

تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس‌هوایی به‌منظور اکتشاف ظرفیت‌های زمین‌گرمایی استان آذربایجان شرقی

الله‌یار خوجم‌لی^۱، فرامرز دولتی ارده‌جانی^{۲*}، علی مرادزاده^۳، علی نجاتی کلاته^۴، سهیل پرخیال^۵، محمد رضا رحمانی^۶

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران
^۲آستاد همکار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران
^۳آستاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران
^۴آستادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران
^۵کارشناس ارشد ژئوفیزیک، گروه انرژی زمین‌گرمایی، سازمان انرژی‌های نو، وزارت نیرو، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۲۴)

چکیده

نقطه کوری، دمایی است که در آن سنگ‌های پوسته زمین خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. در مناطقی که ظرفیت زمین‌گرمایی دارند و یا مناطق آتشفشانی جوان انتظار می‌رود که عمق نقطه کوری به‌طور قابل‌توجهی کم باشد. ارزیابی تغییرات نقطه کوری یک منطقه می‌تواند اطلاعات با ارزشی از توزیع دمایی ناحیه‌ای در عمق و تمرکز انرژی زمین‌گرمایی در زیر سطح عرضه کند. ایده به‌کارگیری داده‌های مغناطیس‌هوایی برای برآورد عمق نقطه کوری خیلی جدید نیست و تاکنون در جاهای گوناگون دنیا در نواحی فعال زمین‌ساختی و ژئودینامیکی از آن استفاده شده است. در این تحقیق از داده‌های مغناطیس‌هوایی استان آذربایجان شرقی برای برآورد عمق کوری استفاده شده است. برای این کار، ابتدا نقشه تبدیل میدان به قطب تهیه شد. سپس ابعاد بهینه بلوک انتخاب شد و بلوک‌بندی روی نقشه تبدیل میدان به قطب صورت گرفت. عمق بالایی عمیق‌ترین بلوک مغناطیسی با برازش خط راست به دومین بخش بلندترین طول موج طیف توان شعاعی به‌دست آمد. همچنین عمق مرکزی عمیق‌ترین بلوک مغناطیسی با برازش خط راست به بخش بلندترین طول موج طیف توان شعاعی برآورد شد. با توجه به عمق بالایی و مرکزی بلوک‌ها، عمق نقطه کوری برای هر بلوک محاسبه شد. عمق کوری برآوردی برای منطقه مورد بررسی بین ۹/۴۲ تا ۱۸/۹۲ کیلومتر تغییر می‌کند. در مناطقی که تمرکز چشمه‌های آب‌گرم بیشتر است، عمق نقطه کوری به‌طور قابل‌توجهی کمتر از بقیه مناطق است و این نواحی را می‌توان در حکم نواحی امیدبخش برای اکتشاف منابع زمین‌گرمایی محسوب کرد.

واژه‌های کلیدی: مغناطیس‌هوایی، زمین‌گرمایی، عمق کوری، طیف توان، آذربایجان شرقی

۱ مقدمه

از میان روش‌های ژئوفیزیکی در مراحل مقدماتی شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی، برداشت و استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی امری متداول است (تی-سلنتیس، ۱۹۹۱؛ صالح و همکاران؛ ۲۰۱۳). برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هوایی معمولاً برای تهیه نقشه سنگ‌های مغناطیسی مانند پی‌سنگ‌های آذرین و دگرگونی می‌باشد

برای شناسایی و اکتشاف منابع زمین‌گرمایی در مراحل اولیه و یا حتی نیمه‌تفصیلی، روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مثل مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و الکترومغناطیسی در کنار دیگر روش‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی نقش مهمی دارند (مایالا، ۲۰۰۶؛ هوچستین و سودارمن، ۲۰۰۸).

بی‌هنجاری‌های مغناطیسی پیشنهاد شده‌است (اسپکتور و گرت، ۱۹۷۰؛ باتاچاریا و لیو، ۱۹۷۵، ۱۹۷۷؛ اکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵؛ پیلکینگتون و تودوسچوک، ۱۹۹۳؛ ماوس و دیمری، ۱۹۹۵؛ بانسال و همکاران، ۲۰۱۱). تا به حال دو روش پایه برای تخمین عمق کف منابع مغناطیسی براساس ویژگی‌های طیفی داده‌های مغناطیسی مورد استفاده بوده است. اولین آنها روش اسپکتور و گرت (۱۹۷۰) و دومین آنها روش باتاچاریا و لیو (۱۹۷۵، ۱۹۷۷) است. اسپکتور و گرت نشان دادند که مقدار مورد انتظار طیف یک مدل همادی (Ensemble model) همانند میانگین عمق بالایی یک منشور مستطیلی مغناطیسی شده است. باتاچاریا و لیو عمق مرکزی توده را با استفاده از تفسیر بی‌هنجاری منفرد تخمین زدند. این روش موقعی که قله‌های (پیک‌های) طیفی بر روی دامنه طیف مشاهده نمی‌شوند، بسیار کاربرد دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۰). اکیوبو و همکاران (۱۹۸۵) این دو روش را ترکیب کردند و از آنها برای اکتشاف منابع زمین‌گرمایی استفاده کردند (هیسارلی و همکاران، ۲۰۱۲).

مطالعات زیادی در زمینه تعیین عمق کوری در مناطق زمین‌گرمایی با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی صورت گرفته است که در این خصوص می‌توان به برخی از آنها اشاره کرد. هیسارلی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی و چاه‌ها نقشه عمق نقطه کوری منطقه شمال غرب ترکیه را تهیه کردند. آنها ابتدا صافی (فیلتر) میان‌گذر (۶۵ - ۱۰ کیلومتر) را بر روی داده‌های برگردان به قطب شده اعمال کردند. سپس به منظور تخمین عمق کوری نقشه شدت میدان کل را به ۱۷ بلوک با اندازه ۹۰×۹۰ کیلومتر و همپوشانی ۵۰٪ تقسیم کردند. در ادامه با محاسبه طیف توان شعاعی برای هر بلوک، بازه تغییرات عمق نقطه کوری ۱۷ بلوک منطقه مورد مطالعه بین ۹/۷ تا ۲۰/۳ کیلومتر تعیین شد. تی-سلنتیس (۱۹۹۱) گستره سامانه‌های زمین‌گرمایی منطقه‌ای

که در زیر لایه‌های رسوبی واقع شده‌اند (گوپتا و روی، ۲۰۰۷). مهم‌ترین کاربرد داده‌های مغناطیس‌سنجی در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی تعیین عمق نقطه کوری منابع مغناطیسی می‌باشد.

سنگ‌های پوسته زمین در دما و عمق خاصی، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند که به این دما و عمق، به ترتیب دما و عمق نقطه کوری گویند. دمای کوری برای کانی مگنتیت تقریباً ۵۸۰ درجه سلسیوس است که در این دما کانی‌های مغناطیسی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند (آیدین و اکسام، ۲۰۱۰). مغناطیدگی سنگ‌های پوسته حاوی مگنتیت در دمای کوری از بین می‌رود. بنابراین عمقی که دمای آن به نقطه کوری می‌رسد عمق کف توده‌های مغناطیسی پوسته فرض می‌شود. دمای نقطه کوری با توجه به زمین‌شناسی منطقه و کانی‌های موجود در سنگ‌ها از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند. بنابراین در مناطقی که ظرفیت زمین‌گرمایی دارند و یا مناطق آتشفشانی جوان وجود دارند انتظار می‌رود که عمق نقطه کوری به‌طور قابل توجهی کم باشد (آیدین و اکسام، ۲۰۱۰). بنابراین با محاسبه و بررسی تغییرات خطوط هم‌دمای کوری یک ناحیه می‌توان اطلاعات ارزشمندی درباره تغییرات ناحیه‌ای دما در عمق و تجمع منابع زیرزمینی انرژی زمین‌گرمایی به‌دست آورد (تی-سلنتیس، ۱۹۹۱).

تعیین عمق نقطه کوری در مراحل اولیه شناسایی منابع زمین‌گرمایی اکثراً به‌کمک داده‌های مغناطیس‌هوایی صورت می‌گیرد. ایده به‌کارگیری داده‌های مغناطیس‌هوایی برای تخمین عمق نقطه کوری خیلی جدید نبوده و تاکنون در جاهای مختلف دنیا در نواحی فعال زمین-ساختی و ژئودینامیکی استفاده شده است (باتاچاریا و مورلی، ۱۹۶۵؛ بیری و استولت، ۱۹۷۷).

در دهه‌های گذشته روش‌های مختلفی همراه با تغییراتی برای تخمین عمق کوری با استفاده از طیف توان

۲ برآورد عمق کف به روش مرکز یابی

باتاچاریا و لیو در سال ۱۹۷۷ روشی را که بیشتر در مطالعات نقطه کوری منطقه آتشفشانی یلوستون به کار برده بودند، برای تعیین مرکزیت منابع متوازی‌السطوح مستطیلی منتشر کردند. در این روش فرض می‌شود که منابع دارای توزیع ناهمبسته یکنواخت تصادفی مغناطیدگی $M(x,y)$ می‌باشند. طیف توان (P) برای مجموعه‌ای از توده‌های دو بُعدی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (اسپکتور و گرن، ۱۹۷۰؛ بلکلی، ۱۹۹۵):

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

که k_x و k_y عددهای موج در راستای x و y ، C_m ثابت تناسب، $\phi_m(k_x, k_y)$ طیف توان دو بُعدی 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 و علاوه بر آن میانگین شعاعی Θ_m و Θ_f ثابت هستند. به همین دلیل $\phi_m(k_x, k_y)$ یک مقدار ثابت است با این شرط که مغناطیدگی $M(x, y)$ کاملاً تصادفی و ناهمبسته باشد. از این رو بعد از میانگین‌گیری شعاعی، معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت (استامپولیدیس و همکاران، ۲۰۰۵):

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

که A_1 ثابت می‌باشد. برای محاسبه عمق مرکزی Z_0 (Centroid depth) منبع مغناطیسی با استفاده از بخش عدد موج پایین طیف توان، معادله (۲) را می‌توان به صورت ساده‌تر نوشت (اکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵):

در یونان را با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی و جریان گرمایی مورد مطالعه قرار داد. وی مطالعات خود را بر روی ۵ بلوک مجزا انجام داد و کمترین و بیشترین عمق کوری را به ترتیب ۱۱/۳ و ۲۸ کیلومتر تعیین کرد. در سال ۱۹۷۵ باتاچاریا و لیو به کمک داده‌های مغناطیس هوایی تغییرات عمق کوری را در پارک ملی یلوستون بررسی کردند. آنها ابتدا داده‌های مغناطیس هوایی را رقمی کردند. سپس با اعمال صافی‌های پایین‌گذر اثر بی-هنجاری‌های سطحی را کاهش دادند. آنها برای تعیین عمق کف توده‌های مغناطیسی عمیق، منطقه مورد مطالعه را به ۴۹ بلوک با ابعاد ۳۹×۳۹ کیلومتر با همپوشانی ۵۰ درصد با بلوک‌های مجاور تقسیم کردند. سپس طیف توان شعاعی را برای هر بلوک حساب کردند. نتایج حاصل از مطالعه آنها نشان می‌دهد که در بخش‌های داخلی کالدرها و جاهایی که چشمه‌های آب گرم مشاهده شد عمق کوری بین ۴ تا ۶ کیلومتر، اما در دیگر نواحی بیش از ۱۰ کیلومتر می‌باشد. صالح و همکاران (۲۰۱۳) عمق کوری منطقه شمالی دریای سرخ را با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس هوایی به نقشه درآوردند. آنها داده‌های مغناطیس هوایی برگردان به قطب شده را به ۱۱۲ بلوک ۱۶۱×۱۶۱ کیلومتر تقسیم، طیف توان شعاعی را برای هر بلوک محاسبه، و سپس عمق کوری را محاسبه کردند. برای هر بلوک عمق کوری به مرکز آن بلوک نسبت داده و سپس نقشه عمق کوری برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عمق نقطه کوری بلوک‌ها در ناحیه مورد نظر بین ۵ تا ۲۰ کیلومتر تغییر می‌کند.

در این مقاله سعی می‌شود با تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس هوایی عمق نقطه کوری برای استان آذربایجان شرقی تخمین زده و مناطق امیدبخش جهت بررسی‌های بیشتر برای اکتشاف منابع زمین‌گرایی معرفی شود.

آتشفشانی، افق‌های پامیس‌دار 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 زمین-گرمایی می‌باشند، سطح وسیعی از استان را به خود اختصاص می‌دهند که در این میان سنگ‌های آتشفشانی حد واسط ائوسن تا میوسن از بیشترین سهم برخوردارند. نقشه زمین‌شناسی استان بر پایه نوع سنگ در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۳ پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی و تحلیل آنها داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از سری داده‌های مغناطیسی است که بین سال‌های ۱۹۷۴ و ۱۹۷۷ میلادی با دو برداشت مغناطیسی هوایرد با حساسیت بالا توسط شرکت ایرسرویس (Aero service) برای سازمان زمین-شناسی انجام شده است. هدف از انجام این عملیات کسب اطلاعات بیشتری از زمین‌ساخت و زمین‌شناسی ناحیه‌ای و نیز تعیین مناطق مناسب برای اکتشاف تفصیلی کانسارهای معدنی و منابع هیدروکربنی بوده است. پیمایش‌های مغناطیسی مذکور در دو مرحله زمانی در طی سال‌های ۱۹۷۴-۷۵ و ۱۹۷۶-۷۷ شامل ۸۹۰۵۸ و تقریباً ۱۶۲۶۱۲ کیلومتر خط پروازی با فاصله خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله خطوط کنترلی یا گره‌ای (Tie Line) ۴۰ کیلومتر می‌باشد. در این تحقیق از تلفیق دو سری داده برداشت شده در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

شدت میدان مغناطیسی کل در هر نقطه متأثر از مواد و ساختارهای مغناطیسی موجود در آن محل است. مقدار International Geomagnetic (IGRF) = 48000 nT (Reference field) ابتدا از مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده حذف شده و مقدار مانده که مربوطه به بی‌هنجاری-های موجود در منطقه است به‌دست آمد. با توجه به زاویه میل و انحراف مغناطیسی زمین، بدیهی است که منبع این

$$\ln\left(\frac{P(k)^{1/2}}{k}\right) = A_2 - |k|Z_0. \quad (3)$$

که A_2 نیز ثابت است. برای محاسبه عمق بالایی منبع مغناطیسی (Z_t) معادله (۲) را می‌توان ساده کرد با فرض اینکه سیگنال‌های بالای منبع بر طیف توان غالب شوند (اسپکتور و گرنت، ۱۹۷۰؛ باتاچاریا و لیو، ۱۹۷۵؛ اکیوبو و همکاران، ۱۹۸۵):

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

در این روش که به روش عمق مرکزبایی معروف است، تخمین عمق کف منبع مغناطیسی در دو مرحله انجام می‌شود: الف) محاسبه عمق مرکزی Z_0 عمیق‌ترین منابع مغناطیسی با استفاده از معادله (۳) و ب) محاسبه عمق بالایی Z_t عمیق‌ترین منابع مغناطیسی با استفاده از معادله (۴). در نهایت، عمق کف Z_b توده‌های مغناطیسی می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t. \quad (5)$$

در این مقاله نیز با استفاده از روش مرکزبایی به تعیین عمق نقطه کوری استان آذربایجان شرقی با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی پرداخته خواهد شد.

۳ برآورد عمق نقطه کوری استان آذربایجان شرقی

۳-۱ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد

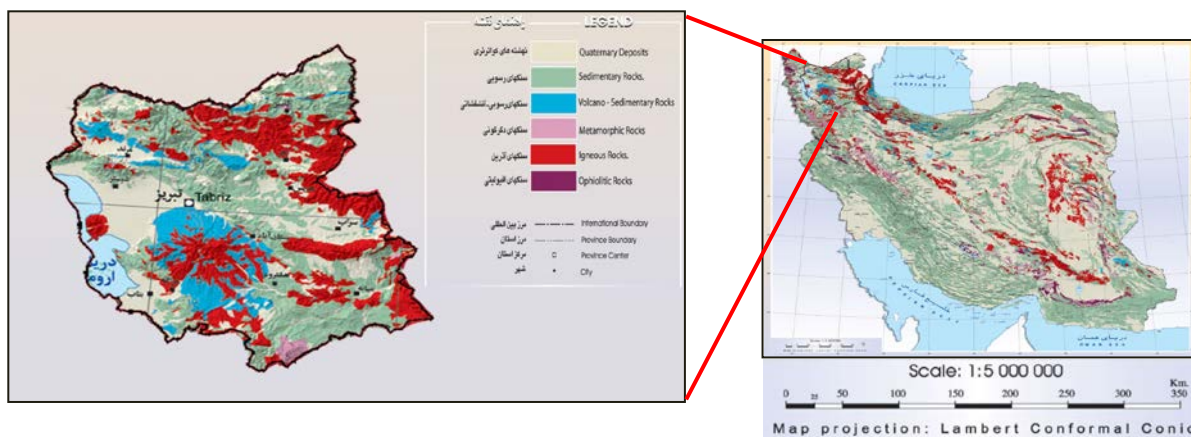
مطالعه

آذربایجان شرقی در شمال غرب کشور واقع شده است. این منطقه با ارتفاعات مشخص، یک منطقه کوهستانی را تشکیل داده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به رشته کوه سهند اشاره کرد. این رشته کوه در ۵۰ کیلومتری جنوب تبریز واقع شده است. مواد آتشفشانی تشکیل‌دهنده سهند به‌ترتیب از پایین به بالا عبارتند از کنگلومرای

همکاران (۲۰۰۹) عمق نقطه کوری را در بلغارستان با ۶ بلوک با ابعاد 300×300 کیلومتر تخمین زدند. تاناکا و همکاران (۱۹۹۹) شرق و جنوب شرق آسیا را به بلوک‌های 200×200 کیلومتر تقسیم کردند. سپس طیف توان شعاعی را برای هر بلوک به صورت جداگانه محاسبه و نقشه عمق کوری منطقه را تهیه کردند. بلکلی (۱۹۸۸) منطقه نوادا را برای محاسبه عمق نقطه کوری به بلوک‌های 120×120 کیلومتر تقسیم کرد. بولیگانگ 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. بانسال و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند در صورتی ابعاد پنجره مورد نظر بهینه است که در نمودار طیف توان در عدد موج‌های پایین برای اکثر بلوک‌ها، قله مشاهده شود. در این تحقیق با توجه به نظریه بانسال و همکاران ابعاد بهینه بلوک برای منطقه مورد مطالعه 140×140 کیلومتر با همپوشانی ۵۰ درصد با بلوک‌های مجاور انتخاب شد. در شکل ۲ بر روی نقشه مانده روند ۲ میدان مغناطیسی مراکز و محدوده بلوک‌ها مشخص شده‌اند.

بی‌هنجاری‌ها دقیقاً در زیر نقاط اندازه‌گیری واقع نمی‌باشد و شکل آنها نیز ممکن است دچار تغییرات اندکی شود. همچنین وجود توده‌های دوقطبی مغناطیسی و نحوه قرار گرفتن آنها نسبت به جهت میدان مغناطیسی زمین و امتداد خطوط برداشت می‌تواند باعث تغییر در شدت میدان و یا شکل بی‌هنجاری‌های حاصل از آنها شود. بنابراین برای حذف این گونه عوامل مزاحم در تفسیر، با اعمال صافی‌هایی مثل صافی برگردان (تبدیل میدان) به قطب این اثرات حذف شد. در نتیجه شدت و شکل بی‌هنجاری‌های مشاهده‌ای را می‌توان پس از حذف این اثرات، به منبع به وجود آورنده آنها نسبت داد. زوایه میل و انحراف میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۵۶ و ۴ درجه می‌باشد. نقشه مانده حاصل از اعمال سطح روند درجه ۲ (روند ۲) میدان مغناطیسی در شکل ۲ آورده شده است.

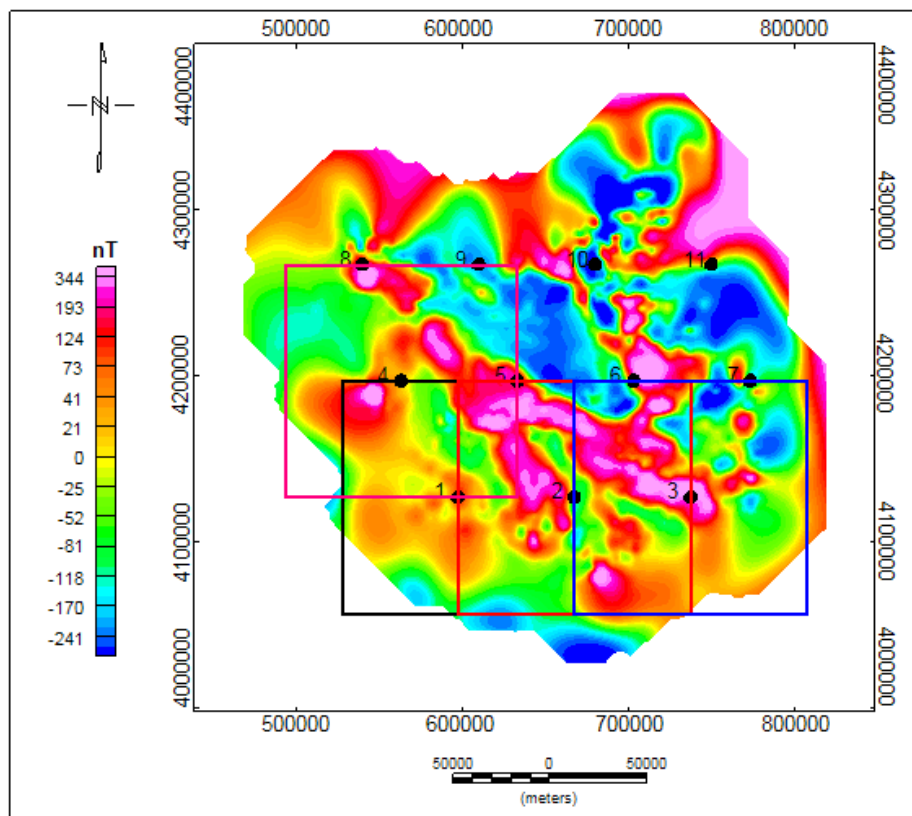
یکی از مهم‌ترین مراحل محاسبه عمق کوری با استفاده از طیف توان، انتخاب ابعاد بهینه برای بلوک‌بندی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. اکیوبو و همکاران (۱۹۸۵) پیشنهاد کردند که ابعاد بهینه پنجره مربعی مورد بررسی باید تقریباً ۱۰ برابر عمق واقعی هدف باشد. تریفونوا و



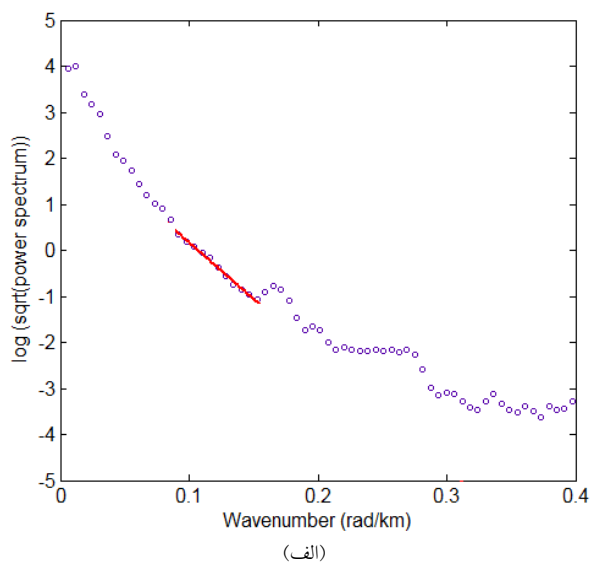
شکل ۱. زمین‌شناسی استان آذربایجان شرقی بر پایه نوع سنگ.

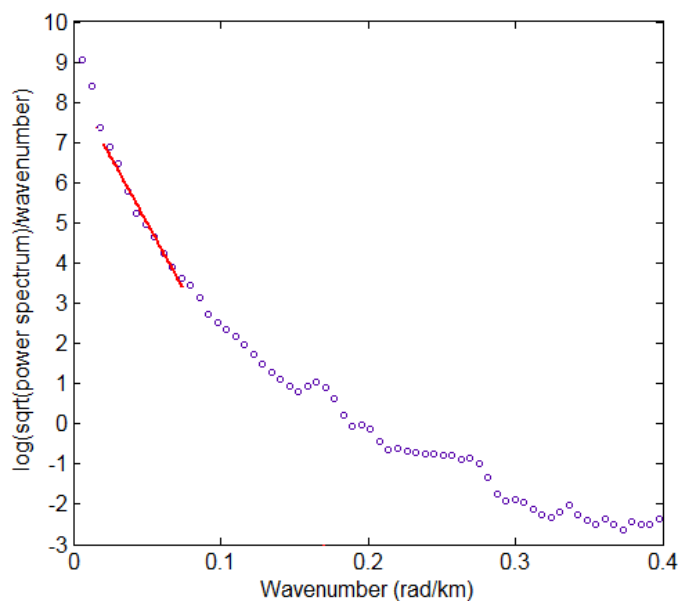
از روش بیشینه آنتروپی برای ایجاد لبه‌های پیوسته ۱۰ درصد گسترش داده شدند.

طیف توان هر بلوک از نقشه تبدیل میدان به قطب با استفاده از تبدیل فوریه سریع محاسبه شد. روند مرتبه اول نیز برای هر بلوک حذف شد. همچنین شبکه‌ها با استفاده



شکل ۲. نقشه مانده حاصل از اعمال سطح روند درجه ۲ میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه (مراکز بلوک‌ها نیز در این شکل با دایره‌های مشکی نشان داده شده- اند).





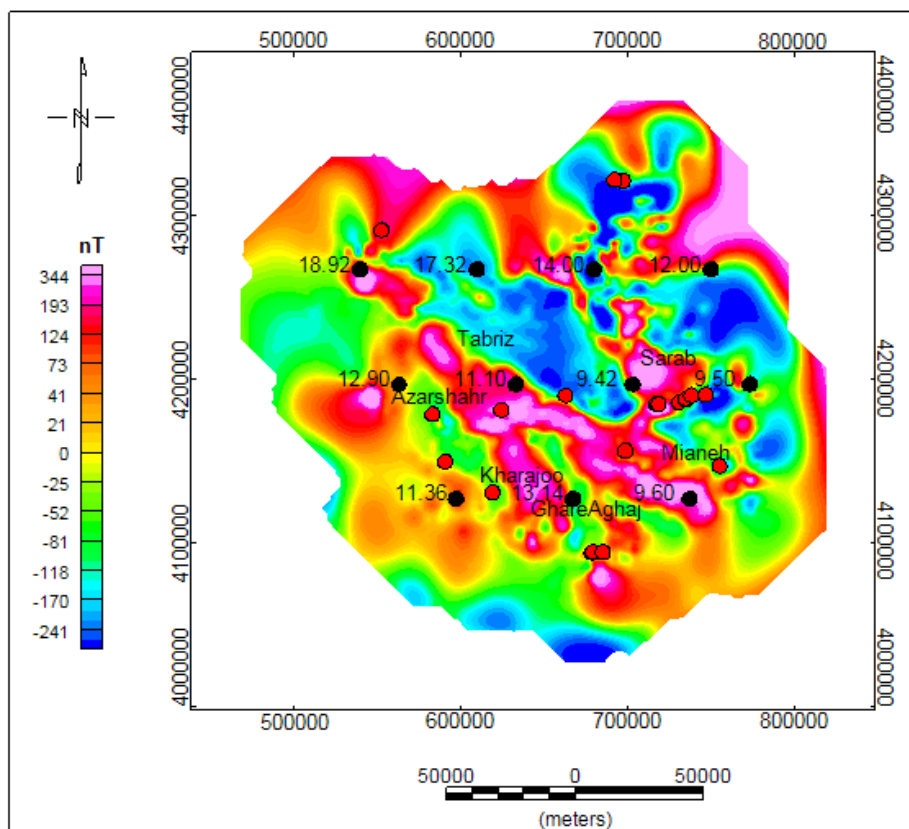
(ب)

شکل ۳. محاسبه عمق بالایی و مرکزی بلوک ۹ با استفاده از طیف توان. (الف) عمق بالایی ۳/۹ کیلومتر با برازش خط راست به دومین بخش بلندترین طول موج طیف به دست آمده است. (ب) عمق مرکزی ۱۰/۶ کیلومتر با برازش خط راست به بخش بلندترین طول موج طیف به دست آمده است. عمق کوری برای این بلوک می‌باشد. $Z_b = 2Z_0 - Z_t = 17.32 \text{ km}$

برابر عدد موج برازش می‌شود همیشه به مقدار زیادی به قضاوت شخصی وابسته است. در انتها بعد از محاسبه عمق‌های بالایی و مرکزی، با استفاده از معادله (۵) عمق نقطه کوری نیز محاسبه شد. مثالی از محاسبه عمق‌های بالایی و مرکزی برای یک بلوک در شکل ۳ آورده شده است. در جدول ۱ عمق‌های بالایی، مرکزی و کوری تمامی بلوک‌ها آورده شده است که در آن عمق کوری هر بلوک به مختصات مرکز آن اختصاص داده شده است. همچنین عمق کوری بلوک‌های منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه مانده روند ۲ میدان مغناطیسی به همراه بعضی چشمه‌های آب گرم موجود در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

۳-۳ تخمین عمق نقطه کوری بلوک‌ها

برای تخمین عمق‌های بالایی و مرکزی، ابتدا طیف توان شعاعی برای هر بلوک 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 شدند 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 بسیار مهم و اساسی می‌باشد. با این حال انتخاب بازه عدد موج به هنگامی که خط مستقیم به نمودار لگاریتم طیف توان در

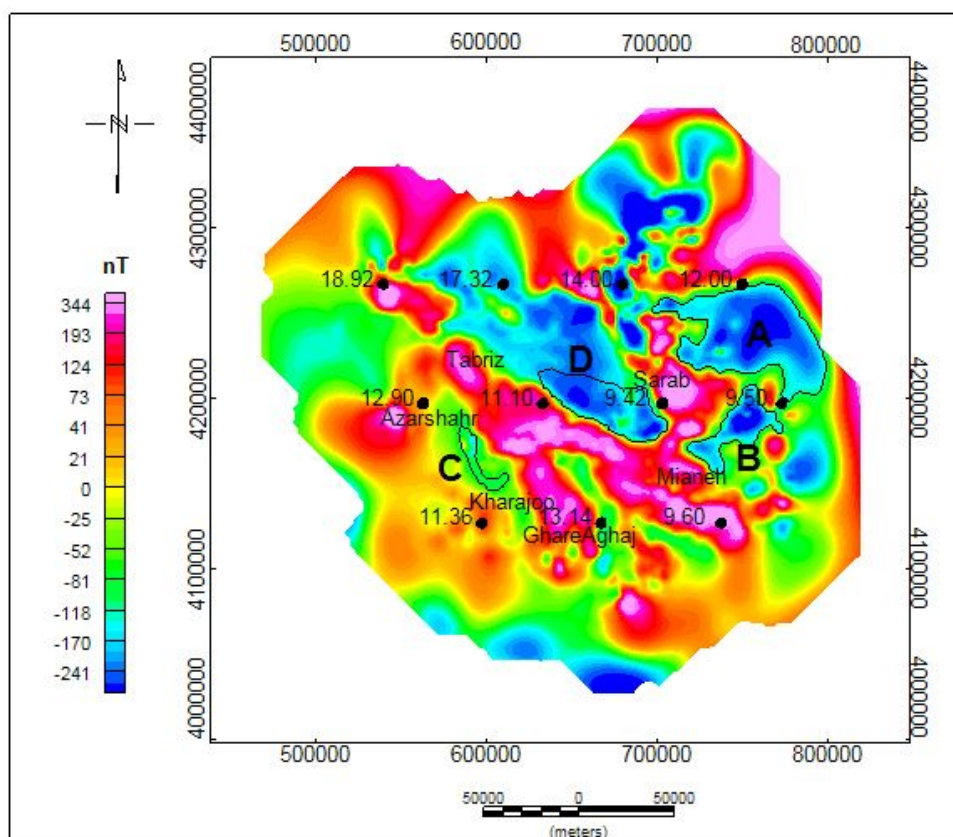


شکل ۴. مقادیر عمق نقطه کوری در مرکز هر بلوک که با عدد در کنار دایره‌های مشکی مشخص شده‌اند. همچنین محل چشمه‌های آب‌گرم موجود در منطقه با دایره‌های قرمز نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. عمق نقطه کوری تخمین زده شده برای ۱۱ بلوک منطقه مورد مطالعه.

عمق نقطه کوری (Z_b) به کیلومتر	عمق بالایی (Z_t) به کیلومتر	عمق مرکزی (Z_0) به کیلومتر	موقعیت جغرافیایی (UTM) (متر)		شماره بلوک
			شمالی	شرقی	
۱۱/۳۶	۲/۰	۶/۸	۴۱۲۷۳۷۹	۵۹۶۷۸۱	۱
۱۳/۱۴	۳/۹	۸/۵۲	۴۱۲۷۳۷۹	۶۶۶۷۸۱	۲
۹/۶۰	۳/۰	۶/۳۰	۴۱۲۷۳۷۹	۷۳۶۷۸۱	۳
۱۲/۹۰	۲/۸	۷/۸۵	۴۱۹۷۳۷۹	۵۶۲۵۳۸	۴
۱۱/۱۰	۲/۳	۶/۷۰	۴۱۹۷۳۷۹	۶۳۲۵۳۸	۵
۹/۴۲	۲/۸	۶/۱۱	۴۱۹۷۳۷۹	۷۰۲۵۳۸	۶
۹/۵۰	۱/۷	۵/۶۰	۴۱۹۷۳۷۹	۷۷۲۵۳۸	۷
۱۸/۹۲	۳/۵	۱۱/۲۱	۴۲۶۷۳۷۹	۵۳۹۳۰۲	۸
۱۷/۳۲	۳/۹	۱۰/۶۱	۴۲۶۷۳۷۹	۶۰۹۳۰۲	۹
۱۴/۰۰	۲/۴	۸/۲۰	۴۲۶۷۳۷۹	۶۷۹۳۰۲	۱۰
۱۲/۰۰	۲/۸	۷/۴۰	۴۲۶۷۳۷۹	۷۴۹۳۰۲	۱۱

**موقعیت جغرافیایی مرکز هر بلوک آورده شده است.



شکل ۵. نقشه تفکیک بی‌هنجاری‌های پیشنهادی زمین گرمایی با توجه به مقادیر عمق کوری، زمین‌شناسی و میدان مغناطیسی (بی‌هنجاری‌ها با حروف بزرگ انگلیسی نمایش داده شده‌اند).

۴ نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر تحلیل طیفی بر روی داده‌های مغناطیس هوایی به منظور مطالعه ساختارهای گرمایی در منطقه آذربایجان شرقی برای اولین بار صورت گرفت. با تهیه نقشه عمق کوری بلوک‌ها می‌توان گفت که در مناطقی که چشمه‌های آب گرم با دمای بالا وجود دارند و گرادیان دمایی بالاست، عمق نقطه کوری به‌طور قابل توجهی نسبت به نواحی دیگر کم می‌شود. مقادیر عمقی به‌دست آمده برای بلوک‌های ۳، ۶ و ۷ موید این مطلب می‌باشد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، موقعیت چشمه‌های آب گرم و تغییرات مانده روند ۲ میدان مغناطیسی، در

چهار منطقه بی‌هنجاری احتمالی منابع زمین گرمایی پیشنهاد شد که باید تحت بررسی‌های دقیق‌تر قرار بگیرد.

منابع

- 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, Analysis of magnetic anomalies over

- Maus, S., and Dimri, V. P., 1995, Potential field power spectrum inversion for scaling geology: *J. Geophys. Res.*, **100**, 12605–12616.
- Mayalla, J. W. M., 2006, Geothermal mapping in the Hromundartindur area, SW-Iceland: The United Nations University, Geothermal Training Program, Iceland, Reports 2006, No: 13, 245-260.
- 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 of Japan: *Geophysics*, **53**, 481-494.
- Pilkington, M., and Todoeschuck, J. P., 1993, Fractal magnetization of continental crust: *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 627–630.
- Saleh, S., Salk, M., and Pamukcu, O., 2013, Estimating Curie point depth and heat flow map for Northern Red Sea rift of Egypt and its surroundings, from aeromagnetic data: *Pure Appl. Geophys.*, **170**, 863-885.
- Spector, A. and Grant, F. S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data: *Geophysics*, **35**, 293-302.
- Stampolidis, A., Kane, I., Tsokas, G. N., and Tsourlos, P., 2005, Curie point depths of Albania inferred from ground total field magnetic data: *Survey Geophysics.*, **26**, 461–480.
- 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.
- Trifonova, P., Zhelev, Z., Petrova, T., and Bojadgieva, K., 2009, Curie point depths of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional thermal structure and seismicity: *Tectonophysics*, **473**, 362–374.
- Tselentis, G. A., 1991, An attempt to define Curie depths in Greece from aeromagnetic and heat flow data: *Pure Appl. Geophys.*, **136**, 87-101.
- Yellowstone National Park: Mapping of Curie point isothermal surface for geothermal reconnaissance: *J. Geophys. Res.*, **80**, 4461-4465.
- Bhattacharyya, B. K., and Leu, L. K., 1977, Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies: *Geophysics*, **41**, 41–50.
- Bhattacharyya, B. K., and Morley, L. W., 1965, The delineation of deep crustal magnetic bodies from total field aeromagnetic anomalies: *J. Geomagn. Geoelect.*, **17**, 237-252.
- Blakely, R., 1988, Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada: *J. Geophys. Res.*, **93**, 11817–11832.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*: Cambridge Univ. Press, Cambridge, England.
- 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: *Geophysics*, **42**, 1394-1400.
- Gupta, H. and Roy, S., 2007, *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21ST Century*: Elsevier, 111 pp.
- 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: *Stud. Geophys. Geod.*, **56**, 269-291.
- Hochstein, M. P., and Sudarman, S., 2008, History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000: *Geothermics*, **37**, 220-266.
- Li, C. F., Shi, X., Zhou, Z., Li, J., Geng, J., and Chen, B., 2010, Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and their tectonic implications: *Geophys. J. Int.*, **182**, 1229–1247.