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

Abstract

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) 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 the 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, 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

تشخیص مرز افقی بی هنجاری های گرانی با استفاده از فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH) احمد الوندی^{۲۰۱}، سید هانی متولی عنبران^{۳۳}

۱- موسسه ژئوفيزيک، دانشگاه تهران، تهران، ايران

۲- رئیس اداره پژوهش و فناوری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، واحد استانی همدان، همدان، ایران

۳- دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ايميل رابط نويسنده: motavalli@ut.ac.ir

چکیدہ

تعیین لبه و موقعیت افقی ساختارهای زمین شناسی یکی از مراحل اساسی در تفسیر دادههای میدان پتانسیل محسوب می گردد. در این مقاله مثبت ترین و منفی ترین انحنا دادههای گرانی تجزیه و تحلیل گردیده و فیلتری کار آمدتر با استفاده از نشانگرهای انحنا و ترکیبات آنها برای تشخیص گوشههای ساختارها و چشمههای مدفون گرانی معرفی و استفاده گردیده است. روش پیشنهادی که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (یا به اختصار PNH) نامیده می شود، مثبت ترین و منفی ترین انحناها را با تنظیم فرمول و جمع وزنی در یک انحنا ترکیب و از مزایای دو انحنا مثبت و منفی به به و در منفی و استفاده گردیده است. روش پیشنهادی که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (یا به اختصار PNH) نامیده می شود، مثبت ترین و منفی ترین انحناها را با تنظیم فرمول و جمع وزنی در یک انحنا ترکیب و از مزایای دو انحنا مثبت و منفی برای بهبود تشخیص لبه دادههای گرانی استفاده می نماید. بدین منظور ابتدا توانایی فیلتر PNH با در نظر گرفتن سه سناریو مختلف برای چگالی (مثبت، منفی و مثبت منفی) برای مدل گرانی استفاده می نماید. بدین منظور ابتدا توانایی فیلتر PNH با در نظر گرفتن سه سناریو مختلف برای چگالی (مثبت، منفی و مثبت منفی) برای مدل گرانی استفاده می نماید. بدین منظور ابتدا توانایی فیلتر PNH با در نظر گرفتن سه سناریو مختلف برای چگالی (مثبت، منفی و مثبت منفی) بر روی مدل های مصنوعی نشان می دهد فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی، از توانایی بهتری برای تشخیص مرزهای افقی ساختارهای مدفون با چگالی متفاوت و عمق می مختلف برخوردار است. همچنین از فیلترهای استاندارد تعین گو شه ماند، مشتق قائم مرتبه دوم گرانی و فیلتر زاویه تیلت برای مقایسه و صحت سنجی توانایی فیلترهای نشانگر انحنا بر روی مدل مصنوعی استفاده شده است. در ادامه کیفیت فیلتر PNH ابتدا بر روی دادههای و اقعی می که معدن طلا و افتری مدونان برای تعیین موقعیت ساختارهای میران با استفاده شده است. در ادامه کیفیت فیلتر PNH ابتدا بر روی دادههای و اقعی شرقی (ایران) و در پایان برای تعیین موقعیت ساختارهای مدون محدوده در از گودال ماریانا با استفاده از داده می گرانی ماهوارهای (POM) و مو پاین بر این ترین می مدفون محدون محدوده در از گودال ماریانا با استفاده از دانه با مرانی ماهوارهای (POM) مرهور با بر رست مروز بررین رایر و می پایان برای میرین مو معرت مانوی مدون محدوده در از گودال

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

۱- مقدمه

یکی از دستاوردهای مهم در تفسیر کیفی دادههای گرانی تعیین موقعیت و تشخیص دقیق مرزهای جانبی ساختارهای مدفون است. در ناحیه برخورد ساختارهای مختلف زمین شناسی (مانند گنبد نمکی، دایک، کنتاکت و یا زونهای گسلی) میزان تغییرات بی هنجاری بر روی نقشههای گرانی بو که معمولاً زیاد است. لذا در این مناطق تباین چگالی قابل توجهی در سراسر مرزهای جانبی (Lateral) و گوشهها وجود دارد. به همین 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 کیفی و تعیین لبه بی هنجاریهای 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، ۱۹۷۹) خطوط صفر دامنه (میلر و سینگ، ۱۹۹۴؛ اروچ، ۲۰۱۰) و مینیمم مقدار دامنه (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵) تعریف می گردد. به عنوان 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 می مقدار دامنه (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۹). این داری طون مقدار بیشینه دامنه برای تعیین گوشه چشمههای مدفون استفاده می مقدار دامنه و میکران، ۲۰۰۹). البته اگر بی هنجاری گرانی دارای طیف مقدار بیشینه دامنه برای تعیین گوشه چشمههای مدفون استفاده می میتان تحلیلی (یا فیلتر دامنه کل) (روئست و همکاران، ۲۹۹۱) از و میویم مقدار بیشینه دامنه برای تعیین گوشه چشمههای مدفون استفاده می میترا تحلیلی (یا فیلتر دامنه کل) (روئست و همکاران، ۱۹۹۲) از

اگرچه بزرگترین مزیت این فیلترها حساسیت کمتر آنها به نوفه به دلیل استفاده از مشتقات درجه اول میدان گرانی است. به منظور متعادل نمودن دامنه های مختلف از چشمه های دارای عمق های متفاوت، در ده های اخیر فیلتر های فاز محلی (local phase) که ترکیبی از مشتقات افقی و قائم هستند برای تعیین مرز جانبی چشمههای میدان پتانسیل معرفی و توسعه پیدا نموده است (الوندی و همکاران، ۲۲۰۲۲). 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 نمودند. این فیلتر از دامنه صفر (کانتور صفر در نقشه-های سهبعدی) برای تعیین گوشه بیهنجاریهای میدان پتانسیل استفاده مینماید. اگرچه این فیلتر برای تعیین لبه ساختارهای نازک و بسیار عميق مناسب نيست و الزاما نيز يک فيلتر تعيين گوشه محسوب نمي گردد (الوندي و همكاران، ٢٠٢٢). در سال ٢٠٠٥، ويجنز و همكاران، فیلتر آشکارساز لبه تتا (یا فیلتر زاویه تتا) را با استفاده از آرک کسینوس گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی معرفی نمودند. این فیلتر قادر به بالانس همزمان دامنههای ضعیف و قوی حاصل از چشمههای عمیق و کمعمق است. هرچند ترسیم خطوط کاذب و جعلی با دامنه مینیمم در نقشههای خروجی که سبب گمراهی در تفسیر می شود، بزرگترین نقص و عیب فیلتر زاویه تتا محسوب می گردد (فام و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوندی و همکاران، a۲۰۲۲). 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 نرمالایز شده که عکس فیلتر زاویه تیلت است را برای تعیین مرز افقی چشمههای میدان پتانسیل معرفی نمودند. فریرا و همکاران (۲۰۱۳) فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل را برای تعیین همزمان گوشه چشمههای عمیق و کمعمق با استفاده از گرادیانهای جهتی مشتق افقی کل معرفی نمودند. فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی کل توسط فام و همکاران (۲۰۲۰) توسعه پیدا نمود و فیلتر تابع لجستیک گرادیان افقی کل به عنوان یک فیلتر توانمند در تعیین لبه ساختارهای مدفون معرفی گردید (فام و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوندی و همکاران، b۲۰۲۲). 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 به منظور دستیابی به موقعیت و تعیین گوشه چشمههای بی هنجار است.

با توجه به تعداد بزوهش های انجام شده در سالهای اخیر، بهره گیری از نشانگرهای انحنا، یک روش کمر متداول برای تعیین موقعیت افقی ساختارهای مختلف زمین شناسی به کمک دادههای گرانی است. در روش گرانی باتوجه به اینکه تباین چگالی در لایههای مختلف زیرسطحی باعث ایجاد تغییرات بی هنجاری گرانی (تغییرات میدان گرانی) در سطح مشاهدهای (زمین، هوا یا دریا) می گردد. لذا انحنای بی -هنجاریهای گرانی، توصیف چگونگی خمش یک منحنی یا یک سطح در نقطه دلخواه است، که از نظر توری می تواند برای آشکار کردن محل خطوارها، لایهها و مرزهای افقی و تعیین مرز جانبی بی هنجاریهای گرانی مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس فیلیپس و ممکاران (۲۰۰۷) یک روش کمی و کیفی مبتی بر نشانگر انحنا (نشانگر انحنا منفی و مثبت) و توابع ویژه ارائه کردند که برای یافتن موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۴، کوپر روش انحنای پروفیلی متعادل شده وا را مفهوم عدد بی هنجاریهای گرانی و معناطیسی با استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۴، کوپر روش انحنای پروفیلی متعادل شده وا رای تعیین لبه موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۴، کوپر روش انحنای پروفیلی متعادل شده را رای تعیین لبه بی هنجاریهای گرانی و مغناطیسی با استفاده از تبدیلات هیلبرت جهتی سیکنال تحلیلی معوفی نمود (الوندی و اردستانی، ۲۰۲۳). در سال موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۴، کوپر روش انحنای پروفیلی متعادل شده را برای تعیین لبه موج محلی (ترستون و اسمیت، ۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۴، کوپر روش انحنای پروفیلی متعادل شده را برای تعیین لبه موج محلی (ترستون و معادی یوش بر اساس ویژ گیهای انحنا برای تفسیر داده های گرادیان گرانی هوابرد و تفسیر داده های زمین-برخوردار است. هرچند در تعیین گوشه چشمههای گرانی و مغناطیسی پیچیده از تفکیک پذیری و رزولیشن کافی برخوردار نمی، شد. گو برخوردار است. هرچند در تعین گوشه چشمههای گرانی و معناطیسی پیچیده از تفکیک پذیری و رزولیشن کافی برخوردار نمی، شد. گو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از ترکیب انحانهای مثب و منفی و ترکیب توابع ویژه، فیلتری برای تعین گوشه داده های مغناطیسی معرفی نمودند. در سال ۲۰۱۸، فام و همکاران با استفاده از حداکثر زاویه تیلت از دامنه سیگنال تحلیلی دادهای مغناطیسی یک فیلتری رنه و تفسیر دادههای میدان پتانسیل و بویژه دادههای گرانی، استفاده و بهره گیری 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 به طور مناسب و دقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است.

در این پژوهش با استفاده از نشانگرهای انحنا و به کمک مدل نسبتا پیچیده مصنوعی گرانی با چگالیهای متفاوت برای چشمههای مدفون با دادههای بدون نوفه و همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی، کیفیت روش های مثبت ترین انحنا و منفی ترین انحنا برای تعیین لبه چشمه-های 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 تایید نظری توانمندی روش انحنا هیبریدی مثبت و منفی، توانایی و کیفیت این فیلتر و فیلترهای مثبت ترین انحنا و منفی ترین اتحنا بر روی دادههای گرانی میدانی مربوط به سه محدوده ویتواترزند واقع در آفریقای جنوبی و گنبد نمکی آجی چای واقع در استان آذربایجان شرقی و دادههای گرانی میدانی مربوط به سه محدوده ویتواترزند واقع در آفریقای جنوبی و گنبد است. با توجه به اینکه در فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی از مشتقات درجه دوم گرانی استفاده شده، به منظور مقایس و تایید کارآیی فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی و دادهای مثبت ترین و منفی ترین انحنا، از روش مشتق قائم گرانی مرتبه و تاید کارآیی فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی و فیلترهای مثبت و منفی ترین انحنا، از روش مشتق قائم گرانی مرتبه دوم (وایه تیلت نیز میلوه بر محبوبیت و توانایی آن در تعیین لبه ساختارهای مدفون، ویژگی مشترک آن با فیلترهای انحنا در استفاده از کانتور صفر برای تعیین معلاوه بر محبوبیت و توانایی آن در تعیین لبه ساختارهای مدفون، ویژگی مشترک آن با فیلترهای انحنا در استفاده از کانتور صفر برای تعیین

۲- فیلتر مثبت ترین و منفی ترین انحنا

انحناهای بی هنجاری گرانی شبکهای با برازش یک سطح درجه دوم در یک پنجره متحرک ۳ × ۳ برای هر گره شبکه محاسبه می-گردد (فام و همکاران، ۲۰۱۸). با استفاده از روش حداقل مربعات (least squares)، سطح درجه دوم به هشت گره اطراف گره شبکه مرکزی برازش گردیده (شکل ۱) و در مرحله نخست، بی هنجاری گرانی g(x, y) با استفاده از ضرایب A، G، C، B، A، و F به صورت زیر محاسبه می گردد (گوو و همکاران، ۲۰۱۵؛ فام و همکاران، ۲۰۱۸):

(1)

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



شکل ۱- سطح درجه دوم (یا همان سلول شبکهای ۳ × ۳) متعلق به نه داده گرانی (گو و همکاران، ۲۰۱۵)

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

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

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

$$C = \frac{d^{2}g}{dxdy} = \frac{g_{3}+g_{7}-g_{1}-g_{9}}{4\Delta x \Delta y}$$

$$D = \frac{dg}{dx} = \frac{g_{3}+g_{6}+g_{9}-g_{1}-g_{4}-g_{7}}{6\Delta x}$$

$$E = \frac{dg}{dy} = \frac{g_{1}+g_{2}+g_{3}-g_{7}-g_{8}-g_{9}}{6\Delta y}$$
(6)

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

در معادلات فوق، g₁ تا g₉ مقادیر گره شبکه بی هنجاری گرانی در شکل (۱) و Δx و Δy به ترتیب فواصل شبکه در جهتهای x و y در مختصات کارتزین هستند. در نقاط اکسترمم یک سطح درجه ۲، مشقات 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 می گردد:

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2g}{dx^2} & \frac{d^2g}{dxdy} \\ \frac{d^2g}{dxdy} & \frac{d^2g}{dy^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2A & C \\ C & 2B \end{pmatrix}$$

$$(A)$$

$$a \exists c = (A + B) + \sqrt{(A - B)^2 + C^2}$$

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

$$(A)$$

$$(A)$$

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

$$(A)$$

با استفاده از دو رابطه (۹) و (۱۰)، موقعیت گسل ها، خطوارهها و سایر ساختارهای زمین شناسی به کمک دادههای گرانی تعیین می گردد. هرچند برای کسب نتیجه دلخواه و ارائه تفسیری دقیقتر و جامع تر، نقشه هر دو روش _β و +β بهتر است تولید و همزمان مورد بررسی قرار گیرد (رابر تز، ۲۰۰۱). اگرچه نخستین بار از توانایی این دو نشانگر برای تفسیر دادههای لرزهای استفاده شده، اما از روش های مثبت ترین انحنا (+β) و منفی ترین انحنا (_β) می توان برای تفسیر دادههای گرانی و تعیین گوشه بی هنجاری های میدان پتانسیل استفاده نمود (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۷).

۳- فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH)

(V)

دو فیلتر مثبت ترین انحنا و منفی ترین انحنا دارای نقاط ضعف در تشخیص لبههای چشمههای مدفون هستند. از اینرو گو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تعریف ضرایب وزنی و ادغام دو فیلتر مثبت ترین انحنا و منفی ترین انحنا با یکدیگر، فیلتری موثر تر و دقیق تر برای تعیین گوشه بیهنجاریهای میدان پتانسیل تحت عنوان روش انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH) معرفی نمودند. ۱- در مرحله نخست مقادیر منفی +β با مقادیر صفر به منظور برجسته سازی مقادیر مثبت +β جایگزین می گردد. از اینرو در رابطه (۱۱)
 داریم:

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

۲- در مرحله دوم، مقادیر مثبت _β با مقادیر صفر به منظور برجستهسازی مقادیر منفی _β جایگزین میگردد. از اینرو با استفاده از رابطه (۱۲) داریم:

(۱۲) when $\beta_{-} \leq 0, \beta_{-} = \beta_{-}$ when $\beta_{-} > 0, \beta_{-} = 0$ $-\infty$ - در مرحله سوم با استفاده از ضرایب وزنی، دو فیلتر با یکدیگر ترکیب می گردد. با استفاده از رابطه (۱۳)، مجموع دو فیلتر وزنداده-شده محاسبه می گردد:

 $\beta_{sum} = W_p \beta_+ + W_n \beta_-$

که W_p و W_n به ترتیب ضرایب وزنی مثبت و منفی برای β₊ و β₊ هستند که به منظور کنترل کیفیت تفکیک پذیری 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، تاثیر β₊ بیشتر و اگر W_p کوچکتر از W_n باشد، تاثیر β₋ بیشتر خواهد بود.

۴- در مرحله نهایی به منظور نرمالیزه کردن رابطه (۱۳) و به دست آوردن یک انحنا نرمالیزه شده تحت عنوان انحنای هیبریدی مثبت و منفی، β_{sum} بر ماکزیمم قدر مطلق β_{sum} تقسیم می گردد. بنابراین داریم:

 $PNH = \frac{\beta_{sum}}{\max|\beta_{sum}|}$

در فیلتر هیبریدی PNH ماکزیمم تغییرات دامنه برابر با یک و مینیمم تغییرات دامنه برابر با منفی یک است. گوشه چشمههای مدفون با استفاده از دامنه صفر و نزدیک به صفر تعیین می گردد.

٤- کاربرد بر روی دادههای مصنوعی

در این بخش توانایی فیلترهای مثبت ترین انحنا (+β)، منفی ترین انحنا (_β) و فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH) برای تعیین گوشه بی هنجاری 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 سه بعدی مقدار ضریب وزنی W_p برابر ۵/۰ و ضریب وزنی W_n نیز برابر ۵/۰ فرض شده است.

۱-٤- داده دو بعدی

(13)

(14)

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 انحنای هیبریدی مثبت و منفی در محیط برنامه متلب تولید شده است. خط چین عمودی موقعیت دقیق لبههای دو چشمه گرانی را در شکل (۲) نمایش میدهد. مدل مفروض و پارامترهای درنظر گرفته شده برای دو چشمه مدفون در شکل (۲) نمایش داده شده است. بی هنجاری گرانی تولید شده حاصل از دو منشور مدفون با چگالی مثبت و منفی در شکل ۲-الف برحسب میلی گال ترسیم شده است. در شکل ۲-ب نتایج فیلتر مثبت ترین انحنا، شکل ۲-ج نتایج فیلتر تعیین لبه منفی ترین انحنا و در شکل ۲-د نتایج تعیین لبه با فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی برای مدل دوبعدی گرانی نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل (۲)، فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی قادر به تعیین لبه هر دو منشور با چگالی های مختلف و عمق های متفاوت به طور همزمان است. در صورتی که با دو فیلتر تعیین گوشه منفی ترین انحنا و مثبت ترین انحنا به ترتیب مرز افقی چشمه عمیق تر با چگالی مثبت و چشمه با عمق کمتر و با چگالی منفی بهتر ترسیم شده است.



سکل ۱- مدل مصنوعی دوبعدی (منشور سمت چپ (ابی رنگ) دارای چکالی ۲۰۱۵- کرم بر سانتی متر محعب که در عمق ۲ کیلومتر و منتور سمت راست (سبز رنگ) دارای چگالی ۰/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب که در عمق ۴ کیلومتر قرار گرفته است) همچنین موقعیت دقیق لبه ها با خطوط خط چین عمودی مشخص شده است؛ الف) بی هنجاری گرانی تولید شده توسط منشورهای دوبعدی مدفون بر حسب میلی گال، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی

۲-٤- داده سه بعدی

در این بخش توانایی فیلترهای مثبت ترین انحنا (+β)، منفی ترین انحنا (_β) و فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (PNH) برای مدل سهبعدی گرانی با نوفه و بدون نوفه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۳–الف مدل دوبعدی و شکل ۳–ب مدل سهبعدی دادههای گرانی مصنوعی نمایش داده شده است. پارامترهای مدل مصنوعی نیز در جدول-۱ شرح داده شده است. مدل مصنوعی با سه سناریوی مختلف برای سه چشمه مدفون با فرض چگالی مثبت برای هر سه منشور (سناریوی اول)، چگالی منفی برای هر سه منشور (سناریوی دوم) و و G3 در یک شبکه منظم 10 km² 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

	G1	G2	G3	پارامترهای مدل مصنوعی	
	۳۰۰۰	۲۰۰۰	1	تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض اول	
	- ٣٠٠٠	-7	-1	📘 🛛 تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض دوم	S
	۳۰۰۰	-7	1	ی تباین چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب): فرض سوم	2
	1	1	۱۰۰۰	عرض منشور (متر)	
11-0-1	٧	> v	٧	طول منشور (متر)	
	- <u>\</u>	7	1	ضخامت منشور (متر)	
	Sx	0	۲۰۰۰	مختصات افقى (متر)	
	٥	۵۰۰۰	۵۰۰۰	مختصات عمودی (متر)	
S	۹.,	1	٨٠٠	عمق بالا (متر)	
	19	۳۰۰۰	۱۸۰۰	عمق پايين (متر)	
	40	-۴۵	40	آزيموت جهتي (درجه)	
		•			

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

نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین گوشه شامل فیلترهای مثبت ترین انحنا، منفی ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی در شکل ۴ نمایش داده شده است. به منظور 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 مثبت بودن تباین چگالی منشورهای G1، G2 و G3، در سناریوی دوم فرض بر منفی بودن 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 بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلیگال نمایش داده شده است. شکل ۴–و به ۲۰ در بر م تتایج به دست آمده از روش های مثبت ترین انحنا، منفی ترین انحنای هیبریدی مثبت و منفی با فرض ضریب وزنی W_P برابر ۸۰ و

ضریب وزنی W_n برابر ۵/۰ به ترتیب نمایش داده شده است. در تصویر ۴–ب، سیگنال های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و فیلتر مثبت ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی هنجاری گرانی با تباین چگالی مثبت و مدفون شده در عمق های مختلف نمی باشد. در تصویر ۴-ج، سیگنال.های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن هستند و فیلتر منفی ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی.هنجاری گرانی با تباین چگالی مثبت با عمق.های مختلف میباشد. در تصویر ۴–د، مرز افقی سه منشور G1، G2 و G3 به خوبی تعیین شده و این فیلتر قادر است به طور همزمان مرز ساختارهای مدفون با چگالی مثبت را با استفاده از ترسیم کانتور صفر تعیین نماید. در شکل ۴-ذ بی هنجاری گرانی مدل مصنوعي با فرض منفي بودن تباين چگالي منشورهاي مدفون بر حسب ميلي گال نمايش داده شده است. شکل ۴-س، ۴-ش و ۴-م نتايج به دست آمده از روش های مثبت ترین انحنا، منفی ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی به ترتیب نمایش داده شده است. در شکل ۴ –س سیگنالهای حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن و فیلتر مثبت ترین انحنا قادر به تعیین مرز افقی بی هنجاری های با تباین چگالی منفی در عمقهای مختلف است. در تصویر ۴-ش، سیگنالهای حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و فیلتر منفی ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی هنجاری های با تباین چگالی منفی و مدفون شده در عمق های مختلف نمی باشد. در تصویر ۴-م مرز افقی سه منشور G1، G2 و G3 به خوبی تعیین شده و تصویر خروجی بیانگر توانایی و کیفیت این فیلتر در تعیین لبه چشمههای مدفون با چگالی منفی است. شکل ۴-ص بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت و منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی گال نمایش داده شده است. شکل ۴-ض، ۴-ک و ۴-گ نتایج به دست آمده از روش های مثبتترین انحنا، منفی ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی به ترتیب نمایش داده شده است. فیلتر مثبت ترین 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 می-نماید (شکل ۴-ض). در شکل ۴-ک لبه چشمه G2 که دارای تباین چگالی منفی است توسط فیلتر منفی ترین انحنا مشخص گردیده است. اگر چه لبه دو چشمه G1 و G3 نیز به صورت تار و کدر ترسیم گردیده 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 گردیده و این فیلتر قادر است با استفاده از ترکیب قابلیتهای هر دو فیلتر مثبتترین و منفیترین انحناها مرز چشمههای مدفون با تباین چگالی مثبت، منفی و مثبت-منفی را مشخص نماید.

در ادامه به منظور تایید توانایی و کیفیت فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی برای تعیین لبه چشمه های 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 فیلتر محبوبیت و فراگیری آن ها در تعیین لبه و همچنین ویژگی مشترک آن ها با فیلتر های انحنا در استفاده از کانتور صفر برای تعیین موقعیت و تشخیص لبه ساختارهای زمین شناسی است. همچنین چون کرنل فیلترهای انحنا مشتقات درجه دوم است، استفاده از فیلتر مشتق قائم مرتبه دوم انتخابی صحیح به منظور مقایسه کیفیت روش های 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 بی هنجاری های عمیق و کم عمق را تعیین نماید (میلر و سینگ)، این فیلتر به صورت زیر تعریف می شود:

$$TDR = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial g}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}} \right]$$
(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 عملا 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 نموده و تنها موقعیت کلی چشمههای گرانی در مدل مصنوعی مشخص شده است.



شکل ٤- تعیین گوشه بی هنجاری گرانی مصنوعی بدون نوفه با فیلترهای مختلف؛ الف) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2 = Wn)، ذ) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت ترین انحنا، ش) فیلتر منفی ترین انحنا، م) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2 = Wn)، ح) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت و منفی، ص) فیلتر منفی ترین انحنا، ک) فیلتر منفی ترین انحنا، گ) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2 = Wn)، ص) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2).



شکل ۵- تعیین گوشه بی هنجاری 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)

از آنجا که هدف اصلی در تولید مدل های مصنوعی گرانی نزدیک نمودن پارامترها و شرایط به ساختارهای مدفون واقعی است، مدل مصنوعی تولید شده را با ۵ درصد نوفه تصادفی آلوده نمودهایم. نقشه بی هنجاری های 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 نوفه است. باتوجه به اینکه در فیلترهای انحنا نیز از مشتقات مرتبه اول و دوم استفاده شده، به منظور کاهش تاثیر نوفه، قبل از استفاده از این فیلترها به کار بردن فیلترهای کاهش نوفه مانند روش ادامه فراسو بسیار ضروری به نظر می آید (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 نوفه های ضعیف و هموار کردن دادههای مدل مصنوعی اعمال گردیده است.





شکل ۲- تعیین گوشه بی هنجاری گرانی مصنوعی همراه با نوفه با فیلترهای مختلف پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو؛ الف) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی مثبت، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = W و 1/2 = W)، ذ) بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت ترین انحنا، ش) فیلتر منفی ترین انحنا، م) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (2/2 = W و گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت ترین انحنا، ش) فیلتر منفی ترین انحنا، م) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (2/2 = W و گرانی مدل مصنوعی با فرض تباین چگالی منفی، س) فیلتر مثبت ترین انحنا، ش) فیلتر مثبت ترین انحنا، ک) فیلتر مثبت و منفی (2/2 = W و ایر ایر ایر مینان می منبریدی مثبت و منفی (2/2 = W و 2/2 = W). هیبریدی مثبت و منفی (2/2 = W و 2/2 = W).

شکل ۶–الف بیهنجاری گرانی مدل مصنوعی همراه با نوفه تصادفی با فرض مثبت بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلیگال نمایش داده شده است. شکل ۶–ب، ۶–ج و ۶–د نتایج به دست آمده از روشهای مثبتترین انحنا، منفیترین انحنا و انحنای 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– ب، سیگنالهای حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و فیلتر مثبتترین انحنا قادر به تعیین مرز بیهنجاریهای با تباین چگالی

مثبت و مدفون شده در عمق.های مختلف نمی.باشد. در شکل ۶–ج، سیگنال.های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن هستند و فیلتر منفی ترین انحنا قادر به تعیین مرز چشمه های با تباین چگالی مثبت است. همانطور که انتظار داریم در شکل ۶-د لبه سه منشور G1، G2 و G3 به خوبي تعيين شده است. اين فيلتر قادر است به طور همزمان مرز ساختارهاي مدفون با چگالي مثبت را تعيين نمايد. در شكل ۶-ذ بي-هنجاری گرانی مدل مصنوعی همراه با نوفه با فرض منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی گال نمایش داده شده است. شکل ۶–س، ۶–ش و ۶–م نتایج به دست آمده از روشهای مثبتترین انحنا، منفیترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی با فرض ضریب وزنی W_p برابر ۰/۵ و نیز ضریب وزنی W_n برابر ۵/۰ به ترتیب نمایش داده شده است. در شکل ۶–س، سیگنالهای حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن و فیلتر مثبت ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی هنجاری های با تباین چگالی منفی و مدفون شده در عمق های مختلف است. در شکل ۶-ش، سیگنال های حاصل از منابع عمیق و کم عمق متوازن نیستند و فیلتر منفی ترین انحنا قادر به تعیین مرز بی هنجاری های 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 بی هنجاری گرانی مدل مصنوعی با فرض مثبت و منفی بودن تباین چگالی منشورهای مدفون بر حسب میلی گال نمایش داده شده است. در این مدل نیز فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی قادر به تعیین مرز سه چشمه مدفون است. البته باتوجه به اینکه در فیلترهای مثبت ترین و منفی ترین انحناها و انحنا هیبریدی مثبت و منفی از مشتقات درجه دوم گرانی استفاده شده و به طور ناخواسته با سیگنالهای تصویر نوفه نیز برجسته می شود، لذا استفاده از روش های رفع نوفه مانند فیلتر گاوسی، موجک، ادامه فراسو و. . قبل از استفاده از فیلترهای تعیین لبه ضروری به نظر می آید. شکل ۶-ض، ۶-ک و ۶-گ نتایج به دست آمده از روشهای مثبتترین انحنا، منفیترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی به ترتیب نمایش داده شده است. که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی قادر است مرز چشمههای مدفون حاوی نوفه را نیز مشخص نماید.

٥- کاربرد بر روی دادههای میدانی ۱-٥- حوزه ویتواترزند، آفریقای جنوبی

در این بخش توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین لبه بی هنجاری بر روی داده های گرانی حوزه ویتواترزند، 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 می باشد (بیچ و اسمیت، ۲۰۰۷) (شکل ۷۷. نتایج یک مطالعه زمین شناسی گسترده که توسط بارنیکوت و همکاران (۱۹۹۷) ارائه گردیده، تشان می دهد که کانی سازی طلا در منطقه ویتواترزند منشأ گرمابی دارد. این حوضه از رسوبات و سنگهای آتشفشانی با قدمت بین ۷/۷ تا ۳ میلیارد سال تشکیل شده است (روب و میر، ۱۹۹۵). یکی از ویژگی های برجسته در مرکز حوضه ویتواترزند، دهانه معروف وردفورت شده است. نقشه زمین شناسی محدوده ویتواترزند، موقعیت دهانه برخوردی شناخته شده بر روی زمین است که در نزدیکی شهر ژوهانسبورگ واقع شده است. نقشه زمین شناسی محدوده ویتواترزند، موقعیت دهانه وردفورت، موقعیت ذخایر طلا و گسلهای اصلی حوزه مورد مطالعه در شکل (۹) نمایش داده شده است. این دهانه بزرگترین دهانه برخوردی شناخته شده بر روی زمین است که در نزدیکی شهر ژوهانسبور گ واقع شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالبا از سنگهایی مانند ماسه سنگ، کواترزیت و شیل شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالبا از سنگهایی مانند ماسه سنگ، کواترزیت و شیل شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالبا از سنگهایی مانند ماسه سنگ، کواترزیت و شیل شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالبا از سنگهایی مانند ماسه سنگ، کواترزیت و شیل شکل (۹) نمایش داده شده است. قدیمی ترین رخساره منطقه با نام گروه بالایی، غالبا از سنگهای ماند ماسه سنگ، کواترزیت و شیل گرانی بو گه آفریقای جنوبی به نشانی هری مین می میلونه است. است رفته مای مراد و دانلود رایگان است. شکل ۸–الف نقشه بی منجاری گرانی حوضه ویتواترزند را بر حسب میلی گال نشان می دهد. داده های محدوده مورد مطالعه، در یک شبکه منظم منجاری از استفاده از فیلترهای مثرترین انحنا، منفی ترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی، از ویلتر ادامه فراسو (۱۰۰ متر) استفاده مینه، زیرا همانطور که اشاره گردید، فیلتر فراحن می شود، تا طول موجهای کوچک حذف و نقشه گرانی یکنونت ترم را می ای ای استان داشته باشیم (شکل ۸–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 وردفورت و گسلهای اصلی منطقه مورد مطالعه به همراه نتایج استفاده از فیلترهای مختلف تعیین لبه شامل مثبتترین انحنا، منفیترین انحنا و انحنای هیبریدی مثبت و منفی در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- تعیین گوشه بی هنجاری گرانی محدوده ویتواترزند واقع در آفریقای جنوبی (موقعیت دهانه وردفورت و گسل های اصلی بر روی نقشه نمایش داده شده است)؛ الف) بی هنجاری گرانی میدانی بر حسب میلی گال پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2).

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 منفی ترین 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 گردیده اما این موضوع تفسیر را دچار ابهام و پیچیدگی نموده و عملا تفسیر آنها با مشکل مواجه می گردد. ازاینرو نمی توان با اطمینان از فیلترهای مثبتترین و منفی ترین انحناها برای تفسیر اطلاعات زیرسطحی محدوده ویتواترزند استفاده نمود. شکل ۸-د نقشه مربوط به فیلتر انحنای 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 گردیده است. موقعیت دهانه وردفورت، مرز افقی معادن طلا و موقعیت گسلهای اصلی با نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل۷ مطابقت و همخوانی مناسبی دارد.

۲-٥- گنبد نمکی آجی چای

در ادامه توانایی و کیفیت فیلترهای تعیین لبه بر روی دادههای گرانی گنبد نمکی آجی چای، واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. منطقه آجی چای در جنوب میانه (استان آذربایجان شرقی) قرار دارد و در نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مشخص شده است (رضوی و جعفری، ۲۰۰۹). 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 کم عمق را ایجاد نموده است .گنبدهای نمکی استان آذربایجان عموماً دارای حجم کم و در نزدیکی سطح زمین قرار دارند. در شکل ۹ نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و جعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸ برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و جعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸ برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و جعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸ برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و جعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸ برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت گنبد نمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و دعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸ برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت راست دمکی آجی چای نمایش داده شده است (رضوی و دعفری، ۲۰۰۸). در سال ۲۰۰۸، برداشتهای معناطیس -مورد مطالعه و موقعیت را دقتی مناسب توسط سازمان زمین شناسی ایران در منطقه آجی چای به منظور اکتشاف پتاس انجام شده است. دوه در نقربی این این ایدان منوبی در یک شبکه منظم ایران در منطقه آجی چای به منظور اکتشاف پتاس انجام شده است. (عابدی، ۲۰۱۸) الوندی و قناتی، ۲۰۲۳). برای کاهش اثرات نوفه در نقشه بی هنجاری گرانی و داشتن نقشه موار تر، قبل از استفاده از فیلترهای مثبت ترین انحنا، منفی ترین انحنای هیبریدی مثبت و منفی، از فیلتر ادامه فراسو (به ار تفاع ۵ متر) استفاده است. نقشه بی هنجاری گرانی گرانی گذین مینی در می است داده مده است.



شکل ۹- نقشه زمین شناسی محدوده گنبد نمکی آجیچای واقع در استان آذربایجان شرقی (رضوی و جعفری، ۲۰۰۸؛ عابدی، ۲۰۱۸؛).



شکل ۱۰ – تعیین گوشه بی هنجاری گرانی گنبد نمکی آجی چای 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) بی هنجاری گرانی محدوده آجی چای بر حسب میلی گال، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = Wp و 1/2 و 1/2 = Wn).

در شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج نتایج تعیین لبه و موقعیت افقی با فیلترهای مثبت ترین و منفی ترین انحناها ترسیم شده است. در نقشه مثبت-ترین 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 منفی ترین انحنا مرز افقی گنبد نمکی مشخص نگردیده و موقعیت سایر چشمهها نیز به صورت تار ترسیم شده است. ازاینرو همانند مدل میدانی قبلی نمی توان از فیلترهای مثبت ترین و منفی ترین انحناها برای تفسیر اطلاعات زیرسطحی استفاده نمود. شکل ۱۰-د نقشه مربوط به فیلتر انحنای 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 آجی چای و سایر چشمههای مدفون با استفاده از اطلاعات کانتورهای صفر به خوبی قابل تشخیص هستند. در این نقشه سیگنالهای حاصل از منابع عمیق و کم عمق به خوبی متعادل گردیده و نقشه خروجی از کیفیت مناسی برخوردار است.

۳-٥- دراز گودال 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 عمیق ترین درازگودال اقیانوس های جهان و عمیق-ترین 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 MGM2012 به نشانی اقیانوس آرام و ماریانا را تشکیل میدهد. دادههای گرانی بوگه درازگودال ماریانا از پایگاه دادههای گرانی WGM2012 به نشانی درازگودال ماریانا در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نقشه موقون محدوده مورد مطالعه استخراج شده است. نقشه موقعیت درازگودال ماریانا در شکل (۱۱) نشان داده شده است (آلبرز و همکاران.، ۲۰۲۲).



شکل 11- موقعیت و عمق دراز گودال ماریانا و سایر رسوبات (آلبرز و همکاران.، ۲۰۲۲)

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



شکل ۱۲ – تعیین گوشه بیهنجاریهای گرانی محدوده ماریانا و دراز گودال ماریانا پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو (موقعیت دراز گودال با نقطهچین بر روی شکل نمایش داده شده است)؛ الف) بیهنجاری گرانی محدوده دراز گودال ماریانا بر حسب میلی گال، ب) فیلتر مثبت ترین انحنا، ج) فیلتر منفی ترین انحنا، د) فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی (1/2 = W_p و 1/2 و 1/2 = W).

در شکل ۱۲–ب و ۱۲–ج نتایج تعیین لبه و موقعیت افقی با فیلترهای مثبتترین و منفیترین انحناها ترسیم شده است. در نقشههای مثبتترین و منفیترین انحنا مرز افقی ساختارها و موقعیت درازگودال ماریانا مشخص نشده است. شکل ۱۲–د نقشه مربوط به فیلتر انحنای 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 کمعمق به خوبی متعادل گردیده و نقشه خروجی از کیفیت مناسبی برخوردار است.

٦- نتیجه گیری 💦 📃

در این پژوهش روش انحنای هیبریدی مثبت و منفی برای تعیین لبه بی هنجاری های گرانی ارائه شده است. این فیلتر از قابلیت های دو فیلتر مثبت ترین و منفی ترین انحناها برای تشخیص گوشه بی هنجاری های گرانی بهره می گیرد. کیفیت فیلتر ترکیبی با داده های مصنوعی دو بعدی و سه بعدی همراه با نوفه تصادفی و بدون نوفه و داده های واقعی از سه محدوده ویتواترزند در آفریقای جنوبی، گنبد نمکی آجی چای در استان آذربایجان شرقی و دراز گودال ماریانا در اقیانوس آرام مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که فیلتر انحنای هیبریدی مثبت و منفی از کیفیت بیشتری برای تعیین لبه بی هنجاری های میدان پتانسیل در مقایسه با دو فیلتر مثبت ترین و منفی ترین انحناها بر خوردار است. همچنین این فیلتر قادر است به طور همزمان سیگنال های حاصل از منابع عمیق و سطحی را متعادل نماید. البته به دلیل حساسیت این فیلتر به نوفه به سبب استفاده از مشتقات گرانی مرتبه دوم، حتما باید از داده های با کیفیت و عاری از نوفه استفاده گردد. لذا پیشنهاد می گردد قبل از ترسیم نقشه های تعیین لبه حتما از فیلترهای رفته ماید از داده های با کیفیت و عاری از نوفه استفاده

تشكرو قدرداني

از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران به دلیل در اختیار قرار دادن گزارش زمین شناسی و داده های گرانی منطقه آجی چای آذربایجان شرقی، دکتر لوان ثان فام از دانشگاه ملی علوم ویتنام (هانوی) به دلیل ارسال داده های گرانی محدوده ویتواترزند آفریقای جنوبی و همچنین دکتر لیانگهویی گوو از دانشگاه علوم زمین چین (پکن) به جهت در دسترس قراردادن بخشی از اسکریپت های برنامه کامپیوتری تقدیر و تشکر می گردد.

منابع

- 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, J.W., Hansen, C.T., Ichiyama, Y., & Fryer, P. (2022). Shallow Depth, Substantial Change: Fluid-Metasomatism Causes Major Compositional Modifications of Subducted Volcanics (Mariana Forearc). Front. Earth Sci. 10:826312. https://doi.org/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
- Alvandi, A., Toktay, H. D., & Pham, L.T. (2022a). Interpretation of gravity data using logistic function and total horizontal gradient (LTHG)- A case study: Charak anticline. Journal of Research on Applied Geophysics 7, 401-412, https://doi.org/10.22044/jrag.2022.11430.1325. (In Persian).
- Alvandi, A., Toktay, H. D., & Pham, L.T. (2022b). Capability of improved Logistics filter in determining lateral boundaries and edges of gravity and magnetic anomalies Tuzgolu Area Turkey. Journal of Mining Engineering 17, 57-72, https://doi.org/10.22034/ijme.2022.538984.1889. (In Persian).
- Barnicoat, A.C., Henderson, I.H.C., Knipe, R.J., Yardley, B.W.D., Napier, R.W., Fox, N.P. C., & et al. (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.

1000

- 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, L., Gao, R., Meng, X. & et al. (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.
- Klein, P., Richard, L., & James, H. (2008). 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation. First break 26, 105–112.
- 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. Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. Pure Appl. Geophys. 2010, 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 Sciences178, 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
- Razavi, S.A., & Jafari, F. (2008). Potash exploration via magnetometry and gravity methods in Aji-Chai (East Azerbaijan) and Ghareh-Aghaj (Zanjan Province). A Report in Geological Survey of Iran. pp: 75 (In Persian).
- 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 SPITM method. Geophysics 62:807–813.
- Wijns, C., Perez, C., & Kowalczyk, P. (2005). Theta map: edge detection in magnetic data. Geophysics 70, 39–43.