



تفسیر داده‌های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، مطالعه موردی: ناقدیس چارک

احمدالوندی^{۱*}، هازل دینیز توکتای^۲ و لوآن ثان فام^۳

۱- اداره پژوهش، نوآوری و فناوری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، واحد استان همدان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی ژئوفیزیک، دانشگاه استانبول، استانبول، ترکیه
۳- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علوم، دانشگاه ملی ویتنام، هانوی، ویتنام

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

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

چکیده

تعیین مرز و لبه بی‌هنجاری‌های گرانی در مراحل تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و تکتونیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، توانایی فیلترهای متفاوت تعیین لبه، مانند گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه تنا، مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده و زاویه تیلت گرادیان افقی کل به منظور تعیین مرز بی‌هنجاری‌های گرانی مصنوعی و میدانی مقایسه و بررسی شده است. همچنین در این پژوهش یک فیلتر دیگر بر اساس تابع لجستیک و فیلتر گرادیان افقی کل معرفی گردیده است. به منظور بررسی توانایی و کیفیت فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در تعیین مرز بی‌هنجاری‌های گرانی، ابتدا روش بر روی داده‌های مصنوعی گرانی منشورهای دارای عمق‌ها و چگالی‌های متفاوت با نوفه و بدون نوفه اعمال و پس از تایید، داده‌های گرانی مربوط به ناقدیس چارک در استان هرمزگان مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که این فیلتر از کیفیت بالاتری نسبت به سایر فیلترهای تعیین مرز برخوردار بوده و نتایج بدست آمده نیز هماهنگی خوبی با داده‌های زمین‌شناسی دارد. از اینرو با اطمینان می‌توان از فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در تفسیر کیفی آنومالی‌های گرانی استفاده کرد. مدل مصنوعی گرانی، نقشه‌ها و الگوریتم فیلتر-های مورد استفاده، در محیط برنامه MATLAB تهیه شده است.

واژگان کلیدی

بی‌هنجاری گرانی
فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل
فیلترهای تعیین لبه
ناقدیس چارک

۱- مقدمه

این فیلتر را با بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی در اعماق مختلف بررسی کرده و نشان دادند که این روش بسیار حساس به عمق است. به طوری که با افزایش عمق منبع، کیفیت تعیین لبه فیلتر کاهش پیدا می‌کند. در ادامه Ferreira و همکاران (۲۰۱۳) فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل (TTHG) را معرفی کردند. این فیلتر در نقاط بیشینه بر روی مرز بی‌هنجاری قرار گرفته و سیگنال‌های حاصل از منابع کم‌عمق و عمیق را نیز متوازن می‌نماید (Zhang et al. 2015; Ferreira et al. 2013). Pham و همکاران (۲۰۱۹)، فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل (LTHG) را به منظور تعیین لبه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و گرانی معرفی کردند. این فیلتر که ترکیبی از تابع لجستیک و فیلتر گرادیان افقی کل است، در مقایسه با فیلترهای مرسوم تعیین لبه، از دقت مناسب‌تری در تعیین مرز بی‌هنجاری‌های عمیق و کم‌عمق برخوردار است (Pham et al. 2019).

در این پژوهش به منظور بررسی توانایی و قابلیت فیلترهای اشاره شده با تکیه بر مفاهیم مشتقات افقی و قائم، ابتدا یک مدل مصنوعی نسبتاً پیچیده گرانی (بدون نوفه و همراه با نوفه گاوسی) بررسی و در نهایت این فیلترها بر روی داده‌های میدانی منطقه چارک (تاقدیس چارک)، در جنوب ایران اعمال و با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی این پژوهش ضمن معرفی فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل، بررسی توانایی برخی از فیلترهای متداول تعیین مرز بی‌هنجاری‌های گرانی است که در سال‌های اخیر کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند.

۲- فرمول‌بندی فیلترهای تعیین لبه

در این بخش، فرمول فیلترهای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی ارائه شده است.

۲-۱- مشتق افقی کل

فیلتر مشتق افقی کل به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Cordell and Grauch, 1985)

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

که در آن F مقدار بی‌هنجاری گرانی، و $\frac{\partial F}{\partial x}$ و $\frac{\partial F}{\partial y}$ گرادیان‌های افقی بی‌هنجاری گرانی است.

۲-۲- سیگنال تحلیلی

دامنه سیگنال تحلیلی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Roest et al. 1992):

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

در این رابطه $\frac{\partial F}{\partial z}$ گرادیان قائم بی‌هنجاری گرانی است.

فیلترهای تعیین لبه نقش اساسی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل ایفا می‌نمایند. در سال‌های اخیر، روش‌های تعیین لبه به طور گسترده در تفسیر داده‌های گرانی در مقیاس کوچک (اکتشاف کانی) و در مقیاس بزرگ (مطالعات تکتونیکی) به کار رفته است. این فیلترها اصولاً بر مبنای گرادیان‌های افقی و قائم داده‌های گرانی و مغناطیسی تعریف می‌شوند. محبوب‌ترین فیلتر تعیین مرز داده‌های پتانسیل، فیلتر گرادیان افقی کل (THG) است که توسط Cordell و Grauch (۱۹۸۵) معرفی شد. فیلتر THG در تعیین لبه بی‌هنجاری‌های عمیق دارای محدودیت است و با افزایش عمق، سیگنال ضعیف می‌شود. این فیلتر نمی‌تواند لبه بی‌هنجاری‌های با دامنه بزرگ و کوچک را متوازن نماید. فیلتر محبوب دیگر، سیگنال تحلیلی (AS) یا فیلتر گرادیان کل است، که توسط Roest و همکاران (۱۹۹۲) به منظور تفسیر داده‌های گرانی و مغناطیسی معرفی شد. بیشینه مقدار دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی مانند گرادیان افقی کل، مرز بی‌هنجاری را تعیین می‌کند. این فیلتر نیز همانند فیلتر THG در متوازن نمودن بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی با دامنه‌های کوچک و بزرگ عملکرد مناسبی ندارد و حتی در تعیین مرز بی‌هنجاری‌های عمیق ضعیف‌تر رفتار می‌نماید (Cooper, 2009; Hidalgo-Gato and Barbosa, 2017). در سال‌های اخیر، فیلترهای تعیین لبه برای متوازن نمودن (balance) دامنه بی‌هنجاری‌های کوچک و بزرگ با کمی تغییر در روابط ریاضی و استفاده از مشتقات نرمال‌سازی شده میدان پتانسیل، معرفی گردیده است. نخستین روش برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌ها، فیلتر فاز محلی زاویه تیلت (TA) است که توسط Singh و Miller (۱۹۹۴) معرفی گردید. فیلتر زاویه تیلت برابر با معکوس تانژانت نسبت گرادیان قائم داده‌های گرانی به قدر مطلق مشتق افقی کل است. البته این فیلتر در تعیین مرز دقیق منابع عمیق تا حدودی ضعیف است. Verduzco و همکاران (۲۰۰۴) با ترکیب فیلتر زاویه تیلت و گرادیان افقی کل، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت (TA-THG) را به جای فیلتر زاویه تیلت به دلیل تفکیک‌پذیری (resolution) بیشتر در تعیین لبه بی‌هنجاری میدان پتانسیل معرفی کردند. اگرچه با افزایش عمق منبع، دامنه سیگنال تبدیل شده در این فیلتر کاهش می‌یابد (Ferreira et al. 2013). مهمترین عیب این فیلتر حساسیت بالای آن به نوفه است. Wijns و همکاران (۲۰۰۵) فیلتر نقشه تتا (TM) را بر اساس گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی معرفی کردند. دقت این روش در تعیین لبه منابع با دامنه‌های متفاوت تا حدی مناسب است، اگرچه منابع عمیق به صورت پخش و هاله‌ای در نقشه‌ها نمایان می‌شوند (Cooper and Cowan 2008). Cooper و Cowan (۲۰۰۶) یک فیلتر اصلاح شده از زاویه تیلت را تحت عنوان فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده (TDX) معرفی کردند. در واقع در این فیلتر، صورت و مخرج زاویه تیلت با یکدیگر جابه‌جا شده است. فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، برابر با مشتق افقی کل به قدر مطلق مشتق قائم گرانی است. البته Ferreira و همکاران (۲۰۱۳)،

$$TTHG = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial TTHG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial TTHG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TTHG}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (7)$$

۲-۸- تابع لجستیک گرادیان افقی کل

فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل، مبتنی بر نسبت مشتق قائم و مشتق افقی کل، گرادیان افقی کل و تابع لجستیک است که برای تعیین لبه دامنه‌های کوچک و بزرگ بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل معرفی شده است. ایده معرفی این فیلتر این است که تابع لجستیک یک تابع ریاضی است که یک منحنی سیگموئیدی تولید می‌کند. شکل S تابع لجستیک بسیار شبیه تابع تانژانت معکوس در فیلترهای TA، TDX و TTHG است که برای شناسایی لبه‌های بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شود (Pham et al. 2019). فیلتر LTHG به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$LTHG = \left[1 + \exp \left[- \frac{\frac{\partial TTHG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial TTHG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TTHG}{\partial y}\right)^2}} \right] \right]^{-K} \quad (8)$$

متغیر K یک ثابت مثبت است که کارایی فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل را کنترل و مقدار آن نیز توسط مفسر تعیین می‌شود.

البته نتایج به دست آمده بر روی مدل‌های مصنوعی نشان داده که مقدار عددی K بهتر است برای مدل‌های مختلف بین ۲ تا ۱۰ در نظر گرفته شود (Pham et al. 2019). ویژگی اصلی فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل، قرار گرفتن دامنه بیشینه بر روی لبه‌های بی‌هنجاری، عدم حساسیت به افزایش عمق چشمه، و متوازن کردن بی‌هنجاری‌های حاصل از چشمه‌های عمیق و کم عمق است (Pham et al. 2019).

به منظور درک بهتر و بررسی تاثیر متغیر K بر روی کیفیت فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل، دو بلوک دوبعدی با عمق و چگالی‌های متفاوت در برنامه متلب تولید شده است (شکل ۱). بی‌هنجاری گرانی ایجاد شده توسط این دو مدل در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از مقادیر مختلف K (۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵) در شکل ۱ (ب، ج، د، و، ه و ن) به ترتیب نشان داده شده است. سیگنال‌های LTHG بر روی لبه هر دو مدل مصنوعی به ازای مقادیر $K \geq 2$ به صورت تیز و صحیح رسم شده است. همچنین به ازای $K > 10$ (شکل ۱: ن) سیگنال LTHG به صورت پهن برای دو مدل ترسیم شده که مرز بی‌هنجاری‌ها را پهن تر و غیر واقعی نشان داده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت بهترین مقدار برای متغیر K، $2 \leq K \leq 10$ است.

۲-۳- زاویه تیلت

فیلتر زاویه تیلت، یک فیلتر فاز محلی مرسوم در تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Miller and Singh., 1994)

$$TA = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (3)$$

۲-۴- گرادیان افقی کل زاویه تیلت

فیلتر گرادیان افقی کل زاویه تیلت، به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (Verduzco et al. 2004):

$$TA-THG = \sqrt{\left(\frac{\partial TA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TA}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

۲-۵- نقشه تنا

فیلتر نقشه تنا، با استفاده از گرادیان افقی کل و دامنه سیگنال تحلیلی، به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (Wijns et al. 2005)

$$TM = \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{|AS|} \quad (5)$$

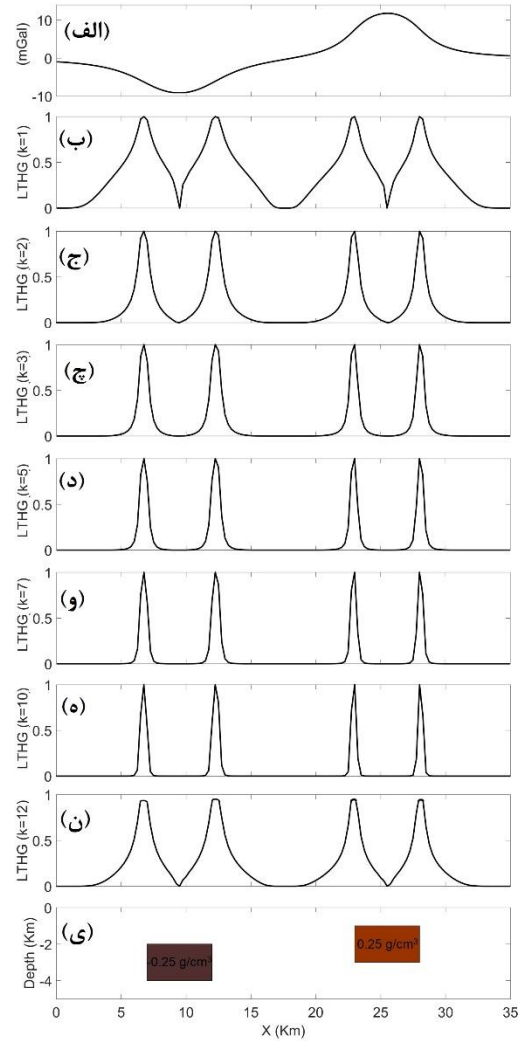
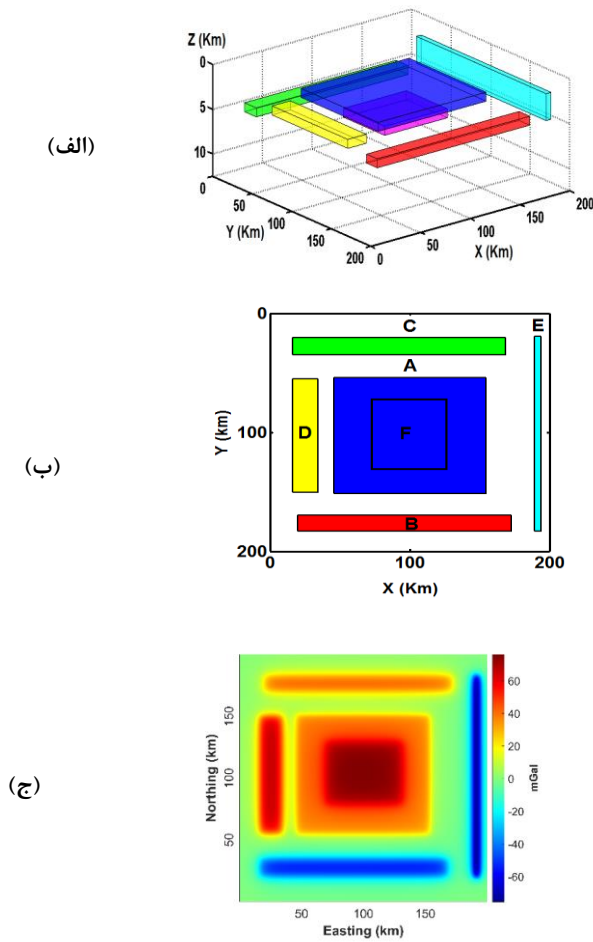
۲-۶- مشتق کل افقی نرمال سازی شده

فیلتر مشتق کل افقی نرمال سازی شده، با استفاده از گرادیان افقی کل و مشتق قائم میدان گرانی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود (Cooper and Cowan, 2006):

$$TDX = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\left| \frac{\partial F}{\partial z} \right|} \right] \quad (6)$$

۲-۷- زاویه تیلت گرادیان افقی کل

فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی در بازه $\frac{\pi}{2}$ و $-\frac{\pi}{2}$ به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود (Ferreira et al. 2013):



شکل ۲: الف) مدل مصنوعی سه بعدی بی‌هنجاری گرانی، ب) مدل مصنوعی دوبعدی بی‌هنجاری گرانی، ج) بی‌هنجاری گرانی ایجاد شده با شش منشور مدفون بر حسب میلی گال

پارامترهای مدل مصنوعی نیز در جدول (۱) شرح داده شده است. مدل مصنوعی با شش منشور مدفون با چگالی مثبت و منفی و عمق‌های متفاوت در یک شبکه منظم ۲۰۱×۲۰۱ در جهت شمال-جنوب و شرق-غرب با فاصله نمونه‌برداری یک کیلومتر با استفاده از فرمول ارائه شده توسط Rao و همکاران (۱۹۹۰) در محیط برنامه متلب تولید شده است. در مدل مصنوعی، عمق بالا و پایین منشورهای B, C و F و تباین چگالی منشورهای A و F یکسان هستند (جدول ۱).

جدول ۱: پارامترهای چگالی و هندسی مدل مصنوعی گرانی

پارامترها/برچسب منشور	A	B	C	D	E	F
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱	۱/۵	-۲	۲	-۱/۵	۱
طول (کیلومتر)	۱۰۵	۱۵۰	۱۵۰	۹۰	۱۶۰	۱۰۰
عرض (کیلومتر)	۹۵	۱۳	۱۵	۲۰	۴	۵۰
عمق بالا (کیلومتر)	۲	۴	۴	۳	۲	۴
عمق پایین (کیلومتر)	۳	۵	۵	۴	۵	۵

شکل ۳: الف) بی‌هنجاری گرانی ایجاد شده توسط مدل‌های مصنوعی (بلوک دوبعدی) مدفون؛ ب) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=1؛ ج) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=2؛ د) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=3؛ ه) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=5؛ و) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=7؛ ز) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=10؛ ح) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار K=12؛ ی) مدل دوبعدی در نظر گرفته شده با چگالی ۰/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب (بلوک سمت راست) و ۰/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب (بلوک سمت چپ) و عمق‌های متفاوت

۳- کاربرد بر روی مدل گرانی مصنوعی

در این بخش توانایی فیلترهای پیشنهاد شده برای تعیین لبه بی‌هنجاری مصنوعی گرانی با منشورهای دارای ویژگی‌های متفاوت با نوفه و بدون نوفه بررسی شده است. مدل دو بعدی و سه بعدی مدل گرانی به همراه بی‌هنجاری گرانی تولید شده بر حسب میلی گال در شکل (۲) نمایش داده شده است.

گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی به ترتیب نمایش داده شده است. با توجه به این شکل فیلترهای گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های عمیق با دامنه‌های کوچک نمی‌باشند و تا حدودی مرز منبع کم‌عمق با دامنه بزرگ (منشور E) در نقشه مشخص شده است. البته منشور (A) نیز دارای عمق کمی است که در نقشه سیگنال تحلیلی به دلیل ادغام با منشور (F) به صورت هاله‌ای و پخش نمایش داده شده است. اگرچه مرز بی‌هنجاری کم‌عمق و نازک (مانند منشور E) در سیگنال تحلیلی بهتر مشخص شده است. در شکل ۴ (د) و (و) نتایج به دست آمده از روش‌های زاویه تیلت و مشتق افقی کل زاویه تیلت به ترتیب نمایش داده شده است. نقشه بدست آمده با روش مشتق افقی کل زاویه تیلت، با توجه به حساسیت بالا به نوفه کیفیت مناسبی نداشته و نقشه زاویه تیلت نیز دارای مرزهای افقی واضح و مشخصی نیست. در نقشه TDX و TM مرز بی‌هنجاری‌های کم‌عمق و عمیق، به دور از واقعیت ترسیم شده است. با توجه به شکل ۴ (ط) و (ی)، نتایج به دست آمده از فیلترهای زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل رضایت بخش بوده است. هر چند کیفیت تعیین مرز بی‌هنجاری در روش LTHG بیشتر و حساسیت آن به نوفه نسبت به فیلتر TTHG و سایر فیلترهای تعیین لبه مورد استفاده در این پژوهش به مراتب کمتر است. البته باید اشاره کرد که ضمن حساسیت فیلترهای تعیین مرز به نوفه به دلیل وجود مشقات جهتی در روابط، در این همه فیلترها، اندازه لبه بی‌هنجاری‌های مدفون دورتر از مشخصات واقعی آن‌ها ترسیم می‌گردد (Pham et al. 2019).

۴- استفاده از فیلترها بر روی مدل گرانی میدانی

در این بخش توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین لبه بی‌هنجاری، بر روی داده‌های تاقدیس چارک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

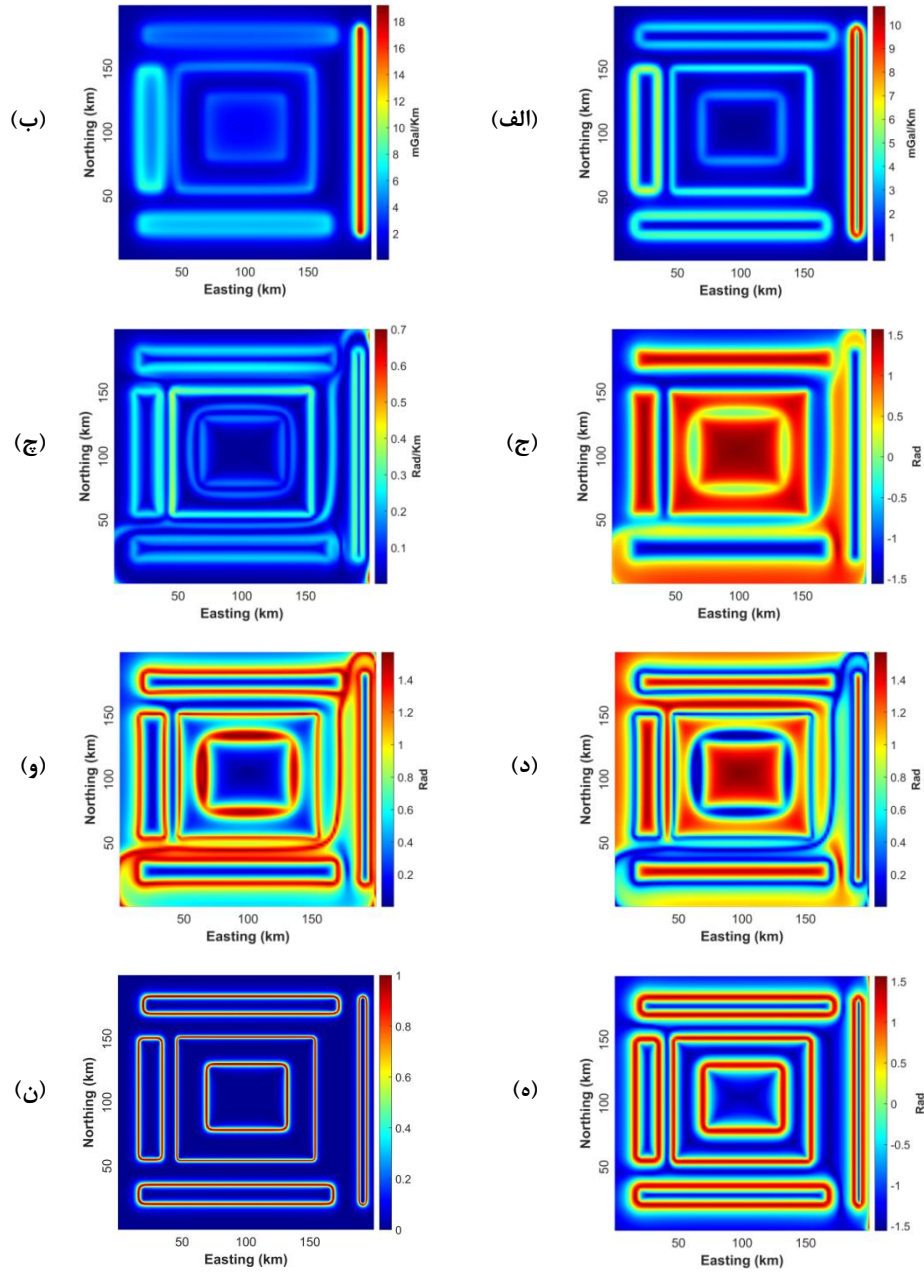
۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

وجود میدان‌های عظیم نفت و گاز، زاگرس را به یکی از مهم‌ترین حوضه‌های رسوبی جهان تبدیل نموده است. منطقه مورد نظر که در حوزه نفت-خیز جنوب زاگرس در استان هرمزگان واقع شده است، بین طول‌های جغرافیایی $53^{\circ}08'$ تا $54^{\circ}38'$ و عرض‌های جغرافیایی $26^{\circ}71'$ تا $27^{\circ}00'$ واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، به دلیل وجود رخنمون‌های گنبدی شکل که در دو طرف تاقدیس چارک قرار دارند، از قابلیت اکتشاف نفت و گاز برخوردار است (فرمانی، ۱۳۸۲). این منطقه از شرق به لاوران، چاه درویش، ورزنگ و دره رجیلین، از شمال به دهنو مراغ، بهمنی، ده نومیر، رستمی و کوردان، از غرب به کلات، مزرعه جبران، گزدال و رستاق و از سمت جنوب نیز به خلیج فارس منتهی می‌شود (فرمانی، ۱۳۸۲؛ مهرنیا و همکاران، ۱۳۹۲). سازندهای آسماری، پابده و گورپی، سازندهای مهم منطقه به شمار می‌آیند (فرمانی، ۱۳۸۲). نقشه زمین‌شناسی و محدوده مورد مطالعه در شکل (۵) نمایش داده شده است.

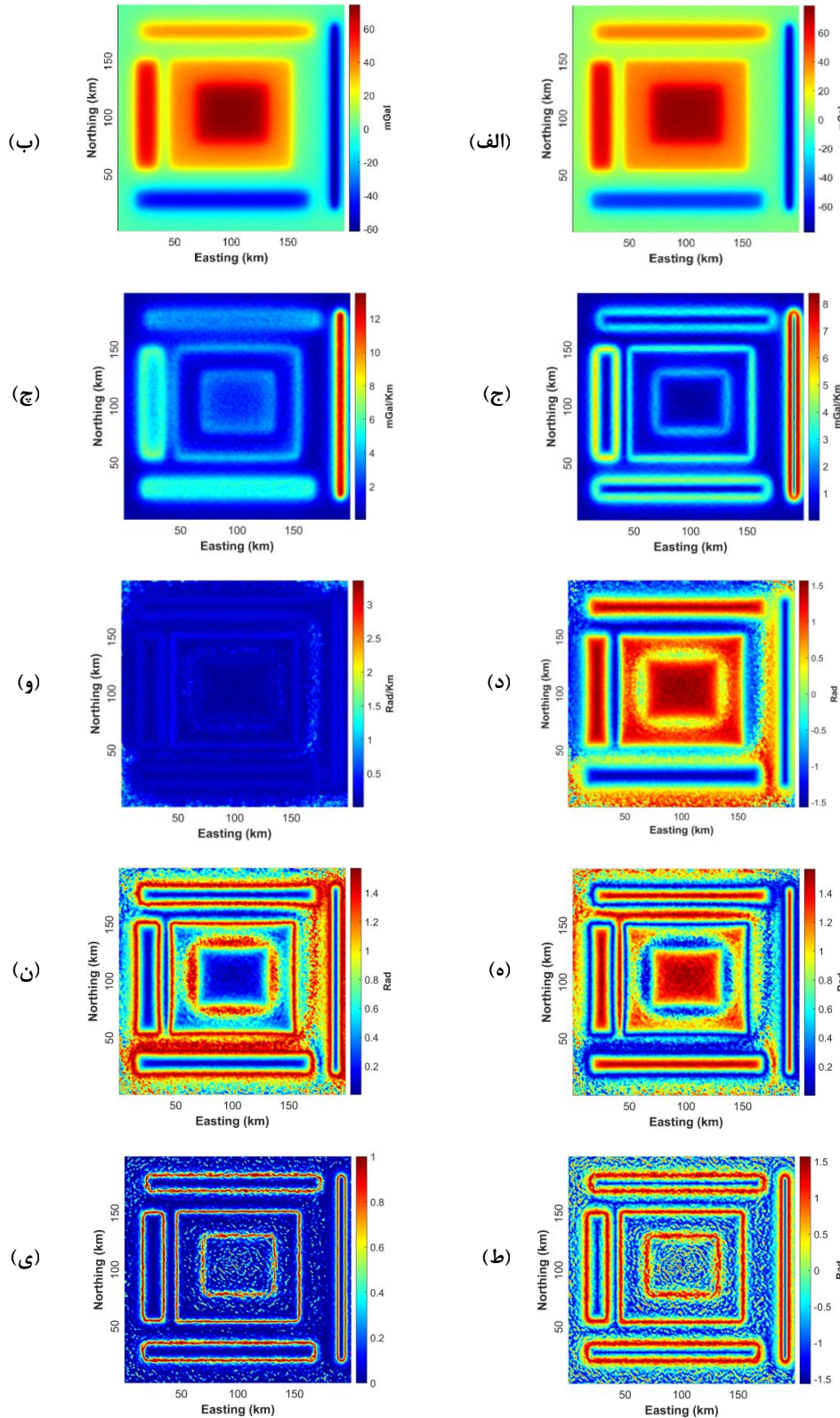
نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین لبه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه تنا، مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، زاویه تیلت گرادیان افقی کل و فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در شکل (۳) نمایش داده شده است. در شکل ۳ (الف) و (ب) نتایج به دست آمده از روش‌های گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی به ترتیب نمایش داده شده است. در این دو تصویر، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و حتی فیلتر سیگنال تحلیلی قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های عمیق نمی‌باشد. در شکل ۳ (ج)، (چ)، (د) و (و) به ترتیب نتایج استفاده از فیلتر زاویه تیلت، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه تنا و مشتق افقی نرمال‌سازی شده نمایش داده است. هر چند فیلتر TA دامنه‌های سیگنال را برجسته می‌کند اما مقدار بیشینه زاویه تیلت در مرکز چشمه و پربند صفر، لبه آنومالی را تعیین نموده و نمی‌توان فیلتر زاویه تیلت را صرفاً به عنوان یک فیلتر برآورد مرز در نظر گرفت (Cooper and Cowan 2008). فیلتر TA-THG مرز بی‌هنجاری را گسترده‌تر و به صورت هاله‌ای ترسیم کرده است. در فیلتر TM مرز بی‌هنجاری‌های ضعیف و قوی به طور همزمان برجسته شده، اما مرز برآوردی، دور از واقعیت بوده و به صورت هاله‌ای ترسیم شده است. مقدار ماکزیمم در نقشه TDX مرز بی‌هنجاری را تعیین کرده است. البته اندازه لبه بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر (منشور B و F) بیشتر از مشخصات واقعی آن‌ها است. در شکل ۳ (ه) از فیلتر TTHG برای تعیین لبه بی‌هنجاری در مدل مصنوعی استفاده شده است. این فیلتر وابستگی کمتری به عمق دارد و مقدار بیشینه فیلتر، لبه بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در شکل ۳ (ن)، نتایج به دست آمده از فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی مشابه با فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل در تعیین مرز بی‌هنجاری است. البته با این تفاوت که نقشه LTHG به دور از هرگونه هاله و پخش‌شدگی دارای وضوح و کیفیت بهتری نسبت به TTHG و سایر فیلترها است. این فیلتر مرز بی‌هنجاری‌های ضعیف و قوی را به خوبی برجسته می‌کند.

از آنجا که هدف اصلی در تولید مدل‌های مصنوعی نزدیک نمودن پارامترها و شرایط به ساختارها و بی‌هنجاری‌های واقعی زمین‌شناسی است، مدل مصنوعی تولید شده، با ۵ درصد نوفه تصادفی آغشته شده و نقشه بی‌هنجاری گرانی همراه با نوفه در شکل (۴) نمایش داده شده است. به منظور کاهش تأثیر نوفه، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین مرز، فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۱ کیلومتر بر روی داده‌های گرانی مصنوعی اعمال شده است. نتایج حاصل از فیلترهای مختلف تعیین لبه در شرایط نوفه‌ای شامل فیلتر گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه تنا، مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، زاویه تیلت گرادیان افقی کل، و فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در شکل (۴) نمایش داده شده است. شکل ۴ (الف) و (ب) به ترتیب نقشه بی‌هنجاری گرانی مصنوعی آغشته به نوفه گوسی و ادامه فراسو نشان داده شده است. در شکل ۴ (ج) و (چ) نتایج به دست آمده از روش‌های

الوندی و همکاران، تفسیر داده های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، صفحات ۴۰۱-۴۱۲.



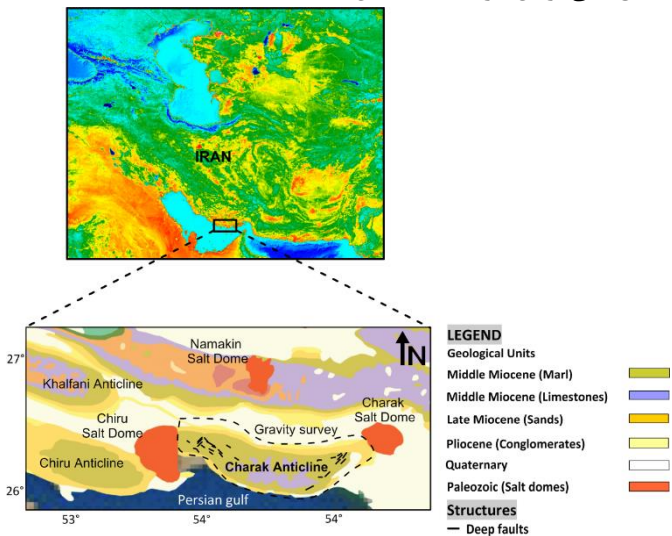
شکل ۳: تعیین لبه بی هنجاری گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف، شامل: الف) گرادیان افقی کل، ب) سیگنال تحلیلی، ج) زاویه تیلت، چ) مشتق افقی کل زاویه تیلت، د) نقشه تنا، و) مشتق کل افقی نرمال سازی شده، ه) زاویه تیلت گرادیان افقی، ن) تابع لجستیک گرادیان افقی کل ($K=2$) فرض شده است



شکل ۴: الف) نقشه بی‌هنجاری گرانی آغشته شده به نوفه؛ ب) اعمال فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه (الف)؛ تعیین لبه بی‌هنجاری گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف، شامل: ج) گرادیان افقی کل، چ) سیگنال تحلیلی، د) زاویه تیلت، و) مشتق افقی کل زاویه تیلت، ه) نقشه تنا، ن) مشتق کل افقی نرمال سازی شده، ط) زاویه تیلت گرادیان افقی، ی) تابع لجستیک گرادیان افقی کل ($K=2$ فرض شده است)

الوندی و همکاران، تفسیر داده های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، صفحات ۴۰۱-۴۱۲.

فیلتر زاویه تیلت، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه زاویه تتا و مشتق افقی نرمال سازی شده نمایش داده شده اند.

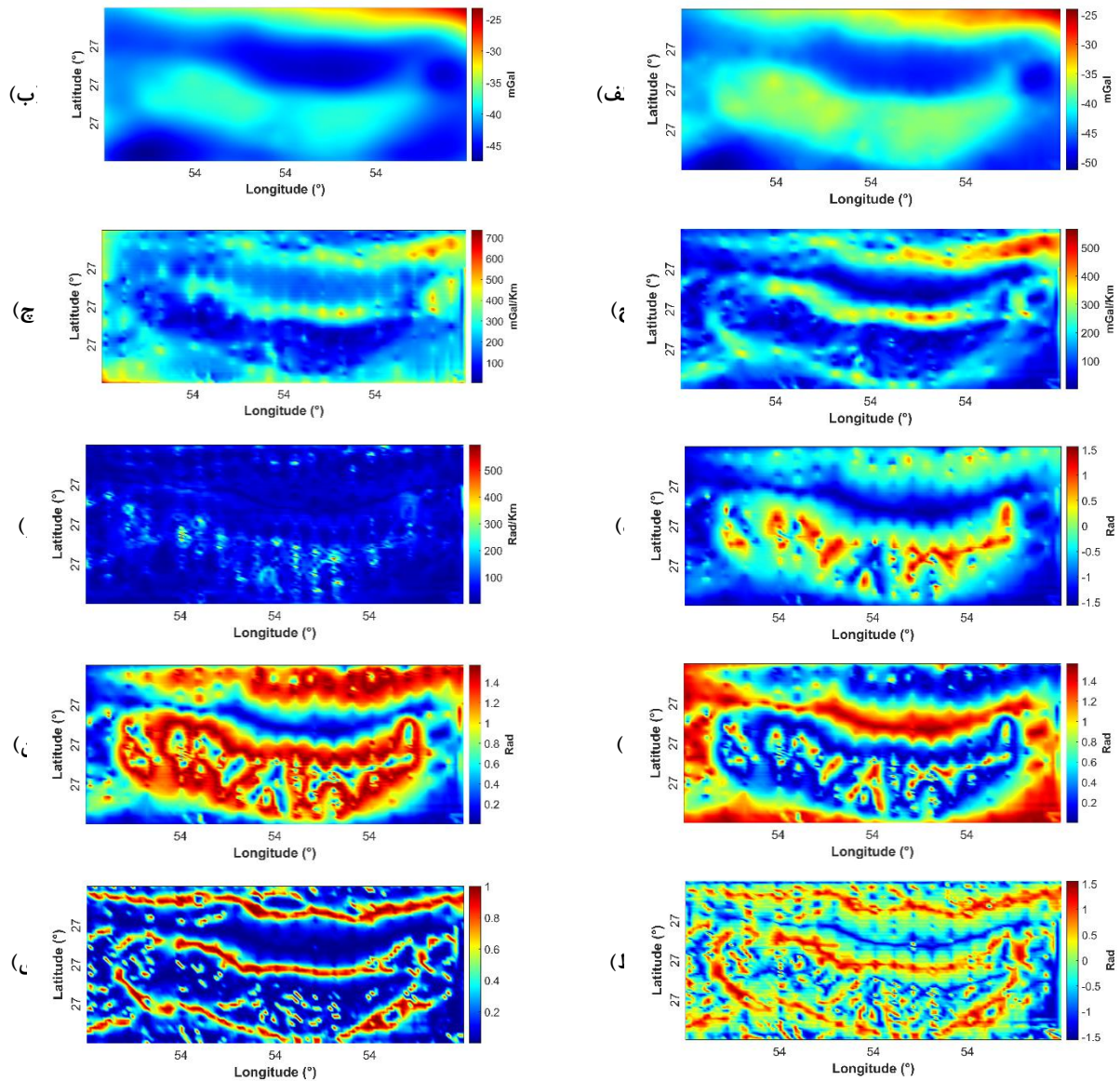


شکل ۵: الف) موقعیت تاقدیس چارک در نقشه هوایی ایران (استخراج شده از وبسایت OneGeology به نشانی <http://portal.onegeology.org>؛ ب) نقشه ساده زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (فرمانی، ۱۳۸۲) و محدوده مورد مطالعه که با خط چین نمایش داده شده است.

در نقشه زاویه تیلت، گسل های عمیق و مرز نمک درون تاقدیس و مرز اصلی تاقدیس اصلی به صورت هاله ای ترسیم شده است. نتایج به دست آمده از نقشه مشتق افقی کل زاویه تیلت رضایت بخش نبوده و تشخیص مرز تاقدیس امکان پذیر نیست. در نقشه زاویه تتا و مشتق افقی نرمال سازی شده مرز اصلی تاقدیس مشخص شده اما بی هنجاری های درون تاقدیس به صورت پخش و هاله ای ترسیم شده است. در شکل های ۶ (ط) و ۶ (ی) از روش های TTHG و LTHG استفاده شده که در مقایسه با فیلتر TTHG، نقشه LTHG از کیفیت و تفکیک پذیری بیشتری برخوردار است. نقشه LTHG به دور از هرگونه هاله و پخش شدگی دارای وضوح و کیفیت بهتری نسبت به سایر فیلترها است. این فیلتر مرز تاقدیس اصلی، نمک درون تاقدیس و گسل های عمیق را به خوبی برجسته کرده است.

داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی توسط مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران (NIOC) برداشت شده است. کلیه تصحیحات لازم مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه (با فرض چگالی ۲/۳ گرم بر سانتی متر مکعب)، تصحیح توپوگرافی و تصحیح کشند بر روی داده های برداشت شده اعمال شده و داده ها با فاصله ۲/۵ کیلومتر شبکه بندی شده است. نقشه بی هنجاری گرانی بوگه منطقه بر حسب میلی گال در شکل (۶: الف) نمایش داده شده که ساختارهای نمکی (گنبد های نمکی در بخش شمال شرقی و جنوب غربی محدوده) و تاقدیس چارک از شرق به غرب در نقشه بی هنجاری بوگه قابل مشاهده است (شکل ۶: الف). برای کاهش نوفه در نقشه بی هنجاری بوگه، از نقشه ادامه فراسو (۲۰۰ متر) استفاده شده، زیرا فیلتر فراسو باعث می شود که طول موج های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت تری در اختیار داشته باشیم (شکل ۶: ب). بیشینه و کمینه گرانی به ترتیب ۲۴- میلی گال مربوط به رخساره های مارنی و ۵۴- میلی گال مربوط به گنبد نمکی محاسبه شده که با نقشه زمین شناسی (شکل ۵) از انطباق مکانی تقریباً مناسبی برخوردار است. اهداف اصلی این پژوهش، نخست یافتن وجود بی هنجاری کم در بخش میانی تاقدیس - که دلیل آن وجود نمک در این محدوده می باشد - تشخیص گسل های عمیق موجود و تعیین مرز تاقدیس در محدوده مورد مطالعه است. البته موقعیت تاقدیس تا حدی در نقشه های زمین شناسی و بوگه قابل مشاهده است اما تشخیص دو مورد اول در نقشه بی هنجاری گرانی بوگه به سختی امکان پذیر است (شکل ۶). به منظور شناسایی گسل های عمیق و تعیین مرز بی هنجاری درون تاقدیس، فیلترهای تعیین لبه بر روی نقشه ادامه فراسو اعمال شده که در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین برای تعیین مرز اصلی تاقدیس، فیلترهای تعیین لبه بر روی داده های میدانی ادامه فراسو، اعمال شده است. نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین لبه شامل فیلتر گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، مشتق افقی کل زاویه تیلت، نقشه تتا، مشتق کل افقی نرمال سازی شده، زاویه تیلت گرادیان افقی کل، و فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در شکل (۶) نمایش داده شده است.

در شکل ۶ (ج) و (د) نتایج به دست آمده از روش های گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی به ترتیب نمایش داده شده که اصلاً قابل اطمینان نیستند. در شکل های ۶ (د)، (و)، (ه) و (ن) به ترتیب نتایج استفاده از



شکل ۶: الف) نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه؛ ب) اعمال فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه (الف)؛ تعیین لبه بی‌هنجاری گرانی با فیلترهای مختلف. شامل: ج) گرادیان افقی کل، چ) سیگنال تحلیلی، د) زاویه تیلت، و) مشتق افقی کل زاویه تیلت، ه) نقشه تتا، ن) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، ط) زاویه تیلت گرادیان افقی و ی) تابع لجستیک گرادیان افقی کل ($K=2$ فرض شده است)

بی‌هنجاری است. نمک موجود در تاقدیس، گسل‌های عمیق و مرز اصلی تاقدیس چارک به وضوح در نقشه تابع لجستیک گرادیان افقی کل قابل مشاهده است.

منابع

- تلفورد، دلبیو، جلدارت، ال.، شریف، از. و کیز، دی.، ۱۹۸۹، ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه: زمردیان، ح.، حاجب حسینی، ح.، انتشارات دانشگاه تهران، ۱، ۶۹۶
- حاجب حسینی، ح.، انتشارات دانشگاه تهران، فرمانی، ف.، ۱۳۸۲، گزارش اکتشافات گرانی در منطقه چارک-نمکین، شرکت ملی نفت ایران. مهنیا، س.، و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، و تیموریان، ا. (۱۳۹۲). استفاده از

نتیجه‌گیری

در مدل مصنوعی وضوح نتایج برای فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل حتی با حضور نوفه بالا است و مرزهای بی‌هنجاری گرانی در عمق‌های مختلف به خوبی تشخیص داده شده که نشان از حساسیت کمتر فیلتر LTHG به نوفه نسبت به سایر فیلترها می‌باشد. این فیلتر به دلیل مستقل بودن از عمق، برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌ها، بسیار مناسب می‌باشد. در این روش مرز چشمه‌های مصنوعی ضخیم و نازک به خوبی تعیین شده است. هدف اصلی پژوهش، تعیین مرز بین تاقدیس و نمک و شناسایی گسل‌های عمیق با استفاده از فیلتر LTHG است که در نقشه گرانی قابل استخراج نیست. بیشینه دامنه نقشه LTHG، نشان‌دهنده مرز

- Miller HG, Singh V (1994) Potential field tilt a new concept for location of potential field sources. *J Appl Geophys* 32:213-217
- Pham, L.T., Oksum, E. & Do, T.D. Edge enhancement of potential field data using the logistic function and the total horizontal gradient. *Acta Geod Geophys* 54, 143-155 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00248-6>
- 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 J, Pilkington M (1992) Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics* 57(1):116-125
- 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
- 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
- روش برخال برای تعیین چگالی بوگه لوح سنگی در منطقه چارک (جنوب ایران). مجله ژئوفیزیک ایران, ۷(۱), ۳۴-۵۰.
- Cooper GRJ (2009) Balancing images of potential-field data. *Geophysics* 74: L17-L20
- Cooper GRJ, Cowan DR (2006) Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Comput Geosci* 32:1585-1591
- Cooper GRJ, Cowan DR (2008) Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics* 73(3):H1-H4
- Cordell L, Grauch VJS (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
- Hidalgo-Gato MC, Barbosa VC (2017) The monogenic signal of potential-field data: a Python implementation. *Geophysics* 82(3): F9-F14



Interpretation of gravity data using logistic function and total horizontal gradient (LTHG) - A case study: Charak anticline

Ahmad Alvandi^{*1}, Hazel Deniz Toktay² and Luan Thanh Pham³

1- Head of Research and Technology department, University of Applied Science and Technology, Hamedan Province Branch, Hamedan, Iran

2- Assistant Professor , Department of Geophysical Engineering, Istanbul University Cerrahpasa, Istanbul, Turkey

3- Assistant Professor , Faculty of Physics, University of Science, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

Received: 28 November 2021; Accepted: 8 March 2022

Corresponding author: sim.alvandi@gmail.com

Keywords

Gravity anomaly
Total horizontal gradient logistic filter
Edge enhancement
Charak anticline

Extended Abstract

Summary

Determination of the boundaries and edges of gravity anomalies is of particular importance in the interpretation stages of geological and tectonic structures. In this paper, the ability of different edge enhancement filters, such as total horizontal gradient, analytical signal, tilt angle, total horizontal derivative of tilt angle, theta map, normalized total horizontal derivative, and tilt angle of total horizontal gradient to determine the edges of synthetic and real gravity anomalies is examined and compared. Moreover, in this research, another filter based on logistic function and total horizontal gradient filter is introduced. In order to evaluate the ability and quality of the total horizontal gradient logistic filter in determination of the boundaries of gravity anomalies, first, the filter is applied to the synthetic gravity data of prisms having different depths and density contrasts with noise and without noise, and after

observing successful efficiency of the filter on the synthetic gravity data, it is applied on the gravity data related to Charak anticline in Hormozgan Province, Iran. Based on the obtained results, it can be concluded that this filter is superior compared to other boundary filters, and the obtained results are in good agreement with the geological information of the study area. Hence, the total horizontal gradient logistic filter can reliably be used in the qualitative interpretation of gravity anomalies. The synthetic gravity model, results and filter algorithm have been prepared in MATLAB program environment.

Introduction

Edge determination filters play an essential role in the interpretation of potential field data. In recent years, edge enhancement methods have been widely used in the interpretation of mineral exploration and tectonic studies data. These filters are mainly defined based on horizontal gradients and vertical magnetic and gravity data. In this paper, the ability of different filters in order to determine the edges of synthetic and real field gravity anomalies is investigated and compared. The filters, used in this paper, include total horizontal gradient, analytical signal, tilt angle, horizontal derivative of total tilt angle, theta map, total horizontal derivative of normalization and total horizontal gradient tilt angle. The main purpose of this study, while introducing the total horizontal gradient logistic filter, is to investigate the ability of some common filters to determine the boundaries of gravity anomalies. These filters are more applicable in recent years.

Methodology and Approaches

The introduced filter in this paper is the logistic function of the total horizontal gradient (LTHG), based on the ratio of the vertical derivative to the total horizontal derivative and the logistic function. This filter is used to determine the edge of small and large amplitudes of potential field anomalies. The idea of introducing this filter is that the logistic function is a mathematical function that produces a sigmoid curve. The logistic function has a S shape, which is a much like the reverse tangent function in TA, TDX and TTHG filters that can be used for edge enhancement of potential field

anomalies. The LTHG filter is defined as follows:

$$\text{LTHG} = \left[1 + \exp \left[- \frac{\frac{\partial \text{THG}}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial y}\right)^2}} \right] \right]^{-\alpha}$$

The α variable is a positive constant that controls the filter efficiency of the total horizontal gradient logistic function and its value is determined by the interpreter. However, the results obtained on synthetic models have shown that the α numerical value should be considered between 2 and 10 for different models (Pham et al., 2019). The main characteristic of the filter is the maximum amplitude on the edges of the anomaly, the insensitivity to increase the depth of the source, and the balancing of the anomalies resulting from deep and shallow sources (Pham et al. 2019). All maps and computations in this study have been carried out using MATLAB software.

Results and Conclusions

The results obtained from applying the LTHG filter on the synthetic model, even with the presence of high noise, show that the boundaries of gravity anomalies at different depths are well identified, indicating that the low sensitivity of the LTHG filter to noise is less than the other edge enhancement filters used in this research. The LTHG filter is suitable for determination of the edges of potential field anomalies because it is independent of depth. In this filter, the boundaries of thick and thin synthetic sources are well determined. The main purpose of this study has been the determination of the boundary between Charak anticline and salt, and also, identification of deep faults using the LTHG filter that cannot be extracted directly from the gravity map of the study area. The maximum amplitude of the LTHG map indicates the edge of anomalies. The salt in the anticline, deep faults and the main boundary of Charak anticline are clearly visible in the LTHG map.
