

مقایسه روش‌های گوناگون برآورد عمق، مکان و نوع چشمه میدان‌های مغناطیسی و گرانی

جمال الدین بنی‌عامریان^۱، بهروز اسکویی^{۲*} و موریتریو فدی^۳

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

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

۳. استاد، گروه علوم زمین، زیست محیط و منابع دانشگاه ناپلز قدریکو ۲، ناپل، ایتالیا

(دریافت: ۹۴/۷/۱۵، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

در این مقاله برخی از متداول‌ترین روش‌های برآورد عمق و نوع ساختار چشمه‌های میدان پتانسیل (مغناطیسی و گرانی) از جمله روش‌های سیگنال تحلیلی یا گرادیان کل، تصویرسازی مشخصه‌های چشمه (Source Parameter Imaging-SPI)، تصویرسازی بهبودیافته مشخصه‌های چشمه، (Improved SPI-iSPI)، واهمامیخت اویلر (Euler deconvolution)، عدد موج محلی (Local wavenumber) و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اویلر (ANEUL) مورد بحث قرار می‌گیرد. این روش‌ها اغلب مبتنی بر مشتق‌های میدان و یا ترکیب‌های گوناگون آن هستند. سپس گروه دیگری از روش‌ها تحت عنوان روش‌های چندمقیاسی (multiscale) که در سال‌های اخیر برای تعیین عمق و شکل چشمه‌ها مطرح شده‌اند بررسی می‌شود. این روش‌ها همان‌گونه که از نام آنها پیدا است به تحلیل میدان در مقیاس‌های گوناگون می‌پردازند و عموماً پایداری بیشتری نسبت به نطفه دارند. برای درک بهتر روش‌های معرفی شده، این روش‌ها روی داده‌های مصنوعی تولید شده با مدلی که پی سنگ مغناطیسی را شبیه‌سازی می‌کند به کار می‌روند و سپس نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. علاوه بر این نشان داده می‌شود که چگونه با استفاده از نتایج روش‌های گوناگون می‌توان جواب‌های به دست آمده را اعتبارسنجی کرد. در این مقاله فقط به بررسی ساختارهای دوبعدی پرداخته می‌شود. در نهایت از این روش‌ها برای تحلیل داده‌های واقعی ناشی از یک ساختار دوبعدی مغناطیسی استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برآورد عمق، مشتق میدان، میدان گرانی، میدان مغناطیسی، تحلیل چندمقیاسی میدان پتانسیل، ادامه فراسو.

۱. مقدمه

به‌ویژه عمق باشد. برای مثال در بیشتر مواقع عمق برآوردی را می‌توان در حکم اطلاعات اولیه در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرارداد. در اکتشافات مخازن نفتی، عمق برآوردی پی سنگ مغناطیسی یا به عبارت دیگر ضخامت لایه رسوبی، به‌طور مستقیم در مدل‌سازی حوزه نفتی (برآورد حجم چشمه) به کار گرفته می‌شود (لی، ۲۰۰۶، هینزه و هم‌کاران، ۲۰۱۳). به این ترتیب برآورد ساختار پی سنگ با استفاده از عمق مغناطیسی، دید اولیه خوبی از مشخصه‌های مهم حوزه مورد نظر فراهم می‌کند. علاوه بر این، به علت سرعت و هزینه به نسبت کم آن، برآورد عمق به روش مغناطیسی در به نقشه درآوردن گسل‌ها، سطح تماس، چین‌خوردگی‌ها و ساختارهای نمکی، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. برآورد موقعیت برای چشمه‌های دوبعدی را می‌توان

هدف از تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (مغناطیسی و گرانی) تعیین مشخصه‌های چشمه‌های مولد میدان شامل موقعیت، شکل هندسی و تباین خاصیت فیزیکی (قابلیت مغناطیس‌پذیری یا چگالی) آنها است. با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌هایی که در عملیات گوناگون هوابرد، دریایی و زمینی جمع‌آوری می‌شود، در بسیاری از موارد مدل‌سازی آنها با روش‌های وارون بسیار زمان‌بر است. بنابراین در طی سالیان گذشته روش‌های خود کار و نیمه‌خود کار گوناگونی برای برآورد سریع و دقیق‌تر مشخصه‌های چشمه، توسعه یافته است (نیقیان و هم‌کاران، ۲۰۰۵a و ۲۰۰۵b). چون در بسیاری از موارد تعیین عمق اهمیت بیشتری دارد، اغلب این روش‌ها مستقل از خاصیت فیزیکی چشمه هستند. بنابراین تفسیر کمی ممکن است فقط شامل برآورد موقعیت چشمه

همکاران، ۲۰۰۹؛ فدلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ فلوریو و همکاران، ۲۰۰۹؛ عباس و همکاران ۲۰۱۴؛ عباس و فدلی، ۲۰۱۵). در این روش‌ها به بررسی میدان در مقیاس‌های گوناگون پرداخته می‌شود. این گروه از روش‌ها پایداری بسیار زیادی نسبت به نوفه دارند و استفاده از مشتق‌های بالا در آنها با حفظ پایداری نسبت به نوفه، امکان‌پذیر است. در دهه ۱۹۹۰ روش‌های خودکار برآورد عمق برای حالت سه‌بعدی نیز ابداع شد. این روش‌ها در واقع تعمیمی از حالت دوبعدی بودند که برای اعمال روی داده‌های گرید شده ایجاد شدند.

امروزه بسیاری از این روش‌ها در نرم‌افزارهای تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال از میان روش‌های گوناگون برآورد مشخصه‌های چشمه هیچ روشی همواره کامل نیست. به این معنی که نمی‌توان صرفاً نتایج یک روش خاص را به‌منزله نتایج قطعی در نظر گرفت. بنابراین در هر موردی لازم است که با توجه به کیفیت داده‌ها و هدف نهایی روش‌های گوناگونی به کار گرفته شوند تا بهترین نتایج با کمترین خطا به دست آید. هدف اصلی از این مقاله بررسی برخی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌هایی است که مقبولیت زیادی در اکتشاف و تفسیر پیدا کرده‌اند. به این منظور ابتدا یک ساختار به‌نسبت پیچیده مصنوعی تحلیل می‌شود. در نهایت این روش‌ها و روش‌های معرفی شده روی داده‌های واقعی ناشی از یک چشمه دوبعدی اعمال و نتایج آنها به‌منظور گزینش بهترین نتایج با هم مقایسه می‌شود.

۲. نظریه

در این بخش ابتدا مبانی نظری روش‌ها و مفاهیم بنیادی آنها شرح داده می‌شود:

۲.۱. سیگنال تحلیلی (Analytic signal)

شکل ریاضی تابع سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی با رابطه (۱) تعریف می‌شود (نیقیان، ۱۹۷۲، ۱۹۷۴):

با استفاده از داده‌های نیم‌رُخی عملی ساخت. اولین روش‌های برآورد عمق اغلب گرافیکی بودند و فقط برای بی‌هنجاری‌های یک چشمه مجزا کاربرد داشتند (اسملی، ۱۹۵۶؛ گرت و مارتین، ۱۹۶۶؛ کولومزین و همکاران، ۱۹۷۰). در این روش‌ها برای برآورد مشخصه‌های چشمه از ویژگی‌های گوناگون بی‌هنجاری مانند انطباق خمیدگی، شیب، پهنا در نصف دامنه و فاصله افقی بین نقطه‌های ویژه بی‌هنجاری استفاده می‌شود. در دهه ۱۹۷۰ روش‌های خودکار برآورد عمق جایگزین روش‌های گرافیکی شد. این روش‌ها اغلب بر مبنای استفاده از مشتق‌های جهتی میدان هستند. روش اولیو بر مبنای استفاده از مشتق‌های اول میدان برای حالت دوبعدی را تامپسون (۱۹۸۲) و در حالت سه‌بعدی را رید و همکاران (۱۹۹۰) معرفی کردند. مهم‌ترین مزیت این روش خودکار بودن آن برای برآورد موقعیت چشمه است اما برای این کار باید شکل هندسی ساختار به‌صورت اطلاعات اولیه وارد مسئله شود. تورستون و اسمیت (۱۹۹۷) روش SPI را ابداع کردند. در این روش از مشتق مرتبه دوم میدان استفاده می‌شود و با استفاده از مفهوم عدد موج محلی، عمق ساختار برآورد می‌شود. روش iSPI (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸) شکل بهبودیافته روش اخیر است که توانایی برآورد شاخص ساختاری را هم دارد. سالم و راوات (۲۰۰۳) با ادغام تعریف سیگنال تحلیلی مرتبه بالا (هسو، ۱۹۹۸) و معادله همگن اولیو روش خودکار ANEUL را ابداع کردند که به علت خودکار بودن، مقبولیت زیادی در تفسیر پیدا کرد. سالم و همکاران (۲۰۰۵) با کاربرد مفهوم عدد موج محلی و ترکیب آن با معادله‌های اولیو، روش عدد موج محلی ارتقا یافته را برای برآورد موقعیت و نوع چشمه معرفی کردند. همه این روش‌ها حساسیت بسیار زیادی نسبت به نوفه موجود در داده دارند و در صورتی که داده‌ها کیفیت مطلوبی نداشته باشد، جواب‌های دقیقی حاصل نمی‌شود. در سال‌های اخیر روش‌های چندمقیاسی برای برآورد مشخصه‌های چشمه معرفی شده‌اند (فدلی، ۲۰۰۷؛ فدلی و

این ویژگی سیگنال تحلیلی را می‌توان در تفسیر کیفی داده‌ها مورد استفاده قرار داد.

۲.۲. روش تصویرسازی مشخصه‌های چشمه

تورستون و اسمیت (۱۹۹۷) با معرفی مفهوم عدد موج محلی در حوزه میدان‌های پتانسیل، به منزله مشتق مکانی فاز محلی (رابطه (۵)) روش پُر کاربرد SPI را با هدف برآورد مشخصه‌های چشمه‌های دوبعدی توصیف کردند. بر مبنای تعریف عرضه شده عدد موج محلی در حالت دوبعدی با رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$k_x = \frac{\partial}{\partial x} \tan^{-1} \left(\frac{\partial T / \partial z}{\partial T / \partial x} \right) \quad (7)$$

شکل بازتر رابطه (۷) با رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$k_x = \frac{1}{|A|^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

با محاسبه نظری مشتق‌های افقی و قائم برای یک سطح تماس مغناطیسی (نیقیان، ۱۹۷۲) و در نظر گرفتن این نکته که مقدار عدد موج محلی در مرز سطح تماس بیشینه است، می‌توان عمق، زاویه شیب و تباین قابلیت مغناطیس‌پذیری محلی را با رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) در مرز سطح تماس محاسبه کرد (تورستون و اسمیت (۱۹۹۷)):

$$h = \frac{1}{k_0} \quad (9)$$

$$\text{dip} = \theta_0 + 2I - 90 \quad (10)$$

$$\chi = \frac{|A|_{x=0}}{2k_0 F_a c \sin(\text{dip})} \quad (11)$$

که در این رابطه‌ها: h عمق محلی، k_0 عدد موج محلی در مرز سطح تماس، dip شیب، θ_0 فاز محلی در مرز سطح تماس، I زاویه میل موثر، χ قابلیت مغناطیس‌پذیری، F_a میدان مغناطیسی زمین، و c تابعی از زاویه میل موثر است و جهت محور اندازه‌گیری و $x=0$ نشان‌دهنده مرز سطح تماس است و کمیت‌های فوق در این نقطه محاسبه می‌شوند. در استخراج این رابطه‌ها فرض بر این است که اثرات تداخلی بی‌هنجاری‌های مجاور وجود ندارد و ساختار دوبعدی

$$A = \frac{\partial T}{\partial x} - i \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

که در آن، T می‌تواند میدان گرانی یا شدت میدان مغناطیسی باشد. $i = \sqrt{-1}$ و x, z مختصات در جهت قائم و افقی است. قسمت حقیقی و موهومی سیگنال تحلیلی زوج تبدیل هیلبرت هستند. با این تعریف تبدیل فوریه سیگنال تحلیلی با رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$F(A) = F \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) (1 + \text{sgn}(k)) \quad (2)$$

که در آن، F نماد تبدیل فوریه، sgn تابع علامت و k عدد موج است. رابطه (۱) معادل است با:

$$A = |A| e^{i\theta} \quad (3)$$

که در آن، A دامنه سیگنال تحلیلی و θ فاز محلی است (براسول، ۲۰۰۰):

$$|A| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2} \quad (4)$$

و

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial T / \partial z}{\partial T / \partial x} \right) \quad (5)$$

با استفاده از مشتق‌های قائم مرتبه n ام، $T_n^z = \frac{\partial^n T}{\partial z^n}$ ، سیگنال تحلیلی از مرتبه دلخواه n ام با معادله (۶) تعریف می‌شود (هسو، ۱۹۹۸):

$$A_n = \frac{\partial T_n^z}{\partial x} \hat{i} - i \frac{\partial T_n^z}{\partial z} \hat{k} \quad (6)$$

سیگنال تحلیلی حساسیت زیادی نسبت به نوفه دارد زیرا فرایند مشتق‌گیری همانند یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند. با افزایش مرتبه سیگنال تحلیلی، این ناپایداری افزایش می‌یابد. برای ساختارهای دوبعدی شکل و دامنه سیگنال تحلیلی کاملاً مستقل از جهت و اندازه بردار مغناطیس‌شوندگی است. از آنجا که سیگنال تحلیلی ترکیبی از مشتق‌های میدان پتانسیل است، کاربرد آن پاسخ چشمه‌های عمیق (طول موج‌های بلند) را تضعیف می‌کند اما در عوض چشمه‌های سطحی (طول موج‌های کوتاه) با تفکیک‌پذیری (Resolution) بیشتری نمایان می‌شود. سیگنال تحلیلی ضمن کاهش دادن اثر تداخلی، چشمه‌های مجاور مرز چشمه‌ها را مشخص می‌کند. سیگنال تحلیلی چون همواره یک کمیت مثبت است، مانند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، شکل دوقطبی ندارد.

فرض اینکه محل چشمه دُبعدی $x=0$ باشد، مقدار بیشینه نسبی Δk با عمق چشمه رابطه عکس دارد:

$$\Delta k_{x=0} = \frac{1}{h} \quad (16)$$

از طرفی با حل معادله‌های (۱۵) و (۱۶) برای N و محاسبه آن در محل بیشینه عدد موج محلی، می‌توان اندیس ساختاری چشمه را برآورد کرد:

$$N = \frac{k_1}{k_2 - k_1} - 1 \quad (17)$$

نکته مهم در استفاده از روش iSPI این است که: (۱) چشمه باید دُبعدی باشد، به عبارت دیگر باید امتداد آن در یک راستا در مقایسه با جهت‌های دیگر بزرگ باشد، (۲) اثر تداخلی ناشی از بی‌هنجاری چشمه‌های مجاور کم باشد. در غیر این صورت جواب‌های به‌دست آمده از این روش قابل اعتماد نیست.

۲. ۴. روش پیشرفته عدد موج محلی (Enhanced local wave number- ELW)

این روش برای برآورد عمق، موقعیت و اندیس ساختاری چشمه‌های دُبعدی و سه‌بعدی (سالم و همکاران، ۲۰۰۸) به کار می‌رود. حالت دُبعدی این روش بر مبنای ترکیب عدد موج محلی افقی (رابطه (۷)) و تعریف دیگری از آن است که فاز آن ۹۰ درجه چرخیده است (عدد موج محلی قائم). با ترکیب این دو کمیت، معادله‌ای به‌دست می‌آید که از حل آن مشخصه‌های چشمه بدون نیاز به اطلاعات اولیه تعیین می‌شود. این تعریف جدید از عدد موج محلی با رابطه (۱۸) بیان می‌شود (سالم و همکاران، ۲۰۰۵):

$$k_z = \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{1}{|A|^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (18)$$

همان‌گونه که در روش iSPI توضیح داده شد، برای ساختارهای دُبعدی با فرض اینکه موقعیت چشمه (x_0, z_0) باشد عدد موج محلی با توجه به رابطه (۱۳) با فرمول (۱۹) به‌دست می‌آید:

$$k_x = \frac{(N+1)(z_0 - z)}{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (19)$$

که در این رابطه، (z_0, z) معادل h در رابطه (۱۳) است. به

یک سطح تماس است، در غیر این صورت این روش برآورد درستی از مشخصه‌های چشمه نمی‌دهد. عدد موج محلی نیز به علت استفاده از مشتق‌های مرتبه بالا، نسبت به نوفه بسیار ناپایدار است. در مورد چشمه‌های گرانی عمق ساختار با رابطه (۹) برآورد می‌شود.

۲. ۳. تصویرسازی بهبود یافته پارامترهای چشمه

با استفاده از مفهوم سیگنال تحلیلی مرتبه بالا (رابطه (۶))، عدد موج محلی مرتبه دوم با فرمول (۱۲) تعریف می‌شود (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸):

$$k_2 = \frac{\partial}{\partial x} \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}{\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z}} \right) \quad (12)$$

با ترکیب عدد موج محلی مرتبه اول و مرتبه دوم (رابطه (۷) و (۱۲)) می‌توان عمق و اندیس ساختاری را برای چشمه‌های دُبعدی مانند سطح تماس، دایک نازک و استوانه افقی به صورت خودکار و بدون هیچ پیش‌فرض یا وابستگی به جهت میدان، شیب و ویژگی‌های فیزیکی برآورد کرد.

با جای‌گذاری رابطه‌های ریاضی محاسبه شده مشتق‌های گوناگون میدان برای این ساختارها (رفورد، ۱۹۸۰؛ نیقیان، ۱۹۷۲) در رابطه‌های (۷) و (۱۲) و اجرای برخی ساده‌سازی‌ها، رابطه‌های کلی (۱۳) و (۱۴) برای عدد موج محلی مرتبه اول و دوم به‌دست می‌آید (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸):

$$k_1 = \frac{(N+1)h}{x^2 + h^2} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{(N+2)h}{x^2 + h^2} \quad (14)$$

که در آن، N اندیس ساختاری و مقدار آن برای سطح تماس، دایک و استوانه مغناطیسی (۰، ۱، ۲) و برای چشمه‌های مشابه گرانی به ترتیب (۱، ۰، ۱) است. h عمق x محل چشمه است. تفاضل k_1 و k_2 مقداری مستقل از نوع ساختار چشمه خواهد بود:

$$\Delta k = k_2 - k_1 = \frac{h}{x^2 + h^2} \quad (15)$$

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، بیشینه مقدار عدد موج محلی، موقعیت چشمه را برآورد می‌کند. بنابراین با

با این مقدمه به شرح مختصر روش واهمامیخت اولر که یک روش نیمه خودکار و بسیار پُر کاربرد برای برآورد عمق، شکل و مکان چشمه‌های مغناطیسی یا گرانی است می‌پردازیم.

این روش را تامپسون (۱۹۸۲) برای تفسیر داده‌های دُوبُعدی مغناطیسی معرفی کرد و سپس رید و همکاران (۱۹۹۰) آن را برای حالت سه‌بُعدی تعمیم دادند. روش اولر به منزله یک روش بنیادی همواره مورد توجه بوده و تاکنون به شیوه‌های گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است (راوات، ۱۹۹۶؛ نیقیان و هانسن، ۲۰۰۱؛ هسو، ۲۰۰۲؛ سیلوا و باروسا، ۲۰۰۳؛ موشایاندبو و همکاران، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۴؛ استاورو و رید، ۲۰۰۷؛ فدی و همکاران، ۲۰۰۹).

معادله اصلی در این روش عبارت است از:

$$x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + NB = x \frac{\partial T}{\partial x} + z \frac{\partial T}{\partial z} + NT \quad (24)$$

که در آن، N اندیس ساختاری و B میدان زمینه است. حل این معادله یک مسئله بیش‌تعیین شده است و با تعریف پنجره‌های متحرک روی داده‌ها و استفاده از روش کمترین مربعات در هر پنجره با یک مقدار پیش‌فرض N ، برای (x_0, z_0) حل می‌شود. خطای برآورد براساس انحراف معیارها بیان می‌شود. چنانچه اندیس ساختاری برای یک چشمه به‌درستی انتخاب شود جواب‌های به‌دست آمده متمرکز خواهد بود که این می‌تواند معیار خوبی برای تعیین میزان درستی نتایج باشد.

فرض اولیه در روش اولر این است که چشمه مغناطیسی دارای شکل هندسی ساده مانند کره، استوانه، دایک و مانند آن باشد. زیرا میدان مغناطیسی تولید شده با این‌گونه ساختارها کاملاً همگن است، یعنی اندیس ساختاری ثابت است و با تغییر فاصله تغییر نمی‌کند (رید و تورستون، ۲۰۱۴). بنابراین برای چشمه‌هایی با ساختارهای پیچیده، این روش ممکن است روش مناسبی نباشد، زیرا این‌گونه چشمه‌ها در واقع کامل نیستند و اندیس ساختاری ثابتی ندارند.

همان شیوه‌ای که رابطه‌های (۱۳) و (۱۹) به‌دست آمد، عدد موج محلی قائم با بهره‌گیری از رابطه (۱۸) برای ساختارهای دُوبُعدی با فرمول (۲۰) بیان می‌شود (سالم و همکاران، ۲۰۰۵):

$$k_z = \frac{(N+D)(x-x_0)}{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (20)$$

از ترکیب رابطه‌های (۱۹) و (۲۰) معادل خطی (۲۱) به‌دست می‌آید:

$$k_x x + k_z z = k_x x_0 + k_z z_0 \quad (21)$$

این معادله خطی هیچ وابستگی به شکل چشمه دُوبُعدی ندارد و با روش کمترین مربعات می‌توان آن را برای x_0, z_0 حل کرد.

برای حل معادله (۲۱) ابتدا یک پنجره به مرکزیت بیشینه عدد موج محلی تعریف می‌شود. سپس برای همه داده‌های درون پنجره این معادله به روش کمترین مربعات حل می‌شود. مقدارهای k_x و k_z برای همه نقطه‌های درون پنجره با رابطه‌های (۸) و (۱۸) محاسبه می‌شود. انتخاب طول پنجره به کیفیت داده، پهنای پیک و میزان تداخل بی‌هنجاری‌های مجاور بستگی دارد. برای مثال برای یک بی‌هنجاری کاملاً مجزا در امتداد یک نیم‌رخ پنجره می‌تواند کل داده‌های اندازه‌گیری شده در امتداد نیم‌رخ باشد. در صورتی که چندین چشمه وجود داشته باشد طول پنجره باید کوچک‌تر باشد. روش ELW به علت استفاده از مشتق مرتبه دوم نسبت به نوفه حساسیت زیادی دارد.

۵.۲. روش واهمامیخت اولر

تابع V همگن از مرتبه n است در صورتی که برای هر ضریب حقیقی t رابطه (۲۲) برآورده شود:

$$V(tx, tz) = t^n V(x, z) \quad (22)$$

هر تابعی که همگن باشد در معادله دیفرانسیل همگن اولر صدق می‌کند:

$$x \frac{\partial V}{\partial x} + z \frac{\partial V}{\partial z} = nV(x, y, z) \quad (23)$$

برای مثال میدان ناشی از یک دوقطبی مغناطیسی که برای $T(x, z) = \frac{a}{r^3}$ است، یک تابع همگن از درجه (-۳) است.

۲.۶. روش ANEUL

این روشی روشی تمام خودکار برای برآورد موقعیت و شکل (اندیس ساختاری) چشمه میدان‌های پتانسیل در حالت دوبعدی و سه‌بعدی است که برخی محدودیت‌های روش‌های پیشین را که صرفاً برای ساختارهای خاصی به کار می‌روند ندارد. معادله‌های اصلی این روش از جای‌گذاری مشتق‌های معادله اولر در معادله سیگنال تحلیلی به دست می‌آید (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$N = \left(\frac{2|AAS_1|^2 - |AAS_2||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0} \quad (25)$$

$$z_0 = \left(\frac{|AAS_1||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0} \quad (26)$$

که در آن، (x_0, z_0) مختصات چشمه میدان است و $|AAS_0|$ ، $|AAS_1|$ ، $|AAS_2|$ به ترتیب دامنه سیگنال تحلیلی میدان، مشتق مرتبه اول و دوم میدان هستند. این رابطه‌ها در محل افقی چشمه محاسبه می‌شوند. موقعیت افقی چشمه با توجه به محل بیشینه مقدار دامنه سیگنال تحلیلی میدان برآورد می‌شود.

هیچ کدام از معادله‌های بالا وابستگی صریح به مغناطیس شوندگی ندارند، لذا مغناطیس باقی مانده، عامل مزاحمی نخواهد بود. اگر چند چشمه موجود باشد، به منظور جلوگیری از اثر تداخلی بی‌هنجاری‌های چشمه‌های مجاور بهتر است بی‌هنجاری ناشی از هر چشمه به طور جداگانه بررسی شود. روش ANEUL ناپایداری زیادی نسبت به نوفه‌های بسامد زیاد دارد، بنابراین برای کاهش اثر نوفه می‌توان از ادامه فراسوی داده‌ها استفاده کرد. در مورد داده‌های مغناطیسی، با استفاده از انتقال به قطب و یا تبدیل شبه گرانی می‌توان خطای برآورد موقعیت افقی چشمه را (بر مبنای استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی) کاهش داد و در نتیجه عمق و اندیس ساختاری را با دقت بیشتری محاسبه کرد (بنی عامریان و اسکویی، ۱۳۸۸).

۲.۷. تحلیل چندمقیاسی با استفاده از روش هندسی در روش تحلیل چندمقیاسی، مشخصه‌های چشمه میدان

پتانسیل شامل عمق، مکان و اندیس ساختاری با تحلیل رفتار میدان در ارتفاع‌های گوناگون برآورد می‌شود. از آنجاکه اندازه‌گیری مستقیم میدان در چند ارتفاع متفاوت به ندرت امکان‌پذیر است، ابتدا میدان پتانسیل چندمقیاسی با ادامه فراسوی داده‌ها به ارتفاع‌های متفاوت محاسبه می‌شود. مقدارهای بیشینه یا کمینه میدان پتانسیل همگن با توجه به تغییرات این میدان‌ها نسبت به فاصله از چشمه، در ارتفاع‌های متفاوت در امتداد مجموعه خط‌های راست به نام مرزها (Ridge) قرار می‌گیرند (فدی و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۲). ابتدا با یک روش هندسی با برون‌یابی این مرزها تا زیر سطح اندازه‌گیری و تعیین نقطه‌های برخورد مرزها با یکدیگر، عمق نقطه‌های تکین چشمه (Singular points) به سادگی برآورد می‌شود. برای 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 (فدی و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹). طبق تعریف تابع مقیاس‌ده عبارت است از مشتق لگاریتم میدان پتانسیل نسبت به لگاریتم ارتفاع (فدی و فلوریو ۲۰۰۶، فدی، ۲۰۰۷، فلوریو و همکاران ۲۰۰۹):

$$\tau = \frac{\partial \log(f(z))}{\partial \log(z)} \quad (27)$$

که در آن، τ تابع مقیاس‌ده و f میدان در ارتفاع z است. هر میدان پتانسیل نیوتنی، از جمله میدان‌های گرانشی و مغناطیسی و به‌طور کلی مشتق قائم مرتبه n ام میدان پتانسیل نیوتنی یک چشمه نقطه‌ای شکل ساده میدان و تابع مقیاس‌ده با رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$f_n(z) = \frac{1}{(z-z_0)^{n+1}} \quad (28)$$

$$\tau_n = \frac{\partial \log(f_n(z))}{\partial \log(z)} = -\frac{(n+1)z}{z-z_0} = -N_s \frac{z}{z-z_0} \quad (29)$$

که در آن، Z_0 عمق تا چشمه و N_s اندیس ساختاری نسبت به میدان f_n است. برای میدان‌های گرانشی و مغناطیسی به ترتیب $n=1$ و $n=2$ است. در این رابطه‌ها، محاسبات در محل افقی چشمه صورت گرفته است.

۸.۲. روش تبدیل DEXP

روش DEXP بر مبنای مقیاس‌دهی میدان در مقیاس‌های (ارتفاع‌های) متفاوت با توان مناسبی از همان ارتفاع است. تابع مقیاس‌دهی در این روش تابعی از ارتفاع، توان مقیاس‌دهی (scaling function) (و در نتیجه اندیس ساختاری) و مرتبه میدان است. بنابراین تبدیل DEXP میدان پتانسیل با رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود (فدی، ۲۰۰۷):

$$DEXP(h_i) = |h_i|^{\alpha} f(h_i) = \quad (30)$$

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

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، مقدارهای کمینه یا بیشینه میدان DEXP منطبق بر محل چشمه‌های میدان پتانسیل هستند. به عبارت دیگر با تعیین بیشینه‌های میدان DEXP محل چشمه تعیین می‌شود. در صورتی که اثرهای تداخلی چشمه‌های مجاور یا میدان‌های منطقه‌ای شدید باشد می‌توان از مشتق‌های میدان در رابطه (۳۰) استفاده کرد. در این حالت تبدیل DEXP مشتق مرتبه n میدان با رابطه کلی (۳۱) محاسبه می‌شود (فدی و پیلکینگتون، ۲۰۱۲):

$$DEXP^n(h_i) = |h_i|^{\alpha n} \frac{\partial^n f(h_i)}{\partial z^n} = \quad (31)$$

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

با افزایش مرتبه مشتق میدان، چشمه‌های سطحی با وضوح بیشتر و چشمه‌های عمیق‌تر با وضوح کمتری تصویر می‌شوند. چنانچه توان مقیاس‌دهی 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 برآوردی چشمه‌ها تغییر اندکی خواهد داشت. از این معیار می‌توان برای برآورد توان مقیاس‌دهی استفاده کرد (فدی، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه ادامه فراسوی داده‌ها فرایندی بسیار پایدار است، روش DEXP نسبت به سطح نوفه موجود در داده پایدار خواهد بود؛ حتی در شرایطی که

در صورتی که میدان‌های منطقه‌ای، اثرات تداخلی (Interference effect) چشمه‌های مجاور (که در ارتفاع‌های بالاتر بیشتر می‌شوند) و مقدار نوفه قابل توجه باشد، مرزها خمیدگی پیدا می‌کنند. برای رفع این مشکل می‌توان از مشتق‌های مرتبه بالاتر میدان استفاده کرد. به این ترتیب اثر تداخلی ناشی از چشمه‌های مجاور یا میدان‌های منطقه‌ای کاهش پیدا می‌کند. همچنین برای حذف اثرات چشمه‌های سطحی و نوفه‌ها می‌توان از مقیاس‌های کم صرف نظر کرد. از آنجاکه فرایند مشتق‌گیری (فیلتر بالاگذر) و ادامه فراسو (فیلتر پایین‌گذر) به طور هم‌زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند، در نتیجه کل فرایند نسبت به نوفه پایدار است. عمل مشتق‌گیری باعث می‌شود میزان گسترش افقی بی‌هنجاری به علت افزایش نرخ تضعیف میدان کاهش پیدا کند. هرچند از هر نوع مشتق‌گیری جهتی می‌توان استفاده کرد، اما چون در مشتق‌گیری قائم هیچ تغییر فازی رخ نمی‌دهد، این فرایند ارجحیت دارد.

هنگام استفاده هم‌زمان از دو فیلتر مشتق‌گیری و ادامه فراسو، برای تضعیف اثر بسامدهای زیاد که ناشی از نوفه‌ها یا چشمه‌های سطحی است می‌توان از ارتفاع یا مقیاس‌های کم چشم‌پوشی کرد. همچنین اثرات تداخلی میدان‌های منطقه‌ای را می‌توان با در نظر نگرفتن مقیاس‌ها یا ارتفاع‌های بالاتر کاهش داد. بنابراین اگر مقیاس‌ها (کمترین و بیشترین ارتفاع ادامه فراسو) و مرتبه مشتق‌گیری به درستی انتخاب شود مرزها خطوط مستقیمی خواهند بود و با روش هندسی می‌توان عمق را به درستی برآورد کرد. نکته مهم در استفاده از روش هندسی این است که فقط مرزهایی باید در نظر گرفته شوند که بتوان آنها را به یک بی‌هنجاری در میدان اندازه‌گیری شده نسبت داد. همچنین مرزهایی را که در توافق با مرزهای دیگر به یک چشمه همگرا نمی‌شوند باید نادیده گرفت. هرچه تعداد مرزهایی که به یک چشمه ختم می‌شوند بیشتر باشد، محل چشمه با دقت و اعتبار بیشتری برآورد می‌شود (فدی و همکاران، ۲۰۰۹).

گرفت، رابطه (۳۲) به شکل رابطه (۳۳) درمی آید:

$$k_p(x, z) = \frac{-N_p(z - z_0)}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (33)$$

که در آن، $N_p = N + p$ و N اندیس ساختاری است.

با محاسبه تابع مقیاس ده (رابطه (۲۷)) برای عدد موج

محلی:

$$\tau(k_p) = \frac{\partial \log(k_p)}{\partial \log(z)} = -\frac{z}{z - z_0} \quad (34)$$

رابطه (۳۴) نشان می دهد که تابع وزنی به دست آمده از

عدد موج محلی برخلاف تابع وزنی میدان پتانسیل

مستقل از اندیس ساختاری چشمه است. پس از اجرای

برخی محاسبه ها (فدی ۲۰۰۷، عباس و همکاران ۲۰۱۴)

تبدیل DEXP عدد موج محلی مرتبه p از رابطه (۳۵)

به دست می آید:

$$\Omega_p = z^{0.5} k_p \quad (35)$$

همانند تبدیل DEXP میدان پتانسیل مقدارهای بیشینه یا

کمینه Ω_p منطبق بر محل چشمه پتانسیل خواهد بود. با

ترکیب رابطه های (۳۳) و (۳۵) در محل Ω_{\max} یعنی در

نقطه (x_0, z_0) می توان اندیس ساختاری چشمه را نیز

برآورد کرد:

$$N = 2z_0^{0.5} \Omega_{\max} - p \quad (36)$$

با استفاده از فرمول بندی فیلیپس و همکاران (۲۰۰۷) این

روش را می توان برای حالت سه بعدی نیز تعمیم داد.

۳. کاربرد روی داده های مدل مصنوعی

روش های بحث شده در این تحقیق با کاربرد آنها روی

بی هنجاری مغناطیسی تولید شده از یک پی سنگ

مغناطیسی شبیه سازی شده، مقایسه می شود. به این ترتیب

قابلیت ها و مزایای روش ها به صورت عملی مورد بررسی

قرار می گیرد. شکل ۱ مدل یک پی سنگ مغناطیسی

مصنوعی و بی هنجاری شدت میدان کل را برای این

ساختار نشان می دهد. شدت میدان مغناطیسی خارجی

۴۷۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل آن ۴۵ درجه است. راستای

اندازه گیری میدان عمود بر امتداد ساختار است و با جهت

شمال مغناطیسی، زاویه صفر درجه می سازد. تعداد

از مشتق های مرتبه بالا استفاده شود. با توجه به رفتار

دوقطبی چشمه های مغناطیسی، برای هر چشمه مغناطیسی

تبدیل DEXP میدان دارای یک بیشینه و یک کمینه

است که چشمه بین این دو نقطه قرار می گیرد. در این

شرایط برای برآورد بهتر محل چشمه می توان از تبدیل

DEXP میدان منتقل شده به قطب، دامنه سیگنال تحلیلی

میدان یا مدوله سازی میدان (Field modulation) (ریشه

مجموع مربعات مولفه های میدان) استفاده کرد. در این

حالت شکل دوقطبی میدان DEXP حذف می شود و

فقط یک نقطه بیشینه وجود خواهد داشت.

مهم ترین مزیت روش های چندمقیاسی معرفی شده

این است که سرعت زیادی دارند و برخلاف روش های

وارون سازی به آسانی می توان از آنها برای تحلیل حجم

زیادی از داده ها و یا حتی تصویر سازی سریع چشمه ها

استفاده کرد.

۲.۹. تبدیل خود کار DEXP

این روش روشی خود کار بر مبنای تبدیل DEXP عدد

موج محلی است که برای برآورد کمیت های چشمه

شامل عمق، موقعیت و اندیس ساختاری کاربرد دارد.

تبدیل DEXP بسیار پایدار و عدد موج محلی نسبت به

نوفه ناپایدار است. اما کل این روش پایداری خوبی دارد

و با توجه به خود کار بودن می توان از آن در برآورد

سریع و اولیه مشخصه های چشمه استفاده کرد.

همان طور که در بخش های قبلی اشاره شد، عدد موج

محلی مرتبه اول و دوم برای چشمه های دوبعدی با

رابطه های (۷)، (۱۳)، (۱۲) و (۱۴) تعریف می شود. شکل

تعمیم یافته عدد موج محلی برای مرتبه های بالاتر با

استفاده از معادله (۳۲) تعریف می شود (عباس و

همکاران، ۲۰۱۴):

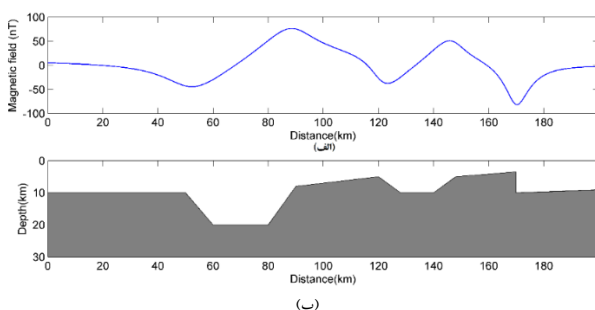
$$k_p(x, z) = \frac{\partial}{\partial x} \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial^p f}{\partial z^p}}{\frac{\partial^p f}{\partial x \partial z^{p-1}}} \right) \quad (37)$$

که در آن، p مرتبه عدد موج محلی است. پس از اجرای

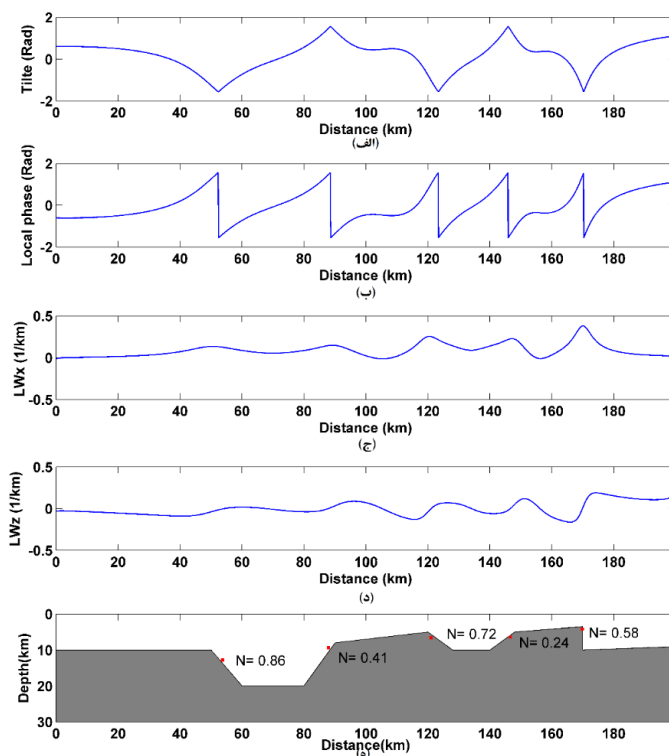
برخی محاسبه ها همانند آنچه در روش iSPI صورت

پایداری آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲ خم کمیت‌های مورد نیاز برای کاربرد روش ELW و نتایج حاصل از این روش را (نقطه‌های سرخ‌رنگ در شکل ۲-ه) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بیشینه مقادیرهای نمودارهای زاویه شیب، فاز محلی و عدد موج محلی به خوبی محل ساختارها را برآورد می‌کند و محاسبات در مجاورت این نقطه‌ها صورت می‌گیرد. جدول ۲ مقدار عددی مشخصه‌های چشمه‌ها را، که با استفاده از روش ELW به دست آمده است نشان می‌دهد.

نقطه‌های اندازه‌گیری ۲۰۰۰ نقطه و فاصله بین آنها ۰/۱ کیلومتر است. مغناطیس‌پذیری صرفاً القایی است و قابلیت مغناطیس‌پذیری (susceptibility) ساختار (SI) ۰/۰۱۲ فرض شده است. جدول ۱ محل دقیق ساختارهای مدل پی سنگ را نشان می‌دهد. از آنجا که هدف مقایسه جواب‌های حاصل از روش‌های گوناگون در بهترین شرایط است، ابتدا از افزودن نوفه به میدان تولید شده خودداری می‌شود. سپس به منظور شبیه‌سازی بهتر شرایط واقعی، داده‌ها با نوفه گاوسی آمیخته می‌شوند. به این ترتیب میزان اثرگذاری نوفه بر دقت جواب‌ها و



شکل ۱. (الف). بی‌هنجاری مغناطیسی و (ب) مدل پی سنگ



شکل ۲. نتایج به دست آمده از روش ELW. (الف) زاویه شیب، (ب) فاز محلی، (ج) عدد موج محلی افقی، (د) عدد موج محلی قائم و (ه) اندیس ساختاری و محل ساختارها. نقطه‌های سرخ روی مدل، موقعیت برآورد شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. موقعیت ساختارهای پی سنگ

X_0 (km)	۵۰	۹۰	۱۲۰	۱۴۸	۱۷۰
Depth (km)	۱۰	۸	۵	۵	۳/۵

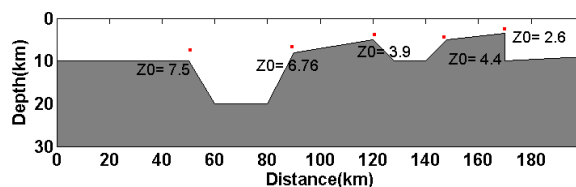
جدول ۲. نتایج روش ELW

X_0 (km)	۵۳/۷۲	۸۷/۹	۱۲۱	۱۴۶/۵	۱۶۹/۸
Depth (km)	۱۲/۸	۹/۴	۶/۶۲	۶/۴	۴/۲

(فاصله ۱۲۰ متری از مبدا) مقدار شیب و قابلیت مغناطیس پذیری ۶/۶۶ و ۰/۰۳۹۱ برآورد شده است که تفاوت زیادی با مقدارهای واقعی این کمیت‌ها یعنی ۴۵ درجه و ۰/۰۱۲ دارد.

با استفاده از روش iSPI نتایج جدول ۴ برای ساختارهای پی سنگ به دست می‌آید. همچنین شکل ۴ می‌شود که عمق ساختارهای ۱، ۲، ۳ و ۴ بیشتر از مقدار واقعی آن برآورد شده است. نکته قابل توجه این است که هرچه اندیس ساختاری به دست آمده بزرگ‌تر از مقدار قابل انتظار باشد، عمق برآوردی نیز بیشتر خواهد بود.

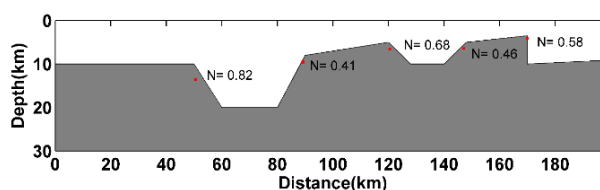
شکل ۳ نتایج به دست آمده از روش SPI را برای مدل مصنوعی پی سنگ نشان می‌دهد. در نظریه این روش فرض شده است که ساختار سطح تماس مغناطیسی است و اثرات تداخلی وجود ندارد. از جمله مزیت‌های این روش این است که یک برآورد اولیه و تقریبی از شیب و تباین مغناطیس‌پذیری چشمه به صورت کاملاً خودکار به دست می‌دهد. جدول ۳ مشخصات چشمه‌های برآورد شده با این روش را نشان می‌دهد. با توجه به شرایط آرمانی، ساده‌سازی‌ها و فرض‌های اولیه‌ای که در مبانی این روش به کار رفته است مقدارهای محاسبه شده برای شیب و تباین قابلیت مغناطیس‌پذیری در برخی موارد خطای زیادی دارد. برای مثال برای ساختار سوم



شکل ۳. موقعیت برآورد شده برای ساختارها با استفاده از روش SPI

جدول ۳. نتایج روش SPI

X_0 (km)	۵۰/۶	۸۹/۳	۱۲۰/۵	۱۴۷/۲	۱۷۰
Depth (km)	۷/۵	۶/۷۳	۳/۹۲	۴/۳۴	۲/۶۲
Dip (deg)	۳۲/۲	۵۰/۸	۶/۶۶	۶۱/۷	۳۹/۳۵
Susceptibility	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۳۹۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۹۳



شکل ۴. اندیس ساختاری و موقعیت برآورد شده برای ساختارها با استفاده از روش iSPI

جدول ۴. نتایج روش iSPI

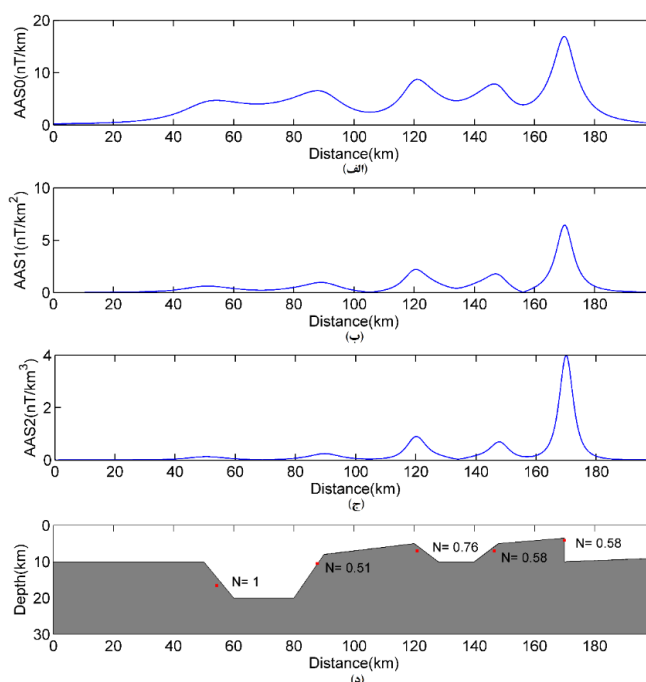
X_0 (km)	۵۰/۵	۸۹/۲	۱۲۰/۵	۱۴۷/۱	۱۷۰
Depth (km)	۱۳/۶	۹/۶	۶/۶۵	۶/۴۶	۴/۱۷

به درستی تعیین شده است.

روش واهمامیخت اولر برای این بی‌هنجاری با انتخاب اندیس ساختاری ۰/۵ و پنجره‌ای با طول ۷ نقطه حل می‌شود و در نهایت با اعمال یک معیار، حل‌های غیر منطقی حذف خواهد شد. شکل ۶ مجموعه جواب‌های به‌دست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به میزان تجمع (Clustering) جواب‌ها می‌توان حل‌ها و فرضیه‌های اولیه (اندیس ساختاری) را اعتبارسنجی کرد. خطا در این روش برای چشمه ۱ و ۳ (از چپ به راست) به نسبت زیاد است (به جدول ۷ مراجعه شود).

حال با استفاده از روش خودکار ANEUL

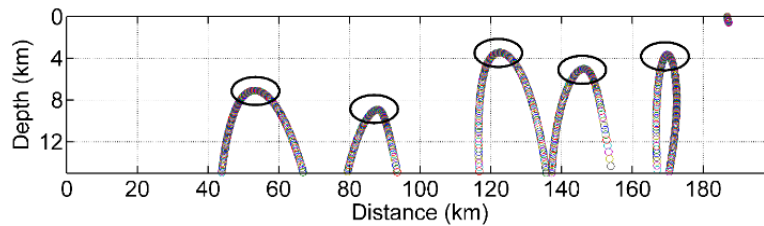
بی‌هنجاری تولید شده با این مدل مصنوعی تفسیر می‌شود. شکل ۵ دامنه سیگنال تحلیلی از مرتبه‌های گوناگون را برای این بی‌هنجاری نشان می‌دهد. موقعیت افقی ساختارها با توجه به محل مقدارهای بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی تعیین می‌شود و محاسبات در این نقطه‌ها صورت می‌گیرد. در جدول ۵ مقدارهای برآورد شده برای عمق و موقعیت افقی ساختارها نشان داده شده است. این روش عمق چشمه‌ها را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. برای مثال خطای برآورد عمق چشمه اول حدود ۶۰ درصد است. اما محل افقی آنها تقریباً



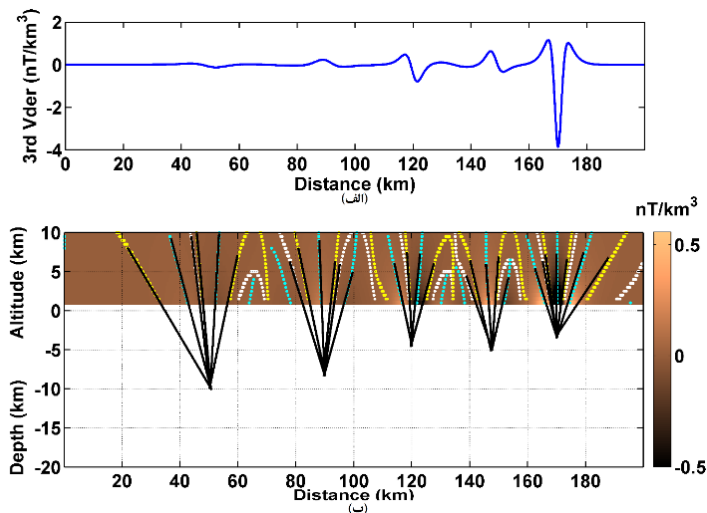
شکل ۵. نتایج روش ANEUL، (الف) دامنه سیگنال تحلیلی میدان، (ب) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم و (د) اندیس ساختاری و موقعیت برآورد شده برای ساختارها

جدول ۵. نتایج روش ANEUL

X_0 (km)	۵۴/۳	۸۷/۸	۱۲۱	۱۴۶/۶	۱۶۹/۹
Depth(km)	۱۶/۵	۱۰/۵	۷	۷	۴/۱



شکل ۶. تجمع جواب‌های به‌دست آمده از روش واهمامیخت اولیه



شکل ۷. (الف) مشتق قائم مرتبه سوم میدان و (ب) میدان چندمقیاسی و روش هندسی برآورد عمق، همه ساختارها به درستی برآورد شده‌اند.

مشتق مرتبه سوم میدان تحلیل می‌شود. با استفاده از مشتق مرتبه سوم میدان می‌توان ضمن کاهش اثرات تداخلی چشمه‌های مجاور، درجه تفکیک پذیری را افزایش داد. شکل ۷ مشتق قائم مرتبه سوم میدان، میدان چندمقیاسی و مرزهای آن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل محل چشمه‌ها یا نقطه‌های تکین به درستی برآورد شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مرتبه مشتق‌گیری، پاسخ ساختارهای کم‌عمق پی‌سنک در میدان چندمقیاسی تقویت می‌شود در حالی که پاسخ ساختارهای عمیق‌تر تضعیف می‌شود.

به‌منظور کاهش اثرهای تداخلی چشمه‌ها برای تحلیل میدان با روش تبدیل DEXP از مشتق مرتبه دوم و سوم استفاده می‌شود. همچنین برای حذف شکل دوقطبی تبدیل DEXP، این تبدیل به ترتیب برای دامنه سیگنال تحلیلی مشتق دوم میدان و دامنه مدوله‌سازی مشتق سوم محاسبه می‌شود. بنابراین ابتدا میدان

در همه این روش‌ها عمق نقطه‌های تکین ساختارها برآورد می‌شود. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که همه این روش‌ها حساسیت زیادی نسبت به نوفه دارند و قطعاً با افزودن نوفه، میزان خطا نیز افزایش می‌یابد.

در ادامه بی‌هنجاری تولید شده از پی‌سنک مغناطیسی با استفاده از روش‌های چندمقیاسی معرفی شده تفسیر می‌شود. به این ترتیب روش‌های چندمقیاسی: روش هندسی برآورد عمق، تبدیل DEXP میدان و تبدیل DEXP عدد موج محلی (خودکار) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

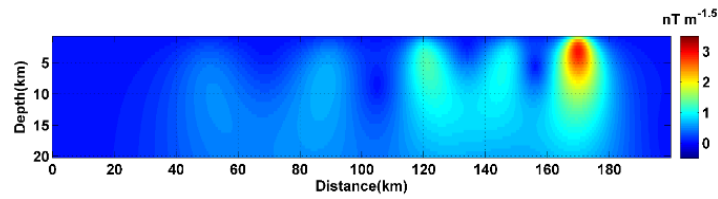
ابتدا با استفاده از دامنه فراسوی داده‌ها، میدان چندمقیاسی تولید می‌شود. سپس مرزها از اتصال مقدارهای بیشینه یا کمینه میدان در هر مقیاس مشخص، و از برون‌یابی آنها محل چشمه‌ها برآورد می‌شود. از آنجا که اثرات تداخلی چشمه‌های مجاور شدید است،

برای تصویرسازی چشمه و تفسیر بی‌هنجاری با تبدیل DEXP خودکار، ابتدا تبدیل DEXP عدد موج محلی مرتبه اول و دوم مشتق اول میدان با ادامه فراسو داده‌ها از ارتفاع ۱ تا ۳۰ کیلومتری از سطح اندازه‌گیری تولید می‌شود. شکل ۱۰ تصویر به دست آمده از تبدیل DEXP عدد موج محلی مرتبه دوم را نشان می‌دهد. چون عدد موج محلی کمیتی غیر هماهنگ است باید در هر ارتفاع با استفاده از میدان در آن مقیاس محاسبه شود. به عبارت دیگر نمی‌توان فیلتر ادامه فراسو را به‌طور مستقیم روی این کمیت اعمال کرد. نقطه‌های مشخص شده، عمق برآوردی ساختارها را با توجه به محل بیشینه تبدیل نشان می‌دهد. بی‌هنجاری شدید دوقطبی که در تصویر DEXP دیده می‌شود (ناحیه مشخص شده با خط چین) ناشی از ماهیت غیرخطی عدد موج محلی است (کیتینگ، ۲۰۰۹؛ عباس و همکاران، ۲۰۱۴) و حاوی هیچ اطلاعاتی در مورد چشمه‌ها نیست و به هیچ چشمه خاصی مربوط نمی‌شود. در این نوع تبدیل DEXP این اثرها به سادگی قابل شناسایی هستند. ذکر این نکته لازم است که هرچند تصویر حاصل از تبدیل DEXP خودکار به‌خوبی شکل‌های ۸ و ۹ نیست، اما مزیت مهم آن این است که بدون هیچ پیش‌فرض اولیه از اندیس ساختاری، برآورد اولیه به‌نسبت خوبی از موقعیت ساختارها می‌دهد. بنابراین می‌توان از آن برای تفسیرهای دقیق‌تر بعدی بهره جست. جدول ۶ نتایج به‌دست آمده از تبدیل DEXP عدد موج محلی مرتبه دوم را نشان می‌دهد. اندیس ساختاری چشمه‌ها با رابطه (۳۶) محاسبه شده است.

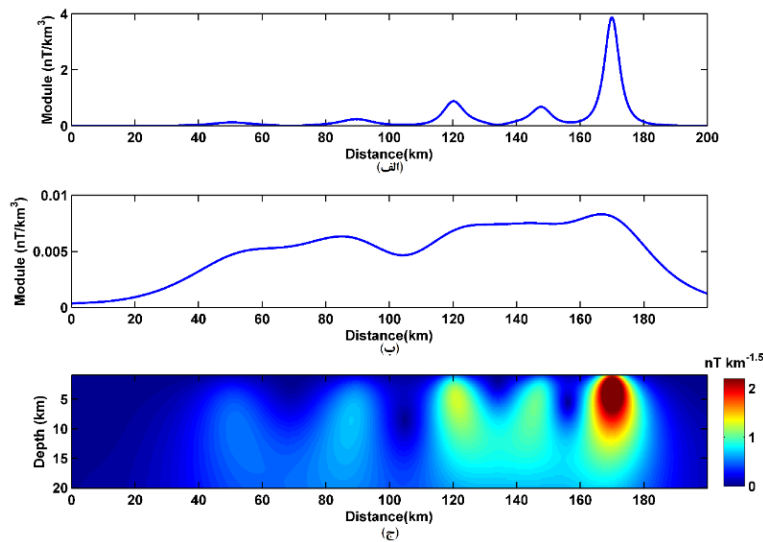
چندمقیاسی با ادامه فراسوی مشتق‌های میدان از ارتفاع ۱ کیلومتری تا ارتفاع ۲۰ کیلومتری با فاصله‌های ۰/۵ کیلومتری تولید می‌شود. چون سیگنال تحلیلی و مدوله‌سازی دامنه هماهنگ (هارمونیک) نیستند این کمیت‌ها باید به‌طور جداگانه در هر مقیاس با توجه به میدان در آن سطح محاسبه شوند. چون ساختارها سطح تماس هستند، اندیس ساختاری صفر فرض می‌شود. شکل ۸ تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی مشتق دوم میدان را نشان می‌دهد. شکل ۹ مشتق سوم میدان در سطح اندازه‌گیری و در اولین مقیاس (ارتفاع ۱ کیلومتری از سطح اندازه‌گیری) و تبدیل DEXP مدوله‌سازی آن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها عمق (محل بیشینه تبدیل DEXP) و شکل همه ساختارهای پی‌سنگ با دقت خوبی برآورد شده است. تبدیل DEXP میدان یک تصویر تقریبی و بسیار نرم (smooth) از مدل پی‌سنگ تولید می‌کند. در واقع تبدیل DEXP روشی بسیار سریع و تقریبی برای مدل‌سازی است که می‌توان آن را به‌منزله مدلی اولیه در وارون‌سازی‌های پیشرفته و دقیق مورد توجه قرار داد. ذکر این نکته لازم است که به علت استفاده از مشتق مرتبه دوم، میدان چشمه‌های کم‌عمق با وضوح بیشتری تصویر می‌شوند. در اینجا اندیس ساختاری ثابتی برای همه ساختارها در نظر گرفته شده است. اما در شرایط واقعی برای تفسیر دقیق‌تر می‌توان بی‌هنجاری مربوط به هر چشمه را به‌طور جداگانه با اندیس ساختاری دقیق‌تر بررسی کرد؛ هرچند در این حالت جداسازی بی‌هنجاری‌ها ممکن است فرایندی دشوار باشد.

جدول ۶. نتایج حاصل از تبدیل DEXP خودکار، به‌دست آمده از شکل (۱۰)

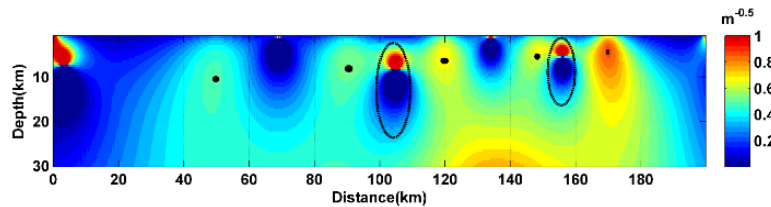
Source	X_0 (km)	Depth (km)	Ω_{max}	P	N
۱	۵۰	۱۰/۵	۰/۴۷۱۶	۲	۰/۰۶
۲	۹۰	۸/۵	۰/۵۲۳۲	۲	۰/۰۵
۳	۱۲۰	۶/۵	۰/۶۷۲۳	۲	۰/۴۲
۴	۱۴۸/۵	۵/۵	۰/۶۳۷۲	۲	-۰/۰۱
۵	۱۷۰/۵	۴	۰/۸۵۵۴	۲	۰/۴۲



شکل ۸. تبدیل DEXP دامنه سیگنال تحلیلی مشتق دوم میدان. مدل پی‌سنگ با تقریب خوبی به تصویر کشیده شده است.



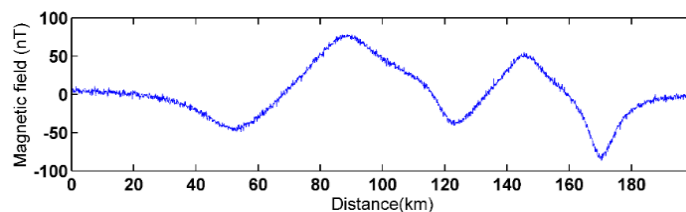
شکل ۹. (الف) دامنه مدوله‌سازی مشتق سوم میدان، (ب) دامنه مدوله‌سازی مشتق سوم در اولین مقیاس و (ج) تبدیل DEXP مدوله‌سازی مشتق سوم میدان



شکل ۱۰. تبدیل DEXP عدد موج محلی مرتبه دوم

گاوسی به نسبت قوی با انحراف معیار ۲/۴ نانوتسلا و میانگین صفر به داده‌ها افزوده می‌شود. سپس میزان پایداری و اثرپذیری از نوفه برای نمونه در روش‌های ANEUL و تبدیل DEXP مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۱ میدان مغناطیسی آلوده به نوفه را نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه کمی بهتر، مجموع نتایج (عمق و موقعیت) به دست آمده از همه روش‌ها به همراه مشخصه‌های واقعی چشمه‌ها در جدول ۷ آورده شده است. بنابر بررسی‌های صورت گرفته با مدل مصنوعی، نتایج روش‌های چندمقیاسی اعتبار و دقت بیشتری دارد. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی‌تر، یک نوفه تصادفی



شکل ۱۱. داده مغناطیسی همراه با نوفه. نوفه افزوده شده گاوسی است با انحراف معیار ۲/۴ نانوتسلا و میانگین صفر

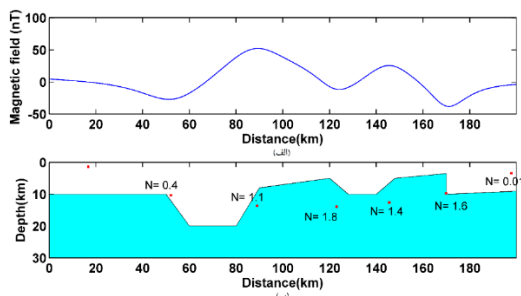
جدول ۷. جمع‌بندی و مقایسه نتایج حاصل از همه روش‌ها برای ۵ چشمه موجود در مدل مصنوعی

Methods	Parameters (km)	۱	۲	۳	۴	۵
<i>Real</i>	X_0	۵۰	۹۰	۱۲۰	۱۴۸	۱۷۰
	Z_0	۱۰	۸	۵	۵	۳/۵
<i>ANEUL</i>	X_0	۵۴/۳	۸۷/۸	۱۲۱	۱۴۶/۶	۱۶۹/۹
	Z_0	۱۶/۵	۱۰/۵	۷	۷	۴/۱
<i>Euler</i>	X_0	۴۷	۸۷	۱۲۳	۱۴۷	۱۷۰
	Z_0	۶	۱۰	۳/۵	۵/۵	۳/۵
<i>SPI</i>	X_0	۵۰/۶	۸۹/۳	۱۲۰/۵	۱۴۷/۲	۱۷۰
	Z_0	۷/۵	۶/۷۳	۳/۹۲	۴/۳۴	۲/۶۲
<i>iSPI</i>	X_0	۵۰/۵	۸۹/۲	۱۲۰/۵	۱۴۷/۱	۱۷۰
	Z_0	۱۳/۶	۹/۶	۶/۶۵	۶/۴۶	۴/۱۷
<i>ELW</i>	X_0	۵۳/۷۲	۸۷/۹	۱۲۱	۱۴۶/۵	۱۶۹/۸
	Z_0	۱۲/۸	۹/۴	۶/۶۲	۶/۴	۴/۲
<i>Auto-DEXP</i>	X_0	۵۰	۹۰	۱۲۰	۱۴۸/۵	۱۷۰/۵
	Z_0	۱۰/۵	۸/۵	۶/۵	۵/۵	۴
<i>DEXP(Module)</i>	X_0	۵۲/۶	۸۷/۹	۱۲۱/۲	۱۴۶	۱۷۰
	Z_0	۱۰/۲۵	۸/۵	۵	۵/۵	۳/۲۵
<i>DEXP (AS)</i>	X_0	۵۲/۵	۸۸/۱	۱۲۰/۹	۱۴۵/۵	۱۷۰
	Z_0	۱۰/۵	۸/۵	۵	۶	۳

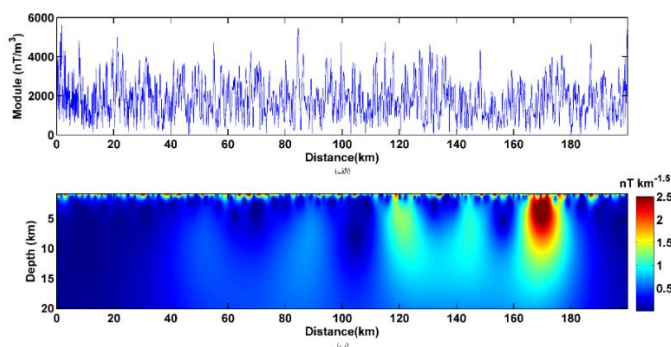
(۱ تا ۰) است. به عبارت دیگر عمق و اندیس ساختاری در تناظر هستند و چشمه‌هایی که اندیس ساختاری به دست آمده برای آنها از مقدار واقعی بزرگ‌تر است عمق‌شان نیز بیشتر برآورد می‌شود. چشمه ۱ عمیق‌تر از سایر چشمه‌ها است. بنابراین ادامه فراسو پاسخ آن را در مقایسه نسبی با سایر چشمه‌ها تقویت می‌کند. یعنی نرخ تضعیف میدان ناشی از این چشمه کمتر است. بنابراین مشخصه‌های این چشمه با دقت بهتری (حتی در مقایسه با حالت بدون نوفه) تعیین شده است.

در شکل ۱۳ مدوله سازی مشتق سوم میدان و تبدیل DEXP آن نشان داده شده است. با وجود اینکه از مشتق‌های مرتبه سوم میدان استفاده شده است، تبدیل DEXP همچنان پایدار است و نتایج دقت خوبی دارد (بیشینه تبدیل DEXP محل ساختار را برآورد می‌کند).

برای کاربرد روش ANEUL لازم است که ابتدا نوفه‌ها تضعیف شوند، در غیر این صورت تقویت شدید نوفه‌ها هنگام مشتق‌گیری عملاً امکان استفاده از این روش را غیرممکن می‌سازد و منجر به نتایج نادرستی خواهد شد. بنابراین ابتدا داده‌ها به ارتفاع ۵ کیلومتری از سطح اندازه‌گیری منتقل و سپس تحلیل می‌شوند. شکل ۱۲ میدان در ارتفاع جدید و نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. نقاط سرخ‌رنگ روی مدل جواب‌های روش ANEUL را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نوفه افزوده شده تا چه حدی نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در واقع فقط عمق چشمه ۱ با دقت مطلوبی برآورد شده و عمق سایر ساختارها بیشتر از مقدار واقعی به دست آمده است. نکته قابل توجه این است که برای این چشمه‌ها اندیس ساختاری بزرگ‌تر از مقدار مورد انتظار



شکل ۱۲. (الف) میدان پس از ادامه فراسو و (ب) نتایج روش ANEUL برای داده‌های آمیخته به نوفه، نقطه‌های سرخ‌رنگ محل موقعت برآورد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. (الف). مدوله‌سازی مشتق سوم میدان و (ب) تبدیل مشتق سوم میدان

می‌تواند شاهدهی بر مزیت روش‌های چندمقیاسی باشد.

۴. داده‌های واقعی

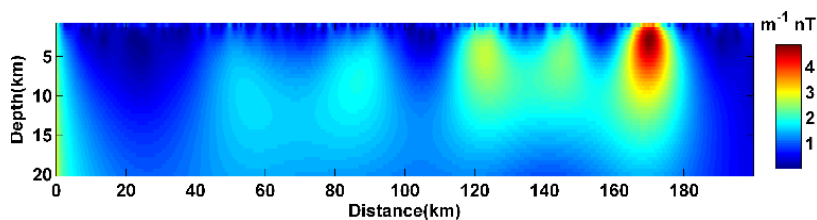
به منزله یک مثال واقعی، از داده‌های مغناطیسی هوابرد در امتداد یک نیم‌رخ عمود بر راستای ساختار دو بُعدی استفاده می‌شود. این داده‌ها مربوط به منطقه‌ای در کشور سوئد است. شکل ۱۵ نقشه مغناطیسی و بی‌هنجاری مغناطیسی در امتداد نیم‌رخ استخراج شده را نشان می‌دهد. مطابق اطلاعات زمین‌شناسی این بی‌هنجاری‌ها ناشی از نفوذ رگه‌های ضخیم دیابازی است و همچنین گسل‌ها و شکستگی‌های زیرسطحی نیز وجود دارد.

شکل ۱۴ تبدیل دامنه سیگنال تحلیلی مشتق

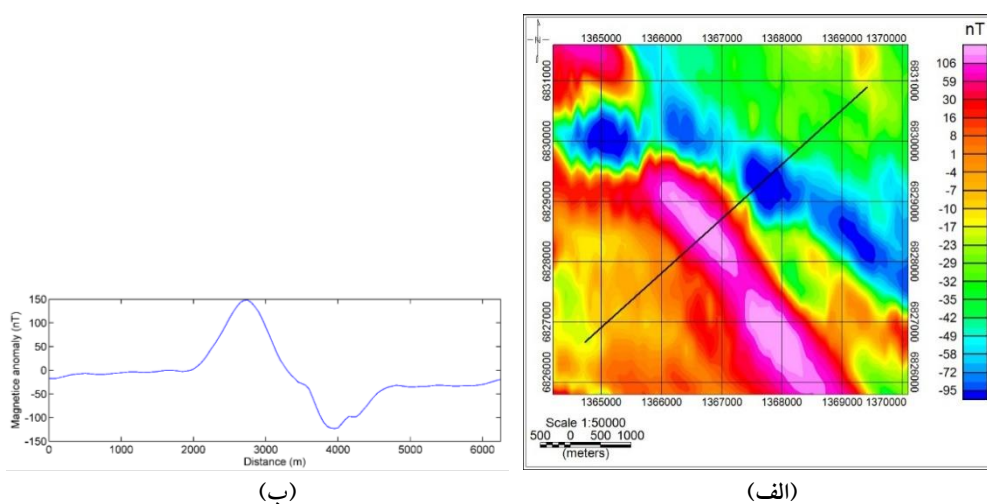
اول میدان را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، پایداری نسبت به نوفه واضح است. این پایداری زیاد نسبت به نوفه مهم‌ترین مزیت روش‌های چندمقیاسی در مقایسه با سایر روش‌های مشتق‌مبنای تحلیل میدان است. در جدول ۸ مقدار عددی عمق و موقعت افقی برآورد شده برای داده آمیخته به نوفه آمده است. با توجه به مقدارهای این جدول کاملاً مشهود است که نتایج به دست آمده از تحلیل چندمقیاسی میدان، با وجود نوفه شدید، از نتایج سایر روش‌ها، حتی در صورتی که نوفه وجود نداشته باشد، دقیق‌تر است (مقایسه شود با جدول ۷). در نتیجه، این مثال

جدول ۸. مقایسه نتایج برای داده آلوده به نوفه

Methods	Parameters (km)	۱	۲	۳	۴	۵
Real	X_0	۵۰	۹۰	۱۲۰	۱۴۸	۱۷۰
	Z_0	۱۰	۸	۵	۵	۳/۵
ANEUL	X_0	۵۲/۱	۸۹	۱۲۳	۱۴۵/۶	۱۶۹/۹
	Z_0	۱۰/۳۴	۱۳/۶۸	۱۳/۹	۱۲/۶۲	۹/۷
DEXP(Module)	X_0	۵۲/۲	۸۸/۲	۱۲۰/۲	۱۴۴	۱۷۰/۱
	Z_0	۱۰	۸/۷۵	۵	۵/۵	۳/۲۵
DEXP (AS)	X_0	۵۵/۳	۸۶/۷	۱۲۳	۱۴۵/۵	۱۷۰
	Z_0	۱۰/۵	۸	۵	۵/۵	۳



شکل ۱۴. تبدیل دامنه سیگنال تحلیلی مشتق اول میدان



شکل ۱۵. (الف) نقشه مغناطیسی و (ب) داده مغناطیسی در امتداد نیم‌رخ نشان داده شده در شکل (الف)

می‌دهد.

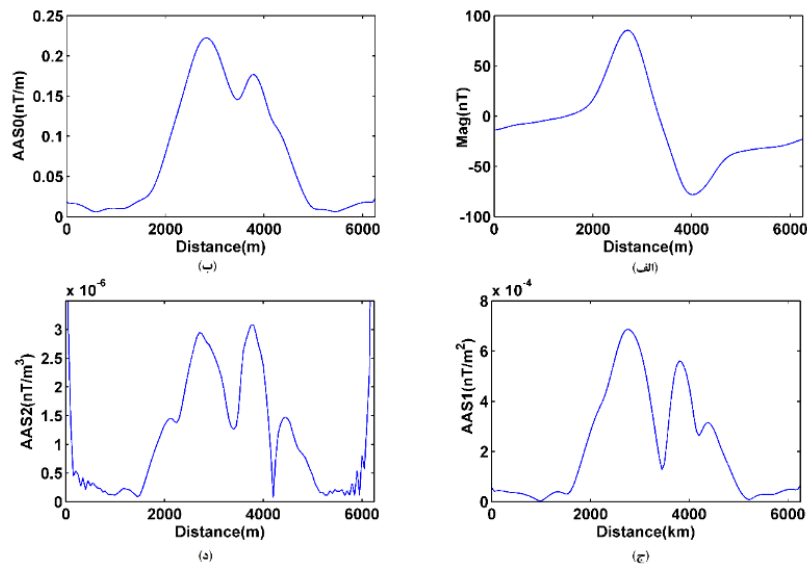
با توجه به مقدارهای منفی به‌دست آمده برای عمق و اندیس ساختاری چشمه‌های واقع در فاصله‌های ۹۵۰ و ۶۱۰۰ متری، این چشمه‌های شناسایی شده نمی‌توانند واقعی باشند و ممکن است ناشی از خطای محاسباتی یا نوفه‌ها باشند. ارتفاع ادامه فراسو از مقدار عمق به‌دست آمده کم شده است. اندیس ساختاری چشمه واقع در فاصله ۲۸۵۰ متری طبق محاسبات صورت گرفته ۱/۸ است. با توجه به نوع ساختار، این مقدار از حدود قابل انتظار بیشتر است. بنابراین ممکن است عمق به‌دست آمده نیز بیشتر از مقدار واقعی باشد. حالت مشابه این مورد در مدل مصنوعی (اولین ساختار آن) نیز قابل مشاهده است.

برای برآورد چشمه‌ها با روش اولیتر از یک پنجره ۹ نقطه‌ای استفاده شده است. پس از اعمال معیارهای لازم جهت حذف جواب‌های غیر منطقی با توجه به میزان تجمع دسته جواب‌ها نتایج نشان داده شده در شکل ۱۷ به‌دست می‌آید. اندیس ساختاری تقریباً برابر ۰/۵ فرض شده است. چشمه دوم توافق خوبی با روش ANEUL دارد.

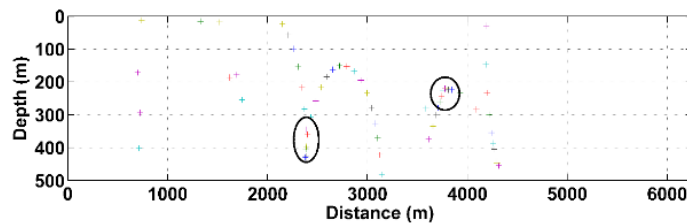
با توجه به اینکه روش‌های ذکر شده مبتنی بر مشتق‌های میدان هستند، نسبت به نوفه حساسیت بسیار زیادی دارند. بنابراین برای کاهش اثر بازدارنده نوفه‌ها، قبل از اعمال هر روش، با استفاده از فیلتر ادامه فراسو داده‌ها به یک سطح بالاتر منتقل می‌شوند. لازم به ذکر مجدد این نکته است که روش‌های چندمقیاسی به علت به کارگیری هم‌زمان عملگر مشتق و ادامه فراسو، بسیار پایدارند و می‌توان در آنها از مشتق‌های مرتبه بالا استفاده کرد.

ابتدا داده‌ها با روش ANEUL تحلیل می‌شوند. چون در این روش از مشتق مرتبه سوم میدان استفاده می‌شود. برای جلوگیری از تقویت شدید اثر نوفه‌ها، داده‌ها به ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح اندازه‌گیری منتقل می‌شوند. در این ارتفاع مشتق‌های میدان به پایداری می‌رسند. شکل ۱۶ میدان در ارتفاع ۲۰۰ متری و دامنه سیگنال تحلیلی از مرتبه صفر، یک و دو را نشان می‌دهد.

موقعیت افقی چشمه‌ها با توجه محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی برآورد می‌شود و محاسبات در این نقطه‌ها صورت می‌گیرد. جدول ۹ نتایج به‌دست آمده از این روش را نشان



شکل ۱۶. (الف) میدان مغناطیسی در ارتفاع ۲۰۰ متری، دامنه سیگنال تحلیلی از مرتبه‌های: (ب) صفر، (ج) اول و (د) دوم



شکل ۱۷. برآورد مشخصه چشمه‌ها با روش اویلر

درحالی‌که عمق آن با عمق به‌دست آمده از روش ELW سازگاری دارد. همچنین چشمه واقع در فاصله ۴۲۹۰ متری توسط روش ANEUL و اویلر شناسایی نشده است. خطای روش ANEUL می‌تواند به علت وجود مشتق‌های مرتبه سوم میدان باشد. تا اینجا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که چشمه دوم در فاصله ۳۷۰۰ تا ۳۸۰۰ متری و در عمق ۲۲۰ تا ۲۹۰ متری واقع شده است.

جدول ۹. نتایج روش ANEUL

$X_0(m)$	۹۵۰	۲۸۵۰	۳۸۰۰	۶۱۰۰
Depth (m)	-۱۶۰	۵۶۰	۲۹۰	-۱۵۰
N	-۰/۹۸	۱/۸	۰/۳	-۰/۸۸

جدول ۱۰. نتایج روش ELW

$X_0(m)$	۲۸۳۴	۳۷۷۰	۴۲۹۰
Depth (m)	۴۵۰	۲۶۴	۲۰۰
N	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱

شکل ۱۸ خم کمیت‌های موردنیاز برای به‌کارگیری روش ELW را نمایش می‌دهد. قبل از اعمال الگوریتم ELW داده‌ها به ارتفاع ۲۰۰ متری منتقل می‌شوند. برای کاهش اثر تداخلی چشمه‌های مجاور از یک پنجره ۱۰ نقطه‌ای استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این روش پس از حذف مقادیر غیر واقعی در جدول ۱۰ آمده است. قطع‌شدگی یا تغییر فاز ناگهانی در نمودار فاز محلی می‌تواند موقعیت افقی چشمه‌ها را برآورد کند.

با استفاده از روش ELW و ANEUL موقعیت افقی تقریباً یکسانی برای دو ساختار اول به‌دست می‌آید. همچنین عمق ساختار دوم نیز در هر دو روش توافق دارد. اما دو روش، عمق‌های متفاوتی برای ساختار اول می‌دهند. روش اویلر نیز در توافق با دو روش دیگر ساختار دوم را به‌خوبی برآورد می‌کند اما موقعیت افقی چشمه اول نسبت به دو روش قبلی تفاوت بیشتری دارد،

شکل ۱۸. خم کمیت‌های مورد استفاده در روش ELW، (الف) فاز محلی، (ب) زاویه شیب، (ج) عدد موج محلی قائم و (د) عدد موج افقی

جدول ۱۲. نتایج روش SPI

X_0 (m)	۲۷۰۰	۳۸۵۰	۴۴۵۰
Depth (m)	۳۱۹	۳۰۱	۳۳۵
N	۰/۰۰۱	۰/۲	۰/۳

جدول ۱۱. نتایج روش iSPI

X_0 (m)	۲۷۰۰	۳۸۵۰	۴۴۵۰
Depth (m)	۵۹۵	۲۹۰	۳۶۴
N	۰/۰۰۱	۰/۲	۰/۳

چندمقیاسی با ادامه فراسوی میدان مغناطیسی از ارتفاع ۱۰ تا ۵۰۰ متری با گام ۵ متر تولید می‌شود. برای افزایش میزان تفکیک چشمه‌ها، از مشتق اول میدان استفاده شده است. شکل ۱۹-الف مشتق میدان در اولین مقیاس و شکل ۱۹-ب میدان چندمقیاسی، مرزها و روش هندسی را نشان می‌دهد. با استفاده از روش هندسی سه چشمه در موقعیت‌های تقریبی (۲۷۵۰، ۳۳۰) و (۳۹۰۰، ۲۳۰) و (۴۳۰۰، ۲۰۰) شناسایی شده‌اند. با توجه به شکل ۱۹-ب همه ساختارهای برآورد شده با روش هندسی، پاسخ مشخصی روی خم مشتق میدان دارند. از طرفی چون تعداد مرزهای منتهی به چشمه اول زیاد است، موقعیت برآورد آن نیز اعتبار زیادی دارد. ضمن اینکه مقدار عمق در توافق خوبی با روش اویلر و SPI است. علاوه بر این، مثال مصنوعی نیز نشان داد که دقت روش هندسی از سایر روش‌های تحلیلی بیشتر است. موقعیت

برای برآورد مشخصه‌های چشمه‌ها با دو روش iSPI و SPI داده‌های انتقال داده شده به ارتفاع ۲۰۰ متری تحلیل می‌شوند. جواب‌های به دست آمده از این دو روش در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ ذکر شده است. با کاربرد این دو روش، به علت حساسیت زیاد نسبت به نوفه، چشمه‌های متعددی شناسایی می‌شوند که بسیاری از آنها با توجه به مقدارهای عددیشان، غیر واقعی است. برای مثال شاخص ساختاری آنها مقداری منفی و یا بسیار بزرگ است، بنابراین این نوع جواب‌ها حذف شده‌اند. برای برآورد موقعیت افقی چشمه‌ها همانند روش ELW از محل مقدارهای بیشینه خم عدد موج محلی افقی در شکل ۱۸ استفاده شده است.

در ادامه از روش هندسی، تبدیل DEXP مدوله‌سازی و سیگنال تحلیلی و تبدیل DEXP خود کار برای برآورد مشخصه‌های چشمه استفاده می‌شود. ابتدا میدان

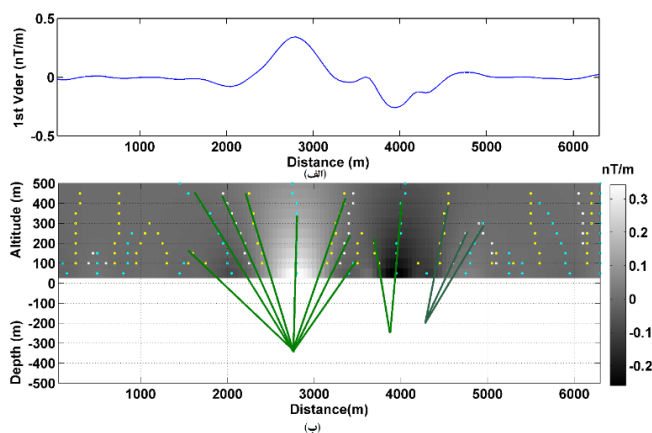
علاوه بر این در ادامه خواهیم دید که روش DEXP خودکار، چشمه سوم را مطابق با این دو روش برآورد می‌کند.

در تبدیل DEXP خودکار از عدد موج محلی مرتبه اول استفاده می‌شود. شکل ۲۱ عدد موج محلی در اولین مقیاس و تبدیل DEXP آن را نشان می‌دهد. به علت شدید بودن اثرهای غیر خطی، با استفاده از این روش فقط چشمه سوم به تصویر کشیده شده است؛ که با نتایج به دست آمده از سایر روش‌ها سازگاری خوبی دارد.

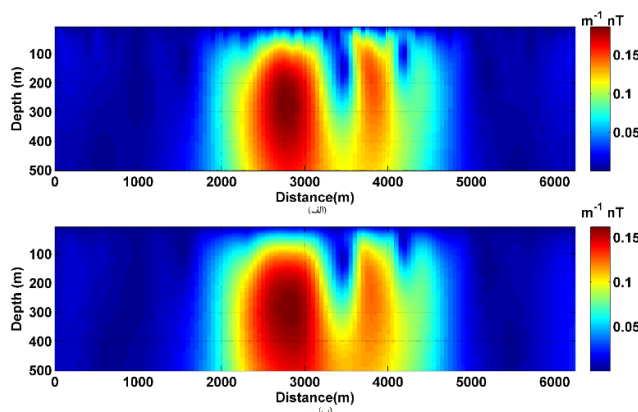
در جدول ۱۳ مقدار کمی عمق و موقعیت افقی چشمه‌های برآورد شده با استفاده از همه روش‌ها جمع‌بندی شده است. در نهایت با مقایسه مقدارهای به دست آمده برای عمق و محل ساختارها با استفاده از همه روش‌های بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که نتایج روش هندسی و تبدیل DEXP همواره در توافق با حداقل دو روش دیگر هستند و بنابراین اعتبار قابل قبولی دارند.

چشمه دوم نیز با بیشتر روش‌های قبل سازگاری خوبی دارد. همچنین مقدار برآورد شده برای عمق چشمه سوم با روش ELW مطابقت بسیار خوبی با روش هندسی دارد، هر چند موقعیت افقی آنها تا حدی متفاوت است. دو روش SPI و iSPI عمق چشمه سوم را بیشتر از روش هندسی و ELW برآورد کرده‌اند.

با فرض شاخص ساختاری صفر تبدیل DEXP مدوله‌سازی مشتق دوم میدان و سیگنال تحلیلی مشتق اول میدان محاسبه می‌شود (شکل ۲۰). با توجه به تصویرهای تولید شده با تبدیل DEXP، سه چشمه به خوبی با تفکیک زیادی به تصویر کشیده می‌شوند. با توجه به محدوده بیشینه این تبدیل ملاحظه می‌شود که عمق و موقعیت به دست آمده برای چشمه‌ها با نتایج اغلب روش‌های بررسی شده و روش هندسی در توافق به نسبت خوبی است. برای نمونه عمق چشمه سوم تقریباً برابر با عمق حاصل از روش‌های هندسی و ELW است.



شکل ۱۹. (الف) مشتق میدان در اولین مقیاس و (ب) میدان چندمقیاسی، مرزها و روش هندسی



شکل ۲۰. (الف) تبدیل DEXP مدوله‌سازی مشتق دوم میدان و (ب) تبدیل DEXP سیگنال تحلیلی مشتق اول میدان

شکل ۲۱. (الف) عدد موج محلی مرتبه اول در اولین مقیاس و (ب) تبدیل DEXP عدد موج محلی، نقطه سرخ‌رنگ محل برآورد چشمه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۳. نتایج جمع‌بندی و مقایسه نتایج حاصل از همه روش‌ها برای داده واقعی

Methods	Parameters (m)	۱	۲	۳
ANEUL	X_0	۲۸۵۰	۳۸۰۰	-
	Z_0	۵۶۰	۲۹۰	-
Euler	X_0	۲۴۰۰	۳۸۰۰	-
	Z_0	۳۵۰	۲۲۰	-
SPI	X_0	۲۷۰۰	۳۸۵۰	۴۴۵۰
	Z_0	۳۱۹	۳۰۱	۳۳۵
iSPI	X_0	۲۷۰۰	۳۸۵۰	۴۴۵۰
	Z_0	۵۹۵	۲۹۰	۳۶۴
ELW	X_0	۲۸۳۴	۳۷۷۰	۴۲۹۰
	Z_0	۴۵۰	۲۶۴	۲۰۰
Auto-DEXP	X_0	-	-	۴۴۵۰
	Z_0	-	-	۲۱۰
DEXP(Module)	X_0	۲۷۵۰	۳۸۰۰	۴۳۵۰
	Z_0	۲۸۰	۲۰۰	۲۳۰
DEXP (AS)	X_0	۲۹۰۰	۳۸۰۰	۴۴۰۰
	Z_0	۳۱۰	۲۲۰	۲۱۰
Geometric	X_0	۲۷۵۰	۳۹۰۰	۴۳۰۰
	Z_0	۳۳۰	۲۳۰	۲۰۰

۵. نتیجه‌گیری

برای مدل مصنوعی می‌توان به جمع‌بندی زیر رسید: (۱) همه روش‌های به کار گرفته شده، موقعیت افقی چشمه‌ها را با دقت خوبی برآورد کردند، (۲) روش‌های چندمقیاسی عمق چشمه‌ها را با دقت بسیار خوبی برآورد کردند اما دقت و اعتبار سایر روش‌ها در برآورد عمق به اندازه روش‌های چندمقیاسی نیست، (۳) با استفاده از روش‌های گوناگون مقدارهای متفاوتی برای اندیس ساختاری یک چشمه به نسبت پیچیده به دست می‌آید. چراکه میدان مدل‌های پیچیده همگن نیست و چون همه

در این تحقیق به بررسی برخی روش‌های متداول برای برآورد موقعیت و شکل ساختاری‌های مغناطیسی و گرانی پرداخته شد. از آنجا که در تفسیر میدان‌های پتانسیل نمی‌توان صرفاً به نتایج به دست آمده از یک روش اعتماد کرد، استفاده از روش‌های گوناگون برای برآورد مشخصه‌های یک چشمه ضروری است. در این صورت مقایسه نتایج روش‌های گوناگون درجه اعتبار تفسیر را افزایش می‌دهد. از تحلیل صورت گرفته

می توان به این نتایج اعتماد کرد.

مراجع

- بنی عامریان، ج. و اسکویی، ب.، ۱۳۸۸، مقایسه نتایج به دست آمده از اعمال روش ANEUL روی داده های مغناطیسی، داده های منتقل شده به قطب و داده های شبه گرانی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳، ۴۱-۵۷.
- Abbas, M., A., Fedi, M. and Florio, G., 2014, Improving the local wavenumber method by automatic DEXP transformation, *Journal of Applied Geophysics*, 111, 250-255.
- Abbas, M., A. and Fedi, M., 2015, Application of the DEXP method to the streaming potential data, 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Turin, Italy.
- Bracwell, R. N., 2000, *The Fourier transform and its application*, Mc Graw Hill Press, Third Edition.
- 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., Florio, G. and Quarta, T., 2009, Multiridge analysis of potential fields, geometric method and reduced euler deconvolution, *Geophysics*, 74(4), L53-L65, doi: 10.1190/1.3142722.
- 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, *Geophysical Journal international*, 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), *Geophysical Prospecting*, 57, 479-489.
- Grant, F. S. and Martin, L., 1966, Interpretation of aeromagnetic anomalies by the use of characteristic curves, *Geophysics*, 31, 135-148.
- Hinze, W. J., vonFrese, R. B. and Saad, A. H., 2013, *Gravity and magnetic exploration principles, Practices and Application*. Cambridge University Press.
- Hsu, S. K., Coppens, D. and Shyu, C. T. 1998, Depth to magnetic source using the generalized analytic signal, *Geophysics*, 63, 1947-1957.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Euler's equation, *Geophysical Prospecting*, 56, 15-25.
- Keating, P., 2009, Improved use of the local wavenumber in potential-field interpretation, *Geophysics*, 74(6), L75-L85.
- Koulomzine, T., Lamontagne, Y. and Nadeau, A., 1970, New methods for the direct interpretation of magnetic anomalies caused by inclined dikes of infinite length, *Geophysics*, 35, 812-830.
- Li, X., 2006, Understanding 3D analytic signal amplitude, *Geophysics*, 71, L13-L16.
- Mushayandevu, M. F., van Driel, P., Reid, A. B. and Fairhead, J. D., 2001, Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution, *Geophysics*, 66, 814-823.
- Mushayandevu, M. F., Lesur, V., Reid, A. B. and Fairhead, J. D., 2004, Grid Euler deconvolution with constraints for 2D structures, *Geophysics*, 69, 489-496.
- 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 with two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 39, 85-92.
- Nabighian, M. N. and Hansen, R. O., 2001, Unification of Euler and Werner deconvolution in three dimensions via the generalized Hilbert transform, *Geophysics*, 66, 1805-1810.
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S.,

- Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Pearson, W. C., Peirce, J. W., Phillips, J. D., and Ruder, M. E., 2005a, Historical development of the gravity method in exploration, *Geophysics*, 70, 63ND-89ND.
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Peirce, J.W., Phillips, J.D., Ruder, M. E., 2005b, Historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysics*, 70, 33ND-61ND.
- Phillips, J. D., Hansen, R. O. and Blakely, R., 2007, The use of curvature in potential-field interpretation. *Exploration Geophysics.*, 38, 111-119.
- Ravat, D., 1996, Magnetic properties of unruled steel drums from laboratory and field-magnetic measurements, *Geophysics*, 61, 1325-1335.
- Reford, M. S., 1980, History of geophysical exploration-magnetic method, *Geophysics*, 45, 1640-1658.
- 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.
- Reid, A. B. and Thurston, J. B., 2014, The structural index in gravity and magnetic interpretation, Errors, uses, and abuses, *Geophysics*, Jul 2014, 79(4), J61-J66.
- Salem, A. and Ravat, D., 2003, A combined analytic signal and Euler method ANEUL for automatic interpretation of magnetic data, *Geophysics*, 68, 1952-1961.
- Salem, A., Ravat, D., Smith, R. and Ushijima, K., 2005, Interpretation of magnetic data using an enhanced local wavenumber (ELW) method, *Geophysics*, 70, 141-151.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R. and Ravat, D., 2008, Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives, *Geophysics*, 73, L1-L10.
- Silva, J. B. C. and Barbosa, V. C. F. 2003, 3D Euler deconvolution: theoretical basis for automatically selecting good solutions, *Geophysics*, 68, 1962-1968.
- Smellie, D. W., 1956, Elementary approximations in aeromagnetic interpretation, *Geophysics*, 21, 1021-1040.
- Smith, R. S., Thurston, J. B., Dai, T. and MacLeod, I. N., 1998, iSPI- the improved source parameter imaging method, *Geophysical Prospecting*, 46, 141-151.
- Stavrev, P. and Reid, A. B., 2007, Degrees of homogeneity of potential fields and structural indices of Euler deconvolution, *Geophysics*, 72, L1-L12.
- 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.