



آشکارسازی سازه های زیرزمینی در داده های گرادیان گرانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمدرضا سیف^۱، حامد صباغ^{۲*} و صفا خزایی^۳

۱- دکتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه امام حسین (ع)

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: sabagh_hamed72@ut.ac.ir

چکیده

شناسایی و کشف ساختارهای زیرزمینی از جنبه های گوناگونی کاربرد دارد. از جمله این کاربردها، مطالعات مهندسی و نظامی است. گاهاً ساختارهای مهندسی خاصی وجود دارند که به دلایل امنیتی یا استراتژیک در زیرزمین ساخته شده اند. در بسیاری از موارد، این ساختارها از طریق سنجنده های تصویربرداری قابل شناسایی نیستند؛ بنابراین مسئله آشکارسازی آن ها یکی از مسائل بسیار پیچیده در موضوعات اکتشافی و مهندسی قلمداد می گردد. روش های مختلفی برای شناسایی این سازه های طبیعی یا مصنوعی وجود دارد. از میان روش های ژئوفیزیکی معمول برای کشف اجسام زیرزمینی و با استفاده از مشاهدات سطحی، به کارگیری داده های گرادیان جاذبه ای که مشتق دوم پتانسیل جاذبه ای زمین است، از کارایی بالایی برخوردار است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای کشف و تعیین موقعیت و اندازه سازه های زیرزمینی و با استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبه ای استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم تکاملی، به دلیل عدم نیاز به خطی سازی مسئله و به ویژه عدم وابستگی به جواب اولیه، می تواند روشی مفید و کارا در حل مسئله مورد نظر باشد. این روش در کنار روش های همتای خود، همچون روش کمترین مربعات، برای حل مسائل بهینه سازی به کار رفته؛ اما با این وجود برتری هایی نیز نسبت به آن ها دارد. با شبیه سازی داده های گرادیان جاذبه ای حاصل از سازه های زیرزمینی و به کار بردن این الگوریتم برای تعیین موقعیت و اندازه چنین سازه هایی، مسئله آشکارسازی حل شده و احتمال کشف سازه های زیرزمینی با در نظر گرفتن سطوح نوفه مختلف دستگاه اندازه گیری مورد بررسی قرار می گیرد.

واژگان کلیدی

مشاهدات گرادیان جاذبه ای
سازه های زیرزمینی
الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

با پیچیده شدن روش‌های مهندسی و نظامی، مطالعه‌ی ساختارهای زیرزمینی اهمیت گسترده‌ای پیدا کرده است. برای مثال، برای محافظت از سازه‌ها یا تجهیزات مهم، مهندسان یا متخصصان علوم نظامی آن‌ها را در زیرزمین قرار می‌دهند؛ تا آسیب‌پذیری آن‌ها به حداقل رسیده یا امکان کشف و شناسایی آن‌ها کمتر شود. همچنین سازه‌های زیرزمینی اهمیت بسزایی در مسائل مربوط به امنیت ملی دارند. زیرا این سازه‌ها و تأسیسات وظیفه محافظت و استتار تجهیزات و نیروها را بر عهده دارند. از طرف دیگر، کشف موقعیت این تأسیسات به راحتی ممکن نیست؛ که این امر برای نیروهای نظامی یکی از مهم‌ترین مسائل است (لینگر و همکاران، ۲۰۰۲).

از میان روش‌های شناسایی اجرام زیرزمینی، سنجنده‌های ژئوفیزیکی از کارایی بالایی برخوردارند. از این میان می‌توان سنجنده‌های میدان جاذبه و میدان مغناطیسی زمین را نام برد. در علم ژئوفیزیک، از داده‌های گرانی‌سنجی برای کشف و مکان‌یابی گنبد‌های نمکی و منابع هیدروکربنی استفاده می‌شود. در این تحقیق آشکارسازی این سازه‌ها با استفاده از مشاهدات گرادیان گرانی صورت می‌گیرد. با کاهش سطح نوفه و افزایش قدرت تفکیک مکانی گرادیومترها (دستگاه گرادیان‌سنج) می‌توان اختلاف چگالی موجود در زیرزمین و در نتیجه سازه‌های زیرزمینی پرداخت.

دلیل استفاده از داده‌های گرادیان جاذبه به جای استفاده از داده‌های جاذبه‌ای این است که شتاب و میدان جاذبه به طور کلی قابل تفکیک از یکدیگر نیستند. بنابراین وسایل متحرکی که میدان جاذبه را اندازه می‌گیرند با مسئله تفکیک شتاب و سیله متحرک از میدان ثقل اندازه‌گیری شده مواجه هستند. از آنجایی که گرادیان جاذبه به شتاب و سیله متحرک حساسیت ندارد؛ استفاده از این مشاهدات ژئوفیزیکی برای هر وسیله متحرکی کارایی بیشتری دارد. همچنین به دلیل اندازه‌گیری تغییرات مکانی میدان جاذبه‌ای، دقت و حساسیت این مشاهدات به تغییرات چگالی به مراتب بالاتر از داده‌های ثقل است. بنابراین استفاده از داده‌های گرادیان جاذبه این امکان را فراهم می‌سازد تا طول موج‌های کوچک میدان ثقل مدل‌سازی شوند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰).

در زمینه تحقیقات داخلی به انجام رسیده در زمینه کشف سازه‌های زیرزمینی با استفاده از مشاهدات ثقلی باید به عابدینی (۱۳۹۱)، معدنچی و همکاران (۱۳۹۲)، سهامی و همکاران (۱۳۹۱) و سیف و خزایی (۱۳۹۴) اشاره کرد. در تحقیق عابدینی و همکاران از روش ثقل‌سنجی برای شناسایی اهداف مدفون مورد بررسی قرار گرفته است (عابدینی، ۱۳۹۱). روش کار در این پروژه بیشتر توصیفی بوده و کمتر نتایج عددی ملموس در آن به چشم می‌خورد. در تحقیق دیگری نیز روش‌های مختلف اعم از لرزه‌ای، الکترومغناطیس و گرانی‌سنجی برای شناسایی سازه‌های زیرزمینی به طور اجمالی و کلی معرفی شده و برای هر مورد یک شبیه‌سازی انجام شده است

(معدنچی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین در پژوهش دیگری شناسایی سازه‌های مدفون با داده‌های شبیه‌سازی گرانی‌سنجی معرفی شده و با انجام شبیه‌سازی‌هایی مسئله کشف آن‌ها به کمک مدل‌سازی پیشرو مورد بررسی قرار داده شده است (سهامی و همکاران، ۱۳۹۱).

در تحقیقات اشاره شده، مسئله آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و به ویژه داده‌های گرادیان جاذبه به صورت مسئله پیشرو مورد بررسی قرار گرفته است. در مسئله پیشرو با معلوم سازه زیرزمینی و ویژگی‌های آن، سیگنال گرادیان جاذبه مدل‌سازی می‌شود و بر اساس سیگنال مدل‌سازی شده، نتایجی در مورد احتمال کشف سازه زیرزمینی گرفته می‌شود. در مقاله سیف و خزایی (۱۳۹۴) مسئله شناسایی تأسیسات زیرزمینی به دو صورت پیشرو و وارون مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. برای حل مسئله وارون که به معنی تعیین موقعیت و ویژگی‌های سازه زیرزمینی با استفاده از سیگنال جاذبه است، روش دکانونلشن^۱ اوایل به کار گرفته شده است.

در مقاله حاضر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی آشکارسازی و تعیین موقعیت اهداف زیرزمینی استفاده می‌شود. به طور کلی انتخاب و طراحی بهینه در بسیاری از مسائل علمی و فنی باعث تولید بهترین جواب ممکن در یک شرایط خاص می‌شود. از آنجایی که نتیجه کار با توجه به نوع انتخاب روش‌ها و روش‌ها حاصل می‌شود؛ لذا به اهمیت موضوع انتخاب بهینه و بهینه‌سازی در همه‌ی مسائل پی می‌بریم. جستجوها برای یافتن جواب بهینه به طور کلی به دو روش قطعی^۲ و احتمالی^۳ (یا غیرقطعی) تقسیم می‌شود. در روش قطعی می‌توان به الگوریتم steepest gradient و از روش غیرقطعی می‌توان به روش تصادفی اشاره کرد. فارغ از این‌که روش جستجو قطعی یا غیرقطعی باشد، هدف دستیابی به یک نتیجه‌ی معتبر است. الگوریتم‌های ژنتیک که یکی از الگوریتم‌های تکاملی است، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها است؛ که توسط Holland مطرح شد (هولند، ۱۹۷۵). این الگوریتم پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش توسعه یافت. الگوریتم‌های ژنتیک یک روش جستجوی مؤثر در فضاها بسیار وسیع و بزرگ است؛ که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت جواب بهینه می‌شود.

الگوریتم‌های ژنتیک تفاوت بسیار زیادی با روش‌های بهینه‌سازی قدیمی دارند. در این الگوریتم‌ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود. بنابراین الگوریتم‌های ژنتیک با یک سری متغیرهای کد شده کار می‌کنند. مزیت کار با متغیرهای کد شده در

1- Deconvolution
2- Deterministic
3- Stochastic

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{xx} & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \Gamma_{yy} & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \Gamma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 V}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

این تانسور در یک سیستم مختصات محلی دلخواه کارترین در نقطه‌ی دلخواه به صورت معادله ۳ خواهد بود. این تانسور متقارن بوده و مجموع عناصر قطری آن نشان‌دهنده معادله پواسون است.

$$\nabla^2 V = -4\pi G \rho \quad (4)$$

زمانی که چگالی در نقطه‌ی مورد محاسبه برابر صفر باشد، این معادله به معادله‌ی لاپلاس تبدیل می‌شود. بنابراین با استفاده از معادله لاپلاس که بر اساس آن مجموع عناصر قطری تانسور باید صفر باشد و همچنین به دلیل متقارن بودن این تانسور، از ۹ مؤلفه تانسور گرادیان تنها پنج مؤلفه مستقل خطی می‌باشند. از آنجایی که اثر جاذبه اجرام دوردست را می‌توان با جرم نقطه‌ای تقریب زد، در این مقاله برای حل مسئله وارون اهداف زیرزمینی به صورت المان جرم نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. مکان جرم نقطه‌ای در مرکز ثقل جرم مورد نظر و با جرمی معادل آن در نظر گرفته می‌شود. مسلم است که میدان جاذبه تولید شده از یک آنومالی جرمی مانند سازه زیرزمینی مکعبی با میدان حاصل از تقریب آن با استفاده از یک جسم کروی دقیقاً برابر نیست؛ ولی می‌توان گفت که برای هر سازه مکعبی می‌توان معادلی کروی تقریب زد؛ که میدان حاصل از آن‌ها تا حد قابل قبولی برابر با یکدیگر باشند. ۶ مؤلفه تانسور گرادیان جاذبه‌ای برای جرم نقطه‌ای عبارت‌اند از (هافمن و موریتر، ۲۰۰۶):

$$\Gamma_{xx} = GM \times \left[-\frac{1}{l^3} + \frac{3(x-x')^2}{l^5} \right] \quad (5)$$

$$\Gamma_{xy} = GM \cdot \left[\frac{3(x-x')(y-y')}{l^5} \right] \quad (6)$$

$$\Gamma_{xz} = GM \cdot \left[\frac{3(x-x')(z-z')}{l^5} \right] \quad (7)$$

$$\Gamma_{yy} = GM \times \left[-\frac{1}{l^3} + \frac{3(y-y')^2}{l^5} \right] \quad (8)$$

$$\Gamma_{yz} = GM \cdot \left[\frac{3(y-y')(z-z')}{l^5} \right] \quad (9)$$

$$\Gamma_{zz} = GM \times \left[-\frac{1}{l^3} + \frac{3(z-z')^2}{l^5} \right] \quad (10)$$

این است که اصولاً قابلیت تبدیل فضای پیوسته به گسسته را دارند. یکی از تفاوت‌های اساسی الگوریتم ژنتیک (GA) با روش‌های قدیمی بهینه‌سازی در این است که در GA با جمعیت یا مجموعه‌ای از نقاط در یک لحظه کار می‌شود، در حالی که در روش‌های قدیمی بهینه‌سازی تنها برای یک نقطه‌ی خاص عمل می‌شود. این بدین معنی است که GA بر پردازش تصادفی هدایت شده استوار است. از دیگر مزایای این روش می‌توان به حل مسائل غیرخطی بدون نیاز به خطی‌سازی و عدم نیاز به جواب اولیه اشاره کرد (انگلبریکس، ۲۰۰۷).

در مسائلی مانند مسئله معکوس تعیین آنومالی‌های جرمی درون زمین با استفاده از مشاهدات جاذبه سطحی، به دلیل غیرخطی و پیچیده بودن مسئله و عدم وجود جواب اولیه، الگوریتم ژنتیک کارایی بسیار بالایی دارد. به عنوان نمونه در مانتیزینز و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از این الگوریتم و فرض معلوم بودن چگالی جرم، هندسه و شکل اجسام زیرزمینی برآورد شده است. به عنوان یک مثال دیگر، در ژانگ و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از ترکیب روش المان محدود و الگوریتم ژنتیک مسئله تعیین چگالی اجرام زیرزمینی با استفاده از مشاهدات میدان جاذبه زمین حل شده است.

۲- مدل‌سازی سیگنال گرادیان جاذبه

تانسور گرادیان جاذبه به صورت مشتق دوم تابع اسکار پتانسیل جاذبه یا مشتق اول بردار شتاب جاذبه تعریف می‌گردد. این تانسور ۹ مؤلفه دارد؛ که به دلیل تقارن آن و همچنین شرط لاپلاس، تنها پنج مؤلفه از آن‌ها مستقل از یکدیگرند.

با استفاده از تئوری پتانسیل نیوتن، پتانسیل جاذبه در یک نقطه در سیستم مختصات کارترین، به علت حضور یک توزیع جرم با تابع دانسیته و حجم به صورت رابطه‌ی زیر خواهد بود:

$$V(Q) = G \iiint_V \frac{\rho}{l} dv, \quad (1)$$

که در آن $l = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ بیان‌کننده فاصله‌ی بین نقطه المان جرمی (x', y', z') و نقطه‌ی محاسباتی $Q(x, y, z)$ است. G ثابت جاذبه نیوتن بوده و برابر

$$\text{است با } G = 6.6742 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg.s^2} \quad (2)$$

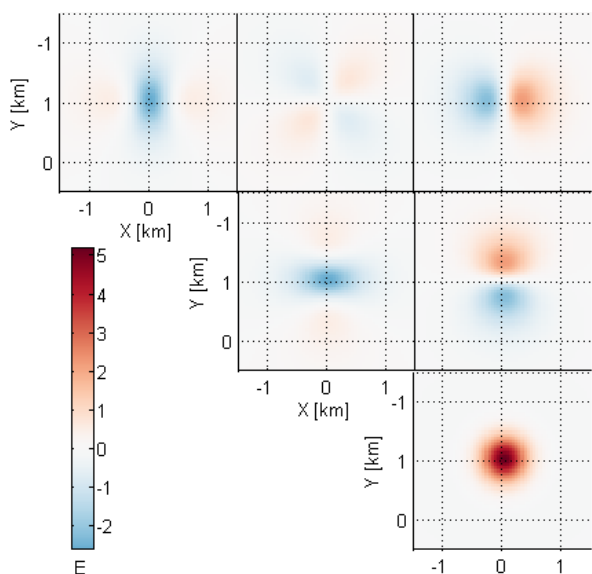
دیفرانسیلی حجم است. بردار نیروی جاذبه، گرادیان پتانسیل جاذبه است:

$$g = (g_x, g_y, g_z)^T = \left(\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z} \right)^T \quad (2)$$

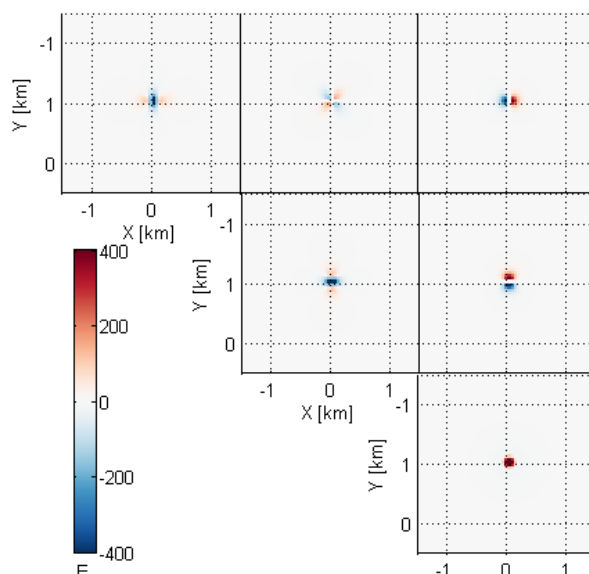
و تانسور گرادیان جاذبه تانسور مرتبه دوم پتانسیل جاذبه است:

(الف) تا (د)، هر بخش نمایش‌دهنده یک عنصر از تانسور گرادیان در منطقه مورد نظر است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، دامنه سیگنال مؤلفه شعاعی تانسور (Γ_{zz}) بیشتر از سایر مؤلفه‌ها است. این مؤلفه در بخش پایین-چپ هر زیرتصویر نمایش داده شده است. همچنین تنها مؤلفه شعاعی تانسور دارای توزیعی همگن در همه جهت‌ها است. لازم به ذکر است که بر اساس معادلات (۵) تا (۱۰) دامنه سیگنال گرادیان جاذبه با افزایش ارتفاع با ضریب $1/l^3$ کاهش می‌یابد. روند تضعیف سیگنال جاذبی از زیر تصویر (الف) تا (د) به دلیل افزایش ارتفاع کاملاً مشهود است. توجه شود، مقیاس نوار رنگی زیرتصاویر یکسان نیست.

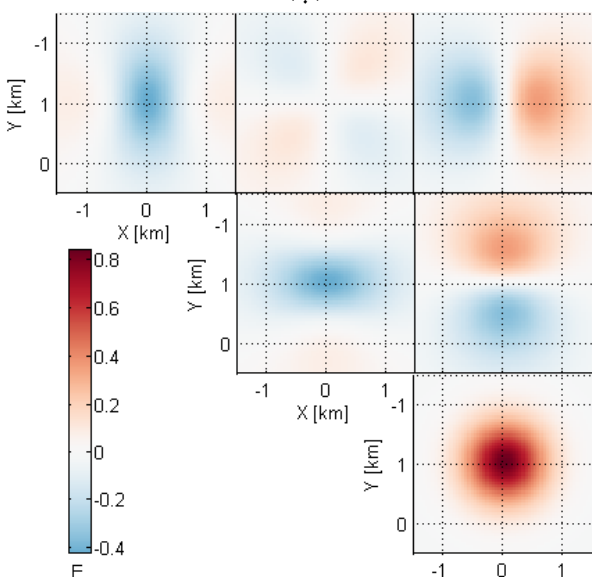
برای محاسبه گرادیان جاذبه حاصل از کره همگن با چگالی ρ و شعاع R ، جرم M در معادلات فوق از رابطه $M = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$ به دست می‌آید. برای مدل‌سازی سیگنال گرادیان جاذبه حاصل از سایر المان‌های جرمی به (وایلد فیفر، ۲۰۰۷) مراجعه شود. برای مشاهده مؤلفه‌های این تانسور، سازه‌ای کروی با شعاع ۱۰۰ متر در عمق ۱۰۰ متری زمین با اختلاف چگالی $\frac{kg}{m^3}$ -۲۰۰۰ نسبت به محیط اطراف شبیه‌سازی می‌گردد. تانسور گرادیان جاذبه حاصل از این هدف زیرزمینی در ارتفاع‌های ۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین محاسبه و در شکل ۱ نمایش داده شده است. کاهش دامنه سیگنال و میرایی آن با افزایش ارتفاع آشکار است. در هر کدام از زیرتصویرهای



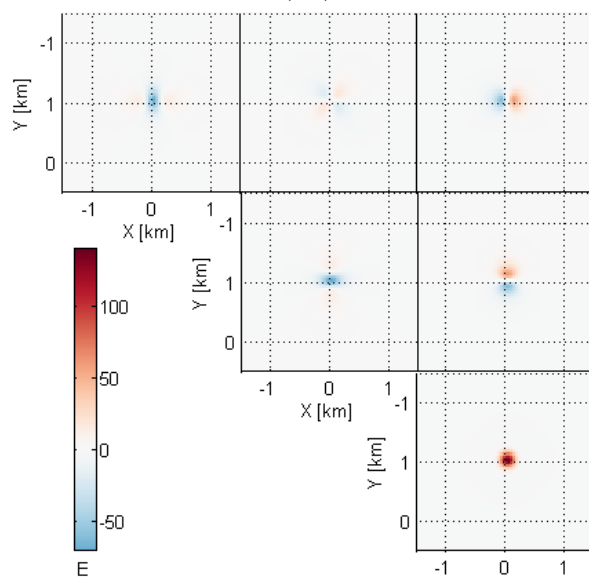
(ب)



(الف)



(د)



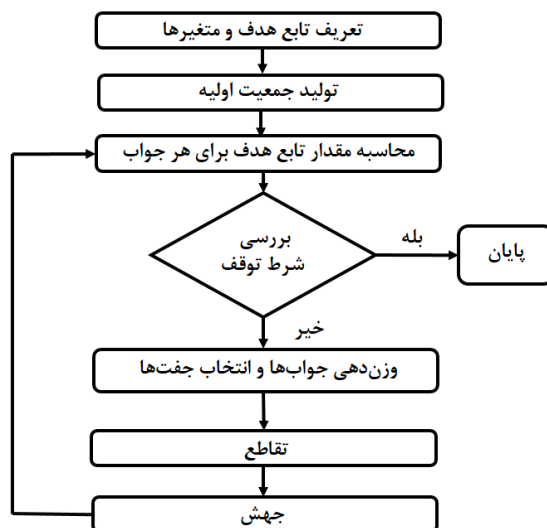
(ج)

شکل ۱: تغییرات تانسور گرادیان جاذبه حاصل از جرم نقطه‌ای در اعماق مختلف برای ارتفاع‌های مختلف سنسور گرادیمتری (مقیاس تصاویر یکسان نیست): (الف) ۱۰۰ متری در سطح زمین (ب) عمق ۱۰۰ متری در ارتفاع ۵۰۰ متری (ج) عمق ۱۰۰ متری در ارتفاع ۱۰۰ متری (د) عمق ۱۰۰ متری در ارتفاع ۱۰۰۰ متری.

کار می‌شود؛ در حالی که روش‌های سنتی بهینه‌سازی تنها با استفاده یک نقطه انجام می‌گیرد. برای تعریف و پیاده‌سازی فضای جستجو دو نوع روش باینری و مقدار حقیقی وجود دارد. در روش باینری کروموزوم‌ها بر اساس مدل باینری کدگذاری می‌شوند؛ ولی در نوع دوم اعداد حقیقی به کار می‌رود. در این مقاله از فضای جستجوی حقیقی استفاده می‌شود. شکل ۲ نحوه کارکرد این الگوریتم را نشان می‌دهد.

۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک بر اساس فرآیندهای تکاملی در طبیعت پایه‌گذاری شده است (هواند، ۱۹۷۵). این الگوریتم از انتخاب طبیعی همراه با مفاهیم وراثتی ژنتیک برای یافتن جواب بهینه استفاده می‌کند. اصول الگوریتم بر پردازش تصادفی هدایت شده استوار است. یکی از تفاوت‌های اساسی این الگوریتم با روش‌های سنتی بهینه‌سازی این است که در این روش با جمعیت یا مجموعه‌ای از نقاط در یک لحظه



شکل ۲: نحوه کارکرد الگوریتم ژنتیک (سحابی و همکاران، ۲۰۰۶).

نسبت داده می‌شوند، تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که تابع هدف را می‌توان به صورت قدر مطلق مجموع اختلافات مقادیر مشاهده شده از محاسباتی و یا قدر مطلق حداکثر اختلاف آن‌ها نیز تعریف کرد.

۳-۲- جمعیت اولیه^۴

اعدادی که به بردار X نسبت داده می‌شود، کروموزوم نامیده می‌شوند و به مجموعه N_{pop} تایی از کروموزوم‌ها جمعیت گفته می‌شود. بنابراین هر جمعیت یک ماتریس با ابعاد $N_{pop} \times N_{var}$ را تشکیل می‌دهد.

۳-۳- تناسب^۵

مقدار تابع هدف برای هر یک از کروموزوم‌ها را تناسب گویند.

۳-۴- انتخاب

الگوریتم ژنتیک برای تکامل جمعیت اولیه و رسیدن به جواب بهینه، چند جواب را از میان جمعیت موجود انتخاب و آن‌ها را برای تولید نسل بعدی بکار می‌برد. نسل بعدی شامل سه نوع جواب است. نوع اول آن‌هایی هستند که بهترین مقدار تناسب را دارند. این مجموعه به

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف تابعی است که هدف از حل مسئله، بهینه‌سازی آن و تعیین نقطه بیشینه یا کمینه آن است. تعداد متغیرهای این تابع با N_{var} و خود متغیرها با بردار X نمایش داده می‌شود. در مسئله تعیین موقعیت سازه‌های زیرزمینی به وسیله داده‌های گرادیان جاذبه تابع هدف به صورت آتی تعریف می‌گردد:

$$f = [(\Gamma_{ij}^{obs} - \Gamma_{ij}^{cal})^T P (\Gamma_{ij}^{obs} - \Gamma_{ij}^{cal})]^{1/2} \quad (11)$$

که در آن $i, j = x, y, z$ بردار گرادیان جاذبه مشاهده شده، Γ_{ij}^{cal} بردار گرادیان جاذبه محاسبه شده با استفاده از معادلات (۵ تا ۱۰) و P ماتریس وزن مشاهدات است. متغیرهای تابع هدف فوق شامل سه مؤلفه موقعیت مرکز جرم کروی و شعاع آن است. متغیرهای تابع هدف فوق شامل سه مؤلفه موقعیت مرکز جرم کروی و شعاع آن است. در نتیجه تعداد متغیرهای این مسئله چهار است.

رابطه ۱۱ اندازه بردار اختلافات مشاهدات از مقادیر محاسباتی آن‌ها بر اساس چهار متغیر اشاره شده را نشان می‌دهد. اندازه این بردار به صورت وزن‌دار که بر اساس دقت مشاهدات وزن‌های مربوطه

4- Initial Population
5- Fitness

یافتن جواب بهینه جستجو می‌کند. بنابراین استفاده از این عملگر باعث می‌شود که مسئله به جواب‌های محلی همگرا نگردد. عملگرهای جهش مختلفی وجود دارند که در این تحقیق از جهش یکنواخت استفاده شده است. در این روش تعداد N_m از تمامی کروموزوم‌ها انتخاب شده و هر یک از اعضای کروموزوم‌های انتخاب شده را با احتمال μ_m تغییر می‌دهد.

۳-۷- شرط توقف

تولید نسل‌های متوالی و تکامل آن‌ها تا زمانی که این شرط حاصل نگردد، ادامه می‌یابد. این شرط به عنوان نمونه می‌تواند تعداد نسل‌ها، تعیین یک حد آستانه برای تابع تناسب و یا ثابت ماندن مقدار تابع هدف پس از چند نسل متوالی باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد. برای این منظور جرمی نقطه‌ای با شعاعی معادل ۱۰۰ متر و

اختلاف چگالی $\frac{kg}{m^3}$ ۲۰۰۰- به عنوان تخمینی از سازه زیرزمینی در

موقعیت $(x_0, y_0, z_0) = (100, 200, -100)$ (مختصات مرکز ثقل جرم) در نظر گرفته می‌شود. در محدوده‌ای مربعی به اندازه ۳۳ کیلومتر و در ارتفاع ۲۰۰ متری داده‌های گرادیان جاذبه با قدرت تفکیک مکانی ۵۰ متری شبیه‌سازی می‌شوند.

در الگوریتم ژنتیک نرخ تقاطع (μ_c) ۰.۸، تعداد جواب‌های برگزیده (N_e) ۵، احتمال جهش یکنواخت (μ_m) ۰.۰۱، پارامتر ثابت در روش تقاطع (C) ۰.۸۵، تعداد جمعیت (N_{pop}) ۵۰ و حداکثر تعداد نسل‌ها هم ۳۰۰۰ انتخاب گردید. کران پایین برای فضای جستجو مجهولات یا همان متغیرهای مسئله (x_0, y_0, z_0, R) برابر با $(-1500, -1500, -1000, 1000)$ و کران بالای آن $(1500, 1000, 0, 1500)$ انتخاب شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای بررسی کارایی این الگوریتم فضای جستجو تا حد ممکن بزرگ در نظر گرفته شده است.

در اولین مرحله برای بررسی صحت الگوریتم پیشنهادی مؤلفه حاصل از هدف زیرزمینی شبیه‌سازی شده در فوق به عنوان مشاهده در نظر گرفته شده و الگوریتم ژنتیک با پارامترها و تابع هدف تعریف شده برای حل مسئله بکار گرفته می‌شود. گرادیان جاذبه Γ_{ii} شبیه‌سازی شده در شکل ۳ آمده است. با توجه به این شکل، بیشترین دامنه سیگنال حدوداً ۱۳۰ اتووش است. محور X و Y در این شکل نمایش‌دهنده موقعیت هر نقطه و محور Z بیانگر مؤلفه Γ_{ii} حاصل از منبع زیرزمینی در آن نقطه است. روش است با نزدیک شدن به مرکز منبع، مقدار گرادیان به بیشینه مقدار خود خواهد رسید.

صورت مستقیم و بدون هیچ تغییری از نسل موجود به نسل بعدی منتقل می‌شود. این دسته جواب‌ها را جواب برگزیده ۶ می‌نامند. دو مجموعه دیگر با بکار بردن دو عملگر ژنتیکی از کروموزوم‌های انتخاب شده نسل موجود ایجاد می‌گردند. کروموزوم‌های انتخاب شده والدین نامیده می‌شوند. والدین بر اساس امتیاز یا مقادیر تناسب خود انتخاب می‌شوند. برای رسیدن به جواب بهتر کروموزوم‌ها وزن‌دهی می‌شوند. وزن‌دهی می‌تواند بر اساس مرتبه جواب‌ها در جمعیت حاضر انجام گیرد. برای این کار جواب‌ها بر اساس مقدار تناسب خود اولویت‌بندی می‌شوند. بنابراین مرتبه هر کروموزوم با موقعیت آن در جمعیت طبقه‌بندی شده برابر است. وزن هر کروموزوم به صورت زیر می‌تواند تعریف شود:

$$P_i = \frac{N_{pop} - i + 1}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} 1} \quad (12)$$

سپس روش چرخ رولت برای انتخاب والدین بکار گرفته می‌شود. در این روش وزن تجمعی چرخ را ایجاد می‌کند. یک بردار از اعداد تصادفی بین صفر و یک تولید شده و اولین کروموزومی که وزن تجمعی آن بزرگ‌تر از عدد تصادفی تولید شده باشد، به عنوان والد برای نسل بعد انتخاب می‌گردد. کروموزوم‌های با تناسب بالاتر از شانس بالاتری برای انتخاب برخوردارند.

۳-۵- تقاطع

این عملگر بر روی دو والد انتخاب شده اعمال می‌شود تا یک یا دو کروموزوم برای نسل بعد تولید گردد. در این مقاله از تقاطع میانی استفاده شده است. در این روش دو والد به صورت زیر باهم ترکیب می‌شوند:

$$X' = X_1 + rand \times C(X_2 - X_1) \quad (13)$$

که در آن $rand$ یک عدد تصادفی بین صفر و یک و C نیز یک ضریب ثابت بین صفر و یک است. تعداد کروموزوم‌های تولید شده در نسل جدید توسط این اپراتور بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$N_e = round(\mu_c(N_{pop} - N_e)) \quad (14)$$

که در آن N_e تعداد کروموزوم‌های حاصل از ترکیب والدین، μ_c درصدی از جمعیت است که عملگر تقاطع بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد، N_{pop} اندازه جمعیت و N_e تعداد کروموزوم‌های ممتاز است.

۳-۶- جهش

این عملگر به ما کمک می‌کند که اعضای کروموزوم را به صورت تصادفی تغییر دهیم. هدف این عملگر ایجاد تنوع در جمعیت است. الگوریتم ژنتیک با استفاده از این عملگر فضای بزرگ‌تری را برای

یکی از مزیت‌های روش‌های عددی مانند الگوریتم ژنتیک نسبت به روش کمترین مربعات در نظر گرفته شود. چرا که همگرایی روش کمترین مربعات برای مشاهدات با سطح نوفه بالا با مشکل مواجه می‌شود.

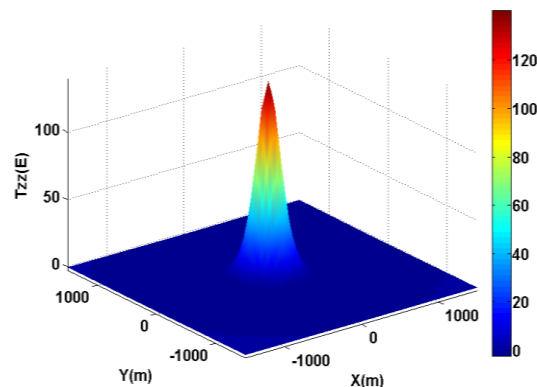
اختلاف مشاهدات Γ_{zz} و مقادیر محاسباتی گرادیان جاذبه Γ_{zz} حاصل از جواب‌های برآورد شده، بردار باقی‌مانده مشاهدات نامیده می‌شود. با فرض نرمال بودن تابع توزیع نوفه مشاهدات، می‌توان با محاسبه انحراف معیار این بردار باقی‌مانده به برآوردی از سطح نوفه مشاهدات دست یافت. انحراف معیار بردار باقی‌مانده به ازای مثال‌های ارائه شده با سطح نوفه‌های اشاره شده در جدول ۱ به ترتیب ۱، ۰، ۱، ۳، ۰، ۳، ۵، ۰، ۵ و ۱۰، ۱۳ اتووش است. با مقایسه این اعداد با نوفه استفاده شده در شبیه‌سازی داده‌ها می‌توان دقت بالای جواب برآورد شده توسط الگوریتم ژنتیک را نتیجه گرفت.

جدول ۱: جواب الگوریتم ژنتیک به ازای نوفه‌های مختلف مشاهداتی.

سطح نوفه	x_0	y_0	z_0	R
۱ E	۱۰۰،۵۵	۲۰۰،۱۸	-۹۹،۸۶	۹۸،۸۰
۳ E	۱۰۱،۵۵	۱۹۹،۷۷	-۱۰۰،۴۵	۹۸،۸۲
۵ E	۱۰۱،۵۶	۱۹۹،۶۲	-۱۰۰،۷۳	۹۸،۷۰
۱۰ E	۱۰۲،۵۰	۲۰۲،۰۹	-۱۰۳،۱۶	۱۰۱،۶۱

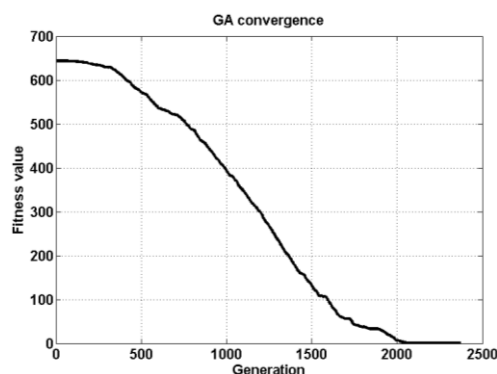
حال به جای استفاده از یک مؤلفه تنسور گرادیان جاذبه، از سه مؤلفه قطری در این شبیه‌سازی با نوفه ۱۰ اتووش استفاده می‌شود. الگوریتم به مقدار ۹۸،۹۸ برای شعاع و بردار (۱۰۱،۱۳، -۲۰۱،۷۶، ۹۸،۲۷) برای مختصات مرکز جرم همگرا می‌گردد. از مقایسه این مقادیر با سطر آخر جدول ۱ (نتایج شبیه‌سازی با استفاده از یک مؤلفه گرادیان جاذبه Γ_{zz})، به این نتیجه می‌رسیم که با اضافه کردن دیگر مشاهدات درجه آزادی مسئله افزایش یافته و دقت افزایش می‌یابد.

از آنجایی که با افزایش ارتفاع پرواز از دامنه سیگنال جاذبه کاسته می‌شود، یک شبیه‌سازی در ارتفاع ۴۰۰ متری با سطح نوفه ۴ اتووش تعریف می‌شود؛ تا به عنوان یک سناریو در یکی از بدترین حالت‌های ممکن کارایی الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گیرد. برای درک بهتر مسئله، مؤلفه‌های قطر اصلی تنسور گرادیان جاذبه به دو صورت عاری از نوفه (زیرتصاویر سمت راست) و آغشته به نوفه (زیرتصاویر سمت چپ) در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، واضح است که به دلیل کم بودن دامنه سیگنال مشاهداتی و بالا بودن نسبی سطح نوفه، مسئله کشف هدف زیرزمینی در این مورد به مسئله‌ای مشکل و پیچیده تبدیل می‌گردد. جواب برآورد شده توسط الگوریتم ژنتیک برای این مسئله (۱۰۰،۲۵، -۹۵،۸۴، ۱۹۸،۱۶، ۸۳،۹۴) است. این جواب نشان‌دهنده کارایی این الگوریتم در مسائل با دامنه سیگنال نسبتاً پایین و سطح نوفه بالا است.



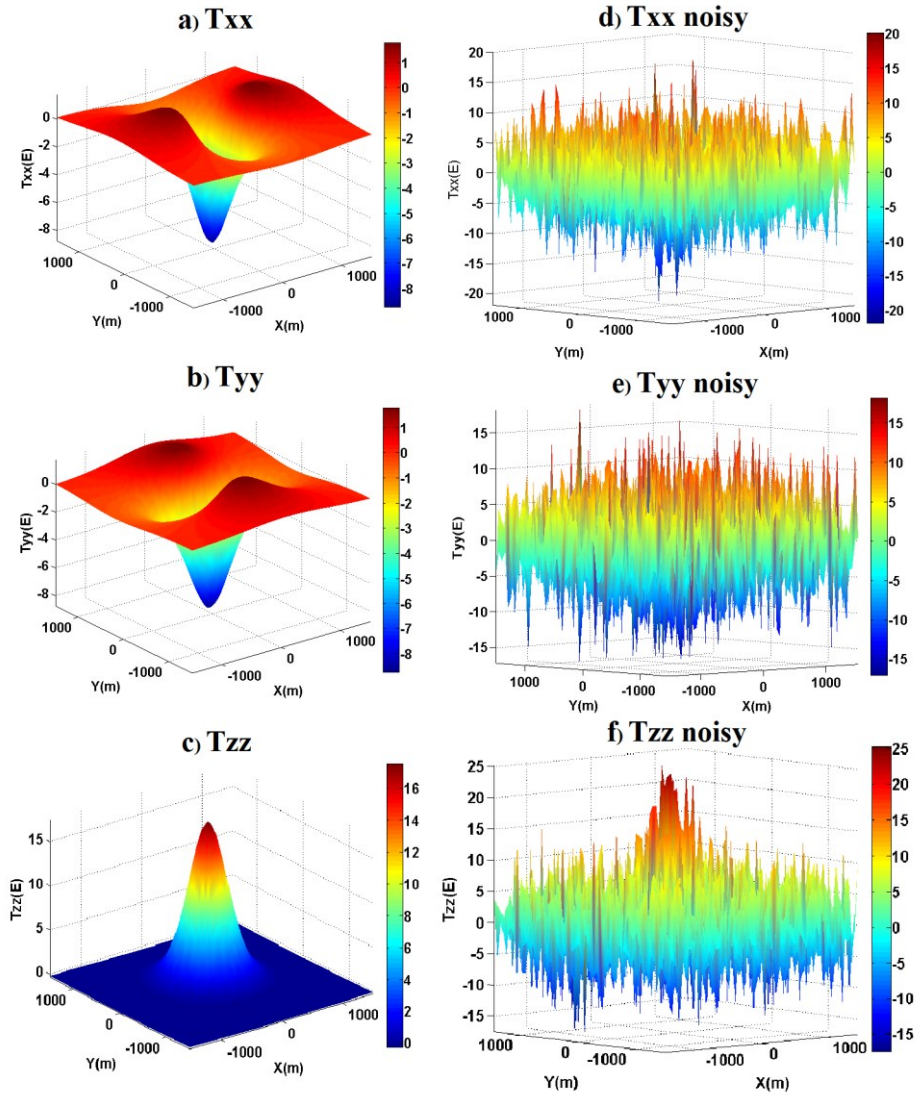
شکل ۳: گرادیان جاذبه شبیه‌سازی شده از جرم نقطه‌ای با شعاع معادل ۱۵۰ متر و مختصات مرکز ثقل (۱۰۰، ۲۰۰، -۱۰۰).

نتایج حاصله نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک به جواب صحیح همگرا می‌شود. نمودار همگرایی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، الگوریتم پس از حدوداً ۲۰۰۰ نسل به جواب صحیح همگرا می‌گردد. لازم به ذکر است که به دلیل عاری از هرگونه نوفه اتفاقی بودن مسئله طراحی شده، مقدار تابع هدف برای جواب برآورد شده صفر است که نشان‌دهنده همگرایی صحیح و دقیق این الگوریتم است. برای افزایش سرعت همگرایی و رسیدن به جواب نهایی می‌توان فضای جستجو محدودتری انتخاب کرد. محدودتر کردن فضای جستجو معمولاً با داشتن اطلاعات اولیه از مسئله انجام می‌گیرد.

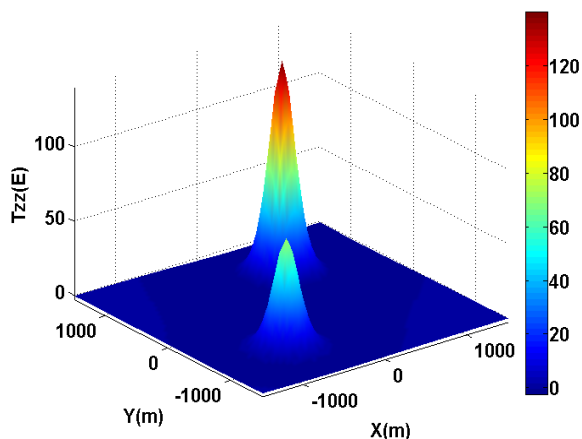


شکل ۴: نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک در مسئله عاری از نوفه با استفاده از گرادیان جاذبه.

در مرحله بعد، به بررسی اثر سطح نوفه مشاهدات روی دقت جواب حاصله می‌پردازیم. برای این منظور، گرادیان جاذبه Γ_{zz} شبیه‌سازی شده در مثال بالا به نوفه سفید با میانگین صفر و انحراف معیار ۱، ۳، ۵ و ۱۰ اتووش آغشته می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان اثر سطح نوفه دستگاه گرادیمتر را روی دقت جواب حاصله مورد ارزیابی قرار داد. جواب حاصله برای سطح نوفه‌های مختلف در جدول ۱ آمده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در این جدول می‌توان گفت که حتی به ازای سطح نوفه بالایی مانند ۵ و ۱۰ اتووش هم این الگوریتم به جواب نسبتاً درست همگرا می‌شود. این نکته می‌تواند به عنوان



شکل ۵: داده‌های گرادیان جاذبه شبیه‌سازی شده به دو صورت عاری از نوفه و آغشته به نوفه مشاهداتی در ارتفاع ۴۰۰ متری با نوفه ۴ اتووش.



شکل ۶: گرادیان جاذبه Γ_{zz} شبیه‌سازی شده حاصل از دو منبع زیرزمینی.

گرادیان جاذبه Γ_{zz} شبیه‌سازی شده حاصل از دو منبع زیر-زمینی در شکل ۶ آمده است. با توجه به این شکل، بی‌هنجاری‌های ناشی از وجود دو منبع زیرزمینی در یک پس زمینه همگن به طور وضوح نمایان است. در استفاده از الگوریتم ژنتیک، لازم به ذکر است که تعداد متغیرهای مسئله به دلیل وجود دو منبع از چهار به هشت عدد افزایش می‌یابند. واضح است که به این دلیل تعداد نسل‌های لازم برای همگرایی الگوریتم افزایش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهد که هر یک از هشت متغیر به صورت کاملاً دقیق برآورد می‌شوند. حال به این مسئله نوفه نرمال با انحراف معیار ۱۰ اتووش اضافه می‌کنیم. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در این مورد، الگوریتم فقط قادر است مختصات و شعاع یکی از منابع را صحیح برآورد کند و منبع دیگر به اشتباه برآورد می‌گردد. بنابراین در مواجهه با مسائلی با چند منبع، باید با احتیاط و توجه بیشتری از این الگوریتم جهت کشف سازه‌های زیرزمینی استفاده کرد.

معدنچی زارع، ا.، دهقانی، ح.، موسی زاده، ک. و تقوی، س.ر.، ۱۳۹۲، مدل‌سازی توانمندی سنجنده‌های ژئوفیزیکی در شناسایی تأسیسات زیرزمینی و راهکارهای مقابله با آن. فصلنامه پدافند غیرعامل، ۴ (۴)، ۶۳-۷۳.

Engelbrecht, A.P., 2007, Computational intelligence: an introduction, John Wiley & Sons.

Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H., 2006, Physical geodesy, Springer Science & Business Media.

Holland, J.H., 1975, Adaption in natural and artificial systems, University of Michigan press, Ann Arbor.

Linger, D.A., Baker, G.H. and Little, R.G., 2002, Application of underground structures for the physical protection of critical infrastructures, North American Tunneling, Editor: Ozdemir. Swets and Zetlinger, Lisse.

Montesinos, F.G., Arnoso, J. and Vieira, R., 2005, Using a genetic algorithm for 3-D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands), International Journal of Earth Sciences, 94 (2), 301-316.

Sahabi, H., Rajabi, M.A. and Blais, J.A.R., 2006, Second Order Design of Geodetic Networks Using Augmented Lagrangian Genetic Algorithm, Map Asia.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sherif, R.E., 1990, Applied Geophysics, Cambridge university press.

Wild-Pfeiffer, F., 2008, A comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry, Journal of Geodesy, 82, 637-653.

Zhang, J., Chi-Yuen, W., Yaolin, S., Yongen, C., Wu-Cheng, C., Douglas, D., Win-Bin, C. and Yen-Horng, Y., 2004, Three-dimensional crustal structure in central Taiwan from gravity inversion with a parallel genetic algorithm, Geophysics, 69 (4), 917-924.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از داده‌های جاذبه، به ویژه مشاهدات گرادیان جاذبه، یکی از کاراترین روش‌ها در کشف و تعیین موقعیت تأسیسات زیرزمینی است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای تعیین موقعیت و اندازه سازه‌های زیرزمینی استفاده شد.

نتایج عددی حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که الگوریتم ژنتیک در تعیین موقعیت سازه‌های زیرزمینی حتی در سطح نوفه‌های بالا یعنی ۵ و ۱۰ اتووش با اضافه کردن دیگر مؤلفه‌های گرادیان جاذبه علاوه بر مؤلفه Γ_{zz} درجه آزادی مسئله بیشتر می‌شود و در نتیجه دقت افزایش می‌یابد.

علاوه بر شبیه‌سازی یک منبع، با انجام یک شبیه‌سازی نشان داده شد که این الگوریتم توانایی کشف چند منبع همزمان را در حالت استفاده از داده‌های با دقت بسیار بالا داراست؛ اما در حالتی که گرادیان‌های جاذبه به نوفه با سطح بالا آغشته شدند، الگوریتم قادر به کشف تمامی منابع نیست. به عنوان پیشنهاد برای حل مسئله در این موارد خاص می‌توان به روش‌های هیبریدی اشاره کرد. در این روش‌ها جواب نهایی حاصل از الگوریتم ژنتیک به عنوان جواب اولیه برای روش‌های تحلیلی مانند کمترین مربعات یا انواع روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶- منابع

سهامی، ح.، رادان، م.ی. و مجیدی، د.، ۱۳۹۱، شناسایی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های ثقل‌سنجی، علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل، ۳ (۱)، ۸۱-۹۴.

سیف، م.ر. و خزائی، ص.، ۱۳۹۴، آشکارسازی و تعیین موقعیت اهداف و تأسیسات زیرزمینی با استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبه‌ای به روش دکانونلوشن اوپلر، علوم و فناوری‌های پدافند نوین، ۶ (۱)، ۳۳-۴۱.

عابدینی، م.، ۱۳۹۱، شناسایی اهداف زیرزمینی، گزارش پروژه، دانشگاه مالک اشتر.



Detection of underground structures in gravity gradient observations using genetic algorithms

Mohammad Reza Seif¹, Hamed Sabagh^{2*} and Safa Khazaei³

1- Ph.D., Department of Surveying and Geomatics, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student, School of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Passive Defense, University of Imam Hossein, Iran

Received: 10 January 2017; Accepted: 23 June 2017

Corresponding author: sabagh_hamed72@ut.ac.ir

Keywords

Gravity Gradient Observations
Underground Structures
Genetic Algorithm

Extended Abstract

Summary

Detection of underground structures is important in both civil and military applications. Detection such facilities usually cannot be fulfilled by using remotely sensed images. Hence, geophysical methods have widely been employed for this purpose. Among geophysical methods, which are used to

detect underground structures, gravity gradiometry is one of the most efficient methods. In this study, genetic algorithm is used to solve the gradiometry inverse problem in order to detect underground structures. Genetic algorithm as one of the evolutionary algorithms, due to solving nonlinear problems without any requirement of an initial solution, can be considered as a useful and efficient method. This method in addition to its counterparts, like least square approach, is used to solve optimization problems and yet has some advantages over those methods. In this paper, genetic algorithm is applied to detect underground structures and to estimate their locations and sizes from simulated gravity gradient signals. Moreover, by studying the noise level of gradiometer instruments, the problem of detectability is thoroughly analyzed.

Introduction

Underground structures can be detected from gravity gradient observations. The gradiometer is not sensitive to the vehicle acceleration. Thus, the gravity gradiometry can be employed on a moving vehicles and that is why this method is preferred over simple gravimetry. One way to analyze data obtained by gravity gradient is to use genetic algorithm (GA) to solve optimization problems.

Methodology and Approaches

GA method has been used to solve the gradiometry problem for detecting underground structures. This algorithm helps to find a value for the unknown parameter (so-called population) over generations in such a way to optimize the fitness function. This algorithm helps us to search the best solution over a population of candidate solutions. During this procedure, the optimization problem is evolved toward better and better solutions. The properties of each candidate can be mutated and altered.

Results and Conclusions

In this paper, it has been shown that GA method can be used to detect underground structures and to estimate their sizes and positions from gradiometry data. GA method has its own kind of advantages over least square method. The results of applying GA algorithm in this study show that the underground structures could be detectable even when we have high noisy data.