

## به کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری در فیلتر کردن ساختارهای داده‌های گرانی سنجی منطقه معدنی کرومیت فاریاب

محمدرضا آزاد<sup>۱</sup>، محمد کنشلو<sup>۲\*</sup> و ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(دریافت: ۹۱/۹/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

### چکیده

با توجه به این واقعیت که توده‌های کرومیت وزن مخصوص زیادی دارند، در اکتشافات معدنی معمول‌ترین روش ژئوفیزیکی که برای اکتشاف ذخایر کرومیت پیشنهاد می‌شود، روش گرانی‌سنجی است. در نقشه‌های بی‌هنجاری بوگه حاصل از برداشت‌های گرانی‌سنجی گرچه تاثیر بسیاری از عوامل فیلتر و حذف می‌شود، لیکن بازهم مقادیر بازمانده دست آمده نتیجه برهم‌نهی چند مولفه متفاوت از حیط ابعاد تاثیر و درجه اهمیت هستند. برای پردازش و تفسیر نقشه‌های بی‌هنجاری گرانی اصولاً از روش‌های متعددی استفاده می‌شود. نقطه ضعف فیلترهای ژئوفیزیکی معمول در نظرنگرفتن ساختار فضایی داده‌ها حین تفکیک آنها است. ساختار فضایی در واقع بیانگر میزان همبستگی داده‌ها نسبت به فاصله بینشان است. آنالیز کریجینگ فاکتوری (FKA) اساساً یک نوع فیلترینگ زمین‌آماري است که قادر است با توجه به تشخیص ساختارهای فضایی از روی واریوگرام تودرتوی داده‌ها و تفکیک ساختارها، به تجزیه متغیر اولیه به مولفه‌های اصلی آن و یا در واقع عوامل اصلی تغییرپذیری بپردازد. در این تحقیق، داده‌های گرانی منطقه معدنی کرومیت فاریاب با استفاده از روش FKA پردازش و تفسیر شده است. براساس بررسی‌های ساختاری سه ساختار متناسب با فاکتورهای ناحیه‌ای، محلی و نوفه تشخیص داده و دو محدوده برای ادامه عملیات اکتشافی براساس مولفه ناحیه‌ای فیلتر شده پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از فیلترهای ژئوفیزیکی مقایسه شده است. این تحقیق به‌خوبی قابلیت کاربرد این روش را در فیلتر کردن داده‌های گرانی‌سنجی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: گرانی‌سنجی، فیلتر، ساختار فضایی، آنالیز کریجینگ فاکتوری (FKA)، معدن کرومیت فاریاب

## Using the factorial Kriging analysis to filter spatial structures in gravity data acquired from Faryab chromite mine area

Azad, M. R.<sup>1</sup>, Koneshloo, M.<sup>2</sup> and Kamkar Rouhani, A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. in Exploration Engineering, Shahrood University of Technology, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

(Received: 12 Dec 2012, Accepted: 08 Oct 2013)

### Summary

Considering this fact that chromite masses possess high density, the gravity method is the most common geophysical method suggested for prospecting of chromite deposits. Usually, the result of superposition of several factors is observed in the acquired datum, which includes different spatial scales. The observed potential field could be assumed as the sum of the regional field, the residual field, and noise. Despite filtering out several

factors to obtain a bouguer anomaly map from gravity survey data, the obtained values are still the result of superposition of several components; these components are different from the view points of scale and importance. Definition and recognition of these components are essential in interpretation of geophysical surveys. There are various methods for processing and interpretation of bouguer gravity anomaly maps. These methods, e.g. potential field filters, are mostly based on mathematical analyses using trial and error technique. There are many different methods concerned with separation of the regional and residual components from the gravity map. Upward continuation technique is frequently used to identify regional anomalies and gravity variations of deeper recourses. The upward continuation is a general filter in processing geophysical data that can remove or considerably lessen the contribution of high-frequency, near-surface, shallow causative bodies from the gravity field, resulting in a smooth field reflecting the deeper causative bodies and/or density structures. This method is applied to separate a regional anomaly from the observed gravity. This filter is a low pass filter since the residual component, which is concerned with local anomalies, can be assumed as high frequency part of the signal. The main weakness of usual potential field filters comes from the fact that they cannot take into account spatial structure of components while filtering them.

Spatial structure of a variable is an indicator of the amount of data correlation with respect to the distances between the data. Factorial Kriging analysis (FKA) is principally a geostatistical filtering method that includes classic factorial analysis and geostatistics. The FKA method consists of three basic steps: variogram, factorial analysis and Kriging/co-Kriging. This method

- computes of the experimental variograms to choose the number of spatial scales to be considered and fit by theoretical models, (generally linear model of regionalization/coregionalization),
- applies the decomposition method on variance-covariance/variogram matrix of spatial components (generally principle component analysis/spectral decomposition),
- estimats the regionalized factors in order to determine the relative contribution of each factor for the estimation of a particular location and mapping.

Factorial Kriging decomposes the raw variable into as many components as the identified structures in the variogram. The basic step in FKA is experimental variogram calculation and fitting a valid model to this variogram. If the variogram is nested, it can be represented as a combination of several individual components variograms.

The FKA method includes two types of univariate and multivariate. In the case of a geophysical variable, the univariate type is applied. Therefore, the variogram in this case can be written as a linear combination of its components.

In this research, the gravity data, acquired from Faryab chromite mine area, are processed and interpreted using the FKA method. Based on this study, three components, which may represent regional, local, and noise components are defined and filtered based on spatial structure study. Moreover, two locations are proposed for further detailed exploration considering the extracted local component map. Also, the gravity data are processed using potential field filters. In this regard, different heights are considered in the upward continuation filter method applying on the gravity data, and then, the results are shown in the relevant maps. Low value gravity anomalies can be interpreted as the geological structures having low density or special geometric shapes such as a geo-anticline. High value gravity anomalies can be considered as densie masses like chromite lenses.

Finally, in this research work, the obtained results from applying the FKA method on the gravity data are compared with the potential field filtering results using the upward

continuation filter method. The basic difference between the upward continuation and the FKA methods is that the latter method takes into account the spatial structure of the data while the former does not. This study clearly indicates the capability of the FKA method in filtering gravity data.

**Keywords:** Gravity, Filter, Spatial Structure, Factorial Kriging Analysis (FKA), Faryab chromite mine

## ۱ مقدمه

اکتشاف ذخایر کرومیت است (جان، ۱۹۹۷). برای تعیین دقیق توده‌های بی‌هنجاری گرانی نیاز به پردازش و تفسیر دقیق نقشه‌های بی‌هنجاری بوگه حاصل از برداشت گرانی‌سنجی است. روش متداولی که برای این منظور به کار می‌رود، فیلترهای ژئوفیزیکی است. فیلترهای رایجی همچون ادامه فراسو و فروسو، مشتقات و روند سطحی عموماً برای تعیین بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای به کار گرفته می‌شوند (کلیربوت، ۱۹۸۵). نقطه ضعف عمده این فیلترها در نظرنگرفتن ساختار فضایی داده‌های برداشتی است. بنابراین برای پردازش و تفسیر دقیق‌تر بایستی روش‌هایی به کار برد که ساختار فضایی را نیز در نظر بگیرند و بتوانند تفکیک دقیقی از سیگنال و نوفه داده‌ها داشته باشند.

روشی که ساختار آن براساس رابطه فضایی داده‌ها شکل می‌گیرد، آنالیز کریجینگ فاکتوری است (مترون، ۱۹۸۲). این روش براساس تشخیص ساختارهای فضایی قادر است مؤلفه‌های یک نقشه بی‌هنجاری را تفکیک کند و سهم هر مؤلفه را از نقشه بی‌هنجاری کلی تعیین سازد (سندجیوی و گالی، ۱۹۸۵). این روش را اولین بار گالی و گردیل-نویه (۱۹۸۴) در تفسیر داده‌های مغناطیس به کاربرد گرفتند. در اکتشاف نفت و برای حذف نوفه داده‌های لرزه نیز می‌توان این روش را به کار برد (بورژ و ژانه، ۲۰۰۹). ژانه و ژان-لوک (۲۰۰۸) از این روش در تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی از روی داده‌های گرانی‌سنجی استفاده کرده‌اند، همچنین از این روش

کرومیت ماده اولیه حیاتی صنایع مهمی همچون فولاد، آلیاژهای غیر آهنی سخت، صنایع نسوز و ریخته‌گری است. چهار نوع کانسار کرومیت در جهان شناخته شده است که دو نوع آن به صورت لایه‌ای و عدسی‌های معدنی (تیپ کرومیت آلپی) و دو نوع دیگر ثانویه آن، به صورت لاتریت یا پلاسرها هستند، که نسبت به دو نوع اول، اهمیت کمتری دارند (کوگل و همکاران، ۲۰۰۶). تقریباً همه کانسارهای کرومیت ایران خاستگاه افیولیتی دارند. کمپلکس‌های افیولیتی ایران بخشی از کمربند افیولیتی تیتیس است که به بقیه افیولیت‌های آسیا از قبیل پاکستان در شرق و همچنین افیولیت‌های موجود در ناحیه مدیترانه از قبیل ترکیه، رودخانه ترودوس و شرق اروپا در غرب وصل می‌شود (یعقوب‌پور و حسن‌نژاد، ۲۰۰۶).

انتخاب روش مناسب در اکتشاف، یکی از عوامل مهم در اکتشاف ذخایر معدنی است. اکثر کانسارهای کرومیت استخراج شده در دهه اخیر کشف شده‌اند (یعقوب‌پور، ۲۰۰۵). توده‌های کانسنگ کرومیت آلپی عدسی‌های کرومیت به علت تاثیر عوامل زمین‌ساختی و شکل‌های نامنظم آنها، اهداف مشکلی برای اکتشاف هستند، روش‌های گرانی و الکتریکی مهم‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده هستند (کوگل و همکاران، ۲۰۰۶). با وجود آنکه سنگ‌های افیولیتی وزن مخصوص به نسبت زیادی دارند، با وجود این چگالی زیاد کانسنگ کرومیت آن را از سنگ درون‌گیرش قابل تمییز می‌سازد. بنابراین گرانی‌سنجی روش ژئوفیزیکی متداولی در

به‌مثابه روشی جایگزین به‌جای آنالیز طیفی در پردازش و تفسیر داده‌های گرانی استفاده شده است (شیلز و گوین، ۱۹۸۴). در این مقاله، ابتدا کلیاتی از منطقه مورد بررسی بیان می‌شود و سپس آنالیز کریجینگ فاکتوری برای داده‌های گرانی برداشتی به کار می‌رود و در نهایت نقشه‌های بی‌هنجاری گرانی حاصل از این روش با نقشه‌های حاصل از فیلترهای ژئوفیزیکی داده‌های گرانی مورد نظر مقایسه می‌شود.

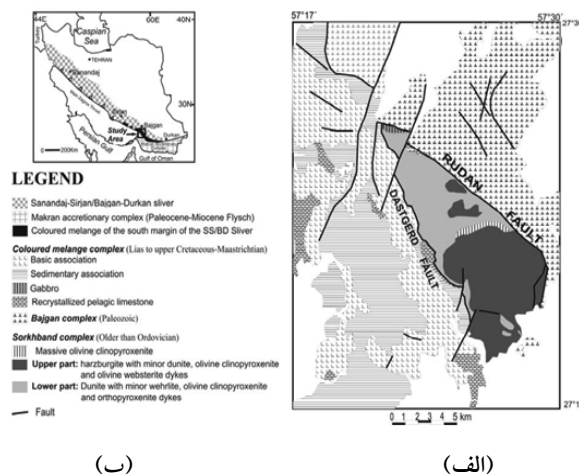
۲ بررسی موردی

۱-۲ معرفی و زمین‌شناسی منطقه

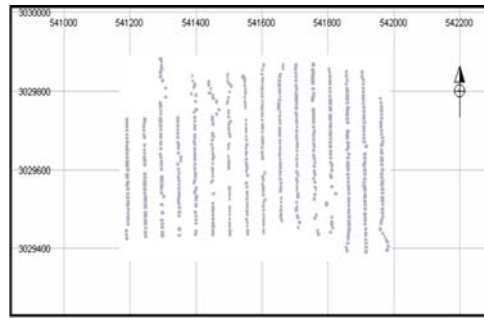
منطقه معدنی فاریاب در حد فاصل بین استان‌های کرمان و هرمزگان واقع شده است و مساحتی حدود ۶۰۰ کیلومتر مربع دارد. توده و منطقه فاریاب یک کمپلکس افیولیتی است که به کمربند سرخ‌بند معروف است. شکل ۱ الف، موقعیت کمپلکس سرخ‌بند را نشان می‌دهد. سنگ‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده این کمپلکس شامل دونت، کانسارهای کرومیت، توده‌ها و دایک‌های کلینوپروکسینیت الیون‌دار، ورلیت و دایک‌های

وبستریت اولیون‌دار است. این کمپلکس از دو بخش بالایی و پایینی تشکیل شده است (شکل ۱ ب). بخش بالایی شامل هارزبوژیت پرفیروکلاست ورقه‌ای همراه با دایک‌های دونت و دایک‌های اورتوپروکسینیت اما بدون اثر کانی‌سازی کرومیت و بخش پایینی دربرگیرنده توده‌های کرومیت است (نجف‌زاده و همکاران، ۲۰۱۰).

چندین توده کرومیت در زون توالی اولترامافیک سرخ‌بند رخ داده است که حاصل آن وجود ۱۰ معدن فعال کرومیت در منطقه است. توالی‌های اولترامافیک از شرق و شمال شرق به کمپلکس دگرگونی پالئوزوئیک با یک گسل معکوس (گسل رودان) و از غرب و جنوب غرب به کمپلکس افیولیتی مزوزوئیک با گسل معکوس دیگری (گسل دستگرد) محدود می‌شوند. کانسارهای کرومیت فاریاب بزرگ‌ترین کانسارهای کرومیت ایران هستند که با ذخیره‌ای معادل ۳۰ میلیون تن با عیار اقتصادی  $Cr_2O_3$  ۳۰٪ برآورد شده‌اند. این کانسارها به‌صورت لنزهای گسسته و روندی لایه‌ای با امتداد NE-SW تشکیل شده‌اند. لنزها در ابعاد گوناگون از cm تا km متفاوت‌اند (بومری و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۱. الف) موقعیت زون سرخ‌بند و ب) نقشه زمین‌شناسی زون سرخ‌بند (نجف‌زاده و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌ها و نیم‌رخ‌های برداشت داده‌های گرانی در منطقه فاریاب (نقاط یا ایستگاه‌های برداشت داده‌های گرانی با علامت "o" و نیم‌رخ‌های برداشت داده‌های گرانی با خطوط ممتد نشان داده شده است).

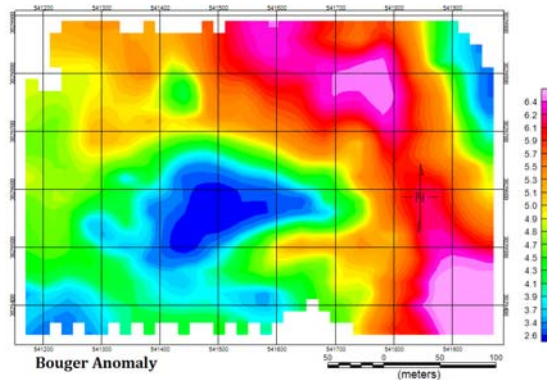
متوالی از یکدیگر در روی هر نیم‌رخ ۱۰ متر است. داده‌های گرانی برداشت شده به صورت میدان گرانی پس از اعمال تصحیحات لازم در وهله اول تبدیل به بی‌هنجاری بوگه (برحسب میلی‌گال) شده است. لازم به تذکر است که همه تصحیحات گرانی لازم روی داده‌های موجود، قبلاً صورت گرفته است.

شکل ۳ نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه در منطقه فاریاب را نشان می‌دهد. این نقشه با استفاده از کریجینگ درونیابی شده است و در نرم‌افزار SGeMS® رسم شده است. همان‌طور که از روی این نقشه دیده می‌شود، میدان گرانی بوگه در بخش‌های شمالی، شرق و جنوب شرقی منطقه (احتمالاً مرتبط با عدسی‌های کرومیت در زیر سطح زمین) بالاتر است و در بخش‌های مرکزی به طرف جنوب و جنوب غربی این منطقه کمتر می‌شود.

زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که عدسی‌های کرومیت منطقه فاریاب با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی در کمپلکس افیولیتی سرخ‌بند پراکنده شده‌اند و اکثر دایک‌های اورتوپروکسنیت و دونیت‌های بخش پایینی این زون بنا به بررسی‌های صورت گرفته مستعد کانی‌سازی کرومیت هستند.

## ۲-۲ داده‌های گرانی منطقه

داده‌های گرانی در نقاط یا ایستگاه‌های گوناگون در امتداد ۱۶ نیم‌رخ به منظور اکتشاف کرومیت در منطقه فاریاب، در منطقه معدن فطر فعلی برداشت شده‌اند. در شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌ها و نیم‌رخ‌های برداشت داده‌های گرانی در منطقه فاریاب نشان داده شده است. فاصله نیم‌رخ‌های متوالی از یکدیگر ۵۰ متر و فاصله ایستگاه‌های



شکل ۳. نقشه بی‌هنجاری بوگه فاریاب حاصل از درونیابی.

### ۳ آنالیز کریجینگ فاکتوری

آنالیز کریجینگ فاکتوری اساساً یک روش فیلترینگ است. این روش تلفیقی از آنالیز فاکتوری کلاسیک و زمین‌آمار است. آنالیز کریجینگ فاکتوری شامل سه مرحله مدل‌سازی واریوگرام‌های یک‌متغیره یا چندمتغیره، آنالیز مؤلفه‌های اصلی PCA و برآورد کوکریجینگ است. این روش برای ساختارهای تودرتو به کار می‌رود. منظور از ساختارهای تودرتو، برهم‌نهی واریوگرام‌های با دامنه‌های متفاوت است. این پدیده بیانگر عملکرد عوامل در مقیاس‌های متفاوت است. این ساختارهای تودرتو واریوگرام‌های تودرتو ایجاد می‌کنند. یعنی واریوگرامی که دارای بیشتر از یک ساختار واریوگرام باشد که هر ساختار نشان‌دهنده‌ی یک فرایند مجزا است (آرمسترانگ، ۱۹۹۸). به‌منظور بررسی کارایی آنالیز کریجینگ فاکتوری این روش روی داده‌های مصنوعی ژئوفیزیکی به کار برده شده است. سه ساختار فضایی معرف سه مؤلفه بی‌هنجاری ناحیه‌ای، بی‌هنجاری محلی داده‌ها و نوفه شبیه‌سازی شده و با نسبت‌های متفاوت، یک ساختار تودرتو تشکیل داده‌اند. سپس با استفاده از آنالیز واریوگرافی داده‌ها و با استفاده از روش فیلترینگ فضایی دوباره سه ساختار بازسازی شده است. نتایج مقایسه حاکی از همبستگی زیاد دوبه‌دوی مؤلفه‌ها است (آزاد و همکاران، ۱۳۸۹).

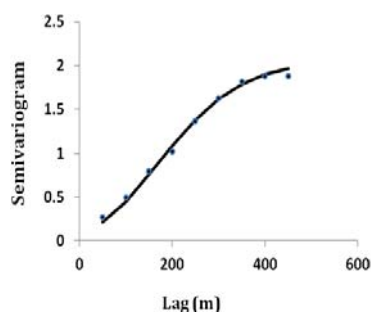
### ۱-۳ واریوگرافی داده‌ها

با استفاده از آنالیز کریجینگ فاکتوری مؤلفه‌های مؤثر در این نقشه تفکیک، و نقشه هر دام از مؤلفه‌ها شامل مؤلفه محلی، مؤلفه ناحیه‌ای و مؤلفه نوفه داده‌ها رسم می‌شود. اولین گام در آنالیز کریجینگ فاکتوری، محاسبه تغییرپذیری نسبت به فاصله و یا در واقع همان واریوگرام تجربی داده‌ها است (گووآرتز، ۱۹۹۳). ناهمسانگردی داده‌ها بررسی و در نهایت واریوگرام در دو جهت با سمت

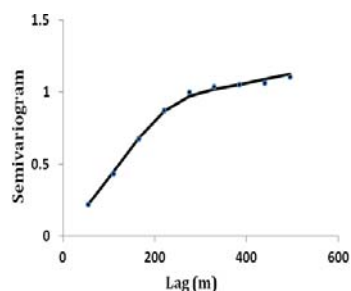
۵۵ درجه و سمت عمود بر آن رسم شده است. واریوگرام، دو نوع ناهمسانگردی را نشان می‌دهد: ناهمسانگردی منطقه‌ای و ناهمسانگردی هندسی. اثر ناهمسانگردی هندسی با تغییر مقیاس و ناهمسانگردی منطقه‌ای با بزرگ در نظر گرفتن دامنه مؤلفه بزرگ مقیاس در جهت با سقف کمتر رفع می‌شود. شکل ۴ واریوگرام تجربی و واریوگرام نظری به برازش داده شده به داده‌ها در دو جهت مشخص را نشان می‌دهد.

سپس در گام بعدی بایستی یک مدل واریوگرام معتبر به واریوگرام تجربی تودرتو برازش داده شود. بر این اساس، بهترین مدل به‌صورت رابطه (۱) به‌دست آمده است که ترکیبی از سه ساختار بزرگ مقیاس، کوچک مقیاس و ساختار اثر قطعه‌ای است؛

$$\gamma(h) = 0.12nugget + 0.8Cub\left(\frac{N55E}{475}, \frac{N35W}{340}\right) + 1.1Cub\left(\frac{N55E}{650}, \frac{N35W}{2400}\right) \quad (1)$$



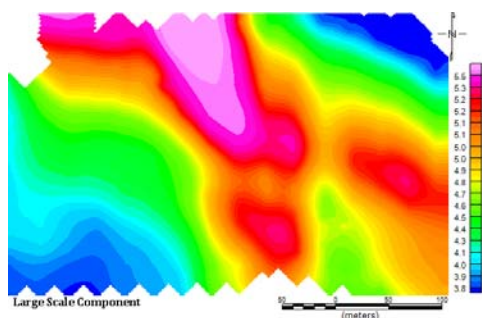
(الف)



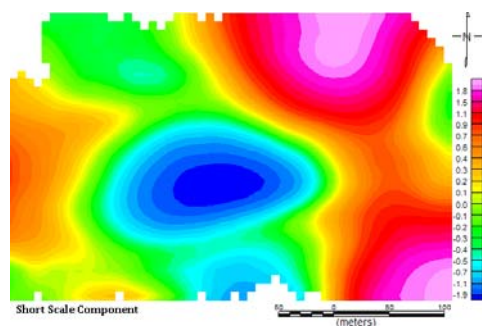
(ب)

شکل ۴. واریوگرافی داده‌ها، (الف) سمت ۵۵ و (ب) سمت ۱۳۵؛ واریوگرام تجربی (نقاط)، مدل واریوگرام (خط).

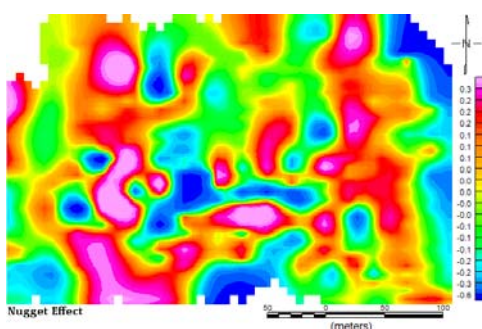
است. شکل ۵-ب ساختار تغییرات محلی یا در واقع بی‌هنجاری محلی داده‌ها را نشان می‌دهد. بعد از برآورد ساختار مکعبی دوم، مقادیر این ساختار را از داده‌های مرحله قبل کسر می‌کنیم و آنچه که از داده‌ها باقی می‌ماند ساختار اثر قطعه‌ای یا همان نوفه داده‌های گرانی است (شکل ۵-ج).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. نتایج کریجینگ فاکتوری: (الف) ساختار بزرگ‌مقیاس، (ب) ساختار کوچک‌مقیاس و (ج) اثر قطعه‌ای.

دو ساختار مکعبی یکی بزرگ‌مقیاس و دیگری کوچک‌مقیاس و یک ساختار اثر قطعه‌ای نتیجه واریوگرافی داده‌ها یا همان مدل واریوگرام معتبر برآزش داده شده به واریوگرام داده است. ساختار بزرگ‌مقیاس در راستای سمت ۵۵ درجه دارای دامنه واریوگرام ۶۵۰ متر و در راستای عمود بر آن دامنه ۲۴۰۰ متر دارد. این پیوستگی به‌وضوح در نتایج دیده خواهد شد. ساختار مکعبی دوم نیز در راستای اصلی، پیوستگی فضایی ۴۷۵ متری نشان می‌دهد و در راستای عمود بر آن دامنه واریوگرام ۳۴۰ متر است و بالاخره ساختار سوم، که معرف خطاهای اندازه‌گیری و یا یک ساختاری با دامنه کمتر از فاصله برداشت‌ها است. در گام بعد هدف فیلتر این ساختارها است.

### ۳-۲ اعمال فیلترینگ کریجینگ فاکتوری

پس از شناخت تعداد ساختارها و یا در واقع معرفی ساختار فضایی داده‌های گرانی، با استفاده از آنالیز کریجینگ فاکتوری سهم هر ساختار (مؤلفه) در داده‌های برداشت شده مشخص و نقشه تغییرات فضایی آن رسم می‌شود. لذا برای این کار بایستی تک‌تک ساختارها فیلتر شوند. عملیات فیلترینگ از ساختار بزرگ‌مقیاس شروع می‌شود. این ساختار تغییرات ناحیه‌ای اثر گرانی منطقه را نشان می‌دهد که در شکل ۵-الف آورده شده است. لازم به تذکر است که مقادیر هر ساختار به‌صورت نقطه‌ای برآورد شده‌اند و برای تولید نقشه بی‌هنجاری ناحیه‌ای، با کریجینگ برآورد می‌شوند. پس از محاسبه سهم ساختار بزرگ در هر نقطه بایستی مقادیر به‌دست آمده را از مقادیر اولیه داده‌ها کسر کرد؛ بنابراین اکنون داده‌ها تلفیقی از دو ساختار مکعبی مقیاس کوچک و ساختار اثر قطعه‌ای هستند. در مرحله بعد هدف فیلترینگ ساختار مکعبی کوچک‌مقیاس از مقادیر بازماند فیلترینگ گام پیشین

### ۳-۳ تحلیل و تفسیر نتایج کریجینگ فاکتوری

همان‌طور که از روی نقشه بی‌هنجاری گرانی درون‌یابی شده (بی‌هنجاری بوگه فیلتر نشده) در شکل ۳ مشخص است، نواحی شمالی، شرقی و جنوب شرقی دارای بی‌هنجاری گرانی زیادی است که دلیل آن وجود عدسی‌های کرومیت تفسیر شده است (کامکار روحانی، ۱۳۸۷). برای اظهار نظر دقیق‌تر بایستی مؤلفه‌های فیلتر شده را تفسیر کرد. ساختار بزرگ‌مقیاس یا در واقع مؤلفه ناحیه‌ای داده‌ها، روند تغییرات چگالی در سنگ میزبان را نشان می‌دهد. در نیمه شرقی تا شمالی می‌توان افزایش گرانی را مشاهده کرد که علت آن ممکن است وجود سنگ‌های اولترامافیک یا نزدیکی بیشتر آنها در این مناطق به سطح زمین باشد. ساختار کوچک‌مقیاس فیلتر شده نیز معرف مؤلفه محلی بی‌هنجاری گرانی است که در واقع مکان توده‌های کرومیت را نشان می‌دهد. در نیمه شرقی منطقه دو توده بزرگ یکی در شمال و دیگری در جنوب شرقی منطقه به وضوح دیده می‌شود که وسعت توده بالایی به مراتب بیشتر از توده جنوبی است. همچنین در غرب منطقه نیز احتمالاً بی‌هنجاری گرانی با شدت زیادی موجود است که اثراتی از آن در نقشه بی‌هنجاری گرانی (شکل ۳) دیده می‌شود. مرکز منطقه بی‌هنجاری گرانی با شدت کم را نشان می‌دهد که می‌تواند نشان از نبود عدسی‌های کرومیت در این منطقه باشد. ساختار اثر قطعه‌ای که نظم خاصی در توزیع شدت گرانی در آن دیده نمی‌شود، توزیع خطای موجود در داده‌ها یا مؤلفه‌ای فضایی با دامنه کوچک را نشان می‌دهد. در واقع نوفه داده‌ها می‌تواند بخشی از این مؤلفه باشد. بیشترین مقدار این مؤلفه، در بخش گوشه شمال غرب و بخش جنوبی منطقه به دست آمده است که علت آن برداشت داده

ناکافی از این مناطق است.

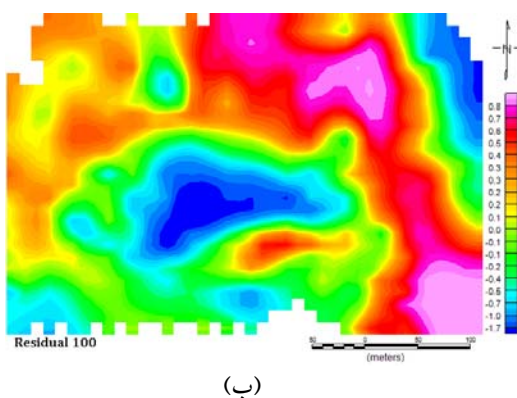
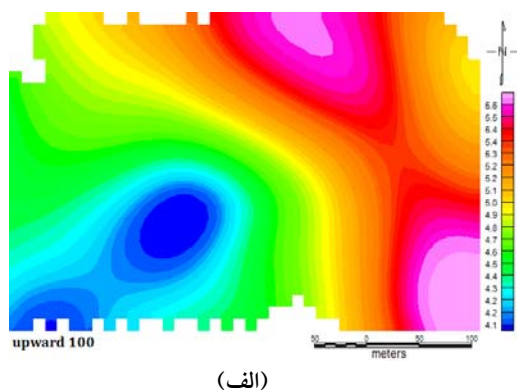
### ۳-۴ تفسیر داده‌ها با فیلترهای معمول ژئوفیزیکی

بررسی‌های تفسیری و تحلیلی داده‌های گرانی را کامکار روحانی (۱۳۸۷) عملی ساخت و با استفاده از فیلترهای معمول ژئوفیزیکی مشخص شد که عدسی‌های کرومیت به احتمال زیاد در بخش‌های شمالی (به خصوص شمال، شمال شرقی و شمال غربی)، شرقی و جنوبی (به خصوص جنوب و جنوب شرقی) منطقه قرار گرفته‌اند و اکثر بخش‌های مرکزی و جنوب غربی منطقه فاقد وجود عدسی‌های کرومیت هستند (کامکار روحانی، ۱۳۸۷).

به منظور تشخیص بی‌هنجاری‌های گرانی عمیق، از روش فیلتر ادامه گسترش رو به بالا (ادامه فراسو) استفاده شده که نتایج آنها در ادامه به‌طور خلاصه توضیح داده شده است. شکل ۶-الف، نقشه فیلتر گسترش رو به بالای میدان گرانی برای ارتفاع ۱۰۰ متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نقشه دیده می‌شود میدان گرانی در بخش جنوب غربی منطقه کمتر است و به‌صورت روندی از جنوب غربی به شمال شرقی، افزایش میدان گرانی قابل مشاهده است، به‌طوری‌که در شمال شرقی منطقه بیشترین مقدار بی‌هنجاری گرانی را می‌توان رؤیت کرد که علت آن ممکن است وجود عدسی‌های کرومیت در زیر سطح زمین باشد. برای تعیین بی‌هنجاری‌های گرانی کم عمق و یا در واقع بی‌هنجاری محلی گرانی، از روش‌های پردازش و تفسیر به کمک فیلترهای مشتقات قائم، روند سطحی، گریفین و ادامه گسترش رو به پایین (ادامه فرسو) استفاده می‌شود. با اعمال این فیلترها، نقشه‌های باقی‌مانده به دست می‌آیند که در آنها، بی‌هنجاری‌های گرانی محلی یا کم عمق، در صورت وجود، بارز یا مشهود هستند. در شکل ۵ ب، نقشه باقی‌مانده مربوط به فیلتر گسترش رو به بالا با ارتفاع ۱۰۰ متر آورده شده است.



کانسارهای کرومیت عدسی شکل با مجموعه افیولیت‌ها و سنگ‌های اولترابازیک نظیر پریدوتیت، دونیت، پیروکسینت و سرپانتینت و یا سنگ‌های آلتیره شده ناشی از آنها همراه هستند. سنگ‌های اولترابازیک این مجموعه در ارتباط با پوسته‌های اقیانوسی و شکاف‌های دریایی اند که در پی باز شدن گودال‌های ژرف و نفوذ توده‌های اولترابازیک در پوسته قاره‌ای، کرومیت همراه آنها به سطح یا نزدیک سطح زمین می‌رسد. بنابراین، با توجه به چگالی بیشتر کرومیت نسبت به سنگ‌های اطراف آن، انتظار می‌رود که کرومیت میدان گرانی باقی مانده بیشتری نسبت به اطراف داشته باشد.



شکل ۶. (الف) فیلتر گسترش رو به بالا با ارتفاع ۱۰۰ متر و (ب) نقشه باقی مانده گرانی.

همان گونه که در این نقشه می‌توان مشاهده کرد، بی‌هنجاری‌ها در نقشه باقی مانده برخلاف نقشه گسترش رو به بالا نامنظم تر و تعدد بی‌هنجاری‌ها نیز بیشتر شده است. همچنین این نقشه نشان می‌دهد که میدان گرانی در برخی بخش‌های مرکزی و شمال شرقی منطقه کم است. البته ذکر این نکته نیز لازم است که میدان گرانی زیاد در برخی از این بخش‌ها در کنار میدان گرانی کم دیده می‌شود. یک بی‌هنجاری منفی گرانی دقیقاً در مرکز منطقه وجود دارد که نشان از نبود کرومیت در این بخش از منطقه دارد ولی در نیمه راست منطقه، همان طور که در نقشه باقی مانده دیده می‌شود، می‌توان به وجود عدسی‌های کرومیت اذعان کرد.

با توجه به پردازش و تفسیر صورت گرفته روی داده‌های گرانی که در بالا به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفت، می‌توان نتایج زیر را در مورد وجود عدسی‌های کرومیت زیرزمینی در منطقه فاریاب بیان کرد. همان طور که تقریباً نقشه باقی مانده گرانی (شکل ۶-ب) نشان می‌دهد، میدان گرانی در اکثر بخش‌های مرکزی و جنوب غربی و شمال شرقی منطقه نسبت به بخش‌های شمالی، شرقی و جنوبی کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدسی‌های کرومیت به احتمال زیاد در بخش‌های شمالی (به خصوص شمال، شمال شرقی و شمال غربی) و بخش‌های شرقی و جنوبی (به خصوص جنوب شرقی) منطقه قرار گرفته‌اند و اکثر بخش‌های مرکزی و جنوب غربی منطقه فاقد وجود عدسی‌های کرومیت هستند. لازم به تذکر است که برای تفسیر و بیان موقعیت دقیق تر عدسی‌های کرومیت منطقه فاریاب در زیر سطح زمین به داشتن مختصر اطلاعات بیشتری از جمله اطلاعات زمین‌شناسی جزئی و بزرگ مقیاس از این منطقه نیاز است. از نظر زمین‌شناسی،

## ۵ مقایسه نتایج آنالیز کریجینگ فاکتوری و فیلترهای ژئوفیزیکی

نقشه ساختار کوچک مقیاس فیلتر کریجینگ فاکتوری را می توان با نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه ناشی از فیلتر ژئوفیزیکی مقایسه کرد (شکل ۷). در هر دو نقشه تقریباً موقعیت عدسی های کرومیت با شدت گرانی زیاد و یکسان است، اما تفاوت هایی نیز بین دو نقشه وجود دارد. در نقشه باقی مانده بعضاً مناطقی با گرانی کم در کنار مناطق با گرانی زیاد دیده می شود که این نمی تواند توجیه فیزیکی خاصی داشته باشد، مگر وجود گسل ها در این مناطق که البته وجود چنین پدیده ای را تحقیقات زمین شناسی در مناطق مورد بحث تأیید نکرده است. نقشه ساختار کوچک مقیاس پیوستگی فضایی داده ها را به وضوح نشان می دهد و در آن می توان گستردگی و ابعاد عدسی های کرومیت را تا حدودی تشخیص داد. این در حالی است که نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه نظم خاصی در توزیع ساختارهای زمین شناسی و به طور خاص تر عدسی های کرومیت نشان نمی دهد. همچنین در تفسیر ژئوفیزیکی بسته به دید کارشناس می توان چندین نقشه تولید کرد که انتخاب بهینه ترین آنها سلیقه ای است در حالی که پیامد نتایج کریجینگ فاکتوری برای هر ساختار فضایی، فقط یک انتخاب است. با توجه به تشکیل عدسی های کرومیت همراه با افیولیت ها و سنگ های اولترابازیک مانند پریدوتیت، دونیت، پیروکسینت و سرپانتینت و یا سنگ های آلتزه شده ناشی از آنها که به علت بالا آمدن کرومیت همراه با نفوذ توده های اولترابازیک به سطح یا نزدیک سطح زمین، رخ داده و همچنین، با توجه به چگالی بیشتر کرومیت نسبت به سنگ های اطراف آن، می توان موقعیت عدسی های کرومیت با شدت گرانی زیاد را در هر دو نقشه مورد مقایسه (نقشه ساختار کوچک مقیاس حاصل از کریجینگ

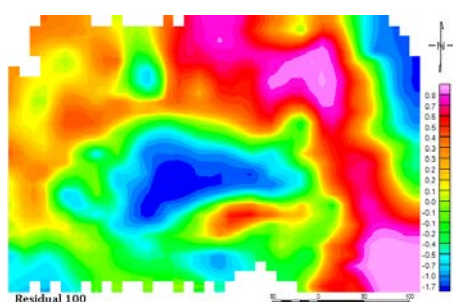
فاکتوری و نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه ناشی از فیلتر ژئوفیزیکی) تشخیص داد. خوشبختانه به این لحاظ، هر دو نقشه مورد نظر مشابهت و تطابق خوبی با هم دارند اما با توجه به تحقیقات زمین شناسی صورت گرفته، به ویژه ساختار نسبتاً منظم کرومیت در منطقه مورد بررسی، نقشه ساختار کوچک مقیاس، نسبت به نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه، انطباق بیشتری با اطلاعات زمین شناسی منطقه نشان می دهد. لازم به ذکر است که در نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه، نظم خاصی در ساختار عدسی های کرومیت مشاهده نمی شود اما پیوستگی فضایی داده ها و نظم خاص در ساختار عدسی های کرومیت، به ویژه گستردگی و ابعاد آنها به وضوح در نقشه ساختار کوچک مقیاس دیده می شود. اطلاعات زمین شناسی کانسارهای کرومیت در منطقه مورد بررسی حکایت از ساختار به نسبت منظم لایه ای و نواری شکل کرومیت دارد تا ساختار نسبتاً نامنظم انبانی شکل کرومیت (که اغلب در سایر مناطق کرومیت دار ایران دیده می شود). این ویژگی زمین شناسی کرومیت در منطقه مورد بررسی تطابق بیشتری با نقشه ساختار کوچک مقیاس دارد تا نقشه بی هنجاری باقی مانده بوگه.

به منظور مقایسه نتایج بی هنجاری ناحیه ای حاصل از دو روش مورد بحث، نقشه گسترش رو به بالا در نتیجه اعمال فیلتر ژئوفیزیکی و نقشه ساختار فضایی بزرگ مقیاس حاصل از کریجینگ فاکتوری در شکل ۸ در نظر گرفته می شود. نقشه گسترش رو به بالا با ارتفاع ۱۰۰ متر در قسمت شمال شرق منطقه تقریباً شدت زیاد گرانی را نشان می دهد، در حالی که نقشه بی هنجاری ساختار بزرگ مقیاس فیلتر زمین آماری در همین منطقه، کمترین شدت گرانی را آشکار می سازد. از نظر شدت مقدار گرانی تقریباً دو نقشه شبیه هم هستند ولی از نظر نظم ساختاری، هموارسازی بیشتری در فیلتر ژئوفیزیکی

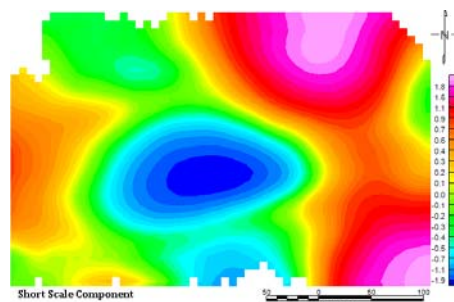
در بخش‌های زیرین قرار گرفته‌اند و عدسی‌های کرومیتی را در درون خود جای داده‌اند. توده‌های اولترامافیک منطقه معمولاً سرپانتینیته شده اما دارای درجات متفاوتی هستند. با توجه به این اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقه فاریاب، به نظر نمی‌رسد که ساختارهای ناحیه‌ای منطقه مورد بررسی، آن طور که نقشه گسترش رو به بالا نشان می‌دهد، از نوع هموار و منظم باشند و بنابراین نقشه ساختار فضایی بزرگ مقیاس حاصل از کریجینگ فاکتوری، تطابق بیشتری با اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقه مورد بررسی دارد. از دیگر مباحثی که می‌توان در مقایسه دو روش مطرح کرد، تشخیص مؤلفه نوفه و نقشه توزیع خطا با استفاده از فیلتر زمین‌آماری در منطقه است که فیلترهای ژئوفیزیکی قادر به تفکیک مجزای آن نیستند.

مشاهده می‌شود. شایان ذکر است همانند آنچه که در مؤلفه محلی داده گفته شد، با تغییر ارتفاع فیلتر گسترش رو به بالا، نتایج متفاوت و انتخاب بی‌هنجاری نهایی به دید کارشناس وابسته است. اما آنچه مسلم است با افزایش ارتفاع فیلتر گسترش رو به بالا، تعداد و تغییرات ساختارهای ناحیه‌ای، کمتر و به عبارت دیگر، همواری و نظم ساختارهای ناحیه‌ای، بیشتر خواهد شد.

اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای حاکی از آن است که در مجموعه‌های افیولیتی منطقه فاریاب، بخش‌های متفاوت دنباله افیولیتی را به صورت تقریباً کامل می‌توان دید. از جمله آهک‌های پلاژیک دگرگون شده، نهشته‌های رادیولاریتی (مربوط به لایه دنباله افیولیتی) پیلولواهای ولکانیکی مشخص، گابروهای لایه‌ای و همچنین توده‌های هارزبورژی، دونیتی و پیروکسنیتی که

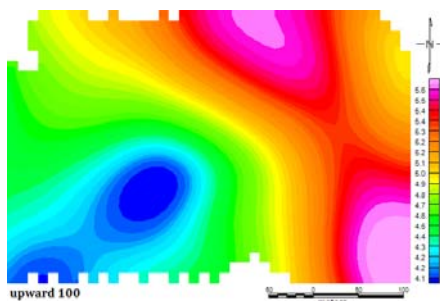


(ب)

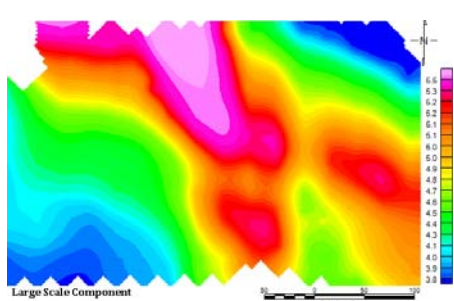


(الف)

شکل ۷. مقایسه مؤلفه محلی دو روش (الف) روش FKA و (ب) فیلتر ژئوفیزیکی.



(ب)



(الف)

شکل ۸. مقایسه مؤلفه ناحیه‌ای دو روش، (الف) روش FKA و (ب) فیلتر ژئوفیزیکی.

## ۶ نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید برای پردازش و تفسیر نقشه‌های بی‌هنجاری گرانی در ژئوفیزیک عرضه شده است که براساس آنالیز واریوگرام و فیلتر ساختارهای فضایی صورت می‌گیرد. براساس تشخیص ساختارهای فضایی داده‌ها از روی مدل واریوگرام تودرتو و، فیلتر هر کدام از این ساختارها بر مبنای نظریه آنالیز کریجینگ فاکتوری، بی‌هنجاری ناحیه‌ای، بی‌هنجاری محلی و نوفه داده‌های گرانی برداشت شده از توده کرومیت منطقه فاریاب تشخیص داده شده‌اند و تغییرات آنها بررسی شده است. سپس همین داده‌ها با استفاده از فیلترهای معمول ژئوفیزیکی نیز تفسیر و در نهایت نتایج حاصل از این روش و فیلترهای ژئوفیزیکی مقایسه شده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده از این مقایسه، آنالیز کریجینگ فاکتوری را می‌توان در حکم روشی قوی در جدایش سیگنال از نوفه داده‌های گرانی (و مغناطیس) به‌کاربرد.

## مراجع

- آزاد، م.، کنشلو، م.، کامکار روحانی، ا. و آزاد، ع.، ۱۳۸۹، کاربرد آنالیز کریجینگ فاکتوری برای جدایش ساختارهای فضایی، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- 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.
- Armstrong, M., 1998, Basic linear geostatistics, Springer Berlin Heidelberg, 155p.
- Boomeri, M. Nakashima, K. and Palangsevar, S., 2010, Chromite ore deposits from Sorkhband ultramafic sequence, Faryab, southern Iran, Japan Geoscience Union Meeting, Tokyo.
- Bourges, M. and Jeannee, N., 2009, M-Factorail kriging for seismic data noise attenuation, 11<sup>th</sup>
- International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil.
- Chiles, J. P. and Guillen, A., 1984, Variogrammes et krigees pour la gravimetrie et le magnetism, Sciences de le Terre Vol-20.
- Claerbout, J. F., 1985, Fundamentals of geophysical data processing, With Applications to Petroleum Prospecting, Blackwell Scientific Publications.
- Galli, A. and Gerdil-Neuillet, F., 1984, Factorial Kriging analysis: a substitute to spectral analysis of magnetic data, In Geostatistics for natural resources characterization, 2, 543-557.
- Goovaerts P., Sonnet P. and Navarre, A., 1993, Factorial Kriging analysis of springwater contents in the Dyle river basin, Belgium, Water Resources Research, 29(7), 2115-2125.
- John, M. R., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley. 796 pages
- Jeannee, N. and Jean-Luc, M. 2008, Applying geostatistical filtering techniques to nearsurface geophysics: tow examples for refraction surveying and gravity, 70th EAGE conference & Exhibition-Rome, Italy.
- Kogel, J. E., Trivedi, N. C. and Barker, J. M., (Eds.), 2006, Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Users. SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration), 1556p.
- Matheron, G., 1982, Pour une analyse krigeante des données régionalisées, Report of Centre de Geostatistique, ENSMP, France: 1-30.
- Najafzadeh, A., Arvin, M., et al., 2010, Evidences of melt-rock interaction during petrogenesis of wehrlites from Sorkhband ultramafic complex, southern Kerman, Iran: Constraints on mineral and whole rock chemistry, XI RMS General Meeting and the Fedorov Session, Saint Petersburg, Russia, 223-225.
- Sandjivy, L., and Galli, A., 1985, Analyse Krigeante et analyse spectral, Sciences de la Terre, Série Informatique, Géologique, 21, 115-124.
- Yaghubpur, A., 2005, Mineral deposits of Iran: a brief review, in mineral resources and development, mineral resources and development, Edited by G. S. Roonwal, K. Shahriar and H. Ranjbar, Daya, 191-202.
- Yaghubpur, A. and Hassannejad, A. A., 2006, The spatial distribution of some chromite deposits in Iran, Using Fry Analysis, Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 17(2), 147-152.