

مدل‌سازی وارون مارکوارت بی‌هنجاری گرانی ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی بر اساس تباین چگالی سهموی (مطالعه موردی: ناحیه کَرند)

عطا اسحق‌زاده^{۱*} و ساناز سیدی‌صاحباری^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی نبی اکرم(ص)، تبریز

نویسنده مسئول: * eshagh@ut.ac.ir

دریافت: ۹۹/۸/۳۰

پذیرش: ۹۹/۱۱/۱

نوع مقاله: مطالعه موردی

چکیده

در این مقاله روشی بر اساس مدل‌سازی وارون مارکوارت دو بعدی ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی با استفاده از داده میدان گرانی ارائه و تباین چگالی اعماق مختلف زمین بر اساس تابع تباین چگالی سهموی محاسبه می‌گردد. در این روش ساختارهای چین‌خورده از نظر هندسی به مثلث متساوی‌الساقین تشبیه می‌شود. داده گرانی بوگه شامل گرانی منطقه‌ای و محلی می‌باشد و نیاز است تا اثر گرانی منطقه‌ای حذف گردد. روش‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است؛ اما در بهترین حالت نیز اثر میدان گرانی منطقه‌ای بطور کامل حذف نمی‌شود. در این مقاله، کارایی روش برای بی‌هنجاری‌های گرانی مربوط به مدل‌های مصنوعی تاقدیسی و ناودیسی، با و بدون بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش با بکارگیری روش بهینه‌سازی مارکوارت پارامترهای عمق بالا و پائین و زاویه ساق‌های مثلث، با تکرار تغییر می‌کنند تا اینکه خطای بین داده‌های گرانی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای از حد تعیین شده کمتر گردد. نتایج بدست آمده عملکرد قابل قبول الگوریتم نوشته شده را نشان می‌دهند. همچنین داده‌های گرانی واقعی مربوط به ناحیه کَرند استان گلستان مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند تا شکل و عمق ساختارهای چین‌خورده که می‌توانند بعنوان تله‌های هیدروکربنی در منطقه مورد مطالعه عمل کنند، تعیین گردد. خروجی این روش در واقع عمق نهشته‌ها موجود در منطقه مورد مطالعه که روی سنگ بستر واقع شده‌اند را نشان می‌دهد. مدل سه بعدی ساختارهای چین‌خورده مدفون در زیر نهشته‌ها حاصل از وارون‌سازی مارکوارت، عمق بالای تاقدیس را در حدود ۲۸۰۰ متر، عمق پایین تاقدیس یا بالای ناودیس که تقریباً مطابق با داده گرانی صفر می‌باشد را در حدود ۴۲۰۰ متر و عمق پایین ناودیس را در حدود ۵۶۰۰ متر تخمین زده است.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری‌های گرانی، تباین چگالی سهموی، ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی، کَرند، وارون‌سازی مارکوارت

۱- پیشگفتار

تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها در زمره ساختارهای زمین‌شناسی بسیار مهم در اکتشافات هیدروکربن بشمار می‌آیند. بسیاری از موارد پژوهشی در زمینه ساختارهای چین‌خورده بوسیله لیونس (۱۹۵۶) انجام پذیرفت و کاربردهای موفق روش‌های ژئوفیزیکی برای مشخص کردن ساختارهای تاقدیسی بوسیله وی مطرح شده است. همچنین روش‌های زیادی جهت تخمین عمق نهشته‌ها و در نتیجه مدل‌سازی شکل سنگ بستر ارائه شده است (آلساندرو و همکاران، ۱۹۸۳؛ چای و هینز، ۱۹۸۸؛ چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۵؛ اسحق‌زاده و کلانتری، ۲۰۱۷). بطور معمول مدل‌های مثلثی متساوی‌الساقین چه در حالت عادی و چه در حالت معکوس به‌ترتیب برای

توضیح شکل هندسی ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی جهت تجزیه و تحلیل بی‌هنجاری‌های گرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۷؛ اسحق‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰). بهینه‌سازی بی‌هنجاری گرانی یک فرآیند ریاضی برای برآورد پارامترهای مدل در حالت‌های تاقدیسی و ناودیسی مانند عمق بالا و پایین و زاویه ساق‌های مثلث متساوی‌الساقین و همچنین ضرائب بی‌هنجاری منطقه‌ای می‌باشد. یکی از روش‌های بهینه‌سازی، روش مارکوارت می‌باشد که بطور گسترده در بسیاری از مطالعات ژئوفیزیکی، بخصوص روش‌های تحلیل میدان‌های پتانسیل کاربرد دارد (چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۷؛ اسحق‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسحق‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

نقاط اندازه‌گیری بر حسب km، زاویه ساق‌های چین بر حسب درجه و بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای بر حسب mGal بیان می‌شود.

۲ - تابع چگالی سهموی

تابع چگالی سهموی^۱ PDF به صورت زیر تعریف شده است (چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۸):

$$\Delta\rho(z) = \frac{\Delta\rho_0^3}{(\Delta\rho_0 - \alpha z)^2} \quad (1)$$

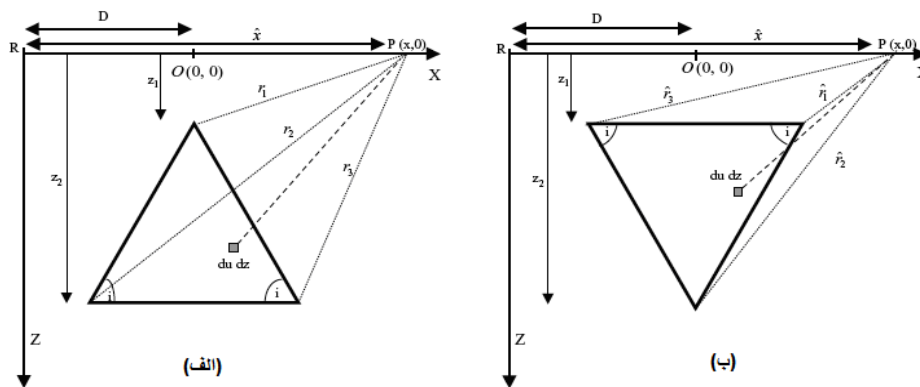
که $\Delta\rho(z)$ تباین چگالی یک قسمت از ستون رسوبی در عمق Z ، $\rho\Delta_0$ تباین چگالی مشاهده شده در سطح زمین و α یک ثابت می‌باشد که می‌توان با یکی از روش‌های بیان شده در زیر بدست آیند (چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۸):

- (۱) آگاهی از اطلاعات زمین‌شناسی زیرسطحی
- (۲) وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای قبل و بعد از stack کردن
- (۳) توموگرافی لرزه‌ای

۳ - مدل‌سازی پیشرو گرانی

شکل هندسی دو بعدی ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی در شکل ۱ نشان داده شده است. محور Z به سمت پائین را مثبت در نظر می‌گیریم که با امتداد محور X مربوط به مدل متقاطع می‌باشد (شکل ۱). بعلاوه Z_1 و Z_2 به ترتیب عمق بالا و پائین ساختار است و i زاویه ساق‌های چین می‌باشد. مبدا $O(0,0)$ به طور عمود بالای محور صفحه مدل ارائه شده قرار دارد.

چندین روش مدل‌سازی پیشرو برای ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی وجود دارد که بطور رایج استفاده می‌شوند (هیلند، ۱۹۶۸؛ راثو و مارتی، ۱۹۷۸)، بطوریکه این روابط بر اساس فرض ثابت بودن تباین چگالی برای ساختارها می‌باشند که بندرت معتبر می‌باشند. بهمین دلیل پژوهشگران زیادی تغییرات تباین چگالی با عمق را بصورت توابع ریاضی مختلف مانند تباین چگالی نمایی (چای و هینز، ۱۹۸۸؛ جیانگ‌های و اسپرول، ۱۹۹۵)، چندجمله‌ای درجه دوم (راثو، ۱۹۹۰) و چندجمله‌ای درجه سوم (چانگ و همکاران، ۲۰۰۱) بیان نموده‌اند که با افزایش عمق چگالی نیز زیاد می‌گردد. تابع چگالی سهموی نه تنها تغییرات تباین چگالی با عمق را توضیح می‌دهد، استنتاج شکل بسته معادلات برای بی‌هنجاری گرانی در حوزه مکان را ممکن می‌سازد (چاکراواری، ۲۰۰۳؛ چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۴). در نبود اطلاعات زمین‌شناسی، امکان ندارد که بطور کامل اثر گرانی ساختارهای زمین‌شناسی (بی‌هنجاری محلی یا باقی‌مانده) را از بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای جدا کنیم. حتی با داشتن اطلاعات دقیق زمین‌شناسی، باز هم اثر بی‌هنجاری منطقه‌ای بطور کامل از بی‌هنجاری گرانی اندازه‌گیری شده ساختار مورد نظر حذف نمی‌شود و اثراتی از بی‌هنجاری منطقه‌ای در داده‌های گرانی مشاهده‌ای باقی می‌ماند. بنابراین در تحلیل بی‌هنجاری‌های گرانی، روش‌هایی که شامل هر دو اثر بیان شده‌اند، ترجیح داده می‌شوند. در این مقاله تباین چگالی سطحی بر اساس gr/cm^3 ، ثابت تابع تباین چگالی سهموی (α) بر اساس $gr/cm^3/km$ ، عمق بالا و پائین ساختارها و نیز فاصله



شکل ۱. شکل هندسی دو بعدی ساختارهای (الف) تاقدیسی و (ب) ناودیسی (چاکراواری و سانداراراجان، ۲۰۰۸)

¹Parabolic Density Contrast

فرمول‌های زیر محاسبه نمود (چاکراواتی و سانداراراجان، ۲۰۰۸):

بی‌هنجاری گرانی $g(x)$ مربوط به ساختار تاقدیس و ناودیس به ترتیب در هر نقطه $P(x,0)$ روی محور x با تباین چگالی متغیر با عمق بصورت سهموی را می‌توان از

$g(\hat{x}) = 2G\Delta\rho_0^3 \left(\frac{k_3}{q_1} - \frac{k_2}{q} \right) \tan^{-1} \left(\frac{x'}{z_1} \right) + \frac{k_1}{q} \tan^{-1} \left(\frac{x'+w}{z_2} \right) - \frac{k_4}{q_1} \tan^{-1} \left(\frac{x'-w}{z_2} \right)$ $+ \sin i \left \frac{t}{q} \ln \frac{r_2 c_1}{r_1 c_2} - \frac{t_1}{q_1} \ln \frac{r_3 c_1}{r_1 c_2} \right + A\hat{x} + B$	۲
$g(\hat{x}) = 2G\Delta\rho_0^3 \left(\frac{\hat{k}_3}{s} - \frac{\hat{k}_1}{f} \right) \tan^{-1} \left(\frac{x'}{z_2} \right) + \frac{\hat{k}_4}{s} \tan^{-1} \left(\frac{x'+w}{z_1} \right) - \frac{\hat{k}_2}{f} \tan^{-1} \left(\frac{x'-w}{z_1} \right)$ $+ \sin i \left \frac{f_2}{s} \ln \frac{\hat{r}_2 c_1}{\hat{r}_3 c_2} - \frac{f_1}{f} \ln \frac{\hat{r}_2 c_1}{\hat{r}_1 c_2} \right + A\hat{x} + B$	۳

$$\hat{k}_2 = \frac{\alpha f_1^2 + f_1 \Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_1 + f_1 \alpha z_1 \cos i}{c_1}$$

$$\hat{k}_3 = \frac{\alpha f_2^2 - f_2 \Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_2 - f_2 \alpha z_2 \cos i}{c_2}$$

$$\hat{k}_4 = \frac{\alpha f_2^2 - f_2 \Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_2 - f_2 \alpha z_1 \cos i}{c_1}$$

می‌باشد. همچنین:

$$r_1^2 = [x'^2 + z_1^2]$$

$$r_2^2 = [(x'+w)^2 + z_2^2]$$

$$r_3^2 = [(x'-w)^2 + z_2^2]$$

$$\hat{r}_1^2 = [(x'-w)^2 + z_1^2]$$

$$\hat{r}_2^2 = [x'^2 + z_2^2]$$

$$r_3'^2 = [(x'+w)^2 + z_1^2]$$

فاصله شعاعی نقطه $P = (\hat{x}, 0)$ با سه گوشه ساختارهای مربوطه می‌باشد (شکل ۱).

۴- بهینه‌سازی بی‌هنجاری‌های گرانی

بهینه‌سازی بی‌هنجاری‌های گرانی ساختارهای تاقدیس و ناودیس به‌طور مفهومی یک پروسه ریاضی انطباق بی‌هنجاری گرانی تئوری با بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای بوسیله روش کمترین مربعات و سپس برآورد سه پارامتر بیان شده Z_1, Z_2 و i از ساختارها بعلاوه دو ضریب بی‌هنجاری منطقه‌ای می‌باشد. فرآیند ریاضی با محاسبه بی‌هنجاری گرانی تئوری با استفاده از معادله ۲ برای ساختار تاقدیسی و معادله ۳ برای ساختار ناودیسی با یک مجموعه از پارامترهای تقریبی حدس زده شده برای هر دو

G ثابت جهانی گرانی، $x' = \hat{x} - D$ و D فاصله نقطه مبدأ از نقطه مرجع، R می‌باشد (شکل ۱). اثر بی‌هنجاری منطقه‌ای در هر نقطه $P = (\hat{x}, 0)$ روی پروفایل با معادله خطی $A\hat{x} + B$ نشان داده می‌شود که A و B ضرائب بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای می‌باشند. در معادلات بالا:

$$t = x' \sin i - z_1 \cos i$$

$$t_1 = x' \sin i + z_1 \cos i$$

$$f_1 = x' \sin i - z_2 \cos i$$

$$f_2 = x' \sin i + z_2 \cos i$$

$$q = \alpha^2 t^2 + 2t\alpha\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0^2$$

$$q_1 = \alpha^2 t^2 - 2t_1\alpha\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0^2$$

$$c_1 = \Delta\rho_0 - \alpha z_1$$

$$c_2 = \Delta\rho_0 - \alpha z_2$$

$$f = \alpha^2 f_1^2 + 2f_1\alpha\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0^2$$

$$s = \alpha^2 f_2^2 + 2f_2\alpha\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0^2$$

$$w = (z_2 - z_1) \cot i$$

9

$$k_1 = \frac{\alpha t^2 + t\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_2 + t\alpha z_2 \cos i}{c_2}$$

$$k_2 = \frac{\alpha t^2 + t\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_1 + t\alpha z_1 \cos i}{c_1}$$

$$k_3 = \frac{\alpha t_1^2 - t_1\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_1 - t_1\alpha z_1 \cos i}{c_1}$$

$$k_4 = \frac{\alpha t_1^2 - t_1\Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_2 - t_1\alpha z_2 \cos i}{c_2}$$

$$\hat{k}_1 = \frac{\alpha f_1^2 + f_1 \Delta\rho_0 \cos i + \Delta\rho_0 z_2 + f_1 \alpha z_2 \cos i}{c_2}$$

شد. سپس مقدار بی‌هنجاری گرانی تئوری که برای نقاطی به فاصله 1km روی پروفیل 40 km بالای مدل محاسبه گردید (شکل ۲ الف و ب). در مرحله بعد، پارامترهای ورودی اولیه $Z_1=0.5$ km، $Z_2=3.0$ km و $i=20.0$ درجه را با همان فاصله نقاط و مقدار گرانی حاصل از مدل پیشرو بیان شده در بالا به الگوریتم نوشته شده اعمال گردید (شکل ۲ الف و ب).

در طی وارون‌سازی، α ، $\Delta\rho$ و D ثابت باقی می‌مانند و سه پارامتر مدل و دو ضریب منطقه‌ای در هر تکرار تغییر می‌کنند تا بهترین تطابق بین داده‌های ورودی و خروجی برنامه حاصل شود. برنامه بعد از ۱۶ تکرار به مقدار کمتر از خطای مجاز در نظر گرفته شده برای تابع غیرمتجانس، که $0.1/0.0000001$ میلی‌گال می‌باشد، رسید. J بطور خیلی شدید در پایان پنجمین تکرار از مقدار ورودی ۸۷۳/۶۳۸ به مقدار ۲/۶۲ کاهش می‌یابد و سپس بتدریج بعد از ۱۶ تکرار به صفر می‌رسد (شکل ۳ الف). در طی تکرار، پارامترهای مدل نیز بهبود می‌یابند (شکل ۳). تغییرات تباین چگالی با عمق در شکل ۴ نشان داده شده است. برای آزمایش پایداری و همگرایی مدل‌های وارون، مدل‌های اولیه مختلف در نظر گرفته شد با بی‌هنجاری گرانی برای ورودی‌های گوناگون مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرند. پارامترهای برآورد شده در نتیجه وارون‌سازی در هر حالت کاملاً یکسان و منطبق بر پارامترهای فرض شده برای مدل پیشرو می‌باشد (جدول ۱). همچنین این برنامه با اضافه کردن پس زمینه بی‌هنجاری منطقه‌ای به بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با مقدار $A=0.0005$ mgal/km و $B=0.5$ mgal در حالت تاقدیسی، اجرا گردید. تغییرات بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با تکرار در شکل ۵ نشان داده شده است. برای اطمینان از کارآیی برنامه در حضور بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای ورودی‌های مختلف به الگوریتم کامپوتری اعمال گردید و مدل‌های وارون حاصل در این حالت نیز کاملاً یکسان و مطابق با جدول ۱ حاصل گردید.

حالت بالا، استنتاج شده از اطلاعات زمین‌شناسی، شروع می‌شود.

اختلاف بین گرانی مشاهده‌ای $g_{obs}(\hat{x}_k)$ و اثرگرانی مدل $g_{mod}(\hat{x}_k)$ را می‌توان بصورت عددی از تابع نامتجانس (عدم تطابق)، J، بدست آورد (چاکراواری و ساندراراجان، ۲۰۰۸).

$$J = \sum_{k=1}^{N_{obs}} [g_{obs}(\hat{x}_k) - g_{mod}(\hat{x}_k)]^2 \quad (4)$$

سیستم معادلات نرمال برای بهبود همه پارامترهای بیان شده با استفاده از الگوریتم مارکواردت (مارکوآردت، ۱۹۶۳) ارائه شده بوسیله چاکراواری و ساندراراجان (۲۰۰۸) حل می‌گردد.

$$\sum_{k=1}^{N_{obs}} \sum_{m=1}^5 \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial a_j} \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial a_m} (1 + \delta\lambda) da_m \quad (5)$$

$$= \sum_{k=1}^{N_{obs}} [g_{obs}(\hat{x}_k) - g_{mod}(\hat{x}_k)] \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial a_j}, \text{for } j=1,2,\dots,5$$

که da_m و $m=1,2,3,4,5$ پیشرفت و بهبود سه پارامتر ساختاری و دو ضریب بی‌هنجاری منطقه‌ای می‌باشند. همچنین:

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{for } m = j \\ 0 & \text{for } m \neq j \end{cases}$$

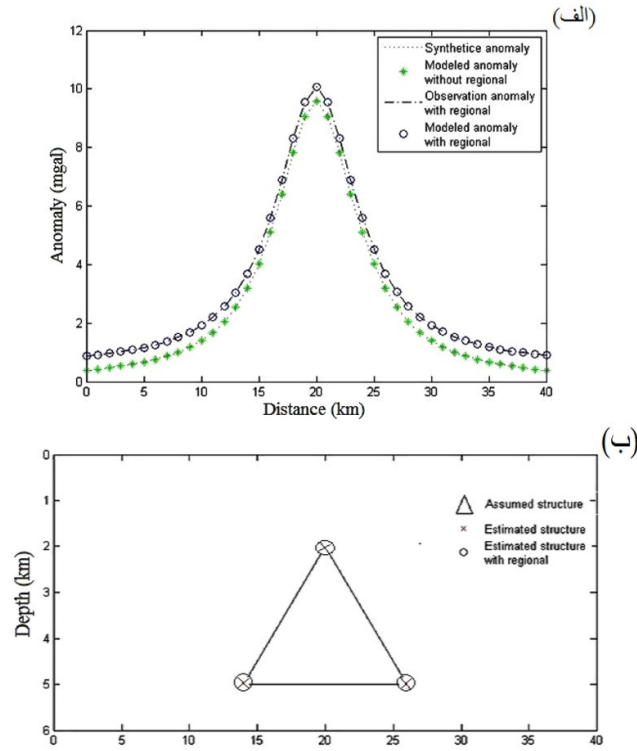
و λ ضریب تعدیل (تضعیف) است. پارامترهای بهبود یافته، da_m برای $m=1,2,3,4,5$ بدست آمده از معادله ۵ از پارامترهای موجود کم و یا به پارامترها اضافه می‌گردد و این فرآیند تکرار می‌شود تا اینکه یا مقدار Z در معادله ۴ از یک خطای مجاز از قبل تعیین شده کمتر گردد، یا ضریب تعدیل از یک مقدار مشخص شده بزرگ‌تر شود و یا عدد تعیین شده برای تعداد تکرار کامل گردد.

۵ - مدل‌سازی مصنوعی برای ساختار تاقدیسی

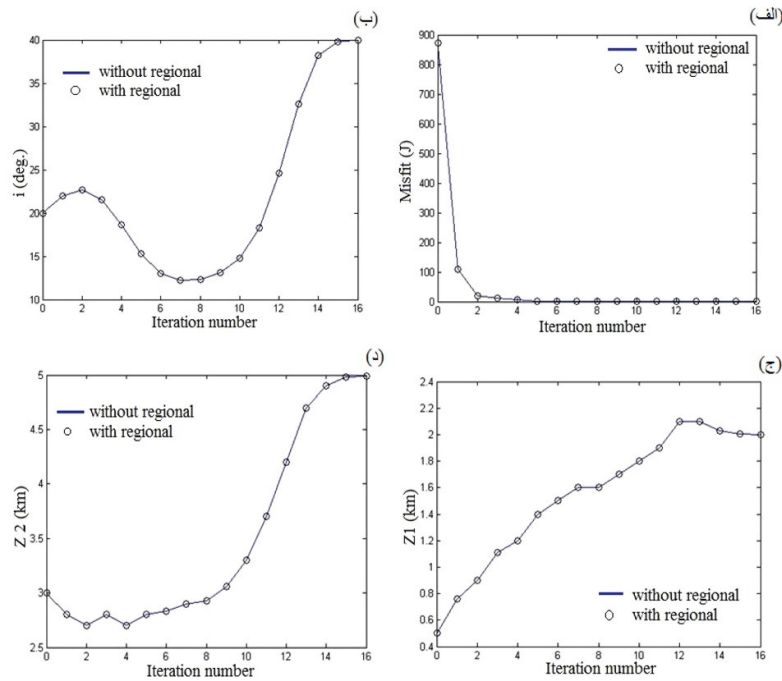
برای حالت تاقدیسی یک مثلث متساوی‌الساقین با فرض $Z_1=2.0$ km، $Z_2=5.0$ km، $i=40.0$ درجه، $\Delta\rho=0.4$ $gr/cm^3/km$ و $\alpha=-0.02$ در نظر گرفته

جدول ۱. تحلیل بی‌هنجاری‌های گرانی برای مدل‌های مختلف تاقدیسی، با و بدون بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای

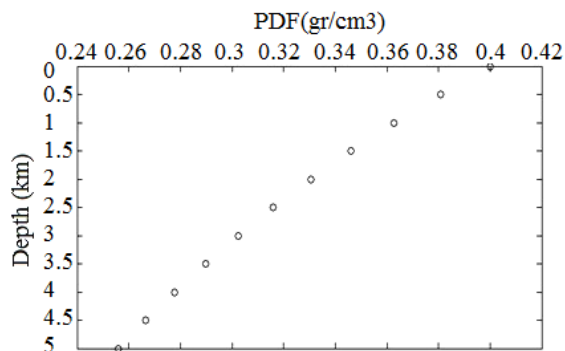
پارامترهای اولیه			پارامترهای نتیجه شده با PDF					misfit	
Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	N.iteration	Initial	Final	
							0.5	3.0	20
0.2	2.5	30	2.0	5.0	40	18	218.7	0.0	
0.1	2.0	10	2.0	5.0	40	17	1733	0.0	



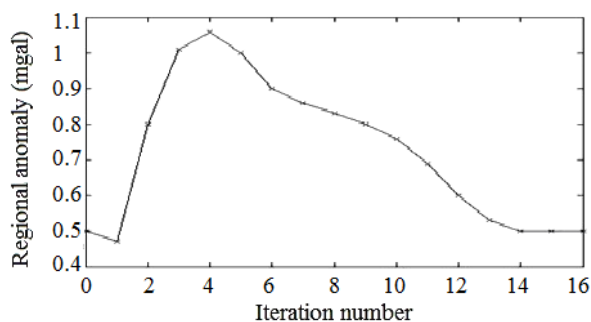
شکل ۲. (الف) بی‌هنجاری گرانی محاسبه‌ای و بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای برای مدل (ب) که در دو حالت، با و بدون بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با استفاده از تابع تباین چگالی سهموی برآورد شده است را نشان می‌دهد و (ب) ساختار تاق‌دیسی فرض شده اولیه با عمق بالا ۲ km، عمق پایین ۵ km و زاویه ساق ۴۰ درجه و ساختار نهایی بدست آمده از یک مدل فرضی با مقادیر ورودی عمق بالا ۰/۵ km، عمق پایین ۳ km و زاویه ساق ۲۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. (الف) تغییرات مقدار تابع عدم تطابق (j) با افزایش تکرار برای مدل فرضی شکل (۲ب) که در پایان تکرار شانزدهم این مقدار صفر گردید؛ (ب) تغییرات زاویه ساق‌های مدل فرضی شکل (۲ب) با افزایش تکرار؛ (ج) بهبود عمق بالا و (د) عمق پایین با افزایش تکرار برای مدل فرضی شکل (۲ب).



شکل ۴. تغییرات تابع چگالی سهموی با عمق



شکل ۵. تغییرات بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با تکرار

در طی تکرار، پارامترهای مدل نیز بهبود می‌یابند (شکل ۷). تغییرات تباین چگالی با عمق نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین این برنامه با اضافه کردن پس زمینه بی‌هنجاری منطقه‌ای به بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با مقدار $A = -0.0008 \text{ mgal/km}$ و $B = -0.8 \text{ mgal}$ در حالت ناقدیسی، اجرا گردید.

برای آزمایش پایداری و همگرایی مدل‌های وارون، مدل‌های اولیه مختلف با و بدون حضور بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای در نظر گرفته شد تا بی‌هنجاری گرانی برای ورودی‌های گوناگون مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرند. پارامترهای برآورد شده در نتیجه وارون‌سازی در هر حالت کاملاً یکسان و منطبق بر پارامترهای فرض شده برای مدل پیشرو می‌باشد (جدول ۲). تغییرات بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با تکرار در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به اعمال ورودی‌های مختلف به کد نوشته شده و یکسان بودن جواب وارون‌سازی با پارامترهای فرض شده اولیه برای مدل مصنوعی در هر دو حالت ناودیسی و تاقدیسی، چه با حضور بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای و چه بدون وجود بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای، می‌توان به قابل اطمینان بودن نتایج حاصل از روش ارائه شده، پی برد.

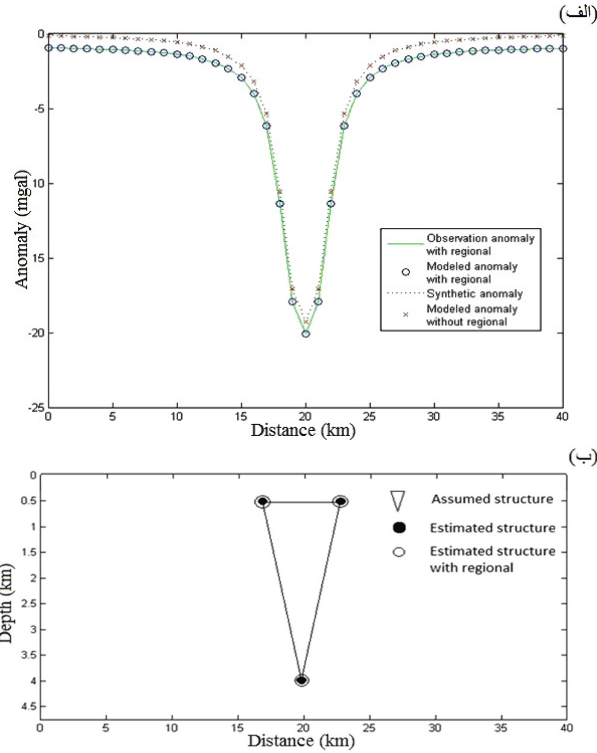
۶ - مدل‌سازی مصنوعی برای ساختار ناودیسی

برای حالت ناودیس، یک مثلث متساوی‌الساقین با فرض $Z_1 = 0.5 \text{ km}$ ، $Z_2 = 4.0 \text{ km}$ ، $i = 60.0$ درجه، $\Delta\rho = -0.5 \text{ gr/cm}^3$ و $\alpha = 0.04 \text{ gr/cm}^3 / \text{km}$ در نظر گرفته شد. مقدار بی‌هنجاری گرانی تئوری که برای نقاطی به فاصله 1 km روی پروفیل 40 km بالای مدل محاسبه گردیده (شکل ۶ الف و ب).

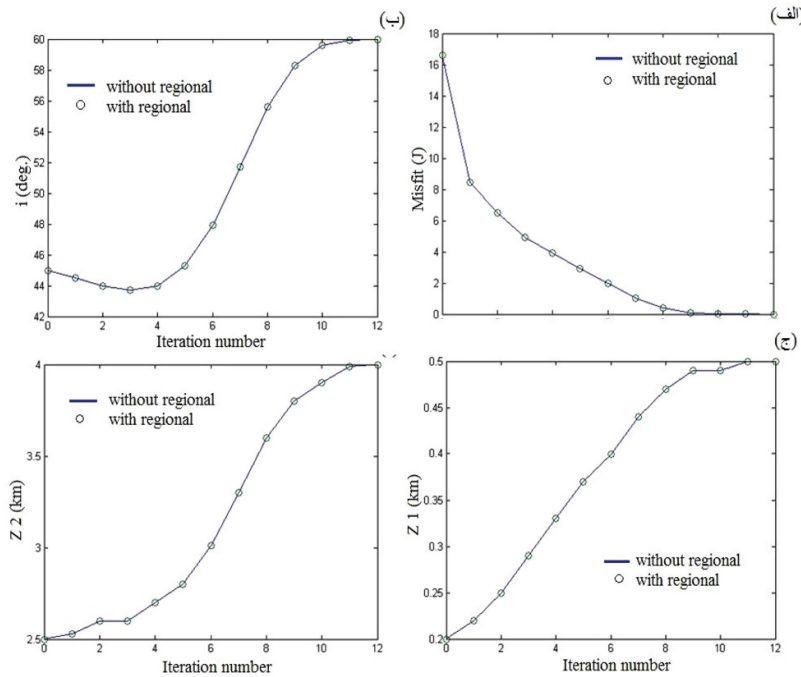
در مرحله بعد، پارامترهای ورودی اولیه $Z_1 = 0.2 \text{ km}$ ، $Z_2 = 2.5 \text{ km}$ و $i = 45$ درجه را با همان فاصله نقاط و مقدار گرانی حاصل از مدل پیشرو بیان شده در بالا به الگوریتم نوشته شده اعمال گردید (شکل ۶ الف و ب).

در طی وارون‌سازی، α ، $\Delta\rho$ و D ثابت باقی می‌مانند و سه پارامتر مدل و دو ضریب منطقه‌ای در هر تکرار تغییر می‌کنند تا بهترین تطابق بین داده‌های ورودی و خروجی برنامه حاصل شود.

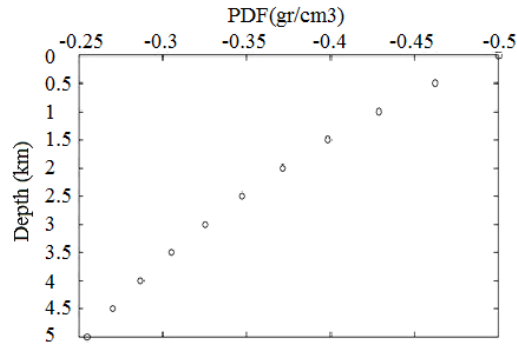
برنامه بعد از ۱۲ تکرار به مقدار کمتر از خطای مجاز در نظر گرفته شده برای تابع غیرمتجانس، که $1/0.000001$ میلی‌گال می‌باشد، رسید. بطور خیلی شدید در پایان ششمین تکرار از مقدار ورودی ۱۶/۶ به مقدار ۱/۹۷ کاهش می‌یابد و سپس بتدریج بعد از ۱۲ تکرار به صفر می‌رسد.



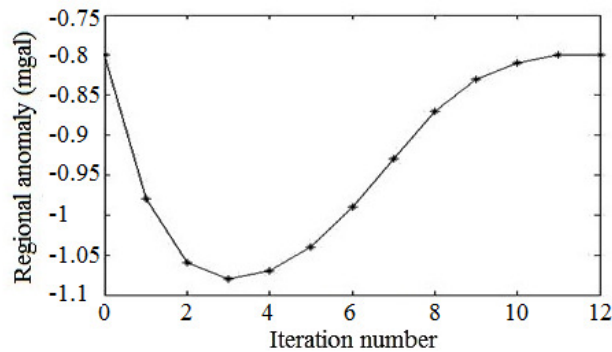
شکل ۶. (الف) بی‌هنجاری گرانی محاسبه‌ای و بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای برای مدل (ب) که در دو حالت با و بدون بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با استفاده از تابع تباین چگالی سهموی برآورد شده است را نشان می‌دهد؛ (ب) ساختار ناودیسسی فرض شده اولیه با عمق بالا ۰/۵ km عمق پایین ۴ km و زاویه ساق ۶۰ درجه و ساختار نهایی بدست آمده از یک مدل فرضی با مقادیر ورودی، عمق بالا ۰/۲ km عمق پایین ۲/۵ km و زاویه ساق ۴۵ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۷. (الف) تغییرات مقدار تابع عدم تطابق (ج) با افزایش تکرار برای مدل فرضی شکل (ب) که در پایان تکرار دوازدهم این مقدار صفر گردید؛ (ب) تغییرات زاویه ساق‌های مدل فرضی شکل (ب) با افزایش تکرار؛ (ج) بهبود عمق بالا و (د) عمق پایین با افزایش تکرار برای مدل فرضی شکل (ب).



شکل ۸. تغییرات تابع چگالی سهموی با عمق برای ناودیس



شکل ۹. تغییرات بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای با تکرار

جدول ۲. تحلیل بی‌هنجاری‌های گرانی برای مدل‌های مختلف ناودیس، با و بدون بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای

پارامترهای اولیه			پارامترهای نتیجه شده با PDF					
Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	N.iteration	misfit	
							Initial	Final
0.2	2.5	45	0.5	4.0	60	12	16.7	0.0
0.1	2.0	35	0.5	4.0	60	14	23.62	0.0
2.0	4.0	15	0.5	4.0	60	16	502.2	0.0

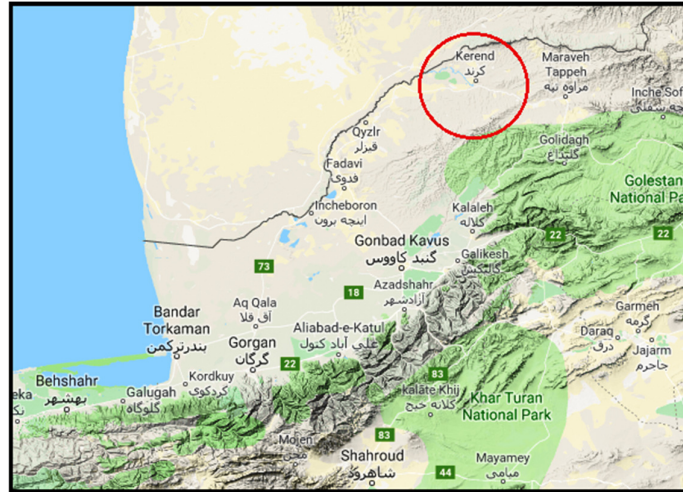
۶۰۰۰ متر می‌رسد و نهشته‌ها ژوراسیک تا الیگوسن بطور هم‌شیب روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. ردیف چینه‌شناسی آن از قدیم به جدید سازندهای کشف‌شده، چمن‌بید، مزدوران، شوریچه، تیرگان، سرچشمه، سنگان، آتامیر، آب دراز، آب‌تلخ، نیزار، کلات، نفته، پسته‌لیق، چهل‌کمان و خانگیان را در بر دارد و قدمتی از ژوراسیک زیرین تا نئوژن دارد. واحدهای ژوراسیک بالایی ناحیه (سازند مزدوران) مهمترین منشاء هیدروکربورهای گازی این ناحیه می‌باشند. در این منطقه سنگ مخزن از توالی‌های ضخیم لایه‌های آهکی و دولومیت‌های متخلخل سازندهای مزدوران و تیرگان تشکیل شده است. شیل‌های ضخیم لایه و مارن حاوی مواد آلی فراوان مربوط به سازندهای کشف‌شده و چمن‌بید سنگ مادر منطقه می‌باشند و

۷- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه کوند

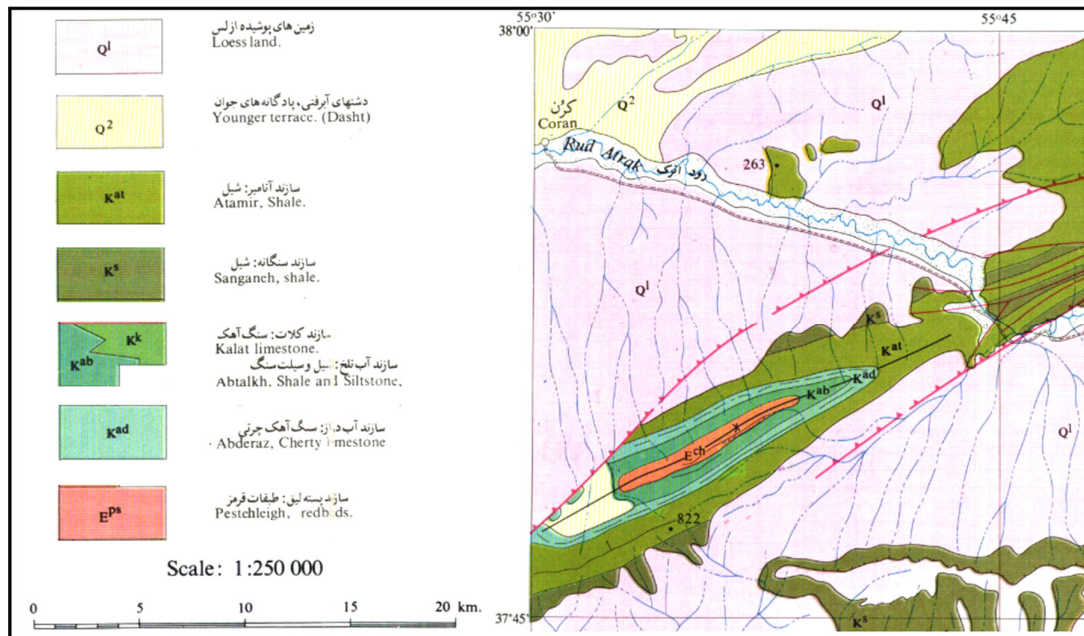
منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۲ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴ دقیقه در شمال شرقی استان گلستان واقع شده است (شکل ۱۰). در این منطقه با وسعت حدود ۲۲۵۰ کیلومتر مربع به منظور اکتشاف ساختارهای تاقدیسی که احتمال وجود مواد هیدروکربن در آن‌ها بسیار بالاست، عملیات گرانی‌سنجی در طول ۴۰ پروفیل به فاصله ۲ کیلومتر و فاصله بین ایستگاهی حدود ۱ کیلومتر با دستگاه لاکوست - رومبرگ مدل G-440 با دقت ۰/۰۱ میلی‌گال انجام پذیرفت و در ۱۰۵۳ نقطه داده گرانی قرائت گردید. این ناحیه در پهنه رسوبی کپه‌داغ قرار دارد. ستبرای نهشته‌های ممتد دریایی در این حوضه به

گرانی‌سنجی در ناحیه کرند برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ کوه کورخود را نشان می‌دهد (افشار و همکاران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

آهک‌های رس‌دار و لایه‌های مارن و شیل سازندهای سرچشمه و سنگان و نیز لایه‌های رس‌دار بالایی سازند تیرگان سنگ‌پوش را تشکیل می‌دهند (آقناباتی، ۱۳۸۳). شکل ۱۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه تحت مطالعه



شکل ۱۰. موقعیت ناحیه کرند



شکل ۱۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه اکتشافی، برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ کوه کورخود (افشار و همکاران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

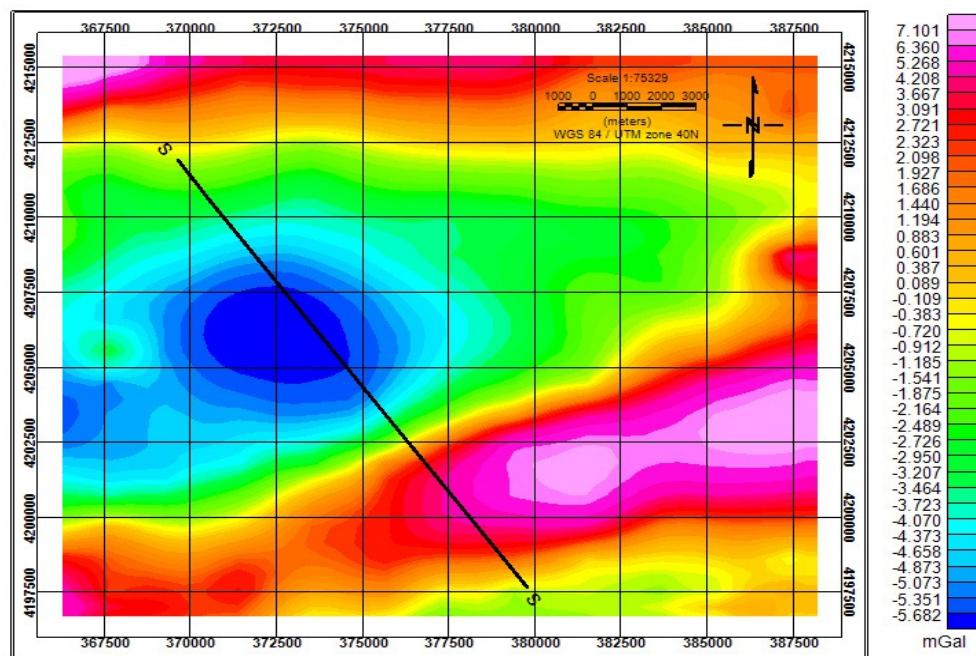
۸- تحلیل داده‌های گرانی ناحیه کرند در منطقه مورد مطالعه دو پروفیل جهت تحلیل نتلتن زده شد. بی‌هنجاری بوگه با چگالی‌های مختلف برای پروفیل‌ها محاسبه و رسم گردید که در نتیجه این بررسی‌ها و نیز مطالعات زمین‌شناسی منطقه، چگالی میانگین سطحی

۱۲ gr/cm^3 برای حوزه رسوبی برآورد گردید. شکل ۱۲ نقشه بی‌هنجاری‌های گرانی باقی‌مانده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر بی‌هنجاری گرانی مربوط به ساختارهای تاقدیسی، مثبت و مقادیر بی‌هنجاری گرانی مربوط به ساختارهای ناودیسی، منفی می‌باشند. برای

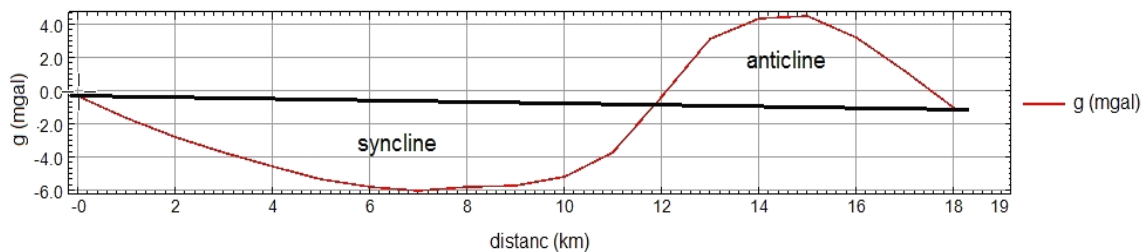
۸- تحلیل داده‌های گرانی ناحیه کرند در منطقه مورد مطالعه دو پروفیل جهت تحلیل نتلتن زده شد. بی‌هنجاری بوگه با چگالی‌های مختلف برای پروفیل‌ها محاسبه و رسم گردید که در نتیجه این بررسی‌ها و نیز مطالعات زمین‌شناسی منطقه، چگالی میانگین سطحی

ساختار تاقدیسی، در نه نقطه در طول پروفیل S داده گرانی با فاصله ۰/۷ کیلومتری برداشت گردید (شکل الف ۱۴). برای این حالت ورودی‌های اولیه $z_1=3.5$ km، $z_2=5$ km و $i=30^\circ$ به کد نوشته شده اعمال نمودیم. مقدار تابع خطا (تابع نامتجانس) از مقدار اولیه ۴۷۳/۵ بعد از پایان تکرار پنجم به مقدار ۳/۰۹ کاهش می‌یابد و سپس طی ۲۳ تکرار به مقدار ۰/۸ می‌رسد که در این تکرار با افزایش λ به یک مقدار زیاد غیر معمول که در برنامه تعریف شده است، اجرای برنامه پایان می‌پذیرد که در نتیجه خروجی برنامه $z_1=3.24$ km، $z_2=5.02$ km و $i=24.4^\circ$ می‌باشد (شکل ۱۴ ب). مقدار گرانی محاسبه شده در شکل ۱۴ الف و نحوه تغییر مقادیر پارامترها با تکرار در شکل ۱۵ آورده شده است.

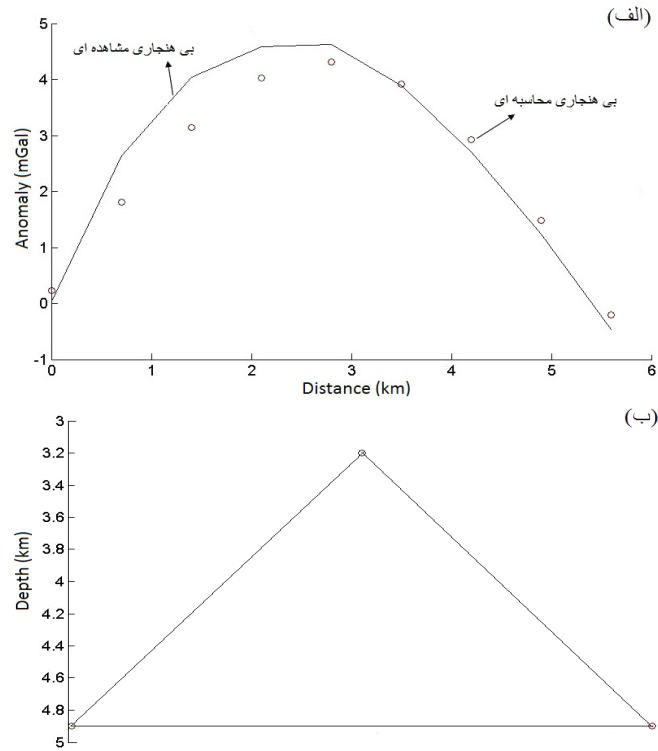
مدل‌سازی دوبعدی ساختارهای چین‌خورده در منطقه مطالعاتی، داده‌برداری گرانی در راستای پروفیل S با امتداد NW-SE، نشان داده شده در شکل ۱۲، که از روی بی-هنجاری‌های مثبت و منفی مربوط به ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی عبور کرده است، انجام می‌شود. شکل ۱۳ تغییرات میدان گرانی در راستای پروفیل S را نشان می‌دهد. از آنجا که عمق پائین ساختارها در بررسی‌های انجام شده بیش‌تر از جنس آهک و دولومیت می‌باشد (سازند مزدوران)، چگالی نهشته‌ها در عمق پائین بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعاتی که قبلاً بر روی سازند مزدوران انجام گرفته، $2/8 \text{ gr/cm}^3$ در نظر گرفته شده است. با این وجود تباین چگالی سطحی ($\Delta\rho_0$) gr/cm^3 ۱/۱ و ثابت α بر اساس چینه‌شناسی منطقه برابر برای $0/15 \text{ gr/cm}^3 / \text{km}$ در نظر گرفته شد.



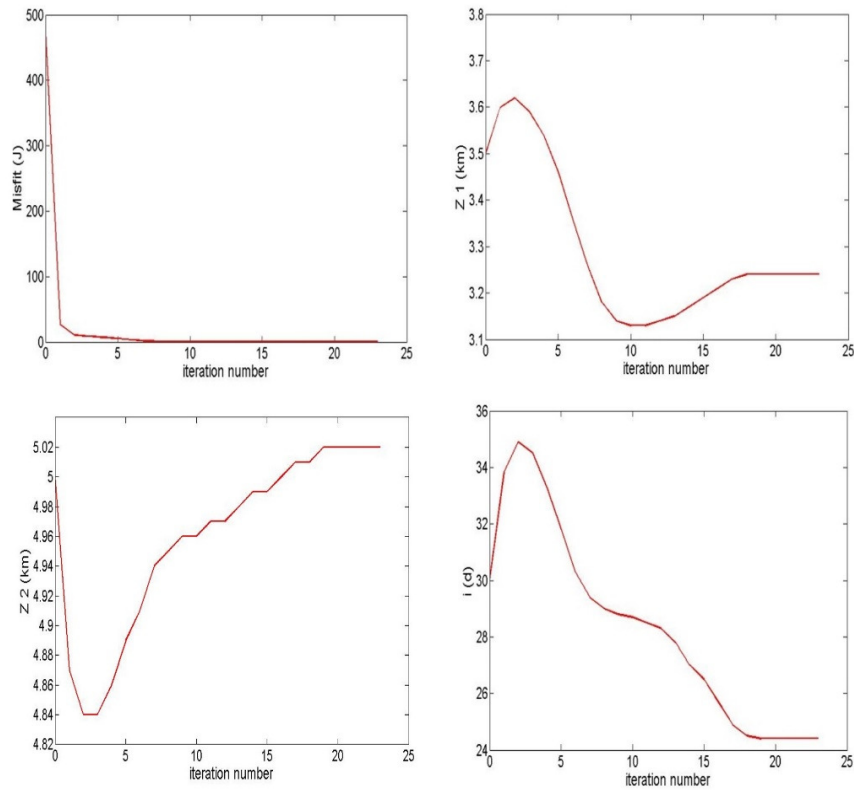
شکل ۱۲. نقشه بی‌هنجاری گرانی باقی مانده ناحیه مورد مطالعه



شکل ۱۳. تغییرات بی‌هنجاری گرانی در طول پروفیل S



شکل ۱۴. الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در طول پروفیل S برای بی‌هنجاری مثبت؛ ب) ابعاد ساختار ناقیدیسی بدست آمده.



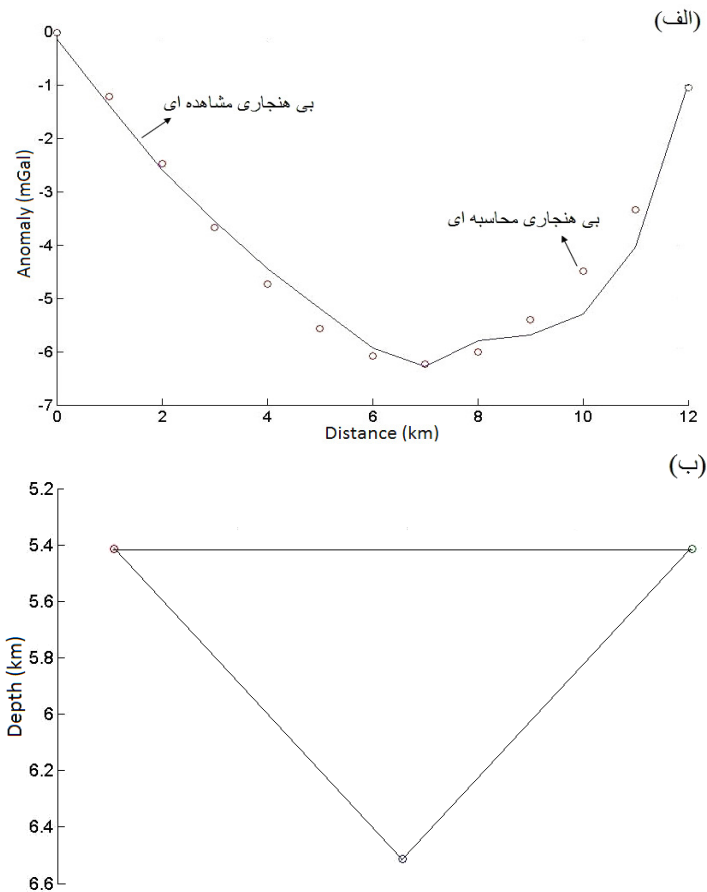
شکل ۱۵. بهبود پارامترهای تابع خطا (z)، عمق بالا (Z_1)، عمق پایین (Z_2) و زاویه ساق‌ها (i) با افزایش تکرار

برای بررسی ثابت بودن و قابل اطمینان بودن نتایج، مدل‌های مختلفی را به برنامه اعمال کردیم که نتایج حاصل در جدول ۳ آورده شده است که نشان از قابل اطمینان بودن نتایج وارون‌سازی می‌باشد.

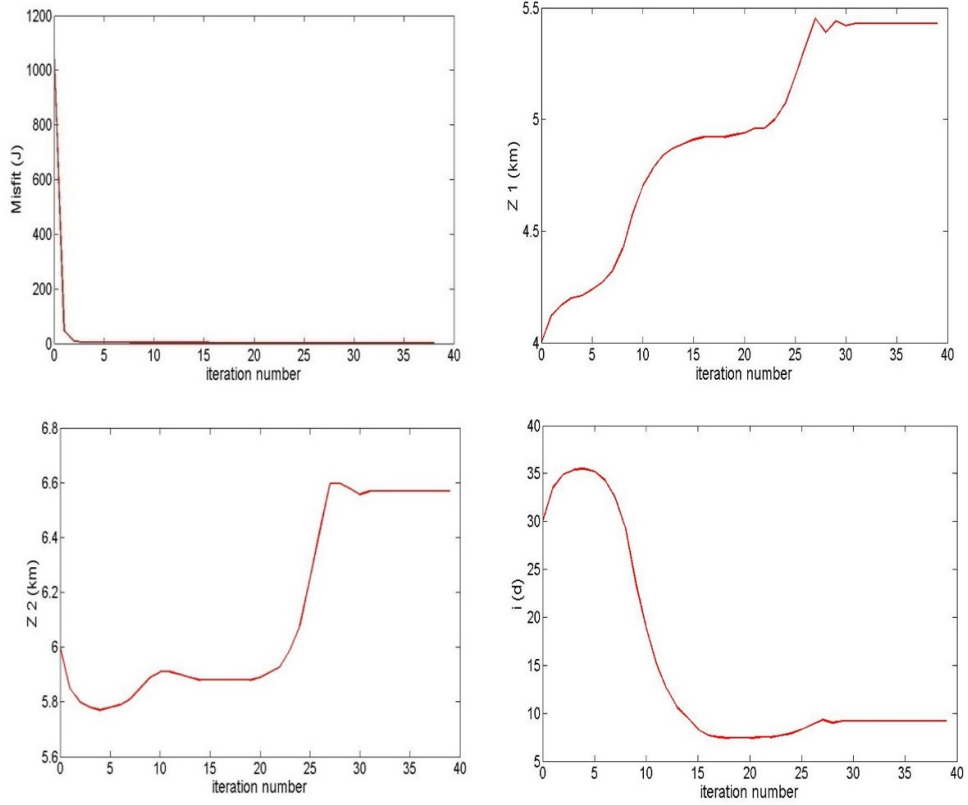
برای داشتن تصویری سه‌بعدی از بی‌هنجاری‌های گرانی منطقه مورد مطالعه، مطابق شکل ۱۸ دوازده پروفیل برداشت داده موازی بر روی بی‌هنجاری‌های گرانی زده شد که ده پروفیل اول هر دو بی‌هنجاری مثبت و منفی را در بر می‌گیرد. فاصله بین پروفیل‌ها حدود هشتصد متر و فاصله نمونه‌برداری داده گرانی نیز هشتصد متر می‌باشد. بی‌هنجاری گرانی مربوط به این پروفیل‌ها با روش وارون‌سازی مارکوارت شرح داده شده، مورد تجزیه تحلیل قرار گرفتند و حدود ساختار مدل‌سازی شده برآورد گردید. پارامترهای محاسبه شده برای ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی مربوط به هر پروفیل در جدول ۴ آورده شده است.

برای ساختار ناودیسی، در سیزده نقطه در طول پروفیل داده گرانی با فاصله ۱ کیلومتری برداشت گردید (شکل ۱۶ الف). برای این حالت ورودی‌های اولیه $z_1=4.0$ km، $z_2=6.0$ km و $i=30^\circ$ و تباین چگالی سطحی $(\Delta\rho_0)$ برابر $1/1$ gr/cm^3 - و ثابت α بر اساس چینه‌شناسی منطقه برابر 0.15 $gr/cm^3/km$ ، به کد برنامه معرفی نمودیم.

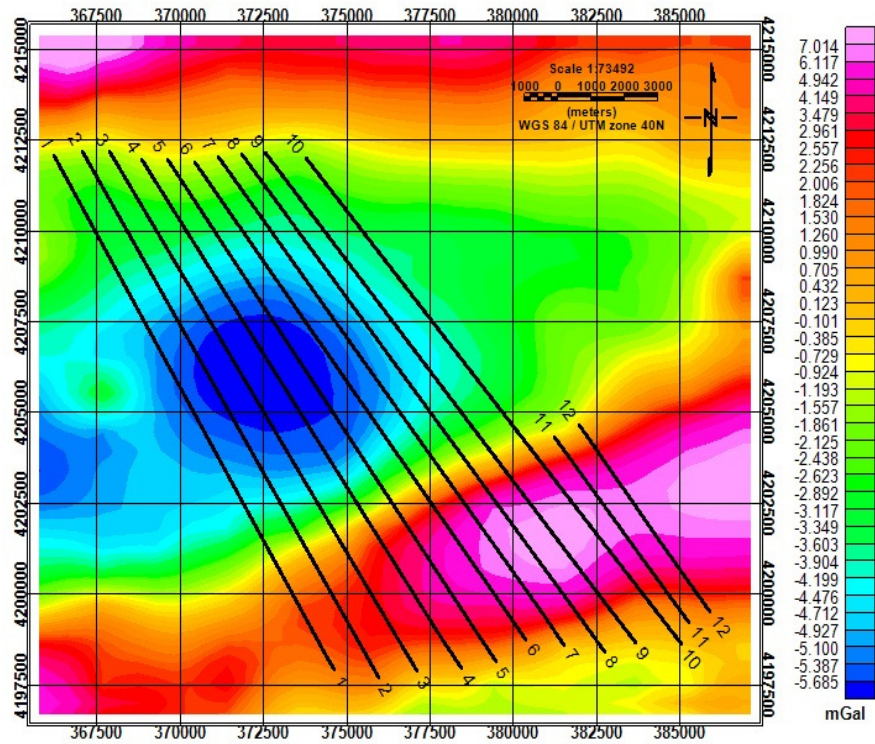
مقدار تابع خطا (تابع نامتجانس) از مقدار اولیه $1068/6$ بعد از پایان تکرار دوازدهم به مقدار $3/01$ کاهش می‌یابد و سپس طی ۳۹ تکرار به مقدار $2/7$ می‌رسد که در این تکرار با افزایش λ به یک مقدار زیاد غیر معمول که در برنامه تعریف شده است، اجرای برنامه پایان می‌پذیرد که در نتیجه خروجی برنامه $z_1=5.4$ km، $z_2=6.6$ km و $i=9.2^\circ$ می‌باشد (شکل ۱۶ ب). مقدار گرانی محاسبه شده در شکل ۱۶ الف و نحوه تغییر مقادیر پارامترها با تکرار در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۶. الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در طول پروفیل S برای بی‌هنجاری منفی؛ ب) ابعاد ساختار ناودیسی بدست آمده



شکل ۱۷. بهبود پارامترهای تابع خطا (z)، عمق بالا (z1)، عمق پایین (z2) و زاویه ساق‌ها (i) با افزایش تکرار



شکل ۱۸. موقعیت و جهت پروفیل‌های برداشت گرانی بر روی بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی منطقه کردند جهت مدل‌سازی سه بعدی ساختارها

از تعیین عمق ساختار تاقدیسی با استفاده از عملیات لرزه‌نگاری در منطقه کردند را نشان می‌دهد. عمق‌های برآورد شده از هر دو روش گرانی‌سنجی و لرزه تطابق بسیار نزدیکی با هم دارند.

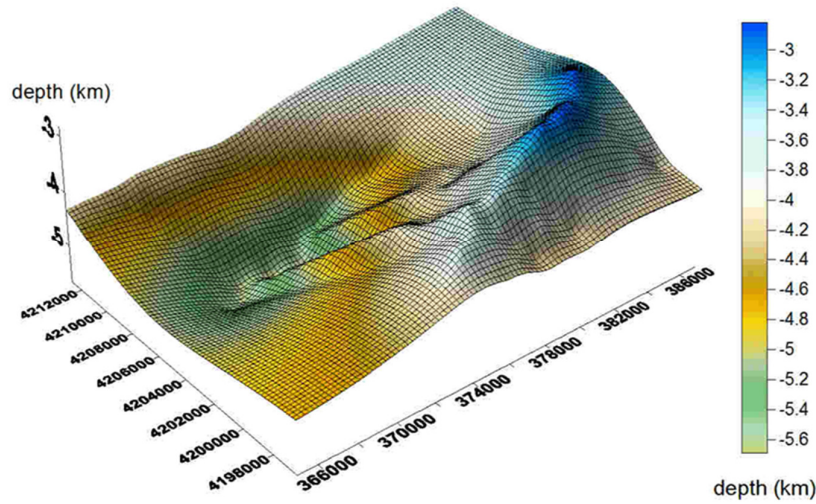
از روی ساختارهای دوبعدی بدست آمده برای حدود ۳۴۰ نقطه، مختصات طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت استخراج و بوسیله نرم‌افزار سورفر شکل سه‌بعدی ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل ۱۹). شکل ۲۰ نتایج حاصل

جدول ۳. نتیجه تحلیل بی‌هنجاری گرانی پروفیل S؛ SA معرف مدل‌های تاقدیسی و SS معرف مدل‌های ناودیسی می‌باشد.

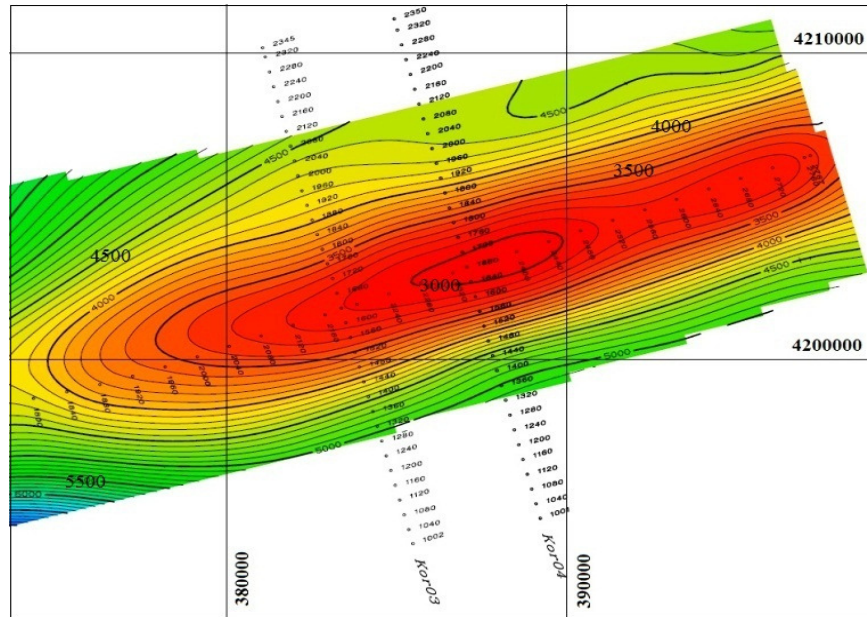
ژ	پارامترهای اولیه			پارامترهای نتیجه شده با PDF					
	Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	Z ₁ (km)	Z ₂ (km)	I (deg.)	N.iteration	misfit	
								Initial	Final
SA	۳/۵	۵	۳۰	۳/۲۴	۵/۰۲	۲۴/۴	۲۳	۴۷۳/۵	۰/۸
SA	۳/۳	۵/۲	۲۶	۳/۲۴	۵/۰۳	۲۴/۴	۲۹	۶۴۸/۳	۰/۷
SA	۳/۷	۴/۸	۳۳	۳/۲۴	۵/۰۲	۲۴/۴	۲۵	۹۳۵/۷	۰/۷۵
SS	۴	۶	۳۰	۵/۴	۶/۶۲	۹/۲	۳۹	۱۰۶۸/۶	۲/۷
SS	۴/۲	۶/۳	۳۰	۵/۴	۶/۶۳	۹/۲	۳۴	۹۶۲	۲/۶
SS	۳/۷	۶	۳۵	۵/۴	۶/۶۱	۹/۲	۴۱	۷۱۴/۵	۲/۳

جدول ۴. پارامترهای محاسبه شده در نتیجه تحلیل دو بعدی داده‌های گرانی بدست آمده در راستای ۱۲ پروفیل در منطقه کردند

پروفیل (تاقدیس)	عمق بالا Z ₁ (km)	عمق پایین Z ₂ (km)	زاویه یال i°	طول ساختار (km)
۱	۳/۸	۵/۱۶	۳۰/۴	۵
۲	۳/۷۲	۵/۲۴	۳۵/۳	۴/۸
۳	۳/۵	۵/۲	۳۵/۵	۵/۵
۴	۳/۲۴	۵/۰۴	۳۹/۷	۵
۵	۳/۲	۴/۷	۲۸	۶
۶	۳/۱۶	۴/۳۶	۲۱	۶/۵
۷	۳	۴/۲۵	۲۱/۵	۶/۶
۸	۲/۹	۴/۲	۲۱/۷	۶/۸
۹	۳	۴/۲	۱۹/۴	۷
۱۰	۳/۲	۴/۱۴	۱۶/۴	۶/۵
۱۱	۳/۲۴	۴/۱	۱۵/۱	۶/۵
۱۲	۳/۱	۴/۰۷	۱۷	۶/۵
پروفیل ناودیس	عمق بالا Z ₁ (km)	عمق پایین Z ₂ (km)	زاویه یال i°	طول ساختار (km)
۱	۵/۲	۶/۲۸	۹/۸	۱۲/۵
۲	۵/۳۸	۶/۴۴	۹/۳	۱۳
۳	۵/۴۱	۶/۵	۹/۷	۱۲/۸
۴	۵/۴	۶/۶	۱۱/۶	۱۱/۷
۵	۵/۳۹	۶/۵۶	۱۲/۲	۱۰/۸
۶	۵/۲۷	۶/۳۲	۱۱/۹	۱۰
۷	۵/۱۸	۶/۲	۱۱/۸	۹/۸
۸	۴/۹	۵/۸	۱۰/۷	۹/۵
۹	۴/۷	۵/۵	۱۰/۳	۸/۸
۱۰	۴/۵	۵/۲	۱۰/۶	۷/۵



شکل ۱۹. نمای سه‌بعدی از ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی مدل‌سازی شده با استفاده از بی‌هنجاری‌های گرانی منطقه کردند



شکل ۲۰. نقشه پهنه‌بندی عمق ساختار تاقدیسی در ناحیه مورد نظر، حاصل از مطالعات لرزه نگاری

پوشاننده خود است، باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های گرانی مثبت و منفی می‌گردد. روش ارائه شده برای مدل‌های مصنوعی تاقدیسی و ناودیسی برای هر دو حالت که اثر میدان گرانی منطقه‌ای در داده‌های میدان گرانی باقی‌مانده وجود داشته باشد یا وجود نداشته باشد، مورد استفاده قرار گرفت که نتایج بسیار قابل قبولی حاصل شده است. بر همین اساس روش معرفی شده برای تعیین عمق و شکل ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی ناحیه بکار گرفته شد. مدل سه‌بعدی ساختارهای تاقدیسی و ناودیس حاصل

نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی از وارون‌سازی بر اساس روش بهینه‌سازی مارکوارت ارائه شده است که ساختارهای چین‌خورده مدفون در زیر نهشته‌ها را با استفاده از داده‌های میدان گرانی، با دقت بالایی مدل‌سازی می‌نماید. در واقع با تعیین شکل و عمق ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی مجاور هم، می‌توان عمق نهشته‌ها و شکل سنگ بستر منطقه تحت مطالعه را تعیین نمود. چراکه تغییرات عمقی در سنگ بستر که دارای تباین چگالی بالایی با نهشته‌ها

منابع

- آقناباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- افشار، الف، سهیلی، م، والی، ن، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کوه کورخود، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Alessandrello, E., Bichara, M. and Lakshmanan, J (1983) Automatic three layer, three-dimensional deconvolution of the Pays De Bray anticline. *Geophysical Prospecting*, 31: 608–626.
- Chai, Y. and Hinze, W. J (1988) Gravity inversion of an interface above which the density contrast varies exponentially with depth. *Geophysics*, 53: 837–845.
- Chakravarthi, V (2003) US patent, 6: 615, 139.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N (2004) Ridge regression algorithm for gravity inversion of fault structures with variable density. *Geophysics*, 69: 1394–1404.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N (2005) Gravity modeling of 2½-D sedimentary basins—a case of variable density contrast. *Computers & Geosciences*, 31: 820–827.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N (2007) Marquardt optimization of gravity anomalies of anticlinal and synclinal structures with prescribed depth dependent density. *Geophysical Prospecting*, 55: 571–587.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N (2008) TODGINV—A code for optimization of gravity anomalies due to anticlinal and synclinal structures with parabolic density contrast. *Computers & Geosciences*, 34: 955–966
- Eshaghzadeh, A. and Kalantary, R. A (2017) Anticlinal Structure Modeling with Feed Forward Neural Networks for Residual Gravity Anomaly Profil, 8th congress of the Balkan Geophysical Society, DOI: 10.3997/2214-4609.201414210, 2015.
- Eshaghzadeh, A., Dehghanpour, A. and Kalantari, R. A (2019) Marquardt inverse modeling of the residual gravity anomalies due to simple geometric structures: A cast study of Chromite deposit. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 49: 153-180.
- Eshaghzadeh, A., Sahebari S. S. and Kalantari, R. A (2020) Anticlinal structure modeling using Feed-forward neural network (FNN) inversion for 2D gravity field data. Accepted in journal of the earth and space physics.
- Eshaghzadeh, A., Sahebari S. S. and Kalantari, R. A (2020) Determination of sheet-like geological structures parameters using Marquardt inversion of the magnetic data. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 49: 450-457.
- Heiland, C. A (1968) *Geophysical Exploration*, 2nd ed. Hafner Publishing Co., New York, 1013pp.
- Jianghai, X. and Sprowl, D. R (1995) Moho depths in Kansas from gravity inversion assuming

از وارون‌سازی مارکوارت که در واقع شکل سنگ بستر منطقه مورد بررسی می‌باشد، عمق بالای تاقدیس را در حدود ۲۸۰۰ متر، عمق پایین تاقدیس یا بالای ناودیس که تقریباً مطابق با داده گرانی صفر می‌باشد را در حدود ۴۲۰۰ متر و عمق پایین ناودیس را در حدود ۵۶۰۰ متر تخمین زده است. تحلیل داده‌های لرزه‌ای عمق بالای تاقدیس را در حدود ۳۰۰۰ متر برآورد کرده است. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل داده‌های گرانی که در جدول ۴ آورده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که عمق ساختار تاقدیسی از موقعیت کمترین عمق محاسبه شده (تخمین زده شده از تغییرات میدان گرانی در راستای پروفیل شماره ۸) به سمت غرب و شرق افزایش می‌یابد، ولی شیب محور تاقدیس به سمت غرب کمتر از شیب محور تاقدیس به سمت شرق می‌باشد. همچنین سستی برای رسوبات روی ساختار ناودیسی از غرب به شرق کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج حاصل از روش مدل‌سازی وارون مارکوارت با نتایج حاصل از روش لرزه‌ای، تطابق خوبی بین عمق‌های محاسبه شده نشان می‌دهد که کارایی و عملکرد خوب و درست کد نوشته شده بر اساس روش وارون‌سازی ارائه شده را اثبات می‌نماید. روش وارون‌سازی مارکوارت، عمق و حدود ساختارهای تاقدیسی و ناودیسی را با دقت بالایی برآورد می‌کند که با تلفیق نتایج حاصل از این روش و با نتایج حاصل از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی، می‌تواند در تفسیر بهتر منطقه مورد مطالعه موثر باشد. در این تحقیق به دلیل عدم وجود چاه‌های اکتشافی نزدیک به منطقه مورد مطالعه، مقدار تباین چگالی میانگین سطحی و نیز عدد ثابت α در فرمول تباین چگالی سهموی، بر اساس چگالی حاصل از روش نلتون و مطالعات زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است که در صورت وجود اطلاعات درون چاهی، دقت پردازش و تفسیر کیفی و کمی داده‌های گرانی افزایش یافته و نتایجی با درجه اطمینان بیشتر حاصل می‌گردد.

سیاسگزاری

نظرات سازنده داوران محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی باعث بهتر شدن این نوشتار گردید که از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

- exponential density contrast. *Computers & Geosciences*, 21: 237–244.
- Lyons, P. L (1956) *Geophysical Case Histories*, Society of Exploration Geophysicists, 237–518.
- Marquardt, D. W (1963) An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431–441.
- Rao, D. B (1990) Analysis of gravity anomalies of sedimentary basins by an asymmetrical trapezoidal model with quadratic density function. *Geophysics*, 55: 226–231.
- Rao, B. S. R. and Murty, I. V. R (1978) *Gravity and Magnetic Methods of Prospecting*. Arnold-Heinemann Publishers, New Delhi, India, 390pp.
- Jianghai, X. and Sprowl, D. R (1995) Moho depths in Kansas from gravity inversion assuming exponential density contrast. *Computers & Geosciences*, 21: 237–244.
- Zhang, J., Zhong, B., Zhou, X. and Dai, Y (2001) Gravity anomalies of 2-D bodies with variable density contrast. *Geophysics*, 66: 809–813.

Marquardt inverse modeling of gravity anomalies due to anticlinal and synclinal structures based on parabolic density contrast. (A case study: Kerend region)

A. Eshaghzadeh^{1*} and S. Seyedi Sahebari²

1- Ph. D. student. Dept., of Geology, Faculty of sciences, University of Isfahan, Isfahan

2- Dept., of Civil Engineering, Nabi Akram Higher education Institute, Tabriz

* eshagh@ut.ac.ir

Received: 2020/11/20 Accepted: 2021/1/20

Abstract

In this paper, a method based on the 2D Marquardt inverse modeling of anticlinal and synclinal structures using the gravity field data is introduced and the density contrast of the difference depths of the earth is computed based on a parabolic density function (PDF). The normal and inverted isosceles triangular models are generally used to describe the geometries of these structures in analyzing gravity anomalies. In the absence of known geology, it may not be possible to isolate completely the gravity signature due to a geological structure from the regional gravity background. In this paper a computer program solves three different parameters of the structure, z_1 , z_2 and i , in addition to estimating two coefficients of regional gravity anomaly. The modeling process begins with computing the theoretical gravity anomaly of an anticline or syncline prototype, defined by approximate shape parameters in each case that can be attained from known geology. The program reduces the error between the observed gravity anomaly and the estimated gravity anomaly by improving the initial parameters of the model during repetition until the misfit function falls below a predefined allowable error or the damping factor acquires a large value or the specified number of iterations is completed. The efficiency of the algorithm is illustrated with a set of synthetic gravity anomalies over an anticlinal and a synclinal structure both with and without regional background, further, the code is exemplified with the gravity data from Kerend region, Iran. The target of gravity survey studies is determination the limits and depth values of anticlinal structures as a probable hydrocarbon traps. The results show the top depth of the anticlinal about 2800 m, the bottom depth of the anticlinal about 4200 m and the bottom depth of the synclinal about 5600 m.

Keywords: Anticlinal and Synclinal structures, Gravity anomalies, Kerend, Marquardt, Parabolic density contrast.