

تفسیر کیفی آنومالی های مغناطیسی منطقه تیکمه داش با استفاده از تحلیل واریوگرام

یوسف شرقی^{۱*}، 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

چکیده

یکی از فرضیه های عمومی در تفسیر داده های شدت کل میدان مغناطیسی این است که این داده ها از برهم نهی میدان های مغناطیسی ساختارهایی بوجود می آیند؛ که با اشکال متفاوت و در عمق های مختلفی قرار دارند. این ساختارهای زمین شناسی متفاوت، ایجاد کننده آنومالی های محلی و ناحیه ای هستند. جداسازی آنومالی های ناحیه ای و محلی همواره به عنوان یکی از مراحل اساسی در تفسیر داده های مغناطیسی مطرح است. بدین منظور روش های مختلفی ارائه شده؛ که از جمله آنها می توان به روش های گرافیکی، برازش سطح چند جمله ای و روش های مبتنی بر تبدیلات فوریه اشاره کرد. یکی از مشکلات موجود در استفاده از روش های مبتنی بر تبدیلات فوریه نیاز به وجود داده ها 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 روش ها را تحت تاثیر قرار می دهند. در این پژوهش از روش زمین آماری کریجینگ فاکتوری برای جداسازی آنومالی های محلی از آنومالی های ناحیه ای داده های مغناطیسی استفاده شده است. این روش فاقد محدودیت های موجود در روش های مبتنی بر تبدیلات فوریه است. برای بررسی کارایی این روش، داده های مغناطیسی مربوط به محدوده اکتشافی تیکمه داش در شمال غرب ایران، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. روش کریجینگ فاکتوری بر روی داده های مغناطیس برگردان به قطب شده منطقه مورد نظر اعمال و آنومالی های ناحیه ای و محلی از هم تفکیک شدند. سپس نقشه مربوط به هر کدام از مولفه ها به صورت جداگانه ترسیم شد. شواهد حاکی از تشخیص چندین گسل در محدوده، با استفاده از نقشه آنومالی ناحیه ای حاصل از بکارگیری روش کریجینگ فاکتوری است؛ که در نقشه های 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 می دهد این روش نسبت به ادامه فراسو با دقت بالاتری محل گسله ها را مشخص می کند و بر خلاف ادامه فراسو به صورت سعی و خطا نمی باشد. در ادامه نتایج حاصل از روش مذکور با روش فیلتر بالاگذر به عنوان یک روش استاندارد، در بررسی آنومالی های 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 آنومالی های کاذبی است که در استفاده از فیلتر بالاگذر ظاهر می شوند.

واژگان کلیدی

مغناطیس سنجی
آنومالی ناحیه ای
آنومالی محلی
زمین آمار
کریجینگ فاکتوری
تیکمه داش

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 می‌شود، این است که داده‌های مغناطیس اندازه‌گیری شده از برهم‌نهی آنومالی‌های مختلفی ایجاد می‌شوند؛ که در عمق‌های مختلفی قرار دارند (Keating and Pinet, 2011). بنابراین جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای از آنومالی‌های محلی همواره به عنوان یکی از مسائل مهم در تحلیل داده‌های مغناطیس مطرح است. تاکنون روش‌های مختلفی جهت جداسازی آنومالی ناحیه‌ای از محلی ابداع شده‌اند؛ که از جمله آنها می‌توان به روش‌های گرافیکی، برازش سطح چندجمله‌ای^۱ (Beltrão et al., 1999; Mallick and Sharma, 1999)، کمترین خمینه^۲ (Mickus et al., 1991)، الگوریتم معکوس مغناطیسی سه بعدی، المان محدود^۳ (Mallick and Sharma, 1999)، روش فیلتر مطابقت یافته^۴ (G. Chen et al., 2016) اشاره کرد. امروزه از روش‌های مبتنی بر تبدیلات فوریه همچون ادامه فراسو^۵، بطور گسترده توسط مفسران برای جداسازی آنومالی ناحیه‌ای و محلی استفاده می‌شود (Umeanoh et al., 2018). هر چند سادگی اعمال روش‌های مبتنی بر تبدیلات فوریه به عنوان یک مزیت در نظر گرفته می‌شود؛ اما منظم بودن داده‌ها به عنوان شرط اصلی برای استفاده از آنها یکی از معایب این روش‌هاست. (Dentith and Mudge, 2014). اخیراً استفاده از روش‌های تبدیل موجک^۶ (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 نمی‌توان 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 مقیاس‌های مختلف داده ارائه می‌دهد، انتخاب مولفه‌های محلی و ناحیه‌ای از بین این توابع نیاز به اطلاعات تکمیلی دیگری دارد. کریجینگ فاکتوری یک روش زمین‌آماري است؛ که برای فیلتر کردن توسعه یافته است. در واقع کریجینگ فاکتوری یک روش فیلتر کردن فضایی است؛ که بر اساس واریوگرام عمل می‌نماید. امروزه روش کریجینگ فاکتوری در

زمینه‌های مختلف به صورت گسترده استفاده می‌شود، 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)، تخمین 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 زمین‌آماري 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 عملکرد 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 زمین‌آمار در دهه شصت میلادی و اولین بار توسط ماترون^۷ برای بررسی برخی از مسائل در علوم مهندسی معدن مطرح شد، که آمار کلاسیک قادر به پاسخگویی به آنها نبود. در علم زمین‌آمار محل قراگیری نمونه‌ها نسبت بهم دارای اهمیت است. امروزه زمین‌آمار کاربردهای مختلفی از تهیه و ایجاد نقشه و بررسی و مدیریت پیدا کرده است (Oliver and Webster, 2015).

۲-۱- تابع واریوگرام

زمین‌آمار بر این فرض اساسی استوار است که نمونه‌هایی که در فواصل نزدیک‌تر 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, 2016). به تابعی که به بررسی تغییرات فضایی میان مقادیر جفت نمونه‌ها می‌پردازد، تابع واریوگرام گفته می‌شود. بنابراین تابع واریوگرام بصورت عددی می‌تواند ارتباط فضایی در یک متغیر زمین‌شناسی را بیان کند.

اگر $Z(x)$ مقدار یک متغیر ناحیه‌ای Z در محل x باشد و همچنین $Z(x+h)$ مقدار متغیر Z در فاصله h دورتر از محل x باشد، تابع واریوگرام بصورت زیر نشان داده می‌شود:

- 1 Polynomial surface fitting
- 2 Minimum curvature
- 3 Finite element
- 4 Match filtering
- 5 Upward continuation
- 6 Wavelet transform

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

$$\gamma(h) = \gamma^1(h) + \gamma^2(h) + \dots + \gamma^s(h) \quad (6)$$

که در آن عددهای بالانویس نشان دهنده عددهایی در تفکیک و جدا بودن مدل‌های واریوگرام‌ها از هم است و مربوط به توان واریوگرام نمی‌باشد. 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 می‌گیرد:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{\rho} Y_i(x) \quad (7)$$

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

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{\rho} Y_i(x) + M(x) \quad (8)$$

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:

$$CY_i Y_j(h) = 0 \quad (9)$$

که در آن $CY_i Y_j(h)$ تابع کواریانس متقابل بین مولفه‌های Y_i و Y_j 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، گسترده‌ترین فعالیت آتشفشانی که نتیجه فاز انبساطی در ائوسن بوده، به وقوع پیوسته و سبب بیرون ریختن گدازه‌های آتشفشانی از شکاف‌های متعدد شده‌است. این ولکانیک‌ها که بیشتر گستره محدود 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

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2n(h)} \right) \sum_i^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

که در آن $n(h)$ تعداد جهت نمونه‌هایی است که در فاصله h از هم قرار دارند (Gandhi and Sarkar, 2016).

۲-۲- کریجینگ

کریجینگ به عنوان بهترین تخمینگر خطی ناریب شناخته می‌شود^۱ (Salarian et al., 2019). این تخمین مبتنی بر تحلیل واریوگرام است. با استفاده از کریجینگ می‌توان مقدار یک نقطه مجهول را با استفاده از وزن‌دهی به نمونه‌های موجود در همسایگی آن نقطه محاسبه نمود:

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

که در آن $\hat{Z}(x)$ مقدار تخمین ناریب، λ_i وزن مربوط به نمونه‌های اطراف نقطه مورد نظر و $Z(x_i)$ مقادیر نمونه‌های اندازه‌گیری 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.

۱- $\hat{Z}(x)$ تخمین ناریب از $Z(x)$ باشد:

$$E[(\hat{Z}(x) - Z(x))] = 0 \quad (4)$$

۲- واریانس تخمین کمینه باشد:

$$E[(\hat{Z}(x) - Z(x))^2] = \text{minimum} \quad (5)$$

۳-۲- کریجینگ فاکتوری^۲

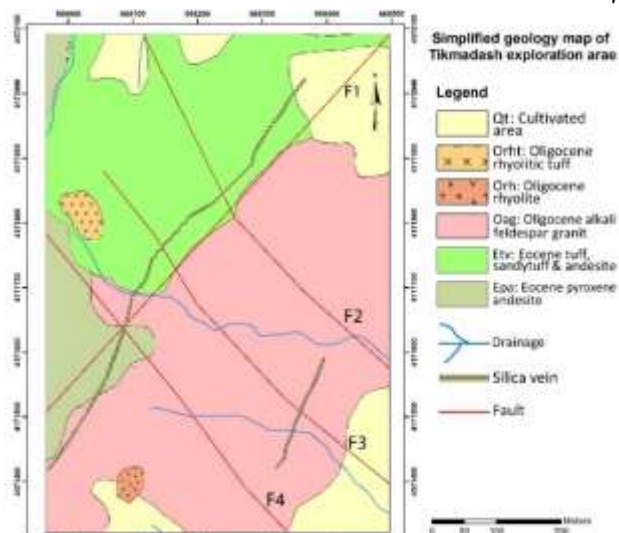
کریجینگ فاکتوری یکی از روش‌های زمین‌آماري است، که از آن در علوم مختلف همچون هیدرولوژی (P Goovaerts et al., 1993)، ژئوشیمی (Sandjivy, 1984) و همچنین ژئوفیزیک (Tingting, 1997) استفاده می‌شود. استفاده از کریجینگ فاکتوری معمولاً به عنوان یک روش فیلتر کردن در علم زمین‌آمار مطرح می‌گردد. تغییرات فضایی می‌توانند تحت مقیاس‌های مختلف و یا درجه‌ای از اندازه‌های مختلف اتفاق بیفتند که دلیل آن، تغییرات 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 $Z(x)$ می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای از چند فرآیند مستقل از هم در نظر

1 Best Linear Unbiased Estimator

2 Factorial kriging

3 Nested variogram

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



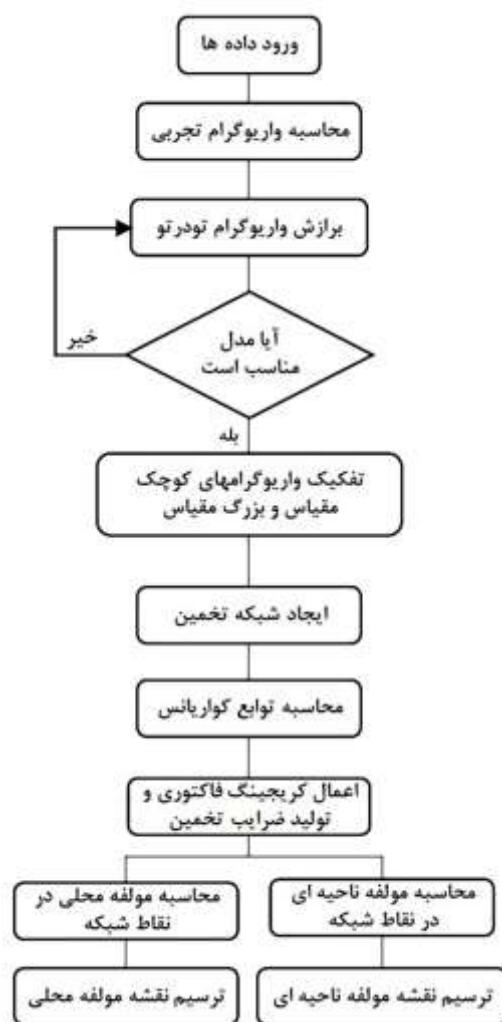
شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (دو دانگه و همکاران، ۱۳۹۸).

کانی‌زایی پلی‌متال در این محدوده از نوع هیدروترمال (اپی‌ترمال کم سولفیدی) رگه‌ای با الویت طلا، مس و نقره است (*Error!* *Reference source not found.* سنگ میزبان این رگه‌های سیلیسی کانه‌دار واحدهای ولکانیکی ائوسن و در بعضی بخش‌ها توده‌های 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.



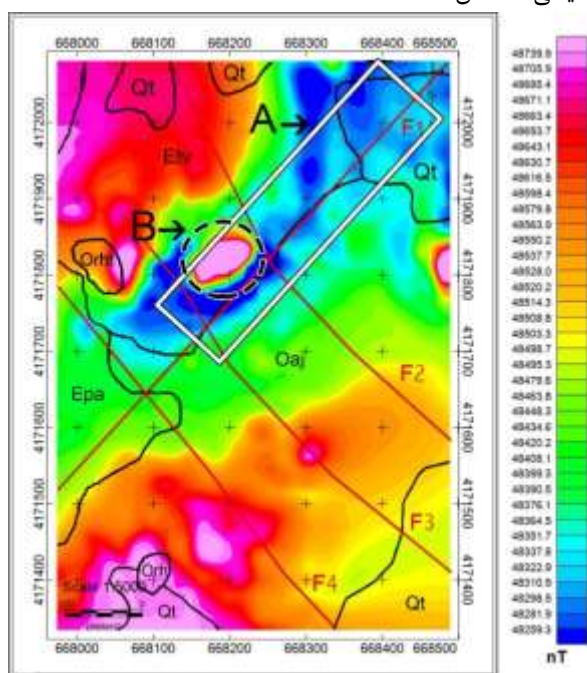
شکل ۳: شواهدی از کانی‌زایی مس بر روی رگه‌های سیلیسی در محدوده مورد مطالعه.

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 قدیمی‌ترین واحد سنگی موجود در محدوده اکتشافی تیکمه‌داش واحدهای آتشفشانی و پیروکلاستیک با سن ائوسن هستند؛ که با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی 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 شمال‌شرقی-جنوب‌غربی (گسل F1) است. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: روندنمای اعمال کریجینگ فاکتوری بر روی داده‌های مغناطیسی.

راستای این گسل است. این آنومالی منفی مغناطیسی (مشخص شده با پلی‌گون A) از نظر موقعیت و امتداد منطبق بر روند اصلی کانی‌زایی مس و طلا در منطقه است. مطالعات زمین‌شناسی حاکی از دگرسانی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در اثر تزریق 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 مغناطیس‌سنجی 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.



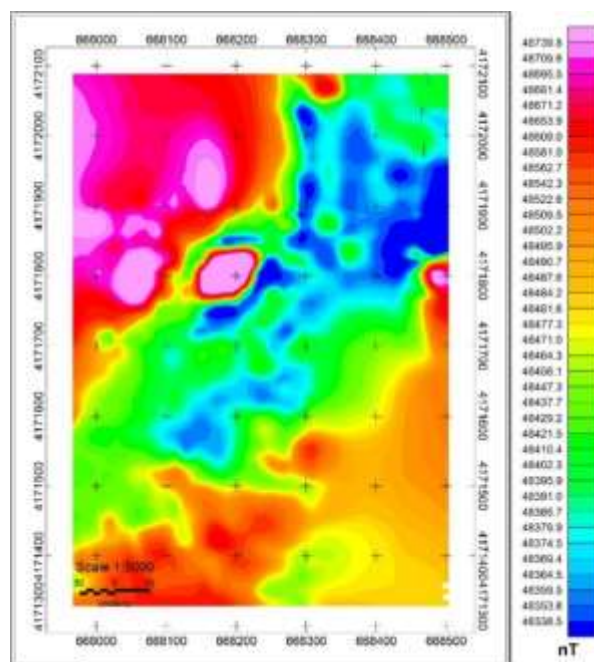
شکل ۵: نقشه آنومالی مغناطیسی برگردان به قطب شده منطقه تیکمه‌داس (خطوط مشکی مرز لیتولوژی‌ها را نمایش می‌دهد).

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 آزمون‌های 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 حدود ۱۰۰ متر واریوگرام‌ها افزایش یافته تا به سقف مشخص برسند. 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.

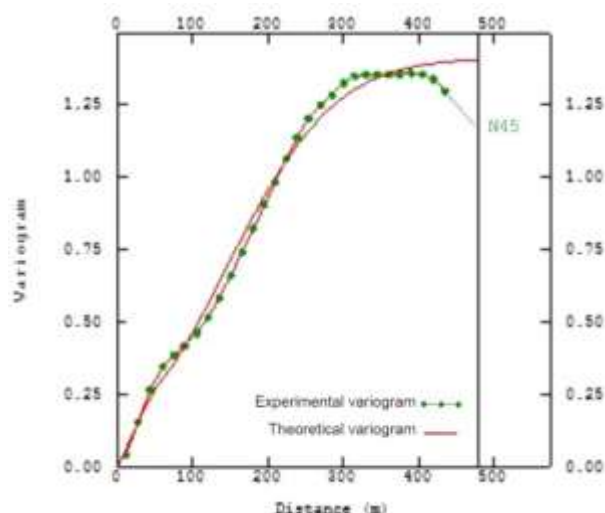
۴- داده‌های مغناطیسی تیکمه‌داس

مساحتی در حدود چهل هکتار با پروفیل‌هایی 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 تصحیحات مرسوم مانند حذف نوفه‌ها و داده‌های پرت، تصحیح روزانه و فیلتر کاهش به قطب (زاویه میل ۵۵/۴ و زاویه انحراف ۵/۲۵) مورد پردازش اولیه صورت گرفت. دامنه داده‌های برداشت شده بین ۴۸۲۰۰ تا ۴۸۸۰۰ نانو تسلا قرار دارند. مقدار میدان مغناطیسی زمینه در منطقه مورد مطالعه با توجه به مشاهدات میدانی و مدل IGRF (سال ۲۰۱۹) در حدود ۴۸۴۰۰ نانو تسلا است. در شکل ۵ نقشه مربوط به داده‌های مغناطیسی پس از انجام پردازش‌های اولیه (نقشه RTP) نمایش داده شده است. همچنین مرز لیتولوژی‌ها نیز بر روی آن با خطوط سیاه مشخص شده است.



شکل ۴: نقشه آنومالی مغناطیسی کل منطقه تیکمه‌داس.

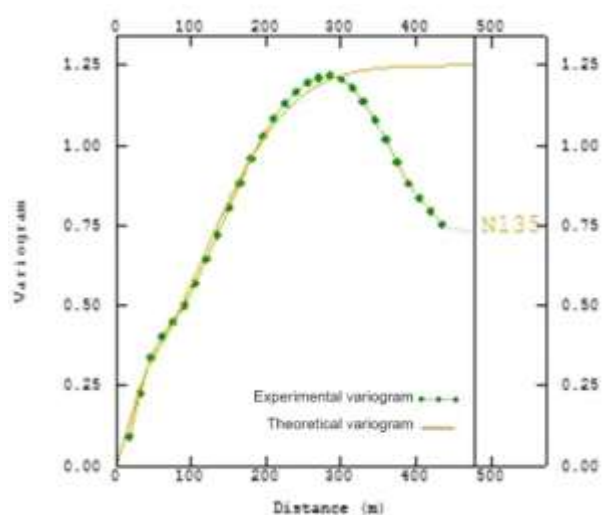
مقایسه نقشه آنومالی مغناطیسی با نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که روند کلی آنومالی مغناطیسی با شواهد زمین‌شناسی به خوبی انطباق دارد. مطابق این نقشه گراتیت‌های آلکالی فلدسپار الیگوسن و توفه‌ها، آندزیت‌های ائوسن بطور کلی دارای میزان مغناطیس به مراتب بالاتری هستند در حالیکه سنگ‌های آندزیت پیروکسن‌های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



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

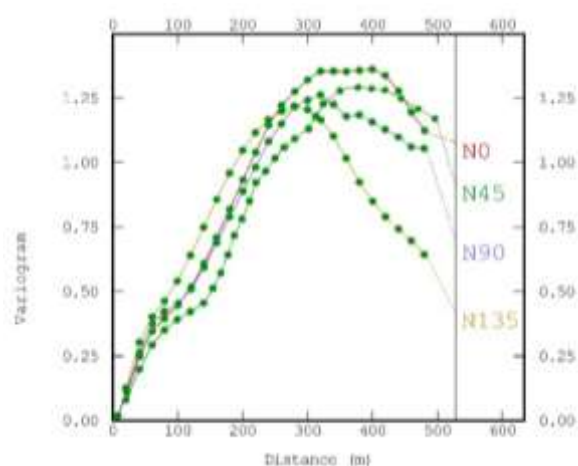
همانطور که مشخص است (جدول ۱)، یکسان بودن سقف و دامنه واریوگرام کروی در جهات مختلف نشان دهنده همسانگرد بودن این مولفه است. حال آن که یکسان بودن سقف واریوگرام‌ها و متفاوت بودن دامنه واریوگرام‌های گوسی در جهات مختلف (جدول ۱) نشان دهنده وجود ناهمسانگردی هندسی (در ساختار دوم) است (Nguimous-Kouh et al., 2018).

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).



شکل ۸: واریوگرام برازش شده بر واریوگرام تجربی در جهت ۱۳۵ درجه.

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



شکل ۹: واریوگرام‌های جهت‌ی تجربی داده‌های مغناطیسی برگردان به قطب شده منطقه تیکمه‌داش در جهات مختلف.

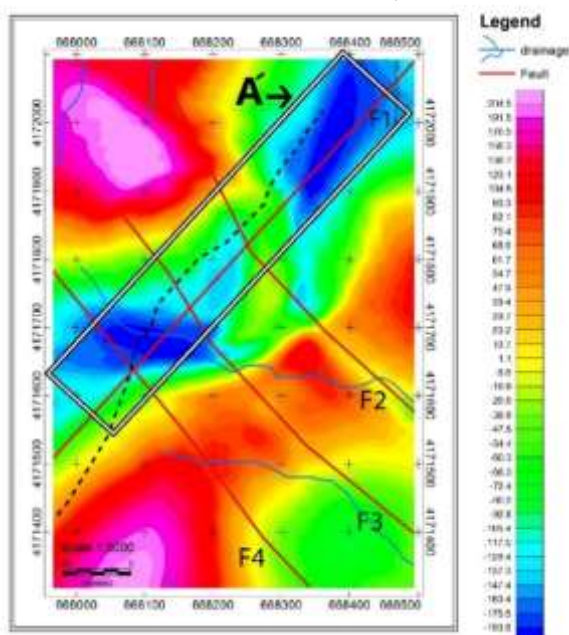
در فواصل کم، مدل کروی (معادله ۱۰) و در فواصل زیاد، مدل گوسی (معادله ۱۱) مناسب‌ترین انطباق را با واریوگرام تجربی نشان می‌دهند.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (10)$$

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

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

مدل‌های برازش شده بر واریوگرام تجربی در جهات ۴۵ و ۱۳۵ درجه به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند و مشخصات مربوط به این مدل‌ها نیز در جدول ۱ آمده است.



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^۱ موارد زیر قابل مشاهده است:

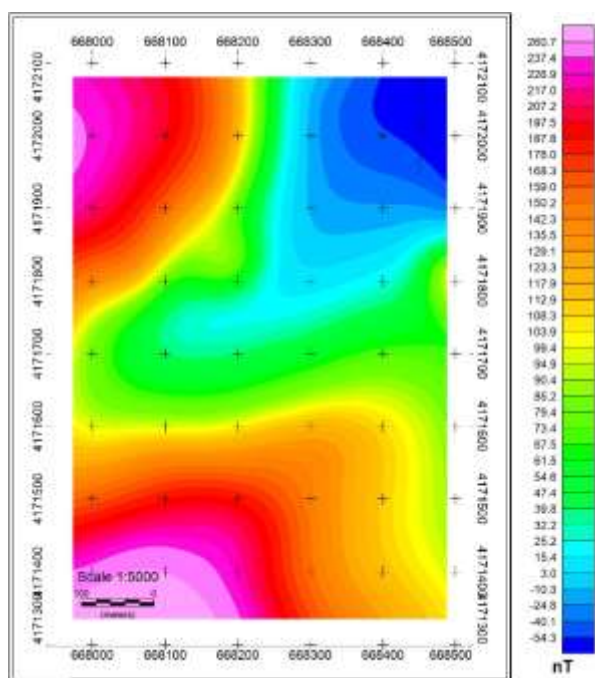
۱- همخوانی بین روند و موقعیت گسل اصلی (F1) و همچنین رگه‌های سیلیسی (بصورت خطچین در نقشه آنومالی ناحیه‌ای نشان داده شده است) با روند آنومالی‌های مغناطیسی در نقشه آنومالی‌های ناحیه‌ای بمراتب بهتر از نقشه آنومالی مغناطیسی است (Error! Reference source not found). به عنوان مثال امتداد آنومالی منفی در غرب 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 (پلی‌گون A در شکل ۹).

۲- مطابق نقشه آنومالی ناحیه‌ای (شکل ۹) در محل گسل‌های F2، F3 و F4 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.

شدند؛ که ضریب همبستگی ۰.۹۲، نشان‌دهنده انتخاب مناسب پارامترهای مدل‌های برازش شده‌است. در تهیه هر کدام از این نقشه‌ها (شکل ۹ و ۱۰) از واریوگرام‌های سازنده ساختار تودرتو بصورت جداگانه استفاده شد. تهیه شکل ۹ با استفاده از واریوگرام گوسی صورت گرفته، که دامنه بیشتر آن در مقایسه با واریوگرام کروی نشان می‌دهد داده‌ها در فواصل فضایی بیشتری نسبت بهم در ارتباط می‌باشند، که نشان‌دهنده مولفه ناحیه‌ای (طول موج بلند) است. مقایسه نقشه آنومالی ناحیه‌ای حاصل Error! Reference source not found. (شکل ۹) با نقشه زمین‌شناسی محدوده نشان می‌دهد امتداد و محل گسل اصلی (F1) منطقه که همان امتداد رگه سیلیسی طلادار است، با مرزهای تشخیص داده شده در آنومالی ناحیه‌ای (آنومالی منفی آبی رنگ با امتداد شمال شرق-جنوب غرب- پلی‌گون A در شکل ۹) تطابق خوبی دارد. همچنین شکل ۱۰ با استفاده از واریوگرام کروی ایجاد شده‌است که دامنه کمتر آن در مقایسه با واریوگرام گوسی نشان می‌دهد که داده‌ها در فواصل کمتری نسبت بهم در ارتباط فضایی خواهند بود که این موضوع نشان دهنده مولفه محلی میدان (طول موج کوتاه) است.

	واریوگرام جهتی (نسبت به جهت شمال)	مدل واریوگرام	دامنه (متر)	سقف
N45	ساختار اول:	کروی	۶۰	۰/۳
	ساختار دوم:	گوسی	۳۵۰	۰/۹۶
N135	ساختار اول:	کروی	۶۰	۰/۲۸
	ساختار دوم:	گوسی	۲۸۰	۰/۹۵

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

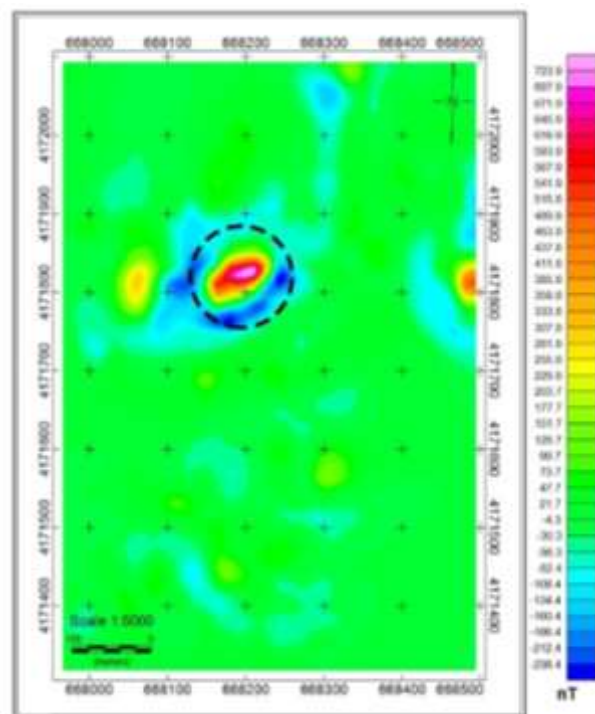


شکل ۱۱: نقشه مربوط به فیلتر ادامه فراسو ۶۰ متر.

در ادامه نقشه آنومالی محلی به دست آمده از روش کریجینگ فاکتوری 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 (پلی گون B در شکل ۵) را دربر داشته باشد. البته انتخاب این طول موج قطع با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی 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 زمین‌شناسی منطقه نیست با چنین چالشی روبرو نخواهد بود. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، نقشه مولفه محلی حاصل از روش کریجینگ فاکتوری، تنها یک آنومالی با دامنه بالا را مشخص می‌کند 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 اندازه‌گیری 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



شکل ۱۰: نقشه مولفه کوچک مقیاس میدان مغناطیسی (آنومالی محلی) که با استفاده از روش کریجینگ فاکتوری تولید شده است.

حذف اطلاعات مربوط به آنومالی‌های با طول موج کوتاه‌تر یا آنومالی‌های محلی^۱ از نقشه اولیه میدان کل باعث شده است آنومالی ناحیه‌ای واقعیت‌های زمین‌شناسی محدوده را به مراتب بهتر از نقشه آنومالی برگردان به قطب نمایش دهد. علت این امر، دامنه نسبتاً بالای آنومالی محلی است، که بقیه آنومالی‌ها را تحت تاثیر قرار داده و برخی از آنها 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 می‌تواند 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 ناحیه‌ای حاصل از کریجینگ فاکتوری (شکل ۹) مرز این گسله‌ها قابل شناسایی است.

1 Residual Anomaly (Short-range anomaly)

۸- منابع

دو دانگه، ر.، سهرابی، ق.، انصاری، ی.، نصیری، م.، و امیرپور، ا. ۱۳۹۸. نقشه ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه تیکمه‌داش، 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., Rasesa, 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.

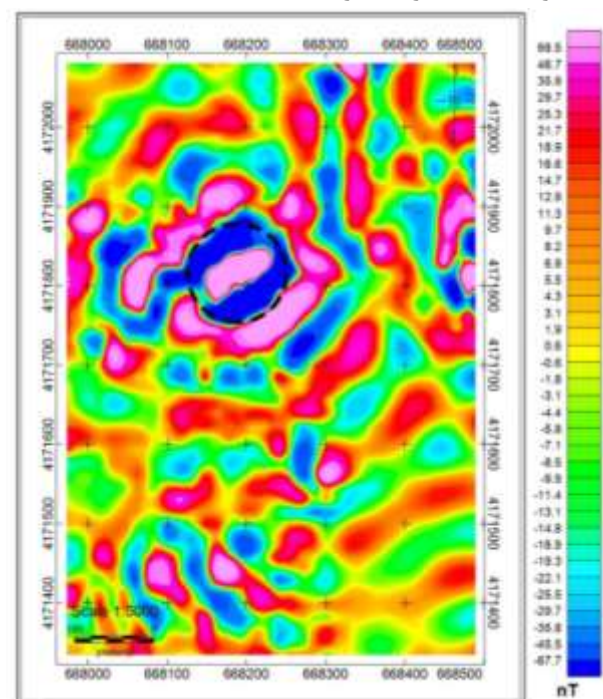
Gandhi, S., & Sarkar, B. (2016). *Essentials of mineral exploration and evaluation*: Elsevier.

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.



شکل ۱۲: نقشه حاصل از روش فیلتر بالاگذر.

بدین منظور روش‌های مختلفی ارائه شده است؛ که از جمله آنها می‌توان 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 می‌نماید و قادر به حذف اثرات مربوط به پی‌سنگ نخواهد بود. برای غلبه بر این مشکلات در این پژوهش از روش کریجینگ 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. همچنین مقایسه روش مذکور با روش فیلتر بالاگذر نشان می‌دهد که نقشه حاصله از کریجینگ فاکتوری آنومالی‌های کاذب کمتری نسبت به روش بالاگذر نمایش می‌دهد و باعث تفسیر بهتر 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.

- 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.
- Sandjiv, 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.
- Nguimbois-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.