

## تخمین عمق کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد جهت پتانسیل یابی منابع زمین گرمایی؛ مطالعه موردی: شرق استان کرمان

محمدفهم آویش<sup>۱</sup>، حجت‌اله رنجبر<sup>۲</sup>، آزاده حجت<sup>۳\*</sup> و سعید کریمی‌نسب<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت: ۹۸/۴/۲۹، پذیرش نهایی: ۹۸/۱/۱)

### چکیده

در این مطالعه از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد در محدوده‌ای در شرق استان کرمان جهت شناسایی مناطق دارای شار زمین گرمایی استفاده شد. ابتدا تصحیح مربوط به میدان مغناطیسی مرجع با مدل *IGRF* انجام و سپس فیلتر برگردان به قطب بر روی داده‌ها اعمال شد. سپس به منظور حذف اثرات ناشی از توپوگرافی، خصوصیات زمین‌شناسی و میدان‌های مغناطیسی هسته، از فیلتر میان‌گذر استفاده شد. پس از بلوک‌بندی محدوده و انتقال داده‌ها به فاز فوریه، طیف توان هر بلوک محاسبه شد. عمق بالایی ( $Z_t$ ) و عمق مرکزی ( $Z_0$ ) هر بلوک از منحنی‌های لگاریتمی طیف توان به دست آمدند. عمق کف منابع مغناطیسی ( $Z_b$ ) که به عنوان عمق کوری در نظر گرفته می‌شود از رابطه  $Z_b = 2Z_0 - Z_t$  محاسبه و برای تخمین گرادیان زمین گرمایی و شار زمین گرمایی منطقه استفاده شد. نتایج نشان داد کمترین عمق کوری (۹/۵-۸/۵ کیلومتر) با بیشترین گرادیان دما و شار زمین گرمایی در جنوب کویر لوت (جنوب شرق محدوده) و جنوب غرب گلباف در محدوده راین با واحدهای آذرین متنوع و بیشترین عمق کوری در کویر لوت و واحدهای رسوبی شمال منطقه قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: داده‌های مغناطیسی هوابرد، عمق نقطه کوری، زمین گرمایی، کرمان، طیف توان.

### ۱. مقدمه

فرومغناطیسی، خاصیت فرومغناطیسی با افزایش دما کاهش می‌یابد تا این‌که در بالای دمای کوری ( $T_c$ ) ناپدید می‌شود (لانزا و ملونی، ۲۰۰۶).

با توجه به این نکته که دما با عمق ناشی از گرادیان زمین گرمایی محلی افزایش می‌یابد، اگر دمای سطح زمین محاسبه شود، گرادیان زمین گرمایی می‌تواند از تقسیم اختلاف بین دمای سطح زمین در آن ناحیه و دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد بر عمق نقطه کوری به دست آید (هسیه و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین عمق کوری برای آن ناحیه منعکس‌کننده یک شار زمین گرمایی محلی و همچنین خصوصیات کانی‌شناسی کانی‌های مغناطیسی آن ناحیه می‌باشد (چوپینگ و کنت، ۲۰۱۵). از طرفی، عمق کوری کم نشان‌دهنده مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی، ولکانیسم جوان و پوسته با ضخامت نازک می‌باشد (آیدین و همکاران، ۲۰۰۵).

بیشتر منابع زمین گرمایی، در نواحی فعال تکتونیکی قرار دارند و در این نواحی، فعالیت‌های گسترده آذرین درونی و بیرونی سبب ایجاد بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشخص و قابل تمایز در میدان مغناطیسی می‌شود (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). در واقع، از روش مغناطیس‌سنجی نیز به‌همین منظور و برای مکان‌یابی توده‌های نفوذی و ردیابی گسل‌ها و دایک‌های پنهان و مناطق با مغناطیس پایین استفاده می‌شود (جرجسون، ۲۰۰۹). نقطه کوری همان دمایی است که در آن کانی‌های مغناطیسی خاصیت فرومغناطیس خود را از دست می‌دهند (وانکو و شئو، ۲۰۱۵). در واقع عمق کوری، سطح نظری با دمای حدود ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد است و با توجه به تبدیل مواد فرومغناطیس به مواد پارامغناطیس، می‌تواند به عنوان شاخص پایین یک منبع مغناطیسی در نظر گرفته شود (هسیه و همکاران، ۲۰۱۴). برای کلیه کانی‌های

(۲۰۱۵) نشان دادند که عمق پایین منابع مغناطیسی که با عنوان عمق کوری نیز معرفی می‌شود، می‌تواند از طریق آنالیز داده‌های مغناطیس‌سنجی محلی تخمین زده شود (وانکو و شتو، ۲۰۱۵).

یوسفی و همکاران (۲۰۰۷) با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در سامانه اطلاعات جغرافیایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی در ایران را شناسایی کردند. حیدرآباد صنمی و نجاتی کلاته (۱۳۹۸) با استفاده از آنالیز طیف توان دی-فرکتال شده داده‌های مغناطیس هوابرد، به تخمین پارامتر فرکتالی و عمق کوری منابع مغناطیسی در آذربایجان شرقی پرداخته‌اند. مطالعه مذکور به بررسی و مقایسه روش‌های معمول تخمین عمق کوری با روش طیف دیفرکتال شده پرداخته است که ایده جالبی برای مطالعات آتی می‌باشد. فردوسی و مرادزاده (۱۳۹۷) به کمک داده‌های مغناطیسی هوابرد، عمق کوری و شار زمین‌گرایی استان زنجان را جهت شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرایی تخمین زدند. حجت و همکاران (۱۳۸۹؛ ۲۰۱۶) نیز با استفاده از مدل‌های ماهواره‌ای میدان مغناطیسی پوسته و محاسبات عمق کوری، به شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی پرداختند که بخشی از ناحیه جنوب شرق استان کرمان را به‌عنوان محدوده پتانسیل‌دار معرفی کردند. آویش و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مطالعات سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی در محدوده سیرج-گلباف استان کرمان و حیدرآبادی پور و همکاران (۱۳۹۶) نیز با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد به تخمین عمق کوری در محدوده مرکزی استان کرمان پرداختند. با این وجود اکتشاف دقیق‌تر این منابع در استان کرمان نیازمند مطالعات جامع و بیشتری می‌باشد.

در این مطالعه نیز مقادیر عمق کوری، گرادیان زمین‌گرایی و شار آن در محدوده‌ای واقع در شرق استان کرمان با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی و روش طیف توان تخمین زده خواهد شد.

بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، عمق هم‌دمای کوری و شار گرمای سطحی با یکدیگر مطابقت دارند (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵؛ تاناکا و همکاران، ۱۹۹۹؛ استمپولیدیس و سوکاس، ۲۰۰۲). ایده استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد در تخمین عمق کوری جدید نیست. اوکیوبو و همکاران (۱۹۸۵) لیستی از اولین مطالعات از سال ۱۹۴۱ تا ۱۹۸۱ در این زمینه ارائه کرده‌اند.

شوئی و همکاران (۱۹۷۷) گزارشی از تلاش خود در تعیین عمق بستر توده‌های مغناطیسی در چهار منطقه از غرب ایالات متحده ارائه کرده‌اند. آنها با مقایسه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با میدان‌های تئوری محاسبه شده برای شبکه‌ای از منشورهای قائم، عمق بستر منابع مغناطیسی را تخمین زدند. در مطالعه‌ای جهت برآورد منابع زمین‌گرایی ژاپن برای جزیره کیوشو (Kyushu)، با استفاده از معکوس‌سازی داده‌های ناحیه‌ای مغناطیس هوابرد، نقشه عمق کوری تهیه شد (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵). با استفاده از خصوصیات طیفی میدان‌های مغناطیسی حاصل از برداشت‌های مغناطیس هوابرد ایالت نوادا، امریکا، عمق هم‌دمای کوری در این منطقه تخمین زده شد (بلیکلی، ۱۹۸۸). استمپولیدیس و سوکاس (۲۰۰۲) عمق کوری را با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد اندازه‌گیری شده در تراکیه (Thrace) و مقدونیه (Macedonia) یونان، تخمین زدند. آنها در تحقیق خود نیز، منابعی را که با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد به تخمین عمق کوری در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند (از سال ۱۹۴۱ تا سال ۱۹۹۸) معرفی کرده‌اند.

راوات و همکاران (۲۰۰۷) به منابعی که نزدیک به چهار دهه (۲۰۰۵-۱۹۷۰) از روش‌های مختلف جهت تخمین عمق کوری از منحنی طیف میانگین فوریه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی استفاده کرده‌اند، اشاره کرده‌اند. هیسارلی و همکاران (۲۰۱۲) نیز در بخشی از مطالعه خود، منابعی را که از تخمین‌های طیفی داده‌های مغناطیس‌سنجی جهت تهیه نقشه عمق کوری در مناطق مختلف جهان استفاده کرده‌اند، معرفی کرده‌اند. چندین مطالعه (از ۱۹۷۵ تا

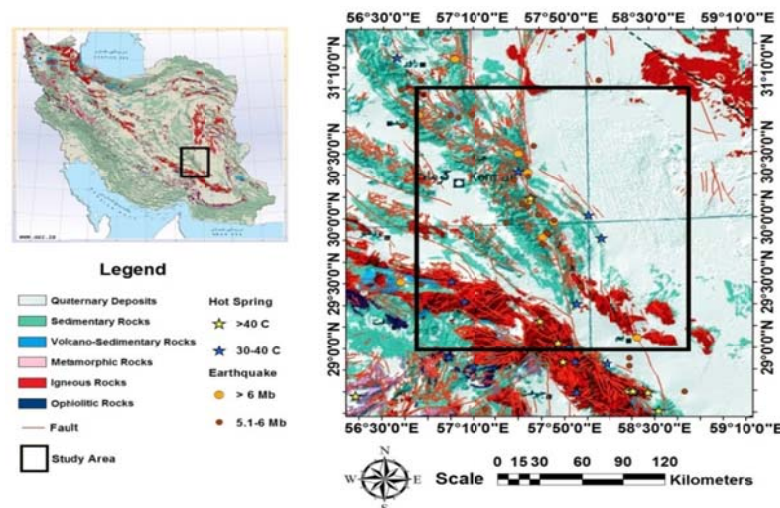
## ۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

استان کرمان در جنوب شرق ایران قرار گرفته که از دیدگاه ریخت‌شناختی سیمای بسیار متنوعی دارد. نواحی شرقی این استان محدود به پهنه‌های کویری بسیار گسترده‌ای می‌شود که تا استان سیستان و بلوچستان ادامه دارد. نواحی مرکزی آن که مهم‌ترین رشته‌های آن سلسله جبال بارز است کوهستانی و مرتفع بوده و دارای زمستان‌ها و پاییز سرد و بهار و تابستان نسبتاً معتدل می‌باشد. این استان در نواحی جنوب غربی با رشته کوه‌های زاگرس مجاور می‌شود.

از دیدگاه زمین ساخت بزرگ مقیاس نیز استان کرمان دارای تنوع ساختاری زیادی است. در جنوب غرب بخشی از زون ساختاری زاگرس و زون خرد شده آن و در جنوب بخشی از زون ساختاری مکران را شامل می‌شود. زون سندج-سیرجان از نواحی غرب شهر بابک تا نزدیکی زون گسلی زندان در کهنوج در این استان رخنمون داشته و رشته کوه‌های آتشفشانی ارومیه-دختر به‌صورت کمربندی با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی از نزدیکی انار تا جنوب شرقی بم در آن امتداد می‌یابد. پلاتفرم پالئوزوئیک ایران مرکزی بخش عمده‌ای از شرق و شمال و شمال شرق این استان را پوشش داده است (آقانباتی، ۱۳۸۵).

ناحیه مورد مطالعه در این پژوهش در عرض جغرافیایی

۲۹°۰۰' تا ۳۱°۰۰' شمالی و طول جغرافیایی ۵۶°۴۵' تا ۵۸°۴۵' شرقی قرار گرفته است. به‌طور کلی این محدوده از سه واحد زمین‌شناسی اصلی شامل رسوبات کویر لوت در شرق و شمال شرق، سنگ‌های رسوبی از قبیل کنگلومرا و ماسه‌سنگ، سنگ‌های آهکی و دولومیتی، شیل، رسوبات کواترنری در مرکز و شمال غرب و تنوعی از سنگ‌های آتشفشانی و اسیدی شامل ریولیت، آندزیت، تراکی آندزیت، ریوداسیت به‌همراه مجموعه‌ای از کمپلکس‌های حاوی جریان‌های بازالتی و تراکی بازالت و آگلومرا در جنوب و جنوب غرب که در واقع، بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر و محور دهج-ساردوئیه است، تشکیل شده است (شکل ۱؛ آقانباتی، ۱۹۹۳؛ سهندی، ۱۳۷۰). از لحاظ ساختاری اکثر گسل‌های محدوده روند شمال غرب-جنوب شرق داشته که در امتداد آنها چشمه‌های آب‌گرم متنوعی نیز به‌وجود آمده‌اند (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲؛ شجاعی، ۱۳۸۲). از مهم‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های محدوده گسل گلباف یا گوک است که در چند سال گذشته چندین زلزله شدید و ویرانگر از جمله در شهر گلباف و روستای سیرچ در امتداد این گسل رخ داده‌اند. این گسل بخشی از گسل نایبند-سبزواران بوده و ساز و کار آن، فشاری و امتداد لغز با مؤلفه راستگرد در جهت شمال غرب-جنوب شرق است (www.gsi.ir).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ساده شده زمین‌شناسی ایران بر پایه نوع سنگ، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

## ۳. روش تحقیق

روش‌های برآورد میزان عمق منابع مغناطیسی را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد: روش‌هایی که به بررسی شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی جدا شده می‌پردازند (باتاچاریا و لئو، ۱۹۷۵ b) و روش‌هایی که خواص آماری الگوهای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (اسپکتور و گرنت، ۱۹۷۰) را بررسی می‌کنند. هر دو روش، ارتباط بین طیف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و عمق یک منبع مغناطیسی را، با تبدیل داده‌های مکانی به حوزه فرکانس، ارائه می‌دهند (تاناکا و همکاران، ۱۹۹۹)، با این تفاوت که روش دوم برای مجموعه‌های منطقه‌ای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بسیار مناسب‌تر است (شوئی و همکاران، ۱۹۷۷).

استفاده از روش طیف توان برای کسب اطلاعات میدان پتانسیل و شناسایی بی‌هنجاری‌های این روش، اولین بار توسط باتاچاریا (۱۹۶۵ و ۱۹۶۶) و اسپکتور و باتاچاریا (۱۹۶۶) مورد مطالعه قرار گرفت. روش آنالیز طیفی دو بعدی، بعداً توسط اسپکتور و گرنت (۱۹۷۰) منتشر شد. آنها عمق بالای منشور مستطیل شکل مغناطیسی ( $Z_t$ ) را از روی شیب منحنی لگاریتم طیف توان تخمین زدند. سپس عمق مرکز ثقل منبع مغناطیسی ( $Z_0$ ) توسط باتاچاریا و لئو (a و b ۱۹۷۵؛ ۱۹۷۷) محاسبه شد. روش برآورد عمق پایین اجسام مغناطیسی ( $Z_b$ ) نیز با استفاده از روش تجزیه و تحلیل طیفی اسپکتور و گرنت (۱۹۷۰) بعداً توسط اوکیو و همکاران (۱۹۸۵) ارائه شد.

مطابق تاناکا و همکاران (۱۹۹۹)، اگر فرض کنیم که لایه در تمام جهات افقی گسترش بی‌نهایت دارد، عمق بالای یک منبع مغناطیسی در مقایسه با مقیاس افقی آن منبع مغناطیسی کوچک است و مغناطش  $M(x, y)$  یک تابع تصادفی بر حسب  $x$  و  $y$  است. در سال ۱۹۹۵، طیف توان چگالی کل میدان بی‌هنجاری  $\Phi_{\Delta T}$  توسط بلیکلی (۱۹۹۵) به صورت زیر معرفی شد:

$$\Phi_{\Delta T}(kx, ky) = \Phi_M(kx, ky) \times F(kx, ky) \quad (1)$$

$$F(kx, ky) = 4\pi^2 C_m^2 |\theta_m|^2 |\theta_f|^2 e^{-2|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (2)$$

که در آن  $k_x$  و  $k_y$  مؤلفه‌های عدد موج و  $\Phi_M$  چگالی انرژی مغناطیس شدگی،  $C_m$  یک عدد ثابت و  $\theta_m$  و  $\theta_f$  به ترتیب فاکتور جهت مغناطیسی و جهت میدانی وابسته به مغناطیس زمین می‌باشند. تمامی جملات به جز  $|\theta_m|^2$  و  $|\theta_f|^2$  به صورت شعاعی متقارن‌اند. علاوه بر این، میانگین شعاعی  $\theta_m$  و  $\theta_f$  ثابت هستند. اگر  $M(x, y)$  کاملاً تصادفی و غیر همبسته باشد،  $\Phi_{\Delta T}(kx, ky)$  ثابت است. بنابراین میانگین شعاعی  $\Phi_{\Delta T}$  برابر است با:

$$\Phi_{\Delta T}(|k|) = A e^{-2|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (3)$$

A یک مقدار ثابت است. برای طول موج‌های کمتر از حدود دو برابر ضخامت لایه، رابطه (۳) برابر است:

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}] = \ln B - |k|Z_t \quad (4)$$

B مقدار ثابتی است. می‌توان عمق بالای محدوده ( $Z_t$ ) یک منبع مغناطیسی را توسط شیب لگاریتم طیف توان کل میدان بی‌هنجاری نسبت به  $|k|$  از رابطه (۴) به دست آورد. از طرفی رابطه (۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2} = C e^{-|k|Z_0} (e^{-|k|(Z_t - Z_0)} - e^{-|k|(Z_b - Z_0)}) \quad (5)$$

که در آن  $Z_0$  عمق مرکز ثقل منبع مغناطیسی،  $Z_b$  عمق پایه منبع مغناطیسی و C ثابت است. در طول موج‌های بلند، رابطه (۵) به شکل زیر قابل بیان است:

$$\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2} = C e^{-|k|Z_0} (e^{-|k|(-d)} - e^{-|k|(d)}) \approx C e^{-|k|Z_0} 2|k|d \quad (6)$$

$2d$  ضخامت لایه مغناطیسی است. رابطه (۶) با تقسیم طرفین بر  $|k|$  و گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین برابر خواهد بود با:

$$\ln\{[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}]/|k|\} = \ln D - |k|Z_0 \quad (7)$$

D مقداری ثابت است. حال اگر منحنی  $\ln\{[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}]/|k|\}$  نسبت به  $|k|$  رسم شود، شیب منحنی برابر با  $Z_0$  یا همان عمق قسمت میانی لایه مغناطیسی افقی است. بنابراین عمق کف منبع مغناطیسی را

سنگ‌های مختلف هدایت گرمای متفاوتی دارند که نشان دهنده ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی می‌باشد (هیسارلی و همکاران، ۲۰۱۲). ثابت هدایت گرمایی بازالت و گرانیته به ترتیب  $Wm^{-1}C^{-1}$   $۱/۳-۲/۹$  و  $۲/۴-۳/۸ Wm^{-1}C^{-1}$  (تورکات و شوبرت، ۱۹۸۲)، ساختارهای رسی نئوزن  $۲/۱ Wm^{-1}C^{-1}$  (ترجان، ۱۹۷۹) و سنگ بستر متامورفیک  $۲/۱۲۳ Wm^{-1}K^{-1}$  (استمپولیدیس و سوکاس، ۲۰۰۲) ارائه شده است.

#### ۴. تخمین عمق کوری در منطقه مورد مطالعه

جهت تهیه نقشه عمق کوری از روش طیف توان (اسپکتور و گرن، ۱۹۷۰) و داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد شرکت تگزاس هوستون آمریکا در سال‌های ۱۹۷۷-۱۹۷۵، با فاصله خطوط پرواز  $۷/۵$  کیلومتر، استفاده شد. محدوده مورد مطالعه به صورت چهارگوشی با ابعاد  $۲ \times ۲$  درجه می‌باشد. پس از حذف داده‌های ناهمخوان و میدان مغناطیسی زمین، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی رسم شد. سپس فیلتر برگردان به قطب بر روی آن اعمال شد (شکل ۲).

بخش‌های مختلف طیف مغناطیسی، مؤلفه‌های مختلفی از میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند. داده‌های میدان کل شامل بی‌هنجاری‌های طول موج بلند بوده که در تخمین عمق مرکزی و عمق نقطه کوری تأثیرگذار می‌باشند. این مؤلفه‌ها ناشی از توپوگرافی، خصوصیات زمین‌شناسی و میدان‌های مغناطیسی هسته بوده و به وسیله مدل‌های IGRF و DGRF به طور کامل حذف نمی‌شوند (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵؛ استمپولیدیس و سوکاس، ۲۰۰۲). بلندترین طول موج‌ها در داده‌های بی‌هنجاری حاوی اطلاعاتی از منابع بسیار عمیق می‌باشند. جهت تخمین عمق مرکزی و حذف اثر این طول موج‌ها، از یک فیلتر بالاگذر در داده‌های مغناطیس‌سنجی استفاده شد (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵).

استمپولیدیس و سوکاس (۲۰۰۲) از فیلتر میان‌گذر با طول موج قطع  $۵۰-۱۰$  کیلومتر جهت محاسبه عمق منابع

می‌توان از رابطه زیر به دست آورد (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵، تاناکا و همکاران، ۱۹۹۹):

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (۸)$$

از آنجا که  $Z_b$  عمق کران پایین منبع مغناطیسی، نشان می‌دهد مواد معدنی فرومغناطیس به مواد معدنی پارامغناطیس، با توجه به دمای حدود  $۵۸۰$  درجه سانتی‌گراد، تبدیل شده‌اند؛ بنابراین می‌توان فرض کرد عمق پایین به دست آمده منبع مغناطیسی، همان عمق کوری است (هسیه و همکاران، ۲۰۱۴). این مقدار نشان دهنده مقدار متوسط منطقه است (تاناکا و همکاران، ۱۹۹۹). از طرف دیگر، به منظور ارتباط عمق کوری ( $Z_b$ ) با دمای کوری، جهت قائم تغییرات دما و گرادیان دمایی ثابت فرض شد. گرادیان دما ( $dT/dz$ ) بین سطح زمین و عمق کوری (گرادیان زمین‌گرایی) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد (مادن، ۲۰۱۰؛ هسیه و همکاران، ۲۰۱۴):

$$dT/dz = 580^{\circ}C/Z_b \quad (۹)$$

گرادیان دما تغییرات دما بر حسب عمق بوده و با عمق کوری رابطه معکوس دارد. گرادیان دمایی بالا نشان‌دهنده عمق کوری کم بوده که در اکتشاف منابع زمین‌گرایی اهمیت دارد. شار زمین‌گرایی نیز یکی از پارامترهای اصلی جهت بررسی و اکتشاف منابع زمین‌گرایی می‌باشد (حجت و همکاران، ۲۰۱۶). شار زمین‌گرایی بالا نشان‌دهنده دمای بالاتر در زیر سطح زمین می‌باشد. گرادیان دما را می‌توان با استفاده از رابطه زیر، به شار زمین‌گرایی  $q$  مرتبط کرد (مادن، ۲۰۱۰؛ هسیه و همکاران، ۲۰۱۴):

$$q = \lambda(dT/dZ) = \lambda(580^{\circ}C/Z_b) \quad (۱۰)$$

که در آن  $۵۸۰^{\circ}C$  دمای نقطه کوری و  $\lambda$  ضریب هدایت گرمایی می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان می‌دهد عمق کوری با جریان گرما نسبت معکوس دارد.

هدایت گرمای سنگ‌های رسوبی یک فاکتور اصلی کنترل‌کننده تغییرات قائم و جانبی در سنگ بستر است.

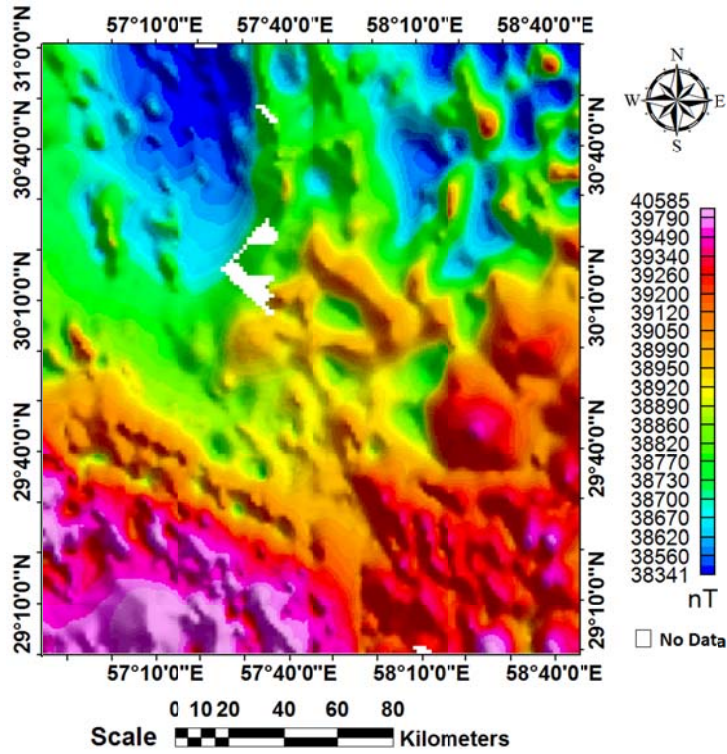
مغناطیسی بسیار عمیق و حذف مؤلفه‌های مذکور استفاده کردند. در این مطالعه به منظور حذف اثرات عوارض سطحی و منابع بسیار عمیق، از فیلتر میان‌گذر با طول موج قطع ۶۵-۱۰ کیلومتر استفاده شد (شکل ۳). بخش قوی طول موج بلند که توسط منابع واقع در نزدیک سطح زمین به وجود آمده‌اند و در طیف داده برگردان به قطب مشاهده می‌شود، در طیف داده فیلتر میان‌گذر رقیق می‌شود (هیسارلی و همکاران، ۲۰۱۲).

در محاسبه عمق کوری با استفاده از روش طیف توان، تقسیم محدوده به بلوک‌های کوچک‌تر و انتخاب ابعاد بهینه برای بلوک‌بندی منطقه مورد مطالعه با اهمیت می‌باشد. انتخاب ابعاد پنجره انتخابی در مطالعات برخی محققان در مناطق مختلف جهان که توسط هیسارلی و همکاران (۲۰۱۲) به آنها اشاره شده است، متغیر بوده است. مثلاً، ابعاد بهینه پنجره مربعی مورد بررسی ممکن است تا ۱۰ برابر عمق واقعی باشد (اوکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵؛ بولیگانگاند و همکاران، ۲۰۰۹). می‌توان گفت در صورتی که در منحنی طیف توان اکثر بلوک‌ها، در عدد موج‌های پایین پیک مشاهده شود، ابعاد بلوک‌بندی بهینه است (بانزال و همکاران، ۲۰۱۱).

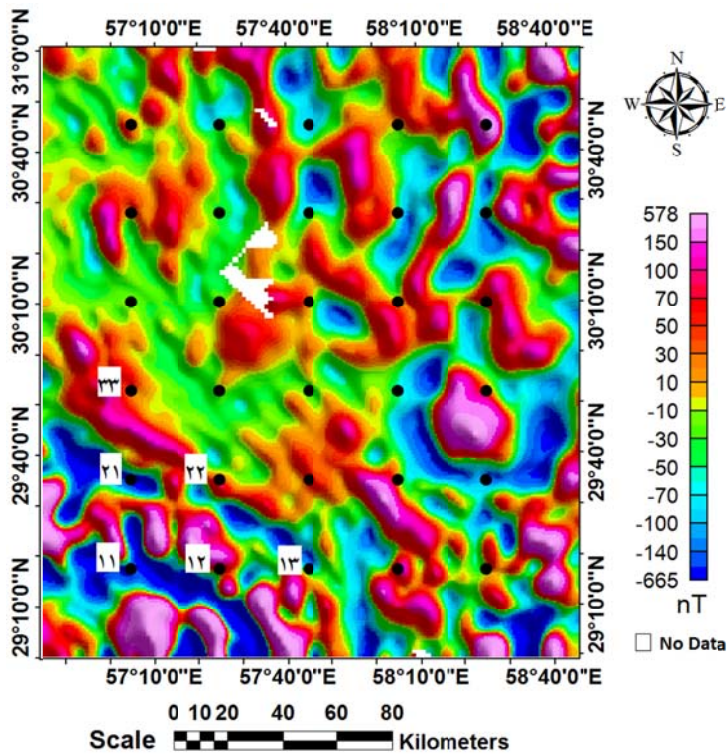
برای انتخاب ابعاد بلوک‌ها از نظریه بانزال و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شد. بلوک‌بندی با ابعاد متغیر از ۵۵ تا ۸۵ کیلومتر انجام شد. در نهایت، ابعاد بهینه بلوک ۶۵×۶۵ کیلومتر، با هم‌پوشانی ۵۰ درصد با بلوک‌های مجاور (شکل ۳)، برای محدوده مورد مطالعه انتخاب شد (جدول ۱). سپس روند مرتبه اول برای هر بلوک حذف شد و شبکه‌ها با استفاده از روش بیشینه آنتروپی جهت ایجاد

لبه‌های پیوسته ۱۰٪ گسترش داده شدند. برای محاسبه طیف توان، ابتدا نقشه فیلتر میان‌گذر هر بلوک به فاز فوریه منتقل و سپس میانگین لگاریتم طیف توان شعاعی بر حسب عدد موج ( $k$ ) برای هر بلوک رسم شد. عمق بالایی ( $Z_t$ ) و عمق مرکزی ( $Z_0$ ) هر بلوک را می‌توان با برازش شیب منحنی در عدد موج بالا و عدد موج پایین منحنی‌های مربوطه تخمین زد. در نهایت، با استفاده از رابطه  $Z_b = 2Z_0 - Z_t$  می‌توان عمق کوری را برای مرکز هر بلوک محاسبه کرد (هیسارلی و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به واحد عدد موج، جهت تخمین عمق‌های بالایی و مرکزی بلوک بر حسب کیلومتر، شیب منحنی‌ها به  $2\pi$  تقسیم شد (جدول ۲). نمونه‌ای از منحنی طیف توان حاصل از داده‌های فیلتر میان‌گذر محدوده مورد مطالعه در شکل (۵) آورده شده است. عمق بالایی و مرکزی این بلوک به ترتیب ۵/۲۶ و ۸/۷۲ کیلومتر به دست آمدند. عمق پایینی بلوک مذکور یا همان عمق کوری نیز ۱۲/۱۸ کیلومتر تخمین زده شد که معرف نقطه مرکز بلوک می‌باشد. با توجه به اینکه مختصات مرکزی هر بلوک مشخص است، می‌توان نقشه عمق کوری را برای محدوده مورد مطالعه رسم کرد (شکل ۶).

گرادیان زمین‌گرمایی منطقه نیز با استفاده از دمای  $580^\circ\text{C}$  نقطه کوری و مقادیر عمق کوری، از رابطه (۹) به دست آمد (شکل ۷). شار زمین‌گرمایی نیز یکی از پارامترهای اصلی است که در برنامه‌های اکتشاف زمین‌گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد (حجت و همکاران، ۲۰۱۶). برای محاسبه زمین‌گرمایی (شکل ۸) نیز از رابطه (۱۰) استفاده شد.



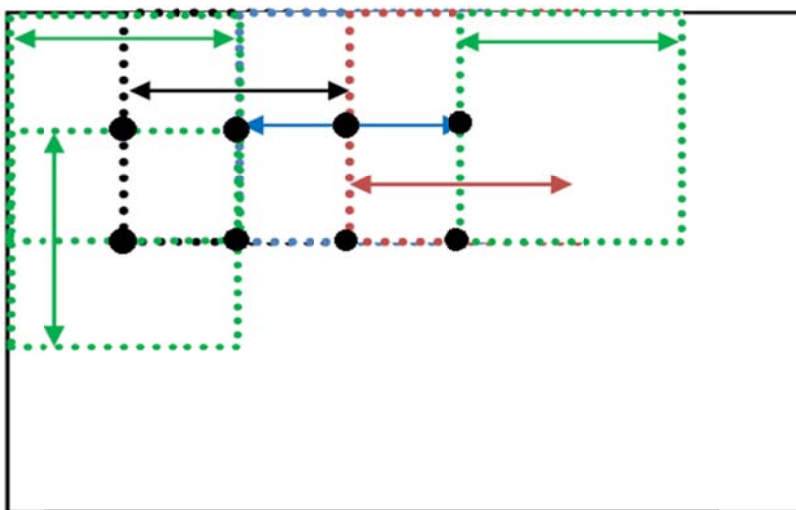
شکل ۲. نقشه فیلتر برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه.



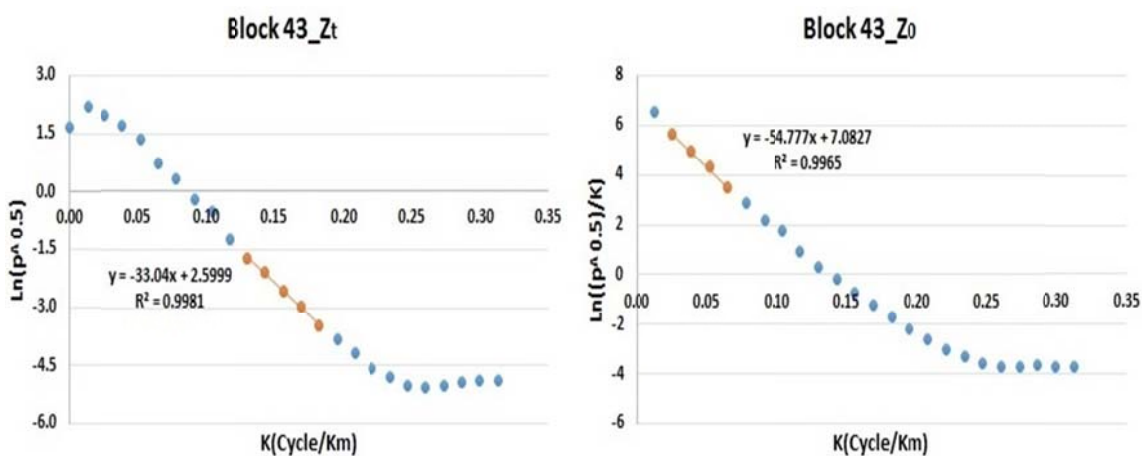
شکل ۳. نقشه فیلتر میان‌گذر محدوده مورد مطالعه و مراکز بلوک‌ها.

جدول ۱. اندازه ابعاد بلوک‌ها در تخمین عمق کوری.

ردیف	ابعاد بلوک (Km)	تعداد بلوک	تعداد پیک	درصد پیک
۱	۵۵×۵۵	۴۲	۲۳	۵۵
۲	۶۰×۶۰	۳۰	۲۱	۷۰
۳	۶۵×۶۵	۳۰	۲۴	۸۰
۴	۷۰×۷۰	۲۰	۱۵	۷۵
۵	۷۵×۷۵	۲۰	۱۴	۷۰
۶	۸۰×۸۰	۱۲	۵	۴۲
۷	۸۵×۸۵	۱۲	۵	۴۲



شکل ۴. نحوه بلوک‌بندی محدوده با ۵۰٪ همپوشانی جهت تخمین عمق کوری (برگرفته از وانگو و شتو، ۲۰۱۵).



شکل ۵. منحنی طیف توان بلوک ۴۳ جهت تخمین عمق بالایی ( $Z_t$ ) و عمق مرکزی ( $Z_0$ ) بلوک.



جدول ۲. نتایج تخمین زده شده پارامترهای مختلف زمین‌گرایی در مرکز بلوک‌ها.

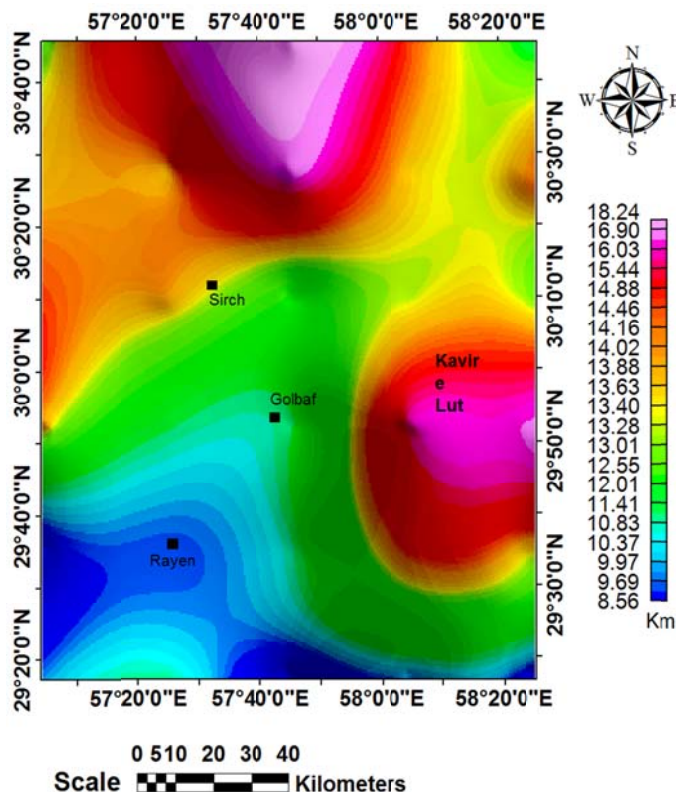
شماره بلوک	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	$Z_0$ (Km)	$Z_t$ (Km)	عمق کوری (Km)	گرادیان زمین‌گرایی ( $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ )	شار زمین‌گرایی ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
۱۱	۵۰۷۷۰۰	۳۲۴۰۵۰۰	۷/۵۱۱	۵/۱۷۲۳	۹/۸۴۹۷	۵۸/۸۸۵	۲۵۷/۹۴۵
۱۲	۵۴۰۲۰۰	۳۲۴۰۵۰۰	۷/۴۹۳۲	۴/۱۱۲۶	۱۰/۸۷۳۷	۵۳/۳۴	۲۳۳/۶۵۳
۱۳	۵۷۲۷۰۰	۳۲۴۰۵۰۰	۶/۹۲۱۵	۵/۱۵۱۹	۸/۶۹۱۱	۶۶/۸۳۵	۲۹۲/۳۳۲
۱۴	۶۰۵۲۰۰	۳۲۴۰۵۰۰	۷/۳۳۸۱	۴/۶۸۴۴	۹/۹۹۱۷	۵۸/۰۴۸	۲۵۴/۲۷۹
۱۵	۶۳۷۷۰۰	۳۲۴۰۵۰۰	۷/۳۲۷۹	۵/۰۹۴۷	۹/۵۶۱	۶۰/۶۶۳	۲۶۵/۷۳۴
۲۱	۵۰۷۷۰۰	۳۲۷۳۰۰۰	۶/۹۰۹۷	۴/۵۹۱۷	۹/۲۲۷۷	۶۲/۸۵۴	۲۷۵/۳۳۲
۲۲	۵۴۰۲۰۰	۳۲۷۳۰۰۰	۶/۴۸۴۱	۳/۳۵۹۶	۹/۶۰۸۶	۶۰/۳۶۳	۲۶۴/۴۱۷
۲۳	۵۷۲۷۰۰	۳۲۷۳۰۰۰	۷/۵۴۳۸	۴/۳۵۸۹	۱۰/۷۲۸۷	۵۴/۰۶۱	۲۳۶/۸۱۲
۲۴	۶۰۵۲۰۰	۳۲۷۳۰۰۰	۹/۲۳۷۷	۴/۲۷۹۳	۱۴/۱۹۶۲	۴۰/۸۵۶	۱۷۸/۹۶۹
۲۵	۶۳۷۷۰۰	۳۲۷۳۰۰۰	۹/۱۶۶۱	۴/۷۷۶۶	۱۳/۵۵۵۶	۴۲/۷۸۷	۱۸۷/۴۲۷
۳۱	۵۰۷۷۰۰	۳۳۰۵۵۰۰	۹/۴۵۴۸	۵/۰۴۲۵	۱۳/۸۶۷	۴۱/۸۲۶	۱۸۳/۲۱۷
۳۲	۵۴۰۲۰۰	۳۳۰۵۵۰۰	۷/۹۲۵۲	۴/۶۰۰۸	۱۱/۲۴۹۵	۵۱/۵۵۸	۲۲۵/۸۴۸
۳۳	۵۷۲۷۰۰	۳۳۰۵۵۰۰	۷/۹۷۹۸	۴/۹۷۶۱	۱۰/۹۸۳۴	۵۲/۸۰۷	۲۳۱/۳۱۹
۳۴	۶۰۵۲۰۰	۳۳۰۵۵۰۰	۱۰/۴۲۲۳	۴/۷۳۹۶	۱۶/۱۰۴۹	۳۶/۰۱۴	۱۵۷/۷۵۸
۳۵	۶۳۷۷۰۰	۳۳۰۵۵۰۰	۱۰/۶۳۵۲	۴/۹۷۸۳	۱۶/۲۹۲	۳۵/۶	۱۵۵/۹۴۶
۴۱	۵۰۷۷۰۰	۳۳۳۸۰۰۰	۹/۳۶۸۶	۴/۲۴۰۴	۱۴/۴۹۶۸	۴۰/۰۰۹	۱۷۵/۲۵۸
۴۲	۵۴۰۲۰۰	۳۳۳۸۰۰۰	۹/۲۷۶	۴/۶۳۴۹	۱۳/۹۱۷	۴۱/۶۷۶	۱۸۲/۵۵۹
۴۳	۵۷۲۷۰۰	۳۳۳۸۰۰۰	۸/۷۲۲۵	۵/۲۶۱۱	۱۲/۱۸۳۸	۴۷/۶۰۴	۲۰۸/۵۳
۴۴	۶۰۵۲۰۰	۳۳۳۸۰۰۰	۹/۰۱۹۹	۴/۷۸۷۶	۱۳/۲۵۲۲	۴۳/۷۶۶	۱۹۱/۷۱۷
۴۵	۶۳۷۷۰۰	۳۳۳۸۰۰۰	۸/۹۶۰۴	۴/۹۸۳۹	۱۲/۹۳۶۸	۴۴/۸۳۳	۱۹۶/۳۹۲
۵۱	۵۰۷۷۰۰	۳۳۷۰۵۰۰	۹/۳۶۴	۴/۹۶۸۶	۱۳/۷۵۹۴	۴۲/۱۵۳	۱۸۴/۶۵۱
۵۲	۵۴۰۲۰۰	۳۳۷۰۵۰۰	۸/۷۹۷	۳/۷۵۹۱	۱۳/۸۳۴۹	۴۱/۹۲۳	۱۸۳/۶۴۳
۵۳	۵۷۲۷۰۰	۳۳۷۰۵۰۰	۱۰/۴۳۴۱	۴/۱۵۴۳	۱۶/۷۱۳۹	۳۴/۷۰۲	۱۵۲/۰۱
۵۴	۶۰۵۲۰۰	۳۳۷۰۵۰۰	۸/۹۴۹۸	۴/۳	۱۳/۵۹۹۷	۴۲/۶۴۸	۱۸۶/۸۱۹
۵۵	۶۳۷۷۰۰	۳۳۷۰۵۰۰	۹/۲۸۵۴	۴/۵۰۵۳	۱۴/۰۶۵۴	۴۱/۲۳۶	۱۸۰/۶۳۳
۶۱	۵۰۷۷۰۰	۳۴۰۳۰۰۰	۹/۱۴۵۹	۵/۳۱۷۲	۱۲/۹۷۴۵	۴۴/۷۰۳	۱۹۵/۸۲۱
۶۲	۵۴۰۲۰۰	۳۴۰۳۰۰۰	۹/۹۳۸۴	۳/۹۷۹۳	۱۵/۸۹۷۵	۳۶/۴۸۴	۱۵۹/۸۱۷
۶۳	۵۷۲۷۰۰	۳۴۰۳۰۰۰	۱۱/۳۵۵۹	۴/۴۶۹۱	۱۸/۲۴۲۷	۳۱/۷۹۴	۱۳۹/۲۷۱
۶۴	۶۰۵۲۰۰	۳۴۰۳۰۰۰	۸/۹۴۳۶	۳/۴۰۵۹	۱۴/۴۸۱۴	۴۰/۰۵۱	۱۷۵/۴۴۵
۶۵	۶۳۷۷۰۰	۳۴۰۳۰۰۰	۷/۹۶۵۸	۴/۰۷۹۸	۱۱/۸۵۱۸	۴۸/۹۳۸	۲۱۴/۳۷۲

۵. بحث و نتایج

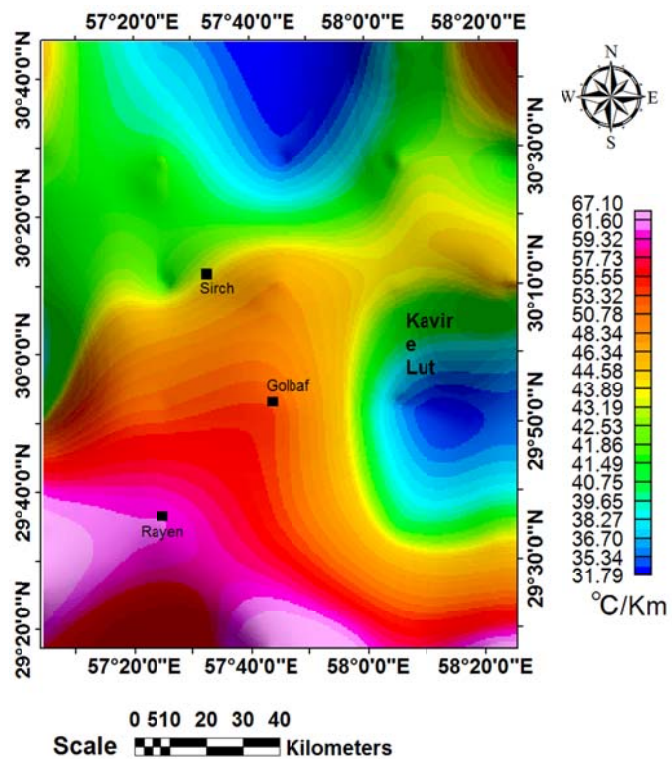
بررسی نتایج عمق کوری در این پژوهش (جدول ۲ و شکل ۶) نشان می‌دهد کمترین عمق کوری که در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی اهمیت دارد، در جنوب و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه می‌باشد. تغییرات آن از این ناحیه که دارای واحدهای آذرین بوده به سمت شمال و کویر لوت در شمال شرق که دارای واحدهای رسوبی می‌باشد، بیشتر می‌شود. همچنین در نواحی جنوبی و جنوب غربی که عمق نقطه کوری به طور قابل توجهی کم می‌باشد، واحدهای آذرین و چشمه‌های آب گرم با دمای بالا تمرکز بیشتری دارند (شکل ۹). این موضوع با توجه به نقشه فیلتر برگردان به قطب منطقه (شکل ۲) می‌تواند مربوط به توده‌های نفوذی و آتشفشانی در جنوب محدوده باشد. از طرفی نتایج حجت و همکاران

(۱۳۸۹ و ۲۰۱۶) و امیرپور و قدس (۱۳۸۹)، که در آن بخشی از جنوب شرق استان کرمان را به عنوان ناحیه پتانسیل‌دار زمین‌گرمایی معرفی کرده‌اند، این نتیجه را تأیید می‌کند.

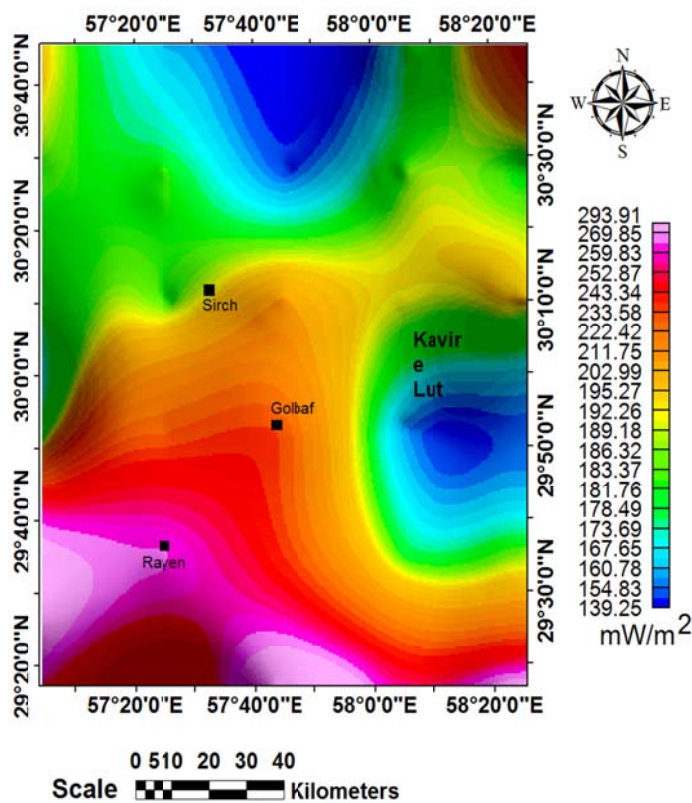
بر اساس نتایج مربوط به نقشه‌های گرادیان و شار زمین‌گرمایی (شکل‌های ۷ و ۸) نیز، بیشترین بی‌هنجاری شار زمین‌گرمایی منطقه در جنوب کویر لوت و جنوب غرب محدوده راین و کمترین مقدار آنها در کویر لوت و واحدهای رسوبی شمال و شمال غرب منطقه می‌باشد. وجود چندین چشمه آب گرم و نیز توده‌های آذرین مربوط به محور دهج-ساردوئیه در این محدوده و جنوب آن با نتایج محاسبه شده گرادیان و شار زمین‌گرمایی در این پژوهش مطابقت دارند.



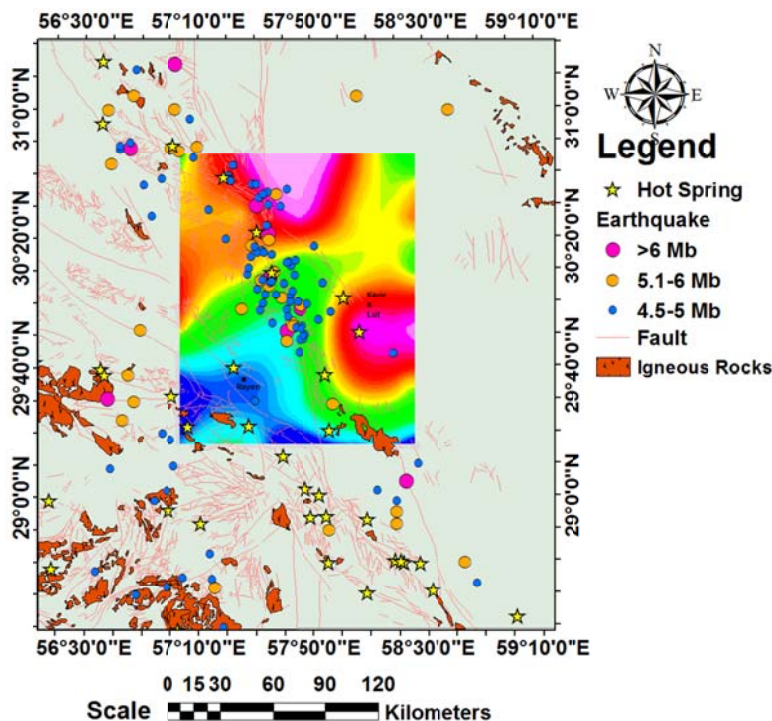
شکل ۶. نقشه عمق کوری محدوده مورد مطالعه.



شکل ۷. نقشه گرادیان زمین‌گرمایی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۸. نقشه زمین‌گرمایی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۹. هم‌پوشانی نشانه‌های سطحی با عمق کوری منطقه مورد مطالعه.

#### ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از داده‌های مغناطیسی هوابرد جهت اکتشاف مقدماتی منابع گرمایی در محدوده کرمان-بم استفاده شد. ابتدا عمق کوری با استفاده از روش طیف توان و سپس با توجه به وجود رابطه بین عمق کوری و شار زمین‌گرمایی (بالا بودن شار زمین‌گرمایی در مناطق با عمق کوری کم و بالعکس)، گرادیان و شار زمین‌گرمایی منطقه محاسبه شد. میانگین عمق کوری منطقه حدود ۱۲/۹ کیلومتر بوده و جنوب محدوده با عمق کوری نزدیک به ۹ کیلومتر، کمترین عمق با بیشترین شار زمین‌گرمایی را دارد و به‌عنوان محدوده پیشنهادی برای مراحل بعدی اکتشاف انرژی پیشنهاد می‌شود.

#### مراجع

آقاباتی، س.ع.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی و توان معدنی استان کرمان، رشد آموزش زمین‌شناسی، ۴۶، ۱۳-۸.  
 آویش، م. ف.، رنجبر، ح.، حجت، آ. و کریمی نسب،

س.، ۱۳۹۶، مطالعات سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی جهت اکتشاف منابع ژئوترمال در منطقه سیرچ-گلباف استان کرمان، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۳(۱)، ۹۹-۱۱۸.  
 امیرپور، ا. و قدس، ع.، ۱۳۸۹، تخمین عمق کوری در ایران با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.  
 حجت، آ.، حسین‌زاده گویا، ن. و فاکس ماول، ک.ک.، ۱۳۸۹، ارائه روشی جدید برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی (ژئوترمال) با استفاده از مدل‌های ماهواره‌ای میدان مغناطیسی پوسته، مجله ژئوفیزیک ایران، ۴(۱)، ۳۳-۴۳.  
 حسامی، خ.، جمالی، ف. و طبسی، ه.، ۱۳۸۲، نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، گروه لرزه، زمین‌ساخت، پژوهشگاه زلزله‌شناسی.

شجاعی، م. ر.، ۱۳۸۲، مجموعه اطلاعات پیرامون چشمه‌های آبگرم استان کرمان، مطالعه هیدروژئولوژی شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان. فردوسی، ح. و مرادزاده، ع.، ۱۳۹۷، تخمین عمق کوری و جریان حرارتی استان زنجان جهت شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی به کمک داده‌های مغناطیس هوابرد با قدرت تفکیک بالا، مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۸۷۸-۸۸۱ نوراللهی، ی.، جمال‌الدینی، م. و غضبان، ف.، ۱۳۷۷، پروژه پتانسیل‌سنجی انرژی زمین‌گرمایی ایران، بررسی روش‌های پتانسیل‌سنجی انرژی زمین‌گرمایی در جهان، سازمان انرژی‌های نو ایران، گروه زمین‌گرمایی، تهران.

حیدرآبادی پور، ن.، حجت، آ.، رنجبر، ح. و کریمی نسب، س.، ۱۳۹۶، تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد به منظور اکتشاف مقدماتی پتانسیل زمین‌گرمایی در محدوده مرکزی استان کرمان، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۳(۲)، ۱۷۶-۱۶۷.

حیدرآباد صنمی، پ. و نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۸، تخمین پارامتر فرکتالی و عمق کوری منابع مغناطیسی با استفاده از آنالیز طیف توان دی-فرکتال شده داده‌های مغناطیس هوابرد، آذربایجان شرقی، ایران، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۵(۱)، ۵۷-۷۲.

سهندی، م. ر.، ۱۳۷۰، نقشه زمین‌شناسی کرمان، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Aghanabati, A., 1993, Geological quadrangle map of Iran, No. J11, (Bam Quadrangle Map 1:250000), Geological Survey of Iran.
- Aydın, İ., Karat, H. İ. and Koçak, A., 2005, Curie-point depth map of Turkey, *Geophysical Journal International*, 162(2), 633-640.
- 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), L11-L22.
- Bhattacharyya, B. K., 1965, Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation, *Geophysics*, 30(5), 829-857.
- Bhattacharyya, B. K., 1966, Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body, *Geophysics*, 31(1), 97-121.
- Bhattacharyya, B. K. and Leu, L. K., 1975a, Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park: mapping of Curie point isothermal surface for geothermal reconnaissance, *Journal of Geophysical Research*, 80(32), 4461-4465.
- Bhattacharyya, B. K. and Leu, L. K., 1975b, Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures, *Geophysics*, 40(6), 993-1013.
- Bhattacharyya, B. K. and Leu, L. K., 1977, Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies, *Geophysics*, 42(1), 41-50.
- Blakely, R. J., 1988, Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada, *Journal of Geophysical Research*, 93, 817-832.
- Blakely, R. J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press, Cambridge, 441 p.
- Bouligand, C., Glen, J. M. and Blakely, R. J., 2009, Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B11), 1-25.
- Chopping, R. and Kennett, B. L. N., 2015, Maximum depth of magnetisation of Australia, its uncertainty, and implications for Curie depth, *GeoResJ*, 7, 70-77.
- Georgsson, L. S., 2009, Geophysical methods used in geothermal exploration. Presentation in short course IV on exploration for geothermal resources, UNU-GTP KenGen, GDC, Naivasha, Kenya, 1-16.
- Hisarli, Z. M., Dolmaz, M. N., Okyar, M., Etiz, A. and Orbay, N., 2012, Investigation into regional thermal structure of the Thrace Region, NW Turkey, from aeromagnetic and borehole data, *Studia Geophysica and Geodaetica*, 56(1), 269-291.
- Hojat, A., Fox Maule, C. and Hemant Singh, K., 2016, Reconnaissance exploration of potential geothermal sites in Kerman province, using Curie depth calculations, *Journal of the Earth and Space Physics*, 41 (4), 95-104.
- Hsieh, H. H., Chen, C. H., Lin, P. Y. and Yen, H. Y., 2014, Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan, *Journal*

- of Asian Earth Sciences, 90, 26-33.
- Lanza, R. and Meloni, A., 2006, *The Earth's magnetism*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 278 p.
- Maden, N., 2010, Curie-point depth from spectral analysis of magnetic data in Erciyes stratovolcano (Central Turkey), *Pure and Applied Geophysics*, 167(3), 349-358.
- Nwankwo L. I. and Shehu, A. T., 2015, Evaluation of Curie-point depths, geothermal gradients and near-surface heat flow from high-resolution aeromagnetic (HRAM) data of the entire Sokoto Basin, Nigeria, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 45-55.
- Okubo, Y., Graf, R., Hansen, R., Ogawa, K. and Tsu, H., 1985, Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan, *Geophysics*, 53(3), 481-494.
- 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.
- Shuey, R. T., Schellinger, D. K., Tripp, A. C. and Alley, L. B., 1977, Curie depth determination from aeromagnetic spectra, *Geophysical Journal International*, 50(1), 75-101.
- Spector, A. and Bhattacharyya, B. K., 1966, Energy density spectrum and autocorrelation function of anomalies due to simple magnetic models, *Geophysical Prospecting*, 14(3), 242-272.
- Spector, A. and Grant, F. S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35(2), 293-302.
- Stampolidis, A. and Tsokas, G. N., 2002, Curie point depths of Macedonia and Thrace, N. Greece, *Pure and Applied Geophysics*, 159, 2659-2671.
- Tanaka, A., Okubo, Y. and Matsubayashi, O., 1999, Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in east and southeast Asia, *Tectonophysics*, 306, 461-470.
- Tezcan, A. K., 1979, Geothermal studies, their present status and contribution to heat flow contouring in Turkey. In (Cermak, V., Rybach, L. eds.), *Terrestrial Heat Flow in Europe*, Springer, Berlin, 283-291.
- Turcotte, D. L. and Schubert, G., 1982, *Geodynamics applications of continuum physics to geologic problems*, Wiley, New York, 450 p.
- Yousefi, H., Ehara, S. and Noorollahi, Y., 2007, Geothermal potential site selection using gis in Iran, *Thirty-Second workshops on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, California, pp. 174-182.

## Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data for reconnaissance exploration of geothermal potential; Case study: east of Kerman Province

Avish, M. F.<sup>1</sup>, Ranjbar, H.<sup>2</sup>, Hojat, A.<sup>3\*</sup> and Karimi-Nasab, S.<sup>4</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2. Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

4. Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: 20 July 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

### Summary

In the recent decade, there has been an increasing interest in developing various resources of renewable energy as an alternative to fossil fuels in Iran. Geothermal energy is one of the promising reservoirs and exploration of geothermal favorability has become one of the main research interests in most parts of the country. Some reconnaissance studies have shown that the Kerman Province can be one of the geothermal potential regions in Iran. Different studies are being performed to prepare the geothermal favorability map for Kerman Province.

The aim of this study is to estimate the Curie point depth (CPD), heat flow and geothermal gradient from spectral analysis of aeromagnetic data for reconnaissance exploration of geothermal resources in the east of Kerman Province, southeast of Iran. This area is selected because it is characterized by thermal manifestations such as several hot springs with temperatures between 20–73°C, faults, and igneous rocks in the southern and southwestern parts.

Aeromagnetic data were first processed for removing the geomagnetic main field (using the International Geomagnetic Reference Field (IGRF)), reduced to pole (RTP) and band-pass filter. Then, we used spectral analysis technique to estimate the top and bottom boundaries of the magnetized crust. Comparison of magnetic map with geologic map shows a good correlation between the exposed geological units and magnetic signatures. Strong variations in magnetic intensity suggest a variety of magnetic properties. Bandpass filtered data were produced from the RTP aeromagnetic anomalies to isolate near surface and undesired deep effects. Then, the map was divided into thirty blocks, each having 50% of overlap with the adjacent block. A first-order trend was removed from each block, and grids were expanded by 10% using the maximum entropy method to make the edges continuous. Then, each block was analyzed using the spectral centroid method to obtain the depths to the top, centroid and bottom of magnetic sources. First, we calculated the radially averaged log power spectrum of each block. To compute the spectrum of the data, the magnetic anomaly of the area was transformed by 2D Fourier to obtain the average Curie depth. From the slope of the very long wavelength part of the spectrum, the centroid depth ( $Z_0$ ) was estimated, while the average depth to the top ( $Z_t$ ) was estimated from the second longest wavelength part of the spectrum. Using the values obtained for  $Z_0$  and  $Z_t$ , the depth to the bottom ( $Z_b$ ) was calculated for each block using the equation  $Z_b=2Z_0-Z_t$ . The depths obtained for the bottom of the magnetized crust are assumed to correspond to Curie point depths where the magnetization of the layer disappears. Variations of the Curie isotherm level can correlate to some indices of geothermal activity (e.g., geothermal gradient and near-surface heat flow) in the study area.

The results showed that Curie point depth in the study area varies from 8.5km to 18.2km, and accordingly, the geothermal gradient ranges between 31-67°C/km. The heat flow was estimated in the range 139-294mW/m<sup>2</sup> in the study area. The results showed the shallowest Curie depths occurring in the southern part of the area. This is the zone which mainly hosts volcanic rocks and hot springs.

**Keywords:** Aeromagnetic data, Curie point depth, geothermal, Kerman, power spectrum.

\* Corresponding author:

ahojat@uk.ac.ir