

## Detection of the horizontal boundary of gravity anomalies using the hybrid positive and negative curvature (PNH) procedure

Alvandi, A.<sup>1</sup>  | Motavalli-Anbaran, S. H.<sup>1</sup> 

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

Corresponding Author E-mail: [motavalli@ut.ac.ir](mailto:motavalli@ut.ac.ir)

(Received: 23 July 2023, Revised: 15 Oct 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

### Summary

Determining the edge and horizontal position of geologic structures is one of the fundamental steps in interpreting potential field data. Several filters have been introduced that use the concept of curvature to determine the edge of potential field data. However, these filters have advantages and disadvantages in detecting causative sources. Therefore, it seems necessary to introduce more efficient approaches. In this work, the most positive and most negative curvatures of gravity field data were analyzed, and a more efficient filter was introduced and applied that uses the concept of curvature and its combination to delineate the edges of geological structures and buried sources. The proposed method, called the hybrid positive and negative curvature (PNH) approach, combines the most positive and most negative curvatures into one curvature by fitting the formula and weighted summation. The proposed strategy takes advantage of both positive and negative curvatures to improve the edge detection of gravity field data. To this end, the performance of the PNH procedure was investigated considering different density assumptions (positive, negative, and positive-negative) for the relatively imposed synthetic gravity model resulting from buried prisms. The results obtained on synthetic models with and without noise show that the PNH procedure can detect the horizontal boundaries of buried structures relatively well. Of course, due to the use of directional derivatives in the filter of the hybrid positive and negative curvature approach, it seems very necessary to use noise-reducing filters before applying edge detection methods. Moreover, conventional filters such as the second vertical derivative (SVD) and the tilt angle (TDR) were used to compare the performance of the hybrid positive and negative curvature filter on the synthetic model. However, the obtained results show that the second vertical derivative and the tilt angle do not have the required capability to determine the edge of the synthetic model. In the following, the quality of the most positive and most negative curvatures filter and the hybrid positive and negative curvature were investigated using real data from a gold mine in the Witwatersrand area (South Africa) and also gravity data from the Aji-chai salt dome, East Azerbaijan province (Iran) and then using WGM-2012 derived gravity data belonging to the Marian trench area. Due to the sensitivity of the filters to noise, the upward continuation filter was applied before determining the edge of the buried structures. The edge maps from the Witwatersrand area and the data from the Aji-chai salt dome obtained using the hybrid positive and negative curvature determination method, demonstrate acceptable accuracy of this filter in determining the edge and representing the horizontal position of various geological structures. By using the PNH filter, the lateral boundaries of the main structures and other subsurface sources are well detected. Of course, due to the noise sensitivity of this filter, which is due to the use of second-order gravity derivatives, good quality data without noise must be used. Therefore, it is suggested that noise attenuate filters, such as upward continuation method, must be used prior to creating the maps to determine the edge. Therefore, the PNH edge detection method can be reliably used for qualitative interpretation of gravity field data.

**Keywords:** edge detection, WGM-2012 derived gravity data, hybrid curvature procedure.

Cite this article: Alvandi, A., & Motavalli-Anbaran, S. H. (2024). Detection of the horizontal boundary of gravity anomalies using the hybrid positive and negative curvature (PNH) procedure. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 323-340. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.362046.1007541>

E-mail: (1) [aalvandi@ut.ac.ir](mailto:aalvandi@ut.ac.ir)



Publisher: University of Tehran Press.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.362046.1007541>

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

## تشخیص مرز افقی بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH)

احمد الوندی<sup>۱</sup> | سید هانی متولی عنبران<sup>۱</sup> ✉

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

رایانامه نویسنده مسئول: [motavalli@ut.ac.ir](mailto:motavalli@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۷/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

### چکیده

تعیین لبه و موقعیت افقی ساختارهای زمین‌شناسی یکی از مراحل اساسی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل محسوب می‌شود. در این مقاله مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنای داده‌های گرانی تجزیه و تحلیل شده و فیلتری کارآمدتر با استفاده از نشانگرهای انحنای ترکیبات آنها برای تشخیص گوشه‌های ساختارها و چشمه‌های مدفون گرانی معرفی و استفاده شده است. روش پیشنهادی که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (یا به اختصار PNH) نامیده می‌شود، مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنای را با تنظیم فرمول و جمع وزنی در یک انحنای ترکیب و از مزایای دو انحنای مثبت و منفی برای بهبود تشخیص لبه داده‌های گرانی استفاده می‌کند. بدین منظور ابتدا توانایی فیلتر PNH با در نظر گرفتن سه سناریو مختلف برای چگالی (مثبت، منفی و مثبت-منفی) برای مدل گرانی نسبتاً پیچیده مصنوعی حاصل از منشورهای مدفون بدون نوفه و همراه با نوفه تصادفی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج به دست آمده بر روی مدل‌های مصنوعی نشان می‌دهد فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی، از توانایی بهتری برای تشخیص مرزهای افقی ساختارهای مدفون با چگالی متفاوت و عمق‌های مختلف برخوردار است. همچنین از فیلترهای استاندارد تعیین گوشه مانند، مشتق قائم مرتبه دوم گرانی و فیلتر زاویه تیلت برای مقایسه و صحت سنجی توانایی فیلترهای نشانگر انحنای بر روی مدل مصنوعی استفاده شده است. در ادامه کیفیت فیلتر PNH ابتدا بر روی داده‌های واقعی یک معدن طلا واقع در منطقه ویتواترزد (آفریقای جنوبی)، سپس بر روی داده‌های گرانی مربوط به گنبد نمکی آبی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی (ایران) و در پایان برای تعیین موقعیت ساختارهای مدفون محدوده درازگودال ماریانا با استفاده از داده‌های گرانی ماهواره‌ای (WGM-2012) مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تعیین گوشه، داده‌های گرانی زمینی و ماهواره‌ای، فیلتر انحنای هیبریدی.

### ۱. مقدمه

کیفی و تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی در سال‌های اخیر معرفی شده است. فیلترهای تشخیص گوشه معمولاً بر اساس خواص و تبدیل مشتقات جهتی میدان گرانی مانند ماکزیمم مقدار دامنه (کوردل و گراوچ، ۱۹۸۵)، خطوط صفر دامنه (میلر و سینگ، ۱۹۹۴؛ اروچ، ۲۰۱۰) و مینیمم مقدار دامنه (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵) تعریف می‌شود. به‌عنوان نمونه فیلترهای ساده و محبوب گرادیان افقی کل (کوردل، ۱۹۷۹) و دامنه سیگنال تحلیلی (یا فیلتر دامنه کل) (روئست و همکاران، ۱۹۹۲) از مقدار بیشینه دامنه برای تعیین گوشه چشمه‌های مدفون استفاده می‌کنند (فام و همکاران، ۲۰۲۰). البته اگر بی‌هنجاری گرانی دارای

یکی از دستاوردهای مهم در تفسیر کیفی داده‌های گرانی تعیین موقعیت و تشخیص دقیق مرزهای جانبی ساختارهای مدفون است. در ناحیه برخورد ساختارهای مختلف زمین‌شناسی (مانند گنبد نمکی، دایک، کنتاکت و یا زون‌های گسلی) میزان تغییرات بی‌هنجاری بر روی نقشه‌های گرانی بوگه معمولاً زیاد است. لذا در این مناطق تباین چگالی قابل توجهی در سراسر مرزهای جانبی (Lateral) و گوشه‌ها وجود دارد. به‌همین دلیل تشخیص موقعیت گسل‌ها و تعیین مرزهای افقی ساختارهای مدفون با استفاده از داده‌های گرانی از نقش بسزایی در مطالعات ژئوفیزیکی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تفسیر

جهتی مشتق افقی کل معرفی کردند. فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل توسط فام و همکاران (۲۰۲۰) توسعه پیدا کرد و فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل به‌عنوان یک فیلتر توانمند در تعیین لبه ساختارهای مدفون معرفی شد (فام و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوندی و همکاران، ۱۴۰۱). اساس تعریف تمامی این فیلترها برای تعیین گوشه، استفاده مستقیم از داده‌های برداشت شده زمینی یا هوایی گرانی و مغناطیسی و پردازش داده‌ها با ترکیبی از مشتقات افقی و قائم با مرتبه‌های مختلف به‌منظور دستیابی به موقعیت و تعیین گوشه چشمه‌های بی‌هنجار است.

با توجه به تعداد پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از نشانگرهای انحنا، یک روش کمتر متداول برای تعیین موقعیت افقی ساختارهای مختلف زمین‌شناسی به‌کمک داده‌های گرانی است. در روش گرانی با توجه به این که تباین چگالی در لایه‌های مختلف زیرسطحی باعث ایجاد تغییرات بی‌هنجاری گرانی (تغییرات میدان گرانی) در سطح مشاهده‌ای (زمین، هوا یا دریا) می‌شود. لذا انحنا بی‌هنجاری‌های گرانی، توصیف چگونگی خمش یک منحنی یا یک سطح در نقطه دلخواه است، که از نظر تئوری می‌تواند برای آشکار کردن محل خطواره‌ها، لایه‌ها و مرزهای افقی و تعیین مرز جانبی بی‌هنجاری‌های گرانی مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس فیلیپس و همکاران (۲۰۰۷) یک روش کمی و کیفی مبتنی بر نشانگر انحنا (نشانگر انحنا منفی و مثبت) و توابع ویژه ارائه کردند که برای یافتن موقعیت افقی چشمه‌های مدفون میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیسی) و تخمین عمق بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از مفهوم عدد موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می‌گیرد. کوپر (۲۰۰۹) روش انحنا پروفیلی متعادل‌شده را برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی با استفاده از تبدیلات هیلبرت جهت سیگنال تحلیلی معرفی کرد (الوندی و اردستانی، ۲۰۲۳). سوالوس و همکاران (۲۰۱۳) چندین روش بر اساس ویژگی‌های انحنا برای تفسیر داده‌های گرادیان گرانی هابرد و تفسیر داده‌های زمین‌شناسی ارائه و معرفی کردند. این روش در مقایسه با

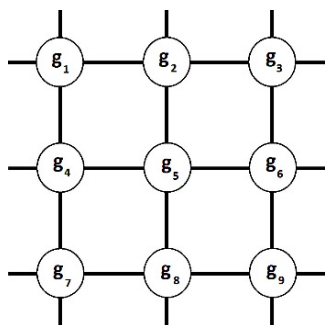
طیف وسیعی از دامنه‌های ضعیف و قوی باشد، تعیین مرز جانبی چشمه‌های عمیق‌تر و پیچیده‌تر (imposed) با این فیلترها امکان‌پذیر نیست. اگرچه بزرگ‌ترین مزیت این فیلترها حساسیت کمتر آنها به نوفه به‌دلیل استفاده از مشتقات درجه اول میدان گرانی است. به‌منظور متعادل کردن دامنه‌های مختلف از چشمه‌های دارای عمق‌های متفاوت، در ده‌های اخیر فیلترهای فاز محلی (local phase) که ترکیبی از مشتقات افقی و قائم هستند برای تعیین مرز جانبی چشمه‌های میدان پتانسیل معرفی و توسعه پیدا کرده است (الوندی و همکاران، ۱۴۰۰). نخستین فیلتر فاز محلی، فیلتر زاویه تیلت یا زاویه کجی نام دارد. میلر و سینگ (۱۹۹۴) فیلتر زاویه تیلت (tilt angle) را که یک مشتق قائم متعادل شده برای تعیین همزمان گوشه چشمه‌های مدفون با عمق‌های متفاوت است را معرفی کردند. این فیلتر از دامنه صفر (کانتور صفر در نقشه‌های سه‌بعدی) برای تعیین گوشه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل استفاده می‌کند. اگرچه این فیلتر برای تعیین لبه ساختارهای نازک و بسیار عمیق مناسب نیست و الزاماً نیز یک فیلتر تعیین گوشه محسوب نمی‌شود (الوندی و همکاران، ۲۰۰۵). ویجنز و همکاران (۲۰۰۵)، فیلتر آشکارساز لبه تتا (یا فیلتر زاویه تتا) را با استفاده از آرک کسینوس گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی معرفی کردند. این فیلتر قادر به توازن همزمان دامنه‌های ضعیف و قوی حاصل از چشمه‌های عمیق و کم‌عمق است. هرچند ترسیم خطوط کاذب و جعلی با دامنه کمینه در نقشه‌های خروجی که سبب گمراهی در تفسیر می‌شود، بزرگ‌ترین نقص و عیب فیلتر زاویه تتا محسوب می‌شود (فام و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوندی و همکاران، ۱۴۰۰). کوپر و کوآن (۲۰۰۶) با استفاده از تابع آرک تانژانت مشتق افقی کل و قدر مطلق گرادیان قائم میدان، فیلتر دیگری تحت عنوان فیلتر مشتق افقی کل به‌نچار شده که عکس فیلتر زاویه تیلت است را برای تعیین مرز افقی چشمه‌های میدان پتانسیل معرفی کردند. فریرا و همکاران (۲۰۱۳) فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل را برای تعیین همزمان گوشه چشمه‌های عمیق و کم‌عمق با استفاده از گرادیان‌های

منفی از مشتقات درجه دوم گرانی استفاده شده، به منظور مقایسه و تأیید کارایی فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی و فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا، از روش مشتق قائم گرانی مرتبه دوم (second order vertical derivative) و فیلتر زاویه تیلت بر روی مدل مصنوعی گرانی بدون نوفه استفاده شده است. دلیل انتخاب فیلتر زاویه تیلت نیز علاوه بر محبوبیت و توانایی آن در تعیین لبه ساختارهای مدفون، ویژگی مشترک آن با فیلترهای انحنا در استفاده از کانطور صفر برای تعیین موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی است.

#### ۲. فیلتر مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا

انحنای بی‌هنجاری گرانی شبکه‌ای با برازش یک سطح درجه دوم در یک پنجره متحرک  $3 \times 3$  برای هر گره شبکه محاسبه می‌شود (فام و همکاران، ۲۰۱۸). با استفاده از روش حداقل مربعات (least squares)، سطح درجه دوم به هشت گره اطراف گره شبکه مرکزی برازش شده (شکل ۱) و در مرحله نخست، بی‌هنجاری گرانی  $g(x, y)$  با استفاده از ضرایب  $A, B, C, D, E$ ، و  $F$  به صورت زیر محاسبه می‌شود (گوو و همکاران، ۲۰۱۵؛ فام و همکاران، ۲۰۱۸):

$$Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F \approx g(x, y) \quad (1)$$



شکل ۱. سطح درجه دوم (یا همان سلول شبکه‌ای  $3 \times 3$ ) متعلق به نه داده گرانی (گوو و همکاران، ۲۰۱۵).

در رابطه (۱) ضرایب  $A, B, C, D, E$ ، و  $F$  گرادین‌های جهتی درجه اول و دوم هستند که با استفاده از رابطه ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ به صورت زیر محاسبه می‌شوند (رابرتز، ۲۰۰۱؛ گوو و همکاران، ۲۰۱۵):

روش‌های پیشین که از مفهوم انحنا استفاده شده، از توانایی و کیفیت مناسب‌تری برخوردار است. هرچند در تعیین گوشه چشمه‌های گرانی و مغناطیسی پیچیده از تفکیک‌پذیری کافی برخوردار نمی‌باشد. گوو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از ترکیب انحناهای مثبت و منفی و ترکیب توابع ویژه، فیلتری برای تعیین گوشه داده‌های مغناطیسی معرفی کردند. فام و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از حداکثر زاویه تیلت از دامنه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی یک فیلتر برای تعیین لبه چشمه‌های مغناطیسی مبتنی بر مفهوم انحنا و بر اساس روش فیلیس و همکاران (۲۰۰۷) معرفی کردند. با این وجود تا اکنون در پردازش و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل و بویژه داده‌های گرانی، استفاده و بهره‌گیری از فیلترهای مبتنی بر انحنا هنوز به یک روش و تکنیک محبوب و فراگیر برای تشخیص لبه‌های بی‌هنجاری‌های گرانی تبدیل نشده و توانمندی و نقاط ضعف این روش‌ها به‌طور مناسب و دقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است.

در این پژوهش با استفاده از نشانگرهای انحنا و به کمک مدل نسبتاً پیچیده مصنوعی گرانی با چگالی‌های متفاوت برای چشمه‌های مدفون با داده‌های بدون نوفه و همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی، کیفیت روش‌های مثبت‌ترین انحنا و منفی‌ترین انحنا برای تعیین لبه چشمه‌های گرانی تحت بررسی قرار گرفته و همزمان فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی نیز به عنوان روشی جدیدتر و کارآمدتر برای تعیین مرز افقی ساختارهای مدفون گرانی مورد آزمایش قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیق کارآمدی فیلترها، سه سناریو متفاوت برای مدل‌های مصنوعی در نظر گرفته شده است. پس از بررسی و تأیید نظری توانمندی روش انحنا هیبریدی مثبت و منفی، توانایی و کیفیت این فیلتر و فیلترهای مثبت‌ترین انحنا و منفی‌ترین انحنا بر روی داده‌های گرانی میدانی مربوط به سه محدوده ویتواترزد واقع در آفریقای جنوبی و گنبد نمکی آجی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی و داده‌های ماهواره‌ای مربوط به درازگودال ماریانا نیز مورد ارزیابی و آزمایش واقع شده است. با توجه به این که در فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و

ضرایب وزنی و ادغام دو فیلتر مثبت‌ترین انحنای منفی‌ترین انحنای با یکدیگر، فیلتری مؤثرتر و دقیق‌تر برای تعیین گوشه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل تحت عنوان روش انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH) معرفی کردند.

- در مرحله نخست مقادیر منفی  $\beta_+$  با مقادیر صفر به‌منظور برجسته‌سازی مقادیر مثبت  $\beta_+$  جایگزین می‌شود.

از این‌رو در رابطه (۱۱) داریم:

$$\begin{cases} \text{when } \beta_+ \geq 0, \beta_+ = \beta_+ \\ \text{when } \beta_+ < 0, \beta_+ = 0 \end{cases} \quad (11)$$

- در مرحله دوم، مقادیر مثبت  $\beta_-$  با مقادیر صفر به‌منظور برجسته‌سازی مقادیر منفی  $\beta_-$  جایگزین می‌شود. از این‌رو با استفاده از رابطه (۱۲) داریم:

$$\begin{cases} \text{when } \beta_- \leq 0, \beta_- = \beta_- \\ \text{when } \beta_- > 0, \beta_- = 0 \end{cases} \quad (12)$$

- در مرحله سوم با استفاده از ضرایب وزنی، دو فیلتر با یکدیگر ترکیب می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۳)، مجموع دو فیلتر وزن‌داده‌شده محاسبه می‌شود:

$$\beta_{sum} = W_p \beta_+ + W_n \beta_- \quad (13)$$

که  $W_p$  و  $W_n$  به ترتیب ضرایب وزنی مثبت و منفی برای  $\beta_+$  و  $\beta_-$  هستند که به‌منظور کنترل کیفیت تفکیک‌پذیری و رزولیشن فیلتر به رابطه فوق اضافه شده است. مقدار مجموع ضرایب  $W_p$  و  $W_n$  برابر با عدد یک است که اگر  $W_p$  بزرگ‌تر از  $W_n$  باشد، تأثیر  $\beta_+$  بیشتر و اگر  $W_p$  کوچک‌تر از  $W_n$  باشد، تأثیر  $\beta_-$  بیشتر خواهد بود.

۴- در مرحله نهایی به‌منظور بهنجار کردن رابطه (۱۳) و به‌دست آوردن یک انحنای بهنجار شده تحت عنوان انحنای هیبریدی مثبت و منفی،  $\beta_{sum}$  بر بیشینه قدر مطلق  $\beta_{sum}$  تقسیم می‌شود. بنابراین داریم:

$$PNH = \frac{\beta_{sum}}{\max |\beta_{sum}|} \quad (14)$$

در فیلتر هیبریدی PNH بیشینه تغییرات دامنه برابر با یک و کمینه تغییرات دامنه برابر با منفی یک است. گوشه چشمه‌های مدفون با استفاده از دامنه صفر و نزدیک به صفر تعیین می‌شود.

#### ۴. کاربرد بر روی داده‌های مصنوعی

در این بخش توانایی فیلترهای مثبت‌ترین انحنای ( $\beta_+$ )، منفی‌ترین انحنای ( $\beta_-$ ) و فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و

$$A = \frac{1}{2} \frac{d^2g}{dx^2} = \frac{g_1+g_3+g_4+g_6+g_7+g_9}{12\Delta x^2} - \frac{g_2+g_5+g_8}{6\Delta x^2} \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{d^2g}{dy^2} = \frac{g_1+g_2+g_3+g_7+g_8+g_9}{12\Delta y^2} - \frac{g_4+g_5+g_6}{6\Delta y^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{d^2g}{dx dy} = \frac{g_3+g_7-g_1-g_9}{4\Delta x \Delta y} \quad (4)$$

$$D = \frac{dg}{dx} = \frac{g_3+g_6+g_9-g_1-g_4-g_7}{6\Delta x} \quad (5)$$

$$E = \frac{dg}{dy} = \frac{g_1+g_2+g_3-g_7-g_8-g_9}{6\Delta y} \quad (6)$$

$$F = \frac{2(g_2+g_4+g_6+g_8)-(g_1+g_3+g_7+g_9)+5g_5}{9} \quad (7)$$

در معادلات فوق،  $g_1$  تا  $g_9$  مقادیر گره شبکه بی‌هنجاری گرانی در شکل (۱) و  $\Delta x$  و  $\Delta y$  به ترتیب فواصل شبکه در جهت‌های  $x$  و  $y$  در مختصات کارترین هستند. در نقاط اکسترمم یک سطح درجه ۲، مشتقات جزئی درجه اول برابر با صفر هستند. از این‌رو با استفاده از ماتریس هسین (معادله ۸) مشتقات جزئی درجه دوم  $g(x, y)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2g}{dx^2} & \frac{d^2g}{dx dy} \\ \frac{d^2g}{dx dy} & \frac{d^2g}{dy^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2A & C \\ C & 2B \end{pmatrix} \quad (8)$$

مقادیر ویژه ماتریس هسین (مثبت‌ترین انحنای منفی‌ترین انحنای) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_+ = (A + B) + \sqrt{(A - B)^2 + C^2} \quad (9)$$

$$\beta_- = (A + B) - \sqrt{(A - B)^2 + C^2} \quad (10)$$

با استفاده از دو رابطه (۹) و (۱۰)، موقعیت گسل‌ها، خطواره‌ها و سایر ساختارهای زمین‌شناسی به کمک داده‌های گرانی تعیین می‌شود. هرچند برای کسب نتیجه دلخواه و ارائه تفسیری دقیق‌تر و جامع‌تر، نقشه هر دو روش  $\beta_+$  و  $\beta_-$  بهتر است تولید و همزمان مورد بررسی قرار گیرد (رابرتز، ۲۰۰۱). اگرچه نخستین بار از توانایی این دو نشانگر برای تفسیر داده‌های لرزه‌ای استفاده شده، اما از روش‌های مثبت‌ترین انحنای ( $\beta_+$ ) و منفی‌ترین انحنای ( $\beta_-$ ) می‌توان برای تفسیر داده‌های گرانی و تعیین گوشه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل استفاده کرد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

#### ۳. فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH)

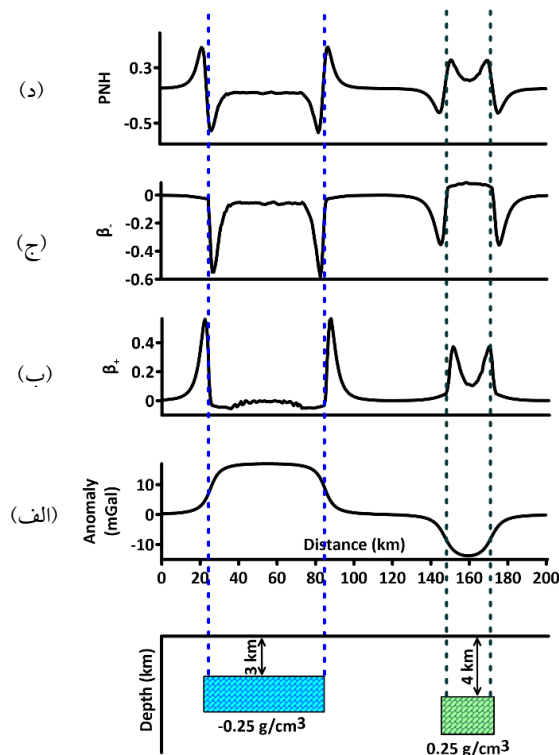
دو فیلتر مثبت‌ترین انحنای منفی‌ترین انحنای دارای نقاط ضعف در تشخیص لبه‌های چشمه‌های مدفون هستند. از این‌رو گوو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تعریف

برنامه متلب تولید شده است. خط چین عمودی موقعیت دقیق لبه‌های دو چشمه گرانی را در شکل (۲) نمایش می‌دهد. مدل مفروض و پارامترهای در نظر گرفته شده برای دو چشمه مدفون در شکل (۲) نمایش داده شده است. بی‌هنجاری گرانی تولید شده حاصل از دو منشور مدفون با چگالی مثبت و منفی در شکل ۲-الف بر حسب میلی‌گال ترسیم شده است. در شکل ۲-ب نتایج فیلتر مثبت‌ترین انحنا، شکل ۲-ج نتایج فیلتر تعیین لبه منفی‌ترین انحنا و در شکل ۲-د نتایج تعیین لبه با فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی برای مدل دوبعدی گرانی نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل (۲)، فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی قادر به تعیین لبه هر دو منشور با چگالی‌های مختلف و عمق‌های متفاوت به طور همزمان است. در صورتی که با دو فیلتر تعیین گوشه منفی‌ترین انحنا و مثبت‌ترین انحنا به ترتیب مرز افقی چشمه عمیق‌تر با چگالی مثبت و چشمه با عمق کمتر و با چگالی منفی بهتر ترسیم شده است.

منفی (PNH) برای تعیین گوشه بی‌هنجاری مصنوعی گرانی با منشورهای دارای پارامترهای مختلف بررسی شده است. در ابتدا یک مدل دوبعدی با دو منشور مدفون دارای چگالی مثبت و منفی و سپس مدل‌های سه‌بعدی با چگالی‌های مختلف، جهت بررسی کیفیت و توانایی فیلترهای تعیین گوشه تولید و در نظر گرفته شده است. با فرض عدم اطلاع از ویژگی‌های هندسی و تباین چگالی چشمه‌های مصنوعی، به منظور بررسی دقیق و عاری از خطا، در همه مدل‌های مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی مقدار ضریب وزنی  $W_p$  برابر  $0/5$  و ضریب وزنی  $W_n$  نیز برابر  $0/5$  فرض شده است.

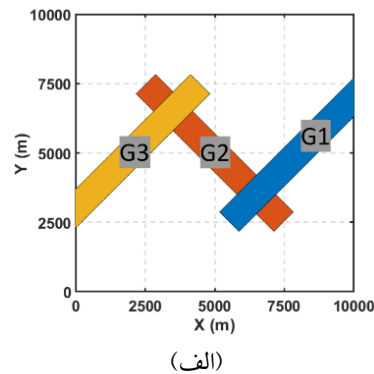
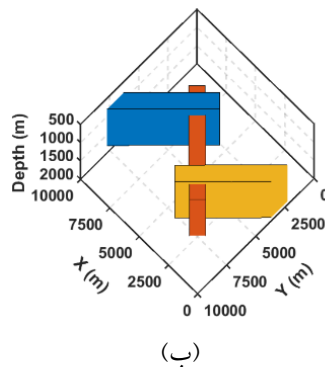
#### ۱-۴. داده دو بعدی

یک مدل دوبعدی گرانی شامل دو منشور با ضخامت ۲ کیلومتر در عمق‌های ۳ و ۴ کیلومتری با چگالی منفی و مثبت به منظور بررسی توانایی فیلترهای مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی در محیط



شکل ۲. مدل مصنوعی دوبعدی (منشور سمت چپ (آبی‌رنگ) دارای چگالی  $-0/25$  گرم بر سانتی‌متر مکعب که در عمق ۳ کیلومتر و منشور سمت راست (سبز رنگ) دارای چگالی  $0/25$  گرم بر سانتی‌متر مکعب که در عمق ۴ کیلومتر قرار گرفته است) همچنین موقعیت دقیق لبه‌ها با خطوط خط‌چین عمودی مشخص شده است؛ الف) بی‌هنجاری گرانی تولید شده توسط منشورهای دوبعدی مدفون بر حسب میلی‌گال، ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، د) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی.

چگالی‌های منفی و مثبت برای چشمه‌های مدفون در سناریوی سوم، و با در نظر گرفتن عمق‌های متفاوت برای چشمه‌های مدفون G1، G2 و G3 در یک شبکه منظم  $10 \times 10 \text{ km}^2$  در جهت شمال-جنوب و شرق-غرب با فاصله نمونه‌برداری ۱۰۰ متر با استفاده از فرمول ارائه شده توسط رائو و همکاران (۱۹۹۰) در محیط برنامه متلب تولید شده است. برای ایجاد پیچیدگی بیشتر در مدل مصنوعی گرانی، مقدار عمق بالا، عمق پایین، تباین چگالی و سایر پارامترها برای هر منشور مدفون G1، G2 و G3 متفاوت در نظر گرفته شده است (جدول ۱).



شکل ۳. مدل مصنوعی گرانی: الف) نمایش دوبعدی مدل مصنوعی گرانی؛ ب) نمایش سه‌بعدی مدل مصنوعی گرانی.

جدول ۱. پارامترهای چگالی و هندسی مدل مصنوعی گرانی با در نظر گرفتن سه فرض متفاوت برای تباین چگالی.

G1	G2	G3	پارامترهای مدل مصنوعی
۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض اول
-۳۰۰۰	-۲۰۰۰	-۱۰۰۰	تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض دوم
۳۰۰۰	-۲۰۰۰	۱۰۰۰	تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض سوم
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	عرض منشور (متر)
۷۰۰۰	۷۰۰۰	۷۰۰۰	طول منشور (متر)
۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	ضخامت منشور (متر)
۸۰۰۰	۵۰۰۰	۲۰۰۰	مختصات افقی (متر)
۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	مختصات عمودی (متر)
۹۰۰	۱۰۰۰	۸۰۰	عمق بالا (متر)
۱۹۰۰	۳۰۰۰	۱۸۰۰	عمق پایین (متر)
۴۵	-۴۵	۴۵	آزیموت جهتی (درجه)

نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلترهای مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی در شکل ۴ نمایش داده شده است. به‌منظور بررسی کیفیت و توانایی فیلترها در تعیین گوشه و تشخیص موقعیت افقی مدل مصنوعی، همان‌طور که اشاره شد ما سه سناریو برای منشورهای مدل مصنوعی گرانی در نظر گرفتیم. در سناریوی اول فرض بر مثبت‌بودن تباین چگالی منشورهای G1، G2 و G3، در سناریوی دوم فرض بر منفی‌بودن تباین چگالی منشورهای G1، G2 و G3 و در سناریوی سوم تباین چگالی دو منشور G1 و G3 مثبت و تباین چگالی منشور G2 منفی در نظر گرفته شده است (جدول ۱). شکل ۴-الف بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت‌بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. شکل ۴-ب، ج و د-نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی با فرض ضریب وزنی  $W_p$  برابر ۰/۵ و ضریب وزنی  $W_n$  برابر ۰/۵ به‌ترتیب نمایش داده شده است. در تصویر ۴-ب، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن نیستند و فیلتر مثبت‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری گرانی با تباین چگالی مثبت و مدفون شده در عمق‌های مختلف نمی‌باشد. در تصویر ۴-ج، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن هستند و فیلتر منفی‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری گرانی با تباین چگالی مثبت با عمق‌های مختلف می‌باشد. در تصویر ۴-د، مرز افقی سه منشور G1، G2 و G3 به‌خوبی تعیین شده و این فیلتر قادر است به‌طور هم‌زمان مرز ساختارهای مدفون با چگالی مثبت را با استفاده از ترسیم کانتور صفر تعیین کند. در شکل ۴-ذ بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض منفی‌بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. شکل ۴-س، ۴-ش و ۴-م-نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی به‌ترتیب نمایش داده شده است. در شکل ۴-س سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن و فیلتر

مثبت‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز افقی بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی منفی در عمق‌های مختلف است. در تصویر ۴-ش، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن نیستند و فیلتر منفی‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی منفی و مدفون شده در عمق‌های مختلف نمی‌باشد. در تصویر ۴-م مرز افقی سه منشور G1، G2 و G3 به‌خوبی تعیین شده و تصویر خروجی بیانگر توانایی و کیفیت این فیلتر در تعیین لبه چشمه‌های مدفون با چگالی منفی است. شکل ۴-ص بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت و منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. شکل ۴-ض، ۴-ک و ۴-گ-نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی به‌ترتیب نمایش داده شده است. فیلتر مثبت‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز افقی ساختارهای مدفون نیست و موقعیت تقریبی چشمه‌های مدفون G1 و G2 با تباین چگالی مثبت مشخص شده است. البته ترسیم کانتورهای جعلی و اضافی در تصویر، اساس کار تفسیر را با مشکل مواجه می‌کند (شکل ۴-ض). در شکل ۴-ک لبه چشمه G2 که دارای تباین چگالی منفی است توسط فیلتر منفی‌ترین انحنا مشخص شده است. اگر چه لبه دو چشمه G1 و G3 نیز به‌صورت تار و کدر ترسیم شده است. در شکل ۴-گ لبه چشمه G1، G2 و G3 که دارای تباین چگالی‌های مثبت و منفی هستند توسط فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی مشخص شده و این فیلتر قادر است با استفاده از ترکیب قابلیت‌های هر دو فیلتر مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنای مرز چشمه‌های مدفون با تباین چگالی مثبت، منفی و مثبت-منفی را مشخص کند.

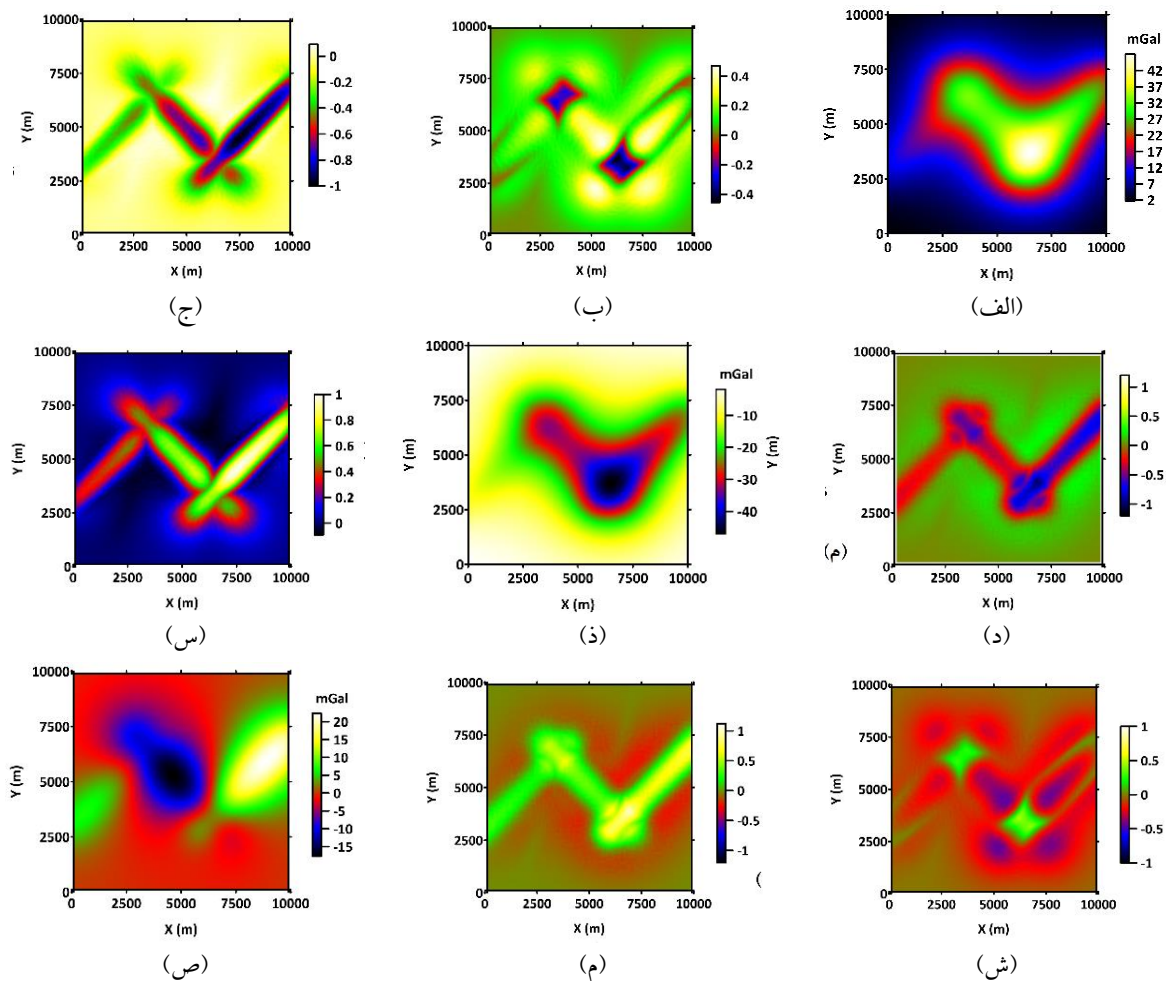
در ادامه به‌منظور تأیید توانایی و کیفیت فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی برای تعیین لبه چشمه‌های گرانی، دو فیلتر مشتق قائم گرانی مرتبه دوم و فیلتر زاویه تیلت برای تعیین مرز افقی مدل مصنوعی گرانی بدون نوفه مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۵). دلیل انتخاب این دو

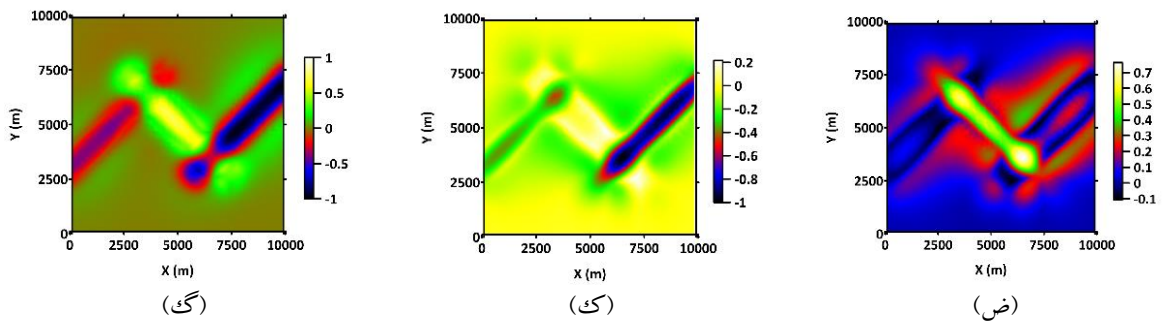


$$\text{TDR} = \tan^{-1} \left[ \frac{\frac{\partial g}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (14)$$

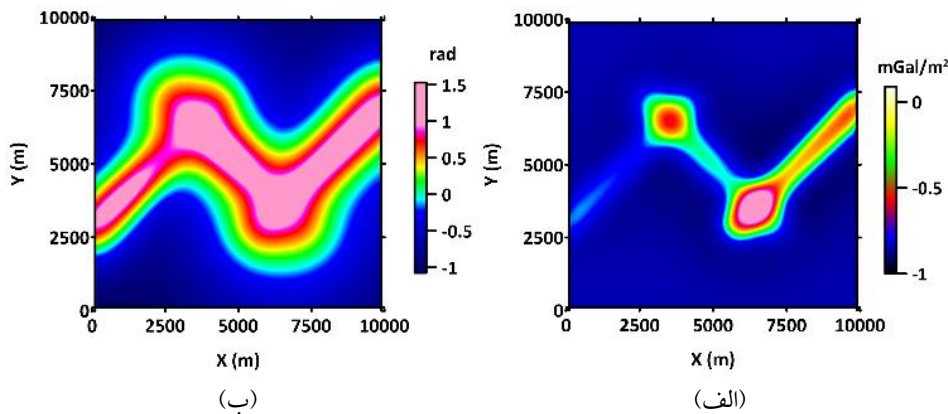
در شکل ۵-الف و ۵-ب به ترتیب نتایج به دست آمده از فیلترهای مشتق دوم قائم گرانی و زاویه تیلت نمایش داده شده است. با استفاده از تحلیل کانتورهای صفر در شکل ۵-الف، فیلتر مشتق دوم قائم قادر به تعیین لبه هیچکدام از سه منشور مدفون در مدل مصنوعی نیست و عملاً این فیلتر از کیفیت لازم برای تعیین لبه مدل مصنوعی برخوردار نمی‌باشد. همچنین با توجه به نتایج ترسیم شده از فیلتر زاویه تیلت، این فیلتر نیز مرز سه منشور را به صورت کلی و بسیار بزرگ‌تر از واقعیت ترسیم کرده و تنها موقعیت کلی چشمه‌های گرانی در مدل مصنوعی مشخص شده است.

فیلتر محبوبیت و فراگیری آنها در تعیین لبه و همچنین ویژگی مشترک آنها با فیلترهای انحنای در استفاده از کانتور صفر برای تعیین موقعیت و تشخیص لبه ساختارهای زمین‌شناسی است. همچنین چون کرنل فیلترهای انحنای مشتقات درجه دوم است، استفاده از فیلتر مشتق قائم مرتبه دوم انتخابی صحیح به منظور مقایسه کیفیت روش‌های تعیین لبه در این پژوهش است. فیلتر زاویه تیلت، یک فیلتر فازی است (الوندی و اردستانی، ۲۰۲۳) که قادر است با استفاده از آرک تانژانت گرادیان قائم گرانی (صورت کسر) و مجموع گرادیان افقی میدان گرانی (مخرج کسر) به طور همزمان مرز بی‌هنجاری‌های عمیق و کم عمق را تعیین کند (میلر و سینگ، ۱۹۹۴). این فیلتر به صورت زیر تعریف می‌شود:





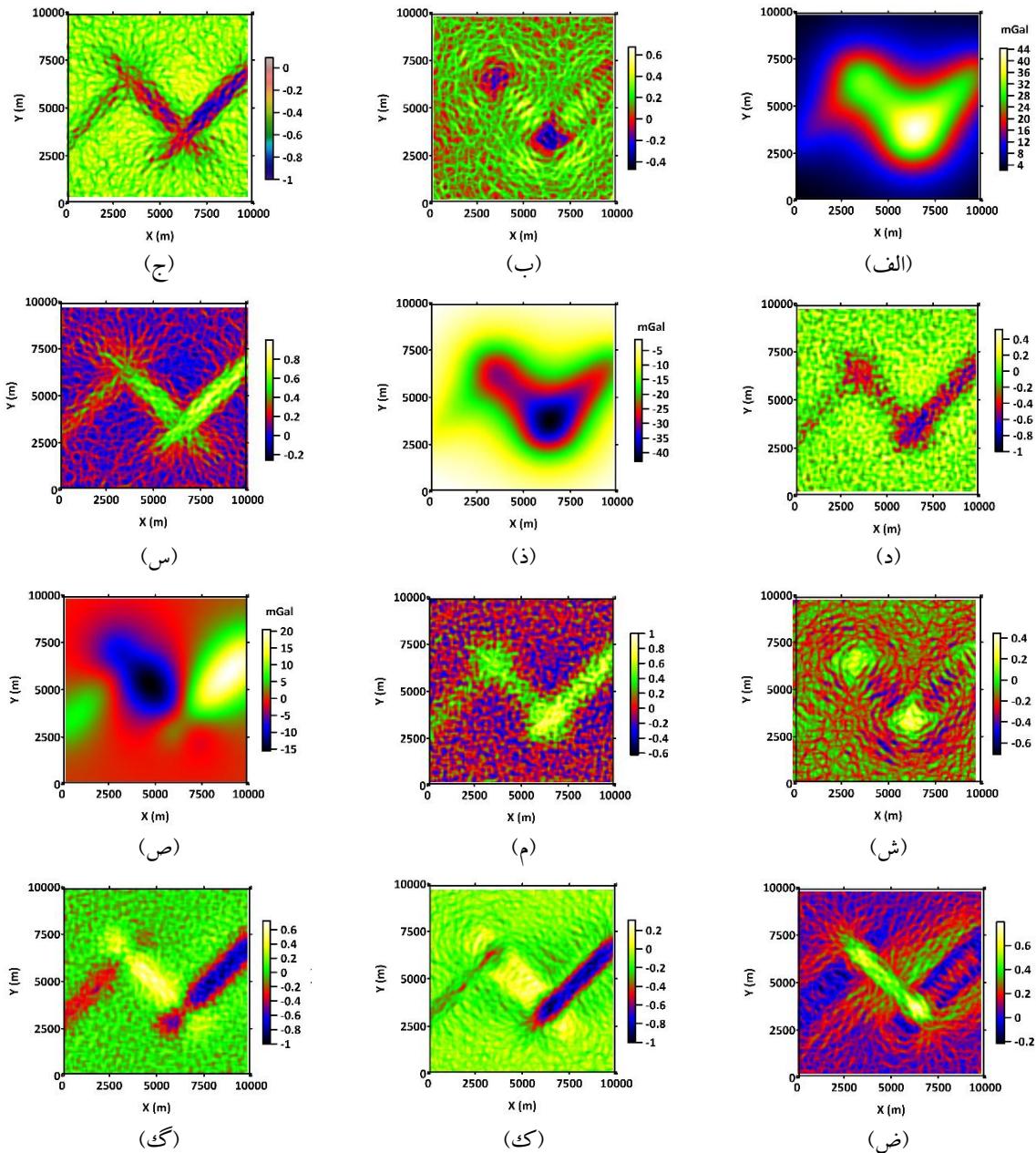
شکل ۴. تعیین گوشه بی‌هنجاری گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف؛ الف) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت، ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ )، ذ) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ش) فیلتر منفی‌ترین انحنا، م) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ )، ص) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت و منفی، ض) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ک) فیلتر منفی‌ترین انحنا، گ) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ ).



شکل ۵. تعیین گوشه بی‌هنجاری گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف؛ الف) فیلتر مشتق دوم قائم گرانی؛ ب) فیلتر زاویه تیلت (کانتور صفر بیانگر مرز افقی چشمه‌های مدفون است).

نوفه است. با توجه به این که در فیلترهای انحنا نیز از مشتقات مرتبه اول و دوم استفاده شده، به منظور کاهش تأثیر نوفه، قبل از استفاده از این فیلترها به کار بردن فیلترهای کاهش نوفه مانند روش ادامه فراسو بسیار ضروری به نظر می‌آید (گوو و همکاران، ۲۰۱۵). از این رو بر روی داده‌های مدل مصنوعی آلوده به نوفه، فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۱۵۰ متر به منظور کاهش نوفه‌های ضعیف و هموار کردن داده‌های مدل مصنوعی اعمال شده است.

از آنجاکه هدف اصلی در تولید مدل‌های مصنوعی گرانی نزدیک کردن پارامترها و شرایط به ساختارهای مدفون واقعی است، مدل مصنوعی تولید شده را با ۵ درصد نوفه تصادفی آلوده کرده‌ایم. نقشه بی‌هنجاری‌های گرانی همراه با نوفه (با در نظر گرفتن سه سناریوی مختلف برای تباین چگالی) در شکل ۶ نمایش داده شده است. مشکل اساسی در اکثر فیلترهای تعیین لبه به دلیل استفاده از مشتقات جهتی با درجات مختلف، حساسیت زیاد فیلترهای تعیین گوشه به



شکل ۶. تعیین گوشه بی‌هنجاری گرانی مصنوعی همراه با نوفه با فیلترهای مختلف پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو؛ الف) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت، ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، د) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ )، ذ) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ش) فیلتر منفی‌ترین انحنا، م) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ )، ص) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت و منفی، ض) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ک) فیلتر منفی‌ترین انحنا، گ) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $1/2$ ).

و منفی با فرض ضریب وزنی  $W_p$  برابر  $0/5$  و نیز ضریب وزنی  $W_n$  برابر  $0/5$  به ترتیب نمایش داده شده است. در شکل ۶-ب، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق متوازن نیستند و فیلتر مثبت‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی مثبت و مدفون شده در

شکل ۶-الف بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی همراه با نوفه تصادفی با فرض مثبت‌بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. شکل ۶-ب، ج و د- نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت

نتایج به دست آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی به ترتیب نمایش داده شده است. که فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی قادر است مرز چشمه‌های مدفون حاوی نوفه را نیز مشخص کند.

## ۵. کاربرد بر روی داده‌های میدانی

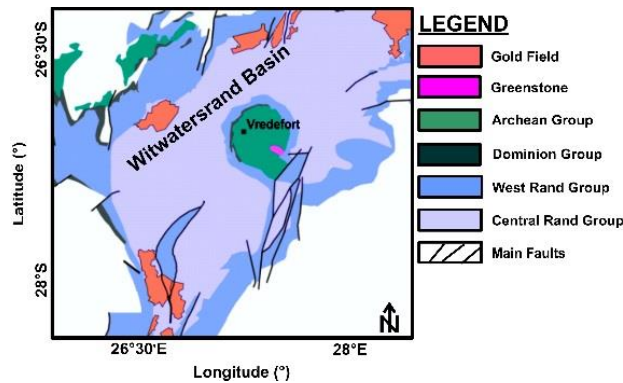
### ۵-۱. حوزه ویتواترزنند، آفریقای جنوبی

در این بخش توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین لبه بی‌هنجاری بر روی داده‌های گرانی حوزه ویتواترزنند، واقع در آفریقای جنوبی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه در مرکز کاپوال کراتون قرار گرفته و یکی از بزرگ‌ترین ذخایر طلا در جهان را دارا می‌باشد (بیچ و اسمیت، ۲۰۰۷) (شکل ۷). نتایج یک مطالعه زمین‌شناسی گسترده که توسط بارنیکوت و همکاران (۱۹۹۷) ارائه شده، نشان می‌دهد که کانی‌سازی طلا در منطقه ویتواترزنند منشأ گرمایی دارد. این حوضه از رسوبات و سنگ‌های آتشفشانی با قدمت بین ۲/۷ تا ۳ میلیارد سال تشکیل شده است (روب و میر، ۱۹۹۵). یکی از ویژگی‌های برجسته در مرکز حوضه ویتواترزنند، دهانه معروف وردفورت (Vredefort crater) است. این دهانه بزرگ‌ترین دهانه برخوردی شناخته شده بر روی زمین است که در نزدیکی شهر ژوهانسبورگ واقع شده است. نقشه زمین‌شناسی محدوده ویتواترزنند، موقعیت دهانه وردفورت، موقعیت ذخایر طلا و گسل‌های اصلی حوزه مورد مطالعه در شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی‌ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالباً از سنگ‌هایی مانند ماسه‌سنگ، کواتریت و شیل تشکیل و دارای ضخامتی بیش از ۸ کیلومتر است. اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های گرانی منطقه ویتواترزنند از پایگاه اینترنتی داده‌های گرانی بوگه آفریقای جنوبی به نشانی <https://www.geoscience.org.za> قابل استخراج و دانلود رایگان است. شکل ۸-الف نقشه بی‌هنجاری گرانی حوضه ویتواترزنند را بر حسب میلی‌گال نشان می‌دهد. داده‌های محدوده مورد مطالعه، در یک شبکه منظم

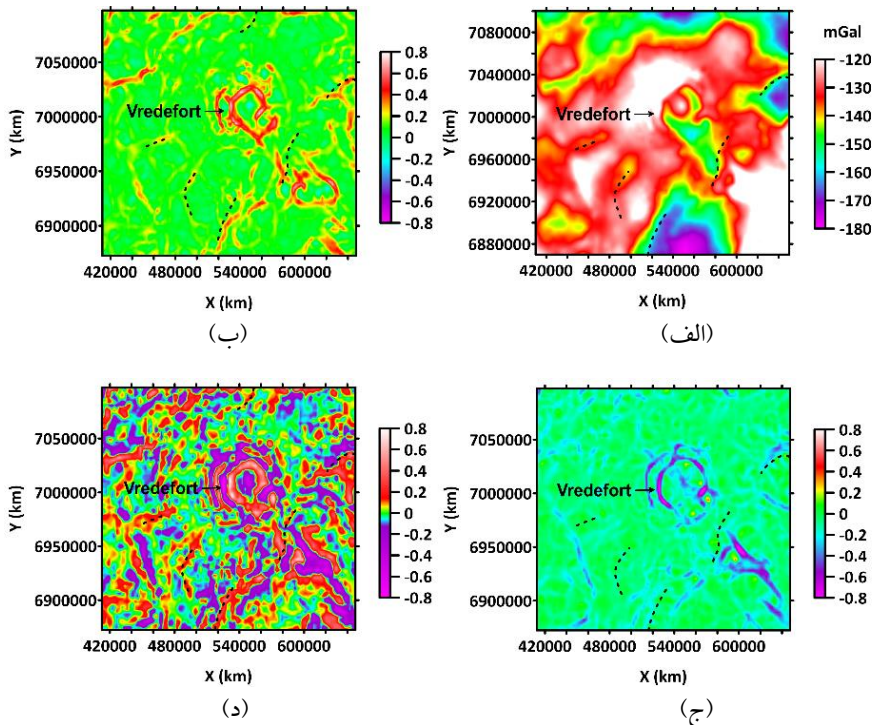
عمق‌های مختلف نمی‌باشد. در شکل ۶-ج، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن هستند و فیلتر منفی‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز چشمه‌های با تباین چگالی مثبت است. همان‌طور که انتظار داریم در شکل ۶-د لبه سه منشور  $G1$ ،  $G2$  و  $G3$  به خوبی تعیین شده است. این فیلتر قادر است به‌طور همزمان مرز ساختارهای مدفون با چگالی مثبت را تعیین کند. در شکل ۶-ذ بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی همراه با نوفه با فرض منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. شکل ۶-س، ۶-ش و ۶-م نتایج به دست آمده از روش‌های مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی با فرض ضریب وزنی  $W_p$  برابر ۰/۵ و نیز ضریب وزنی  $W_n$  برابر ۰/۵ به ترتیب نمایش داده شده است. در شکل ۶-س، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن و فیلتر مثبت‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی منفی و مدفون شده در عمق‌های مختلف است. در شکل ۶-ش، سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و فیلتر منفی‌ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی‌هنجاری‌های با تباین چگالی منفی نمی‌باشد. در شکل ۶-م لبه سه منشور  $G1$ ،  $G2$  و  $G3$  تعیین شده و تصویر خروجی بیانگر توانایی و کیفیت این فیلتر در تعیین لبه چشمه‌های مدفون با چگالی منفی در شرایط نوفه‌ای است. شکل ۶-ص بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت و منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی‌گال نمایش داده شده است. در این مدل نیز فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی قادر به تعیین مرز سه چشمه مدفون است. البته با توجه به این که در فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحناها و انحنا هیبریدی مثبت و منفی از مشتقات درجه دوم گرانی استفاده شده و به‌طور ناخواسته با سیگنال‌های تصویر نوفه نیز برجسته می‌شود، لذا استفاده از روش‌های رفع نوفه مانند فیلتر گاوسی، موجک، ادامه فراسو و ... قبل از استفاده از فیلترهای تعیین لبه ضروری به نظر می‌آید. شکل ۶-ض، ۶-ک و ۶-گ

الف). به منظور تعیین گوشه چشمه‌های بی‌هنجار مدفون، فیلترهای تعیین گوشه بی‌هنجاری بر روی نقشه به دست آمده از فیلتر ادامه فراسو اعمال شده است. محدوده گنبد وردفور و گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه به همراه نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین لبه شامل مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی در شکل (۸) نمایش داده شده است.

۴۶۱×۴۸۱ km<sup>2</sup> با فاصله نمونه‌برداری نیم کیلومتر شبکه‌بندی شده است (فام، ۲۰۲۱). برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی‌هنجاری گرانی، قبل از استفاده از فیلترهای مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی، از فیلتر ادامه فراسو (۱۰۰ متر) استفاده شده، زیرا همان‌طور که اشاره شد، فیلتر فراسو باعث می‌شود، تا طول موج‌های کوچک حذف و نقشه گرانیتی یکنواخت‌تری در اختیار داشته باشیم (شکل ۸-).



شکل ۷. نقشه زمین‌شناسی حوضه ویتواتراند (تیلور و اندرسون، ۲۰۱۸).



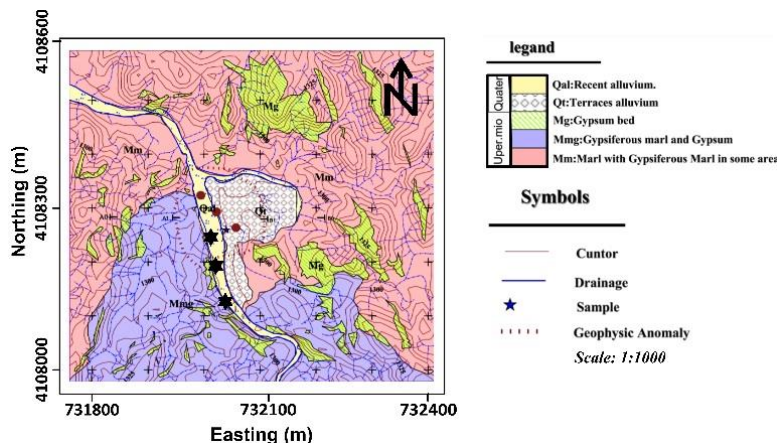
شکل ۸. تعیین گوشه بی‌هنجاری گرانیتی محدوده ویتواتراند واقع در آفریقای جنوبی (موقعیت دهانه وردفور و گسل‌های اصلی بر روی نقشه نمایش داده شده است): الف) بی‌هنجاری گرانیتی میدانی بر حسب میلی‌گال پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو، ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، د) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ ).

منطقه آجی‌چای در جنوب میانه (استان آذربایجان شرقی) قرار دارد و در نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مشخص شده است (رضوی و جعفری، ۱۳۸۷). این منطقه دارای رسوبات مارن، ماسه سنگ، کنگلومرا و... همراه با رسوبات تبخیری است که به دلیل ماهیت سست خود در معرض فرسایش شدید قرار گرفته و مورفولوژی کم با دره‌های کم‌عمق را ایجاد کرده است. گنبد‌های نمکی استان آذربایجان عموماً دارای حجم کم و در نزدیکی سطح زمین قرار دارند. در شکل ۹ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی‌چای نمایش داده شده است (رضوی و جعفری، ۱۳۸۷). در سال ۲۰۰۸، برداشت‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی با دقتی مناسب توسط سازمان زمین‌شناسی ایران در منطقه آجی‌چای به منظور اکتشاف پتاس انجام شده است. داده‌های گرانی‌سنجی محدوده مورد مطالعه، در یک شبکه منظم  $321 \times 381 \text{ km}^2$  با فاصله نمونه‌برداری ۲۰ متر شبکه‌بندی شده است (عابدی، ۲۰۱۸؛ الوندی و قناتی، ۲۰۲۳). برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی‌هنجاری گرانی و داشتن نقشه‌ای هموارتر، قبل از استفاده از فیلترهای مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی، از فیلتر ادامه فراسو (به ارتفاع ۵ متر) استفاده شده است. نقشه بی‌هنجاری گرانی گنبد نمکی آجی‌چای بر حسب میلی‌گال پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو در شکل ۱۰-الف نمایش داده شده است.

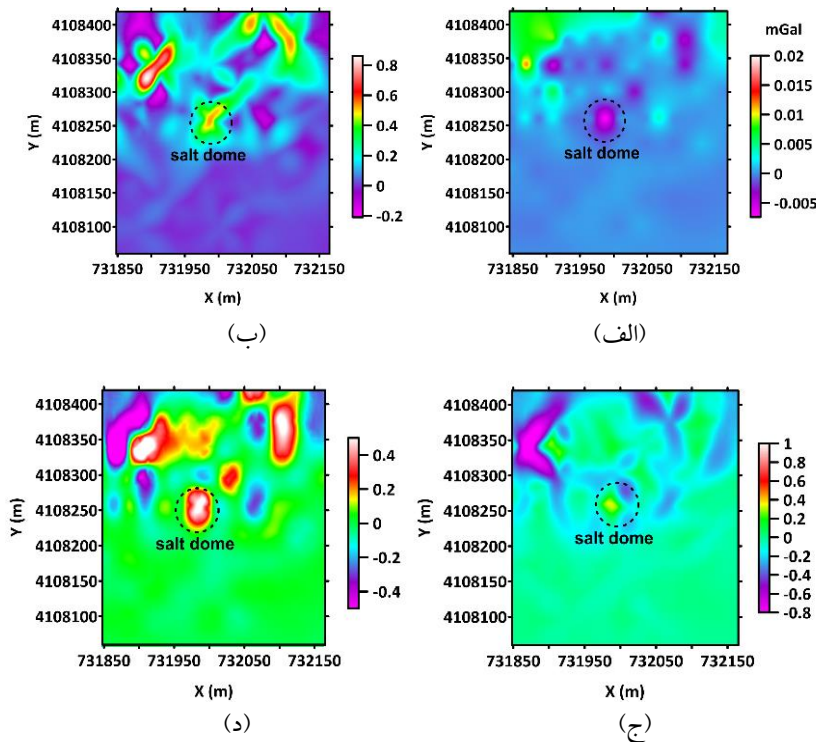
در شکل ۸-ب و ۸-ج با توجه به اطلاعات استخراجی از کانتورهای صفر و نزدیک به صفر به دست آمده از فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحناها، مرز افقی گنبد وردفورت تعیین شده اما سایر آنومالی‌ها و چشمه‌ها به صورت تار و کم‌رنگ در نقشه خروجی ترسیم شده است. هرچند برخی از ساختارها با دامنه‌ای متفاوت بر روی نقشه خروجی ترسیم شده اما این موضوع تفسیر را دچار ابهام و پیچیدگی کرده و عملاً تفسیر آنها با مشکل مواجه می‌شود. از این رو نمی‌توان با اطمینان از فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحناها برای تفسیر اطلاعات زیرسطحی محدوده ویتواترزد استفاده کرد. شکل ۸-د نقشه مربوط به فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی را نمایش داده است. در نقشه خروجی فیلتر PNH، مرزهای افقی با دقت و کیفیت بیشتری تعیین و مرز سایر آنومالی‌ها نیز به خوبی قابل تشخیص هستند. در این نقشه سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق به خوبی متعادل شده است. موقعیت دهانه وردفورت، مرز افقی معادن طلا و موقعیت گسل‌های اصلی با نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل ۷ مطابقت و همخوانی مناسبی دارد.

## ۲-۵. گنبد نمکی آجی‌چای

در ادامه توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین لبه بر روی داده‌های گرانی گنبد نمکی آجی‌چای، واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۹. نقشه زمین‌شناسی محدوده گنبد نمکی آجی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی (رضوی و جعفری، ۱۳۸۷؛ عابدی، ۲۰۱۸).



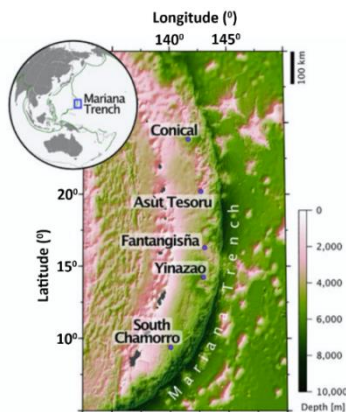
شکل ۱۰. تعیین گوشه بی‌هنجاری گرانی گنبد نمکی آجی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو (موقعیت گنبد نمکی با نقطه چین بر روی شکل نمایش داده شده است)؛ الف) بی‌هنجاری گرانی محدوده آجی‌چای بر حسب میلی‌گال، ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، د) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ ).

برخوردار است.

### ۳-۵. درازگودال ماریانا

در ادامه توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین گوشه بر مبنای نشانگرهای انحنا بر روی داده‌های گرانی ماهواره‌ای درازگودال ماریانا، واقع در شمال غرب اقیانوس آرام مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. درازگودال ماریانا عمیق‌ترین درازگودال اقیانوس‌های جهان و عمیق‌ترین مکان پوسته کره زمین است. درازگودال ماریانا بخشی از سیستم فرورانش ایزو-بونین-ماریانا است که مرز بین دو صفحه تکتونیکی اقیانوس آرام و ماریانا را تشکیل می‌دهد. داده‌های گرانی بوگه درازگودال ماریانا از پایگاه داده‌های گرانی WGM2012 به نشانی <http://bgi.obsmp.fr> برای بررسی و تعیین گوشه بی‌هنجاری‌های مدفون محدوده مورد مطالعه استخراج شده است. نقشه موقعیت درازگودال ماریانا در شکل (۱۱) نشان داده شده است (آلبرز و همکاران، ۲۰۲۲).

در شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج نتایج تعیین لبه و موقعیت افقی با فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا ترسیم شده است. در نقشه مثبت‌ترین انحنا، مرز گنبد نمکی و سایر ساختارها دارای یک کشیدگی است و نقشه تعیین گوشه از کیفیت لازم برای تفسیر ساختارهای زیرسطحی برخوردار نیست. در نقشه منفی‌ترین انحنا مرز افقی گنبد نمکی مشخص نشده و موقعیت سایر چشمه‌ها نیز به صورت تار ترسیم شده است. از این رو همانند مدل میدانی قبلی نمی‌توان از فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا برای تفسیر اطلاعات زیرسطحی استفاده کرد. شکل ۱۰-د نقشه مربوط به فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی را نمایش داده است. در نقشه خروجی فیلتر PNH، مرزهای افقی با دقت و کیفیت بیشتری تعیین و مرز گنبد نمکی آجی‌چای و سایر چشمه‌های مدفون با استفاده از اطلاعات کانتورهای صفر به خوبی قابل تشخیص هستند. در این نقشه سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم‌عمق به خوبی متعادل شده و نقشه خروجی از کیفیت مناسبی

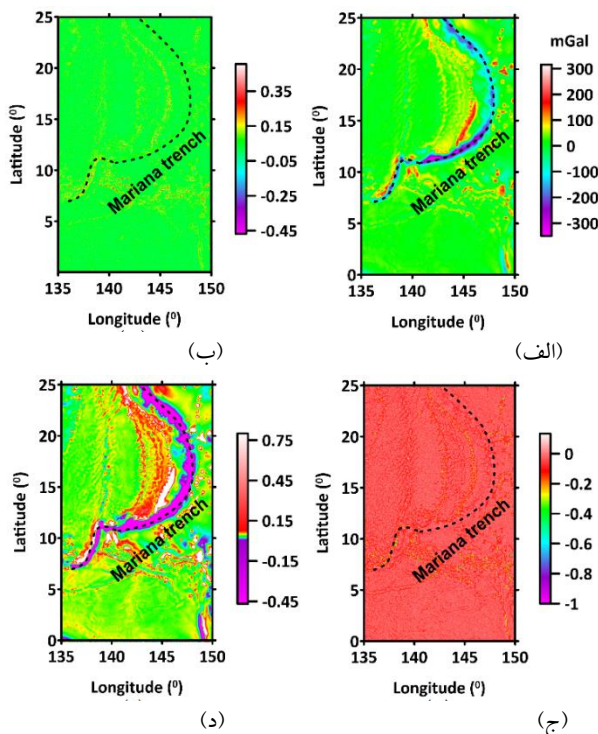


شکل ۱۱. موقعیت و عمق درازگودال ماریانا و سایر رسوبات (آلبرز و همکاران، ۲۰۲۲).

در نقشه‌های مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنا مرز افقی ساختارها و موقعیت درازگودال ماریانا مشخص نشده است. شکل ۱۲-د نقشه مربوط به فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی را نمایش داده است. در نقشه خروجی فیلتر PNH، مرزهای افقی با دقت و کیفیت بیشتری تعیین و مرز درازگودال ماریانا و سایر چشمه‌های مدفون به خوبی قابل تشخیص هستند. در این نقشه سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و کم عمق به خوبی متعادل شده و نقشه خروجی از کیفیت مناسبی برخوردار است.

برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی‌هنجاری گرانی و داشتن نقشه‌ای هموارتر، قبل از استفاده از فیلترهای مثبت‌ترین انحنا، منفی‌ترین انحنا و انحنا هیبریدی مثبت و منفی، از فیلتر ادامه فراسو (به ارتفاع ۳۰۰ متر) استفاده شده است. نقشه بی‌هنجاری گرانی درازگودال ماریانا بر حسب میلی‌گال پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو در شکل ۱۲-الف نمایش داده شده است.

در شکل ۱۲-ب و ۱۲-ج نتایج تعیین لبه و موقعیت افقی با فیلترهای مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحناها ترسیم شده است.



شکل ۱۲. تعیین گوشه بی‌هنجاری‌های گرانی محدوده ماریانا و درازگودال ماریانا پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو (موقعیت درازگودال با نقطه‌چین بر روی شکل نمایش داده شده است): (الف) بی‌هنجاری گرانی محدوده درازگودال ماریانا بر حسب میلی‌گال، (ب) فیلتر مثبت‌ترین انحنا، (ج) فیلتر منفی‌ترین انحنا، (د) فیلتر انحنا هیبریدی مثبت و منفی ( $W_n = 1/2$  و  $W_p = 1/2$ ).



## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش انحنای هیبریدی مثبت و منفی برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی ارائه شده است. این فیلتر از قابلیت‌های دو فیلتر مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنای برای تشخیص گوشه بی‌هنجاری‌های گرانی بهره می‌گیرد. کیفیت فیلتر ترکیبی با داده‌های مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی همراه با نوفه تصادفی و بدون نوفه و داده‌های واقعی از سه محدوده ویتواترزد در آفریقای جنوبی، گنبد نمکی آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی و درازگودال ماریانا در اقیانوس آرام مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی از کیفیت بیشتری برای تعیین لبه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل در مقایسه با دو فیلتر مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحنای برخوردار است. همچنین این فیلتر قادر است به‌طور همزمان سیگنال‌های حاصل از منابع عمیق و سطحی را متعادل کند. البته به‌دلیل حساسیت این فیلتر به نوفه به سبب استفاده از مشتقات گرانی مرتبه دوم، حتماً باید از داده‌های با کیفیت و عاری از نوفه استفاده شود. لذا پیشنهاد می‌شود قبل از ترسیم نقشه‌های تعیین لبه حتماً از فیلترهای رفع نوفه مانند ادامه فراسو استفاده شود.

## تشکر و قدردانی

از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران به‌دلیل در اختیار قرار دادن گزارش زمین‌شناسی و داده‌های گرانی منطقه آجی‌چای آذربایجان شرقی، دکتر لوان ثان فام از دانشگاه ملی علوم ویتنام (هانوی) به‌دلیل ارسال داده‌های گرانی محدوده ویتواترزد آفریقای جنوبی و همچنین دکتر لیانگهویی گوو از دانشگاه علوم زمین چین (پکن) به جهت در دسترس قرار دادن بخشی از اسکرپت‌های برنامه کامپیوتری تقدیر و تشکر می‌شود.

## مراجع

الوندی، ا؛ دنیز توکنای، ه. و فام، ل. (۱۴۰۰). تفسیر داده‌های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادینان افقی کل، مطالعه موردی: تاق‌دیس چارک. پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۷(۴)، ۴۰۱-۴۱۲.

الوندی، ا؛ دنیز توکنای، ه. و فام، ل. (۱۴۰۱). توانایی فیلتر لجستیک بهبود یافته در تعیین گوشه‌ها و مرزهای جانبی آنومالی‌های گرانی و مغناطیسی توزگولو ترکیه. نشریه مهندسی معدن، ۱۷(۵۶)، ۵۷-۷۲.

رضوی، ا. و جعفری، ف. (۱۳۸۷). اکتشاف پتاس با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی در منطقه آجی‌چای. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Abedi, M. (2018). An integrated approach to evaluate the Aji-Chai potash resources in Iran using potential field data. *Journal of African Earth Sciences*, 139, 379–391.
- Albers E, Shervais JW, Hansen CT, Ichiyama Y and Fryer P (2022) Shallow Depth, Substantial Change: Fluid Metasomatism Causes Major Compositional Modifications of Subducted Volcanics (Mariana Forearc). *Front. Earth Sci.* 10:826312. doi: 10.3389/feart.2022.826312
- Alvandi, A., & Ghanati, R. (2023). Using magnetic data for estimating the location of lateral boundaries and the depth of the shallow salt dome of Aji-Chai, East Azerbaijan Province, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 57(3), 251-258. doi: 10.22059/ijmge.2023.352685.595014.
- 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, 279–300. <https://doi.org/10.4430/bgo00420>
- Barnicoat, A. C., Henderson, I. H. C., Knipe, R. J., Yardley, B. W. D., Napier, R. W., Fox, N. P. C., Kenyon, A. K., Muntingh, Strydom, D. J., D., Winkler, K. S., Lawrence S. R., & Cornford, C. (1997). Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin. *Nature*, 386 (6627), 820–824.
- Beach, A., & Smith, R. (2007). Structural geometry and development of the Witwatersrand basin, South Africa. Geological Society, London. *Special Publications*, 272, 533–542.
- Cevallos, C., Kovac, P., & Lowe, S. J. (2013). Application of curvatures to airborne gravity gradient data in oil exploration. *Geophysics*, 78, G81–G88.
- Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin: New

- Mexico, in J. W. Hinze, ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. SEG, 181–197.
- Cooper, G. R. J. (2009). Balancing images of potential-field data. *Geophysics*, 74, L17–L20.
- Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32, 1585–1591.
- Ferreira F. J. F., de Souza J. Bongiolo A.B.S., & Castro L.G. (2013). Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78, 33–41, <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>.
- Guo, Lianghui., Gao, Rui., Meng, Xiaohong., & Zhang, Guoli. (2015). A Hybrid Positive-and-Negative Curvature Approach for Detection of the Edges of Magnetic Anomalies, and Its Application in the South China Sea. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 2701–2710. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0956-y>.
- Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt-A new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213–217.
- Oruç, B. (2010). Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. *Pure Appl. Geophys.*, 168, 1769–1780.
- Pham, L. T. (2021). A high-resolution edge detector for interpreting potential field data: A case study from the Witwatersrand basin, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 178, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104190>.
- Pham, L.T., Van Vu, T., Le Thi, S., & Thi Trinh, P. (2020). Enhancement of Potential Field Source Boundaries Using an Improved Logistic Filter. *Pure and Applied Geophysics*, 5237–5249, <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02542-9>.
- Pham, L. T., Minh, L. H., Oksum, E., & Thanh, D. D. (2018). Determination of maximum tilt angle from analytic signal amplitude of magnetic data by the curvature-based method. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 40(4), 354–366. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/40/4/13106>.
- Phillips, J. D., Hansen, R. O., & Blakely, R. J. (2007). The use of curvature in potential-field interpretation. *Exploration Geophysics*, 38, 111–119.
- Rao, D. B., Prakash, M. J., & Ramesh, Babu. N. (1990). 3-D and 2 1/2-D modeling of gravity anomalies with variable density contrast. *Geophysical Prospecting*, 38, 411–422
- Roberts, A. (2001). Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First break*, 19, 85–100.
- Robb, L. J., & Meyer, F. M. (1995). The Witwatersrand Basin, South Africa: geological framework and mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 10, 67–94
- Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116–125.
- Taylor, R. D., & Anderson, E. D. (2018). Quartz-pebble conglomerate Gold Deposits. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report
- Thurston, J. B., & Smith, R. S. (1997). Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPIT<sup>TM</sup> method. *Geophysics*, 62, 807–813.
- Wijns, C., Perez, C., & Kowalczyk, P. (2005). Theta map: edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70, 39–43.