



دانشگاه صنعتی شاهرود

دوره ۱۱، شماره ۲، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۰۳-۱۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2025.15485.1365

تجزیه و تحلیل وضعیت گسل کلاته خج با روش الگوریتم ژنتیک با استفاده از داده‌های گرانی سنجی

مجتبی بابایی^{۱*}، حمید آقاجانی^۲، سید منوچهر حسینی پیلانگرگی^۳

- ۱- استادیار؛ گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.
- ۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ۳- استادیار؛ گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: m_babaei@iauh.ac.ir

چکیده

در مسائل وارون، روش‌های بهینه‌سازی برای یافتن برخی پارامترهای فیزیکی و هندسی ساختارهای زیرزمینی به کار می‌روند. در این مقاله، با استفاده از داده‌های گرانی، از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی در تخمین پارامترهای یک گسل با ضخامت محدود استفاده می‌شود. به این منظور داده‌های مصنوعی بدون و با نوفه گاوسی حاصل از گسل‌های نرمال و معکوس در راستای عمود بر امتداد بی‌هنجاری تولید و سپس با الگوریتم ژنتیک، پارامترها شامل ضخامت، عمق بالایی، عمق پایینی و زاویه شیب گسل به دست می‌آیند. تعداد جمعیت اولیه مفروض یکی از متغیرهای تأثیرگذار در سرعت همگرایی الگوریتم و دقت نتایج است. با این روش، پارامترهای مدل گسل نرمال با داده‌های بدون نوفه با خطای کمتر از یک درصد، با داده‌های با نوفه ۵ درصد با خطای کمتر از ۶ درصد و با داده‌های با نوفه ۱۰ درصد با خطای کمتر از ۱۰ درصد به دست آمدند. در گام بعد برای بهبود کیفیت پارامترهای تخمین زده شده از فیلتر هموار سازی میانگین متحرک مرتبه دوم برای گسل معکوس استفاده شد که منجر به بهبود نتایج و افزایش سرعت همگرایی الگوریتم گردید. در این حالت، پارامترها با داده‌ها با ۱۰ درصد نوفه با خطای تخمین کمتر از ۲ درصد به دست آمدند. سرانجام الگوریتم بر روی داده‌های گرانی واقعی گسل کلاته‌خج اعمال شد که نتایج به دست آمده با شواهد زمین‌شناسی همخوانی قابل قبولی داشت.

واژگان کلیدی

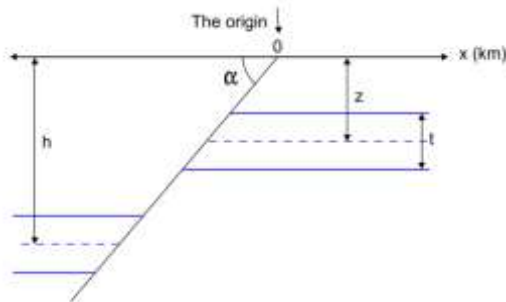
داده‌های گرانی
گسل
تخمین پارامترها
الگوریتم ژنتیک
گسل کلاته‌خج

۱- مقدمه

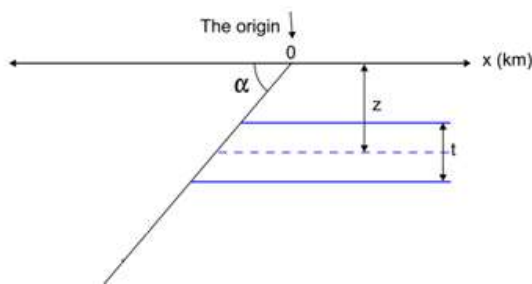
در این مطالعه، الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامترهای هندسی یک گسل مدفون (عمق‌های بخش‌های بالایی و پایینی لایه گسله شده، زاویه شیب و ضخامت گسل) با داده‌های گرانی استفاده می‌کنیم. این روش بر روی داده‌های نظری با و بدون نوفه‌های تصادفی اعمال و سپس بر روی داده‌های گرانی واقعی بخشی از مسیر گسل کلاته‌خیج آزمایش می‌شود. رابطه بی‌هنجاری گرانی باقیمانده در راستای پروفیل عمود بر امتداد لایه نازک گسلی شیب‌دار دو بعدی با طول امتداد بی‌نهایت (شکل ۱-الف) با معادله زیر داده می‌شود (Telford, Geldart, Sheriff, & Keys, 1976):

$$g(x_i, z, h, \alpha) = K \left[\pi + \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{z} + \cot \alpha \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{h} + \cot \alpha \right) \right] \quad (1)$$

که در آن z و h به ترتیب عمق‌های مرکز قسمت‌های بالایی و پایینی لایه هستند، α زاویه شیب اندازه‌گیری شده در خلاف جهت عقربه‌های ساعت از سطح، $K = 2\gamma\sigma t$ ، ضریب دامنه وابسته به ضخامت (t) و تباین چگالی (σ) لایه گسلی، γ ثابت جهانی گرانش و x_i موقعیت مختصات افقی است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. انواع گسل مورد مطالعه (الف) گسل نرمال شیب‌لغز (ب) گسل نرمال شیب‌لغز با یک لایه گسله با عمق محدود

مطابق شکل (۱-ب) اگر h نامحدود فرض شود یا به عبارت دیگر گسلی تنها با یک لایه گسله با عمق محدود داشته باشیم، رابطه پاسخ گرانی آن به صورت رابطه (۱) خواهد شد:

$$g(x_i, z, h, \alpha) = K \left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{z} + \cot \alpha \right) + \alpha \right] \quad (2)$$

روش گرانی یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌های ژئوفیزیک است که کاربردهای گسترده‌ای در اکتشاف نفت و گاز (Assaad & Assaad, 2009; Cho, Cao, Zagayevskiy, Wong, & Munoz, 2020; Hicheri, Ramdhane, Yahyaoui, & Gonenc, 2018; Rosid & Essa & Elhussein, 2018; Lelièvre, 2017) معدن (Siregar, 2017) در باستان‌شناسی (Farquharson, & Hurich, 2012) (Aghajani, 2017) (Araffa, Sabet, & Gaweish, 2015; Pánisová, 2015) (Araffa et al., 2015) (Pašteka, 2009)، در هیدروژئولوژی (Araffa et al., 2015)، نقشه‌برداری زیرسطحی ساختارهای زمین‌شناسی مانند ناودیس، تاقدیس و گسل‌ها (Chakravarthi, Malleh, & Ramamma, 2017; Deng, 2016) (et al., 2016) (Biswas, Mandal, Sharma, & Mohanty, 2014) (Essa, Nady, Mostafa, & Elhussein, 2018) دارند. در تفسیر داده‌های گرانی، هدف اصلی تخمین پارامترهای بی‌هنجاری مانند ضریب دامنه، عمق، زاویه شیب، موقعیت مبدأ، ضریب شکل و غیره است (E. Abdelrahman & Essa, 2015; Abdelrahman, Essa, & Abo-Ezz, 2013; Essa et al., 2018). گسل‌ها ساختارهای مهم پوسته‌ای را نشان می‌دهند که با شکستگی شدید پوسته زمین و جابجایی نسبی قابل توجه در امتداد هر دو طرف سطح گسل مشخص می‌شوند. گسل‌ها به طور کلی نقش حیاتی در تکامل تکتونیکی دارند که می‌تواند شامل تله‌های هیدروکربنی، مورفولوژی سنگ معدن و لرزه‌خیزی باشد. به همین دلیل وارون‌سازی داده‌ها برای شناسایی ساختارهای گسلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بسیاری از تکنیک‌های وارون‌گرانی برای تفسیر داده‌های گرانی ناشی از ساختارهای دو بعدی گسل (Brandes & Tanner, 2020; Schultz, 2019) توسعه یافته‌اند. روش‌هایی مانند تکنیک‌های گرافیکی و عددی مبتنی بر هندسه ساده ثابت (Abdelrahman, Bayoumi, & El-Araby, 1989) (Abdelrahman et al., 1999) (Abdelrahman et al., 1999) (Essa, 2013) مشتقات افقی (Essa, 2013) و نقاط مشخصه (Abdelrahman et al., 1989) در تخمین پارامترهای گسل به کار رفته‌اند. با وجود نایکتایی، بدوضعی، محتوای نوفه و همچنین تعداد ناکافی داده‌های مشاهده‌شده، تکنیک‌های وارون‌سازی به طور کلی در مطالعات تخمین پارامترهای ژئوفیزیکی با کمک برخی قیدها و اطلاعات پیشین با موفقیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تکنیک‌های وارون‌سازی، ضمن بهبود تابع هدف، که نشانگر برازش بین داده‌های ژئوفیزیکی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده است، با استفاده از بهینه‌سازی، کمینه سراسری در فضای مدل جستجو می‌شود. به دلیل وجود هزینه محاسباتی هنگفت برای مسائل وارون دارای معادلات پیشرو چگال، الگوریتم‌های فرا ابتکاری الهام گرفته شده از طبیعت در طول دهه گذشته محبوبیت بیشتری به دست آورده‌اند. از میان چندین الگوریتم بهینه‌سازی سراسری مورد استفاده در مطالعات تخمین پارامتر مدل بی‌هنجاری‌های میدان‌های گرانی و مغناطیسی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) (Babaei & Hosseini Pilangorgi, 2024; Göktürkler & Balkaya, 2012; Pace, Santilano, & Godio, 2019; Shaw & Srivastava, 2007) (Babaei & Hosseini Pilangorgi, 2024; Kaftan, 2015) (Osman & Albora, 2015) محبوب‌تر هستند.

باشد، احتمال انتخاب آن بیشتر است.

۲-۳. انتخاب کروموزوم‌ها

عملگر انتخاب کروموزوم‌ها را با جایگزینی انتخاب می‌کند. بنابراین یک کروموزوم می‌تواند بیش از یک بار انتخاب شود.

۲-۴. ترکیب برای تولید نسل بعدی کروموزوم‌ها

عملگر ترکیب شبیه ترکیب بیولوژیکی و ترکیب مجدد کروموزوم‌ها در میوز سلولی است. این عملگر دنباله‌ای از دو کروموزوم انتخابی را برای ایجاد دو فرزند تعویض می‌کند. به عنوان مثال، اگر کروموزوم‌های والد [۰۱۰۱۱۱۰۱۰۱۰۰۱۰] و [۱۱۰۱۰۱۱۱۰۰۱۰۰۰] پس از بیت چهارم ترکیب شوند، [۰۱۰۱۰۱۱۱۰۰۱۰۰۰] و [۱۱۰۱۱۱۰۱۰۱۰۰۱۰] فرزندان آنها خواهند بود.

۲-۵. جهش تصادفی کروموزوم‌ها در نسل جدید

عملگر جهش به طور تصادفی تک تک بیت‌ها را در کروموزوم‌های جدید جاروب می‌کند (تبدیل صفر به ۱ و بالعکس). به طور معمول جهش با احتمال بسیار کم حدود ۰/۰۰۱ اتفاق می‌افتد. در نگاه اول، عملگر جهش ممکن است غیرضروری به نظر برسد. ولی در واقع، نقش مهمی را ایفا می‌کند. انتخاب و ترکیب اطلاعات ژنتیکی کروموزوم‌های مناسب‌تر را حفظ می‌کند، اما این کروموزوم‌ها فقط نسبت به نسل فعلی مناسب‌تر هستند. این می‌تواند سبب شود الگوریتم خیلی سریع همگرا شود و مواد ژنتیکی بالقوه مفید (۱ یا صفر در مکان‌های خاص) را از دست بدهد. به عبارت دیگر، الگوریتم می‌تواند قبل از یافتن بهینه سراسری در یک بهینه محلی گیر کند. عملگر جهش با حفظ تنوع در جمعیت به محافظت در برابر این مشکل کمک می‌کند، اما همچنین می‌تواند سبب کندی همگرایی الگوریتم شود.

۲-۶. چرخه رولت

رویه ساده‌ای که در بخش قبل ارائه شد، پایه بیشتر کاربردهای الگوریتم ژنتیک است. جزئیاتی مانند اندازه جمعیت و احتمالات ترکیب و جهش وجود دارد که موفقیت الگوریتم اغلب به این جزئیات بستگی دارد. به عنوان یک مثال از یک الگوریتم ژنتیک ساده، فرض کنید $L = 8$ (طول رشته)، $n = 4$ (تعداد جمعیت) و $f(x)$ تابع برازش است. جمعیت اولیه که به طور تصادفی تولید شده؛ ممکن است به شرح جدول (۱) باشد:

جدول ۱. نمونه‌ای از انتخاب کروموزوم‌ها به عنوان پارامترهای مدل

برچسب کروموزوم	رشته کروموزومی
A	۰۰۰۰۰۱۱۰
B	۱۱۱۰۱۱۱۰
C	۰۰۱۰۰۰۰۰
D	۰۰۱۱۰۱۱۰

یک روش ساده برای اجرای انتخاب متناسب با تابع برازش، نمونه‌برداری

۲- روش کار

الگوریتم‌های ژنتیک نوعی الگوریتم بهینه‌سازی هستند که برای یافتن مقدار کمینه یک تابع هدف به کار می‌روند. الگوریتم‌های ژنتیک نشان‌دهنده یکی از شاخه‌های مطالعاتی به نام محاسبات تکاملی هستند که از فرآیندهای بیولوژیکی تولید مثل و انتخاب طبیعی برای حل «مناسب‌ترین» راه‌حل‌ها تقلید می‌کنند (Holland, 1975). این الگوریتم‌ها بسیار قوی‌تر و کارآمدتر از جستجوی تصادفی و الگوریتم‌های جستجوی فراگیر هستند و در عین حال نیازی به اطلاعات اضافی در مورد مسئله ندارند. این ویژگی به روش اجازه می‌دهد تا راه‌حل‌هایی برای مسائلی بیابند که سایر روش‌های بهینه‌سازی به دلیل عدم پایداری، مشتقات، غیرخطی بودن یا ویژگی‌های دیگر نمی‌توانند از عهده آن برآیند. از آنجایی که الگوریتم‌های ژنتیک برای شبیه‌سازی یک فرآیند بیولوژیکی طراحی شده‌اند، بسیاری از واژه‌های مورد استفاده در آن از علوم زیست‌شناسی گرفته شده که اجزای اصلی و مشترک در همه الگوریتم‌های ژنتیک هستند و می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۲-۱. تابع برازش

تابع برازش تابعی است که الگوریتم سعی در بهینه‌سازی آن دارد. تابع برازش هر راه‌حل بالقوه را آزمایش و کیفیت آن را مشخص می‌کند. تابع برازش یکی از محوری‌ترین بخش‌های الگوریتم است. در این تحقیق تابع برازش یا هدف $\Phi(p)$ با رابطه (۳) تعریف شده است:

$$\Phi(p) = \sum_{i=1}^N (g_{obs}(x_i) - g_{calc}(x_i, \mathbf{P}))^2 \quad (3)$$

\mathbf{P} بردار پارامترهای مدل و x_i نقاط برداشت داده‌ها است. کمینه شدن این تابع به این معنی است که مدل به دست آمده بهترین برازش را با داده‌های واقعی دارد.

۲-۲. جمعیتی از کروموزوم‌ها

واژه کروموزوم به یک مقدار یا مقادیر عددی اشاره دارد که نشان دهنده یک راه‌حل پیشنهادی برای مسئله‌ای است که الگوریتم ژنتیک سعی در حل آن دارد. هر حل پیشنهادی به صورت آرایه‌ای از مقادیر پارامتر کدگذاری می‌شود. اگر یک مسئله دارای ابعاد N_{par} باشد، معمولاً هر کروموزوم به عنوان یک آرایه با N_{par} عضو مانند $chromosome = [p_1, p_2, \dots, p_N]$ کدگذاری می‌شود که در آن هر p_i مقدار خاصی از پارامتر i امین است. یک رویکرد این است که هر مقدار پارامتر را به یک رشته بیت (توالی ۱ و ۰) تبدیل و سپس پارامترها مانند ژن‌ها از سر به انتها در یک رشته DNA برای ایجاد کروموزوم‌ها ضمیمه می‌شوند. الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند و به عنوان نسل اول (جمعیت اولیه) عمل می‌کند، آغاز می‌شود. سپس هر کروموزوم در جمعیت توسط تابع برازش ارزیابی می‌شود تا آزمایش شود که چگونه مساله موجود را حل می‌کند. اکنون عملگر انتخاب، برخی از کروموزوم‌ها را برای تولید مثل بر اساس توزیع احتمالی که کاربر تعریف می‌کند انتخاب می‌کند. هر چه کروموزوم مناسب‌تر

بدین معنا که کروموزوم‌هایی با تابع هدف کمتر (خطای کمتر) شانس بیشتری برای انتخاب دارند. کروموزوم‌ها بر اساس مقدار برازش (fitness) مرتب شده و بهترین آن‌ها انتخاب می‌شوند.

ث- عملگرهای ژنتیکی: ترکیب (Crossover) و جهش (Mutation)

ث-۱. ترکیب (Crossover): پس از انتخاب، فرآیند ترکیب بین کروموزوم‌های انتخاب شده اجرا می‌شود. در این روش، دو والد انتخاب شده و بخشی از اطلاعات ژنتیکی آن‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شود تا فرزندان جدیدی تولید شوند. این فرآیند باعث می‌شود که ویژگی‌های مفید کروموزوم‌های برتر به نسل بعد منتقل شود.

ث-۲. جهش (Mutation): برای حفظ تنوع ژنتیکی و جلوگیری از همگرایی زودرس به مینیمم‌های محلی، جهش بر روی کروموزوم‌ها اعمال می‌شود. در این الگوریتم، جهش به صورت تصادفی در چند نقطه از کروموزوم رخ داده و مقدار بیت‌های انتخابی معکوس (flip) می‌شود. این تغییرات جزئی به الگوریتم اجازه می‌دهند تا نواحی جدیدی از فضای جستجو را بررسی کند.

ج- به‌روزرسانی جمعیت و بررسی همگرایی

پس از اعمال ترکیب و جهش، جمعیت جدید جایگزین جمعیت اولیه می‌شود و فرآیند از مرحله محاسبه تابع هدف مجدداً تکرار می‌شود. این روند تا زمانی که شرط تعریف شده توقف برقرار شود ادامه پیدا می‌کند.

چ- شرط توقف

الگوریتم تا زمانی اجرا می‌شود که مقدار خطا که در این الگوریتم با رابطه (۴) تعریف شد، کمتر از مقدار آستانه (ϵ) شود.

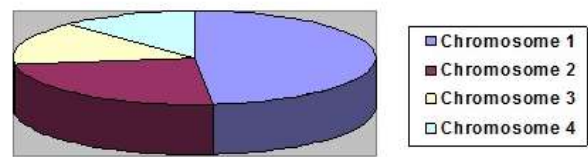
$$\sum \left(\frac{g_{obs} - g_{calc}}{g_{obs}} \right)^2 < \epsilon \quad (4)$$

ح- استخراج بهترین پاسخ و نمایش نتایج

پس از اتمام فرآیند تکاملی، بهترین کروموزوم انتخاب شده و مقادیر بهینه پارامترهای گسل استخراج می‌شوند. سپس پاسخ گرانی متناظر با این پارامترهای بهینه محاسبه و با داده‌های اولیه مقایسه می‌شود تا دقت مدل بررسی گردد. نمودارهای مقایسه‌ای بین داده‌های اولیه و مدل شبیه‌سازی شده ترسیم می‌شوند تا کیفیت تطابق مدل ارزیابی شود.

شکل (۳) فلوجارت اجرای این الگوریتم را نشان می‌دهد:

از چرخ رولت است (گلدبرگ ۱۹۸۹)، که از نظر مفهومی معادل دادن یک تکه از چرخ رولت دایره‌ای به هر فرد است که مساحتی برابر با برازش فرد دارد. چرخ رولت می‌چرخد، توپ روی یک تکه گوه‌ای شکل قرار می‌گیرد و فرد مربوطه انتخاب می‌شود (شکل ۲). به عنوان نمونه برای مثال بالا با $n = 4$ ، چرخ رولت چهار بار می‌چرخد. دو چرخش اول ممکن است کروموزوم‌های B و D را به عنوان والدین انتخاب کنند و دو چرخش دوم ممکن است کروموزوم‌های B و C را به عنوان والدین انتخاب کنند. این واقعیت که ممکن است A انتخاب نشود؛ فقط شانس قرعه کشی است. اگر چرخ رولت بارها بچرخد، میانگین نتایج به مقادیر مورد انتظار نزدیک-تر خواهد بود.



شکل ۲. چرخه رولت

در این پژوهش برای محاسبه پارامترهای هندسی گسل از روش الگوریتم ژنتیک با استفاده از چرخه رولت استفاده شده است. کد این الگوریتم در محیط Matlab نوشته شد. مراحل اجرا این الگوریتم به شرح زیر است:

الف- کدگذاری کروموزوم‌ها

ابتدا، جمعیتی متشکل از تعداد معینی کروموزوم به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود. هر کروموزوم شامل ۴ پارامتر اصلی یعنی زاویه شیب (α)، عمق از مرکز دیواره بالایی (h)، عمق سطح از مرکز دیواره پایینی (Z) و ضخامت گسل (t) است. این پارامترها به صورت دودویی و با ۱۶ بیت برای هر پارامتر کدگذاری شده‌اند. در مجموع، هر کروموزوم ۶۴ بیت دارد و به صورت یک رشته دودویی نمایش داده می‌شود. محدوده مقادیر ممکن برای هر پارامتر از پیش تعریف شده است و هر کروموزوم به‌طور تصادفی مقادیری اولیه می‌شود.

ب- مدل‌سازی گرانی (Forward Model):

مقدار بی‌هنجاری گرانی گسل بر اساس پارامترهای پیشنهادی کروموزوم محاسبه می‌شود.

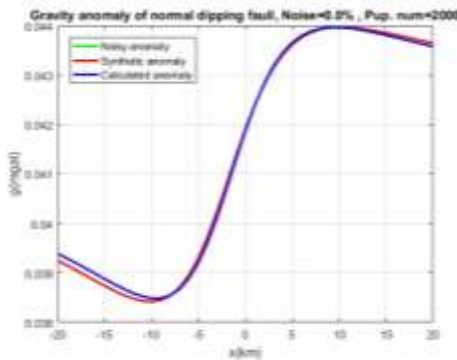
پ- محاسبه تابع هدف (ارزیابی شایستگی)

برای هر کروموزوم، مقدار پارامترهای مربوطه از قالب دودویی به مقادیر واقعی تبدیل می‌شود. سپس با استفاده از این پارامترها، پاسخ گرانی مدل محاسبه می‌شود. تابع هدف به‌صورت مجموع مربعات اختلاف بین داده‌های گرانی مشاهده شده و داده‌های گرانی محاسبه شده از مدل تعریف شده است. مقدار این تابع نشان‌دهنده میزان تطابق مدل با داده‌های واقعی است. هدف الگوریتم، کمینه کردن این مقدار است.

ت- انتخاب (Selection)

بعد از ارزیابی کروموزوم‌ها، فرآیند انتخاب به‌منظور گزینش کروموزوم‌های برتر برای تولید نسل بعدی انجام می‌شود. در این الگوریتم، روش چرخ رولت (Roulette Wheel) برای انتخاب افراد برتر استفاده می‌شود. در این روش، احتمال انتخاب هر فرد به مقدار شایستگی آن بستگی دارد؛

گرفته شده است. در شکل (۴) نمودار بی‌هنجاری گرانی این مدل ارائه شده است. نمودار قرمز رنگ مربوط به داده‌های حاصل از مدل مصنوعی بدون نوفه و نمودار آبی رنگ نشان دهنده پاسخ گرانی گسل پس از تخمین پارامترها با روش الگوریتم ژنتیک است. ملاحظه می‌شود که انطباق خوبی بین دو نمودار وجود دارد. در این نمودار تعداد جمعیت برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. این انطباق پس از ۲۵ بار تکرار حاصل شده است.

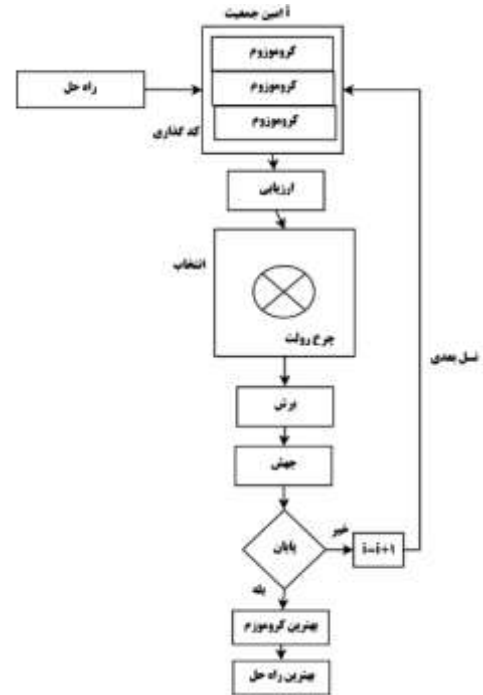


شکل ۴. اثر بی‌هنجاری گرانی حاصل از داده‌های بدون نوفه برای مدل گسل نازک شیبدار نرمال مدفون با پارامترهای جدول (۱). تعداد جمعیت ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

این روند برای مدل مصنوعی گسل با مشخصات فوق با تعداد جمعیت ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ نیز انجام شد و مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با الگوریتم و تعداد تکرارها برای همگرایی در جدول (۳) آورده شده‌اند. مطابق این جدول در همه موارد پارامترها با خطای کمتر از ۱ درصد به دست آمده‌اند. خطای ناچیز مذکور ناشی از محاسباتی است که در حین اجرای الگوریتم روی می‌دهد. خطای تخمین ضخامت گسل در همه موارد صفر است و نسبت به سایر پارامترها با دقت بیشتری به دست آمده است که به دلیل رابطه خطی این کمیت با داده‌هاست. در هر سه مورد تعداد جمعیت انتخابی، تعداد دفعات تکرار الگوریتم کوچک و سرعت همگرایی بالاست. با افزایش جمعیت، به دلیل افزایش تعداد جهش‌ها تعداد دفعات تکرار بیشتر شده است.

جدول ۳: تخمین پارامترها و خطای تخمین برای گسل نرمال با داده‌های بدون نوفه با الگوریتم ژنتیک

Parameters	Population number = 2000 Iteration=25		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	75.32	0.43
z (km)	8	8.02	0.33
h (km)	12	12.01	0.09
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 4000 Iteration =32		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	74.98	0.03
z (km)	8.00	8.06	0.72
h (km)	12	12.13	0.59
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 8000		



شکل ۳. الگوریتم ژنتیک با چرخ رولت (زهرایی و حسینی، ۱۳۹۳)

این الگوریتم بر روی داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه‌های تصادفی اعمال می‌شود. اعتبار روش بر روی داده‌های گرانی واقعی بررسی شده است.

۳. کاربرد الگوریتم ژنتیک بر روی داده‌های گرانی مدل مصنوعی

در این بخش، ابتدا با در نظر گرفتن پارامترهای گسل نرمال، داده‌های مصنوعی تولید و به این داده‌ها نوفه گاوسی سفید اضافه می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مدل گسل با داده‌های بدون و با نوفه تخمین زده می‌شود. در ابتدای اجرای الگوریتم لازم است بر اساس اطلاعات اولیه، شامل اطلاعات زمین‌شناسی، یافته‌های پژوهش‌های پیشین و مشاهدات میدانی، برای پارامترها بازه‌هایی انتخاب شوند. محدوده بازه انتخابی در سرعت و دقت تخمین پارامترها موثر است.

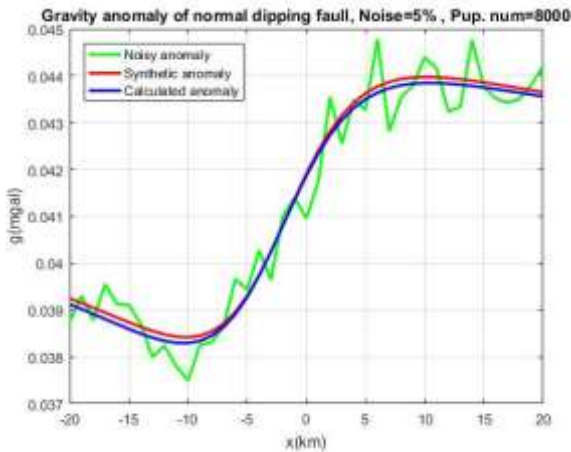
۳-۱. گسل نرمال

برای بررسی توانمندی الگوریتم در شناسایی ساختارهای زیرسطحی مدل مصنوعی گسل نرمال شکل (۱) با مشخصات مذکور در جدول (۲) تهیه شد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و هندسی گسل

پارامترها	مقدار	واحد
تباين چگالی (σ)	۵۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب
ضخامت گسل (t)	۱	کیلومتر
عمق بالایی (z)	۸	کیلومتر
عمق پایینی (h)	۱۲	کیلومتر
زاویه شیب (α)	۷۵	درجه

طول پروفیل برابر ۴۰ کیلومتر و فاصله نقاط برداشت ۱ کیلومتر در نظر



شکل ۷. بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با ۵٪ نوفه تصادفی یک گسل نازک شیبدار نرمال. با پارامترهای مندرج در جدول (۱) با تعداد جمعیت ۸۰۰۰.

نتایج تخمین پارامترها با داده‌های با نوفه‌های ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول ۴: تخمین پارامترها و خطای تخمین برای گسل نرمال با داده‌ها با نوفه ۵ درصد با الگوریتم ژنتیک

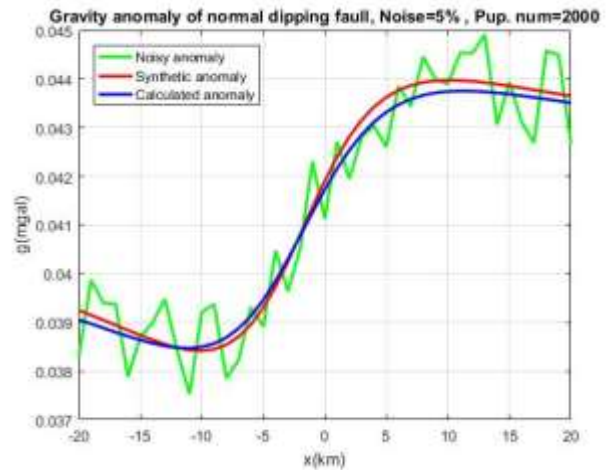
Parameters	Population number = 2000 Iteration=25		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	76.40	1.88
z (km)	8	8.31	3.85
h (km)	12	12.50	4.17
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 4000 Iteration =32		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	76.87	2.50
z (km)	8.00	7.82	2.24
h (km)	12	11.92	0.61
t (km)	2.00	1.99	0.00
Parameters	Population number = 8000 Iteration =41		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	77.01	2.69
z (km)	8.00	8.45	5.62
h (km)	12	12.14	1.67
t (km)	2.00	2.00	0.00

جدول ۵: تخمین پارامترها و خطای تخمین برای گسل نرمال با داده‌ها با نوفه ۱۰ درصد با الگوریتم ژنتیک

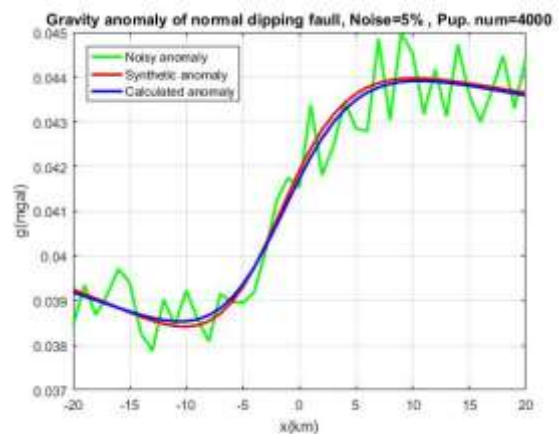
Parameters	Population number = 2000 Iteration=25		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	75.25	0.33
z (km)	8	7.71	3.64
h (km)	12	12.10	0.9
t (km)	2.00	2.01	0.1
Parameters	Population number = 4000 Iteration =32		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	72.20	3.75
z (km)	8.00	8.71	8.95
h (km)	12	13.09	9.08
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 8000 Iteration =41		
	Real	Computed	Error (%)

	Iteration =41		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	75	75.35	0.46
z (km)	8.00	8.02	0.22
h (km)	12	12.03	0.29
t (km)	2.00	1.99	0.01

در گام بعد به داده‌های مدل مذکور ۵ درصد نوفه گاوسی اضافه و اثر گرانی آن محاسبه شد (شکل ۵). در این حالت پس از ۳۲ بار تکرار الگوریتم با جمعیت ۲۰۰۰ تایی، همگرایی ایجاد و نمودار مربوط به داده‌های مصنوعی و نمودار حاصل از پارامترهای تخمینی تقریباً منطبق شده‌اند. شکل‌های (۶) و (۷) نیز به همین ترتیب، با نوفه ۵ درصد و با تعداد جمعیت به ترتیب ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ به دست آمده‌اند.



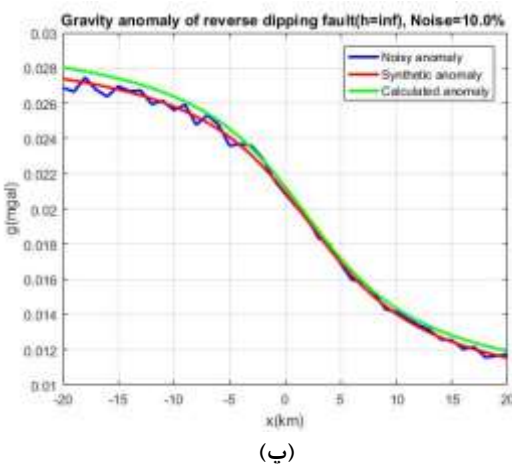
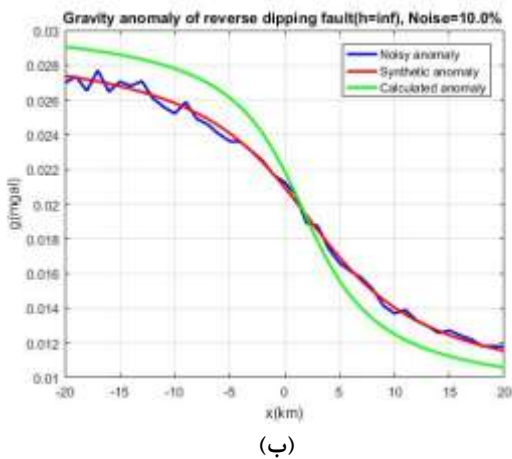
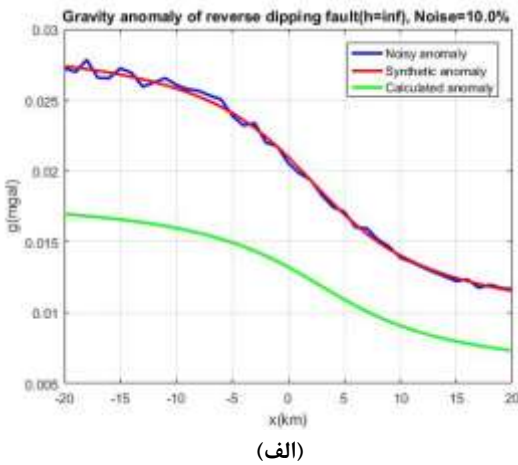
شکل ۵. بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با ۵٪ نوفه تصادفی یک گسل نازک شیبدار نرمال. با پارامترهای مندرج در جدول (۱) با تعداد جمعیت ۲۰۰۰.



شکل ۶. بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با ۵٪ نوفه تصادفی یک گسل نازک شیبدار نرمال. با پارامترهای مندرج در جدول (۱) با تعداد جمعیت ۴۰۰۰.

شیبدار معکوس مدفون. با پارامترهای مندرج در جدول ۶

برای تعیین پارامترهای گسل، روش الگوریتم ژنتیک با داده‌های بدون و با نوفه ۱۰ درصد اجرا شد. برای نشان دادن روند همگرایی در این الگوریتم، نمودارهای حاصل از بی‌هنجاری (با و بدون نوفه) و نمودار پیش‌بینی حاصل از الگوریتم در تکرارهای ۱، ۵ و ۱۰ در شکل (۹) آورده شده است.



شکل ۹. روند همگرایی شدن پاسخ گسل شیب‌دار معکوس با پارامترهای مندرج در جدول ۶: الف- در تکرار اول، ب- در تکرار پنجم و پ- در تکرار دهم

α (deg)	75	68.9	8.12
z (km)	8	7.60	5.00
h (km)	12	10.97	8.50
t (km)	2.00	2.00	0.00

ملاحظه می‌شود که با داده‌های با نوفه ۵ درصد همه پارامترها با خطای کمتر از ۵ درصد به دست آمده‌اند. چون افزایش جمعیت در اجرای الگوریتم منجر به بزرگ شدن فضای جستجو می‌شود، برای جمعیت‌های بزرگ، تعداد دفعات تکرار الگوریتم برای رسیدن به همگرایی بیشتر بوده است؛ با این حال تاثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت پارامترهای تخمینی نداشته است. همچنین با داده‌های با ۱۰ درصد نوفه نیز، بهترین نتیجه برای تخمین پارامترها با تعداد جمعیت ۲۰۰۰ حاصل شده است که در این مورد خطای تخمین، کمتر از ۴ درصد بوده است. در این وضعیت به نظر می‌رسد به دلیل افزایش درصد نوفه، تعداد کمینه‌های محلی افزایش یافته و افزایش تعداد جمعیت شانس گرفتار شدن الگوریتم در کمینه محلی را افزایش داده و پارامترها با خطای بیشتری به دست آمده‌اند. با هر دو دسته داده با درصد نوفه‌های مختلف، کمترین خطای تخمین مربوط به پارامتر ضخامت گسل بوده است. این موضوع به دلیل ماهیت خطی این پارامتر در حل مساله وارون برای این نوع بی‌هنجاری است.

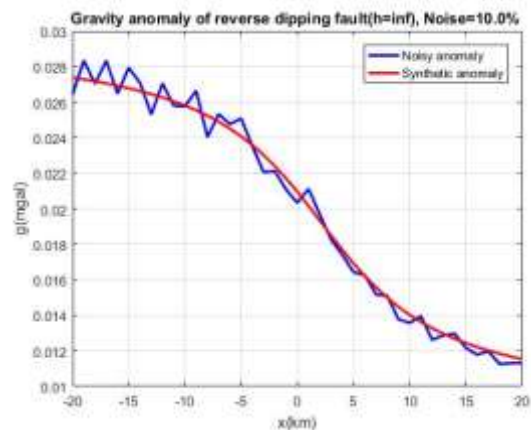
۲-۳. مدل مصنوعی گسل معکوس با یک لایه با عمق نامحدود

شکل ۱-ب پاسخ گرانی گسل با یک لایه با عمق نامحدود ($h \rightarrow \infty$)، با داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه را نشان می‌دهد. مشخصات گسل مدل-سازی شده در جدول (۶) آورده شده است. در این مدل، زاویه شیب بیشتر از ۹۰ درجه در نظر گرفته شده و بنابراین مدل مورد مطالعه، گسل معکوس است.

جدول ۶: مشخصات فیزیکی و هندسی گسل معکوس

زاویه شیب (α)	عمق بالایی (z)	ضخامت (t)	تباين چگالی (σ)
105°	8 km	1km	500 kg/m^3

نمودار پاسخ گرانی این بی‌هنجاری با پارامترهای مندرج در جدول (۶) بدون نوفه (نمودار قرمز) و با نوفه ۱۰ درصد (نمودار آبی) در امتداد پروفیلی به طول ۴۰ کیلومتر در شکل (۸) آورده شده است.



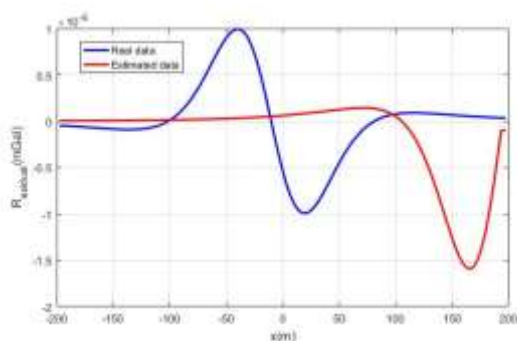
شکل ۸. بی‌هنجاری گرانی مصنوعی با ۱۰٪ نوفه تصادفی یک گسل نازک

ناحیه‌ای را نشان می‌دهد (Pawlowski, 1994; عباسی و همکاران، ۲۰۱۶). میانگین متحرک دوم در امتداد پروفایل‌ها عبارت است از:

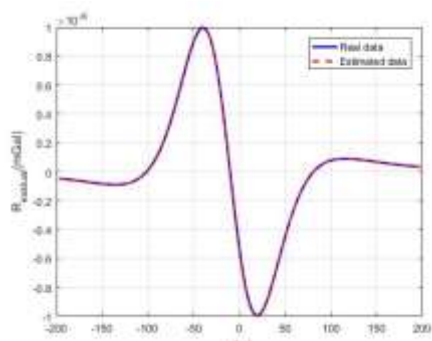
$$R_2(x_j, z, s) = \frac{6g(x_j) - 4g(x_j + s) - 4g(x_j - s) + g(x_j + 2s) + g(x_j - 2s)}{4} \quad (6)$$

که در آن s طول پنجره است.

برای نمونه، این فیلتر بر روی داده‌های مدل مصنوعی گسل معکوس اعمال و پس از آن پارامترهای مدل محاسبه شدند. در شکل (۱۰)، نمودارهای با رنگ آبی و قرمز به ترتیب مربوط به داده‌های فیلتر شده واقعی و داده‌های تخمینی حاصل از الگوریتم در تکرار اول (۱۰-الف) و هفتم (۱۰-ب) است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نمودار پاسخ گرانی مدل گسل معکوس پس از اعمال فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم، الف- در تکرار اول، ب- پس از همگرایی بهینه در تکرار هفتم

چنان که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، پس از هفت تکرار، با سرعت همگرایی بالا (یا تعداد دفعات کمتر اجرای الگوریتم)، برازش کامل بین دو نمودار ایجاد شده است

۵. اعمال الگوریتم ژنتیک بر روی داده گرانی واقعی

داده واقعی گرانی مورد استفاده در این پژوهش، از بخشی از مسیر گسل کلاته خبیج برداشت شده است. در این پژوهش پس از بازدید صحرایی از منطقه مورد نظر و با استفاده از اطلاعات تکتونیکی موجود، امتداد گسل به صورت شمال شرقی-جنوب غربی تعیین و بر این اساس ۸ پروفیل گرانی در راستای عمود بر گسل طراحی شد. برای برداشت داده‌های گرانی روی هر پروفیل ۱۱ ایستگاه به فاصله ۵۰ متری اندازه‌گیری انجام شد. داده‌های گرانی منطقه مورد بررسی در محدوده‌ای بین عرض‌های ۴۰۵۵۸۹۳ و ۴۰۵۶۷۵۷ و طول‌های ۳۴۵۸۷۰ و ۳۴۶۶۷۰ در سیستم متریک UTM در زون ۴۰S با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 برداشت شد.

نتایج با داده‌های با نوفه ۱۰ درصد برای این گسل معکوس در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷. پارامترهای به دست آمده از داده‌های با نوفه ۱۰ درصد حاصل از گسل معکوس مدل‌سازی شده

Parameters	Population number = 2000 Iteration=25		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	107	1.9
z (km)	8	8	0.00
t (km)	2	2.02	0.1
Parameters	Population number = 4000 Iteration =32		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	106.10	1.00
z (km)	8	8	0.00
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 8000 Iteration =41		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	105.60	0.00
z (km)	8	8.00	0.00
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 2000 Iteration=25		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	107	1.9
z (km)	8	8	0.00
t (km)	2	2.02	0.1
Parameters	Population number = 4000 Iteration =32		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	106.10	1.00
z (km)	8	8	0.00
t (km)	2.00	2.00	0.00
Parameters	Population number = 8000 Iteration =41		
	Real	Computed	Error (%)
α (deg)	105	105.60	0.00
z (km)	8	8.00	0.00
t (km)	2.00	2.00	0.00

۴. کاربرد روش میانگین متحرک مرتبه دوم^۱ برای هموارسازی نمودار داده‌ها

از روش میانگین متحرک مرتبه دوم برای هموار سازی نمودار داده‌ها می‌توان بهره برد. این تکنیک کمک می‌کند تا روش‌های وارون کمتر در کمینه‌های محلی به دام بیفتند و در نتیجه با سرعت همگرایی بیشتر به جواب قابل اطمینان‌تری برسند (گریفین، ۱۹۴۹؛ اسا و موشی، ۲۰۱۹). به این منظور در این مقاله از این تکنیک بر روی داده‌های گسل مورد نظر استفاده شد و پس از آن پارامترها به دست آمد. اجرای تکنیک میانگین متحرک مرتبه دوم به شرح زیر است:

بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده در امتداد یک پروفیل به صورت زیر است:

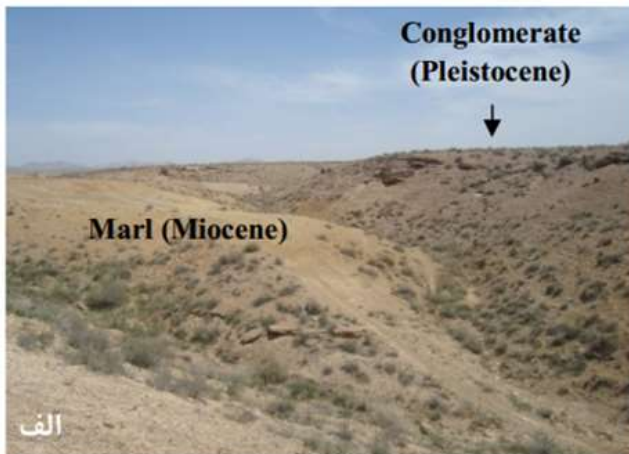
$$Bouguer(x_j) = \quad (5)$$

$R_{residual}(x_j, z) + R_{regional}(x_j)$, $j = 0, 1, 2, 3, \dots, N$
که $Bouguer$ نشان‌دهنده گرانی بوگه یا داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده، $R_{residual}(x_j, z)$ بی‌هنجاری گرانی باقیمانده ناشی از ساختار گسل دوبعدی است که با رابطه (۵) تعریف می‌شود و $R_{regional}(x_j)$ بی‌هنجاری

¹ Second moving average

بر روی تصویر ماهواره‌ای (گوگل ارث) به همراه سایر گسل‌ها (راه اصلی به رنگ زرد دیده می‌شود)

مطالعات و مشاهدات ریخت‌شناسی در طول این قطعه نشان می‌دهد که این گسل واحدهای ماری میوسن را در کنار کنگلومرای پلیستوسن قرار داده است (شکل ۱۳-الف). بر اثر عملکرد این گسل، مارن‌های میوسن در طول این خطواره گسلی رخنمون یافته و کنگلومرای پلیستوسن دچار خردشدگی شده است (شکل ۱۳-ب). این گسل با عبور از حاشیه جنوبی شهر کلاته‌خیج، اختلاف توپوگرافی مشخصی که ایجاد کرده، مرز واضحی بین شهر کلاته‌خیج و باغستان‌های جنوب آن به وجود آورده، به طوری که اختلاف ارتفاع طرفین گسل قابل ملاحظه است.



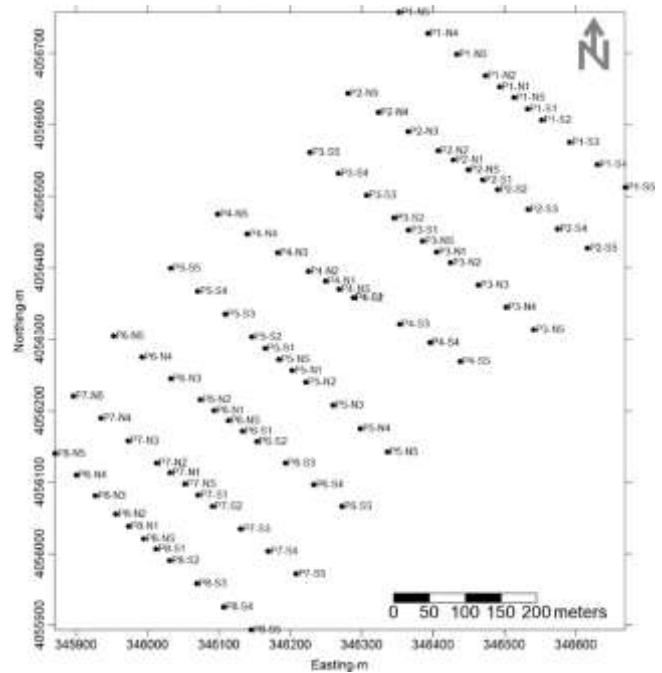
شکل ۱۳. واحدهای سنگی میوسن و پلیستوسن در اطراف گسل کلاته‌خیج

این قطعه با عملکرد معکوس خود سبب بالا آمدن بخش جنوب خاوری نسبت به بخش شمال باختری شده است. جاویدفخر و همکارانش با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقمی شده (۱:۲۰,۰۰۰) میزان جابجایی قائم ایجاد شده در طرفین این گسل را حدود ۱۲ متر تخمین زده‌اند (Javidfakhr et al., 2011).

۵-۲. بی‌هنجاری گرانی

هدف نهایی از برداشت‌های گرانی‌سنجی دستیابی به مقادیری است که بی‌هنجاری بوگه نامیده می‌شود. با عنایت به این که مقادیر داده‌های

شبکه نسبتاً منظم داده‌های گرانی از ۸ پروفیل به فاصله ۱۰۰ متری و حدود ۸۸ ایستگاه گرانی تشکیل شده است (شکل ۱۱).



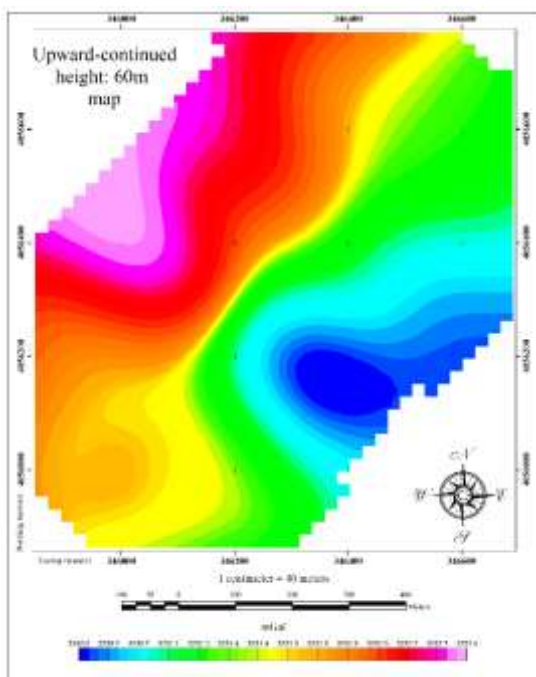
شکل ۱۱. شبکه برداشت داده‌های گرانی در محدوده گسل کلاته‌خیج

۵-۱. گسل کلاته‌خیج

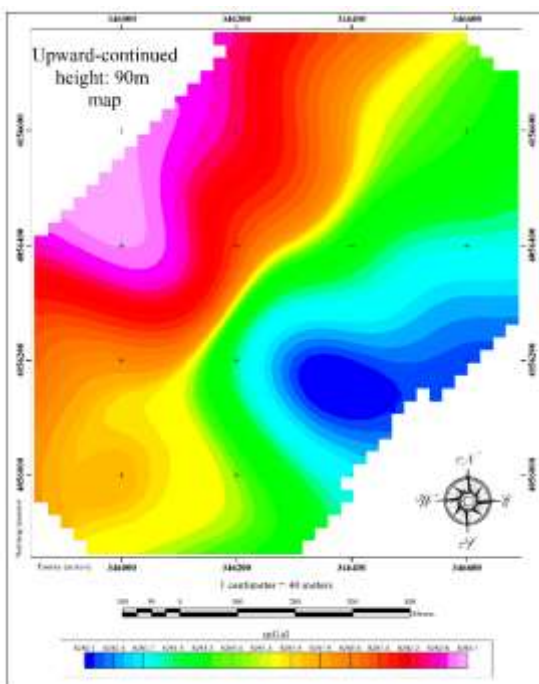
گسل کلاته‌خیج توسط برخی پژوهشگران به عنوان قطعه‌ای از گسل خبیج نامیده شده است که دو قطعه دیگر آن سیاهکوه و ریزو می باشند. این قطعه با روند شمال خاوری- جنوب باختری، در جنوب باختری شهر کلاته‌خیج قرار گرفته است. قطعه کلاته‌خیج در تصاویر دورسنجی به صورت خطواره مشخصی دیده می‌شود که از شمال خاوری سیاهکوه آغاز شده و تا شمال خاوری شهر کلاته‌خیج ادامه می‌یابد. مطالعه تصاویر دورسنجی و مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که این گسل رسوبات کواترنری را بریده و کانالهای رودخانه‌ای را به صورت چپ‌بر جابجا کرده است (شکل ۱۲). جاویدفخر و همکاران بر اساس بازسازی کانال‌های جابجا شده، حدود 400 ± 50 متر جابجایی چپ‌بر را توسط این گسل شناسایی نموده‌اند (Javidfakhr et al 2011a).



شکل ۱۲. نقشه موقعیت گسل کلاته‌خیج در جنوب غرب شهر کلاته‌خیج



(الف)

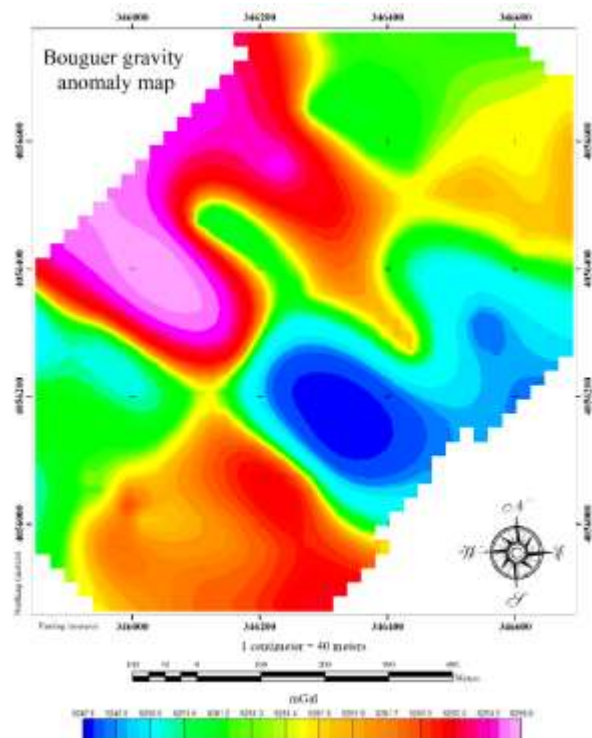


(ب)

شکل ۱۵. نقشه گسترش بی‌هنجاری گرانی به سمت بالا (فراسو) و امتداد گسل کلاته خبیج؛ (الف) ارتفاع ۶۰ متری (ب) ارتفاع ۹۰ متری.

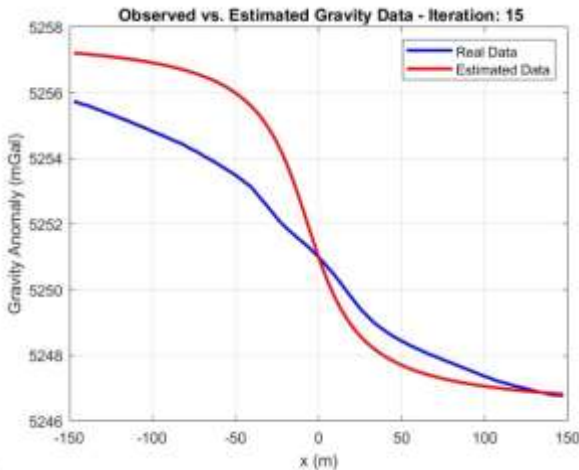
برای بررسی وضعیت گسل مذکور، در راستای عمود بر امتداد گسل چندین پروفیل تهیه شد که اثر گرانی یکی از آن‌ها در شکل (۱۶) ارائه شده است. برای تخمین داده‌ها و نیز تعیین پارامترهای گسلی که در نتیجه آن چنین اثر گرانی ظاهر شده است از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

مزاحم و نوفه‌ها از داده‌های برداشت حذف شده است، مقدار بی‌هنجاری بوگه تابعی تغییرات ساختارها و نیز توزیع جرمی زیرسطحی است که به صورت اختلاف چگالی سنگ‌ها و بزرگی و حجم توده‌ها یا ساختارها است. بدین ترتیب با مقدار بی‌هنجاری بوگه می‌توان اهدافی را شناسایی کرد که دارای اختلاف چگالی مشخص با سنگ‌های میزبان اطراف خود داشته و حجم آن‌ها نیز قابل توجه بوده و بتوان مقدار شتاب گرانی حاصل را با دستگاه گرانی‌سنج ثبت کرد. لازم به ذکر است که اثر تغییرات اختلاف چگالی روی شدت بی‌هنجاری بوگه بسیار بیشتر از اثر تغییرات روی سایر پارامترهای هدف مورد مطالعه است. پس از برداشت داده‌های گرانی و اعمال تصحیحات لازم روی داده‌ها، نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه کامل تهیه شده است (شکل ۱۴).

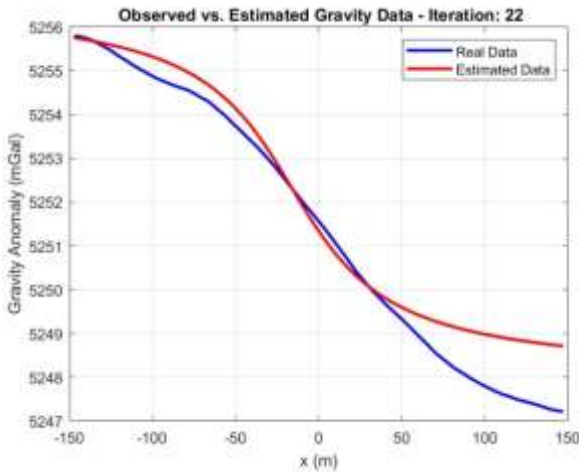


شکل ۱۴. نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه نسبی در محدوده گسل کلاته خبیج؛ امتداد شمال شرق - جنوب غرب گسل به خوبی دیده می‌شود.

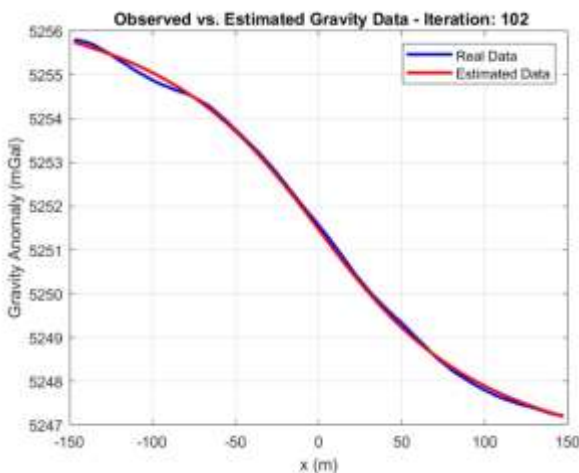
برای تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای از بی‌هنجاری بوگه از روش‌های مرسوم سطح روند و گسترش میدان استفاده شد. این نقشه‌ها یکدیگر را تایید کرده و با ساختار منطقه نیز هماهنگ است در شکل (۱۵) دو نمونه از تصویر تهیه شده ارائه شده است. در نقشه‌های بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده حاصل از روند سطحی و گسترش به سمت بالا به خوبی روند گسل در جهت شمال شرق - جنوب غرب مشخص است.



(الف)



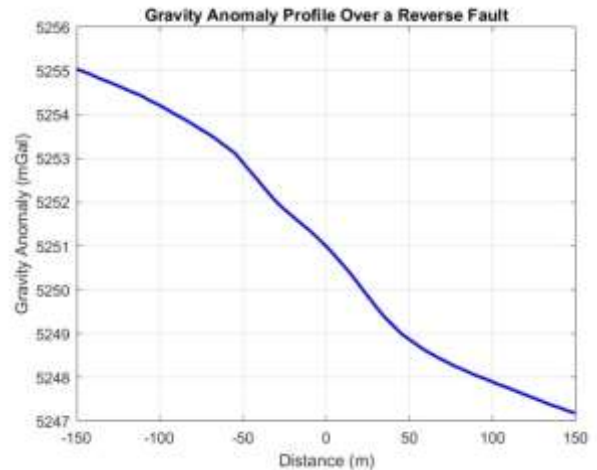
(ب)



(پ)

شکل ۱۷. نمودارهای برازش داده تخمینی به روش الگوریتم ژنتیک با تکرارهای مختلف، پس از الف: ۱۵ تکرار، ب: ۲۲ تکرار، پ: ۱۰۲ تکرار

در این تحقیق فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم بر روی داده‌های واقعی اعمال شد و پس از کاربست الگوریتم ژنتیک بر روی داده‌های فیلتر شده، پارامترهای گسل مطابق جدول (۹) به دست آمدند. نمودار داده‌های



شکل ۱۶. بی‌هنجاری گرانی بوگه در راستای پروفیل شمال غرب به جنوب شرق

ابتدا تعداد جمعیت ۱۲۰۰۰ در نظر گرفته شد و با این تعداد حجم و زمان محاسبه پارامترها توسط الگوریتم بالا بود. با آزمون مقادیر کمتر برای جمعیت و ملاحظه میزان همگرایی نمودار حاصل از الگوریتم و نمودار داده‌های واقعی، مشخص شد که با در نظر گرفتن تعداد ۴۰۰۰ برای جمعیت نیز همگرایی به خوبی روی می‌دهد. ضمن این که سرعت محاسبه پارامترها نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافت. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی برای پارامترها بازه اولیه مناسب تعریف شد. در این بخش با توجه به اطلاعات قبلی مقدار چگالی برای لایه ۲/۱۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب منظور شد. شرط توقف تکرار الگوریتم، کمتر شدن مجموع مربعات خطای تخمین پارامترها از 10^{-10} لحاظ شد. به این ترتیب مقدار K با این الگوریتم ۳/۸۹ میلی‌گال به دست آمد و مقدار ضخامت لایه و سایر پارامترهای گسل محاسبه شد که در جدول (۸) ارائه شده است. شکل (۱۷) نمودارهای برازش داده تخمینی با تکرارهای مختلف الگوریتم پس از الف: ۱۵ تکرار، ب: ۲۲ تکرار، پ: ۱۰۲ تکرار نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تکرار سی و هشتم، برازش نسبتاً خوبی بین نمودارهای داده‌های واقعی و تخمینی وجود دارد.

جدول ۸. پارامترهای به دست آمده با الگوریتم ژنتیک برای گسل در تکرار ۱۰۲

عمق (متر)	ضخامت (متر)	شیب (درجه)
۹۱	۱۳۵/۳۴	۹۶/۲۳

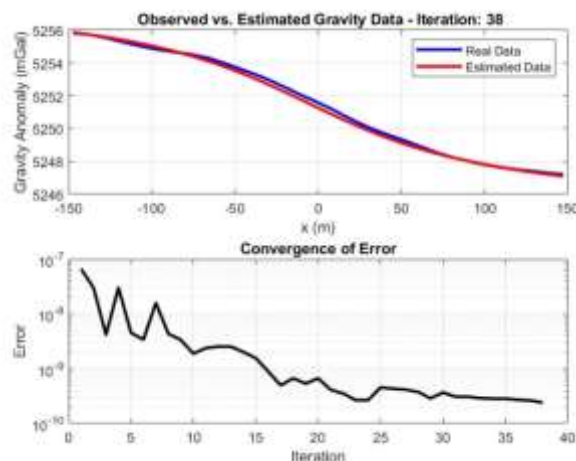
گسل به تعداد ۸۸ ایستگاه داده به فاصله ۵۰ متری برداشت شد. پس از تصحیح داده‌ها و تهیه نقشه بی‌هنجاری گرانی بوگه، پردازش لازم به روش‌های مختلف صورت گرفت. به روش الگوریتم ژنتیک برای تحلیل داده استفاده شد. ابتدا روی داده گرانی حاصل از گسل مدل مصنوعی این کار انجام شد. سپس این روش بر روی داده‌های گرانی منطقه مورد مطالعه-گسل کلاته خبیج به کار برده شدند. برای بررسی شیب گسل چندین پروفیل عمود بر راستای گسل تهیه شد. از آنجایی که نقشه‌های حاصل از تفکیک بی‌هنجاری‌ها هیچ‌گونه اطلاعات کمی در مورد پارامترهای هندسی (مانند عمق و شیب) و فیزیکی (مانند چگالی) بی‌هنجاری به دست نمی‌دهند، لذا جهت تعیین این پارامترها، روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. به این ترتیب شیب گسل ۹۶/۲ درجه و عمق لایه بالایی گسل از مرکز آن ۹۱/۰۶ متر تخمین زده شد. ضخامت لایه حدود ۱۳۵/۳ متر برآورد شد. با توجه به شواهد زمین‌شناسی صحرایی (قطع-شدگی رسوبات کواترن) و همچنین اطلاعات حاصل از داده‌های گرانی-سنجی و مدل‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که گسل کلاته خبیج یک گسل فعال بوده و مشخصه‌ی آن به صورت $N45E/83.8SE$ است. با عنایت به مشاهدات صحرایی و نیز تغییرات موجود روی رسوبات کواترن به نظر می‌رسد بررسی بیشتر روی مکانیزم این گسل با روش‌های مختلف مثل روش لرزه‌نگاری انعکاسی و رادار نفوذی به زمین ضروری باشد تا علاوه بر شناخت بیشتر امکان لرزه‌خیزی آن مورد بحث قرار گیرد.

منابع

زهرایی، بنفشه. حسینی، سید موسی. (۱۳۹۳). الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی مهندسی. چاپ دوم. تهران. انتشارات گوتنبرگ.

- Abdelrahman, E.-S. M., & Essa, K. S. (2013). A new approach to semi-infinite thin slab depth determination from second moving average residual gravity anomalies. *Exploration geophysics*, 44(3), 185-191.
- Abdelrahman, E., Bayoumi, A., & El-Araby, H. (۱۹۸۹). Dip angle determination of fault planes from gravity data. *Pure and Applied Geophysics*, 130, 735-742.
- Abdelrahman, E., & Essa, K. (2015). Three least-squares minimization approaches to interpret gravity data due to dipping faults. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 427-438.
- Abdelrahman, E., Essa, K., & Abo-Ezz, E. (2013). A least-squares window curves method to interpret gravity data due to dipping faults. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(2), 025003.
- Abdelrahman, E., Radwan, A., Issawy, E., El-Araby, H., El-Araby, T., & Abo-Ezz, E. (1999). Gravity interpretation of vertical faults using correlation factors between successive least-squares residual anomalies. Paper presented at the Mining Pribram Symp. on Mathematical Methods in Geology.
- Araffa, S. A. S., Sabet, H. S., & Gaweish, W. R. (2015). Integrated geophysical interpretation for delineating the structural elements and groundwater aquifers at central part of Sinai

باقیمانده در تکرار در ۳۸ الگوریتم ژنتیک مطابق شکل (۱۸) است:



شکل ۱۸. نمودارهای داده‌های واقعی گسل (آبی)، نمودار حاصل از روش الگوریتم ژنتیک (قرمز) پس از کاربست فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم، در تکرار ۳۸ و نمودار همگرایی داده‌های واقعی و تخمینی (نمودار پایینی، سیاه رنگ)

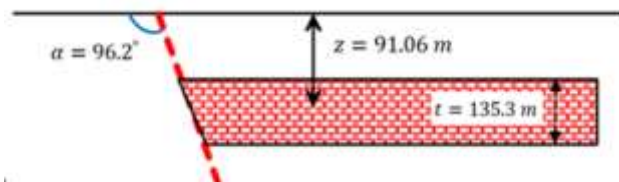
ملاحظه می‌شود پس از کاربست فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم، همگرایی با تعداد دفعات به مراتب کمتر الگوریتم روی داده است.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک بر روی داده‌های واقعی گسل، پس از اعمال فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم در جدول (۹) آورده شده است.

جدول ۹. پارامترهای به دست آمده با الگوریتم ژنتیک برای گسل پس از اعمال فیلتر میانگین متحرک مرتبه دوم، در تکرار ۳۸

عمق (متر)	ضخامت (متر)	شیب (درجه)
۹۱	۱۳۵/۲۷	۹۶/۲۱

شکل نهایی یا مدل خروجی گسل مستخرج از روش در شکل (۱۹) آورده شده است:



شکل ۱۹. مدل خروجی گسل مستخرج از روش الگوریتم ژنتیک

۶. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به منظور تجزیه و تحلیل گسل کلاته خبیج با استفاده از الگوریتم ژنتیک روی داده‌های گرانی برداشتی در محدوده از این گسلی بوده است. در بررسی‌های صحرایی امتداد گسل به صورت شمال-شرقی-جنوب غربی تشخیص داده شد. روی هشت پروفیل عمود بر روند

- Margin, case study of the Tajerouine Area (Northern Tunisian Atlas). *J Geol Geophys*, 8 (۱)
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press google schola, 2, 29-41 .
- Javidfakhr, B., Bellier, O., Shabanian, E., Siame, L., Léanni, L., Boulès, D., & Ahmadian, S. (2011). Fault kinematics and active tectonics at the southeastern boundary of the eastern Alborz (Abr and Khij fault zones): Geodynamic implications for NNE Iran. *Journal of Geodynamics*, 52(3-4), 290-303 .
- Kaftan, I. (201). Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm. *Acta Geophysica*, 65, 627-634 .
- Lelièvre, P. G., Farquharson, C. G., & Hurich, C. A. (2012). Joint inversion of seismic traveltimes and gravity data on unstructured grids with application to mineral exploration. *Geophysics*, 77(1), K1-K15 .
- Osman, O., & Alhora, A. M. (2015). Modeling of gravity anomalies due to 2D geological structures using Genetic algorithm. *Electrica*, 15(2), 1929-1936 .
- Pace, F., Santilano, A., & Godio, A. (2019). Particle swarm optimization of 2D magnetotelluric data. *Geophysics*, 84(3), E125-E141 .
- Pánisová, J., & Pašteka, R. (2009). The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39(3), 237-254 .
- Rosid, M. S., & Siregar, H. (2017). Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal vertical diagonal maxima (HVDM) method: A comparative study. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Sarlak, B., & Aghajani, H. (2017). Archaeological investigations at Tepe Hissar-Damghan using Gravity and Magnetism methods. *Journal of Research on Archaeometry*, 2(2), 19-34 .
- Schultz, R. (2019). Introduction to geologic structural discontinuities. *Geologic Fracture Mechanics*, 1-26 .
- Shaw, R., & Srivastava, S. (2007). Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data. *Geophysics*, 72(2), F75-F83 .
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., & Keys, D. (1976). *Applied geophysics* cambridge university press. London. 860pp .
- Baker, D.W. and Carter, N.L., 1972, Seismic velocity anisotropy calculated for ultramafic minerals and aggregates, in H.C. Heard, I.V. Borg, N.L. Carter, and C.B. Raleigh, eds., *Flow and fracture of rocks*, American Geophysical Union Geophysical Monographs 16, 157-166.
- Castagna, J.P., 1993, *Petrophysical imaging using AVO: The Leading Edge*, 12, 172-179.
- Peninsula, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 105, 93-106 .
- Assaad, F. A., & Assaad, F. A. (2009). Surface geophysical petroleum exploration methods. *Field Methods for Petroleum Geologists: A Guide to Computerized Lithostratigraphic Correlation Charts Case Study: Northern Africa*, 21-23 .
- Babaei, M., & Hosseini Pilangorgi, S. M. (2024). Estimation of conductive and non-conductive spherical geometrical parameters as a model of unexploded ordnance with electromagnetic induction data using genetic algorithm. *Iranian Journal of Geophysics*, 18(5), 67-82 .
- Biswas, A., Mandal, A., Sharma, S., & Mohanty, W. (2014). Delineation of subsurface structures using self-potential, gravity, and resistivity surveys from South Purulia Shear Zone, India: Implication to uranium mineralization. *Interpretation*, 2(2), T103-T110 .
- Brandes, C., & Tanner, D. C. (2020). Fault mechanics and earthquakes. In *Understanding Faults* (pp. 11-80): Elsevier.
- Chakravarthi, V., Malleth, K., & Ramamma, B. (2017). Basement depth estimation from gravity anomalies: two 2.5 D approaches coupled with the exponential density contrast model. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(2), 303-315 .
- Cho, Y., Cao, Y., Zagayevskiy, Y., Wong, T., & Munoz, Y. (2020). Kriging-based monitoring of reservoir gas saturation distribution using time-lapse multicomponent borehole gravity measurements: Case study, Hastings Field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190, 107054 .
- Deng, Y., Chen, Y., Wang, P., Essa, K. S., Xu, T., Liang, X., & Badal, J. (2016). Magmatic underplating beneath the Emeishan large igneous province (South China) revealed by the COMGRA-ELIP experiment. *Tectonophysics*, 672, 16-23 .
- Essa, K. S. (2013). Gravity interpretation of dipping faults using the variance analysis method. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(1), 015003 .
- Essa, K. S., & Elhussein, M. (2018). Gravity data interpretation using different new algorithms: A comparative study. *Gravity-geoscience applications, industrial technology and quantum aspect* .
- Essa, K. S., Nady, A. G., Mostafa, M. S., & Elhussein, M. (2018). Implementation of potential field data to depict the structural lineaments of the Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 147, 43-53 .
- Göktürkler, G., & Balkaya, Ç. (2012). Inversion of self-potential anomalies caused by simple-geometry bodies using global optimization algorithms. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(5), 498-507 .
- Hicheri, M., Ramdhane, B., Yahyaoui, S., & Gonenc, T. (2018). New insights from gravity data on the geodynamic evolution of Northern African Passive

- Constable, S.C., 1986, Offshore electromagnetic surveying techniques, 56th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 81-82.
- Davis, P.J. and Rabinowitz, P., 1975, Methods of numerical integration, Academic Press Inc.
- Guillon, A., 2005, Multiple attenuation in complex geology with a pattern-based approach, *Geophysics*, 70 (5), V97-V107.
- Hellman, H., 1998, Great feuds in science: Ten of the liveliest disputes ever, John Wiley & Sons, e-book.
- Hubbard, T.P., 1979, Deconvolution of surface recorded data using vertical seismic profiles, Presented at the 49th Annual International Meeting, SEG.
- Kosloff, D.D. and Baysal, E., 1982, Forward modeling by a Fourier method, *Geophysics*, 47, 1402-1412.
- Lodha, G.S., 1974, Quantitative interpretation of airborne electromagnetic response for a spherical model, M.S. thesis, University of Toronto.
- Mungall, J.E. and Hanley, J.J., 2004, Origins of outliers of the Huronian Super group within the Sudbury Structure, *Journal of Geology*, 112, 59-70, accessed 20 March 2006, <http://www.journals.uchicago.edu/JG/journal/contents/v112n1.html?erFrom=5036588460214438945Guest>.
- O'Brien, M., 1994, 1994 Amoco statics test. Data set accessed 20 May 2004 at http://software.seg.org/datasets/2D/Statics_1994/.
- Roemmich, D., 1990, Sea-level change, <http://www.nap.edu/books/0309040396/html>, accessed 14 July 2003.
- Rouse, W.C., Reading, A.J. and Walsh, R.P.D., 1986, Volcanic soil properties in Dominica, West Indies, *Engineering Geology*, 23, 1-28.
- Valenciano, A.A., Cheng, C.C., Chemingui, N. and Brandberg-Dahl, S., 2009, Fourier finite-different migration for 3D TTI media, 71st Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, P065.
- Williams, K.E., 2007, Method and system for combining seismic data and basin modeling, U.S. Patent 7,280,918.
- Zhou, B., 1992, Discussion on: "The use of Hartley transform in geophysical applications", R. Saatçilar, S. Ergintay, and N. Canitez, authors, *Geophysics*, 57, 196-197.