

## پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس زمینی مرتبط با منابع زمین‌گرمایی با استفاده از دو روش اویلر و AN-EUL، شمال شرق محلات

محمود میرزائی<sup>۱</sup>، محمد محمدزاده مقدم<sup>۲</sup>، بهروز اسکویی<sup>۳</sup>، فریدون قدیمی عروس محله<sup>۴</sup> و سید سجاد جزایری<sup>۵\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی اراک، ایران  
<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اراک، ایران  
<sup>۵</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
(دریافت: ۹۱/۳/۲۷، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

### چکیده

چشمه‌های آبگرم متعدد در منطقه محلات و همچنین نوع زمین‌شناسی منطقه، نشان‌دهنده وجود یک سامانه زمین‌گرمایی بزرگ در اعماق منطقه است. طی فعالیت‌های صورت گرفته از ۱۳۷۴ در ایران، چندین ناحیه امیدبخش از لحاظ پتانسیل زمین‌گرمایی از سوی مرکز انرژی‌های نو وزارت نیرو معرفی شده که محلات یکی از مناطق مهم در این زمینه است. به‌منظور شناسایی دقیق نواحی مستعد زمین‌گرمایی، عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی در طول ۱۰ نیم‌رخ به‌نسبت بلند، جمعاً به طول حدود ۱۶۰ کیلومتر با فاصله ایستگاهی ۴۰ متر و فاصله نیم‌رخ ۱/۵ کیلومتر، در محدوده اطراف چشمه‌های آبگرم محلات صورت گرفت. در مجموع بیش از ۴۰۰۰ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شد. در این پژوهش داده‌های حاصل از عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی با استفاده از دو روش بسیار کاربردی اویلر و روش تلفیقی سیگنال تحلیلی و اویلر (AN-EUL) مورد تفسیر قرار گرفته است. نتایج برآورد عمق منبع اصلی بی‌هنجاری به‌دست آمده با این دو روش، وجود یک منبع زمین‌گرمایی با عمق حداقل یک کیلومتر در منطقه را برآورد می‌کند. مقدار شاخص ساختاری به‌دست آمده از این دو روش پردازشی، مؤید این است که منبع بی‌هنجاری احتمالاً داری شکلی شبیه به یک استوانه قائم است. نبود قطب منفی مغناطیسی بارز در منطقه احتمالاً حاکی از گسترش این توده در عمق است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش اویلر علاوه بر برآورد عمق بی‌هنجاری، به بررسی روند تغییر عمق در نقاط متفاوت بی‌هنجاری هم می‌پردازد ولی روش AN-EUL فقط در نقاط خاصی می‌تواند برآورد عمق را عملی سازد.

واژه‌های کلیدی: چشمه‌های آبگرم، محلات، مغناطیس‌سنجی زمینی، منبع زمین‌گرمایی

### Processing and interpretation of ground magnetic data corresponding to geothermal resources using Euler and AN-EUL method, north-east of Mahallat

Mirzaei, M.<sup>1</sup>, Mohammadzadeh-Moghaddam, M.<sup>2</sup>, Oskooi, B.<sup>3</sup>, Ghadimi, F.<sup>4</sup> and Jazayeri, S.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Industrial University of Arak, Iran

<sup>2</sup>M. Sc., Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, Faculty of Mining, Industrial University of Arak, Iran

<sup>5</sup>M. Sc., Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 16 Jun 2012, Accepted: 08 Oct 2013)

### Summary

Ground magnetic survey was carried out in Mahallat region, Iran, as the first part of

exploration and development of geothermal energy program conducted by Arak and Tehran universities. The magnetic method is useful in mapping near-surface volcanic rocks that are often of interest in geothermal exploration. The magnetic method has come into use for identifying and locating masses of igneous rocks that have relatively high concentrations of magnetite. Strongly magnetic rocks include basalt and gabbro, while rocks such as granite, granodiorite and rhyolite have only moderately high magnetic susceptibilities. The surface manifestations of thermal activity in the area are in the form of hot springs, hydrothermal deposits, thermal alteration, vast travertine outcrops and young volcanic rocks.

In the geological dividing of Iran, Mahallat area is located in the volcanic zone of Central Iran. This zone has been one of active zones during the different geological periods that is located in Central Iran with triangle form. This area, from permeability aspect and by regarding to expansion of calcareous and dolomite units and also presence of cracks and joints, has a good condition. Also, with regard to presence of hot water springs and regard to geologic settings in the area, we can define it as one of important and suitable geothermal potential in Iran.

Existence of many hot springs in Mahallat and also its special geology show a big probable deep geothermal system in the area. During activities performed since 1996 in Iran, few encouraging area with geothermal potential have been introduced by the Renewable Energy Organization of Iran and one of the corresponding areas is Mahallat. In order to delineate susceptible area with geothermal potentials accurately, ground magnetic survey was performed around hot springs of Mahallat. Total magnetic field data was collected along 10 profiles, with station distance of 40 m and profile distance of 1.5 km. During this survey, measurements were performed at over 4000 stations.

In this research, magnetic data of magnetometry operations are interpreted by two practical methods: standard Euler deconvolution and AN-EUL. The standard Euler method is based on the Euler equation, and using this method in the depth estimation of magnetic anomalies inserts the geology of the region into the calculations. AN-EUL is a new automatic method for the simultaneous approximation of depth, geometry and location of magnetic sources. The principle advantage of this method is its combining both the analytic signal and the Euler Deconvolution methods. In this method, the determination of the source location is based on the position of the maximum value of the analytic signal amplitude.

Results of depth estimation of the main source of the anomaly, from these two methods, have estimated existence of geothermal resource, with probable depth of more than 1000 m and structural index of 1.8. Estimated structural index from these two methods shows that source of anomaly has a conical cylinder shape. Absence of negative magnetic pole in the area imply of extension of anomaly in depth. Results of this research also show that Euler method in addition to estimation of anomalous depth is also able to investigate trend of depth variations in different position of the anomaly, while AN-EUL can only estimate depth in special position.

Gravity, resistivity and MT surveys and also exploratory drillings over the interpreted geothermal anomalies in the area are suggested for the future assessment of geothermal energy in the region on an industrial and scientific scale.

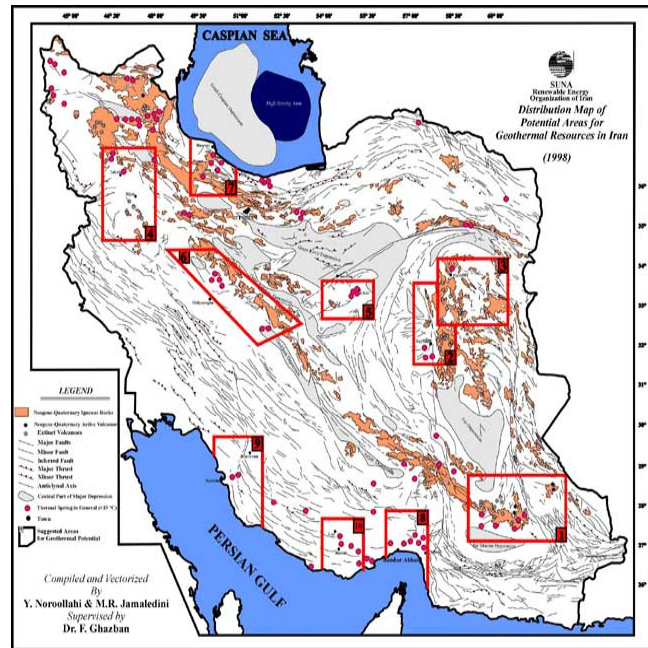
**Keywords:** Geothermal resource, Hot springs, Magnetic survey, Mahallat region

## ۱ مقدمه

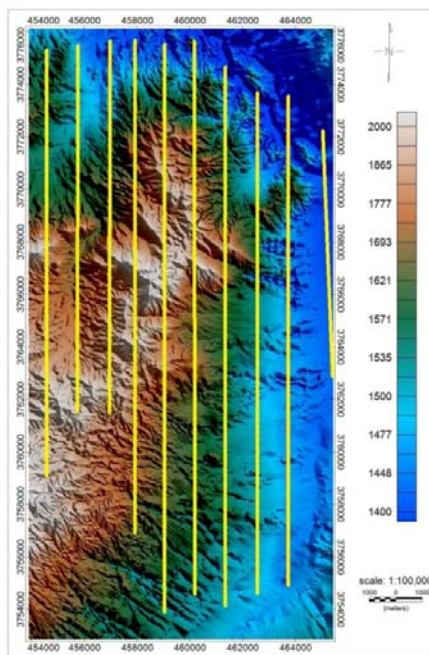
منطقه محلات یکی از مناطق زمین گرمایی مهم در ایران به شمار می‌رود که در ۱۳۷۷، از سوی کارشناسان گروه زمین گرمایی سازمان انرژی‌های نو وزارت نیرو ایران، شناسایی شد. این ناحیه بسیار بزرگ است و در حدود ۵۱۰۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد و بخش‌هایی از استان‌های قم، مرکزی و اصفهان را در بر می‌گیرد. در شکل ۱ موقعیت آن در نقشه ایران و در جدول ۱ مختصات جغرافیایی آن، مشخص شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، وسعت منطقه محلات بسیار زیاد است و به وضوح مشخص نیست که در چه بخش‌هایی از این منطقه وسیع، استعداد زمین گرمایی وجود دارد. اما ناحیه اطراف چشمه‌های آبگرم محلات دارای ویژگی‌های زیر است: وجود چشمه‌های آبگرم، سنگ‌های آتشفشانی جوان، نواحی دگرسان شده، رخنمون وسیع تراورتن و توده‌های نفوذی. بر این اساس به نظر می‌رسد که منطقه مورد بررسی از لحاظ زمین گرمایی پتانسیل زیادی داشته باشد و اجرای بررسی مغناطیسی، به منظور شناسایی و شناخت بیشتر منطقه، اهمیت زیادی دارد.

به منظور شناسایی دقیق نواحی مستعد زمین گرمایی، و مشخص ساختن نواحی دارای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی در طول ۱۰ نیم‌رخ به نسبت بلند جمعا به طول ۱۶۰ کیلومتر با فاصله ایستگاهی ۴۰ متر و فاصله نیم‌رخ ۱/۵ کیلومتر، در محدوده اطراف چشمه‌های آبگرم محلات صورت گرفته است. این طرح در نیمه اول ۱۳۹۰ از سوی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و دانشگاه اراک صورت گرفت. در این تحقیق در مجموع بیش از ۴۰۰۰ ایستگاه مغناطیس‌سنجی برداشت شد. مساحت کل ناحیه مورد بررسی حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع است. شکل ۲ مدل ارتفاعی ماهواره‌ای منطقه را نشان می‌دهد. در این شکل، نیم‌رخ‌های برداشت داده با خطوط

زرد رنگ شمالی- جنوبی مشخص شده‌اند. در این تحقیق به منظور برآورد عمق توده‌های بی‌هنجار مغناطیسی، داده‌های مغناطیس برداشت شده با استفاده از دو روش اویلر و AN-EUL مورد پردازش و تفسیر قرار گرفته است. روش واهمامیخت اویلر به مثابه فنی برای تعیین عمق، موقعیت و شکل منبع‌های مغناطیسی دو بُعدی و سه بُعدی، از چند دهه پیش کاربرد وسیعی یافته است؛ رید و همکاران (۱۹۹۰)، راوات (۱۹۹۶)، هسو (۲۰۰۲)، کی‌تینگ و پیلکینگتون (۲۰۰۴)، بین دوو و همکاران (۲۰۰۷)، کوپر (۲۰۰۸). روش سیگنال تحلیلی نیز در حکم روشی پُراهمیت در تفسیر داده‌های مغناطیسی مورد توجه بوده است. نیقیان (۱۹۷۲، ۱۹۷۴، ۱۹۸۴) از سیگنال تحلیلی برای برآورد عمق سطح تماس (Contact) استفاده کرد. هسو و همکاران (۱۹۹۶) از سیگنال تحلیلی ارتق‌یافته (Enhanced analytic signal) برای تعیین عمق ساختارهای زمین‌شناسی مثل دایک و گسل استفاده کردند. بر همین اساس، باستانی و پدرسن (۲۰۰۱) با استفاده از سیگنال تحلیلی روشی را برای محاسبه پارامترهای دایک عرضه کردند. سالم و همکاران (۲۰۰۲)، از تابع سیگنال تحلیلی در روش اویلر استفاده کردند و عمق و مکان منبع را برای حالت خاصی که شکل اندیس ساختاری معلوم باشد به دست آوردند. سالم و راوات (۲۰۰۳) روش پیشین را تعمیم دادند و از ادغام دو روش واهمامیخت اویلر و سیگنال تحلیلی روش AN-EUL را ابداع کردند. با استفاده از این روش عمق و اندیس ساختاری منبع در محل منبع محاسبه می‌شود؛ که مکان منبع با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی برآورد می‌شود. اویسی و همکاران (۱۳۸۶) از روش بهبودیافته تلفیقی سیگنال تحلیلی و اویلر در تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه خرم‌آباد استفاده کردند.



شکل ۱. نقشه توزیع نواحی دارای پتانسیل منابع زمین گرمایی در ایران (سازمان انرژی‌های نو وزارت نیرو، ایران).



شکل ۲. مدل ارتفاعی ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی. بر اساس این شکل، به ترتیب بیشترین و کمترین ارتفاع منطقه حدود ۲۱۳۶ و ۱۳۵۷ متر از سطح دریای آزاد است که با توجه به مساحت کل محدوده، این اختلاف ارتفاع زیاد است و بنابراین برای داده‌برداری زمینی، جزء مناطق سخت محسوب می‌شود. خطوط زرد رنگ، نیم‌رخ‌های برداشت داده را نشان می‌دهد. در ابتدا خطوط برداشت داده به صورت منظم و با طول یکسان طراحی شد اما به علت وجود برخی موانع و مشکلات بر سر راه داده‌برداری در منطقه، طول و اندازه نیم‌رخ‌های برداشت شده نسبت به هم یکسان نیستند.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ قم و ۱:۲۵۰۰۰۰ گلبایگان).

## ۲ زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

در تقسیم‌بندی زمین‌ساختی ایران، منطقه محلات در زون آتشفشانی ایران مرکزی واقع شده است. این زون یکی از زون‌های فعال و پرتکاپو در طی دوران‌های متفاوت زمین‌شناسی بوده که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار گرفته است. مرز غربی زون پیش‌گفته به زون دگرگونی سنندج-سیرجان محدود می‌شود و مرز آن در استان مرکزی با گسل‌های تلخاب و تبرته مشخص می‌شود. زون ایران مرکزی از سمت شمال به زون البرز و از سمت جنوب به زون مکران محدود می‌شود. حد شرقی زون ایران مرکزی چندان مشخص نیست، زیرا بعضی از زمین‌شناسان، بلوک لوت را جزئی از ایران مرکزی محسوب می‌کنند و بعضی دیگر بلوک لوت را قطعه مجزایی از آن می‌دانند.

چشمه‌های آبگرم محلات که در فاصله ۱۵ کیلومتری

شمال شرقی شهر محلات در میان ارتفاعات بلند منطقه قرار گرفته‌اند و از جمله مهم‌ترین منابع آب معدنی استان مرکزی محسوب می‌شوند. منطقه آبگرم محلات بخش کوچکی از پهنه ایران مرکزی است که روی کمر بند آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد. شکل ۳ وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و پراکندگی چشمه‌های آبگرم منطقه را نشان می‌دهد.

سازندهای رخنمون‌یافته در منطقه مورد بررسی عبارت‌اند از: سازند شمشک ( $J_s, J_s^{sh}$ ) با لیتولوژی شیل و ماسه‌سنگ، واحد آهک اوریتولین‌دار کرتاسه ( $K^1$ )، واحد آهک مارنی سازند قم ( $OM_q^{II}$ ) و در مجاورت این سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های آذرین شامل گرانودیوریت، توف و گدازه در منطقه رخنمون دارند. چشمه‌های آبگرم محلات که موقعیت آنها در نقشه زمین‌شناسی شکل ۳ با مثلث‌های توپو سرخ‌رنگ مشخص

می‌رود. البته پدیده اختلاط آب‌های گرم با آب‌های سرد کم عمق نیز می‌تواند در فرایند انحلال سنگ‌های کربناته مؤثر باشد. صعود آب‌ها به بخش‌های فوقانی و کاهش فشار هیدروستاتیک باعث خروج گازها از جمله  $CO_2$  و فوق اشباع شدن آب‌ها از کلسیت و در نتیجه رسوب‌گذاری و تشکیل تراورتن می‌شود.

### ۳ نظریه و اعمال روش‌های پردازشی

#### ۱-۳ روش اولر

تابع  $V$  در دستگاه دکارتی به صورت  $V(x, y, z)$ ، همگن از درجه  $N$  نامیده می‌شود، اگر:

$$x \frac{\partial V}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial y} + z \frac{\partial V}{\partial z} = -NV, \quad (1)$$

با یک بار مشتق گرفتن از رابطه (۱) نسبت به مؤلفه  $z$  و مرتب کردن جملات، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial z} + y \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial z} + z \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} = -(N+1)V, \quad (2)$$

به طوری که مؤلفه‌های مشتق تابع همگن  $V$  از درجه  $N$  خود، همگن از درجه  $N+1$  خواهند بود. چشمه پتانسیلی ساده‌ای در موقعیت  $(x_0, y_0, z_0)$  را در نظر بگیرید. در نقطه‌ای به موقعیت  $(x_i, y_i, z_i)$  اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی کل یا میدان گرانشی منجر به تابع  $T(x_i, y_i, z_i)$  می‌شود که در آن  $i=1, 2, 3, \dots, m$  صفحه مشاهده و برداشت داده‌ها در صفحه  $Z=0$  است و جهت مثبت محور  $Z$  رو به پایین انتخاب می‌شود. میدان  $T$  باید در معادله اولر با درجه  $N$  صدق کند. در نتیجه داریم:

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} = -NT(x_i, y_i, z_i), \quad (3)$$

با حذف اثر میدان مغناطیسی منطقه‌ای، برای  $i=1, 2, 3, \dots, m$  به شکل ماتریسی این  $m$  رابطه به صورت

شده است، از رسوبات تراورتن و آبرفت خارج می‌شوند. رسوبات تراورتن که به مرور زمان در اثر ته‌نشست رسوبات چشمه‌ها به وجود آمده‌اند، اغلب در مجاورت گسل‌های ناحیه تشکیل شده‌اند و ضخامت قابل توجهی دارند. در گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیایگان، ضخامت آنها حتی تا ۵۰۰ متر نیز قید شده است. گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی که در این منطقه به چشم می‌خورد، در چرخش آب از سطح به عمق و برعکس، نقش مهمی دارند. نکته حائز اهمیت دیگر، دگرسانی‌های فراوان منطقه است. اغلب دگرسانی‌های منطقه از نوع آرژیلیکی-سیریسیتی است ولی دگرسانی از نوع کائولینیتی-آلونیتی نیز در منطقه زیاد به چشم می‌خورد. این نوع از دگرسانی‌ها، به خصوص نوع اول آن ارتباط تنگاتنگی با فعالیت شاره‌های گرمابی (هیدروترمال) دارد. به عبارتی این نوع از دگرسانی عمدتاً در دمای زیاد اتفاق می‌افتد.

رضایی و همکاران (۱۳۸۸) مدل فرضی و مفهومی تشکیل چشمه‌های آبگرم منطقه را به این ترتیب عرضه کردند: ریزش‌های جوئی در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های متقاطع (غالباً) و سنگ‌های نفوذپذیر منطقه به اعماق زمین نفوذ می‌کنند. اضافه شدن بخارها و مواد فرار پرفشار، از توده ماگما یا سنگ‌های داغ، از جمله  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ، قابلیت انحلال آنها را در واکنش با سنگ‌های دربرگیرنده از جمله کربنات‌ها افزایش می‌دهد. گرم شدن آب‌ها در اعماق در مجاورت ماگمای در حال سرد شدن و یا سنگ‌های بسیار داغ و نیز به دام انداختن گازها و مواد فرار، موجب کاهش چگالی آنها می‌شود و در نتیجه، آب‌های گرم به علت خاصیت شناوری در امتداد گسل‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند. زمانی که آب صعود می‌کند و در طول مسیر حرکت در سنگ‌های کربناته درجه حرارت خود را از دست می‌دهد، گازها و مواد فرار بیشتری در آب حل می‌شود و به این ترتیب ظرفیت انحلالی آب‌های گرم با ایجاد کارست عمقی بالا

زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \Delta T_2}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_2}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{pmatrix} = -N \begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (4)$$

پس در روابط بالا با معلوم بودن  $N$ ، پارامترهای  $(x_0, y_0, z_0)$  که موقعیت چشمه تولید کننده بی‌هنجاری هستند نیز با استفاده از روش کمینه مربعات به دست خواهند آمد. چند مورد در روش اویلر برای رسیدن به نتایج اهمیت فراوانی دارند، که عبارت‌اند از: انتخاب درست  $N$  که از آن به منزله اندیس ساختاری تعبیر می‌شود، اندازه پنجره اویلر و عدم قطعیت عمق (جزایری و اسکویی، ۱۳۹۰).

درجه همگنی  $N$  به صورت اندیس ساختاری (SI) بیان می‌شود. اندیس ساختاری در واقع معیاری از نرخ انحراف (fall-off) میدان، نسبت به فاصله از منبع بی‌هنجاری است. اندیس ساختاری در مغناطیس از ۰ تا ۳ متغیر است. برای مناطقی که ساختار زمین‌شناسی قدیمی دارند، این عدد بین ۰ و ۱ و برای مناطقی که شاهد پدیده‌های زمین‌شناسی جوان‌تری هستند، بین ۰ و ۳ خواهد بود (راوات، ۱۹۹۶). به‌طور کلی مقدار صفر برای پله و کنتاکت زمین‌شناسی، مقدار ۱ برای سیل و دایک، مقدار ۲ برای استوانه و مقدار ۳ را برای کره در نظر می‌گیرند. در جدول شماره ۲ مقادیر  $N$  برای شکل‌های گوناگون زمین‌شناسی را تامپسون (۱۹۸۲) عرضه کرده است. باید توجه داشت که مقدار صفر اندیس ساختاری حاکی از ثابت ماندن میدان به‌رغم فاصله از منبع بی‌هنجاری است. در واقع مقدار صفر اندیس ساختاری را برای منبع بی‌هنجاری با ابعاد بی‌نهایت در نظر می‌گیرند؛ اما در این موارد در نرم‌افزار ژئوسافت، اغلب با در نظر گرفتن مقدار ۰/۵ اندیس ساختاری برای داده‌های واقعی، نتایج قابل قبول‌تری به دست می‌دهد.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه زمین‌گرایی محلات.

شماره	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۴۹° ۰۰'	۳۴° ۴۱'
۲	۳۱° ۵۰'	۳۴° ۴۱'
۳	۴۰° ۵۳'	۳۳° ۰۰'
۴	۴۰° ۵۲'	۳۲° ۱۳'

جدول ۲. مقادیر  $N$  (بدون واحد) برای شکل‌های متفاوت زمین‌شناسی (تامپسون، ۱۹۸۲).

شکل ساختار	N
Contact افقی با گستردگی بی‌نهایت	۰
Contact قائم	۰/۵-۰
پله (فروافتادگی) ضخیم	۰/۵
دایک- سیل نامنظم	۱
استوانه قائم	۲/۲۵-۲
استوانه با امتداد نامشخص	۲/۵
استوانه افقی	۲/۷۵-۲
دوقطبی نقطه‌ای- کره	۳

برای اعمال روش اویلر روی داده‌ها، به علت حجم زیاد داده‌های برداشت شده در روش‌های مغناطیسی یا گرانشی و دست نیافتن به دقت و کیفیت لازم در پردازش یک‌باره و کلی داده‌ها در کل شبکه، پنجره مربعی اویلر مطابق شکل ۴ تعریف می‌شود که روی شبکه جابه‌جا می‌شود و عملیات پردازشی درون پنجره صورت می‌گیرد. این پنجره باید دو مشخصه داشته باشد:

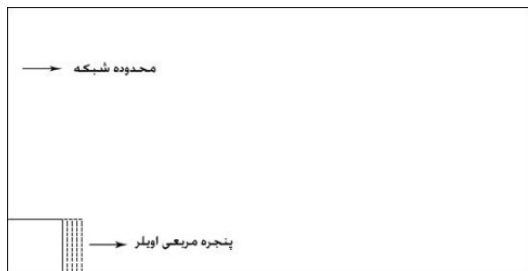
- به اندازه کافی بزرگ باشد تا تغییرات اساسی میدان را در بر بگیرد.

- به اندازه کافی کوچک باشد تا اثر چند چشمه‌ای در پنجره رخ ندهد. یعنی پنجره در هر موقعیت فقط شامل یک چشمه باشد.

یک پنجره ۱۰×۱۰، ۱۰۰ رابطه با ۴ پارامتر نامعلوم

باید اندازه پنجره را بزرگ‌تر در نظر بگیریم، در صورتی که بازهم به نتیجه مورد نظر نرسیم، باید از راه‌های گوناگون اندازه مؤثر پنجره، یعنی اندازه سلول شبکه را زیاد کنیم.

بهترین مجموعه نقاط حل، مجموعه‌ای است که مناطقی با داده نوفه‌ای، ولی بدون بی‌هنجاری داشته باشیم، نقطه حلی از واهمامیخت اوایلر حاصل نشود. با به نقشه درآوردن نقاط باقی‌مانده پس از اعمال پنجره‌سازی (Windowing) بهترین مجموعه نقاط حل مربوط به روش اوایلر با اندیس ساختاری ۱/۷۵ و اندازه پنجره ۴۰۰×۴۰۰ تعیین شد که در شکل ۵، نقاط پیش‌گفته، روی نقشه شدت میدان باقی‌مانده، تصویر شده‌اند و نتایج این برآورد عمق در نقاط گوناگون شبکه با دایره‌های رنگی توپُر مشخص شده که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را در عمق‌های گوناگون به تصویر کشیده‌اند. با توجه به نمایش حل‌های اوایلر روی نقشه مغناطیس باقی‌مانده منطقه در شکل ۵، روش اوایلر روی بی‌هنجاری عمده منطقه مورد بررسی، در جهت غرب به شرق- شمال شرق، اعماق متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به طوری که در این جهت از عمق نزدیک به ۱۰۰۰ متر شروع می‌شود و تا اعماق بیشتر از ۱۴۰۰ متر را نشان می‌دهد. این امر احتمالاً حاکی از شیب ساختار (توده با مغناطیس زیاد) در این جهت است. البته از لحاظ آماری حل‌های با عمق کمتر از ۱۰۰۰ متر (دایره‌های سیاه‌رنگ) تعدادشان به نسبت حل‌های مجاور کمتر است ولی برای اعماق بیشتر، تعداد نقاط حل قابل توجه است.



شکل ۴. پنجره مربعی اوایلر (در هر مرحله یک سلول جا به جا می‌شود).

$(x_0, y_0, z_0, B)$  و عدم قطعیت‌هایشان (انحراف معیار) برای هر اندیس ساختاری معلوم فراهم می‌شود (باربوسا و همکاران، ۱۹۹۹).

### ۳-۱-۱ اعمال روش اوایلر روی داده‌ها

به منظور اعمال روش اوایلر روی داده‌ها از نرم‌افزار ژئوسافت استفاده شد. پس از آماده‌سازی شبکه، نقشه‌های مشتقات میدان کل در سه جهت  $X, Y, Z$ ، که تهیه آن لازمه اجرای فرایند واهمامیخت اوایلر است، تهیه شد؛ همچنین برای اعمال فرایند اوایلر نیاز به اندیس ساختاری و اندازه پنجره است. برای دستیابی به پاسخ‌های مناسب، شاخص‌های ساختاری به صورت پیش‌فرض به مسئله داده می‌شود و شاخص ساختاری صحیح‌تر شاخصی در نظر گرفته می‌شود که اولاً بیشترین خوشه‌بندی را در پاسخ‌ها داشته باشد، یعنی پاسخ‌های با عمق یکسان، مجاور هم باشند و دوم اینکه مناطقی که در آنها بی‌هنجاری وجود ندارد از لحاظ آماری، تعداد نقاط حل اوایلر کمینه باشد (جزایری و اسکویی، ۱۳۹۰). از آنجا که هیچ دیدی از اعماق زمین نداریم، برای رسیدن به این اندیس ساختاری مناسب، باید اعداد متفاوت اندیس ساختاری، مورد آزمایش قرار گیرد. در اینجا کار را از عدد ۰/۵ آغاز و با گام ۰/۱ تا عدد ۳ ادامه می‌دهیم. با توجه به مطالب پیش‌گفته، بهترین اندیس ساختاری که برای شکل بی‌هنجاری عمده موجود در منطقه برآورد شد، محدوده عددی بین ۱/۶ تا ۱/۹ است. به طور میانگین اندیس ساختاری ۱/۷۵ را در نظر می‌گیریم.

برای حل عمومی روش اوایلر روی داده‌ها، پنجره‌های متفاوت با اندازه‌های متفاوت انتخاب شد. برای رسیدن به بهترین نتایج، از نظر موقعیت نقاط روی شکل، متمرکزتر و دربرگیرنده روند بی‌هنجاری‌ها، اندازه پنجره بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود؛ اگر با یک اندازه سلول در نظر گرفته شده، نقاط موقعیت خوبی روی نقشه نداشته باشند



تحلیلی میدان کل، عمق  $Z_0$  و هندسه چشمه  $\eta$ ، هر سه به‌طور هم‌زمان در محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی به‌دست می‌آیند. در واقع معادلات اصلی روش AN-EUL به‌صورت زیر است (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$Z_0 = \left( \frac{|AAS_1||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0}, \quad (5)$$

$$\eta = \left( \frac{2|AAS_1|^2 - |AAS_2||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0}, \quad (6)$$

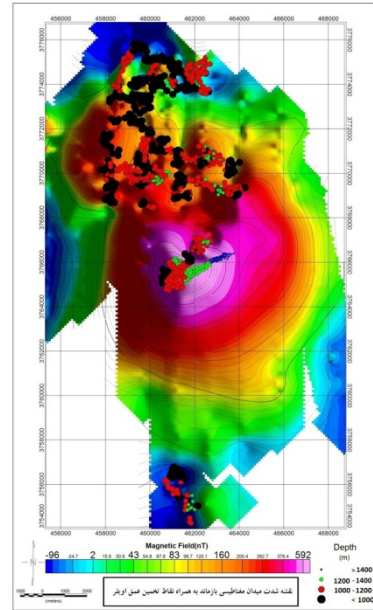
که  $|AAS_0(x, y)|$ ،  $|AAS_1(x, y)|$ ،  $|AAS_2(x, y)|$  به‌ترتیب دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری میدان کل و دامنه مشتق مرتبه اول و دوم سیگنال تحلیلی است، اگر  $AS_n$  را گرادیان مشتق مرتبه  $n$ ام میدان مغناطیسی در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$|AS_n(x, y)| = \sqrt{\left( \frac{\partial M_n^z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial M_n^z}{\partial z} \right)^2}, \quad (7)$$

که در این معادله  $Z$  نشان‌دهنده مشتق قائم میدان است. معادله (۷) نشان می‌دهد که عمق و شاخص ساختار چشمه مغناطیسی را می‌توان به‌طور هم‌زمان از دامنه سیگنال تحلیلی و دامنه مشتقات مرتبه اول و دوم آن در نقطه رومرکز  $(x, y)$  محاسبه کرد. خود مکان رومرکز نیز براساس محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی برآورد می‌شود.

### ۳-۲-۱ اعمال روش AN-EUL روی داده‌ها

از آنجا که این روش از مشتقات مرتبه بالا استفاده می‌کند، در نتیجه به نوفه‌ها و توده‌های سطحی حساس است؛ به همین علت، قبل از محاسبه سیگنال‌های تحلیلی و اعمال روش AN-EUL، به‌منظور کاهش اثر این نوفه‌ها و توده‌های سطحی، با استفاده از فیلتر ادامه فراسو، داده‌ها را به سطح بالاتر منتقل می‌کنیم. سطح مطلوب برای ادامه فراسوی داده‌ها، اولین ارتفاعی است که پس از آن میزان تغییرات عمق و اندیس ساختاری جزئی است. در اینجا ارتفاع مناسب برای ادامه فراسوی داده‌ها ۳۰ متر است.



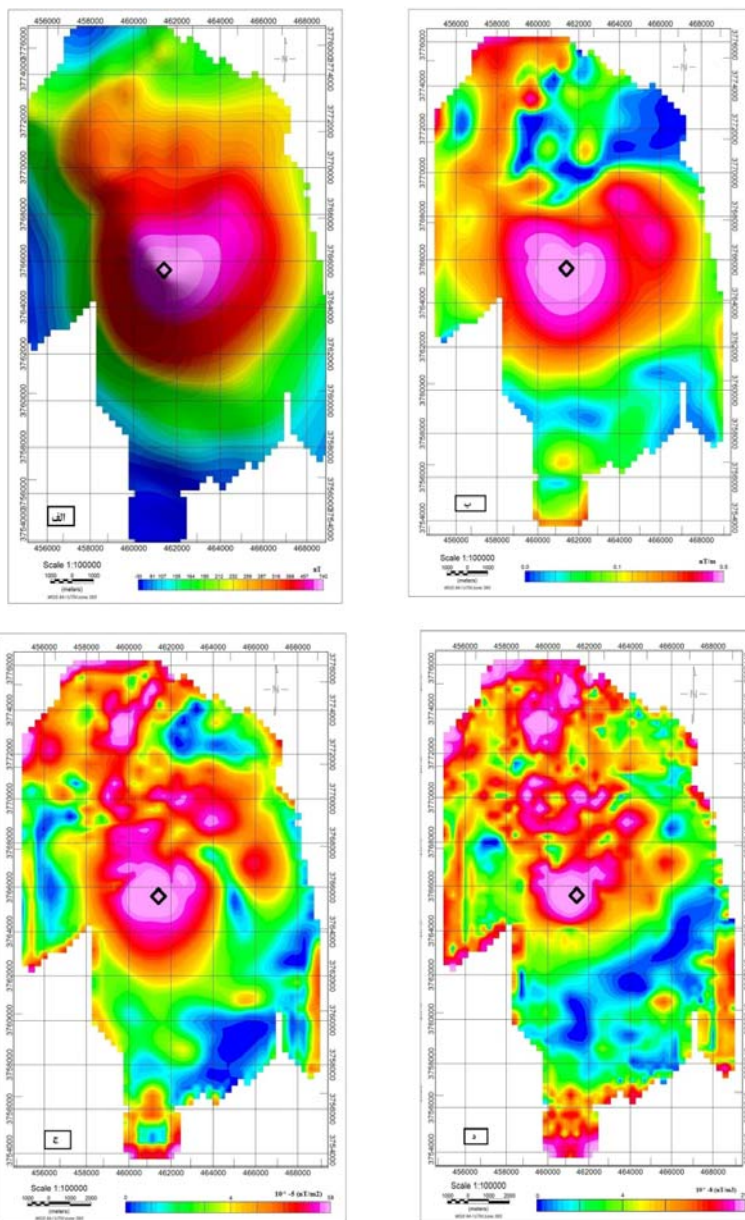
شکل ۵. نقشه شدت میدان مغناطیسی بازماند به همراه نقاط برآورد عمق به روش اوپلر.

### ۳-۲ روش AN-EUL

در روش وارون سازی معادله اوپلر ابتدا باید اندیس ساختاری از مشخصات زمین‌شناسی منطقه و سایر مشخصات دیگر حدس زده شود و هر قدر این حدس به واقعیت چشمه مغناطیسی نزدیک‌تر باشد به‌همان اندازه جواب‌های گرفته شده از معادله اوپلر دارای عدم قطعیت کمتری خواهند بود (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸). روش AN-EUL، شیوه قبلی تفسیر را کامل می‌کند و مختصات محل و هندسه چشمه مغناطیسی (اندیس ساختاری) را از بی‌هنجاری مشاهده شده مشخص می‌سازد. این روش را ابتدا سالم و راوات (۲۰۰۳) ابداع کردند. در این روش عمق و هندسه چشمه مغناطیسی با روش تلفیقی، هر دو هم‌زمان در محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی مشخص می‌شوند. مزیت مهم روش AN-EUL نسبت به روش وارون‌سازی معادله اوپلر در این است که دیگر نیازی به حدس هندسه چشمه مغناطیسی نیست. در این روش با جای‌گذاری مشتقات معادله اوپلر با عبارت سیگنال

می‌توان مختصات چشمه را به‌طور تقریبی برآورد کرد. محل چشمه با علامت لوزی در همه شکل‌های ۶ نشان داده شده است. پس از تعیین محل چشمه و اعمال روش روی داده‌های مغناطیس زمینی نتایج موردنظر در جدول ۳ به‌دست آمد.

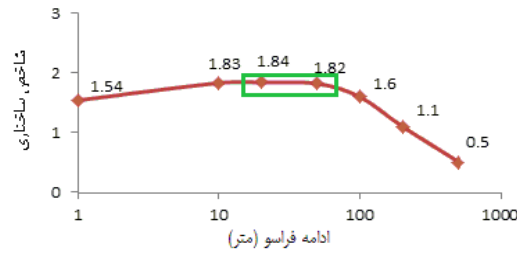
شکل ۶، نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده منطقه مورد بررسی و دامنه سیگنال تحلیلی را پس از ادامه فراسوی داده‌ها به ارتفاع ۳۰ متری از سطح برداشت، نشان می‌دهد. دامنه سیگنال تحلیلی دارای یک بیشینه قابل قبول است که با استفاده از موقعیت آن



شکل ۶. اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیس زمینی در منطقه محلات. (الف) نقشه شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده پس از فراسوی ۳۰ متر، (ب) دامنه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی، مقدار آن در مرکز پنجره برابر  $4/25 \times 10^{-1}$  نانوتسلا بر متر است، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول، مقدار آن در مرکز پنجره برابر  $4/8 \times 10^{-4}$  نانوتسلا بر متر مربع است و (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم، مقدار آن در مرکز پنجره برابر  $8 \times 10^{-7}$  نانوتسلا بر متر مکعب است.

محدوده قابل قبول برای اندیس ساختاری و عمق‌های به دست آمده است. در نتیجه براساس این نمودارها و نتایج جدول ۳، اندیس ساختاری چشمه مورد نظر  $0/1 \pm 1/8$  و عمق آن  $1220 \pm 50$  متر برآورد زده می‌شود.

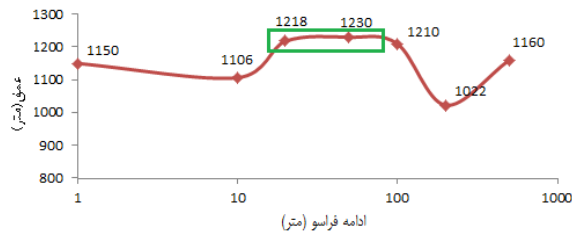
شکل‌های شماره ۷ و ۸، به ترتیب نمودار تغییرات عمق و اندیس ساختاری را با افزایش ارتفاع سطح ادامه فراسو برای چشمه مورد نظر نشان می‌دهند. با توجه به مطالب ذکر شده، کادر سبز رنگ در این شکل‌ها نشان‌دهنده



شکل ۷. برآورد شاخص ساختاری ( $\eta$ ) برای ادامه فراسوهای متفاوت به منظور تعیین ادامه فراسوی مناسب برای پنجره انتخابی روی بی‌هنجاری اصلی منطقه. قاب سبزرنگ محدوده قابل قبول را نشان می‌دهد. برای نمایش بهتر، محور افقی به صورت لگاریتمی رسم شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیس زمینی. مختصات محل چشمه عبارت است از  $X=461400$  و  $Y=376600$ .

ردیف	سطح فراسو (متر)	اندازه پنجره (متر مربع)	عمق محاسبه شده (متر)	اندیس ساختاری (N)
۱	صفر	۱۴۹۷	۱۱۵۰	۱/۵۴
۲	۱۰	۱۵۱۴	۱۱۰۶	۱/۸۳
۳	۲۰	۱۵۳۱	۱۲۱۸	۱/۸۴
۴	۵۰	۱۵۸۱	۱۲۳۰	۱/۸۲
۵	۱۰۰	۱۶۴۴	۱۲۱۰	۱/۶
۶	۲۰۰	۱۸۷۵	۱۰۲۲	۱/۱
۷	۵۰۰	۲۸۷۷	۱۱۶۰	۰/۵



شکل ۸. برآورد عمق ( $Z_0$ ) برای ادامه فراسوهای متفاوت به منظور تعیین ادامه فراسوی مناسب برای پنجره انتخابی روی بی‌هنجاری اصلی منطقه. قاب سبزرنگ محدوده قابل قبول را نشان می‌دهد. برای نمایش بهتر، محور افقی به صورت لگاریتمی رسم شده است.

## ۴ نتیجه گیری

با توجه به شکل های ۵، ۶ و ۷ نکات زیر قابل استنتاج است:

۱- یک بی‌هنجاری مغناطیسی به نسبت بزرگ و احتمالاً پیوسته در منطقه وجود دارد که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، به نظر می‌رسد این بی‌هنجاری ناشی از توده سنگ‌های با مغناطیس زیاد است.

۲- از آنجا که هیچ قطب مغناطیسی منفی مرتبط با این بی‌هنجاری به نسبت بزرگ در محدوده دیده نمی‌شود، به نظر می‌رسد که روند توده در اعماق ادامه دارد به طوری که به رخم قطبیدگی ناشی از میدان مغناطیسی زمین، قطب منفی توده به علت فاصله زیاد تا سطح زمین نتوانسته است خود را در سطح آشکار سازد.

۳- از آنجا که قطب مثبت بی‌هنجاری اصلی منطقه در همه جهت‌ها بسته شده است، به نظر می‌رسد که توده مورد نظر در جهت شرقی- غربی و شمالی- جنوبی نامحدود نیست و در هر جهت پس از چند کیلومتر بسته می‌شود.

۴- با توجه به شکل های ۶ و ۷ و جدول ۳، روش AN-EUL در مرکز بی‌هنجاری اصلی منطقه (محل پنجره در شکل ۶) عمق  $50 \pm 1220$  متر را برآورد می‌کند و با توجه به شکل ۵، روش اوایلر نیز دقیقاً در همین محل عمق ۱۰۰۰-۱۲۰۰ متر (دایره‌های سرخ‌رنگ) را نشان می‌دهد. انطباق به نسبت قابل قبول این دو روش در برآورد عمق بی‌هنجاری منطقه، صحت برآورد عمق توده مورد نظر را افزایش می‌دهد. با توجه به شکل ۵، روش اوایلر نشان‌دهنده افزایش تدریجی عمق توده به سمت شرق- شمال شرق است به طوری که در محل دایره‌های آبی‌رنگ احتمالاً عمق توده به حدود ۱۵۰۰ متر می‌رسد.

۵- شاخص‌های ساختاری به دست آمده با دو روش نیز انطباق قابل قبولی دارند. روش اوایلر و AN-EUL به ترتیب عدد  $0.1 \pm 1/8$  و  $0.1 \pm 1/8$  را برآورد می‌کند. با توجه به

جدول ۲ این عددهای محاسبه شده، نزدیک به عدد شاخص ساختاری استوانه قائم هستند. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی، این شکل هندسی برای ساختار منطقه، تا حد زیادی قابل قبول به نظر می‌رسد. احتمالاً یک توده نفوذی در سنگ‌های منطقه نفوذ کرده و به صورت ساختاری به نسبت شبیه به استوانه قائم، منجمد شده است. با توجه به برآورد عمق اوایلر، به نظر می‌رسد که عمق سطح قاعده بالایی این توده شبه‌استوانه‌ای، متفاوت است و احتمالاً از عمق نزدیک به ۱۰۰۰ متر (دایره‌های سیاه‌رنگ روی بی‌هنجاری اصلی شکل ۵) شروع و با حرکت به سمت شرق- شمال شرق به طور منظم عمق بی‌هنجاری بیشتر می‌شود و تا عمق حدود ۱۵۰۰ متر (دایره‌های آبی‌رنگ) می‌رسد.

۶- نکته حائز اهمیت دیگر این است که روش اوایلر علاوه بر برآورد عمق بی‌هنجاری، به بررسی روند تغییر عمق در نقاط گوناگون بی‌هنجاری هم می‌پردازد ولی روش AN-EUL فقط در نقاط خاصی برآورد عمق را عملی می‌سازد. منطقه مورد بررسی به علت قرار گرفتن در کمان آتشفشانی ارومیه- دختر از یک سو و شرایط زمین‌ساختی از سوی دیگر، یکی از مناطق مستعد برای بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی است. با توجه به بررسی‌های مغناطیس‌سنجی و زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که واحد آهکی کرتاسه و آهک قم سنگ‌مخزن چشمه‌ها را تشکیل داده باشند و احتمالاً چندین میلیون سال قبل توده ماگما در داخل سنگ‌آهک کرتاسه نفوذ کرده و در حال حاضر مراحل نهایی سرد شدن خود را طی می‌کند و از دمای کوری مغناطیسی‌اش تا حد زیادی پایین‌تر آمده، باعث ایجاد یک بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی بزرگ در این منطقه شده است. نبود قطب منفی مغناطیسی بارز در منطقه احتمالاً حاکی از گسترش این توده در عمق است. با توجه به تشکیل تراورتن در این چشمه‌ها به نظر می‌رسد که

بی‌هنجاری‌های مغناطیس زمینی با استفاده از روش واهمامیخت اوایلر استاندارد در منطقه رشم استان سمنان، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۷(۲)، ۳۳-۴۳.

رضایی، م.، قربانی، ص. و بومری، م.، ۱۳۸۸، هیدرژنولوژی و ژئوترموتری چشمه‌های آبگرم محلات، نخستین کنفرانس سراسری آبهای زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهیان.

نقشه زمین شناسی قم و گلپایگان مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Barbosa, V. C. F., Silva, J. B. C. and Medeiros, W. E., 1999, Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution, *Geophysics*, **64**, 48-60.
- Bastani, M. and Pedersen, L. B., 2001, Automatic interpretation of magnetic dike parameters using the analytical signal technique, *Geophysics*, **66**, 551-561.
- Bin Doo, W., Hsu, S. K. and Yeg, Y., 2007, A derivative-based interpretation approach to estimating source parameters of simple 2D magnetic sources from Euler deconvolution, the analytic-signal method and analytical expressions of the anomalies, *Geophysical Prospecting*, **55**, 255-264.
- Cooper, G. R. J., 2008, Euler deconvolution with improved accuracy and multiple different structural index, *Journal of China University of Geosciences*, **19**, 72-76.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Euler equation, *Geophysical Prospecting*, **50**, 15-25.
- Hsu, S. K., Sibuet, J. C. and Shyu, C. T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies: An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Keating, P. and Pilkington, M., 2004, Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation, *Geophysical Prospecting*, **52**, 165-182.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, **37**, 507-517.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two dimensional

سنگ مخزن آنها دارای حفره‌های انحلالی زیرزمینی باشد و بنابراین پدیده کارست-گرمابی در عمق تشکیل شده باشد. چشمه‌های آبگرم کارستی در مناطق زمین گرمایی به علت تشکیل سامانه‌های کارستی گرمابی به وجود می‌آیند. همچنین، حجم و ضخامت زیاد تراورتن‌ها در منطقه احتمالاً حاکی از قدمت زیاد سامانه زمین گرمایی منطقه است (بیت‌اللهی، ۱۳۷۴). به عبارت دیگر، منبع زمین گرمایی در این سامانه، یک توده آذرین نفوذی بزرگ است که احتمالاً آخرین مراحل سرد شدن خود را طی می‌کند و آب چشمه‌های آبگرم محلات به آخرین مراحل سرد شدن ماگمای مذاب در منطقه مربوط است.

#### تشکر و قدردانی

از همکاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و دانشگاه اراک برای در دسترس قرار دادن امکانات لازم برای اجرای طرح و همچنین از آقای دکتر لقمان نمکی به خاطر راهنمایی‌هایشان در مراحل طراحی نیم‌رخ و برداشت داده، سپاسگزاریم.

#### مراجع

- اویسی، م.، قاسمی، و. و شاه‌نظری، ح.، ۱۳۸۶، تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی با استفاده از روش بهبود یافته تلفیقی سیگنال تحلیلی و اوایلر در منطقه خرم آباد، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۶۱-۷۱.
- بنی‌عامریان، ج.، ۱۳۸۸، روش ترکیبی سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اوایلر (AN-EUL) در تفسیر داده‌های مغناطیسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- بیت‌اللهی، م.، ۱۳۷۴، تشکیل تراورتن و منشأ پرتوزایی طبیعی بالا در منطقه آبگرم محلات، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی تهران.
- جزایری، س. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۰، برآورد عمق

- deconvolution, *Geophysics*, **55**, 80-91.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003, A analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of data, *Geophysics*, **68**, 1952-1961.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J. and Ushijima, K., 2002, Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations, *J. Appl. Geophysics.*, **49**, 231-244.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics* **47**, 31-37.
- magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, **39**, 85-92.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three dimensional automatic interpretation of potential-field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations: *Geophysics*, **49**, 780-786.
- Ravat, D., 1996, Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations, *J. Environ.Eng. Geophysics*, **1**, 229-238.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J. and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler