

تفسیر کیفی آنومالیهای مغناطیسی منطقه تیکمهداش با استفاده از تحلیل واریوگرام

یوسف شرقی '، میلاد حسنی ^{۲®}و امیر امیرپور اصل^۳

۱–دانشیار؛ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران ۲– دانشجوی دکتری؛ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران ۳–استادیار؛ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: sharghi@sut.ac.ir

واژگان کلیدی

مغناطيس سنجى

آنومالي ناحيهاي

كريجينگ فاكتوري

آنومالی محلی

زمينآمار

تيكمەداش

چکیدہ

یکی از فرضیههای عمومی در تفسیر دادههای شدت کل میدان مغناطیسی این است که این دادهها از برهم-نهی میدانهای مغناطیسی ساختارهایی بوجود میآیند؛ که با اشکال متفاوت و در عمقهای مختلفی قرار دارند. این ساختارهای زمین شناسی متفاوت، ایجاد کننده آنومالیهای محلی و ناحیه ای هستند. جداسازی آنومالیهای ناحیهای و محلی همواره به عنوان یکی از مراحل اساسی در تفسیر دادههای مغناطیسی مطرح است. بدین منظور روشهای مختلفی ارائه شده؛ که از جمله آنها میتوان به روشهای گرافیکی، برازش سطح چند جملهای و روشهای مبتنی بر تبدیلات فوریه اشاره کرد. یکی از مشکلات موجود در استفاده از روشهای مبتنی بر تبدیلات فوریه نیاز به وجود دادهها بر روی یک شبکه منظم است. نیاز به اطلاعات اولیه، تجربه مفسر و همراه بودن سعی و خطا در انتخاب پارامترهای مناسب از جمله عواملی هستند که نتایج حاصل از این روشها را تحت تاثیر قرار میدهند. در این پژوهش از روش زمینآماری کریجینگ فاکتوری برای جداسازی آنومالیهای محلی از آنومالیهای ناحیهای دادههای مغناطیسی استفاده شده است. این روش فاقد محدودیت-های موجود در روشهای مبتنی بر تبدیلات فوریه است. برای بررسی کارایی این روش، دادههای مغناطیسی مربوط به محدوده اکتشافی تیکمهداش در شمالغرب ایران، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. روش کریجینگ فاکتوری بر روی دادههای مغناطیس برگردان به قطب شده منطقه مورد نظر اعمال و آنومالیهای ناحیهای و محلی از هم تفکیک شدند. سپس نقشه مربوط به هر کدام از مولفهها به صورت جداگانه ترسیم شد. شواهد حاکی از تشخیص چندین گسل در محدوده، با استفاده از نقشه آنومالی ناحیهای حاصل از بکارگیری روش کریجینگ فاکتوری است؛ که در نقشههای میدان مغناطیسی منطقه قابل مشاهده نبودند. همچنین به منظور بررسی کارایی روش مذکور، نتایج آن با فیلتر ادامه فراسو نیز مورد مقایسه قرار گرفت؛ که شواهد نشان میدهد این روش نسبت به ادامه فراسو با دقت بالاتری محل گسلهها را مشخص می کند و بر خلاف ادامه فراسو به صورت سعی و خطا نمیباشد. در ادامه نتایج حاصل از روش مذکور با روش فیلتر بالاگذر به عنوان یک روش استاندارد، در بررسی آنومالیهای محلی مقایسه شد و مزایای استفاده از روش کریجینگ فاکتوری مورد بررسی قرار گرفت. نقشه آنومالی محلی تولید شده با استفاده از روش کریجینگ فاکتوری فاقد آنومالیهای کاذبی است که در استفاده از فیلتر بالاگذر ظاهر میشوند.

۱– مقدمه

جداسازی آنومالیهای مغناطیسی به مولفههای محلی و ناحیهای ، یکی از مهمترین موضوعات در تفسیر دادههای مغناطیسی است. یکی از فرضیههای عمومی که توسط مفسران در نظر گرفته می شود، این است که دادههای مغناطیس اندازه گیری شده از برهمنهی آنومالیهای مختلفی ایجاد می شوند؛ که در عمق های مختلفی قرار دارند (Keating and Pinet, 2011). بنابراین جداسازی آنومالیهای ناحیهای از آنومالی های محلی همواره به عنوان یکی از مسائل مهم در تحلیل داده-های مغناطیس مطرح است. تاکنون روشهای مختلفی جهت جداسازی آنومالی ناحیه ی از محلی ابداع شدهاند؛ که از جمله آنها می توان به روشهای گرافیکی، برازش سطح چندجملهای' (Beltrão et al., Mickus)، كمترين خمينه⁷ (1991; Mallick and Sharma, 1999)، كمترين خمينه et al., 1991)، الگوريتم معكوس مغناطيسي سه بعدي، المان محدود["] G.) ^{*}مابقت يافته), روش فيلتر مطابقت يافته) (Mallick and Sharma, 1999) Chen et al., 2016) اشاره کرد. امروزه از روش های مبتنی بر تبدیلات فوريه همچون ادامه فراسو⁶، بطور گسترده توسط مفسران برای جداسازی آنومالی ناحیه ای و محلی استفاده می شود (Umeanoh et al., 2018). هر چند سادگی اعمال روشهای مبتنی بر تبدیلات فوریه به عنوان یک مزیت در نظر گرفته می شود؛ اما منظم بودن دادهها به عنوان شرط اصلی برای استفاده از آنها یکی از معایب این روش هاست. (Dentith and Mudge, 2014). اخیراً استفاده از روشهای تبدیل موجک⁵ (Xu et al., 2009) نیز با توجه به داشتن قابلیت چند مقیاسی مورد بررسی قرار گرفتهاند. هر کدام از روشهای مذکور دارای مزایا و معایبی هستند؛ اما نمی توان بدون در نظر گرفتن اطلاعات کیفی و کمی زمینشناسی بطور قطعی بیان کرد که کدام روش نسبت به دیگری برتری دارد (Nabighian et al., 2005). روش تجزیه مد تجربی (EMD) که توسط هووانگ و همکاران (۱۹۹۸) معرفی شده و یک روش تحلیل طیفی سیگنال در فضای فرکانس است، روش دیگری است که برای جداسازی آنومالیهای محلی و ناحیهای گرانی مورد استفاده قرار گرفته است (Chen et al., 2017; Hassan, 2005). با توجه به این که این روش توابع مد ذاتی متعددی را به عنوان مقیاس-های مختلف داده ارائه میدهد، انتخاب مولفههای محلی و ناحیهای از بین این توابع نیاز به اطلاعات تکمیلی دیگری دارد. کریجینگ فاکتوری یک روش زمینآماری است؛ که برای فیلتر کردن توسعه یافته است. در واقع كريجينگ فاكتورى يك روش فيلتر كردن فضايي است؛ كه بر اساس واریوگرام عمل مینماید. امروزه روش کریجینگ فاکتوری در

زمینههای مختلف به صورت گسترده استفاده می شود، که از جمله آنها میتوان به استفاده از این روش در پروژههای نفتی برای بررسی نوفه، به نقشه در آوردن سطح دریاها (de Carvalho et al., 2019)، علوم مربوط به خاک (Bevington et al., 2019)، بررسی بازدهی سیستم حمل و نقل (Lindner et al., 2016)، تخمين آلودگی اجزاء سمی خاک (Zhou et al., 2016) اشاره کرد. آزاد و همکاران نیز نتایج اعمال روش کریجینگ فاکتوری و ادامه فراسو را بر روی دادههای گرانی منطقهای در ویتنام مورد بررسی قرار دادند (Azad et al., 2016). در این پژوهش از روش زمین آماری کریجینگ فاکتوری، برای جداسازی آنومالیهای ناحیهای و محلی دادههای مغناطیس تیکمهداش استفاده شده است. باید توجه داشت که آنومالیهای مغناطیسی بدلیل خاصیت دوقطبی پیچیدگی بیشتری نسبت به آنومالیهای گرانی دارند. این روش به نامنظم بودن شبکه دادهها حساس نیست و از روی ساختارهای موجود در واریوگرام رسم شده میتوان آنومالی محلی و ناحیهای را تشخیص داد. در این پژوهش مزیتهای نسبی این روش بررسی شده و در انتها عملكرد این روش با فیلتر بالاگذر مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- روش پژوهش

در راستای انجام این پژوهش ابتدا مسائل اساسی مربوط به کریجینگ فاکتوری مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه این روش بر روی دادههای واقعی مغناطیسی اعمال و نتایج آن با فیلترهای ژئوفیزیکی مقایسه شده است. علم زمین آمار در دهه شصت میلادی و اولین بار توسط ماترون برای بررسی برخی از مسائل در علوم مهندسی معدن مطرح شد، که آمار کلاسیک قادر به پاسخگویی به آنها نبود. در علم زمین آمار محل قراگیری نمونهها نسبت بهم دارای اهمیت است. امروزه زمین آمار کاربردهای مختلفی از تهیه و ایجاد نقشه و بررسی و مدیریت پیدا کرده است (Oliver and Webster, 2015).

۲-۱- تابع واريوگرام

زمین آمار بر این فرض اساسی استوار است که نمونههایی که در فواصل نزدیک تر بهم قرار دارند، مقادیر نزدیکتر بهم خواهند داشت. این فرض زمانی درست خواهد بود که ارتباط موجود میان مقادیر نمونه را بتوان بصورت تابعی بر اساس فاصله بیان کرد (Gandhi and Sarkar, جفت 2016). به تابعی که به بررسی تغییرات فضایی میان مقادیر جفت نمونهها می پردازد، تابع واریو گرام گفته می شود. بنابراین تابع واریو گرام بصورت عددی می تواند ارتباط فضایی در یک متغیر زمین شناسی را بیان کند.

اگر Z(x) مقدار یک متغیر ناحیه ی Z در محل x باشد و همچنین Z(x) مقدار متغیر X دورتر از محل x باشد، تابع Z(x + h) واریوگرام بصورت زیر نشان داده می شود:

¹ Polynomial surface fitting

² Minimum curvature

³ Finite element

⁴ Match filtering

⁵ Upward continuation

⁶ Wavelet transform

$$\gamma(h) = (\frac{1}{2n(h)}) \sum_{i}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$
(1)

که در آن n(h) تعداد جهت نمونههایی است که در فاصله h از هم قرار دارند (n(h) تعداد جهت نمونههایی است که در فاصله n(h)

۲-۲- کریجینگ

کریجینگ به عنوان بهترین تخمینگر خطی نااریب شناخته می شود^ا (Salarian et al., 2019). این تخمین مبتنی بر تحلیل واریوگرام است. با استفاده از کریجینگ می توان مقدار یک نقطه مجهول را با استفاده از وزن دهی به نمونه های موجود در همسایگی آن نقطه محاسبه نمود:

$$\hat{Z}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \tag{(7)}$$

که در آن $(\hat{Z}(x)$ مقدار تخمین نااریب، λ_i وزن مربوط به نمونههای اطراف نقطه مورد نظر و $(X(x_i)$ مقادیر نمونههای اندازه گیری شده هستند. همانطور که اشاره شد، روش کریجینگ یک روش وزندهی به نمونههای اطراف است و این وزنها به گونهای انتخاب میشوند که دو شرط زیر برقرار باشند.

اریب از
$$Z(x)$$
 باشد:
 $E[(\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}))] = 0$ (۴)

۲- واریانس تخمین کمینه باشد:

 $E[(\hat{Z}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}))^2] = minimum \qquad (\Delta)$

۲-۳- کریجینگ فاکتوری^۲

کریجینگ فاکتوری یکی از روشهای زمین آماری است، که از آن در علوم مختلف همچون هیدرولوژی (Sandjivy, 1984) (P Goovaerts et al., 1993) و همچنین ژئوفیزیک (Tingting,) ژئوشیمی (Sandjivy, 1984) و همچنین ژئوفیزیک (1997) استفاده میشود. استفاده از کریجینگ فاکتوری معمولاً به عنوان یک روش فیلتر کردن در علم زمین آمار مطرح می گردد. تغییرات فضایی میتوانند تحت مقیاسهای مختلف و یا درجهای از اندازههای مختلف اتفاق بیفتند که دلیل آن، تنییرات خواص فیزیکی در مقیاسهای متفاوت است. در هر ناحیه ممکن است منابع و یا مقیاسهای مختلفی از تغییرات وجود داشته باشد (Webster and Oliver, 2007). این تغییرات تودرتو را میتوان به صورت واریوگرام تودرتو^۳ نمایش داد. اساس تغییرات تودرتو به این صورت است که یک جامعه را میتوان به دو یا چند کلاس تقسیم کرد. یک متغیر تصادفی مشخص مانند (x) میتواند به عنوان مجموعهای از چند فرآیند مستقل از هم در نظر

- 2 Factorial kriging
- 3 Nested variogram

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۱، ۱۴۰۰.

گرفته شود که یکی می تواند در برگیرنده دیگری باشد، ولی با ویژگیها و خصوصیات متفاوت از هم و در مقیاس فضایی متفاوت از هم می توانند قرار داشته باشند (Pierre Goovaerts, 1997). در این شرایط واریوگرام حاصله از Z(x) می تواند به صورت مجموعهای از چند واریوگرام باشد:

$$\gamma(h) = \gamma^1(h) + \gamma^2(h) + \dots + \gamma^s(h) \tag{(5)}$$

که در آن عددهای بالانویس نشان دهنده عددهایی در تفکیک و جدا بودن مدلهای واریوگرامها از هم است و مربوط به توان واریوگرام نمی باشد. بنابراین کریجینگ فاکتوری را میتوان به عنوان عملیات فیلتر کردن در نظر گرفت؛ که متغیر تصادفی Z(x) را به صورت مجموعههای متغیر تصادفی سازنده آن در نظر می گیرد:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{p} Y_i(x) \tag{Y}$$

در اغلب موارد Z(x) دارای میانگین غیر صفر است بنابراین برای ساده-تر کردن موضوع بهتر است میانگین را به عنوان یک مولفه جدا در نظر گرفت:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{p} Y_i(x) + M(x)$$
^(A)

که در آن M(x) میانگین Z(x) بوده و تمام مولفههای خروجی دارای میانگین صفر خواهند بود (Shamsipour et al., 2017). در استفاده از کریجینگ فاکتوری تمام مولفههای خروجی دارای شرط ارتوگونال خواهند بود. بدین معنی که مولفههای خروجی مستقل از هم در نظر گرفته میشوند: (۹)

 Y_i و Y_i تابع کواریانس متقابل بین مولفههای Y_i و Y_i است. روندنمای انجام روش بر روی دادههای مغناطیسی در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شدهاست.

۳- زمینشناسی منطقه تیکمهداش

محدوده اکتشافی تیکمهداش در زون ساختاری البرز-آذربایجان و در منطقه طلادار میانه قرار دارد که از نظر گسترش از شرق شهرستان میانه آغاز شده و تا غرب بستانآباد ادامه داشته و همچنین از شمال به دامنه شمالی رشته کوه بز قوش محدود میشود. از نظر زمینشناسی تقریباً بخش عمده منطقه مورد بررسی را سنگهای آتشفشانی مربوط به زمان ترشیری تشکیل میدهند. به دنبال فاز کوهزایی لارامید، به وقوع پیوسته و سبب بیرون ریختن گدازههای آتشفشانی از شکاف-های متعدد شده است. این ولکانیکها که بیشتر گستره محدوده را تشکیل میدهند شامل گدازههای لاتیت، تراکیآندزیت، بازالت، داسیت و ریولیت همراه با سنگهای پیروکلاستیک هستند. تودههای نفوذی متعلق به الیگوسن در بخش خاوری منطقه گسترش زیادی ندارند؛ ولی

¹ Best Linear Unbiased Estimator

شرقی و همکاران، تفسیر کیفی آنومالیهای مغناطیسی منطقه تیکمهداش با استفاده از تحلیل واریوگرام ، صفحات 65-75.

به سمت محدودههای مجاور در بخشهای غربی (به خصوص در جنوب بستانآباد)، این تودهها در سطح گستردهای ولکانیکهای ائوسن را قطع کرده و باعث دگرسانیهای شدید و کانیزایی طلا و مس در منطقه شدهاند. عامل دیگر دگرسانی در سنگهای ائوسن، تزریقات نیمه عمیق به صورت گنبد و یا سیل بوده است. از نظر زمینشناسی قدیمی ترین واحد سنگی موجود در محدوده اکتشافی تیکمهداش واحدهای آتشفشانی و پیروکلاستیک با سن ائوسن هستند؛ که با روند شمال غربی–جنوب شرقی در بخش مرکزی محدوده رخنمون دارند. در مجاورت بلافصل این واحدهای ولکانیکی، توده نفوذی گرانیتوئیدی با سن الیگوسن و با روند کلی موازی با روند گسلها قرار دارد. امتداد ساختاری رگههای بارور غالباً همراستا با گسل شمال شرقی–جنوب غربی (گسل F1) است. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل ۲



شکل ۱: روندنمای اعمال کریجینگ فاکتوری بر روی دادههای

مغناطيسي.



شکل ۲: نقشه زمینشناسی محدوده مورد مطالعه (دو دانگه و همکاران، ۱۳۹۸).

کانیزایی پلیمتال در این محدوده از نوع هیدروترمال (اپیترمال کم سولفیدی) رگهای با الویت طلا، مس و نقره است (!Error ! سنگ میزبان این رگههای سیلیسی کانهدار واحدهای ولکانیکی ائوسن و در بعضی بخشها توده-های گرانیتوئیدی الیگوسن است. ضخامت رگههای سیلیسی از یک سانتیمتر تا بیش از یک متر متغیر است. کانههای قابل مشاهده در سایر رگهها از نوع سولفیدی و شامل پیریت و کالکوپیریت است. به دلیل اکسیداسیون کانههای سولفیدی کالکوپیریت و پیریت، کانههای ثانویه مس از قبیل مالاکیت و آزوریت و همچنین اکسید آهن در سطح رگهها تشکیل شدهاند.



شکل ۳: شواهدی از کانیزایی مس بر روی رگههای سیلیسی در محدوده مورد مطالعه.

۴- دادههای مغناطیسی تیکمهداش

مساحتی در حدود چهل هکتار با پروفیل هایی با فاصله ۲۰ متر و فاصله ایستگاهی حدود ۱۰ متر تحت پوشش دادهبرداری قرار گرفته و در طی آن حدود ۲۰۰۰ داده مغناطیسی برداشت شد که در شکل ۴ آنومالی مغناطیس کل منطقه نشان داده شده است و پس از انجام تصحیات مرسوم مانند حذف نوفه ها و داده های پرت، تصحیح روزانه و فیلتر کاهش به قطب (زاویه میل ۵۵/۴ و زاویه انحراف ۵/۲۵) مورد پردازش اولیه صورت گرفت. دامنه داده های برداشت شده بین ۴۸۲۰۰ مورد پردازش مطالعه با توجه به مشاهدات میدانی و مدل *IGRF* (سال ۲۰۱۹) در مطالعه با توجه به مشاهدات میدانی و مدل ۲*GRF* (سال ۲۰۱۹) در معناطیسی پس از انجام پردازش های اولیه (نقشه مربوط به داده های مغناطیسی پس از انجام پردازش های اولیه (نقشه *RTP*) نمایش داده شده است. همچنین مرز لیتولوژی ها نیز بر روی آن با خطوط سیاه



شكل ۴: نقشه آنومالي مغناطيسي كل منطقه تيكمهداش.

مقایسه نقشه آنومالی مغناطیسی با نقشه زمینشناسی منطقه نشان می دهد که روند کلی آنومالی مغناطیسی با شواهد زمینشناسی به خوبی انطباق دارد. مطابق این نقشه گراتیتهای آلکالی فلدسپار الیگوسن و توفها، آندزیتهای ائوسن بطور کلی دارای میزان مغناطیس به مراتب بالاتری هستند در حالیکه سنگهای آندزیت پیروکسنهای ائوسن میزان مغناطیس به مراتب پایینتری را نشان دادهاند. در مرز بین گرانیتهای آلکالی فلدسپار الیوگسن با توفها، آندزیتهای ائوسن، این سنگها آنومالی مغناطیسی پایینی نشان دادهاند، که این آنومالی مغناطیسی منفی منطبق بر گسل F1 می باشد و تهی شدگی مغناطیسی در در آنجا احتمالاً ناشی از دگرسانی و تجزیه کانیهای مغناطیسی در

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۱، ۱۴۰۰.

راستای این گسل است. این آنومالی منفی مغناطیسی (مشخص شده با پلی گون A) از نظر موقعیت و امتداد منطبق بر روند اصلی کانیزایی مس و طلا در منطقه است. مطالعات زمین شناسی حاکی از دگرسانی سنگهای آتشفشانی ائوسن در اثر تزریقات نیمه عمیق بصورت گنبد یا سیل میباشد؛ که این گنبدها در سطح زمین رخنمون نداشته، ولی عامل اصلی کانیزایی در منطقه هستند. بنابراین تعیین موقعیت این تودهها که مولد کانیزایی هستند، کمک شایانی در شناسایی مکانهای دارای تمرکز بالای مس و طلا میتواند باشد؛ که به دلیل عدم وجود رخنمون این گنبد در سطح زمین استفاده از روش مغناطیس سنجی میتواند مفید واقع شود و انتظار این است که خود این تودههای مولد میزان مغناطیس بالایی نشان دهند. مطابق نقشه RTP منطقه، این توده مولد بین دو گسل F2 و F3 (پلیگون B) با آنومالی مثبت مغناطیسی مشخص شده است.



شکل ۵: نقشه آنومالی مغناطیسی برگردان به قطب شده منطقه تیکمهداش (خطوط مشکی مرز لیتولوژیها رانمایش میدهد).

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

اولین گام در اعمال فیلتر با استفاده از کریجینگ فاکتوری رسم واریوگرام تجربی و برازش مدلی مناسب به دادهها است. به همین منظور همبستگی فضایی بین دادههای مغناطیسی با استفاده از معادله ۱ در فواصل مختلف (لگ) به صورت تابعی در چهار جهت با آزیموتهای ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵، نمایش داده شد (واریوگرام)، که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شدهاست. بررسی واریوگرامها نشان میدهد که در فاصله نشان داده شدهاست. بررسی واریوگرامها نشان میدهد که در فاصله حدود ۱۰۰ متر واریوگرامها افزایش میابد و در فاصله تقریبی ۳۵۰ سپس مقادیر واریوگرام مجدداً افزایش مییابد و در فاصله تقریبی ۳۵۰ متر به سقف دوم میرسد، که این موضوع نشان دهنده دو ساختاره بودن واریوگرام است.

شرقی و همکاران، تفسیر کیفی آنومالیهای مغناطیسی منطقه تیکمهداش با استفاده از تحلیل واریوگرام ، صفحات ۶۵-۷۵.



شکل ۶: واریوگرامهای جهتی تجربی دادههای مغناطیسی برگردان به قطب شده منطقه تیکمهداش در جهات مختلف.

در فواصل کم، مدل کروی (معادله ۱۰) و در فواصل زیاد، مدل گوسی (معادله ۱۱) مناسبترین انطباق را با واریوگرام تجربی نشان میدهند.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \le a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$
(1.)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)} \right], & h \le a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$
(11)

که در این معادلات C_0 ، اثر قطعهای، C آستانه، a دامنه و h فاصلهای است که به ازای آن واریوگرام محاسبه می شود. معمولاً سقف واریوگرام $(C_0 + C_0)$ به یک نرمالایز می شود. در این پژوهش، با توجه به وجود همبستگی فضایی در مقیاسهای مختلف، استفاده از مدل های کروی و گوسی به صورت جداگانه قادر به ایجاد بهترین برازش بر واریوگرام تجربی نخواهند بود. بنابراین با درنظر گرفتن بهترین شرایط برازش (خطای کمترین مربعات)، از واریوگرام تودرتو استفاده شد، که متشکل از یک واریوگرام گوسی با دامنه کم و یک واریوگرام گوسی با دامنه از یک واریوگرام تورت استفاده شد، که متشکل از یک واریوگرام کروی با دامنه کم و یک واریوگرام گوسی با دامنه با می می شود. محمولاً موسی با دامنه

مدلهای برازش شده بر واریوگرام تجربی در جهات ۴۵ و ۱۳۵ درجه به ترتیب در شکلهای ۲ و ۸ نمایش داده شدهاند و مشخصات مربوط به این مدلها نیز در جدول ۱ آمده است.



شکل ۷: واریوگرام برازش شده بر واریوگرام تجربی در جهت ۴۵ درجه.

همانطور که مشخص است (جدول ۱)، یکسان بودن سقف و دامنه واریوگرام کروی در جهات مختلف نشان دهنده همسانگرد بودن این مولفه است. حال آن که یکسان بودن سقف واریوگرامها و متفاوت بودن دامنه واریوگرامهای گوسی در جهات مختلف (جدول ۱) نشان دهنده وجود ناهمسانگردی هندسی (در ساختار دوم) است (-Nguimbous).

به همین منظور با در نظر گرفتن بیضوی ناهمسانگردی با محور بزرگ بیضوی ناهمسانگردی در راستای آزیموت ۴۵ درجه و جهت محور کوچک بیضوی ناهمسانگردی با آزیموت ۱۳۵ درجه و با استفاده از کریجینگ فاکتوری هر یک از مولفههای سازنده واریوگرام تودرتو بصورت جداگانه و با استفاده از روابط کریجینگ که در بخش ۲-۳ به آن اشاره شد، به نقشه در آمدند (شکلهای ۹ و ۱۰).



همچنین برای بررسی پارامترهای مدلهای برازش شده، مقادیر دو مولفه با هم جمع شده و با مقادیر واقعی دادههای مغناطیسی مقایسه

شدند؛ که ضریب همبستگی ۹۲/، نشان دهنده انتخاب مناسب پارامترهای مدلهای برازش شدهاست. در تهیه هر کدام از این نقشهها (شکل ۹ و ۱۰) از واریو گرامهای سازنده ساختار تودر تو بصورت جداگانه استفاده شد. تهیه شکل ۹ با استفاده از واریو گرام گوسی صورت گرفته، که دامنه بیشتر آن در مقایسه با واریو گرام کروی نشان می دهد دادهها در فواصل فضایی بیشتری نسبت بهم در ارتباط می باشند، که نشان دهنده مولفه ناحیه ای (طول موج بلند) است. مقایسه نقشه آنومالی ناحیه ای حاصل found فضایی میشتری نسبت بهم مقایسه نقشه آنومالی ناحیه ای حاصل *found و* موج بلند) است. *Error! Reference source not* مقایسه نقشه آنومالی ناحیه ای حاصل *found.* (شکل ۹) با نقشه زمین شناسی محدوده نشان می دهد امتداد و محل مرزهای تشخیص داده شده در آنومالی ناحیه ای (آنومالی منفی آبی رنگ با امتداد شمال شرق جنوب غرب پلی گون *Å* در شکل ۹) تطابق خوبی دارد. همچنین شکل ۱۰ با استفاده از واریو گرام کروی ایجاد شده است که دامنه کمتری نسبت بهم در ارتباط فضایی خواهند بود که این موضوع نشان دهنده مولفه محلی میدان (طول موج کوتاه) است.

سقف	دامنه	مدل	واریوگرام جهتی	
	(متر)	واريوگرام	(نسبت به جهت شمال)	
•/٣	80	کروی	ساختار اول:	N45
•/٩۶	800	گوسی	ساختار دوم:	
•/7X	۶.	کروی	ساختار اول:	N135
•/9۵	۲۸.	گوسی	ساختار دوم:	

جدول ۱: مشخصات مربوط به واریوگرامهای برازش شده بر واریوگرامهای تجربی دادههای مغناطیسی تیکمهداش.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره۷، شماره ۱، ۱۴۰۰.



شکل ۹: نقشه مولفه بزرگ مقیاس (آنومالی ناحیهای) حاصل از اعمال روش کریجینگ فاکتوری.

علاوه بر این با مقایسه جداگانه نقشههای میدان مغناطیسی و نقشه حاصل از آنومالی ناحیهای⁽ موارد زیر قابل مشاهده است:

۱-همخوانی بین روند و موقعیت گسل اصلی (F1) و همچنین رگههای سیلیسی (بصورت خطچین در نقشه آنومالی ناحیهای نشان داده شده است) با روند آنومالیهای مغناطیسی در نقشه آنومالیهای ناحیهای است) با روند آنومالیهای مغناطیسی است (Error! Reference در غرب محراتب بهتر از نقشه آنومالی منفی در غرب محدوده و به موازات رگه سیلیسی در نقشه شکل ۵ قابل ردیابی نیست؛ در حالی که این امتداد در نقشه آنومالی ناحیهای به وضوح ظاهر شده- است (پلی گون Å در شکل ۹).

۲-مطابق نقشه آنومالی ناحیهای (شکل ۹) در محل گسلهای F3 ، F2 و F3 یک تهیشدگی در بین آنومالیهای مثبت منطقه قابل مشاهده است در صورتیکه این تهیشدگیها در نقشههای مغناطیس و برگردان به قطب منطقه قابل مشاهده نمیباشد. بنابراین نقشه آنومالی ناحیهای حاصل از روش کریجینگ فاکتوری بمراتب بهتر از نقشه آنومالیهای میدان کل میتواند در شناسایی محل گسلهها مفید واقع شود.

1 Regional Anomaly (Long-range anomaly)

شرقی و همکاران، تفسیر کیفی آنومالیهای مغناطیسی منطقه تیکمهداش با استفاده از تحلیل واریوگرام ، صفحات ۶۵-۷۵.



شكل ١٠: نقشه مولفه كوچك مقياس ميدان مغناطيسي (آنومالي محلی) که با استفاده از روش کریجینگ فاکتوری تولید شده است.

حذف اطلاعات مربوط به آنومالي هاي با طول موج كوتاهتر يا آنومالي-های محلی از نقشه اولیه میدان کل باعث شده است آنومالی ناحیهای واقعیتهای زمین شناسی محدوده را به مراتب بهتر از نقشه آنومالی برگردان به قطب نمایش دهد. علت این امر، دامنه نسبتاً بالای آنومالی محلى است، كه بقيه أنوماليها را تحت تاثير قرار داده و برخى از أنها را پنهان میکند. این امر نشان میدهد که جداسازی انجام شده با روش پیشنهادی از صحت قابل قبولی برخوردار است (همخوانی با واقعیتهای زمینشناسی قابل مشاهده در منطقه).

همچنین در راستای بررسی کارایی روش کریجینگ فاکتوری، نتایج این روش با نتایج حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو نیز مقایسه شد. مطابق شکل ۱۱ فیلتر ادامه فراسو ۶۰ متر، آنومالی ناحیهای مربوط به منطقه را نشان میدهد. با توجه به این شکل روند کلی مغناطیسی حاصل از این نقشه شباهت بسیار زیادی با نتایج آنومالی ناحیهای حاصل از روش کریجینگ فاکتوری (شکل ۹) دارد. با این حال انتخاب ارتفاع مناسب در اعمال فیلتر ادامه فراسو به صورت سعی و خطا بوده حال آن که نقشه حاصله از آنومالی ناحیهای با استفاده از روش کریجینگ فاکتوری می-تواند بدون در نظر گرفتن اطلاعات اولیه مقدار آنومالی ناحیهای را نشان دهد. همچنین مقایسه شکلهای ۹ و ۱۱ حاکی از عدم موفقیت نقشه ادامه فراسو در شناسایی گسلههای منطقه است. در حالی که در نقشه آنومالی ناحیه ای حاصل از کریجینگ فاکتوری (شکل ۹) مرز این گسله-ها قابل شناسایی است.





668100

4172000 4172100

4171900

4171800

4171700

4171600

با نقشه حاصل از روش فیلتر بالاگذر فرکانسی (Error! Reference source not found.) مقایسه شد. بدین منظور با توجه به ابعاد آنومالی مربوط به توده نفوذی یک فیلتر بالاگذر یا طول موج قطع ۱۰۰ متر انتخاب شد، تا مطمئن شویم خروجی این نقشه اطلاعات مربوط به توده مذکور (پلیگون B در شکل ۵) را دربر داشته باشد. البته انتخاب این طول موج قطع با توجه به اطلاعات زمین شناسی یا ژئوفیزیکی قبلی انجام شده است، در حالی که در شرایط عدم وجود چنین اطلاعاتی انتخاب طول موج قطع بهینه، همراه با تردید خواهد بود. با توجه به این که روش کریجینگ فاکتوری نیازمند هیچگونه اطلاعات اولیه در مورد ساختار زمین شناسی منطقه نیست با چنین چالشی روبرو نخواهد بود. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می شود، نقشه مولفه محلی حاصل از روش کریجینگ فاکتوری، تنها یک آنومالی با دامنه بالا را مشخص می-کند که مطابق با محل یک توده نفوذی نسبتاً کم عمق است. از سوی دیگر در نقشه مربوط به فیلتر بالاگذر آنومالیهای کاذب متعددی، علاوه بر آنومالی اصلی ظاهر شدهاند؛ که این موضوع میتواند تفسیر نقشه را دشوار سازد. در نتیجه در این مورد، استفاده از روش کریجینگ فاکتوری کارایی به مراتب بهتری نسبت به روش فیلتر بالاگذر داشته است.

۶- نتیجهگیری

میدان مغناطیسی اندازه گیری شده در هر منطقه حاصل از برهمنهی میدان مغناطیسی ناشی از تودههای معدنی، اثرات پیسنگ و میدانهای مغناطیسی داخلی و خارجی زمین است. هر چند آنچه در اکتشافات معدنی حائز اهمیت است، مولفه مربوط به تودههای معدنی است؛ که اثر

¹ Residual Anomaly (Short-range anomaly)

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۱، ۱۴۰۰.

دو دانگه، ر.، سهرابی، ق.، انصاری، ی.، نصیری، م.، و امیرپور، ا. ۱۳۹۸. نقشه ۱:۵۰۰۰ زمینشناسی منطقهتیکمهداش، شرکت معدنی توانگران سهند، تبریز.

- Azad, M. R., Koneshloo, M., Kamkar-Rouhani, A. K., & Aghajani, H. (2016). Comparison of factorial kriging analysis method and upward continuation filter to recognize subsurface structures—a case study: gravity data from a hydrocarbon field in the southeast sedimentary basins of the East Vietnam Sea. Acta Geophysica, 64(2), 398-416.
- Beltrão, J., Silva, J., & Costa, J. (1991). Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. *Geophysics*, 56(1), 80-89.
- Bevington, J., Scudiero, E., Teatini, P., Vellidis, G., & Morari, F. (2019). Factorial kriging analysis leverages soil physical properties and exhaustive data to predict distinguished zones of hydraulic properties. *Computers and electronics in agriculture*, 156, 426-438.
- Chen, G., Cheng, Q., & Zhang, H. (2016). Matched filtering method for separating magnetic anomaly using fractal model. *Computers & geosciences*, 90, 179-188.
- Chen, Y., Zhang, L., & Zhao, B. (2017). Application of Bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) modeling for extracting gravity anomaly indicating the ore-controlling geological architectures and granites in the Gejiu tin-copper polymetallic ore field, southwestern China. Ore Geology Reviews, 88, 832-840.
- de Carvalho, P. R. M., Rasera, L. G., Costa, J. F. C. L., Araújo, M. G. S., & Varella, L. E. S. (2019). Variogram modeling of broadband artifacts of a seafloor map for filtering with Factorial Kriging. *Journal of Applied Geophysics*, 161, 92-104.
- Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*: Cambridge University Press.
- Gandhi, S., & Sarkar, B. (2016). *Essentials of mineral exploration and evaluation*: Elsevier.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*: Oxford University Press on Demand.
- Goovaerts, P., Sonnet, P., & Navarre, A. (1993). Factorial kriging analysis of springwater contents in the Dyle river basin, Belgium. *Water Resources Research*, 29(7), 2115-2125.
- Hassan, H. H. (2005). Empirical mode decomposition (EMD) of potential field data: airborne gravity data as an example. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005 (pp. 704-706): Society of Exploration

آن باید از دادههای دیگر جدا گردد.



شكل ١٢: نقشه حاصل از روش فيلتر بالأگذر.

بدین منظور روشهای مختلفی ارائه شده است؛ که از جمله آنها می توان به روشهای گرافیکی، تبدیلات فوریه و روش IGRF اشاره کرد. استفاده از تبدیلات فوریه نیاز به وجود دادهها در شبکههای منظم دارد. همچنین استفاده از روش IGRF روندهای مربوط به آنومالیهای بزرگ مقیاس را حذف می نماید و قادر به حذف اثرات مربوط به پیسنگ نخواهد بود. برای غلبه بر این مشکلات در این پژوهش از روش کریجنیگ فاکتوری استفاده شد.

اعمال این روش بر روی دادههای مغناطیسی منطقه تیکمهداش باعث تفکیک آنومالیهای ناحیهای و محلی از یکدیگر شد. مقایسه این روش با روش ادامه فراسو حاکی از انطباق روش فوق با نتایج حاصل از فیلتر ادامه فراسو است. کریجینگ فاکتوری قادر خواهد بود بدون نیاز به اطلاعات اولیه آنومالی ناحیهای را به نقشه درآورد و این در حالی است که اعمال فیلتر ادامه فراسو نیاز به اطلاعات اولیه برای مفسر دارد. انطباق بین گسلهای موجود در منطقه با نقشه آنومالی ناحیهای حاصل از کریجینگ فاکتوری صحت بالای روش مذکور در تفکیک آنومالی را نمایش میدهد که نقشه حاصله از کریجینگ فاکتوری آنومالیهای کاذب نشان میدهد که نقشه حاصله از کریجینگ فاکتوری آنومالیهای کاذب نقشههای حاصله میگردد.

۷- سپاسگزاری

نگارندگان از مساعدت و همکاری شرکت توانگران سهند تبریز، آقایان مهندس دودانگه و مهندس نصیری به خاطر پشتیبانی و فراهم آوردن امکانات مورد نیاز در انجام این تحقیق کمال قدردانی و تشکر را دارند.

شرقی و همکاران، تفسیر کیفی آنومالیهای مغناطیسی منطقه تیکمهداش با استفاده از تحلیل واریوگرام ، صفحات 65-75.

- Salarian, S., Asghari, O., Abedi, M., & Alilou, S. K. (2019). Geostatistical and multi-fractal modeling of geological and geophysical characteristics in Ghalandar Skarn-Porphyry Cu Deposit, Iran. *Journal* of Mining and Environment, 10(4), 1061-1081.
- Sandjivy, L. (1984). The factorial kriging analysis of regionalized data. Its application to geochemical prospecting. In *Geostatistics for natural resources characterization* (pp. 559-571): Springer.
- Shamsipour, P., Chouteau, M., & Marcotte, D. (2017). Data analysis of potential field methods using geostatistics. *Geophysics*, 82(2), G35-G44.
- Tingting, Y. (1997). Application of factorial kriging to improve seismic data integration. *Geostatistics Wollongong &96. 1 (1997), 1, 350.*
- Umeanoh, D. C., Ugwu, S., & Ofoha, C. C. (2018). Qualitative evaluation of aeromagnetic data of Mmaku area, Nigeria, by means of upward continuation, band pass, highs pass and low pass filtering actions. *World Scientific News*, 108, 74-86.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*: John Wiley & Sons.
- Xu, Y., Hao, T., Li, Z., Duan, Q., & Zhang, L. (2009). Regional gravity anomaly separation using wavelet transform and spectrum analysis. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(3), 279-287.
- Zhou, J., Feng, K., Li, Y., & Zhou, Y. (2016). Factorial Kriging analysis and sources of heavy metals in soils of different land-use types in the Yangtze River Delta of Eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(15), 14957-14967.

Geophysicists.

- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series* A: mathematical, physical and engineering sciences, 454(1971), 903-995.
- Keating, P., & Pinet, N. (2011). Use of non-linear filtering for the regional–residual separation of potential field data. *Journal of Applied Geophysics*, 73(4), 315-322.
- Lindner, A., Pitombo, C. S., Rocha, S. S., & Quintanilha, J. A. (2016). Estimation of transit trip production using Factorial Kriging with External Drift: an aggregated data case study. *Geo-spatial Information Science*, 19(4), 245-254.
- Mallick, K., & Sharma, K. (1999). A finite element method for computation of the regional gravity anomaly. *Geophysics*, 64(2), 461-469.
- Mickus, K. L., Aiken, C. L., & Kennedy, W. (1991). Regional-residual gravity anomaly separation using the minimum-curvature technique. *Geophysics*, 56(2), 279-283.
- Nabighian, M. N., Grauch, V., Hansen, R., LaFehr, T., Li, Y., Peirce, J., Ruder, M. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND-61ND.
- Nguimbous-Kouoh, J., Ndougsa-Mbarga, T., & Manguelle-Dicoum, E. (2018). Gravity Data Transformation by Polynomial Fitting and Kriging Data Analysis of the Mamfe Basin (Cameroon). Geoinfor Geostat: An Overview 6: 2. of, 12, 2.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2015). Basic steps in geostatistics: the variogram and kriging: Springer.



JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG) 2021, VOL 7, No 1



(DOI): 10.22044/JRAG.2020.9537.1285

Qualitative interpretation of magnetic anomalies of Tikmehdash area using variogram analysis

Yousef Sharghi^{2*}, Milad Hasani['] and Amir Amirpour Asl³

1. Associated Professor; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran 2. PhD Student; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3. Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 11 April 2020; Accepted: 29 September 2020

Corresponding author: sharghi@sut.ac.ir

Keywords	Extended Abstract		
Magnetic measurement	Summary		
Local anomaly	Regional - local (residual) anomaly separation has always been one of the		
Regional anomaly	crucial steps in magnetic data interpretation. Therefore, a variety of methods		
Geostatistics	has been proposed for this issue, mostly based on Fourier transform. The focus		
Factorial kriging	of this research is to use the spatial filtering method to map the regional and		
Tikmehdash	local anomalies individually. For this purpose, factorial kriging (FK) method		
	was applied on the magnetic data obtained from Tikmehdash area in northwest		
	of Iran. The results of applying the FK method on the data were compared		

with the results of using upward continuation on the same data to evaluate the efficiency of the method. Besides, the FK method has been used alongside high-pass filtering to investigate local anomalies. Consequently, the advantages of using the FK method were recognized. The results of this study show the superiority of the FK method to identify the faults in the area that were not evident in the total intensity magnetic map. Overall, we introduced a robust and solid method for separation of magnetic anomalies that can be utilized for further studies.

Introduction

Separation of regional and local anomalies is widely used to interpret magnetic data. Magnetic anomalies are the superposition of various anomalies with different shapes and depths. Generally, it is assumed that the regional (low-frequency) anomalies are caused by deep magnetic sources. On the other hand, local (high-frequency) anomalies are believed to be related to shallow sources. The usual methods like upward continuation, high-pass and low-pass filtering methods, are based on Fourier transform. Sensitivity to the regular data grid and overlapping of the anomalies in the frequency domains are two main problems when applying the Fourier-based techniques. Kriging is a geostatistical method that concerns with data that are spatially related. It estimates the unknown value of a specific sample by weighting the samples in its neighborhoods. FK is developed for filtering purposes in geostatistics. It is widely used in geochemistry and geophysics. In this research, the FK method is used to separate regional anomalies from local ones.

Methodology and Approaches

Kriging uses variograms to estimate the unknown values in a specific location using the known values of the samples around them. Variograms show the dependencies of the data related to the distance between them. A nested variogram is caused by combination of different variograms, each of them is related to a specific scale of variation. Each component of the nested variograms can be shown individually by FK. Regional and local anomalies in magnetic data can be determined by using the FK approach.

Results and Conclusions

Regional anomalies map created by the FK method displays the faults in the study area that complies with the geological map. The faults were not detectable in the total magnetic intensity map. The results of this study show that the FK method determines the location of the faults more accurately than the upward continuation method. Furthermore, in contrast to the high-pass filtering method, the results indicate that local anomalies map created by using the FK method is a noise-free map and only shows the local sources.