

تعیین مرز بی‌هنجاری‌های میدان گرانی با استفاده از ترکیب تبدیلات هیلبرت جهتی و تابع لجستیک

احمد الوندی^{۱*} و وحید ابراهیم زاده اردستانی^۲

۱- واحد همدان، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران
۲- گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: aalvandi@uast.ac.ir

چکیده

بی‌هنجاری‌های گرانی از ساختارها و چشمه‌های مختلف مدفون که هر کدام دارای شکل، عمق، چگالی و... متفاوتی هستند تشکیل می‌گردد. در دهه‌های اخیر انواع آشکارسازهای لبه و فیلترهای تعیین موقعیت افقی، به منظور تعیین و ترسیم دقیق هندسه و جزئیات چشمه‌های مدفون با پارامترهای مختلف توسعه و معرفی گردیده است. اگرچه در اکثر این تکنیک‌ها، تصاویر ترسیم‌شده برای چشمه‌های عمیق‌تر معمولاً تار یا مبهم هستند و یا فیلتر نمی‌تواند به طور همزمان لبه‌های حاصل از چشمه‌های مختلف با دامنه‌های ضعیف و قوی را ترسیم نماید. از اینرو به منظور غلبه بر این مشکلات، برای نخستین بار در این پژوهش یک فیلتر موثر با تفکیک‌پذیری و کیفیت مناسب و با استفاده از ترکیب تابع لجستیک و تبدیل هیلبرت جهت‌دار معرفی گردیده است. نتایج حاصل از بررسی فیلتر بر روی داده‌های گرانی مصنوعی دوبعدی و داده‌های گرانی سه‌بعدی بدون نوفه و همراه با نوفه نشان می‌دهد که فیلتر پیشنهادی نسبت به سایر فیلترهای مرسوم (سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی متعادل شده و تابع لجستیک سیگنال تحلیلی) از عملکرد بهتر و کیفیت بیشتری در تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی برخوردار است. همچنین به منظور تایید عملی کارایی و توانمندی فیلترهای تعیین لبه، از تکنیک پیشنهادی و سایر فیلترهای استاندارد به منظور ترسیم موقعیت افقی برخی گسل‌ها و چشمه‌های مدفون در کارپاتیان غربی واقع در کشور اسلواکی استفاده گردیده است. نتایج حاصل از داده‌های بی‌هنجاری گرانی بوگه کامل نشان می‌دهد که فیلتر پیشنهادی می‌تواند به نتایج بهتری در تفسیر کیفی و ترسیم موقعیت افقی بی‌هنجاری‌های گرانی نسبت به سایر تکنیک‌ها دست پیدا نماید.

واژگان کلیدی

بی‌هنجاری گرانی
تبدیل هیلبرت
دامنه سیگنال تحلیلی
اسلواکی
تعیین لبه

۱-مقدمه

روش گرانی‌سنجی یکی از محبوب‌ترین و باسابقه‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی برای تعیین موقعیت و بررسی ویژگی‌های ساختارها و چشمه‌های زیرسطحی است (اردستانی، ۱۳۸۹). علی‌رغم پیشرفت روش‌های اکتشافی در دهه‌های اخیر که برخی از آن‌ها کیفیت بررسی و تفسیر اطلاعات زیرسطحی را بهبود داده‌اند، روش گرانی‌سنجی همچنان نقشی

اساسی و مورد اطمینان در بررسی و اکتشاف منابع هیدروکربنی، معادن زیرزمینی، ساختارهای زمین‌شناسی و غیره ایفا می‌نماید (Hinze et al., 2013; Ai et al., 2023; Ai et al., 2025; Deniz Toktay et al., 2025; Alvandi et al., 2025; Su et al., 2024; Alvandi and Ardestani, 2023). بدین منظور تکنیک‌های مختلفی با توانمندی‌های متفاوت برای پردازش و تفسیر داده‌های گرانی در دهه‌های اخیر ایجاد و توسعه یافته است (Cooper and Cowan, 2006; Eldosouky and

(HT) و تکنیک دامنه سیگنال تحلیلی (ASA) به عنوان فیلتر سیگنال تحلیلی متعادل‌شده ($ASAB$) معرفی نمود. فیلتر سیگنال تحلیلی متعادل‌شده به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$ASAB = \frac{ASA}{\alpha + \sqrt{(HT_x(ASA))^2 + (HT_y(ASA))^2 + (ASA)^2}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، HT_x و HT_y تبدیلات هیلبرت در جهت x و y و α یک عدد ثابت مثبت (بزرگتر از صفر و کمتر از ۱۰) به منظور کنترل کیفیت فیلتر است. انتخاب مقدار α بستگی به نظر مفسر دارد هرچند بهترین مقدار برای α با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته مقدار یک می‌باشد (Alvandi and Ardestani, 2023; Cooper, 2009). اگرچه در فیلتر سیگنال تحلیلی متعادل‌شده ماکزیمم دامنه بر روی لبه‌های واقعی قرار می‌گیرد، اما در ترسیم مرزهای افقی ساختارهای پیچیده با چشمه‌های دارای عمق‌های کم و زیاد از کیفیت مناسبی برخوردار نیست (Alvandi and Ardestani, 2023). به منظور رفع مشکلات فیلترهای تعیین لبه (فاز محلی و غیره) در سال‌های اخیر فیلترهای مختلفی به منظور تعیین موقعیت افقی دانه‌های میدان پتانسیل (گرانی و مغناطیس) با توانایی و دقت بیشتر معرفی و توسعه یافته است. به عنوان مثال می‌توانیم به فیلتر تابع لجستیک، فیلتر تابع سیگموئید، فیلتر تابع گومپرتز، فیلتر تابع گودرمان، فیلتر تابع الیوت و... اشاره نماییم (Pham et al., 2018; Pham et al., 2019; Pham et al., 2020; Melouah and Pham, 2021; Oksum et al., 2021; Eldosouky et al., 2022; Prasad et al., 2022). توابع مورد استفاده در این فیلترها با الهام از فیلترهای فاز محلی به صورت مستقیم از توابع مثلثاتی ($\tanh$ یا $\arctan$) استفاده نموده و یا از توابع فعالساز ($\text{activation function}$) که ساختاری شبیه و نزدیک به تابع آرک‌تانژانت و یا تانژانت هایپربولیک دارند، برای تولید فیلتر استفاده می‌نمایند (Alvandi and Ardestani, 2023).

در سال (۲۰۱۸)، Pham و همکاران از تابع لجستیک (logistic function) و دامنه سیگنال تحلیلی برای تعیین لبه‌های بی‌هنجاری میدان پتانسیل استفاده کردند. فیلتر تعیین لبه تابع لجستیک دامنه سیگنال تحلیلی (LK) به صورت زیر تعریف می‌شود (Pham et al., 2018):

$$LK = \frac{1}{P + \exp^{-T}} \quad (3)$$

که تابع T در رابطه (۳) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$T = \frac{\frac{\partial ASA}{\partial Z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial ASA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial ASA}{\partial y}\right)^2}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $\frac{\partial ASA}{\partial Z}$ مشتق قائم سیگنال تحلیلی، دامنه مشتق افقی دامنه سیگنال تحلیلی و در رابطه (۳)، P یک پارامتر مثبت بین ۰ و ۱ است که توسط مفسر انتخاب می‌گردد. Pham و همکاران، (۲۰۱۸) از مقدار ۰/۱ برای پارامتر P استفاده نمودند.

در این فیلتر، ماکزیمم دامنه بر روی لبه‌های بی‌هنجاری قرار گرفته و فیلتر قادر است به طور همزمان لبه بی‌هنجاری‌های عمیق و کم‌عمق را

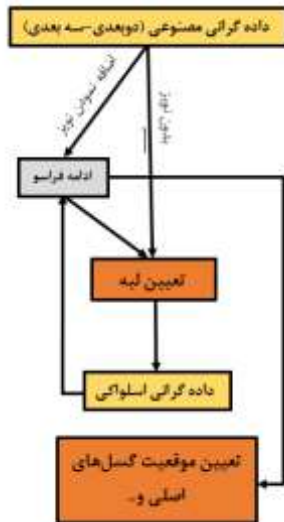
Mohamed, 2021; Pham, 2021; Deniz Toktay, 2022; Alvandi et al., 2024; Ai et al., 2024). فیلترهای ترسیم لبه (تعیین موقعیت افقی) یکی از ابزارهای مهم و اساسی برای تفسیر بهتر و دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های گرانی محسوب می‌گردند (Everett, 2013; Alvandi et al., 2023). اکثر فیلترهای تشخیص لبه از مشتقات جهتی (افقی و یا قائم) و یا ترکیبی از دو مشتق افقی و قائم با درجات مختلف همراه با تابع آرک‌تانژانت، آرک کسینوس، تانژانت هایپربولیک و... برای تعیین مرزهای افقی چشمه‌های گرانی استفاده می‌کنند. اگرچه با توجه به ضعف این فیلترها در تعیین موقعیت افقی ساختارهای زمین‌شناسی عمیق و یا ساختارهای پیچیده و حساسیت به نوفه به دلیل استفاده از مشتقات جهتی در روابط اصلی آن‌ها، در سال‌های اخیر توسعه و معرفی فیلترهای جدیدتر با قابلیت بیشتر در تعیین لبه چشمه‌های عمیق و افزایش تفکیک‌پذیری (resolution) در نقشه‌های خروجی از اهمیت بیشتری برخوردار گردیده است (الوندی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Deniz Toktay et al., 2026).

۲- فیلترهای تعیین لبه

فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی (ASA) که توسط Nabighian (۱۹۷۲) و (۱۹۸۴) با استفاده از ترکیب مشتقات عمودی و افقی دانه‌های میدان پتانسیل پیشنهاد شده است، رایج‌ترین و محبوب‌ترین فیلتر تشخیص لبه در تفسیر دانه‌های گرانی‌سنجی است. در سال ۱۹۸۴، Nabighian استفاده از روش دامنه سیگنال تحلیلی را ابتدا برای تفسیر دانه‌های میدان پتانسیل دوبعدی پیشنهاد نمود. سپس Roest و همکاران (۱۹۹۲) رابطه دامنه سیگنال تحلیلی میدان پتانسیل محاسبه‌شده در یک صفحه افقی را به سه‌بعدی تعمیم دادند و نشان دادند که سیگنال تحلیلی سه‌بعدی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

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

در معادله (۱)، G میدان گرانی، $\frac{\partial G}{\partial x}$ مشتق میدان گرانی در جهت x ، $\frac{\partial G}{\partial y}$ مشتق میدان گرانی در جهت y و $\frac{\partial G}{\partial z}$ مشتق میدان گرانی در جهت z است (Florio et al., 2006). در این فیلتر، مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی مستقیماً بر روی چشمه بی‌هنجار قرار نمی‌گیرد و لذا موقعیت مرزهای افقی به طور نادرست ترسیم می‌گردد (Salem et al., 2002). همچنین فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی قادر به تعیین مرزهای افقی چشمه‌های مختلف با دامنه ضعیف و قوی به طور همزمان نیست (Prasad et al., 2022). به منظور کاهش و غلبه بر مشکلات و نواقص فیلتر سیگنال تحلیلی (فیلتر گرادیان کل) در تعیین لبه بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل، فیلترهای فاز محلی (local phase) یا فیلترهای نرمالایز شده معرفی و توسعه پیدا نمودند. به عنوان مثال فیلتر معروف زاویه تیل (tilt angle)، نقشه تتا (theta map) و... را می‌توان نام برد. هرچند این فیلترها نیز دارای معایب عمده‌ای مانند ترسیم لبه‌های جعلی در نقشه‌های خروجی، تفکیک‌پذیری نامناسب، عدم ترسیم مرز افقی چشمه‌های باریک و... هستند (Ai et al., 2025; Deniz Toktay et al., 2025). از اینرو در سال (۲۰۰۹)، Cooper به منظور حل این مشکلات یک فیلتر جدید با استفاده از تبدیلات هیلبرت متعامد

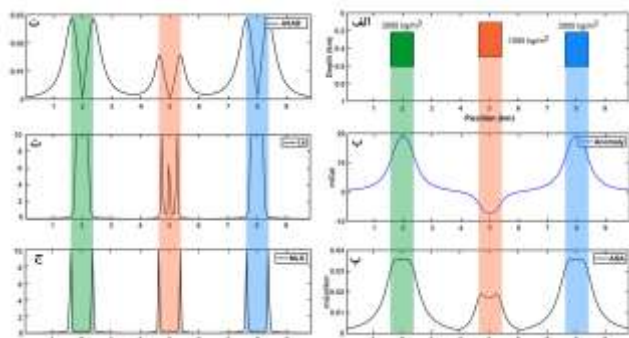


شکل ۱: روندنمای استفاده از روش‌های تعیین لobe

۴- داده دوبعدی

در این قسمت یک مدل دوبعدی گرانی مصنوعی شامل سه منشور مدفون با ویژگی‌های متفاوت و در اعماق مختلف تولید شده است. ویژگی‌های تخصیص داده‌شده به هر چشمه در شکل ۲-الف نشان داده شده است. بی-هنجاری گرانی مدل مصنوعی بر حسب میلی‌گال در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. پاسخ فیلترهای تعیین لobe در شکل‌های ۲-پ تا ۲-ج ترسیم شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از دو فیلتر ASA و ASAB می‌توان مشخص نمود که این دو تکنیک به عمق حساس هستند. در ادامه نتایج ترسیم شده با روش LK نیز بیانگر ضعف تکنیک در تعیین لobe چشمه-های مدفون و ترسیم لobe اضافی و جعلی بین چشمه‌ها است. در نهایت باتوجه به نتایج ترسیم شده با استفاده از تکنیک تابع لجستیک اصلاح‌شده، به خوبی مشخص است که روش MLK موقعیت افقی چشمه‌های مصنوعی را بدون ترسیم لobe‌های اضافی تعیین نموده است.



شکل ۲: پاسخ تکنیک‌های مختلف بر روی یک مدل دوبعدی گرانی؛ (الف) نمایش شماتیک چشمه‌های مصنوعی با عمق و چگالی‌های متفاوت، (ب) بی‌هنجاری گرانی بر روی سه چشمه مصنوعی گرانی بر حسب میلی‌گال، (پ) فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی، (ت) فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی، (ج) فیلتر متعادل شده، (ث) فیلتر تابع لجستیک دامنه سیگنال تحلیلی، (د) فیلتر تابع لجستیک اصلاح‌شده

بدون اضافه نمودن لobe‌های جعلی و اضافی و با کیفیت مناسب ترسیم نماید (Pham et al., 2018).

۳- فیلتر پیشنهادی

در این مقاله، یک فیلتر آشکارساز لobe مبتنی بر ترکیب تابع لجستیک و تبدیلات هیلبرت متعامد برای ترسیم لobe‌های بی‌هنجاری گرانی پیشنهاد و معرفی شده است. فیلتر تابع لجستیک اصلاح‌شده (MLK) با استفاده از معادله (۵) تعریف می‌گردد:

$$MLK = \frac{1}{0.01 + \exp\left(\frac{\frac{\partial MTH}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial MTH}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial MTH}{\partial y}\right)^2}}\right)} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، MTH با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$MTH = \frac{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}{1 + \sqrt{\left(\mathcal{HT}_x\left(\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}\right)\right)^2 + \left(\mathcal{HT}_y\left(\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}} \quad (6)$$

در رابطه (۵)، $\frac{\partial MTH}{\partial z}$ مشتق قائم MTH و $\sqrt{\left(\frac{\partial MTH}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial MTH}{\partial y}\right)^2}$ دامنه مشتق افقی تابع MTH است. در این روش بر خلاف دو فیلتر سیگنال تحلیلی متعادل‌شده و تابع لجستیک، مفسر بدون استفاده از عدد یا پارامتری مانند P یا α از فیلتر برای تفسیر استفاده خواهد نمود.

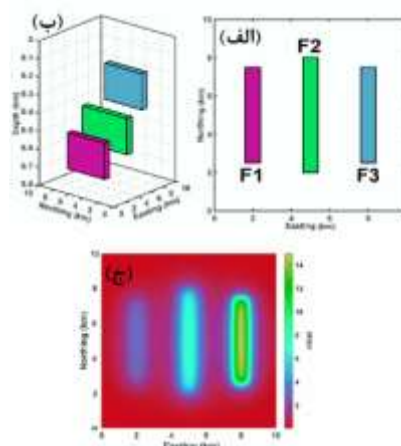
در این پژوهش از مدل‌های مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی برای ارزیابی توانمندی فیلتر پیشنهادی و سایر روش‌های تعیین لobe استفاده شده است. با استفاده از داده‌های گرانی مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه نتایج حاصل از فیلتر پیشنهادی MLK با نتایج فیلترهای تعیین لobe ASAB، LK و ASA مقایسه شده است. همچنین از داده‌های گرانی باکیفیت کشور اسلوواکی به منظور ارزیابی و بررسی توانمندی فیلترهای تعیین لobe استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق مقایسه فیلتر MLK با فیلترهای تعیین لobe استاندارد (ASA، LK و ASAB) در ترسیم مرز افقی ساختارهای مدفون است. روندنمای استفاده از فیلترهای تعیین لobe با استفاده از داده‌های مصنوعی و میدانی در شکل (۱) ترسیم شده است.

۵- داده سه‌بعدی

در ادامه به منظور بررسی توانایی فیلتر MLK و سایر روش‌های تعیین لبه، از یک داده گرانی مصنوعی سه‌بعدی همراه با نوفه و عاری از نوفه استفاده شده است. در این مدل مصنوعی از سه چشمه مدفون با پارامترهای متفاوت فیزیکی که ویژگی‌های این چشمه‌ها در جدول (۱) ارائه گردیده، استفاده شده است. نمایش دوبعدی و سه‌بعدی مدل گرانی مصنوعی در شکل ۳-الف و ۳-ب به ترتیب نمایش داده شده است. بی-هنجاری گرانی تولید شده بر حسب میلی‌گال در شکل ۳-ج ارائه شده است. بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی در یک شبکه منظم 10×10 کیلومتر در جهت شمال به جنوب و شرق به غرب با فاصله نمونه‌برداری 0.1 کیلومتر در برنامه متلب (MATLAB) محاسبه و تولید شده است.

جدول ۱: پارامترهای چگالی و هندسی مدل گرانی مصنوعی

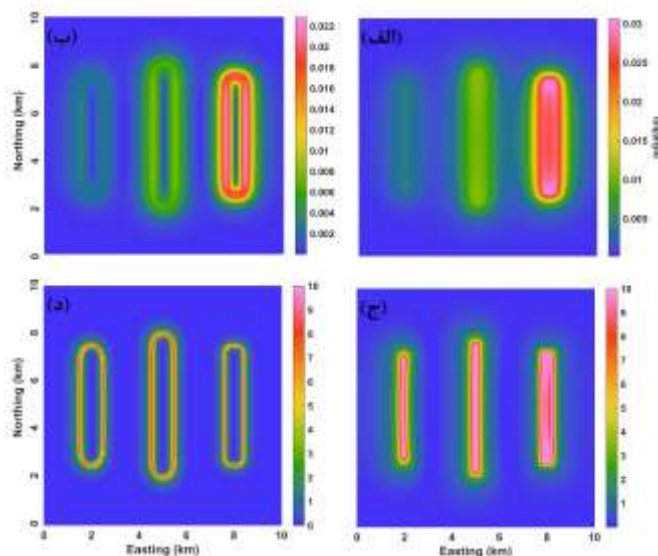
پارامترها/برچسب منشور	F3	F2	F1
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰
طول (متر)	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۵۰۰۰
عرض (متر)	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
عمق بالا (متر)	۲۰۰	۴۰۰	۵۰۰
ضخامت (متر)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰



شکل ۳: (الف) نمایش دوبعدی مدل گرانی مصنوعی؛ (ب) نمایش سه‌بعدی مدل گرانی مصنوعی؛ (ج) میدان گرانی مصنوعی تولید شده با استفاده از سه چشمه مدفون با عمق و تباین چگالی متفاوت بر حسب mGal

نتایج تعیین لبه مدل مصنوعی با فیلترهای مختلف در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج تعیین لبه با فیلتر سیگنال تحلیلی (ASA) در شکل ۴-الف ترسیم شده است. همانطور که مشخص است، فیلتر سیگنال تحلیلی کلاسیک قادر به ترسیم لبه چشمه‌های عمیق (F1 و F2) نمی‌باشد. در شکل ۴-ب، نتایج به دست آمده با فیلتر سیگنال تحلیلی متعادل‌شده (ASAB) ترسیم شده است. اگرچه در مقایسه با فیلتر سیگنال تحلیلی، موقعیت چشمه کم‌عمق بهتر ترسیم گردیده اما همچنان در تعیین لبه چشمه‌های عمیق‌تر از توانایی و دقت کافی برخوردار نبوده و لبه چشمه‌ها به صورت هاله‌ای ترسیم گردیده است. در ادامه نتایج ترسیم لبه با استفاده از روش تابع لجستیک سیگنال تحلیلی (LK) در شکل ۴-ج ترسیم شده است. همانطور که انتظار داشتیم، مانند نتایج حاصل از مدل مصنوعی دوبعدی، این فیلتر قادر به متعادل کردن

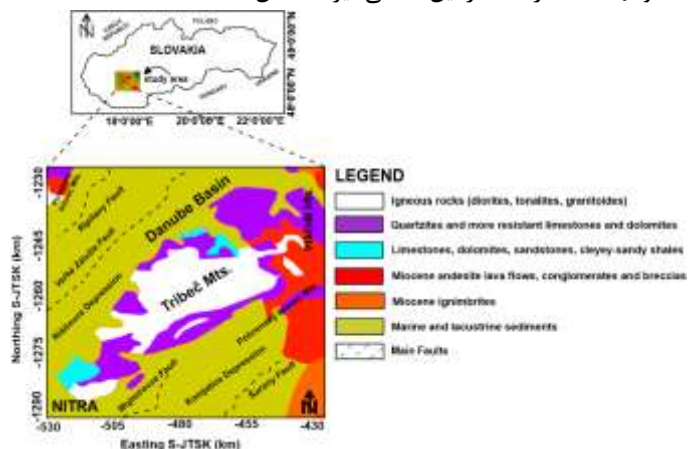
دامنه حاصل از چشمه‌های مختلف با عمق‌های متفاوت به طور همزمان است. هرچند مرز افقی چشمه‌ها به طور دقیق و واضح مشخص نگردیده و ماکزیمم دامنه به صورت یک خط پهن ترسیم گردیده است. در شکل ۴-د روش پیشنهادی تابع لجستیک اصلاح شده (MLK) به خوبی لبه چشمه‌های مدفون را نمایش داده است. در مقایسه با سه روش تعیین لبه ASA، ASAB و LK این فیلتر قادر است با وضوح بیشتر لبه‌های چشمه مدل مصنوعی را ترسیم و به طور همزمان موقعیت افقی بی-هنجاری‌های گرانی را تعیین نماید.



شکل ۴: پاسخ فیلترهای تعیین لبه بر روی مدل گرانی مصنوعی تولید شده از سه چشمه مدفون با عمق و پارامترهای متفاوت؛ (الف) سیگنال تحلیلی، (ب) سیگنال تحلیلی متعادل‌شده، (ج) تابع لجستیک سیگنال تحلیلی، (د) تابع لجستیک اصلاح‌شده

در ادامه، به منظور نزدیک نمودن شرایط مدل مصنوعی به شرایط دنیای واقعی، به داده‌های گرانی سه‌بعدی، ۳ درصد نوفه تصادفی اضافه شده است. شکل ۵-الف مدل گرانی مصنوعی آلوده به نوفه تصادفی نمایش داده شده است. به منظور کاهش تأثیر نوفه بر نتایج تعیین لبه، قبل از استفاده از فیلترهای تعیین لبه (سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی متعادل‌شده، تابع لجستیک سیگنال تحلیلی و تابع لجستیک اصلاح‌شده) از فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۵۰ متر استفاده شده است (شکل ۵-ب). به منظور کاهش اثر نویزهای فرکانس بالا و بهبود وضوح، از روش ادامه فراسو (Upward Continuation) به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر جهت پیش‌پردازش داده‌ها استفاده می‌شود. نتایج تعیین لبه با استفاده از فیلترهای تعیین لبه بر روی داده‌های مصنوعی سه‌بعدی آلوده به نوفه، در شکل (۶) نمایش داده شده است.

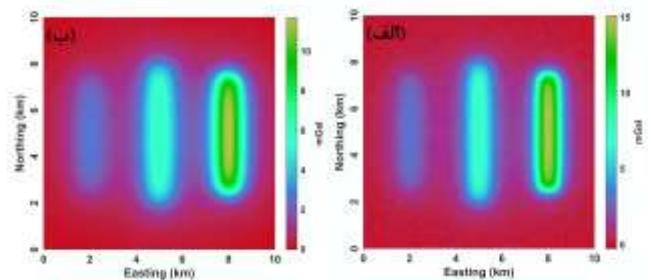
کارپاتیانز (Carpathians) کشور اسلواکی به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفته است. کشور اسلواکی در محدوده زمین‌شناختی کارپاتیانز غربی که عموماً نتیجه کوهزایی آلپ می‌باشد، واقع شده است (Hók et al. 2001). در شکل (۷)، نقشه ساده زمین‌شناسی بخشی از منطقه کارپاتیانز غربی (کوهستان تریپچ، گسل‌های اصلی و...)، حوضه دانوب و محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است. منطقه مورد مطالعه عمدتاً از سنگ‌های آذرین و رسوبی تشکیل شده که پوشش رسوبی شامل ماسه‌سنگ‌های مختلف، شیل، آهک، دولومیت و کوارتز می‌باشد (Štašková and Minár, 2016). موقعیت چهار گسل اصلی محدوده مورد مطالعه شامل Mojmirovce, Ripňany, Veľké Zálužie و Šurany در نقشه زمین‌شناسی نیز مشخص شده است.



شکل ۷: نقشه ساده زمین‌شناسی، گسل‌های اصلی و موقعیت محدوده مورد مطالعه (Štašková and Minár, 2016)

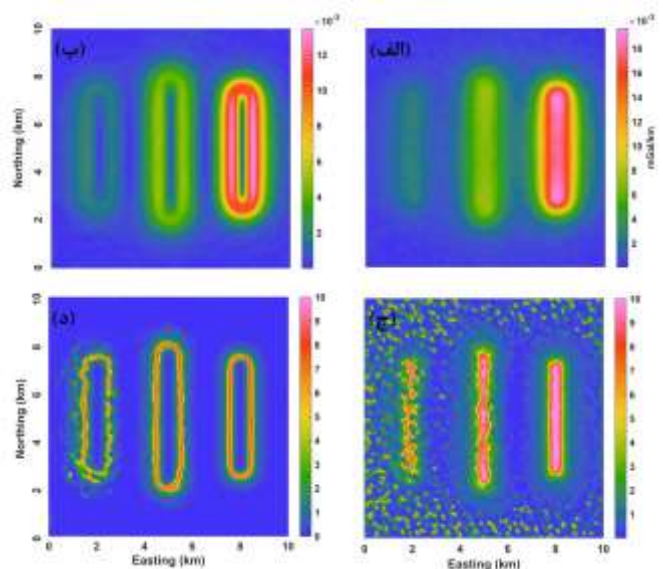
بی‌هنجاری گرانی بوگه کشور اسلواکی تقریباً از ۳۲۰۰۰۰ نقطه برداشت ایجاد شده است. شبکه بی‌هنجاری گرانی برداشت شده در کشور اسلواکی (به جز ناحیه غیرقابل دسترس) در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (به ازای هر کیلومتر مربع ۳ تا ۶ نقطه برداشت) تهیه گردیده است. مجموعه داده گرانی بوگه کامل و نقشه و اطلاعات زمین‌شناسی این کشور توسط موسسه دولتی زمین‌شناسی براتیسلاوا به صورت رایگان و برخط در اختیار پژوهشگران سراسر دنیا قرار گرفته است (Zahorec et al. 2017). مجموعه داده گرانی‌سنجی کشور اسلواکی از کیفیت بسیار قابل قبولی برخوردار است و می‌تواند با اطمینان در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و مطالعات ژئودزی توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گیرد (Zahorec et al. 2017). منطقه مورد مطالعه با وسعتی در حدود ۷۰۰۰ کیلومترمربع در محدوده UTM زون N۳۳ واقع شده است که بازه مختصات آن از ۴۳۰۰۰۰ تا ۵۳۰۰۰۰ متر (شرقی) و ۱۲۳۰۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰۰۰ متر (شمالی) گسترده شده است.

نقشه بی‌هنجاری گرانی میدانی بر حسب میلی‌گال به همراه موقعیت گسل‌های اصلی واقع در محدوده مورد مطالعه در شکل ۸-الف ترسیم شده است. به منظور کاهش تأثیر نوفه بر روی داده‌های میدانی، از فیلتر ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰۰ متر استفاده شده است (شکل ۸-ب). با



شکل ۵: الف) بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی آلوده به نوفه تصادفی، ب) نقشه ادامه فراسو به منظور کاهش تأثیر نوفه

نتایج تعیین لبه با فیلتر سیگنال تحلیلی در شکل ۶-الف ترسیم شده است. همانطور که مشخص است مجدد فیلتر سیگنال تحلیلی تحت تأثیر دامنه بی‌هنجاری‌های کم‌عمق بوده و قادر به ترسیم لبه چشمه‌های عمیق‌تر نمی‌باشد. در ادامه در شکل ۶-ب نتایج ترسیم لبه با استفاده از تکنیک سیگنال تحلیلی متعادل شده نمایش داده شده است. این فیلتر نیز مانند فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی کلاسیک قادر به ترسیم همزمان لبه همه چشمه‌های مدفون نمی‌باشد و عملاً از برتری خاصی در این مدل مصنوعی نسبت به تکنیک کلاسیک برخوردار نیست. در شکل ۶-ج و ۶-د نتایج تعیین لبه با دو فیلتر تابع لجستیک و تابع لجستیک اصلاح شده بر روی داده‌های مصنوعی آلوده به نوفه به ترتیب نمایش داده شده است. نتایج حاصل از دو فیلتر مذکور، بیانگر کیفیت و دقت بیشتر فیلتر تابع لجستیک اصلاح شده در تعیین موقعیت افقی چشمه‌های گرانی حتی در شرایط نوفه‌ای است.



شکل ۶: پاسخ فیلترهای تعیین لبه بر روی مدل گرانی مصنوعی آلوده به نوفه؛ الف) سیگنال تحلیلی، ب) سیگنال تحلیلی متعادل شده، ج) تابع لجستیک سیگنال تحلیلی، د) تابع لجستیک اصلاح شده

۵- داده میدانی

در این بخش، توانایی فیلترهای تعیین لبه با استفاده از داده‌های گرانی واقعی برداشت شده از کوه‌های تریپچ (Tribeč)، واقع در غرب کوهستان

لبه با روش تابع لجستیک اصلاح شده ترسیم گردیده است. همانطور که انتظار داشتیم، لبه‌های تعیین شده از توافق خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی و همچنین سایر پژوهش‌های صورت گرفته (Deniz Toktay et al., 2025) برخوردار است. همچنین لبه‌های ترسیم گردیده با روش تابع لجستیک اصلاح شده از تفکیک‌پذیری بسیار مناسبی برخوردار است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش‌های مختلف تعیین لبه، شامل دامنه سیگنال تحلیلی (ASA)، دامنه سیگنال تحلیلی متعادل شده (ASAB)، تابع لجستیک دامنه سیگنال تحلیلی (LK) و تابع لجستیک اصلاح‌شده (MLK) با استفاده از داده‌های مصنوعی دوبعدی متعلق به سه منشور قائم و داده‌های سه‌بعدی بدون نوفه و آلوده به نوفه و همچنین داده‌های بی‌هنجاری گرانی بوگه کامل کشور اسلوواکی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. لبه‌های ترسیم شده با سه روش سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی متعادل شده و تابع لجستیک از کیفیت و وضوح لازم در نقشه‌های خروجی برخوردار نیست. به همین منظور روش تابع لجستیک اصلاح شده به عنوان یک فیلتر جدید و توانمند برای نخستین بار در این پژوهش معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده با این تکنیک، بیانگر کیفیت مناسب روش پیشنهادی در تعیین لبه بی‌هنجاری‌های گرانی با تفکیک‌پذیری مناسب و عاری از لبه‌های جعلی و اضافی در نتایج خروجی است. ضمن اینکه این فیلتر قادر است به طور همزمان دامنه حاصل از چشمه‌های مختلف با چگالی و عمق‌های متفاوت را ترسیم نماید. لذا با اطمینان می‌توان از این تکنیک در تفسیر کیفی چشمه‌های مدفون و بررسی ساختارهای زمین‌شناسی و... استفاده نمود.

۷- منابع

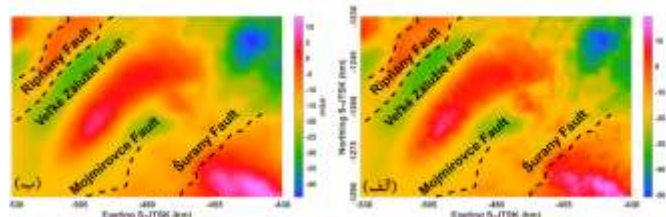
ابراهیم‌زاده اردستانی، سید وحید، (۱۳۸۹)، گرانی‌سنجی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران.
الوندی، ا؛ توک‌تای، ه، د؛ فام، ل، ث. (۱۴۰۰)، تفسیر داده‌های گرانی با استفاده از تابع لجستیک و گرادینان افقی کل، مطالعه موردی: تاق‌دیس چارک، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۷ (۴)، ۴۰۱-۴۱۲.

Hinze WJ, von Frese RRB, Saad AH. Gravity and magnetic Exploration—Principles, Practices, and Applications. 1st ed. Cambridge University Press; (2013). 525 p.

Ai, H., Huang, Q., Ekinici, Y. L., Alvandi, A., & Narayan, S. (2025). Robust edge detection for structural mapping beneath the Aristarchus Plateau on the Moon using gravity data. Earth and Space Science, 12, e2025EA004379. <https://doi.org/10.1029/2025EA004379>.

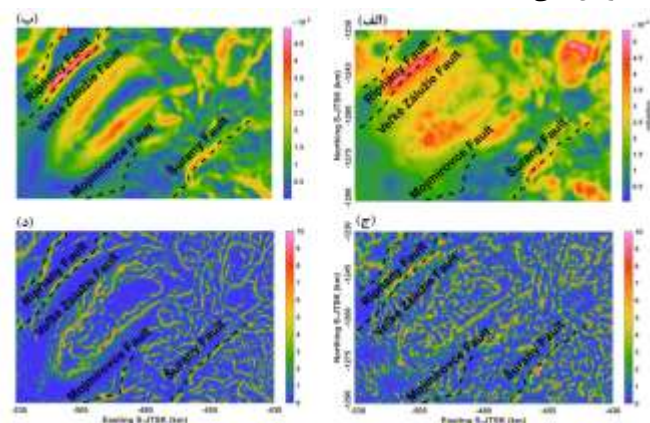
Ai, H., Ekinici Y.L., Alvandi A., Deniz Toktay H., Balkaya Ç. and Roy A. (2024). Detecting edges of geologic sources from gravity or magnetic anomalies through a novel algorithm based on hyperbolic tangent function, Turkish Journal of

استفاده از روش ادامه به سمت بالا، داده‌ها قبل از مشتق‌گیری (برای لبه‌یابی) نرم (smooth) می‌شوند تا نویز در خروجی نهایی به صورت لبه‌های کاذب و جعلی ظاهر نگردد.



شکل ۸: الف) بی‌هنجاری گرانی میدانی به همراه موقعیت گسل‌های اصلی واقع در محدوده مورد مطالعه، ب) نقشه ادامه فراسو به منظور کاهش تاثیر نوفه

نتایج تعیین لبه داده گرانی میدانی با فیلترهای مختلف شامل، سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی متعادل شده، تابع لجستیک سیگنال تحلیلی و تابع لجستیک اصلاح‌شده در شکل (۹) نمایش داده شده است. نتایج تعیین لبه با فیلتر سیگنال تحلیلی در شکل ۹-الف ترسیم شده است. این نقشه توسط بی‌هنجاری‌های کوه‌های تریبچ که ممکن است توسط ساختارهای کم‌عمق ایجاد شده باشند احاطه گردیده که باعث می‌شود موقعیت افقی سایر چشمه‌های مدفون به خوبی ترسیم نگردد. شکل ۹-ب نتایج ترسیم شده با فیلتر دامنه سیگنال تحلیلی متعادل شده را نمایش داده است. اگرچه موقعیت چشمه‌های مدفون با روش سیگنال افقی متعادل شده در مقایسه با سیگنال تحلیلی کلاسیک بهتر ترسیم گردیده، اما همچنان قادر به تعیین موقعیت افقی چشمه‌های مختلف به طور همزمان نمی‌باشد.



شکل ۹: پاسخ فیلترهای تعیین لبه بر روی مدل میدانی پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو در شکل ۷-ب؛ الف) سیگنال تحلیلی، ب) سیگنال تحلیلی متعادل شده، ج) تابع لجستیک سیگنال تحلیلی، د) تابع لجستیک اصلاح‌شده

در ادامه نتایج تعیین لبه با روش تابع لجستیک سیگنال تحلیلی در شکل ۹-ج نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است مرزهای افقی چشمه‌های کم عمق و عمیق با تفکیک‌پذیری مناسب ترسیم گردیده اما لبه‌های چشمه‌های مدفون به صورت پراکنده و منفصل ترسیم گردیده است. ضمن اینکه در برخی موارد لبه‌های اضافی و جعلی نیز مانند نتایج ترسیم گردیده در مدل دوبعدی مشاهده می‌گردد. شکل ۹-د نتایج تعیین

- in gravity and magnetic data. *Eur. Phys. J. Plus*, 141:398. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-026-07646-0>.
- Everett, M.E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Eldosouky, A.M.; Mohamed, H. Edge detection of aeromagnetic data as effective tools for structural imaging at Shilman area, South Eastern Desert, Egypt. *Arab. J. Geosci.* 2021, 14, 1–10.
- Eldosouky A. M., L. T. Pham, A. Henaish. (2022). High precision structural mapping using edge filters of potential field and remote sensing data: a case study from Wadi Umm Ghalqa area, South Eastern Desert, Egypt, *Egypt J Remote Sens Space Sci*, 25, 2, 501–513.
- Florio, G., Fedi, M., and Pasteka, R., (2006), On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics*, 71(6), L87–L93.
- Hók, J., Kahan, Š. & Aubrecht, R., (2001): *Geológia Slovenska*. Bratislava, Univerzita Komenského, 1 – 47. (In Slovak.).
- Melouah. O., and Pham, L.T. Improved ILTHG method for edge enhancement of geological structures: application to gravity data from the Oued Righ valley, *J. Afr. Earth Sci.*, 177 (2021), Article 104162
- Nabighian, M. N., (1972), The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section – Its properties and use of automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nabighian, M. N., (1984), Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms – Fundamental relations. *Geophysics*, 49, 780-786.
- Oksum E, Le DV, Vu MD, Nguyen THT, Pham LT. (2021). A novel approach based on the fast sigmoid function for interpretation of potential field data. *Bull Geophys Oceanogr.* 62(3):543–556.
- Prasad, K.N.D., Pham, L.T., Singh, A.P., (2022). Structural mapping of potential field sources using BHG filter. *Geocarto International*, 37, 1-22, DOI: 10.1080/10106049.2022.2048903.
- Pham, L.T., Oksum, E., Do, T. D., Le-Huy, M., (2018). New method for edges detection of magnetic sources using logistic function. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(6), 127-135.
- Earth Sciences, 33 (6). <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1936>.
- Ai, H., Alvandi, A., Ghanati, R., Pham, L., Alarifi, S., Nasui, D. and Eldosouky, A., (2023), Modified non-local means: A novel denoising approach to process gravity field data. *Open Geosciences*, 15(1), <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0551>.
- Alvandi, A., Su, K., Ai, H., Ardestani, V.E., and Lyu, C., (2023), Enhancement of Potential Field Source Boundaries Using the Hyperbolic Domain (Gudermannian Function). *Minerals*, 13, 1312. <https://doi.org/10.3390/min13101312>.
- Alvandi, A., and Ardestani, V.E., (2023), Edge detection of potential field anomalies using the Gompertz function as a high-resolution edge enhancement filter. *Bull. Geophys. Oceanogr*, 64, 279–300. <https://doi.org/10.4430/bgo00420>.
- Alvandi, A., Ardestani, V. E., & Motavalli Anbaran, S. H. (2025). Enhancement of the total horizontal gradient of potential field data using the Modified Gudermannian Function (MGTHG): application to aeromagnetic data from Georgia, USA. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 66(1), 73-94. <http://dx.doi.org/10.4430/bgo00479>.
- Alvandi, A., Ardestani, V. E., & Motavalli Anbaran, S. H. (2024). Novel Detectors Based on the Elliott Function for Mapping Potential Field Data: Application to Aeromagnetic Data from Indiana, United States. *Annals of Geophysics*, 67(6), GP656. <https://doi.org/10.4401/ag-9146>.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., (2006), Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32(10), 1585–1591.
- Cooper, G.R.J., Cowan, D.R., (2009). Terracing potential field data. *Geophysical Prospecting*, 57, 1067–1071.
- Deniz Toktay, H., (2022), *Modeling of Archaeomagnetic Anomaly Maps*, Springer, Singapore, <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4219-8>.
- Deniz Toktay, H., Ai, H., Alvandi, A., Su, K., & Li, J. (2025). MTAHG and MTBHG: Modified approaches for interpreting gravity data. *Earth and Space Science*, 12, e2024EA003900. <https://doi.org/10.1029/2024EA003900>.
- Deniz Toktay, H., Alvandi, A., Ai, H. (2026). A bi-hyperbolic tilt method for robust edge detection

- Pham, L.T., Oksum, E. & Do, T.D. Edge enhancement of potential field data using the logistic function and the total horizontal gradient. *Acta Geod Geophys* 54, 143–155 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00248-6>
- Pham, L.T., Van Vu, T., Le Thi, S. et al. Enhancement of Potential Field Source Boundaries Using an Improved Logistic Filter. *Pure Appl. Geophys.* 177, 5237–5249 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02542-9>
- 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 Science*, 178(104), 190.
- Roest, W. R., J. Verhoef, and M. Pilkington, (1992), magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T.J., and Ushijima, K. (2002). Analytic signal approach and its applicability in environmental investigations. *Appl. Geophys.*, 49, 231–244.
- Su, K., Ai, H., Alvandi, A., Lyu, C., Wei, X., Qin, Z., Tu, Y., Yan, Y. & Nie, T. (2024). Hunger Games Search for the elucidation of gravity anomalies with application to geothermal energy investigations and volcanic activity studies. *Open Geosciences*, 16(1), 20220641. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0641>
- Staškovanová, Veronika and Minár, Jozef. "Modelling the geomorphic history of the Tribeč Mountains and the Pohronský Inovec Mountains (Western Carpathians) with the CHILD model" *Open Geosciences*, vol. 8, no. 1, (2016), pp. 371-389. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0038>.
- Zahorec P., Pašteka R., Mikuška J., Szalaiová V., Papčo J., Kušnirák D., Pánisová J., Krajňák M., Vajda P., Bielik M., Marušiak I., (2017): Chapter 7 – National Gravimetric Database of the Slovak Republic. In: Pašteka R., Mikuška J., Meurers B. (Eds.): *Understanding the Bouguer Anomaly: A Gravimetry Puzzle*. Elsevier, Amsterdam, 113–125, doi: 10.1016/B978-0-12-812913-5.00006-3.