	۲۰	۷۰	۱۰	۵۰	۵۰
محور افقی	۴۰	۴۰	۴۰	۶۰	۴۰	۲۰	۴۰
محور عمودی	۷۰	۱۰	۱۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
عمق	۱	۱/۵	۲	۲	۱	۲	۳

بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی اول (شکل ۳-ا) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. همانطور که انتظار داریم، نتایج تعیین گوشه بدون استفاده از فیلتر تصحیح داده به قطب رضایت‌بخش نبوده و امکان تعیین مرز جانبی چشمه‌ها به صورت درست وجود ندارد (Prasad et al., 2022). به همین دلیل در مرحله بعد، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، ابتدا از فیلتر RTP استفاده می‌گردد.

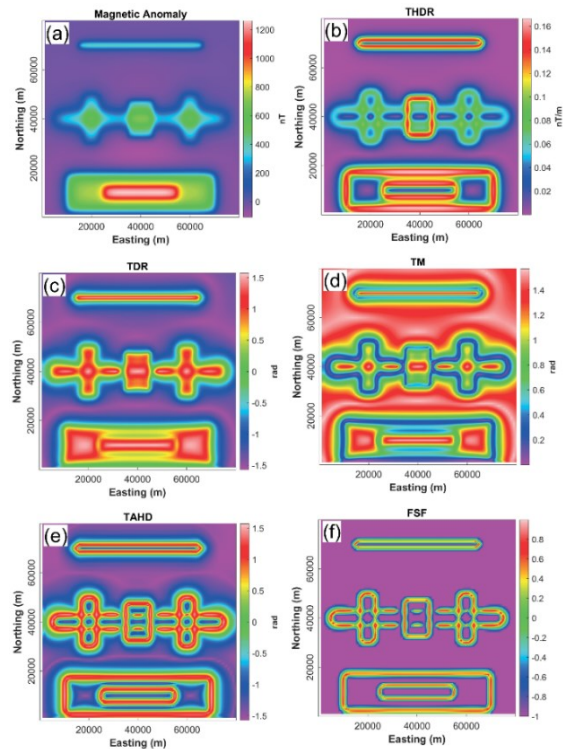
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.

سیگموئید سریع در شکل (۵) نمایش داده شده است. شکل ۵ (b) نتایج به‌دست‌آمده از روش THDR را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در نتیجه استفاده از فیلتر گرادیان افقی کل، چشمه‌های A1، B1، C1، D1 و G1 به صورت هاله‌ای نمایان شده است. همچنین به دلیل ادغام چشمه‌ها، مرز افقی چشمه F1 تعیین نشده است. در شکل‌های ۵ (c) و (d) به ترتیب نتایج استفاده از فیلتر TDR و TM نمایش داده شده‌اند. هر چند مرز ساختارهای عمیق و باریک توسط این دو فیلتر تعیین شده اما به دلیل ادغام چشمه‌ها، مرز چشمه F1 قابل تشخیص نیست. با توجه به شکل‌های ۵ (e) و (f) نتایج به‌دست‌آمده از فیلترهای TAHD و فیلتر FSF رضایت‌بخش هستند، هر چند کیفیت تعیین مرز بی‌هنجاری در روش FSF بیشتر و حساسیت آن به نوفه نسبت به فیلتر TAHD و فیلترهای THDR، TDR و TM به مراتب کمتر است. لازم به ذکر است که در فیلترهای تعیین مرز، در نتیجه حساسیت آنها به نوفه به دلیل وجود مشتقات جهتی در محاسبات مربوطه، اندازه گوشه بی‌هنجاری‌های مدفون دورتر از مشخصات واقعی آنها ترسیم می‌گردد (Alvandi؛ Pham et al., 2019؛ et al., 2022a).



شکل ۵: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی مدل اول برحسب nT و تعیین گوشه مدل تبدیل‌یافته به قطب همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی با فیلترهای مختلف شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

سریع، مشابه با فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل در تعیین مرز چشمه‌ها است. البته با این تفاوت که نقشه FSF به دور از هرگونه هاله و پخش شدگی دارای وضوح و کیفیت بهتری نسبت به TAHD و سایر فیلترها است. این فیلتر مرز چشمه‌های با عمق کم و زیاد را به خوبی برجسته کرده است. در مدل مغناطیسی اول با وجود ادغام منشورهای مدفون، مرز افقی چشمه‌ها برخلاف نتایج فیلترهای گرادیان افقی کل، زاویه تیلت و نقشه تتا به خوبی تعیین شده است.



شکل ۴: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی مدل اول برحسب nT و تعیین لبه مدل مغناطیسی مصنوعی تبدیل‌یافته به قطب و بدون نوفه با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

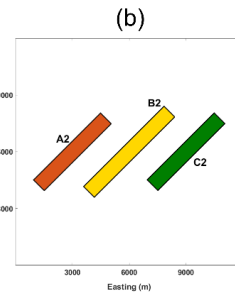
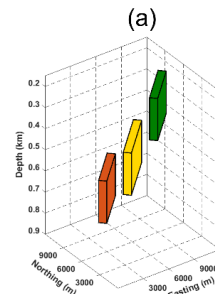
۲-۱-۲- مدل مغناطیسی همراه با نوفه

از آنجا که هدف اصلی در تولید مدل‌های مصنوعی نزدیک کردن پارامترها و شرایط به ساختارها و بی‌هنجاری‌های واقعی زمین‌شناسی است؛ داده‌های مدل مصنوعی تولیدشده با ۵ درصد نوفه تصادفی با دامنه نویز ۰/۷۵ و با توزیع نرمال با استفاده از دستور نویز در برنامه متلب آغشته شده‌اند. نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی اول همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی در شکل ۵ (a) نمایش داده شده است. به منظور کاهش تأثیر نوفه، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین مرز، فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۵۰۰ متر بر روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی اعمال شده است. نتایج حاصل از فیلترهای مختلف تعیین گوشه در شرایط نوفه‌ای شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تتا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع

۲-۲-۲ مدل مصنوعی دوم

۲-۲-۱-۲ مدل گرانی بدون نوفه

در مدل دوم، یک مدل گرانی به منظور بررسی توانایی فیلترهای تعیین گوشه در نظر گرفته شده است. مدل های دوبعدی و سه بعدی بی هنجاری گرانی در شکل (۶) نمایش داده شده اند. پارامترهای مربوط به مدل مصنوعی دوم نیز در جدول (۲) شرح داده شده اند. مدل مصنوعی گرانی با سه منشور مدفون با تباین چگالی و عمق های متفاوت در یک شبکه منظم ۱۲km×۱۲km در جهت شمال- جنوب و شرق- غرب با فاصله نمونه- برداری ۱۰۰ متر در محیط نرم افزار MATLAB تولید شده است. کمترین عمق مربوط به منشور C2 و بیشترین عمق مربوط به منشور A2 است.



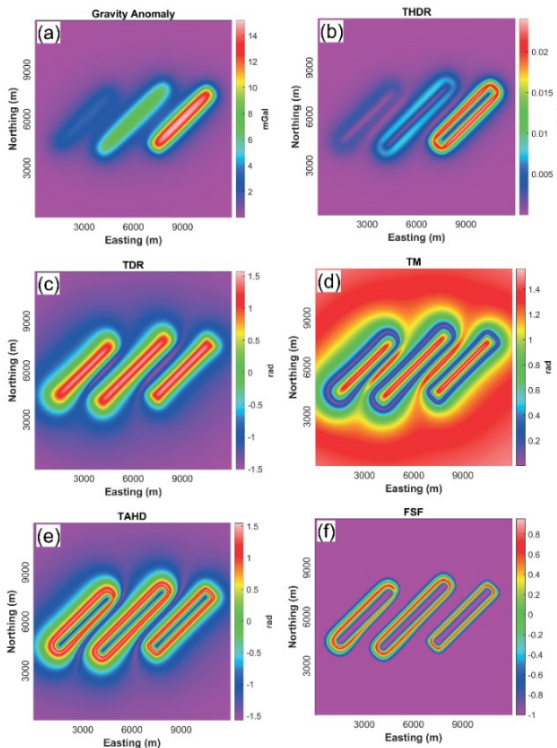
شکل ۶: (a) مدل مصنوعی سه بعدی بی هنجاری گرانی با ۳ منشور دارای عمق و چگالی متفاوت، (b) مدل مصنوعی دوبعدی بی هنجاری گرانی

جدول ۲: پارامترهای مدل مصنوعی دوم (چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، آزیموت امتداد بر حسب درجه و سایر پارامترها بر حسب کیلومتر فرض شده اند)

پارامترها	A2	B2	C2
چگالی	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
عرض	۰/۸	۰/۸	۰/۸
طول	۵	۵	۵
ضخامت	۰/۲	۰/۲	۰/۲
محور افقی	۳	۶	۹
محور عمودی	۶	۶	۶
عمق	۰/۵	۰/۴	۰/۲
آزیموت امتداد	۴۵	۴۵	۴۵

بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی دوم (شکل ۷-a) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل (THDR)، زاویه تیلت (TDR)، نقشه تتا (TM)، زاویه تیلت گرادیان افقی کل

(TAHD) و فیلتر تابع سیگموئید سریع (FSF) در شکل (۷) نمایش داده شده اند. با توجه به شکل ۷ (b) در اثر اعمال فیلتر THDR، لبه چشمه A2 و B2 به صورت تار و هاله ای رسم شده است و تصویر خروجی از کیفیت مناسب برخوردار نیست. شکل های ۷ (c)، (d) و (e) به ترتیب نتایج استفاده از فیلترهای TDR، TM و TAHD را نشان می دهند. هر چند فیلتر زاویه تیلت، دامنه های سیگنال را برجسته می کند، اما در اثر اعمال این فیلتر گوشه و مرز افقی چشمه های مدل گرانی، باریک تر از مقدار واقعی تعیین شده است. همچنین اگرچه دو فیلتر تتا و زاویه تیلت گرادیان افقی کل سیگنال های ضعیف و قوی حاصل از سه چشمه با عمق های متفاوت را برجسته نموده اند، اما تصاویر حاصل از اعمال این فیلترها از کیفیت و تفکیک پذیری مناسبی برخوردار نیستند. با توجه به نتایج به دست آمده از فیلتر FSF (شکل ۷ (f)) همانطور که مشاهده می شود، مرز افقی سه چشمه A1، B1 و C1 کاملاً مشخص بوده و تصویر خروجی از کیفیت و رزولوشن مناسب برخوردار است.



شکل ۷: (a) بی هنجاری گرانی مدل دوم بر حسب میلی گال و تعیین لبه مدل گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

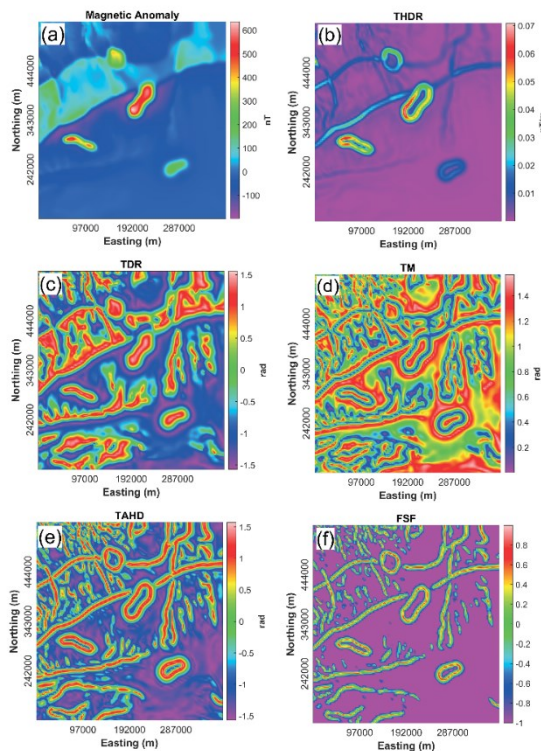
۲-۲-۲-۲ مدل گرانی همراه با نوفه

از آنجا که هدف اصلی در تولید مدل های مصنوعی نزدیک نمودن پارامترها و شرایط به ساختارها و بی هنجاری های واقعی زمین شناسی است، داده های مرتبط با مدل مصنوعی گرانی نیز با ۵ درصد نوفه تصادفی با دامنه نوفه ۰/۷۵ و با توزیع نرمال آغشته شدند. نقشه بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی

۲-۳- مدل مصنوعی سوم

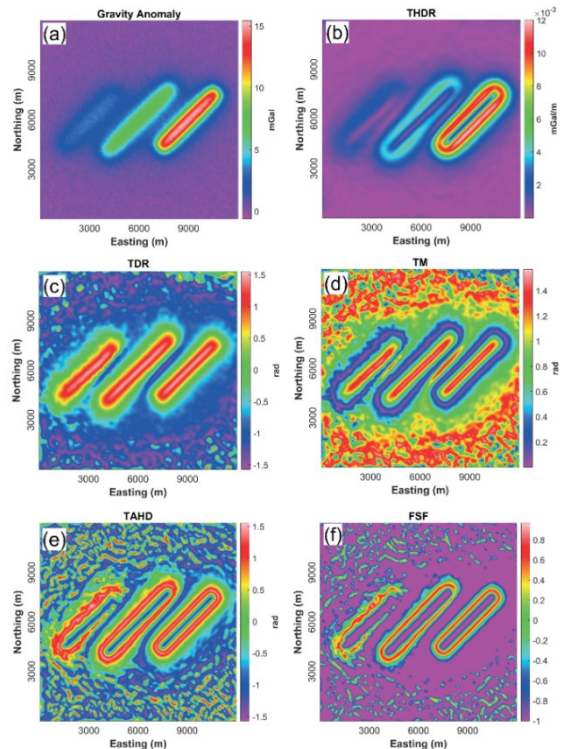
۲-۳-۱- مدل بیشاپ بدون نوفه

در مدل سوم، مدل مصنوعی مغناطیسی بیشاپ (Bishop) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر پژوهشگران متعددی از این مدل به عنوان یک مدل مصنوعی قابل اطمینان و مناسب در سنجش و بررسی روش‌های تشخیص عمق، تعیین مرز افقی ساختارهای زمین‌شناسی و... استفاده کرده‌اند (Salem et al., 2008; Chen and Zhang, 2022; Cooper, 2020). مدل مصنوعی مغناطیسی بیشاپ، یک مدل مصنوعی بدون نوفه بر اساس ساختار زمین‌شناسی پیچیده مناطق آتشفشانی شمال بیشاپ، واقع در کالیفرنیا (ایالات متحده) است (Williams et al., 2002; Fairhead et al., 2004). داده‌ها و تفسیر مختصر مدل بیشاپ به صورت رایگان در وبسایت https://wiki.seg.org/wiki/Bishop_Model قابل دسترسی و دانلود می‌باشد. در این مدل مصنوعی، رسوبات و نهشته‌های غیرمغناطیسی، پی‌سنگ مغناطیسی و برخی توده‌های نفوذی بالای پی-سنگ را پوشانده و عمق پی‌سنگ از چند صد متر آغاز و تا عمق ۱۰ کیلومتری ادامه دارد (Salem et al., 2008). مدل مصنوعی مغناطیسی بیشاپ، با فرض اندازه میدان مغناطیسی ۵۰۰۰۰ نانوتسلا، زاویه میل مغناطیسی ۹۰ درجه و انحراف مغناطیسی ۰ درجه تولید شده است.



شکل ۹: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی RTP مدل مصنوعی بیشاپ و تعیین لبه با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

با نوفه تصادفی در شکل ۸ (a) نمایش داده شده است. به منظور کاهش تاثیر نوفه، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین مرز، فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۱۵۰ متر بر روی داده‌های گرانی مصنوعی اعمال گردیده است.



شکل ۸: (a) بی‌هنجاری گرانی مدل دوم برحسب میلی‌گال و تعیین لبه مدل گرانی مصنوعی همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

نتایج حاصل از فیلترهای مختلف تعیین گوشه در شرایط نوفه‌ای شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تتا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل ۸ (a) نمایش داده شده‌اند. شکل ۸ (b) نتایج به دست آمده از روش THDR را نشان می‌دهد. در اثر اعمال این فیلتر، مرز جانبی چشمه‌های عمیق‌تر به صورت هاله‌ای و تار نمایان شده است. شکل‌های ۸ (c)، (d) و (e) به ترتیب نتایج استفاده از فیلترهای TDR، TM و TAHD را نشان می‌دهند. هر چند مرز افقی چشمه‌ها توسط این سه فیلتر تعیین شده، اما تصویر خروجی از کیفیت مناسب برخوردار نبوده و وجود نوفه در نقشه‌ها بیشتر از روش گرادیان افقی کل نمایان شده است. شکل ۸ (f) نتایج استفاده از فیلتر تابع سیگموئید سریع را نشان می‌دهد. مرز افقی سه چشمه با وجود نوفه تعیین شده و کیفیت تصویر خروجی نیز در مقایسه با فیلترهای تعیین گوشه بهتر است. مهم‌ترین ویژگی فیلتر تابع سیگموئید سریع، حساسیت کمتر فیلتر به افزایش عمق در شرایط نوفه‌ای و عاری از نوفه است.

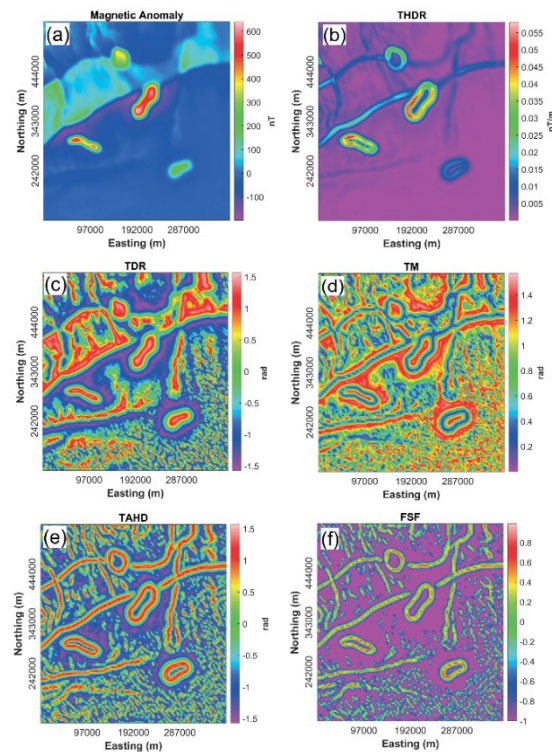
متعادل کردن سیگنال های حاصل از منابع مختلف از ویژگی های مهم فیلتر FSF است.

۲-۳-۲- مدل بیشاپ همراه با نوفه

به منظور نزدیک نمودن محیط مصنوعی مدل بیشاپ به ساختار واقعی و سنجش توانایی فیلتر در شرایط نوفه ای، داده ها به ۲ درصد نوفه تصادفی با توزیع نرمال آغشته شدند. پیش از اعمال فیلترهای تعیین گوشه استاندارد و فیلتر تابع سیگموئید سریع بر روی داده های آغشته به نوفه، به منظور کاهش تاثیر نوفه، فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۵۰۰ متر اعمال شده و سپس توانایی فیلترهای تعیین لبه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از کاربرد فیلترهای مختلف در تعیین گوشه مدل مصنوعی بیشاپ در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می گردد، همانند نتایج به دست آمده از مدل های مصنوعی گرانی و مغناطیسی، نقشه حاصل از اعمال فیلتر تابع سیگموئید سریع ضمن پایداری بیشتر در برابر نوفه از کیفیت و تفکیک پذیری بیشتری برخوردار بوده و به خوبی مرز افقی ساختارهای عمیق و کم عمق را نمایان کرده است.

داده های گرانی و مغناطیسی بی هنجاری شماره دو گل گلهر سیرجان، واقع در استان کرمان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. ناحیه معدنی گل گهر با داشتن معادن غنی از سنگ آهن، از مهم ترین قطب های فعال معدنی ایران محسوب می گردد (Alvandi et al., 2022b). کانسار سنگ آهن گل گهر در شش آنومالی مجزا در مجموع با ذخیره ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن در شهرستان سیرجان، استان کرمان و در زون سندنجد-سیرجان قرار گرفته است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۰). در این زون ذخایر متعددی از کانه زایی آهن وجود دارد که سنگ آهن گل گهر یکی از مهم ترین ذخایر آن محسوب می گردد. منطقه مورد مطالعه تقریباً بین طول های جغرافیایی ۲۹° ۰۲' تا ۲۹° ۰۷' شمالی در زیر پوشش آبرفت های عهد حاضر و بدون هیچگونه رخنمونی از ماده معدنی واقع شده است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ Alvandi et al., 2022b). کانسار شماره دو گل گهر از مجموعه ای از سنگ های آذرین و دگرگونی شامل انواع آمفیبولیت، میکاشیست، آندالوزیت، گارنت، استارولیت شیست، مرمر و گرافیت تشکیل شده که تا حد رخساره آمفیبولیت دگرگون شده اند. کانسار سنگ آهن گل گهر یک کانسار آهن نواری نوع راپیتان است. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

بی هنجاری مغناطیسی مدل بیشاپ (شکل ۹-ا) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تنا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل (۹) نمایش داده شده است. شکل ۹ (b) نتایج به دست آمده از فیلتر گرادیان افقی کل را نشان می دهد. با توجه به این شکل در نتیجه اعمال این فیلتر، گوشه چشمه های کم عمق تعیین شده است اما لبه چشمه های عمیق تر قابل تشخیص نیستند. شکل های ۹ (c) و (d) به ترتیب نتایج استفاده از روش های زاویه تیلت و فیلتر تنا را نشان می دهند. در نقشه زاویه تیلت، با وجود اینکه مرز ساختارهای عمیق و کم عمق تعیین شده اما لبه های ساختارهای عمیق به صورت مناسب ترسیم نشده است. در فیلتر زاویه تنا، مرزهای کاذب ایجاد شده بین ساختارهای مدل، بزرگترین مشکل در تفسیر نقشه خروجی است. شکل های ۹ (e) و (f) نتایج استفاده از فیلترهای FSF و TAHD را نشان می دهند. در هر دو روش، سیگنال های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متعادل شده اند اما نقشه فیلتر تابع سیگموئید سریع از کیفیت بالاتری برخوردار بوده و تفسیر نقشه خروجی به مراتب آسانتر از سایر روش های تعیین گوشه است. حساسیت کمتر به افزایش عمق و



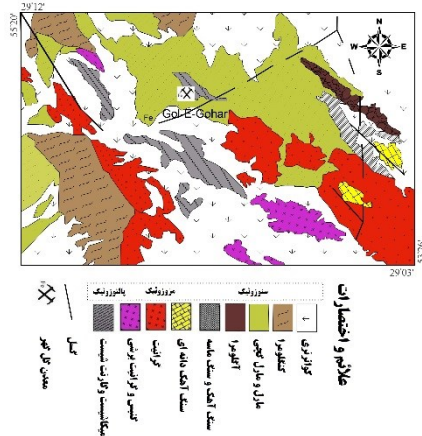
شکل ۱۰: (a) بی هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی آلوده به نوفه و تعیین لبه با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تنا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی و (f) تابع سیگموئید سریع

۳- کاربرد بر روی مدل واقعی

در این بخش توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین گوشه بی هنجاری، بر روی

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.

شده‌اند. در شکل ۱۲ (b)، نقشه فیلتر گرادیان افقی کل نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مرز افقی ساختارهای کم‌عمق ترسیم شده‌اند اما سایر ساختارها قابل شناسایی نیستند. در شکل ۱۲ (c) نقشه زاویه تیلت نمایش داده شده است. در این فیلتر سیگنال‌های حاصل از منابع و ساختارهای عمیق و کم‌عمق متعادل شده‌اند اما مرز ساختارها بسیار پهن‌تر و دور از واقعیت ترسیم شده‌اند. در شکل ۱۲ (d) نقشه زاویه تنا نشان داده شده است. در نقشه تنا، ترسیم مرزهای جعلی در بخش شرقی نقشه بزرگترین نقص فیلتر به شمار می‌آید اما در قیاس با دو فیلتر گرادیان افقی کل و زاویه تیلت، نتایج بهتری ارائه شده و مرز بی‌هنجاری اصلی و سایر ساختارها تقریباً قابل تشخیص است. شکل‌های ۱۲ (e) و (f)، نقشه فیلترهای زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع را نشان می‌دهند. در این دو روش لبه و محدوده آنومالی اصلی به خوبی مشخص شده است. البته نقشه فیلتر تابع سیگموئید سریع از کیفیت بهتری در قیاس با زاویه تیلت گرادیان افقی کل برخوردار بوده و روند شرقی-غربی آنومالی اصلی و موقعیت سایر منابع بی‌هنجاری که ممکن است بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، مربوط به دایک، گسل و یا شکستگی موجود در منطقه باشد، به خوبی در بخش غربی-شرقی نقشه مشخص شده است.



شکل ۱۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (Mahmoudi et al., 2017; Eshraghi et al., 1999; Behnam and Ramazi, 2019)

۳-۱- داده‌های مغناطیسی

روش مغناطیس‌سنجی، یک روش مطمئن و متداول در اکتشاف مواد معدنی و تعیین پارامترهای عمق، شکل، ابعاد و ... در کنار سایر داده‌ها و روش‌های اکتشافی است. در محدوده گل‌گهر، عملیات برداشت داده‌های مغناطیس-سنجی با استفاده از ۲۱ پروفیل توسط مغناطیس‌سنج مگنتومتر GEM انجام شده است. فاصله پروفیل‌های برداشت از یکدیگر ۱۰۰ متر و فاصله ایستگاه‌های برداشت ۴۰ متر در نظر گرفته شده است (علمدار و انصاری، ۱۳۸۸). بر روی داده‌های برداشت‌شده تصحیحات مورد نیاز از قبیل تصحیح IGRF، تغییرات روزانه، تصحیح ارتفاعی، تصحیح ایستگاه مبنایی و تصحیحات طول و عرض جغرافیایی انجام شده و سپس داده‌ها شبکه‌بندی شده‌اند. در تفسیر داده‌های مغناطیسی و استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، حذف اثر دوقطبی نقش بسیار مهم و حیاتی دارد. لذا با استفاده از فیلتر تبدیل به قطب (RTP)، داده‌های برداشت‌شده به قطب مغناطیسی، یعنی جایی که میدان القایی قائم است، تبدیل می‌شوند. سپس قبل از استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، از فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰ متر بر روی نقشه RTP استفاده شده است. روش ادامه فراسو، اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با فرکانس بالا را حذف و اثر بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای را بهتر آشکار می‌سازد. نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی تبدیل یافته به قطب منطقه مورد مطالعه بر حسب نانتوسلا و موقعیت آنومالی اصلی با خط‌چین سیاه رنگ در شکل ۱۲ (a) نمایش داده شده است. نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی تبدیل یافته به قطب نشان می‌دهد کانسار آهن به صورت آنومالی مثبت مغناطیسی با روند تقریبی شرقی-غربی نمایان شده است. به منظور تعیین لبه ساختار اصلی و سایر چشمه‌های بی‌هنجار مدفون، فیلترهای تعیین گوشه بی‌هنجاری بر روی نتایج حاصل از فیلتر ادامه فراسو، اعمال شده است. محدوده آنومالی اصلی (خط‌چین سیاه رنگ) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه کجی، نقشه تنا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل (۱۲) نمایش داده

شکل ۱۲: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی تبدیل یافته به قطب معدن شماره دو گل‌گهر کرمان و تعیین لبه کانسار آهن با فیلترهای مختلف اعمال شده بر روی نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰ متر، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تنا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی و (f) تابع سیگموئید سریع

۳-۲- داده‌های گرانی

به منظور بررسی بیشتر و تعیین ویژگی‌های بی‌هنجاری شماره دو کانسار آهن سیرجان، علاوه بر داده‌های مغناطیس زمینی، داده‌های گرانی با استفاده از ۲۱ پروفیل برداشت شده است. فاصله پروفیل‌های برداشت از یکدیگر ۱۰۰ متر و فاصله ایستگاه‌های برداشت ۴۰ متر در نظر گرفته شده‌اند. کلیه تصحیحات لازم شامل تصحیحات عرض جغرافیایی، هوای آزاد، بوگه، توپوگرافی و کشند بر روی داده‌های برداشت‌شده اعمال گردیده و

زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل (۱۳) نمایش داده شده اند. مشابه نتایج به دست آمده در تفسیر داده های مغناطیسی، مرز افقی ساختار اصلی در نقشه گرادیان افقی کل (شکل ۱۳- b) تعیین نشده و سایر آنومالی ها و چشمه ها به صورت تار ترسیم شده است. در شکل های ۱۳ (c) و (d) نقشه های مربوط به زاویه تیلت و تنا ترسیم شده است که با وجود متعادل نمودن سیگنال های حاصل از ساختارهای مختلف، تفسیر آن ها با مشکل روبرو است. شکل های ۱۳ (e) و (f) نقشه های مربوط به فیلترهای زاویه تیلت گرادیان افقی کل و تابع سیگموئید سریع را نمایش می دهند. در نقشه تابع سیگموئید سریع، مرزها با دقت و کیفیت بیشتری تعیین شده و مرز سایر آنومالی ها نیز قابل تشخیص هستند. در این نقشه روند شرقی-غربی آنومالی شماره دو گل گهر تعیین شده که به خوبی با اطلاعات زمین شناسی و نقشه های زیرسطحی موجود از معدن شماره (۲) همخوانی و مطابقت دارد.

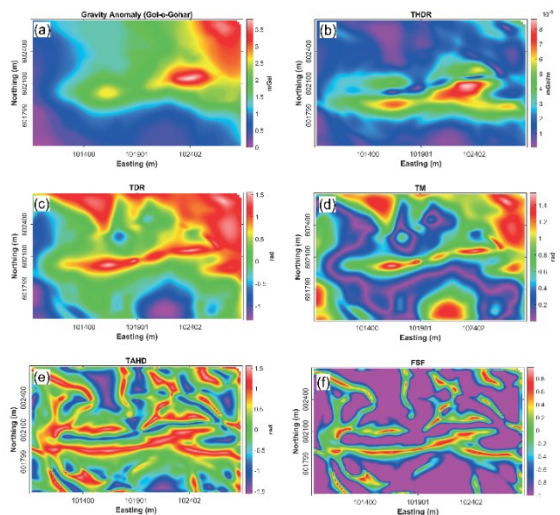
که فیلترهای استاندارد و مرسوم مانند گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تنا و.. از توانایی لازم برای تفکیک ساختارهای مدفون برخوردار نیستند و معمولاً مفسر را برای ارائه تفسیری درست دچار اشتباه می کنند. اما تابع سیگموئید سریع قادر است دامنه های کوچک و بزرگ مربوط به بی-هنجاری های مختلف با عمق و گستره های متفاوت را به طور همزمان متعادل نموده و با کیفیت بالاتری مرزهای افقی و گوشه های ساختارهای زمین شناسی را تعیین و ترسیم نماید. همچنین با استفاده از داده های گرانی و مغناطیسی تبدیل یافته به قطب، فیلتر FSF مرز اصلی و روند کانسار آهن معدن شماره دو گل گهر کرمان و سایر ساختارهای محدوده مطالعه را با کیفیت مناسب و به دور از هرگونه هاله، پخش شدگی و ایجاد مرز جعلی در نقشه نهایی ترسیم کرده است. در مجموع نتایج استفاده از مدل های مصنوعی و میدانی نشان می دهد که فیلتر FSF می تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند و باکیفیت در تفسیر داده های میدان پتانسیل استفاده شود و به عنوان یک الگوریتم مناسب در ترسیم مدل های دو بعدی و سه بعدی به مفسر کمک نماید. البته استفاده از روش های حذف نویز برای مدل های مصنوعی و میدانی گرانی و مغناطیسی آغشته به نوفه، مانند فیلتر ادامه فراسو قبل از استفاده از فیلترهای تعیین لبه و فیلتر تبدیل داده به قطب برای مدل های مغناطیسی بدون نوفه و همراه با نوفه اکیدا توصیه می گردد.

۵- تشکر و قدردانی

از داوران محترم به جهت ارائه نظرات و پیشنهادات ارزنده به منظور ارتقاء کیفیت مقاله تشکر و قدردانی می گردد. همچنین از آقای Guy Flanagan مشاور ارشد شرکت نفت و گاز کونوکو فیلیپس به جهت ارسال تفسیر داده های مغناطیسی و ارائه اطلاعات تکمیلی منطقه بیشاپ صمیمانه تشکر و قدردانی می گردد. ۶- منابع

الوندی، ا.، توکتای، ه.، د.، فام، ل.، ش.، (۱۴۰۰)، تفسیر داده های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، مطالعه موردی: تاقدیس چارک، پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی doi: 10.22044/jrag.2022.11430.1325, 7(4), pp. 401-412.

سپس داده ها شبکه بندی شده اند. نقشه بی-هنجاری گرانی محدوده مورد مطالعه بر حسب میلی گال در شکل ۱۳ (a) نمایش داده شده است. همانند تفسیر داده های مغناطیسی، برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی-هنجاری گرانی، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، از فیلتر ادامه فراسو (۳۰ متر) استفاده شده، زیرا فیلتر فراسو باعث می شود، تا طول موج های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت تری در اختیار داشته باشیم. بیشینه و کمینه گرانی به ترتیب ۳ میلی گال مربوط به بخش شرقی معدن و ۰/۵ میلی گال مربوط به بخش غربی محدوده مورد مطالعه است. نقشه بی-هنجاری گرانی نشان می دهد که کانسار آهن به صورت دو آنومالی مثبت گرانی با روند تقریبی شرقی- غربی نمایان شده است. به منظور تعیین لبه ساختارهای اصلی و سایر چشمه های بی-هنجار مدفون، فیلترهای تعیین گوشه بی-هنجاری بر روی نتایج حاصل از فیلتر ادامه فراسو، اعمال شده است. محدوده آنومالی اصلی (خط چین سیاه رنگ) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه کجی، نقشه تنا،



شکل ۱۳: (a) بی-هنجاری گرانی معدن شماره دو گل گهر کرمان و تعیین لبه کانسار آهن با فیلترهای مختلف اعمال شده بر روی نقشه ادامه فراسو به ارتفاع ۳۰ متر، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تنا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک فیلتر تعیین گوشه با استفاده از تابع سیگموئید سریع و مشتقات افقی کل و مشتق قائم میدان پتانسیل برای ترسیم مرزهای افقی با کیفیت و دقت بالا ارائه شده است. توانایی و کارایی فیلتر تابع سیگموئید سریع در مقایسه با فیلترهای استاندارد مانند گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، زاویه تنا و زاویه تیلت گرادیان افقی کل بر روی سه مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی بدون نوفه و همراه با نوفه و داده های گرانی و مغناطیسی مربوط به معدن شماره دو گل گهر کرمان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده بر روی مدل های مصنوعی حاصل از چشمه های منشوری (prismatic) و مدل مغناطیسی مصنوعی بیشاپ (Bishop) نشان می دهد

- Pham L.T., (2020), A comparative study on different filters for enhancing potential field source boundaries: synthetic examples and a case study from the Song Hong Trough (Vietnam). *Arabian J. Geosci.*, 13, 723
- Oksum, E., Le, D., Vu, M., Hang, N., Pham, L., (2021), A novel approach based on the fast sigmoid function for interpretation of potential field data, *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 62, 543–556. <https://doi.org/10.4430/bgta0348>.
- Prasad, K. N. D; Pham, L, T; Singh, A, P,(2022), Structural mapping of potential field sources using BHG filter ,*Geocartointernational*, DOI: 10.1080/10106049.2022.2048903
- Cordell, L., Grauch, V.J.S., (1985), Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. In: Hinze WJ (ed) *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, pp 181–197
- Ferreira FJF, Souza J, Bongiolo ABS, Castro LG (2013) Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78(3): J33–J41
- Fairhead, J. D., S. E. Williams, and G. Flanagan, (2004), Testing magnetic local wavenumber depth estimation methods using a complex 3D test model: 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 742–745, <https://doi.org/10.1190/1.1851313>.
- Rao DB, Prakash MJ, Ramesh Babu N., (1990), 3-D and 2 1/2-D modeling of gravity anomalies with variable density contrast, *Geophys Prospect* 38:411–422
- Roest WRJ, Verhoef Pilkington M, (1992), Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics* 57(1):116–125
- Salem, A., S. Williams, D. Fairhead, R. Smith, and D. Ravat, (2008), Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives, *Geophysics*, 73, no.1, L1–L10 <https://doi.org/10.1190/1.2799992>
- Verduzco B, Fairhead JD, Green CM, MacKenzie C, (2004) New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *Lead Edge* 23(2):116–119
- Wijns C, Perez C, Kowalczyk P, (2005) Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics* 70:39–43
- Williams, S. E., J. D. Fairhead, and G. Flanagan, (2002), Realistic models of basement topography for depth to magnetic basement testing, 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 814817 <https://doi.org/10.1190/1.1817384>.
- ابراهیم‌زاده اردستانی، و. (۱۳۸۹)، گرانی سنجی کاربردی (اکتشاف کانی- زمین شناسی مهندسی)، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- انصاری، ع.، قاری، ح.، علمدار، ک.، مرادی، س.، (۱۳۹۰)، بررسی ارتباط بین میدان‌های پتانسیل ادامه فراسو شده با عمق قرارگیری توده‌های معدنی با بررسی موردی در معدن سنگ‌آهن گل‌گهر، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۴)، ۱۱۲-۱۱۸.
- علمدار، ک.، انصاری، ع. ح.، (۱۳۸۸)؛ تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با روش تصویرسازی پارامترهای توده (SPI)، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۲)، ۲۵-۴۰.
- Fedi M. and Florio G., (2001): Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. *Geophys. Prospect.*, 49, 40-58.
- Hsu S.K., Coppense D. and Shyu C.T., (1996): High-resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies: an enhanced analytic signal technique, *Geophy.* ,61, 1947-1957.
- Zuo B., Hu X., Liang Y. and Han Q., (2014): Detection of gravity field source boundaries using deconvolution method. *Geophys. J. Int.*, 199, 1527-1543.
- Hidalgo-Gato MC, Barbosa VC., (2017), The monogenic signal of potential-field data: A Python implementation. *Geophysics* 82(3): F9–F14
- Miller HG, Singh V., (1994), Potential field tilt a new concept for location of potential field sources, *J Appl Geophys* 32:213–217
- Alvandi. A., Toktay, H, D., Nasri, S., (2022a), Application of direct source parameter imaging (direct local wave number) technique to the 2D gravity anomalies for depth determination of some geological structures, for depth determination of some geological structures, *Acta Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00750-6>
- Alvandi, A., Toktay, H, D., Pham, L, T., (2022b), Capability of improved Logistics filter in determining lateral boundaries and edges of gravity and magnetic anomalies Tuzgolü Area Turkey, *Journal of Mining Engineering*, 17(56), pp. 57-72. doi: 10.22034/ijme.2022.538984.1889
- Pham, L.T., Oksum, E. & Do, T.D. (2019), Edge enhancement of potential field data using the logistic function and the total horizontal gradient., *Acta Geod Geophys* 54, 143–155 <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00248-6>

- Chen, T.; Zhang, G. NHF, (2022), an Edge Detector of Potential Field Data and Its Application in the Yili Basin. Minerals, 12, 149. <https://doi.org/10.3390/min12020149>
- Behnam S, Ramazi H, (2019), Interpretation of geomagnetic data using power spectrum and 3D modeling of Gol-e-Gohar magnetic derivatives, J Appl Geophys 171:13. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103829>
- Mahmoudi, S, Mahmoudi, A, Mehrabi, B (2017), Microstructure- re and geochemical evidences for genesis of the Gol-e-Gohar iron deposit, Iran J Econ Geol 9(2):463-481 (in Persian)
- Zhang X, Yu P, Tang R, Xiang Y, Zhao CJ, (2015), Edge enhancement of potential field data using an enhanced tilt angle. Explor Geophys 46(3):276-283
- Nasuti Y. and Nasuti A.; (2018), NTilt as an improved enhanced tilt derivative filter for edge detection of potential field anomalies, Geophys. J. Int., 214, 36-45.
- Eshraghi, S.A., Roshan Ravan, J. and Sabzehei, M., (1999), Geological map of Neyriz. Scale 1:100,000. Geological survey of Iran.
- G. R. J. Cooper, (2020), A modified enhanced horizontal derivative filter for potential field data, Exploration Geophysics, DOI: 10.1080/08123985.2020.1725386



Interpretation of potential field data using fast sigmoid function filter – A case study: Gol-e-Gohar mine, Kerman Province, Iran

Ahmad Alvandi ^{1,2,*}, Vahid Ebrahimzadeh Ardestani ¹ and Roshanak Rajablou ¹

1- Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- University of Applied Science and Technology (UAST), Hamedan Province Branch, Hamedan, Iran

Received: 8 October 2022; Accepted: 27 November 2022

Corresponding author: nejati@shahroodut.ac.ir

Keywords

Gravity and magnetic anomalies
Fast sigmoid filter
Edge enhancement
Gol-e-Gohar

Extended Abstract

Summary

Determination of the edges of geological structures such as dykes, faults, salt domes, etc., is one of essential issues in the interpretation of gravity and magnetic data. In this paper, to determine the edges and lateral boundaries of buried geological structures, a filter is introduced that has been obtained by combining fast sigmoid function and the horizontal and vertical derivatives of the total horizontal gradient. For this purpose, first, the efficiency and capability of the fast sigmoid function is investigated on gravity and magnetic synthetic models obtained from prismatic

buried sources and Bishop synthetic magnetic model, and then, the ability of the filter compared to standard filters such as total horizontal gradient (THDR), tilt angle (TDR), theta map (TM) and tilt angle of total horizontal gradient (TAHD), on the gravity and magnetic field data from Gol-e-Gohar mine located in Kerman Province is investigated. For both synthetic and field models, the fast sigmoid function method has better quality and resolution than other edge enhancement filters and is capable of simultaneously determining the boundaries of gravity and magnetic sources. Therefore, the fast sigmoid function filter can reliably be used in the qualitative interpretation of potential field anomalies and helps to identify the edges of subsurface structures.

Introduction

Gravity and magnetic methods are widely used geophysical methods for understanding the subsurface structures and tectonics. Some of the applications of these methods include mineral resource exploration, hydrocarbon exploration, crustal deformation studies, surface and subsurface structural mapping, etc. Much of the emphasis can be made on the structural feature delineation that helps us to determine the boundaries of various buried geological structures. In this regard, it is significant to determine the horizontal boundaries of these buried sources and to delineate their lateral extents. There are many filters used to determine the edges of potential field anomalies. Each filter has its own advantages as well as limitations. The filters used in this research are total horizontal gradient filter (THDR), tilt angle (TDR), theta map (TM) and tilt angle of total horizontal gradient (TAHD). These filters have been unsuccessful in determination of the boundaries of deep or narrow structures (Pham et al., 2019).

Methodology and Approaches

In this paper, we applied an edge detection filter that is based on fast sigmoid function for balancing the edges of synthetic and real magnetic and gravity sources (Oksum et al. 2021). The fast sigmoid filter (FSF) is defined by equation (1):

$$FSF = \frac{\left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right) - 1}{1 + \left| \frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right|} \quad (1)$$

where $\frac{\partial \text{THDR}}{\partial x}$ and $\frac{\partial \text{THDR}}{\partial y}$ are the horizontal derivatives of the total horizontal gradient and $\frac{\partial \text{THDR}}{\partial z}$ is the vertical derivative of the total horizontal gradient. The fast sigmoid filter is tested on different synthetic gravity and magnetic models in which the gravity and magnetic sources of different properties have been buried at various depths. In addition, the fast sigmoid filter is applied on the field data from an area of the Gol-e-Gohar mine, Kerman Province in Iran, where the edges of the main anomalies are well recognized in this area. All maps and computations in this paper have been carried out using MATLAB software.

Results and Conclusions

Edge detection is a fundamental process in the subsurface structural analysis and interpretation. The accuracy increases with the reduction of noise, making the use of new filters more common. Because the edge enhancement filters are based on the data derivative, they amplify the noise in the data. However, the fast sigmoid filter can equalize the weak and strong signals at the same time and does not bring any false information to the edge map. Moreover, the fast sigmoid filter can establish a good correlation between the edge detection image and the geological map of the study area that can help to draw a structural framework of the area. Finally, the fast sigmoid filter, compared to traditional edge detection filters, has the advantages of higher resolution, removal of false edges and generates subtler geological features.
