

تخمین پیشینه‌ی عمق بی‌هنجاری به روش ضریب ساختار

اندیشه حبیبی*، دانشگاه همدان • شهاب قمی^۱، شرکت مدیریت اکتشاف

چکیده

یکی از کاربردهای روش میدان پتانسیل (گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی) شناسایی عمق بی‌هنجاری است. تعیین ساده و سریع محدوده‌ی عمق بی‌هنجاری کمک مهمی در تفسیر اطلاعات خواهد بود. برای به دست آوردن حداکثر عمق بی‌هنجاری روش‌های نیمه‌خودکار متعددی از جمله روش اولسر و روش عمق از نقاط بی‌نهایت (DEXP2) وجود دارد. روش پیشنهاد شده در این تحقیق (DEXP) شامل تخمین پیشینه‌ی عمق حاصل برای بیشترین مقدار ضریب ساختار قابل قبول است. با توجه به اینکه ضریب ساختار پیشینه فقط به ابعاد مسأله (2D/3D) و طبیعت میدان مورد بررسی وابسته است (مثلاً میدان گرانی یا میدان مغناطیسی)، می‌توان عمق این میادین را به راحتی تعیین کرد. در این مطالعه روش DEXP روی داده‌های مصنوعی و داده‌های واقعی گرانی‌سنجی آزمایش شده است. سودمندی استفاده از این روش برای اطلاعات واقعی در مورد نمک مدفون در ناحیه‌ی چارک نشان‌دهنده‌ی آنست که عمق حاصل با سایر روش‌های دیگر تخمین عمق تطابق دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۴/۲/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۴/۲/۲۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۴/۷/۲۵

واژگان کلیدی:

میدان گرانی، شاخص ساختاری، آنومالی، تفسیر داده‌های گرانی، روش نیمه‌خودکار، تخمین بیشترین عمق

مقدمه

بی‌هنجاری از روی وضعیت نقاط نهایی میدان مقیاس‌بندی شده قابل دسترسی است. اضافه جرم یا گشتاور دوقطبی از مقادیر میدان مقیاس‌بندی شده به دست می‌آید. بنابراین قوانین مقیاس‌بندی به صورت تئوری برای منابعی از قبیل قطب‌ها، دوقطبی‌ها و خطوط دوقطبی‌ها حاصل می‌شوند. اغلب به منظور تخمین مستقیم قانون مقیاس‌بندی صحیح از داده‌ها، ضوابطی در نظر گرفته می‌شود. ثابت شده که شاخص قیاس چنین قوانینی با ضریب ساختار مرتبط است که این خود شامل تئوری و پیچش اولسر است. این روش سریع و پایدار بوده و مزیت آن رفتار منظم داده‌ی میدان پتانسیل در مقابل ارتفاع Z است [۱].

هدف این تحقیق، بیان روشی جدید برای تفسیر داده‌ی میدان پتانسیل بر مبنای ویژگی‌های معنی‌دار میادین سه‌بعدی است که تاکنون ناشناخته مانده‌اند. این روش که عمق نقاط بی‌نهایت (DEXP) نامیده می‌شود از پتانسیل نیوتونی و مشتقات آن از هر مرتبه استفاده می‌کند و ضریب ساختار توسط درجه‌ی بالای پایداری و دقت در حصول مجدد موقعیت، شرح داده خواهد شد.

روش DEXP شامل چهار مرحله است:

- حجم سه‌بعدی داده‌ی میدان پتانسیل ایجاد می‌شود؛ بدین معنی که هم داده‌های افقی و هم داده‌های عمودی مورد نیاز است.
- با استفاده از قوانین مذکور میدان سه‌بعدی لایه‌بندی می‌شود. میدان سه‌بعدی $f(r, r(0))$ ناشی از منبعی در r_0 به میدان لایه‌بندی شده $w(r, r_0)$ منتقل می‌گردد.
- عمق منبع؛ که شامل جستجویی برای نقاط نهایی میدان پتانسیل لایه‌بندی شده است. ثابت می‌شود که نقاط نهایی برای $w(r, r_0)$ در نقاط $r(x, y, z)$ به $r_0(x_0, y_0, z_0)$ که نسبت به صفحه‌ی xy متقارنند رخ می‌دهد (شکل-۱). این نقاط ارتباط معنی‌داری دارند: $z=z_0, y=y_0, x=x_0$

در تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی سه متغیر توده‌ی بی‌هنجار (عمق، شکل هندسی و چگالی توده‌ی مدفون) مدنظر هستند. برای به دست آوردن این سه مشخصه از روش‌های تفسیر مختلفی از جمله روش‌های مستقیم و معکوس تبدیل فوریه و شبکه‌ی عصبی استفاده می‌شود.

مهم‌ترین مشخصه‌ای که در بسیاری از عملیات اکتشافی نقش اساسی دارد عمق بی‌هنجاری گرانی است. تا جایی که در بعضی از کاوش‌های اکتشافی، عمق بی‌هنجاری، تنها متغیری است که در تفسیر مورد توجه قرار می‌گیرد. از این رو جهت برآورد عمق بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل، روش‌های بسیاری به وجود آمد که اکثر آنها بین روش‌های گرانی و مغناطیسی مشترک هستند؛ مثلاً روش پیترز^۲، روش سیگنال تحلیلی^۴، روش ورنز^۵، روش کمترین مربعات^۶ و چندین روش سرانگشتی دیگر^۷. در این پژوهش از روش تخمین عمق و تعیین ضریب ساختار آنومالی‌های گرانی در اکتشاف ژئوفیزیکی، به دور روش اولسر و DEXP استفاده شده است. در مواردی که با چند منشأ بی‌هنجاری سروکار داریم با استفاده از این روش‌ها دقت تجزیه و تحلیل داده‌ها و تخمین متغیرهای منبع بهبود می‌یابد.

۱- تخمین عمق حاصل از نقاط بی‌نهایت (DEXP)

با مقیاس‌بندی میادین پتانسیل توسط قوانین نیروی ویژه‌ی ارتفاع مشخص می‌شود که این میادین ویژگی‌های ارزشمندی دارند. برای میدان گرانی، باید میدان مغناطیسی و مشتقات آن از هر مرتبه تئوری توصیف شود که روشی که جهت تفسیر تمامی میادین پتانسیل پیشنهاد می‌گردد روش DEXP (محاسبه‌ی عمق از نقاط بی‌نهایت) است. این روش تخمین عمق منبع، چگالی و شاخص ساختار از روی نقاط نهایی سه‌بعدی مقیاس‌بندی شده بر حسب قوانین نیروی ارتفاع را امکان‌پذیر می‌کند. عمق منشأ

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (andishe.habibi@gmail.com)

خاصیت، با افزایش N عمق تخمینی منبع افزایش خواهد یافت و عمق بیشینه هم به بیشینه قابل قبول (N_{max}) خواهد رسید. بنابراین می توان با بیشینه های Ω_p بر اساس معادله ی ۳- به عمق بیشینه رهنمون شد [۲].

$$\Omega_p = z^{N_{max}/2} f_p \quad (۳)$$

۳- مدل مصنوعی

در این مبحث سه روش تخمین عمق معرفی شده را بر داده های حاصل از مدل های مختلف مصنوعی اعمال کرده و با استفاده از نتایج، آنها را با یکدیگر مقایسه می کنیم. برای این کار ابتدا از داده های بدون نوفه استفاده کرده، سپس به هر مدل ۵ و ۱۰ درصد نوفه ی تصادفی اضافه و مجدداً نتایج را بررسی می کنیم.

۴- مدل ساده ی کروی در عمق ۵۲ متری

۴-۱- مدل کروی بدون نوفه

در مرحله ی اول مدل کروی ساده ای را به شعاع ۵ متر در نظر می گیریم. داده ها در شبکه ای به طول ۲۰۰ متر و با فواصل ۲ متری محاسبه شده اند. مرکز کره در عمق ۲۵ متری و در وسط شبکه ی برداشت فرض شده است. شکل ۲- آنومالی بوگه ی حاصل از این مدل را نشان می دهد. برای اعمال روش DEXP بر داده های حاصل از مدل، از مشتق قائم مرتبه اول داده ها استفاده می کنیم. با محاسبه ی ادامه ی فراسو از داده های مشتق در ارتفاع های مختلف و تا ارتفاع ۵۰ متری، حجمی سه بعدی از داده را در نیم فضای بالای سطح برداشت ایجاد خواهیم کرد که به کمک آنها و با استفاده از معادلات ارائه شده در مبحث قبل می توان عمق توده ی زیر سطحی را تخمین زد. در شکل ۳- نتایج حاصل از روش DEXP ارائه شده است.

این شکل، مشتق قائم مرتبه اول را نشان می دهد و نتایج حاصل از ادامه ی فراسو و تخمین عمق DEXP در صفحه ی موازی با محور x و گذرنده از محل مرکز توده ی زیر سطحی در شکل ۴- نشان داده شده است. بدین ترتیب مرکز مدل مصنوعی در عمق ۲۶ متر برآورد می شود که هم خوانی مناسبی با مقدار واقعی آن دارد.

به منظور استفاده از روش تخمین عمق اوپلر، ضریب ساختار ۲ برای مدل کروی در نظر گرفته می شود. در شکل ۵- بهترین محل معادله ی همگن اوپلر به ازای طول پنجره های مختلف نشان داده شده است.

همان گونه که مشاهده می شود نقاط عمقی مختلفی در این شکل وجود دارد که بیشترین تمرکز آنها در عمق ۲۷/۷ متر و در مختصات مرکز کره قرار می گیرد.

۴-۲- مدل کروی به همراه پنج درصد نوفه ی تصادفی

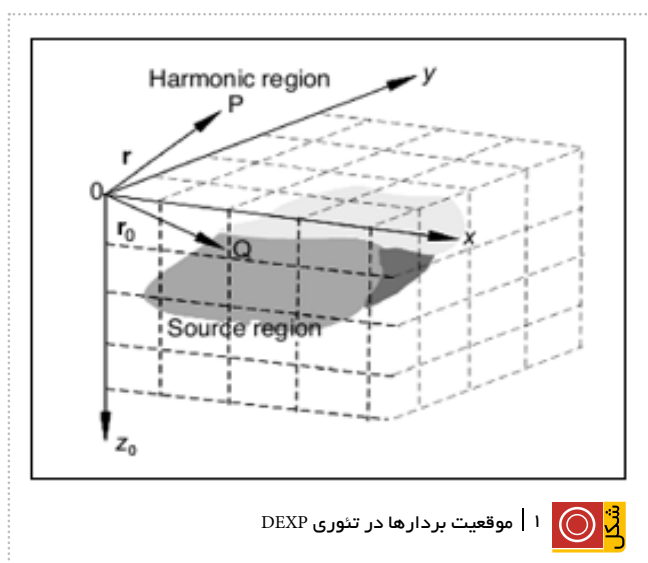
در این مرحله ۵ درصد نوفه ی تصادفی به داده های حاصل از مدل مصنوعی مرحله ی قبل اضافه شده است. شکل ۶- آنومالی بوگه ی حاصل از افزایش نوفه را نشان می دهد.

مانند بخش قبل هر سه روش را بر داده های حاصل اعمال می کنیم. شکل ۷- مشتق قائم مرتبه اول را نشان می دهد. نتایج حاصل از مشتق قائم به منظور تخمین دقیق تر عمق توده ی هدف در روش DEXP استفاده می شود.

شکل ۹- بهترین حل معادله ی همگن اوپلر را نشان می دهد. با توجه به این شکل، عمق حاصل از این روش ۲۸/۲ متر است.

■ اضافه جرم و اضافه گشتاور دوقطبی برای میدان مغناطیسی، از حجم میدان پتانسیل لایه بندی شده در نقاط نهایی به دست می آیند. نتیجه ی نهایی آشفتگی، عمق نقاط نهایی، اضافه جرم ها و تعاریف لایه لایه خواهد بود. بردار مکان r, r_0 نشان دهنده ی موقعیت نقطه ی $P(r)$ در ناحیه ی هارمونیک و موقعیت نقطه ی $Q(r_0)$ در ناحیه ی چشمه هستند.

مقدار ضریب ساختار N بر اساس نوع میدان و نوع منبع تغییر می کند. بیشترین مقدار قابل قبول N_{max} در عمل با طبیعت میدانی که تحلیل شده (میدان گرانی یا میدان مغناطیسی) و یا با بُعد مسأله (دو بعدی یا سه بعدی) تعیین می شود. مثلاً در حالت گرانی سه بعدی، مقادیر قابل قبول N اعداد صحیح (۲، ۱، ۰، -۱) است؛ به طوری که $N_{max}=2$ و در حالت دو بعدی، N_{max} برای حالت گرانی برابر است با یک.



۲- تبدیل DEXP

تبدیل DEXP تبدیلی ساده است که به مشتق مرتبه ی p میدان پتانسیل f که با f_p نشان داده می شود اعمال می گردد (z عمق است):

$$\Omega_p = z^{N_p/2} f_p \quad (۱)$$

$$N_p = N + P \quad (۲)$$

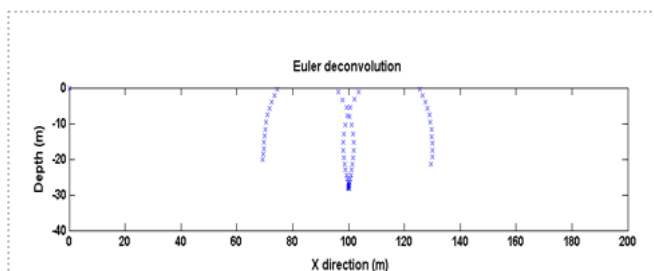
در اجرای عددی این روش برای محاسبه ی f_p از ادامه ی فراسو و دیفرانسیل عمودی استفاده می شود. تبدیل DEXP ویژگی های سودمندی دارد که مهم ترین آنها این است که موقعیت عمودی بیشینه های آن Z_0 ، عمق تا منبع (Z_0) را به دست می دهد؛ به سادگی و به صورت $Z_0 = -Z$. این قانون به میادین همگن اعمال می شود. می توان از معادله ی ۱- استدلال کرد که تبدیل DEXP به N_p نیاز دارد که N_p در عمل مفروض است یا تخمین زده می شود. در این روش از یک ویژگی متفاوت DEXP استفاده می شود که اجازه ی تعیین عمق بیشینه از منبع را می دهد. این ویژگی در واقع ارتباط خطی میان N و Z_0 است که به وضوح توسط نویسندگان بسیاری در حالت دیکانولوشن اوپلر نشان داده شده است. در نتیجه ی این

نشان می‌دهد که دو روش فوق وابستگی چندانی به افزایش نوفه ندارند. جدول ۱- نتایج مربوط به هر دو روش را در سطوح مختلف نوفه نشان می‌دهد.

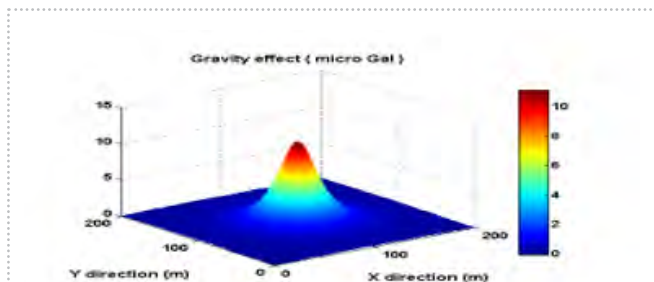
با توجه به نتایج جدول ۱- می‌توان گفت که روش DEXP در تخمین عمق توده‌های نزدیک به سطح دقت قابل قبولی دارد. همچنین از مزایای این روش می‌توان به عدم وابستگی نتایج به سطح نوفه‌ی داده‌ها اشاره کرد.

۵- اعمال روش بر داده‌های واقعی منطقه‌ی چارک

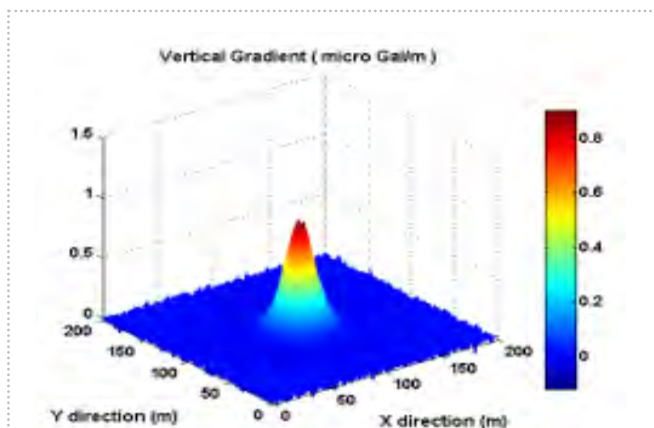
بعد از آزمایش این دو روش روی مدل‌های مصنوعی مختلف و یافتن



شکل ۵ | نتایج حاصل از تخمین عمق اویلر، مدل کروی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (بدون نوفه)



شکل ۶ | آنومالی بوگه‌ی حاصل از مدل کروی به همراه ۵ درصد نوفه‌ی تصادفی

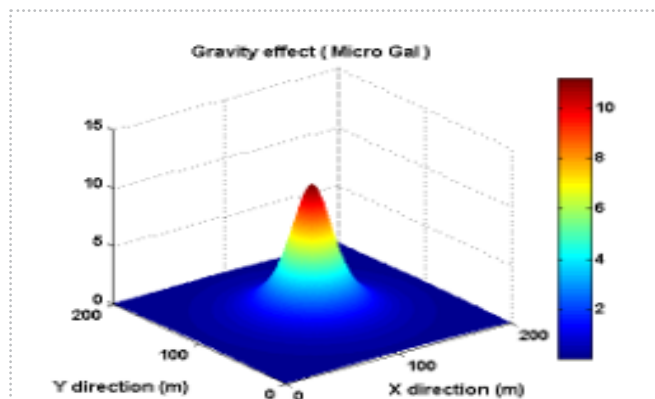


شکل ۷ | مشتق قائم مرتبه اول، مدل کروی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (با نوفه‌ی ۵ درصد)

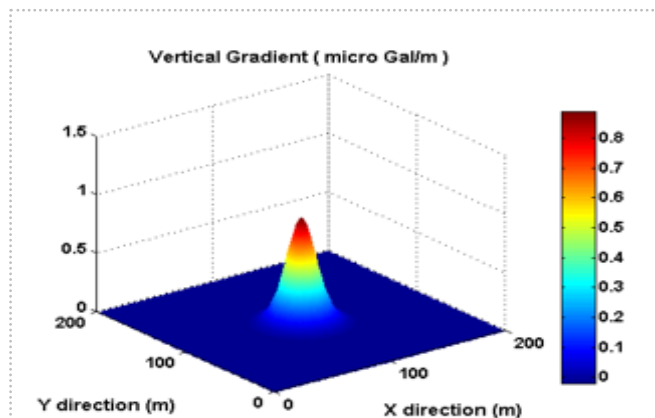
۴-۳- مدل کروی به همراه ۱۰ درصد نوفه‌ی تصادفی

اکنون به منظور سنجش روش، ۱۰ درصد نوفه‌ی تصادفی را به داده‌ها اعمال می‌کنیم و مجدداً نتایج بررسی می‌شود. شکل ۱۰- آنومالی بوگه و مشتق قائم مرتبه اول حاصل از داده‌ها را نشان می‌دهد.

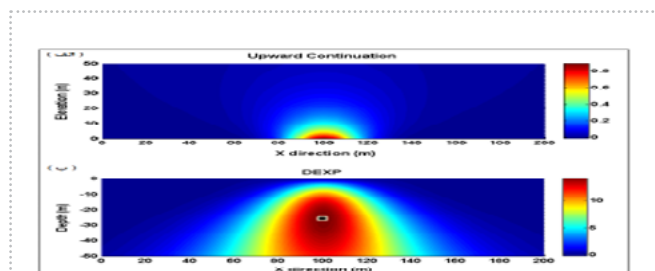
نتایج حاصل از روش‌های DEXP و اویلر در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش DEXP عمق توده را در ۲۵ متری و روش اویلر آنرا در ۲۸/۶ متری تخمین می‌زند. این نتایج



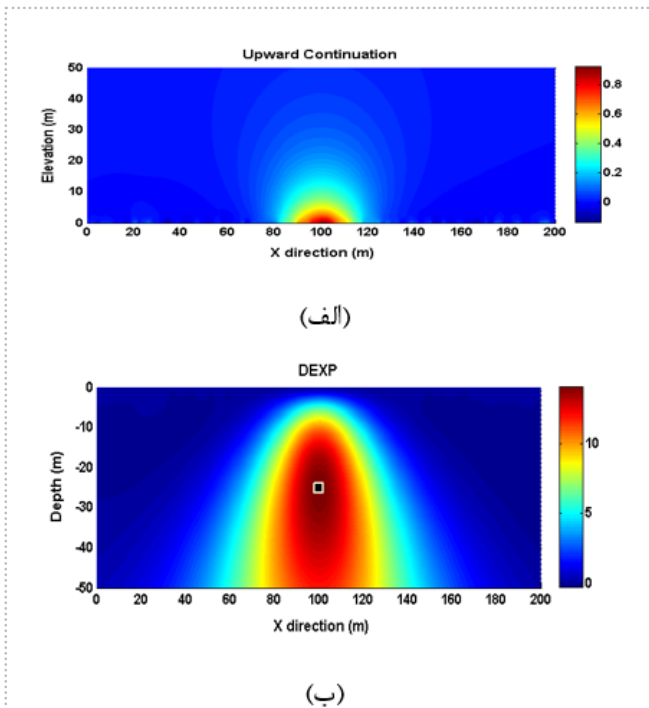
شکل ۱۰ | آنومالی بوگه، مدل کروی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (بدون نوفه)



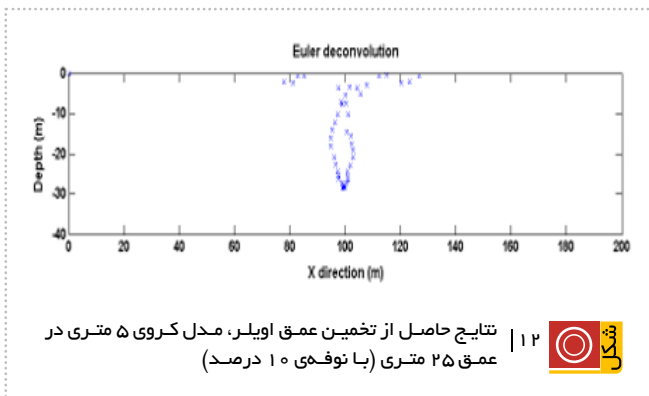
شکل ۱۱ | مشتق قائم مرتبه اول، مدل کروی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (بدون نوفه)



شکل ۱۲ | الف) ادامه‌ی فراسو (ب) تخمین عمق DEXP مدل کروی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (بدون نوفه)



شکل ۱۱ | الف) ادامه‌ی فراسو (ب) تخمین عمق DEXP مدل کرووی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (با نوفه‌ی ۱۰ درصد)



شکل ۱۲ | نتایج حاصل از تخمین عمق اویلر، مدل کرووی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (با نوفه‌ی ۱۰ درصد)

۷- نقشه‌های باقیمانده

در تفسیر کیفی اطلاعات برای تفکیک آنومالی‌های محلی^۸ و آنومالی‌های ناحیه‌ای^۹ از روش فیلتر کردن استفاده شده است. در نقشه‌ی باقیمانده‌ی بی‌هنجاری‌های گرانی‌سنجی (شکل-۱۴) مشاهده می‌شود که تاقدیس در عمق‌های پایین‌تر نیز شکل کماتی خود را حفظ می‌کند. نکته‌ی بسیار مهم وجود آنومالی Low در قسمت میانی این تاقدیس است که احتمال وجود نمک را در این محدوده مطرح می‌نماید. لازم به ذکر است که نقشه‌های حاصل از فیلتر، تنها نشان‌دهنده‌ی وجود یا عدم وجود آنومالی هستند و برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر، مخصوصاً اطلاعات عمقی، باید از روش‌های تخمین عمق یا مدل‌سازی استفاده شود.

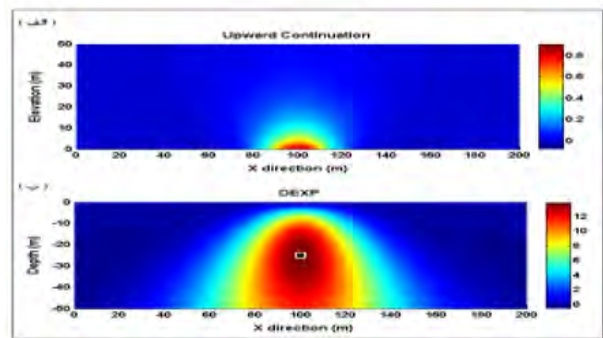
با استفاده از روش‌های ارائه شده برای مدل‌های مصنوعی و تعمیم آن برای مدل واقعی نتایج زیر حاصل شد:

عمق احتمالی بی‌هنجاری کم مشاهده شده در نقشه‌ی باقیمانده (که

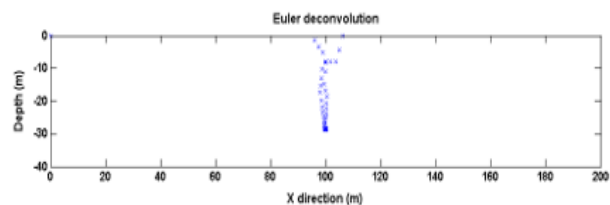
توانایی تخمین عمق به روش‌های مذکور، روش ارائه شده روی داده‌های واقعی اعمال شده است. اطلاعاتی که در این بخش استفاده می‌شود مربوط به عملیات گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی فارس ساحلی و تاقدیس چارک است. نظر به اهمیت این تاقدیس و برای تعبیر و تفسیر دقیق‌تر، قسمتی از داده‌هایی که تاقدیس چارک و مناطق اطراف آنرا می‌پوشاند از مجموعه‌ی کلی داده‌های فارس ساحلی استخراج و این روش روی اطلاعات آن اعمال شده است.

۶- اطلاعات گرانی و مغناطیس

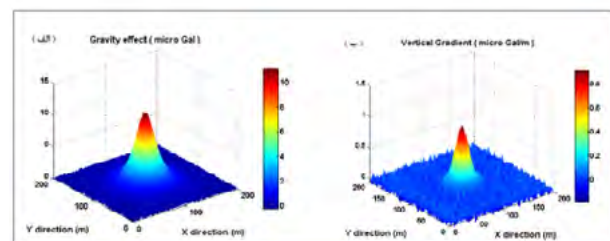
با بررسی انجام شده تعداد ۱۹۱۷ ایستگاه گرانی‌سنجی تاقدیس چارک را پوشش می‌دهند. فواصل برداشت در راستای خطوط ۵۰۰ متر و فاصله‌ی خطوط ۲۵۰۰ متر است. بر اساس نتایج مشاهده‌ای بازه‌ی تغییرات گرانی در نقشه‌ی آنومالی بوگه ۱۵/۱ میلی گال است.



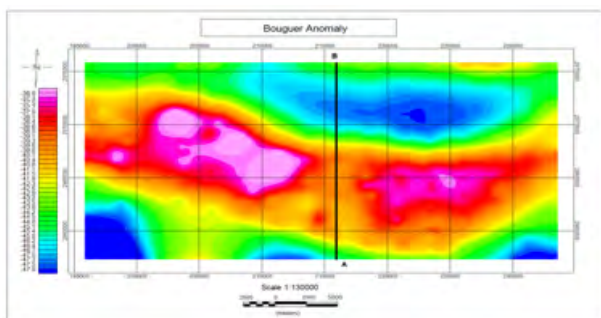
شکل ۸ | الف) ادامه‌ی فراسو (ب) تخمین عمق DEXP، مدل کرووی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (با نوفه‌ی ۵ درصد)



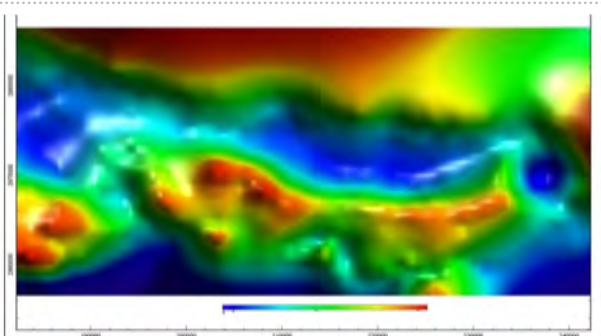
شکل ۹ | نتایج حاصل از تخمین عمق اویلر، مدل کرووی ۵ متری در عمق ۲۵ متری (با نوفه‌ی ۵ درصد)



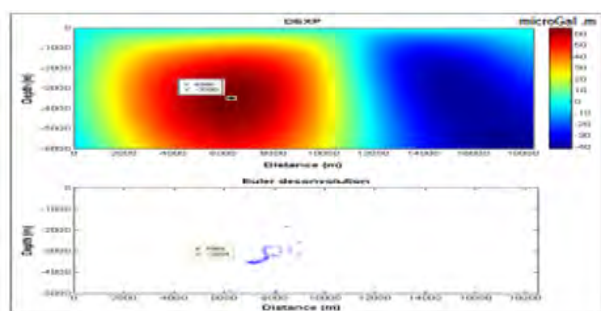
شکل ۱۰ | الف) آنومالی بوگه (ب) مشتق قائم مرتبه اول (با نوفه‌ی ۱۰ درصد)



شکل ۱۳ | نقشه‌ی آنومالی بوگه‌ی تاکدیس چارک



شکل ۱۴ | نقشه‌ی بی‌هنجاری باقیمانده‌ی تاکدیس چارک



شکل ۱۵ | الف) نقشه‌ی تخمین عمق DEXP (ب) بهترین حل معادله‌ی همگن اویلر (تاکدیس چارک)

شکل ۱۱ | نتایج حاصل از تخمین عمق دو روش مختلف

درصد نوفه	عمق واقعی	نتیجه‌ی حاصل از روش DEXP	نتیجه‌ی حاصل از روش اویلر
۰٪	۲۵	۲۶	۲۷/۷
۵٪	۲۵	۲۵	۲۸/۲
۱۰٪	۲۵	۲۵	۲۸/۳

می‌توان آنرا به نمک نسبت داد) با استفاده از روش DEXP با ضریب ساختار ۰/۶، ۳۵۰۰ متر و با استفاده از روش اویلر با ضریب ساختار ۰/۶، ۳۵۵۴ متر محاسبه شده است (شکل-۱۵).

نتایج حاصل از روش DEXP و روش اویلر در این مطالعه با نتیجه‌ی مدل‌سازی انجام شده در بخش گرانی‌سنجی اداره‌ی ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف نفت هم‌خوانی مناسبی دارد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر نتایج زیر حاصل شد:

- در مورد اهداف نزدیک به سطح و در حالت بدون نوفه، هر دو روش از دقت قابل‌قبولی برخوردارند.
- به دلیل پایداری روش DEXP در برابر نوفه و اثرات سطحی، می‌توان این روش را بر داده‌های ناشی از مشتقات مرتبه‌ی اول و دوم داده‌های گرانی اعمال کرد. این قابلیت، سبب افزایش دقت روش DEXP در مورد مدل‌های پیچیده‌ی متشکل از چندین هدف متفاوت و همچنین اهداف عمیق می‌شود.
- در بی‌هنجاری‌های عمیق، دقت روش DEXP کاهش می‌یابد اما همچنان در مقایسه با روش اویلر قابل‌استفاده است.
- روشی سریع و آسان است و در مقابل روش اویلر پیچیدگی‌هایی مثل تغییرات ضریب ساختار و ابعاد پنجره‌ی اویلر را ندارد.

پانویس‌ها

- | | | |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1. sh.ghomi@gmail.com | 4. analytic signal | 7. Rules of thumbs |
| 2. Depth From Extreme Point Method | 5. Werner | 8. Local |
| 3. Peter 's method | 6. least-squares | 9. Regional |

منابع

[1]. Fedi, M., 2007. DEXP: a fast method to determine the depth and the structural index of potential field sources. *Geophysics* 72(1), 1-11

[2]. Fedi, M., and G. Florio, 2013. Determination of the maximum-depth to potential field sources by a maximum structural index method: *Journal of Applied Geophysics*, 88, 154-160