



دوره ۹، شماره ۱، ۱۴۰۲، صفحات ۸۳-۹۴
DOI: 10.22044/JRAG.2022.11430.1325 شناسه دیجیتال

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

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

۱- اداره پژوهش، نوآوری و فناوری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، واحد استان همدان، ایران

۲- گروه مهندسی ژئوفیزیک، دانشگاه استانبول، استانبول، ترکیه

۳- 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

واژگان کلیدی

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

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 تیل، مشتق افقی کل زاویه تیل، نقشه تنا، مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده و زاویه تیل 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 تاق‌دیس 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.

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 (Ferreira et al. 2013; Zhang et al. 2015). 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)،

$$TDX = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial F}{\partial z}\right|} \right] \quad (۶)$$

۲-۳- زاویه تیلت

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

$$TA = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (۳)$$

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):

$$TTHG = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (۷)$$

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:

$$LTHG = \left[1 + \exp \left[- \frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right] \right]^{-K} \quad (۸)$$

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

۲-۴- گرادیان افقی کل زاویه تیلت

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

$$TA-THG = \sqrt{\left(\frac{\partial TA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TA}{\partial y}\right)^2} \quad (۴)$$

۲-۵- نقشه تتا

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

$$TM = \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{|AS|} \quad (۵)$$

۲-۶- مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده

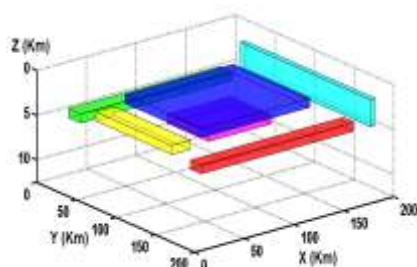
فیلتر مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، با استفاده از گرادیان افقی کل و مشتق قائم میدان گرانی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود (Cooper and Cowan, 2006):

به منظور درک بهتر و بررسی تاثیر متغیر K بر روی کیفیت فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل، دو بلوک دوبعدی با عمق و چگالی های 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، چ، ده، ه و ن) به ترتیب نشان داده شده است. سیگنال های 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 بی‌هنجاری ها را پهن تر و غیر واقعی نشان داده است. لذا می توان نتیجه گرفت بهترین مقدار برای متغیر K ، $2 \leq K \leq 10$ است.

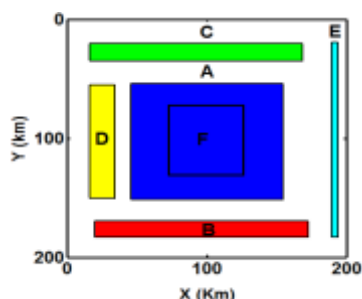
۳- کاربرد بر روی مدل گرانی مصنوعی

در این بخش توانایی فیلترهای پیشنهاد شده برای تعیین لبه بی‌هنجاری مصنوعی گرانی با منشورهای دارای ویژگی های متفاوت با نوفه و بدون نوفه بررسی شده است.

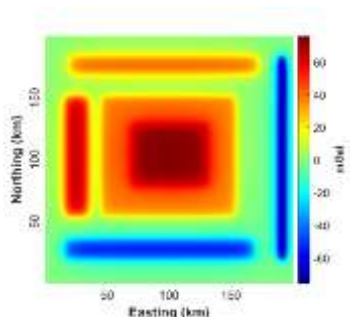
(الف)



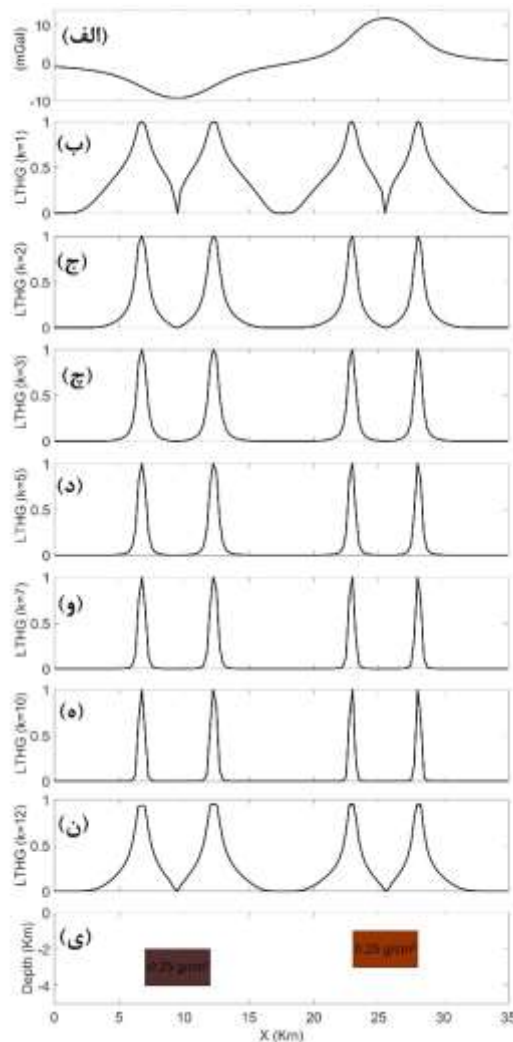
(ب)



(ج)



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



شکل ۱: (الف) بی‌هنجاری گرانی ایجاد شده توسط مدل های مصنوعی (بلوک دوبعدی) مدفون؛ (ب) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=1$ ؛ (ج) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=2$ ؛ (چ) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=3$ ؛ (د) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=5$ ؛ (و) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=7$ ؛ (ه) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=10$ ؛ (ن) فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل با مقدار $K=12$ ؛ (ی) مدل دوبعدی در نظر گرفته شده با چگالی 0.25 گرم بر سانتی متر مکعب (بلوک راست) و -0.25 گرم بر سانتی متر مکعب (بلوک سمت چپ) و عمق های متفاوت

البته نتایج به دست آمده بر روی مدل های مصنوعی نشان داده که مقدار عددی K بهتر است برای مدل های 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 لبه های بی‌هنجاری، عدم حساسیت به افزایش عمق چشمه، و متوازن کردن بی‌هنجاری های حاصل از چشمه های عمیق و کم عمق است (Pham et al. 2019).

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 تتا، 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 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).

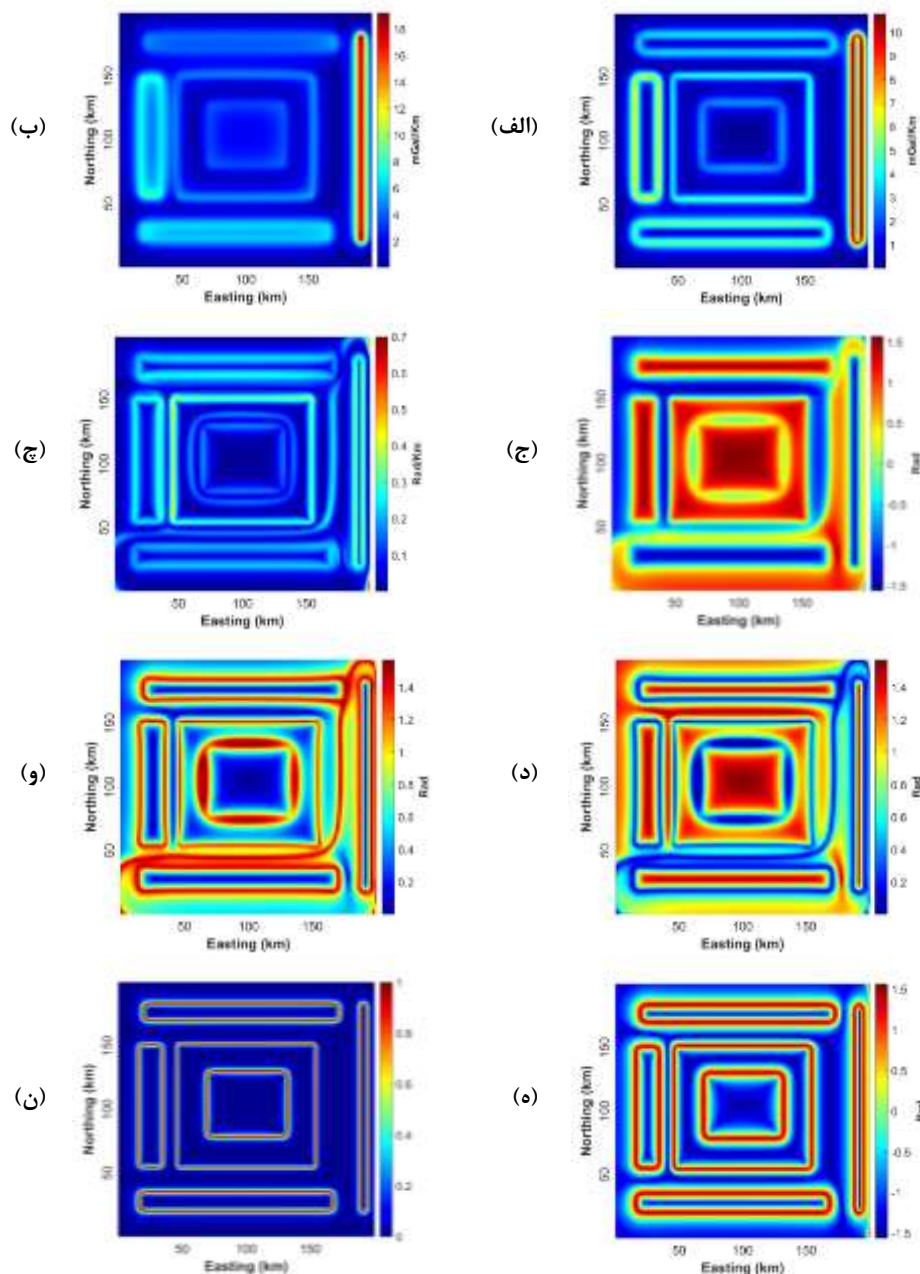
مدل دو بعدی و سه بعدی مدل گرانی به همراه بی‌هنجاری گرانی تولید شده بر حسب میلی گال در شکل (۲) نمایش داده شده است. پارامترهای مدل مصنوعی نیز در جدول (۱) شرح داده شده است. مدل مصنوعی با شش منشور مدفون با چگالی مثبت و منفی و عمق‌های متفاوت در یک شبکه منظم ۲۰۱×۲۰۱ در جهت شمال- جنوب و شرق- غرب با فاصله نمونه‌برداری 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

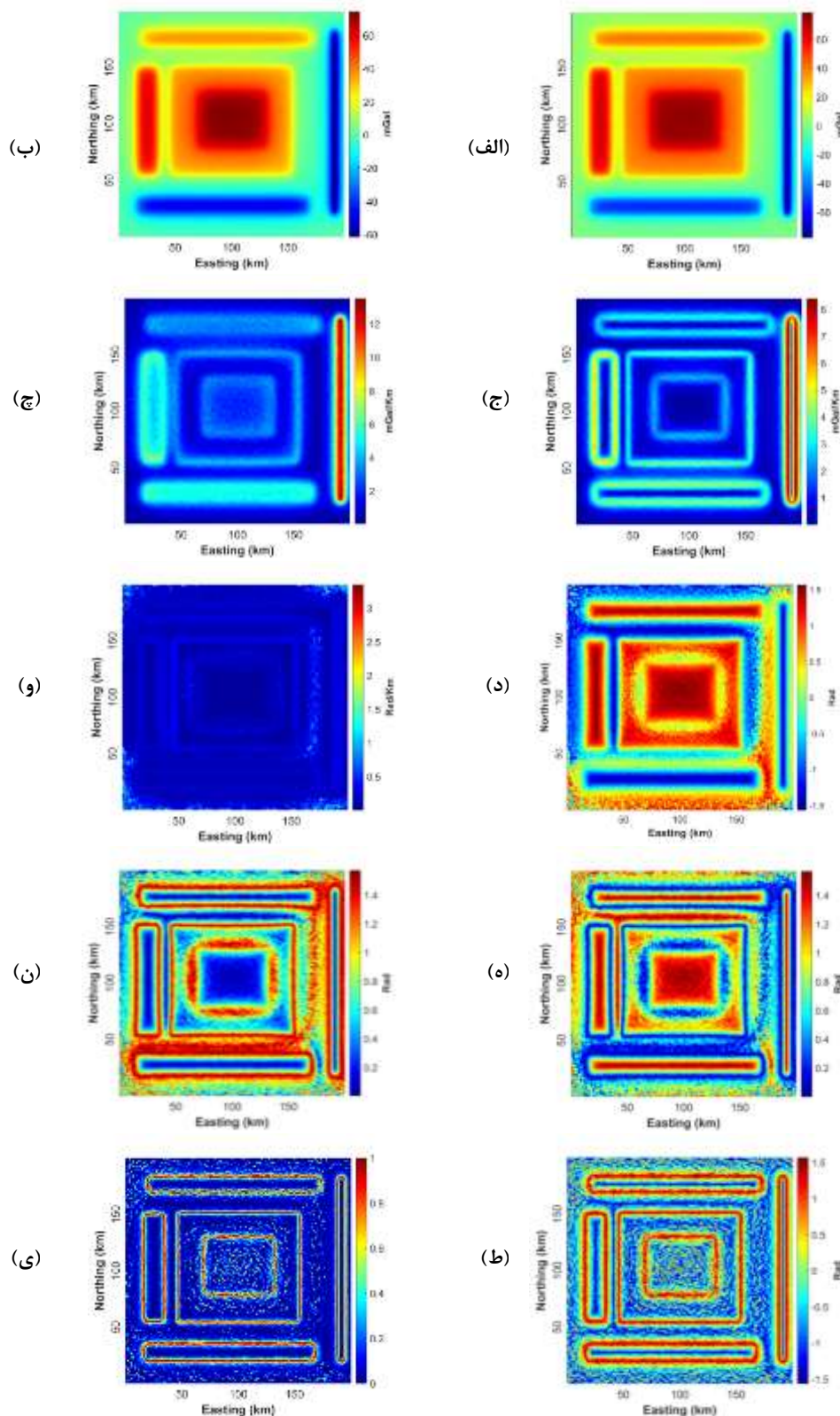
پارامترها/برچسب منشور	A	B	C	D	E	F
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱	۱/۵	-۲	۲	-۱/۵	۱
طول (کیلومتر)	۱۰۵	۱۵۰	۱۵۰	۹۰	۱۶۰	۱۰۰
عرض (کیلومتر)	۹۵	۱۳	۱۵	۲۰	۴	۵۰
عمق بالا (کیلومتر)	۲	۴	۴	۳	۲	۴
عمق پایین (کیلومتر)	۳	۵	۵	۴	۵	۵

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 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 تتا 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

الوندی و همکاران، تفسیر داده های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادیان افقی کل، صفحات ۸۳-۹۴.



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

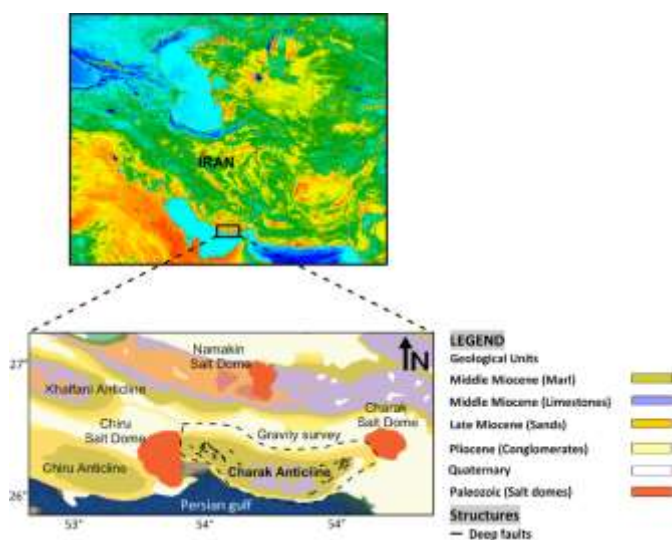
۴- استفاده از فیلترها بر روی مدل گرانی میدانی

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

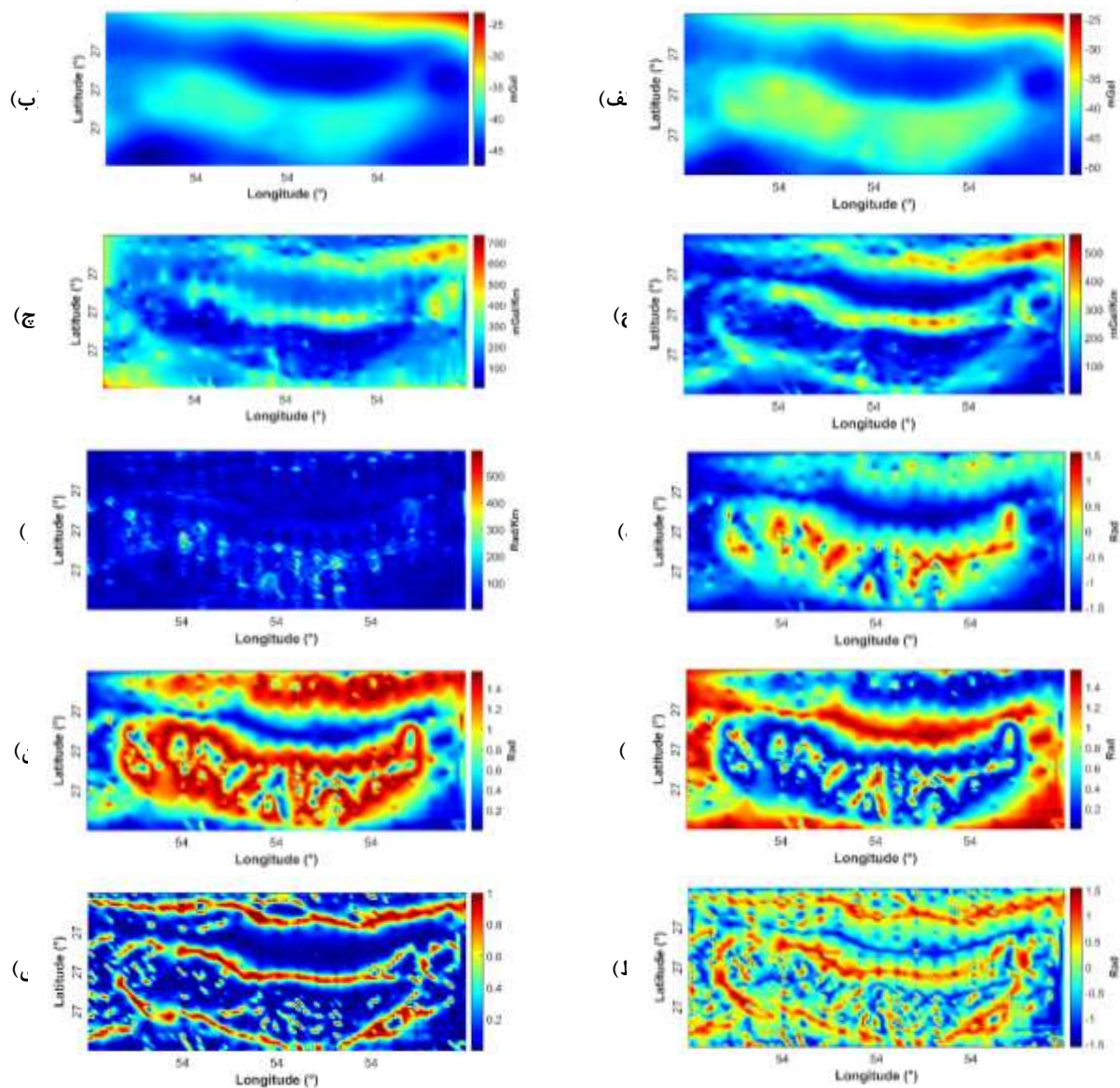
۴-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

وجود میدان‌های عظیم نفت و گاز، زاگرس را به یکی از مهم‌ترین حوضه‌های روسوبی 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. داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی 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 $2/3$ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، تصحیح توپوگرافی و تصحیح کشند بر روی داده‌های برداشت شده اعمال شده و داده‌ها با فاصله $2/5$ کیلومتر شبکه‌بندی شده است. نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه منطقه بر حسب میلی‌گال در شکل (۶: الف) نمایش داده شده که ساختارهای نمکی (گنبد‌های نمکی در بخش شمال شرقی و جنوب غربی محدوده) و تاق‌دیس چارک از شرق به غرب در نقشه بی‌هنجاری بوگه قابل مشاهده است (شکل ۶: الف). برای کاهش نوفه در نقشه بی‌هنجاری بوگه، از نقشه ادامه فراسو (۲۰۰ متر) استفاده شده، زیرا فیلتر فراسو باعث می‌شود که طول موج‌های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت‌تری در اختیار داشته باشیم (شکل ۶: ب). بیشینه و کمینه گرانی به ترتیب ۲۴- میلی‌گال مربوط به رخساره‌های مارنی و ۵۴- میلی‌گال مربوط به گنبد نمکی محاسبه شده که با نقشه زمین‌شناسی (شکل ۵) از انطباق مکانی تقریباً مناسبی برخوردار است. اهداف اصلی این پژوهش، نخست یافتن وجود

بی‌هنجاری کم در بخش میانی تاق‌دیس- که دلیل آن وجود نمک در این محدوده می‌باشد- تشخیص گسل‌های عمیق موجود و تعیین مرز تاق‌دیس در محدوده مورد مطالعه است. البته موقعیت تاق‌دیس تا حدی در نقشه-های زمین‌شناسی و بوگه قابل مشاهده است اما تشخیص دو مورد اول در نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه به سختی امکان‌پذیر است (شکل ۶). به منظور شناسایی گسل‌های عمیق و تعیین مرز بی‌هنجاری 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 داده‌های 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 نرمال‌سازی شده، زاویه تیلت گرادیان افقی کل، و فیلتر لجستیک گرادیان افقی کل در شکل (۶) نمایش داده شده است.



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



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 تیل، (و) مشتق افقی کل زاویه تیل، (ه) نقشه تتا، (ن) مشتق کل افقی نرمال‌سازی شده، (ط) زاویه تیل گرادیان افقی و (ی) تابع لجستیک گرادیان افقی کل ($K=2$ فرض شده است)

TTHG و LTHG استفاده شده که در مقایسه با فیلتر TTHG، نقشه از کیفیت و تفکیک‌پذیری بیشتری برخوردار است. نقشه LTHG به دور از هرگونه هاله و پخش‌شدگی دارای وضوح و کیفیت بهتری نسبت به سایر فیلترها است. این فیلتر مرز تاقدیس اصلی، نمک درون تاقدیس و گسل‌های عمیق را به خوبی برجسته کرده است.

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 می-

باشد. در شکل ۶ (ج) و (د) نتایج به دست آمده از روش‌های گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی به ترتیب نمایش داده شده که اصلاً قابل اطمینان نیستند. در شکل‌های ۶ (د)، (و)، (ه) و (ن) به ترتیب نتایج استفاده از فیلتر زاویه تیل، فیلتر مشتق افقی کل زاویه تیل، نقشه زاویه تتا و مشتق افقی نرمال‌سازی شده نمایش داده شده‌اند. در نقشه زاویه تیل، گسل‌های عمیق و مرز نمک درون تاقدیس و مرز اصلی تاقدیس اصلی به صورت هاله‌ای ترسیم شده است. نتایج به دست آمده از نقشه مشتق افقی کل زاویه تیل رضایت‌بخش نبوده و تشخیص مرز تاقدیس امکان‌پذیر نیست. در نقشه زاویه تتا و مشتق افقی نرمال‌سازی شده مرز اصلی تاقدیس مشخص شده اما بی‌هنجاری‌های درون تاقدیس به صورت پخش و هاله‌ای ترسیم شده است. در شکل‌های ۶ (ط) و ۶ (ی) از روش‌های

- 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
- 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
- باشد. در این روش مرز چشمه های مصنوعی ضخیم و نازک به خوبی تعیین شده است. هدف اصلی پژوهش، تعیین مرز بین تاقدیس و نمک و شناسایی گسل های عمیق با استفاده از فیلتر LTHG است که در نقشه گرانی قابل استخراج نیست. بیشینه دامنه نقشه LTHG، نشان دهنده مرز بی هنجاری است. نمک موجود در تاقدیس، گسل های عمیق و مرز اصلی تاقدیس چارک به وضوح در نقشه تابع لجستیک گرادیان افقی کل قابل مشاهده است.
- ### منابع
- تلفورد، دلبیو، جلدارت، ال، شریف، ار. 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.
- مهرنیا، س. و ابراهیمزاده اردستانی، و. و تیموریان، ا. (۱۳۹۲). استفاده از 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