

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 کارایی 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 تیل (TDR)، زاویه تیل (TM) و زاویه تیل گرادیان افقی کل (TAHD) بر روی داده‌های گرانی و مغناطیسی میدانی معدن گل‌گلهر 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 بی‌هنجاری-های 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 گل‌گلهر

۱- مقدمه

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 Zuo et al., 2014; et al., 2022a). 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; Cordell and Grauch, 1985). 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 $\frac{\partial F}{\partial x}$ و $\frac{\partial F}{\partial y}$ 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 Singh و Miller (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).

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

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 نشان می دهد (Alvandi et al., 2022a; 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.

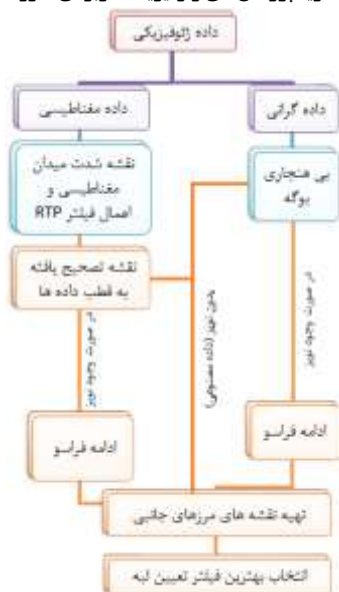
در سال ۲۰۰۵، Wijns و همکاران فیلتر دیگری با استفاده از آرک کسینوس نسبت گرادیان افقی کل و گرادیان کل (دامنه سیگنال تحلیلی) تحت عنوان فیلتر تتا (TM) معرفی کردند. مقادیر مینیمم دامنه در نقشه زاویه تتا بر روی گوشه های چشمه قرار می گیرد. این فیلتر به صورت رابطه (۳) تعریف می شود (Wijns et al. 2005).

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

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 (Alvandi et al., 2022a; Pham et al. 2019; Prasad et al., 2022). 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).

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

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



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.

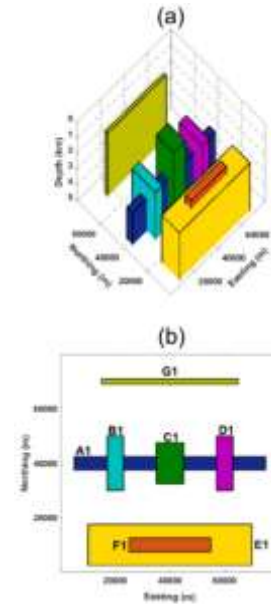
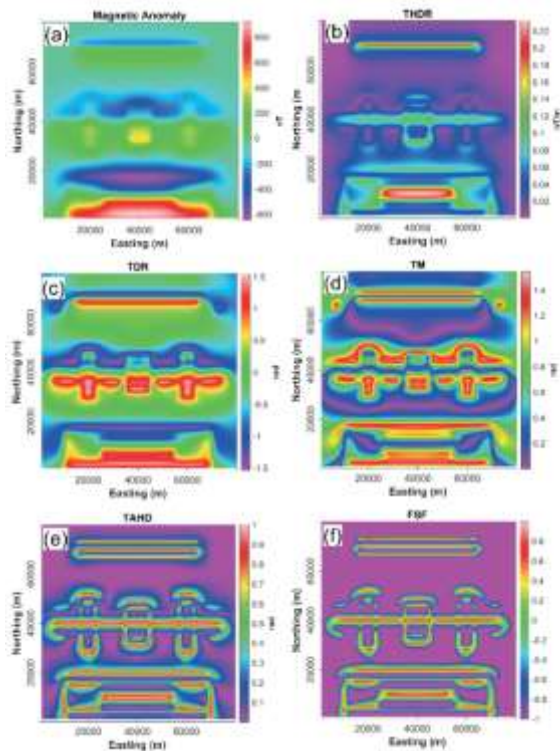
۲-۱-۱ مدل مصنوعی بدون نوفه

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 ۱۰۰ متر و با فرض میل مغناطیسی ۴۵ درجه و انحراف مغناطیسی ۱۰ 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 چشمه-های 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.

آرک‌تانژانت مشتقات میدان پتانسیل مانند فیلتر زاویه تیل، فیلتر زاویه تیل گرادبان افقی کل و.. استفاده می‌شود (Zhang et al., 2015). از طرفی به دلیل شباهت 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 بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی، Oksum (2021) با استفاده از تابع سیگموئید سریع، و مشتق اول قائم و مشتقات افقی گرادبان 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 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 ۴: (a) مدل مصنوعی سه بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی با ۷ منشور دارای پارامترهای متفاوت، (b) مدل دوبعدی بی‌هنجاری مغناطیسی

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 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

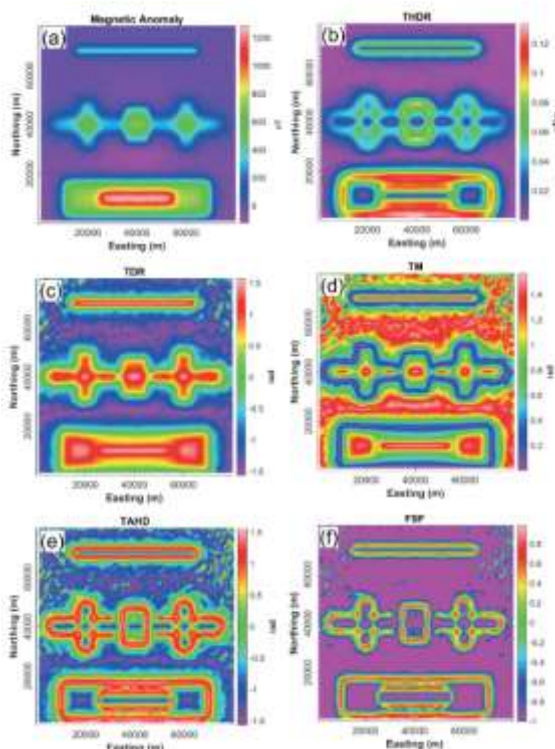
(خودپذیری مغناطیسی بر حسب SI)، آزمایشات امتداد بر حسب درجه و سایر پارامترها بر حسب کیلومتر فرض شده است)

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

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 به‌دست آمده 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 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 به‌دست آمده 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 به‌دست آمده از فیلتر تابع

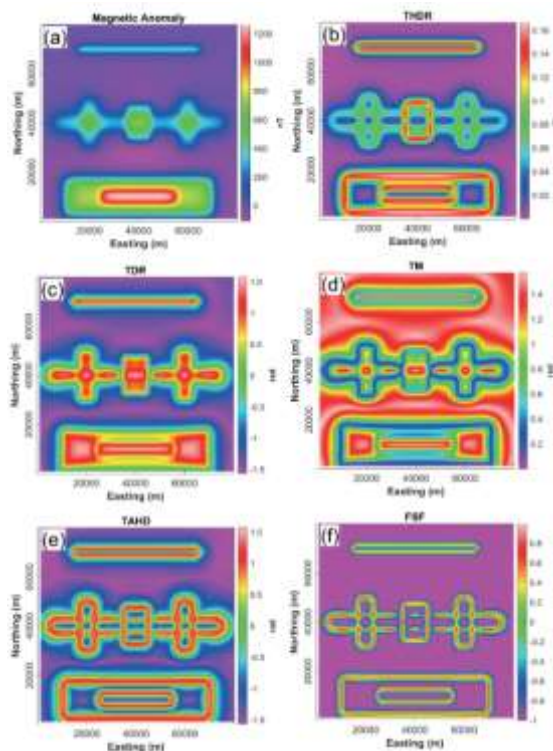
بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی اول (شکل ۳-ا) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. همانطور که انتظار داریم، نتایج تعیین گوشه بدون استفاده از فیلتر تصحیح داده به قطب رضایت‌بخش نبوده و امکان تعیین مرز جانبی چشمه‌ها به صورت درست وجود ندارد (Prasad et al., 2022). به همین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

فیلتر تابع 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 et al., 2022a; Pham et al., 2019).



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

سیگموئید 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 پخش‌شدگی 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

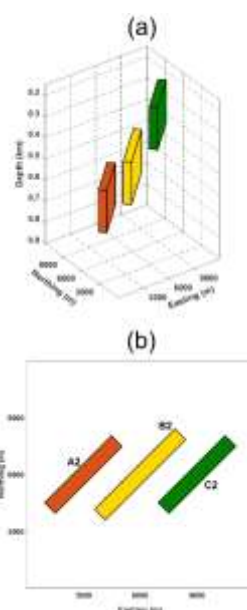
۲-۱-۲- مدل مغناطیسی همراه با نوفه

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 نويز ۰/۷۵ و با توزیع نرمال با استفاده از دستور نويز 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

۲-۲- مدل مصنوعی دوم

۲-۲-۱- 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 $12\text{km} \times 12\text{km}$ 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.



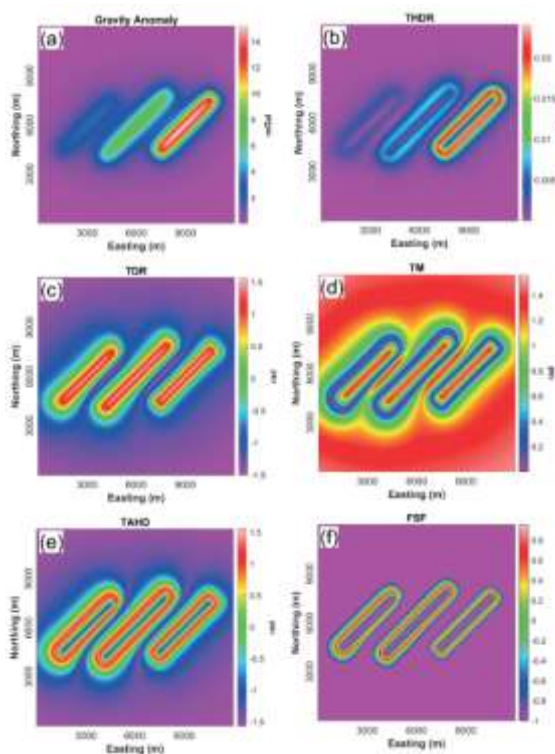
شکل ۶: (a) مدل مصنوعی سه بعدی بی هنجاری گرانی با ۳ منشور دارای عمق و چگالی متفاوت، (b) مدل مصنوعی دوبعدی بی هنجاری گرانی

جدول ۲: پارامترهای مدل مصنوعی دوم (چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، آزمایشات 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
آزموت 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- مدل گرانی همراه با نوفه

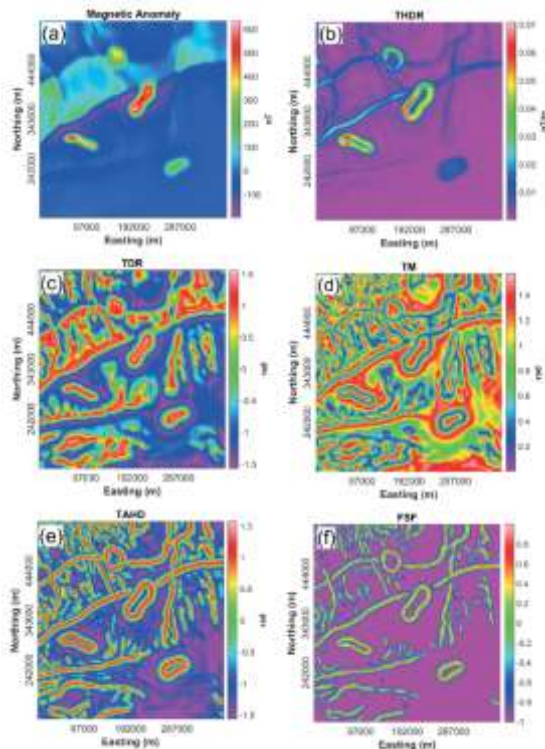
از آنجا که هدف اصلی در تولید مدل های مصنوعی نزدیک نمودن پارامترها

است. مهم‌ترین ویژگی فیلتر تابع سیگموئید سریع، حساسیت کمتر فیلتر به افزایش عمق در شرایط نوفه‌ای و عاری از نوفه است.

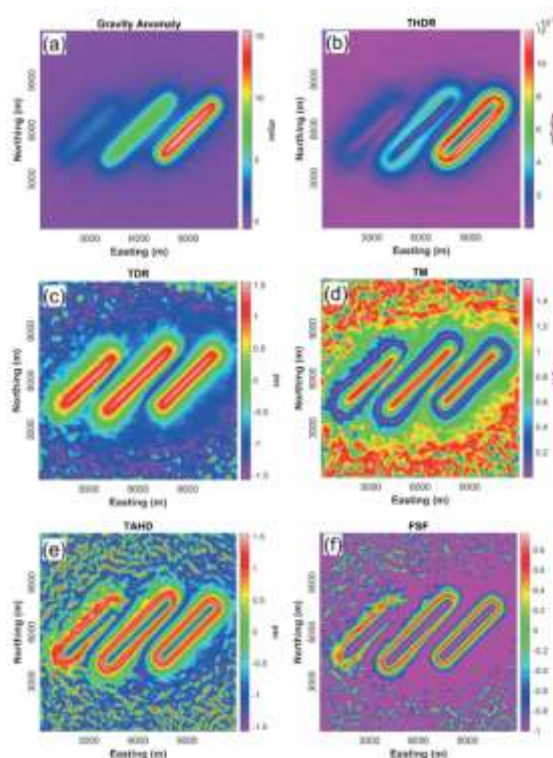
۲-۳- مدل مصنوعی سوم

۱-۲-۳- 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 به‌عنوان یک مدل مصنوعی قابل اطمینان و مناسب در سنجش و بررسی روش‌های تشخیص عمق، تعیین مرز افقی ساختارهای زمین-شناسی 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، پی-سنگ مغناطیسی و برخی توده‌های نفوذی بالای پی-سنگ را پوشانده و عمق پی-سنگ 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.



و شرایط به ساختارها و بی‌هنجاری‌های واقعی زمین‌شناسی 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 بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی 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 تنا، (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 تنا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل ۸ (a) نمایش داده شده‌اند. شکل ۸ (b) نتایج به‌دست‌آمده 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) به‌ترتیب 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

نقشه فیلتر تابع سیگموئید سریع از کیفیت بالاتری برخوردار بوده و تفسیر نقشه خروجی به مراتب آسانتر از سایر روشهای تعیین گوشه است. حساسیت کمتر به افزایش عمق و متعادل کردن سیگنالهای حاصل از منابع مختلف از ویژگیهای مهم فیلتر FSF است.

۲-۳-۲- مدل بیشاپ همراه با نوفه

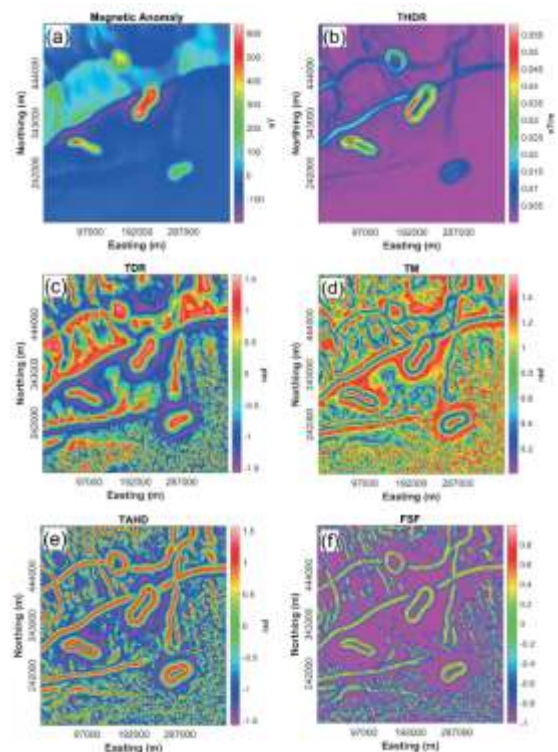
به منظور نزدیک نمودن محیط مصنوعی مدل بیشاپ به ساختار واقعی و سنجش توانایی فیلتر در شرایط نوفه‌ای، داده‌ها به ۲ درصد نوفه تصادفی با توزیع نرمال آغشته شدند. پیش از اعمال فیلترهای تعیین گوشه استاندارد و فیلتر تابع سیگموئید سریع بر روی داده‌های آغشته به نوفه، به منظور کاهش تاثیر نوفه، فیلتر ادامه فراسو به 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 می‌گردد، همانند نتایج به دست آمده از مدل‌های 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.

۳- کاربرد بر روی مدل واقعی

در این بخش توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین گوشه بی‌هنجاری، بر روی داده‌های گرانی و مغناطیسی بی‌هنجاری شماره دو گل‌گلهر سیرجان، واقع در استان کرمان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. ناحیه معدنی گل‌گلهر با داشتن معادن غنی از سنگ آهن، از مهم‌ترین قطب‌های فعال معدنی ایران محسوب می‌گردد (Alvandi et al., 2022b). کانسار سنگ آهن گل‌گلهر در شش آنومالی مجزا در مجموع با ذخیره‌ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن در شهرستان سیرجان، استان کرمان و در زون سهندج- سیرجان قرار گرفته است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۰). در این زون ذخایر متعددی از کانه‌زایی آهن وجود دارد که سنگ آهن گل-گلهر یکی از مهم‌ترین ذخایر آن محسوب می‌گردد. منطقه مورد مطالعه تقریباً بین طول‌های جغرافیایی ۲۰° ۵۵' تا ۲۴° ۵۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹° ۰۲' تا ۲۹° ۰۷' شمالی در زیر پوشش آبرفت‌های عهد حاضر و بدون هیچگونه رخنمونی از ماده معدنی واقع شده است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ Alvandi et al., 2022b). کانسار شماره دو گل‌گلهر از مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین و دگرگونی شامل انواع آمفیبولیت، میکاشیست، آندالوزیت، گارنت، استارولیت شیست، مرمر و گرافیت شیست تشکیل شده که تا حد رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. کانسار سنگ آهن گل‌گلهر یک کانسار آهن نواری نوع راپیتان است. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

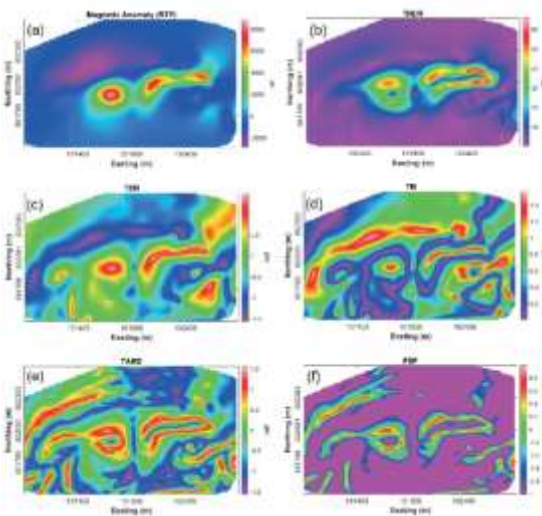
شکل ۹: (a) بی‌هنجاری مغناطیسی RTP مدل مصنوعی بیشاپ و تعیین لبه با فیلترهای مختلف، شامل: (b) گرادیان افقی کل، (c) زاویه تیلت، (d) نقشه تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

بی‌هنجاری مغناطیسی مدل بیشاپ (شکل ۹-ا) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تتا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل ۹ (ب) نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده از فیلتر گرادیان افقی کل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در نتیجه اعمال این فیلتر، گوشه چشمه‌های کم عمق تعیین شده است اما لبه چشمه‌های عمیق‌تر قابل تشخیص نیستند. شکل‌های ۹ (c) و (d) به ترتیب نتایج استفاده از روش‌های زاویه تیلت و فیلتر تتا را نشان می‌دهند. در نقشه زاویه تیلت، با وجود اینکه مرز ساختارهای عمیق و کم عمق تعیین شده اما لبه‌های ساختارهای عمیق به صورت مناسب ترسیم نشده است. در فیلتر زاویه تتا، مرزهای کاذب ایجاد شده بین ساختارهای مدل، بزرگترین مشکل در تفسیر نقشه خروجی است. شکل‌های ۹ (e) و (f) نتایج استفاده از فیلترهای TAHD و FSF را نشان می‌دهند. در هر دو روش، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متعادل شده‌اند اما



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

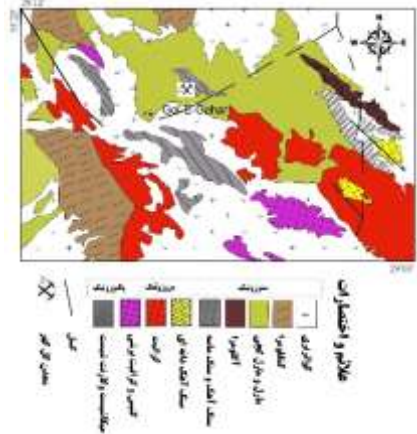
فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند. در شکل ۱۲ (b)، نقشه فیلتر گرادیان افقی کل نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مرز افقی ساختارهای کم عمق ترسیم شده‌اند اما سایر ساختارها قابل شناسایی نیستند. در شکل ۱۲ (c) نقشه زاویه تیلت نمایش داده شده است. در این فیلتر سیگنال‌های حاصل از منابع و ساختارهای عمیق و کم عمق متعادل شده‌اند اما مرز ساختارها بسیار پهن‌تر و دور از واقعیت ترسیم شده‌اند. در شکل ۱۲ (d) نقشه زاویه تتا نشان داده شده است. در نقشه تتا، 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 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 تتا، (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



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 مغناطیس‌سنجی 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 نائوتسلا 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 تتا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و

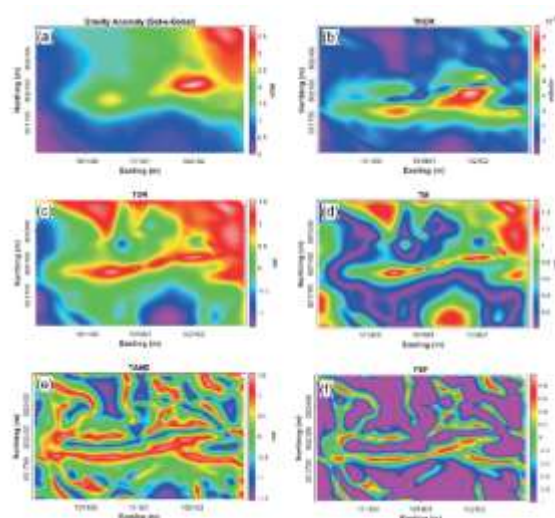
رنگ) و نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، زاویه کجی، نقشه تتا، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر تابع سیگموئید سریع در شکل (۱۳) نمایش داده شده‌اند. مشابه نتایج به‌دست‌آمده در تفسیر داده‌های مغناطیسی، مرز افقی ساختار اصلی در نقشه گرادیان افقی کل (شکل ۱۳- b) تعیین نشده و سایر آنومالی‌ها و چشمه‌ها به صورت تار ترسیم شده است. در شکل‌های (c) و (d) نقشه‌های مربوط به زاویه تیلت و تتا ترسیم شده است که با وجود متعادل نمودن سیگنال‌های حاصل از ساختارهای مختلف، تفسیر آن‌ها با مشکل روبرو است. شکل‌های ۱۳ (e) و (f) نقشه‌های مربوط به فیلترهای زاویه تیلت گرادیان افقی کل و تابع سیگموئید سریع را نمایش می‌دهند. در نقشه تابع سیگموئید سریع، مرزها با دقت و کیفیت بیشتری تعیین شده و مرز سایر آنومالی‌ها نیز قابل تشخیص هستند. در این نقشه روند شرقی- غربی آنومالی شماره دو گل‌گهر تعیین شده که به خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی و نقشه‌های زیرسطحی موجود از معدن شماره (۲) هم‌خوانی دارد.

بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده بر روی مدل‌های مصنوعی حاصل از چشمه‌های منشوری (prismatic) و مدل مغناطیسی مصنوعی بیشاپ (Bishop) نشان می‌دهد که فیلترهای استاندارد و مرسوم مانند گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، نقشه تتا و... از توانایی لازم برای تفکیک ساختارهای مدفون برخوردار نیستند و معمولاً مفسر را برای ارائه تفسیری درست دچار اشتباه می‌کنند. اما تابع سیگموئید سریع قادر است دامنه‌های کوچک و بزرگ مربوط به بی‌هنجاری‌های مختلف با عمق و گستره‌های متفاوت را به طور همزمان متعادل نموده و با کیفیت بالاتری مرزهای افقی و گوشه‌های ساختارهای زمین‌شناسی را تعیین و ترسیم نماید. همچنین با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیسی تبدیل‌یافته به قطب، فیلتر FSF مرز اصلی و روند کانسار آهن معدن شماره دو گل‌گهر کرمان و سایر ساختارهای محدوده مطالعه را با کیفیت مناسب و به دور از هرگونه هاله، پخش‌شدگی و ایجاد مرز جعلی در نقشه نهایی ترسیم کرده است. در مجموع نتایج استفاده از مدل‌های مصنوعی و میدانی نشان می‌دهد که فیلتر FSF می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند و باکیفیت در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل استفاده شود و به عنوان یک الگوریتم مناسب در ترسیم مدل‌های دو بعدی و سه بعدی به مفسر کمک نماید. البته استفاده از روش‌های حذف نویز برای مدل‌های 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 مدل‌های مغناطیسی بدون نوفه و همراه با نوفه اکیدا توصیه می‌گردد.

۵- تشکر و قدردانی

از داوران محترم به جهت ارائه نظرات و پیشنهادات ارزنده به منظور ارتقاء کیفیت مقاله تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از آقای Guy Flanagan مشاور ارشد شرکت نفت و گاز کونوکو فیلیپس به جهت

شده‌اند. کلیه تصحیحات لازم شامل تصحیحات عرض جغرافیایی، هوای آزاد، بوگه، توپوگرافی و کشند بر روی داده‌های برداشت‌شده اعمال گردیده و سپس داده‌ها شبکه‌بندی شده‌اند. نقشه بی‌هنجاری گرانی محدوده مورد مطالعه بر حسب میلی‌گال در شکل (a) ۱۳ نمایش داده شده است. همانند تفسیر داده‌های مغناطیسی، برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی‌هنجاری گرانی، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین گوشه، از فیلتر ادامه فراسو (۳۰ متر) استفاده شده، زیرا فیلتر فراسو باعث می‌شود، تا طول موج‌های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت‌تری در اختیار داشته باشیم. بیشینه و کمینه گرانی به ترتیب ۳ میلی‌گال مربوط به بخش شرقی معدن و ۰/۵ میلی‌گال مربوط به بخش غربی محدوده مورد مطالعه است. نقشه بی‌هنجاری گرانی نشان می‌دهد 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 چشمه‌های بی‌هنجار مدفون، فیلترهای تعیین گوشه بی‌هنجاری بر روی نتایج حاصل از فیلتر ادامه فراسو، اعمال شده است. محدوده آنومالی اصلی (خط‌چین سیاه



شکل ۱۳: (a) بی‌هنجاری گرانی معدن شماره دو گل‌گهر 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 تتا، (e) زاویه تیلت گرادیان افقی، (f) تابع سیگموئید سریع

۴- نتیجه‌گیری

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 تتا و زاویه تیلت گرادیان افقی کل بر روی سه مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی بدون نوفه و همراه با نوفه و داده‌های گرانی و مغناطیسی مربوط به معدن شماره دو گل‌گهر کرمان مورد

- الوندی و همکاران، تفسیر داده های میدان پتانسیل با استفاده از فیلتر تابع سیگموئید سریع AB، صفحات ۲۹-۴۲. ارسال تفسیر داده های مغناطیسی و ارائه اطلاعات تکمیلی منطقه بیشاپ صمیمانه تشکر و قدردانی می گردد. ۶-منابع
- 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>
- 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
- الوندی، ا.، توکتای، ه. د.، فام، ل. ث.، (۱۴۰۰)، تفسیر داده های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، مطالعه موردی: تاکدیس چارک، پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی- 7(4)، pp. 401-412. doi: 10.22044/jrag.2022.11430.1325
- ابراهیم زاده 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 میدان های پتانسیل ادامه فراسو شده با عمق قرارگیری توده های معدنی با بررسی موردی در معدن سنگ آهن گل گهر، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۴)، pp. ۱۲-۱۰.
- علمدار، ک.، انصاری، ع. ح.، (۱۳۸۸)، تفسیر بی هنجاری های میدان پتانسیل با روش تصویرسازی پارامترهای توده (SPI)، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۲)، pp. ۴۰-۲۵.
- 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., Coppers 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*

- G. R. J. Cooper, (2020), A modified enhanced horizontal derivative filter for potential field data, *Exploration Geophysics*, DOI: 10.1080/08123985.2020.1725386
- 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)
- 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>.
- 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.