فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحهٔ ۱۱۱– ۱۲۱

بر آورد عمق و شاخص ساختاری چشمههای مغناطیسی با استفاده از روشهای تحلیل چندمقیاسی و DEXP

جمالالدين بنىعامريان'، بهروز اسكويي * و اسداله جوع عطا بيرمي *

۱ . دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران ۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران ۳. استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، ایران

(دریافت: ۱۰/۱۱/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیدہ

در این مقاله دو روش برمبنای استفاده از میدان مغناطیسی در ارتفاع یا مقیاسهای مختلف برای تخمین عمق و شاخص ساختاری چشمههای بی هنجاری مغناطیسی بررسی می شوند. در روش اول، موقعیت و شاخص ساختاری چشمه در دو مرحله به طور مستقل از هم تخمین زده می شود. عمق چشمه با یک روش هندسی و بر اساس مفهوم مرزها (Ridges) تعیین می شود. سپس شاخص ساختاری (Structural index) بهره می و شاخص کرد می شود. سپس شاخص ساختاری (Structural index) بهره می و شرمی می شوند. در روش اول، موقعیت و شاخص ساختاری چشمه در دو مرحله به طور مستقل از هم تخمین زده می شود. می مو چشمه با یک روش هندسی و بر اساس مفهوم مرزها (Ridges) تعیین می شود. سپس شاخص ساختاری (Structural index) بهره گیری از مفهوم تابع مقیاسده (Scaling function) در روش CalFun ScalFun می شود. سپس شاخص ساختاری چشمه با وزن دهی میدان بهره گیری از مفهوم تابع مقیاس ده (Stanctural می شود. در روش دوم، بر آورد عمق و شاخص ساختاری چشمه با وزن دهی میدان شدید باشد، از مشتق میدان در تحلیل چندمقیاسی استفاده می شود. در روش دوم، بر آورد عمق و شاخص ساختاری چشمه مواد می میدان و چندمقیاسی استفاده می شود. در روش دوم، بر آورد عمق و شاخص ساختاری چشمه مواد میدان و چندمقیاسی توسط یک تابع مقیاس ده مناسب انجام می گیرد. این تابع مقیاس ده وابسته به نوع میدان پتانسیل، ساختار چشمهٔ مولد میدان و توندمقیاسی ادر ام فراسو است. با استفاده از این میدان وزن داده که به اصطلاح تبدیل DEXP میدان نامیده می شود، می توان محل و شاخص ساختاری چشمه را بر آورد کرد. به این ترتیب که محل مقادیر بیشینه و کمینهٔ میدان PEXP میدان نامیده می شود، می توان محل و انخص ساختاری چشمه را بر آورد کرد. به این ترتیب که محل مقادیر بیشینه و کمینهٔ میدان PEXP میدان نامیده می شود، می توان محل و انخص ساختاری چشه را داده های مصنوعی تولد می می مونوی تولی می می می منوی توسخ می موردی که تابع مقیاس ده به می می موردی می مود، می مود، می مود، می و می می می مود، می مونوی تول ما داده و مونوی و دان می مود. می و می می می و می می و می می و می می می و می می خوست می ساخی می می می و در این می و می می و می می و می می می و می می و می می می و می می و می می و می می می و می می و می می و می می و می می و می

واژههای کلیدی: ادامهٔ فراسو، تحلیل چندمقیاسی، تخمین عمق، چشمهٔ مغناطیسی، شاخص ساختاری، مشتق میدان.

۱. مقدمه

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 همهٔ 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 گرنت، ۱۹۷۰، فیلیپس، ۱۹۷۹؛ بلیکلی و حسنزاده، ۱۹۸۱؛ راوات و همکاران، ۲۰۰۷)، واهمامیخت ورنر (ورنر، ۱۹۵۳؛ هارتمن و همکاران، ۱۹۷۱)، سیگنال تحلیلی (نبیقیان، ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴)،

واهمامیخت اویلر (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) (راجاگپلان و میلگان، ۱۹۹۴؛ تورستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ اسمیت و سالم، ۲۰۰۵؛ سالم و همکاران، ۲۰۱۰)، تبدیل موجک پیوستهٔ ۲۰۰۲ (فدی و راپولا، ۱۹۹۷). این روش ها معمولاً برای چشمههایی با شکل هندسی ساده خوب عمل میکند و مستقل از پذیرفتاری مغناطیسی هستند. فدی و فلوریو (۲۰۰۶) روش های تخمین عمق و شاخص ساختاری را به طورکلی به پنج گروه تقسیم کردند و قابلیت های کلی هر روش را بیان کردند. در شرایط

*نگارنده رابط:

E-mail: boskooi@ut.ac.ir

ناچیز باشد، عمق بهدست آمده از این روش ها را می توان به عنوان مقدار کمی نهایی در نظر گرفت. اغلب اوقات این عمق تخمینی نقطهٔ شروع مناسبی برای تفسیر ساختاری، وارونسازی و مدلسازی است. در سال های اخیر روش های مختلفی تحت عنوان روش های چندمقیاسی معرفی شدهاند که عمدتاً بر مبنای این واقعیت هستند که میدان های پتانسیل و تغییرات آن ها تابع توان مشخصی از فاصله تا چشمه است. با بهره گیری از این خاصیت، مطالعهٔ میدان در ارتفاع یا مقیاس های مختلف اطلاعات سودمندی از عمق و ساختار تقریبی چشمه فراهم می کند. در این تحقیق از میان روش های چندمقیاسی بر مبنای روش هندسی و روش جدید تحلیل چندمقیاسی بر مبنای روش هندسی و ساز گاری مرزها (فدی و همکاران، ۲۰۱۲) و DEXP (فدی،

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 اندازه گیری میدان در چند ارتفاع مختلف بهندرت امکان پذیر است، ابتدا میدان پتانسیل چندمقیاسی با استفاده از ادامهٔ فراسوی دادهها به ارتفاعهای مختلف محاسبه میشود. مقادیر بیشینه یا

كمينة ميدان يتانسيل همكن با توجه به رفتار اين ميدانها نسبت به فاصله از چشمه، در ارتفاعهای مختلف در امتداد یک سری خطوط راست به نام مرزها قرار می گیرند (فلوريو و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹). با برونيابي اين مرزها تا زیر سطح اندازه گیری 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 نقطهٔ تکین چشمههایی با شکل هندسی ساده مانند کره و استوانهٔ افقی، در مرکز و نقطهٔ تکین ساختارهایی مانند دایک، سطح تماس و استوانهٔ عمودی در بالای آنها قرار دارد (فلوريو و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹). شکل ۱ مفهوم مرزها و روش هندسی تخمین عمق را برای خطی از دوقطبی های 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 می شود (فدی و فلوریو ۲۰۰۶، فدی، ۲۰۰۷، فلوریو و همکاران ۲۰۰۹). اساس این روش مفهوم تابع مقیاس ده برای میدان های پتانسیل است که برای تخمین همزمان یا مستقل شاخص ساختاری و عمق چشمه کاربرد دارد. تابع مقیاس ده به صورت مشتق لگاریتم میدان پتانسیل نسبت به لگاریتم ارتفاع تعریف می شود (فدی، ۲۰۰۷):

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



(1)

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 کمینهٔ میدان بهدست آمدهاند. (ب) بیهنجاری مغناطیسی برای خطی از دو قطبیهای در عمق ۲۰ متری.

که در آن، T، تابع مقیاسده و f میدان در ارتفاع z است. هر میدان پتانسیل نیوتنی از جمله میدانهای گرانشی و مغناطیسی و مشتقهای آن از مرتبهٔ n با رابطهٔ (۲) تعریف میشوند (فدی، ۲۰۰۷):

$$f(\mathbf{r}) = k \int \frac{\partial^n}{\partial z^n} \frac{M(r_0)}{\|\mathbf{r} - r_0\|_2} d^3 \mathbf{r_0},\tag{Y}$$

که در آن، k یک ثابت فیزیکی است که به ماهیت میدان بستگی دارد؛ *M*، چگالی یا مغناطش و **r** و **r** و **r** به ترتیب مختصات نقطهٔ اندازه گیری و محل چشمه است. با فرض اینکه *f* میدان گرانشی یک تکقطبی نقطهای در *f* میدان گرانشی *یک تکقطبی نقطهای در f* با چگالی *M* باشد، رابطهٔ (۳) برای *f* برقرار است:

$$f_1(\mathbf{r}) = M \frac{(z-z_0)}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0\|_2^2}, \tag{(4)}$$

در این رابطه ثابت K برابر ۲ فرض شده است. برای سادگی می توان فرض کرد که چشمه در نقطهٔ (*۳۵(۵٫۵٫۵)* قرار گرفته باشد؛ در این صورت با توجه به رابطهٔ (۳) میدان در نقطهٔ (*۳(۵٫۵٫۶)* با رابطه (۴) محاسبه می شود:

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

برای این میدان تابع مقیاس ده از رابطهٔ (۵) به دست می آید: $\tau_1(z) = -\frac{2z}{(z-z_0)}$ (۵)

این نتایج محدود به میدان گرانشی نیست و تابع مقیاس ده را می توان برای مشتق های میدان گرانشی، میدان مغناطیسی (حالتی که n=2) و مشتق های آن محاسبه کرد. به طور کلی برای مشتق قائم مرتبه *n*مم میدان پتانسیل نیوتنی یک چشمهٔ نقطه ای تابع مقیاس ده با رابطهٔ (۶) محاسبه می شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$f_n(z) = \frac{1}{(z - z_0)^{n+1}},$$
 (9)

بنابراین، تابع مقیاسده برای مشتق قائم مرتبهٔ *n* از رابطهٔ (۷) بهدست می آید:

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

که در آن، Zo، عمق تا چشمه و Ns، شاخص ساختاری نسبت به میدان fn است. برای میدانهای گرانشی و مغناطیسی به ترتیب n=1 و n=2 است. بنابراین تابع

مقیاسده، تابعی از عمق تا چشمه؛ 20، شاخص ساختاری و Z، ارتفاع سطح است. با استفاده از مقدار این تابع در نقطهٔ z=z0 شاخص ساختاری چشمه محاسبه می شود:

(A)

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

$$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0 \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0 \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad z_0 \quad \text{inf} \quad z_0 \quad z_0$$

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

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

$$\tau_n(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{z}}_0) = -N_s \frac{1-\hat{\mathbf{z}}_0 q}{1-\mathbf{z}_0 q},$$
 (1.)

این تابع برحسب مقدار q، بسته به اینکه \widehat{z}_0 کوچک تر، بزرگ تر یا برابر عمق واقعی تا چشمه، z₀، باشد، تابعی صعودی، نزولی یا ثابت است. علاوه بر این برای هر مقدار تخمینی \widehat{z}_0 :

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

رابطه (۱۱) نشان میدهد که بر آورد شاخص ساختاری با استفاده از تم از عمق چشمه مستقل است.

ScalFun شاخص ساختاری تخمینی که با روش ScalFun شاخص ساختاری تخمینی که با روش scalFun به دست می آید نسبت به عمق اولیهٔ \hat{s} تقریباً پایدار است. در روش ScalFun شاخص ساختاری با استفاده از تمامی مرزهای به کار گرفته شده در روش هندسی تخمین عمق برهای به کار گرفته شده در روش هندسی تخمین عمق با معادلهٔ ۱۱ و قراردادن عمق به دست آمده از روش هندسی به جای \hat{c} تخمین زده می شود. جواب های به دست آمده (عمق و شاخص ساختاری) برای هر دسته از مرزهایی که مربوط به یک چشمهٔ مشترک هستند، با معیار سازگاری مرزها (فدی و همکاران، ۲۰۱۲) که در ادامه شرح داده می شود، ارزیابی می شود.

اعتبار جوابهای بهدست آمده بر اساس معیار

سازگاري مرزها مطابق دستورالعمل زير سنجيده مي شود. در صورتی که میدان های منطقه ای، آثار تداخلی (Interference effects) چشمه های مجاور (که در ارتفاعهای بالاتر تشدید میشوند) و مقدار نوفهٔ موجود شایان توجه باشد، مرزها انحنا پیدا میکنند و شاخص ساختاری بهدست آمده از تحلیل دو یا چند مرز مربوط به یک چشمهٔ یکسان ممکن است کاملاً متفاوت باشند. در این صورت جوابهای بهدست آمده از تحلیل چندمقیاسی میدان معتبر نخواهد بود. بر اساس این معیار، شاخص ساختاری بهدست آمده از تمامی مرزهایی که به یک چشمهٔ یکسان منتهی میشوند، باید یکسان باشد. اگر مقادیر بهدست آمده از مرزهای مختلف متفاوت باشند، باید از مشتق.های میدان استفاده شود تا اثر تداخلی چشمههای مجاور یا میدان منطقهای کاهش پیدا کند و شاخصهای ساختاری یکسانی از تحلیل مرزها برای هر چشمه بهدست آید. در این روش چون فرایند مشتق گیری (فيلتر بالاگذر) و ادامهٔ فراسو (فيلتر يايين گذر) همزمان استفاده مي شوند، در نتيجه كل فرايند نسبت به نوفه پايدار است. عمل مشتق گیری سبب می شود گسترش افقی بیهنجاری به دلیل افزایش نرخ تضعیف میدان کاهش پیدا کند. هرچند از هر مشتق گیری جهتی می توان استفاده کرد، اما از آنجا که در مشتق گیری قائم هیچ تغییر فازی رخ نمیدهد، این فرایند ارجحیت دارد.

برای تضعیف اثر بسامدهای (frequeny) بالا که ناشی از نوفهها و تودههای سطحی است، می توان از ارتفاع یا مقیاس های پایین در فرایند ادامهٔ فراسو چشم پوشی کرد. همچنین تأثیرات میدان های تداخلی چشمه های مجاور یا میدان های منطقه ای را می توان با درنظرنگرفتن مقیاس ها یا ارتفاع های بیشتر حذف کرد. بنابراین اگر مقیاس ها (کمترین و بیشترین ارتفاع ادامهٔ فراسو) به درستی انتخاب شوند، مرز ها خطوط مستقیمی خواهند بود و روش هندسی می تواند عمق را به درستی تخمین بزند و تمام مرز هایی که به یک چشمهٔ یکسان مربوط هستند، مقادیر یکسانی برای شاخص ساختاری به دست می دهند. این ساز گاری نشان دهندهٔ اعتبار

عمق و شاخص ساختاری تخمینی خواهد بود. چنانچه تأثیرات تداخلی شدید باشند، حتی اگر مرزها خطوط مستقیم باشند، شاخصهای ساختاری بهدستآمده از مرزهای مختلف برای یک چشمه سازگار نخواهند بود. در این حالت نیز برای بهدستآوردن جوابهای معتبر باید مشتقهای مرتبهٔ بالاتر تحلیل شوند (فدی و همکاران، مشتقهای مرتبهٔ بالاتر تحلیل شوند (فدی و همکاران، رحال مرحلهٔ اصلی است: الف. تولید میدان چندمقیاسی با استفاده از یک الگوریتم بهینه شدهٔ ادامهٔ فراسو؛ ب. تخمین موقعیت چشمه با استفاده از یک روش هندسی؛ ج. تخمین شاخص ساختاری در امتداد هر مرز با استفاده از روش شاخص دارزیابی نتایج با معیار سازگاری مرزها.

۳. روش DEXP

روش DEXP بر مبنای مقیاس دهی میدان در مقیاس های (ارتفاع های) مختلف با توان مناسبی از ارتفاع است. تابع مقیاس ده در این روش تابعی از ارتفاع، توان مقیاس ده (و در نتیجه شاخص ساختاری) و مرتبهٔ میدان است. تبدیل DEXP میدان پتانسیل با رابطهٔ (۱۲) محاسبه می شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha} f(h_i) =$$
(11)
$$|h_i|^{\frac{N}{2}} f(h_i), \qquad i = 1, 2, \dots, l$$

که در آن، *h*i مقیاس یا ارتفاع ادامهٔ فراسو و *l* تعداد مقیاس ها برای تولید میدان DEXP است. با توجه به مبانی این روش در صورتی که تابع مقیاس ده به درستی انتخاب شود، مقادیر کمینه یا بیشینهٔ میدان DEXP منطبق بر محل چشمه های میدان پتانسیل هستند. به عبارت دیگر با تعیین بیشینه های میدان DEXP موقعیت افقی و عمق چشمه بیشینه های میدان OEXP موقعیت افقی و عمق چشمه مجاور یا میدان مورتی که تأثیرات تداخلی چشمه های مشتق های میدان در رابطهٔ (۱۲) استفاده کرد. در این حالت تبدیل DEXP مشتق مرتبهٔ *n*مٔ میدان از رابطهٔ کلی (۱۳) محاسبه می شود (فدی و پیلکینگتون، ۲۰۱۲):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha_n} \frac{\partial^n f(h_i)}{\partial z^n} =$$
(1)")

$$|h_i|^{\frac{(n+1)}{2}} \frac{\partial^{n} f(n_i)}{\partial z^n}, \qquad i = 1, 2, \dots, l$$

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 دامنهٔ سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی کاملاً مستقل از جهت میدان، بردار مغناطیس شوندگی یا مغناطیس باقی مانده است (نبیقیان، 1947 و ۱۹۷۴؛ سالم و راوات، ۲۰۰۳؛ لی، ۲۰۰۶). بنابراین تبدیل DEXP آن نیز به جهت بردار مغناطیس شوندگی یا میدان زمینه وابسته نیست. درمورد روش هندسی جهت میدان ممکن است شیب مرزها را تغییر دهد، اما در نهایت نقطهٔ همگرایی آن ها ثابت می ماند. بنابراین یکی از مزیت های روش های چندمقیاسی وابسته نبودن آنها به زاویهٔ میل و انحراف است.

۲. کاربرد روش تحدیل چندمقیاسی و DEXP روی
 دادههای مصنوعی

شکل ۲-الف، بی هنجاری مغناطیسی و مشتق اول قائم آن را برای سه دایک ناز ک مغناطیسی نشان می دهد. این مدل در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. خاصیت مغناطیس پذیری دایکها یکسان است و عمق تا سطح بالایی به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۱۰ متر است. مغناطش ۲۸/۳ و فقط القایی است. زاویهٔ میل و انحراف میدان خارجی به ترتیب ۵۰ و ۵ درجه است. میدان مغناطیسی تولید شده با نوفهٔ گاو سی با انحراف معیاری برابر با ۳ درصد دامنهٔ بی هنجاری مغناطیسی آمیخته شده است.

10

Depth(m) 30 40

> 50 60

100

200

300

با افزایش مرتبهٔ مشتق میدان چشمه های سطحی با وضوح بیشتر و چشمههای عمیق تر با وضوح کمتری تصویر می شوند. چنانچه توان مقیاس ده و در نتیجه شاخص ساختاری درستی برای تبدیل DEXP میدان به کار رفته باشد، با تغییر مر تبهٔ مشتق گیری محل بیشینه های میدان DEXP و در نهایت عمق و محل تخمینی چشمه ها تغییر اند کی خواهد دا شت. با است فاده از این معیار می توان برای تخمین توان مقیاس ده استفاده کرد (فدی، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه ادامهٔ فراسوی داده ها فرایندی بسیار پایدار است، روش DEXP نسبت به سطح نو فهٔ موجود در داده یا یدار خوا هد بود؛ حتی در شرايطي كه از مشتق هاي مرتبة بالا استفاده شود. با توجه به رفتار دوقطبی چشـمه های مغناطیسـی، برای هر چشـمهٔ مغناطیسے تبدیل DEXP میدان دارای یک بیشینه و یک کمینه است که چشمه بین این دو نقطه قرار می گیرد. در این شرايط براي تخمين بهتر محل چشمه مي توان از تبديل DEXP ميدان منتقل شده به قطب يا دامنه سيگنال تحليلي ميدان استفاده كرد. در اين حالت شكل دوقطي ميدان DEXP برطرف مي شود و تنها يک نقطهٔ بيشينه وجود خواهد داشت. هر دو روش بررسی شده از سر عت زیادی برخوردارند و به آسانی می توان از آن ها برای تحلیل حجم زیادی از دادهها استفاده کرد.

ذکر این نکته لازم اســت که زاویهٔ میل و انحراف و به عبارتی دیگر جهت گیری میدان ممکن اســت تنها شــکل

(mT/m)

o st VD

5

800

800



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

400

Distance(m)

500

600

700

با توجه به اینکه تأثیرات تداخلی چشـمه ها روی همدیگر شدید است، مرزهای به دست آمده از میدان چندمقیا سی میدان مغناطیسی خطوط را ستی نخواهد بود و جواب های به دست آمده از تحلیل این مرز ها نمی تواند معتبر باشد؛ بنابراین مشتق قائم اول برای تخمین عمق و ساختار چشمهها تحليل مي شود. همچنين براي تضعيف اثر بازدار ندهٔ نو فه ها از مقیاس های پایین صرفنظر مى شود. در نهايت براى توليد ميدان چندمقياسي و تبديل DEXP، مشــتق قائم ميدان از ارتفاع ۵ مترى با تغييرات ارتفاعی ۳/. متر تا ۴۰ متری از سطح اندازه گیری ادامهٔ فراسو مي شود. شكل ۳ ميدان چندمقياسي، تبديل DEXP و مرز ها را براي اين بي هنجاري نشان مي دهد. شاخص ساختاری برای این ساختار برابر ۱ فرض شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد اکسترممهای میدان DEXP موقعیت مدل را نشان می دهد، اما در مورد میدان مغناطیسی به خاطر رفتار دوقطبی میدان، دو اکسترمم وجود دارد که موقعیت افقی چشــمهٔ مورد نظر بســته به جهت میدان مغناطیسے بین دو اکسترمم قرار می گیرد (شکل ۳-ب). شکل ۳-ج نشان می دهد که چگونه با استفاده از روش هندسی و بدون نیاز به شاخص ساختاری عمق همهٔ چشمهها بهدرستی تخمین زده میشود.

با استفاده از معادلهٔ ۱۱ در امتداد مرزها می توان شاخص ساختاری چشمهها را محاسبه کرد. برای هر دایک مرزهای آبی رنگ (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 می دهد. با توجه به معادلهٔ ۱۱ عرض از مبدأ خط برازش شده در ترسیم π بر حسب qمعادل اندیس ساختاری است. مقدار عرض از مبدأ خط برازش شده در شکل های ۴-الف تا ۴-ه به ترتیب برابر است با ۲/۱-، ۲/۱-، ۲/۲-، ۲/۱-، ۲/۳-، از آنجایی که با مشتق اول قائم تحلیل شده است، مقدار شاخص ساختاری برابر است با قدر مطلق عرض از مبدأ به دست آمده (تقریباً ۲)

منهای مرتبهٔ مشتق میدان. مقدار شاخص ساختاری مرزهای منتهى به يک چشمهٔ واحد تقريباً يکسان هستند و شرط معيار سازگاری مرزها را بر آورده می کنند. مقدار خطا در تعیین اين مشخصه با توجه به نوفة افزوده شده به داده ها طبيعي است. ضمن اینکه خطای محاسباتی و عدم قطعیت بالا نیز همواره در تمامي روش هاي ژئوفيزيکي تعيين پارامترهاي چشمه وجود دارد. از طرفی تعیین شاخص ساختاری فرایندی ناپایدار است که می تواند متأثر از نوفهها و تأثیرات تداخلی و میدان زمینه باشد. در مورد دایک سوم مقدار تعیین شده برای این کمیت در مقایسه با چشمهٔ اول از دقت کمتری برخوردار است که ممكن است به دلیل تأثیرات تداخلی قوی تر چشمه های مجاور روی آن باشد. این مسئله قطعاً مرزهای تولیدشده و در نتیجه دقت تخمين شاخص ساختاري را براي اين چشمه تحت تأثير قرار میدهند. اما با این حال مقدار تعیینشده برای شاخص ساختاري دايك سوم يعني ٧/٠ و ١/٣ پذيرفتني است. با توجه به شکل ۲-ب دايک اول در فاصلهٔ بيشتري از دو چشمه ديگر واقع شده است؛ در نتیجه میدان چشمه های دیگر تأثیر کمتری روی آن دارد و شاخص ساختاری آن از دقت بیشتری يرخوردار است.



شکل ۳. (الف) میدان چندمقیاسی، (ب) میدان DEXP، اندیس ساختاری برابر ۱ فرض شده است و (ج) مرزهای میدان چندمقیاسی که برمبنای مقادیر بیشینه یا کمینهٔ میدان چندمقیاسی به دست می آیند.

برای به تصویر کشیدن بهتر چشمه های کم عمق یا عمیق بهره گرفت. به این معنی که مشتق های مرتبهٔ پایین چشمه های عمیق تر و مشتق های مرتبهٔ بالاتر چشمه های کم عمق را بهتر به تصویر می کشند. زیرا فرایند مشتق گیری اثر چشمه های سطحی را تقویت و پاسخ چشمه های عمیق را تضعیف می کند؛ به عنوان مثال چشمهٔ دوم در شکل ۵-الف در مقایسه با شکل ۵-ج وضوح بیشتری دارد. درخور توجه است که با وجود اینکه تا مشتق مرتبهٔ چهارم میدان استفاده شده است، حتی با وجود نوفهٔ 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 حوزهٔ مکان (نبیقیان، 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 آبیرنگ در شکل ۳-ج تحلیل شده است.



شکل ۵. تبدیل DEXP بهدستآمده برای: (الف) سیگنال تحلیلی مرتبهٔ صفرم مشتق قائم میدان، (ب) سیگنال تحلیلی مرتبهٔ اول مشتق قائم میدان و (ج) سیگنال تحلیلی مرتبهٔ دوم مشتق قائم میدان.

همان گونه که قبلاً اشاره شد تبدیل DEXP میدان مغناطیسی و مشتق های آن به خاطر ماهیت دو قطبی که دارند، تصویری دوقطبی تولید می کند. برای حذف شکل دوقطبي تبديل و در نتيجه تخمين بهتر موقعيت چشمه مى توان تبديل DEXP دامنهٔ سيگنال تحليلي ميدان (يا مشتق های میدان) را محاسبه کرد. شکل ۵ تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی میدان از مرتبه های مختلف را برای مشتق قائم میدان با فرض شاخص ساختاری ۱ نشان میدهد. با توجه به این شکل ها تبدیل DEXP دامنهٔ سیگنال تحلیلی با حذف شکل دوقطبی، میدان چشمهها را بهخوبی به تصویر می کشد و نقاط بیشینهٔ آن موقعیت چشمهها را برآورد می کند. علاوه بر این تبدیل DEXP تصویری بسیار نرم (smooth) و تقریبی از چگونگی توزیع چشمهها فراهم می کند. در واقع این روش را می توان به عنوان یک روش سریع و تقریبی برای مدلسازی در نظر گرفت که می تواند برای تولید یک مدل اولیه قبل از وارون سازیهای پیشرفته و دقیق مورد توجه قرار بگیرد (فدی و پیلکینگتون، ۲۰۱۲). تصاویر نشانداده شده در این شکل را صرفنظر از مقدار خاصیت فیزیکی چشمهها مي توان مدل بازسازي شدهٔ اوليه در نظر گرفت. اين روش از سرعت زیادی برخوردار است و به آسانی می توان از آنها برای تحلیل حجم زیادی از دادهها استفاده کرد. همچنین می توان با استفاده از مشتق های مرتبه های

مختلف (یا دامنهٔ سیگنال تحلیلی از مرتبه های مختلف)

۶۰ متر بوده است. شکل ۶ نقشهٔ زمین شناسی و بیهنجاری مغناطیسی منطقه را نشان میدهد. مطابق نقشهٔ زمین شنا سی دایکهای دیابازی نفوذی در جهت شمال غربی-جنوب شرقی در داخل سنگهای ریولیتی و شن ماسه گسترش دارند. خط سفید مشخص شده روی نقشهٔ مغناطیسی پروفیل تحلیل شده را نشان میدهد. ۵. اعمال روش روی دادههای واقعی در این بخش روش های معرفی شده در این مقاله روی بخشی از داده های مغناطیس سنجی هوابرد مربوط به مناطقی از کشور سوئد اعمال می شود. این داده ها در سال ۲۰۰۵ برداشت شده اند و تمامی تصحیحات و پردازش های لازم روی آن انجام گرفته است. در این عملیات ارتفاع میانگین پرواز از سطح زمین تقریباً برابر



(الف)



شکل ۶. (الف) نقشهٔ زمین شناسی و (ب) نقشهٔ میدان مغناطیسی (سازمان زمین شناسی سوئد، ۲۰۰۵)

۱۱۸

می شود. به این منظور مشتق قائم اول از ارتفاع ۵۰ متری از سطح اندازه گیری با فاصلهٔ ۵ متری تا ارتفاع ۵۰۰ متری، ادامهٔ فرا سو می شود. برای تضعیف نوفه و تأثیرات سطحی از ارتفاعهای پایین صرفنظر شده است. شاخص ساختاری بهطور تقریبی برابر ۱ درنظر گرفته می شود. شکل ۸-الف مشتق قائم میدان را پس از ادامهٔ فراسو در اولین مقیاس نشان مىدهد. با توجه به اين نمودار مشتق قائم ضمن برخورداري از درجهٔ تفکیک پذیری زیاد از نسبت سیگنال به نوفهٔ خوبی برخوردار است و پاسخ چشمههای عمیق و سطحی به آسانی قابل شــناسـایی هسـتند. در این حالت نیز برای تخمین بهتر محل چشمه ها از تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی میدان (مشتق اول قائم میدان) از مرتبه های مختلف استفاده می شود (شکل های ۸-ب، ۸-ج، ۸-د). با توجه به این شکل ها با افزایش مرتبهٔ سیگنال تحلیلی تفکیک پذیری چشمه ها افزایش پیدا می کند و چشمه های مولد بی هنجاری های مشاهده شده در شکل ۸-الف قابل شنا سایی ا ست. چون محل چشمه ها با تغيير مرتبة سيكنال تحليلي نسبتاً پايدار است، می توان نتیجه گرفت که مقدار ۱ برای شاخص ساختاری تقریباً صحیح است. نکتهٔ شایان توجه این است که با وجود استفاده از مشتق مرتبهٔ چهارم در شکل ۸-د همچنان نسبت سیگنال به نوفه، زیاد و تصویر چشمه ها واضح است.

شکل ۷-الف بی هنجاری مغناطیسی امتداد این یروفیل را نشان مي دهد. شايان ذكر است كه به دليل تداخل بی هنجاری های مجاور، مرز های به دست آمده از تحلیل میدان مغناطیسی برمبنای معیارهای معرفی شده پذیرفتنی نخواهند بود. همچنین با استفاده از مشتق اول قائم میدان چشمههای کمعمق شناسایی نمی شوند؛ بنابراین ابتدا عمق چشمهها با به کارگیری روش هند سی برای مشتق دوم قائم تخمین زده میشود. به این منظور مشتق دوم میدان از ارتفاع ۷۰ متری از سطح اندازه گیری تا ارتفاع ۵۰۰ متری از آن ادامهٔ فراسو می شود. شکل ۷-ب مشتق دوم قائم را در ارتفاع ۷۰ متری و شکل ۷-ج میدان چندمقیاسی و مرزها را نشان می دهد. نکتهٔ 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 مقایسهٔ شکل های ۷-ب و ۷-ج، همهٔ چشمههای تخمینزدهشده با استفاده از روش هندسی پاسخ مشخصي در نمودار مشتق دوم قائم ميدان دارند؛ در حالي که پاسخ مغناطیسی این چشمهها در نمودار میدان مغناطیسی وضوح کمتری دارد. در ادامه برای تعیین شاخص ساختاری از معیار تغییرناپذیری اکسترمم های تبدیل DEXP با تغییر مرتبهٔ مشتق گیری استفاده می شود.



برای تحلیل DEXP، از مشــتق قائم میدان اســتفاده

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

عمق.

فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵



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

از آنجایی که در شرایط واقعی نتایج فقط یک روش خاص قابل اعتماد نیست، همواره لازم است از روش های مختلفی برای تخمین چشمه ها استفاده شود. روش های هندسی تخمین عمق و تبدیل DEXP مبانی کاملاً متفاوتی از یکدیگر دارند و دو روش مستقل برای تخمین مشخصه های چشمه های مغناطیسی یا گرانی هستند. بنابراین هر دو روش برای تفسیر داده های واقعی به کار گرفته شدند. با توجه به تطابق عمق و موقعیت افقی به دست آمده از این دو روش، اعتبار کمیت های به دست آمده و اعتماد به آن ها به افزایش می یابد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله دو روش چندمقیاسی که اساس آنها رفتار میدانهای پتانسیل در ارتفاعهای مختلف است، بررسی شد. با استفاده از این روش ها موقعیت و عمق چشمه تعیین می شود. در روش اول موقعیت چشمه با یک روش هند سی بدون نیاز به هر گونه اطلاعات اولیه با دقت خوبی تخمین زده می شود. شاخص ساختاری با مفهوم تابع مقیاس ده بر آورد و در نهایت در جهٔ اعتبار کمیت های به دست آمده با معیار ساز گاری مرزها سنجیده شد. در روش DEXP که در واقع

میدان چندمقیاسی وزن دهی شده است، کمیتهای چشمه با توجه به مقادیر بیشینه یا کمینهٔ تبدیل DEXP تعیین می شود. اعمال این روش ها روی داده های مصنوعی آمیخته به نوفه نشان داد که حتی در شرایطی که از مشتق های مرتبهٔ بالا استفاده می شود، نتایج از کیفیت و دقت خوبی برخوردارند. در واقع یکی از مزایای مهم این دسته از روش ها پایداری و حساس نبودن آن ها به سطح نوفه در میدان مشاهده شده است. زیرا عملگر ادامهٔ فراسو همانند یک فیلتر پایین گذر از تقویت نوفه ها هنگام فرایند مشتق گیری جلو گیری می کند. از دیگر مزایای این روش ها سرعت زیاد است، به طوری که میدان می شود. با اعمال جدا گانهٔ هر دو روش روی داده های معناطیسی برداشت شده در کشور سوئد نتایج یکسانی به معناطیسی برداشت داند بیانگر صحت و اعتبار آن باشد.

تشكر و قدرداني

از سازمان زمین شناسی سوئد برای دادهها و نقشهها و همچنین از پروفسور موریتزیو فدی برای راهنمایی های ارزنده شان قدردانی می شود.

www.SID.ir

- 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.
- Gological 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 threedimensional 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 Undersok., Arsbok, 43(6), series C, no. 508.