

تعیین مرز توده‌های معدنی با استفاده از فیلتر انحنای تانسور گرادیان‌های گرانی

سحر معظم^۱، حمید آقاجانی^{۲*} محمد رضایی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده معدن، ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۷، پذیرش: تیر ۱۳۹۸)

چکیده

سنگ‌های سربانتینی شده فوق بازی محلی برای تمرکز کانی با ارزش کرومیت است. وجود اختلاف چگالی قابل ملاحظه این کانه با سنگ‌های میزبان، سبب شده تا از روش گرانی‌سنجی برای شناسایی محدوده‌های کانی‌زایی کرومیت استفاده شود و براساس آن مناسب‌ترین محل برای حفر گمانه‌های اکتشافی تعیین شود. تعیین حدود توده‌های معدنی کرومیت به طور معمول با استفاده از فیلترهای فاز محلی و تشخیص لبه انجام می‌شود. فیلتر زاویه تمایل یکی از فیلترهای آشکارساز لبه است که می‌تواند مرز ساختارهای زیرسطحی را به شکل کمی تعیین نماید. فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی نیز برای شناسایی کمی مرز ساختارهای زیرسطحی توسعه داده شده است. در این مقاله از این دو فیلتر برای شناسایی مرز توده‌های زیرسطحی از روی آنومالی‌های گرانی حاصل از مدل مصنوعی و نیز داده‌های واقعی گرانی برداشتی از روی مناطق کرومیت دار استفاده شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی مرز توده‌ها و ساختارهای زیرسطحی را با دقت بیشتری تفکیک و بارز می‌کند. به کارگیری فیلترهای زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان گرانی بر روی داده‌های گرانی بوگه محدوده کرومیت‌دار در ایالت کاماگئی کشور کوبا توانست مرز کانی‌زایی کرومیت را مشخص نماید. با توجه نتایج مطالعات زمین‌شناسی و اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی در این محدوده می‌توان گفت استفاده از فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی دقت بالایی در شناسایی مرز توده‌ها داشته است. با توجه به اینکه داده‌های گرانی این محدوده دارای آنومالی مشخصی بود، لذا از داده‌های گرانی کانسار کرومیت شرق سبزوار که به نسبت پیچیده‌تر است، نیز استفاده شد. نتایج به کارگیری این فیلتر روی داده‌های این محدوده اکتشافی نیز جواب‌های قابل قبولی را ارائه داده است. بنابراین از این فیلتر می‌توان در شناسایی ساختارهای زیرسطحی در داده‌های میدان پتانسیل استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها

کرومیت، گرانی‌سنجی، تانسور، آشکارسازی لبه، زاویه تمایل، کاماگئی

*عهده‌دار مکاتبات: haghajani@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

تحقیقی دیگر مرز ساختارهای زمین‌شناسی جنوب آلب را با استفاده از تانسور گرادیان‌های گرانی تعیین شده است [۱۰]. روشی برای بررسی پدیده‌های خطی با استفاده از مقادیر ویژه ماتریس هسین (Hessian) گرادیان‌های افقی گرانی مشاهده‌ای یا محاسبه‌ای از داده‌های مغناطیس ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دو تا از مقادیر ویژه این ماتریس دارای بیش‌ترین انحنای مثبت و منفی هستند، مقدار ویژه دارای انحنای مثبت می‌تواند برای بررسی پدیده‌های خطی استفاده شود و مقدار ویژه دارای انحنای منفی در تخمین عمق منابع ایجاد بی‌هنجاری مفید است [۱۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد جهت امتداد اجسام شبه دویعدی می‌تواند با استفاده از بردار ویژه مرتبط با کم‌ترین مقدار ویژه ماتریس تانسور گرادیان گرانی تخمین زده شود [۱۲]. فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی^۲ برای شناسایی ساختارهای زیر سطحی به کار گرفته شده است [۱۳]. با استفاده از این فیلتر نیز می‌توان مرز ساختارهای زیرسطحی را به صورت کمی مشخص نمود، بدین صورت که مقدار ویژه ماتریس انحنای گرادیان بر روی مرز ساختارها برابر صفر است. پژوهش‌ها نشان داده مقدار ویژه کوچک برای تعیین مرز توده‌هایی با اختلاف چگالی مثبت به کار می‌رود و مقدار ویژه بزرگ برای شناسایی مرز توده‌هایی با اختلاف چگالی منفی به کار می‌رود. در همین راستا با تغییر رابطه محاسبه مقدار ویژه کوچک، می‌توان مرز توده‌هایی با اختلاف چگالی مثبت و منفی را به طور کمی و همزمان تعیین نمود [۱۴]. همچنین به منظور شناسایی لبه براساس مقادیر ویژه ماتریس گرادیان گرانی فیلتری ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان مرز توده‌های زیرسطحی عامل بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی گرانی را آشکار نمود. البته با استفاده از این روش می‌توان مرز ساختارهای زیرسطحی را به شکل کیفی شناسایی نمود. از فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی بیشتر برای شناسایی مرز ساختارهای زمین‌شناسی بزرگ مقیاس استفاده شده است [۱۵]. از طرفی چون تکنولوژی ساخت دستگاه‌های گرادایومتر در همه کشورها وجود ندارد و به دلیل قیمت بالا در دسترس همگان نیست. از این رو، در سال‌های اخیر روش‌های محاسباتی برای به دست آوردن مولفه‌های تانسور گرادیان گرانی توسعه یافته‌اند [۱۶].

در این مقاله، از فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی بر روی داده‌های رایج میدان قائم گرانی به منظور شناسایی

کانی کرومیت به دلایل اقتصادی و دارا بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص به عنوان یک فلز استراتژیک در صنایع متالورژی برای تولید فروکروم و فروسیلیکوکروم در ساخت فولاد ضد زنگ و فولاد آلیاژی و چدن، دیرگذاها و شیمیایی استفاده می‌شود. کاربرد وسیع این ماده علاوه بر صنعت فولاد، سبب شده که اکتشاف ذخایر معدنی کرومیت از اولویت‌های اصلی اکتشاف مواد معدنی باشد. بنابراین استفاده از روش‌های مختلف اکتشافی برای شناسایی این ماده معدنی سبب شناخت بهتر آن شده و هزینه عملیاتی و اجرایی استخراج را کاهش خواهد داد [۱].

از آن‌جا که کانی کرومیت اختلاف چگالی قابل ملاحظه‌ای با سنگ‌های میزبان دارد، می‌توان از روش گرانی‌سنجی جهت اکتشاف این کانسارها بهره گرفت. یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از گرانی‌سنجی در اکتشاف کانسارهای کرومیت شناسایی محدوده و تعیین محل توده‌های کرومیت برای انجام حفاری اکتشافی است [۲]. با استفاده از روش‌های شناسایی لبه که به صورت فیلتر بر روی داده‌های گرانی اعمال می‌شوند، می‌توان محل تغییرات جانبی چگالی سنگ‌ها و مرز ساختارهای زمین‌شناسی، از جمله توده‌های کرومیت در یک منطقه را مشخص نمود. تا کنون روش‌های متعددی برای شناسایی لبه ارائه شده است [۳-۸].

در میان فیلترهای مختلف شناسایی لبه، فیلتر زاویه تمایل (Tilt angle) فیلتری است که کاربرد زیادی در شناسایی ساختارهای زیرسطحی دارد [۸]. به کمک این فیلتر می‌توان مرز ساختارهای زیر سطحی را به صورت کمی مشخص نمود، بدین ترتیب که مقدار زاویه تمایل بر روی مرز ساختارها برابر صفر است [۴]. در سال‌های اخیر دستگاه‌های گرادایومتر این امکان را فراهم کرده‌است که همه مولفه‌های تانسور گرادیان گرانی^۱ (GGT) را بتوان اندازه‌گیری کرد. بنابراین روش‌های زیادی برای به نقشه درآوردن ویژگی‌های ساختاری با استفاده از داده‌های تانسورگرادیان میدان پتانسیل توسعه یافته‌اند. برای مثال، تانسورهای افقی گرادیان گرانی برای مشخص کردن مرز واحدهای زمین‌شناسی به کار گرفته شده‌اند [۹]. در

نمود. ماتریس انحنای گرادیان میدان گرانی (CGGT) به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\Gamma = \text{CGGT} = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{yx} & g_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن g_{xx} ، g_{xy} و g_{yy} بردارهای گرادیان‌های افقی هستند و با استفاده از دستگاه‌های گرادیومتر اندازه‌گیری می‌شوند. در بیشتر وقت‌ها این داده‌ها در دسترس نمی‌باشند، که در این صورت برای به دست آوردن این بردارها با استفاده از داده‌های قائم میدان گرانی (g_z) می‌توان از فیلتر رابطه (۳) استفاده کرد [۱۶]:

$$\Gamma_{ij} = F^{-1} \{ [K(k)] G_z(k) \} \quad (3)$$

که در آن F^{-1} نماد تبدیل فوریه معکوس می‌باشد و $G_z(k)$ تبدیل فوریه میدان گرانی قائم است که در آن بیانگر عدد موج است و

$$[K(k)] = \begin{bmatrix} \frac{-k_x^2}{|k|} & \frac{-k_x k_y}{|k|} \\ \frac{-k_x k_y}{|k|} & \frac{-k_y^2}{|k|} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن $|k| = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2} \neq 0$ معمولاً در گرانی‌سنجی بی‌هنجاری ایجاد شده با اختلاف چگالی توده عامل بی‌هنجاری با سنگ‌های در برگیرنده، هم علامت است؛ برای بردارهای گرادیان افقی g_{xx} و g_{yy} این مسئله صادق نیست، بنابراین این دو بردار معمولاً در عدد منفی یک ضرب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. به هر حال، با چرخش محورها در جهت بردارهای ویژه ماتریس تانسور گرادیان گرانی می‌توان نوشت:

$$\Gamma x = \Lambda x \quad (5)$$

که در آن $x \neq 0$ ماتریسی است که ستون‌های آن بردارهای ویژه ماتریس Γ و Λ ماتریس مقادیر ویژه است [۲۰]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

رابطه (۵) را می‌توان به صورت رابطه (۷) بازنویسی کرد [۲۰]:

$$(\Gamma - \Lambda)x = 0 \quad (7)$$

برای برقراری رابطه (۷)، باید ماتریس $\Gamma - \Lambda$ تکین باشد یعنی دترمینان آن برابر با صفر باشد:

مرز توده‌های معدنی نظیر عدسی‌های کرومیت استفاده شده است. به این منظور ابتدا، مولفه‌های تانسور گرادیان گرانی در این مقاله، از فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی بر روی داده‌های رایج میدان قائم گرانی به منظور شناسایی مرز توده‌های معدنی نظیر عدسی‌های کرومیت استفاده شده است. به این منظور ابتدا، مولفه‌های تانسور گرادیان گرانی مورد نیاز، با به کارگیری روش‌های محاسباتی و با استفاده از داده‌های میدان قائم گرانی محاسبه شده است. سپس فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی و فیلتر زاویه تمایل بر روی داده‌های مصنوعی اعمال شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. سپس این الگوریتم بر روی داده‌های گرانی کانسار کرومیت ایالت کاماگئی کوبا و داده‌های گرانی منطقه شرق سبزوار نیز اعمال شد و مرز توده‌های زیرسطحی کرومیت در این مناطق تعیین و با نتایج حاصل از حفاری و زمین‌شناسی مقایسه و اعتبارسنجی شده است.

۲- روش کار

۲-۱- فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی

تانسور گرادیان‌های گرانی (GGT)، تانسور مرتبه دوم تشکیل شده از مشتق‌های دوم میدان پتانسیل گرانی در فضا و در سیستم مختصات کارتزین هستند؛ که می‌توان آنها را به صورت رابطه (۱) نوشت [۱۰]:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن U پتانسیل گرانشی است. خارج از منبع تولید بی‌هنجاری گرانی، U در معادله لاپلاس صدق می‌کند، یعنی $\nabla^2 U(r) = 0$. همچنین ماتریس تانسور گرادیان‌های گرانی است و چون G یک ماتریس متقارن است، تنها شامل پنج مولفه مستقل است. جزئیات بیشتر در مورد گرادیان‌های گرانی در منابع مورد اشاره آورده شده است [۱۷-۱۹].

به کمک ماتریس انحنای مقدار انحنای یک خط یا سطح را در یک نقطه بر روی آن خط یا سطح مشخص

۲-۲- فیلتر زاویه تمایل

فیلتر زاویه تمایل یا تیلت یکی از فیلترهای فاز محلی برای شناسایی لبه است. فیلترهای فاز محلی با تغییر فازی که در داده به وجود می‌آورند؛ لبه‌های ساختارهای زیرسطحی را به خوبی بارز می‌کنند؛ اما نوفه موجود در داده را نیز افزایش می‌دهند. فیلتر زاویه تمایل به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۴]:

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{g_{zz}}{\sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2}} \right) \quad (11)$$

که در آن g_{zz} مشتق قائم میدان گرانی قائم است. g_{zx} و g_{zy} مشتق‌های افقی میدان گرانی قائم هستند. فیلتر زاویه‌ی تمایل دامنه‌ی بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را نسبت به سطحی تقویت می‌کند. مقدار این زاویه زمانی که بالای منبع بی‌هنجار قرار می‌گیرد، مثبت بوده و زمانی که بالا یا نزدیک لبه‌های آن منبع قرار گیرد، صفر می‌شود و می‌تواند تا حدودی به طور کمی مرز ساختارهای زیرسطحی را مشخص نماید [۴].

۲-۳- اعمال فیلترها روی داده‌های مصنوعی

به منظور بررسی نحوه کاربرد فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی در تعیین و شناسایی بی‌هنجاری‌های گرانی و همچنین آشکارسازی مرز آنها و تفکیک لبه‌ها، از یک مدل مصنوعی استفاده شد. برای این کار، ابتدا کدهای لازم برای اعمال فیلترهای انحنای تانسور گرادیان گرانی و زاویه تمایل در نرم‌افزار MATLAB 2017b نوشته شد. سپس یک مدل مصنوعی طراحی شد که شامل چهار بلوک در ابعاد و در عمق‌های مختلف با چگالی‌های متفاوت است (شکل ۱). موقعیت، ابعاد و چگالی هر یک از بلوک‌های تشکیل دهنده مدل مصنوعی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\det(\Gamma - \Lambda I) = \begin{vmatrix} \frac{\partial g_x}{\partial x} - \lambda_1 & \frac{\partial g_x}{\partial y} \\ \frac{\partial g_y}{\partial x} & \frac{\partial g_y}{\partial y} - \lambda_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

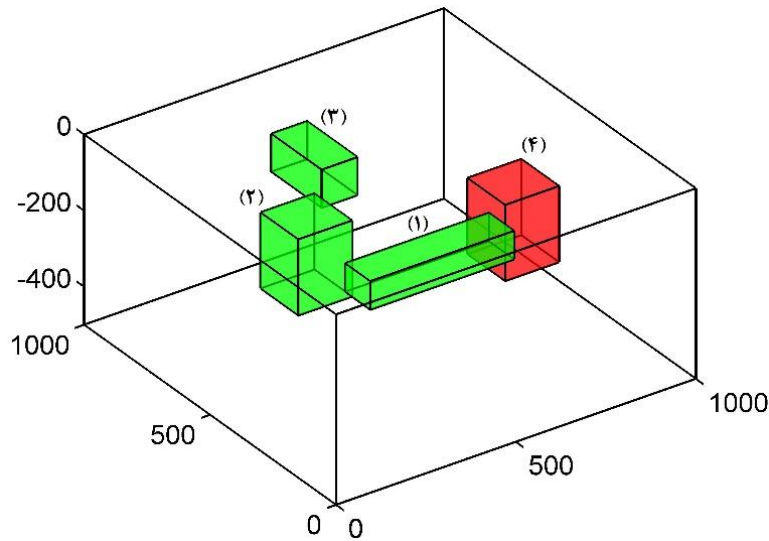
با حل نمودن معادله رابطه (۸)، مقادیر ویژه تانسور Γ که λ_1 و λ_2 هستند به صورت رابطه‌های (۹) و (۱۰) به دست می‌آید [۱۳]:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_x}{\partial x} + \frac{\partial g_y}{\partial y} + \sqrt{\left(\frac{\partial g_x}{\partial x} - \frac{\partial g_y}{\partial y} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial g_x}{\partial y} \right)^2} \right) \quad (9)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_x}{\partial x} + \frac{\partial g_y}{\partial y} - \sqrt{\left(\frac{\partial g_x}{\partial x} - \frac{\partial g_y}{\partial y} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial g_x}{\partial y} \right)^2} \right) \quad (10)$$

که λ_1 مقدار ویژه بزرگ و λ_2 مقدار ویژه کوچک است. به این وسیله با استفاده از مقادیر ویژه ماتریس انحنای گرادیان میدان گرانی می‌توان مرز توده‌های زیرسطحی را مشخص نمود [۱۳].

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد فیلتر λ_2 می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری مثبت گرانی ایجاد می‌کنند را تعیین نماید به گونه‌ای که مقدار λ_2 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است. از طرف دیگر فیلتر λ_1 قابلیت تعیین مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری منفی گرانی ایجاد می‌کنند را دارد، به گونه‌ای که مقدار λ_1 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است [۱۴]. کانی‌ها و توده‌های معدنی در مقایسه با سنگ‌های میزبان در دو گروه کم چگال و پرچگال قرار می‌گیرند و می‌توان براساس این دو فیلتر مرز توده‌ها را شناسایی کرد. کانی کرومیت یک از کانی‌هایی است که چگالی بالایی داشته و به طور معمول اختلاف چگالی آن با سنگ‌های دربرگیرنده مثبت است که این پدیده باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های مثبت گرانی می‌شود [۲]، بنابراین در اینجا فیلتر λ_2 برای شناسایی لبه توده‌های کرومیت به کار گرفته می‌شود.



شکل ۱: محل قرار گیری بلوک‌های مختلف مدل مصنوعی در زیر سطح زمین.

جدول ۱: موقعیت و چگالی هر یک از بلوک‌ها در مدل مصنوعی

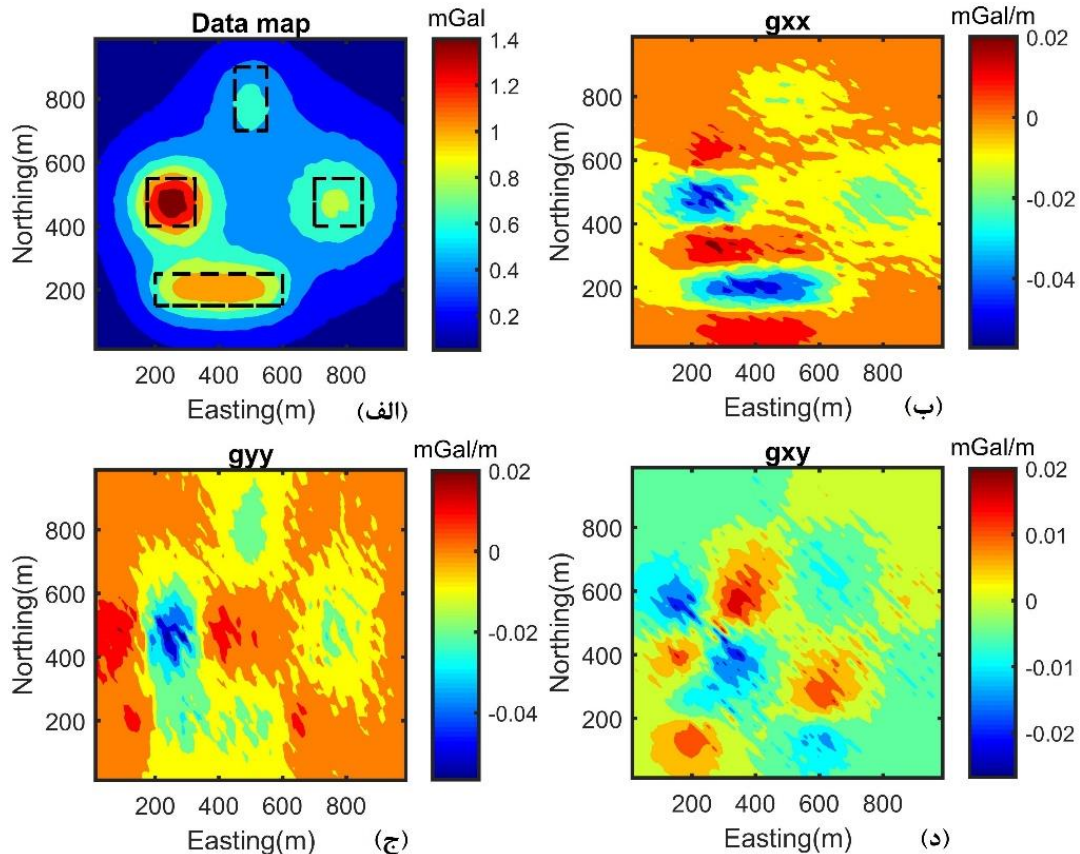
شماره مدل	ابعاد طول، عرض و ارتفاع بر حسب متر	عمق سطح بالایی توده بر حسب متر	اختلاف چگالی بین توده‌ها و محیط اطراف (g/cc)
(۱)	۴۰۰×۱۰۰×۷۵	-۵۰	۱
(۲)	۱۵۰×۱۵۰×۲۰۰	-۵۰	۱
(۳)	۱۰۰×۲۰۰×۱۰۰	-۱۰۰	۱
(۴)	۱۵۰×۱۵۰×۲۰۰	-۱۵۰	۱/۵

شده‌است. این بردارهای گرادیان افقی جدید در اعمال فیلتر λ_2 استفاده می‌شود.

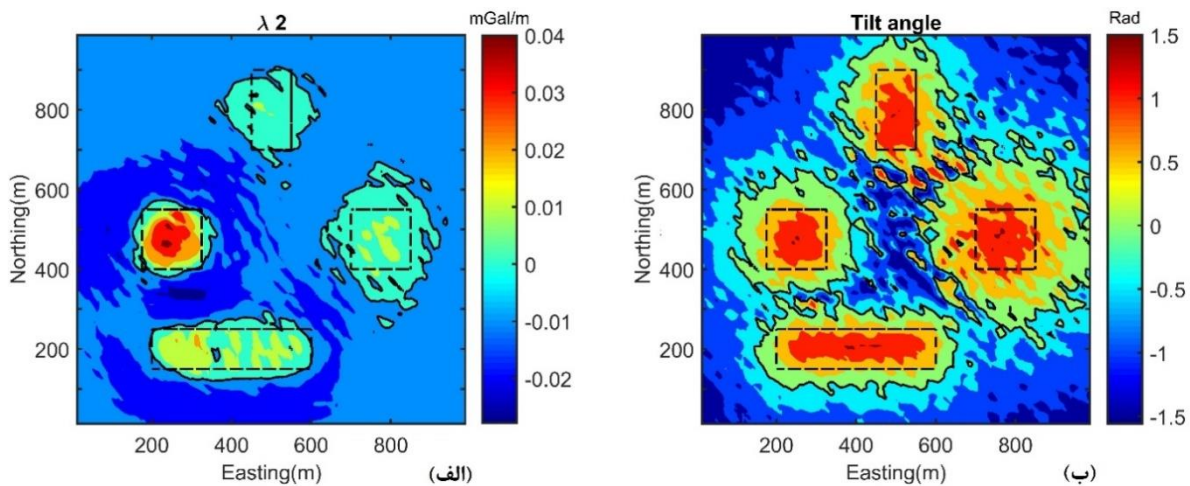
نتایج حاصل از اعمال فیلترهای λ_2 و زاویه تیلت بر روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق شکل، با توجه به مرز توده‌های زیر سطحی (که با خط چین نشان داده شده است) و خط تراز صفر (که با خط مشکی نشان داده شده است) روی نقشه نتیجه حاصل از اعمال فیلترها، می‌توان نتیجه گرفت که خط تراز صفر در فیلتر λ_2 محل قرارگیری توده‌های زیرسطحی را بهتر مشخص نموده و به مرز واقعی توده‌های زیر سطحی نزدیک‌تر است. از طرف دیگر به نظر می‌رسد حساسیت این فیلتر نسبت نوفه نسبت به فیلتر زاویه تیلت کمتر بوده و تصویر هموارتری ایجاد کرده است. بنابراین به نظر می‌رسد بهتر است از فیلتر λ_2 برای تعیین مرز دقیق-تر توده‌های معدنی استفاده شود.

داده‌های حاصل از این مدل مصنوعی با استفاده از روش مدلسازی پیشرو [۲۱] بر روی شبکه‌ای منظم با فواصل ۲۵ × ۲۵ متر و با گسترش ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ متر محاسبه شد. داده‌ها برای اختلاف چگالی مثبت محاسبه شده و به داده‌ها ۵ درصد نوفه تصادفی با توزیع گوسی اضافه شده است (شکل ۲-الف).

به منظور اعمال فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی ابتدا با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) بردارهای گرادیان افقی میدان گرانی محاسبه شدند. شکل‌های (۲-ب) تا (۲-ج) گرادیان‌های افقی محاسبه شده میدان قائم گرانی نمایش داده شده در شکل (۲-الف) را نشان می‌دهند. سپس برای هم علامت کردن بی‌هنجاری‌های گرانی بردارهای گرادیان افقی g_{xx} و g_{yy} با اختلاف چگالی مثبت سنگ‌ها، این بردارها در یک منفی یک ضرب



شکل ۲: نقشه داده‌های حاصل از مدل مصنوعی به همراه محل توده‌های زیر سطحی (الف). تانسورهای گرادیان افقی (ب)، (ج) و (د)



شکل ۳: نتایج حاصل از اعمال فیلتر λ_2 (الف) و نتایج حاصل از اعمال فیلتر تیلت (ب). بر روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی. خط تراز صفر با خط سیاه و مرز توده‌های زیرسطحی با خط چین سیاه نشان داده شده است

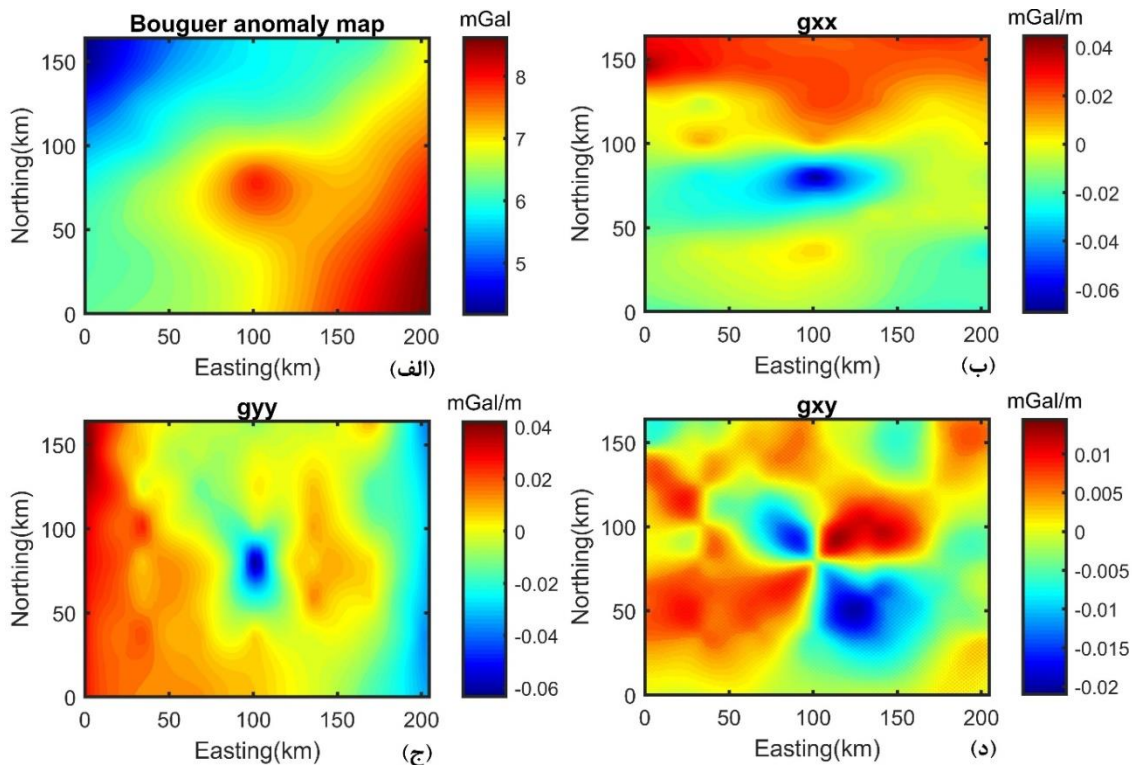
سنگ‌های فلدسپاتی شامل گابرو، تروکتولیت و آنورتوزیت است. این مجموعه سنگی به وسیله سنگ‌های آتشفشانی پوشانده شده است. توده‌های بزرگ‌تر کرومیتی درون سنگ‌های نفوذی پریدوتیت‌های سرپانتینی شده و دونیت‌ها تمرکز یافته‌اند و توده‌های کوچک‌تر آن درون سنگ‌های نفوذی با ترکیب گابرو قرار دارند که همه این سنگ‌ها به

۲-۴- تعیین مرز کانسار کرومیت ایالت کاماگئی کوبا با استفاده از فیلتر انحنای تانسور گرادیان‌های گرانی

در ایالت کاماگئی کشور کوبا، ناحیه‌ای وجود دارد که دارای مجموعه معادن کرومیت نوع آلپی (انبانه‌ای) است. واحدهای سنگی اصلی در این منطقه شامل بخش اساسی پریدوتیت‌های سرپانتینی و دونیت‌ها همراه با مقدار کمی

حفر شده است [۲ و ۲۳]. داده‌های گرانی مورد استفاده شده در این پژوهش، با رقومی کردن نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه کامل یکی از مناطق نه گانه این ناحیه تهیه شده است (شکل ۴- الف). مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد چگالی سنگ‌های حاوی کرومیت نسبت به سایر سنگ‌ها در منطقه مورد مطالعه بیشتر است که باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های مثبت گرانی در محدوده مورد مطالعه شده است. چون گسترش سطحی سنگ‌های فلدسپاتی بیشتر است، این سنگ‌ها باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای مثبت گرانی با فرکانس پایین در داده‌ها شده و عدسی‌های کرومیت به خاطر گسترش سطحی کمتر بی‌هنجاری‌های محلی مثبت گرانی با فرکانس پایین در داده‌های گرانی ایجاد می‌کنند [۲].

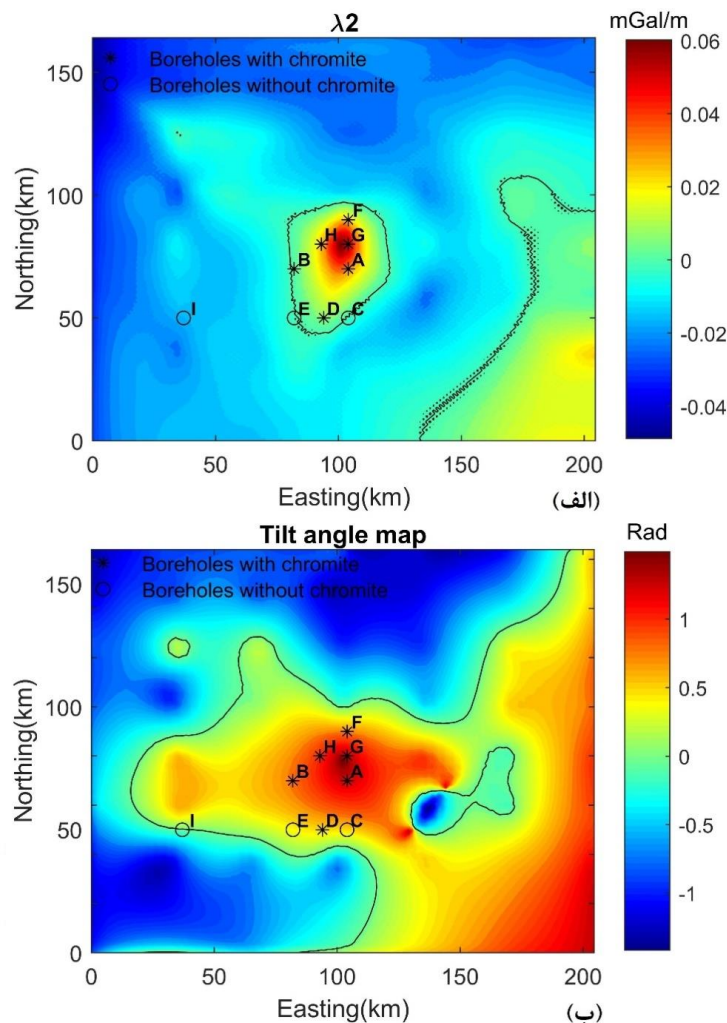
موازات سنگ‌های فلدسپاتی مثل آنوروزیت و یا آتشفشانی قرار گرفته‌اند. شکل توده‌های کرومیتی در این منطقه به صورت توده‌های عدسی شکل است [۲۲]. مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که محور بزرگ بیشتر عدسی‌های کرومیت در منطقه مورد مطالعه، به موازات نزدیک‌ترین مرز بین سنگ‌های پریدوتیت سرپانتینیتی شده و سنگ‌های فلدسپاتی و یا آتشفشانی قرار گرفته است [۲]. در نه منطقه از این ناحیه طی سال‌های ۱۹۵۴ تا ۱۹۵۶، حدود ۴۱۹۲۱ ایستگاه گرانی برداشت شده است که مساحتی در حدود ۳۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. سپس این داده‌ها پردازش شده و نقشه‌های بوگه کامل این منطقه به دست آمده است. در نهایت براساس نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و تجزیه و تحلیل داده‌های گرانی، گمانه‌های اکتشافی زیادی برای دسترسی به ماده معدنی



شکل ۴: نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه مورد مطالعه (الف). تانسورهای گرادیان افقی بی‌هنجاری بوگه (ب)، (ج) و (د)

داده شده در شکل (۴- الف) را نشان می‌دهند. سپس فیلترهای λ_2 و زاویه تیلت بر روی داده‌های منطقه مورد مطالعه اعمال شد که نتایج در شکل (۵) ارائه شده است.

به منظور اعمال فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی، ابتدا با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) بردارهای گرادیان افقی میدان گرانی محاسبه شدند. شکل‌های (۴- ب) تا (۴- ج) گرادیان‌های افقی محاسبه شده بی‌هنجاری بوگه نمایش



شکل ۵: نتایج حاصل از اعمال فیلتر λ_2 (الف) و نتایج حاصل از اعمال فیلتر زاویه تمایل (ب)، بر روی داده‌های گرانی یکی از معادن کرومیت ایالت کاماگنی کوبا (موقعیت گمانه‌های اکتشافی به صورت دواپر و ستاره‌ها و خط تراز صفر با خط سیاه نشان داده شده است).

کرومیت قرار گرفته‌اند. قرار گرفتن گمانه‌های C و E خارج از محدوده تعریف شده برای عدسی کرومیت و در نزدیکی مرز آن و قرار گرفتن گمانه D در درون این محدوده، نشان دهنده دقت مناسب فیلتر λ_2 در تعیین مرز عدسی کرومیت است. بی‌هنجاری دوم که گسترش سطحی بیشتری داشته ولی شدت بی‌هنجاری آن کمتر است، در جنوب شرق این منطقه قرار گرفته است. مرز این بی‌هنجاری دارای امتداد شمال شرقی- جنوب غربی است که موازی با قطر اصلی عدسی کرومیت است. بنابراین به نظر می‌رسد این بی‌هنجاری مرتبط با سنگ‌های فلدسپاتی در منطقه مورد مطالعه باشد.

نتایج حاصل از اعمال فیلتر زاویه تمایل (شکل ۵- ب) بر روی داده‌های گرانی بوگه محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که این فیلتر بر خلاف فیلتر λ_2 نتوانسته بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را تفکیک

نتایج حاصل از اعمال فیلتر λ_2 (شکل ۵- الف) نشان می‌دهد که دو بی‌هنجاری گرانی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد. اولین بی‌هنجاری در مرکز محدوده مورد مطالعه قرار گرفته و به شکل بیضی است که امتداد قطر اصلی آن شمال شرقی- جنوب غربی است. این بی‌هنجاری که وسعت محدودی دارد ناشی از عدسی کرومیت در این منطقه است. خط تراز صفر در نقشه حاصل از اعمال فیلتر λ_2 ، محدوده عدسی کرومیت را به خوبی مشخص نموده است. اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده، موید این موضوع است. در محدوده عدسی کرومیت که با خط تراز صفر فیلتر λ_2 مشخص شده است، تمام گمانه‌های موجود شامل گمانه‌های A, B, C, D, F, G, H به ماده معدنی برخورد کرده است در حالی که سایر گمانه‌های اکتشافی که به ماده معدنی برخورد نکرده است (گمانه‌های C, E, I) خارج از محدوده تعریف شده برای عدسی

تایید می‌کند. نتایج حاصل از اعمال فیلتر زاویه تمایل (شکل ۷-ب) بر روی داده‌های گرانی بوگه محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که این فیلتر بر خلاف فیلتر λ_2 نتواسته به شکل مناسبی بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را تفکیک نماید.

۳- نتیجه‌گیری

کانسنگ کرومیت به دلیل چگالی بالا نسبت به سنگ‌های میزبان سبب ایجاد اختلاف شتاب گرانی در مناطق معدنی کرومیتی می‌شود. مشخص نمودن حدود عدسی‌های کرومیت با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی از اهداف اصلی این روش است که با استفاده از فیلترهای آشکار کننده لبه یا فیلترهای فاز محلی انجام می‌شود. در این فیلترها از گرادیان‌های میدان گرانی استفاده می‌شود. فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی برای شناسایی کمی مرز ساختارهای زیرسطحی ارائه و توسعه داده شده است. در این فیلتر مقدار انحنای تانسور گرادیان گرانی بر روی مرز ساختارهای زیرسطحی صفر است. برای اعمال این فیلتر به گرادیان‌های افقی میدان گرانی نیاز است که با استفاده از روابط ریاضی محاسبه می‌شوند.

در این مقاله فیلتر زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان گرانی (λ_2) بر روی داده‌های گرانی حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های واقعی اعمال شده است. نتایج نشان داد که فیلتر λ_2 مرز توده‌ها و ساختارهای زیرسطحی را با دقت بیشتری مشخص می‌کند. به کارگیری فیلتر زاویه تمایل و فیلتر λ_2 بر روی آنومالی گرانی بوگه محدوده معدن کرومیت کاماگنی کشور کوبا سبب محدود کردن مرز عدسی‌های کرومیت شد. این نتیجه با نتایج مطالعات زمین‌شناسی و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده معدنی کاملاً تطابق دارد. می‌توان گفت که فیلتر λ_2 دقت خوبی در شناسایی مرز توده‌های کرومیت به صورت کمی داشته به طوری که بیش از ۹۰ درصد حفاریات به ماده معدنی برخورد کرده است. همچنین نتایج استفاده از این فیلترها بر روی داده‌های گرانی بوگه محدوده معدنی شرق سبزوار به خوبی مرز توده‌های کرومیت‌دار را شناسایی کرده به طوری که عمده حفاریات معدنی در محدوده مورد نظر واقع شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که فیلتر

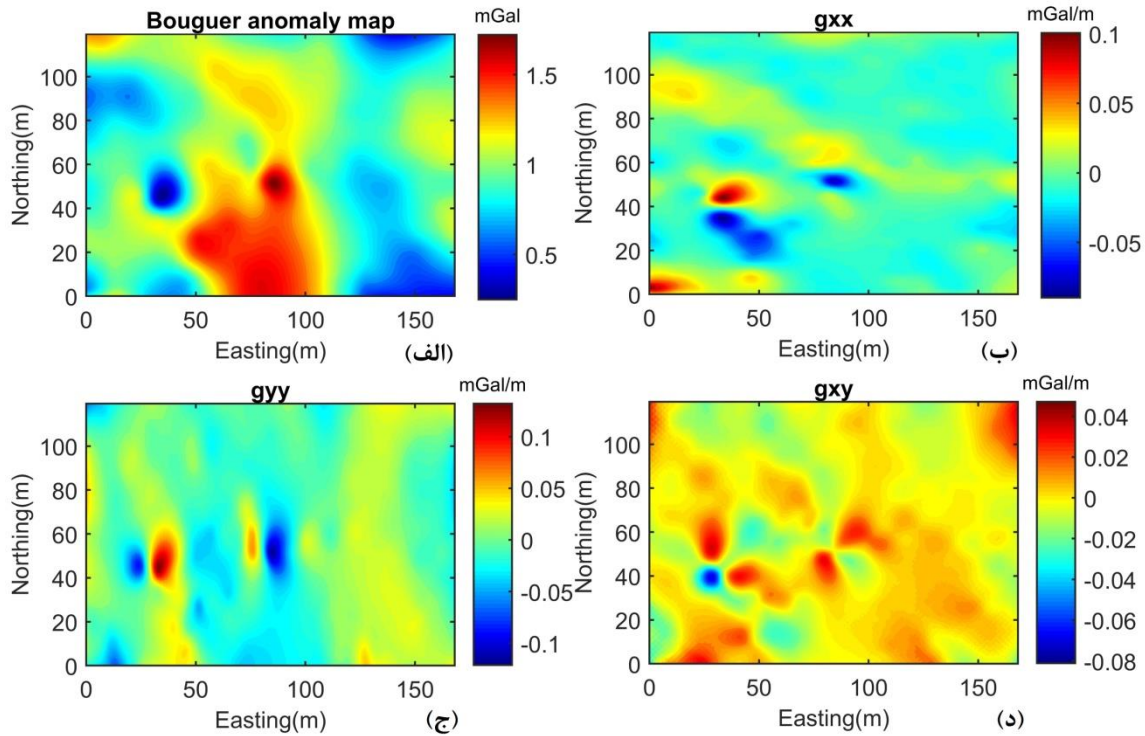
نماید و در تشخیص مرز عدسی کرومیت نیز خوب عمل نکرده است به طوری که گمانه‌های C و E داخل محدوده بی‌هنجار کرومیت در نظر گرفته شده است در حالی که این گمانه‌ها به ماده معدنی برخورد نکرده است.

۲-۵- تعیین مرز کانی‌زایی کرومیت در کانسار کرومیت شرق سبزوار

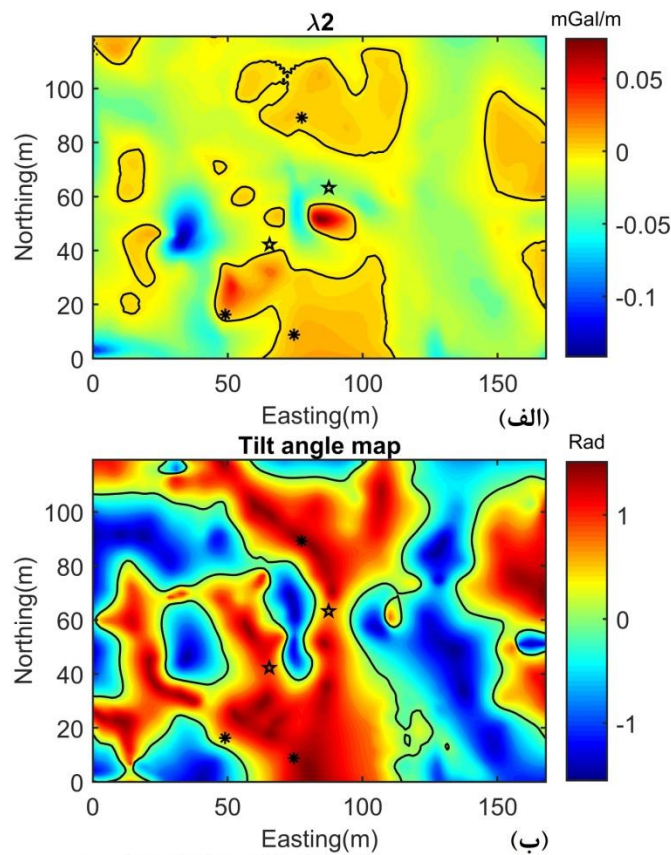
کانسار کرومیت مورد بررسی در شرق سبزوار در استان خراسان رضوی قرار گرفته است. برونزدهای سنگی محدوده، در برگیرنده سنگ‌های آذرین از جنس الترابازیک بوده که بیشتر به سرپانتین و کانی‌هایی نظیر تالک و ورمیکولیت تبدیل شده است که از مجموعه افیولیتی نوار شمال غرب-جنوب شرق سبزوار هستند. افیولیت زون سبزوار در شمار افیولیت‌های نوار حلقوی پیرامون خرد قاره مرکز و خاور ایران است. رویداد بازشدگی و زایشی اقیانوس باریک حاشیه خردقاره در دوره ژوراسیک رخ داده است و در روند مزوزوئیک این قاره یک چرخش خلاف حرکت عقربه‌های ساعت داشته است. در دوره کرتاسه حرکت ورقه عربستان به سوی شمال خاور به بسته شدن این اقیانوس منجر شده و افیولیت‌های کنار شمال خاور این خردقاره بر روی پوسته قاره‌ای جایگزین شده‌اند. در نوار افیولیتی محدوده مورد مطالعه، از فرومد تا انتهای کمر بند معادن کرومیتی متروکه و فعال زیادی یافت می‌شوند. ذخایر کرومیت در این محدوده از نوع آلپی هستند. پس از انجام تصحیحات لازم روی داده‌های گرانی برداشت شده از محدوده اکتشافی شرق سبزوار [۱]، نقشه آنومالی بوگه تهیه شده است (شکل ۶-الف).

برای اعمال فیلتر انحنای تانسور گرادیان گرانی، ابتدا بردارهای گرادیان افقی آنومالی گرانی محاسبه شدند (شکل‌های ۶-ب تا ۶-د). سپس فیلترهای λ_2 و زاویه تیلت بر روی داده‌های اکتشافی محدوده شرق سبزوار اعمال شد (شکل ۷). نتایج حاصل از اعمال فیلتر λ_2 (شکل ۷-الف) نشان می‌دهد که دوازده بی‌هنجاری گرانی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که احتمالاً مرتبط با کانی‌سازی کرومیت در این محدوده است. خط تراز صفر در این نقشه، محدوده عدسی‌های کرومیت را به خوبی مشخص نموده است. اطلاعات حاصل از حفاریات اکتشافی در محدوده مورد نظر و اطلاعات زمین‌شناسی این مسئله را

پتانسیل تعیین نماید. انحنای تانسور گرادبان گرانی به خوبی می‌تواند مرز توده-های زیرسطحی را در برداشتهای ژئوفیزیکی میدان



شکل ۶: نقشه بی‌هنجاری بوگه منطقه سبزواری (الف). تانسورهای گرادبان افقی بی‌هنجاری بوگه (ب)، (ج) و (د).



شکل ۷: نتایج حاصل از اعمال فیلتر λ_2 (الف) و نتایج حاصل از اعمال فیلتر زاویه تمایل (ب)، بر روی داده‌های گرانی کانسار کرومیت شرق سبزواری (حفریات معدنی به صورت ستاره‌های توپر و توخالی و خط تراز صفر با خط سیاه نشان داده شده است)

مراجع

edge detection and a method for overcoming it. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 237-242.

[15] Zuo, B., & Hu, X. (2015). Edge detection of gravity field using eigenvalue analysis of gravity gradient tensor. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 263-270.

[16] Mickus, K. L., & Hinojosa, J. H. (2001). The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique. *Journal of Applied Geophysics*, 46(3), 159-174.

[17] Alaia, R., Patella, D., & Mauriello, P. (2009). Imaging multipole gravity anomaly sources by 3D probability tomography. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(3), 298.

[18] Oruç, B., & Keskinsezer, A. (2008). Structural setting of the northeastern Biga Peninsula (Turkey) from tilt derivatives of gravity gradient tensors and magnitude of horizontal gravity components. *Pure and applied geophysics*, 165(9-10), 1913-1927.

[19] Pedersen, L. B., & Rasmussen, T. M. (1990). The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps. *Geophysics*, 55(12), 1558-1566.

[20] Boring, E. (1998). Visualization of tensor fields (Master's thesis, University of California, Santa Cruz).

[21] Blakely, R. J. (1996). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press.

[22] Flint, D. E., de Albear, J. F., & Guild, P. W. (1948). Geology and chromite deposits of the Camagüey district, Camagüey Province, Cuba. US Government Printing Office.

[23] Hammer, S., Nettleton, L. L., & Hastings, W. K. (1945). Gravimeter prospecting for chromite in Cuba. *Geophysics*, 10(1), 34-49.

1 Gravity gradient tensor (GGT)

2 Curvature gravity gradient tensor (CGGT)

[1] Aghajani, H. (2013). "Gravity surveying in Sabzevar for chromite exploration". Internal report. Shahrood University of technology (In Persian).

[2] Davis, W. E., Jackson, W. H., & Richter, D. H. (1957). Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey Province, Cuba. *Geophysics*, 22(4), 848-869.

[3] Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., & MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116-119.

[4] Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—A new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217.

[5] Wijns, C., Perez, C., & Kowalczyk, P. (2005). Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70(4), L39-L43.

[6] Cooper, G. R., & Cowan, D. R. (2008). Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics*, 73(3), H1-H4.

[7] Ma, G., & Li, L. (2012). Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative. *Computers & Geosciences*, 41, 83-87.

[8] Hidalgo-Gato, M. C., & Barbosa, V. C. (2015). Edge detection of potential-field sources using scale-space monogenic signal: Fundamental principles. *Geophysics*, 80(5), J27-J36.

[9] Murphy, C. A. (2004). The Air-FTG airborne gravity gradiometer system. *Airborne gravity*, 7-14.

[10] Fedi, M., Ferranti, L., Florio, G., Giori, I., & Italiano, F. (2005). Understanding the structural setting in the Southern Apennines (Italy): insight from Gravity Gradient Tensor. *Tectonophysics*, 397(1-2), 21-36.

[11] Hansen, R. O., & Deridder, E. (2006). Linear feature analysis for aeromagnetic data. *Geophysics*, 71(6), L61-L67.

[12] Beiki, M., & Pedersen, L. B. (2010). Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies. *Geophysics*, 75(6), I37-I49.

[13] Oruç, B., Sertçelik, I., Kafadar, Ö., & Selim, H. H. (2013). Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 105-113.

[14] Zhou, W., Du, X., & Li, J. (2013). The limitation of curvature gravity gradient tensor for