



## تخمین عمق و شاخص ساختار بی‌هنجاری‌های دوبعدی مغناطیسی توسط سیگنال تحلیلی بهبود یافته

محمد رسول نیک بخش<sup>۱</sup>، میرستار مشین چی اصل<sup>۲\*</sup>، محسن اویسی موخر<sup>۳</sup> و حمیدرضا سیاهکوهی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژئوفیزیک دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- استادیار، گروه ژئوفیزیک دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳- استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی

۴- استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [m.meshinchi@srbiau.ac.ir](mailto:m.meshinchi@srbiau.ac.ir)

### واژگان کلیدی

### چکیده

سیگنال تحلیلی بهبود یافته  
بی‌هنجاری مغناطیسی  
تخمین عمق  
شاخص ساختاری

مهم‌ترین هدف در تفسیر داده‌های مغناطیسی، محاسبه عمق و تعیین هندسه (شاخص ساختاری) بی‌هنجاری مغناطیسی است. به همین منظور روش‌های متعددی ابداع و پیشنهاد شده است. کاربردی‌ترین روش، استفاده از روش سیگنال تحلیلی است. در این تحقیق روش جدیدی برای تفسیر داده‌های دوبعدی مغناطیسی پیشنهاد شده است. در این روش از ترکیب سیگنال تحلیلی و گرادیان با بهبود روش سیگنال تحلیلی برای تخمین عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی استفاده شده است. به دلیل حساس بودن روش حاضر به نوفه از روش فراسو برای کاهش اثر نوفه بکار برده شده است. به طور کلی روش سیگنال تحلیلی یک روش مشتق‌گیری است که این روش باعث تقویت دامنه نوفه‌ها می‌شود. داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده همواره با نوفه همراه‌اند، بنابراین برای شبیه‌سازی داده‌های واقعی باید داده‌هایی تولید شوند که به نوفه آلوده باشند. به عبارت دیگر باید به داده‌های مصنوعی مقداری نوفه اضافه شود. در داده‌های مصنوعی نوفه دار، جواب‌ها ناپایدار هستند. برای کاهش اثر نوفه در ایجاد ناپایداری، از فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌شود. استفاده از این تابع سیگنال تحلیلی نیازی به اطلاع از جهت مغناطیس‌شدگی ندارد در نتیجه استفاده از آن در مواقع وجود مغناطیس‌شدگی بازماند مفید است. برای بررسی دقت روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته از یک مدل دایکی شکل در عمق‌های متفاوت استفاده شده است. نتایج به دست آمده توسط روش پیشنهاد شده بر روی داده‌های مصنوعی نوفه دار و بدون نوفه نشان می‌دهد که روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته خطایی کمتر از ۸ درصد در محاسبه عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دارد. از این روش برای تعیین عمق کانسار آهن خلیل‌آباد واقع در استان کرمان، شمال غرب شهرستان سیرجان استفاده شد و نتایج آن با نتایج روش تخمین عمق اویلر و اطلاعات گزارش‌های حفاری مورد مقایسه قرار گرفته است.

تحلیلی و اوایل داده‌های مغناطیس هوایی را تفسیر کردند. بنی عامریان و همکاران (۱۳۸۹) توسط روش ترکیبی AN-EUL عمق، شاخص ساختاری مکان منبع‌های مغناطیسی برآورد کردند.

(Salem et al (2004) با استفاده از مشتق‌های مرتبه اول و دوم میدان سیگنال تحلیلی و گرادیان افقی، روش کمترین مربعات خطی را توسعه دادند که اطلاعاتی در مورد عمق و هندسه منابع زیرسطحی تولید کرد. با این حال روش آن‌ها به دانستن موقعیت افقی منابع مولد بی‌هنجاری نیاز دارد که برای تعیین آن‌ها از نقطه پیک آنومالی سیگنال تحلیلی استفاده می‌شود. اما کافی نبودن چگالی داده‌های مشاهده‌ای و یا آغشته بودن آن‌ها به نوفه از مشکلات این روش محسوب می‌شود، نتیجه این بی‌دقتی در انتخاب موقعیت افقی سبب بروز خطا در هر دو پارامتر عمق و هندسه منبع زیرسطحی می‌شود. (Li (2006 نشان داد که سیگنال تحلیلی ۳ بعدی به جهت مغناطیسی حساس است. (Wen et al. (2007 ترکیب سیگنال تحلیلی با روش اوایلر دی کانونولوشن برای تخمین عمق و اندیس ساختاری منابع مغناطیسی را پیشنهاد دادند، (Copper (2015 استفاده از دامنه سیگنال تحلیلی برای تخمین مکان و عمق دایک نازک را پیشنهاد می‌کند. (Zhou et al. (2016 از تصحیح ارتفاعی سیگنال تحلیلی برای محاسبه عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی استفاده کردند. به منظور رفع محدودیت‌های مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه و بهبود تخمین پارامترهای منابع مغناطیسی با استفاده از سیگنال تحلیلی، در این مقاله استفاده از روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته که ترکیب روش سیگنال تحلیلی با روش گرادیان کل است برای تفسیر بی‌هنجاری‌های دوبعدی مغناطیسی، پیشنهاد شده است. برای امکان‌سنجی روش پیشنهادی از مدل دایکی با عمق‌های متفاوت و داده‌های مغناطیسی کانسار آهن منطقه خیرآباد واقع در شهرستان سیرجان استفاده شده است.

با توجه به حفاری‌های اکتشافی صورت گرفته روی کانسار آهن خلیل‌آباد (گزارش نهایی پایان اکتشاف معدن خلیل‌آباد)، نتایج آن با برآورد عمق به دست آمده از روش پیشنهادی و روش تخمین عمق اوایلر مقایسه شده و اعتبار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- تئوری روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته

دامنه سیگنال تحلیلی دوبعدی توسط (Nabighian (1972 به صورت رابطه زیر ارائه گردید:

$$|AS(x, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

مهم‌ترین هدف در تفسیر داده‌های مغناطیسی، محاسبه عمق و تعیین هندسه (شاخص ساختاری) بی‌هنجاری مغناطیسی است. به همین منظور روش‌های متعددی ابداع و پیشنهاد شده است. کاربردترین روش، استفاده از روش سیگنال تحلیلی است که نخستین بار (Nabighian (1974 برای برآورد عمق همبری (contact) به کار برد (Atchuta et al. (1981 با استفاده از مجموعه نقاط مشخصی روی منحنی دامنه سیگنال تحلیلی، روابطی را برای محاسبه عمق تا سطح دایک‌های ضخیم و نازک به دست آوردند. استفاده از این تابع سیگنال تحلیلی نیازی به اطلاع از جهت مغناطیس‌شدگی ندارد در نتیجه استفاده از آن در مواقع وجود مغناطیس‌شدگی بازماند مفید است. افراد زیادی برای محاسبه پارامترهای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از روش سیگنال تحلیلی استفاده کردند. اسکویی و همکاران (۱۳۹۱) روش سیگنال تحلیلی در برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی ساختارهای دوبعدی، علمدار و همکاران (۱۳۹۲) تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی توسط مشتقات سیگنال تحلیلی، کنگازیان کنگازی و اسکویی (۱۳۹۴) برآورد عمق و تعیین محل توده‌های مغناطیسی با استفاده از سیگنال تحلیلی تانسور گرادیان مغناطیسی در حوزه بسامد، (Zhou et al. (2016 استفاده از سیگنال تحلیلی برای تعیین عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، (Oruc (2010 استفاده از سیگنال تحلیلی برای تعیین عمق و موقعیت دوقطبی‌های مغناطیسی، (Roest et al. (1992 از نصف عرض دامنه سیگنال تحلیلی، (MacLeod et al. (1993 از فاصله بین نقاط عطف دامنه سیگنال تحلیلی برای تعیین عمق توده‌های دوبعدی استفاده کردند. روش سیگنال تحلیلی کمتر تحت تأثیر اختلال ایجاد شده از بی‌هنجاری‌های مجاور قرار می‌گیرد. (Hsu et al. (1998 روش سیگنال تحلیلی سه‌بعدی را توسعه دادند و از مشتقات قائم مرتبه‌های بالاتر سیگنال تحلیلی تعمیم‌یافته که مرز توده‌ها را بهتر از سیگنال تحلیلی مشخص می‌کند، استفاده کردند که این روش فقط برای ساختارهای زمین‌شناسی خاص مثل همبری‌ها، صفحات نازک و دوقطبی‌ها کاربرد داشت (Ma and Du, Ma and Li (2012) و (Smith et al. (2005) رابطه سیگنال تحلیلی را برای مدل‌های دوبعدی همبری، دایک‌های نازک شیب‌دار و استوانه افقی تعریف کردند و با بهنجار کردن مقدار سیگنال تحلیلی با مقدار بیشینه آن، عمق، شاخص ساختاری و تباین خودپذیری توده‌های گوناگون را به دست آوردند.

پیشبرد استفاده از روش سیگنال تحلیلی برای تخمین دو پارامتر عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی توسط (Salem (1997)؛ (Debeglia and Corpel (1998)؛ (Hsu et al (1998)؛ (Salem (2003)؛ (Ravat and Ravat انجام گرفته است. در ایران نیز توسط اوپسی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از روش بهبود یافته تلفیقی سیگنال

عدم وابستگی به مقدار  $k$  است.

در ادامه رابطه ۷ برای دو حالت  $z = 0$ ،  $x = x_0$  و  $z = 0$  و  $x = x_0 + b$  محاسبه می‌شود:

$$\frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0} = \frac{(N+1)}{z_0} \quad (8)$$

$$\frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0+b} = \frac{(N+1)}{[b^2 + z_0^2]^{1/2}} \quad (9)$$

با تقسیم رابطه ۸ بر رابطه ۹ و یک باز چینی ساده عمق بی‌هنجاری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$z_0 = \sqrt{\frac{b^2}{\left[ \frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0} \right]^2 - \left[ \frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0+b} \right]^2}} - 1 \quad (10)$$

موقعیت افقی بی‌هنجاری از روی پیک منحنی سیگنال تحلیلی و منحنی رابطه ۷ مشخص می‌شود، همچنین عمق بی‌هنجاری با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه عمق، با استفاده از رابطه ۸ یا ۹ می‌توان شاخص ساختاری بی‌هنجاری را محاسبه کرد، که دقت اندازه‌گیری شاخص ساختاری، یک تابع وابسته به دقت اندازه‌گیری عمق بی‌هنجاری است.

همچنین راه دومی برای محاسبه شاخص ساختاری پیشنهاد می‌شود که در آن از تفریق مربع رابطه ۸ از مربع رابطه ۹ و یک باز چینی ساده، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N = \sqrt{\frac{b^2}{\left( \frac{1}{\left[ \frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0+b} \right]^2} \right) - \left( \frac{1}{\left[ \frac{SAS}{AS} \Big|_{x=x_0} \right]^2} \right)}} - 1 \quad (11)$$

## ۲-۱- بررسی روش پیشنهادی بر روی داده‌های مصنوعی

یکی از مدل‌هایی که اغلب در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل دایک است. دایک نازک به دایکی گفته می‌شود که ضخامت آن نسبت به عمق سطح رویه تا سطح اندازه‌گیری کوچک‌تر باشد. در این حالت دامنه سیگنال تحلیلی دارای یک بیشینه است و نقطه بیشینه دامنه روی مرکز دایک قرار می‌گیرد. که در این بخش به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی بر روی داده‌های مصنوعی یک مدل دایک نازک با سه عمق متفاوت، ۵ متر، ۱۰ متر و ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

حالت اول شامل یک دایک قائم است که در عمق ۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است. زاویه میل و انحراف مغناطیس شدگی

که در این رابطه  $\frac{\partial T}{\partial x}$  و  $\frac{\partial T}{\partial z}$  به ترتیب مشتق افقی و قائم بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل است.

رابطه سیگنال تحلیلی در مورد مدل‌های مغناطیسی دوبعدی مانند همبری مغناطیسی، دایک و استوانه افقی که در موقعیت افقی  $x_0$  قرار گرفته‌اند و عمق بالائی آن‌ها  $z_0$  است از سه رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$AS(x, z) = \frac{\alpha}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}} \quad \begin{matrix} \text{مدل} \\ \text{همبری} \end{matrix}$$

$$AS(x, z) = \frac{\alpha}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^1} \quad \text{مدل دایک} \quad (2)$$

$$AS(x, z) = \frac{2\alpha}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}} \quad \begin{matrix} \text{مدل} \\ \text{استوانه} \\ \text{افقی} \end{matrix}$$

که در این رابطه  $\alpha$  مقدار ثابتی است که به مغناطیس شدگی توده بستگی دارد (Macleod et al., 1993).

Salem et al (2004) شکل کلی و تعمیم یافته رابطه فوق را به شکل زیر ارائه کردند:

$$AS(x, z) = \frac{k}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{N+1/2}} \quad (3)$$

در این رابطه  $k$  فاکتور دامنه که به شدت مغناطیس شدگی توده وابسته است و  $N$  شاخص ساختاری که مشخصه ماهیت هندسه منبع مغناطیسی است.

در ادامه با مشتق رابطه (۳) در راستای افقی و قائم روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{\partial AS(x, z)}{\partial x} = k \frac{(N+1)(x-x_0)}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{N+3/2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial AS(x, z)}{\partial z} = k \frac{(N+1)(z-z_0)}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{N+3/2}} \quad (5)$$

با جمع مربع دو رابطه ۴ و ۵ و محاسبه جذر این جمع، رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$AS = \sqrt{\frac{\partial AS(x, z)^2}{\partial x} + \frac{\partial AS(x, z)^2}{\partial z}} = k \frac{(N+1)}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{N+1/2}} \quad (6)$$

با تقسیم رابطه ۶ بر رابطه ۳ معادله زیر به دست می‌آید:

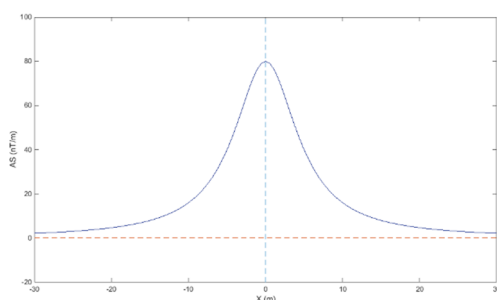
$$\frac{SAS}{AS} = \frac{(N+1)}{[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

ویژگی مهم این رابطه در روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته،

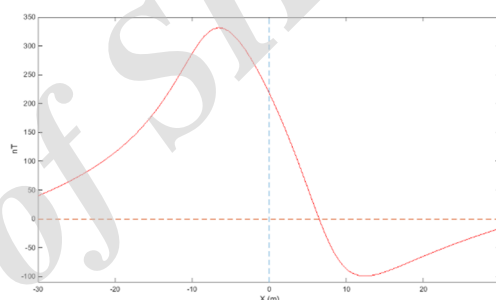
**نیک بخش و همکاران، تخمین عمق و شاخص ساختار بی‌هنجاری‌های دوبعدی مغناطیسی توسط سیگنال تحلیلی بهبود یافته، صفحات ۳۶۳-۳۵۱.**

محاسبه شده‌اند (شکل ۴- الف و ب). در حالت سوم با افزایش عمق مدل به ۱۵ متر در شکل ۵- الف پاسخ مغناطیسی مدل مذکور را نشان می‌دهد. شکل ۵- ب نمودار سیگنال تحلیلی مدل فرض شده نشان داده شده است. شکل ۵- ج نمودار SAS و شکل ۵- د نمودار SAS/AS نشان داده شده است که با استفاده از این نمودار دو نقطه  $b=9m$  و  $b=0$  مقدار SAS/AS محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه ۱۰ عمق مدل  $Z_0 = 15m$  و شاخص ساختاری  $N = 0.95$  محاسبه شده‌اند (شکل ۶- الف و ب). با بررسی نتایج می‌توان دریافت که روش پیشنهادی با عمق مدل در کنار افزایش مقادیر  $b$  در تخمین شاخص ساختاری دچار ناپایداری می‌شود که این خطا با افزایش عمق از ۵ متر تا ۱۵ متر کمتر از ۵ درصد است و در محاسبه عمق مدل، بهترین انطباق بین مقادیر مفروض اولیه با مقادیر محاسبه شده دارد. نتایج به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده‌اند.

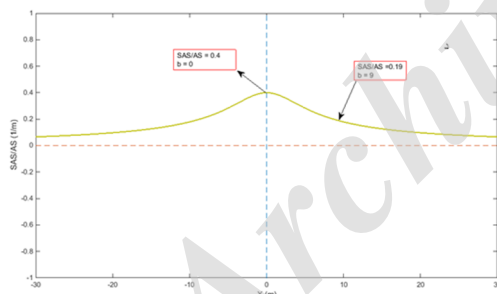
توده به ترتیب ۴۵ و ۳ درجه و شدت مغناطیس شدگی آن ۲ آمپر/متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱- الف پاسخ مغناطیسی مدل مذکور را نشان می‌دهد. شکل ۱- ب نمودار سیگنال تحلیلی مدل فرض شده نشان داده شده است. شکل ۱- ج نمودار SAS و شکل ۱- د نمودار SAS/AS نشان داده شده است که با استفاده از این نمودار دو نقطه  $b=9m$  و  $b=0$  مقدار SAS/AS محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه ۱۰ عمق مدل  $Z_0 = 5m$  و شاخص ساختاری  $N = 1$  محاسبه شده‌اند (شکل ۲- الف و ب). حالت دوم با افزایش عمق مدل به ۱۰ متر در شکل ۳- الف پاسخ مغناطیسی مدل مذکور را نشان می‌دهد. شکل ۳- ب نمودار سیگنال تحلیلی مدل فرض شده نشان داده شده است. شکل ۳- ج نمودار SAS و شکل ۳- د نمودار SAS/AS نشان داده شده است که با استفاده از این نمودار دو نقطه  $b=9m$  و  $b=0$  مقدار SAS/AS محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه ۱۰ عمق مدل  $Z_0 = 10m$  و شاخص ساختاری  $N = 0.98$



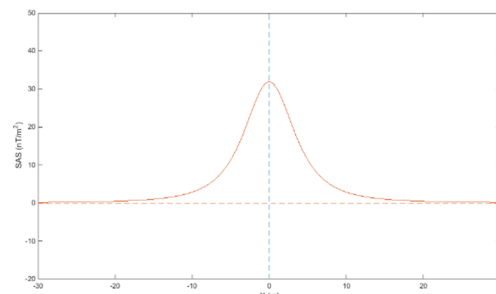
(ب)



(الف)

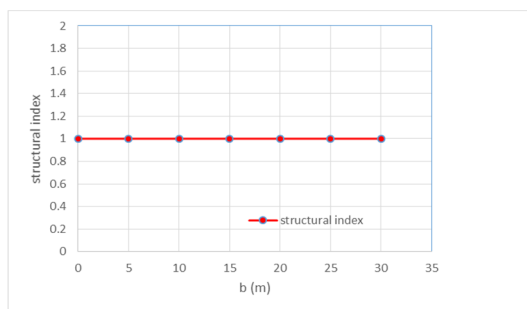


(د)

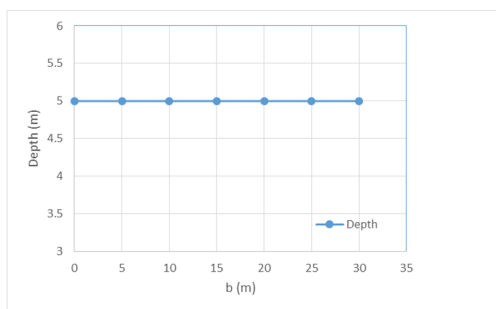


(ج)

شکل ۱: تخمین عمق و شاخص ساختاری توسط روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته. الف) منحنی پاسخ مغناطیسی دایک نازک با عمق ۵ متر ب) نمودار سیگنال تحلیلی دایک با عمق ۵ متر ج) نمودار SAS مدل دایک با عمق ۵ متر د) نمودار SAS/AS مدل دایک نازک با عمق ۵ متر.

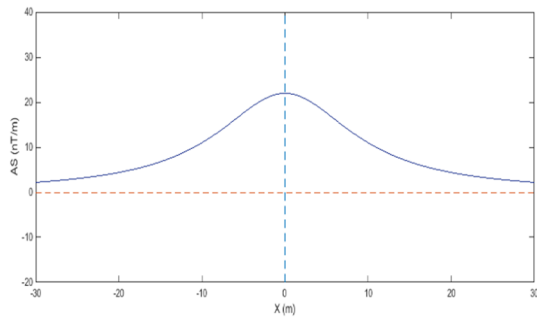


(ب)

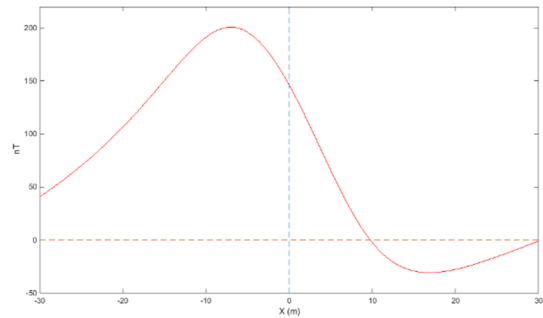


(الف)

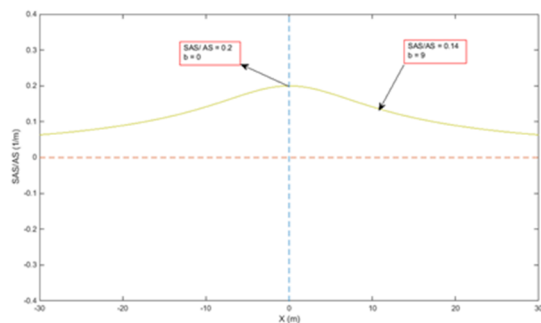
شکل ۲: الف) محاسبه عمق مدل دایک نازک با عمق ۵ متر توسط رابطه ۱۰. ب) محاسبه شاخص ساختاری دایک نازک با عمق ۵ متر توسط رابطه ۱۱.



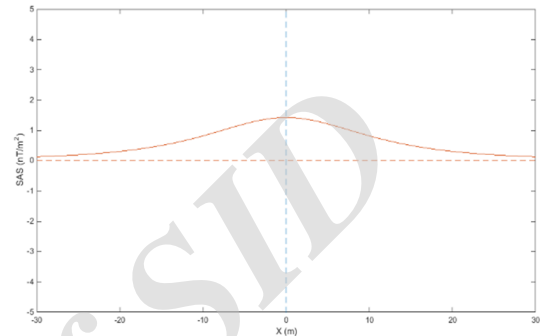
(ب)



(الف)

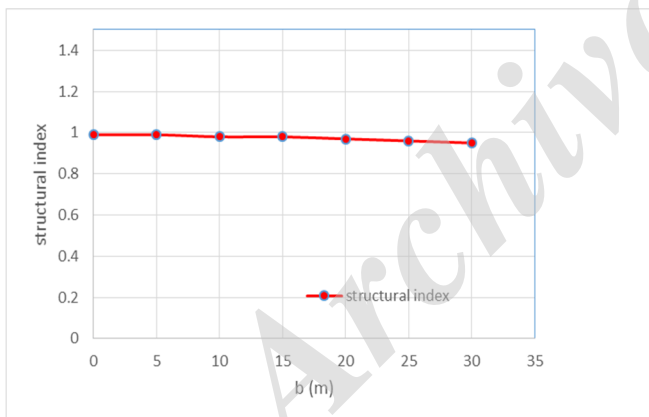


(د)

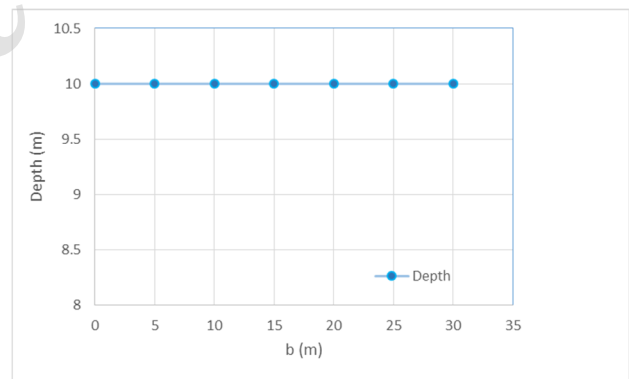


(ج)

شکل ۳: تخمین عمق و شاخص ساختاری توسط روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته. الف) منحنی پاسخ مغناطیسی دایک نازک با عمق ۱۰ متر ب) نمودار سیگنال تحلیلی دایک با عمق ۱۰ متر ج) نمودار SAS مدل دایک با عمق ۱۰ متر د) نمودار SAS/AS مدل دایک نازک با عمق ۱۰ متر.



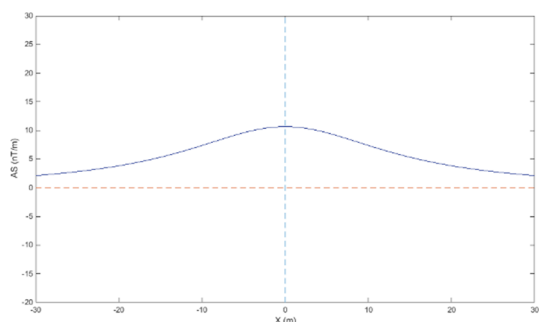
(ب)



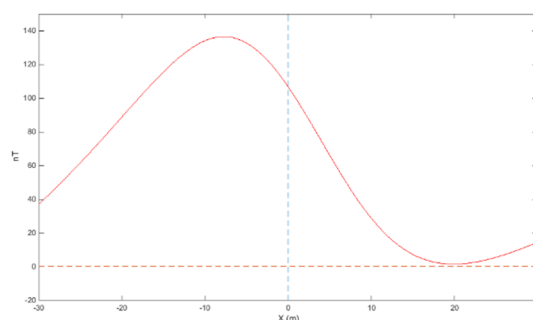
(الف)

شکل ۴: الف محاسبه عمق مدل دایک نازک با عمق ۱۰ متر توسط رابطه ۱۰. ب محاسبه شاخص ساختاری دایک نازک با عمق ۱۰ متر توسط رابطه

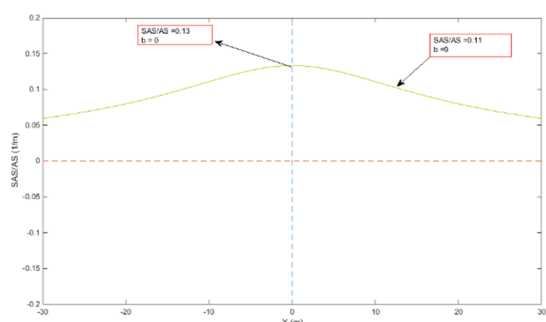
نیک بخش و همکاران، تخمین عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های دوبعدی مغناطیسی توسط سیگنال تحلیلی بهبود یافته، صفحات ۳۶۳-۳۵۱.



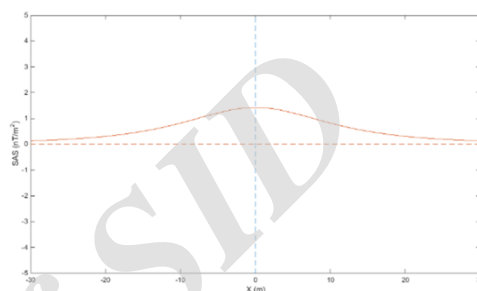
(ب)



(الف)

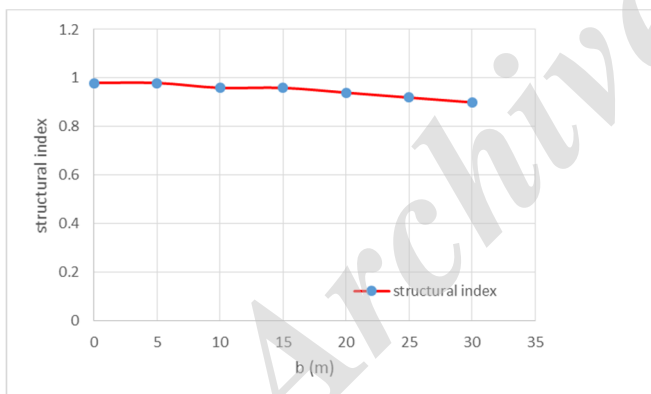


(د)

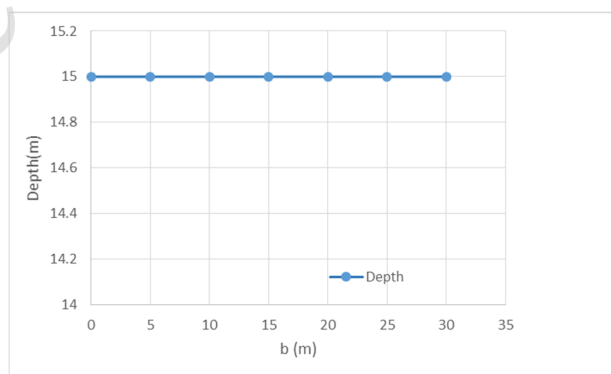


(ج)

شکل ۵: تخمین عمق و شاخص ساختاری توسط روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته. (الف) منحنی پاسخ مغناطیسی دایک نازک با عمق ۱۵ متر (ب) نمودار سیگنال تحلیلی دایک با عمق ۱۵ متر (ج) نمودار SAS/AS مدل دایک با عمق ۱۵ متر (د) نمودار SAS/AS مدل دایک نازک با عمق ۱۵ متر.



(ب)



(الف)

شکل ۶: (الف) محاسبه عمق مدل دایک نازک با عمق ۱۰ متر توسط رابطه ۱۰. (ب) محاسبه شاخص ساختاری دایک نازک با عمق ۱۵ متر توسط رابطه ۱۱.

جدول ۱: مقادیر محاسبه شده عمق و شاخص ساختاری برای سه عمق ۱۰، ۱۵ و ۱۰،۵ متر و میزان خطا در محاسبه شاخص ساختاری با افزایش عمق مدل.

مدل	عمق فرض شده (متر)	عمق محاسبه شده توسط روش پیشنهادی (متر)	شاخص ساختاری محاسبه شده توسط روش پیشنهادی	درصد خطا در محاسبه شاخص ساختاری
۱	۵	۵	۱	۰
۲	۱۰	۱۰	۰٫۹۸	۲
۳	۱۵	۱۵	۰٫۹۵	۵

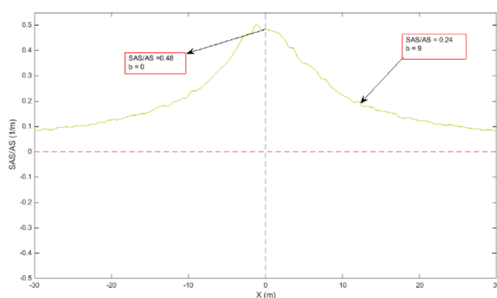
کل) اضافه شده است.

شکل ۷ الف و ب و ج نمودار SAS/AS مربوط به مدل دایک با عمق ۵ متر برای داده‌های نوفه دار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بعد اعمال فیلتر فراسو ۲ متر را نشان می‌دهد که با انتخاب دو نقطه ( $b=0$  و  $b=9m$ ) عمق و شاخص ساختاری مدل با استفاده از رابطه ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند شکل ۸ الف و ب. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش نوفه همراه با افزایش  $b$ ، خطای روش پیشنهادی در تخمین عمق و شاخص ساختاری افزایش می‌یابد. در جدول ۲ نتایج و میزان خطا در محاسبه عمق و شاخص ساختاری برای سه سطح نوفه ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد آورده شده است.

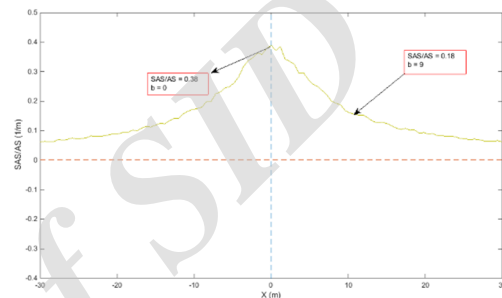
## ۲-۲- بررسی روش پیشنهادی بر روی داده‌های مصنوعی

### نوفه دار

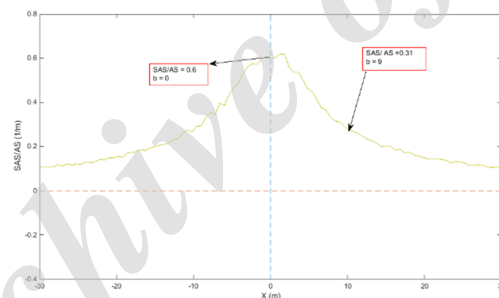
داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده همواره با نوفه همراه‌اند، بنابراین برای شبیه‌سازی داده‌های واقعی باید داده‌هایی تولید شوند که به نوفه آلوده باشند. به عبارت دیگر باید به داده‌های مصنوعی مقداری نوفه اضافه شود. روش سیگنال تحلیلی یک روش مشتق‌گیری است و این روش باعث تقویت دامنه نوفه‌ها می‌شود. در داده‌های مصنوعی نوفه دار، جواب‌ها ناپایدار هستند. برای کاهش اثر نوفه در ایجاد ناهنجاری، از فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌کنیم. در این بخش به مدل دایک حالت اول با عمق ۵ متر به داده‌ها نوفه تصادفی با انحراف استاندارد ۵، ۱۰ و ۱۵ نانو تسلا (معادل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میدان مغناطیسی



(ب)

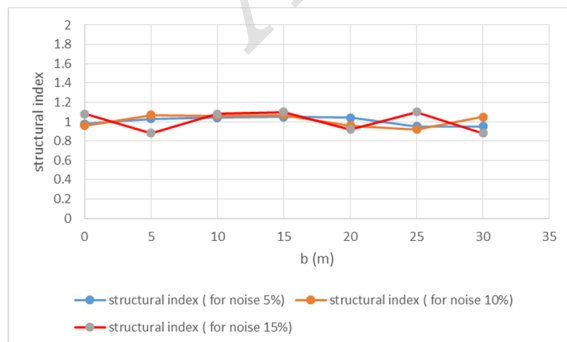


(الف)

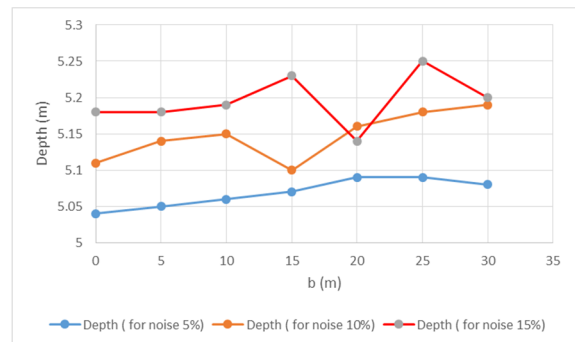


(ج)

شکل ۷: اضافه کردن نوفه به داده‌های نمودار SAS/AS مدل دایک نازک با عمق ۵ متر بعد از اعمال فیلتر فراسو با ارتفاع ۲ متر. الف) اضافه کردن نوفه ۵ درصد، ب) اضافه کردن ۱۰ درصد نوفه، ج) اضافه کردن نوفه ۱۵ درصد.



(ب)



(الف)

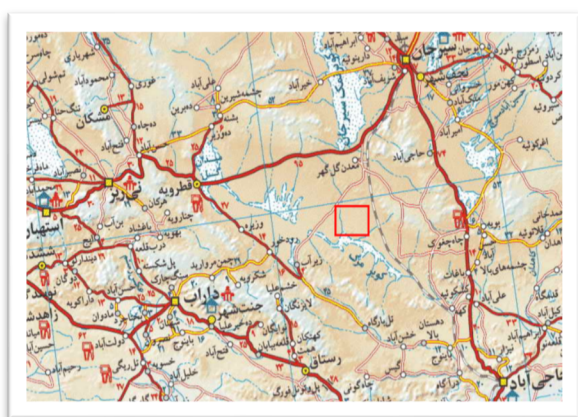
شکل ۸: الف) محاسبه عمق مدل دایک نازک توسط رابطه ۱۰ در سه سطح نویز ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بعد اعمال فیلتر فراسو با ارتفاع ۲ متر، ب) محاسبه شاخص ساختاری مدل دایک نازک توسط رابطه ۱۰ در سه سطح نویز ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بعد اعمال فیلتر فراسو با ارتفاع ۲ متر.

یک بخش و همکاران، تخمین عمق و شاخص ساختار بی‌هنجاری‌های دوبعدی مغناطیسی توسط سیگنال تحلیلی بهبود یافته، صفحات ۳۶۳-۳۵۱.

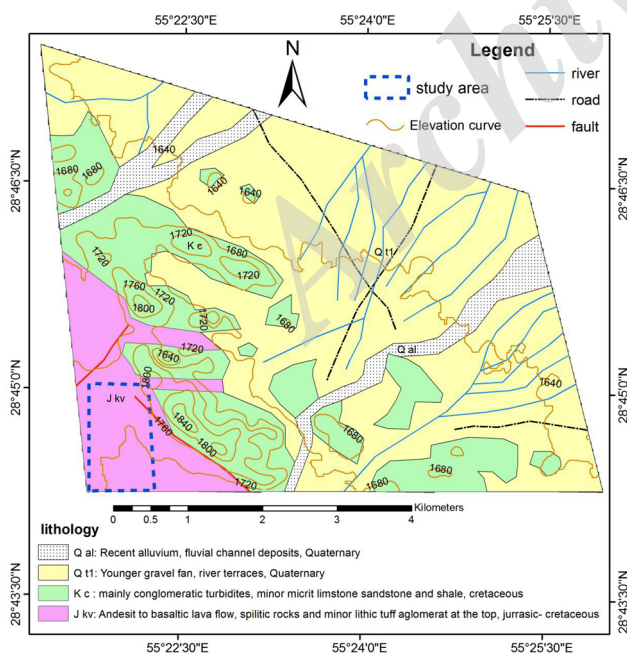
جدول ۲: مقدار خطای ایجاد شده در محاسبه عمق و شاخص ساختاری بعد از اضافه کردن نوفه به داده‌های مصنوعی مدل دایک نازک با عمق ۵ متر.

مقدار نوفه (درصد)	عمق محاسبه شده توسط روش پیشنهادی بعد اضافه کردن نوفه	شاخص ساختاری محاسبه شده توسط روش پیشنهادی بعد از اضافه کردن نوفه	خطای عمق (درصد)	خطای شاخص ساختاری (درصد)
۵	۵/۰۶	۱/۰۳	۱/۲	۳
۱۰	۵/۱۵	۱/۰۵	۳	۵
۱۵	۵/۱۹	۱/۰۸	۳/۸	۸

شمال- جنوب در نظر گرفته شده است. با توجه به مختصات ابتدا (x=340570,y=3180841) و انتهای (x=340576,y=3180465) طول تقریبی پروفیل ۳۷۶ متر است.



شکل ۹: محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه راه‌های ایران (کادر قرمز رنگ).



شکل ۱۰: موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه (کادر آبی رنگ).

### ۲-۳- بررسی روش پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۱۰۵ کیلومتری جنوب غربی سیرجان و ۴۰ کیلومتری جنوب معدن گل گهر، در ۵ کیلومتری روستای خلیل‌آباد واقع شده است، دسترسی به محدوده از مسیر جاده سیرجان به شیراز است (شکل ۹). مطالعه اکتشافی در منطقه توسط روش مغناطیس سنجی در دو بلوک شمالی و جنوبی انجام شده است که در مقاله از داده‌های بلوک جنوبی منطقه برای بررسی روش پیشنهاد شده مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰).

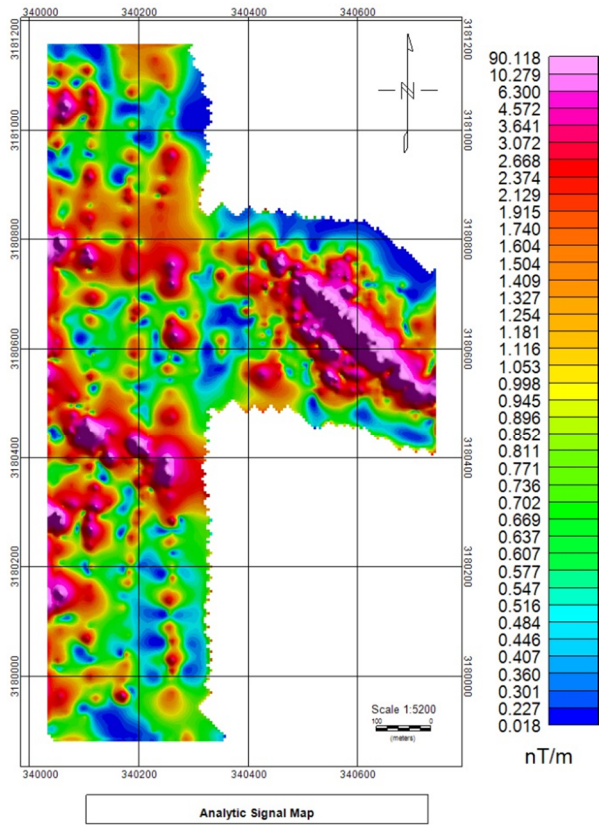
برای شروع برداشت با توجه به زمین‌شناسی منطقه و رخنمون‌های موجود در محدوده که روندی شمال غرب- جنوب شرق و همچنین روندی شرقی- غربی دارند، پروفیل‌ها به صورت شمال- جنوبی پیدا شدند. فاصله پروفیل‌ها ۵۰ متر و فاصله نقاط ۵ متر تعیین شدند. تمامی نقاط بر اساس سیستم مختصات UTM (WGS84) توسط دستگاه مگنتومتر GEM 19T ساخت کشور کانادا برداشت شده‌اند. در مواردی که نیاز بود فاصله نقاط و فاصله پروفیل‌ها تغییر پیدا کرد تا دقت برداشت‌ها جهت تعیین دقیق تر ابعاد ناهنجاری گسترش یابد.

ابتدا و انتهای هر پروفیل طوری طراحی شدند که مقدار میدان مغناطیسی در امتداد هر پروفیل از یک حد زمینه ناحیه‌ای شروع شود و پس از گذشتن از مقدار ناهنجاری، دوباره در انتهای پروفیل به مقدار زمینه برگردد.

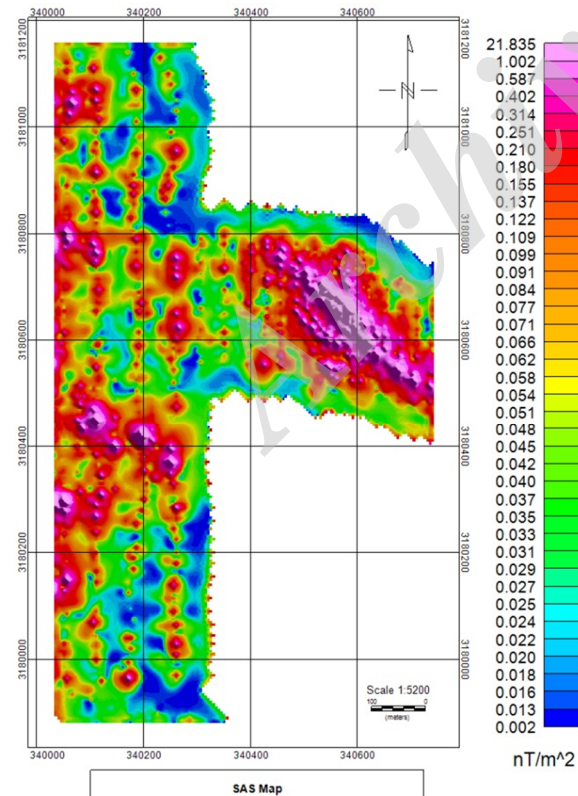
با توجه به اینکه در اکتشافات مغناطیس سنجی، ناهنجاری‌های کم‌عمق مورد توجه است بنابراین میدان‌های عمیق مانند هسته و مناطق عمیق پوسته با استفاده از مقدار میدان محاسبه شده توسط IGRF حذف می‌شود.

مقدار حد زمینه میدان مغناطیسی با توجه به مقادیر محاسبه شده از IGRF در منطقه ۴۵۴۹۶ nT نانوتسلا است که بررسی‌های میدانی نیز همین مقدار حد زمینه را در منطقه نشان داد نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه بعد از اعمال فیلتر فراسو به ارتفاع ۵ متر در شکل ۱۱ نشان داده شده است با توجه به نقشه میدان کل یک بی‌هنجاری در قسمت شرق منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود که روندی شمال غربی- جنوب شرقی دارد که در این مقاله برای محاسبه عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری مورد نظر پروفیل AB را عمود بر راستای بی‌هنجاری به صورت



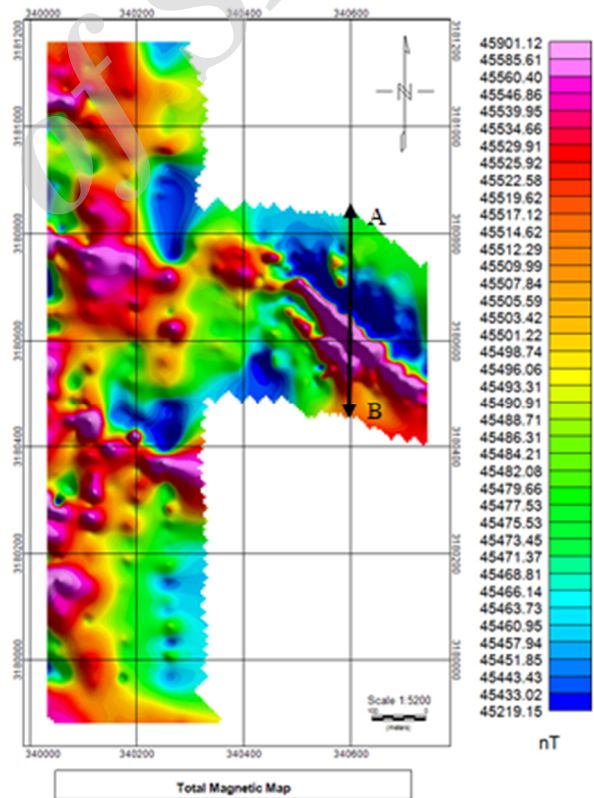


شکل ۱۲: نقشه سیگنال تحلیلی منطقه مورد مطالعه.

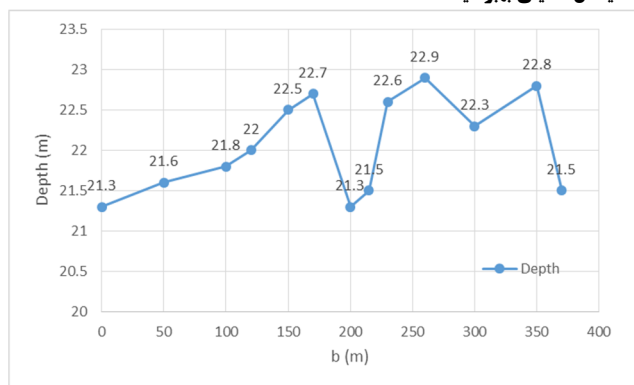


شکل ۱۳: نقشه SAS منطقه مورد مطالعه.

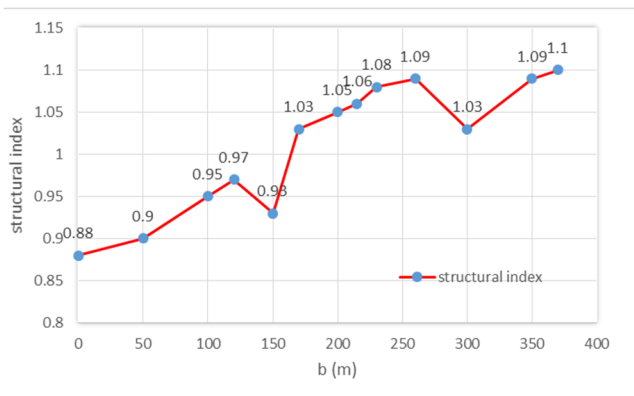
در ادامه نقشه سیگنال تحلیلی منطقه برداشت شده توسط نرم‌افزار ژئوسافت ترسیم می‌شود (شکل ۱۲) با استفاده از نقشه سیگنال تحلیلی نقشه SAS شکل ۱۳ و در ادامه نقشه SAS/AS محاسبه می‌شود و بروی نقشه SAS/AS دو نقطه به مختصات  $x_2 = 340592, y_2 =$  و  $x_1 = 340592, y_1 = 3180655$  در نظر گرفته می‌شود. اگر نقطه A شروع پروفیل در نظر گرفته شود با توجه به مختصات نقاط انتخاب شده مقادیر b، ۱۷۰ و ۲۱۵ متر محاسبه می‌شوند (شکل ۱۴). در ادامه با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری مورد نظر محاسبه می‌شود (شکل ۱۵ الف و ب). با توجه به مقادیر محاسبه شده عمق  $N=1.02, z_0=22.5$  m که نشان می‌دهد بی‌هنجاری مورد نظر هندسه دایک مانند دارد. در ادامه عمق محاسبه شده بی‌هنجاری توسط روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته با روش تخمین عمق اویلر مورد مقایسه قرار گرفت، که نتایج آن در بخش بعدی ارائه گردیده است.



شکل ۱۱: نقشه شدت مغناطیس کل محدوده مورد مطالعه.



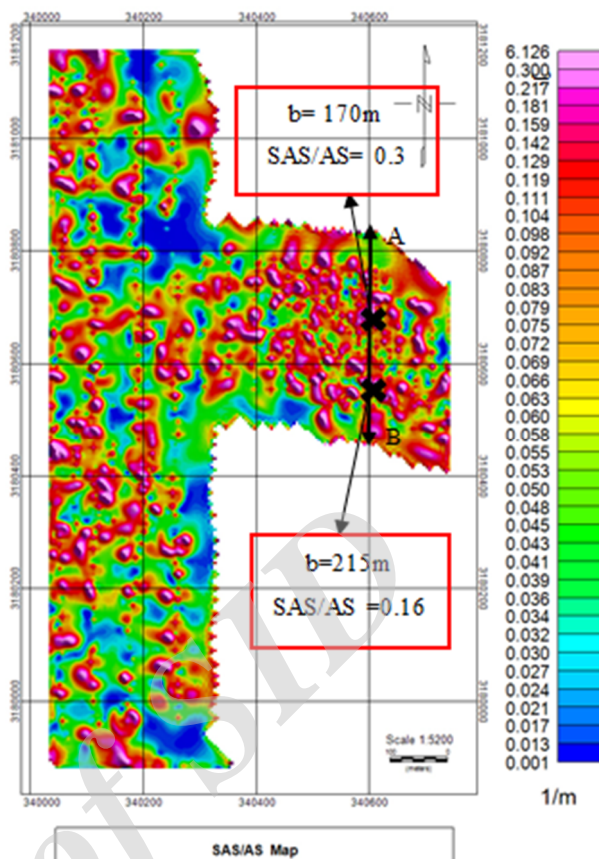
(الف)



(ب)

شکل ۱۵: الف) محاسبه عمق بی‌هنجاری دایک مانند داده‌های میدانی توسط رابطه ۱۰. ب) محاسبه شاخص ساختاری بی‌هنجاری دایک مانند توسط رابطه ۱۱.

پیشنهاد شده برای تفسیر داده‌های میدانی مورد تأیید قرار می‌گیرد. در جدول ۴ عمق بی‌هنجاری در گزارش حفاری تهیه شده توسط شرکت گهرکاوش (گزارش پایان اکتشاف معدن خلیل‌آباد، کفه مر، ۱۳۹۳)، با نتایج دو روش اوپلر و روش پیشنهاد شده در مقاله مقایسه شده است که نشان می‌دهد که عمق و شاخص ساختاری محاسبه شده توسط روش پیشنهادی مورد تأیید است و خطای کمتر از ۶ درصد دارد.



شکل ۱۴: نقشه SAS/AS منطقه مورد مطالعه.

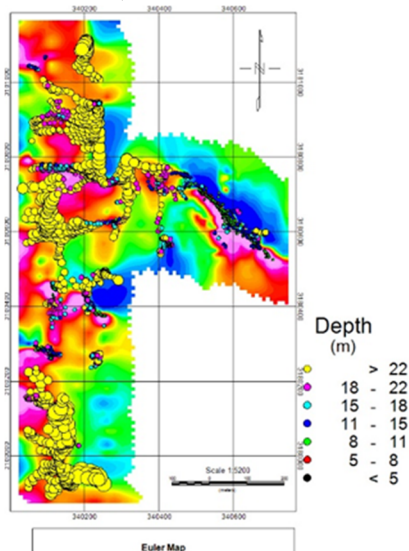
## ۴-۲- مقایسه نتایج روش پیشنهادی بر روی داده‌های

### میدانی با روش اوپلر دی کانولوشن

در این بخش با استفاده از روش اوپلر دی کانولوشن با فرض شاخص ساختاری یک ( $N=1$ ) عمق بی‌هنجاری محاسبه می‌شود که عمق محاسبه شده توسط روش اوپلر با نتایج حفاری (جدول ۳) مطابقت دارد می‌توان نتیجه گرفت که شاخص ساختاری بی‌هنجاری مورد نظر نزدیک به یک است (شکل ۱۶)، با مقایسه با نتایج حاصل شده از روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته با نتایج روش اوپلر، صحت روش

جدول ۳: خلاصه گزارش حفاری منطقه مورد مطالعه (Nikbaksh and Meshinchi Asl, 2017).

Borhole ID	x-Coordinate (m)	y-Coordinate (m)	z-Coordinate (m)	Drilling depth (m)
BH1	340592	3180655	1724	24
BH2	340592	3180565	1730	22
BH3	340600	3180600	1735	19.50
BH4	340650	3180575	1735	19.50
BH5	340680	3180565	1738	19.50



شکل ۱۶: تعیین عمق بی‌هنجاری توسط روش اویلر برای شاخص ساختاری یک (N=1).

جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل شده از روش پیشنهادی با روش تخمین عمق اویلر و نتایج حفاری.

میزان درصد خطا در روش پیشنهاد شده	عمق دسترسی به بی‌هنجاری توسط حفاری (متر)	عمق و شاخص ساختاری محاسبه توسط روش پیشنهاد شده (متر)	عمق محاسبه توسط اویلر (متر) با فرض شاخص ساختاری یک (N=1)	مختصات نقاط حفاری
۶/۲۵	۲۴	$Z_0 = 22/5$ $N = 1/0.5$	۲۲-۱۸	۳۴۰۵۹۲ ۳۱۸۶۵۵
۲/۷	۲۲	$Z_0 = 22/5$ $N = 1/0.5$	۲۲-۱۸	۳۴۰۵۹۲ ۳۱۸۵۶۵

## ۵- نتیجه‌گیری

شهرستان سیرجان مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته گسترش عمق بی‌هنجاری را از سطح تا عمق ۲۴ متر تخمین زده است، همچنین شاخص ساختاری تخمین زده شده توسط روش پیشنهاد شده ۱،۰۲ است که نشان می‌دهد بی‌هنجاری مورد نظر یک هندسه دایک مانند دارد. این نتایج انطباق مناسبی با سایر روش‌های بررسی شده (اویلر و گزارش حفاری) در منطقه مورد مطالعه را دارد.

روش سیگنال تحلیلی بهبود یافته برای تعیین عمق و شاخص ساختاری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در این مقاله پیشنهاد شده است که در همین راستا یک مدل دایک قائم با سه عمق متفاوت برای داده‌های بدون نوفه و نوفه دار مورد بررسی قرار گرفته است. در داده‌های بدون نوفه با افزایش مقادیر b، در ازای افزایش عمق مدل، خطایی در محاسبه عمق ایجاد نمی‌شود ولی مقادیر محاسبه برای شاخص ساختاری دارای ناپایداری می‌شوند که برای عمق ۵ متر خطا ۰ درصدی، عمق ۱۰ متری خطای ۲ درصدی و برای عمق ۱۵ متری خطای ۵ درصد ایجاد می‌شود. همچنین این روش برای سه سطح داده‌های نوفه دار (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) برای مدل دایک با عمق ۵ متر تست شده است که حداکثر خطا در محاسبه عمق مدل ۳/۸ درصد و محاسبه شاخص ساختاری ۸ درصد است که می‌توان نتیجه گرفت روی داده‌های نوفه دار با افزایش نوفه محاسبه عمق و شاخص ساختاری دچار ناپایداری می‌شود، به طور کلی روش پیشنهادی در تعیین عمق و شاخص ساختاری مدل‌های فرض شده برای داده‌های بدون نوفه و نوفه دار خطایی کمتر از ۸ درصد دارد. در پایان روش ارائه شده بر روی داده‌های منطقه خلیل‌آباد واقع در استان کرمان،

## ۶- سپاس‌گزاری

نگارندگان بر خود بایسته می‌دانند که نهایت سپاس و قدردانی را از شرکت صنعتی و معدنی گهر کاوش به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های واقعی و همچنین اطلاعات و گزارش‌های حفاری، بجا آورند. همچنین نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم که با نظرات مفید و سازنده خود باعث بالا رفتن سطح علمی مقاله شده‌اند، تشکر و قدردانی کنند

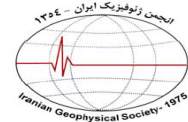
## ۷- منابع

اسکویی، ب.، کریمی کلایه، ع. و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۹۱،

- Li, X., 2006, Understanding 3D analytic signal amplitude, *Geophysics*, 71, L13-L16.
- Ma, G. and Du, X., 2012, An improved analytic signal technique for the depth and structural index from 2D magnetic anomaly data, *Pure Appl. Geophys*, 169, 2193-2200.
- Ma, G. and Li, L., 2012, Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative, *Computers & Geosciences*, 41, 83-87.
- MacLeod, I.N., Jones, K. and Dai, T.F., 1993, 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes, *Exploration Geophysics*, 24, 679-687.
- Nabighian, M.N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 39, 85-92.
- Nikbakhsh, M.R. and Meshinchi, M.A., 2017, New method for Depth and Structural Index Determinations from 2D Magnetic Anomaly Data using Analytic Signal window curves, *J. Geophys. Eng.*, In Press, revised Manuscript
- Roest, W.R. and Pilkington, M., 1993, Identifying remanent magnetization effects in magnetic data, *Geophysics*, 58, 653-659.
- Roest, W.R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57, 116-125.
- 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., Ravat, D., Mushayandevu, M.F. and Ushijima, K., 2004, Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry, *Geophysics*, 69, 783-788.
- Smith, R.S., Salem, A. and Lemieux, J., 2005, An enhanced method for source parameter imaging of magnetic data collected for mineral exploration, *Geophysical Prospecting*, 53, 655-665.
- Wen, B.D., Hsu, S.K. and Yeh, Y.C., 2007, A derivative-based interpretation approach to estimating source parameters of simple 2D magnetic sources from Euler deconvolution, the analytic-signal method and analytical expressions of the anomalies, *Geophys. Prospect.*, 55, 255-264.
- Zhou, S., Huang, D. and Su, C., 2016, Magnetic anomaly depth and structural index estimation using different height analytic signals data, *J. Appl. Geophys.*, 132, 146-151.
- روش سیگنال تحلیلی در برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی ساختارهای دوبعدی، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۸ (۲)، ۱۳۷-۱۴۷.
- اویسی مؤخر، م.، قاسمی، و. و شاه نظری اول، ح.، ۱۳۸۶، تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی با استفاده از روش بهبود یافته تلفیقی سیگنال تحلیلی و
- اویلر در منطقه خرم‌آباد، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۳ (۳)، ۶۱-۷۱.
- بنی عامریان، ج.، اسکویی، ب. و باستانی، م.، ۱۳۸۹، برآورد عمق، اندیس ساختاری و مکان منبع‌های مغناطیسی با استفاده از روش ترکیبی AN-EUL، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۴ (۲)، ۷۰-۸۸.
- علمدار، ک.، کامکار روحانی، ا. و انصاری، ع.، ۱۳۹۱، تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۶ (۱)، ۶۹-۸۳.
- کنگازیان کنگازی، م. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۴، برآورد عمق و تعیین محل توده‌های مغناطیسی با استفاده از سیگنال تحلیلی تانسور گرادین مغناطیسی در حوزه بسامد، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۹ (۲)، ۱-۱۳.
- گزارش نهایی پایان اکتشاف معدن سنگ‌آهن خلیل‌آباد، ۱۳۹۳، شرکت صنعتی و معدنی گهر کاوش کویر.
- Atchuta, R.D., Ram-Badu, H.V. and Sanker-Narayan, P.V., 1981, Interpretation of magnetic anomalies due to dikes, the complex gradient method, *Geophysics*, 46, 1572-1578.
- Cooper, G.R.J., 2015, Using the analytic signal amplitude to determine the location and depth of thin dikes from magnetic data, *Geophysics*, 80 (1), J1-J6.
- Debeglia, N. and Coppel, J., 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives, *Geophysics*, 62, 87-96.
- 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., Sibuet, J.C. and Shyu, C.T., 1996, High-resolution detection of geological boundaries from potential - field anomalies: An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, 61, 373-386.
- Jeng, Y., Lee, Y.L., Chen, C.Y. and Lin, M.J., 2003, Integrated signal enhancements in magnetic investigation in archaeology, *J. Appl. Geophys.*, 53, 31-48.



Shahrood University of Technology



## Estimation of the depth and structural index of 2D magnetic anomalies using improved analytic signal method

Mohammad Rasool Nikbakhsh<sup>1</sup>, Mirsttar Meshinchi Asl<sup>2\*</sup>, Mohsen Oveisy Moakhar<sup>3</sup> and Hmid Reza Siahkoobi<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
2- Assistant Professor, Department of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
3- Assistant Professor, Department of Geophysics, Razi University, Kermanshah, Iran  
4- Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 6 March 2017; Accepted: 17 October 2017

\* Corresponding author: m.meshinchi@srbiau.ac.ir

### Keywords

Improved Analytic Signal  
Magnetic Anomaly  
Depth Estimation  
Structural Index

### Extended Abstract

#### Summary

This paper presents a new method for interpretation of two dimensional (2D) magnetic anomaly data. The new method uses a combination of analytic signal and its total gradient to estimate the depth and nature -i.e. structural index- of an isolated magnetic source. However, the proposed method is sensitive to noise. In order to lower the effect of noise, upward continuation

technique is applied to smooth the anomaly. Tests on synthetic noise-free and noise-corrupted magnetic data show that the new method can successfully estimate the depth and nature of the causative source. For practical application of the method, it was applied to measured magnetic anomaly data from Khalilabad area. For validity of the method, it was tested on a synthetic example with and without random noise. After adding 5%, 10% and 15% random noise to the synthetic data, the maximum error for the model parameters was seen to be less than  $\pm 3\%$ . Moreover, it was found that the inversion results of magnetic data from an area in northeast Sirjan was in good agreement with the results from Euler deconvolution of the analytic signal of the magnetic data.

### Introduction

An important goal in the interpretation of magnetic anomaly data is to obtain the depth and the geometry or structural index of the causative source. To this end, a large number of methods exist to accomplish this goal. The analytic signal method is a popularly used method for this purpose. Using the analytic signal method, we can calculate both the depth and structural index of causative sources. However, the improved analytic signal method, presented in his paper, needs the computation of third-order derivatives of the magnetic anomaly and requires data of high precision or strict filtering.

### Methodology and Approaches

In this paper, we present an improved analytic signal method to interpret 2D magnetic anomaly data. The proposed method uses a combination of the analytic signal and its total gradient to estimate the depth and the structural index of the causative source. The feasibility of the proposed method to compute the source parameters is displayed on synthetic and measured magnetic anomalies.

### Results and Conclusions

We have proposed a new method to estimate the depth and the structural index of the causative source using the ratio of analytic signal to its total gradient. Our method provides two linear equations to estimate individually the depth and nature of a magnetic source. The feasibility of the new method is demonstrated on synthetic magnetic anomaly with and without random noise. For noise-free data, the structural index and the depth, estimated by the new method, are consistent with the theoretical values. For noise-corrupted data, our approach can provide reasonable results by applying upward continuation technique to lower the effect of noise. Application of the method on measured data indicates that the results of the method are in god agreement with the results computed by the Euler deconvolution of analytic signal method.