

## کاربرد روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته در تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل

عالیه یوسفی طبس<sup>۱</sup>، حمید آقاجانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
۲- دانشیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۱۲، پذیرش ۱۳۹۷/۰۷/۰۵)

### چکیده

تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل یکی از اهداف پردازش داده‌ها است که با استفاده از روش‌های مختلفی مانند گرادیان کل نرمال شده انجام می‌شود. روش گرادیان کل نرمال در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی یک روش نیمه کمی و نیمه خودکار است که با تبدیل فوریه مشکلات ناشی از کاربرد فیلتر ادامه فرسو در عبور از منبع بی‌هنجار را رفع می‌کند. نتایج حاصل از این روش در صورتی که تعداد هارمونیک‌ها در سری فوریه مورد استفاده به درستی انتخاب شود، دقت مناسبی دارند. روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته به وسیله آنالیز دو منحنی آهنگ انرژی آنومالی‌های بازسازی شده و منحنی عمق بر حسب تغییرات تعداد هارمونیک‌ها، راه حل مناسبی برای انتخاب تعداد هارمونیک‌های بهینه ارائه می‌کند. این روش روی مدل‌های مصنوعی اعمال شده و نتایج رضایت‌بخشی به دست آمده است. همچنین روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته برای تعیین موقعیت توده بی‌هنجار کانسار جلال‌آباد استفاده شده است. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته می‌توان تعداد هارمونیک‌های بهینه و موقعیت توده‌های بی‌هنجار را از روی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل تعیین کرد.

### کلمات کلیدی

گرادیان کل نرمال بهبود یافته، تعداد هارمونیک بهینه، تبدیل فوریه، موقعیت بی‌هنجاری.

## ۱- مقدمه

روش‌های میدان پتانسیل از روش‌های پرکاربرد در زمینه بررسی‌های مقدماتی و تفصیلی ساختارهای زمین‌شناسی‌اند. میدان پتانسیل مشاهده‌ای، حاصل از توزیع منابع مختلف در فواصل عمقی متفاوت است. روش‌های مختلفی برای تعیین ویژگی‌های ساختاری و تخمین عمق منابع بی‌هنجار با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل توسعه یافته‌اند. این روش‌ها در بیشتر موارد به وسیله الگوریتم‌هایی که به صورت عددی برنامه‌ریزی شده‌اند، توصیف می‌شوند، که معمولاً از دیدگاه اجرای کار پردازش به روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار دسته‌بندی می‌شوند [۱].

ادامه فروسو روشی برای محاسبه میدان در فواصل نزدیک‌تر به منبع است و بنابراین منجر به وضوح بهتری از وضعیت قرارگیری ساختارها و اجسام بی‌هنجار زیرسطحی می‌شود. این روش برای بررسی داده‌های بدون نوفه عملکرد خوبی دارد اما حساسیت زیاد نسبت به نوفه باعث محدودیت استفاده از این فیلتر می‌شود [۲]. در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو، محاسبات در بعد فرکانس و عدد موج انجام می‌گیرد و با توجه به وجود نوفه در داده‌ها، اثر نوفه در تحلیل فوریه داده‌ها به صورت بسامدهایی با دامنه زیاد باعث مخدوش شدن محاسبات می‌شود. با بهره‌گیری از فیلتر پایین‌گذر می‌توان این اثر مخرب را از بین برد ولی با این کار مقداری از اطلاعات همراه سیگنال مورد نظر نیز از بین می‌رود، این یکی از مشکلات اساسی در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو است [۳]. برخلاف موارد یاد شده، پژوهشگران ژئوفیزیک به دلیل سرعت بالا، هزینه پایین و توانایی این روش در تعیین حدود افقی و قائم منابع زمین‌شناسی، به ویژه در مواردی که هیچ داده ژئوفیزیکی دیگر یا داده حفاری وجود ندارد، علاقه‌مند به استفاده از این روش هستند [۴،۳]. پژوهشگران برای بهبود روش ادامه فروسو از روش‌های مختلفی از جمله گرادیان کل نرمال [۵]، مشتق قائم مرتبه دوم کامل [۶] و تبدیل فوریه سریع [۷] استفاده کردند. روش گرادیان کل نرمال اولین بار توسط برزکین برای اکتشاف مخازن نفت با استفاده از داده‌های گرانی معرفی و استفاده شده است [۵]. همچنین اولین کاربرد این روش در تفسیر داده‌های مغناطیسی توسط برزکین و همکاران بررسی شده است [۱]. در سال‌های بعد تئوری این روش توسط پژوهشگران زیادی توسعه یافته است [۳، ۲۱-۸].

مفهوم اصلی روش گرادیان کل نرمال مشابه ادامه

فروسوی گرادیان کل نرمال داده‌های ژئوفیزیکی است. در روند ادامه فروسو با عبور از منبع بی‌هنجاری معمولاً نتایج ناپایدار و نوسانات بیشتر می‌شود. عملگر گرادیان کل نرمال به دلیل استفاده از مشتق‌های اول تابع پتانسیل، قابلیت حذف اغتشاشاتی که در فرآیند تفسیر ادامه فروسوی یک میدان پتانسیل به وجود می‌آیند، را دارد. در نتیجه امکان محاسبه ادامه فروسو در نواحی نزدیک یا زیر منبع بی‌هنجار وجود دارد [۲۴،۳-۲۲]. روش گرادیان کل نرمال فقط شامل یک فرآیند ساده محاسباتی ادامه فروسو است که به حالت نیمه‌خودکار استفاده می‌شود. این روش نیاز به پارامترهای اولیه هندسی یا فرضیاتی در مورد خواص زمین‌شناسی ندارد و می‌توان به طور مستقیم برای به دست آوردن عمق منبع بی‌هنجار از آن استفاده کرد [۲۱،۲۰]. بیشینه و کمینه‌های گرادیان کل نرمال در تشخیص مرکز توده‌های متراکم و عمق بالای دایک‌هایی با وسعت عمقی نامحدود مفید است [۱۱،۱۷].

با توجه به نقش اساسی ادامه فروسو در روش گرادیان کل نرمال، ثبات ادامه فروسو به طور مستقیم صحت این روش را تعیین می‌کند، بنابراین باید یک ادامه فروسو پایدار در فرآیند محاسبات استفاده شود. الگوریتم ادامه فروسوی روش گرادیان کل نرمال با استفاده از سری‌های فوریه با یک فیلتر هموارسازی اجرا می‌شود [۲۰]. مقدار گرادیان کل نرمال وابستگی زیادی به تعداد جملات سری فوریه دارد و تغییر کوچک در تعداد جملات آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار گرادیان کل نرمال خواهد شد [۵، ۲۳، ۲۵]. این پارامتر معمولاً با سعی و خطا تعیین می‌شده است [۱، ۲۳، ۵] با وجود موثر بودن سعی و خطا اما از آنجا که وابسته به نظر مفسر است امکان ایجاد ابهام در تخمین عمق وجود دارد و ممکن است نتایج به دست آمده دقت کافی نداشته باشد [۱۹]. بنابراین یک معیار مناسب و قابل اعتماد برای تعیین تعداد هارمونیک‌های بهینه برای محاسبه سری فوریه مورد استفاده در روش گرادیان کل نرمال لازم است. روش بیشینه نسبی مقدار گرادیان کل نرمال برای انتخاب تعداد هارمونیک‌های بهینه ارایه شده است [۳، ۱۱]. این روش به صورت تابعی از تعداد هارمونیک‌ها، بدون نیاز به داده‌های اولیه مانند نتایج عملیات حفاری، تعداد بهینه هارمونیک‌ها برای محاسبه ضرایب سری فوریه را تعیین می‌کند. همچنین روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته با استفاده از معیار جدیدی برای تعیین تعداد هارمونیک‌های بهینه معرفی شده است [۱۹].

مقادیر بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی با استفاده از سری فوریه سینوسی در دامنه  $(-L, L)$  و اعماق مختلف  $z$  چنین تعریف شده است [۵].

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi n z}{L}} \quad (2)$$

که در آن:

$L$ : طول نیم‌رخ برداشت

$N$ : تعداد هارمونیک‌ها

$B_n$ : ضرایب هارمونیک‌های سینوسی است.

نسبت طول نیم‌رخ به عمق باید حداقل ۱۰ باشد که نتایج حاصل درست باشد و برای نسبت‌های کمتر، از دقت این روش کاسته می‌شود.

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \Delta g(x, 0) \sin \left( \frac{\pi n x}{L} \right) dx \quad (3)$$

روش‌های عددی گوناگونی از جمله روش دوزنقه، روش یک سوم سیمپسون و روش فیلون برای محاسبه ضرایب هارمونیک‌های سینوسی وجود دارد که در این مقاله از روش دوزنقه استفاده شده است.

برای همگرایی سری فوریه استفاده شده در رابطه ۲ که متناظر با بی‌هنجاری گرانی است، شرط لازم آن است که شرایط دیریکله برقرار باشد [۲۶].

برای حذف نوساناتی که در هنگام محاسبه بی‌هنجاری میدان پتانسیل و گرادیان‌های آن در راستای افقی و قائم در روش ادامه فروسو در میدان پتانسیل ظاهر می‌شود، سری فوریه سیسنوسی مورد استفاده در رابطه ۲ در تابع هموارکننده‌ای به نام  $q_m$  که اثر پایدارکننده روی عملگر گرادیان کل نرمال دارد، ضرب می‌شود [۲۴، ۵].

$$q_m = \left( \frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^\mu \quad (4)$$

که در آن:

$\mu$ : عدد صحیحی نمایانگر درجه هموارکنندگی است و میزان انحنای تابع  $q_m$  را کنترل می‌کند. برای  $\mu$  می‌توان هر عدد صحیحی انتخاب کرد ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار ۲ برای آن نتایج منطقی در روش ادامه فروسو ارایه می‌دهد [۵، ۱۰، ۲۴، ۲۵]. تابع  $q_m$  معروف به جمله هموارکننده لانکروزس برای حذف اثر گیبس در تبدیلات فوریه استفاده

در این مقاله با استفاده از مدل‌های مصنوعی به بررسی و مقایسه روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته و روش گرادیان کل نرمال که برای تعیین تعداد هارمونیک‌های بهینه از روش پیشینه نسبی مقدار گرادیان کل نرمال استفاده می‌کند، پرداخته می‌شود. سپس برای تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی واقعی کانسار جلال‌آباد از این دو روش استفاده می‌شود.

## ۲- روش‌شناسی کار

### ۲-۱- روش گرادیان کل نرمال

اولین بار روش گرادیان کل نرمال دو بعدی در یک نقطه، توسط برزکین با استفاده از مشتقات افقی و قائم مرتبه اول بی‌هنجاری گرانی به صورت رابطه ۱ بیان شد [۵]. با توجه به اینکه میدان‌های گرانی و مغناطیسی میدان پتانسیل‌اند از این فرمول برای تعیین گرادیان کل نرمال داده‌های مغناطیسی که برگردان به قطب شده باشند نیز می‌توان استفاده کرد.

$$G_N(x, z) = \frac{G(x, z)}{G_m(z)} \quad (1)$$

$$= \frac{\sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z} \right)^2 \right]^v}}{\frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z} \right)^2 \right]^v}}$$

که در آن:

$G_N(x, z)$ : گرادیان کل نرمال در دو بعد در نقطه  $(x, z)$   
 $G(x, z)$ : گرادیان کل بی‌هنجاری گرانی در هر نقطه مشاهده‌ای

$G_m(z)$ : متوسط گرادیان کل بی‌هنجاری‌های گرانی در افق ثابت  $z$   
 $M$ : تعداد نقاط

$\partial \Delta g(x, z) / \partial x$ : گرادیان افقی مرتبه اول بی‌هنجاری گرانی در نقطه  $(x, z)$   
 $\partial \Delta g(x, z) / \partial z$ : گرادیان قائم مرتبه اول بی‌هنجاری گرانی در نقطه  $(x, z)$  است.

پارامتر  $v$ : درجه عملگری گرادیان کل است که معمولاً عدد یک منظور می‌شود. مقدار گرادیان کل نرمال یک مقدار بدون بعد است.

شده است [۳].

بنابراین گرادیان‌های افقی و قائم رابطه ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x} = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^\mu \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z} = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^\mu \quad (6)$$

بی‌هنجاری به طور کامل بازسازی نمی‌شود؛ مرحله گذار که سیگنال بازسازی شده شامل بیشینه بازسازی سیگنال مطلوب با کمترین نوفه است و مرحله ثابت (تقریباً افقی) که سیگنال بازسازی شده شامل مقادیر زیادی نوفه فرکانس بالا است. تعداد هارمونیک‌های بهینه از مرحله گذار به وسیله تعادل بین سیگنال و نوفه انتخاب می‌شود. برای تعیین نقطه انحنای منحنی  $E_r$ ، منحنی عمق نقاط بیشینه گرادیان کل نرمال محاسبه شده با تعداد هارمونیک‌های مختلف رسم می‌شود، قسمتی از منحنی عمق که منطبق بر مرحله گذار است به شکل  $V$  با یک دنباله بلند است؛ مقدار گوشه بالایی سمت چپ  $V$  بیشینه عمق ادامه فروسو و مقدار  $N$  در پایین‌ترین نقطه  $V$  به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- کاربرد روش روی مدل‌های مصنوعی

برای بررسی دقت نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال، بهبود یافته در تشخیص بی‌هنجاری‌ها و تخمین عمق آن‌ها، ابتدا روش روی مدل‌های مصنوعی اعمال شده است.

#### ۳-۱- مدل استوانه افقی مغناطیسی

داده‌های مغناطیسی مصنوعی از یک استوانه افقی نامحدود که به طور قائم در نیمکره شمالی پلاریزه شده باشد، محاسبه شده است که ویژگی‌های این مدل به این شرح است: موقعیت افقی مرکز استوانه افقی در مرکز مختصات؛ عمق مرکز ۳ کیلومتر؛ شعاع ۰٫۵ کیلومتر؛ درصد حجمی منیتیت موجود در این توده استوانه‌ای شکل ۴۵ درصد و خودپذیری منیتیت در سیستم CGS؛ ۰٫۵ طول پروفیل مغناطیسی ۴۰ کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری ۰٫۱ کیلومتر است. به داده‌های حاصل از این پروفیل ۵ درصد نویز تصادفی اضافه شده است. در صورتی که مولفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین ۰٫۶ اورستد باشد اثر بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از این استوانه در دو حالت بدون نویز و حاوی ۵ درصد نویز در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبود یافته از سطح زمین تا عمق ۵ کیلومتر در ۱۰۱ لایه با فواصل یکسان ۰٫۰۵ کیلومتر محاسبه شده است.

منحنی‌های  $E_r$ ، بیشینه گرادیان‌های کل نرمال و عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال محاسبه شده برای تعداد هارمونیک‌های مختلف، در شکل ۲ (الف-ب) نشان داده شده است. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی منحنی  $E_r$  و منحنی

با جایگذاری رابطه‌های ۵ و ۶ در رابطه ۱ مقدار گرادیان کل نرمال محاسبه می‌شود.

#### ۳-۲- انتخاب تعداد هارمونیک‌های بهینه

همان‌طور که بیان شد، مقدار گرادیان کل نرمال بستگی زیادی به تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده در محاسبه سری فوریه دارد. با توجه به اینکه بی‌هنجاری‌ها مجموع بی‌هنجاری‌های اصلی و نوفه‌های تصادفی‌اند با معرفی کمیت  $E_r$  که آهنگ انرژی بی‌هنجاری‌های بازسازی شده به انرژی بی‌هنجاری‌های اصلی است روشی برای محاسبه تعداد هارمونیک‌های بهینه معرفی شده است [۱۹].

$$E_r(N) = \frac{E_{rec}(N)}{E_{ori}} = \frac{\sum \Delta g_{rec}^2(N)}{\sum \Delta g_{ori}^2} \quad (7)$$

$$\Delta g_{rec}(N) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \quad (8)$$

که در آن:

$E_{rec}$ : انرژی بی‌هنجاری‌های بازسازی شده با اولین ضرایب  $N$

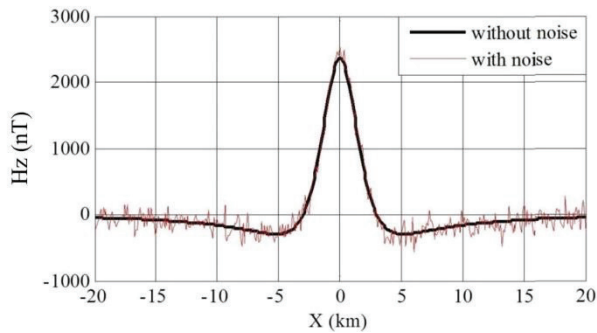
$E_{ori}$ : انرژی بی‌هنجاری‌های اصلی  $\Delta g_{ori}$

$\Delta g_{rec}(N)$ : بی‌هنجاری‌های بازسازی شده در سطح اندازه‌گیری

با اولین ضرایب فوریه  $N$  است.

منحنی  $E_r$  سه مرحله دارد: مرحله صعود که سیگنال

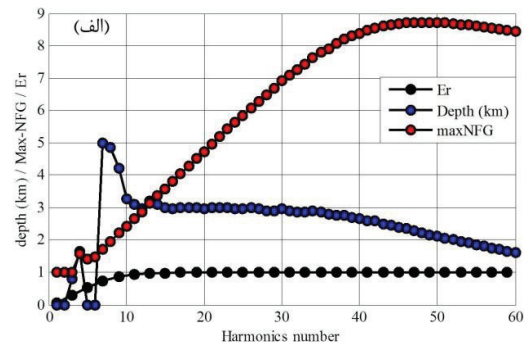
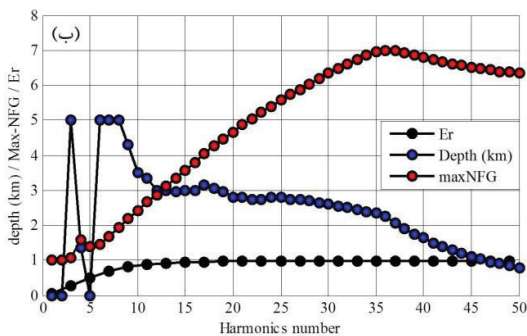
شده است. مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=36$  و  $N=49$  در شکل ۴ (الف-ب) نشان داده شده و عمق منبع در این دو حالت به ترتیب ۲٫۱۵ و ۲٫۲۵ کیلومتر تخمین زده شده است.



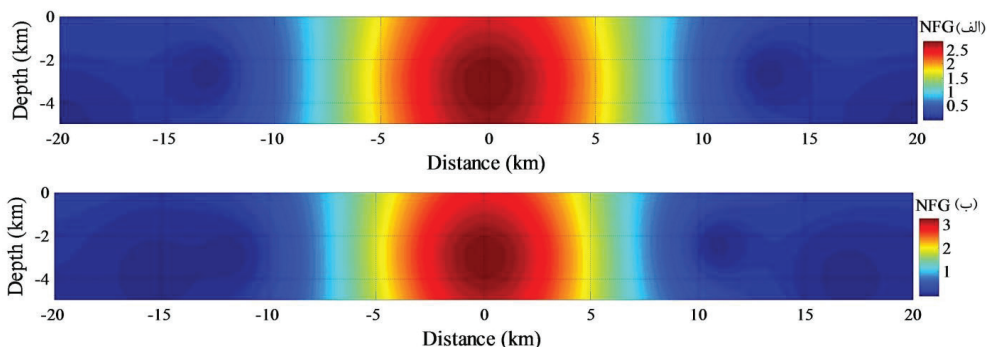
شکل ۱: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی استوانه افقی مغناطیسی

عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال در شکل ۲ (الف-ب) برای دو مدل با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته، در حالت بدون نویز و نویزدار به ترتیب تعداد  $N=12$  و  $N=14$  به عنوان تعداد هارمونیک‌های بهینه تعیین شده است. مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای تعداد ۱۲ و ۱۴ هارمونیک در شکل ۳ (الف-ب) نشان داده شده است، عمق مرکزی منبع در هر دو حالت ۲٫۹۵ کیلومتر برآورد شده است. به وضوح مقدار بیشینه در این مقاطع با مرکز استوانه مطابقت دارد و همچنین این روش نسبت به نویز پایدار است.

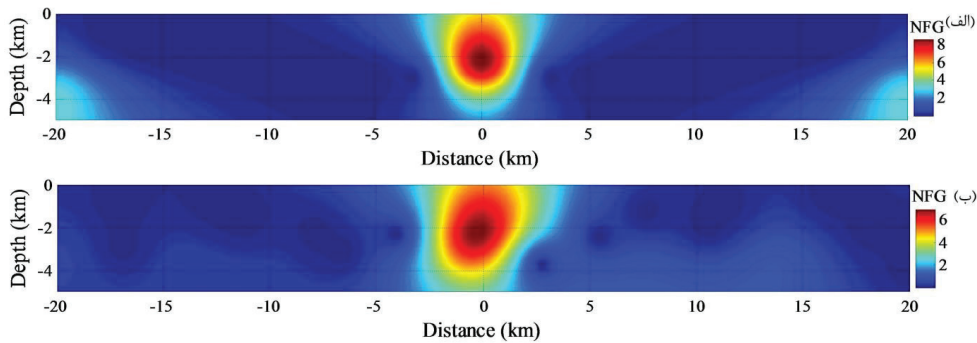
بیشینه گرادیان‌های کل نرمال محاسبه شده با استفاده از تعداد جملات هارمونیک مختلف یک منحنی ایجاد می‌کند که در شکل ۲ (الف-ب) نشان داده شده است. تعداد هارمونیک‌های بهینه در حالت بدون نویز و نویزدار با استفاده از روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال [۳، ۱۱]، به ترتیب ۴۹ و ۳۶ انتخاب



شکل ۲:  $E_r$ ، عمق تخمینی بیشینه گرادیان‌های کل نرمال و مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال بر اساس تعداد هارمونیک‌ها، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۱)؛ (الف) بدون نویز؛ (ب) حاوی ۵ درصد نویز

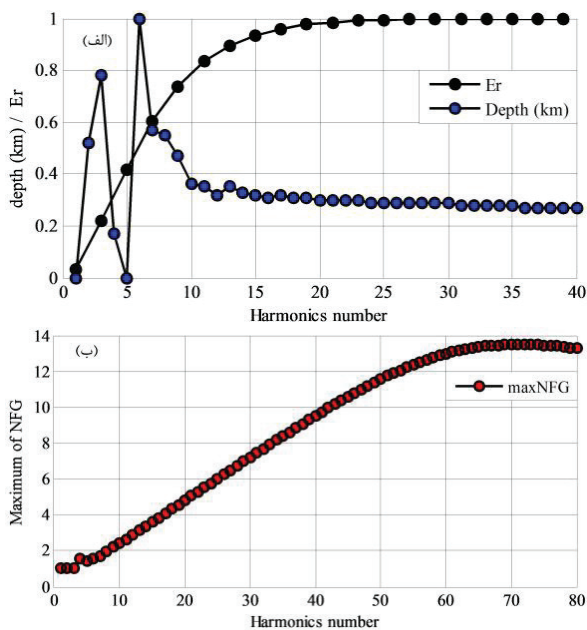


شکل ۳: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی؛ (الف) بدون نویز؛ (ب) حاوی ۵ درصد نویز (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده به ترتیب ۱۲ و ۱۴ است).



شکل ۴: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی استوانه افقی؛ (الف) بدون نویز؛ (ب) حاوی ۵ درصد نویز (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده به ترتیب ۴۹ و ۳۶ است).

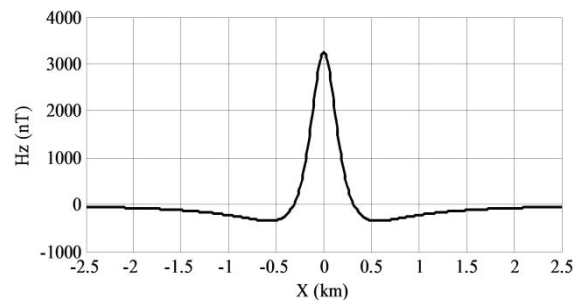
(الف) نشان داده شده است. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی این دو منحنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته،  $N=12$  به عنوان تعداد هارمونیک بهینه برای این مدل تعیین شده است. مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=12$  در شکل ۷ نشان داده شده است، با استفاده از مقدار بیشینه در این مقطع عمق منبع  $0.32$  کیلومتر برآورد شده است. تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال [۱۱،۳]، عدد ۷۱ انتخاب شده است



شکل ۶: (الف)  $E_r$  و عمق تخمینی بیشینه گرادیان‌های کل نرمال؛ (ب) مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، بر اساس تعداد هارمونیک‌ها، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۵)

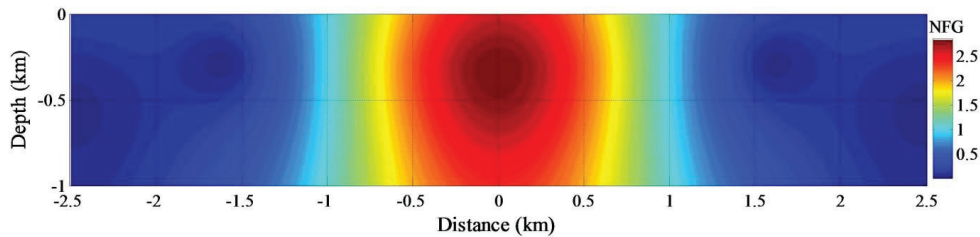
### ۳-۲- مدل دایک قائم مغناطیسی

داده‌های مغناطیسی مصنوعی از یک دایک قائم که به طور قائم در میدان مغناطیسی زمین در نیمکره شمالی پلاریزه شده باشد محاسبه شده است که ویژگی‌های این مدل بدین شرح است: ضخامت  $0.15$  کیلومتر؛ عمق فوقانی  $0.2$  کیلومتر؛ عمق زیرین  $0.5$  کیلومتر؛ درصد حجمی منیتیت موجود در این دایک  $12$  درصد و خودپذیری منیتیت در سیستم CGS؛  $0.5$  طول پروفیل مغناطیسی  $5$  کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری  $10$  متر است. در صورتی که مولفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین  $0.6$  اورستد باشد اثر بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از این مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبود یافته از سطح زمین تا عمق یک کیلومتر در  $10.1$  لایه با فواصل یکسان  $10$  متر محاسبه شده است.

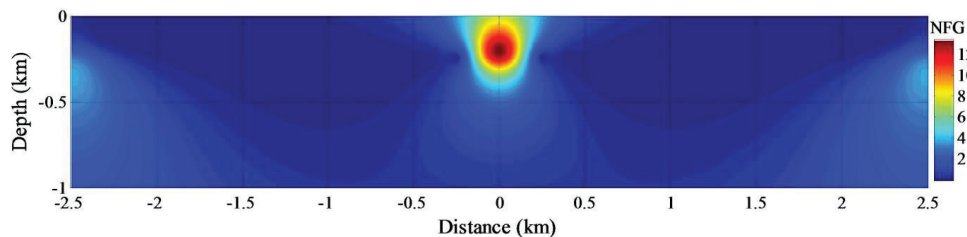


شکل ۵: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی دایک قائم مغناطیسی

منحنی‌های  $E_r$  و عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال محاسبه شده برای تعداد هارمونیک‌های مختلف، در شکل ۶

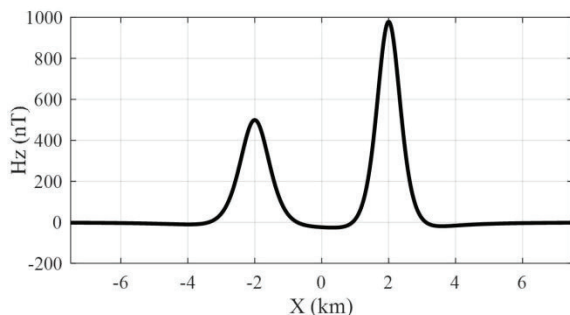


شکل ۷: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۱۲ است).



شکل ۸: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی دایک قائم (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۷۱ است).

۰٫۶ اورستد باشد اثر بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از این مدل در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبود یافته از سطح زمین تا عمق ۳ کیلومتر در ۳۱ لایه با فواصل یکسان ۱۰۰ متر محاسبه شده است.



شکل ۹: بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از دو جسم کروی

منحنی‌های  $E_r$  و عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال محاسبه شده برای تعداد هارمونیک‌های مختلف، در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی این دو منحنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته،  $N=23$  به عنوان تعداد هارمونیک بهینه برای این مدل

(شکل ۶-ب). مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=71$  در شکل ۸ نشان داده شده و عمق منبع ۰٫۲ کیلومتر تخمین زده شده است. با مقایسه این دو روش مشاهده می‌شود که با استفاده از روش گرادیان کل نرمال عمق سطح فوقانی دایک تخمین زده شده است و با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته حدوداً عمق مرکزی دایک تخمین زده شده است. با توجه به اینکه تعداد هارمونیک‌ها در روش گرادیان کل نرمال خیلی بالاست سرعت انجام محاسبات در روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته بیشتر است.

### ۳-۳- مدلی مرکب از دو جسم کروی مغناطیسی

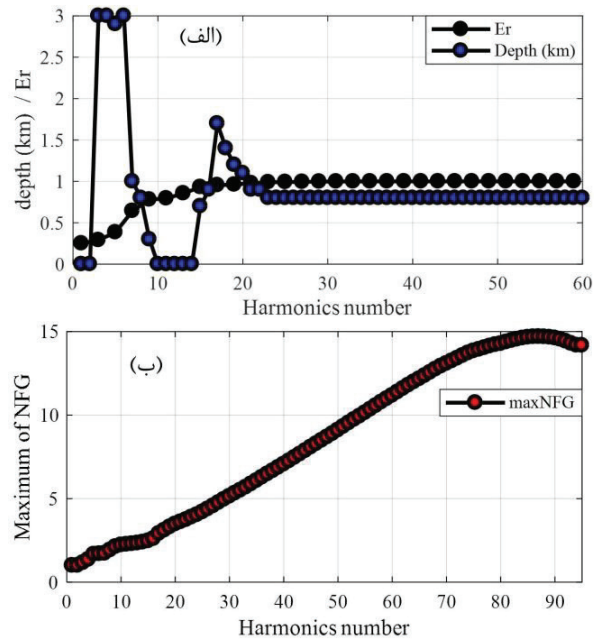
برای طراحی چنین مدلی از دو جسم کروی در عمق‌های مختلف ۱ و ۰٫۸ کیلومتر استفاده شده است و داده‌های مغناطیسی مصنوعی این مدل (با فرض اینکه کره‌ها به طور قائم در میدان مغناطیسی زمین در نیمکره شمالی پلاریزه شده باشند) محاسبه شده است. ویژگی‌های این دو جسم بدین شرح است: شعاع ۰٫۲ کیلومتر؛ درصد حجمی منیتیت ۲۵ درصد و خودپذیری منیتیت در سیستم CGS؛ ۰٫۵ طول پروفیل مغناطیسی ۱۵ کیلومتر و فاصله نمونه‌برداری ۱۰ متر است. در صورتی که مولفه قائم شدت میدان مغناطیسی زمین

تعیین شده است. مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=23$  در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

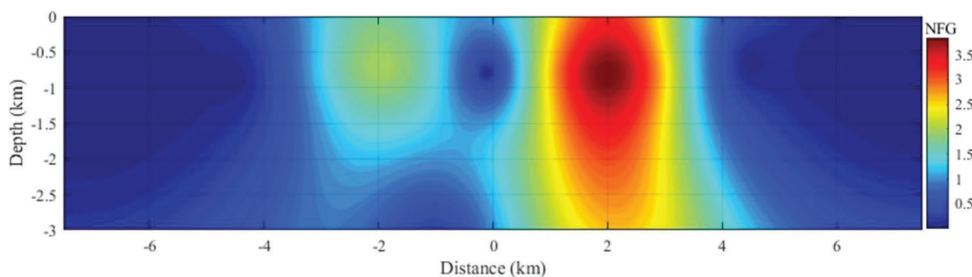
تعداد هارمونیک‌های بهینه مورد نیاز برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال شده با استفاده از روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال [۱۱،۳]، عدد ۸۷ انتخاب شده است (شکل ۱۰-ب). مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=87$  در شکل ۱۲ نشان داده شده و عمق دو کره مطابق جدول ۱ برآورد شده است. با مقایسه این دو روش مشاهده می‌شود که با استفاده از روش گرادیان

جدول ۱: نتایج تخمین عمق برای مدل مغناطیسی مرکب از دو جسم کروی

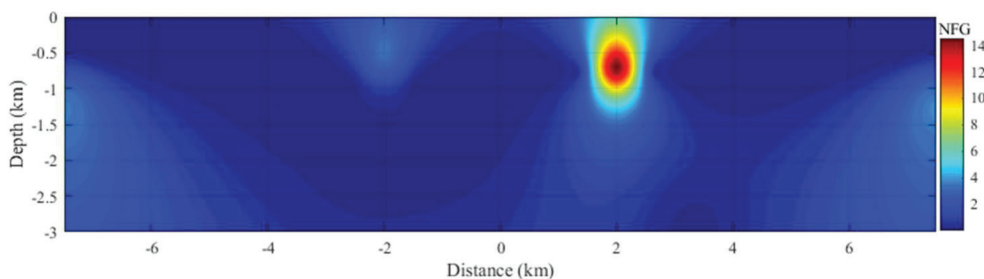
$X = -2$	$X = +2$	موقعیت مرکز کره
۱	۰٫۸	عمق واقعی کره (km)
۰٫۷	۰٫۸	عمق تخمینی با روش ENFG (km)
۰٫۵	۰٫۷	عمق تخمینی با روش NFG (km)



شکل ۱۰: (الف)  $E_r$  و عمق تخمینی بیشینه گرادیان‌های کل نرمال؛ (ب) مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، براساس تعداد هارمونیک‌ها، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۹)



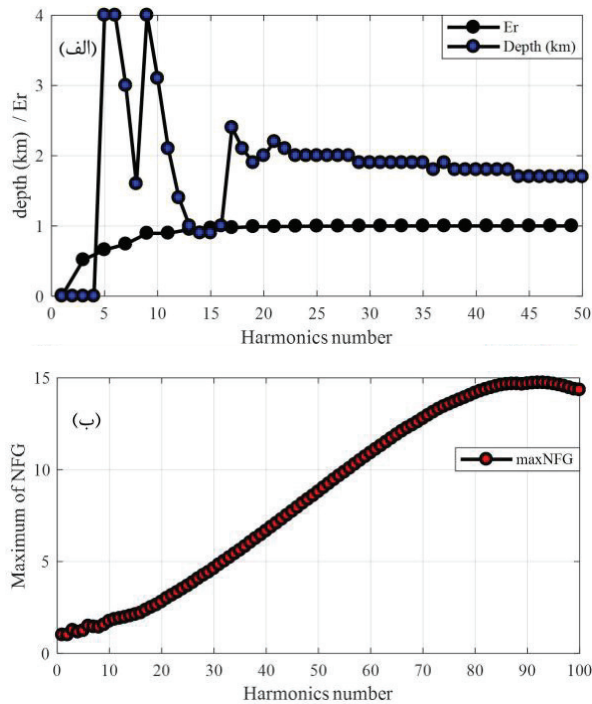
شکل ۱۱: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی مرکب از دو جسم کروی (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۲۳ است).



شکل ۱۲: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مصنوعی مرکب از دو جسم کروی (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۸۷ است).



تعیین شده است. مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=14$  در شکل ۱۵ نشان داده شده است، با استفاده از این مقطع عمق دو جسم به شرح جدول ۲ برآورد شده است.



شکل ۱۴: الف)  $E_r$  و عمق تخمینی بیشینه گرادیان‌های کل نرمال؛ ب) مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال، بر اساس تعداد هارمونیک‌ها، برای بی‌هنجاری نشان داده شده در شکل (۱۳)

جدول ۲: نتایج تخمین عمق برای مدل گرانی مرکب از دو جسم

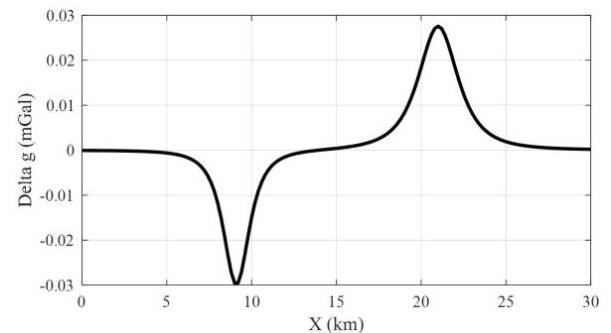
منشور	کره	ساختار
۱٫۲	۱٫۸	عمق مرکز ساختار (km)
۱٫۳۵	۱	عمق تخمینی با روش ENFG (km)
۱٫۲۷	۰٫۶۵	عمق تخمینی با روش NFG (km)

تعداد هارمونیک‌های بهینه با استفاده از روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال شده [۱۱،۳]، عدد ۸۷ انتخاب شده است (شکل ۱۴-ب). مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری در راستای پروفیل به ازای  $N=87$  در شکل ۱۶ نشان داده شده و عمق دو جسم مطابق جدول ۲ برآورد شده است.

کل نرمال بهبود یافته عمق مرکزی کره‌ای که نزدیک‌تر به سطح زمین است به درستی تخمین زده شده است و عمق کره عمیق‌تر با درصدی از خطا همراه است، اما با استفاده از روش گرادیان کل نرمال عمق مرکزی کره‌ای که نزدیک‌تر به سطح زمین است از مقدار واقعی کمتر است.

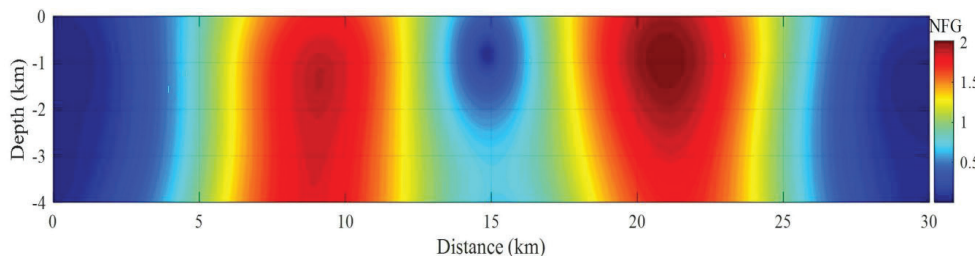
#### ۴-۲- مدلی مرکب از دو جسم گرانی

برای طراحی چنین مدلی از یک منشور و یک کره استفاده شد و اثر گرانی حاصل از چنین مدلی با نوشتن کد در محیط متلب محاسبه شده است. ویژگی‌های این دو جسم به صورت زیر است: منشور در عمق ۱ تا ۱٫۴ کیلومتری سطح زمین قرار دارد و دارای ابعاد  $0.2 \times 0.4 \times 0.4$  کیلومتر مکعب، مختصات مرکز  $(x=9.1, y=15)$  و تباین چگالی  $-0.2$  گرم بر سانتی‌متر مکعب است. کره دارای شعاع ۰٫۲ کیلومتر، تباین چگالی ۰٫۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، عمق مرکز ۱٫۸ کیلومتر و مختصات مرکز  $(x=21, y=15)$  است. ابعاد شبکه برداشت  $30 \times 30$  کیلومتر مربع، فاصله نمونه‌برداری ۰٫۲ کیلومتر و پروفیل برداشت شده شرقی-غربی در  $y=15$  به طول ۳۰ کیلومتر است. اثر بی‌هنجاری گرانی حاصل از این مدل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال بهبود یافته از سطح زمین تا عمق ۴ کیلومتر در ۴۱ لایه با فواصل یکسان ۰٫۱ کیلومتر محاسبه شده است.

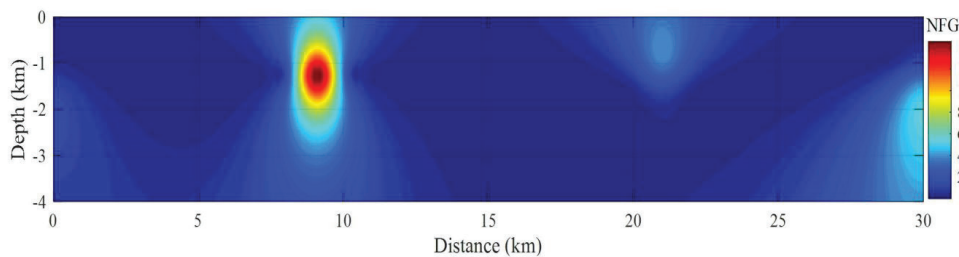


شکل ۱۳: بی‌هنجاری گرانی ناشی از مدل مصنوعی مرکب از دو جسم

منحنی‌های  $E_r$  و عمق بیشینه گرادیان‌های کل نرمال محاسبه شده برای تعداد هارمونیک‌های مختلف، در شکل ۱۴ (الف) نشان داده شده است. به وسیله تحلیل و بررسی ترکیبی این دو منحنی با استفاده از روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته،  $N=14$  به عنوان تعداد هارمونیک بهینه برای این مدل



شکل ۱۵: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی مرکب از دو جسم (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۱۴ است).



شکل ۱۶: مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی مرکب از دو جسم (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۸۷ است).

### ۳-۵- کاربرد روی داده‌های واقعی

در این بخش، روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته برای تفسیر داده‌های واقعی از یک پروفیل در منطقه جلال‌آباد استفاده شده است و نتایج با روش گرادیان کل نرمال مقایسه شده است. کانسار آهن جلال‌آباد در ۳۸ کیلومتری شمال غرب شهر زرنند در استان کرمان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در قسمت شمالی معدن جلال‌آباد در بین طول‌های شرقی ۴۴۳۶۰۰ تا ۴۴۵۴۰۰ و عرض‌های شمالی ۳۴۳۲۸۰۰ تا ۳۴۳۵۰۰۰ در سیستم مختصات متریک (UTM) در زون R40 واقع شده است. داده‌های مغناطیسی در این منطقه در ۲۶ پروفیل شرقی غربی و ۲ پروفیل شمالی جنوبی برداشت شده است. در این برداشت فاصله پروفیل‌ها ۴۰ متر و فاصله نقاط برداشت روی پروفیل‌ها ۲۰ متر بوده است.

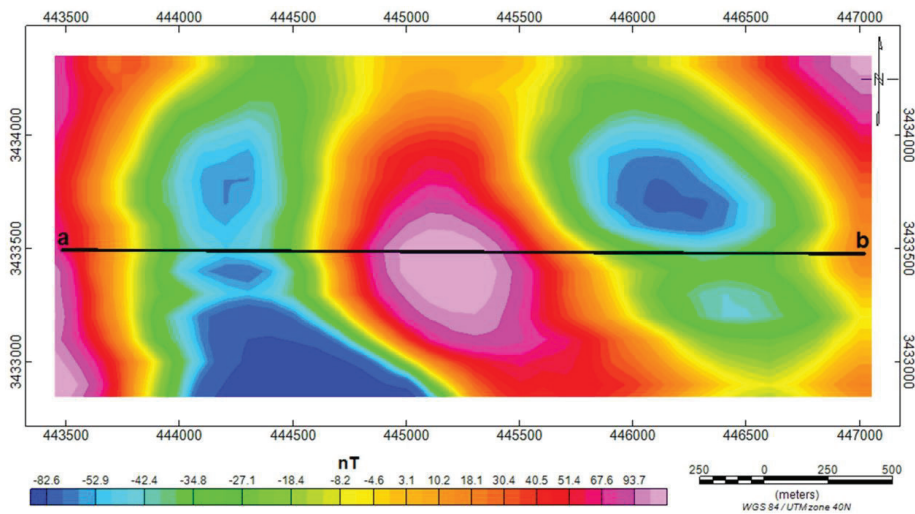
سنگ میزبان سنگ آهن جلال‌آباد، سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی سری ریزو است. شکل کلی کانسار جلال‌آباد به صورت یک عدسی کشیده با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی است که در یک ساختمان چین‌خورده واقع شده است. کانه اصلی کانسار منیتیت است که در بخش‌های عمیق واقع شده است و تقریباً بیشتر حجم کانسار را تشکیل می‌دهد. هماتیت عمدتاً به صورت ثانویه از اکسیداسیون منیتیت ایجاد شده و

در بخش‌های کم عمق و سطحی و محل شکستگی‌ها فراوان است. عمده‌ترین کانی غیرفلزی کوارتز است که همراه تالک، کلریت، فروآکتینولیت و کلسیت، کانی‌های باطله را تشکیل می‌دهند. بررسی ویژگی‌های مشخصه کانی‌سازی در جلال‌آباد نشان می‌دهد که ویژگی‌های کانی‌سازی در جلال‌آباد مشابه کانسارهای گرمابی است. کانی‌سازی مرتبط به یک محیط ریفتی درون قاره‌ای است و احتمالاً منشأ سیالات کانی‌ساز، ماگمای آلکالن سدیک اولیه‌ای بوده که در اثر بالا آمدن استنوسفر و ذوب بخشی گوشته تشکیل شده است.

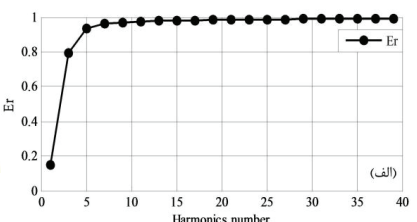
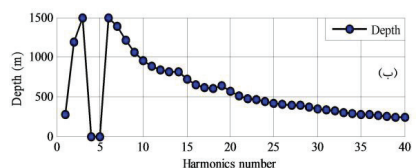
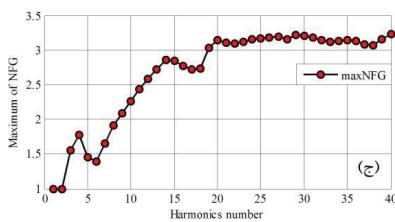
نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده این منطقه همراه با پروفیل ab در شکل ۱۷ نشان داده شده که یک بی‌هنجاری مثبت در وسط این محدوده دارد. طول پروفیل ab، ۳۵۲۰ متر و فاصله نمونه‌برداری ۱۰ متر است. داده‌های حاصل از پروفیل با استفاده از هر دو روش برای تعیین موقعیت بی‌هنجاری استفاده شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال از سطح زمین تا عمق ۱۵۰۰ متر در ۱۵۱ لایه با فواصل یکسان ۱۰ متر محاسبه شده است. در شکل ۱۸ (الف-ب-ج) منحنی‌های  $E_r$ ، عمق تخمینی بیشینه گرادیان کل نرمال و بیشینه گرادیان کل نرمال برای تعداد هارمونیک‌های مختلف برای پروفیل ab نشان داده شده است.

شکل ۱۸ (ج) نشان داده شده است تعداد هارمونیک‌های بهینه  $N=20$  تعیین و مقطع گرادیان کل نرمال حاصل از  $N=20$  در شکل ۲۰ نشان داده شده است. عمق تخمینی با استفاده از این مقطع ۵۵۰ متر برآورد شده است. با توجه به مقاطع، بی‌هنجاری ایجاد شده ناشی از توده‌ای عدسی شکل، شیب‌دار و نسبتاً عمیق است که عمق مرکزی آن

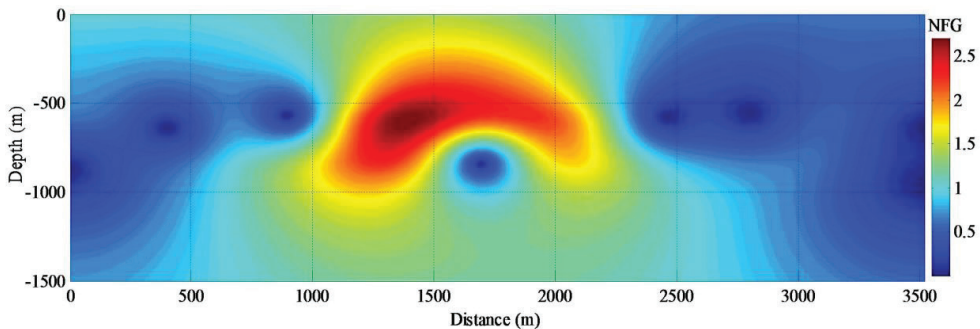
با استفاده از نمودارهای الف و ب شکل ۱۸، تعداد هارمونیک‌های بهینه برای روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته  $N=18$  تعیین و مقطع گرادیان کل نرمال بهبود یافته حاصل از  $N=18$  در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این مقطع عمق مرکزی توده را در حدود ۵۹۰ متر نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال که در



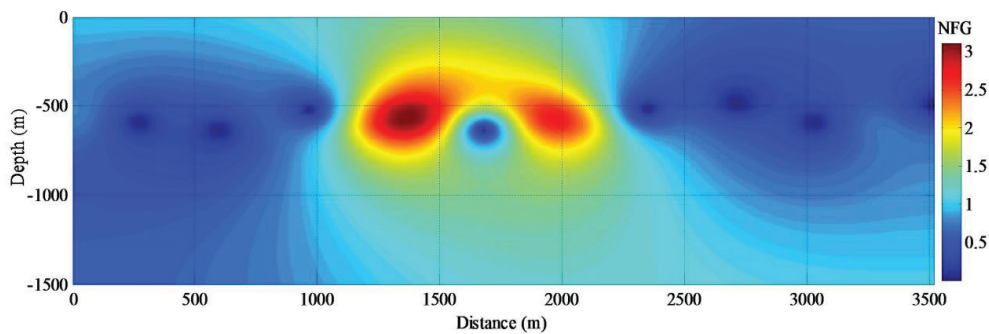
شکل ۱۷: نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده همراه با پروفیل ab



شکل ۱۸: الف)  $E_r$ ; ب) عمق تخمینی بیشینه گرادیان‌های کل نرمال؛ ج) بیشینه گرادیان‌های کل نرمال، براساس تعداد هارمونیک‌ها



شکل ۱۹: مقطع گرادیان کل نرمال بهبود یافته بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل ab (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۱۸ است).



شکل ۲۰: مقطع گرادیان کل نرمال بی‌هنجاری مغناطیسی، در راستای پروفیل ab (تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ۲۰ است).

#### ۵- مراجع

- [1] Oruç, B., and Keskinsezer, A. (2008). "Detection of causative bodies by normalized full gradient of aeromagnetic anomalies from east Marmara region". *Journal of Applied Geophysics*, 65: 39-49.
- [2] Boschetti, F., Hornby, P., and Horowitz, F. G. (2001). "Wavelet based inversion of gravity data". *Exploration Geophysics*, 32: 48-55.
- [3] Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H. (2009). "Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly Method and Its Application to the Mobern Sulfide Body, Canada". *World Applied Sciences*, 6(3): 393-400.
- [4] Trompat, H., Boschetti, F., and Hornby P. (2003). "Improved downward continuation of potential field data". *Exploration Geophysics*, 34: 249-256.
- [5] Zeng, H., Meng, X., Yao, CH., Li, X., Lou, H., Guang, Z., and Li, Z. (2002). "Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field east China". *Geophysics*, 67(4): 1138-1147.
- [6] Fedi, M., and Florio, G. (2002). "A stable downward continuation by using the ISVD method". *Geophysical Journal International*, 151: 146-156.
- [7] Cooper, G. R. J. (2004). "The stable downward continuation of potential data". *Exploration Geophysics*, 35: 260-265.
- [8] Ciancara, B., and Marcak, H. (1979). "Geophysical anomaly interpretation of potential fields by means of singular points method and filtering". *Geophysical Prospecting*, 27: 251-260.
- [9] Zhang, F. X., Meng, L. S., Zhang, F. Q., LIU, C., and Wang, S. Y. (2005). "Calculating normalized full gradient of gravity anomaly using Hilbert transform".

حدود ۵۵۰ متر است. عمق بدست آمده با استفاده از روش‌های گرادیان کل نرمال و گرادیان کل نرمال بهبود یافته با نتایج حاصل از روش اویلر مطابقت دارد. همچنین با توجه به حفاری انجام شده در این منطقه وجود ماده معدنی در منطقه تایید شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تعداد هارمونیک‌های استفاده شده در محاسبه گرادیان کل نرمال پارامتر مهمی است. روش سعی و خطا برای انتخاب تعداد هارمونیک‌های مورد استفاده ممکن است باعث ایجاد ابهام در نتایج یا حتی تعیین موقعیت نادرست شود. روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته با استفاده از آنالیز منحنی نرخ انرژی بی‌هنجاری‌های بازسازی شده و منحنی عمق براساس تعداد هارمونیک‌ها روشی مناسب برای انتخاب تعداد هارمونیک‌های بهینه معرفی کرده است. در مقایسه با روش گرادیان کل نرمال که تعداد هارمونیک‌های بهینه از روش بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال انتخاب می‌شود، روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته برای مدل‌های مصنوعی مجزا تخمین عمق دقیق و پایداری ارائه کرده است و در مواردی که مدل مصنوعی متشکل از چند ساختار در عمق‌های متفاوت است روش گرادیان کل نرمال بهبود یافته در تخمین عمق ساختاری که عمق بیشتری دارد، درصد خطای کمتری دارد. البته لازم به ذکر است که در پژوهش‌های قبلی ذکر شده است که اگر طول پروفیل ۱۳ برابر عمق پیش بینی جسم آنومال مدفون در زمین باشد، دقت تخمین عمق بهتر است. با اعمال روش گرادیان کل نرمال برای تفسیر داده‌های واقعی از منطقه جلال‌آباد نیز نتایج رضایت بخشی بدست آمده است.

- First Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, 17-19 July, Beijing, China, 60-63.
- [19] Zhang, S., and Meng, X. (2015). "Improved normalized full-gradient method and its application to the location of source body". *Journal of Applied Geophysics*, 113: 86-91.
- [20] Zhou, W. (2015). "Normalized full gradient of full tensor gravity gradient based on adaptive iterative Tikhonov regularization downward continuation". *Journal of Applied Geophysics*, 118: 75-83.
- [21] Zhou, W., Li, J., and Du, X. (2015). "Implementation of the singular points method for gravity data by fast Fourier transforms". *IEEE POTENTIALS*, 39-43.
- [22] Pasteka, R. (2000). "2D semi-automated interpretation methods in gravimetry and magnetometer". *Acta Geologica Universitatis Comenniana, Bratislava*, (55): 5-50.
- [23] Aydin, A. (2005). "Evaluation of Gravity Anomalies by Direct Interpretation Techniques: An Application from Hasankale- Horasan Region". *Journal of Engineering Sciences*, 11(1): 95-102.
- [24] Dondurur, D. (2005). "Depth estimates for Sling ram electromagnetic anomalies from dipping sheet-like bodies by the normalized full gradient method". *Pure and Applied Geophysics*, 162: 2179-2195.
- [25] Aghajani, H., and Moradzadeh, A. (2008). "Salt domes depth estimation using normalized full gradient of gravity data". *21th World Mining Congress & Expo, Poland*, 11-19.
- [26] Gerkens, J. C. (1989). "Foundation of exploration geophysics". Elsevier science publishers, pp. 667.
- [27] ژولیده‌سر، ف.؛ مصطفایی، ک.؛ ۱۳۹۲؛ "خدمات ژئوفیزیک مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی در آنومالی‌های سنگ آهن ایران مرکزی، پروژه اکتشاف گرانی‌سنجی در محدوده شمالی معدن سنگ آهن جلال‌آباد زرنند". گزارش فنی گرانی‌سنجی، مشارکت شرکت معدنکاو و زمین موج‌گستر.
- Chinese Journal of Geophysics, 48(3): 777-784.
- [10] Aydin, A. (2007). "Interpretation of gravity anomalies with the normalized full gradient (NFG) method and an example". *Pure and Applied Geophysics*, 164: 2329-2344.
- [11] Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H. (2009). "Estimation of Depth to Salt Domes from Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly and Examples from the USA and Denmark". *Earth Science*, 20(6): 1012-1016.
- [12] Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H. (2010). "Estimation of horizontal and depth of gravity anomalies using normalized full gradient". *Geoscience journal*, 19(76): 169-176.
- [13] Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H. (2011). "Detection of High-Potential Oil and Gas Fields Using Normalized Full Gradient of Gravity Anomalies: A Case Study in the Tabas Basin, Eastern Iran". *Pure and Applied Geophysics*, 168: 1851-1863.
- [14] Elysseieva, I. S., and Pasteka, R. (2009). "Direct interpretation of 2D potential fields for deep structures by means of the quasi-singular points method". *Geophysical Prospecting*, 57(4): 683-705.
- [15] Fedi, M., and Florio, G. (2011). "Normalized downward continuation of potential fields within the quasi-harmonic region". *Geophysical Prospecting*, 59: 1087-1100.
- [16] Fedi, M., and Florio, G. (2015). "Depth estimation from downward continuation: an entropy-based approach". *SEG New Orleans Annual Meeting*, 18-23 November, New Orleans, 1495-1499.
- [17] Oruc, B. (2012). "Source Location and Depth Estimation Using Normalized Full Gradient of Magnetic Anomalies". *Yerbilimleri*, 33(2): 177-192.
- [18] Zhang, S., Meng, X., Chen, Z., Wang, J., and Ren, L. (2013). "The improvement of normalized full gradient method and its application to locate mineral resources".