

تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد به منظور اکتشاف مقدماتی پتانسیل زمین گرمایی در محدوده مرکزی استان کرمان

نسترن حیدرآبادی پور^۱، آزاده حجت^{۲*}، حجت‌اله رنجبر^۲ و سعید کریمی نسب^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استاد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: ahojat@uk.ac.ir

واژگان کلیدی

چکیده

مغناطیس هوابرد

زمین گرمایی

عمق نقطه کوری

طیف توان

کرمان

با توجه به قرار گرفتن کشور ایران در کمربند ماگمایی جهانی و وجود چشمه‌های آب گرم فراوان و کوه‌های آتشفشانی، ایران از جمله مناطق دارای پتانسیل قابل توجه منابع زمین گرمایی به حساب می‌آید. اگرچه برخی اکتشافات مقدماتی، وجود پتانسیل‌های زمین گرمایی در استان کرمان را شناسایی کرده، اما تاکنون مطالعات جامعی به منظور اکتشاف دقیق تر این ذخایر انجام نشده است. در این تحقیق، محاسبه عمق نقطه کوری به منظور تعیین پتانسیل زمین گرمایی در منطقه واقع بین طول‌های شرقی ۳۰° و ۵۶° تا ۳۰' و ۵۸° و عرض‌های شمالی ۳۰' و ۲۸° تا ۳۰' و ۲۹° با وسعت ۲۲۰۱۰ کیلومتر مربع در محدوده مرکزی استان کرمان (واقع در شمال شهر جیرفت و شرق شهر بافت) مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور، اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و داده‌های مغناطیسی هوابرد، به عنوان داده‌های اصلی تحقیق، مورد استفاده قرار گرفت. بعد از حذف میدان مغناطیسی اصلی از داده‌های مغناطیسی (با استفاده از مدل میدان IGRF) و پس از اعمال فیلترهای RTP و میان‌گذر، بلوک‌بندی منطقه جهت استفاده از روش تحلیل طیفی انجام شد. بعد از انتخاب اندازه بهینه ابعاد بلوک‌بندی، با استفاده از شیب نمودار طیف توان، عمق بالا و عمق مرکز توده مغناطیسی برای تمام بلوک‌ها محاسبه و در نهایت، نقشه عمق کوری منطقه مورد مطالعه تهیه شد. عمق کوری در منطقه مورد مطالعه، در محدوده ۹ تا ۹/۹ کیلومتر متغیر است و کمترین مقادیر آن مربوط به ناحیه جنوب شرقی منطقه است. اطلاعات زمین‌شناسی منطقه حاکی از وجود شواهد دیگری چون چشمه‌های آب گرم، توده‌های نفوذی و توده‌های آتشفشانی در قسمت جنوب شرقی منطقه است. محدوده مذکور، به عنوان محتمل‌ترین ناحیه جهت انجام مطالعات اکتشاف تفصیلی منابع زمین گرمایی در محدوده مورد مطالعه معرفی می‌شود.

۱- مقدمه

در چند دهه گذشته، مناطق زمین‌گرایی از نظر تأمین انرژی پاک و تجدیدپذیر در سطح جهان مورد توجه روزافزون قرار گرفته است. مطالعات گسترده‌ای در بسیاری از کشورها به منظور بهره‌برداری از این منابع انجام شده است. با توجه به قرار گرفتن کشور ایران در کمربند ماگمایی جهانی و وجود چشمه‌های آب گرم فراوان و کوه‌های آتشفشانی، ایران نیز از جمله مناطق دارای پتانسیل قابل توجه منابع زمین‌گرایی به حساب می‌آید (Ghorashi and Rahimi, 2011). با این وجود، متأسفانه تحقیقات زمین‌گرایی در ایران بسیار محدود و پراکنده است (حجت و همکاران، ۱۳۸۹). تمرکز اصلی مطالعات زمین‌گرایی در ایران، در نواحی شمال و شمال غرب کشور و به صورت محدود بوده است.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در اکتشاف مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی، شار حرارتی زمین‌گرایی است. به علت مشکلات مرتبط با جمع‌آوری داده‌های پرهزینه شار حرارتی به صورت مستقیم، این چنین اطلاعاتی به صورت پراکنده و جزیره‌ای تهیه شده‌اند؛ بنابراین در بسیاری از مطالعات، استفاده از روش‌های غیرمستقیم مورد توجه محققین قرار گرفته است. مطالعات مختلف در سراسر دنیا نشان داده است که عمق کوری با شار حرارت در ارتباط است (به عنوان مثال، حجت و همکاران، ۱۳۸۹؛ Meyhew, 1982; Okubo et al., 1985; Salk et al., 2005). با توجه به افزایش درجه حرارت با افزایش عمق و با در نظر گرفتن این نکته که با افزایش درجه حرارت به بالاتر از دمای کوری، سنگ‌های پوسته خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند (Lanza and Meloni, 2006)، با استفاده از داده‌های مغناطیسی می‌توان عمق کوری را تخمین زد. اگرچه درجه حرارت کوری بسته به ترکیب کانی‌شناسی بسیار متغیر است، اما در بخش اعظم پوسته قاره‌ای، به یک ضخامت باریک محدود می‌شود. به طور کلی، بدون توجه به ترکیب سنگ‌ها، می‌توان انتظار داشت که در مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی، درجه حرارت کوری کانی‌های غالب در منطقه، در عمق کمتری نسبت به نواحی مجاور قرار داشته باشد. در نتیجه، یکی از روش‌های غیرمستقیم در اکتشاف منابع زمین‌گرایی، استفاده از داده‌های مغناطیسی جهت محاسبه عمق کوری است و با تهیه نقشه هم‌دمای کوری می‌توان به شناسایی سریع و ناحیه‌ای مناطق زمین‌گرایی پرداخت. مطالعات متعددی در سراسر دنیا گزارش شده؛ که آن‌ها به اکتشاف منابع زمین‌گرایی در مقیاس مختلف بر اساس محاسبه عمق کوری با استفاده از داده‌های مغناطیسی پرداخته شده است (به عنوان مثال، Hojat et al., 2016; Saibi et al., 2015; Hsieh et al., 2014; Espinosa-Cardena and Campos-Enriquez, 2008; Okubo et al., 1989; Bhattacharyya and Leu, 1975). در مقیاس وسیع می‌توان با استفاده از داده‌های مغناطیسی ماهواره‌ای به شناسایی اولیه محدوده‌های با احتمال وجود پتانسیل زمین‌گرایی پرداخت. در مرحله بعد می‌توان به اکتشاف مقدماتی این مناطق با

استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد پرداخت و در گام آخر نیز مطالعات تفصیلی زمینی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. اگرچه برخی اکتشافات مقدماتی، وجود پتانسیل‌های زمین‌گرایی در استان کرمان را شناسایی کرده (Hojat et al., 2010; Yousefi et al., 2016)، تاکنون مطالعات جامعی به منظور اکتشاف دقیق‌تر این ذخایر در این استان انجام نشده است. بر اساس مطالعه انجام شده توسط یوسفی و همکاران (۲۰۱۰) که با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گرفت؛ مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی در ایران شناسایی شدند. محدوده بافت در استان کرمان نیز در مناطق معرفی شده در تحقیق مذکور قرار دارد. بعد از آن، حجت و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل‌های میدان مغناطیسی ماهواره‌ای، به محاسبه عمق هم‌دمای کوری در محدوده واقع بین عرض جغرافیایی ۲۸-۳۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۶-۶۴ درجه شرقی پرداختند. بدین ترتیب، یکی از شرایط مرزی برای درجه حرارت در عمق پوسته به دست آمد و سپس با ارائه یک مدل حرارتی یک‌بعدی برای پوسته و محاسبه شار سطحی حرارت، دو منطقه با بیشترین احتمال منابع زمین‌گرایی در جنوب شرق استان کرمان و همچنین در ناحیه طبس شناسایی شد (حجت و همکاران، ۱۳۸۹). در ادامه نیز حجت و همکاران (۲۰۱۶) روش مدل‌سازی مستقیم تکراری برای محاسبه عمق کوری استان کرمان با استفاده از مدل میدان مغناطیسی پوسته MF5 حاصل از مأموریت ماهواره CHAMP را مورد استفاده قرار دادند. در نهایت با کمک شواهد زمین‌شناسی، احتمال وجود ذخیره زمین‌گرایی شناسایی شده با عمق کوری کم در جنوب شرقی استان کرمان را تأیید کرده و مطالعات آتی در این محدوده را پیشنهاد کردند. با توجه به این‌که مطالعات پتانسیل‌های زمین‌گرایی در استان کرمان صرفاً به موارد ذکر شده محدود می‌شود، در این پژوهش، استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد جهت اکتشاف مقدماتی منابع زمین‌گرایی در محدوده مرکزی استان کرمان (که منطقه بافت را نیز شامل می‌گردد) مورد توجه قرار گرفت.

ایده استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد جهت تخمین عمق کوری، چندان جدید نیست و مطالعات متعددی در سراسر دنیا در این خصوص وجود دارد. یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین عمق کوری با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد، روش تحلیل طیف توان است. تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی توسط Spector و Grant در سال ۱۹۷۰ ارائه شد و اصول این روش توسط Okubo در سال ۱۹۸۵ گسترش یافت. به عنوان نمونه‌هایی از مطالعاتی که در نقاط مختلف دنیا به تخمین عمق کوری با استفاده از روش تحلیل طیفی پرداخته‌اند؛ می‌توان به تخمین عمق کوری توسط Shuey و همکاران در سال ۱۹۷۷، تحلیل طیف توان داده‌های مغناطیسی و محاسبه عمق کوری در شرق و جنوب شرقی آسیا توسط Tanaka و

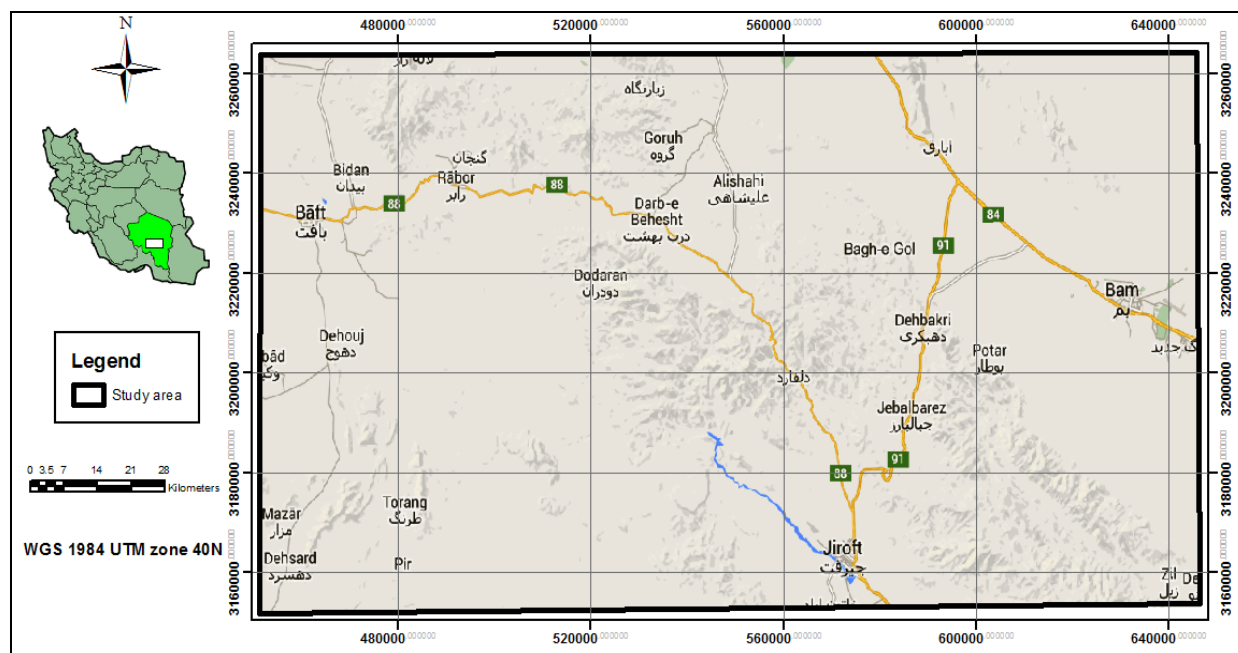
توده‌های آتشفشانی و چشمه‌های آب گرم نیز با نقشه عمق کوری به دست آمده مقایسه شد.

۲- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب شرقی فلات ایران و در محدوده مرکزی استان کرمان، بین طول‌های شرقی ۳۰° و ۵۶° تا ۳۰° و ۵۸° و عرض‌های شمالی ۳۰° و ۲۸° تا ۳۰° و ۲۹°، به وسعت ۲۲۰۱۰ کیلومتر مربع قرار گرفته است (شکل ۱). رخنمون‌های عمده این منطقه را سنگ‌های آذرین و رسوبی دوره دوم، آذرین بیرونی دوره سوم، آذرین درونی الیگوسن-میوسن، رسوبی دوره سوم و رسوبات کواترنر تشکیل می‌دهند. از این منطقه، کمر بند آتشفشانی دهج-ساردوئیه نیز عبور کرده است (عطاپور، ۱۳۸۶) و چشمه‌های آب گرم متعددی در این منطقه وجود دارد.

همکاران در سال ۱۹۹۹، محاسبه عمق کوری توسط Salk و همکاران در سال ۲۰۰۵، محاسبه عمق نقطه کوری در قسمت مرکزی ترکیه توسط Maden در سال ۲۰۱۰، تخمین عمق کوری و بررسی وجود منابع زمین‌گرمایی در تایوان توسط Hsieh و همکاران در سال ۲۰۱۴، تخمین عمق کوری در نیجریه توسط Nwankwo در سال ۲۰۱۵ و بررسی وجود منابع زمین‌گرمایی در اردبیل توسط کسایان و همکاران در سال ۱۳۹۳ اشاره کرد.

به‌طور مشابه با تحقیقات متعدد پیشین در نقاط مختلف دنیا، در این پژوهش، تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد در بخش مرکزی استان کرمان مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، عمق کوری در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد محاسبه شد. به‌منظور تعیین محتمل‌ترین منطقه از نظر پتانسیل زمین‌گرمایی، لایه‌های اطلاعاتی حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی و شواهد سطحی، شامل گسل‌ها، توده‌های نفوذی،



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی.

تخمین کف بستر توده مغناطیسی (Z_b) استفاده کردند. با فرض اینکه لایه مغناطیسی در جهت افقی بی‌نهایت گسترده است، مقیاس منبع مغناطیسی بالای مرز کوچک‌تر از منبع مغناطیسی افقی است؛ که به این صورت مغناطیس‌پذیری $M(x,y)$ یک تابع تصادفی از x و y است (Tanaka et al., 1999). در نتیجه برای تراکم طیف توان بی‌هنجاری کلی $\Phi_{\Delta T}$ رابطه (۱) ارائه شد (Blakely, 1996):

$$\Phi_{\Delta T}(k_x, k_y) = \Phi_M(k_x, k_y) F(k_x, k_y) \quad (1)$$

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

۳- روش تحقیق

عمق کوری با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی که توسط Grant و Spector در سال ۱۹۷۰ ارائه شد و اصول این روش توسط Okubo در سال ۱۹۸۵ گسترش یافت، محاسبه شد.

۳-۱- روابط ریاضی

برای به دست آوردن عمق کوری با استفاده از روش تحلیل طیفی، ابتدا طیف توان محاسبه می‌شود. بدین منظور، با استفاده از شیب لگاریتم طیف توان، عمق بالای محدوده چهارگوش مغناطیسی (Z_t) تخمین زده می‌شود. سپس عمق مرکز توده مغناطیسی (Z_0) محاسبه می‌شود. همچنین Okubo و همکاران (۱۹۸۹) از این روش جهت

حرارتی در نظر گرفته می‌شود. گرادیان زمین‌گرایی (dT/dz) بین سطح زمین و عمق نقطه کوری (Z_b) می‌تواند به واسطه رابطه (۸) تعریف شود (Tanaka et al., 1999; Maden, 2010):

$$dT/dz = 580^\circ\text{C}/Z_b \quad (8)$$

سیس گرادیان زمین‌گرایی با استفاده از رابطه (۹) به جریان حرارتی نسبت داده می‌شود (Tanaka et al., 1999):

$$q = \lambda(dT/dz) = \lambda(580^\circ\text{C}/Z_b) \quad (9)$$

که در آن، λ معرف ضریب هدایت حرارتی است. از رابطه (۹) مشخص می‌شود که عمق نقطه کوری با جریان حرارتی رابطه عکس دارد (Hsieh et al., 2014). برای استفاده از روش تحلیل طیفی باید به این نکته توجه کرد که متناسب با بزرگی منطقه و عمق مورد نظر، ابعاد بلوک‌بندی یا همان پنجره طیف توان را تعیین نمود (Consulting, 2013). به‌طور مثال در نیجریه برای بررسی پتانسیل زمین‌گرایی از روش تحلیل طیفی جهت تخمین عمق کوری استفاده شد اما ابعاد پنجره نسبت به عمق مورد نظر بسیار کوچک‌تر انتخاب شده بود و نتیجه رضایت‌بخشی به دنبال نداشت (Nwankwo, 2015). طبق بررسی محققان، ابعاد پنجره تحلیلی احتمالاً باید حدود ۱۰ برابر عمق بستر باشد و این موضوع به محققان در محاسبه و تفسیر طیفی کمک می‌کند و همچنین بلوک‌ها باید دارای هم‌پوشانی ۵۰٪ باشند (Blakely, 1996).

۳-۲- داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه است که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (با فاصله خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر) برداشت شده است. برای محاسبه عمق نقطه کوری، پردازش داده‌ها و بلوک‌بندی با استفاده از نرم‌افزار Oasis-montaj (6.4.2) انجام گرفت.

۳-۳- تخمین عمق کوری در منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش بر اساس مبانی تئوری ذکر شده در بخش ۳-۱، عمق نقطه کوری در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. در گام اول، آماده‌سازی داده‌های مغناطیسی هوابرد در نرم‌افزار Oasis montaj انجام گرفت. بدین منظور، ابتدا میدان مغناطیسی اصلی زمین با استفاده از مدل IGRF، سال ۱۹۷۵، از مقادیر اندازه‌گیری شده کسر شد (شکل ۲-الف). همچنین فیلتر برگردان به قطب (RTP) (شکل ۲-ب) و فیلتر میان‌گذر (شکل ۲-ج) نیز اعمال شد.

در مرحله بعد، ۱۳ مقیاس بلوک‌بندی (ابعاد 40×40 کیلومتر تا 100×100 کیلومتر) با فواصل ۵ کیلومتر جهت بلوک‌بندی روی نقشه شبکه‌بندی شده تصحیح میان‌گذر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳، نمونه‌ای از نحوه بلوک‌بندی روی تصحیح میان‌گذر در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. ابتدا طیف توان بلوک ۱ محاسبه می‌شود و سپس در راستای افقی با هم‌پوشانی ۵۰٪ بلوک

که در آن، Φ_m تراکم طیف توان مغناطیس‌پذیری، C_m ضریب ثابت، Θ_m جهت مغناطیس‌پذیری توده و Θ_f جهت مغناطیس‌پذیری زمین می‌باشند. به طور کلی، علی‌رغم عدم تقارن شعاعی، Θ_m و Θ_f دارای مقادیر متوسط در طول هر دایره متحدالمرکز هستند که این مقادیر، مستقل از شعاع دایره است (Blakely, 1996). همچنین مقدار متوسط تراکم طیف توان بی‌هنجاری کلی از رابطه (۲) به دست می‌آید (Blakely, 1996):

$$\Phi_{AT}(|k|) = Ae^{-2|k|Z_t}(1 - e^{-|k|(Z_b-Z_t)})^2 \quad (2)$$

که A مقداری ثابت و k عدد موج است. محاسبه طول موج کمتر از حدود دو برابر ضخامت لایه به‌صورت رابطه (۳) است (Blakely, 1996):

$$\ln[\Phi_{AT}(|k|)^{1/2}] = \ln B - |k|Z_t \quad (3)$$

در اینجا B ثابت است. می‌توان عمق بالای منبع مغناطیسی (Z_t) را با امتداد خط مستقیمی در قسمت عدد موج بالا مربوط به شعاع آنالیز طیف توان متوسط $\ln[\Phi_{AT}(|k|)^{1/2}]$ تخمین زد. همچنین می‌توان به‌صورت رابطه (۴) نوشت (Blakely, 1996):

$$\Phi_{AT}(|k|)^{1/2} = Ce^{-|k|Z_0}(e^{-|k|(Z_t-Z_0)} - e^{-|k|(Z_b-Z_0)}) \quad (4)$$

که C مقداری ثابت است. برای طول موج بلند نیز معادله به صورت زیر نوشته می‌شود (Blakely, 1996):

$$\Phi_{AT}(|k|)^{1/2} = Ce^{-|k|Z_0}(e^{-|k|(-d)} - e^{-|k|(d)}) \approx Ce^{-|k|Z_0}2d|k| \quad (5)$$

که $2d$ معرف ضخامت منبع مغناطیسی است. رابطه (۶) از رابطه (۵) به دست می‌آید (Blakely, 1996):

$$\ln\{\Phi_{AT}(|k|)^{1/2}/|k|\} = \ln D - |k|Z_0 \quad (6)$$

D مقداری ثابت است. عمق مرکز منبع مغناطیسی (Z_0) را می‌توان با امتداد خط مستقیم در قسمت عدد موج پایین شعاع فرکانس طیف توان متوسط $\ln\{\Phi_{AT}(|k|)^{1/2}/|k|\}$ تخمین زد (Hsieh et al., 2014).

با استفاده از شیب طیف توان، مقادیر عمق بالای مرز منبع مغناطیسی و عمق مرکزی منبع مغناطیسی تخمین زده می‌شود. عمق بستر مغناطیس نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید (Okubo et al., 1989; Tanaka et al., 1999):

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (7)$$

Z_b پایین‌ترین مرز عمقی توده مغناطیسی است. در نهایت، عمق بستر به دست آمده برای منبع مغناطیسی (Z_b)، معادل عمق نقطه کوری فرض می‌شود. برای مرتبط ساختن عمق نقطه کوری (Z_b) به دمای نقطه کوری (580°C) درجه سانتی‌گراد برای کانی مگنتیت، امتداد قائم اختلاف درجه حرارت و ثابت گرادیان

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۲، ۱۳۹۶.

همچنین پس از محاسبه عمق کوری با استفاده از روش طیف توان برای تک‌تک بلوک‌ها، نقشه عمق کوری برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۶). عمق کوری در منطقه مورد مطالعه در محدوده ۹ تا ۹/۹ کیلومتری به دست آمد. انتظار می‌رود که مناطق با رنگ سبز که نشان‌دهنده عمق کوری کم است، دارای شار حرارتی بالاتری نسبت به سایر مناطق باشند.

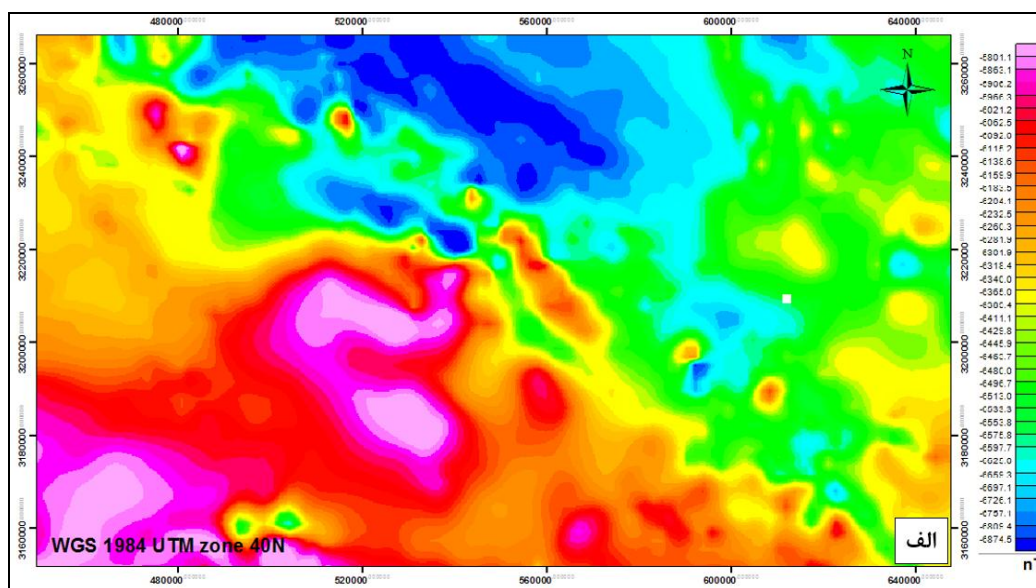
منطقه مورد مطالعه شامل هشت نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ است. ابتدا با کمک نرم‌افزار ENVI، مختصات‌دهی نقشه‌های زمین‌شناسی انجام گرفت و سپس با استفاده از این نقشه‌ها در نرم‌افزار ArcMap، گسل‌ها، توده‌های نفوذی و توده‌های آتش‌فشانی مشخص شد و به‌صورت داده‌های رقومی استخراج شدند. همچنین بر اساس داده‌های چشمه‌های آب گرم استان کرمان، لایه اطلاعاتی چشمه‌های آب گرم نیز تهیه شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر کم عمق کوری در قسمت شرقی و به‌ویژه جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه، با لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی در منطقه مطابقت دارد. در واقع شواهد موجود، تأییدی بر احتمال بالای وجود منابع زمین‌گرمایی در ناحیه جنوب شرقی است. ساختار نفوذی و آتش‌فشانی این محدوده می‌تواند نشانه وجود منبع حرارتی تشکیل شده در زیر سطح (اتاق ماگمایی) باشد و از نقشه عمق کوری نیز می‌توان دریافت که در این محدوده شار حرارتی بالاست. همچنین با توجه به وجود چشمه‌های آب گرم متعدد و گسل‌ها احتمالاً می‌توان نتیجه گرفت که گسل‌ها مسیر مناسبی جهت خروج سیال زمین‌گرمایی است و توسط چشمه‌های آب گرم بر روی سطح مشاهده می‌شوند.

دوم رسم می‌شود. به همین ترتیب در راستای افقی و عمودی بلوک‌بندی انجام شد. از بین این ابعاد، بلوک‌بندی 80×80 کیلومتری بهترین نمودارهای طیف توان با پیک نرمال را شامل بود.

بعد از انتخاب اندازه بهینه ابعاد بلوک‌بندی، با استفاده از شیب نمودار طیف توان، عمق بالا و عمق مرکز توده مغناطیسی برای تمام بلوک‌های 80×80 کیلومتری محاسبه شد. سپس طیف توان با استفاده از رابطه (۷) محاسبه گردید. به عنوان مثال برای یکی از بلوک‌ها با استفاده از شیب نمودارهای طیف توان، عمق بالا و عمق مرکز توده مغناطیسی محاسبه شد (شکل ۴). بدین منظور، شیب قسمت دوم تغییرات عدد موج برای به دست آوردن عمق بالای توده مغناطیسی و شیب قسمت بالایی تغییرات عدد موج برای تعیین عمق مرکز توده محاسبه شد. محاسبات مربوط به تعیین شیب نمودارهای طیف توان، در نرم‌افزار Excel انجام شد. در نهایت، نتایج در رابطه (۷) جای‌گذاری شدند و عمق کوری برای این بلوک، برابر با ۸/۹۶ کیلومتر تخمین زده شد.

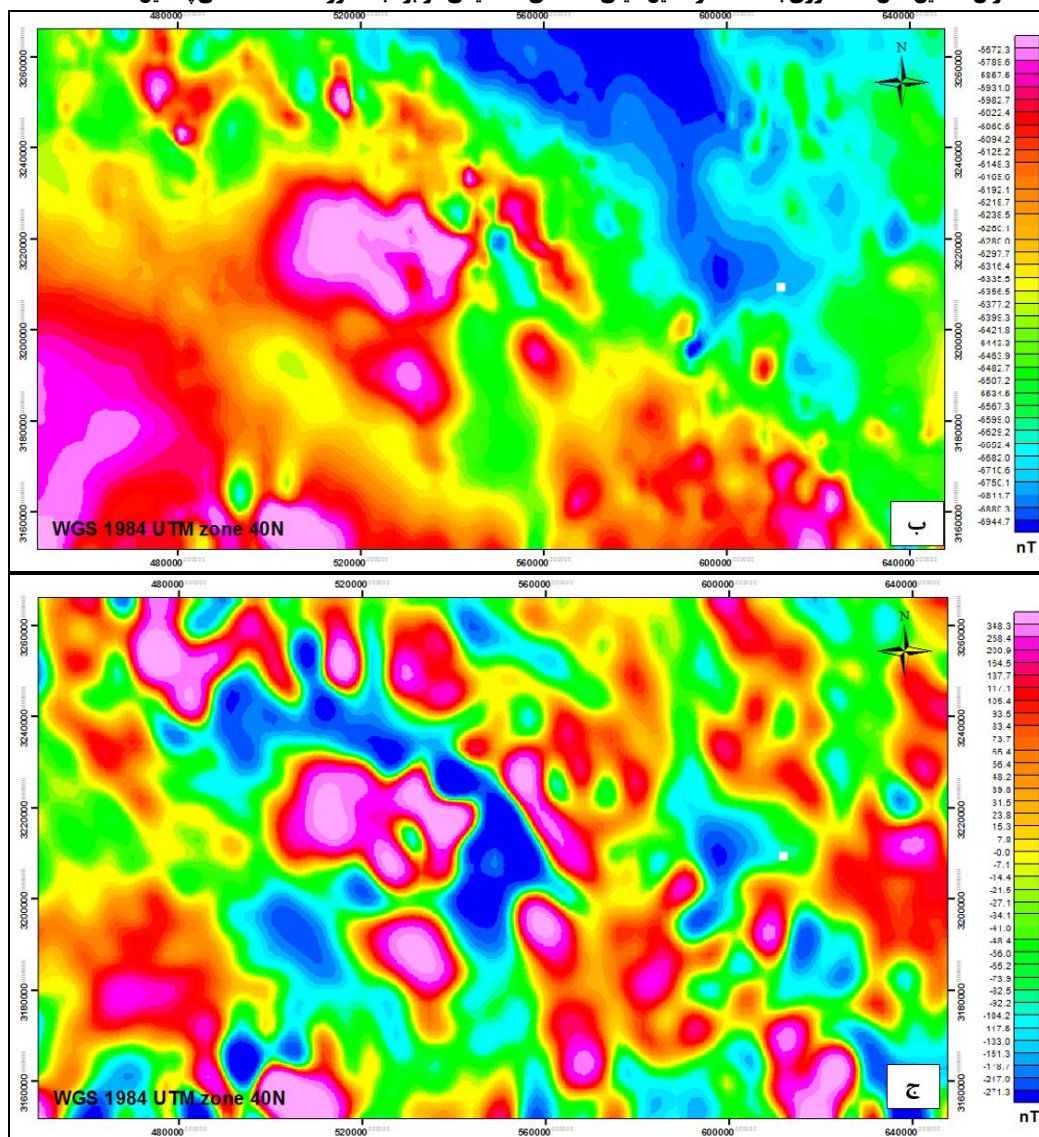
۴- بحث و نتایج

پس از اعمال فیلترهای RTP و میان‌گذر، نقشه مغناطیسی به دست آمده با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه از نظر حضور توده‌های نفوذی مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تطابق مناسبی با توده‌های نفوذی (به دست آمده از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه) دارد و وجود توده‌های مغناطیسی در زیر سطح منطقه مورد مطالعه را تأیید می‌کند.

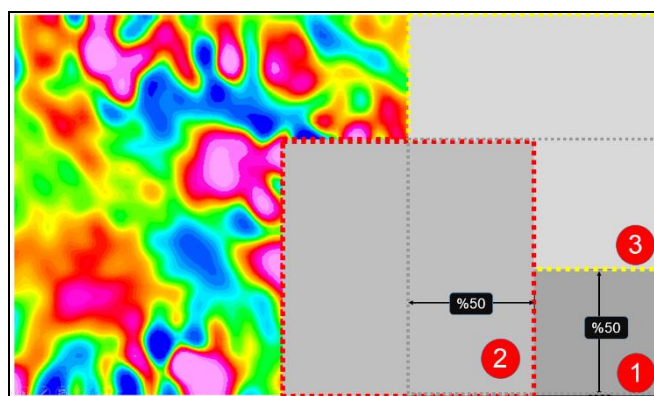


شکل ۲: نقشه‌های شبکه‌بندی تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj. (الف) نقشه میدان مغناطیسی پس از تصحیح IGRF. (ب) نقشه میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلتر RTP. (ج) نقشه میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلتر میان‌گذر.

حیدرآبادی پور و همکاران، تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هواپرد به منظور اکتشاف مقدماتی پتانسیل ... ، صفحات ۱۷۶-۱۶۷.

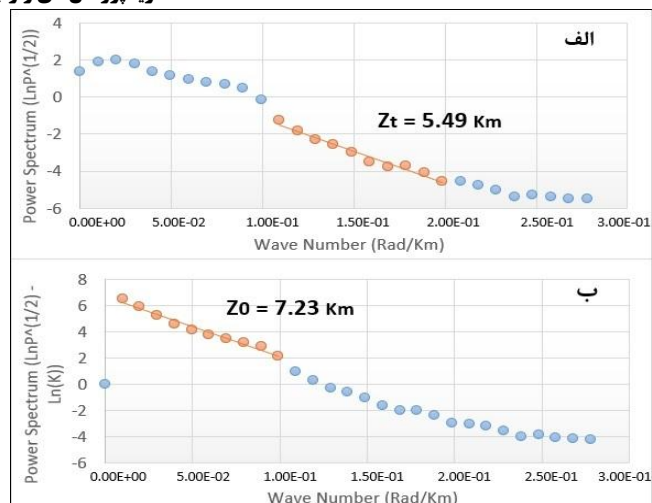


شکل ۲: ادامه.

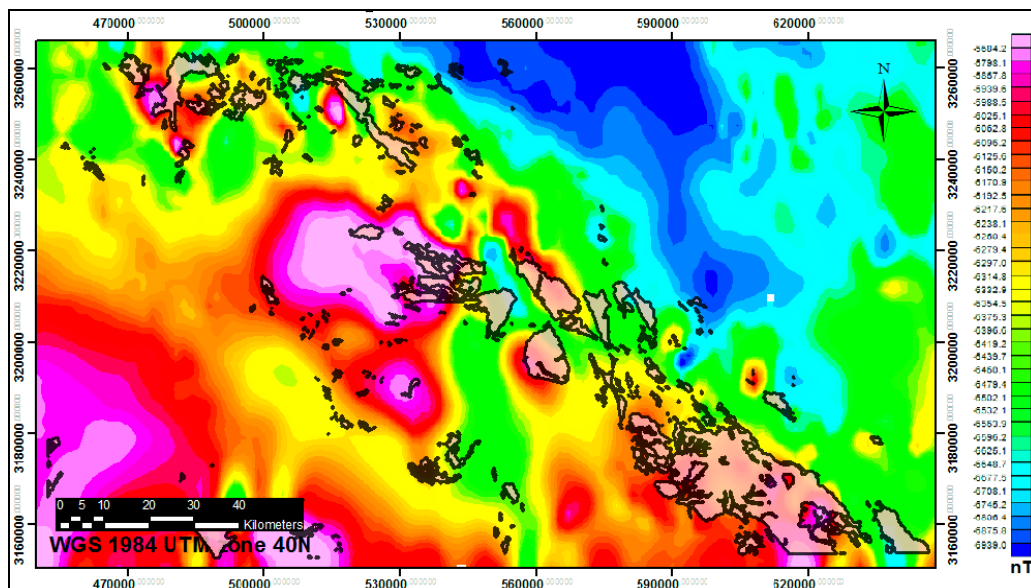


شکل ۳: نمونه‌ای از بلوک‌بندی با ابعاد ۸۰×۸۰ کیلومتر و هم‌پوشانی ۵۰٪.

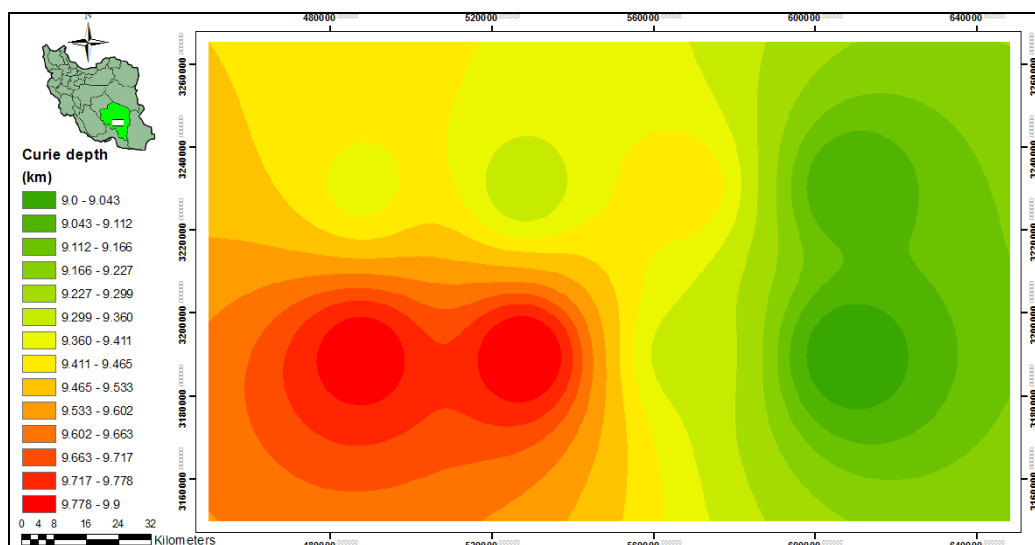
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۲، ۱۳۹۶.



شکل ۴: برازش خط بر روی نمودار طیف توان برای به دست آوردن: (الف) عمق بالای توده مغناطیسی و (ب) عمق مرکز توده مغناطیسی.

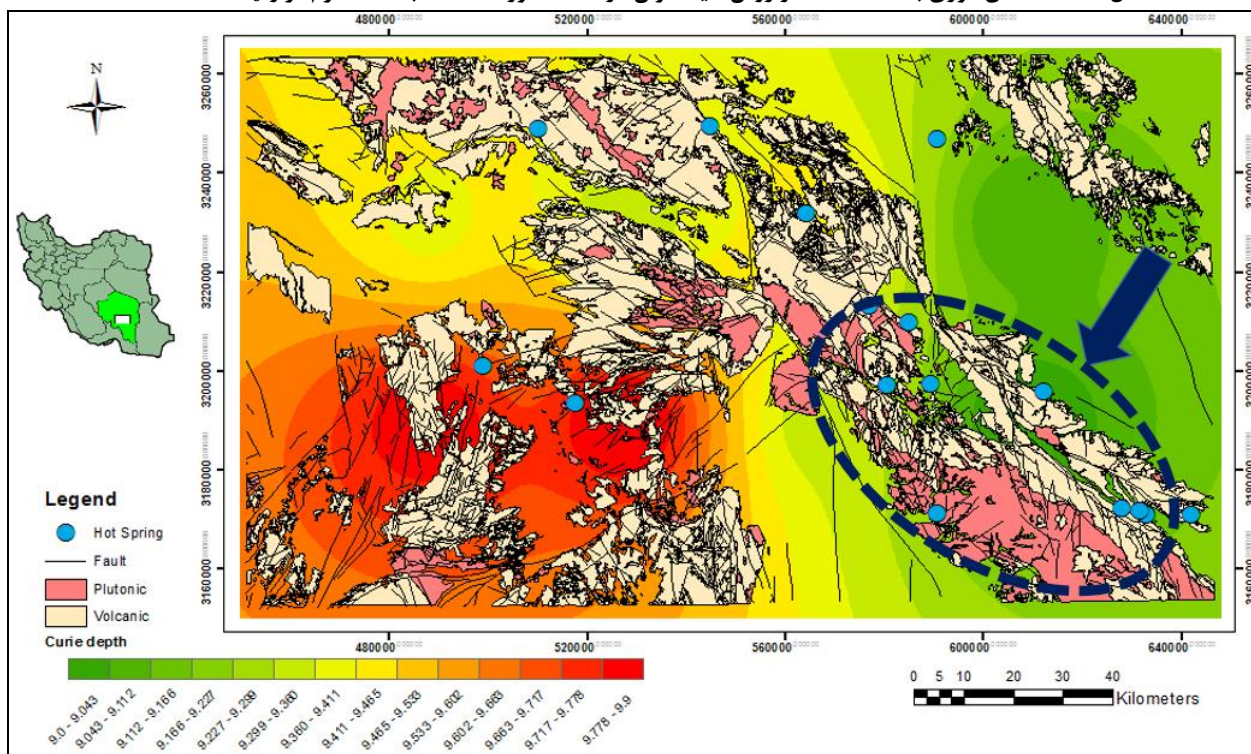


شکل ۵: تطابق لایه اطلاعاتی بی‌هنجاری مغناطیسی (با مغناطیس بالا) با توده‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه (به کمک نرم‌افزار ArcMap).



حیدرآبادی پور و همکاران، تخمین عمق نقطه کوری با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد به منظور اکتشاف مقدماتی پتانسیل ...، صفحات ۱۷۶-۱۶۷.

شکل ۶: نقشه عمق کوری به دست آمده از روش طیف توان در منطقه مورد مطالعه (به کمک نرم‌افزار Oasis montaj).



شکل ۷: محدوده مشخص شده با فلش، تطابق عمق کوری کم با لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده به کمک نرم‌افزار ArcMap (شامل توده‌های نفوذی و آتشفشانی، چشمه‌های آب گرم و گسل‌ها) را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

تخمین عمق کوری با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد یکی از روش‌های متداول در اکتشاف مقدماتی و غیرمستقیم پتانسیل‌های زمین‌گرمایی است. در این پژوهش، اکتشاف مقدماتی منابع زمین‌گرمایی در محدوده مرکزی استان کرمان مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی هوابرد، نقشه عمق کوری منطقه مورد مطالعه محاسبه شد و کمترین عمق در قسمت جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه تعیین گردید. با توجه به تطابق لایه‌های اطلاعاتی حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی و نشانه‌های سطحی با منطقه با عمق کوری کم، وجود پتانسیل زمین‌گرمایی در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه محتمل است. همچنین منطقه شناسایی شده در این پژوهش، با نتایج مطالعات بزرگ‌مقیاس پیشین نیز نسبتاً تطابق دارد. پیشنهاد می‌شود برای اکتشاف دقیق‌تر این منطقه، مطالعات تفصیلی زمینی نیز پیش‌بینی و اجرا شود.

۶- سپاس‌گزاری

نگارندگان از مساعدت و همراهی شرکت مهندسين مشاور کوشا معدن کمال امتنان را دارند. همچنین از جناب آقای مهندس محمد فهيم آویش به دلیل کمک در انجام بخشی از محاسبات، قدردانی

می‌گردد.

۷- منابع

حجت، آ.، حسین‌زاده گویا، ن. و فاکس ماول، 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.

عطاپور، ح.، ۱۳۸۶، تکوین ژئو شیمیایی و متالوژنی سنگ‌های آذرین پتاسیم دار در کمربند آتشفشانی- نفوذی دهج- ساردوئیه، استان کرمان با نگرشی ویژه به عناصر خاص، رساله دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

کسایان، م.، مرادزاده، ع.، خالو کاکائی، ر. و آقاجانی، ح.، ۱۳۹۳، اکتشاف ذخایر زمین‌گرمایی از نقشه عمق کوری، کنفرانس ملی علوم معدنی، مازندران، ۱۱ و ۱۲ شهریورماه ۱۳۹۳.

Bhattacharyya, B.K. and Leu, L.K., 1975, Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park: mapping the Curie point depth isothermal surface for geothermal reconnaissance, Journal of Geophysical Research, 80, 4461-4465.

Blakely, R.J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press.

Consulting, A., 2013, Mapping sub-salt and sub-basalt

- Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K. and Tsu, H., 1985, Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan, *Geophysics*, 50 (3), 481-494.
- Okubo, Y., Tsu, H. and Ogawa, K., 1989, Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan, *Tectonophysics*, 159 (3), 279-290.
- Saibi, H., Aboud, E. and Gottsmann, J., 2015, Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data for geothermal reconnaissance in Afghanistan, *Journal of African Earth Sciences*, 111, 92-99.
- Salem, A., Ushijima, K., Elsirafi, A. and Mizunaga, H., 2000, Spectral analysis of aeromagnetic data for geothermal reconnaissance of Quseir area, northern Red Sea, Egypt, *World Geothermal Congress*, Japan, pp. 1669-1674.
- Salk, M., Pamukçu, O. and Kaftan, I., 2005, Determination of the Curie point depth and heat flow from MAGSAT data of Western Anatolia, *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 8 (4), 149-160.
- Shuey, R.T., Schellinger, D.K., Tripp, A.C. and Alley, L.B., 1977, Curie depth determination from aeromagnetic spectra, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 50, 75-101.
- Spector, A. and Grant, F.S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35 (2), 293-302.
- 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 (3), 461-470.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A., Fujimitsu, Y., Nishijima, J. and Sasaki, K., 2010, Developing the geothermal resources map of Iran, *Geothermics*, 39 (2), 140-151.
- structures from magnetic and gravity data, accessed July 2016, <http://www.geoexpro.com/articles/2013/02/mapping-g-sub-salt-and-sub-basalt-structures-from-magnetic-and-gravity-data>.
- Espinosa-Cardena, J.M. and Campos-Enriquez, J.O., 2008, Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data from Cerro Prieto geothermal area, Baja California, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 601-609.
- Ghorashi, A.H. and Rahimi, A., 2011, Renewable and non-renewable energy status in Iran; Art of know-how and technology-gaps, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1), 729-736.
- 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, An introduction for geologists*, Springer.
- 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.
- Mayhew, M.A., 1982, Application of satellite magnetic anomaly data to Curie isotherm mapping, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 87 (B6), 4846-4854.
- Nwankwo, L.I., 2015, Estimation of depths to the bottom of magnetic sources and ensuing geothermal parameters from aeromagnetic data of Upper Sokoto Basin, Nigeria, *Geothermics*, 54 (2),



Estimation of Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data for preliminary exploration of geothermal resources in central region of Kerman Province

Nastaran Heydarabadi Pour¹, Azadeh Hojat^{2*}, Hojjatollah Ranjbar³ and Saeed Karimi Nasab⁴

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

2- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3- Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

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

Received: 7 August 2016; Accepted: 14 January 2017

Corresponding author: ahojat@uk.ac.ir

Keywords

Aeromagnetic Data
Geothermal Resources
Curie Point Depth
Power Spectrum
Kerman

Extended Abstract

Summary

To optimize the widespread use of fossil fuels in Iran, different resources of renewable energy can be considered as promising challenges. The ever-increasing energy demands of the country can be satisfied by the very rich resources of renewable energy such as wind, solar, biomass, and geothermal energies. This paper presents the results of Curie point depth calculations from

spectral analysis of aeromagnetic data for preliminary exploration of geothermal resources in central region of Kerman Province. The calculations were performed for an area of 22010 km² located north of Jiroft city and east of Baft city. RTP correction and band pass filtering were first applied to the data. Then, the block dimension of 80×80 km with an overlap of 50% was selected for the spectral analysis. The spectral power was calculated for all the blocks and the Curie depth map was obtained for the study area. The results showed that the shallowest Curie depths are about 9 km observed in the southeastern part of the study area. Different information layers including geological and surface information layers were, then, investigated in the ArcMap software. Concentration of several hot springs and presence of faults, intrusive structures, and volcanic rocks prove a high probability of geothermal anomaly in the area of shallowest Curie depth.

Introduction

Although there are evidences of rich geothermal potential regions in Iran, very few exploration studies have been carried out so far, especially in the eastern and central regions of the country. Geothermal heat flux is one of the main parameters to be investigated in geothermal exploration programs but few direct heat flux measurements are available in Iran. Given the proved relation between Curie depths and heat flux, we can use magnetic data to calculate the Curie depths in areas where few or no direct heat flow measurements are available. Hojat et al. (2016) used an iterative forward modeling approach to calculate the Curie depth of Kerman province from satellite magnetic data. The obtained Curie map revealed an area with very shallow Curie depth in the southeastern region of Kerman province. Their finding was confirmed by geological evidence for the probability of a geothermal potential zone. In this paper, aeromagnetic data are used to calculate the Curie depth map for an area of 22010 km² located in the central region of Kerman Province, part of which overlaps with the probable geothermal zone revealed from the previous study.

Methodology and Approaches

The aeromagnetic data have first been processed in the Oasis Montaj software. The IGRF model has been used to remove the main field from the observations. RTP and Bandpass filtering have then been applied to the data. The block dimension of 80×80 km with the overlap of 50% has been selected for the spectral analysis method. After calculating the Curie depth map of the study area, different information layers including hot springs, faults, intrusive bodies, and volcanic structures have been combined in the ArcMap software to validate the interpretation of the results.

Results and Conclusions

1. Curie depth values were obtained in the range of 9-9.9 km.
2. The shallowest Curie depths occurred in the southeastern part of the study area.
3. The main concentration of hot springs, intrusive bodies, and volcanic structures was in the area with the shallowest Curie depths.
4. It is suggested to perform detailed land surveys in the most probable area detected in this study.