نشریه علمی - پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره چهارم، شماره ۴، اردیبهشت ماه ۱۳۹۴

استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان جهت مدل‌سازی معکوس داده های ثقل سنجی(مطالعه موردی منطقه گتوند-ایران)

میترا محمدزاده شادمهری*[۱]، محمدعلی شریفی[۲]، وحید ابراهیم‌زاده اردستانی[۳]
عبدالرضا صفری[۲]،امین باغانی[۴]

[۱] کارشناس ارشد ژئودزی- گروه مهندسی نقشه برداری-پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
m_mohammadzade@ut.ac.ir

[۲] دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
{sharifi, asafari}@ut.ac.ir

[۳] دانشیار گروه فیزیک و زمین- مؤسسهٔ ژئوفیزیک- دانشگاه تهران
ebrahimz@ut.ac.ir

[۴] دانشجوی دکتری فتوگرامتری- دانشکده نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
amin_baghani@mail.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر۱۳۹۳، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۳)

Archive of SID

چکیده

در حال حاضر در زمینه بهینه‌سازی، الگوریتم کلونی مورچه‌ها تاکنون بر روی مسائل بهینه‌سازی گوناگونی، به صورت موفقیت آمیز پیاده‌سازی و اجرا گردیده است. این الگوریتم برگرفته از زندگی واقعی مورچه‌ها برای یافتن کوتاهترین مسیر از لانه تا غذا الهام گرفته است. با تعمیم این رفتار مورچه‌ها به مسائل معکوس در ژئوفیزیک، به منظور یافتن مدلی که به بهترین وجه به داده‌های مشاهده‌ای برازش داده شده باشد، می‌توان از این الگوریتم استفاده کرد. در این مقاله، هدف مدل‌سازی معکوس داده‌های ثقل‌سنجی بصورت خطی می‌باشد، یعنی با ثابت نگه داشتن پارامترهای هندسی، پارامترهای فیزیکی مدل‌سازی شود. جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی، ابتدا الگوریتم توسط مدل مصنوعی‌ای با هندسه پیچیده T و L مورد آزمایش قرار گرفته است. این روش برای داده‌های مصنوعی نویزدار و بدون نویز آزمایش شد. نتایج بدست آمده نشان داد با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان می‌توان آنومالی حاصل از مدل‌هایی با هندسه پیچیده و جهت‌دار را به خوبی مدل‌سازی کرد و همچنین این روش برای ترکیبی از مدل‌ها با تباین چگالی مختلف قابل استفاده است. در-نهایت روش پیشنهادی برای داده‌های ثقل‌سنجی مربوط به منطقه سد گتوند واقع در استان خوزستان مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از معکوس‌سازی داده‌ها، حفره‌هایی با عمق و قطر زیاد را در منطقه نشان می‌دهد. در نتیجه احداث سد، با توجه به اطلاعات زمین شناسی منطقه باعث بوجود آمدن عوارض جدی زیست محیطی خواهد بود.

واژگان کلیدی: الگوریتم کلونی مورچگان، مدل‌سازی معکوس خطی، مدل مصنوعی، داده های ثقل سنجی

* نویسنده رابط

www.SID.ir

۱- مقدمه

مسأله اصلی در تفسیر داده‌های گراویمتری تشخیص پارامترهای هندسی و پارامترهای فیزیکی (تباین چگالی) توده‌های جرمی زیرزمین با استفاده از مشاهدات روی سطح زمین است .ازاین‌رو جهت دستیابی به هندسه و تباین چگالی منابع آنومالی ایجاد کننده در منطقه با یک مسئله معکوس روبه‌رو هستیم. به طور قطع وارون سازی داده ها در ثقل‌سنجی غیر یکتاست[۲]و [۱۵]. این امر به دلیل وجود جواب‌های همگن در یک دستگاه معادلات به وجود می‌آید. جهت فائق آمدن بر این مشکل می‌توان از اطلاعات اضافه‌ای در رابطه با پارامترهای مدل (ساختار زیر سطحی) و یا پارامترهای داده‌ها (ویژگی‌های آماری داده‌ها نظیر توزیع گوسی) در فرآیند مدل‌سازی معکوس استفاده کرد[۷] و [۹].

در مدل‌سازی معکوس داده‌های ثقل‌سنجی، باتوجه به هدف از انجام مسئله که تعیین کننده نوع پارامترهای مدل است، از دو نوع عملگر متفاوت استفاده می‌کنند. در حالت اول اگر هدف تعیین پارامترهای هندسی منبع باشد، باید تباین چگالی را ثابت فرض کرد و از عملگر غیر خطی استفاده نمود. معمولاً برای تبدیل این دستگاه به یک دستگاه معادلات خطی، باید از تقریب‌های متداول نظیر بسط تیلور استفاده کرد[۸] و [۹]. در این راستا، برای مدل‌سازی معکوس غیرخطی، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک GA[۱] [۹] ، الگوریتم بهینه سازی گروهی ذرات PSO[۲] [۱۴] و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان ACO[۳] [۱۳] استفاده کردند، مقایسه‌ی بین این سه الگوریتم و همچنین الگوریتم تبرید شبیه‌سازی SA[۴] نشان می‌دهد که الگوریتم ACO و PSO دارای دقت و سرعت همگرایی بالاتری نسبت به GA و SA هستند[۱۴]. در حالت دوم اگر هدف تعیین پارامترهای فیزیکی (تباین چگالی) باشد، باید هندسه را ثابت فرض کرد و از عملگر خطی استفاده نمود. در این راستا، جهت مدل‌سازی معکوس خطی انواع مدل‌های مصنوعی برای اولین بار، از الگوریتم بهینه‌سازی ACO [۱۸] استفاده کرد.

در این پژوهش، الگوریتم کلونی مورچگان جهت مدل-سازی معکوس خطی بر روی داده‌های واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوریتم کلونی مورچه‌ها تاکنون بر روی مسائل بهینه‌سازی گوناگونی، به صورت موفقیت آمیز پیاده‌سازی و اجرا گردیده است. این الگوریتم برگرفته از زندگی واقعی مورچه‌ها می‌باشد که در سال ۱۹۹۲ توسط مارکو دریگو ارائه شد. الگوریتم کلونی مورچه‌ها از هوش جمعی بهره برده و براین اصل بنا نهاده شده که تعاملات محلی، محدود و ساده اعضای یک دسته جمعیت با محیط، منتهی به یک رفتار جمعی هوشمندانه می‌شود. این تعاملات غریزی بوده و بدون نظارت انجام می‌گیرند و نتیجه آنها غالباً یک رفتار پیچیده و هوشمندانه جمعی و بطور خاص انجام برخی بهینه‌سازی‌های پیچیده است. از ویژگی‌های مثبت این الگوریتم می‌توان سرعت همگرایی بالا و همچنین به کار گیری ساده و راحت و دقیق آن در حل مسائل نام برد[۱۴]و [۵].

در ادامه، پس از معرفی الگوریتم ACO و مدل مورد استفاده در این زمینه، به چگونگی پیاده سازی الگوریتم ACO جهت مدل سازی معکوس سه بعدی پرداخته شده است، سپس الگوریتم طراحی شده برای داده‌های مصنوعی و دادهای واقعی مربوط به منطقه سد گتوند ایران مورد تحلیل قرار گرفته و در انتها نیز به جمع بندی نتایج حاصل از این تحقیق پرداخته شده است.

۲- مبانی تئوری تحقیق

۲-۱- مدل بکار رفته

مدلی که در اینجا به کار رفته است، یکی از معروف ترین مدل‌هایی است که پلوف برای مدل‌سازی سه‌بعدی آنومالی گرانی بیان کرده است[۳]. در این مدل، مجموعه‌ای از بلوک‌های مکعبی برای تقریب شکل فرضیه به کار می-رود. این تقریب سه‌بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. هریک از این بلوک‌ها می‌توانند اختلاف چگالی دلخواهی با محیط اطراف داشته باشند؛ بنابراین طبق اصل جمع پذیری اثر داده‌های گرانی، آنومالی گرانی در هر نقطه را می‌توان به صورت تقریبی از مجموع اثر هر کدام از بلوک‌ها دانست [۳].

---

۱ Genetic Algorithm
۲ Partical Swarm Optimization
۳ Ant Colony Optimization
۴ Simulated Annealing

www.SID.ir
Archive of SID

یک منشور چهاروجهی با چگالی یکنواخت ρ و با ابعاد مشخص شده در محدوده $x_1 \le x \le x_2$ ، $y_1 \le y \le y_2$ و $x_1 \le x \le x_2$ در مرکز مختصات، دارای جاذبه قائم به صورت زیر است :

$$g = G\rho \int_{z_1}^{z_2}\int_{y_1}^{y_2}\int_{x_1}^{x_2} \frac{z'}{(x'^2+y'^2+z'^2)^{3/2}} dx'dy'dz' , \quad (۱)$$

که پلوف[۱۱] با محاسبه عددی انتگرال بالا، فرمول زیر را عرضه کرد[۳] :

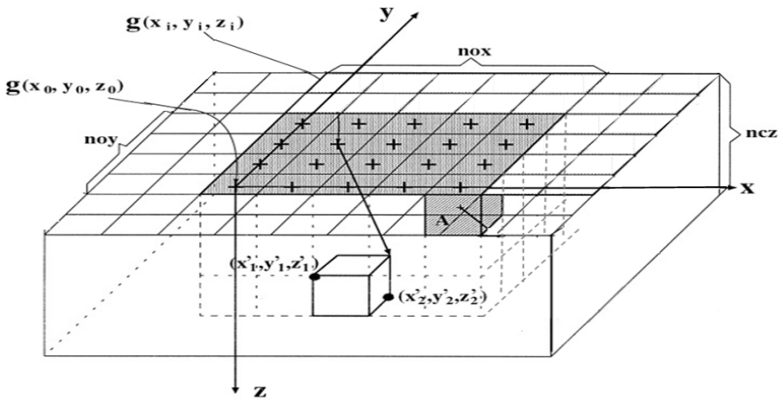
$$g = G\rho \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2} u_{ijk} \begin{bmatrix} z_k \arctan\frac{x_i y_i}{z_k R_{ijk}} \\ -x_i \log(R_{ijk}+y_i) \\ -y_i \log(R_{ijk}+x_i) \end{bmatrix}, \quad (۲)$$

که: $u_{ijk} = (-1)^i(-1)^j(-1)^k$ و $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$

در این رابطه i, j, k هریک مقادیر یک و دو را می‌توانند داشته باشند که به ترتیب ابتدا و انتهای هر ضلع از بلوک مکعبی را در راستای x, y, z نشان می‌دهد. در حالت کلی می‌توان اثر بلوک‌های تولید کننده آنومالی گرانی را به صورت ضرب ماتریسی در رابطه ۳ نشان داد:

$$g_p^{Calculate} = \sum_{q=1}^{M} A_{pq}\rho_q , \quad (۳)$$

که $g_p^{Calculate}$ جاذبهٔ قائم در نقطهٔ مشاهده‌ای p و A_{pq} ماتریسی است که شامل ضرایب هندسی وابسته به بلوک مکعبی q و نقطه مشاهده‌ای p می‌باشد. ρ_q تباین چگالی بلوک مکعبی q است که مجهول است و بایستی با الگوریتم ACO تعیین شود. چگالی بر حسب kg/m^3 و جاذبه گرانشی برحسب $mGal$ است.



شکل ۱- مدل تشکیل شده از بلوک‌های قائم را نشان می‌دهد که آنومالی مشاهده شده در هر ایستگاه (+) مجموع اثرات ناشی از هریک از بلوک‌های مجزا در آن ایستگاه است و ایستگاه‌های $g(x_i,y_i,z_i)$ در مرکز وجه بالایی مکعب‌ها واقع شده‌اند که nox , noz , noy تعداد مشاهدات و تعداد بلوک‌ها در راستای x,y,z است [۱۲].

۲-۲- الگوریتم کلونی مورچگان

منشأ پیدایش این الگوریتم، الهام گرفته از اثری است که مورچه‌ها هنگام حرکت برجای می‌گذارند. بسیاری از گونه‌های مورچه در مسیر حرکت خود ماده‌ای به نام فرومون[۱] روی زمین به‌جای می‌گذارند و بدین طریق یک اثر ایجاد می‌کنند که از آن برای علامت‌گذاری مسیر طی شده استفاده می‌شود. این اثر، ابزار ارتباطی آنها به‌حساب می‌آید و در حقیقت با حس کردن اثرات فرومون، مورچه‌های دیگر که در جستجوی غذا هستند می‌توانند مسیر را به سمت منبع غذاهایی که دیگران کشف کرده‌اند پیدا کنند [۴] و [۶].

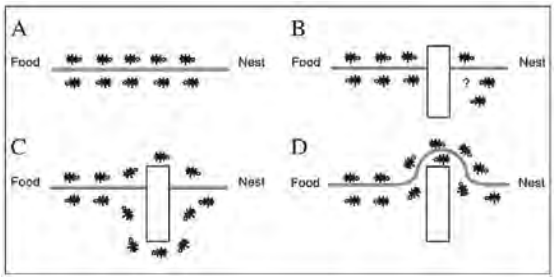
نکته حائز اهمیت در زندگی کلونی مورچگان، توانایی سازگاری مورچه‌ها با تغییرات محیط پیرامون‌شان می‌باشد. به‌عنوان مثال زمانی که کوتاهترین مسیر به دلیل وجود یک مانع بسته شده باشد(شکل۲-B)، دیگر نمی‌توانند اثر

۱ Pheromone

www.SID.ir

فرومون را دنبال کنند. بنابراین به‌صورت اتفاقی برخی مورچه‌ها چرخش به راست، و برخی دیگر چرخش به چپ را انتخاب می‌کنند شکل ۲-C. مورچه‌هایی که به‌صورت اتفاقی راه کوتاهتر را انتخاب می‌کنند، در مقایسه با مورچه‌هایی که مسیر طولانی‌تر را انتخاب کرده‌اند، به صورت سریعتر فرومون قبلی را تقویت می‌نمایند. بنابراین در ادامه مورچه‌های بیشتری مسیر کوتاهتر را که مقدار فرومون بیشتری دارد، انتخاب می‌کنند شکل ۲-D. به‌دلیل این بازخورد مثبت، اکثر مورچه‌ها به سرعت مسیر کوتاهتر جدید را برمی‌گزینند (شکل ۲).

مسائل بهینه‌سازی در الگوریتم ACO در قالب یک گراف متشکل از رئوس و یالها سازماندهی می‌شوند (شکل ۳). وضعیت‌های مساله، مجموعه‌ای از تمامی تورهای ممکن برای پیمایش مورچه‌ها در این گراف است. هر راه حل ممکن در الگوریتم ACO، به صورت یک گراف متشکل از مجموعه‌ای از یالها و گره‌ها نمایش داده می‌شود. انتخاب یک گره توسط مورچه‌ها براساس میزان فرومون منتسب به آن گره انجام می‌شود و میزان فرومون موجود بر روی هر گره متناسب با میزان شایستگی آن گره و در نتیجه تعداد دفعات انتخاب آن توسط مورچه‌ها تعیین می‌گردد. همچنین تبخیر فرومون نیز متناسب با فرومون موجود بر روی هر گره، از کلیه گره‌ها صورت می‌پذیرد.



شکل ۲- نمایش مراحل یافتن کوتاهترین مسیر توسط مورچه‌ها [۵]

گام‌های اساسی در الگوریتم کلونی مورچگان را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

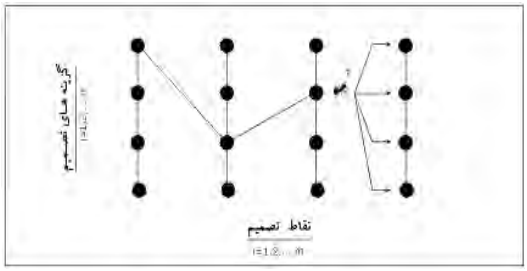
۱. در ابتدای محاسبات، مقداری فرومون به طور مساوی بر روی تمامی گزینه‌ها توزیع می‌شود.

۲. هرکدام از مورچه‌ها در ابتدای پیمایش مسیر، بر روی نقاط مختلف تصمیم قرار می‌گیرند. هر مورچه برای انتقال از یک نقطه تصمیم به نقطه تصمیم بعدی باید از قانون تصمیم‌گیری استفاده کند تا اینکه یک جواب کامل تولید گردد. در این روند، انتخاب نقاط کاندید با مقدار فرومون بیشتر، از احتمال بالاتری برخوردار است.

۳. پس از پیمایش کامل مسیر و تولید جواب کامل توسط هر مورچه، شایستگی جواب تولید شده محاسبه می‌شود.

۴. به تمامی رئوس پیموده شده در مسیر حرکت هر مورچه، یک میزان فرومون متناسب با میزان شایستگی مسیر تعلق می‌گیرد. همچنین تبخیر فرومون، از روی کلیه گزینه‌های موجود، متناسب با فرومون موجود بر روی هر گزینه صورت می‌پذیرد.

۵. مراحل ۲، ۳ و ۴ برای مجموعه‌ای از مورچگان تکرار می‌گردد تا شرط همگرایی برآورده شود.



شکل ۳- گراف الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان [۵]

۳- روش تحقیق

در این تحقیق الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها به منظور مدل‌سازی معکوس داده‌های ثقل‌سنجی طراحی گردید. برای این منظور، در قدم اول مسئله مورد نظر در قالب یک گراف تعریف و ساختاربندی شده و در قدم دوم، میزان فرومون اولیه‌ای که به منظور شروع الگوریتم بایستی بر روی هر گره از گراف قرار گیرد ارزیابی شده است. در قدم سوم ساز و کار پیمایش گراف توسط مورچه‌ها تعریف گردید، این مرحله موسوم به انتخاب مسیر می‌باشد. در قدم چهارم شایستگی مسیرهای پیمایش شده توسط مورچه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و فرومون کلیه مسیرهای ایجاد شده توسط مورچه‌ها بر مبنای شایستگی‌شان، بروزرسانی گردیدند و سپس از کلیه مسیرها تبخیر فرومون صورت پذیرفت، این مرحله موسوم به بروزرسانی فرومون‌ها می‌باشد و در نهایت شرط همگرایی جهت توقف الگوریتم به آن افزوده شد.

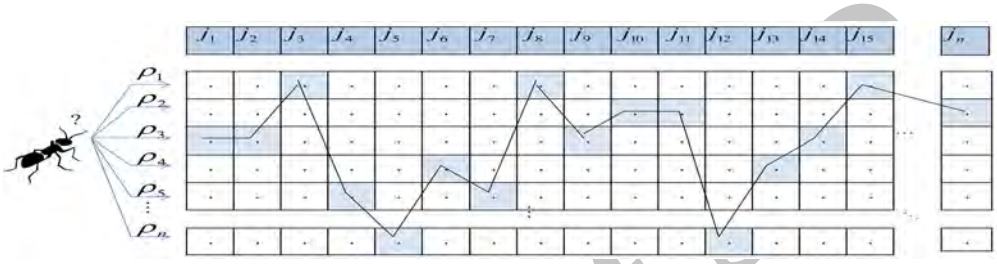
Archive of SID

www.SID.ir

۳-۱- ساختاربندی راه‌حل‌ها به صورت گراف

اولین مرحله در حل مسائل بوسیله الگوریتم فراابتکاری ACO ساختاردهی راه‌حل‌های موجود در قالب یک گراف می‌باشد[۱۶]، گراف مورد نظر برای مسئله مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی‌سنجی مطابق شکل۴ طراحی شد.

در این گراف هر ستون نشان‌دهنده یک بلوک مکعبی است، در واقع یگ گره که مورچه باید آن را بپیماید و سطرها نیز مقادیر مختلفی از تباین چگالی می‌باشد که از مطالعات زمین شناسی در آن منطقه به عنوان اطلاعات اولیه وارد مسئله شدند. همانطور که پیشتر گفته شد هدف ما از معکوس‌سازی دستیابی به مدل چگالی در مقاطع عمقی مختلف می‌باشد. مطابق گراف طراحی شده با به کارگیری این الگوریتم مورچه‌ها با عبور از هر بلوک مکعبی و اختصاص دادن مقداری به‌عنوان تباین چگالی به آن مکعب، مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف را می‌سازند. با بررسی هریک از مدل‌ها در هر تکرار در نهایت بهترین مدل را به‌عنوان جواب نهایی برمی‌گزینند.



شکل ۴- نحوه پیمایش مورچه‌ها در گراف ساخت حل مساله

۳-۲- فرومون اولیه

به منظور شروع الگوریتم بایستی بر روی هر گره از گراف مقدار فرومونی (ارزش) به‌عنوان مقدار اولیه (τ_0) به‌طور یکسان در نظر گرفته شود. τ_0 پارامتر مسأله است [۶]. به منظور افزایش سطح جستجوی اکتشافی در شروع الگوریتم، فرومون‌های اولیه مسیر، ابتدا تخمینی دست بالا اتخاذ می‌شود. به این ترتیب، فاز جستجوی اولیه بسیار اکتشافی خواهد بود و تا حدود زیادی از همگرایی زودرس یا محلی الگوریتم جلوگیری می‌شود، چرا که با وجود فرومون بالا الگوریتم به اندازه کافی زمان خواهد داشت تا سطح وسیعتری از فضای احتمال را جستجو کند.

۳-۳- انتخاب مسیر و پیمایش گراف

در اینجا به منظور تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مقدار تباین چگالی برای هر بلوک مکعبی، بایستی رابطه-ای طراحی گردد که نه تنها بر اساس احتمال کار می‌کند بلکه بتوان انتخاب‌هایی براساس تصادف نیز داشته باشیم، بدین منظور رابطه ۴ متناسب با هدف مورد نظر طراحی گردید. با استفاده از این رابطه مورچه‌ها می‌توانند بر اساس احتمال یا تصادف تصمیم بگیرند که کدام گره بایستی به عنوان گره بعدی انتخاب شود (چه چگالی‌ای برای هر بلوک مکعبی انتخاب شود).

$$G_i = \begin{cases} \text{Max}\{\text{ph}_i(\text{t})\} & \text{if} \quad \text{q}_0 > q_i \\ \text{J} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad , \qquad (۴)$$

که $ph_i(t)$ میزان فرومون موجود بر روی گره iام در تکرار tام می‌باشد و $Max\{ph_i(t)\}$ نیز نشان دهنده انتخاب گره‌ای است که از بیشترین فرومون انباشته شده بر روی خود، برخوردار است. در رابطه بالا J یک تابع تصافی است، در واقع این تابع برداری است به ابعاد تعداد سطرهای گراف که هر کدام از داریه‌های این بردار منتسب به یکی از گره‌های یک ستون از گراف می‌باشد. اعداد این بردار به صورت کاملاً تصادفی پر می‌شوند به‌طوری که تمامی اعداد آن صفر و تنها یکی از داریه‌های آن یک می-باشد. گره مربوط به درایه‌ای که عدد یک به آن منتسب می‌شود بایستی توسط مورچه‌ها به‌عنوان گره بعدی بازدید شود. در رابطه فوق، q_i یک مقدار تصادفی متعلق به بازه [0 , 1] می‌باشد که برای هر بلوک مکعبی در هر تکرار تولید می‌شود و با q_0 که پارامتر مسئله است، مقایسه می‌گردد. q_0 عددی است در بازه [0 , 1] که با توجه به شرایط مسئله به صورت آزمون و خطا تعیین می‌گردد و در

www.SID.ir

تمامی تکرارها ثابت باقی می‌ماند، در واقع با استفاده از این پارامتر می‌توان درصد دخیل بودن تصادف یا احتمال در انتخاب گره بعدی را تغییر داد، اتخاذ مقادیر بالای این پارامتر (بیشتر از ۰/۵) منجر به انتخاب گره‌ای می‌شود که احتمال بالاتری نسبت به سایر گره‌ها را دارد (گره‌ای که فرومون بیشتری دارد) و مقادیر کوچک q_0 (کمتر از ۰/۵) باعث می‌شود مورچه‌ها گره بعدی جهت پیمایش را به صورت تصادف انتخاب کنند، در نتیجه نقش احتمال در این حالت کم‌رنگ خواهد شد.

هر مورچه با پیمایش کل گراف ماتریس ρ ای می‌سازد که با قرار دادن این ماتریس در رابطه ۳، آنومالی گرانی برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه بایستی کیفیت جواب‌های بدست آمده توسط مورچه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳-۴- محاسبه برازندگی (تابع ارزش)

تابع برازندگی از اعمال تبدیل مناسب بر روی تابع هدف یعنی تابعی که قرار است بهینه شود به دست می‌آید این تابع هر راه‌حل ساخته شده توسط یک مورچه را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آن را مشخص می‌نماید. هر چه کیفیت جواب بالاتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت گره‌های مربوط به آن در مسیرهای ساخته شده توسط مورچه‌ها در تکرارهای بعدی نیز افزایش خواهد یافت. بسته به اینکه مسأله مورد نظر بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی باشد برازندگیِ بیشتر مترادف با بیشینه یا کمینه بودن تابع هدف خواهد بود، از آنجایی که مسأله تعیین چگالی برای هریک از بلوک‌های مکعبی به دنبال بیشینه تابع است، باید مسائل کمینه‌سازی به بیشینه‌سازی تبدیل شود. یعنی کمینه مجموع قدر مطلق خطاها (مجموع قدر مطلق اختلاف آنومالی محاسبه شده از آنومالی اندازه‌گیری شده) در تمام ایستگاه‌های مشاهداتی در روی سطح زمین، بایستی منجر به بیشینه فرومون (بیشینه برازندگی) منتسب به گره‌های حاضر (چگالی هر بلوک) در ساختار ماتریس ρ مربوطه گردد. در نهایت با انجام آزمون‌های مختلف و بررسی رابطه میان مجموع قدر مطلق خطاها و میزان فرومون انتسابی به گره‌ها، تابع برازندگی مورد استفاده در این تحقیق، مطابق رابطه ۵ طراحی گردید:

$$\Delta ph_i^k = \frac{1}{\left(e^{Sum\ of\ Erorr^k}\right)^{0.5}} \qquad (۵)$$

که : $Sum\ of\ Erorr = \sum_{i=1}^{N} \left| g^{observation} - g^{Calculate} \right|$

در رابطه بالا، N تعداد ایستگاه مشاهداتی و Δph_i^k میزان فرومون (برازندگی) منتسب به چگالی انتخاب شده برای بلوک‌های مکعبی توسط kامین مورچه را نشان می‌دهد. $g^{observation}$ آنومالی گرانی اندازه‌گیری شده توسط گراویمتر می‌باشد که به عنوان مشاهده وارد الگوریتم می‌شود و $g^{Calculate}$ آنومالی گرانی محاسبه شده از رابطه ۳ را نشان می‌دهد. با استفاده از تابع برازندگی بالا هرچه میزان مجموع قدر مطلق خطای مسیر پیمایش شده توسط یک مورچه کمتر باشد، میزان فرومون محاسبه شده جهت تعلق گرفتن به مسیر پیموده شده توسط آن مورچه بیشتر خواهد بود و برعکس.

مزیت استفاده از این تابع نسبت به سایر روش‌های ذکر شده این است که، تابع برازندگی با یک رفتار نمائی، مورچه‌ها را به سمت پیمایش از طریق گره‌هایی سوق می‌دهد که دقت‌های بالایی را برای ما نتیجه بدهند. یعنی رابطه میان مجموع قدر مطلق خطاها و میزان فرومون محاسبه شده توسط رابطه۵ یک رابطه خطی نیست بلکه یک رابطه نمائی است و هرچه مقدار قدر مطلق خطا به سمت صفر نزدیک شود، میزان شایستگی محاسبه شده شدت افزایش بیشتری دارد.

۳-۵- تبخیر فرومون

تبخیر فرومون‌ها نیز در این الگوریتم، متناسب با فرومون موجود بر روی هر گره، از کلیه گره‌ها صورت می‌پذیرد (رابطه ۶)[۶]:

$$ph_i(t) = (1-v)\, ph_i(t-1)\ ,\ \ \forall i \in G, \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، $ph_i(t)$ فرومون گرهiام در تکرار tام و $ph_i(t-1)$ فرومون گرهiام در تکرار t-1ام می‌باشد. $0<v<1$ نیز ضریب تبخیر است که نرخ تبخیر فرومون از گره‌ها را مشخص می‌کند. پارامتر v جهت جلوگیری از تجمع نامحدود فرومون بر روی یک گره به کار می‌رود و الگوریتم را قادر می‌سازد تا تصمیمات بد گذشته را فراموش کند. استفاده از چنین رویه‌ای برای تبخیر

www.SID.ir
Archive of SID

فرومون‌ها، سبب هرچه بیشتر اکتشافی شدن الگوریتم خواهد شد چرا که با استفاده از این روش، تبخیر از گره-هایی که فرومون بیشتری دارند به میزان بیشتری نسبت به گره‌هایی که فرومون کمتری دارند صورت می‌پذیرد.

۳-۶- بروزرسانی فرومون

پس از تبخیر فرومون از کلیه گره‌ها نوبت به بروزرسانی فرومون در گره‌هایی است که توسط مورچه‌ها پیمایش شده‌اند (رابطه ۷)[۶].

$$\mathrm{ph_i(t)} = \mathrm{ph_i(t-1)} + \sum_{k=1}^{m} \Delta ph_i^k, \quad \forall i \in G \qquad (۷)$$

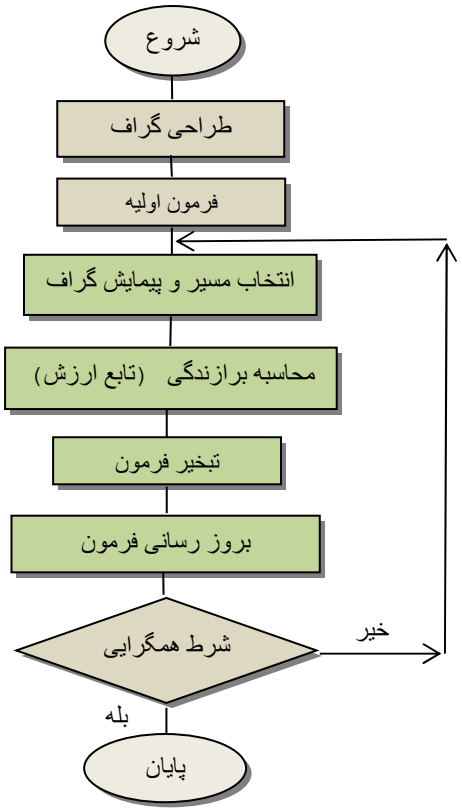
در رابطه بالا، Δph_i^k مقدار فرومونی است که مورچه kام بر روی گره‌هایی که در طی مسیر خود از آنها عبور کرده است، به جای می‌گذارد و این مقدار متناسب با میزان شایستگی راهکار انتخابی توسط مورچه kام اتخاذ می‌گردد که مستلزم تعریف یک تابع برازندگی برای مسأله مورد بهینه‌سازی می‌باشد. Δph_i^k در رابطه ۷، بوسیله رابطه ۵ تعیین می‌گردد.

استفاده از رابطه ۶ و ۷ برای تبخیر و فرومون ریزی باعث خواهد شد پس از مدتی فرومون بیشتری بر روی گره‌های بهینه جمع شوند و در نتیجه شانس بیشتری برای انتخاب توسط مورچه‌های بعدی پیدا کنند و گره‌های غیر بهینه نیز دارای میزان فرومون کمتری گردند و متقابلاً شانس کمتری نیز برای انتخاب توسط مورچه‌های بعدی داشته باشند.

۳-۷- شرط همگرایی

در الگوریتم‌های فراابتکاری، حالت‌های بسیار متفاوتی را برای شرط همگرایی الگوریتم می‌توان در نظر گرفت و این شرط در هر کاربردی بسته به شرایط مسأله متفاوت می-باشد. در اینجا نیز شرط همگرایی در نظر گرفته شده برای الگوریتم بدین صورت است که، در هر تکرار چنانچه ۶۰ ٪ مورچه‌ها یک مسیر واحد را بپیمایند، و در آن تکرار نتیجه بهبود یافته‌ای نسبت به تکرارهای قبلی نداشته باشیم، مسیر منتخب توسط حداقل ۶۰ ٪ از مورچه‌ها به عنوان مسیر همگرایی مورد قبول قرار می‌گیرد. بنابراین الگوریتم تا زمانیکه این شرط برقرار نشود، ادامه پیدا خواهد کرد و به محض ارضای این شرط الگوریتم متوقف خواهد شد.

شکل ۵، روند اجرای این الگوریتم را با استفاده از یک فلوچارت به نمایش می‌گذارد.



شکل۵- روند الگوریتم کلونی مورچگان طراحی شده جهت مدل‌سازی معکوس

۴-داده‌های مورد استفاده

۴-۱-داده‌های شبیه‌سازی شده

در این تحقیق، به منظور بررسی هرچه بیشتر کارایی الگوریتم ACO طراحی شده جهت مدل‌سازی معکوس خطی، از مدلی با هندسه پیچیده T و L که دارای تباین چگالی متفاوت می‌باشند، استفاده شده است. مدل در شبکه‌ای به ابعاد 600×600 متر با فواصل نقاط برداشت شده، ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات مدل T و L و جدول ۲ پارامترهای تنظیم شده الگوریتم ACO در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مدل T وL

آنومالی تداخلی حاصل از دو مدل با هندسه پیچیده TوL	مدلT		مدلL	
	عمق (m)	تباین چگالی (kg/m^3)	عمق (m)	تباین چگالی (kg/m^3)
	10-50	800	10-50	400

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در این تحقیق

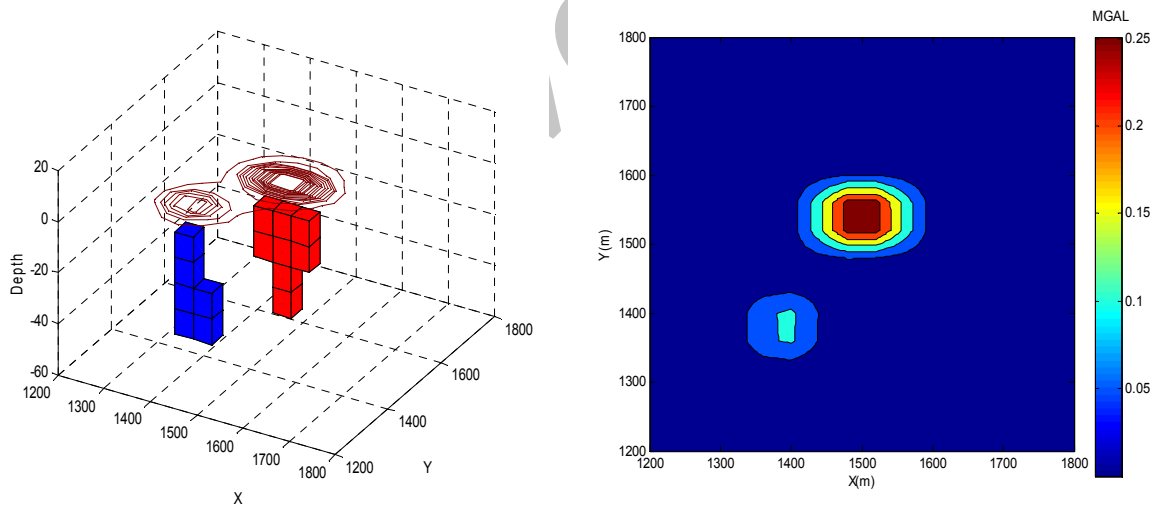
τ_0	q_0	ρ
0.5	0.6	0.08

نکته قابل توجه در استفاده از این روش، انتخاب اندازه بهینه مکعب‌ها در مدل است به‌طوری که ابعاد مکعب‌ها باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا بتوان طول‌موج های کوتاه در داده‌های مشاهده شده را مدل‌سازی کرد و نیز به اندازه کافی بزرگ باشد تا مسئله عدم پایداری، افزایش پارامترهای مدل و افزایش زمان اجرای برنامه رخ ندهد. در این مدل به روش سعی و خطا ابعاد بلوک های مکعبی $10\times40\times40$ تعیین گردید.

از طرف دیگر در مسائل معکوس با عدم یکتایی جواب روبه‌رو هستیم، برای بهبود مسئله عدم یکتایی جواب‌ها و همچنین جهت برآورد دقیق‌تر از توزیع تباین چگالی بااستفاده از این الگوریتم، از روش‌های تعیین عمق بیشینه آنومالی (از جمله روش اویلر) به‌منظور مقیدکردن مسئله در عمق، که منجر به جواب‌های واقعی‌تری در عمق می‌شود، استفاده شده است. علاوه براین ماکزیمم و مینیمم مقدار چگالی در آن منطقه به عنوان اطلاعات اولیه وارد مسأله شده است.

مدل در نظر گرفته شده به همراه آنومالی حاصل از آن برای داده‌های بدون نویز در شکل ۶ نشان داده شده است. ماکزیمم عمق ۶۰ متر و بیشترین و کمترین مقدار تباین چگالی kg/m^3 [۱۰۰۰ و ۰] به‌عنوان اطلاعات اولیه از منطقه وارد مساله شده است. مقادیری که در این بازه می‌تواند به عنوان تباین چگالی مدل در نظر گرفته شود با فاصله $50\ kg/m^3$ گسسته شده است، در نتیجه ابعاد گراف در این حالت با توجه با ابعاد منطقه و ابعاد بلوک‌های مکعبی، $(15\times15\times6)\times20=27000$ می‌باشد.

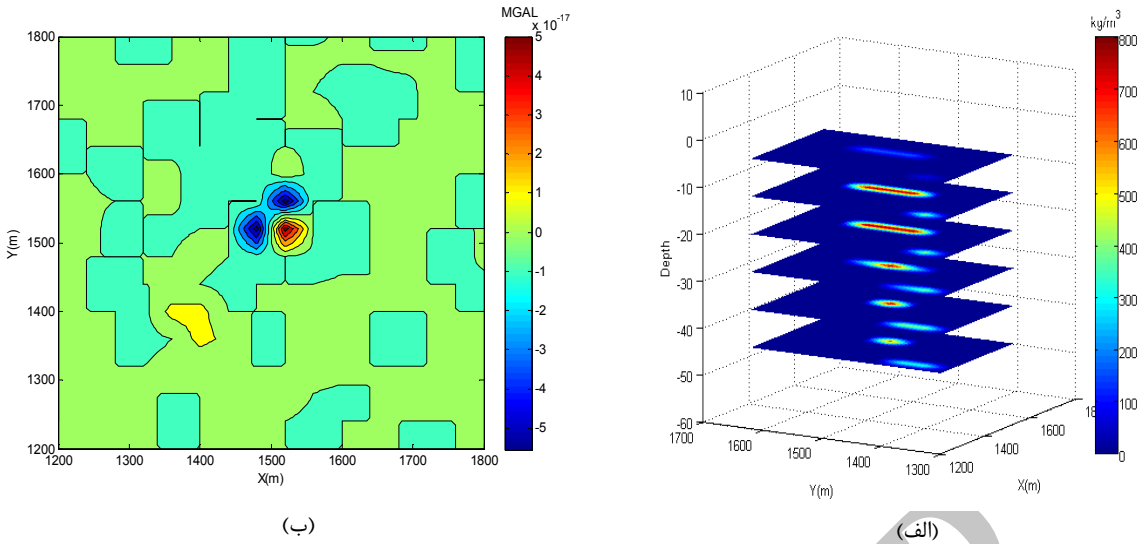
نتایج حاصل از معکوس‌سازی این مدل با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۷-الف ملاحظه می‌گردد، الگوریتم ACO ویژه‌سازی شده در این تحقیق قادر است مدل‌هایی با هندسه پیچیده را با دقت بالایی معکوس‌سازی کند و مدل چگالی آن را بدست آورد. اختلاف آنومالی مشاهده‌ای از آنومالی محاسبه‌ای تقریباً به 10^{-17} MGAL رسیده است (شکل۷-ب).



(الف) (ب)

شکل ۶- (الف) آنومالی گرانی مدل مصنوعی و (ب) مدل مصنوعی برای داده‌های بدون نویز

www.SID.ir



(ب) (الف)

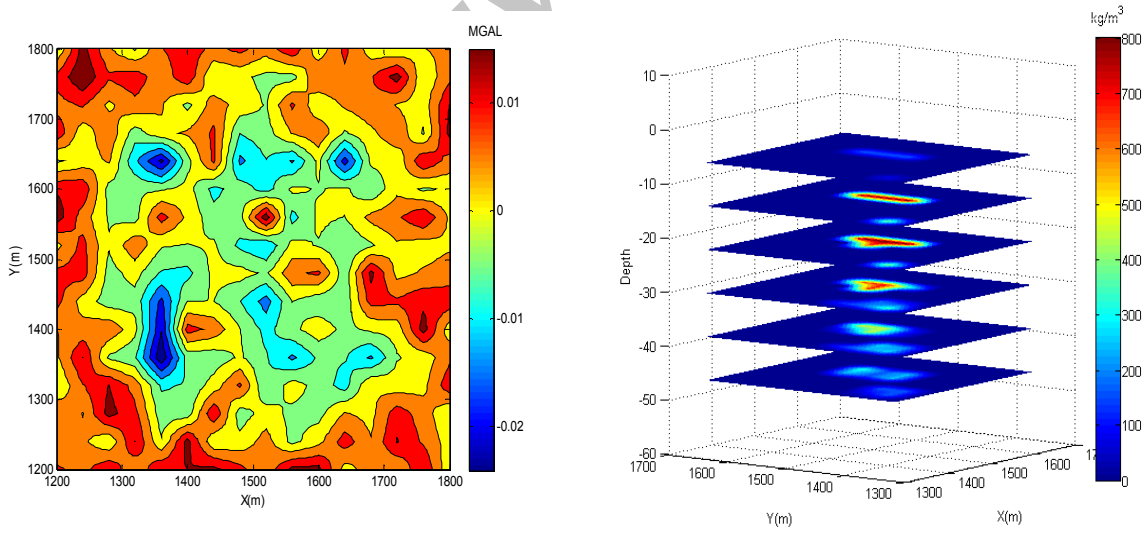
شکل ۷- (الف) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های بدون نویز (ب) اختلاف آنومالی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای

در ادامه به تمام داده‌ها ۵٪ نویز اضافه می‌کنیم. جهت نویزدار کردن داده ها از رابطه۸ استفاده شده است[۱۷]:

$$g_{noies}^{Calculate} = \pm\left(0.05 \times Rand \times g^{Calculate}\right) + g^{Calculate}, \qquad (۸)$$

در این رابطه، Rand تابعی است که به صورت تصادفی اعدادی بین ۰ و ۱ تولید می‌کند و $g_{noies}^{Calculate}$ آنومالی نویزدار حاصل از مدل بدون نویز با آنومالی $g^{Calculate}$ است.

نتایج حاصل از معکوس‌سازی در شکل ۸ آمده است. در شکل۸ -الف مدل چگالی حاصل از معکوس‌سازی آورده شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌گردد علیرغم نویز دار شدن داده ها تباین چگالی در دو مقطع عمقی ۱۵و۲۵ به طور دقیق برآورد شده اما در مقاطع عمقی پایین‌تر با خطا همراه می‌باشد. شکل ۸-ب ، اختلاف آنومالی مشاهده‌ای از آنومالی محاسبه‌ای که تقریباً به زیر MGAL ۰/۰۲± رسیده است را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل۸- (الف) تباین چگالی حاصل از مدل‌سازی معکوس برای داده‌های با نویز ۰/۵ (ب) اختلاف آنومالی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای

۴-۲- داده‌های واقعی

در این بخش به مدل‌سازی داده‌های واقعی می‌پردازیم. منطقه مورد مطالعه، ساخت‌گاه سد گتوند در استان خوزستان است که عملیات داده‌برداری آن را بخش گرانی سنجی مؤسسه ژئوفیزیک تهران به انجام رسانده است. هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات ژئوفیزیکی ساختگاه سد گتوند می‌باشد. از آنجایی که در داده‌های منطقه آنومالی منفی وجود دارد و با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه

www.SID.ir

حدس می‌زنیم حفره‌هایی[1] در منطقه موجود باشند که در اثر انحلال لایه‌های نمکی بوجود می‌آیند. انحلال لایه‌های نمکی باعث بوجود آمدن عوارض جدی زیست محیطی خواهد بود.

۴-۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه

منطقه مورد بررسی، ساختگاه طرح سد و نیروگاه آبی گتوند علیا در نقطه جغرافیایی به طول شرقی ۴۸ درجه و ۵۶ دقیقه و ۱۰ ثانیه و عرض شمالی ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه و ۸ ثانیه و متوسط سطح تراز منطقه از آبهای آزاد ۲۵۰متر می‌باشد که در فاصله ۳۸۰ کیلومتری از مصب رودخانه کارون و در ۱۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان گتوند واقع در استان خوزستان قرار دارد (شکل ۹).

۴-۲-۲- زمین شناسی عمومی منطقه

گسترده مورد بررسی تا فاصله سه تا پنج کیلومتری جوانب مخزن سد، سازند بختیاری و پس از آن سازند گچساران و آغاجاری واقع شده‌اند؛ در واقع در فاصله حدود پنج تا هفت کیلومتری از دیواره سد و در مخزن سد، سازند گچساران به مساحت تقریبی سه کیلومتر مربع قرار دارد. عمده تشکیلات زمین‌شناسی موجود در ناحیه رسوبات دوران سوم (میوسن، پلیوسن) مربوط به تشکیلات گچساران و میشان می‌باشد. ناحیه مورد نظر برای مطالعه عمدتا از تشکیلات گچساران متشکل از مارل، ژیپس، انیدریت، نمک و لایه‌های نمکی تشکیل شده‌است.

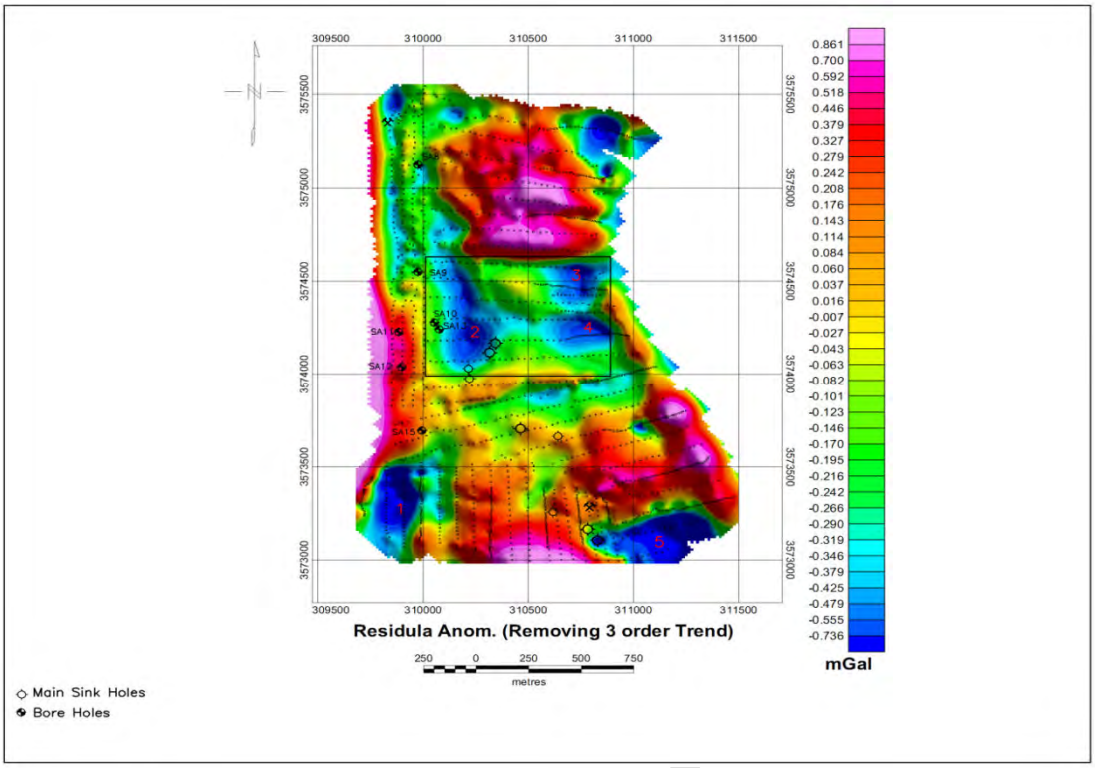
۴-۲-۳- عملیات میدانی

برداشت گرانی‌سنجی در شبکه‌ای شامل ۱۱۹۶۰=۹۲×۱۳۰ ایستگاه به فاصله ۳۵ متر است. آنومالی گرانی مورد نظر بعد از تصحیح داده‌های برداشت شده و حذف اثر روند ناحیه‌ای در شکل ۱۰ و کروکی برداشت نقاط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشینه اختلاف آنومالی باقی مانده به حدود ۱/۵ میلی‌گال می‌رسد. با محدود کردن ناحیه مدل‌سازی روی سطح زمین، تعداد پارامترهای مدل کاهش می‌یابد و دقت مدل‌سازی تا حد زیادی افزایش پیدا می‌کند. همچنین این امر زمان لازم برای اجرای برنامه را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود ناحیه‌ای که با مستطیل مشکی مشخص شده و شامل آنومالی‌های عمده منفی ۲ و ۳ و ۴ است، جهت وارون‌سازی سه‌بعدی در این تحقیق انتخاب شده است.

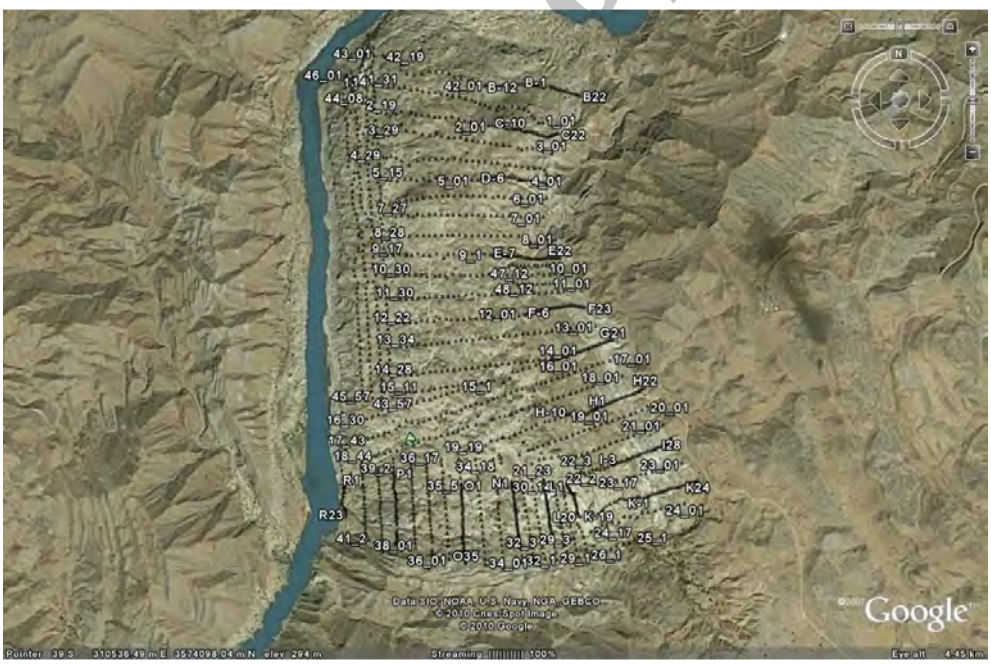
شکل۹- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

[1] Cavity

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۰- آنومالی باقی‌مانده، مستطیل مشکی ناحیه منتخب برای وارون‌سازی



شکل ۱۱- کروکی نقاط برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

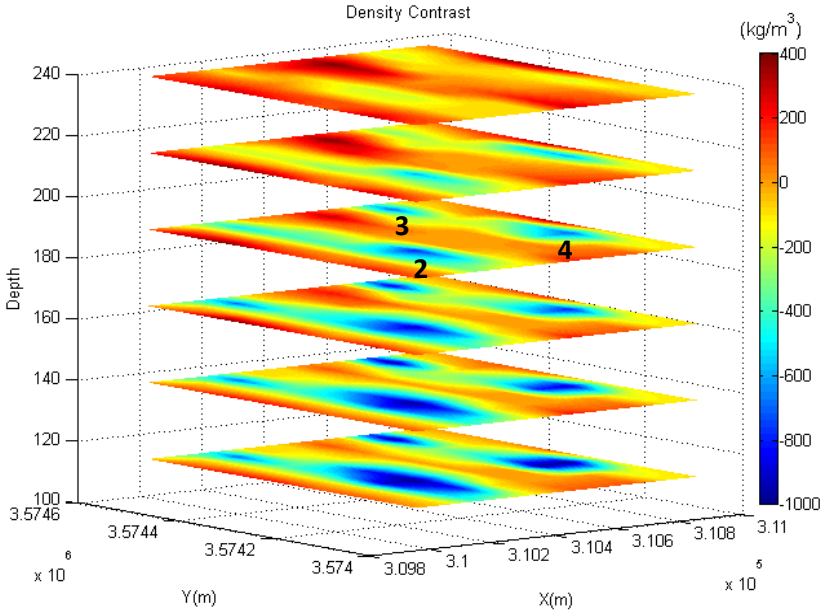
۴-۲-۴- نتایج وارون‌سازی با استفاده از الگوریتم ACO ویژه سازی شده

برای مدل‌سازی سه‌بعدی در این ناحیه از شبکه‌ای با ابعاد ۹۱۰×۵۶۰ که شامل ۴۵۹ = ۲۷×۱۷ نقطه برداشت (مستطیل مشکی در شکل۱۰) استفاده شده است. جهت مدل‌سازی معکوس با استفاده از الگوریتم ACO طراحی شده از بلوک‌های مکعبی‌ای با ابعاد ۲۱×۲۰×۲۰ در نظر گرفته شده است.

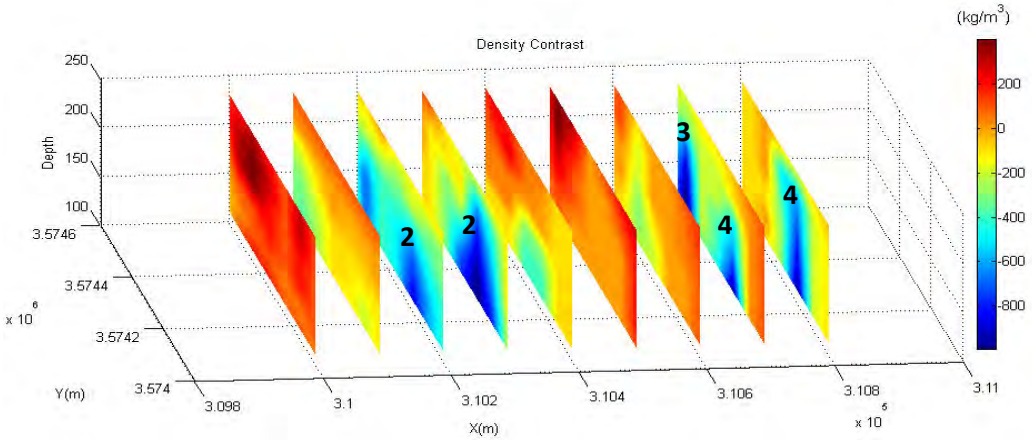
www.SID.ir

همانطور که پیشتر گفته شد برای حل مسئله عدم یکتایی جواب‌ها و همچنین جهت برآورد دقیق‌تر از توزیع تباین چگالی، عمق بیشینه آنومالی در این منطقه با استفاده از روش اویلر ۱۵۰ متر و محدوده چگالی طبق اطلاعات قبلی $-1000\,kg/m^3$ و $+1000\,kg/m^3$ انتخاب شده است.

نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۱۲ برای شش مقطع عمقی به فواصل ۲۱ متر نشان داده شده است. همچنین نمایش دیگری از نتایج (برش‌هایی در راستای محور x) در شکل ۱۳ آورده شده است.

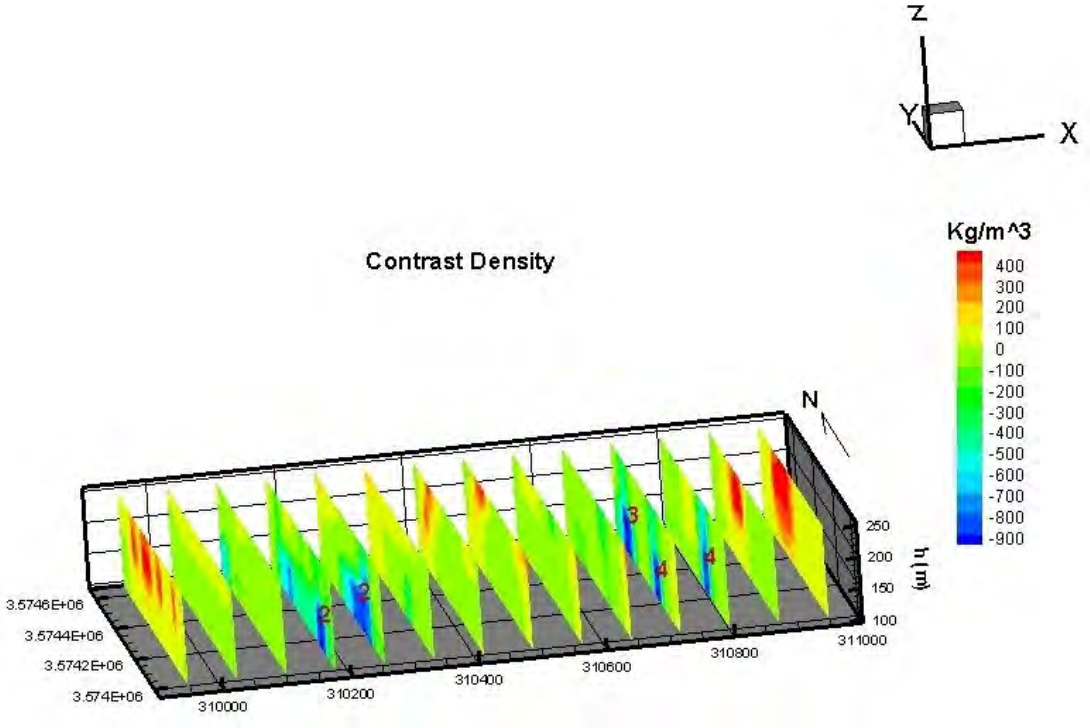


شکل۱۲- نمایش نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از الگوریتم ACO برای منطقه گتوند با برش‌هایی در راستای محور z



شکل۱۳- نمایش نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از الگوریتم ACO برای منطقه گتوند با برش‌هایی در راستای محور x

www.SID.ir



شکل۱۴- نمایش نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از نرم‌افزارModelvision Pro برای منطقه گتوند با برش‌هایی در راستای محورx [۱]

همانطور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود، آنومالی‌های منفی ۲و ۳و ۴ تقریباً از سطح تراز ۲۲۰ متر شروع شده و تا تراز ۱۰۰ متر ادامه داشته است. این آنومالی‌های منفی نشان دهنده، حفره‌ها و چاله‌های بزرگ با عمق و قطر زیاد می‌باشد که احتمال ارتباط آن‌ها با یکدیگر از طریق کانال‌های زیرزمینی زیاد است. حفره‌ها در اثر انحلال لایه‌های نمکی موجود در سازند گچساران ایجاد می‌شوند. در نتیجه، از تماس سازند گچساران با آب موجود در مخزن این حفرات مشکلاتی از جمله خورندگی آب‌های عبوری را ایجاد می‌کنند و اگر به هر علتی آب به این سازند وارد شود، به علت انحلال پذیری بالای نمک، احتمال انحلال لایه نمکی سازند گچساران و ایجاد کانال‌های زیرزمینی وجود دارد که در نتیجه منجر به ریزش سازند گچساران و در نهایت جابه‌جایی توده بزرگ سازند گچی محتوی نمک و شوری آب رودخانه کارون خواهد شد.

مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از وارون‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Modelvision Pro صحت نتایج وارون-سازی را مورد تأیید قرار داده است (شکل ۱۲). نکته اساسی برای این روش وارون‌سازی سه‌بعدی که نخستین بار پیشنهاد شده این است که در واقع به دلیل نبود یکتایی داده‌های گرانی، هیچ روش وارون‌سازی گرانی سنجی نمی‌تواند با قاطعیت مدل سه‌بعدی برآورد شده را با مدل واقعی یکسان بداند و این روش پیشنهادی نیز از این قاعده مستثنی نیست. برای برآورد واقعی‌تر می‌توان از روش‌های غیر ژئوفیزیکی مانند حفر گمانه‌ها استفاده کرد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، الگوریتم کلونی مورچگان، به‌خوبی جهت مدل‌سازی معکوس خطی داده‌های ثقل‌سنجی طراحی گردیده است. طراحی‌ها و پیاده‌سازی‌های انجام شده برای این منظور، شامل دو مرحله مدل‌سازی معکوس برای داده‌های مصنوعی، جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی و مدل‌سازی معکوس داده‌های واقعی، می باشد. نکته قابل توجه جهت برآورد دقیق‌تر توزیع تباین چگالی بااستفاده از این الگوریتم، از قیود عمق بیشینه آنومالی به منظور مقیدکردن مسئله در عمق، که منجر به جواب‌های واقعی‌تری در عمق می‌شود و همچنین بیشینه و کمینه مقدار چگالی در آن منطقه با استفاده از اطلاعات قبلی جهت یکتایی جواب‌ها به عنوان اطلاعات اولیه استفاده شدند. با استفاده از این قیود، توانستیم فضای جستجو را

Archive of SID
www.SID.ir

محدود سازیم و مساله عدم یکتایی نتایج را نیز به میزان خوبی بهبود بخشیم، در نتیجه کارایی‌های الگوریتم ACO در حل این مساله افزایش یافته و قادر خواهیم بود در مدت زمان کمتری به یک نتیجه قابل اعتماد دست یابیم.

در این تحقیق سعی شد ابعاد مکعب‌ها در حالت بهینه خود انتخاب شوند. به‌طوری که ابعاد مکعب‌ها باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا بتوان طول‌موج‌های کوتاه در داده‌های مشاهده شده را مدل‌سازی کرد و نیز به اندازه کافی بزرگ باشد تا مسئله عدم پایداری، افزایش پارامترهای مدل و افزایش زمان اجرای برنامه رخ ندهد. این مسأله به روش سعی و خطا تعیین گردید.

جهت بررسی کارایی الگوریتم مورد نظر از دو مدل مصنوعی با هندسهٔ پیچیده T و L که تباین چگالی هریک متفاوت است استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان می‌توان آنومالی حاصل از مدل‌هایی با هندسه پیچیده و جهت دار را به خوبی مدل‌سازی کرد و همچنین این متد برای ترکیبی از مدل‌ها با تباین چگالی مختلف قابل استفاده است.

پس از حصول اطمینان از کارایی الگوریتم ACO طراحی شده برای داده‌های مصنوعی، به ارزیابی روش پیشنهادی در خصوص داده‌های واقعی پرداخته شد. داده-های گرانی‌سنجی مورد استفاده در این بخش، مربوط به منطقه ساخت‌گاه سد گتوند در استان خوزستان می‌باشد از آنجایی که در داده‌های منطقه آنومالی منفی وجود دارد و با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی از منطقه، حدس زده می‌شود حفره‌هایی در منطقه موجود باشد، که در اثر انحلال لایه‌های نمکی بوجود می‌آیند. نتایج حاصل از معکوس‌سازی داده‌ها به روش پیشنهادی نیز، حفره‌هایی با عمق و قطر زیاد را در منطقه نشان می‌دهد که مؤید مطلب فوق است. از آنجاییکه نتایج حاصل از وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به ساخت‌گاه سد گتوند با روش پیشنهادی، توسط نرم افزار Modelvision pro مورد تایید قرار گرفت، پیشنهاد حفر گمانه در مرکز آنومالی ها منفی داده می‌شود.

تشکر و قدردانی

از بخش گرانی‌سنجی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌ها، کمال تشکر را داریم.

مراجع

[1] Ardestani,V. E ., (2013). “Detecting, delineating and modeling the connected solution cavities in a dam site via microgravity data”. Acta Geod Geophys, 48(2), 123-138.

[2] Barbosa,V. C. F., & Joao,B., (1994). “Generalized compact gravity inversion”. GEOPHYSICS, 59, 57-68.

[3] Blakely,R.J., (1995). “Potential Theory in Gravity and Magnetic Application”. Cambridge University Press.

[4] Dorigo,M., & Blum,C., (2005). “Ant colony optimization theory”. A survey Theoretical computer science 344, 243–278.

[5] Dorigo, M. & Di Caro, G., (1999). “Ant colony optimization”. a new meta-heuristic. In P. J. Angeline, Z. Michalewicz, M. Schoenauer, X. Yao, & A. Zalzala (Eds.), Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC’99) 1470–1477. Piscataway, NJ, IEEE Press.

[6] Dorigo, M., Stützle, T., (2002). “The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications and advances”. In F. Glover & G. Kochenberger (Eds.), Handbook of Metaheuristics, vol. 57 of International Series in Operations Research & Management Science (pp. 251–285). Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers.

[7] Jackson, D. D., (1979). “The use of priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion”. Geophy. J. Roy. Asrt.Soc, 57, 137-157.

[8] Menke, W., (1989). “Geophysical data analysis Discrete inverse theory”. 3rd ed. Academic Press.

Archive of SID

www.SID.ir

[9] Montesinos, F. G., Arnoso, J. & Vieira, R., (2005). " Using a genetic algorithm for 3D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands) ". International Journal of Earth Sciences, 92, 301-316.

[10] Ning, Q. & al, e., (2009). "Gravity Data Inversion Based Genetic Algorithm and Generalized Least Squares". IEEE.

[11] Plouff, D., (1976). "Gravity and magnetic-fielde of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections". Geophysics, 41, 727-741.

[12] Rama Rao, P., Swamy, K. V. & Radhakrishna Murthy, I., (1999). "Inversion of gravity anomalies of three-dimensional density Interfaces". Computers & Geosciences 25, 887-896.

[13] Sanyi, Y. et al., (2008). "Nonlinear Geophysical Inversion Based on ACO with Hybrid Techniques". Fourth International Conference on Natural Computation IEEE.

[14] Sanyi, Y., Shangxu, W. & Nan, T., (2009). "Swarm intelligence optimization and its application ingeophysical data inversion". APPLIED GEOPHYSICS, 6, 166-174.

[15] Snopek, K., (2005). "Inversion of gravity data with application to density modeling of the Hellenic subduction zone". PhD Thesis,Department of Geosciences at the Ruhr Universit.

[۱۶] تقوی‌فرد، م. ت.، آریانژاد، م. ق.، و خلیلی دامغانی، ک.، (۱۳۸۷). "بهینه سازی توسط کلونی مورچگان". دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات، تهران.

[۱۷] عابدی، م .، افشار، ا.، ابراهیم زاده اردستانی، و.، نوروزی، غ.، و لوکس، ک.، (۱۳۸۸). "مدل سازی سه بعدی بی هنجاری های گرانی با استفاده از روش شبکه های عصبی تحمیلی". مجله ژئوفیزیک ایران، ۳ (۲)، ۷۷-۹۰.

[۱۸] محمدزاده شادمهری، م.، شریفی، م. ع.، ابراهیم زاده اردستانی، و.، صفری، ع. ا. و باغانی، ا.،(۱۳۹۳). "مدل سازی معکوس سه بعدی مدل های گرانی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه ها". مجله ژئوفیزیک ایران، ۸ (۱)، ۱۰۲-۱۲۵.

Archive of SID

www.SID.ir