



مقایسه نتایج مدل‌سازی وارون سه‌بعدی با فیلترهای فاز محلی در پردازش داده‌های گرانی‌سنجی کانسار کرومیت سبزوار

وحید جعفرزاده^۱، علی نجاتی کلاته^{۲*}، حمید آقاجانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد ژئوفیزیک، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران
۲- استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران

(دریافت ۱۳۹۴/۰۴/۱۱، پذیرش ۱۳۹۴/۰۶/۲۳)

چکیده

هدف از این تحقیق، پردازش و تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوار، با استفاده از فیلترهای ژئوفیزیکی مانند روند سطحی، زاویه تمایل، زاویه تمایل هایپربولیک و مقایسه نتایج حاصل از این فیلترها با یکی از کارآمدترین روش‌های وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئوفیزیکی، به نام لی-اولدنبگ است. در این روش، روند مدل‌سازی مانند مسایل بهینه‌سازی است و هدف از آن پیدا کردن مدلی برای کمینه کردن تابع هدف و داده‌های آن است تا میزان معینی بر داده‌های برداشتی منطبق باشد. برای مقایسه هر فیلتر با نتایج مدل‌سازی، سعی شده است تا بهترین نمای مدل نهایی متناسب با آن فیلتر انتخاب شود. حاصل این مقایسه، هم‌خوانی قابل قبول فیلترهای استفاده شده در تعیین مرز آنومالی با مدل نهایی است. نتایج این تحقیق، نشان‌دهنده دو گسل با رخنمون سطحی در جنوب و مرکز و تغییرات واحدهای سنگی با امتداد شمالی-جنوبی در غرب محدوده است، همچنین تعدادی توده‌های پراکنده نزدیک به سطح زمین با عمق پایین کمتر از ۲۵ متر و یک آنومالی اصلی نسبتاً بزرگ در غرب محدوده وجود دارد که در سطح، رخنمون کم و گسترش جانبی مناسبی داشته و تا عمق حدود ۴۵ متری ادامه یافته است.

کلمات کلیدی

وارون‌سازی سه‌بعدی، تابع هدف مدل، گرانی‌سنجی، فیلترهای فاز محلی، روش لی و اولدنبگ، کرومیت سبزوار.

۱- مقدمه

جزییات کامل‌تری از شکل، کشیدگی عمقی و میزان گستردگی سطحی منشا، از یکی از موثرترین روش‌های مدلسازی وارون سه‌بعدی استفاده شده و در هر مرحله، هم‌خوانی فیلترهای یاد شده با مدل نهایی، بررسی و مقایسه شده است. واضح است که داشتن درک صحیحی از منبع، تاثیر مستقیم و بسزایی در تصمیم‌گیری‌های بعدی دارد که می‌تواند در مدیریت هزینه‌های کلان موثر واقع شود.

۲- روش‌شناسی تحقیق

۱-۲- روش روند سطحی

مقدار گرانی اندازه گرفته شده در هر نقطه، مجموع تمام اثرات ناشی از منابع زیر سطح را نشان می‌دهد. به ندرت یک پروفیل گرانی بر آمده از یک منبع منفرد است و غالباً ترکیبی از آثار منابع نزدیک به سطح، ساختارهایی در اعماق متوسط و نیز منابع ناحیه‌ای وسیع‌تر یا دورتر است، به عبارتی در هیچ محلی نمی‌توان بی‌هنجاری ناشی از یک منبع را اندازه گرفت مگر آنکه با آثار منابع دیگر پوشیده شده باشد. مجموع آثار ناشی از منابع سطحی و متوسط، تحت عنوان آنومالی باقی‌مانده شناخته می‌شود، در حالی که آثار ناشی از منابع عمیق و وسیع به نام بی‌هنجاری ناحیه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱۱].

روش‌های متفاوتی برای جدایش آنومالی‌های ناحیه‌ای و محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از انعطاف‌پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی است. در این روش میدان ناحیه‌ای به وسیله کمترین مربعات تقریب زده می‌شود که بسته به اهداف مورد مطالعه، با حذف این روند سطحی از داده‌ها، آنومالی‌های باقی‌مانده حاصل می‌شوند [۱۲، ۱۳].

۲-۲- فیلترهای فاز محلی

فیلتر زاویه تمایل یکی از فیلترهای فاز محلی است که مبتنی بر نسبت مشتقات میدان گرانی بوده و دامنه آنومالی‌های عمیق را نسبت به سطحی‌تر تقویت می‌کند. این فیلتر به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۴]:

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

در این رابطه، مشتق قائم اول بر روی منشا مقداری مثبت

کرومیت، ماده اولیه صنایع مهمی همچون فولاد، آلیاژهای غیرآهنی سخت، صنایع نسوز و ریخته‌گری است. چهار نوع کانسار کرومیت در جهان شناخته شده که دو نوع آن به صورت لایه‌ای و عدسی‌های معدنی و دو نوع دیگر آن، به صورت لاتریت و پلاسر هستند که نسبت به دو نوع اول، اهمیت کمتری دارند [۱]. تقریباً همه کانسارهای کرومیت ایران خاستگاه افیولیتی دارند. کمپلکس‌های افیولیتی ایران بخشی از کمربند افیولیتی تئیس است که در شرق به بقیه افیولیت‌های آسیا از قبیل پاکستان و در غرب به افیولیت‌های موجود در ناحیه مدیترانه از قبیل ترکیه و شرق اروپا وصل می‌شود [۲]. از نظر اکتشافی توجه به ژنز کانسار کرومیت و ارتباط آن با سنگ‌های درون‌گیر بسیار مهم است، زیرا ارتباط ژنتیکی کروم با سنگ‌های اولترابازیک، یکی از راه‌های مناسب برای پی‌جویی این ماده معدنی است. لازم است که تمرکز کاوش در مناطق مجاور یا تبدیل سری اولترابازیک به گابرو انجام شود. وجود گسل‌ها، پدیده سرپانتینی شدن در منطقه و رگه‌های منیزیت، در پاره‌ای موارد می‌تواند مهندس اکتشاف را به سمت وجود یک ناهمگنی مکانیکی در درون توده‌های اولترامافیک که می‌تواند کرومیت باشد، رهنمون سازد، همچنین دانستن پاراژنز کانی‌های ثانویه اطراف گسل‌ها نیز می‌تواند در ردیابی رگه‌های کرومیت موثر باشد.

با توجه به بالا بودن وزن مخصوص کانسنگ کرومیت نسبت به سنگ میزبان، گرانی‌سنجی روش ژئوفیزیکی متداولی در اکتشاف ذخایر کرومیت است [۳]. با استفاده از این روش، مناطق معدنی کرومیت بسیاری در کشورهای ترکیه، آلبانی و یوگسلاوی تعیین و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [۴]. هامر و همکاران [۵] و دیویس و همکاران [۶] در کوبا، ارگین [۷] و یونگل [۸] در ترکیه، کامکار روحانی [۹]، آقاجانی [۳] و آزاد و همکاران [۱۰] در ایران، با استفاده از پردازش داده‌های گرانی‌سنجی، توانستند بی‌هنجاری‌های کرومیتی مختلفی را شناسایی کنند.

به منظور بررسی مشخصات بی‌هنجاری‌های گرانی، نیاز به پردازش و تفسیر نقشه بی‌هنجاری بوگه کامل حاصل از داده‌های برداشتی با استفاده از فیلترهای متداول ژئوفیزیک است. در این تحقیق، از فیلتر روند سطحی برای تعیین بی‌هنجاری‌های محلی و از فیلترهای زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک برای تعیین مرز و بارز نمودن خطوارگی و شکستگی‌ها استفاده شده است. در نهایت برای رسیدن به

همواری^۲ مدل بدست آمده را در سه جهت اندازه‌گیری می‌کند. ضرایب a_x, a_y, a_z و وزن‌دهی قسمت‌های مختلف باعث بازسازی مدل‌هایی می‌شود که به مدل مرجع^۳ نزدیک یا در یک راستای خاص هموارتر باشد. توابع وزنی وابسته فضایی w_x, w_y, w_z برای وزن‌دهی اهمیت یک پارامتر مدل نسبت به دیگری است.

شکل ماتریسی رابطه ۳، به صورت رابطه (۴) است:

$$\Phi_m = \|w_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (4)$$

که در آن w_m ، یک ماتریس وزنی با ابعاد $M \times M$ است که تمام توابع مشتق و وزن‌دهی‌های تابع هدف مدل، درون آن جای می‌گیرند و $\|\dots\|$ نرم l_2 است. برای اندازه‌گیری میزان انطباق داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های مشاهده‌ای، یک تابع عدم برازش داده^۴ به صورت رابطه ۵ طراحی شده است:

$$\Phi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{obs} - d_i^{pre}}{\epsilon_i} \right)^2 \quad (5)$$

و شکل ماتریسی آن به شکل رابطه ۶ است:

$$\Phi_d = \|w_d(d - d^{pre})\|^2 \quad (6)$$

مشاهده d_i^{pre} ، آامین داده پیش‌بینی شده به وسیله مدل و ϵ_i بیانگر انحراف معیار آامین داده است. رابطه ۷، تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل عدم برازش داده‌ها (Φ_d) ، تابع هدف مدل (Φ_m) و ضریب منظم‌سازی μ است، کمینه شدن این تابع هدف منجر به تولید مدل مطلوب می‌شود [۱۶]:

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m \quad (7)$$

برای کاهش حافظه مورد نیاز کامپیوتر و همچنین زمان مورد نیاز، از شیوه گرادیان مزدوج، به عنوان حل‌کننده مرکزی روش حصاربندی لگاریتمی^۵، استفاده می‌شود. عموماً از این روش به منظور حل مسایل وارون خطی و درجه دو، شامل قیود ناهمواری استفاده می‌شود [۱۷]. تابع هدف جدید به صورت رابطه ۸ در می‌آید [۱۷، ۱۸]:

و در لبه های آنومالی دارای مقدار صفر بوده همچنین گرادیان افقی بر روی منشا صفر و در لبه‌ها دارای مقدار بیشینه است. در همین راستا، فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک نیز برای تعیین موقعیت افقی بی‌هنجاری‌ها به کار می‌رود (رابطه ۲) [۱۵].

$$HTA = \text{Real} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\partial g / \partial z}{\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}} \right) \right) \quad (2)$$

در دو رابطه ۱ و ۲:

g میدان گرانی

TA زاویه‌ی تمایل

HTA زاویه تمایل هایپربولیک

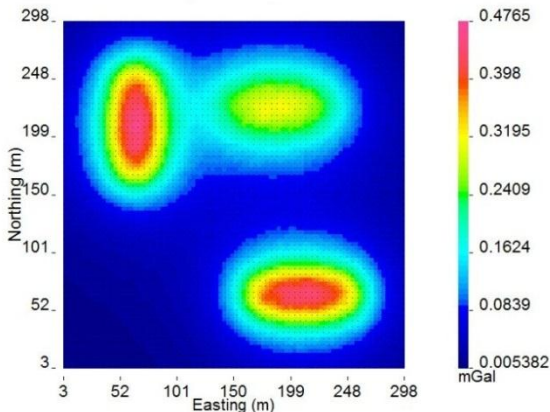
۳-۲- وارون‌سازی به روش لی-اولدنبرگ

در روش لی و اولدنبرگ، زمین به تعداد زیادی سلول‌های مکعبی شکل تقسیم می‌شود که مقدار ویژگی فیزیکی آن‌ها ثابت است. این سلول‌ها درون یک دستگاه مختصات متعامد، یک سیستم شبکه‌ای سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند. در این سیستم، زمین به وسیله یک بردار ستونی معرفی می‌شود که هر درایه این بردار، مربوط به مقدار ویژگی فیزیکی هر سلول (چگالی) در مدل است.

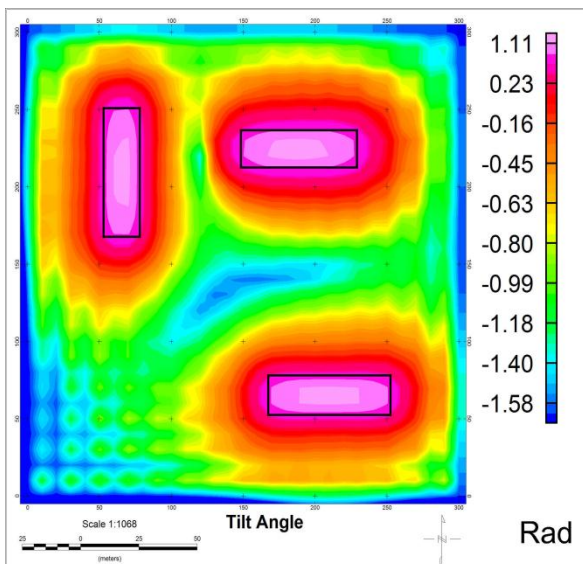
روند وارون‌سازی در این روش مانند مسایل بهینه‌سازی است و هدف پیدا کردن مدلی است که تابع هدف مدل ارایه شده در رابطه ۳ را کمینه کرده و داده‌های آن، تا مقدار معینی بر داده‌های مشاهده‌ای منطبق باشد. تابع هدف مدل به کار رفته در این روش به صورت رابطه ۳ است [۱۶]:

$$\begin{aligned} \Phi_m = & a_s \int_V w_s (m(x, y, z) - m(x, y, z)_{ref})^2 dv \\ & + a_x \int_V w_x \left(\frac{\partial m(x, y, z)}{\partial x} \right)^2 dv \\ & + a_y \int_V w_y \left(\frac{\partial m(x, y, z)}{\partial y} \right)^2 dv \\ & + a_z \int_V w_z \left(\frac{\partial m(x, y, z)}{\partial z} \right)^2 dv \end{aligned} \quad (3)$$

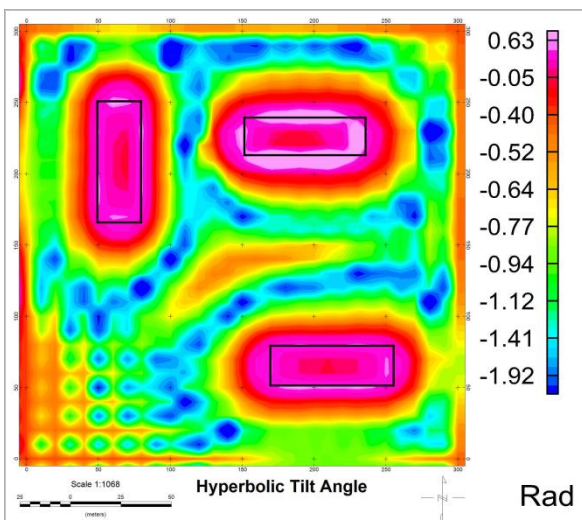
قسمت اول رابطه ۳، میزان نزدیکی^۱ مدل بدست آمده به مدل مرجع $m(x, y, z)_{ref}$ و قسمت بعدی معادله، میزان



شکل ۲: نقشه آنومالی باقی مانده گرانی حاصل از مدل مصنوعی



شکل ۳: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل



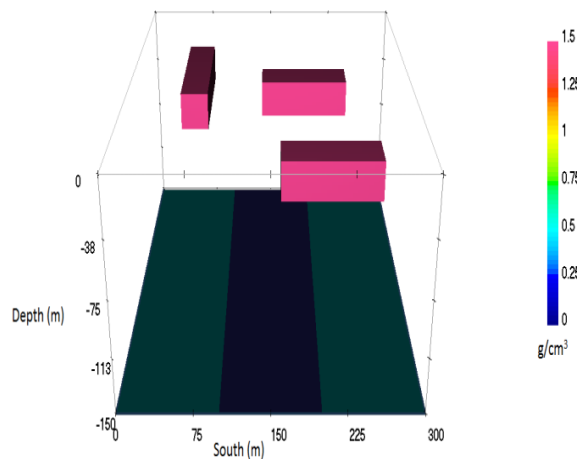
شکل ۴: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک

$$\Phi(\lambda) = \Phi_d + \mu\Phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M \ln(m_j) \quad (8)$$

که در آن عبارت لگاریتمی، تابع حصاربندی^۶، λ ، ضریب حصاربندی^۷ و μ ، ضریب منظم‌ساز^۸ است. همان‌طور که از رابطه ۸ می‌توان استنباط کرد، اعمال جمله لگاریتمی برای شبکه پارامترهای مدل، یک قید روی پارامترها ایجاد کرده و از کمینه شدن تابع هدف در حوزه‌های ممنوع جلوگیری می‌کند. در این روش، با کاهش λ یک توالی کمینه‌سازی غیرخطی انجام می‌شود که با نزدیک شدن مقدار λ به صفر، جواب‌ها به جواب رابطه ۷ نزدیک می‌شوند [۱۹].

۳- داده‌های مصنوعی

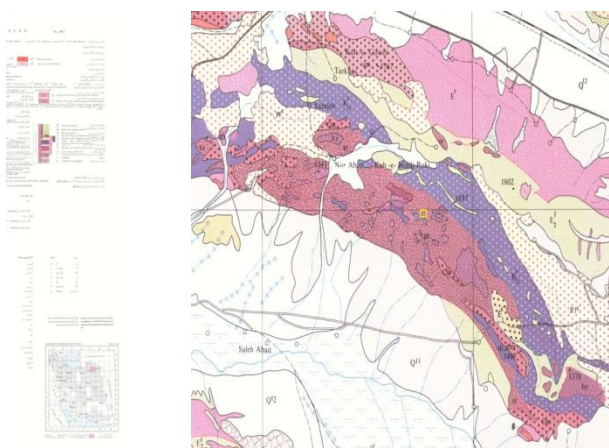
به منظور بررسی شرایط مدلسازی و نحوه عمل، ابتدا روش‌های یاد شده بر روی داده‌های یک مدل مصنوعی که متشکل از دو مکعب مستطیل در شمال غرب و جنوب شرق، با عمق بالا و پایین به ترتیب ۱۵ و ۴۰ متر و یک مکعب مستطیل در شمال شرق با عمق بالا و پایین به ترتیب ۲۵ و ۵۰ متر است، مورد استفاده قرار گرفت که تباین چگالی مکعب‌ها با محیط اطراف، ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شده است (شکل ۱). نقشه آنومالی باقی مانده حاصل از مدل مصنوعی در شکل ۲ آمده است.



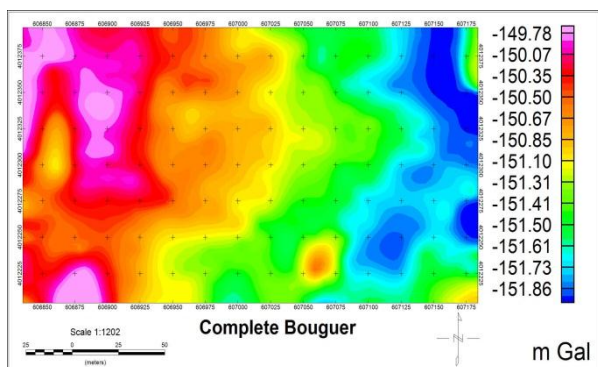
شکل ۱: نمای دید از بالای مدل مصنوعی مورد استفاده

به منظور تخمین مرز تقریبی بی‌هنجاری، با استفاده از بسته کد متلب Poten Soft [۲۰]، فیلترهای زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک، به داده‌ها اعمال و نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

هزارم زمین‌شناسی سلطان‌آباد در جنوب خاوری سبزوار در استان خراسان رضوی قرار دارد به طوری که در منتهی‌الیه جنوب شرق ورقه ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی سلطان‌آباد واقع است (شکل ۷). برونزدهای سنگی محدوده، در برگزیده سنگ‌های آذرین از جنس اولترابازیک‌ها است که بیشتر به سرپانتین و کانی‌هایی مانند تالک و ورمیکولیت تبدیل شده است [۳]. نقشه بوگه کامل داده‌های گرانی‌سنجی این محدوده، در شکل ۸ آمده است.



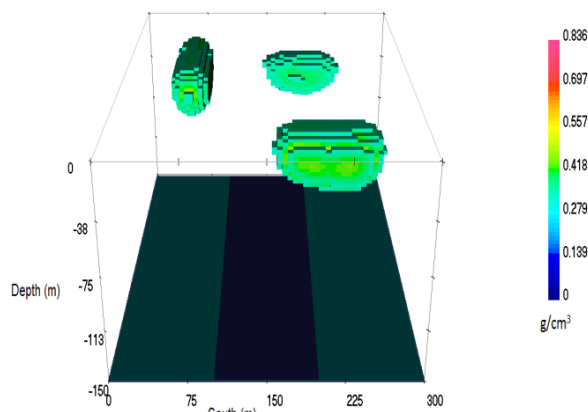
شکل ۷: زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ سبزوار)



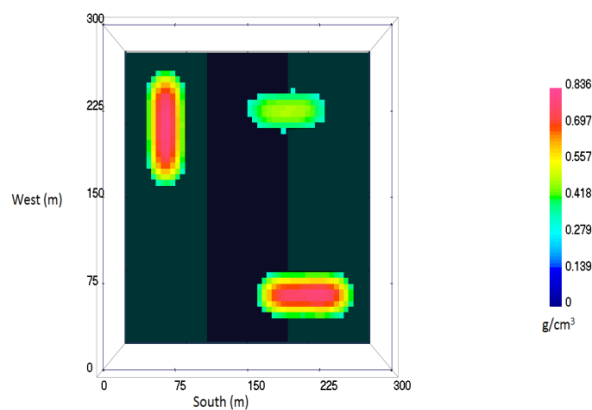
شکل ۸: نقشه بوگه کامل محدوده اکتشافی مورد مطالعه

اولین گام در پردازش روش‌های میدان پتانسیل، تفکیک آثار آنومالی‌ها از یکدیگر است، یعنی جداسازی آنومالی‌های کم‌عمق از منابع عمیق به وسیله تهیه نقشه آنومالی باقی‌مانده که مبین تاثیرات سطحی ناشی از اثرات ساختمانی موجود در منطقه است [۲۱]. تمرکز این تحقیق بر روی قسمت کوچکتري از کل محدوده برداشتی است و از آنجا که هدف، بارزسازی آثار سطحی است، برای جداسازی آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای، از روش حذف روندسطحی درجات ۱ تا ۸،

با توجه به قرارگرفتن مکان صحیح مدل‌ها بر روی شکل‌های بالا، مشاهده می‌شود که فیلترهای مورد استفاده، عملکرد قابل قبولی دارند. به منظور وارون‌سازی مدل مصنوعی، داده‌های بدست آمده از این مدل، در یک شبکه مربعی به فواصل ۱۰ متر محاسبه شده و حاصل آن تعداد ۹۰۰ داده و میزان نوفه گوسی اضافه شده به داده‌ها، ۲ درصد است. مراحل انجام وارون‌سازی با استفاده از نرم‌افزار GRAV 3D انجام و نتیجه آن در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است.



شکل ۵: نتایج حاصل از وارون‌سازی مدل مصنوعی

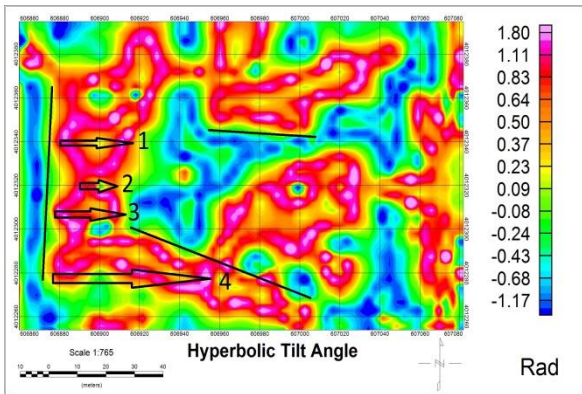


شکل ۶: نمای دید از بالای وارون‌سازی مدل مصنوعی در عمق ۳۰ متر

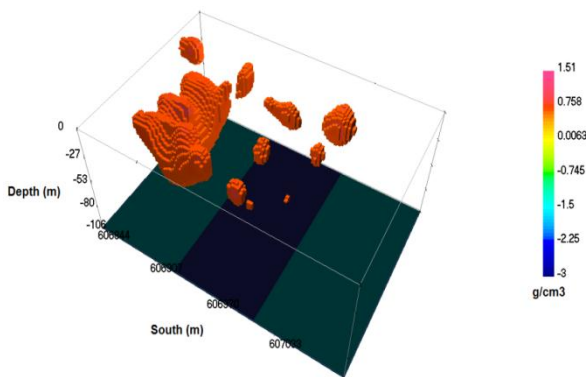
با دقت در شکل‌های ۵ و ۶، مشخص است که با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی لی و اولدنبرگ، مدل‌های مصنوعی پراکنده با تباین چگالی مناسب به راحتی قابل تشخیص و مدل‌سازی‌اند. در ادامه از داده‌های واقعی گرانی‌سنجی مربوط به یک محدوده اکتشافی کانسار کرومیت استفاده می‌شود.

۴- وارون‌سازی داده‌های واقعی

محدوده مورد مطالعه، تقریباً در بخش میانی نقشه یکصد



شکل ۱۱- نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک



شکل ۱۲: مدل نهایی سه بعدی با تباین چگالی مطلوب (سلول‌های با تباین چگالی کمتر از ۱٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده نشده‌اند).

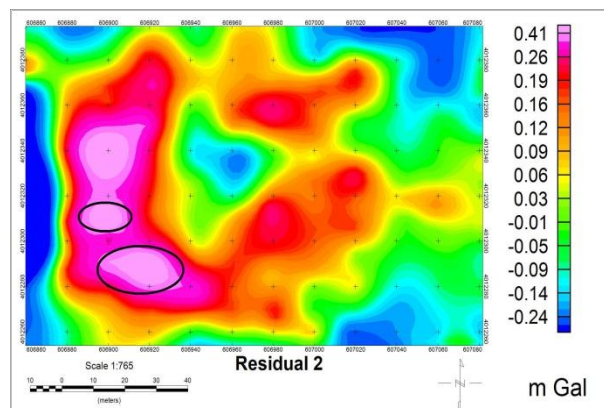
کاربرد دیگر فیلترهای مذکور، بارز کردن خطوارگی‌ها است که می‌تواند ناشی از تغییرات واحدهای سنگی یا وجود گسل باشد. در بازدید زمین‌شناسی، وجود دو گسل در جنوب و مرکز محدوده، تایید شد که با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، این دو گسل در شکل شناسایی شده‌اند. در غرب محدوده نیز یک خطوارگی مشخص شده است که می‌تواند بیانگر تغییرات واحدهای سنگی یا یک گسل پنهان (بدون هیچ‌گونه رخنمون سطحی) باشد. این خطوارگی‌ها، در شکل‌های یاد شده، با خطوط مشکی مشخص شده‌اند و وجود آن‌ها در مدلسازی نیز تایید شده است (شکل ۱۶ و ۱۷).

داده‌های گرانی‌سنجی این محدوده با دستگاه CG5، ساخت شرکت سینترکس کانادا، به صورت ۱۸ خط برداشت به فاصله ۲۰ متری و ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۱۰ متری، برداشت شده است. داده‌های استفاده شده در وارون‌سازی، با روش درون‌یابی نرم افزار surfer در یک شبکه منظم به فواصل ایستگاه‌ها و خطوط برداشت ۵ متری برداشت شده

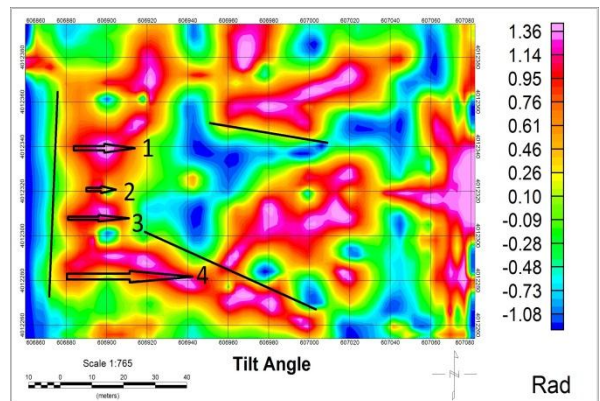
با استفاده از نرم افزارهای آسیس مونتاز شرکت ژئوسافت و وینگلینک استفاده شد و پس از بررسی نتایج حاصل از این روش و نبود تغییرات جدی در آن‌ها، نقشه حاصل از روند ۲ برای تجزیه و تحلیل انتخاب شد (شکل ۹). با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی، در جنوب و غرب محدوده برونزدگی‌هایی بر روی سطح زمین مشاهده شد که با روند کانی‌زایی کرومیت درون توده سرپانتینی به همراه منیزیت با دگرسانی تالکی، انطباق زیادی دارد و در شکل ۹، با رنگ مشکی مشخص شده است [۳].

برای تعیین مرز بی‌هنجاری‌ها، فیلترهای زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک اعمال و نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

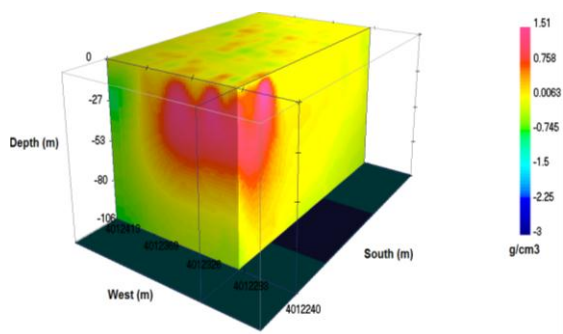
همان‌طور که در این شکل‌ها با پیکان‌های مشکی مشخص شده است، گسترش افقی آنومالی مورد توجه، از شمال به جنوب دارای روندی متغیر است و این نکته را به خوبی می‌توان در مدلسازی نیز مشاهده کرد (شکل ۱۲).



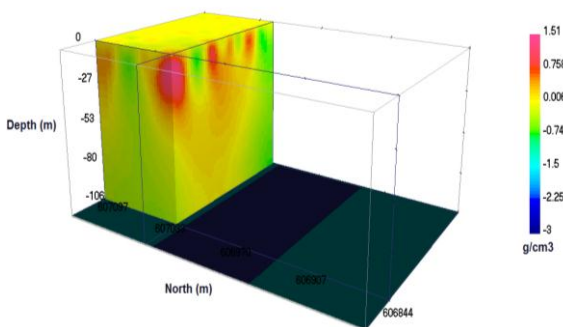
شکل ۹: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی‌هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه دو



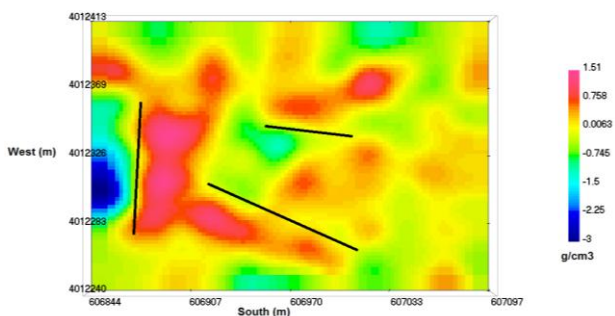
شکل ۱۰: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل



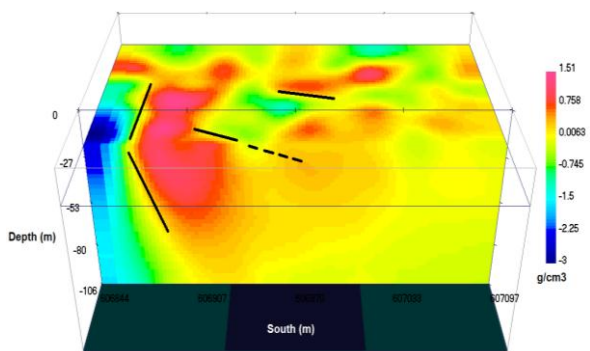
شکل ۱۴: مقطع عرضی مدلسازی (به منظور نمایش عمق پایین توده بزرگ موجود در غرب محدوده)



شکل ۱۵: مقطع عرضی مدلسازی (به منظور نمایش عمق پایین توده‌های کوچک موجود در شرق محدوده)



شکل ۱۶: گسل‌های بازسازی شده در مدلسازی در عمق ۲۰ متری (دید از بالا)



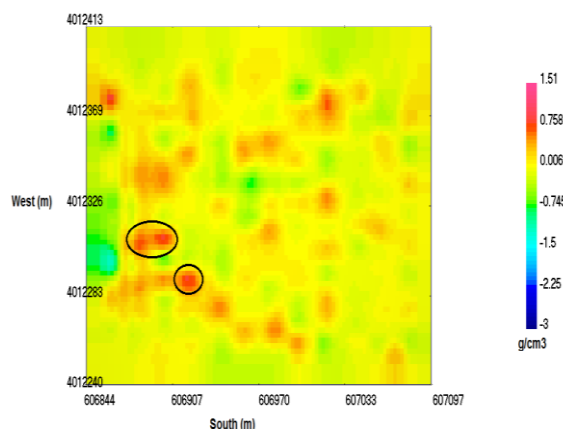
شکل ۱۷: نمایی از مقطع عرضی عمقی مربوط به شکل ۱۶

است که حاصل آن، تعداد ۱۲۶۰ داده است. متوسط چگالی توده کرومیت برابر ۴۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که به طور نسبی به میزان قابل توجهی از دونیت‌ها که چگالی ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و سرپانتین با چگالی نسبی ۲/۷۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، بیشتر است، پس میزان اختلاف چگالی مطلوب، بالاتر از ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نتیجه حاصل از مدلسازی در شکل ۱۲ آورده شده است.

نتایج مدلسازی سه بعدی نشان می‌دهد که توده‌های آنومالی نزدیک به سطح به صورت پراکنده در محدوده وجود دارد ولی یک آنومالی اصلی در غرب محدوده موجود است که حالت شاخه‌ای داشته و گسترش عمقی و جانبی مناسب و در سطح رخنمون کمی دارد (شکل ۱۲). نما از بالای مدل نهایی که در آن، رخنمون‌های یاد شده در شکل ۹، مشخص شده است در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

برای تعیین عمق توده‌های کرومیتی، نماهای مناسبی از مدل نهایی انتخاب شده و از دو جهت برش خورده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). با توجه به نتایج مدلسازی (شکل‌های ۱۴ و ۱۵)، عمق پایین توده بزرگ، حدود ۴۵ متر و عمق دیگر توده‌های پراکنده محیط، کمتر از ۲۵ متر برآورد می‌شود.

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ برای مقایسه نتایج مدلسازی با فیلتر زاویه تمایل در تشخیص ناپیوستگی و شکستگی‌ها آمده است. در این شکل‌ها، ناپیوستگی موجود در غرب محدوده با روند شمالی-جنوبی در کنار توده آنومال، به راحتی قابل پیگیری است، در این تصاویر، دیگر گسل‌های تایید شده شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نیز مشخص شده‌اند.



شکل ۱۳: نمای بالایی مدلسازی که قرمز پررنگ بیانگر رخنمون‌های کانسار کرومیت است (به منظور تشخیص بهتر رخنمون‌ها، همه سلول‌های مدل نمایش داده شده‌اند).

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی کانسار کرومیت سبزوآر با فیلترهایی مانند روند سطحی، زاویه تمایل و زاویه تمایل هایپربولیک مورد پردازش و تفسیر قرار گرفته است. بر اساس این مطالعه، میزان گسترش افقی و عمقی آنومالی‌های موجود، تشخیص داده شد. در پایان هم برای رسیدن به جزئیات کامل‌تری از شکل، کشیدگی عمقی و میزان گستردگی سطحی منشا، اقدام به مدلسازی معکوس سه بعدی داده‌های برداشتی با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ شد. برای مقایسه نتایج فیلترهای استفاده شده با نتایج مدلسازی، نماهای مختلف مدل نهایی متناسب با هر فیلتر تهیه شد که حاصل این مقایسه، هم‌خوانی قابل قبول فیلترهای فاز محلی با مدل‌سازی بود و در هر مرحله تاییدکننده یکدیگر بودند. نتیجه نهایی بررسی منطقه، حاکی از وجود یک ناپیوستگی (تغییرات واحدهای سنگی یا یک گسل پنهان) در غرب محدوده با روندی شمالی-جنوبی است که یک توده نسبتاً بزرگ کرومیتی به موازات آن تشکیل شده است. گسترش سطحی این توده از شمال به جنوب متغیر است و در جنوب، به سمت شرق تمایل دارد. همچنین توده‌های کرومیتی پراکنده دیگری در مرکز و شرق محدوده وجود دارند که تا نزدیکی سطح زمین بالا آمده‌اند. عمق پایین توده بزرگ، حدود ۴۵ متر و عمق دیگر توده‌های پراکنده محیط، کمتر از ۲۵ متر برآورد می‌شود.

۶- مراجع

- [7] Ergin, K. (1952). "Gravity and magnetometer surveys for chromite ore deposits in Turkey". In 19th International Geologic Congress, Algeria, CR Sec, 9: 123-130.
- [8] Yuenguel, S. (1956). "Prospecting for chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in east Turkey". Geophysics, 21(2): 433-454.
- [۹] کامکار روحانی، ا؛ ۱۳۸۷؛ "پردازش، مدل‌سازی، تحلیل و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (گرانی و مغناطیس) برای اکتشاف کرومیت در منطقه فاریاب"، طرح پژوهشی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۱۰] آزاد، م؛ کنشلو، م؛ آگاه، آ؛ کامکار روحانی، ا؛ ۱۳۹۲؛ "به کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری در فیلتر کردن ساختارهای داده-های گرانی‌سنجی منطقه معدنی کرومیت فاریاب"، مجله فیزیک زمین و فضا، تهران، دوره ۳۹، شماره ۴، ص ۶۱-۷۲.
- [11] Nettleton, L. L. (1976). "Gravity and magnetics in oil prospecting". McGraw-Hill Companies.
- [12] Unwin, D. J. (1975). "An introduction to trend surface analysis". Geo Abstracts, University of East Anglia, No. 5 of Concepts and Techniques in Modern Geography, Norwich.
- [13] Miller, R. L. (1956). "Trend surfaces: their application to analysis and description of environments of sedimentation". Journal of Geology, 64: 425-446.
- [14] Miller, H. G., and Singh, V. (1994). "Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources". Journal of Applied Geophysics, 32(2): 213-217.
- [15] Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R. (2006). "Enhancing potential field data using filters based on the local phase". Computers & Geosciences, 32(10): 1585-1591.
- [16] Phillips, N. (2002). "Geophysical inversion in an integrated exploration program: examples from the San Nicolas deposit: University of British Columbia". Vancouver, Canada: Master's Thesis.
- [17] Gill, P. E., Murray, W., Ponceleon, D. B., and Saunders, M. A. (1991). "Solving reduced KKT systems in barrier methods for linear and quadratic programming". (No. SOL-91-7). STANFORD UNIV CA SYSTEMS OPTIMIZATION LAB.
- [18] Saunders, M. A. (1996). "Cholesky-based methods for sparse least squares: The benefits of regulariza-
- [1] Barker, J., Kogel, J., Krukowski, S., and Trivedi, N. (2006). "Industrial Minerals and Rocks-Commodities". Markets, and Uses.
- [۲] یعقوب پور، ع؛ ۱۳۸۳؛ "اصول زمین‌شناسی ذخایر معدنی"، انتشارات دانشگاه تربیت معلم.
- [۳] آقاجانی، ح؛ ۱۳۹۱؛ "انجام پیمایش و مطالعات ثقل‌سنجی در محدوده کرومیت شرق سبزوآر"، طرح پژوهشی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [4] Kospiri, A., Kosho, P., and Vukzaj, N. (1999). "Case histories of the application of geophysical methods to chromite exploration in the Balkans". In Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition. Istanbul, 07-3, 38-40.
- [5] Hammer, S., Nettleton, L. L., and Hastings, W. K. (1945). "Gravimeter prospecting for chromite in Cuba". Geophysics, 10(1): 34-49.
- [6] Davis, W. E., Jackson, W. H., and Richter, D. H.

- processing*". Modeling and Mapping, Computers & Geosciences, 37: 935-942.
- [21] Robinson, E. S., and Coruh, D. (1988). "Basic Exploration Geophysics", New York, John Wiley and Sons, pp. 562.
- tion*". Linear and Nonlinear Conjugate Gradient-Related Methods, 100: 92-100
- [19] Li, Y., and Oldenburg, D. W. (1996). "3-D inversion of magnetic data". Geophysics, 61(2): 394-408.
- [20] Arisoy, M. O., and Dikmen, U. (2011). "Potensoft: MATLAB-based software for potential field data

\ Closeness

˘ Smoothness

˘ Reference model

˘ Data misfit

ˆ Logarithmic barrier method

ˆ Barrier function

˘ Barrier parameter

ˆ tradeoff parameter