فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۵، شماره ۵۹، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۱-۱۲

برآورد عمق و موقعیت چشمه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی با استفاده از روش واهمامیخت اویلر در منطقه دریاچه بلاچفورد، کانادا

داود نظری[۱]، اسداله جوع‌عطا بیرمی[۲] و محمدرضا سپهوند[۳و*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی-واحدامیدیه، امیدیه، ایران

۳. استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲

چکیده

داده‌های مغناطیسی حاصل از برداشت‌های هوابرد، پس از طی مراحل پردازش نیاز به تفسیر دارند. مهم‌ترین اطلاعاتی که از مرحله تفسیر به‌دست می‌آیند، عمق و موقعیت افقی بی‌هنجاری‌ها در زمین است. روش‌های گوناگونی برای به‌دست آوردن این اطلاعات ابداع و توسعه یافته‌اند. یکی از این روش‌ها، روش واهمامیخت اویلر است که بر مبنای معادله همگن اویلر ایجاد شده است. روش اویلر یکی از روش‌های نیمه‌خودکار سریع برای تعیین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و گرانی مدفون است که نتایج حاصل از آن به‌شدت به شاخص ساختاری، اندازهٔ پنجرهٔ اویلر و خطای محاسبه عمق وابسته است. این روش به‌خوبی، عمق و روند تغییرات عمق بی‌هنجاری‌ها را مشخص می‌کند. اطلاعات زمین‌شناسی منطقهٔ مورد مطالعه در کاربرد این روش پراهمیت است. در این روش از میدان پتانسیل و مشتقات مرتبه اول آن در جهت‌های مختلف برای تعیین موقعیت و عمق چشمهٔ میدان پتانسیل استفاده می‌شود. در این مقاله، با استفاده از این روش، عمق و مرزهای بی‌هنجاری‌ها در منطقه دریاچه بلاچفورد واقع در کشور کانادا مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ‌های به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این است که اغلب بی‌هنجاری‌ها در این منطقه دارای عمق کم تا متوسط هستند.

واژه‌های کلیدی: مغناطیس هوابرد، تفسیر عمقی، بی‌هنجاری، واهمامیخت اویلر، بلاچفورد.

مقدمه

بهره‌برداری از داده‌های به‌دست‌آمده از برداشت‌های ژئوفیزیکی هوابرد نیازمند پردازش است. این مراحل به‌منظور بهبود کیفیت داده‌ها و حذف داده‌های ناخواسته از آن‌ها صورت می‌گیرد. داده‌های مغناطیسی بیشتر شامل اندازه‌گیری شدت کل میدان مغناطیسی زمین هستند. در برخی پروژه‌ها گرادیان قائم میدان نیز اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری گرادیان قائم، میدان مغناطیسی بین دو نقطه از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. پس از اعمال پردازش بر روی داده‌ها می‌توان از آن‌ها برای تفسیرهای مقدماتی و پیشرفته استفاده کرد. هدف از تفسیر داده‌ها، به دست آوردن اطلاعات مربوط به بی‌هنجاری‌های درون

* نویسنده مرتبط: mrsepahvand@yahoo.com

زمین از نقشه‌های مغناطیسی است. نقشه‌های مغناطیسی برخلاف نقشه‌های گرانی به‌صورت دوقطبی هستند و همین موضوع تفسیر آن‌ها را پیچیده‌تر می‌کند. مهم‌ترین اطلاعات مربوط به بی‌هنجاری‌ها عبارت هستند از عمق و موقعیت افقی آن‌ها. گرچه برخی از روش‌های تفسیر سعی در به دست آوردن یک مدل هندسی از بی‌هنجاری‌ها را دارند، اما هدف اصلی همچنان رسیدن به مختصات بی‌هنجاری‌ها است. آغاز راه با Pters (1949) بود که روشی رسم شده را برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌ها ارائه کرد که به روش "نیم شیب پیترز" معروف است و از روی منحنی‌های مغناطیسی به دست می‌آید. روش واهمامیخت اویلر برای اولین بار توسط Thompson (1982) برای برآورد عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی استفاده شد. Thompson با استفاده از معادلات همگن اویلر و گرادیان‌های میدان مغناطیسی به‌جای شدت میدان در هر نقطه و همچنین تخصیص یک شاخص ساختاری برای زمین‌شناسی منطقه، روشی را برای برآورد عمق از روی داده‌های هوابرد معرفی کرد که به روش واهمامیخت اویلر شناخته می‌شود. Reid و همکاران (۱۹۹۰) روش واهمامیخت اویلر سه بعدی را معرفی کردند و از آن برای تفسیر داده‌های مغناطیسی منطقه‌ای واقع در جنوب و مرکز انگلستان استفاده کردند و توانستند گسل‌های موجود در این مناطق را شناسایی کنند. Bournas و همکاران (۲۰۰۳) یک معیار جدید بر اساس همبستگی بین بی‌هنجاری میدان کل و برآوردهایی از یک سطح مبنا برای تعیین شاخص ساختاری در روش واهمامیخت اویلر معرفی کردند. تحلیل آن‌ها این موضوع را نشان داد که عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری چشمه را نمی‌توان به‌طور همزمان برآورد کرد. Mushayandebvu و همکاران (۲۰۰۱) با ترکیب رابطه همگن اویلر و یک رابطه حاصل از تغییر شکل توابع همگن تحت دوران، روش واهمامیخت اویلر توسعه‌یافته برای ساختارهای دوبعدی را معرفی کردند. این روش برآورد کامل‌تری از پارامترهای چشمه می‌دهد و این امکان را فراهم می‌کند که تفاوت پذیرفتاری مغناطیسی و همچنین شیب را در مورد چشمه‌های همبری یا دایک‌های نازک تعیین کرد. FitzGerald و همکاران (۲۰۰۴) شیوه‌های تشخیص جدیدی را برای این روش پیشنهاد کردند که دقت برآوردهای عمق را برای داده‌های مغناطیسی شبکه‌ای بالا می‌برد. آن‌ها این شیوه‌ها را برای تشخیص اهداف مغناطیسی ناشی از کیمبرلیت‌های معلوم و دسته‌بندی گسل‌های اصلی با موفقیت به کار بردند. Stavrev and Reid (2007) با استفاده از تعریف اصلی همگنی به کار برده شده برای میدان‌های پتانسیل نشان دادند که شاخص ساختاری می‌تواند مقادیر مثبت، منفی و یا صفر (ولی یک مقدار واحد) داشته باشد. آن‌ها با استفاده از تحلیل همگنی عناصر میدان پتانسیل یک نسخه توسعه‌یافته از معادلات دیفرانسیلی اویلر برای میدان‌های پتانسیل ارائه کردند. Stavrev and Reid (2010) همچنین نشان دادند که استفاده از روش واهمامیخت اویلر توسعه‌یافته در اکتشافات گرانی‌سنجی، می‌تواند برای شناسایی ساختارهای گسلی با گسترش عمق زیاد مفید باشد. Beiki (2013) نشان داد که می‌توان با کاربرد تحلیل تجزیه مقدار منفرد قطع شده (TSVD)[1] و حل معادله اویلر برای مکان چشمه و شاخص ساختاری به‌طور هم‌زمان، پیاده‌سازی اویلر استاندارد مبتنی بر شبکه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. در این مقاله روش اویلر استاندارد بر روی داده‌های حاصل از یک مدل مصنوعی و داده‌های واقعی منطقه دریاچه بلاچفورد اعمال شده و نتایج آن نمایش داده می‌شود. مدل ساختگی در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شده و الگوریتم اویلر در نرم‌افزار Oasis montaj بر روی داده‌ها اعمال شد.

روش مطالعه

روش واهمامیخت اویلر یک تابع در دستگاه مختصات دکارتی (x,y,z) در نظر بگیرید که با f(x,y,z) مشخص شده است. z به سمت پایین مثبت در نظر گرفته می‌شود و محور x به سمت شمال و y به سمت شرق است. تابع f همگن از درجه n است اگر:

معادله ۱) $$f(tx,ty,tz) = t^n f(x,y,z)$$

اگر تابع f همگن از درجه n باشد، آنگاه معادله زیر برآورده می‌شود:

1. Truncated singular value decomposition

معادله ۲) $$x\frac{\partial f}{\partial x}+y\frac{\partial f}{\partial y}+z\frac{\partial f}{\partial z}=nf$$

معادله (۲) به‌عنوان معادله همگن اویلر نامیده می‌شود (Thompson، 1982).

فرض کنید که f(x،y،z) شـــکل عمومی زیر را داشـــته باشد:

معادله ۳) $$f(x,y,z)={}^{G}/_{r^{N}}$$

که r و N در رابطه بالا به‌صورت زیر هستند:

$$r=(x^{۲}+y^{۲}+z^{۲})^{\frac{۱}{۲}}\ ،\ N=۱,۲,۳,\ldots\ldots$$

G به x،y،z وابســـته نیست. معادله ۳ همگن از درجه n=-N است. بسیاری از چشـــمه‌های مغناطیسی نقطه‌ای ساده، شکل معادله ۳ را دارند (Thompson، 1982).

فرض اولیه در روش اویلر این است که چشمهٔ مغناطیسی دارای شـــکل هندسی ساده مانند کره، اســـتوانه، دایک و مانند آن باشـــد. زیرا میدان مغناطیســـی ایجادشده با این گونه ساختارها، همگن است و با تغییر فاصله تغییر نمی‌کند (Reid and Thurston، 2014). بنابراین برای چشمه‌هایی با ساختار پیچیده ممکن است این روش کارایی نداشته باشد زیرا این چشمه‌ها در واقع کامل نیستند و شاخص ساختاری ثابتی ندارند.

حال یک چشـــمه نقطه‌ای را در نظر بگیرید که در نقطه (x_0, y_0, z_0) نسبت به صفحه اندازه‌گیری واقع شده است. در این صورت شدت مغناطیســـی کل به‌صورت زیر خواهد بود:

معادله ۴) $$\Delta T(x)=f[(x-x_{.}),(y-y_{.}),(z-z_{.})]$$

معادله اویلر برای رابطه ۴ به‌صورت زیر است:

$$(x-x_{.})\frac{\partial \Delta T}{\partial x}+(y-y_{.})\frac{\partial \Delta T}{\partial y}+(z-z_{.})\frac{\partial \Delta T}{\partial z}$$

معادله ۵) $$=-N\Delta T(x)$$

گرادیان‌ها در ســـه جهت مختصـــات دکارتی را می‌توان با استفاده از نظریه پتانســـیل محاسبه کرد یا اینکه به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرد (Thompson، 1982).

با تعیین مشـــتقات و مقادیر میدان کل در ســـه جهت مختصات در طول پروفیل و اســـتفاده از معادله ۵ می‌توان به جواب رســـید. نتیجه سه معادله خطی برای سه مجهول خواهد شد که اگر ضریب دترمینان صفر باشد حل می‌شود.

حال فرض می‌شود که بی‌هنجاری توسط یک مقدار ثابت B آشفته می‌شود. در این صورت کمیت مشاهده شده برابر است با:

معادله ۶) $$T(x)=\Delta T(x)+B$$

با جایگذاری معادله ۶ در معادله ۵ و بازنویســـی مجدد خواهیم داشت:

معادله ۷) $$x_{.}\frac{\partial T}{\partial x}+z_{.}\frac{\partial T}{\partial z}+N.B=x\frac{\partial T}{\partial x}+N.T$$

ازآنجایی‌کـــه بی‌هنجاری‌های واقعی با مدل‌های ســـاده تقریب زده می‌شوند، با ســـاختن یک مجموعه از معادلات خطی، یک دسته از معادلات فراتعیین شده حاصل می‌شود. حل مجموعه معادلات فراتعیین‌شده با روش حداقل مربعات برآوردهایی از انحراف معیار پارامتر z_0 را می‌دهد. کمیت σ_z به‌عنوان میله خطا[1] در برآورد عمق قرار می‌گیرد و اســـاس الگوریتمی را شکل می‌دهد که درستی یا نادرستی یک برآورد عمق را تعیین می‌کند.

تلورانس در حالت کلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

معادله ۸) $$TZ=(N.\sigma/z_{.}).۱۰۰$$

کـــه TZ تلورانس عمق Z و σ انحـــراف معیار z_0 برای شاخص ساختاری N است.

معادله ۷ برای اجســـام مغناطیسی با گسترش عرضی نامحدود اســـت (حالت دوبعدی). برای اجسام سه‌بعدی، شکل کلی معادله اویلر به‌صورت زیر می‌باشد:

$$(x-x_{.})\frac{\partial T}{\partial x}+(y-y_{.})\frac{\partial T}{\partial y}+(z-z_{.})\frac{\partial T}{\partial z}$$

معادله ۹) $$=N(B-T)$$

که T میدان کل مشاهده شده در (x،y،z)، B مقدار میدان محلی و N شـــاخص ساختاری اســـت. معادله ۹ را می‌توان بر روی داده‌های مغناطیســـی شـــبکه‌ای برای بـــرآورد عمق و موقعیت چشـــمه‌های محـــدود، لوله‌های قائم، دایک‌ها و همبری‌ها به‌طور مســـتقیم به کاربرد و به نتایج قابل‌توجهی دست یافت. به‌منظور انجام صحیح این روش، می‌بایست پارامترهای آن را به‌درستی انتخاب کرد.

1. Error bar

شاخص ساختاری و مشتقات میدان و تلورانس پاسخ‌ها، پارامترهایی هستند که مستقیم در معادله مؤثرند (جدول ۱). اندازه پنجره نیز در رسیدن به پاسخ‌های درست تأثیرگذار است (Reid et al., 1990).

جدول ۱. شاخص‌های ساختاری برای ساختارهای زمین‌شناسی

ساختار	N
کره	۳
پایپ	۲
استوانه افقی	۲
دایک	۱
سیل	۱
همبری	۰

شاخص ساختاری (SI)

استفاده از شاخص نادرست به جواب‌های پراکنده و عمق‌های نادرست منجر می‌شود. شاخص خیلی کوچک، عمق‌های خیلی کم می‌دهد و شاخص خیلی بزرگ به برآوردهای خیلی عمیق منجر می‌شود. برآوردهای عمق برای چشمه‌های با شاخص بزرگ نسبت به شاخص‌های کوچک دقیق‌تر هستند. رهیافت شاخص ساختاری برای توصیف چشمه شامل مرزهای نامنظم نمی‌شود. هر جواب فقط داده‌های درون پنجره خودش را به کار می‌برد، به‌گونه‌ای که شبه سیل[1] نامنظم توسط روش اویلر با شاخص یک به‌خوبی تعیین می‌شوند، درحالی‌که همبری‌ها با شاخص صفر به‌خوبی مشخص می‌شوند. یک مجموعه داده واقعی شامل بی‌هنجاری‌هایی از چشمه‌هایی با شاخص‌های ساختاری مختلف است. بنابراین نیاز است که این داده‌ها با گستره‌ای از شاخص‌ها (به‌طور مثال ۰، ۰/۵، ۱) حل شوند و برای هر شاخص جداگانه نقشه‌ای رسم شوند. در نتیجه نقشه از یک ویژگی به ویژگی دیگر آزموده می‌شود و شاخصی که بهترین خوشه‌بندی جواب را داشته باشد برای هر ساختار انتخاب می‌شود. همچنین این فرایند نشانه‌هایی از ماهیت ویژگی را نیز نشان می‌دهد (Reid et al., 1990).

اندازه پنجره

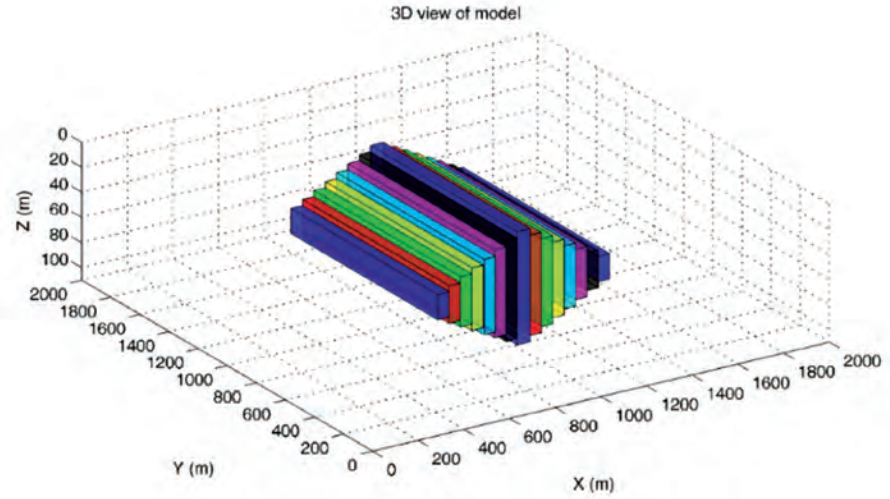
اگر شبکه نمایانگر بی‌هنجاری‌ها را داشته باشیم، اما بی‌هنجاری‌های ناشی از چشمه‌های مختلف خیلی به هم نزدیک باشند، طوری که همه پنجره داده شده را اشغال کنند، در این صورت برازش آماری ضعیف، به رد شدن جواب منجر می‌شود. بنابراین می‌بایست پنجره‌ها تا جای ممکن کوچک انتخاب شوند. از طرف دیگر، بی‌هنجاری‌های پهن ناشی از چشمه‌های عمیق در پنجره‌های کوچک به‌طور ضعیف نشان داده می‌شوند و برآوردهای غیرقابل‌اعتماد عمق و موقعیت چشمه بسیار محتمل است. مدل‌های ساده می‌توانند با پنجره‌هایی به کوچکی اندازه نقاط شبکه ۳×۳ واهمامیخت شوند. اما داده‌های واقعی با پنجره‌های بزرگ‌تر بهتر واهمامیخت می‌شوند. پنجره‌هایی با گستره اندازه نقاط شبکه ۶×۶ (برای مشخص کردن چشمه‌های کم عمق) تا حدود ۲۰×۲۰ (برای چشمه‌های خیلی عمیق) کمینه عمق‌ها کم‌وبیش مثل فاصله شبکه است و بیشینه عمق‌ها نیز تقریباً دو برابر اندازه پنجره هستند (Reid et al., 1990).

مدل ساختگی

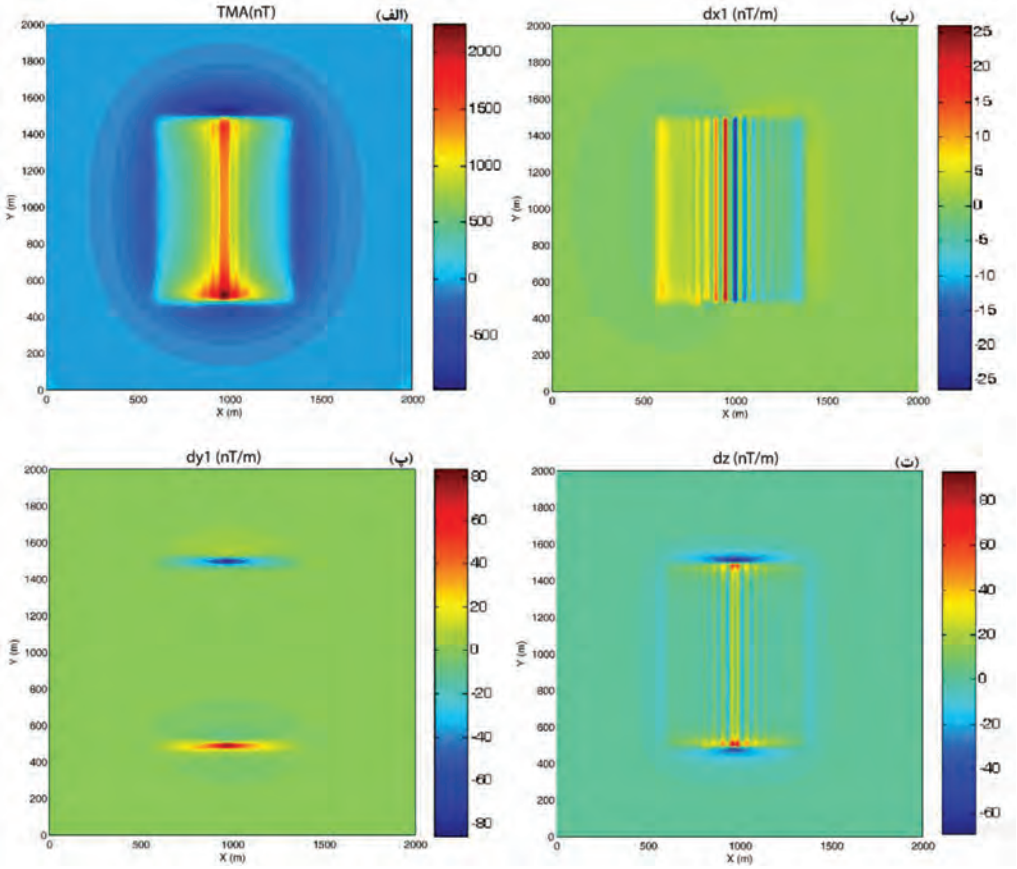
به‌منظور درک عملکرد روش واهمامیخت اویلر و آزمودن میزان توانایی آن در برآورد عمق و مرزهای بی‌هنجاری‌ها، این روش را بر بی‌هنجاری حاصل از یک مدل سه‌بعدی که در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شده است، اعمال شد. این مدل شامل ۱۵ منشور چهار وجهی است که با آرایش نشان داده شده در شکل ۱ در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. عمق بالای منشورها از منشور شماره ۱ در سمت چپ تا منشور شماره ۸ در وسط افزایش و از منشور ۹ تا ۱۵ کاهش می‌یابد. فواصل تغییر عمق سطوح بالایی و پایینی هر منشور پنج متر است. کمینه عمق بالای منشورها پنج متر و بیشینه عمق آن‌ها ۴۵ متر است. کمینه عمق پایین ۶۵ متر و بیشینه آن ۱۰۰ متر است. به این ترتیب ضخامت منشورها از وسط به سمت کناره‌ها به ازای هر منشور ۱۰ متر کاهش می‌یابد. طول هر منشور منفرد ۵۰ متر، طول کل ۷۵۰ متر و عرض کل نیز ۱۰۰۰ متر است. پذیرفتاری تمام منشورها ۰/۱۵ در واحد SI انتخاب

1. Psudo-sill

شده است. زاویه میل مغناطیسی و زاویه انحراف مغناطیسی بـــه ترتیـــب ۸۱/۳ و ۱۷/۶ درجه بوده و شـــدت کل میدان مغناطیسی نیز ۵۸۵۰۰ در نظر گرفته شده است. در محاسبه میدان مغناطیسی از مغناطیس بازماند صرف‌نظر شده است. میدان مغناطیسی این مدل در یک شبکه ۲۰۰۰×۲۰۰۰ متر با فواصل ۱۰ متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۲).

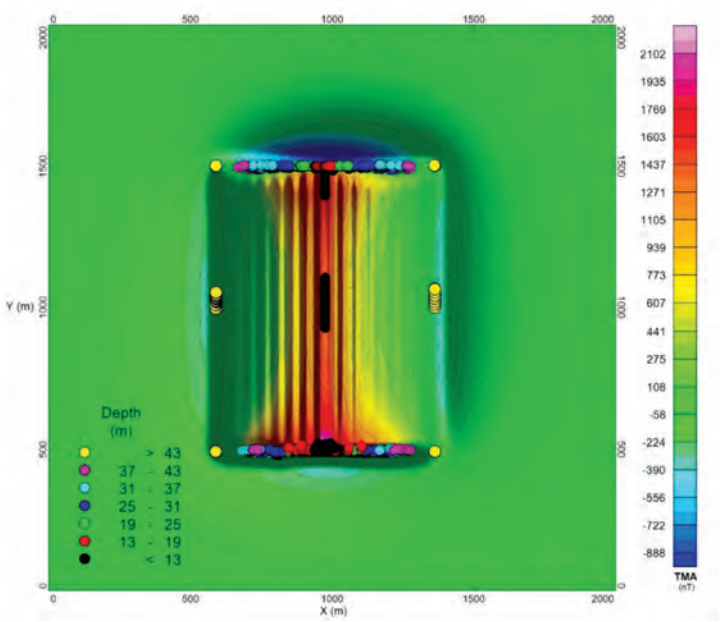


شکل ۱. نمایش سه‌بعدی مدل ساختگی



شکل ۲. بی‌هنجاری مغناطیسی کل و مشتق‌های جهتی آن برای مدل سه بعدی، الف) بی‌هنجاری مغناطیسی کل، ب) مشتق (الف) در جهت X، پ) مشتق (الف) در جهت Y، ت) مشتق (الف) در جهت Z

بی‌هنجاری مغناطیسی کل برای این مدل با فاصله پنج متر شبکه‌بندی شده است. روش اویلر با شاخص ساختاری ۰/۳۵، اندازه پنجره ۱۸، حداکثر فاصله از مرکز پنجره ۵۰ متر و تلورانس ۱۰ درصد بر این مدل اعمال شده است. در این مدل، عمق سطح بالایی جسم از وسط به سمت کناره‌ها بیشتر می‌شود. ازاین‌رو، اعمال روش اویلر بر روی این مدل تا حدودی با مشکل مواجه است. چراکه انتخاب یک شاخص ساختاری تنها بخشی از داده‌های عمقی را ارائه می‌کند و بخشی دیگر پنهان می‌ماند. اگر شاخص کوچک انتخاب شود پاسخ‌های سطحی‌تری به دست می‌آیند و در نتیجه مرزهای بی‌هنجاری مشخص نمی‌شود. از طرفی دیگر شاخص ساختاری بزرگ‌تر موجب از دست رفتن اطلاعات مربوط به سطوح کم‌عمق‌تر می‌شود. اندازه پنجره بزرگ طوری در نظر گرفته شده است که برای یک منشور پاسخی را ارائه نکند و تنها مرزهای کلی حاصل شود. همان‌طور که در شکل ۳ واضح است پاسخ‌های عمقی از وسط به سمت کناره‌های توده عمیق‌تر می‌شود. دلیل اینکه در دو سمت بالا و پایین توده تعداد جواب‌ها بیشتر است، وجود گرادیان‌های شدیدتر در این دو بخش است. درحالی‌که در دو سمت چپ و راست جسم به دلیل گرادیان‌های ضعیف‌تر پاسخ‌های کمتری نیز به‌دست‌آمده است.



شکل ۳. نتایج حاصل از اعمال روش واهمامیخت اویلر بر مدل سه بعدی. هر دایره نشان‌دهنده یک پاسخ عمقی به‌دست‌آمده است

منطقه مورد مطالعه

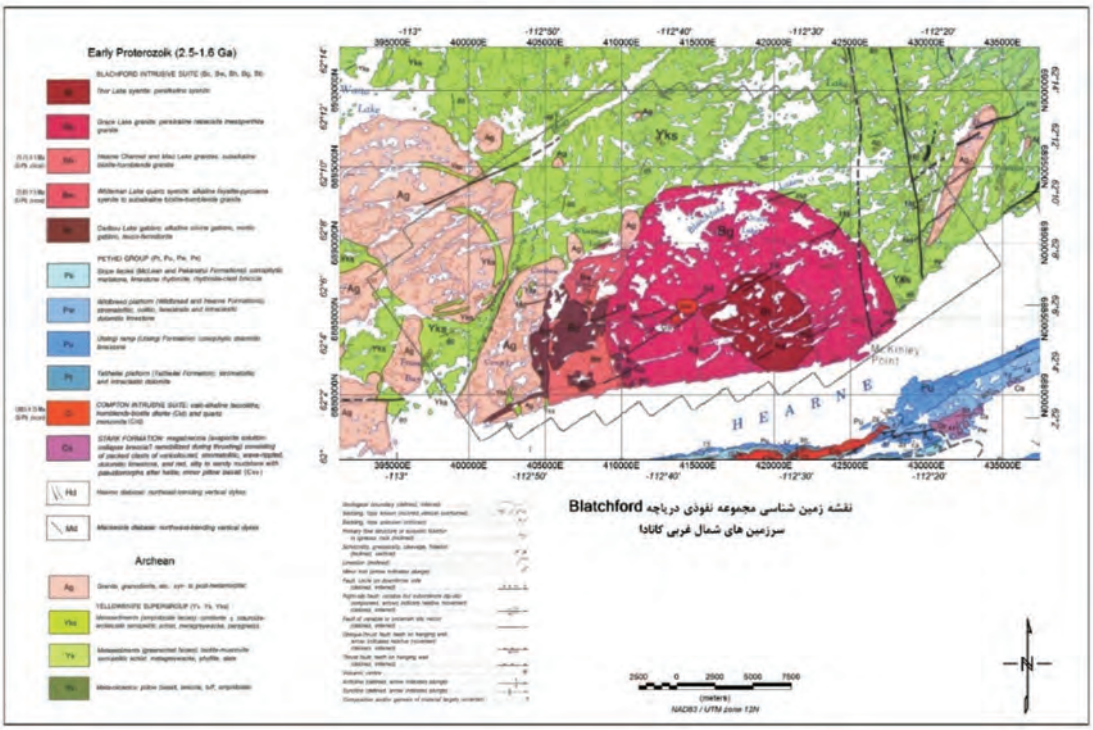
منطقه دریاچه بلاچفورد در عرض جغرافیایی '۶۲°۷ شمالی و طول جغرافیایی '۱۱۲°۳۷ غربی، در طول ساحل شمالی Hearne channel از بازوی شرقی Great Slave Lake، در Northwest Territories کانادا واقع شده است. این مجموعه در طول حاشیه جنوب غربی استان Archean Slave، کم‌وبیش ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر Yellowknife قرار گرفته است (Mumford، 2013). دسترسی به منطقه توسط هواپیمای شناور و بالگرد از یلونایف فراهم شده است.

زمین‌شناسی منطقه

مجموعه نفوذی دریاچه بلاچفورد نامی است که به تمام واحدهای سنگی به هم پیوسته‌ای اطلاق می‌شود که مجموعه پلوتونیک آلکالن واقع در شمال کانال هرن و شرق رودخانه Francois در منطقه Mackenzie را تشکیل می‌دهند (شکل ۴). سنگ‌های آلکالن به شیست‌های فوق رسوبی ابرگروه یلونایف و گرانودیوریت‌های کالک آلکالن و توده‌های نفوذی گرانیتی نفوذ کرده‌اند که سنگ‌های آن‌ها از نظر پتروژنتیکی با سنگ‌های آذرین درونی آرکئن در بخش‌های مجاور استان ساختاری اسلیو جنوبی که به‌طور پرتوسنجی

تاریخ‌گذاری شـــده‌اند، یکسان هســـتند. مجموعه آلکالن به‌نوبه خود به‌وســـیله دایک‌های دیاباز با روند شرقی-شمال شرقی، توده‌های نفوذی کوچک از دیوریت و گرانودیوریت، و دایک‌های دیاباز با روند شمال غربی از دسته Mackenzie، که بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ میلیون سال پیش تعیین سن شده‌اند، مورد نفوذ واقع شده است (Davidson، 1978).

فازهـــای نفوذی متعـــدد در مجموعه نفـــوذی دریاچه بلاچفورد یک جانشـــینی را از پلوتونیســـم اولترامافیک تا فلسیک نشـــان می‌دهند. Davidson (1978) کرونولوژی[1] زیر را برای مجموعه نفوذی دریاچه بلاچفورد بر اساس روابط متقابل و ژئوشـــیمی پیشنهاد کرده اســـت: (۱) سنگ‌های مافیک گابروی دریاچه کاریبو[2]، درجه‌بندی تا لوکوفرودیوریت؛ (۲) کوارتز ســـینیت دریاچه وایتمـــن[3]؛ (۳) گرانیت کانال هرن؛ (۴) گرانیت دریاچه مد[4]؛ (۵) گرانیت دریاچه گریس[5]؛ (۶) سینیت دریاچه تور[6].



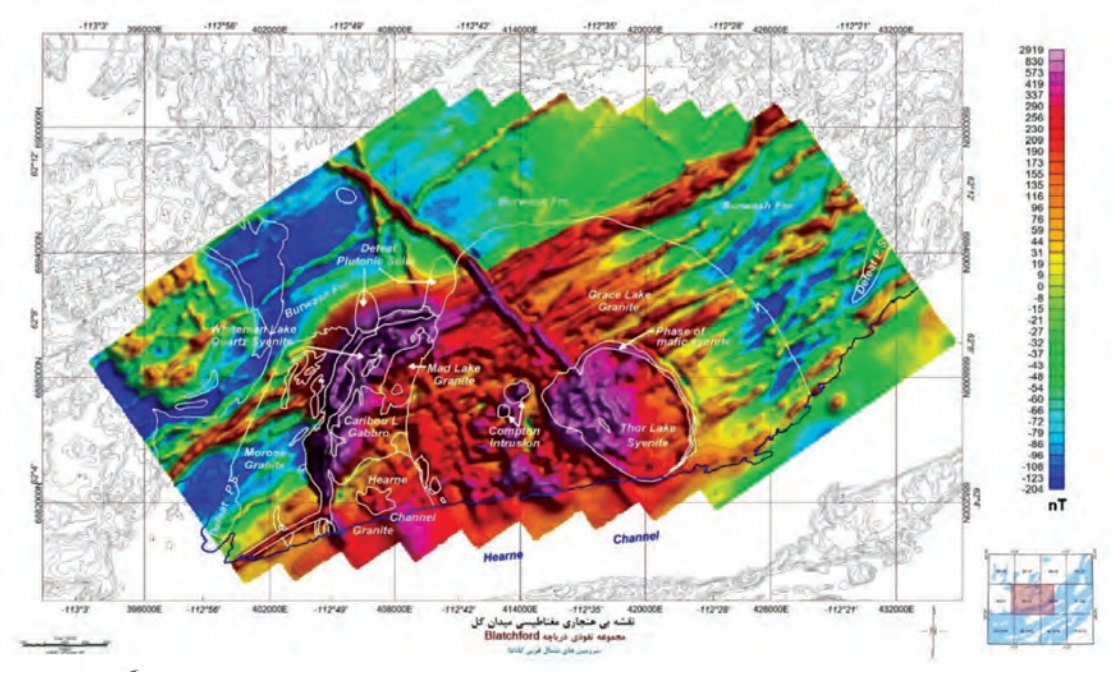
شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی دریاچه بلاچفورد

داده‌های مغناطیسی

داده‌های مغناطیســـی منطقه دریاچه بلاچفورد واقع در ســـرزمین‌های شمال غربی کانادا، در ماه مارس ۲۰۱۱ و طی پنج روز (۲۳-۱۹) در پروژه برداشت گرانی-مغناطیسی منطقه بلاچفورد و توســـط اداره کاوش‌های زمین‌شناسی کانادا زیر نظر وزارت منابع طبیعی کانادا جمع آوری شـــده‌اند. در این پروژه از پلتفرم هواپیمای Fixed-Wing استفاده شده است. مگنتومتر به‌کاربرده شده از نوع بخار سزیم تک‌سلولی مدل CS-3 با حساســـیت ۰/۰۰۵ nT ســـاخت شرکت Scintrex بوده اســـت. ارتفاع پرواز ۱۰۰ متر و خطوط اصلی با آزیموت ۱۴۵° و فاصله ۲۵۰ متر برداشـــت شـــده‌اند. مجموع طول خطوط برداشـــت اصلی ۲۶۹۴ کیلومتر است. روی‌هم‌رفته ۵۶۰ کیلومتر خطوط کنترلی با آزیموت ۵۵° و فاصله ۱۲۵۰ متر نیز برداشـــت شده است. زاویه میل مغناطیسی و زاویه

1. Chronology
2. Caribou lake
3. Whiteman lake
4. Mad lake
5. Grace lake
6. Thor lake

انحراف مغناطیسی گستره در زمان برداشت داده‌ها به ترتیب در حدود °۸۱ و °۱۷ قرار داشته و همچنین شدت کل میدان مغناطیسی زمین در حدود nT ۵۹۰۰۰ بوده است.



شـــکل ۵. نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی کل منطقه دریاچه بلاچفورد. تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌شناسی با خطوط سفیدرنگ مشخص شده است

اعمال روش واهمامیخت اویلر

پس از آماده‌سازی مشتق‌های میدان مغناطیسی، روش واهمامیخت اویلر بر داده‌ها اعمال شد. داده‌های مغناطیسی با فاصله ۵۰ متر شبکه‌بندی شده‌اند. روش اویلر با شاخص ســـاختاری یک و اندازه پنجره ۲۰×۲۰ نقطه شـــبکه معادل ۱ km×۱ km بر داده‌ها اعمال شده است. بیشینه فاصله از مرکز پنجره ۴۰۰ متـــر و تلورانس نیز ۱۰درصد در نظر گرفته شده است.

انتخاب ابعـــاد مذکور با توجه به همگنـــی پارامترهای مغناطیسی و زمین‌شـــناختی منطقهٔ مورد مطالعه صورت گرفته است.

بحث

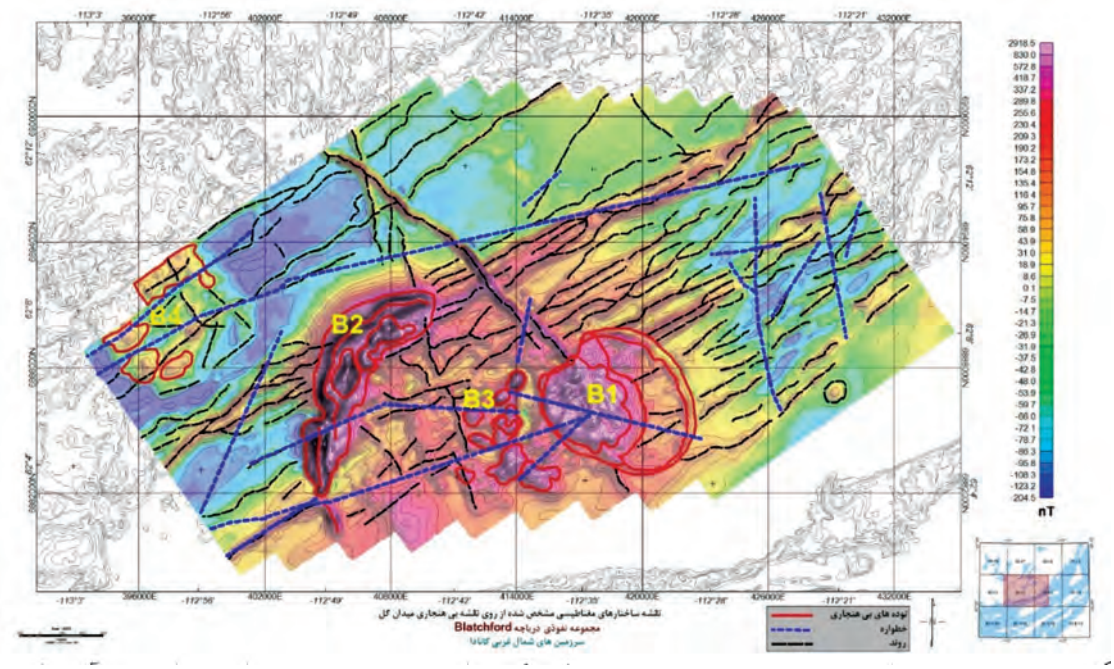
نقشه مغناطیسی این منطقه به دلیل ماهیت نفوذی آن تااندازه‌ای پیچیده است. بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه را کم‌وبیش به دو دسته می‌توان تقسیم کرد (شکل ۵). یک دســـته مربوط به بی‌هنجاری‌های شبه دایک با روند تقریبی شـــمال شرقی است (به‌غیراز یک دایک بزرگ با روند شمال غربی) و دسته دیگر مربوط به بی‌هنجاری‌های توده نفوذی اصلی دریاچه بلاچفورد است. بی‌هنجاری‌های دسته دوم با توجه به ویژگی‌های مغناطیسی خود به چهار زیر بخش قابل تقسیم هستند. نواحی B1 تا B4 مشخص شده در شکل ۶ این تقسیم‌بندی را نشان می‌دهند. شدیدترین بی‌هنجاری‌ها مربـــوط به گابـــروی دریاچـــه کاریبو، با مقادیـــر پیک بین ۱۰۰۰ nT تا ۲۹۰۰ nT، می‌باشند. البته تمام گابروی مشخص شده به‌شدت مغناطیده نشده و فقط ناحیه پیرامونی غربی آن خاصیت مغناطیسی بالایی دارد. ناحیه شمال کانال هرن کمترین خاصیت مغناطیسی را در مقایسه با مقادیر منطقه‌ای دارد. کوارتز سینیت دریاچه وایتمن شامل چندین ناحیه با مغناطیس بالا اســـت. همراهی یکی از آن‌ها با یک واحد از گابروی دریاچه کاریبو با روند NNE نشان می‌دهد که مورد آخر در عمق کم زیر سایر نواحی نیز حاضر بوده است. بخش غربی ســـینیت دریاچه تور با یک نشانه مغناطیسی مثبت برجســـته همراه اســـت که پیک‌هـــای درون آن به بیش از

۵۰۰ nT می‌رسد. سینیت مافیک شرقی کناری یک بی‌هنجاری مثبت واضح با پیک‌های در حدود ۱۰۰ nT ایجاد می‌کند. مجموعه آذرین درونی Defeat و گرانیت‌های موروس و دریاچه مد گویا فاقد نشانه مغناطیسی قابل توجه هستند. بیشینه‌های مغناطیسی خطی با روند کم‌وبیش ENE بر میدان مغناطیسی این بخش‌ها غالب هستند.

گرانیت دریاچه گریس به‌صورت کلی با یک عبارت مغناطیسی همراه است که در مقایسه با سنگ‌های فوق رسوبی احاطه‌کننده سازند بورواش تااندازه‌ای مثبت است، اما به‌شدت بخش غربی سینیت دریاچه تور نمی‌باشد. چندین بیشینه مغناطیسی در جنوب مجموعه نفوذی کامپتون با مغناطیسی شدید یا نشان‌دهنده تغییرات داخلی ترکیبی/ساختاری درون گرانیت دریاچه گریس می‌باشند و یا بیانگر حضور واحدهای نفوذی مدفون کامپتون هستند.

گستره برداشت این داده‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا قرار دارد و زاویه میل مغناطیسی در این منطقه در حدود ۸۱° است، ازاین‌رو در بخش پیش رو از اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP) صرف‌نظر شده است تا داده‌ها بدون تغییر و دخل و تصرف مورد تحلیل قرار گیرند.

در ناحیه B1 که یک ناحیه کم‌وبیش حلقوی است، بی‌هنجاری‌ها به‌صورت کلی مربوط به سینیت دریاچه تور می‌باشند. تمرکز بی‌هنجاری‌ها در این ناحیه مربوط به کناره غربی ناحیه است که کانسار عناصر نادر Nechalacho نیز در آن واقع شده است. این ناحیه بخش اصلی مجموعه نفوذی دریاچه بلاچفورد را تشکیل می‌دهد که در مرکز گرانیت دریاچه گریس قرار گرفته است.



شکل ۶. نقشه ساختارهای مغناطیسی مشخص شده از روی بی‌هنجاری مغناطیسی کل. خط‌چین‌های سیاه روندهای مغناطیسی، خط‌چین‌های آبی خطواره‌ها و خطوط قرمز توده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی را نشان می‌دهند

ناحیه B2 که در نقشه مشخص شده است شامل یک بی‌هنجاری هلالی شکل است که بخش‌های مختلفی را در برمی‌گیرد. کوارتز سینیت دریاچه وایتمن کم‌وبیش در بخش شمال و شرق این ناحیه واقع شده است. بخش شرقی با پیک‌های بزرگ مربوط به گابروی دریاچه کاریبو است. مرز بین این بخش با کوارتز سینیت دریاچه وایتمن بر روی نقشه‌های مغناطیسی مشخص نیست. به نظر می‌رسد که دنباله جنوبی این بخش توسط یک خطواره با روند تقریبی شرقی-غربی قطع شده است. این موضوع به‌ویژه در نقشه بی‌هنجاری میدان کل منطقه قابل تشخیص است.

در بخش مرکزی جنوب مجموعه نفوذی دریاچه بلاچفورد و در غرب ناحیه B1، ناحیه B3 شامل چندین بی‌هنجاری

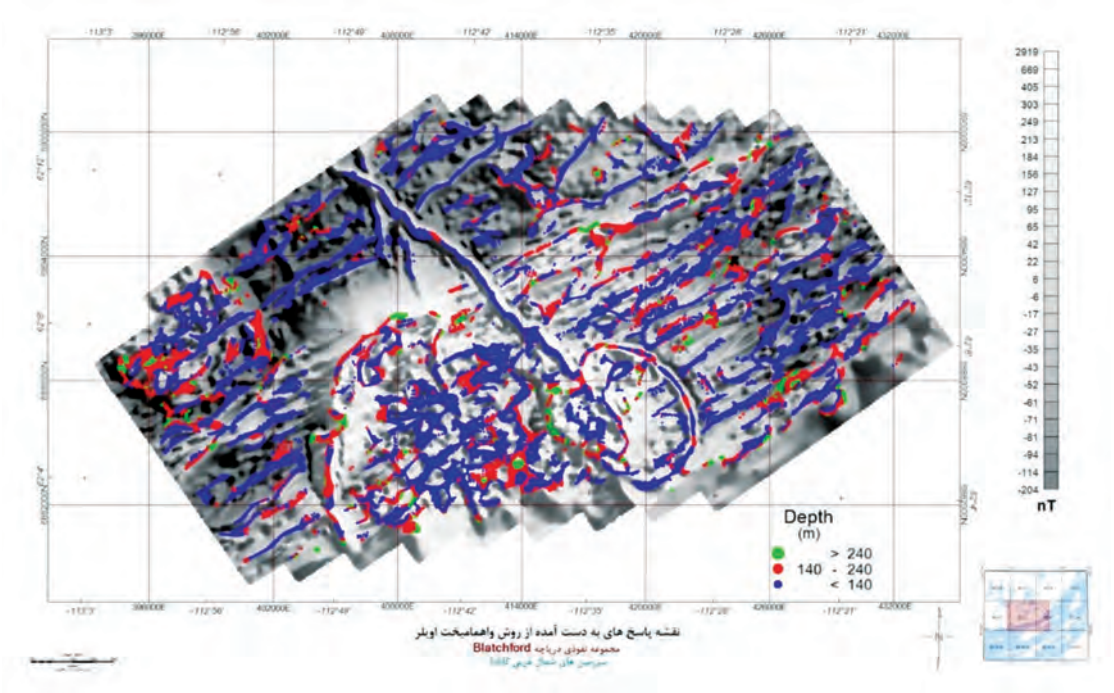
کنار هم است. این بخشی از گرانیت دریاچه گریس را شامل می‌شود که دو توده نفوذی مجموعه نفوذی کامپتون که در نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص شده‌اند و نیز چندین بی‌هنجاری دیگر که در کنار هم هستند، در آن قرار دارند. بی‌هنجاری‌های این ناحیه تااندازه‌ای کوچک‌اند و با مجموعه نفوذی کامپتون در ارتباط هستند.

ناحیه B4 در بخش غربی منطقه قرار دارد. این ناحیه شامل چندین بی‌هنجاری ضعیف با بیشینه بین ۵۰ nT تا ۱۵۰ nT می‌باشد. منشأ بی‌هنجاری‌ها در این بخش شاید مربوط به ابرگروه یلونایف می‌باشند. این ناحیه به دلیل اینکه در مجموعه نفوذی دریاچه بلاچفورد قرار ندارد، از نظر مغناطیسی کم‌اهمیت بوده و در اینجا بررسی نمی‌شود.

دسته دوم بی‌هنجاری‌ها شامل روندهای شبه دایک با جهت‌های مختلف است که در سراسر منطقه پراکنده شده‌اند. روند غالب این شبه دایک‌ها شمال شرقی-جنوب غربی است. یک بی‌هنجاری شبه دایک بزرگ با بی‌هنجاری مغناطیسی تااندازه‌ای بالا و روند شمال غرب-جنوب شرقی نیز دیده می‌شود. یک بی‌هنجاری شبه دایک دیگر نیز در نقشه‌ها دیده می‌شود که روند تقریبی شمالی-جنوبی دارد.

این بی‌هنجاری از میان نواحی B3 و B2 عبور کرده و تا بالای منطقه ادامه دارد. به نظر می‌رسد که این بی‌هنجاری در بالای ناحیه B2 توسط یک خطواره قطع شده و در ادامه مسیر خود بی‌هنجاری شبه دایک بزرگ را که در بالا توصیف شد قطع می‌کند. به نظر می‌رسد که این روندها مربوط به دایک‌های دیابازی باشند که در حین نفوذ ماگمای اولیه در شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه تشکیل شده‌اند.

شکل ۵ بی‌هنجاری مغناطیسی میدان کل منطقه را نشان می‌دهد. این داده‌ها به‌صورت ورودی در الگوریتم واهمامیخت اویلر وارد شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از اعمال روش اویلر بر این داده‌ها در شکل ۷ به نمایش در آمده است. در این شکل مشاهده می‌شود که روش واهمامیخت اویلر به‌خوبی روندهای بی‌هنجاری را در منطقه مشخص کرده است. با توجه به پاسخ‌های به‌دست‌آمده از اعمال روش اویلر می‌توان اغلب بی‌هنجاری‌های این منطقه را دارای عمق کم تا متوسط در نظر گرفت. شاخص ساختاری (SI) اعمال شده در اینجا برابر یک می‌باشد که مربوط به ساختارهای دایک مانند است (جدول ۱). این شاخص ساختاری توانسته است اغلب روندهای شبه دایک منطقه را برآورد کند. بی‌هنجاری‌هایی



شکل ۷. پاسخ‌های اویلر رسم شده بر روی نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی کل منطقه بلاچفورد. هر نقطه بیان‌گر یک پاسخ عمقی است

مثل روند شـــبه دایک با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی، دایک‌های با روند تقریبی شـــمال شرقی-جنوب غربی و نیز بخش‌هایـــی از ناحیه حلقـــوی دارای عمق کمتر از ۱۴۰ متر هســـتند. عمق کم بی‌هنجاری‌های منطقه در نقشه مشتق قائم نیز به‌وضوح مشخص است. ناحیه گابروی دریاچه کاریبو و نیز جنوب بی‌هنجاری‌های ناحیه B3 دارای عمق متوسط بین ۱۴۰ تا ۲۴۰ متر هســـتند. بخش‌هایی از گابروی دریاچه کاریبو نیز با عمق‌های بیش از ۲۴۰ متر برآورد شـــده‌اند. در کل بی‌هنجاری‌ها در این منطقه زیاد عمیق نیستند و فقط در بعضی بخش‌ها پاسخ‌های بیش از ۲۴۰ متر به‌دست‌آمده است. در بخشی از ناحیه B4 نیز پاسخ‌ها تااندازه‌ای عمیق هســـتند که البته به دلیل کم‌اهمیت بودن این ناحیه مورد توجه ما نیســـت. در غرب سینیت دریاچه تور (غرب ناحیه B1) نیز پاسخ‌های تااندازه‌ای عمیق به‌دست‌آمده است که به نظر می‌رسد با همبری سینیت دریاچه تور و گرانیت دریاچه گریس در ارتباط باشد. در کل می‌توان گفت که ساختارهای مولد بی‌هنجاری در این منطقه دارای عمق کم تا متوســـط هستند. البته به‌طور یقین مقادیر واقعی منطقه را نمی‌توان در پاســـخ‌های به‌دست‌آمده از روش واهمامیخت اویلر فرض کرد. برای اطمینان از این مقادیر می‌بایست این پاسخ‌ها را با نتایج حاصل از حفاری‌های منطقه مقایسه کرد.

نتیجه‌گیری

روش واهمامیخت اویلر بر اســـاس رابطه اویلر بنا شده است. در این رابطه مشتق‌های میدان پتانسیل به‌کاررفته‌اند. این روش با استفاده از مشتق‌های میدان مغناطیسی و فرض یک شـــاخص ساختاری، پاســـخ‌هایی را برای منشأ چشمه بی‌هنجاری ارائه می‌کند. البته این روش هیچ مدل هندسی و یـــا زمین‌شناســـی از داده‌ها ارائه نمی‌کند و پاســـخ‌های به‌دســـت‌آمده فقط نشـــان‌دهنده عمق بالای چشمه مولد بی‌هنجاری و موقعیت افقی آن اســـت. روش واهمامیخت اویلر را هم برای داده‌های پروفیل و هم داده‌های شـــبکه‌ای می‌توان بـــه کار برد. در حالت پروفیل، مشـــتق در یکی از جهت‌های افقی صفر در نظر گرفته شـــده و پاسخ‌ها برای دو جهت دیگر به دست می‌آیند. برای کاربرد این روش نیازی به اعمال فیلتر برگردان به قطب بر داده‌ها نیست، چرا که روش بر اســـاس گرادیان‌های میدان و نه جهت آن عمل می‌کند. در حالتی که چشمه‌های متداخل موجود باشد، پاسخ‌های به‌دست‌آمده نیز دارای خطای بیشتری است.

روش واهمامیخـــت اویلر به‌عنوان یک تکنیک ســـریع می‌تواند برای حجم زیاد داده‌های مغناطیسی هوابرد به کار رود. مزیت این روش در این است که هیچ مدل زمین‌شناسی را فـــرض نمی‌کند و نتایج فقط بیان‌گـــر روند کلی عمقی و مرزهـــای بی‌هنجاری‌ها در منطقه اســـت. امـــا اطلاعات به‌دست‌آمده می‌تواند چشـــم‌انداز خوبی از بی‌هنجاری‌ها در منطقه به یک مفســـر ارائه کند. همچنین می‌توان از نتایج به‌دست‌آمده در تنظیم پارامترهای مدل‌سازی پیشرفته‌تر نیز استفاده کرد.

منابع

- Barbosa, C. F., Silva, B. C. and Medeiros, E., 1999. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. Geophysics 64, 48-60.
- Beiki, M., 2013. TSVD analysis of Euler deconvolution to improve estimating magnetic source parameters: An example from the Asele area, Sweden. Journal of Applied Geophysics 90, 82-91.
- Bournas, N., Galdeano, A., Hamoudi, M. and Baker, H., 2003. Interpretation of the aero-magnetic map of Eastern Hoggar (Algeria) using the Euler deconvolution, analytic signal and local wavenumber methods. Journal of African Earth Sciences, 37,3, 191-205.
- Davidson, A., 1978. The Blachford Lake Intrusive Suite: An Aphebian alkaline plutonic complex in the Slave Province, Northwest Territories. Current Research: Geological Survey of Canada, 119-127.
- FitzGerald, D., Reid, A. B. and McInerney, P., 2004. New discrimination techniques for Euler deconvolution. Computers and Geosciences 30, 461-469.

- Mumford, T. R., 2013. Petrology of the Blatchford Lake intrusive suite. Ph.D. thesis, Department of Earth Science, Carleton University, Ottawa, Ont.

- Mushayandebvu, M. F., Driel, P. V., Reid, A. B. and Fairhead, J. D., 2001. Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution. Geophysics 66, 814-823.

- Peters, L. J., 1949. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. Geophysics 14, 290-320.

- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J. and Somerton, I. W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics 55, 180-191.

- Reid, A. B. and Thurston, J.B., 2014, The structural index in gravity and magnetic interpretation, Errors, uses, and abuses, Geophysics, 79,4, J61-J66.

- Stavrev, P. and Reid, A. B., 2007. Degrees of homogeneity of potential fields and structural indices of Euler deconvolution. Geophysics 72, L1-L12.

- Stavrev, P. and Reid, A. B., 2010. Euler deconvolution of gravity anomalies from thick contact/fault structures with extended negative structural index. Geophysics 75, I51-I58.

- Thompson, D. T., 1982. Euldph: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics 47,1, 31-37.