

وارون سازی داده‌های گرانی به کمک روش تبرید شبیه‌سازی شده (مطالعه موردی - منطقه امان آباد اراک)

حمید داودی^{۱*}، عبدالرضا صفری^۲، وحید ابراهیم زاده اردستانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

hadavudi@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

asafari@ut.ac.ir

^۳ استاد گروه فیزیک و زمین - موسسه ژئوفیزیک - دانشگاه تهران

ebrahimz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۴، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۵)

چکیده

هدف از این مقاله استفاده از روش بهینه سازی تصادفی^۱ تبرید شبیه سازی شده^۲ برای وارون سازی داده‌های ثقل سنجی و به دست آوردن ویژگی‌های فیزیکی و به خصوص هندسی منبع به وجود آورنده این داده ها (منبع آنومالی) است. پارامترهای هندسی منبع آنومالی شامل عمق یک سری از منشورهای به هم چسبیده بوده که در نهایت در کنار یکدیگر شکل هندسی منبع را نمایش می‌دهند و منظور از ویژگی‌های فیزیکی همان تباین چگالی میان سنگ میزبان و منبع آنومالی است که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی بازه جستجوی کوچکی برای آن در نظر گرفته شده‌است. همچنین برای وارون سازی بهتر از پارامترهای آنومالی منطقه‌ای نیز استفاده شده‌است به این معنا که ضرایب ثابتی در مختصات نقاط ضرب شده که باعث از بین رفتن اثرات یکنواخت و نسبتاً بزرگ آنومالی‌های سنگ‌های زمینه (که اندازه‌گیری آن‌ها مورد نظر نیست) می‌شوند. در این پژوهش ضمن به کارگیری روش پیشنهادی بر روی داده‌های شبیه سازی شده به ارزیابی کارآمدی الگوریتم بر روی داده های حاصل از گرانی‌سنجی در منطقه امان آباد اراک پرداخته شده و نتایج آن با گمانه های حفر شده در منطقه مذکور مقایسه گردیده است. ارزیابی صورت گرفته نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم در هر دو مرحله می‌باشد. عمق کمینه و بیشینه اکثر سنگ های رسوبی در منطقه مورد نظر بین ۷۰ تا ۱۲۰ متر تخمین زده شده است. در نهایت میزان بزرگی تابع هزینه^۳ (میزان خطا) در منطقه مورد مطالعه محاسبه شده که حداکثر بزرگی آن حدود ۰٫۵ میلی گال است. لازم به ذکر است که عموماً در روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عملیات ماتریسی و محاسبه پارامترهای آماری صورت نمی‌پذیرد و ملاک بررسی عملکرد الگوریتم پیاده‌سازی آن بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده است.

واژگان کلیدی: وارون سازی داده های گرانی، تبرید شبیه سازی شده، روش های بهینه سازی، جستجوی تصادفی

* نویسنده رابط

^۱ stochastic optimization method

^۲ Simulated Annealing

^۳ cost function

۱- مقدمه

یکی از کاربردها و شاخه‌های مورد مطالعه در ژئوفیزیک مبحث ژئوفیزیک اکتشافی است که برای حل مشکلاتی چون پیدا کردن منابع نفتی و معدنی یا گپ‌های موجود در زیر سطح زمین و یا سایر کاربردهای مهندسی و زیست محیطی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو پیدا کردن روش‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها شکل هندسی یا توزیع چگالی این منابع را شناسایی کرد دارای اهمیت هستند. در این راستا روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی به دو دسته خطی و غیر خطی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های خطی هدف پیدا کردن توزیع چگالی منبع مورد نظر (که به عنوان منبع ایجاد کننده آنومالی گرانی شناخته می‌شود) است. چراکه تباین چگالی با آنومالی گرانی رابطه خطی دارد. اما در روش‌های غیر خطی (که به دلیل رابطه غیر خطی پارامترهای هندسی منبع آنومالی با گرانی این چنین نام‌گذاری شده‌اند) هدف پیدا کردن مشخصات هندسی منبع است. این کار که هدف این پژوهش نیز به شمار می‌رود با روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. برخی روش‌ها شکل هندسی مشخصی را در نظر گرفته و سپس پارامترهای تعیین کننده شکل را دچار تغییر می‌کنند تا بتوانند بهترین شکل ممکن را تخمین بزنند. اما در روش فعلی از یک سری منشورهای به هم چسبیده استفاده شده‌است. به این صورت که عمق این منشورها دچار تغییر شده و با توجه به رابطه آن‌ها با آنومالی گرانی آنومالی مربوط به آن‌ها محاسبه می‌شود و با مقایسه با مشاهدات سعی در کشف بهترین ترکیب از عمق منشورها به عمل می‌آید تا در نهایت شکل هندسی منبع مورد نظر کشف شود. پژوهش فعلی برای کاربردهای عملی صورت نگرفته است و تنها در منطقه‌ای که شامل یک سری سنگ‌های رسوبی می‌باشد برای بررسی کارایی الگوریتم مورد نظر اعمال شده است. در این راستا (استفاده از منشورها در گرانی‌سنجی) می‌توان به کار افرادی چون Nagy در ۱۹۶۶ و Buddhadeb Banerjee و Das Gupta در ۱۹۷۷ اشاره کرد که در خصوص مدل‌سازی آنومالی گرانی اجسام مدفون در زیر سطح زمین با شکل هندسی مشخص کار کرده‌اند [۱، ۲]. همچنین مقاله Rao و Murthy در ۱۹۷۸ نیز از دیگر تحقیقاتی است که در حالت دو بعدی در زمینه منشورها صورت گرفته است [۳].

برای اجرای عملی ژئوفیزیک اکتشافی عموماً نیاز به روش‌های بهینه‌سازی است. روش‌های بهینه‌سازی به دو دسته کلی^۱ و محلی^۲ تقسیم می‌شوند. از جمله روش‌های کلی می‌توان به SA^۳، GA^۴، ACO^۵ و PSO^۶ اشاره نمود. در این پژوهش روش SA برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است که در مورد تاریخچه آن می‌توان به کار افرادی چون Kirkpatrick و همکاران در ۱۹۸۳، Geman and Geman در ۱۹۸۴، Laarhoven and Aarts در ۱۹۸۷ و Aarts and Korst در ۱۹۸۹ اشاره کرد [۴-۷].

در مورد به کارگیری روش SA در ژئوفیزیک و مقالات و کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به کار افرادی چون Basu and Frazer در ۱۹۹۰ و Sen and Stoffa در ۱۹۹۱ اشاره نمود [۸، ۹]. علاوه بر آن Rothman در ۱۹۸۵ از این روش در مطالعات لرزه‌سنجی و برای بررسی آنومالی‌های عمده نزدیک به سطح زمین استفاده کرده است [۱۰].

در این مقاله ابتدا در بخش ۲ روش تبرید شبیه‌سازی شده معرفی شده و در بخش ۳ به معرفی تابع هزینه پرداخته شده است. در بخش ۴ روند اجرای الگوریتم شرح داده شده است. در بخش ۵ اعمال الگوریتم بر روی داده های شبیه سازی شده بیان شده و در انتها نیز الگوریتم معرفی شده بر روی داده های منطقه امان آباد اراک اعمال شده است.

۲- تبرید شبیه سازی شده (SA)

تبرید شبیه سازی شده بر این مفهوم فیزیکی اقتباس شده از مکانیک آماری^۷ بنا نهاده شده که چنانچه ذرات یک ماده جامد به قدری حرارت داده شود که ذرات به حالت آزادانه و مایع درآیند و سپس این ماده به آرامی سرد شود ذرات به حالت کریستال^۸ در می‌آیند. یعنی به کمترین سطح انرژی خود خواهند رسید. چنانچه عمل سرد کردن به آرامی صورت نگیرد این کمترین سطح انرژی محقق نمی‌شود. در مورد روش SA نیز هدف ما کم

^۱ Global Optimization

^۲ Local Optimization

^۳ Simulated Annealing

^۴ Genetic Algorithm

^۵ Ant Colony Optimization

^۶ Partial Swarm Optimization

^۷ statistical mechanics

^۸ crystallization

کردن تابع هزینه ای است که مترادف تابع انرژی در تعریف فوق می باشد. این تابع انرژی توسط بولتزمن^۱ ارائه شده و بیان می دارد که احتمال قرار گرفتن وضعیت i در سطح انرژی E_i عبارت است از [۱۱]:

$$p(E_i) = \frac{\exp\left(\frac{-E_i}{K \times T}\right)}{\sum_{j \in S} \exp\left(\frac{-E_j}{K \times T}\right)} \quad (۱)$$

که در آن K ثابت بولتزمن و T دما می باشد و S مجموعه تمامی وضعیت های موجود است. در حالت مشابه در روش تبرید شبیه سازی شده E مترادف با اختلاف میان داده های تولید شده توسط مدل و مشاهدات موجود در مسئله است به عبارت دیگر اختلاف میان آنومالی های بوگه تولید شده توسط مدل مستقیم و مشاهدات آنومالی صورت گرفته در منطقه تعیین کننده تابع هزینه است. در این حالت می توان گفت که آنومالی های بوگه نقش انرژی را ایفا کرده اند. T مترادف پارامتر دما (یکی از پارامترهای موجود در این روش بهینه سازی) است که باید به تدریج کاهش یابد.

روش بهینه سازی SA دارای ۴ بخش زیر است:

- ۱- تعیین پارامتر دما
 - ۲- تعیین نرخ کاهش پارامتر دما و چگونگی فرآیند تبرید
 - ۳- تعیین تعداد تکرار یا طول زنجیره مارکف
 - ۴- شرط پایان عملیات
- در بخش های بعد چگونگی به کارگیری این روش و مدل مورد استفاده برای تابع هزینه شرح داده خواهد شد. اما قبل از آن لازم است که توضیحی مختصر در مورد زنجیره مارکف ارائه شود. یک زنجیره مارکف^۲ فرآیندی تصادفی است که در آن احتمال آنکه از حالت i به حالت j دست یابیم تنها به حالت i بستگی دارد و به حالت های قبل از i بستگی ندارد. به عبارت دیگر احتمال حرکت از پیشامد فعلی به پیشامد بعدی تنها به پیشامد فعلی مرتبط است و به پیشامدهای گذشته مرتبط نمی باشد:

$$p_{ij}(t+1) = p(X(t+1) = j / X(t) = i) \quad (۲)$$

که در آن X نشان دهنده پیشامد و t و $t+1$ نشان دهنده زمانهای وقوع پیشامد هستند. به این ترتیب در اثر تکرار و عبور از پیشامدها این زنجیره که یک فرآیند تصادفی است شکل می گیرد [۱۲]. در واقع رابطه ۲ تعریف دقیق زنجیره مارکف نیست، بلکه بیان کننده احتمال شرطی برای حرکت از پیشامد i به پیشامد j است.

۳- تولید تابع هزینه

در روش مورد استفاده در این پژوهش از رابطه تحلیلی بی هنجاری بوگه تولید شده توسط یک سری از منشورهای به هم چسبیده استفاده شده است. به این معنا که محل و مختصات و عمق این منشورها و همچنین تباین چگالی آنها (که نقش منبع آنومالی را بازی می کنند) توسط رابطه ای به شکل زیر به بی هنجاری بوگه مربوط می شود.

$$\Delta g(x) = G d_c \int_{z_1-W-Y}^{z_2} \int_{-W}^W \int_{-Y}^Y \frac{z_1 dx_1 dy_1 dz_1}{\left\{ (x-x_1)^2 + y_1^2 + z_1^2 \right\}^{3/2}} \quad (۳)$$

که در آن G ثابت جهانی جاذبه و d_c تباین چگالی سنگ میزبان و منبع به وجود آورنده آنومالی است. پارامترهای مشخص شده در رابطه فوق در مورد هر منشور در شکل ۲ مشخص شده اند. در نهایت پس از انتگرال گیری و ساده سازی رابطه زیر بدست می آید:

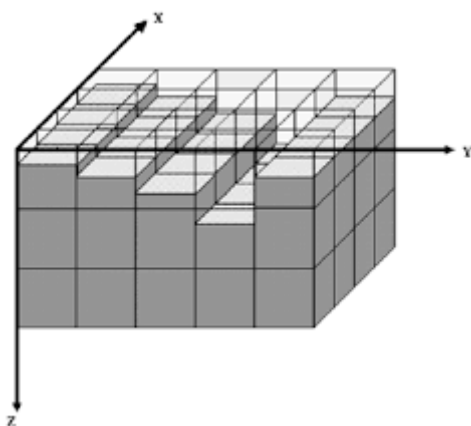
$$\Delta g(x) = 2G d_c \left\{ \left[F(x, Y, z) \right]_{x-W}^{x+W} \right\}_{z_1}^{z_2} \quad (۴)$$

که در آن تابع F به صورت زیر تعریف می شود:

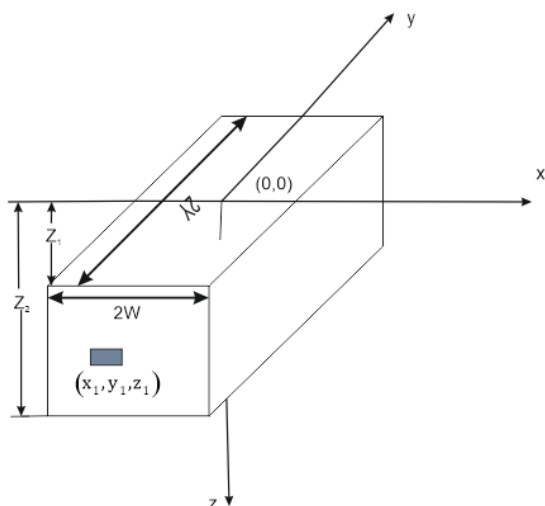
$$F(x, Y, z) = z \times \arctan \left(\frac{Y \times x}{z \times \sqrt{x^2 + Y^2 + z^2}} \right) - \frac{Y}{2} \times \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + Y^2 + z^2} + x}{\sqrt{x^2 + Y^2 + z^2} - x} \right) - \frac{x}{2} \times \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + Y^2 + z^2} + Y}{\sqrt{x^2 + Y^2 + z^2} - Y} \right) \quad (۵)$$

^۱ Boltzmann
^۲ Markov chain

به صورت شماتیک طرز قرارگیری منشورها در مدل بالا را نمایش می‌دهد. البته لزوماً منشورها از سمت پایین به بالا^۲ قرار نمی‌گیرند و ممکن است از بالا به پایین^۳ مرتب شوند.



شکل ۱- چگونگی ارائه منبع آنومالی به وسیله منشورهای به هم چسبیده



شکل ۲- نمایش پارامترهای تعیین کننده ویژگی‌های هر یک از منشورها

۴- روند اجرای الگوریتم

برای اجرای الگوریتم پس از اعمال تصحیحات جاذبی بر روی مشاهدات، آنومالی بوگه بدست آمده و سپس حدود پارامترهای مجهول مسئله یعنی عمق ها و تباین چگالی و پارامترهای آنومالی منطقه ای به الگوریتم معرفی می شوند. در ادامه با توجه به مختصات نقاط برداشت شده حدود و مختصات مراکز منشورها تعیین شده و سپس به صورت کاملاً تصادفی تعداد زیادی نمونه از فضای پارامترهای مجهول امتحان می‌شوند که نمونه‌ای

رابطه بالا تنها برای یکی از منشورها به طول و عرض $2W$ و $2Y$ و عمق های Z_1 و Z_2 نسبت به سطح زمین بوده و X نشان‌دهنده مختصات نقاط مشاهده شده می‌باشد(که با انتقال مبدا مختصات به مراکز منشورها محاسبه می شوند).

در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$M = 2Gd_c \times [F(x+W, Y, Z_2) - F(x-W, Y, Z_2) - F(x+W, Y, Z_1) + F(x-W, Y, Z_1)] \quad (6)$$

یعنی آنومالی بوگه برای نقطه ای به مختصات (X, Y) توسط این منشور از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta g_{prism} = \frac{M(x, W, Y_1, Z_1, Z_2, d_c) + M(x, W, Y_2, Z_1, Z_2, d_c)}{2} \quad (7)$$

رابطه بالا بیان گر این است که همان رابطه مربوط به M را دوبار نوشته (یک بار با $Y_1 = Y - Y$ و یک بار با $Y_2 = Y + Y$) و سپس متوسط گیری می‌کنیم و چنانچه تمامی منشورها در محاسبه آنومالی بوگه یک نقطه دخالت داده شود آن گاه آنومالی بوگه نقطه مورد نظر عبارت است از :

$$\Delta g(x, y) = \sum_K \sum_L (\Delta g_{prism}) + Ax + By + C \quad (8)$$

یعنی جمع تمامی منشورها که در تمامی ردیف ها و ستون ها قرار گرفته اند به علاوه یک آنومالی منطقه ای^۱ که با ضرایب A, B, C معین می‌شود [۱۳].

به این ترتیب آنومالی بوگه برای تمامی نقاط قابل محاسبه است. اختلاف آنومالی محاسبه شده به این روش با مشاهدات میزان تابع هزینه را برای هر نقطه نشان می‌دهد که هدف کمتر نمودن این تابع با در نظر گرفتن شرایط و قیود زمین شناسی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه است. همچنین لازم به ذکر است که چنانچه در روابط بالا عمق ها و مختصات ها بر حسب کیلومتر و تباین چگالی بر حسب $\frac{g}{cm^3}$ قرار داده شوند آن گاه آنومالی بوگه بر حسب میلی‌گال بدست خواهد آمد. شکل ۱

^۲ flat bottom
^۳ flat top

^۱ Regional Anomaly

در زیر بیان شده به بحث در مورد قبولی یا رد حالت جدید پرداخته می‌شود.

$$f = \exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right) \quad (11)$$

که در آن:

$$\Delta E = E_1 - E_0 \quad (12)$$

چنانچه مقدار ΔE کوچکتر از صفر باشد وضعیت جدید بدون هیچ شرطی پذیرفته خواهد بود اما در صورتیکه $\Delta E > 0$ باشد عددی تصادفی nr با توزیع یکنواخت بین صفر و یک تولید شده و با f مقایسه می‌شود. چنانچه $f > nr$ باشد وضعیت جدید قابل قبول بوده و در غیراین صورت این وضعیت رد خواهد شد. درست است که این معیار کاملاً تصادفی به نظر می‌رسد، اما این جزء خواص روش‌های تصادفی بوده و در این‌جا منطق پشت آن این است که با این کار در دماهای بالاتر امکان جستجو در کل فضای نمونه فراهم می‌شود و صرفاً مقادیری که باعث کم کردن تابع هزینه می‌شوند مورد قبول واقع نمی‌شوند، بلکه با این کار از به دام افتادن در مینیمم‌های محلی جلوگیری می‌شود. علاوه بر آن در دماهای پایین‌تر که به مینیمم کلی نزدیک شده‌ایم این معیار با توجه به کوچکتر شدن f باعث رد شدن اکثر حالت‌هایی که تابع هزینه بالاتری دارند می‌شود و ما را در رسیدن به مینیمم کلی یاری می‌دهد. فرآیند تغییر در بردار پارامترهای مجهول به همین شکل تا تعداد معینی تکرار می‌شود. این تعداد که در واقع طول زنجیره مارکف است در الگوریتم مورد بحث در دو حلقه قرار داده شده که حلقه بیرونی تعداد تکراری بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ و حلقه درونی تعداد تکراری بین $aq \times 100$ تا $aq \times 150$ (تعداد مجهولات یا همان طول بردار $\vec{X}$ است) دارند و سپس پارامتر دمای T تحت رابطه زیر کاهش پیدا می‌کند.

$$T = T \times t \quad (13)$$

که t همان پارامتر نرخ کاهش دما است.

این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که به دلیل کوچک شدن بیش از حد پارامتر دما دیگر تغییر قابل

که کمترین تابع هزینه را داشته باشد به عنوان مقدار اولیه وارد روند محاسبات می‌شود.

فرآیند محاسبات به این صورت است که مقدار اولیه‌ای برای پارامتر دما تعیین می‌شود به گونه‌ای که در مراحل ابتدایی تمامی یا اکثریت وضعیت‌های معرفی شده به الگوریتم با روندی که در ادامه توضیح داده می‌شود قبول^۱ شوند. مقدار اولیه این پارامتر در الگوریتم مورد بحث با سعی و خطا تعیین می‌شود. پارامتر دیگری به عنوان نرخ کاهش پارامتر دما معرفی می‌شود که مقدار آن بین ۰/۸۵ تا ۰/۹ است. پس از آن با مقدار اولیه پارامترهای مجهول که با بردار $\vec{X}_0$ نمایش داده می‌شود روند محاسبات آغاز خواهد شد. برای انجام این امر در هر مرحله تنها یکی از پارامترهای مجهول موجود در بردار $\vec{X}_0$ دچار تغییر می‌شود. این تغییر می‌تواند با اضافه و کم کردن مقداری به مقدار اولیه مجهول مورد نظر صورت گیرد (با توجه به آنکه مقدار جدید از حدود پارامتر مورد نظر تجاوز نکند) و یا کاملاً به صورت تصادفی و البته پیوسته عمل شود یعنی چنانچه حد بالا و حد پایین پارامتر i ام با m_{up}^i و m_{low}^i نمادگذاری شوند آنگاه:

$$\Delta m^i = m_{up}^i - m_{low}^i \quad (9)$$

$$m_{new}^i = rn \times \Delta m^i + m_{low}^i \quad (10)$$

که در آن rn عددی تصادفی در بازه صفر و یک است که در روش مذکور از توزیع یکنواخت تبعیت می‌کند. با جایگذاری m_{new}^i در بردار $\vec{X}_0$ بردار $\vec{X}_1$ که تغییر یافته حالت اولیه محسوب می‌شود به دست می‌آید.

سپس نوبت به فرآیند پذیرش یا عدم پذیرش این حالت جدید می‌رسد. برای انجام این امر ابتدا مقادیر آنومالی بوگه توسط مدل مستقیم در این حالت محاسبه شده و سپس تابع هزینه (اختلاف آنومالی‌های محاسبه شده و مشاهدات) مطابق با آن محاسبه می‌شود. حال چنانچه مقدار جدید تابع هزینه با E_1 و مقدار قبلی آن با E_0 نمایش داده شود با محاسبه معیار متروپولیس^۲ که

^۱ accept
^۲ metropolis

ملاحظه‌ای در مقدار تابع هزینه یا همان ΔE مشاهده نمی‌شود. در این حالت گوییم که سیستم به تعادل رسیده و چنانچه این مقدار ΔE به اندازه معیارهای ما کوچک شده باشد الگوریتم پایان یافته است.

در ادامه لازم است که سه نکته تذکر داده شود:

اول آنکه به دلیل روند کاهش دما احتمال قبولی تغییرات به وجود آمده در بردار مجهولات در سری تکرارهای پایانی کاهش می‌یابد. از این‌رو طول زنجیره مارکف در دماهای پایانی بهتر است بیشتر از دماهای ابتدایی در نظر گرفته شود. دوم آنکه در الگوریتم مورد بحث به دلیل رسیدن سریع تر و بهتر به همگرایی برداری شامل مقادیری کوچکتر از طول بازه جستجو طراحی شده و در دماهای پایانی به تدریج مقدار مقادیر آن با ضریبی کاهش پیدا می‌کند. عملکرد اصلی این بردار آن است که در دماهای پایانی بازه جستجوی پارامترهای مجهول را کوچک و کوچک تر می‌کند تا در نواحی اطراف جواب‌های بهینه بیش تر از نواحی دورتر از این جواب‌ها جستجو صورت پذیرد.

سوم آن که در فرآیند تکرار در هر محاسبه تابع هزینه مقدار آن با کوچکترین مقدار قبلی مقایسه شده و چنانچه کوچکتر باشد آن مقدار و مقادیر پارامترهای بردار مجهولات متناظر با آن ذخیره خواهند شد تا در پایان فرآیند الگوریتم کوچکترین مقدار تابع هزینه و پارامترهای مجهول متناظر با آن به عنوان جواب بهینه معرفی شوند. تمام آنچه را که در این بخش شرح داده شد می‌توان در فلوچارت ۱ مشاهده کرد.

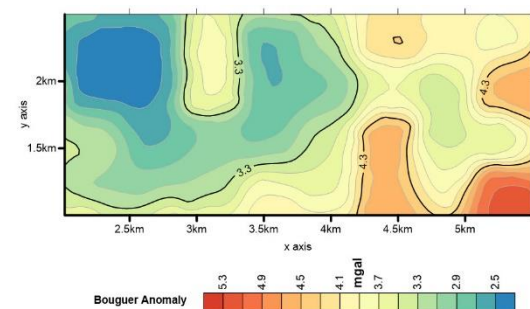
۵- اعمال الگوریتم بر روی داده های شبیه سازی شده

برای بررسی صحت و دقت روش‌های بهینه سازی ابتدا از داده‌های شبیه سازی شده استفاده می‌شود. برای انجام این کار ابتدا توسط مدل مستقیم^۱ داده ها تولید شده و سپس این داده‌ها به مسئله معکوس^۲ وارد می‌شود. برای این منظور الگوریتمی برای محاسبه مدل مستقیم به کار گرفته شد و با مدلی شامل ۳۲ منشور داده‌های شبیه‌سازی‌شده‌ای از آنومالی بوگه برای ۳۶۰ نقطه محاسبه شدند که حکم مشاهدات شبیه سازی شده را دارند.

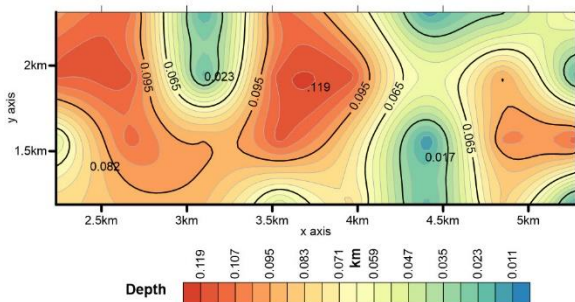
^۱ forward model
^۲ inverse problem

نقشه منحنی میزان این آنومالی بر حسب میلی گال در شکل ۳ و نقشه منحنی میزان مربوط به عمق منشورها به کار گرفته شده در مدل مستقیم در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. هدف اجرای الگوریتم بر روی این داده‌های شبیه سازی شده و سپس مقایسه جواب‌ها با شکل ۳ و شکل ۴ است.

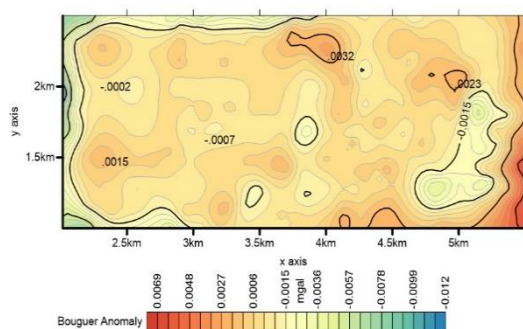
برای این منظور داده‌های بالا طبق فرآیندی که در بخش ۴ توضیح داده شد وارد الگوریتم شده و خروجی آنومالی بوگه آن در دو حالت بدون نویز و دارای نویز در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده‌است. میزان نویز اضافه شده به آنومالی برای تولید داده‌های شبیه سازی شده نویزی حدود ۰,۱ میلی‌گال است. خروجی عمق منشورهای تولیدشده در این دو حالت در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. میزان تابع هزینه برای هر نقطه در شکل ۹ و شکل ۱۰ برای حالت‌های بدون نویز و دارای نویز آورده شده است که بر حسب میلی‌گال می‌باشد، در حقیقت این تابع هزینه اختلاف شکل ۳ با اشکال ۵ و ۶ می‌باشد و به صورت قدر مطلق لحاظ نشده‌است (هر چند که در روند محاسبات قدر مطلق این اختلاف‌ها در نظر گرفته شده‌است). همچنین نقشه منحنی میزان اختلاف عمق‌های بدست آمده با عمق‌های ورودی به مدل مستقیم در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان داده شده است.



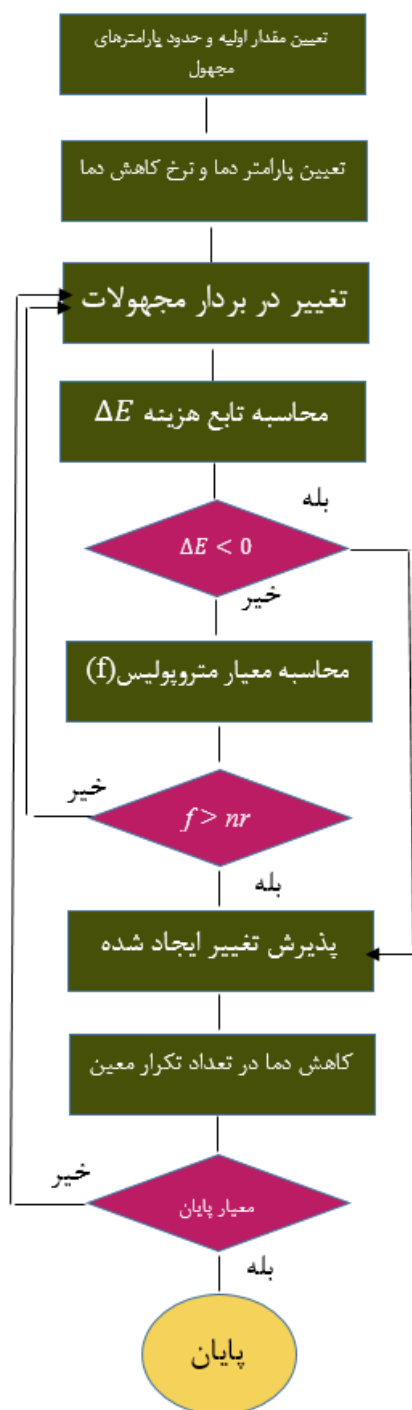
شکل ۳- نقشه آنومالی بوگه تولید شده توسط مدل مستقیم



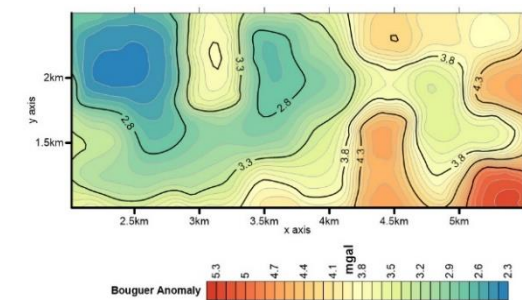
شکل ۴- نقشه منحنی میزان عمق منشورها به کار گرفته شده در مدل مستقیم



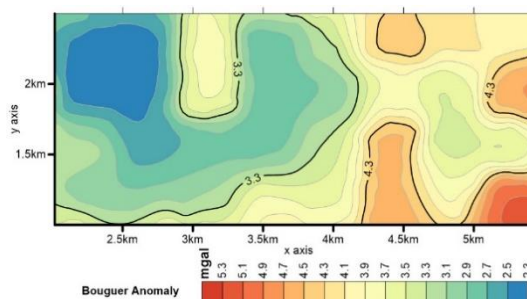
شکل ۹- نقشه منحنی میزان تابع هزینه برای حالت بدون نویز



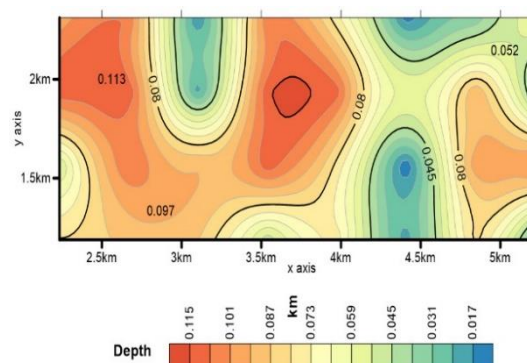
فلوچارت ۱- روند انجام مراحل در الگوریتم مورد نظر



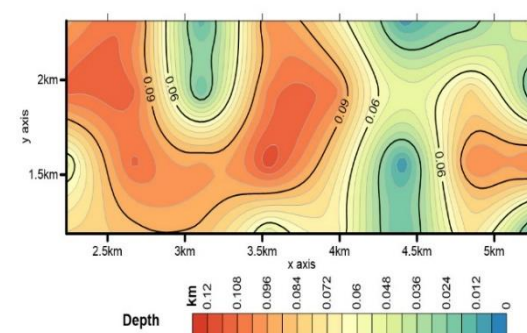
شکل ۵- نقشه آنومالی بوگه در حالت بدون نویز



شکل ۶- نقشه آنومالی بوگه در حالت دارای نویز



شکل ۷- نقشه منحنی میزان عمق منشورها تولید شده در حالت بدون نویز



شکل ۸- نقشه منحنی میزان عمق منشورها تولید شده در حالت دارای نویز

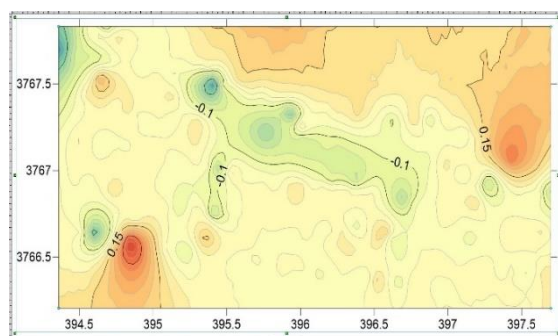
با مقایسه شکل ۳ با اشکال ۵ و ۶ و همچنین شکل ۴ با اشکال ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که الگوریتم به کار گرفته شده دارای عملکرد قابل قبولی در تخمین عمق منشورها می‌باشد. بنابراین در گام های بعدی پس از معرفی مختصری از منطقه مورد مطالعه به اعمال روش بر روی داده های واقعی پرداخته خواهد شد.

تعداد نقاط به ۲۶۲ عدد رسیده است که ما بین طول‌های جغرافیایی $49^{\circ}51'20''$ تا $49^{\circ}53'30''$ و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}1'52''$ تا $34^{\circ}2'46''$ قرار گرفته‌اند. شکل ۱۳ محدوده منطقه مورد مطالعه را نشان داده و توزیع نقاط و تغییرات آنومالی بوگه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

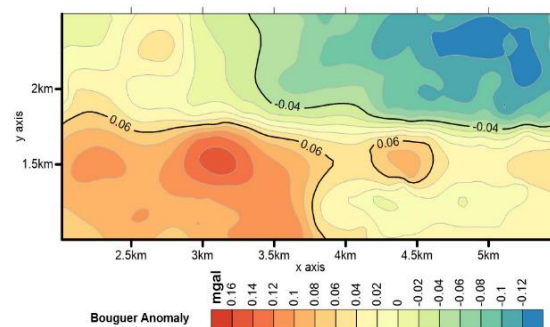
اطلاعات گمانه‌ها یا چاه‌های برداشت شده در این منطقه نشان می‌دهد که حداکثر عمق منبع آنومالی (منشورها) حدود ۱۲۰ تا ۱۳۰ متر و حداقل عمق آن تا ۷۰ یا ۸۰ متر می‌باشد. تباین چگالی میان سنگ میزبان (سنگ‌های اطراف منبع آنومالی) و منبع آنومالی در حد -0.4 تا -0.6 گزارش شده است که به عنوان قیود ژئوفیزیکی استفاده می‌شوند.



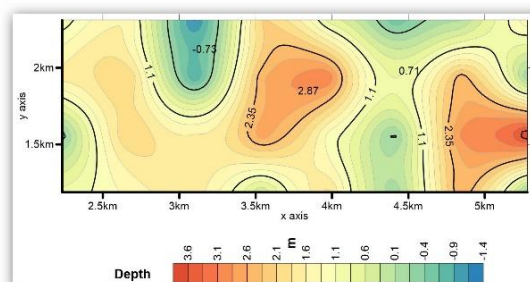
شکل ۱۳- منطقه مورد مطالعه و نواحی اطراف آن



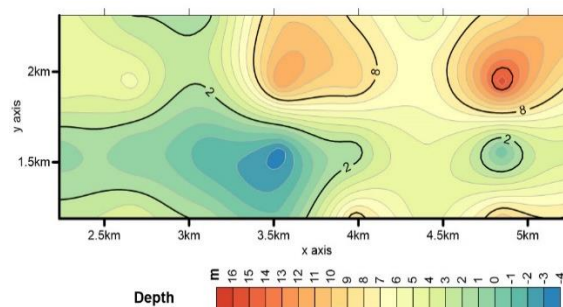
شکل ۱۴- نقشه منحنی میزان تابع هزینه



شکل ۱۰- نقشه منحنی میزان تابع هزینه برای حالت دارای نویز



شکل ۱۱- نقشه اختلاف عمق‌های بدست آمده در حالت بدون نویز با عمق‌های ورودی به مدل مستقیم

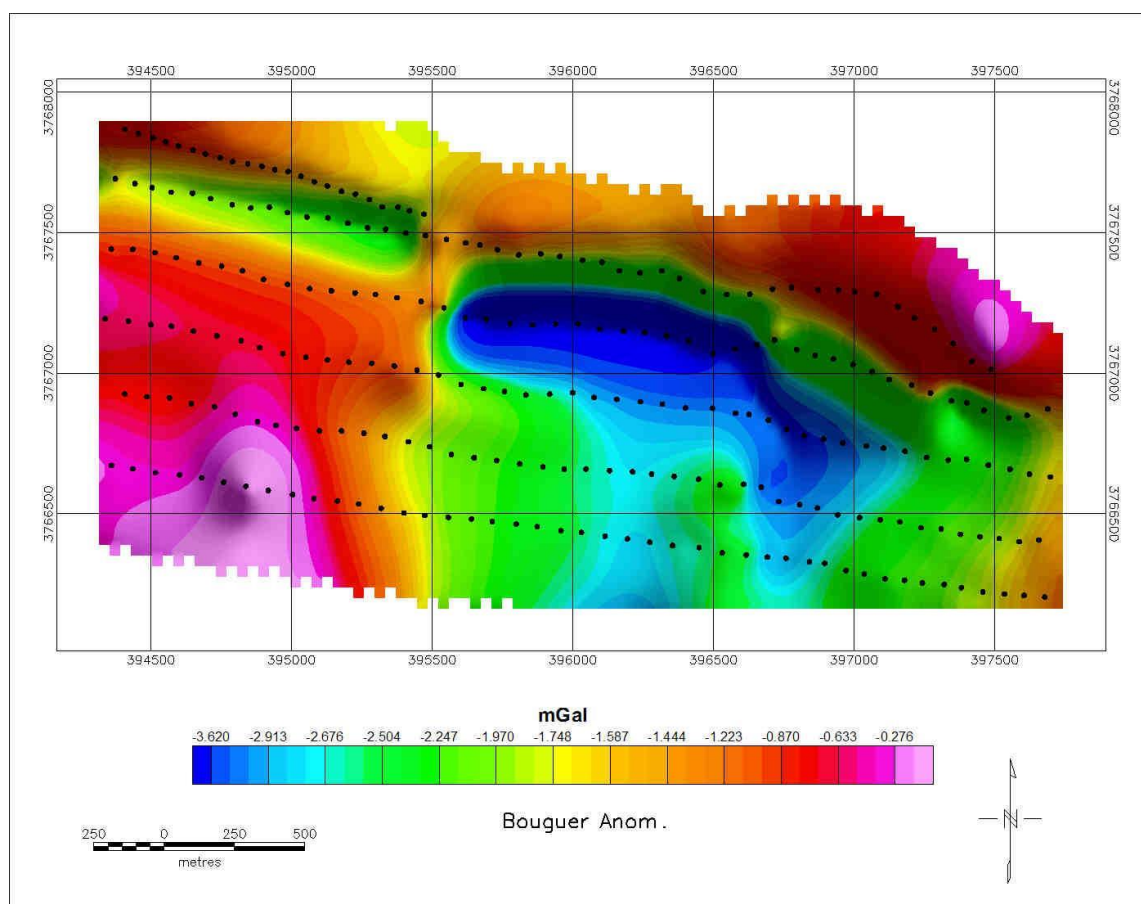


شکل ۱۲- نقشه اختلاف عمق‌های بدست آمده در حالت دارای نویز با عمق‌های ورودی به مدل مستقیم

۶- مطالعه موردی

پس از اجرای الگوریتم بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده و اطمینان از کارایی الگوریتم، روش تبرید شبیه‌سازی شده بر روی داده‌های واقعی به کار گرفته شد و نتایج حاصل در این بخش ارائه می‌شود.

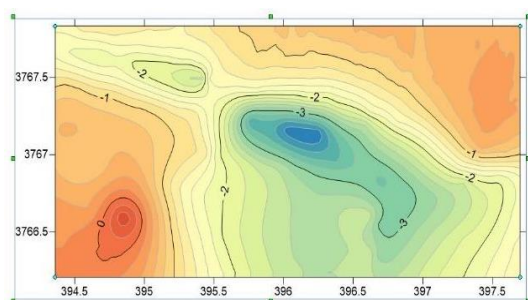
منطقه مورد مطالعه در نزدیکی ناحیه امان آباد شهرستان اراک شامل ۲۴۶ نقطه برداشتی می‌باشد. اما در این پژوهش برای سهولت در محاسبات از داده‌های گریدبندی منطقه که در واقع انترپلاسیون مابین نقاط برداشت شده می‌باشد نیز استفاده شده که در مجموع



شکل ۱۵- نقشه آنومالی بوگه و موقعیت نقاط برداشتی

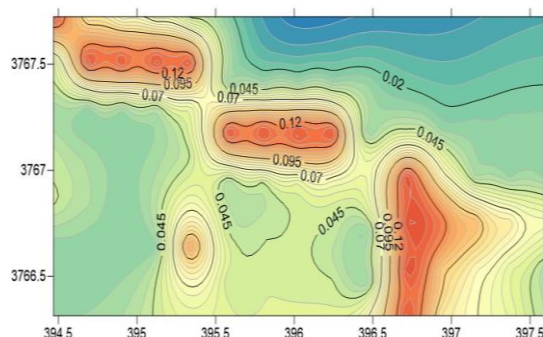
از لحاظ ژئوفیزیکی دارای مفهوم است (و صرفاً جنبه محاسباتی ندارد) با اطلاعات چاه‌ها و گمانه‌های برداشت شده در نواحی اطراف منطقه نیز سازگاری دارد. همچنین این نکته نیز حائز اهمیت است که برای رسیدن به همگرایی و جلوگیری از تعداد پارامترهای مجهول بیش از حد در محاسبات، منطقه مورد نظر به سه بخش تقسیم شده و هر بخش به طور مجزا وارد الگوریتم شده و در نهایت جواب‌ها و آنومالی‌های خروجی در کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند.

شکل ۱۴ نیز میزان تابع هزینه را در نواحی مختلف نشان می‌دهد و میزان تباین چگالی نیز ۰/۵۵ - به دست آمده است.



شکل ۱۷- نقشه منحنی میزان آنومالی بوگه منطقه مورد مطالعه

نقشه آنومالی بوگه داده‌های منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۵ بیان‌کننده چگونگی قرارگیری منشورها است. یعنی در مناطقی که میزان آنومالی بوگه به سمت منفی میل می‌کند (مناطق آبی رنگ) انتظار بر آن است که عمق منشورها بیشتر شود و این مسئله در شکل ۱۶ که بیان‌کننده جواب بهینه خروجی از الگوریتم مورد استفاده است قابل تشخیص است.

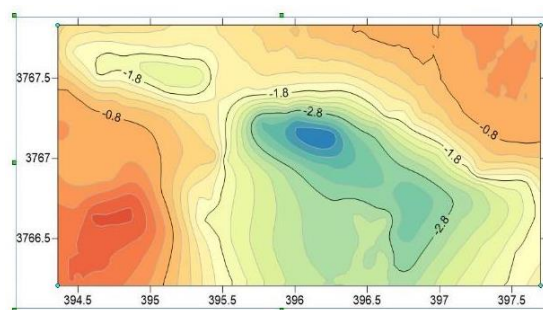


شکل ۱۶- نقشه منحنی میزان عمق منشورها

این شکل علاوه بر آنکه با در نظر گرفتن قیود ژئوفیزیکی مربوط به حدود پارامترهای مجهول به عنوان اطلاعات کمکی

۷- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش روش بهینه سازی تصادفی تبرید شبیه سازی شده^۱ در منطقه امان آباد اراک برای مشخص کردن ویژگی های هندسی سنگ های رسوبی این منطقه مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفت که روش مورد استفاده و نحوه اعمال آن بر داده های شبیه سازی شده و واقعی گزارش داده شد. برای بررسی توانایی این روش نتایج حاصل با گمانه‌های حفر شده در منطقه مقایسه شد. به عنوان توضیح بیشتر باید گفت که در عمل ابتدا به کمک ۳۲ منشور از طریق ورود به مدل مستقیم مورد استفاده داده‌های شبیه‌سازی شده تولید شدند و سپس این داده‌ها به مدل‌سازی معکوس که استفاده از روش تبرید شبیه سازی شده باشد، ارائه شدند. در این مدل‌سازی داده‌ها با دو سطح بدون نویز و دارای نویز به الگوریتم طراحی شده وارد شدند. در این الگوریتم طبق اصول روش تبرید شبیه سازی شده دما به تدریج کاهش یافته و نتایج بدست آمده در نهایت با نقشه آنومالی بوگه تولید شده توسط مدل مستقیم مقایسه گردید. می‌توان گفت که در این حالت تطابق نسبتاً بالایی میان این دو سری نتایج وجود داشت.



شکل ۱۸- نقشه منحنی میزان آنومالی بوگه تولید شده توسط مدل

نتایج حاصل برای تابع هزینه و همچنین مقایسه با گمانه‌های حفر شده نشان دهنده توانایی این روش در وارون سازی داده‌های گرانی^۲ است. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که چنانچه روش های ریاضی به صورت محض به کار گرفته شوند ممکن است چندین مدل با ویژگیهای متفاوت و متمایز بتوانند توابع هزینه قابل قبولی به دست دهند و بنابراین عدم یکتایی و گنگی در جواب به وجود خواهد آمد [۱۴]. از این رو داشتن اطلاعات کمکی در خصوص ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه که به عنوان قیود ژئوفیزیکی در محدود کردن جوابها به ما یاری می رسانند ضروری و لازم به نظر می‌رسد. در این پژوهش اطلاعات گمانه های برداشت شده در منطقه به اجرای این امر کمک شایانی نموده است. به عبارت دیگر دو مبحث مهم در مسائل بهینه سازی (یکتایی و پایداری جواب) هر دو در این روش به کمک اطلاعات چاه‌های اطراف منطقه مورد مطالعه حل شده‌اند چراکه این اطلاعات به عنوان حدود پارامترهای مجهول به کار گرفته شده‌اند. در کل مسئله دارای پایداری قابل قبولی به خصوص در مورد پارامترهای هندسی (عمق منشورها) بوده است. همچنین باید اشاره کرد که گرچه گسسته سازی (مانند به کارگیری منشورها) و یا اعمال الگوریتم در چندین مرحله شاید باعث بروز مشکل عدم یکتایی در جوابها شود، اما این ویژگی جزء جدا نشدنی مدل سازی است چراکه نمی توان زمین را که حالتی پیوسته دارد هم به صورت پیوسته نمونه برداری کرد و هم به صورت پیوسته مطالعه نمود.

مراجع

- [1] D. Nagy, "THE GRAVITATIONAL ATTRACTION OF A RIGHT RECTANGULAR PRISM," GEOPHYSICS, vol. 31, pp. 362-371, 1966.
- [2] B. Banerjee and S. P. D. Gupta, "GRAVITATIONAL ATTRACTION OF A RECTANGULAR PARALLELEPIPED," GEOPHYSICS, vol. 42, pp. 1053-1055, 1977.
- [3] I. V. R. Murthy and D. B. Rao, "Gravity anomalies of two-dimensional bodies of irregular cross-section with density contrast varying with depth," GEOPHYSICS, vol. 44, pp. 1525-1530, 1979.
- [4] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science, 1983.

^۱ Simulated Annealing

^۲ Gravity inversion

- [5] P. J. M. v. Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications* Springer Science+Business Media Dordrecht, 1988.
- [6] S. GEMAN and D. GEMAN, "Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images," *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, 1984.
- [7] E. Aarts and J. Korst, *Simulated Annealing and Boltzmann Machines* WILEY & SONS 1988.
- [8] M. K. Sen and P. L. Stoffa, "Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing," *Geophysics*, vol. 56, pp. 1624-1638, 1991.
- [9] L. Frazer, A. Basu, and J. Low, "Geophysical inversion with simulated annealing and genetic algorithms," *Eos*, vol. 71, p. 1477, 1990.
- [10] D. H. Rothman, "Large near-surface anomalies, seismic reflection data, and simulated annealing," Stanford University, 1985.
- [11] S. A. Soliman and A. H. Mantawy, *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*: springer, 2012.
- [12] A. D. Sokal, "Monte Carlo Methods in Statistical Mechanics: Foundations and New Algorithms," ed. USA: Department of Physics New York University, 1996.
- [13] P. R. Rao, K. V. Swamy, and I. V. R. Murthy, "Inversion of gravity anomalies of three-dimensional density interfaces ", *Computers & Geosciences*, vol. 25, pp. 887-896, 1999.
- [14] P. S. Moharir, "Inversion of potential field data " *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, vol. 99, pp. 473-514, 1990.