



## مدلسازی وارون غیر خطی داده های گرانی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری برای تخمین عمق حوضه رسوبی

مونا احمدی<sup>۱</sup>؛ علی نجاتی<sup>۲\*</sup>؛ افشین اکبری دهخوارقانی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکترای مهندسی معدن؛ گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی
- ۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳- استاد؛ گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [nejati@shahroodut.ac.ir](mailto:nejati@shahroodut.ac.ir)

### چکیده

مدلسازی وارون یکی از جالبترین ابزارها به منظور بدست آوردن تصاویر دوبعدی و سه-بعدی از ساختارهای زمین شناسی است که رابطه بین داده ها و پارامترهای مدل می تواند خطی یا غیرخطی باشد. در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری (GWO) برای مدلسازی وارون غیرخطی دو بعدی داده های گرانی سنجی جهت ارزیابی و تخمین عمق حوضه-رسوبی استفاده شده است. گرگ خاکستری، یک الگوریتم هوش مصنوعی مبتنی بر تکامل است که بر اساس رفتار شکار و صید گروهی گرگ ها الهام گرفته شده است. در این روش، ابتدا داده های گرانی یک پروفیل سنگ بستر دوبعدی با استفاده از روش های جمع آوری داده ها و تجهیزات مخصوصی اندازه گیری می شود. سپس با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، پارامترهای مختلف مدل سنگ بستر از جمله عمق، شکل و ضرایب دیگر مدل، تخمین زده می شوند. در این فرآیند مدلسازی یک سنگ بستر عموماً به وسیله یک سری از بلوک های راست گوشه ی کنار هم چیده شده مدل شده و سپس ضخامت آنها محاسبه می شود. به منظور نشان دادن کارایی این روش ابتدا مدلسازی وارون برای داده های مصنوعی بدون نوفه و حاوی نوفه صورت گرفت. عمق و گرانی محاسبه شده مدل مصنوعی به دلیل محدوده جستجوی تعیین شده برای پارامترهای مدل، تفاوت زیادی با مقادیر فرضی ندارند و همیشه در محدوده قرار می گیرند. همچنین از روش مذکور برای مدلسازی وارون روی قسمتی از داده های گرانی سنجی حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران انجام شد که نتایج بدست آمده با دیگر مطالعات و زمین شناسی منطقه همخوانی دارد. حداکثر عمق به دست آمده این حوضه رسوبی ۲۷۲۰ متر است و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین، گویای عملکرد مناسب آن می باشد.

### واژگان کلیدی

داده گرانی  
مدلسازی وارون غیرخطی  
الگوریتم گرگ خاکستری  
حوضه رسوبی  
عمق



## ۱- مقدمه

حوضه‌های رسوبی به عنوان یکی از مکان‌های مستعد وجود منابع هیدروکربنی همیشه مورد توجه بوده‌اند. برآورد عمق حوضه‌های رسوبی یکی از هدف‌های مهم در ژئوفیزیک است که کاربردهای متعددی دارد، از جمله:

- اکتشافات نفت و گاز: تخمین عمق حوضه‌های رسوبی می‌تواند به شرکت‌های نفتی کمک کند تا مناطق حاوی روزه‌های نفت و گاز را شناسایی و استخراج بهینه را تضمین کنند.

- مطالعات محیط زیست: تخمین عمق حوضه‌های رسوبی به بررسی توزیع منابع آبی، مخازن آب زیرزمینی و مدیریت منابع آب کمک می‌کند.

- مهندسی ژئوتکنیک: شناخت عمق حوضه‌های رسوبی در مهندسی ژئوتکنیک برای ساخت‌وساز و تونل‌کاری اهمیت دارد.

- برنامه‌ریزی کشاورزی: تخمین عمق حوضه‌های رسوبی در کشاورزی برای آبیاری مناسب و بهینه مناطق کشاورزی مفید است. به‌طور کلی، تخمین عمق حوضه‌های رسوبی در ژئوفیزیک باعث افزایش دقت در درک زیرساخت‌های زمینی و منابع زیرزمینی می‌شود که در بسیاری از صنایع و کاربردها، بهره‌وری و بهینه‌سازی را تسهیل می‌کند.

در این پژوهش برای این منظور از وارون‌سازی گرانی استفاده شده است. مسائل وارون‌سازی گرانی به دو صورت خطی و غیرخطی می‌باشد که در حالت خطی هندسه مدل را ثابت در نظر می‌گیریم و چگالی مدل تغییر می‌کند و در حالت غیرخطی چگالی مدل را ثابت در نظر می‌گیریم و هندسه مدل متغیر است. روش‌های وارون غیرخطی به دو دسته محلی و عمومی تقسیم می‌شوند. روش‌های محلی از یک مدل اولیه استفاده می‌شود و با خطی‌سازی تابع هدف در هر تکرار به انتها می‌رسد (Chakravarthi, 1995; Barbosa et al., 1997; Silva et al., 2006; Mojica and Bassrei, 2015a).

این روش‌ها در حل مسائل غیرخطی، مشکلات خاص خود را دارند، اما مشکل اصلی آنها این است که به راحتی در نقاط کمینه محلی گیر می‌افتند. همچنین، پاسخ‌های این روش‌ها به شدت از مدل و اطلاعات اولیه‌ای که در ابتدای مدل‌سازی تعریف می‌شود، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. روش دیگری نیز به نام جستجوی عمومی وجود دارد که معمولاً از پدیده‌های فیزیکی، رفتار حیوانات یا مفاهیم تکاملی الهام گرفته شده‌اند. این روش‌ها به‌طور تصادفی مسائل را بهینه‌سازی می‌کنند (snieder 1998، Tarantola, 2005 و yuan et al., 2009).

برای تخمین عمق حوضه رسوبی چندین نویسنده روش‌های بهینه‌سازی مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند (Gadirov et al., 2016; Anecchione et al., 2001; Barbosa et al., 1997; Rao et al., 1994; Litinsky, 1989; Murthy and Rao, 1989; Murthy et al., 1988; Bhattacharya and Navolio, 1975).

یکی از روش‌های جستجوی عمومی و پرکاربرد در تخمین عمق حوضه‌های رسوبی، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است. در این تحقیق به منظور تخمین عمق رسوبات بر اساس داده‌های گرانی از روش

گرگ خاکستری که الهام گرفته شده از رفتار شکار گرگ خاکستری است استفاده شده است. این روش نخستین بار در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکارانش ارائه شده است (Mirjalili et al., 2014)؛ و برای حل مسائل بهینه‌سازی، مسائل تخمین و مسائل بهینه‌سازی پویا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم محاسباتی مبتنی بر فرایند شبیه‌سازی عملکرد گروهی از گرگ‌ها به‌منظور بهبود جستجوی یک مسئله‌ی بهینه‌سازی است. گرگ‌ها در این الگوریتم با استفاده از رفتارهایی مشابه با گرگ‌های واقعی، به جستجوی راه‌حل‌های بهینه در فضای جستجو پرداخته و به تدریج به جواب بهینه هدایت می‌شوند. در تخمین عمق حوزه رسوبی، معمولاً نیاز به بهینه‌سازی می‌باشد تا محل و عمق مناسب برای حفاری و استخراج رسوبات را پیدا کنیم.

مزیت‌های الگوریتم گرگ خاکستری در این کاربرد شامل موارد زیر می‌شود:

- سادگی پیاده‌سازی: الگوریتم گرگ خاکستری به دلیل سادگی و عدم نیاز به تعیین پارامترهای پیچیده، راحت‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی به حساب می‌آید و برای حل مسائل واقعی مناسب است.

- سرعت همگرایی بالا: الگوریتم گرگ خاکستری به دلیل بهره‌گیری از مکانیسم‌های تغییر نمونه‌ها به سرعت به جواب همگرا می‌شود و از گیر کردن در مینیمم‌های محلی جلوگیری می‌کند.

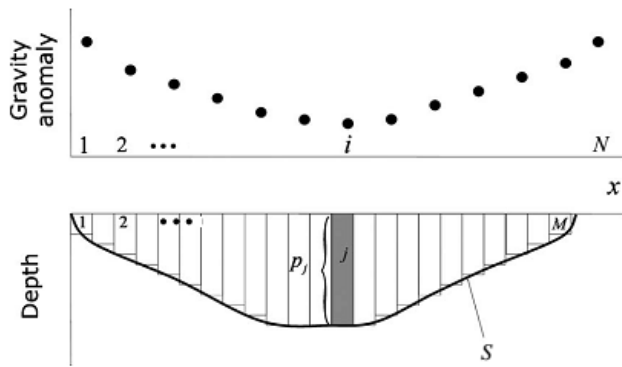
- انعطاف‌پذیری: قابلیت تطبیق الگوریتم گرگ خاکستری با مسائل مختلف، از جمله تخمین عمق حوزه رسوبی، باعث شده است که این الگوریتم در محیط‌های مختلف به خوبی عمل کند.

در این مقاله، ابتدا به معرفی الگوریتم گرگ خاکستری و مدل مورد استفاده در این زمینه پرداخته شده است، سپس نحوه‌ی استفاده از این الگوریتم در تخمین عمق حوضه‌های رسوبی شرح داده شده است. در ادامه، کارایی این روش با استفاده از داده‌های مصنوعی و داده‌های واقعی حاصل از رسوبات حوزه رسوبی مغان واقع در شمال غرب ایران مورد تحلیل قرار گرفته است و در نهایت، مقایسه‌ی نتایج آن با روش‌های دیگر بررسی شده است.

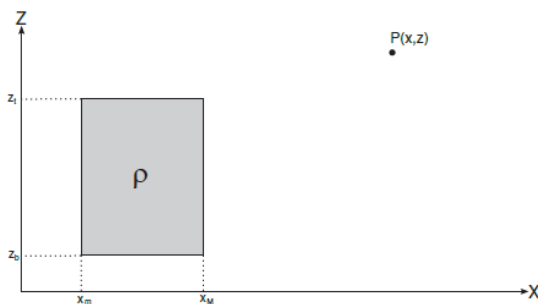
## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- بیهنجاری گرانی یک حوضه رسوبی

در تحلیل مسائل وارون‌سازی غیرخطی، از اطلاعات داده‌های گرانی و مغناطیس‌سنجی بهره برده می‌شود. برای ایجاد ارتباط میان داده‌ها و ویژگی‌های هندسی در اهداف زیر سطحی، نیاز به استفاده از مدل‌های هندسی ریاضی داریم. در این راستا، مدل‌های هندسی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دو مدل مهم در این زمینه، مدل جمع منشوری (Bott, 1960) و مدل چندضلعی تالوانی (Talwani et al., 1959) هستند. در روش تفسیری جمع منشوری، مقطع حوضه رسوبی با چندین منشور کنار هم با عرض یکسان ترسیم می‌شود. در مقابل، در روش چندضلعی تالوانی و همکاران، مقطع حوضه رسوبی با یک چندضلعی با  $n$  ضلع نمایش داده می‌شود. در بسیاری از الگوریتم‌هایی که از این دو روش



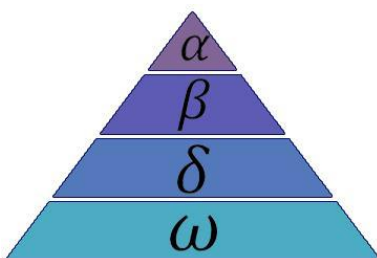
شکل ۱: بلوک بندی فضای مدل به منشورهای قائم با تغییرات در راستای عمق (Barbosa et al., 2011)



شکل ۲: وضعیت شماتیک دو بعدی یک منشور مستطیلی راست گوشه (Pallero et al., 2015)

## ۲-۲ - معرفی الگوریتم گرگ خاکستری

در سال ۲۰۱۴، الگوریتم فراابتکاری جدیدی به نام الگوریتم گرگ-خاکستری توسط میرجلیلی و همکارانش معرفی شد (Mirjalili et al., 2014). این الگوریتم الهام گرفته شده از زندگی گروهی گرگ‌ها و طریقه شکار آنهاست. زندگی گروهی گرگ‌ها دارای سلسله مراتب اجتماعی دقیق و بسیار منظمی است. این سلسله مراتب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: سلسله مراتب گرگ خاکستری (کاهش اختیارات از بالا به پایین) (Mirjalili et al., 2014)

هندسی استفاده می‌کنند، فرض می‌شود که چگالی سنگ بستر در بالای حوضه ثابت است. به طور کلی، یک مقدار ثابت برای چگالی به مدل اختصاص داده می‌شود (Morgan and Grant, 1963; Bhattacharya and Navolio, 1975). در این مقاله، وارون‌سازی با استفاده از مقدار چگالی ثابت انجام شده است. تعداد پارامترها در مساله وارون با تعداد منشورهای استفاده شده برای تعریف حوضه منطبق می‌باشد. در شکل ۱، یک مدل دو بعدی متشکل از مجموعه‌ای از منشورهای مستطیلی (M منشور) با چگالی ثابت و ضخامت نامشخص نشان داده شده است. میدان گرانی باقیمانده در هر نقطه  $i$  به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\Delta g_i = \sum_{j=1}^M F(\Delta \rho_j, z_j, r_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

که  $F(\Delta \rho_j, z_j, r_{ij})$  مدل ریاضی پیشرو برای اثرات هر منشور مجزا در اندازه گیری نقطه ام می باشد.  $\Delta \rho_j$  تباین چگالی،  $z_j$  عمق سنگ بستر در منشور  $j$  ام،  $r_{ij}$  فاصله افقی نقطه اندازه گیری  $i$  ام با منشور  $j$  ام و  $N$  تعداد نقاط اندازه گیری را نشان می‌دهد (Pallero et al., 2015). برای مدل‌سازی داده‌های گرانی یک لایه، از رابطه پیشروی ارائه شده توسط تلفورد و بلوک بندی دو بعدی می‌توان استفاده کرد (Telford et al., 1990). بی‌هنجاری گرانی هر یک از بلوک‌ها در نقطه  $P(x, z)$  از رابطه (۲) بدست می‌آید. (شکل ۲)

$$\begin{aligned} F_{ij} &= F(x, z, x_m, x_M, z_t, z_b, \rho) \\ &= G\rho \left[ A \cdot \ln \frac{A^2 + D^2}{A^2 + C^2} - B \cdot \ln \frac{B^2 + D^2}{B^2 + C^2} \right. \\ &\quad \left. - 2C \left( \arctan \frac{A}{C} - \arctan \frac{B}{C} \right) \right. \\ &\quad \left. + 2D \left( \arctan \frac{A}{D} - \arctan \frac{B}{D} \right) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

در اینجا  $A = x - x_m$ ،  $B = x - x_M$ ،  $C = z - z_b$ ،  $D = z - z_t$  و  $G$  ثابت گرانش می‌باشد. در شکل ۲،  $x$  و  $z$  مختصات نقطه اندازه‌گیری، و پارامترهای  $x_m$  و  $x_M$  مختصات منشور نشان داده شده در امتداد محور  $X$ ها؛  $z_b$  و  $z_t$  به ترتیب عمق سطح پایینی و سطح بالایی منشور می‌باشند (Barbosa et al., 1994).

معمول توسط آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا نیز گاهی اوقات ممکن است در شکار شرکت کنند. برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا از مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند. بنابراین سه تا از بهترین راه‌حل‌های بدست آمده ذخیره شده و دیگر عامل‌های جستجو موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین عامل‌ها جستجو به‌روزرسانی می‌کنند. روابط (۷)، (۸) و (۹) فرآیند شکار را نشان می‌دهند.

$$\begin{cases} \bar{D}_\alpha(t) = |\bar{C}_1 * \bar{X}_\alpha(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\beta(t) = |\bar{C}_2 * \bar{X}_\beta(t) - \bar{X}(t)| \\ \bar{D}_\delta(t) = |\bar{C}_3 * \bar{X}_\delta(t) - \bar{X}(t)| \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1(t) = \vec{X}_\alpha(t) - A_1 * \vec{D}_\alpha(t) \\ \vec{X}_2(t) = \vec{X}_\beta(t) - A_2 * \vec{D}_\beta(t) \\ \vec{X}_3(t) = \vec{X}_\delta(t) - A_3 * \vec{D}_\delta(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1(t) + \bar{X}_2(t) + \bar{X}_3(t)}{3} \quad (9)$$

در روابط بالا  $\vec{X}(t)$  موقعیت مکانی متغیر در وضعیت فعلی،  $\bar{X}(t+1)$  موقعیت مکانی متغیر در وضعیت بعدی و  $\vec{X}_\alpha(t)$ ،  $\vec{X}_\beta(t)$  و  $\vec{X}_\delta(t)$  به ترتیب موقعیت گرگ آلفا، بتا و دلتا می‌باشند. شکل ۴ چگونگی محاصره جواب نهایی در درون یک دایره بواسطه سه دسته ی آلفا، بتا و دلتا در فضای جستجو، و نیز موقعیت گروه امگا را نشان می‌دهد (Mirjalili et al., 2014).

راس هرم متعلق به گروه آلفا ( $\alpha$ ) می‌باشد، که رهبران گروه اند. آلفا مسئولیت تمام تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت گروه را برعهده دارد. گرگ آلفا به گرگ غالب نیز معروف می‌باشد، زیرا که در تمام گروه باید دستورات او اجرا شود. سطح دوم این هرم، گروه بتا ( $\beta$ ) است.

مسئولیت گرگ بتا کمک در تصمیم‌گیری به گرگ آلفا و سایر فعالیت‌های گروه می‌باشد. پایین‌ترین دسته در این سلسله مراتب، گرگ امگا ( $\omega$ ) است. گرگ امگا معمولاً از تمام گرگ‌های سطوح بالا پیروی می‌کند. سطح دیگری از این سلسله مراتب به دسته گرگ دلتا ( $\delta$ ) تعلق دارد. این گرگ تحت پیروی از دستورات گرگ آلفا و بتا است (Mirjalili et al., 2014).

شکار گروهی گرگ خاکستری شامل مراحل زیر می‌باشد (Muro et al., 2011):

- ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه

- دنبال کردن و محاصره شکار تا زمان توقف آن

- حمله به شکار

### الگوی ریاضی

الگوی ریاضی اینگونه بهینه‌سازی بر پایه تکرار است، به‌گونه‌ای که حل با یکسری نقاط آغاز می‌شود و در هنگام تکرارها کوشش بر بهبود پاسخ‌ها و نقاط است. نخست باید یکسری نقاط تصادفی در فضای جستجو پخش شوند، سپس تک تک این نقاط در تابع مورد نظر حل می‌شوند. در این مرحله نقطه‌ای که بهترین پاسخ را داده آلفا، دومین نقطه‌ای که بهترین پاسخ را داده بتا، سومین حلی که در برابر دیگر پاسخ‌ها بهتر بوده دلتا ( $\delta$ ) و در نهایت دیگر نقاط باقیمانده امگا ( $\omega$ ) نامگذاری می‌شوند. در مرحله اول الگوریتم، گرگ‌های خاکستری طعمه را در طول شکار محاصره می‌کنند. برای مدل نمودن رفتار محاصره بصورت ریاضی، رابطه‌های (۳) و (۴) تعریف شده‌اند.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - A * D \quad (3)$$

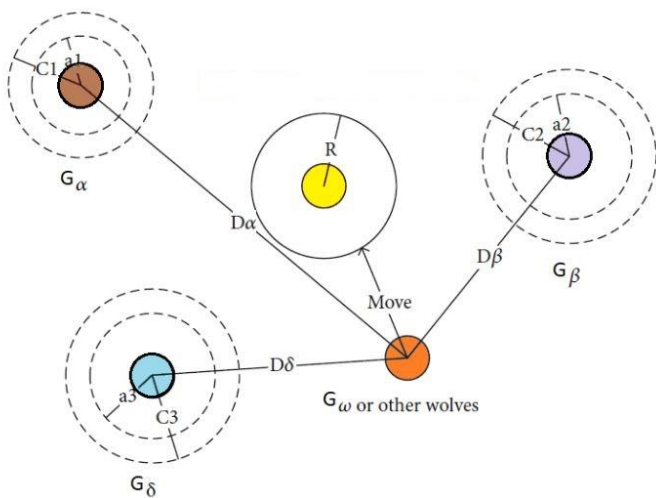
$$D = |\vec{C} * \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (4)$$

در این روابط  $\vec{X}(t)$  موقعیت شکار در لحظه  $t$  و  $\vec{X}_p(t)$  موقعیت گرگ در لحظه  $t$  است.  $D$  فاصله گرگ تا شکار را نشان می‌دهد.  $A$  و  $C$  بردارهای ضریب هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = \vec{a}(2\vec{r}_1 - 1) \quad (5)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (6)$$

$\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بردارهای تصادفی هستند و  $a$  پارامتری است که مقدار آن بصورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد. در مرحله شکار، گرگ خاکستری به طعمه محاصره شده حمله می‌کند. روند شکار به طور



شکل ۴: بروزرسانی موقعیت‌ها در الگوریتم GWO

واقعی استفاده شده است. در این الگوریتم، هر گرگ نماینده یک راه‌حل است و یک بردار  $n$  بعدی است که،  $n$  تعداد منشورهای در نظر گرفته شده برای مدل کردن مقطع دو بعدی رسوبات و هر مولفه این بردار نشان‌دهنده ضخامت یکی از منشورها می‌باشد. اولین مرحله در الگوریتم-های جستجوی عمومی محاسبه کران بالا و پایین برای فضای جستجوی هر پارامتر است که از اطلاعات زمین‌شناسی منطقه بدست می‌آید. یک روش دیگر که در مساله وارون‌سازی دوبعدی سنگ‌بستر بکار می‌رود به این صورت است که با استفاده از فرمول تخته بوگه یک تقریب اولیه از عمق برای هر نقطه از شبکه بدست می‌آید (رابطه (۱۰)):

$$z_j^o = \frac{\Delta g_j^{obs}}{2\pi G \Delta \rho} \quad (10)$$

که در این رابطه  $G$  ثابت جهانی گرانش،  $z_j^o$  تخمین عمق اولیه منشور-ژام و  $\Delta g_j^{obs}$  آنومالی گرانی در نقطه مرکزی لبه بالایی منشور ژام می‌باشد. در مرحله بعد محدوده فضای جستجوی عمق هر منشور از ضرب دو فاکتور  $k_{min} < 1$  و  $k_{max} > 1$  در  $z^o$  بدست می‌آید (رابطه (۱۱))

$$z \in [k_{min} \cdot z^o, k_{max} \cdot z^o] \quad (11)$$

مقدار  $k_{min}$  و  $k_{max}$  با توجه به مقادیر بکارگرفته شده در مطالعات قبلی (جولایی و همکاران، ۱۳۹۸، Pallero et al., 2015) بترتیب ۰/۵ و ۲ تعیین گردید. در زمینه مدلسازی داده‌های گرانی، تابع هزینه مطابق رابطه (۱۲) طراحی شد. (Pallero et al., 2015).

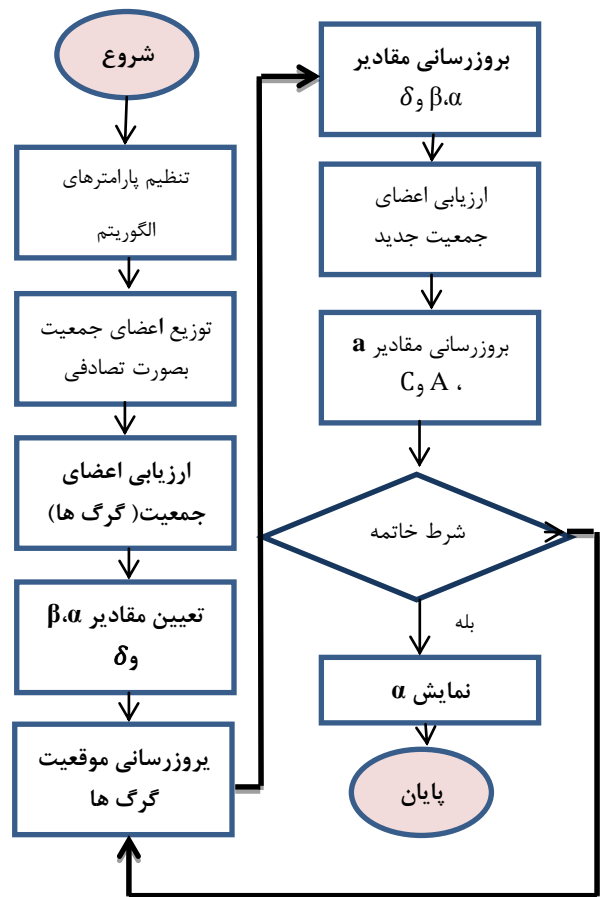
$$C^g = \frac{1}{N} \|\Delta g^{obs} - \Delta g^{cal}\| \quad (12)$$

در این رابطه،  $\Delta g^{obs}$  بیهنجاری گرانی مشاهده‌ای،  $\Delta g^{cal}$  بیهنجاری محاسبه شده از مدل و  $N$  تعداد تکرار می‌باشد.

### ۳-۱- وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مصنوعی

در این پژوهش، از یک مدل مصنوعی برای شبیه‌سازی و تجسم یک حوضه رسوبی دو بعدی با طول ۱۵ km استفاده شده است. در این مدل، داده‌های گرانی‌سنجی به‌فواصل مساوی ۰/۵ km در یک نیم‌رخ قرار گرفته و در مجموع ۳۱ نقطه اندازه‌گیری شده‌اند. در ابتدا با استفاده از برنامه پیشرو، اثر گرانی این مدل به‌دست می‌آید و سپس با برنامه وارون‌سازی GWO، از این داده‌های مصنوعی به مدل سنگ‌بستر می‌رسیم. برای این مدل از تباین چگالی  $\Delta \rho = -1000 \frac{g}{cm^3}$  استفاده شده است و چون

در مرحله جستجوی طعمه، گرگها از یکدیگر فاصله می‌گیرند تا نقاط مختلف فضای راه‌حل را جستجو کنند. برای مدلسازی ریاضی این فرآیند از بردار تصادفی  $A$  با مقدار بزرگتر از ۱ و یا کوچکتر از -۱ استفاده می‌شود. گرگهای خاکستری زمانی که شکار متوقف می‌شود به آن حمله کرده و شکار را به پایان می‌رسانند. برای مدل نمودن حمله به طعمه مقدار پارامتر  $a$  کاهش می‌یابد. در شکل ۵، فلوجارت الگوریتم گرگ-خاکستری نشان داده شده است.

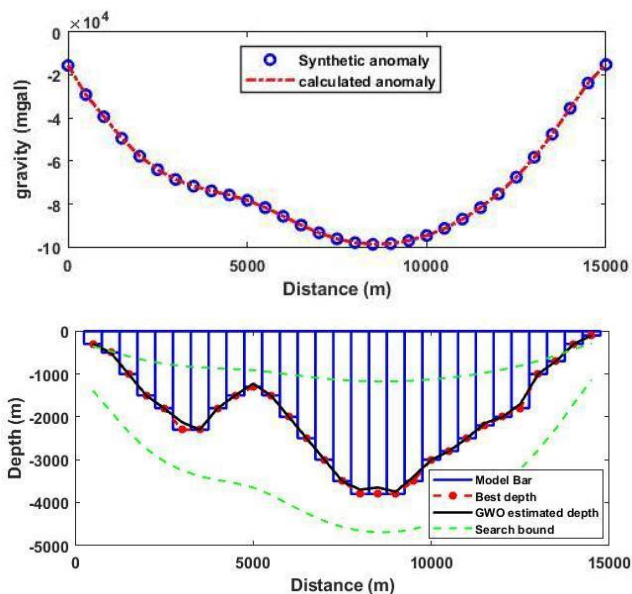


شکل ۵: فلوجارت الگوریتم GWO

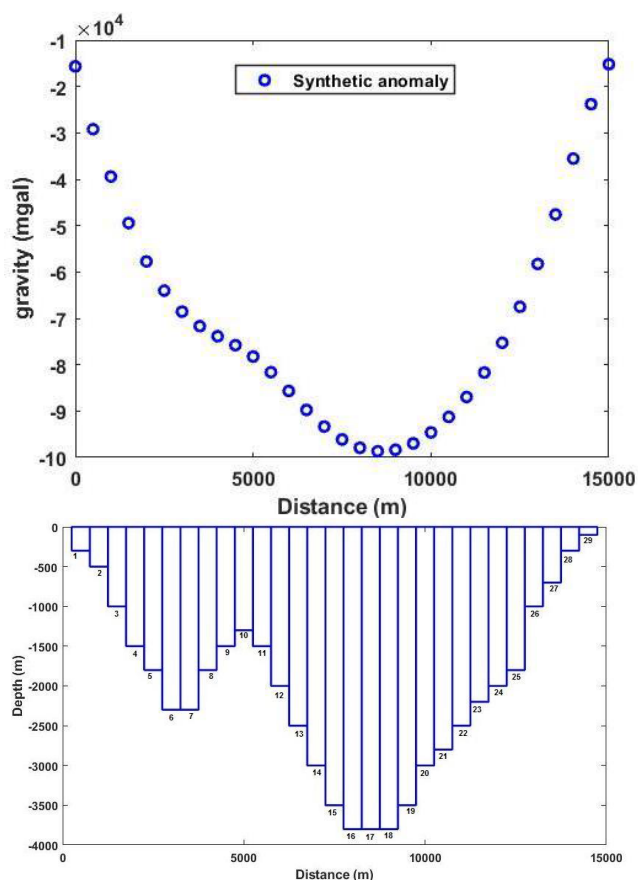
### ۳- اجرای الگوریتم GWO روی داده‌های گرانی

در این تحقیق از روش الگوریتم گرگ‌خاکستری برای مدلسازی غیرخطی سنگ‌بستر برای تخمین عمق با استفاده از داده‌های گرانی مصنوعی و

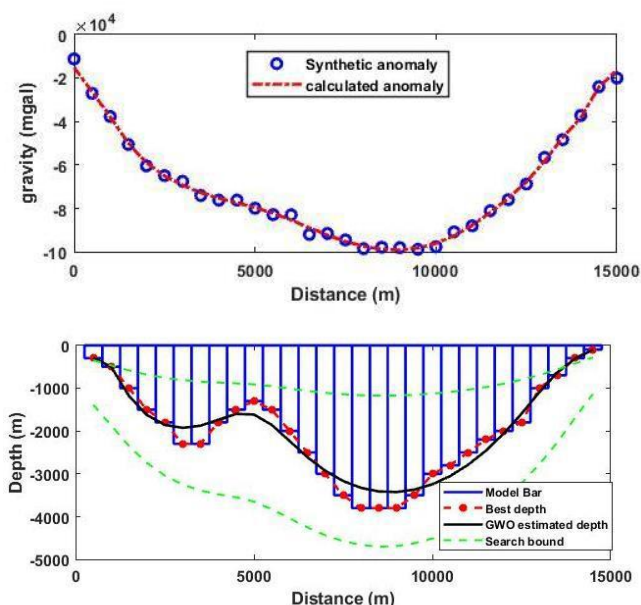
مدلسازی براساس شبیه‌سازی سنگ‌بستر با یک‌سری منشورهای کنارهم چیده شده است، فرض شده که تعداد منشورها ۲۹ عدد و عرض هر منشور ۵/۰ km است. در شکل ۶ مدل مصنوعی حوضه رسوبی که به منشورهای قائم با تغییرات در راستای عمق بلوک بندی شده است به همراه داده‌های گرانی حاصل از آن نمایش داده شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های هر منشور شماره گذاری شده آورده شده است. در شکل ۷ اعماق فرضی و اعماق تخمین زده شده با استفاده از GWO و همچنین بی‌هنجاری گرانی مدل مصنوعی به همراه بی‌هنجاری گرانی تولید شده از مدل مصنوعی بدون نوفه نشان داده شده است. پارامترهای تنظیمی الگوریتم گرگ خاکستری طراحی شده برای داده‌های این مدل مصنوعی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۷: الف) داده‌های مصنوعی به همراه داده‌های مدل تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل تولیدی (تصویر پایین)



شکل ۶: مدل مصنوعی دو بعدی یک حوضه رسوبی منشور بندی شده (تصویر پایین)، بی‌هنجاری گرانی بدست آمده از مدل مصنوعی قرار گرفته در بالای هر منشور (تصویر بالا)



شکل ۸: مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل تولیدی (تصویر پایین)

در ادامه به داده‌های گرانی حاصل از مدل مصنوعی تعریف شده در بخش قبلی ۵ درصد نوفه رندوم طبق رابطه (۱۳) اضافه می‌شود، و بردار گرانی نوفه دار به عنوان ورودی به برنامه معرفی شد (اسحق زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

$$g_{noise} = g + [(max(g) - min(g)] / 2 \times [randn(size(g)) \times M] \quad (13)$$

که در آن  $g_{noise}$  داده گرانی نوفه دار و  $M$  سطح نوفه را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی در شکل‌های ۸ آمده است. مقادیر اولیه و محاسبه شده هر منشور شماره‌گذاری در جدول ۱ آورده شده است. از معیار آماری ریشه میانگین مربعات (RMS) برای مقایسه کمی بین مدل اولیه با مدل محاسبه شده و بیهنجاری گرانی اولیه با بیهنجاری گرانی محاسبه شده استفاده می‌شود. خطای محاسبه شده بین مدل مصنوعی و مدل تولید شده توسط GWO در حالت بدون نوفه و با نوفه رندوم ۵ درصد به ترتیب  $0.14mGal$  و  $0.56mGal$  می‌باشد. همچنین خطای بین بیهنجاری گرانی اولیه و محاسبه شده توسط GWO در حالت بدون نوفه و با نوفه ۵ درصد به ترتیب  $18m$  و  $70.7m$  می‌باشد همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، اختلاف مدل و داده‌های تولیدی با مدل مصنوعی و داده‌های فرضی اولیه بسیار اندک است و نشان می‌دهد که مدل‌سازی از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار اندک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصل از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، بصورت کمی بر این امر دلالت دارد.



جدول ۱: مقادیر فرضی و محاسبه شده توسط  $Gwo$  برای اعماق حوضه رسوبی مدل مصنوعی

شماره منشور	عمق اولیه(متر)	عمق تخمین زده شده بدون نوفه(متر)	عمق تخمین زده شده با نوفه ۵ درصد(متر)	شماره منشور	عمق اولیه(متر)	عمق تخمین زده شده بدون نوفه(متر)	عمق تخمین زده شده با نوفه ۵ درصد(متر)
۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۱۶	۳۸۰۰	۳۷۹۳	۳۶۵۱
۲	۵۰۰	۵۰۲	۵۰۰	۱۷	۳۸۰۰	۳۷۸	۳۷۱۲
۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۸	۳۸۰۰	۳۷۹۴	۳۶۳۲
۴	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۲۴	۱۹	۳۵۰۰	۳۴۹۴	۳۴۹۲
۵	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۱۸۱۸	۲۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۱۰۰
۶	۲۳۰۰	۲۲۹۶	۲۱۴۸	۲۱	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۳۰
۷	۲۳۰۰	۲۲۹۸	۲۱۵۳	۲۲	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۲۵
۸	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۱۸۲۲	۲۳	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۲۱۹
۹	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۳	۲۴	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۹۸۹
۱۰	۱۳۰۰	۱۲۹۵	۱۳۰۰	۲۵	۱۸۰۰	۱۷۹۳	۱۷۰۴
۱۱	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۲۶	۱۰۰۰	۱۰۰۳	۱۰۱۵
۱۲	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۵۰	۲۷	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۱۳	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۷۶	۲۸	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۱۴	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۸	۲۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۵	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۴۰۵	۳۰			

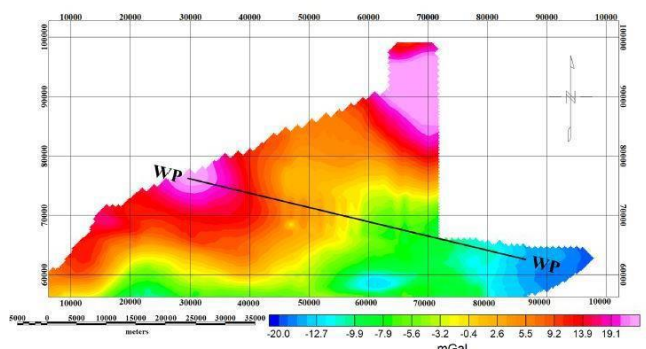
جدول ۲: پارامترهای تنظیمی الگوریتم گرگ خاکستری در این پژوهش

پارامتر	نماد	مقدار
تعداد گرگ‌ها	$n$	۱۰۰
تعداد تکرار	$t$	۶۰۰

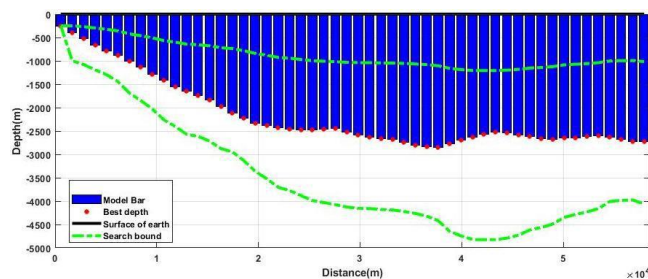
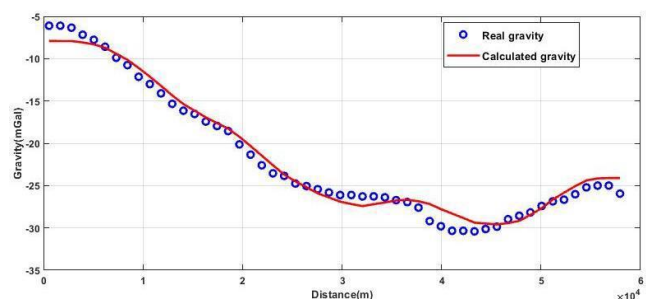
### ۳-۲- وارون سازی دو بعدی داده‌های واقعی

در این مقاله از داده های یک پروفیل داده های گرانی که قبلا نیز مورد مطالعه و مدل‌سازی قرار گرفته؛ استفاده شده است. طول پروفیل در نظر گرفته شده حدود ۵۸۵۰ متر با برداشت تعداد داده های گرانی ۵۲ نقطه در فواصل نامنظم می‌باشد. در شکل ۱۰ که نقشه گرانی باقی مانده ناحیه مغان را نشان می‌دهد، پروفیل مزبور مشخص شده است. داده های حاصل از این پروفیل در شکل ۱۱ آورده شده است. برای مدل‌سازی این داده ها، ابتدا زیر سطح زمین به بلوک‌هایی مستطیلی تقسیم شده و عرض هر بلوک ۱۱۲۵ متر در نظر گرفته شده است. بر این اساس مقطع مورد نظر به ۵۲ منشور افراز شد. تباین چگالی در کلیه بلوکها ثابت و بر اساس متوسط داد ه‌های حفاری در نقاط و اعماق مختلف در منطقه؛ برابر منفی  $۳۰۰ \text{ kg/m}^3$  با سنگ بستر در نظر گرفته شد (جولایی و همکاران، ۱۳۹۸). پارامتر های تنظیم الگوریتم مذکور شامل جمعیت اولیه، تعداد تکرار ها و همچنین پارامتر هموارساز با سعی و خطا تعیین شده است.

داده های استفاده شده در این مقاله ، داده های گرانی برداشت شده از حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران می‌باشد که از مقاله (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۸) دیجیت شده است. این حوضه در غرب دریای خزر واقع شده و به دلیل عواملی از جمله نزدیکی به مناطق نفت خیز باکو و نیز ضخامت زیاد سنگ‌های رسوبی و وجود چشمه‌های نفتی، در اکتشافات هیدروکربوری مورد توجه واقع شده است (Jafarzadeh et al., 2014; Fotouhi, 1973). فعالیت‌های آتشفشانی که در منطقه مغان وجود داشته باعث خروج مواد و روانه های بازالتی در داخل واحدهای رسوبی شده است. شکل ۹ نقشه زمین شناسی این منطقه را نشان می‌دهد. در مطالعات گرانی سنجی انجام شده در این منطقه، ولکانیکهای ائوسن شامل جریان‌های بازالتی، به عنوان ساختارهای پی سنگی این ناحیه در نظر گرفته شده اند؛ که تباین وزن مخصوص مناسبی با رسوبات بالاسری خود دارند و شرایط مناسبی را برای تصویر نمودن پی سنگ ایجاد می نمایند (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۸).



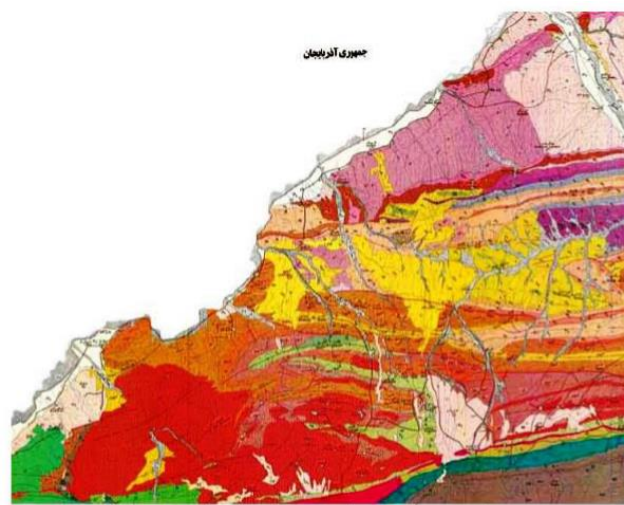
شکل ۱۰: محل پروفیل مورد نظر بر روی نقشه بیهنجاری باقیمانده ناحیه مغان (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۸)



شکل ۱۱. مدل‌سازی دوبعدی پروفیل گرانی حوضه رسوبی مغان: بیهنجاری گرانی محاسبه شده و داده‌های برداشت شده (تصویر بالا)، مدل تولید شده (تصویر پایین)

جهت هموارتر شدن پاسخ‌ها فیلتر میانگین متحرک به صورت پنج نقطه‌ای بر پاسخ‌ها اعمال شد.

مدل نهایی که همان مدل سنگ بستر است در شکل ۱۰ (تصویر پایین) آمده است. شکل ۱۰ (تصویر بالا)، داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های محاسبه شده از مدل نهایی را نشان می‌دهد. مدل بدست آمده با نتایج مطالعات قبلی انجام شده در این مقطع با روش‌های مارکوارت لونبرگ (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۸) (شکل ۱۲) و الگوریتم رقابت ذرات (جولایی و همکاران، ۱۳۹۸) (شکل ۱۳) از نظر روند تغییرات عمق سنگ بستر ساختار یکسانی را نشان می‌دهد که با نتایج مدل‌سازی صورت گرفته در ایت تحقیق مطابقت خوبی داشته است. همچنین مقایسه مدل بدست آمده با نتایج لرزه نگاری مطالعات قبلی (شکل ۱۴)، نشان می‌دهد که روند تغییرات از کم عمق‌ترین نقطه به عمیق‌ترین نقطه سازگاری خوبی داشته است و صحت نتایج مدل‌سازی با الگوریتم GWO را نشان می‌دهد. حداکثر عمق بدست آمده برای حوضه رسوبی مغان در این روش ۲۷۲۰ متر می‌باشد که با نتایج مطالعات قبلی، روش لونبرگ-مارکوارت (۲۶۵۰ تا ۲۷۰۰ متر) و رقابت ذرات (۲۷۰۰ متر) مطابقت مناسبی نشان می‌دهد.

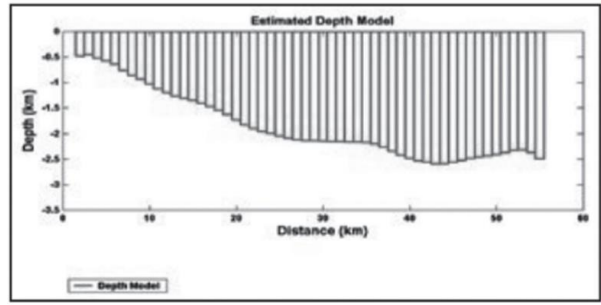


شکل ۹: نقشه زمین‌شناسی دشت مغان

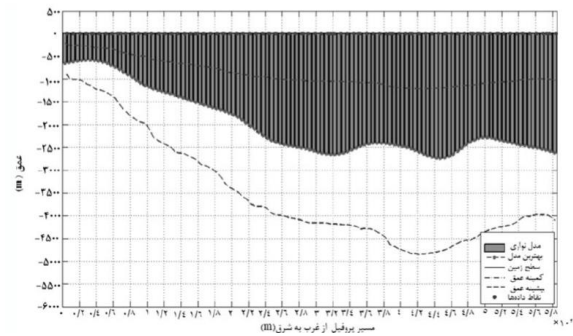
#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از الگوریتم GWO برای تخمین ضخامت حوضه‌های رسوبی و مدل‌سازی غیرخطی دوبعدی داده‌های گرانی با و بدون نوفه تصادفی استفاده شد. این الگوریتم در هر دو حالت با افزودن عملگر هموارساز، مدل حوضه رسوبی را بخوبی بازسازی کرده است. در این مدل‌ها با توجه به رنج‌های جستجوی تعریف شده، عمق و گرانی محاسبه شده از مدل، با مدل‌های اولیه تفاوت چندانی ندارد و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین، از GWO برای تفسیر داده‌های واقعی گرانی مرتبط با حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران، استفاده شد.

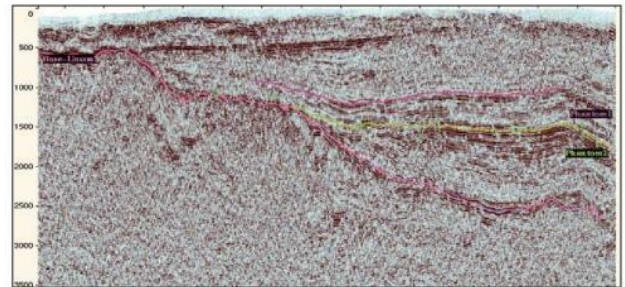
هندسه اولیه حوضه رسوبی با استفاده از روش دو بعدی در طول یک پروفیل مدل‌سازی شده است. عمق‌های محاسبه شده از وارون داده‌های واقعی، مطابقت خوبی با روند بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای دارند و نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین و داده‌های حفاری سازگار می‌باشد. بیشترین مقدار عمق به دست آمده برای این حوضه رسوبی، ۲۸۰۰ متر می‌باشد. نتایج قابل قبول حاصل از وارون‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم مذکور روشی قدرتمند برای مدل‌سازی وارون داده‌های گرانی می‌باشد.



شکل ۱۲. مدل‌سازی بیشتر انجام شده مقطع مورد مطالعه به وسیله الگوریتم مارکورات -لونیبرگ (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۱۳. مدل‌سازی بیشتر انجام شده مقطع مورد مطالعه به وسیله الگوریتم رقابت ذرات (جولایی و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱۴: مقطع لرزه نگاری نیم‌برخ مورد مطالعه (شرکت ملی نفت ایران) (جولایی و همکاران، ۱۳۹۸)

## ۵- منابع

- Litinsky V. A., 1989, Concept of effective density: Key to gravity depth determinations for sedimentary basins. *Geophysics*, 54, 11, 1474-1482.
- Mojica, O.F., and Bassrei, A., 2015, Lanczos bi diagonalization method for parallel 3-D gravity inversion application to basement relief definition: 85th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Morgan, N. A., and Grant, F. S., 1963, High speed calculation of gravity and magnetic profiles across two-dimensional bodies having an arbitrary cross-section: *Geophys. Prospect.*, 11, 10-15.
- Murthy I. V. R., Krishna P. R., Rao S. J., 1988, A generalized computer program for two dimensional gravity modeling of bodies with a flat top or a flat bottom or undulating over a mean depth. *J. Assoc. Explor. Geophys.*, 9, 93-103.
- Murthy I. V. R., Rao S. J., 1989: A FORTRAN 77 program for inverting gravity anomalies of two-dimensional basement structures. *Comput. Geosci.*, 15, 7, 1149-1156.
- C. Muro, R. Escobedo, L. Spector and R. Coppinger, "Wolf-pack (Canis Lupus) Hunting Strategies Emerge from Simple Rules in Computational Simulations," *Behavioural Processes*, Vol.88, No.3, pp.192-197, 2011.
- Pallero JLG, Fernandez-Martinez JL, Bonvalot S, Fudym O., 2015, Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization. *J Appl Geophys* 116:180-191
- Rao C. V., Chakravarthi V., Raju M. L., 1994, Forward modelling: Gravity anomalies of two-dimensional bodies of arbitrary shape with hyperbolic and parabolic density functions. *Comput. Geosci.*, 20, 5, 873-880.
- S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis., 2014, Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*, Vol.69, pp.46-61.
- Silva, J.B.C., Costa, D.C.L., and Barbosa, V.C.F., (2006), "Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth" *Geophysics*, 71, 5, pp: 51-58.
- Snieder, R., 1998, The role of nonlinearity in inverse problems. *Inverse Problems* 14.3
- Talwani, M., Worzel, J. and Ladisman, M., 1959, Rapid computation of gravitational attraction of three dimensional bodies of arbitrary shape. *Journal of Geophysical research* 64(1) 49-59.
- Tarantola, A., 2005, Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E., 1990, *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge university press.
- Yuan, S., Shangxu W., and Nan T. 2009, Swarm intelligence optimization and its application in geophysical data inversion. *Applied Geophysics* 6.2: 166-174.
- اسحق زاده ع., حاجیان ع., خلیلی ش., ۱۳۹۶, مدل سازی وارون دو بعدی میدان گرانی باقی مانده با استفاده از شبکه عصبی پیشخور مدولار: مطالعه موردی یک معدن کرومیت، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۴۳-۶۰
- جولانی ا., عرب امیری ع. ر., نجاتی کلاته ع و قمی ش., ۱۳۹۸, تخمین عمق سنگ بستر حوضه های رسوبی با وارون سازی داد ههای گرانی به وسیله الگوریتم رقابت ذرات، مطالعه موردی حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران، مجله پژوهش نفت، ۱۱۲، ۷۴-۸۹.
- نجاتی کلاته ع., ابراهیم زاده اردستانی و شاهین ا., متولی عنبران، س . ه., قمی ش . و جوان ا., ۱۳۸۸, مدل سازی وارون دو بعدی غیر خطی داد ههای گرانی سنجی ناحیه مغان با استفاده از روش مارکوارت لونبرگ ، مجله علوم زمین، شماره ۱۹۰ (۷۴)، ۱۳-۲۰
- Annechione M. A., Chouteau M., Keating P., 2001, Gravity interpretation of bedrock topography: the case of the Oak Ridges Moraine, southern Ontario, Canada. *J. Appl. Geophys.*, 47, 1, 63-81.
- Barbosa VCF, Silva JB, Medeiros WE., 1997, Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths. *Geophysics* 62(6):1745-1757
- Barbosa VCF, Silva JBC., 1994, Generalized compact gravity inversion. *Geophysics* 59(1) 57-68.
- Barbosa, Valéria CF, and João BC Silva., 2011, Reconstruction of geologic bodies in depth associated with a sedimentary basin using gravity and magnetic data." *Geophysical Prospecting* 59.6: 1021-1034.
- Bhattacharya, B. K., and Navolio, M. E., 1975, Digital convolution for computing gravity and magnetic anomalies due to arbitrary bodies: *Geophysics*, 40, 981-992.
- Bott MHP., 1960, The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophys J Int* 3(1):63-6
- Chakravarthi, V., 1995, Gravity interpretation of nonoutcropping sedimentary basins in which the density contrast decreases parabolically with depth. *Pure and Applied Geophysics* 145.2: 327-335.
- Fotouhi M, 1973, A Comprehensive Review of Geology and Oil Possibilities in Moghan Area. NIOC, Geological Report, 348 pp
- Gadirov V. G., Gadirov K. V., Gamidova A. R., 2016, The deep structure of Yevlakh-Agjabedi depression of Azerbaijan on the gravity-magnetometer investigations. *Geodynamics*, 20, 1, 133-143.
- Jafarzadeh M, Harami RM, Friis H, Amini A, Mahboubi A, Lenaz D., 2014, Provenance of the Oligocene-Miocene Zivah Formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses. *J Afr Earth Sc* 89:56-71