

Determination of the edges of satellite gravity anomalies using the modified Gudermannian filter (modified hyperbolic domain): a case study of the Rafsanjan Plain (Kerman Province)

Alvandi, A.¹  | Ebrahimzadeh Ardestani, V.¹  | Motavalli-Anbaran, S. H.¹  

1. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: motavalli@ut.ac.ir

(Received: 8 Dec 2025, Revised: 31 March 2026, Accepted: 30 June 2026, Published online: 5 Sep 2026)

Summary

Recognizing the boundaries and edges of gravity anomalies is essential for understanding geological and tectonic features that arise from variations in density. In recent decades, a variety of filters and techniques have been developed and improved to delineate the edges of anomalous sources; however, these edge enhancement filters often present notable challenges, such as the introduction of false and spurious edges, sensitivity to depth variations, drawing fuzzy edges, and low resolution in the resulting edge detection maps. This study introduces a modified Gudermannian (MGDF) edge detection filter aimed at enhancing the clarity of output images, eliminating the occurrence of false and spurious edges in output maps, increasing the resolution of edge detection images, and effectively balancing weak and strong amplitudes from buried sources at different depths simultaneously. This technique has been crafted using the gradients of the total horizontal gradient (THG) in tandem with the modified Gudermannian function. The mathematical framework of both the Gudermannian function and its modified counterpart resembles that of the arctangent. The arctangent, when combined with the horizontal and vertical (directional) derivatives of the potential field at varying orders, plays a crucial and traditional role in the conception and refinement of edge detection filters for gravitational and magnetic data. To fulfill this goal, we first employed a range of standard and traditional edge detection methods (such as the total horizontal gradient (THG), tilt angle (TA), total horizontal gradient of the tilt angle (THG-TA), hyperbolic tilt angle (HTA), tilt angle of the total horizontal gradient (TAHG), modified total horizontal gradient (THG-STA), and Gudermannian (GDF) filter with coefficients of zero, two, four, six, and eight) alongside a modified Gudermannian (MGDF) effective method. The MGDF edge detection filter does not require any parameter or coefficient to regulate quality. The filtered synthetic gravity data were examined both in a noise-free condition and with Gaussian noise. A gravity model featuring four sources with different depths and both positive and negative densities was constructed within the MATLAB programming environment. Following the assessment and comparison of the proposed modified Gudermannian filter against other edge detection techniques (THG, TA, THG-TA, HTA, TAHG, THG-STA and GDF), we utilized satellite gravity data (Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)) pertaining to the Rafsanjan Plain in Kerman Province, Iran, to identify the locations of various structures and faults while evaluating the quality and practical functionality of the proposed filter. Considering the seismic activity in the region and the presence of diverse mineral resources, extensive geophysical studies and research have been conducted in this area. The Rafsanjan Plain in Kerman Province is characterized by four major faults, along with numerous hidden faults that constitute part of the Central Iranian System. Aligning with the Zagros Mountain ranges, it is a suitable location for assessing the efficacy of edge detection filters. Findings from both synthetic and field gravity data indicate the effectiveness of the proposed filter (MGDF) in clearly and accurately delineating the edges of gravity sources. Also, the false and spurious edges in the output maps are not observed. Thus, the modified Gudermannian filter can be reliably employed in the analysis and interpretation of gravity anomalies to offer a trustworthy qualitative assessment of geological, subsurface, and buried structures.

Keywords: edge detection, gravity data, Gudermannian function, Rafsanjan.

Cite this article: Alvandi, A., Ebrahimzadeh Ardestani, V., & Motavalli-Anbaran, S. H. (2026). Determination of the edges of satellite gravity anomalies using the modified Gudermannian filter (modified hyperbolic domain): a case study of the Rafsanjan Plain (Kerman Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(2), 225-239. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.406736.1007740>

E-mail: (1) aalvandi@ut.ac.ir | ebrahimz@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.406736.1007740>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تعیین موقعیت افقی بی‌هنجاری‌های گرانی ماهواره‌ای با استفاده از فیلتر گودرمان (دامنه هایپربولیک) اصلاح‌شده (MGDF)، مطالعه موردی: دشت رفسنجان (استان کرمان)

احمد الوندی^۱ | وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^۱ | سید هانی متولی عنبران^{۱*}

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: motavalli@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۱۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۴/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۶/۱۴)

چکیده

تعیین مرز بی‌هنجاری‌های گرانی در مراحل تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و تکتونیکی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در دهه‌های اخیر فیلترهای مختلفی به‌منظور ترسیم لبه‌های چشمه‌های بی‌هنجار معرفی و توسعه یافته اما این فیلترها دارای معایب عمده‌ای مانند ترسیم لبه‌های اضافی، حساسیت به عمق، تفکیک‌پذیری پایین و... در نقشه‌های خروجی هستند. در این مقاله به‌منظور افزایش وضوح تصاویر خروجی، عدم ترسیم لبه‌های جعلی، افزایش تفکیک‌پذیری تصاویر و متعادل کردن دامنه‌های ضعیف و قوی حاصل از چشمه‌های دارای عمق‌های مختلف، فیلتر تعیین لبه گودرمان اصلاح‌شده معرفی شده است. این فیلتر بر اساس ترکیب مشتقات گرادیان افقی کل با تابع گودرمان طراحی و توسعه یافته است. بدین‌منظور ابتدا تکنیک‌های تعیین لبه مرسوم و استاندارد (گرادیان افقی کل، زاویه تیل، گرادیان افقی کل زاویه تیل، زاویه تیل هایپربولیک، زاویه تیل گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح‌شده و فیلتر گودرمان اصلاح‌شده) و فیلتر گودرمان اصلاح‌شده بر روی داده‌های گرانی مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه اعمال و پس از تأیید و مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی با سایر فیلترها، به کمک داده‌های گرانی ماهواره‌ای (EGM2008) مربوط به دشت رفسنجان واقع در استان کرمان، موقعیت برخی ساختارها و گسل‌ها تعیین و کیفیت و توانایی فیلتر مذکور به‌صورت عملی نیز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده بیانگر کیفیت فیلتر معرفی‌شده در ترسیم لبه‌های چشمه‌های گرانی با وضوح و کیفیت مناسب است. لذا با اطمینان می‌توان از فیلتر گودرمان اصلاح‌شده در بررسی بی‌هنجاری‌های گرانی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تعیین گوشه، بی‌هنجاری گرانی، تابع گودرمان، دشت رفسنجان.

۱. مقدمه

معایب منحصر به فردی برخوردار می‌باشند (الدوسوکی و همکاران، ۲۰۲۵؛ دنیز توکنای و همکاران، ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵). فیلترهای معرفی‌شده که از توانایی و محبوبیت بیشتری در ترسیم موقعیت افقی چشمه‌های گرانی برخوردار هستند، به فیلترهای نرمالایز شده یا بهنجارشده معروف هستند. در رابطه اصلی این دسته از فیلترهای تعیین لبه، عمدتاً از توابع آرک تانژانت، آرک کسینوس یا تانژانت هایپربولیک استفاده شده و بر اساس نقاط بیشینه، کمینه و یا صفر و به کمک مشتقات افقی یا قائم داده‌های گرانی و ترکیب این مشتقات می‌توانند لبه‌های چشمه‌های مدفون را ترسیم کنند (الدوسوکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوندی و اردستانی، ۲۰۲۳؛

در تعیین موقعیت توده‌های زمین‌شناسی و بررسی ناهمگنی جانبی چشمه‌های مدفون مانند گنبد نمکی، دایک، کتاکت و یا زون‌های گسلی، روش گرانی‌سنجی از مزایای خاصی برخوردار است (فام و همکاران، ۲۰۲۵؛ دنیز توکنای و همکاران، ۲۰۲۵؛ نارایان و همکاران، ۲۰۲۲؛ آی و همکاران، ۲۰۲۴؛ الف؛ سادا و همکاران، ۲۰۲۱). عمدتاً تعیین لبه و تشخیص موقعیت افقی گسل‌های مدفون آشکار و پنهان و یا ترسیم مرز واحدهای سنگی با تباین چگالی متفاوت به کمک داده‌های گرانی‌سنجی امکان‌پذیر است. در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی معرفی شده که هر کدام از مزایا و

استناد: الوندی، احمد؛ ابراهیم‌زاده اردستانی، وحید و متولی عنبران، سید هانی (۱۴۰۵). تعیین موقعیت افقی بی‌هنجاری‌های گرانی ماهواره‌ای با استفاده از فیلتر گودرمان (دامنه هایپربولیک) اصلاح‌شده (MGDF)، مطالعه موردی: دشت رفسنجان (استان کرمان). مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۲(۲)، ۲۲۵-۲۳۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.406736.1007740>

رایانامه: (۱) ebrahimz@ut.ac.ir | aalvandi@ut.ac.ir

دامنه گرادیان‌های افقی میدان توسعه و معرفی شده است. این فیلتر بر مبنای دو گرادیان افقی در جهت‌های x و y طراحی شده است. روش تعیین لبه THG با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

در رابطه (۱)، $\frac{\partial G}{\partial y}$ و $\frac{\partial G}{\partial x}$ مشتقات افقی (در جهت‌های x و y) میدان گرانی هستند. به منظور رفع نقاط ضعف و مشکل در ترسیم یک نقشه دقیق از موقعیت توده‌های مدفون با پارامترها و عمق‌های متفاوت، در دهه‌های اخیر فیلترهای متعادل شده (نرمالایز شده) معرفی و توسعه پیدا کرده است (فام، ۲۰۲۳). فیلترهای متعادل شده که در واقع ترکیبی از گرادیان‌های گرانی هستند، ابزاری جدید، سریع و پر قدرت در بررسی نقشه‌های گرانی به‌شمار می‌آیند (فام و همکاران، ۲۰۱۹).

نخستین فیلتر تعیین لبه متعادل شده که به منظور رفع نواقص و محدودیت‌های فیلترهای گرادیان افقی کل و به منظور متعادل کردن همزمان دامنه‌های مختلف حاصل از چشمه‌های عمیق و کم عمق معرفی شده، روش زاویه تیل (TA) یا زاویه کجی است. این فیلتر در بالای چشمه بی‌هنجاری مثبت و در نزدیک لبه چشمه به صفر نزدیک می‌شود. روش تعیین لبه TA با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود (میلر، و سینگ، ۱۹۹۴):

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

در رابطه (۲)، $\frac{\partial G}{\partial z}$ مشتق قائم میدان گرانی است. به منظور افزایش تفکیک‌پذیری نقشه‌های تعیین لبه و بهره‌گیری از توانمندی دو فیلتر گرادیان افقی کل و زاویه تیل، فیلتر گرادیان افقی کل زاویه تیل (THG-TA) توسط وردوزکو و همکاران، (۲۰۰۴) معرفی شده است. روش تعیین لبه THG-TA با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$THG-TA = \sqrt{\left(\frac{\partial TA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TA}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

گرادیان افقی کل زاویه تیل، قابلیت تفکیک‌پذیری بهتری

آی و همکاران، ۲۰۲۴؛ ب؛ الدوسوکی و همکاران، ۲۰۲۵؛ لانگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ دنیز توکنای و همکاران، ۲۰۲۶). اگرچه در بیشتر این فیلترها تار بودن گوشه‌ها، ترسیم خطوط کاذب و جعلی با دامنه ماکزیم یا مینیم در نقشه‌های خروجی و تفکیک‌پذیری پایین به‌عنوان مشکلات اساسی در نتایج خروجی این تکنیک‌ها قلمداد شده و اگر بی‌هنجاری گرانی نیز دارای طیف وسیعی از دامنه‌های ضعیف و قوی باشد، تعیین گوشه چشمه‌های عمیق‌تر و پیچیده‌تر عملاً با این فیلترها امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش به منظور بررسی توانایی و قابلیت فیلترهای اشاره شده با اتکا بر مفاهیم مشتقات افقی و قائم، ابتدا یک مدل مصنوعی گرانی (بدون نوفه و همراه با نوفه گاوسی) بررسی و سپس توانمندی تکنیک‌های تعیین لبه و فیلتر پیشنهادی تابع گودرمان اصلاح‌شده بر روی داده‌های گرانی ماهواره‌ای (EGM2008) متعلق به دشت رفسنجان واقع در استان کرمان اعمال و با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی این پژوهش ضمن معرفی فیلتر تابع گودرمان اصلاح‌شده به‌عنوان یک فیلتر جدید و باکیفیت، بررسی توانایی برخی از فیلترهای متداول تعیین مرز بی‌هنجاری‌های گرانی شامل گرادیان افقی کل، زاویه تیل، گرادیان افقی کل زاویه تیل، زاویه تیل هایپربولیک، زاویه تیل گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح‌شده و فیلتر گودرمان با ضرایب صفر، دو، چهار، شش و هشت در شرایط بدون نوفه و همراه با نوفه است، که در سال‌های اخیر معرفی و یا از کاربرد و محبوبیت بیشتری برخوردار هستند. مدل‌های مصنوعی، نقشه‌های تعیین گوشه بی‌هنجاری-گرانی مصنوعی و میدانی و الگوریتم فیلترهای مورد استفاده (تعیین لبه و ادامه فراسو)، در محیط برنامه متلب آماده و ترسیم شده است.

۲. فیلترهای تعیین لبه

نخستین و محبوب‌ترین روش تشخیص لبه بی‌هنجاری‌های گرانی توسط کوردل و گراوچ، (۱۹۸۵)، تحت عنوان، فیلتر گرادیان افقی کل (THG)، به منظور تعیین لبه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از مقادیر بیشینه

$$TAHG = \operatorname{atan} \left[\frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (5)$$

به منظور افزایش کیفیت تفکیک پذیری نقشه‌های تعیین لبه و متعادل کردن سیگنال‌های ضعیف و قوی به طور همزمان و ترسیم لبه‌های با تفکیک پذیری بیشتر و مرزهای باریک‌تر، توسط ناسوتی و همکاران (۲۰۱۹)، فیلتر گرادیان افقی کل اصلاح شده (THG-STA) معرفی شده است. در این فیلتر یک پارامتر مثبت (K) بر اساس میانگین شدت بی‌هنجاری مشاهده شده برای افزایش کیفیت تصاویر خروجی تعریف شده است. روش تعیین لبه THG-STA با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$THG-STA = \sqrt{\left(\frac{\partial STA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial STA}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

که مقدار STA در رابطه (۶) از معادله ذیل محاسبه می‌شود:

$$STA = \operatorname{atan} \left(\frac{K \times \frac{\partial^2 G}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (7)$$

در رابطه فوق، $\frac{\partial^2 G}{\partial z^2}$ گرادیان قائم مرتبه دو میدان گرانی است. برای کاهش تأثیرپذیری نوفه می‌توان با استفاده از معادله لاپلاس، رابطه (۸) را ایجاد کرد. با توجه به پیشنهاد ناسوتی و همکاران، (۲۰۱۹)، بهترین مقدار برای K می‌تواند برای چشمه‌های گرانی ۹۰۰/۰۰۰ و برای چشمه‌های مغناطیسی ۵۰/۰۰۰ فرض شود.

$$STA = \tan^{-1} \left(\frac{K \times \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} - \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) \right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (8)$$

۳. فیلتر گودرمان (دامنه هایپربولیک)

به منظور تعیین مرز جانبی و تعیین لبه ساختارهای زمین‌شناسی، معمولاً از تابع آرک تانژانت مشتقات گرانی (مشتقات جهتی) مانند فیلتر زاویه تیل (TA)، فیلتر زاویه تیل گرادیان افقی کل (TAHG)، فیلتر گرادیان افقی کل

نسبت به گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی دارد، اما چون از طریق مشتق‌گیری از فیلتری که خود بر اساس مشتق فیلتری دیگر محاسبه می‌شود (یعنی بر اساس مشتق فیلتر زاویه تیل)، در مقایسه با روش زاویه تیل نسبت به نویز بسیار حساس می‌باشد. همچنین این فیلتر نسبت به عمق چشمه‌ها حساس بوده و قادر نیست لبه چشمه‌های عمیق را ترسیم کند.

کوپر و کوآن (۲۰۰۶)، با استفاده از قسمت حقیقی تابع تانژانت هایپربولیک و مشتقات افقی و قائم میدان پتانسیل یک فیلتر جدید معرفی کردند. فیلتر هایپربولیک زاویه تیل (HTA) هر چند با استفاده از ماکزیمم دامنه، مرز افقی ساختارهای مدفون را تعیین می‌کند اما ترسیم لبه‌های منفی و جعلی در نقشه HTA بزرگ‌ترین ضعف این روش می‌باشد. روش تعیین لبه HTA با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$HTA = \operatorname{Real} \left\{ \operatorname{atanh} \left[\frac{\frac{\partial G}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}} \right] \right\} \quad (4)$$

فریرا و همکاران (۲۰۱۳) به منظور متوازن کردن سیگنال‌های حاصل از چشمه‌های مختلف با عمق‌های متفاوت روش محبوب و مؤثر زاویه تیل گرادیان افقی کل (TAHG) را به عنوان یک فیلتر مناسب برای تعیین لبه توده‌های زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل معرفی کردند. این روش در مقایسه با سایر روش‌های تعیین لبه که تا قبل از آن معرفی شده از کیفیت تفکیک‌پذیری و دقت بالاتری برخوردار بوده و قادر است به صورت همزمان دامنه‌های کوچک و بزرگ حاصل از چشمه‌های مختلف با شرایط فیزیکی و هندسی متفاوت را ترسیم و متوازن کند (الوندی و همکاران، ۲۰۲۵). مقادیر ماکزیمم دامنه در نقشه TAHG بر روی مرزهای افقی چشمه قرار گرفته و مانند فیلتر زاویه تیل، تغییرات دامنه بین ۱/۵- تا ۱/۵ رادیان است. روش تعیین لبه TAHG با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$GDF = 2 \operatorname{atan} \left[\tanh \left(2 \times \left(-\alpha + \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}} \right) \right) \right] \quad (۱۳)$$

در معادله بالا، $T = \left| \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x \partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y \partial z} \right)^2 \right|$ و مقدار متغیر α یک عدد مثبت بین ۰/۵ تا ۸ است (الوندی و همکاران، ۲۰۲۳). این پارامتر توسط مفسر و با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و کیفیت تصاویر خروجی تعیین می‌شود. همچنین مشتقات $\frac{\partial^2 G}{\partial x \partial z}$ و $\frac{\partial^2 G}{\partial y \partial z}$ گرادیان‌های افقی میدان گرانی در جهت قائم هستند (الوندی و همکاران، ۲۰۲۳). فیلتر GDF قادر است لبه‌های چشمه‌های مختلف با عمق‌های متفاوت را به صورت همزمان ترسیم کند. دامنه این فیلتر بین ۱/۵ تا -۱/۵- رادیان متغیر است و ماکزیمم دامنه بر روی لبه‌های چشمه قرار می‌گیرد.

۴. فیلتر گودرمان اصلاح شده

به منظور افزایش توان تفکیک پذیری و دقت در تعیین و ترسیم کامل لبه‌های بی‌هنجاری‌های گرانی و حذف لبه‌های اضافی، در این پژوهش با استفاده از تابع گودرمان اصلاح شده، و مشتق اول قائم مشتق افقی کل و دامنه گرادیان مشتق افقی کل، فیلتر گودرمان اصلاح شده معرفی می‌شود. این فیلتر نواقص فیلتر گودرمان را نداشته و بدون تعریف پارامتر ثانویه (α) قادر است لبه‌های توده‌های مدفون را ترسیم کند (الوندی و همکاران، ۲۰۲۴).

به منظور دستیابی به یک رابطه اصلاح شده و محدود بین ۱ و -۱، با ضرب $\frac{2}{\pi}$ در رابطه (۱۲) می‌توانیم شکل اصلاح شده تابع گودرمان (MGDF) را داشته باشیم. تابع اصلاح شده گودرمان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$gd(x) = \frac{2}{\pi} (\arctan(\sinh(x))) \quad (۱۴)$$

این فیلتر را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

بهبودیافته (THG-STA) و.. استفاده می‌شود (آی و همکاران، ۲۰۲۴ ب و ۲۰۲۵؛ فام و همکاران، ۲۰۲۴). از طرفی به دلیل شباهت شکل تابع گودرمان به تابع آرک-تانژانت، می‌توان از تابع گودرمان برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی استفاده کرد. از اینرو به منظور افزایش توان تفکیک پذیری و دقت در تعیین لبه‌های بی‌هنجاری‌های گرانی و عدم ترسیم لبه‌های جعلی و ناقص، یک فیلتر مناسب و قابل اطمینان به منظور تعیین لبه ساختارهای مختلف زمین‌شناسی با استفاده از تابع گودرمان معرفی شده است (الوندی و همکاران، ۲۰۲۳).

تابع گودرمان یا دامنه هایپربولیک، یک تابع فرد است که به صورت زیر تعریف می‌شود (گودرمان، ۱۸۳۰):

$$gd(x) \equiv \int_0^x \frac{dt}{\cosh t} \quad (۹)$$

با جایگزینی $u = \sinh t$ که $du = \cosh t dt$ و $1 + u^2 = \cosh^2 t$ ما یک تعریف

جایگزین برای این تابع معرفی می‌کنیم. لذا داریم:

$$gd(x) \equiv \int_0^x \operatorname{sech} t dt = \int_0^x \frac{1}{\cosh t} dt = \int_{t=0}^x \frac{\cosh t}{\cosh^2 t} dt = \int_{u=0}^{\sinh x} \frac{du}{1+u^2} \quad (۱۰)$$

$$gd(x) = (\arctan u) \Big|_{u=0}^{\sinh x} \quad (۱۱)$$

$$gd(x) = \arctan(\sinh(x)) \quad (۱۲)$$

رابطه (۱۲) یک تابع بر اساس آرک تانژانت است که می‌توان از آن برای طراحی فیلتر تعیین لبه استفاده کرد. توابع گودرمان، لجستیک، گومپرتز، Rootsig از ساختاری مشابه برخوردار هستند که به عنوان توابع فعال ساز در شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این مفاهیم می‌توان در طراحی فیلترهای تعیین لبه استفاده کرد (آی و همکاران، ۲۰۲۴ الف و ۲۰۲۴ ب). در سال (۲۰۲۳)، الوندی و همکاران با استفاده از تابع گودرمان و مشتقات جهتی درجه دوم یک فیلتر به منظور تعیین لبه چشمه‌های مدفون با عمق‌های متفاوت معرفی کردند. روش تعیین لبه GDF با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود (الوندی و همکاران، ۲۰۲۳):

این فیلترها بر روی داده‌های مصنوعی اعمال شود. برخلاف داده‌های میدانی که در بیشتر مواقع اطلاعات دقیقی از وضعیت و موقعیت چشمه‌های بی‌هنجار در دسترس مفسر قرار نمی‌دهند، در داده‌های مصنوعی حاصل از مدل‌های نظری، ماهیت و موقعیت چشمه‌های بی‌هنجار کاملاً مشخص و قابل توصیف است. از اینرو با استفاده از فیلترهای تعیین لبه، می‌توان مزایا و معایب هر کدام از روش‌های استاندارد و پیشنهادی را ابتدا به کمک داده‌های مصنوعی تشخیص و با یکدیگر مقایسه کرد.

ساختار دوبعدی و سه‌بعدی مدل مصنوعی در شکل ۱ نمایش داده شده است. این مدل مصنوعی از چهار چشمه مدفون با ابعاد و پارامترهای هندسی و فیزیکی مختلف تشکیل شده که ویژگی و ابعاد هر کدام از چشمه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. بی‌هنجاری گرانی تولید شده حاصل از چهار چشمه گرانی مصنوعی، در شکل ۲ بر حسب میلی گال نمایش داده شده است.

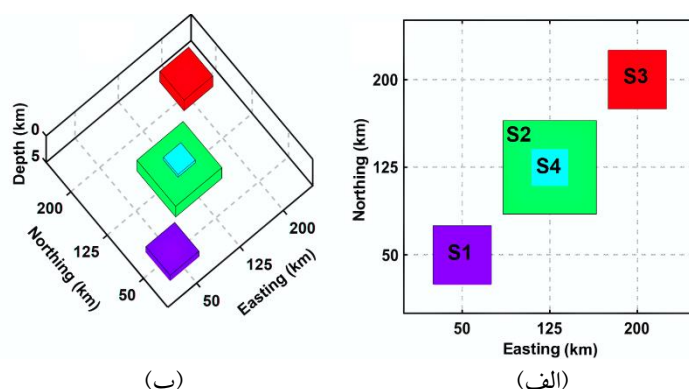
MGDF =

$$\frac{2}{\pi} \arctan \left(\sinh \left(\frac{\left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial z} + \frac{\partial \text{THG}}{\partial z} - \sqrt{\left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial y} \right)^2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial y} \right)^2}} \right) \right) \quad (15)$$

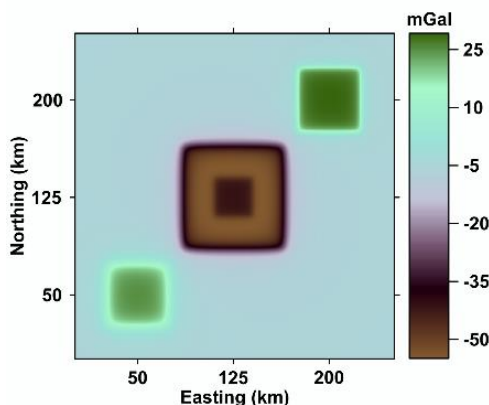
با توجه به این که رابطه اصلی روش فوق از مشتقات جهتی گرادیان افقی کل به عنوان هسته فیلتر استفاده می‌کند، این فیلتر قادر است به طور همزمان لبه‌های بی‌هنجاری‌های عمیق و کم‌عمق را تعیین و از ترسیم مرزهای جعلی و کاذب اجتناب کند. در فیلتر MGDF مقدار ماکزیمم دامنه بر روی مرز افقی چشمه قرار می‌گیرد و مقدار دامنه نیز بین ۱ تا ۱- رادیان متغیر است.

۵. داده مصنوعی بدون نوفه

به منظور بررسی و مقایسه توانایی و کیفیت روش‌های تعیین لبه در ترسیم لبه‌های چشمه‌های گرانی، ضروری است که



شکل ۱. الف) نمایش دوبعدی مدل مصنوعی به همراه برجسب عنوان چشمه‌های مصنوعی، ب) نمایش سه‌بعدی مدل مصنوعی.



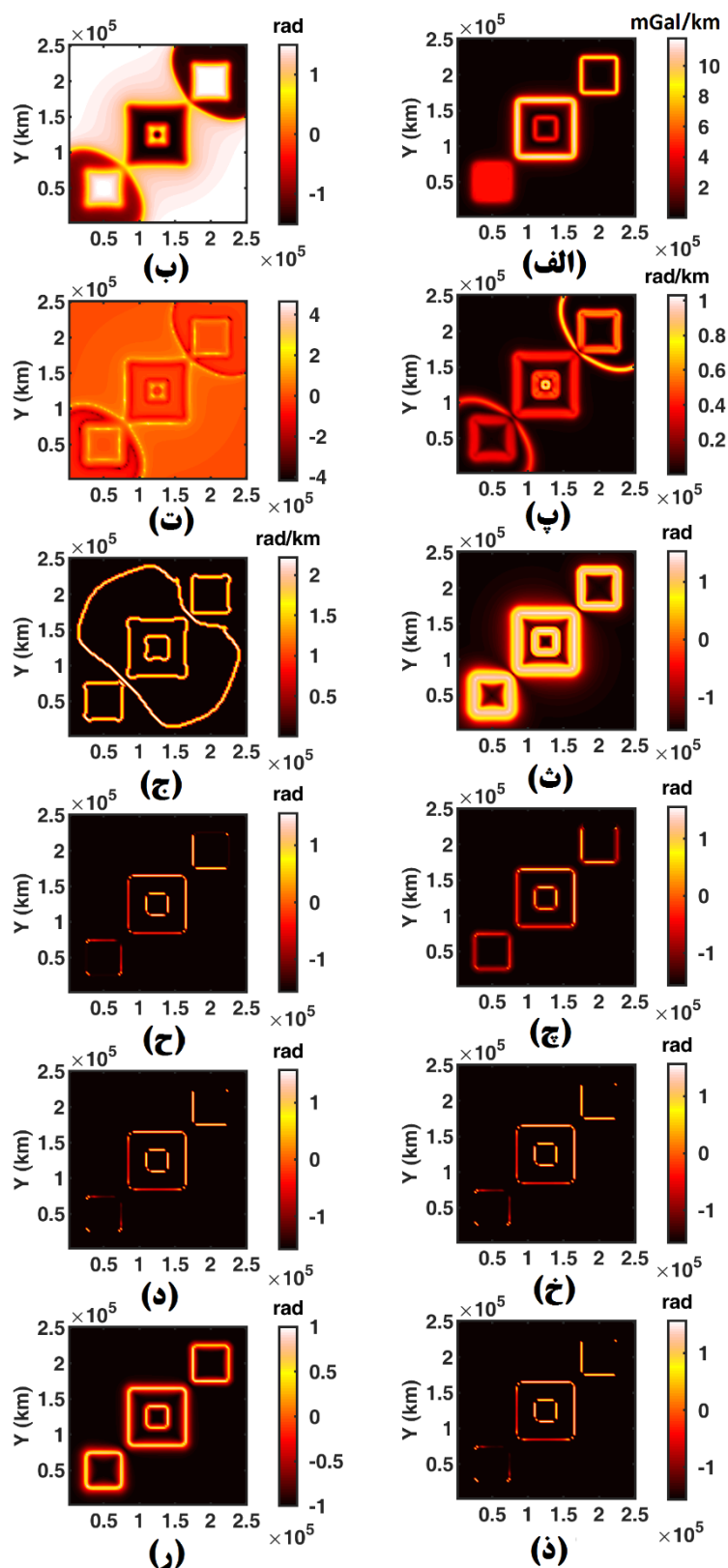
شکل ۲. بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی حاصل از ۴ چشمه مدفون.

جدول ۱. پارامترهای عددی و هندسی مدل مصنوعی گرانی.

پارامتر	S4	S3	S2	S1
عرض چشمه (کیلومتر)	۳۰	۵۰	۸۰	۵۰
طول چشمه (کیلومتر)	۳۰	۵۰	۸۰	۵۰
عمق بالایی چشمه (کیلومتر)	۲/۵	۱/۵	۳/۵	۴/۵
عمق پایینی (کیلومتر)	۳	۳	۴/۵	۵/۵
تباين چگالي (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۷۵	۰/۵۵	-۰/۷۵	۰/۴

روش ضعیف در ترسیم لبه‌ها معرفی کرده است. در این مدل مصنوعی، نتایج ترسیم لبه با روش زاویه تیلت گرادیان افقی کل تاحدودی رضایت بخش است. هرچند پایین بودن تفکیک‌پذیری و وضوح لبه‌ها در نقشه‌های خروجی کاملاً مشهود است. نقشه‌های ترسیم شده با روش گرادیان افقی کل اصلاح شده بیانگر تعیین لبه‌های چشمه‌های کم عمق و عمیق به صورت همزمان در نقشه‌های خروجی است. هرچند در این نقشه نیز ترسیم لبه‌های جعلی یک نقص عمده در آنها محسوب می‌شود. نتایج استفاده از فیلتر تابع گودرمان با ضرایب مختلف برای آلفا در این مدل رضایت بخش نیست به نحوی که هرچند لبه‌های ترسیم شده باریک هستند اما لبه چشمه‌های مدفون به صورت ناقص ترسیم شده و عملاً کار تفسیر را با مشکل مواجه می‌کند. نقشه تعیین لبه با فیلتر پیشنهادی تابع گودرمان اصلاح شده بیانگر توانایی این فیلتر در ترسیم لبه‌های چشمه‌های مدفون با وضوح و کیفیت مناسب است. ضمناً همان‌طور که مشاهده می‌شود در این روش، اثری از لبه‌های جعلی و ناقص در نقشه‌های خروجی تعیین لبه وجود ندارد.

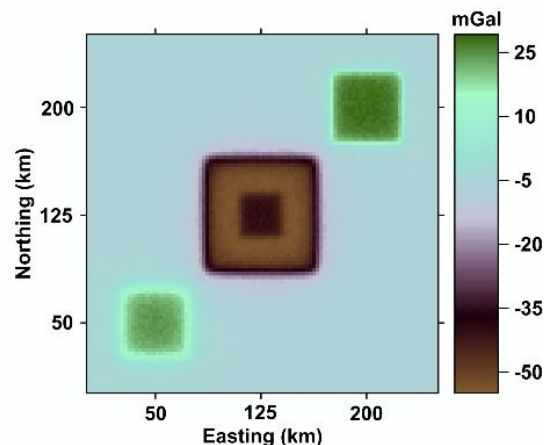
نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین لبه، شامل گرادیان افقی کل، زاویه تیلت، گرادیان افقی کل زاویه تیلت، هایپربولیک زاویه تیلت، زاویه تیلت گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح شده، تابع گودرمان با ضرایب مختلف (آلفا برابر با صفر، دو، چهار، شش و هشت فرض شده است) و تابع گودرمان اصلاح شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج تعیین لبه با روش گرادیان افقی کل نشان می‌دهد که این روش قادر نیست لبه چشمه عمیق S1 را تعیین و آن را به صورت هاله‌ای ترسیم کرده است. لبه چشمه نازک و ادغام شده S4 نیز به صورت هاله‌ای و کدر ترسیم شده است. در شکل ۳، هر چند لبه‌های چشمه‌های مدفون S1، S2، S3 و S4 به ترتیب با روش‌های زاویه تیلت، گرادیان افقی کل زاویه تیلت، و هایپربولیک زاویه تیلت تعیین شده اما ترسیم لبه‌های جعلی در نقشه‌های مذکور، بزرگ‌ترین عیب این روش‌ها است که کار تفسیر را با مشکل مواجه می‌کند. ضمن این که لبه‌های چشمه‌های مدفون در نقشه گرادیان افقی کل زاویه تیلت به صورت هاله‌ای و تار ترسیم شده و عملاً این فیلتر را به عنوان یک



شکل ۳. تعیین لبه چشمه‌های گرانی مصنوعی (بدون نوفه) شامل: (الف) گرادیان افقی کل، (ب) زاویه تیل، (پ) گرادیان افقی کل زاویه تیل، (ت) هایپرولیک زاویه تیل، (ث) زاویه تیل گرادیان افقی کل، (ج) گرادیان افقی کل اصلاح شده، (چ) تابع گودرمان ($\alpha = 0$)، (ح) تابع گودرمان ($\alpha = 2$)، (خ) تابع گودرمان ($\alpha = 4$)، (د) تابع گودرمان ($\alpha = 6$)، (ذ) تابع گودرمان ($\alpha = 8$)، (ر) تابع گودرمان اصلاح شده.

۶. داده مصنوعی آلوده به نوفه

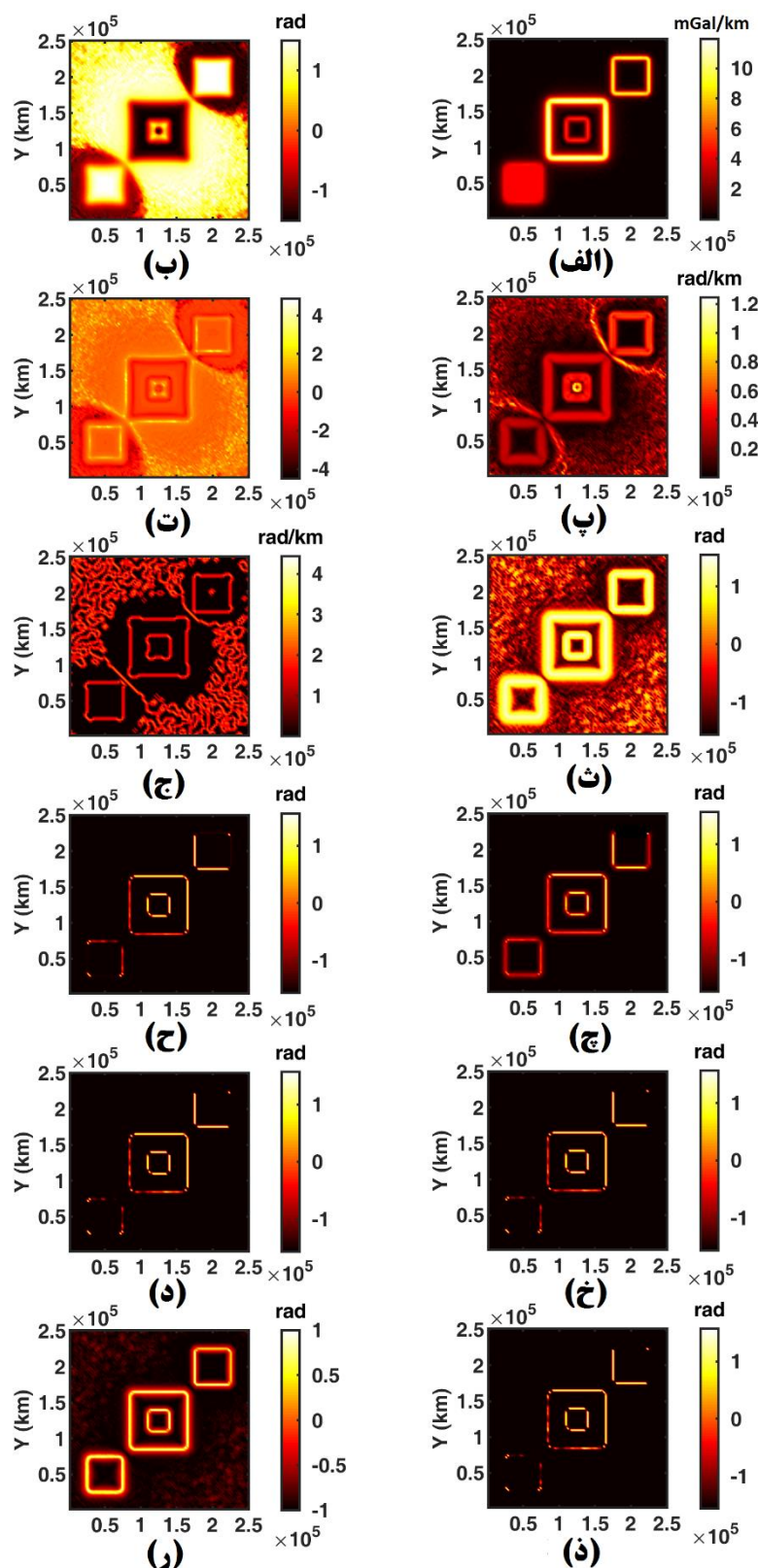
از آنجا که هدف اصلی در تولید چشمه‌های مصنوعی نزدیک کردن پارامترها و شرایط داده‌های مصنوعی تولید شده به بی‌هنجاری‌های واقعی است. داده گرانی مصنوعی، با ۳ درصد نوفه گاوسی آلوده شده که نقشه بی‌هنجاری گرانی این مدل بر حسب میلی‌گال در شکل ۴ نمایش داده شده است. به‌منظور کاهش تأثیر نوفه، پیش از اعمال فیلترهای تعیین لبه، از فیلتر گسترش رو به بالا به ارتفاع ۳۰۰ متر بر روی داده‌های گرانی مصنوعی استفاده شده است. فیلتر گسترش رو به بالا (upward continuation) یک فیلتر پایین گذر است که برای حذف و یا کاهش نوفه، به‌ویژه نوفه‌های حاصل از چشمه‌های سطحی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴. بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی همراه با ۳ درصد نوفه گاوسی.

نتایج حاصل از روش‌های تعیین لبه در شرایط نوفه‌ای شامل گرادیان افقی کل، زاویه تیل، گرادیان افقی کل زاویه تیل، هایپربولیک زاویه تیل، زاویه تیل گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح‌شده، تابع گودرمان با ضرایب مختلف (آلفا برابر با صفر، دو، چهار، شش و هشت فرض شده است) و تابع گودرمان اصلاح‌شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج اعمال فیلتر گرادیان

افقی کل بر روی داده‌های نوفه‌ای، مجدد این روش از عملکرد مناسبی برخوردار نبوده و قادر نیست لبه چشمه عمیق و چشمه ادغام شده را ترسیم کنند. اگرچه روش گرادیان افقی کل در شرایط نوفه‌ای، از حساسیت کمتری به نوفه در مقایسه با سایر فیلترها به‌دلیل عدم وجود گرادیان قائم در رابطه آن برخوردار است. در شکل ۵، هر چند لبه‌های چشمه‌های مدفون با روش زاویه تیل تعیین شده اما ترسیم لبه‌های جعلی و کانتورهای اضافی در نقشه مذکور، بزرگ‌ترین عیب این روش محسوب می‌شود. ضمن این‌که روش‌های گرادیان افقی کل زاویه تیل و هایپربولیک زاویه تیل، گزینه‌های مناسبی برای تعیین موقعیت چشمه‌های گرانی نیستند و لبه‌ها در این نقشه‌ها به‌صورت کم‌رنگ و یا هاله‌ای ترسیم شده است. همان‌طور که انتظار داریم، لبه‌های چشمه‌های مدفون با روش زاویه تیل گرادیان افقی کل با وجود نوفه موجود در داده‌ها تعیین شده است. هر چند وضوح نقشه ترسیم‌شده از لبه‌های مدل نامناسب است. لبه‌های ترسیم‌شده با فیلتر گرادیان افقی کل اصلاح‌شده بیانگر توانایی این فیلتر در ترسیم لبه چشمه‌های کم‌عمق و عمیق به‌صورت همزمان است. هر چند با وجود این‌که این فیلتر، نسخه اصلاح‌شده روش گرادیان افقی کل است، مجدد در شرایط نوفه‌ای نیز مانند شرایط عاری از نوفه، در این نقشه‌ها لبه‌ها و کانتورهای جعلی مشاهده می‌شود و حساسیت به نوفه به‌دلیل استفاده از مشتقات مرتبه بالاتر در فیلتر گرادیان افقی کل بهبود یافته نسبت به گرادیان افقی کل بیشتر است. اگرچه نقشه فیلتر تابع گودرمان از شفافیت و وضوح بالایی نسبت به سایر فیلترها برخوردار است، اما لبه چشمه‌های مدفون در این فیلتر به‌صورت ناقص ترسیم شده است. نقشه‌های تعیین لبه با فیلتر پیشنهادی تابع گودرمان اصلاح‌شده بیانگر توانایی و دقت این فیلتر در ترسیم لبه‌های چشمه‌های مدفون با وضوح و کیفیت مناسب حتی در شرایط نوفه‌ای است.



شکل ۵. تعیین لبه چشمه‌های گرانی مصنوعی آلوده به نوفه پس از اعمال فیلتر گسترش رو به بالا به ارتفاع ۳۰۰ متر شامل: (الف) گرادیان افقی کل، (ب) زاویه تیل، (پ) گرادیان افقی کل زاویه تیل، (ت) هاپربولیک زاویه تیل، (ث) زاویه تیل گرادیان افقی کل، (ج) گرادیان افقی کل اصلاح شده، (چ) تابع گودرمان ($\alpha = 0$)، (ح) تابع گودرمان ($\alpha = 2$)، (خ) تابع گودرمان ($\alpha = 4$)، (د) تابع گودرمان ($\alpha = 6$)، (ذ) تابع گودرمان ($\alpha = 8$)، (ر) تابع گودرمان اصلاح شده.

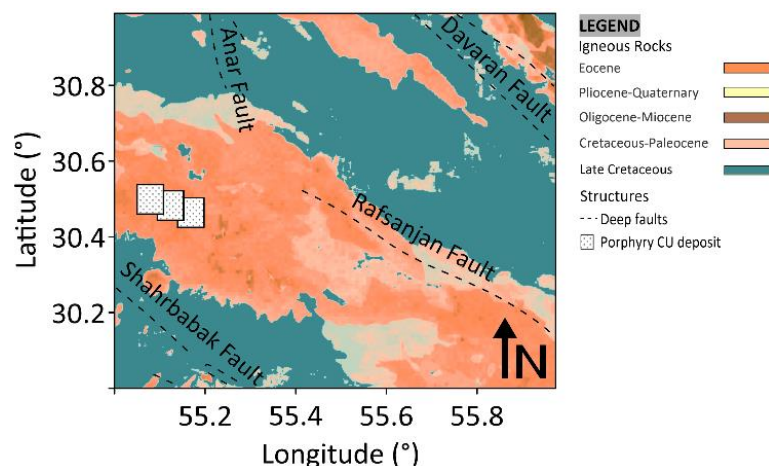
۷. مدل میدانی

تقویت و برجستگی لبه‌های چشمه‌های بی‌هنجار نقشی اساسی در تفسیر داده‌های گرانی دارند. زمانی که از لبه‌های چشمه‌های مدفون صحبت می‌شود، غالباً به خطوط گسل و مرزهای زمین‌شناسی و یا واحدهای سنگی با چگالی متفاوت اشاره می‌کند. به همین دلیل انتخاب مدل‌های واقعی با توجه به شرایط مذکور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (تامناش و دیز توکتهای، ۲۰۲۵). بدین منظور بخشی از استان کرمان جهت ارزیابی و بررسی توانایی فیلترهای تعیین لبه انتخاب و بررسی شده است. در این مقاله موقعیت و محل ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل و... با استفاده از فیلترهای تعیین لبه مرسوم و دو فیلتر گودرمان با ضرایب مختلف و گودرمان اصلاح‌شده تعیین می‌شود.

۷-۱. زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

در استان کرمان هجده گسل فعال وجود دارد و هر یک از این گسل‌ها نیز خود شامل ده‌ها گسله می‌باشند. محدوده دشت رفسنجان واقع در استان کرمان به تنهایی دارای چهار گسل اصلی و ده‌ها گسل پنهان از سیستم ایران مرکزی می‌باشد که به موازات ساختارهای کوهزاد زاگرس پدید آمده است. در این مقاله این محدوده از استان کرمان به دلیل وجود گسل‌های متعدد آشکار و پنهان و به منظور تعیین موقعیت افقی این بی‌هنجاری‌ها مورد بررسی و توجه قرار

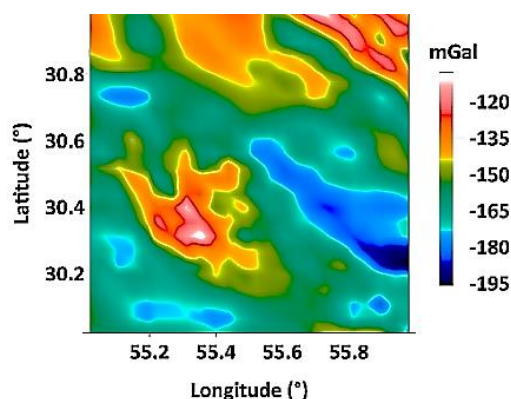
گرفته است. دشت رفسنجان بین دو رشته کوه قرار گرفته است. رشته کوه شمال شرقی، شامل کوه‌های سرخ، گردو، حاجی آباد، حصن و کوه‌نو و رشته کوه جنوب غربی شامل کوه‌های سنگ آواز، پنج خرد، ده حاجی، محمدآباد، تزرچ و کلاته است. آبخوان رفسنجان بین کوه‌های تزرچ و سرخ در جنوب غرب، بدبخت کوه در بخش میانی و کوه‌نو در شمال شرق احاطه شده است. قدیمی‌ترین سازند رخنمون یافته در آبخوان، در مرز شمالی بدبخت کوه قرار دارد. طبق تقسیم‌بندی ساختاری و تکتونیکی، محدوده مطالعاتی دشت رفسنجان در بلوک پشت بادام قرار گرفته است. نکته اساسی این بلوک رخنمون‌های دگرگونی منسوب به پرکامبرین است که بیشتر از نوع سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی‌آواری و آذرآواری به همراه مرمهرهای آهکی و دولومیتی است. محدوده مورد مطالعه از بلوک مذکور انتخاب شده است. این محدوده دارای گسل‌های عمیق و معروفی است که می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید در ارزیابی کیفیت فیلترهای تعیین لبه کمک کند. منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی 55° تا 56° شرقی و عرض‌های جغرافیایی 30° تا 31° شمالی قرار دارد. چهار گسل معروف رفسنجان (Rafsanjan)، انار (Anar)، شهربابک (Shahrabak) و داوران (Davaran) در منطقه مذکور واقع شده است. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی دشت رفسنجان که حاوی سنگ‌های آذرین مزوزوئیک، سنوزوئیک و ذخایر پورفیری همراه با گسل‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه است (ریچاردز و شعله، ۲۰۱۶).

۷-۲. داده گرانی ماهواره‌ای

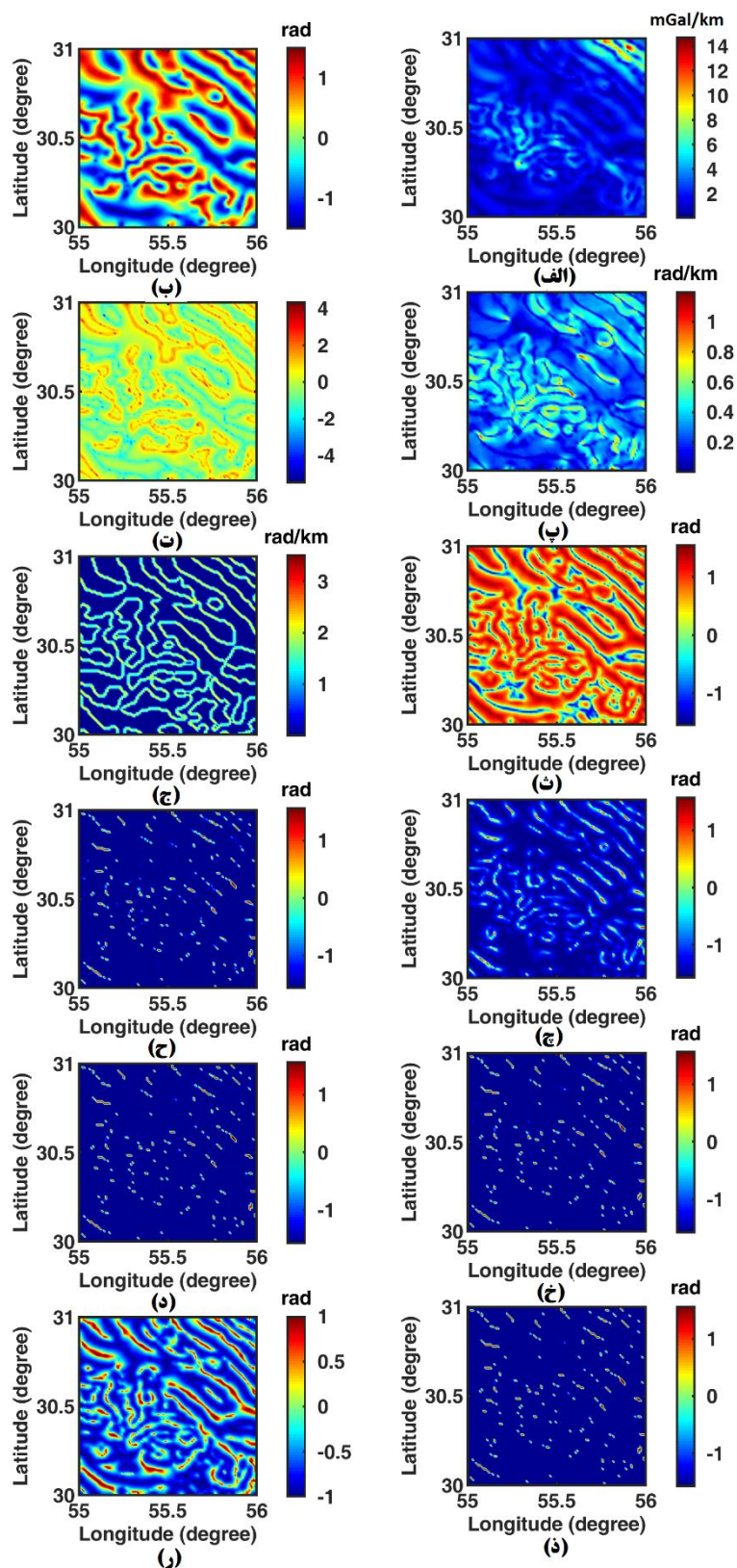
به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد کیفیت فیلترهای تعیین لبه، از داده‌های گرانی ماهواره‌ای استفاده شده است. داده‌ها از مدل جهانی EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) استخراج شده است. این مدل گرانی، یک مدل استاندارد از مدل گرانشی زمین است، که توسط آژانس ملی اطلاعات مکانی ایالات متحده (National Geospatial Intelligence Agency) به صورت رایگان جهت دانلود داده‌های گرانی بوگه و هوای آزاد نقاط مختلف کره زمین طراحی و توسعه داده شده است. داده‌های گرانی بوگه دشت رفسنجان با توجه به وجود گسل‌های متعدد و معروف این منطقه برای بررسی کیفیت فیلترهای تعیین لبه از وبسایت <https://bgi.obs-mip.fr/> انتخاب و استخراج شده است. نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه منطقه مورد مطالعه بر حسب میلی گال در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷. بی‌هنجاری گرانی دشت رفسنجان.

گرانی ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه، شامل گرادیان افقی کل، زاویه تیل، گرادیان افقی کل زاویه تیل، هایپربولیک زاویه تیل، زاویه تیل گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح شده، تابع گودرمان با ضرایب مختلف (آلفا برابر با صفر، دو، چهار، شش و هشت فرض شده است) و تابع گودرمان اصلاح شده در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج تعیین لبه با روش گرادیان افقی کل نشان می‌دهد که این روش قادر نیست موقعیت گسل‌های عمیق این منطقه را تعیین کند. نقشه زاویه تیل لبه‌ها را به صورت تیز و شفاف ترسیم نکرده است. نقشه گرادیان افقی کل زاویه تیل از عملکرد مناسبی برخوردار نیست و لبه‌ها به صورت بسیار تار و هاله‌ای ترسیم شده است. عملکرد فیلتر هایپربولیک زاویه تیل، مانند مدل‌های مصنوعی از عملکرد مناسبی برخوردار نیست. این فیلتر موقعیت برخی منابع را ترسیم کرده اما لبه‌ها به صورت کم‌رنگ ترسیم شده است. در نقشه‌های تعیین لبه با زاویه تیل گرادیان افقی کل و گرادیان افقی کل اصلاح شده هر چند موقعیت گسل‌های اصلی و فرعی در این شکل‌ها ترسیم شده اما مانند نمونه‌های مصنوعی، تفکیک‌پذیری پایین و ترسیم لبه‌های اضافی بزرگ‌ترین ضعف این روش‌ها است. نتایج تعیین لبه با تابع گودرمان با هر ضریب آلفایی در این مدل مناسب نیست و لبه‌ها و موقعیت گسل‌ها قابل تشخیص نیست. نتایج تعیین لبه با تابع گودرمان اصلاح شده کاملاً رضایت‌بخش است. موقعیت گسل‌های فرعی و گسل‌های اصلی محدوده دشت رفسنجان، شامل انار، شهر بابک، رفسنجان و داوران با این دو فیلتر پیشنهادی قابل تشخیص است. این فیلتر قادر است نقشه‌ها را با وضوح بالا ترسیم کنند. همچنین لبه‌های ساختارهای مختلف با یکدیگر متصل نشده و لبه اضافی نیز در نقشه‌ها ترسیم نشده است. نتایج ترسیم شده با فیلتر تابع گودرمان اصلاح شده همخوانی و انطباق خوبی با نقشه زمین‌شناسی در شکل ۶ دارد.

مانند تفسیر مدل مصنوعی، برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی‌هنجاری، پیش از استفاده از فیلترهای تعیین لبه، از فیلتر گسترش رو به بالا به ارتفاع ۳۰۰ متر استفاده شده است. این فیلتر باعث می‌شود، تا طول موج‌های کوچک حذف و نقشه گرانی یکنواخت‌تری برای تفسیر در اختیار داشته باشیم. نتایج اعمال روش‌های مختلف تعیین لبه بر روی داده



شکل ۸. تعیین لبه چشمه‌های گرانی میدانی پس از اعمال فیلتر گسترش رو به بالا به ارتفاع ۳۰۰ متر شامل: الف) گرادیان افقی کل، ب) زاویه تیل، پ) گرادیان افقی کل زاویه تیل، ت) هایپربولیک زاویه تیل، ث) زاویه تیل گرادیان افقی کل، ج) گرادیان افقی کل اصلاح شده، چ) تابع گودرمان ($\alpha = 0$), ح) تابع گودرمان ($\alpha = 2$), خ) تابع گودرمان ($\alpha = 4$), د) تابع گودرمان ($\alpha = 6$), ذ) تابع گودرمان ($\alpha = 8$), ر) تابع گودرمان اصلاح شده.

۸. نتیجه گیری

در دو دهه اخیر روش‌های مختلفی بر مبنای گرادیان‌های افقی و قائم و ترکیب آنها برای رفع محدودیت و مشکل فیلترهای تعیین لبه معرفی و توسعه یافته است. این فیلترها با استفاده از ماکزیمم دامنه (گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل زاویه تیل، هایپربولیک زاویه تیل، زاویه تیل گرادیان افقی کل، گرادیان افقی کل اصلاح شده، تابع گودرمان و...) و دامنه صفر (زاویه تیل) لبه چشمه‌های بی‌هنجار را تعیین می‌کنند. هرچند این روش‌ها نیز با ترسیم لبه‌های جعلی و اضافی، ناواضح بودن تصاویر و مرزهای ترسیم شده و حساسیت به عمق چشمه‌های مدفون از عملکرد مناسبی برخوردار نیستند. از اینرو به منظور افزایش وضوح تصاویر خروجی، عدم ترسیم لبه‌های جعلی و نادرست، افزایش تفکیک پذیری تصاویر تعیین لبه و متعادل کردن دامنه‌های ضعیف و قوی حاصل از چشمه‌های دارای عمق‌های مختلف به صورت همزمان، یک فیلتر جدید بر اساس ترکیب تابع گودرمان اصلاح شده (دامنه هایپربولیک اصلاح شده) با گرادیان‌های جهتی مشتقات افقی در این مقاله معرفی شده

است. نتایج به دست آمده از مدل مصنوعی (با نوفه و بدون نوفه) و داده‌های میدانی، بیانگر توانایی این فیلتر جدید در ترسیم لبه‌های باکیفیت و نقشه‌های عاری از لبه‌های ناقص یا جعلی است. بنابراین با استفاده از فیلتر تابع گودرمان اصلاح شده می‌توان یک تفسیر کیفی از منطقه مورد نظر ارائه کرد. ضمن این که موقعیت افقی گسل‌ها، دایک‌ها و واحدهای سنگی با چگالی متفاوت با این روش قابل ترسیم است.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم و دکتر هاذل دینز توکنای (دانشگاه استانبول، ترکیه) به جهت ارائه نظرات و پیشنهادات ارزنده به منظور ارتقاء کیفیت مقاله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از پروفیسور گوردون کوپر (دانشگاه ویتواتراند، ژوهانسبورگ، آفریقای جنوبی) به دلیل در اختیار قرار دادن بخش کوچکی از اسکریپت‌های برنامه متلب صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Ai, H., Deniz Toktay, H., Alvandi, A., Pasteka, R., Su, K., & Liu, Q. (2024a). Advancing potential field data analysis: the Modified Horizontal Gradient Amplitude method (MHGA). *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 54(2), 119-143. <https://doi.org/10.31577/congeo.2024.54.2.1>.
- Ai, H., Ekinci, Y. L., Alvandi, A., Deniz Toktay, H., Balkaya, Ç. & Roy, A. (2024b). Detecting edges of geologic sources from gravity or magnetic anomalies through a novel algorithm based on hyperbolic tangent function. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 33(6), 684-701. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1936>.
- Ai, H., Huang, Q., Ekinci, Y. L., Alvandi, A., & Narayan, S. (2025). Robust edge detection for structural mapping beneath the Aristarchus Plateau on the Moon using gravity data. *Earth and Space Science*, 12, e2025EA004379. <https://doi.org/10.1029/2025EA004379>.
- Alvandi A. & Ardestani V.E. (2023). Edge detection of potential field anomalies using the Gompertz function as a high-resolution edge enhancement filter. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 64(3), 279-300. <https://doi.org/10.4430/bgo00420>.
- Alvandi, A., Su, K., Ai, H., Ardestani, V. E., & Lyu, C. (2023). Enhancement of Potential Field Source Boundaries Using the Hyperbolic Domain (Gudermannian Function). *Minerals*, 13(10), 1312-1312. <https://doi.org/10.3390/min13101312>.
- Alvandi, A., Ardestani, V. E., & Motavalli-Anbaran, S-H. (2024). Enhancement of the total horizontal gradient of potential field data using the Modified Gudermannian Function (MGTHG): application to aeromagnetic data from Georgia, USA, *Annals of geophysics*, 67(4). <https://doi.org/10.4401/ag-9146>.
- Alvandi, A., Ardestani, V. E., & Motavalli-Anbaran, S-H. (2025). Novel Detectors Based on the Elliott Function for Mapping Potential Field Data: Application to Aeromagnetic Data from Indiana, United States, *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 66 (1). <https://doi.org/10.4430/bgo00479>.
- Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585-1591. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.016>.
- Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New

- Mexico. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 181-179. <https://doi.org/10.1190/1.1826915>.
- Deniz Toktay, H., Prasad, K. N. D., & Alvandi, A. (2024). Edge enhancement of potential field data using the enhanced gradient (EG) filter. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 174(174), 55-66. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1386653>.
- Deniz Toktay, H., Ai, H., Alvandi, A., Su, K., & Li, J. (2025). MTAHG and MTBHG: Modified Approaches for Interpreting Gravity Data. *Earth and Space Science*, 12(4). <https://doi.org/10.1029/2024ea003900>.
- Deniz Toktay, H., Alvandi, A., & Ai, H. (2026). A bi-hyperbolic tilt method for robust edge detection in gravity and magnetic data. *Eur. Phys. J. Plus*, 141, 398. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-026-07646-0>.
- Eldosouky, A. M., Pham, L. T., Mohamed, H., & Pradhan, B. (2020). A comparative study of THG, AS, TA, Theta, TDX and LTHG techniques for improving source boundaries detection of magnetic data using synthetic models: A case study from G. Um Monqul, North Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 170, 103940-103940. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103940>.
- Eldosouky, A. M., Saada, S. A., Allam, S. A., El-Gawad, A. A., Henaish, A., & Zamzam, S. (2025). A robust edge-detection approach for precise delineation of deep structures from potential field data: Structural insights supported by remote sensing. *Scientific Reports*, 15(1), 38475-38475. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23678-5>.
- Ferreira F.J.F., de Souza, J., de B. e S., Bongioio, A., & de Castro, L.G. (2013). Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78(3), J33-J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>.
- Gudermann, C. (1830). *Grundriss der Analytischen Sphärik*; DuMont-Schauberg. Köln, Germany, (In German).
- Long, N. N., Gomez-Ortiz, D., Dung, N. K., & Pham, L. T. (2025). Insights on the structural framework of the Ailaoshan Orogenic Belt from gravity data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106902. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2025.106902>.
- Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1).
- Nasuti, Y., Nasuti, A., & Moghadas, D. (2019). STDR: A Novel Approach for Enhancing and Edge Detection of Potential Field Data. *Pure and Applied Geophysics*, 176(2), 827-841. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2016-5>.
- Narayan, S., Sahoo, S. D., Pal, S. K., & Kumar, U. (2022). Comparative evaluation of five global gravity models over a part of the Bay of Bengal. *Advances in Space Research*, 71, 2416-2436. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.002>.
- 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 Geodaetica et Geophysica*, 54(1), 143-155. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00248-6>.
- Pham, L. T. (2023). A novel approach for enhancing potential fields: application to aeromagnetic data of the Tuangiao, Vietnam. *The European Physical Journal Plus*, 138(12). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04760-1>.
- Pham, L. T., Abdelrahman, K., Prasad, K. N. D., Oliveira, S. P., Gomez-Ortiz, D., & Eldosouky, A. M. (2024). Lineament fabric, crustal structure and isostatic state of the Rub' Al-Khali Basin from gravity data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 279, 106448. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2024.106448>.
- Pham, L. T., Ghomsi, F. E. K., & Eldosouky, A. M. (2025). Identification of the structural configuration of the Equatorial Atlantic Ridge from satellite-derived gravity data using the enhancement techniques. *Advances in Space Research*, 75(12), 8425-8438. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.03.066>.
- Richards J. P., & Sholeh, A. (2016). *The Tethyan Tectonic History and Cu-Au Metallogeny of Iran, Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt*, Society of Economic Geologists, Inc.
- Saada, S. A., Mickus, K., Eldosouky, A. M., & Ibrahim, A. (2021). Insights on the tectonic styles of the Red Sea rift using gravity and magnetic data. *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105253. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105253>.
- Tamtaş, B. D., & Deniz Toktay, H. (2025). Investigation of Potential Structures in the Southeastern Aegean Region Using Seismological and Gravity Data. *Annals of Geophysics*, 68(2), DM216. <https://doi.org/10.4401/ag-9229>.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., & MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116-119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>.