

استفاده از یک فیلتر جدید با قدرت تفکیک بالا برای شناسایی لبه‌های بی‌هنجاری‌ها در داده‌های میدان پتانسیل بر اساس آستانه‌گذاری زاویه شیب گرادیان افقی کل

امین روشندل کاهو^{۱*}، پوران‌دخت سلطانی^۲ و حمیدرضا باغزندانی^۲

^۱دانشیار، گروه نفت و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲دانشجوی دکتری، گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰)

چکیده

تشخیص لبه، یک مرحله مهم در پردازش و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است که برای تعیین موقعیت جانبی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی زمین توسط داده‌های میدان پتانسیل انجام می‌شود. لبه‌ها، مولفه‌های فرکانس بالای داده میدان پتانسیل را تشکیل می‌دهند. بنابراین، عملگر گرادیان با توجه به قابلیت تقویت فرکانس‌های بالا نقش به‌سزایی در تعیین لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل دارند. روش‌های مختلفی بر مبنای گرادیان‌های داده میدان پتانسیل برای لبه‌یابی معرفی شده‌اند که چالش‌های متعددی پیش روی آن‌ها است. عدم توازن و تعادل میان مرزهای منابع بی‌هنجاری عمیق و سطحی و قدرت تفکیک پایین از مهمترین چالش‌های لبه‌یابی با استفاده از روش‌های رایج و متداول است. در این مقاله، یک روش جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری روی زاویه شیب گرادیان افقی کل معرفی شده است که علاوه بر ایجاد توازن در مرزهای شناسایی شده برای بی‌هنجاری‌های با منبع عمیق و سطحی، نسبت به روش‌های موجود دارای قدرت تفکیک بالاتری است. کارایی روش پیشنهادی هم در داده مصنوعی و هم در داده واقعی مربوط به یک کانسار آهن در چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که روش پیشنهادی به خوبی توانسته است بر دو چالش اصلی مطرح شده در لبه‌یابی فائق آید و پایداری خوبی در مقابل نوفه تصادفی داشته باشد.

کلید واژه: میدان پتانسیل، لبه‌یابی، زاویه شیب، گرادیان افقی کل، قدرت تفکیک

۱ مقدمه

روش‌های میدان پتانسیل، مانند گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، به طور گسترده برای شناسایی و مدل‌سازی ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی، ذخایر معدنی و سایر ویژگی‌های مورد علاقه زمین‌شناسان استفاده می‌شوند. این روش‌ها تغییرات میدان‌های گرانشی و مغناطیسی زمین را که ناشی از تفاوت در چگالی و مغناطیس‌پذیری مواد زیرسطحی است، اندازه‌گیری می‌کنند (روی، ۲۰۰۷). تشخیص لبه، یک گام مهم در اکتشافات ژئوفیزیکی به روش میدان پتانسیل است که برای درک مشخصات هندسی ساختارهای زیرسطحی زمین توسط داده‌های میدان پتانسیل ضروری است. در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، تشخیص لبه می‌تواند در شناسایی بهتر و دقیق‌تر مرزهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، بهبود قدرت تفکیک داده‌ها برای بی‌هنجاری‌های عمیق و متعادل کردن دامنه مرز بی‌هنجاری‌های سطحی و عمیق، تعیین محدوده مناطق کانی‌سازی و تلفیق نتایج حاصل با نتایج سایر روش‌های ژئوفیزیکی به منظور کاهش خطر اکتشاف بسیار کارآمد باشد (اولیویرا و همکاران، ۲۰۱۷؛ فام و همکاران، ۲۰۲۲a).

لبه‌های یک تصویر، مولفه‌های فرکانس بالای آن را تشکیل می‌دهند. بنابراین، عملگر مشتق با توجه به قابلیت تقویت فرکانس‌های بالا نقش به‌سزایی در تعیین لبه‌های تصویر دارند. روش‌های تعیین لبه در پردازش تصویر به دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر مشتق درجه اول (گرادیان) و روش‌های مبتنی بر مشتق درجه دوم (لاپلاسین) تقسیم بندی می‌شوند (آچاریا و رای، ۲۰۰۵). دامنه مشتق‌های افقی و مشتق افقی کلی متداول‌ترین روش شناسایی لبه در داده‌های میدان پتانسیل است (فام، ۲۰۲۱). فدی و فلوریو (۲۰۰۱) از مشتقات درجات بالاتر برای تعیین لبه‌های داده‌های میدان پتانسیل استفاده کردند.

چالش‌های متعددی پیش روی تشخیص لبه در داده‌های

میدان پتانسیل است. داده‌های میدان پتانسیل اغلب حاوی نوفه از منابع مختلف هستند که می‌تواند باعث پنهان شدن سیگنال واقعی شود و تشخیص لبه را دشوار کند (سرتسریک و کافادار، ۲۰۱۲). با توجه به اینکه در حین مشتق‌گیری مولفه‌های فرکانس بالای نوفه نیز تقویت می‌شوند، روش‌های مبتنی بر مشتق‌های با درجات بالا در شناسایی لبه‌های داده‌های میدان پتانسیل توسعه نیافتند (ناسوتی و همکاران، ۲۰۱۹). فیلترهای ریخت‌شناسی یک ابزار قوی برای تشخیص لبه با استفاده از عملیات ریخت‌شناسی برای شناسایی لبه‌های بی‌هنجاری در داده‌های میدان پتانسیل می‌باشد. این روش، شامل استفاده از عناصر ساختاری است که امکان استخراج ویژگی‌های مهم نظیر لبه‌ها و در عین حال تضعیف نوفه را فراهم می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به طور ذاتی منحصر به فرد نیست. به عبارت دیگر، مدل‌های زمین‌شناسی متعدد می‌توانند داده‌های مشابهی را تولید کنند. این ابهام می‌تواند منجر به عدم اطمینان در شناسایی لبه‌های واقعی شود (عابدی، ۲۰۲۰). ژیاودی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که روش‌های لبه‌یابی در پردازش تصویر مانند فیلترهای مختلف کنی و سوبل (گوپتا و همکاران، ۲۰۲۳) می‌توانند به طور موثر لبه اجسام زمین‌شناسی را در داده‌های میدان پتانسیل شناسایی کنند. این روش‌ها نسبت به نوفه از حساسیت کمتری برخوردارند. روش‌های میدان پتانسیل وضوح عمقی محدودی دارند و پاسخ از منابع عمیق می‌تواند ضعیف باشد و تشخیص آن از نوفه زمینه دشوار است که می‌تواند تشخیص لبه‌های منابع عمیق را چالش برانگیز کند (فدی و همکاران، ۲۰۰۵). از طرفی، مرزهای ناشی از منابع بی‌هنجاری سطحی در مقایسه با مرزهای بی‌هنجاری عمیق با دامنه بالاتری آشکارسازی می‌شوند که می‌تواند باعث ابهام در تفسیر نتایج شود (کوپر، ۲۰۰۹؛ نجاتی و روشندل، ۲۰۱۳a؛ خزائی، ۲۰۱۶). این محدودیت به دلیل استفاده از اطلاعات دامنه در

است. کارآیی فیلتر جدید در داده مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه و در داده‌های واقعی مربوط به کانسار آهن در چین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ روش‌شناسی تحقیق

همانطور که بیان شد، مشتق یک عملگر ریاضی است که می‌تواند لبه‌ها و مولفه‌های فرکانس بالا را در داده‌های میدان پتانسیل تقویت کند. چنانچه داده میدان پتانسیل به صورت $P(x, y, z)$ نشان داده شود، میدان برداری گرادیان آن را می‌توان به صورت $\vec{G} = \left(\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z} \right)$ نشان داد (روی، ۲۰۰۷). در شکل ۱ هندسه بردار گرادیان نمایش داده شده است. طبق تعریف مرز و لبه در پردازش تصویر، با توجه به تغییرات شدید در محل مرز، طول بردار گرادیان در مرزها بیشینه و جهت آن عمود بر راستای مرز است (سولومون و برکن، ۲۰۱۱). روش گرادیان افقی کل (THG) و سیگنال تحلیلی (|AS|) دو روش متداول مبتنی بر طول بردار گرادیان هستند که مطابق روابط (۱) و (۲) در شناسایی لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شوند (روزت و همکاران، ۱۹۹۲).

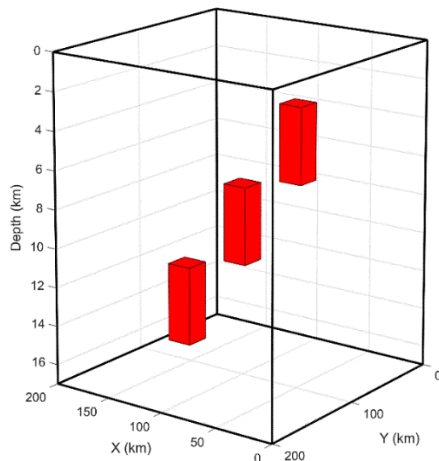
$$THG = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

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

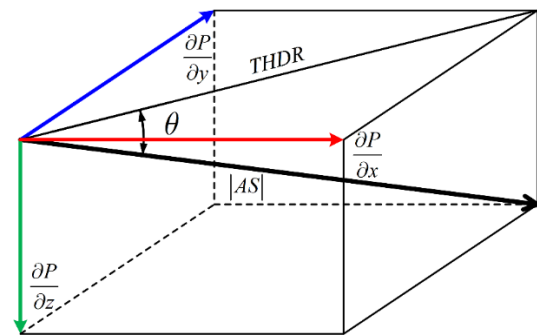
مطابق روابط (۱) و (۲) و با توجه به هندسه شکل ۱ دو روش گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی بر اساس طول بردار گرادیان، لبه‌های بی‌هنجاری میدان پتانسیل را محاسبه می‌کند. به همین دلیل لبه‌های مربوط به بی‌هنجاری‌های عمیق و بی‌هنجاری‌های سطحی که دارای دامنه‌های متفاوتی هستند، با قدرت تفکیک متفاوت و به صورت غیرمتوازن به دست می‌آیند. به منظور درک بهتر، سه بی‌هنجاری با عمق‌های مختلف و ابعاد و تباین چگالی یکسان مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شد. بی‌هنجاری بوگه

محاسبات تعیین لبه است. از آنجایی که سیگنال تحلیلی، یک سیگنال مختلط است که در آن اطلاعات دامنه و فاز وجود دارد، در سال‌های اخیر، روش‌های لبه‌یابی مبتنی بر اطلاعات فازی مانند زاویه شیب و نقشه تدا معرفتی شدند که به جای اطلاعات دامنه از اطلاعات فازی استفاده می‌کنند. در چنین حالتی، مرز بی‌هنجاری‌ها مستقل از دامنه که به عمق ارتباط دارد، توسط اطلاعات فازی تعیین می‌شود که نتایج آن‌ها نسبت به روش‌های مبتنی بر دامنه برای منابع عمیق و سطحی متوازن‌تر است (ویجینز و همکاران، ۲۰۰۵؛ اردستانی، ۲۰۱۰؛ نجاتی و روشندل، ۲۰۱۳b). فریرا و همکاران (۲۰۱۳) پیشنهاد دادند که با محاسبه زاویه شیب بر روی دامنه گرادیان افقی می‌تواند به صورت متوازی مرز بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی را مشخص کند. کوپر (۲۰۲۳) یک فیلتر تشخیص لبه دامنه متعادل برای داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از مولفه دامنه و فاز داده معرفی نمود که قابلیت کاهش نوفه لبه‌های شناسایی شده را نیز دارا می‌باشد. داندان و همکاران (۲۰۲۳) برای متوازن کردن لبه‌های بی‌هنجاری‌های با منشاء عمیق و سطحی یک روش جدید ترکیبی از انحنای متوسط، انحنای عمودی و درجه انحنای ارائه کردند که کمتر تحت تأثیر بی‌هنجاری‌های با دامنه مثبت و منفی قرار می‌گیرد و دارای قابلیت ضد نوفه است.

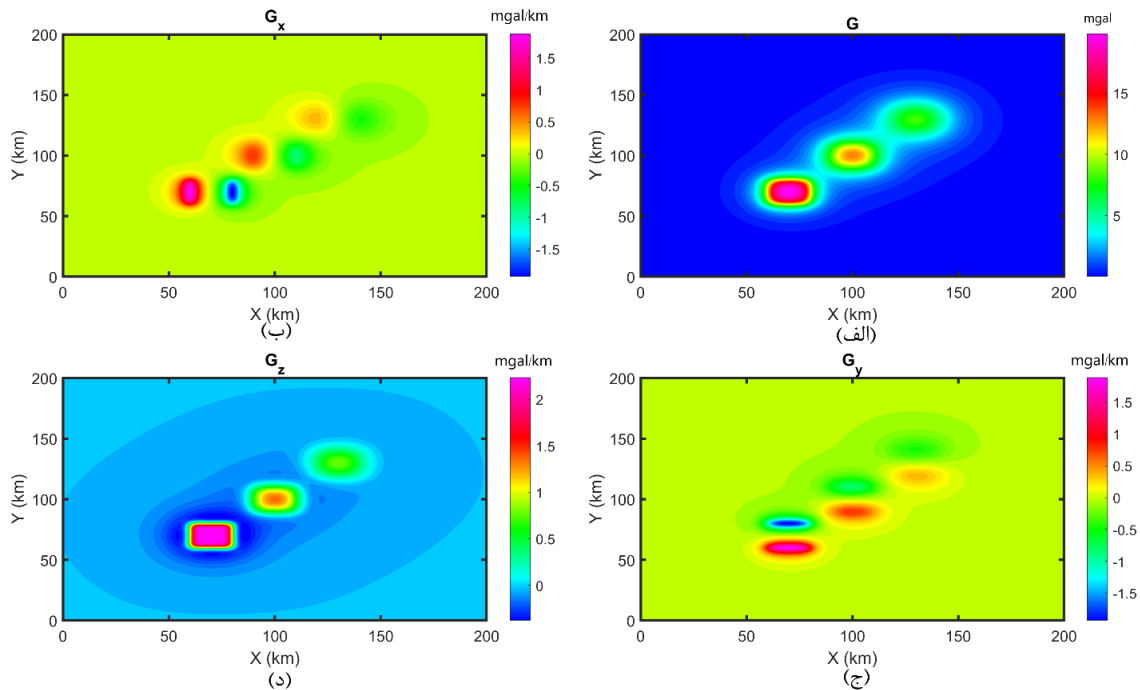
علیرغم اینکه روش‌های مختلفی برای مقابله با چالش‌های متداول در لبه‌یابی داده‌های میدان پتانسیل معرفی شده‌اند، اما همچنان لزوم معرفی روش جدیدی که بتواند ضمن شناسایی لبه‌ها با قدرت تفکیک بالا به صورت متوازن برای منابع عمیق و سطحی در مقابل نوفه حساسیت کمتری داشته باشد، احساس می‌شود. در این مقاله، یک فیلتر جدید برای تعیین لبه در داده‌های میدان پتانسیل معرفی می‌شود که دارای قدرت تفکیک بالایی در شناسایی لبه‌ها است و مرز بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی را به صورت متوازن آشکار می‌کند. فیلتر جدید، مقابل نوفه دارای پایداری مناسبی



شکل ۲. مدل هندسی سه بی‌هنجاری با عمق‌های مختلف و ابعاد و تباین چگالی یکسان.



شکل ۱. هندسه میدان برداری گرادیان داده میدان پتانسیل و مفهوم فیلترهای مختلف لبه‌یابی بر مبنای بردار گرادیان (با تغییر از (میلر و سینگ، ۱۹۹۴)).

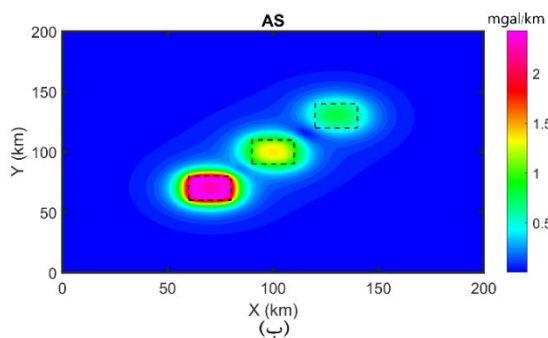


شکل ۳. (الف) بی‌هنجاری بوگه مربوط به مدل هندسی شکل ۲ و گرادیان‌های (ب) افقی در راستای x ، (ج) افقی در راستای y و (د) قائم.

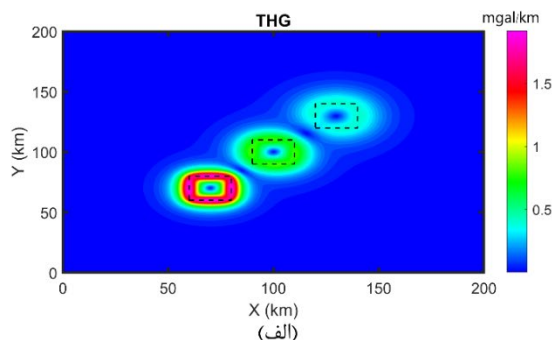
قدرت تفکیک گرادیان‌های افقی و قائم کاهش می‌یابد. همین عامل سبب کاهش قدرت تفکیک لبه‌ها برای منابع عمیق‌تر نسبت به منابع سطحی در روش‌های مبتنی بر دامنه بردار گرادیان می‌شود. در شکل ۴ لبه‌های شناسایی شده با دو روش گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، لبه‌های مربوط به

و گرادیان‌های مختلف آن‌ها محاسبه شده و در شکل ۳ ترسیم شده است. در محاسبه بی‌هنجاری بوگه از الگوریتم برهم‌نهی منشورهای مستطیلی (بلکلی، ۱۹۹۶) و برای محاسبه گرادیان‌های مختلف از روش تبدیل فوریه (بلکلی، ۱۹۹۶) استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق منبع، دامنه بی‌هنجاری بوگه کاهش می‌یابد و

همکاران، ۲۰۱۶). این در حالی است که در مشتق افقی کل، لبه‌ها به صورت حداکثر مقدار مشاهده می‌شوند. بنابراین، می‌توان گفت که مشتق افقی کل برای شناسایی لبه‌ها ابزار مناسبی است؛ در حالیکه سیگنال تحلیلی، برای تعیین مرز در تمام موارد ابزار چندان مناسبی نیست.



منبع عمیق‌تر با وضوح کمتری نسبت به منبع سطحی مشخص شده است. با مشاهده شکل ۴ (ب) می‌توان دید که مقدار سیگنال تحلیلی در مرکز جسم حداکثر است و در روی لبه‌ها کاهش می‌یابد و به همین دلیل، سیگنال تحلیلی روشی برای شناسایی منابع پتانسیل می‌باشد (یائو و



شکل ۴. لبه‌های شناسایی شده برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۳-الف) به روش الف) گردایان افقی کل و ب) سیگنال تحلیلی. خطچین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.

مقدار فیلتر زاویه شیب روی منبع بی‌هنجاری مثبت است و زمانی که روی لبه بی‌هنجاری باشد، مقدار آن از صفر می‌گذرد و در بیرون از موقعیت منبع بی‌هنجاری منفی می‌شود. این رفتار ناشی از این است که به طور معمول در لبه‌ها، تغییر قابل توجهی در جهت قائم در داده میدان پتانسیل وجود ندارد و بنابراین، مولفه گردایان قائم به‌طور قابل توجهی به سمت صفر میل می‌کند؛ در حالیکه گردایان کل افقی در مرز بی‌هنجاری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این در حالی است که رفتار گردایان قائم و کل افقی روی منبع بی‌هنجاری عکس رفتار آن‌ها روی لبه بی‌هنجاری است. همین دلیل، فیلتر زاویه شیب برای ترسیم لبه‌ها یک روش موثر است. در این رابطه گردایان قائم نرمال شده با دامنه گردایان افقی سبب می‌شود که لبه‌های شناسایی شده مستقل از دامنه بی‌هنجاری و گردایان آن باشد و نتیجه لبه‌یابی برای منابع با عمق‌های مختلف متوازن‌تر از سایر روش‌ها باشد. در شکل ۵-الف) نتیجه لبه‌یابی به روش فیلتر زاویه شیب برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۳-الف) نشان

عدم شناسایی لبه‌ها به صورت متوازن برای بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی در روش‌های مبتنی بر دامنه بردار گردایان سبب شد که محققان، روش‌های مبتنی بر اطلاعات فازی بردار گردایان را برای شناسایی لبه‌ها در داده‌های میدان پتانسیل به کار بگیرند که امکان شناسایی لبه‌های منابع با عمق‌های مختلف را به صورت متوازن دارند. فیلتر زاویه شیب (TA) یک روش مفید برای شناسایی لبه‌ها و مولفه‌های فرکانس بالا در داده‌های میدان پتانسیل است که به عنوان اولین روش لبه‌یابی مبتنی بر اطلاعات فازی بردار گردایان شناخته می‌شود (میلر و سینگ، ۱۹۹۴). منظور از زاویه شیب، مطابق شکل ۱، زاویه میان بردار گردایان و سطح افق است. بنابراین، می‌توان فیلتر زاویه شیب با توجه به هندسه شکل ۱ به صورت رابطه (۳) تعریف نمود.

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

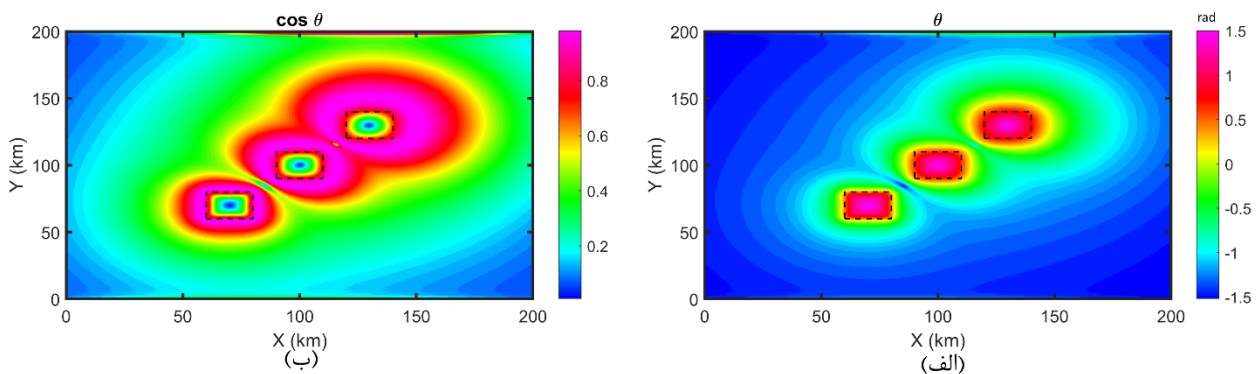
تتا مشخص نماید. هر چند دو روش فیلتر زاویه شیب و نقشه تتا توانستند مشکل عدم توازن در لبه‌های منابع بی‌هنجاری با عمق‌های مختلف را برطرف کنند، ولی چالش قدرت تفکیک پایین برای ساختارهای عمیق همچنان باقی است و لبه منابع بی‌هنجاری عمیق از قدرت تفکیکی بسیار پایین برخوردار است.

$$\cos \theta = \frac{THG}{AS} \quad (۴)$$

فرییرا و همکاران (۲۰۱۳) پیشنهاد دادند که در رابطه (۳) به منظور بهبود قدرت تفکیک فیلتر زاویه شیب، از گرادیان افقی کل به جای داده میدان پتانسیل استفاده شود که منجر به روش جدیدی مطابق رابطه (۵) شد. این تغییر سبب می‌شود که متوازن‌سازی بر روی مرزهای حاصل از روش‌های متداول انجام شود و علاوه بر قدرت تفکیک مناسب، تعادل میان لبه‌های منابع عمیق و سطحی برقرار باشد. در شکل ۶، گرادیان‌های افقی و قائم مربوط به گرادیان افقی کل و لبه‌های تخمین‌زده شده با استفاده از رابطه (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با بکارگیری روش فیلتر زاویه شیب روی گرادیان افقی کل، قدرت تفکیک لبه‌های شناسایی شده تا حدی نسبت به روش زاویه شیب معمول افزایش یافته است. در روش زاویه شیب متداول، مرزها به صورت عبور از صفر مشخص می‌شوند، در صورتی که در روش پیشنهادی فرییرا و همکاران (۲۰۱۳) مرزها به صورت مقادیر بیشینه مشخص

داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تاثیر عمق منبع بی‌هنجاری بر روی لبه‌های تخمین‌زده شده بسیار کاهش یافته است و نتیجه برای عمق‌های مختلف متوازن است.

هر چند که فیلتر زاویه شیب باعث شده است که عمق منبع بی‌هنجاری در فرایند لبه‌یابی بی‌تاثیر شود، اما به دلیل اینکه لبه‌ها منطبق بر محل صفرگذر مقدار زاویه شیب هستند، تعیین لبه از زاویه شیب کار ساده‌ای نیست. به همین دلیل، روش‌های دیگری مبتنی بر زاویه شیب معرفی شدند که علاوه بر متوازن‌سازی، به صورت مستقیم مرزهای بی‌هنجاری را مشخص نمایند. فیلتر نقشه تتا (ویجیز و همکاران، ۲۰۰۵)، مطابق رابطه (۴)، با محاسبه کسینوس زاویه شیب، لبه‌ها را به صورت مقدار یک از سایر قسمت‌ها آشکار می‌کند. در شکل ۵-ب) نتیجه لبه‌یابی به روش نقشه تتا نشان داده شده است. همانطور که مطابق رابطه (۴) مشاهده می‌شود، از آنجاییکه در صورت کسر مقدار مشتق افقی کل قرار دارد و روی لبه‌های بی‌هنجاری، مقدار آن حداکثر است و در مخرج کسر مقدار سیگنال تحلیلی قرار دارد که مقدار آن روی لبه کمینه است، مقدار کسینوس زاویه شیب در مرز بی‌هنجاری‌ها حداکثر مقدار یعنی برابر یک می‌شود. با مقایسه نتایج فیلتر زاویه شیب و نقشه تتا می‌توان دید که روش زاویه شیب که مقدار آن روی لبه‌ها صفر می‌شود بهتر می‌تواند محل لبه‌ها را نسبت به روش نقشه



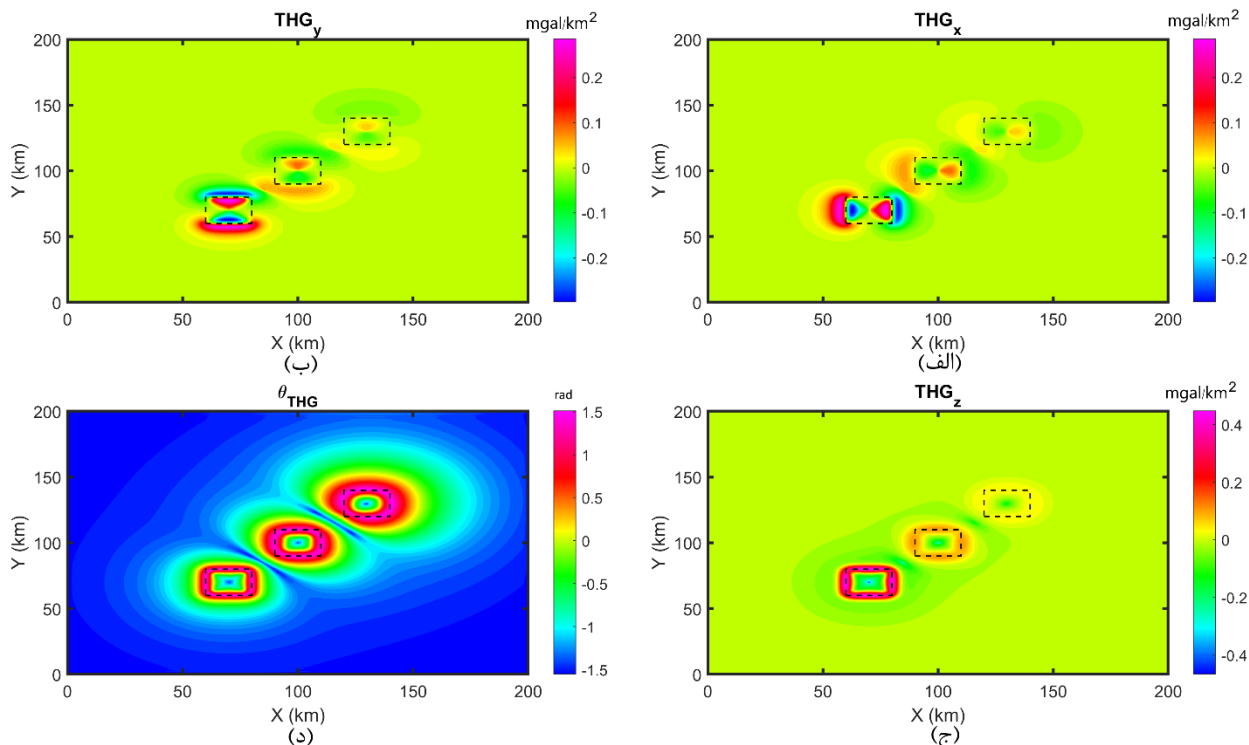
شکل ۵. لبه‌یابی بی‌هنجاری بوگه شکل ۳ الف) به روش الف) فیلتر زاویه شیب و ب) فیلتر نقشه تتا. خط‌چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.

تفکیک لبه بی‌هنجاری‌ها، از نسخه بهبودیافته رابطه (۶) مطابق رابطه (۷) استفاده کردند که k یک مقدار صحیح مثبت است. از آنجایی که آرگومان ورودی تابع معکوس سینوس در رابطه (۷) می‌تواند خارج از بازه $[-1,1]$ به دست بیاید، مقدار خروجی تابع معکوس سینوس یک زاویه مختلط خواهد شد و به همین دلیل در رابطه (۷) مقدار حقیقی آن در نظر گرفته شده است. به ازای $k = 1$ رابطه (۷) معادل رابطه (۶) می‌شود. در شکل ۸ تابع معکوس سینوس $f(a) = \text{asin}(k(a-1) + 1)$ برای مقادیر مختلف k برحسب متغیر مستقل a رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نسخه بهبودیافته همانند یک حد آستانه به ازای مقادیر مختلف k عمل می‌کند و مقدار آن به ازای آرگومان ورودی پایین‌تر از حد آستانه با توجه به مقدار k برابر $-\frac{\pi}{2}$ می‌شود و از این طریق قدرت تفکیک لبه‌ها را افزایش می‌دهد. در شکل ۹، نتیجه لبه‌یابی برای بی‌هنجاری

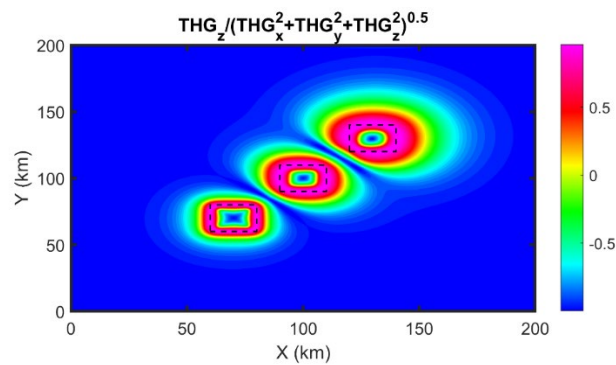
می‌شوند که تعیین آن‌ها به مراتب ساده‌تر است. با این حال، همچنان قدرت تفکیک مرزهای شناسایی شده برای منبع بی‌هنجاری عمیق کمتر از منبع بی‌هنجاری سطحی است.

$$TATHG = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (5)$$

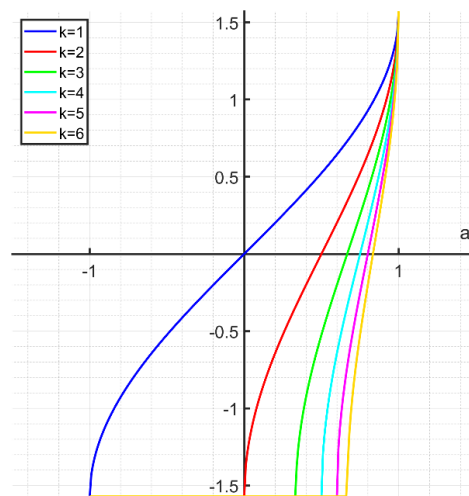
با توجه به هندسه شکل ۱ می‌توان لبه‌های بی‌هنجاری را به جای تابع معکوس تانژانت در رابطه (۵) از تابع معکوس سینوس مطابق رابطه (۶) محاسبه نمود که نتیجه آن با نتیجه حاصل از رابطه (۵) یکسان است. از آنجاییکه مطابق شکل ۷، بازه تغییرات آرگومان تابع معکوس سینوس در بازه $[-1,1]$ است و مرزها منطبق بر مقادیر مثبت نزدیک به یک هستند، فام و همکاران (۲۰۲۲b) به منظور افزایش قدرت



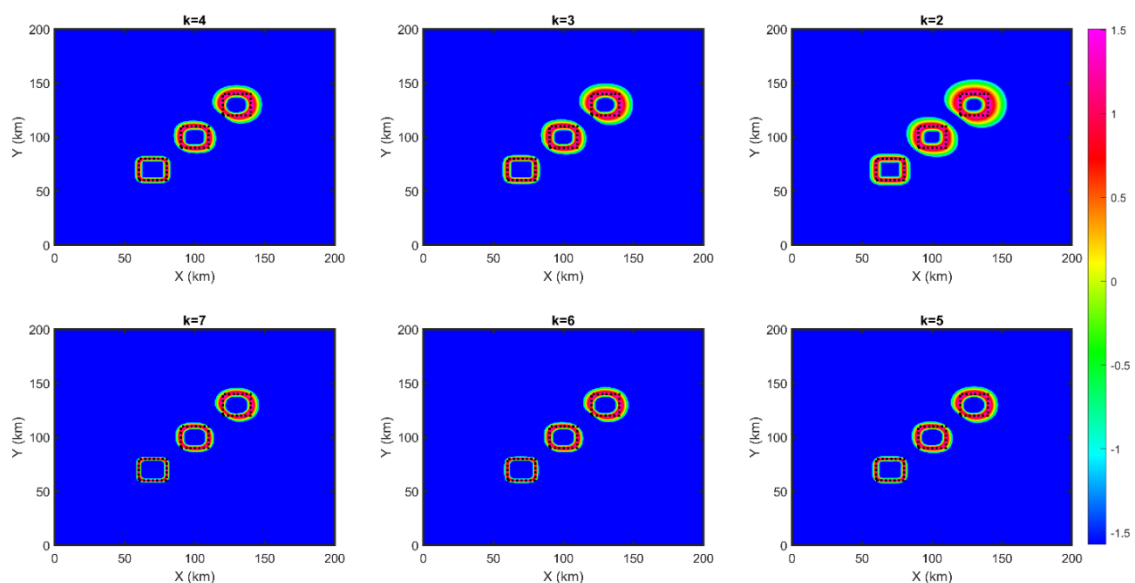
شکل ۶. گرادیان‌های افقی در راستای x (ب) افقی در راستای y و (ج) قائم مربوط به گرادیان افقی کل در شکل ۴-الف) و لبه‌یابی بی‌هنجاری بوگه شکل ۳-الف) به روش فیلتر زاویه شیب برای گرادیان افقی کل. خط‌چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۷. آرگومان ورودی تابع معکوس سینوس در رابطه (۶) برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۳-الف). خط چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۸. تابع $\text{asin}(k(a-1) + 1)$ به ازای مقادیر مختلف k



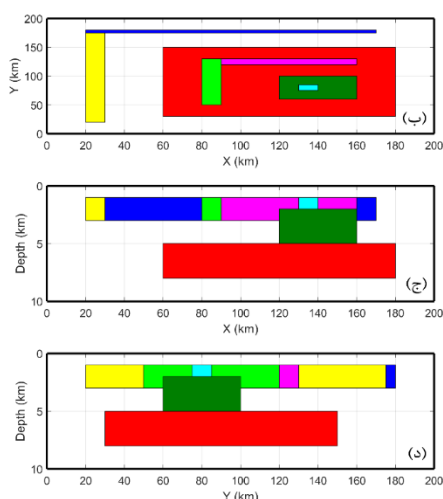
شکل ۹. لبه‌های شناسایی شده با روش پیشنهادی (رابطه (۷)) به ازای مقادیر $k = 2, 3, \dots, 7$. نقطه چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های متداول لبه‌یابی داده‌های میدان پتانسیل، یک مدل مصنوعی با ۷ منبع بی‌هنجاری با ابعاد و عمق‌های مختلف به صورت شکل ۱۰ (تولید شده در محیط نرم‌افزار MATLAB) در نظر گرفته شد که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ آمده است. بی‌هنجاری بوگه حاصل از مدل مصنوعی برای حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۲/۵ درصد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نوفه تصادفی مطابق روابط (۸) و (۹) به داده میدان پتانسیل اضافه شده است.

$$P_{noisy} = P_{clean} + Noise \quad (۸)$$

$$Noise = \sqrt{\frac{Energy\ of\ clean\ data}{M \times N \times SNR^2}} \times RANDN(M, N) \quad (۹)$$

که P_{clean} داده تمیز، P_{noisy} داده آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه SNR بر حسب درصد، $Noise$ نوفه تصادفی، M و N ابعاد داده تمیز و $RANDN$ تابع تولیدکننده عدد تصادفی است. محاسبه بی‌هنجاری بوگه از الگوریتم برهم‌نهی منشورهای مستطیلی (بلکلی، ۱۹۹۶) و محاسبه گرادیان‌های مختلف از روش تبدیل فوریه (بلکلی، ۱۹۹۶) توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط MATLAB انجام شده است.



شکل ۱۰. هندسه مدل مصنوعی در نمای (الف) سه بعدی، (ب) x-y، (ج) Depth-x و (د) Depth-y.

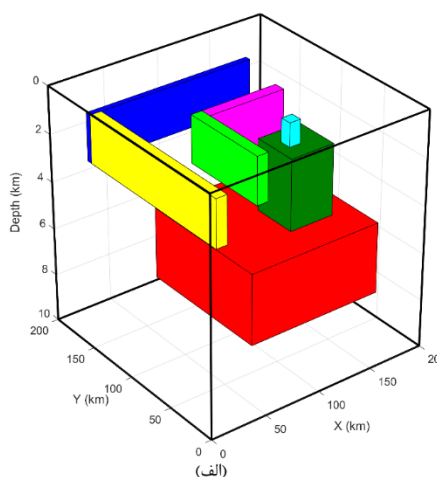
جدول ۱. مشخصات هندسی مدل مصنوعی.

بوگه شکل ۳-الف) با استفاده از رابطه (۷) به ازای چندین مقدار مختلف k نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، لبه‌های شناسایی شده در روش پیشنهادی به مراتب نسبت به روش زاویه شیب گرادیان افقی کل قدرت تفکیک بالاتری دارد و کاملاً منطبق بر مرزهای حقیقی مدل مصنوعی در نظر گرفته شده است. همچنین می‌توان دید که با افزایش مقدار k به دلیل افزایش مقدار حد آستانه، قدرت تفکیک افزایش می‌یابد.

$$TATHG = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial z}\right)^2}} \right) \quad (۶)$$

$$TATHG_{improved} = \mathcal{R} \left\{ \sin^{-1} \left(k \frac{\frac{\partial THG}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THG}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial THG}{\partial z}\right)^2}} \right) - 1 \right\} + 1 \quad (۷)$$

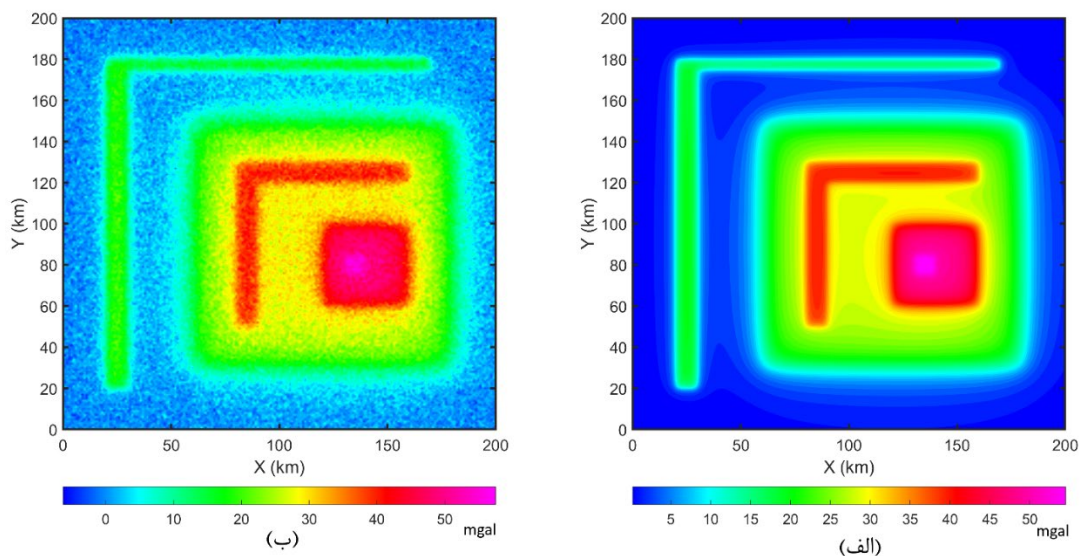
۳ مدل مصنوعی



شکل ۱۰. هندسه مدل مصنوعی در نمای (الف) سه بعدی، (ب) x-y، (ج) Depth-x و (د) Depth-y.

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل مصنوعی.

بی‌هنجاری	مختصات در جهت X (km)	مختصات در جهت Y (km)	مختصات در جهت Z (km)	چگالی (kg/cm ³)
قرمز	۶۰-۱۸۰	۳۰-۱۵۰	۵-۸	۰/۲۵
سبز تیره	۱۲۰-۱۶۰	۶۰-۱۰۰	۲-۵	۰/۲
فیروزه‌ای	۱۳۰-۱۴۰	۷۵-۸۵	۱-۲	۰/۲
سبز روشن	۸۰-۹۰	۵۰-۱۲۰	۱-۳	۰/۲
بنفش	۹۰-۱۶۰	۱۲۰-۱۳۰	۱-۳	۰/۲
آبی	۲۰-۱۷۰	۱۷۵-۱۸۰	۱-۳	۰/۳
زرد	۲۰-۳۰	۲۰-۱۷۵	۱-۳	۰/۳



شکل ۱۱. بی‌هنجاری بوگه برای مدل مصنوعی شکل ۱۰ در حالت (الف) بدون نوفه و (ب) آغشته به نوفه تصادفی به اندازه ۲/۵ درصد.

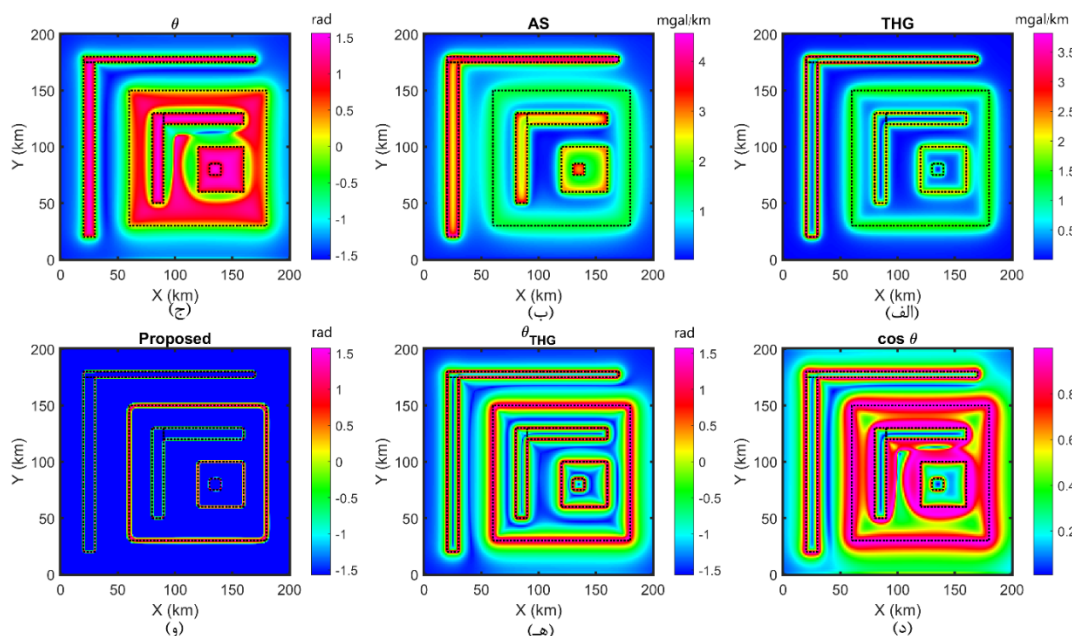
تفکیک به دلیل افزایش مقدار حد آستانه، افزایش می‌یابد. البته از یک مقدار k به بعد (در این مثال $k = 5$) تغییر محسوسی در نتیجه ایجاد نمی‌شود. البته به دلیل استفاده از اطلاعات فازی همانند روش زاویه شیب، در روش پیشنهادی مرز بی‌هنجاری‌های مربوط به عمق‌های مختلف به صورت مقادیر بیشینه و متوازن دیده می‌شوند و با افزایش مقدار k ، قدرت تفکیک بدون تاثیر منفی روی شناسایی لبه‌ها افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی پایداری روش پیشنهادی در مقابل نوفه تصادفی، نتایج لبه‌یابی برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۱۱- (ب) که به اندازه ۲/۵ درصد آغشته به نوفه تصادفی است، به دست آمد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. به منظور

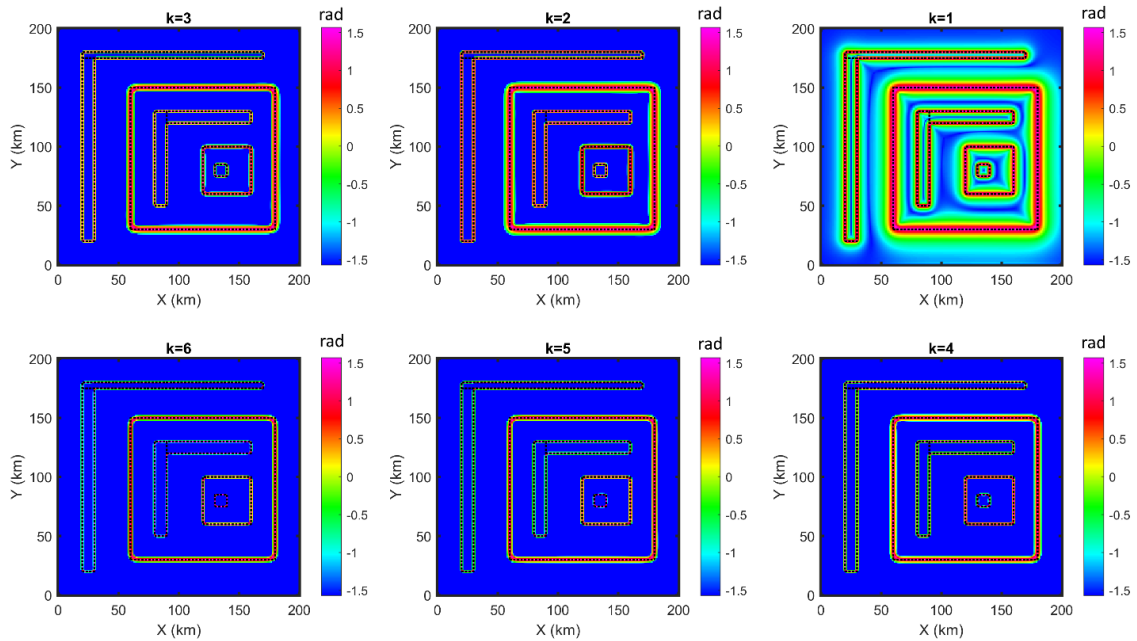
نتایج لبه‌یابی با استفاده از روش پیشنهادی و روش‌های متداول لبه‌یابی در شکل ۱۲ برای بی‌هنجاری بوگه بدون نوفه نشان داده شده است. در روش پیشنهادی، مقدار $k = 5$ در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی با قدرت تفکیک بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌های متداول توانسته است با دقت خوبی لبه‌های منبع بی‌هنجاری را آشکارسازی نماید. به منظور بررسی تاثیر پارامتر k بر روی نتیجه لبه‌یابی، در شکل ۱۳ مقادیر مختلف k در نظر گرفته شد و لبه‌ها به ازای مقادیر مختلف ترسیم گردید. همانطور که مشاهده می‌شود، نتیجه لبه‌یابی به روش پیشنهادی به ازای $k = 1$ کاملاً مشابه نتیجه زاویه شیب گرادیان افقی کل است و با افزایش مقدار k قدرت

لبه‌های بی‌هنجاری را آشکار کند. همانطور که بیان شده، محاسبه گرادیان‌های داده میدان پتانسیل در این مقاله از روش کنداول تبدیل فوریه (بلکلی، ۱۹۹۶) استفاده می‌شود که پایداری کمی در مقابل نوفه تصادفی دارد. می‌توان از روش‌های بهبود یافته محاسبه گرادیان قائم و افقی که در مقابل نوفه پایداری بیشتری نسبت به روش‌های متداول دارند نیز استفاده نمود که سبب بهبود بهتر نتایج لبه‌یابی خواهد شد. لازم به ذکر است که در این مقاله، هدف استفاده از یک روش جدید لبه‌یابی در شناسایی مرزهای بی‌هنجاری و مقایسه نتایج آن با روش‌های متداول است. بنابراین، سعی شده است که تمام عوامل تاثیرگذار روی نتایج لبه‌یابی برای تمام روش‌ها یکسان باشد و نتایج به دست آمده در شرایط یکسان برای تمام روش‌ها به دست آمده است. البته فرایند آستانه‌گذاری که در روش پیشنهادی وجود دارد، سبب کاهش تاثیر نوفه تصادفی نیز می‌شود.

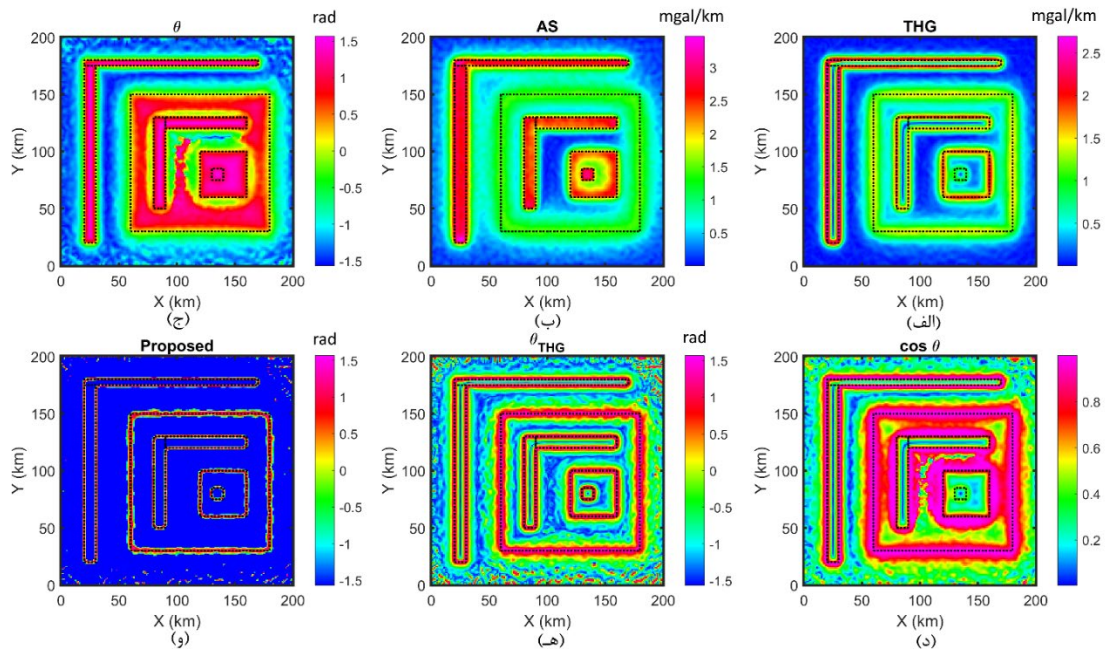
کاهش اثر نوفه تصادفی در محاسبه گرادیان‌ها، بی‌هنجاری بوگه قبل از محاسبه گرادیان از طریق هم‌میخت دو بعدی یک پنجره گوسی با رابطه $\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ و پارامتر انحراف معیار σ هموارسازی شد. البته پنجره‌های متعددی دیگری برای هموارسازی وجود دارد که پنجره گوسی متداول‌ترین آن‌ها است. هرچند فرایند هموارسازی اثر نوفه تصادفی را کاهش می‌دهد، اما باعث افت قدرت تفکیک لبه‌های شناسایی شده به خصوص برای بی‌هنجاری‌های با منبع عمیق می‌شود. حتی در برخی از روش‌های لبه‌یابی مانند زاویه شیب و نقشه‌تتا، هموارسازی باعث شده است که لبه‌های بی‌هنجاری مربوط به منبع فیروزه‌ای که ابعاد کوچکی دارد، در اثر هموارسازی بسیار کاهش یابد. با این وجود، همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، هموارسازی تاثیر مخرب چشم‌گیری روی نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها ندارد و همچنان روش پیشنهادی با قدرت تفکیک بالاتر از سایر روش‌ها و با دقت به مراتب بیشتر توانسته است



شکل ۱۲. نتیجه لبه‌یابی برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۱۱-الف) به روش (الف) گرادیان افقی کل، (ب) سیگنال تحلیلی، (ج) زاویه شیب، (د) نقشه‌تتا، (ه) زاویه شیب گرادیان افقی کل و (د) پیشنهادی. نقطه‌چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. نتیجه لبه‌یابی برای بی‌هنجاری بوگه شکل ۱۱-الف) به روش پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف k . نقطه‌چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. نتیجه لبه‌یابی برای بی‌هنجاری بوگه نوفه‌دار شکل ۱۱-ب) به روش الف) گرادیان افقی کل، ب) سیگنال تحلیلی، ج) زاویه شیب، د) نقشه تنا، ه) زاویه شیب گرادیان افقی کل و د) پیشنهادی. نقطه‌چین سیاه مرز حقیقی منبع بی‌هنجاری را نشان می‌دهد.

۴ داده واقعی

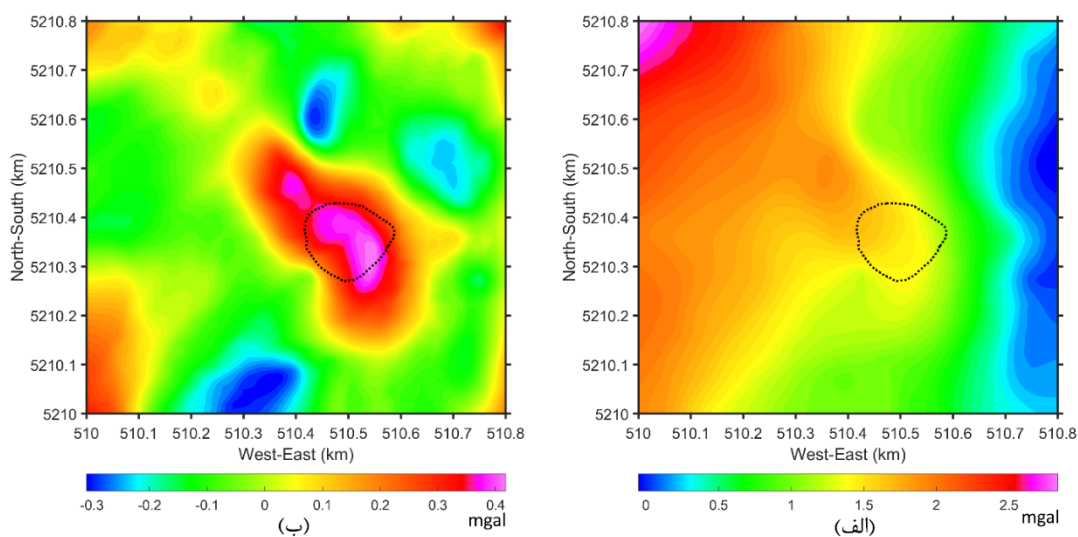
مربوط به کانسار دیدا (Dida) در استان جیلین (Jilin) در شمال شرقی کشور چین گردید که در یک شبکه منظم داده‌برداری شده است و در شکل ۱۵-الف) نشان

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در لبه‌یابی داده‌های واقعی میدان پتانسیل، بی‌هنجاری گرانی بوگه

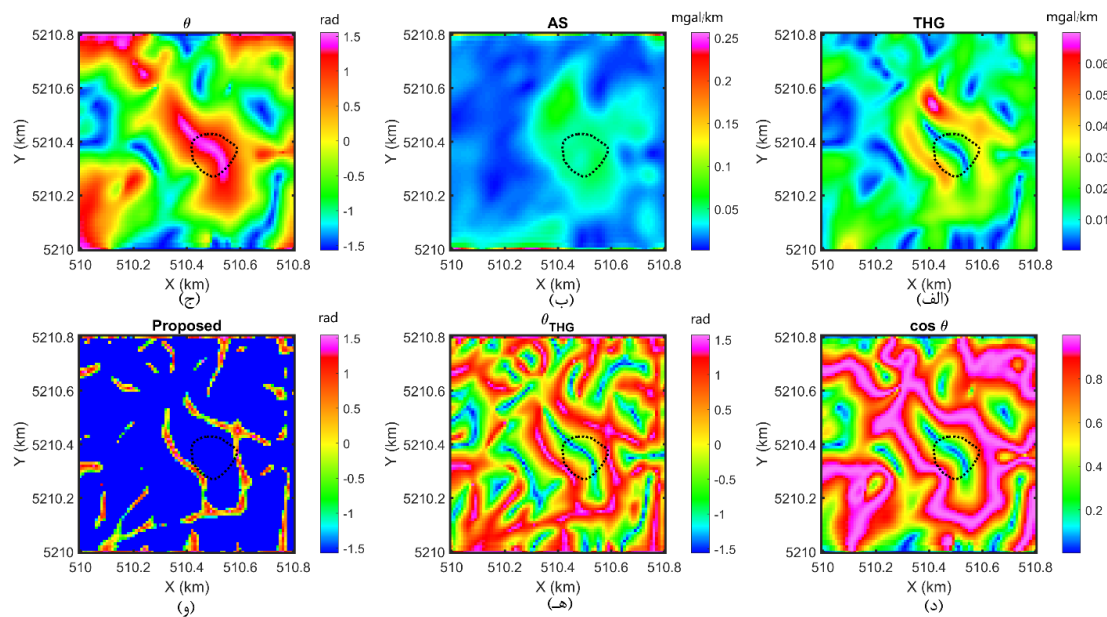
داده شده است. بر اساس گزارش‌ها و حفاری‌های صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه، دو کانسار آهن مجزا در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۷). نقطه چین سیاه در مرکز شکل، گسترش جانبی یکی از کانسار آهن موجود در منطقه را نشان می‌دهد که پس از مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی مشخص شده است. کانسار دیگر در فاصله کمی از کانسار مشخص شده در جهت شمال غرب ردیابی شده است (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ روشندل و انوری، ۲۰۲۴) با استفاده از برآزش چندجمله‌ای بی‌هنجاری محلی و ناحیه‌ای آن تفکیک شد که در شکل ۱۵- (ب) بی‌هنجاری باقیمانده (محلی) نشان داده شده است.

به منظور تعیین محدوده کانسار آهن، الگوریتم‌های لبه‌یابی مذکور روی بی‌هنجاری باقیمانده اعمال گردید که نتیجه آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای محاسبه گردایان‌های مختلف داده گرانی از روش متداول تبدیل فوریه (بلکلی، ۱۹۹۶) توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط MATLAB استفاده شده است. البته، تعبیر و تفسیر منطقه فقط با استفاده از نتایج به دست آمده از لبه‌یابی

منطقی نیست و همواره بایستی اطلاعات تکمیلی دیگر، نظیر نتایج مدل‌سازی، تخمین عمق و نظایر آن‌ها نیز در دسترس باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، اغلب روش‌های لبه‌یابی مورد استفاده توانسته‌اند مرز کانی‌سازی آهن را آشکار نمایند به گونه‌ای که محدوده کانی‌سازی اول مشخص شده از طریق مدل‌سازی معکوس که با خط چین نشان داده شده است، در محدوده آشکارسازی شده قرار دارد. همچنین، محدوده مشخص شده توسط الگوریتم‌های لبه‌یابی، به خصوص روش پیشنهادی، کانی‌سازی شماره ۲ که در شمال غربی کانی‌سازی اول ردیابی شده است را نیز در بر گرفته است. در واقع، تمامی روش‌های مورد استفاده در مقاله به گونه‌ای یا خود توده بی‌هنجار یا مرزهای آن‌را مشخص کرده‌اند. به عنوان مثال، همانطور که بیان شد، روش سیگنال تحلیل روی بی‌هنجاری دارای مقدار حداکثر است و یا شیب مشتق افقی کل مرز بی‌هنجاری را با دامنه بالا نشان داده است. البته با مقایسه روش‌های مختلف می‌توان دید که روش پیشنهادی با قدرت تفکیک بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده در مقاله مرزهای کانی‌سازی آهن در منطقه مورد مطالعه را آشکارسازی کرده است. در تمام روش‌های لبه‌یابی و از جمله روش



شکل ۱۵. (الف) بی‌هنجاری بوگه مربوط به کانسار پیدا و (ب) بی‌هنجاری محلی حاصل از برآزش چندجمله‌ای.



شکل ۱۶. نتیجه لبه‌یابی برای بی‌هنجاری باقیمانده شکل ۱۵- (ب) مربوط به کانسار دیدا (Dida) در استان جیلین (Jilin) به روش (الف) گرادیان افقی کل، (ب) سیگنال تحلیلی، (ج) زاویه شیب، (د) نقشه تتا، (ه) زاویه شیب گرادیان افقی کل و (د) پیشنهادی. نقطه‌چین سیاه مرز یکی از کانسارهای آهن شناسایی شده با مدل سازی را نشان می‌دهد.

پیشنهادی ضمن شناسایی لبه‌های بی‌هنجاری با عمق‌های مختلف به صورت متوازن از قدرت تفکیک بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه در مقاله، گرادیان افقی کل، سیگنال تحلیلی، زاویه شیب، نقشه تتا و زاویه شیب گرادیان افقی کل برخوردار است. همچنین، نتایج حالت نوفه‌دار نشان داد که روش پیشنهادی مقاله در مقابل نوفه پایداری بیشتری نسبت به سایر روش‌های مذکور دارد. نتیجه ارزیابی روش پیشنهادی در داده‌های واقعی گرانی‌سنجی مربوط به کانسار آهن دیدا در استان جیلین در شمال شرقی کشور چین و مقایسه با نتایج روش‌های رایج مورد استفاده در مقاله نشان داد که روش پیشنهادی نه تنها می‌تواند از تولید لبه‌های کاذب جلوگیری کند، بلکه لبه‌هایی با وضوح بالاتر در مقایسه با روش‌های دیگر ایجاد می‌کند. بنابراین، روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب لبه‌یابی در داده‌های میدان پتانسیل استفاده شود.

پیشنهادی مرزهای بی‌هنجاری دیگری نیز علاوه بر هدف اصلی شناسایی می‌شوند که با توجه به شواهد زمین‌شناسی و سایر اطلاعات بایستی میزان اهمیت آن‌ها تعیین شود. با این وجود میزان مرزهای بی‌هنجاری کاذب در روش پیشنهادی به مراتب از سایر روش‌ها کمتر است.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش با قدرت تفکیک بالا برای لبه‌یابی داده‌های میدان پتانسیل معرفی شد که از طریق آستانه‌گذاری بر زاویه شیب گرادیان افقی کل مرز بی‌هنجاری‌ها را با قدرت تفکیک بالا شناسایی می‌کند. این روش بر اساس نسبت گرادیان عمودی به دامنه بردار گرادیان حاصل از گرادیان افقی کل است و به همین دلیل مرز بی‌هنجاری‌های با منبع عمیق و سطحی را به صورت متوازن شناسایی می‌کند. کارآیی روش پیشنهادی بر روی داده‌های مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه نشان داده شد. نتایج داده مصنوعی نشان داد که روش

منابع

- Abedi, M., 2020, A focused and constrained 2D inversion of potential field geophysical data through Delaunay triangulation, a case study for iron-bearing targeting at the Shavaz deposit in Iran: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 309, 106604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106604>.
- Acharya, T., and A. K. Ray, 2005, *Image processing: principles and applications*: John Wiley & Sons.
- Ardestani, E., 2010, Precise Edge detection of gravity anomalies by Tilt angle filters, *J: Earth & Space Phys*, 36, no. 2, 11-19. <http://dx.doi.org/10.1001.1.2538371.1389.36.2.9.5>.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge university press.
- Cooper, G., 2009, Balancing images of potential-field data: *Geophysics*, 74, no. 3, L17-L20. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3096615>.
- Cooper, G., 2023, Amplitude-balanced edge detection filters for potential field data: *Exploration Geophysics*, 54, no. 5, 544-552. <http://dx.doi.org/10.1080/08123985.2023.2184255>.
- Dandan, J., Z. Qi, and Z. Hairong, 2023, A new method of balanced edge detection based on curvature for gravity data: *Acta Geophysica*, 71, no. 4, 1705-1715. <http://dx.doi.org/10.1007/s11600-022-00995-1>.
- Fedi, M., and G. Florio, 2001, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method: *Geophysical prospecting*, 49, no. 1, 40-58. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00235.x>.
- Fedi, M., P. C. Hansen, and V. Paoletti, 2005, Analysis of depth resolution in potential-field inversion: *Geophysics*, 70, no. 6, A1-A11. <http://dx.doi.org/10.1190/1.2122408>.
- Ferreira, F. J., J. de Souza, A. de B. e S. Bongiorno, and L. G. de Castro, 2013, Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle: *Geophysics*, 78, no. 3, J33-J41. <http://dx.doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>.
- Gupta, S., H. Singh, and Y. Singh. 2023, *Comprehensive Study on Edge Detection*. Paper read at International Conference on Communication, Electronics and Digital Technology.
- Khazaee, S., 2016, Precise edge detection of anomalies in potential field data using balanced horizontal derivative and second-order normalized total horizontal derivative: *Journal of the Earth and Space Physics*, 42, no. 2, 393-403. <http://dx.doi.org/10.22059/jesphys.2016.58551>.
- Li, L., G. Ma, and X. Du, 2013, Edge detection in potential-field data by enhanced mathematical morphology filter: *Pure and Applied Geophysics*, 170, 645-653. <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-012-0545-x>.
- Miller, H. G., and V. Singh, 1994, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, 32, no. 2-3, 213-217. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1).
- Nasuti, Y., A. Nasuti, and D. Moghadas, 2019, STD-R: A novel approach for enhancing and edge detection of potential field data: *Pure and Applied Geophysics*, 176, 827-841. <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-018-2016-5>.
- Nejati Kalateh, A., and A. Roshandel Kahoo, 2013a, Potential field data balancing using the Hilbert transform: *Journal of the Earth and Space Physics*, 38, no. 4, 145-153. <http://dx.doi.org/10.22059/jesphys.2013.30212>.
- Nejati Kalateh, A., and A. Roshandel Kahoo, 2013b, Edge detection of potential field data using Theta maps: *Iranian Journal of Geophysics*, 7, no. 1, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1001.1.20080336.1392.7.1.3.7>.
- Oliveira, S. P., F. J. Ferreira, and J. de Souza, 2017, EdgeDetectPFI: An algorithm for automatic edge detection in potential field anomaly images—application to dike-like magnetic structures: *Computers & Geosciences*, 103, 80-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.02.006>.
- 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, 104190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104190>.
- Pham, L. T., A. M. Eldosouky, E. Oksum, and S. A. Saada, 2022a, A new high resolution filter for source edge detection of potential field data: *Geocarto International*, 37, no. 11, 3051-3068.

- <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2020.1849414>.
- Pham, L. T., E. Oksum, D. V. Le, F. J. Ferreira, and S. T. Le, 2022b, Edge detection of potential field sources using the softsign function: *Geocarto International*, 37, no. 14, 4255-4268. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2021.1882007>.
- Roest, W. R., J. Verhoef, and M. Pilkington, 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, 57, no. 1, 116-125. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443174>.
- Roshandel Kahoo, A., and R. Anvari, 2024, Separation of Regional-Residual Anomaly in 2D Gravity Data Using The 2D Singular Spectrum Analysis: *Journal of the Earth and Space Physics*, -. <http://dx.doi.org/10.22059/jesphys.2024.367608.1007574>.
- Roy, K. K., 2007, *Potential theory in applied geophysics*: Springer Science & Business Media.
- Sertcelik, I., and O. Kafadar, 2012, Application of edge detection to potential field data using eigenvalue analysis of structure tensor: *Journal of Applied Geophysics*, 84, 86-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.06.005>.
- Solomon, C., and T. Breckon, 2011, *Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab*: John Wiley and Sons.
- Wang, J., X. Meng, and F. Li, 2020, A computation scheme based on field attenuation rate for improving regional-residual separation of potential field data set: *Journal of Geophysics and Engineering*, 17, no. 1, 117-126. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1093/jge/gx z095>.
- Wijns, C., C. Perez, and P. Kowalczyk, 2005, Theta map: Edge detection in magnetic data: *Geophysics*, 70, no. 4, L39-L43. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1988184>.
- Xiaodi, T., M. Guoqing, and Z. Dailei, 2018, Application of image processing methods in edge detection of potential field data: *ASEG Extended Abstracts*, 2018, no. 1, 1-4. <http://dx.doi.org/10.1071/ASEG2018abP088>.
- Yao, Y., D. Huang, X. Yu, and B. Chai, 2016, Edge interpretation of potential field data with the normalized enhanced analytic signal: *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51, 125-136. <http://dx.doi.org/10.1007/s40328-015-0120-x>.
- Zeng, H., D. Xu, and H. Tan, 2007, A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China: *Geophysics*, 72, no. 4, I45-I50. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1190/1.2719497>.

Using a new filter with high resolution to identify the edges of anomalies in the potential field data based on the thresholding of the tilt angle of the total horizontal gradient

Amin Roshandel Kahoo^{1*}, Poorandokht Soltani² and Hamidreza Baghzendani²

¹Associate Professor, Department of Petroleum and Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Ph.D. Student, Department of Mining Exploration, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 24 July 2024, Accepted: 29 January 2025)

Summary

Potential field methods are extensively utilized for identifying and modeling subsurface geological structures and mineral deposits. Edge detection constitutes a critical step in processing and interpreting potential field data, aimed at determining the precise lateral position of subsurface anomalies. The edges of an image represent its high-frequency components; thus, the derivative operator plays a significant role in delineating these edges due to its remarkable capacity to effectively amplify high-frequency components.

However, several challenges confront edge detection in potential field data. Notably, the imbalance between the edges of deep and shallow sources, alongside low resolution, stands as one of the most prominent challenges encountered with conventional methods such as total horizontal gradient and analytic signal techniques. This limitation primarily arises from the reliance on the amplitude of the gradient vector in edge detection processes. The amplitude of the gradient vector is closely correlated with the amplitude of the anomaly, which, in turn, is inherently associated with the depth of the anomaly source beneath the surface.

In recent years, innovative edge detection methodologies based on phase information derived from the gradient vector have emerged as promising alternatives. Ferreira et al. (2013) proposed that by calculating the tilt angle on the total horizontal gradient, it is feasible to not only balance the edges of deep and shallow anomalies but also significantly enhance resolution. Pham et al. (2022b) introduced an improved approach for calculating the tilt angle on the total horizontal gradient to augment the resolution of anomaly edges by imposing a threshold on the derived tilt angle; this method preserves high values of the tilt angle to further improve resolution.

The efficacy of the proposed method was rigorously evaluated using synthetic data under two distinct conditions: one devoid of noise and another subjected to noise, simulating real-world scenarios that geophysicists often encounter. The results obtained from synthetic data indicated that the proposed method, while effectively identifying edges of anomalies at varying depths in a balanced manner, surpasses other comparative methods discussed within the paper in terms of resolution and clarity. Furthermore, findings derived from the noisy scenario demonstrated that the proposed method exhibits greater stability against noise than many of the aforementioned methods, thereby ensuring more reliable outcomes in practical applications.

An assessment of the proposed method on actual gravimetry data related to the Dida iron deposit located in Jilin province in northeast China, juxtaposed with results from traditional methods, revealed that the proposed approach is capable of not only eliminating false edge generation but also producing edges with superior resolution compared to alternative methods. The comparative analysis highlights its effectiveness in accurately capturing subsurface features crucial for geological exploration. Consequently, this proposed method may be regarded as a viable alternative for edge detection within potential field data. By enhancing our ability to interpret subsurface anomalies effectively, this advancement holds significant implications for various applications in geoscience, including mineral exploration, environmental studies, and resource management.

Keywords: Potential field, edge detection, tilt angle, total horizontal gradient, resolution

*Corresponding author:

roshandel@shahroodut.ac.ir