

برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو داده‌های گرانی به‌منظور اکتشاف کرومیت در استان هرمزگان

امین روشندل کاهو^{۱*} و علی نجاتی کلاته^۱

^۱ دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۴)

چکیده

بی‌هنجاری‌های داده‌های گرانی معمولاً در سطح اولیه برداشت داده‌ها تفسیر می‌شوند. در برخی مواقع به‌منظور تفسیر داده‌ها در یک سطح ارتفاعی دیگر یا مقایسه داده‌ها با سایر داده‌های برداشت شده، داده‌های گرانی را به یک سطح دیگر انتقال می‌دهند. از روش ادامه فراسو می‌توان به‌منظور جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی از یکدیگر استفاده کرد. در این مقاله از یک روش عملی بر مبنای همبستگی عرضی ادامه فراسو در دو ارتفاع متوالی به‌منظور محاسبه ارتفاع بهینه، برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی از یکدیگر استفاده شده است. ارتفاع مربوط به بیشینه انحراف در مقادیر همبستگی عرضی، ارتفاع بهینه در ادامه فراسو است. کارایی روش پیش‌گفته در مورد داده‌های مصنوعی و واقعی مربوط به اکتشاف کرومیت در استان هرمزگان واقع در جنوب ایران مورد بررسی قرار گرفته است. جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای با استفاده از ارتفاع بهینه ادامه فراسو به نحو مطلوب صورت گرفته و موقعیت محدوده ذخیره معدنی به روشنی قابل مشاهده است که این سبب شناخت بهتر توده بی‌هنجار شده است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بهینه، ادامه فراسو، کرومیت، همبستگی عرضی، بی‌هنجاری بوگه، رودان

Estimation of the optimum upward continuation height for chromite prospecting at Hormozgan province

Amin Roshandel Kahoo^{1*} and Ali Nejati Kalateh¹

¹University of Shahrood, Shahrood, Iran

(Received: 21 November 2011, accepted: 4 January 2014)

Summary

Gravity anomaly data are usually interpreted on the initial acquired surface. In some situations, it is useful to move the data to another surface for interpretation or comparison with another data set. Moving the data to another surface is called upward or downward continuation.

The regional-residual gravity anomaly separation is one of the most important steps in processing and interpretation of potential field data. The regional and residual gravity anomalies have long and short wavelengths, respectively. On the other hand, upward continuation is a mathematical transform that reduces the short-wavelength or shallow

*Corresponding author:

roshandel@shahroodut.ac.ir

*نگارنده رابط:

anomalies. Therefore, the upward continuation can be used to separate regional-residual gravity anomalies. In other words, upward continuation can be considered as a low-pass filter that attenuates the short-wavelength anomalies more than long-wavelength ones.

Selection of the optimum height for upward continuation is very important. By choosing the upward height less than optimum value, remains the residual anomalies in the result of upward continuation and choosing the upward height more than optimum value, reduces the amplitude of the regional anomalies in the data. Qualitative comparing of results from the upward continuation with the main data for various heights of upward continuation is a common method for detection of the optimum value of height.

A good height to separate regional from residual gravity anomalies will have a maximum cross-correlation between the regional and the upward-continued data. A possible method for estimating the optimum height for the synthetic model data can be derived using the cross-correlation between the regional anomaly at the observation level and the upward continuation of the observed anomaly at different heights. We used synthetic model data as two regional bodies at the 1500-meter depth with various lateral boundaries and three local bodies at the 200-meter depth and various lateral boundaries.

Because we do not know the real regional anomaly, we present a practical method based on the cross-correlations between the upward continuations at two successive heights to derive an optimum upward continuation height for the regional-residual gravity separation. We calculate the cross-correlation versus height over a range, from zero to a height where a change in the cross-correlation values has clearly passed a maximum deflection from the chord joining the end point heights. The height of the maximum deflection of these cross-correlation values yields the optimum height for the upward continuation.

We tested the efficiency of the method on synthetic data. Our results showed that the maximum cross-correlation between regional and the upward-continued data coincide on the maximum deflection of the upward continuations at two successive heights.

Furthermore, the method was applied to the real gravity anomaly in the Hormozghan Province in the south of Iran to prospect a chromite ore bodies. As we expected, the Bouguer anomaly included both regional and residual anomalies related to the chromite ore body and other shallow sources, respectively. Therefore, we cannot distinguish the location of the mineral deposit. When we separate regional and residual gravity anomalies by an upward continuation at the optimum height, we can see that the obtained residual anomaly clearly shows the location of mineral deposit.

Keywords: Optimum height, upward continuation, chromite, cross-correlation, Bouguer anomaly, Roudan

خشکی و سطح دریا را با داده‌های گرانی هوابرد با استفاده از ادامه فراسو با یکدیگر مقایسه کرد. یکی از مراحل مهم در پردازش و تفسیر داده‌های گرانی، جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی از ناحیه‌ای است (نبیقیان و همکاران، ۲۰۰۵). فرایند ادامه فراسو یک تبدیل ریاضی روی داده‌های برداشت شده است که باعث تضعیف بی‌هنجاری‌هایی با طول موج کوتاه می‌شود (کلوگ، ۱۹۵۳؛ گوپتا و رامانی، ۱۹۸۰). به عبارت دیگر، ادامه فراسو اثر بی‌هنجاری‌های سطحی را تضعیف می‌کند.

۱ مقدمه

معمولا داده‌های گرانی روی سطح اولیه برداشت داده‌ها تفسیر می‌شوند. اما در برخی از موارد به منظور تفسیر بهتر داده‌ها یا مقایسه آنها با داده‌های دیگر لازم است که داده‌های گرانی به یک سطح ارتفاعی دیگر منتقل شوند (باتاچاریا و چان، ۱۹۷۷) که به این فرایند پردازشی داده‌ها، ادامه فراسو (انتقال به سطح بالاتر) یا ادامه فراسو (انتقال به سطح پایین‌تر) می‌گویند (جاکوبسن، ۱۹۸۷). برای مثال می‌توان داده‌های گرانی برداشت شده در

بنابراین می‌توان آن را درحکم ابزاری مناسب برای جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی با طول موج کوتاه از ناحیه‌ای با طول موج بلند به کار گرفت. در روش ادامه فراسو، انتخاب ارتفاع بهینه اهمیت بسیار زیادی دارد؛ زیرا ارتفاع کمتر از مقدار بهینه سبب باقی ماندن اثر بی‌هنجاری‌های محلی در داده‌ها می‌شود و در مقابل ارتفاع بیشتر از مقدار بهینه سبب تضعیف مضاعف اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای در داده‌ها می‌شود (چن، ۱۹۸۷؛ فدی و همکاران، ۱۹۹۹). بنابراین انتخاب ارتفاع بهینه برای ادامه فراسو، اثر مستقیمی بر کیفیت جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای خواهد داشت (زنگ و همکاران، ۲۰۰۷). روش متداول در انتخاب ارتفاع بهینه ادامه فراسو، مقایسه کیفی نتایج ادامه فراسو برای ارتفاع‌های متفاوت با داده اصلی است. در این مقاله یک روش کمی برای برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو براساس همبستگی عرضی بیشینه در دو ارتفاع متوالی ادامه فراسو، عرضه می‌شود.

۲ ادامه فراسو

اگر $U(x, y, z_0)$ میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در سطح $z = z_0$ باشد، برای انتقال میدان پتانسیل به سطح $z = z_0 - \Delta z$ (جهت مثبت محور z به سمت داخل زمین در نظر گرفته شده است) از رابطه (۱) استفاده می‌شود (بلکلی، ۱۹۹۶).

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + \Delta z^2 \right]^{3/2}}, \quad \Delta z > 0 \quad (1)$$

تبدیل فوریه رابطه انتگرالی (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$F[U_{op}] = F[U] e^{-\Delta z |k|} \quad (2)$$

که $F[U_{op}]$ تبدیل فوریه میدان پتانسیل در ارتفاع

۳ برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو

همبستگی عرضی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع معین به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۸۹).

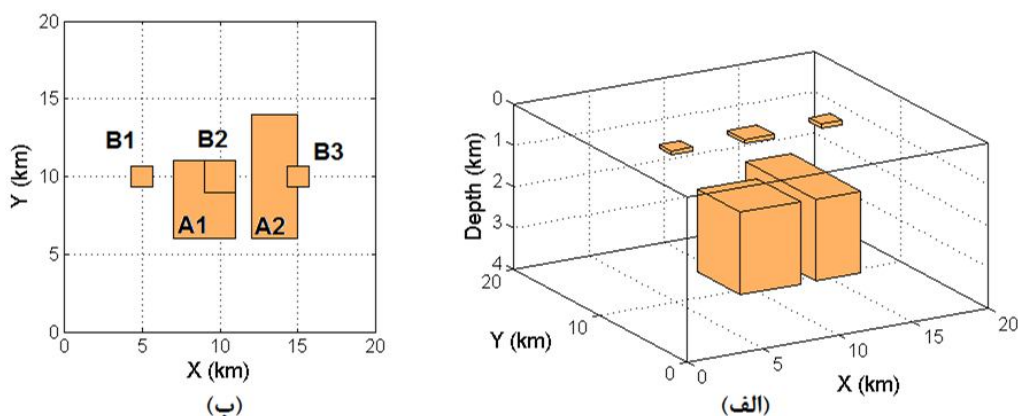
$$r_{\Delta g_r, \Delta g_u} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_r(x_i, y_j) \Delta g_u(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_r^2(x_i, y_j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_u^2(x_i, y_j)}} \quad (3)$$

که M و N به ترتیب تعداد نمونه‌ها در راستاهای x و y است.

برای برآورد ارتفاع بهینه ادامه فراسو، می‌توان همبستگی عرضی بی‌هنجاری ناحیه‌ای (Δg_r) و نتیجه ادامه فراسو (Δg_u) برای ارتفاع‌های گوناگون را برحسب ارتفاع رسم کرد.

جدول ۱. مشخصات بی‌هنجاری‌ها برای تولید داده مصنوعی.

B3	B2	B1	A2	A1	جسم
۱۴/۳	۹	۴/۳	۱۲	۷	x_1 (km)
۱۵/۷	۱۱	۵/۷	۱۵	۱۱	x_2 (km)
۹/۳	۹	۹/۳	۶	۶	y_1 (km)
۱۰/۷	۱۱	۱۰/۷	۱۴	۱۱	y_2 (km)
۰/۲	۰/۲	۰/۲	۱/۵	۱/۵	z_1 (km)
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۳/۵	۳/۵	z_2 (km)
۰/۳	۰/۳	-۰/۳	-۰/۱	۰/۱	$\rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$



شکل ۱. الف) نمای سه‌بُعدی مدل مصنوعی و ب) نمای دو‌بُعدی مدل مصنوعی.

در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۱ مشخصات آنها بیان شده است.

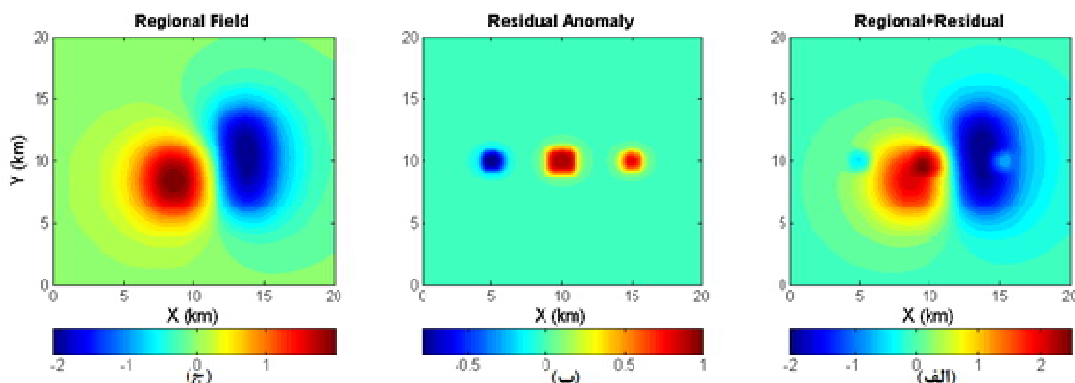
اثر گرانی مدل شکل ۱ به صورت بی‌هنجاری بوگه، ناحیه‌ای و باقی‌مانده در شکل ۲ داده شده است. علاوه بر بی‌هنجاری کلی، بی‌هنجاری‌های محلی ناشی از اجسام B1، B2، B3 و ناحیه‌ای ناشی از اجسام A1 و A2 نیز محاسبه و در شکل ۲ نشان داده شده است.

ادامه فراسو روی داده‌های کلی برای ارتفاع‌های صفر تا ۲۰۰۰ متر با گام ۱۰۰ متر اعمال، همبستگی عرضی بین آنها و بی‌هنجاری ناحیه‌ای (شکل ۲-ج) محاسبه و در شکل ۳ نمودار این همبستگی برحسب تغییرات ارتفاع رسم شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه مقدار همبستگی عرضی در ارتفاع ۵۰۰ متر وجود دارد. این ارتفاع به‌منزله ارتفاع بهینه در نظر گرفته می‌شود. این مطلب را می‌توان روی نیم‌رُخ عبوری از همه بی‌هنجاری‌ها در عرض ۱۰ کیلومتری ($y = 10 \text{ km}$) که در شکل ۴ نشان داده شده است، مشاهده کرد. بیشترین شباهت میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتایج ادامه فراسو در محل نیم‌رُخ در ارتفاع ۵۰۰ متری دیده می‌شود.

بدیهی است که بیشینه مقدار این همبستگی عرضی مربوط به ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی در نتیجه ادامه فراسو تضعیف شده است. این ارتفاع به مثابه ارتفاع بهینه برای ادامه فراسو در نظر گرفته می‌شود.

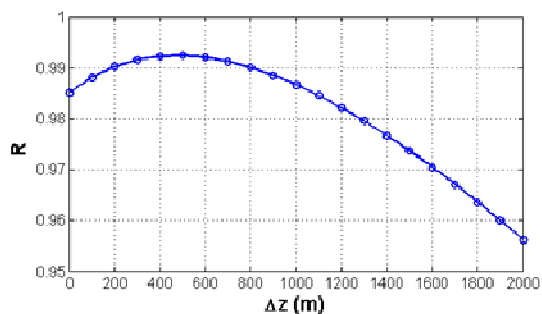
معمولاً در عمل، بی‌هنجاری ناحیه‌ای معلوم نیست. در چنین حالتی می‌توان همبستگی عرضی را میان دو ادامه فراسو برای دو ارتفاع متوالی محاسبه کرد. اگر این مقادیر برحسب ارتفاع رسم شوند، با افزایش ارتفاع مقدار همبستگی به یک مقدار حدی همگرا می‌شوند. بیشترین انحراف از خط واصل بین نقطه ابتدا و انتها در عمق بهینه اتفاق می‌افتد. در واقع بیشینه انحراف مربوط به ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی تضعیف شده و ادامه فراسو در آن ارتفاع بیشتر بیانگر اثرات بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای هستند (زنگ و همکاران، ۲۰۰۷).

برای نشان دادن صحت روش عرضه شده، از یک مدل مصنوعی که در نمای ۲ و ۳ بُعدی در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در مدل مصنوعی مورد استفاده دو بی‌هنجاری A1 و A2 در حکم بی‌هنجاری ناحیه‌ای و B1، B2، B3 در حکم بی‌هنجاری‌های محلی

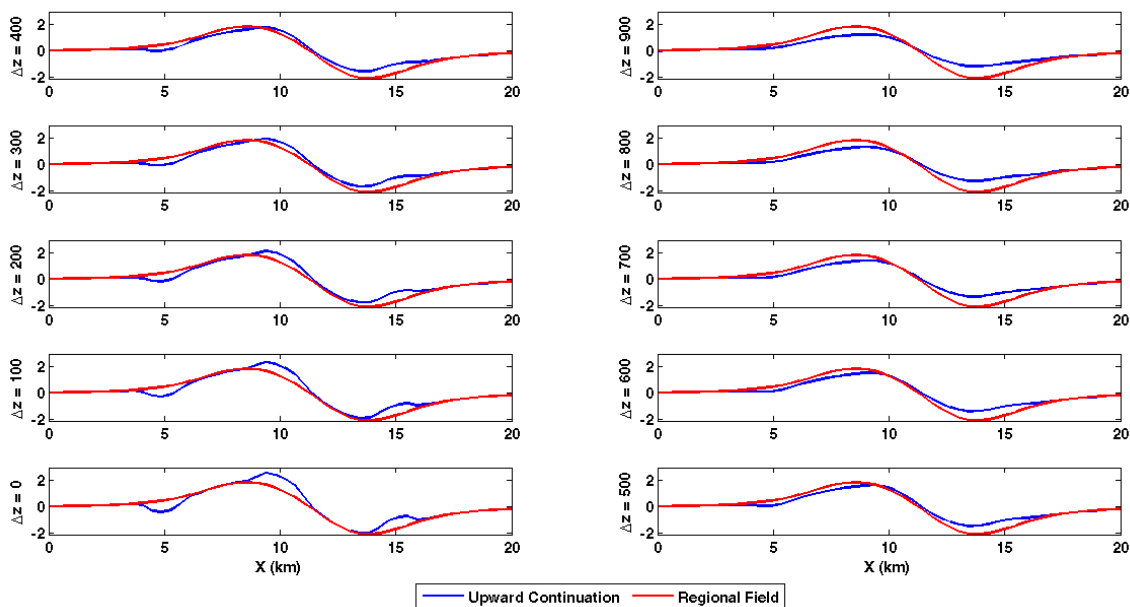


شکل ۲. (الف) بی‌هنجاری کلی، (ب) بی‌هنجاری محلی و (ج) بی‌هنجاری ناحیه‌ای.

همان‌طور که بیان شد، در عمل بی‌هنجاری ناحیه‌ای مشخص نیست. در این حالت از همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی استفاده می‌شود که در این تحقیق فاصله دو فراسوی متوالی ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۵-الف نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع نشان داده شده است.



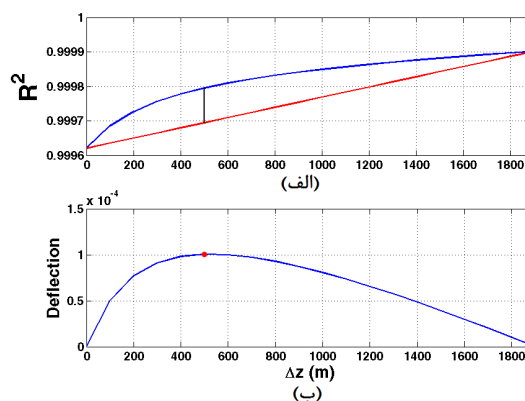
شکل ۳. مقادیر همبستگی عرضی میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتایج ادامه فراسو برای ارتفاع‌های متفاوت.



شکل ۴. مقایسه میان بی‌هنجاری ناحیه‌ای و نتایج ادامه فراسو در نیم‌رخ $y = 10$ (km) برای مقادیر مختلف ارتفاع ادامه فراسو.

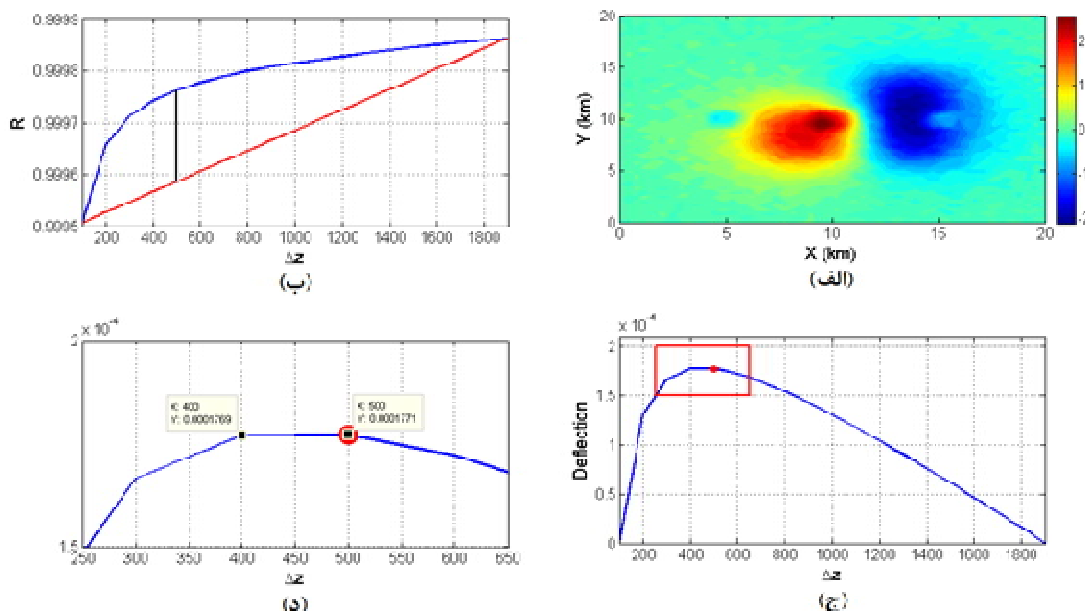
ارتفاع ۵۰۰ متر دیده می‌شود که برابر همان ارتفاع بهینه است. در این مقاله، کلیه محاسبات با کدهای نوشته شده نگارندگان در محیط مت‌کب صورت گرفته است.

برای بررسی اثر نوفه بر کارکرد الگوریتم معرفی شده، میزان ۱۰ درصد نوفه تصادفی سفید به داده مصنوعی اضافه و الگوریتم روی داده حاوی نوفه اعمال شد که در شکل ۶ نتایج آن نشان داده شده است. از آنجاکه الگوریتم بر مبنای همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی است و با توجه به اینکه روش ادامه فراسو باعث تضعیف نوفه می‌شود، انتظار می‌رود که الگوریتم، حساسیت زیادی به نوفه نداشته باشد. این موضوع به‌طور واضح در نتایج به‌دست آمده در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است. بنابراین در حضور نوفه تصادفی سفید ۱۰ درصد نیز ارتفاع بهینه برای اجرای ادامه فراسو، مقدار ۵۰۰ متر به‌دست آمده است.

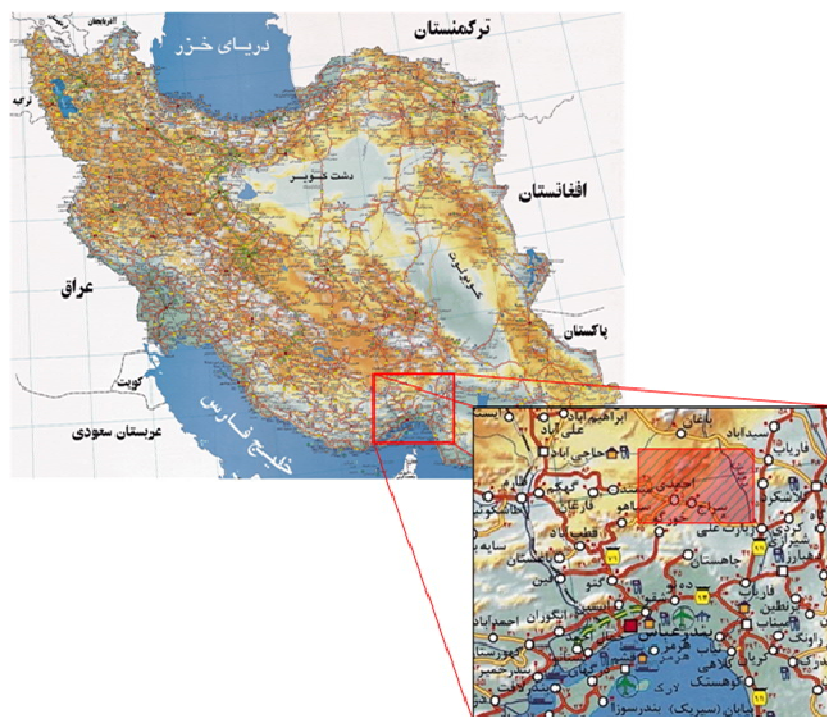


شکل ۵. (الف) نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع و (ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی و مقدار بیشینه مقدار انحراف (نقطه سرخ).

در شکل ۵-ب مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز بیشینه مقدار انحراف در



شکل ۶. (الف) داده مصنوعی حاوی ۱۰ درصد نوفه تصادفی سفید، (ب) نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع برای داده‌های دارای نوفه، (ج) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی و بیشینه مقدار انحراف (نقطه سرخ) برای داده حاوی نوفه و (د) بزرگ‌نمایی مستطیل سرخ‌رنگ در شکل ۶-ج.



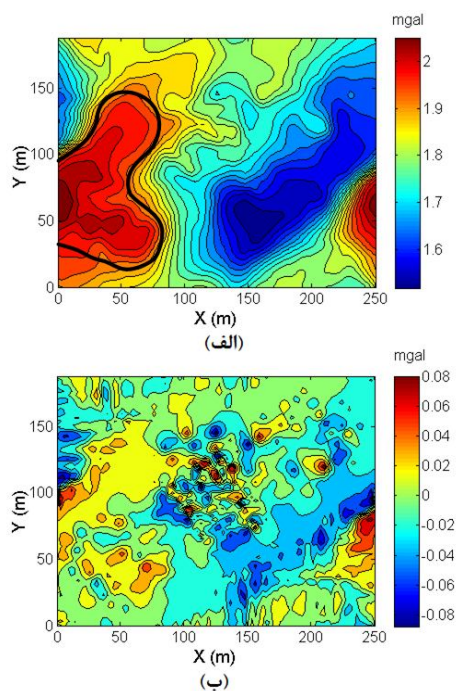
شکل ۷. موقعیت تقریبی منطقه مورد بررسی (مستطیل سرخ هاشور خورده).

برای بررسی بیشتر قابلیت روش معرفی شده در این مقاله برای تعیین ارتفاع بهینه ادامه فراسو، جداسازی بی-هنجاری ناحیه‌ای و محلی با روش برازش چندجمله‌ای با درجات متفاوت روی داده واقعی اعمال شد. معمولاً درجه چندجمله‌ای برازش داده شده در حدود ۲ تا ۴ در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱۱ نتایج حاصل برای چندجمله‌ای درجه ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی جداسازی با دو روش همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. اما در مورد تفاوت‌های جزئی میان نتایج دو روش، لازم به ذکر است که در روش برازش چندجمله‌ای با درجات ۲ تا ۴ بی-هنجاری ناحیه‌ای یا اثر توده معدنی مورد نظر به صورت بیش‌هموار شده به دست می‌آید. به عبارت دیگر، در بی-هنجاری محلی مربوط به چشمه‌های سطحی، اثرات ناحیه‌ای نیز مشاهده می‌شوند که ناشی از فقدان جداسازی مطلوب است. هموارشدگی بیش از حد، تعیین ناحیه تقریبی گسترش ماده معدنی را با مشکلات جدی روبه‌رو

۴ کاربرد روش برای داده‌های واقعی اکتشاف کرومیت

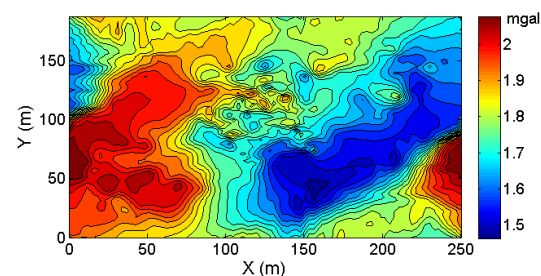
پتانسیل معدنی مورد نظر در بخش رودان از استان هرمزگان واقع شده است که در شکل ۷ با دایره سرخ رنگ موقعیت تقریبی منطقه نشان داده شده است. منطقه مورد بررسی در زون سندج - سیرجان قرار گرفته است. واحدهای سنگی محدوده مورد بررسی از نوع مافیک تا اولترامافیک است و شامل دونیت، کرومیت، اولوین، سرپانتین و هارزبورژیت است. در منطقه برون‌زدگی‌هایی از رگه‌های کرومیت در میان سنگ میزبان سرپانتین وجود دارد. سنگ‌های سطحی عمدتاً از نوع هارزبورژیت به همراه بلورهای اولوین هستند (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دولت‌آباد). جرم حجمی این نوع سنگ‌ها به طور متوسط $2.79 \text{ gr} / \text{cm}^3$ اندازه‌گیری شده است. ماده معدنی در نمونه نسبتاً خالص دارای چگالی تقریباً $4 \text{ gr} / \text{cm}^3$ است (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۴).



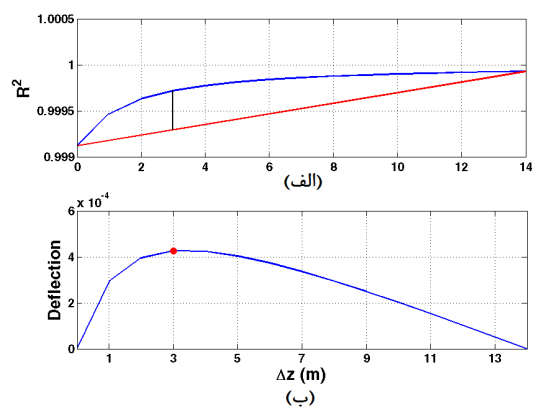
شکل ۱۰. (الف) بی‌هنجاری ناحیه‌ای (محدوده تقریبی ذخیره کرومیت با خط توپوگرافی مشخص شده است) و (ب) بی‌هنجاری سطحی با استفاده از روش ادامه فراسو و ارتفاع بهینه ۳ متر.

مقاله یک روش کاربردی برای برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو به کار رفته است. این روش بر مبنای محاسبه بیشینه انحراف نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی این نمودار است. این روش برای جداسازی بی-هنجاری محلی و ناحیه‌ای در مدل‌های ترکیبی پیچیده پاسخ مناسبی می‌دهد. جداسازی با استفاده از ادامه فراسو با ارتفاع بهینه برآورد شده در بررسی گرانی به منظور اکتشاف کرومیت در منطقه رودان استان هرمزگان صورت گرفت که نتایج به دست آمده کارایی مطلوب روش پیش گفته را به خوبی نشان داد.

می‌کند. اما در الگوریتم معرفی شده در این مقاله، جداسازی به صورت مطلوبی صورت پذیرفته است، به گونه‌ای که روند بی‌هنجاری ماده معدنی در بی‌هنجاری محلی مشاهده نمی‌شود.



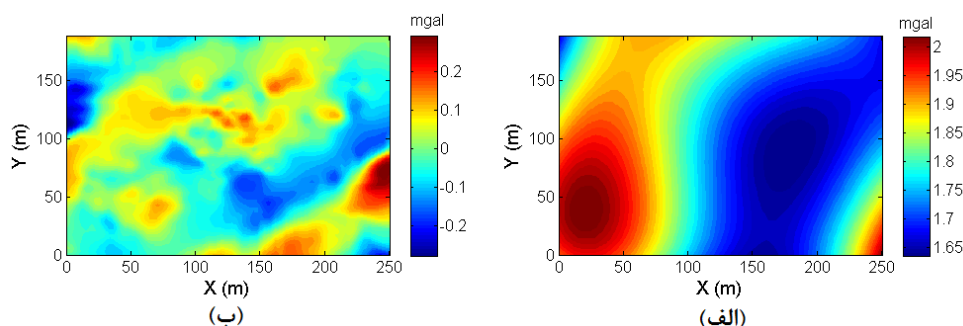
شکل ۸. بی‌هنجاری گرانی بخش رودان از استان هرمزگان.



شکل ۹. (الف) نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی برحسب ارتفاع و (ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی و مقدار بیشینه مقدار انحراف (نقطه سرخ).

۵ نتیجه‌گیری

برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو یک مرحله اساسی در پردازش و تفسیر داده‌های گرانی محسوب می‌شود. در این



شکل ۱۱. (الف) بی‌هنجاری ناحیه‌ای و (ب) بی‌هنجاری محلی حاصل از برازش چندجمله‌ای با درجه ۴.

- Gupta, V. K., and N. Ramani, 1980, Some aspects of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian: *Geophysics*, **45**, 1412–1426.
- Jacobsen, B. H., 1987, A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps: *Geophysics*, **52**, 1138–1148.
- Kellogg, O. D., 1953, *Foundations of potential theory*: Dover Publishing Inc.
- Fedi, M., Rapolla, A., and Russo, G., 1999, Upward continuation of scattered potential field data: *Geophysics*, **64**, 443–451.
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Pearson, W. C., Peirce, J. W., Phillips, J. D., and Ruder, M. E., 2005, Historical development of gravity method in exploration: *Geophysics*, **70**, 63ND-89ND.
- Zeng, H., Xu, D., and Tan, H., 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**, 145-150.

منابع

- نجاتی، ع.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، زمردیان، ح.، و شاهین، الف.، ۱۳۸۴، مدل‌سازی سه‌بُعدی داده‌های گرانی با استفاده از وارون‌سازی فشرده: *مجله علوم زمین*، **۵۷**، (۱)، ۱۸–۲۹.
- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه دولت‌آباد: سازمان زمین‌شناسی ایران.
- Abdelrahman, E. M., Bayoumi, A. I., Abdelhady, Y. E., Gobashy, M. M., and El-Araby, H. M., 1989, Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies: *Geophysics*, **54**, 1614–1621.
- Bhattacharyya, B. K., and Chan, K. C., 1977, Reduction of gravity and magnetic data on an arbitrary surface acquired in a region of high topographic relief: *Geophysics*, **42**, 1411–1430.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University Press.
- Chen, S., 1987, *Gravity exploration*: Geological Publishing House.