

برآورد عمق و شاخص ساختاری چشمه‌های مغناطیسی با استفاده از روش‌های

تحلیل چندمقیاسی و DEXP

جمال‌الدین بنی‌عامریان^۱، بهروز اسکویی^{۲*} و اسداله جوع عطا بیرمی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، ایران

(دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

در این مقاله دو روش بر مبنای استفاده از میدان مغناطیسی در ارتفاع یا مقیاس‌های مختلف برای تخمین عمق و شاخص ساختاری چشمه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی بررسی می‌شوند. در روش اول، موقعیت و شاخص ساختاری چشمه در دو مرحله به‌طور مستقل از هم تخمین زده می‌شود. عمق چشمه با یک روش هندسی و بر اساس مفهوم مرزها (Ridges) تعیین می‌شود. سپس شاخص ساختاری (Structural index) با بهره‌گیری از مفهوم تابع مقیاس‌ده (Scaling function) در روش ScalFun محاسبه می‌شود. چنانچه اثر تداخلی ناهنجاری‌های مجاور شدید باشد، از مشتق میدان در تحلیل چندمقیاسی استفاده می‌شود. در روش دوم، برآورد عمق و شاخص ساختاری چشمه با وزن‌دهی میدان چندمقیاسی توسط یک تابع مقیاس‌ده مناسب انجام می‌گیرد. این تابع مقیاس‌ده وابسته به نوع میدان پتانسیل، ساختار چشمه مولد میدان و ارتفاع (مقیاس) ادامه فراسو است. با استفاده از این میدان وزن داده‌شده که به اصطلاح تبدیل DEXP میدان نامیده می‌شود، می‌توان محل و شاخص ساختاری چشمه را برآورد کرد. به این ترتیب که محل مقادیر بیشینه و کمینه میدان DEXP، در صورتی که تابع مقیاس‌ده به‌درستی انتخاب شود، منطبق بر چشمه خواهد بود. در ابتدا هر دو روش با داده‌های مصنوعی تولیدشده توسط چشمه‌های مصنوعی که با نوفه گاوسی آمیخته شده است، مطالعه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های مصنوعی در مقایسه با مقادیر واقعی از دقت مطلوبی برخوردارند. در مرحله بعد، این روش‌ها روی یک‌سری از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد اعمال می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص ساختاری و موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی با یکدیگر همخوانی دارند.

واژه‌های کلیدی: ادامه فراسو، تحلیل چندمقیاسی، تخمین عمق، چشمه مغناطیسی، شاخص ساختاری، مشتق میدان.

۱. مقدمه

واهمامیخت اوپلر (تامپسون، ۱۹۸۲؛ رید و همکاران، ۱۹۹۰؛ استاورو و رید، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰)، واهمامیخت سیگنال تحلیلی (سالم و راوات، ۲۰۰۳)، تصویرسازی پارامترهای چشمه (Source parameter imaging) یا عدد موج محلی (Local wave number) (راجاگیلان و میلگان، ۱۹۹۴؛ تورستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ اسمیت و سالم، ۲۰۰۵؛ سالم و همکاران، ۲۰۱۰)، تبدیل موجک پیوسته CWT (فدی و راپولا، ۱۹۹۷). این روش‌ها معمولاً برای چشمه‌هایی با شکل هندسی ساده خوب عمل می‌کنند و مستقل از پذیرفتاری مغناطیسی هستند. فدی و فلوریو (۲۰۰۶) روش‌های تخمین عمق و شاخص ساختاری را به‌طور کلی به پنج گروه تقسیم کردند و قابلیت‌های کلی هر روش را بیان کردند. در شرایط آرمانی که بی‌هنجاری به‌خوبی مجزا باشد و مقدار نوفه

منظور از تفسیر کمی کامل داده‌های میدان مغناطیسی تخمین سه کمیت عمق، ابعاد (شکل) و پذیرفتاری مغناطیسی چشمه است. تفسیر کمی داده‌ها ذاتاً دارای ابهاماتی است. به این معنی که تعیین دقیق و همزمان همه کمیت‌های مورد نظر بدون در اختیار داشتن سایر اطلاعات اولیه امکان‌پذیر نیست. در بیشتر کاربردها، تخمین عمق در مقایسه با سایر مشخصات چشمه از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ بنابراین روش‌های مختلفی برای تخمین عمق توسعه پیدا کرده است از جمله روش شیب (پیتر، ۱۹۴۹؛ اسکیلبری، ۱۹۹۳)، روش‌های طیفی (اسپکتور و گرنر، ۱۹۷۰، فیلیس، ۱۹۷۹؛ بلیکلی و حسن‌زاده، ۱۹۸۱؛ راوات و همکاران، ۲۰۰۷)، واهمامیخت ورنر (ورنر، ۱۹۵۳؛ هارتمن و همکاران، ۱۹۷۱)، سیگنال تحلیلی (نیقیان، ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴)،

کمیته میدان پتانسیل همگن با توجه به رفتار این میدان‌ها نسبت به فاصله از چشمه، در ارتفاع‌های مختلف در امتداد یک‌سری خطوط راست به نام مرزها قرار می‌گیرند (فلوریو و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹). با برون‌یابی این مرزها تا زیر سطح اندازه‌گیری و تعیین نقاط برخورد آن‌ها، عمق چشمه به‌سادگی تخمین زده می‌شود. با استفاده از این روش عمق نقاط تکین (Singular points) چشمه‌ها برآورد می‌شوند. به‌عنوان مثال نقطه تکین چشمه‌هایی با شکل هندسی ساده مانند کره و استوانه افقی، در مرکز و نقطه تکین ساختارهایی مانند دایک، سطح تماس و استوانه عمودی در بالای آن‌ها قرار دارد (فلوریو و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹). شکل ۱ مفهوم مرزها و روش هندسی تخمین عمق را برای خطی از دوقطبی‌های مغناطیسی در عمق ۲۰ متری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل موقعیت چشمه به‌درستی تعیین شده است.

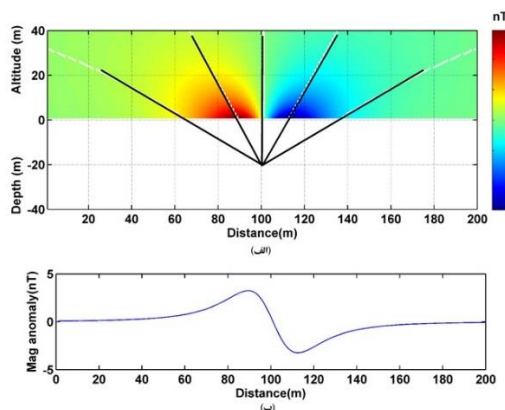
سپس با روش ScalFun شاخص ساختاری چشمه تعیین می‌شود (فدی و فلوریو ۲۰۰۶، فدی، ۲۰۰۷، فلوریو و همکاران ۲۰۰۹). اساس این روش مفهوم تابع مقیاس‌ده برای میدان‌های پتانسیل است که برای تخمین همزمان یا مستقل شاخص ساختاری و عمق چشمه کاربرد دارد. تابع مقیاس‌ده به‌صورت مشتق لگاریتم میدان پتانسیل نسبت به لگاریتم ارتفاع تعریف می‌شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$\tau = \frac{\partial \log(f(z))}{\partial \log(z)} \quad (1)$$

ناچیز باشد، عمق به‌دست آمده از این روش‌ها را می‌توان به‌عنوان مقدار کمی نهایی در نظر گرفت. اغلب اوقات این عمق تخمینی نقطه شروع مناسبی برای تفسیر ساختاری، وارون‌سازی و مدل‌سازی است. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی تحت عنوان روش‌های چندمقیاسی معرفی شده‌اند که عمدتاً بر مبنای این واقعیت هستند که میدان‌های پتانسیل تولیدشده توسط چشمه‌های آرمانی مانند کره، همگن هستند و تغییرات آن‌ها تابع توان مشخصی از فاصله تا چشمه است. با بهره‌گیری از این خاصیت، مطالعه میدان در ارتفاع یا مقیاس‌های مختلف اطلاعات سودمندی از عمق و ساختار تقریبی چشمه فراهم می‌کند. در این تحقیق از میان روش‌های چندمقیاسی (multiscale) موجود، درباره دو روش جدید تحلیل چندمقیاسی بر مبنای روش هندسی و سازگاری مرزها (فدی و همکاران، ۲۰۱۲) و DEXP (فدی، ۲۰۰۷) بحث می‌شود.

۲. روش تحلیل چندمقیاسی بر مبنای روش هندسی و سازگاری مرزها

در روش تحلیل چندمقیاسی، عمق، مکان و شاخص ساختاری چشمه‌های میدان پتانسیل در دو مرحله و بر مبنای تحلیل میدان در ارتفاع‌های مختلف تخمین زده می‌شوند. از آنجایی که اندازه‌گیری میدان در چند ارتفاع مختلف به‌ندرت امکان‌پذیر است، ابتدا میدان پتانسیل چندمقیاسی با استفاده از ادامه فراسوی داده‌ها به ارتفاع‌های مختلف محاسبه می‌شود. مقادیر بیشینه یا



شکل ۱. نمایش روش هندسی و مفهوم مرزها؛ (الف) میدان چندمقیاسی و مرزها برای خطی از دوقطبی‌ها. خطوط راست مرزها هستند که از درون‌یابی مقادیر بیشینه یا کمیته میدان به‌دست آمده‌اند. (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی برای خطی از دو قطبی‌های در عمق ۲۰ متری.

مقیاس‌ده، تابعی از عمق تا چشمه؛ z_0 ، شاخص ساختاری و Z ، ارتفاع سطح است. با استفاده از مقدار این تابع در نقطه $z=z_0$ شاخص ساختاری چشمه محاسبه می‌شود:

$$\tau_n(z = -z_0) = \frac{N_s}{2} = \alpha_n, \quad (8)$$

که در آن α_n توان مقیاس‌ده است. از آنجایی که مبدأ محور مختصات Z به دلخواه انتخاب می‌شود، برای یک حدس اولیه \hat{z}_0 ، ارتفاع Z و عمق تا چشمه Z_0 به ترتیب به $z - \hat{z}_0$ و $z_0 - \hat{z}_0$ تبدیل می‌شوند (فلوریو و همکاران، ۲۰۰۹)؛ بنابراین، تابع مقیاس‌ده به شکل رابطه (۹) نوشته می‌شود:

$$\tau_n(z, \hat{z}_0) = -N_s \frac{z - \hat{z}_0}{z - z_0}, \quad (9)$$

همچنین با فرض $z = 1/q$ ، معادله به رابطه (۱۰) تبدیل می‌شود.

$$\tau_n(q, \hat{z}_0) = -N_s \frac{1 - \hat{z}_0 q}{1 - z_0 q}, \quad (10)$$

این تابع برحسب مقدار q ، بسته به اینکه \hat{z}_0 کوچک‌تر، بزرگ‌تر یا برابر عمق واقعی تا چشمه، z_0 باشد، تابعی صعودی، نزولی یا ثابت است. علاوه بر این برای هر مقدار تخمینی \hat{z}_0 :

$$\tau_n(q \rightarrow 0, \hat{z}_0) = -N_s \quad (11)$$

رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که برآورد شاخص ساختاری با استفاده از τ_n از عمق چشمه مستقل است.

شاخص ساختاری تخمینی که با روش ScalFun به دست می‌آید نسبت به عمق اولیه \hat{z}_0 تقریباً پایدار است. در روش ScalFun شاخص ساختاری با استفاده از تمامی مرزهای به کار گرفته شده در روش هندسی تخمین عمق تعیین می‌شود. برای هر بی‌هنجاری، شاخص ساختاری N_s با معادله ۱۱ و قراردادن عمق به دست آمده از روش هندسی به جای \hat{z}_0 تخمین زده می‌شود. جواب‌های به دست آمده (عمق و شاخص ساختاری) برای هر دسته از مرزهایی که مربوط به یک چشمه مشترک هستند، با معیار سازگاری مرزها (فدی و همکاران، ۲۰۱۲) که در ادامه شرح داده می‌شود، ارزیابی می‌شود.

اعتبار جواب‌های به دست آمده بر اساس معیار

که در آن، τ ، تابع مقیاس‌ده و f ، میدان در ارتفاع Z است. هر میدان پتانسیل نیوتنی از جمله میدان‌های گرانشی و مغناطیسی و مشتق‌های آن از مرتبه n با رابطه (۲) تعریف می‌شوند (فدی، ۲۰۰۷):

$$f(\mathbf{r}) = k \int \frac{\partial^n M(\mathbf{r}_0)}{\partial z^n \| \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 \|_2} d^3 \mathbf{r}_0, \quad (2)$$

که در آن، k یک ثابت فیزیکی است که به ماهیت میدان بستگی دارد؛ M چگالی یا مغناطش و \mathbf{r} و \mathbf{r}_0 به ترتیب مختصات نقطه اندازه‌گیری و محل چشمه است. با فرض اینکه f_1 میدان گرانشی یک تک قطبی نقطه‌ای در $f_1(x_0, y_0, z_0)$ با چگالی M باشد، رابطه (۳) برای f_1 برقرار است:

$$f_1(\mathbf{r}) = M \frac{(z - z_0)}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 \|_2^3}, \quad (3)$$

در این رابطه ثابت k برابر ۱ فرض شده است. برای سادگی می‌توان فرض کرد که چشمه در نقطه $r_0(0, 0, z_0)$ قرار گرفته باشد؛ در این صورت با توجه به رابطه (۳) میدان در نقطه $r(0, 0, z)$ با رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$f_1(z) = \frac{1}{(z - z_0)^2}, \quad (4)$$

برای این میدان تابع مقیاس‌ده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\tau_1(z) = -\frac{2z}{(z - z_0)} \quad (5)$$

این نتایج محدود به میدان گرانشی نیست و تابع مقیاس‌ده را می‌توان برای مشتق‌های میدان گرانشی، میدان مغناطیسی (حالتی که $n=2$) و مشتق‌های آن محاسبه کرد. به طور کلی برای مشتق قائم مرتبه n م میدان پتانسیل نیوتنی یک چشمه نقطه‌ای تابع مقیاس‌ده با رابطه (۶) محاسبه می‌شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$f_n(z) = \frac{1}{(z - z_0)^{n+1}}, \quad (6)$$

بنابراین، تابع مقیاس‌ده برای مشتق قائم مرتبه n از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$\tau_n = \frac{\partial \log(f_n(z))}{\partial \log(z)} = -\frac{(n+1)z}{z - z_0} = -N_s \frac{z}{z - z_0}, \quad (7)$$

که در آن، Z_0 عمق تا چشمه و N_s شاخص ساختاری نسبت به میدان f_n است. برای میدان‌های گرانشی و مغناطیسی به ترتیب $n=1$ و $n=2$ است. بنابراین تابع

عمق و شاخص ساختاری تخمینی خواهد بود. چنانچه تأثیرات تداخلی شدید باشند، حتی اگر مرزها خطوط مستقیم باشند، شاخص‌های ساختاری به دست آمده از مرزهای مختلف برای یک چشمه سازگار نخواهند بود. در این حالت نیز برای به دست آوردن جواب‌های معتبر باید مشتق‌های مرتبه بالاتر تحلیل شوند (فدی و همکاران، ۲۰۱۲). به طور خلاصه روش تحلیل چندمقیاسی میدان شامل چهار مرحله اصلی است: الف. تولید میدان چندمقیاسی با استفاده از یک الگوریتم بهینه شده ادامه فراسو؛ ب. تخمین موقعیت چشمه با استفاده از یک روش هندسی؛ ج. تخمین شاخص ساختاری در امتداد هر مرز با استفاده از روش ScalFun و د. ارزیابی نتایج با معیار سازگاری مرزها.

۳. روش DEXP

روش DEXP بر مبنای مقیاس‌دهی میدان در مقیاس‌های (ارتفاع‌های) مختلف با توان مناسبی از ارتفاع است. تابع مقیاس‌دهی در این روش تابعی از ارتفاع، توان مقیاس‌دهی (و در نتیجه شاخص ساختاری) و مرتبه میدان است. تبدیل DEXP میدان پتانسیل با رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha} f(h_i) = |h_i|^{\frac{N}{2}} f(h_i), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (12)$$

که در آن، h_i مقیاس یا ارتفاع ادامه فراسو و l تعداد مقیاس‌ها برای تولید میدان DEXP است. با توجه به مبانی این روش در صورتی که تابع مقیاس‌دهی به درستی انتخاب شود، مقادیر کمینه یا بیشینه میدان DEXP منطبق بر محل چشمه‌های میدان پتانسیل هستند. به عبارت دیگر با تعیین بیشینه‌های میدان DEXP موقعیت افقی و عمق چشمه تعیین می‌شود. در صورتی که تأثیرات تداخلی چشمه‌های مجاور یا میدان‌های منطقه‌ای شدید باشند، می‌توان از مشتق‌های میدان در رابطه (۱۲) استفاده کرد. در این حالت تبدیل DEXP مشتق مرتبه n م میدان از رابطه کلی (۱۳) محاسبه می‌شود (فدی و پیلکینگتون، ۲۰۱۲):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha n} \frac{\partial^n f(h_i)}{\partial z^n} = |h_i|^{\frac{(N+n)}{2}} \frac{\partial^n f(h_i)}{\partial z^n}, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

سازگاری مرزها مطابق دستورالعمل زیر سنجیده می‌شود. در صورتی که میدان‌های منطقه‌ای، آثار تداخلی (Interference effects) چشمه‌های مجاور (که در ارتفاع‌های بالاتر تشدید می‌شوند) و مقدار نوبه موجود شایان توجه باشد، مرزها انحنا پیدا می‌کنند و شاخص ساختاری به دست آمده از تحلیل دو یا چند مرز مربوط به یک چشمه یکسان ممکن است کاملاً متفاوت باشند. در این صورت جواب‌های به دست آمده از تحلیل چندمقیاسی میدان معتبر نخواهد بود. بر اساس این معیار، شاخص ساختاری به دست آمده از تمامی مرزهایی که به یک چشمه یکسان منتهی می‌شوند، باید یکسان باشد. اگر مقادیر به دست آمده از مرزهای مختلف متفاوت باشند، باید از مشتق‌های میدان استفاده شود تا اثر تداخلی چشمه‌های مجاور یا میدان منطقه‌ای کاهش پیدا کند و شاخص‌های ساختاری یکسانی از تحلیل مرزها برای هر چشمه به دست آید. در این روش چون فرایند مشتق‌گیری (فیلتر بالاگذر) و ادامه فراسو (فیلتر پایین‌گذر) همزمان استفاده می‌شوند، در نتیجه کل فرایند نسبت به نوبه پایدار است. عمل مشتق‌گیری سبب می‌شود گسترش افقی بی‌هنجاری به دلیل افزایش نرخ تضعیف میدان کاهش پیدا کند. هر چند از هر مشتق‌گیری جهت می‌توان استفاده کرد، اما از آنجا که در مشتق‌گیری قائم هیچ تغییر فازی رخ نمی‌دهد، این فرایند ارجحیت دارد.

برای تضعیف اثر بسامدهای (frequency) بالا که ناشی از نوبه‌ها و توده‌های سطحی است، می‌توان از ارتفاع یا مقیاس‌های پایین در فرایند ادامه فراسو چشم‌پوشی کرد. همچنین تأثیرات میدان‌های تداخلی چشمه‌های مجاور یا میدان‌های منطقه‌ای را می‌توان با در نظر نگرفتن مقیاس‌ها یا ارتفاع‌های بیشتر حذف کرد. بنابراین اگر مقیاس‌ها (کمترین و بیشترین ارتفاع ادامه فراسو) به درستی انتخاب شوند، مرزها خطوط مستقیمی خواهند بود و روش هندسی می‌تواند عمق را به درستی تخمین بزند و تمام مرزهایی که به یک چشمه یکسان مربوط هستند، مقادیر یکسانی برای شاخص ساختاری به دست می‌دهند. این سازگاری نشان‌دهنده اعتبار

تبدیل DEXP میدان را تحت تأثیر خود قرار دهد، اما تعیین موقعیت چشمه با توجه به محل مقادیر بیشینه یا کمینه، همواره مستقل از جهت میدان خواهد بود. ضمن اینکه دامنه سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی کاملاً مستقل از جهت میدان، بردار مغناطیس شونده‌گی یا مغناطیس باقی مانده است (نیقیان، ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴؛ سالم و راوات، ۲۰۰۳؛ لی، ۲۰۰۶). بنابراین تبدیل DEXP آن نیز به جهت بردار مغناطیس شونده‌گی یا میدان زمینه وابسته نیست. در مورد روش هندسی جهت میدان ممکن است شیب مرزها را تغییر دهد، اما در نهایت نقطه همگرایی آن‌ها ثابت می‌ماند. بنابراین یکی از مزیت‌های روش‌های چندمقیاسی وابسته نبودن آن‌ها به زاویه میل و انحراف است.

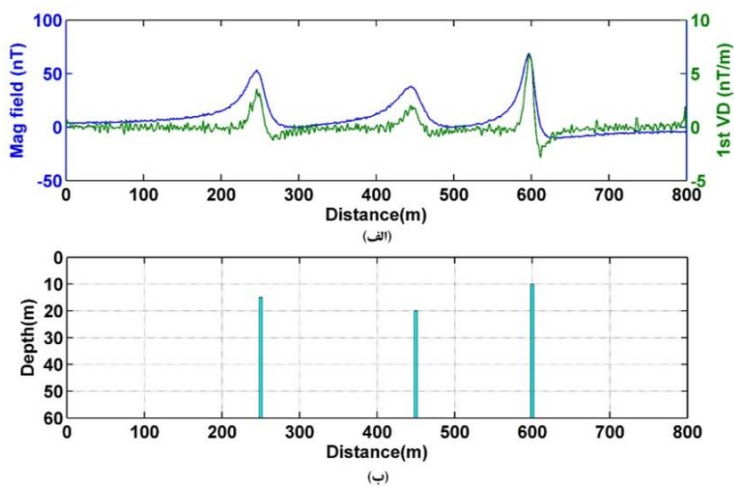
۴. کاربرد روش تحلیل چندمقیاسی و DEXP روی

داده‌های مصنوعی

شکل ۲-الف، بی‌هنجاری مغناطیسی و مشتق اول قائم آن را برای سه دایک نازک مغناطیسی نشان می‌دهد. این مدل در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. خاصیت مغناطیس‌پذیری دایک‌ها یکسان است و عمق تا سطح بالایی به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۱۰ متر است. مغناطش $2A/m$ و فقط القایی است. زاویه میل و انحراف میدان خارجی به ترتیب ۵۰ و ۵ درجه است. میدان مغناطیسی تولید شده با نوبه گاو سی با انحراف معیاری برابر با ۳ درصد دامنه بی‌هنجاری مغناطیسی آمیخته شده است.

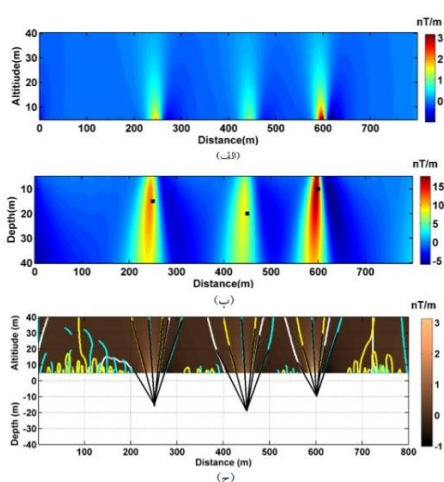
با افزایش مرتبه مشتق میدان چشمه‌های سطحی با وضوح بیشتر و چشمه‌های عمیق‌تر با وضوح کمتری تصویر می‌شوند. چنانچه توان مقیاس ده و در نتیجه شاخص ساختاری درستی برای تبدیل DEXP میدان به کار رفته باشد، با تغییر مرتبه مشتق‌گیری محل بیشینه‌های میدان DEXP و در نهایت عمق و محل تخمینی چشمه‌ها تغییر اندکی خواهد داشت. با استفاده از این معیار می‌توان برای تخمین توان مقیاس ده استفاده کرد (فدی، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه ادامه فراسوی داده‌ها فرایندی بسیار پایدار است، روش DEXP نسبت به سطح نوبه موجود در داده پایدار خواهد بود؛ حتی در شرایطی که از مشتق‌های مرتبه بالا استفاده شود. با توجه به رفتار دوقطبی چشمه‌های مغناطیسی، برای هر چشمه مغناطیسی تبدیل DEXP میدان دارای یک بیشینه و یک کمینه است که چشمه بین این دو نقطه قرار می‌گیرد. در این شرایط برای تخمین بهتر محل چشمه می‌توان از تبدیل DEXP میدان منتقل شده به قطب یا دامنه سیگنال تحلیلی میدان استفاده کرد. در این حالت شکل دوقطبی میدان DEXP برطرف می‌شود و تنها یک نقطه بیشینه وجود خواهد داشت. هر دو روش بررسی شده از سرعت زیادی برخوردارند و به آسانی می‌توان از آن‌ها برای تحلیل حجم زیادی از داده‌ها استفاده کرد.

ذکر این نکته لازم است که زاویه میل و انحراف و به عبارتی دیگر جهت‌گیری میدان ممکن است تنها شکل



شکل ۲. (الف) میدان مغناطیسی (منحنی آبی) و مشتق قائم میدان (منحنی سبز). (ب) مدل سه دایک نازک.

منهای مرتبه مشتق میدان. مقدار شاخص ساختاری مرزهای منتهی به یک چشمه واحد تقریباً یکسان هستند و شرط معیار سازگاری مرزها را برآورده می‌کنند. مقدار خطا در تعیین این مشخصه با توجه به نوفه افزوده شده به داده‌ها طبیعی است. ضمن اینکه خطای محاسباتی و عدم قطعیت بالا نیز همواره در تمامی روش‌های ژئوفیزیکی تعیین پارامترهای چشمه وجود دارد. از طرفی تعیین شاخص ساختاری فرایندی ناپایدار است که می‌تواند متأثر از نوفه‌ها و تأثیرات تداخلی و میدان زمینه باشد. در مورد دایک سوم مقدار تعیین شده برای این کمیت در مقایسه با چشمه اول از دقت کمتری برخوردار است که ممکن است به دلیل تأثیرات تداخلی قوی تر چشمه‌های مجاور روی آن باشد. این مسئله قطعاً مرزهای تولید شده و در نتیجه دقت تخمین شاخص ساختاری را برای این چشمه تحت تأثیر قرار می‌دهند. اما با این حال مقدار تعیین شده برای شاخص ساختاری دایک سوم یعنی 0.7 و $1/3$ پذیرفتنی است. با توجه به شکل ۲-ب دایک اول در فاصله بیشتری از دو چشمه دیگر واقع شده است؛ در نتیجه میدان چشمه‌های دیگر تأثیر کمتری روی آن دارد و شاخص ساختاری آن از دقت بیشتری برخوردار است.

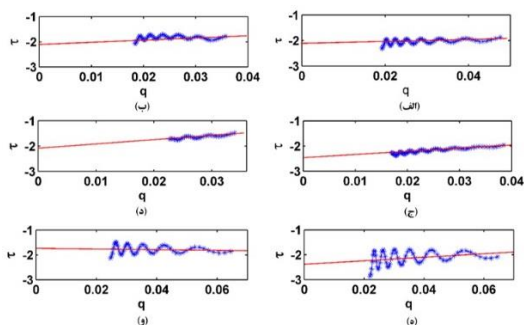


شکل ۳. (الف) میدان چندمقیاسی، (ب) میدان DEXP، اندیس ساختاری برابر ۱ فرض شده است و (ج) مرزهای میدان چندمقیاسی که بر مبنای مقادیر بیشینه یا کمینه میدان چندمقیاسی به دست می‌آیند.

با توجه به اینکه تأثیرات تداخلی چشمه‌ها روی همدیگر شدید است، مرزهای به دست آمده از میدان چندمقیاسی میدان مغناطیسی خطوط راستی نخواهد بود و جواب‌های به دست آمده از تحلیل این مرزها نمی‌تواند معتبر باشد؛ بنابراین مشتق قائم اول برای تخمین عمق و ساختار چشمه‌ها تحلیل می‌شود. همچنین برای تضعیف اثر بازدارنده نوفه‌ها از مقیاس‌های پایین صرف نظر می‌شود. در نهایت برای تولید میدان چندمقیاسی و تبدیل DEXP، مشتق قائم میدان از ارتفاع ۵ متری با تغییرات ارتفاعی ۳/۰ متر تا ۴۰ متری از سطح اندازه‌گیری ادامه فراسو می‌شود. شکل ۳ میدان چندمقیاسی، تبدیل DEXP و مرزها را برای این بی‌هنجاری نشان می‌دهد. شاخص ساختاری برای این ساختار برابر ۱ فرض شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد اکستریم‌های میدان DEXP موقعیت مدل را نشان می‌دهد، اما در مورد میدان مغناطیسی به خاطر رفتار دو قطبی میدان، دو اکستریم وجود دارد که موقعیت افقی چشمه مورد نظر بسته به جهت میدان مغناطیسی بین دو اکستریم قرار می‌گیرد (شکل ۳-ب). شکل ۳-ج نشان می‌دهد که چگونه با استفاده از روش هندسی و بدون نیاز به شاخص ساختاری عمق همه چشمه‌ها به درستی تخمین زده می‌شود.

با استفاده از معادله ۱۱ در امتداد مرزها می‌توان شاخص ساختاری چشمه‌ها را محاسبه کرد. برای هر دایک مرزهای آبی‌رنگ (مشخص شده در شکل ۳-ج) بررسی شده است. شکل ۴ شاخص ساختاری به دست آمده از تحلیل مرزهای مربوط به هر دایک را نشان می‌دهد. با توجه به معادله ۱۱ عرض از مبدأ خط برازش شده در ترسیم τ_n بر حسب q معادل اندیس ساختاری است. مقدار عرض از مبدأ خط برازش شده در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ه به ترتیب برابر است با: $2/1$ ، $2/1$ ، $2/4$ ، $2/1$ ، $2/35$ ، $1/7$ -. از آنجایی که مشتق اول قائم تحلیل شده است، مقدار شاخص ساختاری برابر است با قدر مطلق عرض از مبدأ به دست آمده (تقریباً ۲)

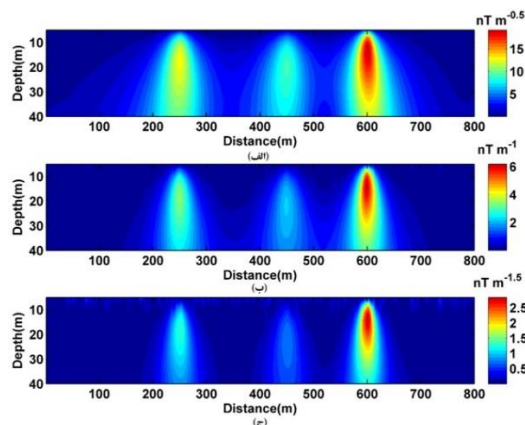
برای به تصویر کشیدن بهتر چشمه‌های کم عمق یا عمیق بهره گرفت. به این معنی که مشتق‌های مرتبه پایین چشمه‌های عمیق‌تر و مشتق‌های مرتبه بالاتر چشمه‌های کم عمق را بهتر به تصویر می‌کشند. زیرا فرایند مشتق‌گیری اثر چشمه‌های سطحی را تقویت و پاسخ چشمه‌های عمیق را تضعیف می‌کند؛ به عنوان مثال چشمه دوم در شکل ۵-الف در مقایسه با شکل ۵-ج و وضوح بیشتری دارد. درخور توجه است که با وجود اینکه تا مشتق مرتبه چهارم میدان استفاده شده است، حتی با وجود نطفه نسبتاً قوی، این روش همچنان پایدار است و نتایج پذیرفتنی هستند. شایان ذکر است که مشتق قائم میدان از روش تبدیل هیلبرت مشتق افقی و در حوزه مکان (نیقیان، ۱۹۸۴) به صورت بسیار پایدار محاسبه می‌شود.



شکل ۴. تخمین شاخص ساختاری برای هر دایک؛ (الف) و (ب) تخمین شاخص ساختاری دایک اول، (ج) و (د) تخمین شاخص ساختاری دایک دوم، (ه) و (ز) تخمین شاخص ساختاری دایک سوم. در مورد هر چشمه مرزهای آبی رنگ در شکل ۳-ج تحلیل شده است.

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد تبدیل DEXP میدان مغناطیسی و مشتق‌های آن به خاطر ماهیت دو قطبی که دارند، تصویری دو قطبی تولید می‌کند. برای حذف شکل دو قطبی تبدیل و در نتیجه تخمین بهتر موقعیت چشمه می‌توان تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی میدان (یا مشتق‌های میدان) را محاسبه کرد. شکل ۵ تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی میدان از مرتبه‌های مختلف را برای مشتق قائم میدان با فرض شاخص ساختاری ۱ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی با حذف شکل دو قطبی، میدان چشمه‌ها را به خوبی به تصویر می‌کشد و نقاط بیشینه آن موقعیت چشمه‌ها را برآورد می‌کند. علاوه بر این تبدیل DEXP تصویری بسیار نرم (smooth) و تقریبی از چگونگی توزیع چشمه‌ها فراهم می‌کند. در واقع این روش را می‌توان به عنوان یک روش سریع و تقریبی برای مدل‌سازی در نظر گرفت که می‌تواند برای تولید یک مدل اولیه قبل از وارون‌سازی‌های پیشرفته و دقیق مورد توجه قرار بگیرد (فدی و پیلکینگتون، ۲۰۱۲). تصاویر نشان‌داده شده در این شکل را صرف نظر از مقدار خاصیت فیزیکی چشمه‌ها می‌توان مدل بازسازی‌شده اولیه در نظر گرفت. این روش از سرعت زیادی برخوردار است و به آسانی می‌توان از آن‌ها برای تحلیل حجم زیادی از داده‌ها استفاده کرد.

همچنین می‌توان با استفاده از مشتق‌های مرتبه‌های مختلف (یا دامنه سیگنال تحلیلی از مرتبه‌های مختلف)

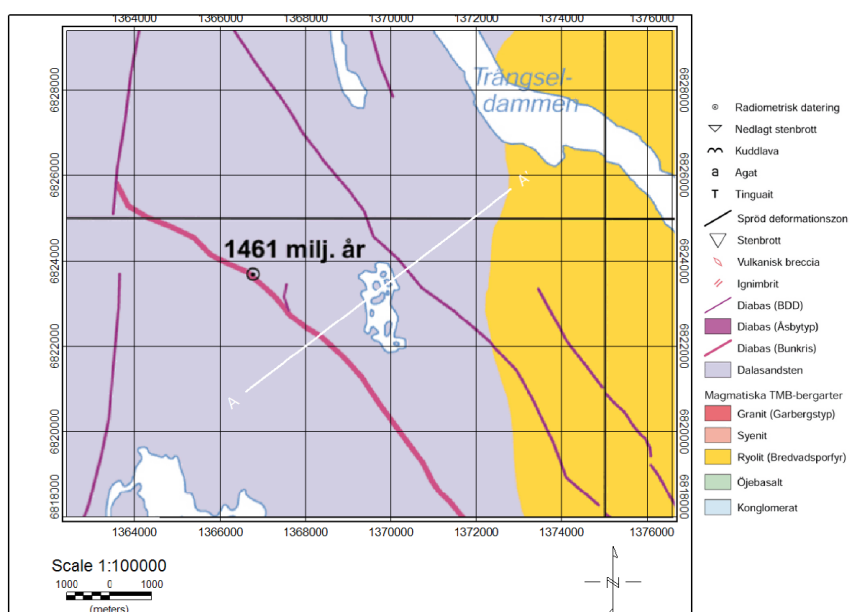


شکل ۵. تبدیل DEXP به دست آمده برای: (الف) سیگنال تحلیلی مرتبه صفرم مشتق قائم میدان، (ب) سیگنال تحلیلی مرتبه اول مشتق قائم میدان و (ج) سیگنال تحلیلی مرتبه دوم مشتق قائم میدان.

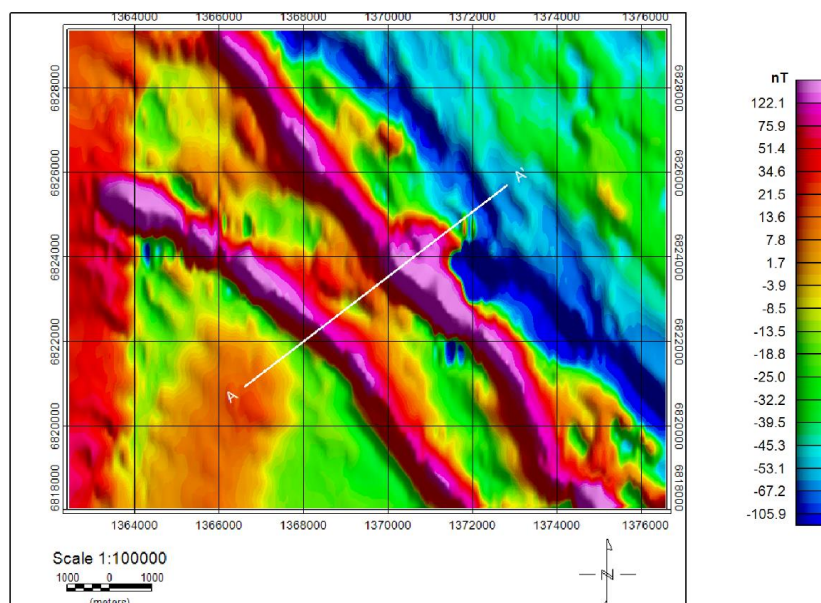
۵. اعمال روش روی داده‌های واقعی

در این بخش روش‌های معرفی شده در این مقاله روی بخشی از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد مربوط به مناطقی از کشور سوئد اعمال می‌شود. این داده‌ها در سال ۲۰۰۵ برداشت شده‌اند و تمامی تصحیحات و پردازش‌های لازم روی آن انجام گرفته است. در این عملیات ارتفاع میانگین پرواز از سطح زمین تقریباً برابر

۶۰ متر بوده است. شکل ۶ نقشه زمین‌شناسی و بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه را نشان می‌دهد. مطابق نقشه زمین‌شناسی دایک‌های دیابازی نفوذی در جهت شمال غربی-جنوب شرقی در داخل سنگ‌های ریولیتی و شن ماسه گسترش دارند. خط سفید مشخص شده روی نقشه مغناطیسی پروفیل تحلیل شده را نشان می‌دهد.



(الف)



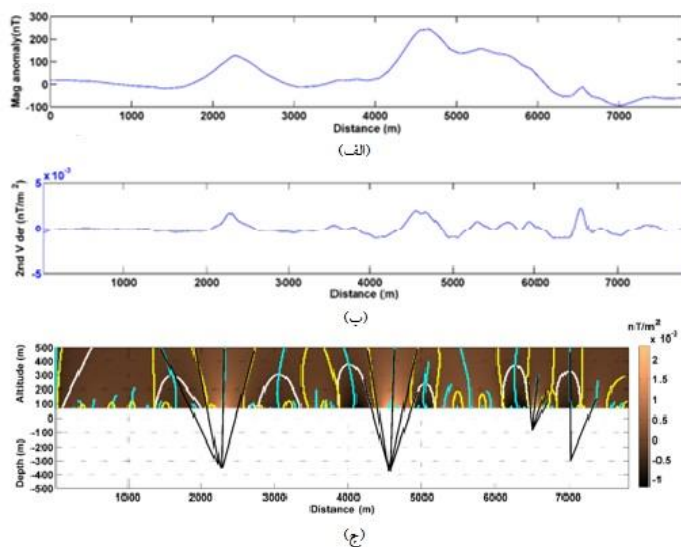
(ب)

شکل ۶. (الف) نقشه زمین‌شناسی و (ب) نقشه میدان مغناطیسی (سازمان زمین‌شناسی سوئد، ۲۰۰۵)

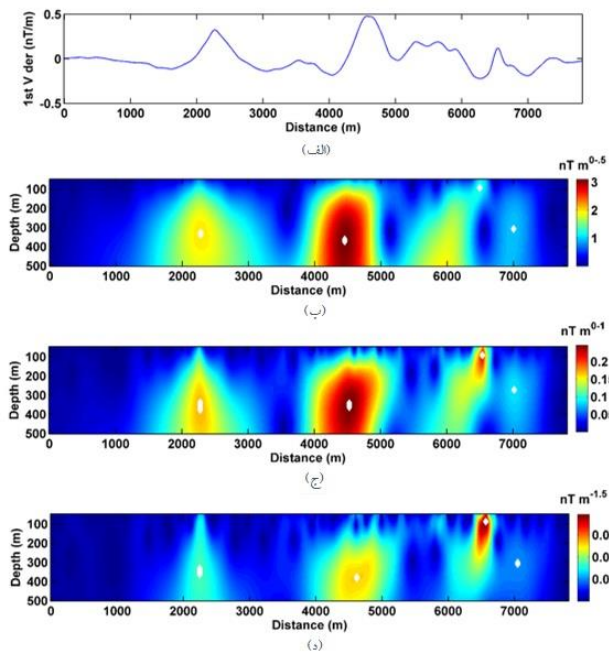
می شود. به این منظور مشتق قائم اول از ارتفاع ۵۰ متری از سطح اندازه‌گیری با فاصله ۵ متری تا ارتفاع ۵۰۰ متری، ادامه فراسو می شود. برای تضعیف نوفه و تأثیرات سطحی از ارتفاع‌های پایین صرف نظر شده است. شاخص ساختاری به‌طور تقریبی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸-الف مشتق قائم میدان را پس از ادامه فراسو در اولین مقیاس نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشتق قائم ضمن برخورداری از درجه تفکیک‌پذیری زیاد از نسبت سیگنال به نوفه خوبی برخوردار است و پاسخ چشمه‌های عمیق و سطحی به آسانی قابل شناسایی هستند. در این حالت نیز برای تخمین بهتر محل چشمه‌ها از تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی میدان (مشتق اول قائم میدان) از مرتبه‌های مختلف استفاده می‌شود (شکل‌های ۸-ب، ۸-ج، ۸-د). با توجه به این شکل‌ها با افزایش مرتبه سیگنال تحلیلی تفکیک‌پذیری چشمه‌ها افزایش پیدا می‌کند و چشمه‌های مولد بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در شکل ۸-الف قابل شناسایی است. چون محل چشمه‌ها با تغییر مرتبه سیگنال تحلیلی نسبتاً پایدار است، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ۱ برای شاخص ساختاری تقریباً صحیح است. نکته شایان توجه این است که با وجود استفاده از مشتق مرتبه چهارم در شکل ۸-د همچنان نسبت سیگنال به نوفه، زیاد و تصویر چشمه‌ها واضح است.

شکل ۷-الف بی‌هنجاری مغناطیسی امتداد این پروفیل را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که به دلیل تداخل بی‌هنجاری‌های مجاور، مرزهای به دست آمده از تحلیل میدان مغناطیسی بر مبنای معیارهای معرفی شده پذیرفتنی نخواهند بود. همچنین با استفاده از مشتق اول قائم میدان چشمه‌های کم عمق شناسایی نمی‌شوند؛ بنابراین ابتدا عمق چشمه‌ها با به کارگیری روش هندسی برای مشتق دوم قائم تخمین زده می‌شود. به این منظور مشتق دوم میدان از ارتفاع ۷۰ متری از سطح اندازه‌گیری تا ارتفاع ۵۰۰ متری از آن ادامه فراسو می‌شود. شکل ۷-ب مشتق دوم قائم را در ارتفاع ۷۰ متری و شکل ۷-ج میدان چندمقیاسی و مرزها را نشان می‌دهد. نکته مهمی که در روش هندسی باید به آن توجه شود، این است که مرزهایی قابلیت تحلیل دارند که به پاسخ مشخصی در میدان مربوطه نسبت داده شوند (فدی و همکاران، ۲۰۰۹). با مقایسه شکل‌های ۷-ب و ۷-ج، همه چشمه‌های تخمین زده شده با استفاده از روش هندسی پاسخ مشخصی در نمودار مشتق دوم قائم میدان دارند؛ در حالی که پاسخ مغناطیسی این چشمه‌ها در نمودار میدان مغناطیسی وضوح کمتری دارد. در ادامه برای تعیین شاخص ساختاری از معیار تغییرناپذیری اکستریم‌های تبدیل DEXP با تغییر مرتبه مشتق‌گیری استفاده می‌شود.

برای تحلیل DEXP، از مشتق قائم میدان استفاده



شکل ۷. الف) میدان مغناطیسی، ب) مشتق دوم میدان در ارتفاع ۷۰ متری از سطح اندازه‌گیری و ج) تحلیل چندمقیاسی و روش هندسی تخمین عمق.



شکل ۸. الف) مشتق قائم میدان در ارتفاع ۵۰ متری، تبدیل DEXP به دست آمده برای: (ب) سیگنال تحلیلی، (ج) سیگنال تحلیلی مرتبه اول و (د) سیگنال تحلیلی مرتبه دوم مشتق قائم میدان. شاخص سفید محل بیشینه‌ها را نشان می‌دهد.

میدان چندمقیاسی وزن‌دهی شده است، کمیت‌های چشمه با توجه به مقادیر بیشینه یا کمینه تبدیل DEXP تعیین می‌شود. اعمال این روش‌ها روی داده‌های مصنوعی آمیخته به نوفه نشان داد که حتی در شرایطی که از مشتق‌های مرتبه بالا استفاده می‌شود، نتایج از کیفیت و دقت خوبی برخوردارند. در واقع یکی از مزایای مهم این دسته از روش‌ها پایداری و حساس نبودن آن‌ها به سطح نوفه در میدان مشاهده شده است. زیرا عملگر ادامه فراسو همانند یک فیلتر پایین‌گذر از تقویت نوفه‌ها هنگام فرایند مشتق‌گیری جلوگیری می‌کند. از دیگر مزایای این روش‌ها سرعت زیاد است، به طوری که میدان چندمقیاسی برای حجم زیادی از داده‌ها در زمان کمی تولید می‌شود. با اعمال جداگانه هر دو روش روی داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده در کشور سوئد نتایج یکسانی به دست آمد که می‌تواند بیانگر صحت و اعتبار آن باشد.

تشکر و قدردانی

از سازمان زمین‌شناسی سوئد برای داده‌ها و نقشه‌ها و همچنین از پروفیسور موریتزیو فدی برای راهنمایی‌های ارزنده‌شان قدردانی می‌شود.

از آنجایی که در شرایط واقعی نتایج فقط یک روش خاص قابل اعتماد نیست، همواره لازم است از روش‌های مختلفی برای تخمین چشمه‌ها استفاده شود. روش‌های هندسی تخمین عمق و تبدیل DEXP مبانی کاملاً متفاوتی از یکدیگر دارند و دو روش مستقل برای تخمین مشخصه‌های چشمه‌های مغناطیسی یا گرانی هستند. بنابراین هر دو روش برای تفسیر داده‌های واقعی به کار گرفته شدند. با توجه به تطابق عمق و موقعیت افقی به دست آمده از این دو روش، اعتبار کمیت‌های به دست آمده و اعتماد به آن‌ها به افزایش می‌یابد.

عمر نتیجه‌گیری

در این مقاله دو روش چندمقیاسی که اساس آن‌ها رفتار میدان‌های پتانسیل در ارتفاع‌های مختلف است، بررسی شد. با استفاده از این روش‌ها موقعیت و عمق چشمه تعیین می‌شود. در روش اول موقعیت چشمه با یک روش هندسی بدون نیاز به هرگونه اطلاعات اولیه با دقت خوبی تخمین زده می‌شود. شاخص ساختاری با مفهوم تابع مقیاس‌ده برآورد و در نهایت درجه اعتبار کمیت‌های به دست آمده با معیار سازگاری مرزها سنجیده شد. در روش DEXP که در واقع

مراجع

- Blakely, R. J. and Hassanzadeh, S., 1981, Estimation of depth to magnetic source using maximum entropy power spectra with application to the Peru- Chile Trench in Nazca Plate; Crustal formation and Andean Convergence, 667-682, Geological Society of America Memoir 154, Boulder, CO.
- Fedi, M. and Rapolla, A., 1997, Space-frequency analysis and reduction of potential field ambiguity, *Annali Di Geofisica*, XL(5), 1189-1200.
- Fedi, M. and Florio, G., 2006, SCALFUN: 3D analysis of potential field scaling function to determine independently or simultaneously structural index and depth to source, *SEG Expanded Abstract*, 25, 963-967.
- Fedi, M., 2007, DEXP: a fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources, *Geophysics*, 72(1), I1-I11.
- Fedi, M. and Pilkington, M., 2012, Understanding imaging methods for potential field data, *Geophysics*, 77(1), G13-G24, doi: 10.1190/geo2011-0078.1.
- Fedi, M., Florio, G., and Cascone, L., 2012, Multiscale analysis of potential fields by a ridge consistency criterion: the reconstruction of the Bishop basement, *Geophys. J. Int.*, 188, 103-114.
- Florio, G., Fedi, M. and Rapolla, A., 2009, Interpretation of regional aeromagnetic data by multiscale methods: the case of Southern Apennines (Italy), *Geophys. Prospect*, 57, 479-489.
- Geological survey of Sweden, 2005, Airborne geomagnetic and geological maps of Sweden.
- Hartman, R. R., Teskey, D. J. and Friedberg, J. L., 1971, A system for rapid digital aeromagnetic interpretation, *Geophysics*, 36, 891-918.
- Li, X., 2006, Understanding 3D analytic signal amplitude, *Geophysics*, 71, L13-L16.
- 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 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.
- Peters, L. J., 1949, The direct approach to magnetic interpretation and its practical application, *Geophysics* 14, 290-320.
- Phillips, J. D., 1979, ADEPT: A program to estimate depth to magnetic basement from sampled magnetic profiles, Open-File Report, 79-367, U.S. Geological Survey.
- Rajagopalan, S. and Milligan, P., 1994, Image enhancement of aeromagnetic data using automatic gain control, *Exploration Geophysics*, 25, 173-178.
- Ravat, D., Pignatelli, A., Nicolosi, I. and Chiappini, M., 2007, A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data, *Geophysical Journal International*, 169, 421-434.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J. and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*, 55, 80-91.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003, A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data, *Geophysics*, 68, 1952-1961.
- Salem, A., Williams, S., Samson, E., Fairhead, D., Ravat, D. and Blakely, R. J., 2010, Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic Tilt-Depth method, *Exploration Geophysics*, 41, 198-209.
- Smith, R. S. and Salem, A., 2005, Imaging the depth, structure, and susceptibility from magnetic data, The advanced source parameter imaging method, *Geophysics*, 70(4), L31-38.
- Skillbrei, J. R., 1993, The straight-slope method for basement depth determination revisited, *Geophysics* 58, 593-595.
- Spector, A. and Grant, F. S., 1970, Statistical model for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35(2), 293-302.
- Stavrev, P. and Reid, A. B., 2007, Degrees of homogeneity of potential fields and structural indices of Euler deconvolution, *Geophysics*, 72(1), L1-L2.
- Stavrev, P. and Reid, A. B., 2010, Euler deconvolution of gravity anomalies from thick contact/fault structures with extended negative structural index.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH - A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, 47, 31-37.
- Thurston, J. B. and Smith, R. S., 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, susceptibility contrast using the SPI method, *Geophysics*, 62, 807-813.
- Werner, S., 1953, Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies, *Sveriges Geologiska Undersök., Arsbok*, 43(6), series C, no. 508.