



مقایسه روش های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو طیف توان به منظور تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده های مغناطیس هوا برد و بررسی ارتباط احتمالی آن با منابع زمین گرمایی در شمال - غرب ایران

پیوند حیدر نژاد صنمی^{۱*} و علی نجاتی کلاته^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: peyvand7010@gmail.com

واژگان کلیدی

چکیده

آنالیز طیفی داده های مغناطیس هوا برد جهت تخمین عمق نقطه کوری می تواند اطلاعات ارزشمندی از گرادیان دمای سطحی در مقیاس ناحیه ای و تمرکز انرژی زمین گرمایی در سطح عرضه کند. در این تحقیق از داده های مغناطیس هوا برد شمال غرب ایران به منظور تخمین عمق کوری به دو روش مرکز یابی و مدل سازی پیشرو استفاده شده است. برای این کار ابتدا نقشه شدت میدان مغناطیسی کل تهیه شد، بعد از حذف اثر IGRF از داده ها فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی به داده ها اعمال شد. ابعاد بهینه پنجره ها 100×100 کیلومتر انتخاب شده و پنجره ها بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی کل اعمال شدند. سپس طیف توان میانگین شعاعی برای هر پنجره محاسبه شد و عمق کوری به دو روش مرکز یابی و مدل سازی پیشرو تخمین زده شد. در تخمین عمق به روش مرکز یابی لگاریتم طیف توان بر مبنای عدد موج رسم شده و عمق بالا و مرکز هر بلوک با استفاده از برازش خط راست به قسمت های مختلف نمودار طیف توان انرژی انجام می شود. مدل سازی پیشرو نیز با زیر برنامه ای که در محیط Matlab برنامه نویسی شده است؛ انجام می شود. با توجه به نتایج عمق کوری بین ۱۴ تا ۲۲ کیلومتر برآورد می شود. با توجه به نقشه تراز تغییرات عمق کوری حاصل از روش مدل سازی پیشرو قسمت های شرق قله ی سهند با توجه به کاهش مقادیر به دست آمده عمق کوری و همچنین با توجه به تمرکز چشمه های آب گرم به عنوان نواحی مستعد برای برنامه ریزی آبی برای اکتشاف منابع زمین گرمایی معرفی شد.

زمین گرمایی
طیف توان شعاعی
مدل سازی پیشرو
مرکز یابی
نقطه کوری

۱- مقدمه

امروزه انرژی‌های تجدید پذیر یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های هر کشور به حساب می‌آیند و منابع انرژی زمین‌گرمایی یکی از انواع انرژی‌های تجدید پذیر است. انرژی زمین‌گرمایی، به انرژی حرارتی درون زمین اطلاق می‌شود؛ که ارتباط مستقیمی با امتداد صفحات تکتونیکی فعال، نواحی شناخته شده آتش‌فشانی و مناطق لرزه‌خیز دارد. برای شناسایی و اکتشاف منابع زمین‌گرمایی در مراحل اولیه و یا حتی نیمه تفصیلی، روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مثل مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و الکترومغناطیس در کنار دیگر روش‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی نقش مهمی دارند. از میان روش‌های ژئوفیزیکی در مراحل مقدماتی شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی، برداشت و استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی امری متداول است (Tselentis, 1991; Saleh et al., 2012). برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هوایی معمولاً برای تهیه نقشه سنگ‌های مغناطیسی مانند پی‌سنگ‌های آذرین و دگرگونی است؛ که در زیر لایه‌های رسوبی واقع شده‌اند (Gupta and Roy, 2007). همچنین برای به نقشه درآوردن مناطق آلتراسیونی که نشان‌دهنده کاهش مغناطیدگی نسبت به سنگ میزبان مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند یکی از مهم‌ترین کاربردهای داده‌های مغناطیس‌سنجی هوای در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی تعیین عمق نقطه کوری منابع مغناطیسی است.

دمای کوری به دمایی اطلاق می‌شود که در آن دما مواد خاصیت مغناطیسی خود را از دست داده و خاصیت پارامغناطیسی از خود نشان می‌دهند. دمای کوری برای هر کانی مغناطیسی متفاوت است. این دما برای کانی مگنتیت تقریباً ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد است؛ که با در نظر گرفتن این کانی به عنوان کانی مغناطیسی رایج در سنگ‌های پوسته دمای کوری مگنتیت، به عنوان دمای کوری سنگ‌های پوسته در نظر گرفته می‌شود. به عمقی که در آن دما به اندازه‌ی دمای کوری بالا باشد، عمق نقطه‌ی کوری گفته می‌شود. عمق کوری نشان‌دهنده‌ی عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در پوسته‌ی زمین است. عمق نقطه‌ی کوری بسته به شرایط زمین‌شناسی و کانی‌شناسی در هر منطقه متفاوت است؛ اما می‌توان انتظار داشت که در نواحی فعال آتش‌فشانی و مناطق مستعد ذخایر زمین‌گرمایی عمق کوری کمتر باشد (Aidin and Oksum, 2010). تخمین عمق کوری در یک منطقه می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد توزیع دمایی در عمق فراهم کند (Tselentis, 1991).

ایده‌ی استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوای در تخمین عمق نقطه کوری تازه نیست و تاکنون محققان زیادی به تخمین عمق نقطه‌ی کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیسی پرداخته‌اند. باتاچاریا و لئو (۱۹۷۵) به تخمین عمق نقطه‌ی کوری در پارک ملی یلوستون در ایالات متحده آمریکا پرداختند. آن‌ها عمق کوری را در منطقه مورد مطالعه خود بین ۴ تا ۸ کیلومتر تخمین

زدند. تاناکا و همکاران (۱۹۹۹) شرق و جنوب شرق آسیا را مورد مطالعه قرار داد. آن‌ها در این تحقیق از روش مرکز یابی بهره استفاده کردند و عمق کوری را بین ۹ تا ۴۶ کیلومتر تخمین زدند. در مرحله‌ی بعد آن‌ها عمق کوری را با استفاده از داده‌های جریان حرارتی منطقه محاسبه کردند و به نتایج مشابهی رسیدند. بورلی و اسلوت (۱۹۷۷) به تخمین عمق نقطه‌ی کوری در منطقه آریزونا پرداختند. آن‌ها منطقه مورد مطالعه را به ۹ پنجره تقسیم کردند؛ سپس عمق نقطه‌ی کوری را برای هر پنجره تخمین زدند. عمق‌های به دست آمده در تحقیق ایشان بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر متغیر بود. اکیوبو و همکاران (۱۹۸۹) نقشه‌ی عمق کوری را در ژاپن ترسیم کردند. دولماز و همکاران (۲۰۰۵) غرب استان آنتولی ترکیه را به بلوک‌های متعدد تقسیم کرده و برای هر یک طیف توان و عمق کوری را محاسبه کردند و در انتها نقشه‌ی عمق کوری را ترسیم نمودند. عمق کوری در آن ناحیه بین ۸ تا ۱۹ کیلومتر تخمین زده شد. بنسال و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقات خود را در آلمان انجام دادند و عمق کوری را بین ۱۹ تا ۳۳ کیلومتر تخمین زدند. آن‌ها از رابطه‌ی عکس جریان حرارت و عمق کوری نیز در تحقیقات خود بهره بردند. آن‌ها برای به دست آوردن عمق کوری ابتدا به وسیله‌ی طیف توان عمق مرکز توده مغناطیسی و در مرحله‌ی بعد عمق بالا و پایین را محاسبه کردند. هیسارلی و همکاران (۲۰۱۱) نیز با آنالیز طیف توان داده‌های مغناطیسی برای به دست آوردن عمق دمای کوری بهره بردند. ایشان نخست فیلتر کاهش به قطب و میان‌گذر را روی داده‌های خود اعمال کرده و سپس عمق را تخمین زدند.

در ایران تحقیقات متفاوتی به منظور تخمین عمق کوری انجام شده است. منطقه‌ی شمال غرب ایران به دلیل پتانسیل بالای منابع زمین‌گرمایی همواره مورد توجه محققان بوده است. خوجم‌لی و همکاران (۱۳۹۳) نقشه جریان حرارتی و عمق کوری را به روش مرکز یابی در اطراف قله‌ی سبلان رسم کردند. آن‌ها در این تحقیق عمق کوری را بین ۱۰ تا ۱۶ کیلومتر تخمین زدند. حیدر نژاد و نجاتی (۱۳۹۴)، عمق کوری را در اردبیل و اطراف قله‌ی سبلان را با استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو تخمین زدند. نتایج این تحقیق عمق کوری را بین ۱۰ تا ۲۲ کیلومتر تخمین زدند. کسایان و همکاران (۱۳۹۲) مناطق اطراف اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آن‌ها عمق کوری را بین ۲ تا ۱۶ کیلومتر برآورد کردند. در این مقاله سعی می‌شود عمق نقطه کوری با دو روش مرکز یابی و مدل‌سازی پیشرو تخمین زده شود. سپس بعد از مقایسه دو روش نقشه‌های مربوط به عمق هم‌دمای کوری ترسیم و در آخر مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی شمال غرب ایران در صورت وجود شناسایی شوند. حال تئوری روش‌های مورد استفاده به طور خلاصه توصیف می‌شود.

همزمان عمق بالا و کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از رابطه ۶ پیشنهاد دادند:

$$P(k) = C \left(e^{-|k|Z_t} - e^{-|k|Z_b} \right)^2 \quad (6)$$

که در آن P طیف توان، $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ عدد موج، $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$ نرم عدد موج، λ طول موج و ثابت C شامل پارامترهای مستقل از عمق است.

در این روش با فرض اولیه Z_t و Z_b ، طیف به دست آمده از معادله ۱ به طیف مشاهده شده برازش می‌شود. C مفروض، موقعیت طیف را کنترل می‌کند و Z_t شیب را در عدد موج‌های بالا کنترل می‌کند. شیب کلی طیف با ترکیبی از Z_t و Z_b کنترل می‌شود. برای مثال عمیق‌تر شدن Z_b به بالا رفتن طیف نسبت به بقیه منحنی مدل شده منجر می‌شود و بالعکس، و نتیجه بر روی شیب عدد موج پایین سمت راست طیف تأثیر می‌گذارد. عمیق‌تر شدن Z_b هم چنین طیف مدل شده را نسبت به بقیه منحنی به سمت چپ جابجا می‌کند و نقطه اوج پهن‌تر می‌شود. در حالی که کمتر شدن عمق کف نقطه را به سمت راست جابجا می‌کند و آن را تیزتر نیز می‌کند. یکی از مزیت‌های مدل‌سازی پیشرو این است که اجازه می‌دهد تا به صورت تکراری موقعیت و پهنای طیف برازش شود و با بخش مجاور شیب‌دار با دقت بالا تطابق پیدا کند. بر اساس برازش طیف‌های مدل شده با طیف‌های مشاهده شده نتایج با اطمینان بالایی رد یا پذیرفته می‌شوند (Ravat et al., 2007).

۳- تخمین عمق کوری شمال غرب ایران

۳-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

این منطقه با ارتفاعات مشخص، یک منطقه کوهستانی را تشکیل داده است؛ که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به رشته‌کوه سهند اشاره کرد. این رشته‌کوه در ۵۰ کیلومتری جنوب تبریز واقع شده است. مواد آتشفشانی تشکیل‌دهنده سهند عبارت‌اند از کنگلومرای آتشفشانی، افق‌های پومیس‌دار و گدازه‌های آندزیتی، تناوبی از لایه‌های آگلومرای، روانه‌های برشی و لاهار و گدازه‌های داسیتی، توده‌های نفوذی آذرین و سنگ‌های آتشفشانی که از مشخصه‌های اصلی وجود ظرفیت زمین‌گرایی می‌باشند، سطح وسیعی را به خود اختصاص می‌دهند؛ که در این میان سنگ‌های آتشفشانی حد واسط ائوسن تا میوسن از بیشترین سهم برخوردارند (شکل ۱).

۲- روش‌های تخمین عمق کوری

۲-۱- روش مرکز یابی

بلکلی (۱۹۹۵) معادله‌ی طیف توان را برای توده‌های دو بعدی با فرض این که منابع دارای توزیع یکنواخت تصادفی هستند؛ به صورت معادله‌ی زیر بیان کرد:

$$P(k_x, k_y) = 4\pi^2 C_m^2 \phi_m(k_x, k_y) |\Theta_m|^2 |\Theta_f|^2 e^{-|k|Z_t} \times (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (1)$$

که در آن k_x و k_y عدد موج در جهات x و y ، C_m ثابت تناسب، $\phi_m(k_x, k_y)$ طیف توان دو بعدی مغناطیدگی و Θ_m و Θ_f به ترتیب فاکتورهای جهتی مرتبط با مغناطیدگی و میدان مغناطیسی زمین می‌باشند. از آنجایی که در معادله فوق به جز $|\Theta_m|^2$ و $|\Theta_f|^2$ تمامی جملات دارای تقارن هستند؛ به همین دلیل، $\phi_m(k_x, k_y)$ یک ثابت است. با فرض مغناطیدگی کاملاً تصادفی و ناهمبسته با میانگین‌گیری شعاعی معادله‌ی ۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P(k) = A_1 e^{-2|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (2)$$

در این معادله A_1 ثابت است. برای محاسبه عمق مرکزی Z_o منبع مغناطیسی با استفاده از بخش عدد موج پایین طیف توان معادله ۲ را می‌توان به صورت ساده‌ی زیر نوشت:

$$\ln \left(\frac{P(k)^{1/2}}{k} \right) = A_2 - |k|Z_o \quad (3)$$

در این معادله A_2 ثابت است. برای محاسبه عمق بالای منبع مغناطیسی Z_t معادله‌ی ۲ را می‌توان ساده کرد. با فرض این که غالب سیگنال‌های طیف، سیگنال‌های بالای منبع هستند:

$$\ln(P(k)^{1/2}) = A_3 - 2|k|Z_t \quad (4)$$

تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در این روش طی دو مرحله انجام می‌شود:

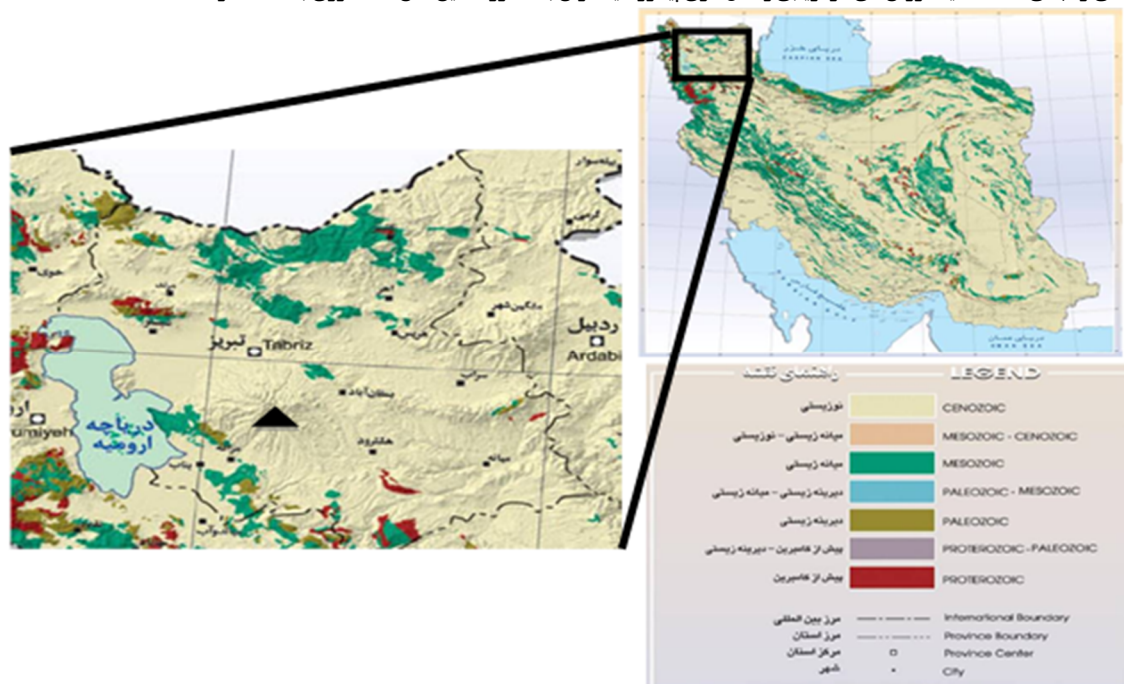
الف) تخمین عمق مرکزی با استفاده از رابطه ۳

ب) تخمین عمق بالایی بی‌هنجاری مغناطیسی با استفاده از رابطه ۴ سپس عمق کف را می‌توان از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد:

$$Z_b = 2Z_o - Z_t \quad (5)$$

۲-۲- مدل‌سازی پیشرو طیف توان

روات (۲۰۰۴) مدل‌سازی پیشرو طیف توان را برای تخمین بهتر و



شکل ۱: نقشه‌ی زمین‌شناسی ایران بر پایه سن. مستطیل سیاه رنگ منطقه مورد مطالعه و مثلث سیاه رنگ بر روی آن قله‌ی سهند را نشان می‌دهد (<http://www.gsi.ir>).

برای جلوگیری از این مشکل، فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی بر روی داده‌ها اعمال شد.

یکی از مراحل محاسبه عمق کوری با استفاده از طیف میانگین شعاعی توان، انتخاب ابعاد بهینه برای پنجره گذاری در منطقه مورد مطالعه است. اکیوبو و همکاران (۱۹۸۵) پیشنهاد دادند که ابعاد بهینه پنجره مربعی مورد بررسی تقریباً ۱۰ برابر عمق واقعی هدف باشد.

بلکلی (۱۹۸۸) منطقه نوادا را برای محاسبه عمق نقطه کوری به پنجره‌های 120×120 کیلومتر تقسیم کرد. بولینگارد و همکاران (۲۰۰۹) پیشنهاد کردند که ابعاد پنجره مورد بررسی حداقل باید ۱۰ برابر بزرگ‌تر از عمق کف منبع مغناطیسی باشد تا عمق کف به دست آمده به خوبی در طیف آشکار گردد. بنسال و همکاران (۲۰۱۱) به این نتیجه رسیدند که در صورتی ابعاد پنجره‌ی مورد نظر بهینه است، که در نمودار طیف توان اکثر پنجره‌ها در عدد موج‌های پایین پیک مشاهده گردد. در این تحقیق ابعاد بهینه‌ی پنجره‌ها برای منطقه مورد مطالعه 100×100 کیلومتر با همپوشانی ۵۰ درصد با پنجره‌های مجاور انتخاب شد.

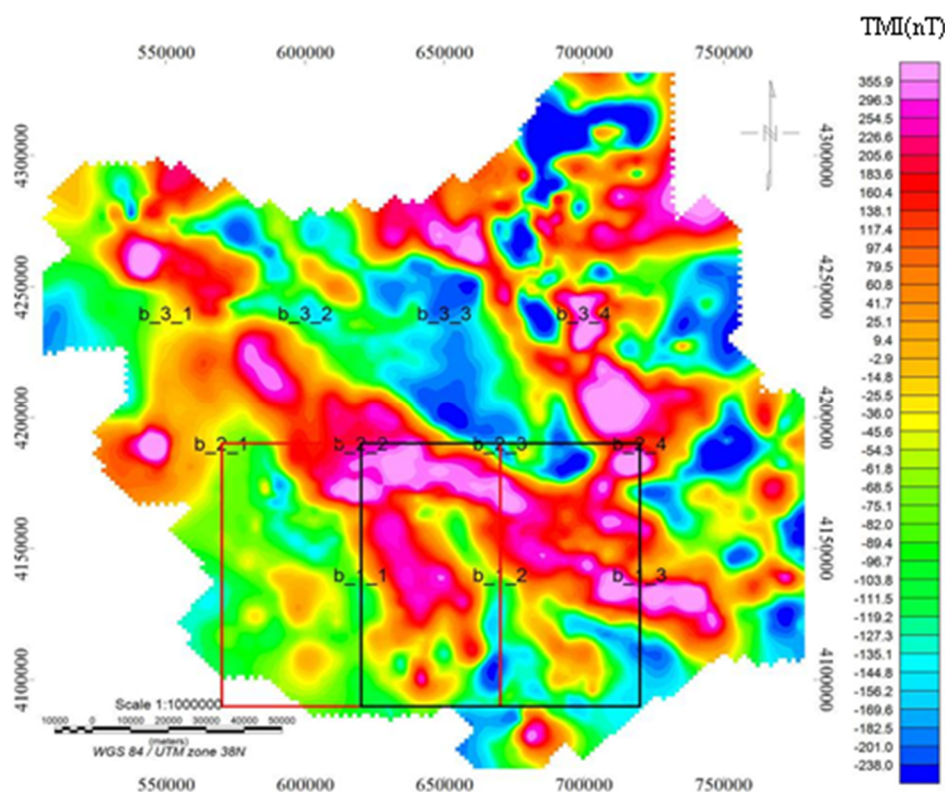
شکل ۲ نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل را بعد از حذف اثر IGRF و اعمال فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی نشان می‌دهد. همچنین نام، محل قرارگیری پنجره‌ها و نحوه‌ی پنجره‌گذاری در شکل قابل مشاهده است. طیف توان هر پنجره با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع و توسط نرم‌افزار Oasis Montaj محاسبه شد.

۳-۲- داده‌ها و پنجره گذاری

منابع عمیق مغناطیسی عموماً بر روی طول موج‌های بلندتر از طول موج‌های منابع مغناطیسی پوسته تأثیر می‌گذارند. بنابراین برای تخمین عمق کف منابع مغناطیسی باید از داده‌هایی استفاده شود که وسعت زیادی را پوشش دهد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق توسط شرکت ایرو سرویس^۱ در سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۷ بنا به درخواست سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برداشت شده‌اند. پیمایش‌های مذکور با فاصله خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر برداشت شده‌اند. این داده‌ها تلفیقی از دو سری داده است؛ که در سال‌های ۱۹۷۴-۱۹۷۵ و ۱۹۷۶-۱۹۷۷ برداشت شده‌اند.

شدت میدان مغناطیسی کل به دست آمده در هر نقطه‌ی برداشت از مواد و ساختارهای مغناطیسی موجود در آن محل ناشی می‌شود. برای تخمین عمق کف منابع مغناطیسی ابتدا باید طول موج‌های بسیار بلند ناشی از منابع هسته و گوشته از داده‌ها حذف شود. برای نیل به این مقصود IGRF محاسبه شده باید از روی داده‌های مغناطیسی حذف شوند.

داده‌های مغناطیسی که در منطقه‌ای غیر از قطب مغناطیسی برداشت می‌شوند، نمی‌توانند به طور دقیق محل منابع مغناطیسی را مشخص کنند؛ به طوری که منابع مغناطیسی که بی‌هنجاری مغناطیسی را ایجاد می‌کنند، دقیقاً در زیر نقاط اندازه‌گیری واقع نمی‌شوند و حتی ممکن است شکل آن‌ها نیز اندکی دچار تغییر شود.



شکل ۲: نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل بعد از اعمال پردازش. نام، محل و نحوه‌ی قرارگیری پنجره‌ها در شکل مشخص شده است.

معادله ۵ عمق نقطه‌ی کوری نیز محاسبه شد. شکل ۴ تخمین عمق بالا و شکل ۵ تخمین عمق متوسط را برای پنجره b_{2_3} نشان می‌دهد. جدول ۱ نتایج حاصل از تخمین عمق به روش مرکزبایی را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲- تخمین عمق با استفاده از مدل‌سازی پیشرو

استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو که توسط روات و همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفت به طور قابل توجه‌ای روند تخمین عمق را ساده‌تر کرد. به دلیل حذف مرحله‌ی تخمین عمق متوسط و تخمین همزمان عمق بالا و عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، استفاده از این روش مطمئن‌تر است. همچنین استفاده از این روش مشکلات انتخاب بازه‌ی عدد موج که در روش مرکزبایی به آن اشاره شد را ندارد. در این مقاله مدل‌سازی پیشرو با زیر برنامه‌ای که در محیط نرم‌افزار Matlab نوشته شد، انجام گرفت. نتایج استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو را برای پنجره b_{2_3} در شکل ۶ مشاهده می‌کنید.

عمق بالا برای پنجره‌ی b_{2_3} ۴ کیلومتر و عمق کوری ۱۶٫۵ کیلومتر برآورد شده است. در جدول ۱ نتایج مربوط به مدل‌سازی پیشرو قابل مشاهده است.

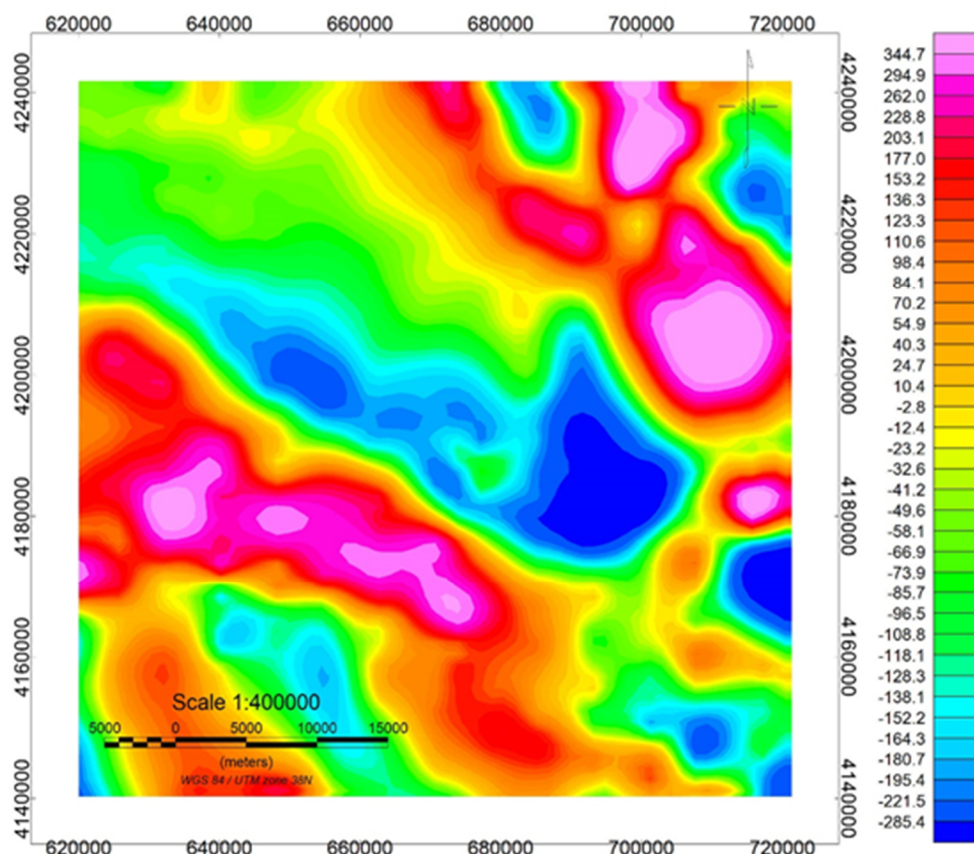
۳-۳-۳- تخمین عمق نقطه‌ی کوری پنجره‌ها

بعد از اعمال پنجره‌های مناسب ادامه‌ی کار بر روی هر پنجره به صورت جداگانه انجام خواهد شد. نخست نقشه شدت میدان مغناطیسی برای هر پنجره محاسبه می‌شود. در ادامه روند تخمین بر روی پنجره b_{2_3} به عنوان نماینده باقی پنجره‌ها مشاهده خواهد شد. شکل ۳ نقشه شدت میدان مغناطیسی کل را برای پنجره b_{2_3} نشان می‌دهد.

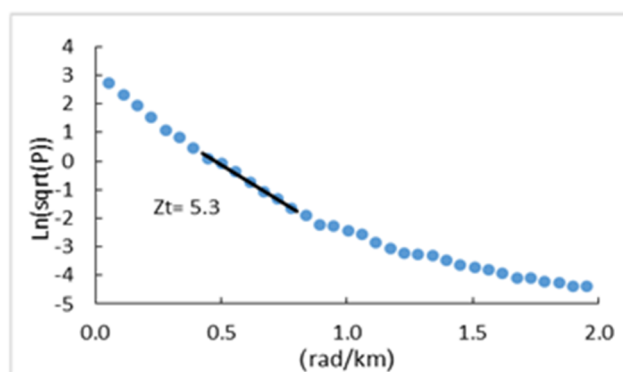
۳-۳-۱- تخمین عمق به روش مرکزبایی

برای تخمین عمق‌های بالایی و مرکزی، ابتدا طیف توان میانگین شعاعی برای هر پنجره با روش تبدیل فوریه سریع و توسط نرم‌افزار Oasis Montaj محاسبه شد. سپس نمودارهای لگاریتم طیف توان شعاعی برحسب عدد موج جهت محاسبه عمق مرکزی و بالایی به ترتیب با استفاده از معادلات (۳) و (۴) تهیه و در ادامه با برازش خط راست در بازه عدد موجی مناسب مقادیر عمقی مربوط محاسبه شدند. انتخاب بازه عدد موجی مناسب برای محاسبه عمق‌های مرکزی و بالایی عمیق‌ترین منابع مهم است. با این حال انتخاب بازه عدد موج هنگامی که خط مستقیم به نمودار لگاریتم طیف توان در برابر عدد موج برازش می‌شود، به مقدار زیادی به قضاوت شخصی وابسته است. در انتها بعد از محاسبه عمق‌های بالایی و مرکزی، با استفاده از

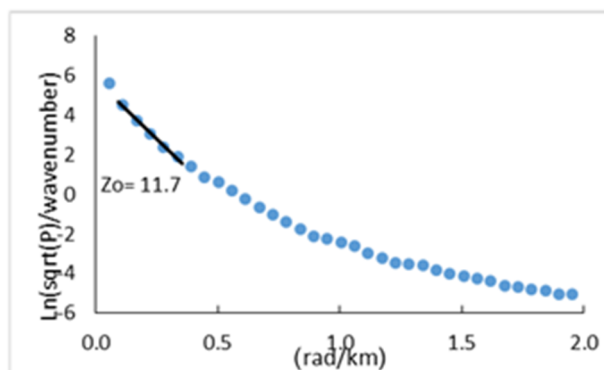
حیدر نژاد صنمی و نجانی کلانه، مقایسه روش‌های مرکزبایی و مدل‌سازی پیشرو طیف توان به منظور تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از ...، صفحات ۴۱۲-۴۰۱.



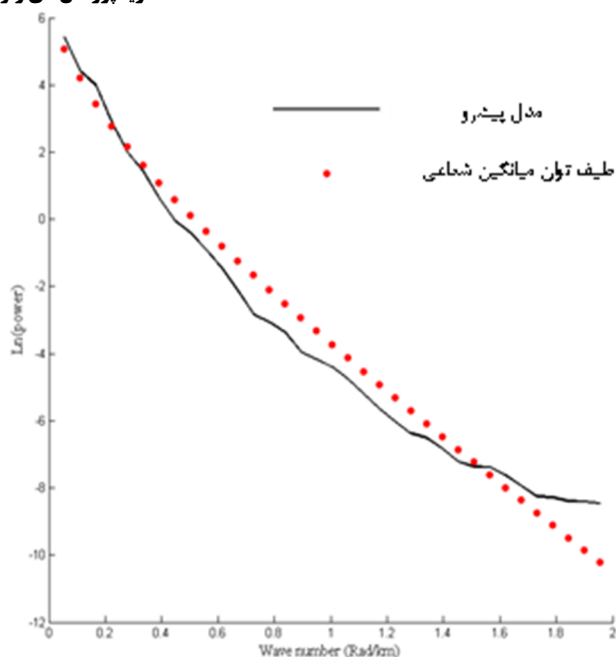
شکل ۳: نقشه شدت میدان مغناطیسی کل پنجره 3_2_b.



شکل ۴: تخمین عمق بالا با برازش خط راست به دومین بخش بلندترین طول موج به دست آمده از طیف.



شکل ۵: تخمین عمق متوسط با برازش خط راست به اولین بخش از بلندترین طول موج به دست آمده از طیف.



شکل ۶: نتیجه حاصل از مدل‌سازی پیشرو برای پنجره b_2_3. دایره‌های قرمز طیف توان انرژی مشاهده‌ای و خط سیاه مدل پیشرو را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات پنجره‌ها، نتایج حاصل از تخمین عمق به روش مرکز یابی و مدل‌سازی پیشرو.

نام پنجره	مشخصات پنجره‌ها		مدل‌سازی پیشرو			روش مرکز یابی	
	مختصات مرکز پنجره‌ها		عمق بالای بی- هنجاری‌های مغناطیسی (km)	عمق کف بی- هنجاری‌های مغناطیسی (km)	عمق بالای بی- هنجاری‌های مغناطیسی (km)	عمق متوسط بی‌هنجاری- های مغناطیسی (km)	عمق کف بی- هنجاری‌های مغناطیسی (km)
	شرقی (m)	شمالی (m)					
b_1_1	۶۲۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰	۳/۵	۱۶/۸	۵/۰۳	۱۲	۱۸/۹۷
b_1_2	۶۷۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰	۳/۴	۱۵/۴	۵/۰۴	۱۰/۹۲	۱۶/۸
b_1_3	۷۲۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰	۳/۹	۱۷/۶	۴/۸	۱۲/۱۴	۱۹/۴۸
b_2_1	۵۷۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۳/۷	۱۹/۶	۵/۹۸	۱۴/۱	۲۲/۲۲
b_2_2	۶۲۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۳/۹	۲۲	۵/۰۵	۱۳/۸۷	۲۲/۶۹
b_2_3	۶۷۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۴	۱۶/۵	۵/۳۱	۱۱/۷۵	۱۸/۱۹
b_2_4	۷۲۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۳/۸	۱۶	۵/۴۴	۱۲/۸۹	۲۰/۳۴
b_3_1	۵۵۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰	۴/۱	۱۸	۴/۶۴	۱۲/۰۹	۱۹/۵۴
b_3_2	۶۰۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰	۳/۶	۱۵	۵/۱۷	۱۰/۷۹	۱۶/۴۱
b_3_3	۶۵۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰	۳/۲	۱۵/۴	۴/۹۷	۱۰/۷۹	۱۶/۶۱
b_3_4	۷۰۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰	۳/۳	۱۸	۴/۳۵	۱۲/۱۵	۱۹/۹۵

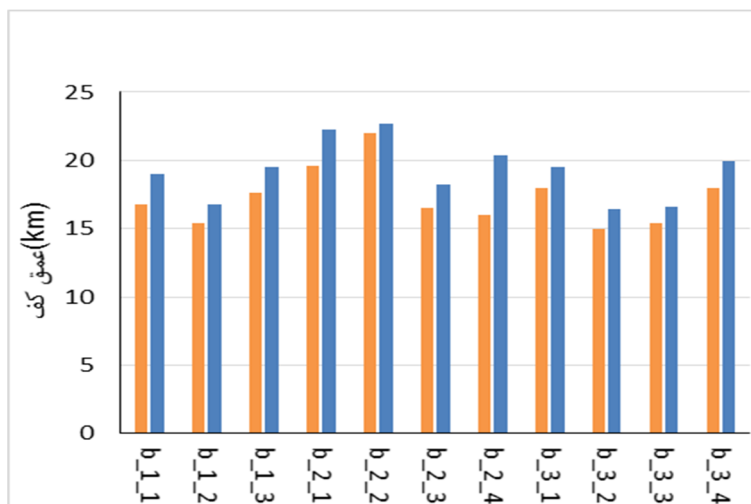
مدل‌سازی پیشرو در شکل ۷ این مسئله مشهود است که مقادیر تخمین‌زده شده با روش مدل‌سازی پیشرو، کمتر مقادیر تخمین زده شده از روش مرکز یابی است. استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو به دلیل تخمین هم‌زمان عمق بالا و کف بی‌هنجاری‌ها و حذف مرحله تخمین عمق متوسط، قابل اعتمادتر است و نتایج به دست آمده نسبت به روش مرکز یابی قابل قبول‌تر است. بنابراین در تحقیق نتایج حاصل از استفاده از روش مدل‌سازی

۴- تهیه نقشه‌ی تراز عمق نقطه‌ی کوری

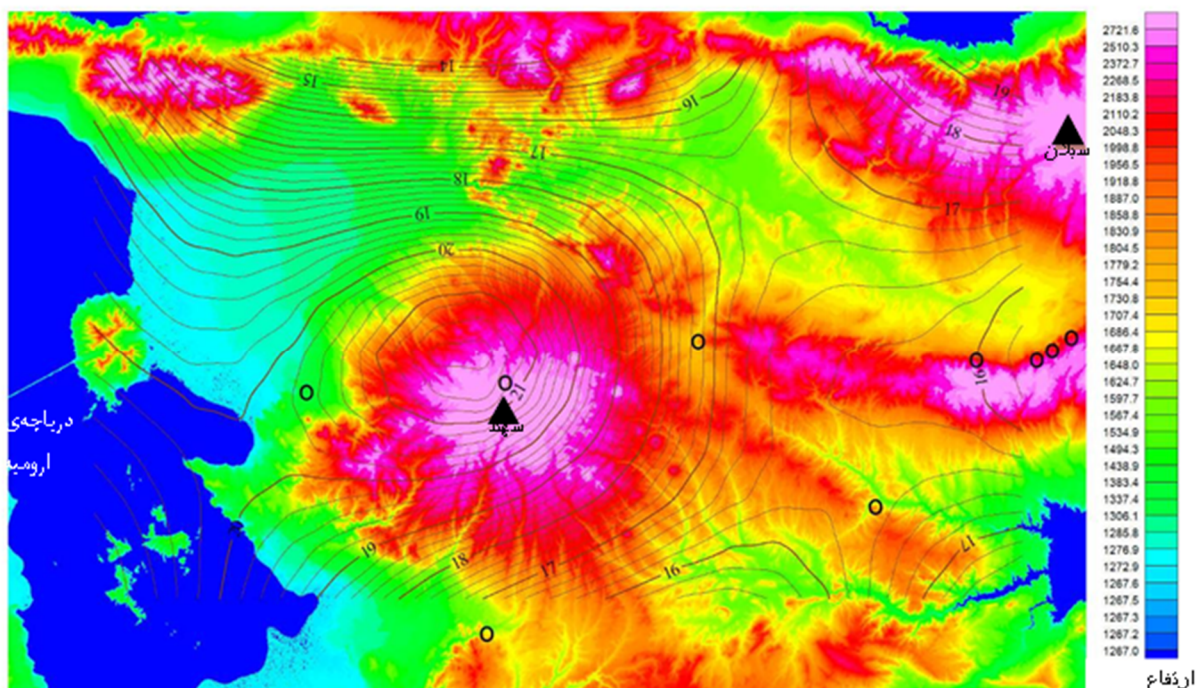
ترسیم خطوط تراز و تهیه نقشه عمق نقطه‌ی کوری یکی از ابزارهای مهم برای شناسایی منابع زمین‌گرمایی در مرحله اکتشاف مقدماتی است. به همین دلیل محاسبه عمق کوری با روش‌های با دقت بالاتر برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی بسیار حائز اهمیت است. با مقایسه مقادیر تخمین زده شده توسط دو روش مرکز یابی و

حیدر نژاد صنمی و نجاتی کلانه، مقایسه روش‌های مرکزبایی و مدل‌سازی پیشرو طیف توان به منظور تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از ...، صفحات ۴۱۲-۴۰۱.

پیشرو به عنوان عمق نقطه‌ی کوری در شمال غرب ایران در نظر گرفته شد. شکل ۸ نقشه تراز تغییرات عمق نقطه‌ی کوری به دست آمده از روش مدل‌سازی پیشرو را بر روی نقشه‌ی توپوگرافی ساخته شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه نتایج حاصل از تخمین عمق به روش مرکزبایی (نارنجی) و مدل‌سازی پیشرو (آبی).



شکل ۸: نقشه‌ی تغییرات عمق نقطه‌ی کوری با فاصله خطوط تراز ۰/۲ کیلومتر بر روی مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (دایره‌های توخالی چشمه‌های آب گرم با گستره‌ی دمایی ۴۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد).

۵- بحث

عمق نقطه‌ی کوری از مراحل اولیه اکتشاف مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی به حساب می‌آید، وسعت منطقه‌ی مورد مطالعه بسیار وسیع است. بنابراین هدف این تحقیق معرفی مناطقی است که احتمال وجود منابع زمین‌گرمایی در آن‌ها بیشتر است. در این تحقیق تخمین عمق نقطه‌ی کوری توسط دو روش

با توجه به شکل ۸، خطوط تراز عمق نقطه‌ی کوری در قسمت شرق قله‌ی سهند و جنوب غرب قله‌ی سبلان کمترین مقدار را از خود نشان می‌دهد. دلیل این موضوع احتمالاً فعالیت دمایی بالای این دو قله‌ی آتشفشانی در عمق است. با توجه به این موضوع که تخمین

مغناطیس هوایی استان اردبیل (مطالعه موردی)، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین.

کساییان، م.، مرادزاده، ع. و نجاتی، ع.، ۱۳۹۲، تخمین عمق نقطه کوری و اکتشاف نقاط مستعد ذخایر ژئوترمال در اردبیل، نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.

Aydin, I. and Oksum, E., 2010, Exponential approach to estimate the Curie-temperature depth, J. Geophys. Eng., 7, 113-125.

Bansal, A.R., Gabriel, G., Dimri, V.P. and Krawczyk, C.M., 2011, Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a modified centroid method for fractal distribution of sources: An application to aeromagnetic data in Germany, Geophysics, 76 (3), 11-22.

Bhattacharyya, B.K. and Leu, L.K., 1975, Spectral Analysis of Gravity and Magnetic Anomalies due to Two-dimensional Structures, Geophysics., 40, 993-1013.

Blakely, R.J., 1988, Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 93 (B10), 11817-11832.

Blakely, R.J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Bouligand, C., Jonathan, M., Glen, G. and Blakely, J.R., 2009, Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization, J. Geophys. Res., 114, 1-25.

Byerly, P.E. and Stolt, R.H., 1977, An Attempt to Define the Curie Point Isotherm in Northern and Central Arizona, Geophys. 42 (7), 1394-1400.

Dolmaz, N.N., Hisarlı, Z.M., Ustaomer, T. and Orabay, N., 2005, Curie point depths based on spectrum analysis of aeromagnetic data, West Anatolian extensional province, Turkey, Pure appl. Geophys, 162, 571-590.

Gupta, H. and Roy, S., 2007, Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21ST Century, Elsevier, 111 P.

Hisarlı, Z.M., Dolmaz, M.N., Okyar, M., Etiz, A. and Orbay, N., 2011, Investigation into regional thermal structure of the Thrace Region, NW Turkey, from aeromagnetic and borehole data, Stud. Geophys. Geod, 56, 269-291.

<http://www.gsi.ir/Images/Maps/Geology01-gsi-iran.pdf>.

Okubo, Y., Graf, R.J., Hansent, R.O., Ogawa, K. and Tsu, H., 1985, Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas Japan" Geophysics., 53, 481-494.

Ravat, D., 2004, Constructing full spectrum potential-

مرکزیابی و مدل‌سازی پیشرو انجام شده است. استفاده از روش مرکزیابی به دلیل سخت بودن انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب برای تخمین عمق بالا و متوسط روش مبتنی بر تجربه مفسر است. استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو به دلیل استفاده از مدل پیشرو و برازش آن به طیف مشاهده‌ای فاقد مشکل انتخاب بازه‌ی عدد موج که در روش مرکزیابی وجود دارد؛ است. همچنین به دلیل تخمین همزمان عمق بالا و عمق نقطه‌ی کوری روش مدل‌سازی پیشرو قابل اعتمادتر است و تخمین را با خطای کمتری مواجه می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از دو روش مرکزیابی و روش مدل‌سازی پیشرو به منظور برآورد عمق کوری در منطقه شمال غرب ایران استفاده شده است. روش معمول در برآورد عمق کوری روش مرکزیابی است؛ که به دلیل دو مرتبه برازش خط (که در مرحله اول عمق بالایی و در مرحله دوم عمق مرکز هر بلوک تخمین زده می‌شود) و همچنین انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب روشی مبتنی بر تجربه مفسر است. در مقابل استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو به دلیل استفاده از مدل پیشرو و برازش آن به طیف مشاهده‌ای مشکلات مربوط به روش فوق‌الذکر را نداشته و می‌توان به نتایج آن اطمینان بیشتری کرده و نتایج به دست آمده از آن قابل قبول‌تر است. تخمین عمق نقطه‌ی کوری به هر دو روش در منطقه‌ی شمال غرب ایران انجام شد؛ که با توجه به برتری ذکر شده برای روش مدل‌سازی پیشرو، این نتایج به صورت نقشه منحنی‌های تراز برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شد. در این نقشه مناطق شرق قله‌ی سهند و جنوب غربی قله‌ی سبلان دارای پتانسیل بالاتری از منظر نقطه کوری نسبت به سایر مناطق تشخیص داده شد؛ که برای فازهای بعدی اکتشاف ذخایر ژئوترمال توصیه می‌شوند.

۷- سپاس‌گزاری

نویسندگان این تحقیق بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر حمید آقاجانی به دلیل مساعدت ایشان در پیشبرد این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

۸- منابع

حیدرنژاد، پ. و نجاتی، ع.، ۱۳۹۴، تخمین عمق دمای کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس هوابرد جهت اکتشاف نقاط مستعد ذخایر ژئوترمال، اولین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی پاک.

خوجم لی، ا.، مرادزاده، ع. و نجاتی، ع.، ۱۳۹۳، تخمین عمق نقطه کوری با روش مدل‌سازی پیشرو پیک طیفی: داده‌های

حیدر نژاد صنمی و نجاتی کلانه، مقایسه روش‌های مرکز یابی و مدل‌سازی پیشرو طیف توان به منظور تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از ...، صفحات ۴۱۲-۴۰۱.

Estimating Curie Point Depth and Heat Flow Map for Northern Red Sea Rift of Egypt and Its Surroundings, from Aeromagnetic Data, Pure Appl. Geophys (published online).

field anomalies for enhanced geodynamical analysis through integration of surveys from different platforms (INVITED), EOS, Trans. Am. geophys. Un., 85 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract G44A-03.

Tanaka, A., Okubo, Y. and Matsubayashi, O., 1999, Curie point depth based on spectrum analysis of magnetic anomaly data in East and Southeast Asia, Tectonophysics., 306, 461-470.

Ravat, D., Pignatelli, A., Nicolosi, I. and Chiappini, M., 2007, A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data, Geophys. J. Int., 169, 421-434.

Tselentis, G.A., 1991, An attempt to define curie depths in Greece from aeromagnetic and heat flow data. PAGEOPH., 136, 87-101.

Saleh, S., Salk, M. and Oya Pamukc, U., 2012,



Shahrood University of Technology



A comparison between centroid and forward modeling methods in order to estimate curie point depth using spectral analysis of aeromagnetic data for geothermal exploration

Peyvand Heidarnejad-Sanami^{1*} and Ali Nejati-Kalate²

1- M.Sc., School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 19 August 2017; Accepted: 4 May 2018

* Corresponding author: peyvand7010@gmail.com

Keywords

Geo Thermal
Radially Power Spectra
Forward Modeling
Centroid Method
Curie Point

Extended Abstract

Summary

Geothermal energy can be a good replacement for any kind of energy we use today. Estimation of curie point depth (CPD) is one of the first steps in geothermal exploration. Spectral analysis of aeromagnetic data can provide important information about temperature distribution in depth. In this study, we attempt to estimate the CPD using centroid method and forward modeling in northwest of Iran. The reduced-to-pole (RTP) aeromagnetic data were

divided into 11 overlapping windows of the size of 100×100 km. In the centroid method, the average depth to the top of the deepest crustal block, Z_t was first computed by linear fitting to the second longest wavelength segment of the power spectrum of aeromagnetic data. Then, depth to the centroid of the deepest crustal block, Z_o was computed by linear fitting to the longest wavelength segment of power spectrum of aeromagnetic data. In forward modeling, the modelled spectra were fitted to the observed spectrum iteratively and the depth to the top and bottom of the block was finally estimated. According to the obtained results, the CPD is shallow in the west part of the area and as a comparison of the results with the locations of hot springs in the area, we conclude that the west part of the area has a good potential for geothermal exploration.

Introduction

Estimation of CPD using spectral analysis of aeromagnetic data is one of the first steps in primary geothermal exploration. The goal of estimation of CPD is to know the thickness of crust and temperature distribution in depth from a set of known aeromagnetic observations measured on the surface. Spectral analysis of aeromagnetic data can also help in the constraining of the temperature within the crust based on identifying and mapping the depth of curie isotherm. Above the curie temperature (580°C), magnetic minerals lose their ferromagnetism. This means that deeper layers at greater temperatures are essentially non-magnetic. This curie isotherm interface can be detected through a number of spectral magnetic methods. In this paper, geothermal exploration in northwest of Iran is attempted by determining the depth to the magnetic bottom. We estimate the magnetic bottom using two different methods that are centroid method and forward modeling of the spectral analysis of aeromagnetic data. These methods are used to determine CPD or magnetic bottom in northwest of Iran.

Methodology and Approaches

Aeromagnetic data of the area were taken from the Geological Survey of Iran. This data were corrected for the international geomagnetic reference field (IGRF1976). In this study, centroid method and forward modeling of the spectral analysis of the aeromagnetic data were used to determine CPD. To use these methods, the RTP aeromagnetic data were divided into 11 overlapping windows of size of 100×100 km (overlapped 50% with the adjacent windows). The two dimensional (2D) power spectrum of aeromagnetic data for each window was computed by Oasis Montaj software using fast Furrier transform (FFT) method. The biggest advantage of 2D power spectrum is that the depth of sources is easily determined by measuring the slop of power spectrum when the centroid method is used. Determination of CPD using centroid method can be carried out in two steps. Firstly, the centroid depth of the deepest magnetic source is estimated from the slop of the longest wavelength part of the spectrum divided by the wave number and the depth to the top of the magnetic source is similarly derived from the slope of high wave number portion of the power spectrum. Then, the bottom of magnetic source is obtained. Using forward modeling for estimation of CPD or magnetic bottom

has another advantage. That is the depths to the top and bottom of magnetic source can be determined together. Another advantage of forward modeling is that it allows one to fit iteratively the position matching the adjacent part of the slope more precisely and explore the model space. Based on the fitting the modeled spectra with the observed, one may accept or reject the results more confidently in this overall subjective process of fitting specific part of the spectra.

Results and Conclusions

An attempt has been made to calculate the depth to the bottom of magnetic sources from the aeromagnetic data in northwest of Iran using two spectral methods. CPD has been calculated by the centroid method and forward modeling. The results show that the CPD varies from 15 to 23 km in the study area. In forward modeling, the calculated power spectrum is fitted iteratively with the measured power spectrum using MATLAB software. A conclusion is that by using forward modeling, the depths to the top and bottom of magnetic source are estimated together and with this approach, CPD can be estimated better. Because of that, the CPD, estimated by forward modeling, is considered the CPD of study area. According to the obtained results of forward modeling, the CPD is shallow in west part of area. By comparing the results with the locations of hot springs in the area, we conclude that west part of area has a great potential for geothermal exploration. Consequently, it is proposed that the results of this study to be integrated in GIS environment with all available geological, geophysical, geochemical and other information layers. This additional information will facilitate selection of optimum sites for geothermal exploration.
