

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری اکتشاف مواد معدنی

شناسایی هندسه سنگ بستر با استفاده از داده‌های
میدان پتانسیل و روش‌های مدل‌سازی الگوریتم کلونی
مورچگان و رقابت استعماری - مطالعه موردی حوضه
رسوبی مغان

نگارنده: امیر جولائی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر علی نجاتی کلاته

شهریور ۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تأیید کند.

تقدیم بہ

نازنین پدر و مادر صبور و مہربانم

شکر و قدردانی

حمد و سپاس سلطان حقیقت و سرچشمه دانایی را که توفیقی دیگر غایت کرد تا مرحله ای دیگر از مسیر بی انتهای دانش اندوزی را طی نمایم و کامی هر چند کوچک در راستای اعتلای هر چه بیشتر علمی و صنعتی این مرز و بوم بردارم. در سخت ترین و پرتلاطم ترین روزهای تحصیل تنها و تنها یاد حضرت دوست بود که مراد طوفان خسته حالی با و ناامیدی با مراسل آرایش و امید بود.

بچنین برخورد لازم می دانم از حمایت با و پشتیبانی های بی دریغ خانواده ی عزیزم بویژه پدر و مادر صبور و مهربانم که در طی این سال ها نهایت مساعی خود را به کار بستند تا شرایطی را برای این بنده فراهم کنند تا تحصیل علم و دانش تنها دغدغه ی ذهنی من نباشد شکر نمایم. سپاس آن ها را که اولین آموزگاران زندگیم بودند و تعلیم و آموزش بنده را بنانده و تابه امروز هدایت و حمایت نمودند. تقدیر و سپاس فراوان من نثار به می آموزگاران و اساتیدی که در طی سال های تحصیل دانش و معرفت و خویش را به اینجانب ارزانی داشتند؛ بویژه اساتید راهبهای این رساله دکتر علی ضاعرب امیری و دکتر علی نجابی که کسب دانش از محضر آنان، یادگار پر افتخاری است برایم از این مقطع تحصیلی.

بچنین از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران بویژه مهندس فرزین فرزانه و شهاب قمی که با حمایت با و راهبانی ارزشمندشان زمینه استفاده از اطلاعات مورد نیاز برای این پژوهش را فراهم نمودند کمال و شکر سپاس را دارم. از داوران کرامتدین این رساله، دکتر حمید آقا جانی، دکتر سید مانی متولی و دکتر کاوه کا۱۰۵ سی که زحمات داوران این رساله را پذیرفتند شکر و پاسکندارم.

در پایان از تمامی دوستان و هم دانشگاهیان خویش که در طی این سال ها مرا تکل نمودند و خاطرات سال های دکتری اینجانب با آن ها عین شده شکر و قدردانی نموده و برای آن ها آرزوی موفقیت می نمایم. بویژه دوستان عزیزم آقایان بشن روشن روان، آرمان حبیبی، محرم جهانگیری، سید سعید موسوی، مجتبی دهقانی، راسین آرایش و بسیاری دیگر که ذکر نام آن ها در این مختصر نمیکند (امیدوارم بنحشد) که با تشویق و مشاوره هایشان مرا یاری رسانند شکر و قدردانی نموده و سلامت و موفقیت و بهروزی آن ها را آرزو مندم.

امیر جولانی سوم مهر ماه ۹۹ - همانسرای دانشگاه صنعتی شاهرود

تعمدنامه

اینجانب **امیرجولائی** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی معدن** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **شناسایی هندسه سنگ بستر با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل و روش‌های مدل‌سازی الگوریتم کلونی مورچگان و رقابت استعماری - مطالعه موردی حوضه رسوبی مغان** تحت راهنمایی اساتید دکتر علیرضا عرب امیری و دکتر علی نجاتی کلاته متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تعیین عمق و هندسه سنگ بسترهای مدفون در حوضه‌های رسوبی از اهداف استراتژیک بسیاری پروژه‌های اکتشافی بویژه آبهای زیرزمینی و ذخایر هیدروکربوری است. اندازه‌گیری و مدل‌سازی بوسیله داده‌های میدان پتانسیل، از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی در این زمینه می‌باشد.

هدف اصلی این رساله، بررسی امکان کاربرد الگوریتم‌های جستجوی عمومی، کلونی مورچگان و رقابت استعماری به عنوان جایگزینی برای روش‌های جستجوی محلی پاسخ از قبیل مارکوارت-لونبرگ و گاوس-نیوتن؛ در مدل‌سازی غیرخطی ضخامت رسوبات حوضه‌های رسوبی با استفاده از داده‌های گرانی-سنجی و مغناطیس‌سنجی می‌باشد. بدین منظور ابتدا با بررسی مدل‌های پیشرو موجود جهت محاسبه پاسخ مدل در نقاط اندازه‌گیری داده، مدل‌های پیشرو (تلفورد-۱۹۷۶) برای مدل‌سازی داده‌های گرانی-سنجی و مدل (کونارتنام-۱۹۸۱) برای مدل‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی در نظر گرفته شدند. برای اجرای مدل‌سازی وارون داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به کمک الگوریتم‌های پیشنهادی و نیز ارائه نتایج به صورت بصری، کدهای مورد نیاز در محیط نرم افزار متلب نوشته شد.

به‌منظور صحت‌سنجی کدهای توسعه داده‌شده ابتدا طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های مذکور برای داده‌های متعلق به دو مدل مصنوعی گرانی و مغناطیسی، هریک در دو مرحله داده‌های بدون نوفه اعتبارسنجی شد. مقایسه کمی اختلاف بین داده‌های حاصل از مدل‌های اولیه و داده‌های محاسبه شده، بوسیله تعیین ریشه میانگین مربعات خطا به انجام رسید که میزان این پارامتر برای مدل‌سازی‌های گرانی‌سنجی از ۰/۲۳ میلی‌گال و برای مدل‌سازی‌های مغناطیس‌سنجی از ۷/۱ نانوتسلا فراتر نبود که این نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم‌های طراحی‌شده را بر روی هر دو نوع داده مدل‌سازی شده، نشان می‌دهد. همچنین در این تحقیق میزان تاثیرپذیری این روش در برابر میزان نوفه‌های معمول احتمالی بر داده‌های مصنوعی مذکور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی؛ پایداری مناسب این الگوریتم

برای مدل سازی داده های هر دو نوع مدل مصنوعی در برابر نوفه های سفید گاوسی را به نشان می دهد. به گونه ای که با افزودن تا ۸ درصد نوفه سفید به داده های آنومالی گرانی مصنوعی تولید شده، و نیز تا ۱۰ درصد نوفه سفید به داده های آنومالی مغناطیسی مصنوعی، هردو الگوریتم از پایداری مناسبی برخوردار بوده و توانستند مدل های پیش فرض را با دقت مناسبی بازسازی نمایند.

همچنین عملکرد الگوریتم رقابت استعماری بر روی داده های حاصل از یک مدل مصنوعی حوضه رسوبی عمیق با دانسیته با تغییرات سهموی نسبت به عمق، بر اساس مدل پیشرو (گالاردو- ۲۰۰۳) بر روی دو نوع داده بدون نوفه و همراه با نوفه سفید بصورت کمی و بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا ارزیابی شد که نتایج بدست آمده عملکرد مناسب الگوریتم مذکور را برای این نوع حوضه های رسوبی نیز نشان می دهد. برای ارزیابی عملکرد کدهای توسعه داده شده از داده های صحرایی مطالعه موردی داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران استفاده شد. مقایسه نتایج مدل سازی های صورت گرفته با نتایج مطالعات زمین شناسی موجود و نیز نتایج مطالعات ژئوفیزیکی گذشته از طریق لرزه نگاری و نیز مدل سازی های گرانی سنجی به کمک روش مارکوارت-لونبرگ؛ عملکرد مناسب کدهای نوشته شده را نشان می دهد.

در پایان با توجه به تفاوت های توزیع دانسیته در حوضه های رسوبی؛ وارون سازی داده های صحرایی مطالعات گرانی سنجی بر روی دو حوضه رسوبی لس آنجلس در کالیفرنیا و نیز حوضه رسوبی صحرای آتاکاما در شمال شیلی بوسیله الگوریتم رقابت استعماری به انجام رسید. در مدل سازی ضخامت رسوبات صحرای آتاکاما، از مدل پیش رو با تباین دانسیته ثابت و در مورد حوضه لس آنجلس از مدل پیش رو با وزن مخصوص متغیر بصورت سهموی استفاده شد. مدل های بدست آمده در هر از این دو مدل سازی با نتایج مطالعات گرانی و لرزه ای پیشین صورت گرفته در آن دو حوضه همخوانی مطلوبی دارد.

کلمات کلیدی: داده های میدان پتانسیل، وارون سازی، بهینه سازی عمومی، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم رقابت استعماری، شناسایی هندسه سنگ بستر، حوضه رسوبی مغان.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- جولائی، ا.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، "مدل سازی وارون غیرخطی داده های گرانی سنگ بستر با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری" پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی: (DOI) (جلد ۶، شماره ۱۲، 10.22044/JRAG.2019.7515.1212).
- ۲- جولائی، ا.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، فرزانه، ف.، "مدل سازی هندسه سنگ بستر با استفاده از داده های گرانی سنجی و الگوریتم کلونی مورچگان". مجله ژئوفیزیک / ایران. جلد ۱۴، شماره ۱، ص ۳۹-۵۴.
- ۳- جولائی، ا.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، قمی، ش.، (۱۳۹۹)، "تخمین عمق سنگ بستر حوضه های رسوبی با وارون سازی داده های گرانی بوسیله الگوریتم رقابت ذرات" پژوهش نفت. شماره ۱۱۲، ص ۷۵-۹۰.
- ۴- جولائی، ا.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، "تخمین ضخامت رسوبات حوضه های رسوبی با وارون سازی داده های گرانی بوسیله الگوریتم رقابت استعماری". کنفرانس ملی پژوهش های دانش بنیان در علوم زمین، اهواز.
- ۵- جولائی، ا.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، "مدل سازی وارون غیرخطی داده های گرانی سنگ بستر با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان" چهارمین سمینار ژئوفیزیک اکتشافی نفت، تهران.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه، مفاهیم اساسی و تبیین مسائل تحقیق.....	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تخمین عمق سنگ بستر بوسیله مدل سازی داده های میدان پتانسیل	۷
۱-۲-۱ مدل سازی پیشرو	۸
۲-۲-۱ مدل سازی وارون	۱۱
۳-۱ سابقه تحقیق و بیان مسأله	۱۲
۱-۳-۱ روش های جستجوی محلی	۱۲
۲-۳-۱ روش های جستجوی عمومی	۱۴
۴-۱ مسأله مدل سازی وارون غیرخطی سنگ بستر بوسیله داده های میدان پتانسیل	۱۸
۵-۱ ضرورت تحقیق حاضر	۱۹
۶-۱ اهداف تحقیق	۲۱
۷-۱ روش تحقیق	۲۱
۸-۱ ساختار رساله	۲۵
فصل دوم: مبانی مدل سازی پیشرو و وارون در مسائل میدان پتانسیل	۲۷
۱-۲ مقدمه	۲۸
۲-۲ مبانی فیزیکی روش های میدان پتانسیل	۲۸
۳-۲ پارامتر سازی مسائل میدان پتانسیل	۳۴

۲-۴ حل مسأله پیشرو در گرانی سنجی ۳۵

۲-۴-۱ مدل منشور دو بعدی با دانسیته ثابت ۳۶

۲-۴-۲ مدل منشور سه بعدی با دانسیته متغیر نسبت به عمق ۳۸

۲-۵ حل مسأله پیشرو در مغناطیس سنجی ۴۱

۲-۶ مدل کونارتنام در سال ۱۹۸۱ ۴۱

۲-۷ مدل سازی وارون ۴۴

۲-۸ یکتایی پاسخ مدل سازی ۴۴

۲-۸-۱ منظم سازی و هموار سازی ۴۵

۲-۸-۲ تخمین عدم قطعیت در مدل سازی وارون غیر خطی ۴۷

۲-۸-۳ روش های بیزین ۵۲

فصل سوم: بکارگیری روش های فراابتکاری در وارون سازی داده های میدان پتانسیل ۵۵

۳-۱ مقدمه ۵۶

۳-۲ دسته بندی روش های فراابتکاری ۵۶

۳-۳ بکارگیری الگوریتم فراابتکاری در مدل سازی غیر خطی داده های میدان پتانسیل ۵۸

۳-۳-۱ الگوریتم کلونی مورچگان ۵۹

۳-۳-۲ الگوریتم رقابت استعماری ۶۵

۳-۳-۳ الگوریتم رقابت ذرات ۷۳

۳-۳-۴ هیبرید رقابت استعماری و کرم شب تاب ۷۶

فصل چهارم: بکارگیری و ارزیابی روش های پیشنهادی بر روی داده های میدان پتانسیل از

مدل های مصنوعی ۸۱

۱-۴ مقدمه ۸۲

۲-۴ مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت) ۸۲

۱-۲-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت) با استفاده از الگوریتم مورچگان ۸۵

۲-۲-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۹۱

۳-۲-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از هیبرید الگوریتم های رقابت استعماری و کرم شب

تاب (ICA-FA) ۹۶

۴-۲-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از الگوریتم رقابت ذرات ۱۰۰

۳-۴ مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) ۱۰۴

۱-۳-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) با استفاده از ICA ۱۰۵

۴-۴ مدل مصنوعی مغناطیس ۱۱۰

۱-۴-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی مغناطیس با استفاده از الگوریتم مورچگان ۱۱۳

۲-۴-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی مغناطیس با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ۱۱۸

۵-۴ جمع بندی ۱۲۲

فصل پنجم: مدل سازی داده های صحرایی گرانی سنجی و مغناطیس سنجی با استفاده از روش های

پیشنهادی ۱۲۵

۱-۵ مقدمه ۱۲۶

۲-۵ مدل سازی داده های گرانی و مغناطیس در حوضه رسوبی مغان ۱۲۶

۱-۲-۵ زمین شناسی و چینه شناسی منطقه مغان ۱۲۶

۲-۲-۵ مطالعات ژئوفیزیک گرانی و مغناطیس سنجی در حوضه مغان ۱۳۰

۳-۲-۵ مدل سازی داده های گرانی سنجی حوضه رسوبی مغان ۱۳۲

۴-۲-۵ مدل سازی داده های مغناطیس سنجی حوضه رسوبی مغان ۱۴۰

۵-۲-۵ بحث و تحلیل نتایج مدل سازی های داده های گرانی و مغناطیس سنجی حوضه مغان ۱۴۴

۵-۳	مدل سازی داده‌های گرانی حوضه رسوبی لس آنجلس (کالیفرنیا).....	۱۴۶
۵-۴	مدل سازی داده‌های گرانی رسوبات صحرای آتاکاما (شیلی).....	۱۵۰
۵-۵	جمع بندی.....	۱۵۵
	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۱۵۷
۶-۱	جمع بندی و نتیجه‌گیری.....	۱۵۸
۶-۲	پیشنهادهای.....	۱۶۰
	پیوست‌ها.....	۱۶۳
	منابع.....	۱۶۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت). ۸۷
- جدول ۲-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA در مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت). ۹۱
- جدول ۳-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA-FA در مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت). ... ۹۵
- جدول ۴-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA در مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق). ۱۰۵
- جدول ۵-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل‌سازی داده‌های مدل مصنوعی مغناطیس. ۱۱۲
- جدول ۱-۵: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل‌سازی پروفیل داده‌های گرانی حوضه رسوبی مغان. ۱۳۲

فهرست مثل؛

- شکل ۱-۱ جابجایی ذره با جرم m از پتانسیل P_0 در مسیر دلخواه به سوی نقطه ای با پتانسیل P ، تحت تأثیر میدان نیرو F ۴
- شکل ۲-۱ تصویر شماتیک خطوط هم‌پتانسیل و خطوط میدان برای یک میدان دوقطبی ۵
- شکل ۳-۱ الگوریتم مدل‌سازی پیشرو ۱۰
- شکل ۴-۱ روابط شماتیک مدل‌سازی‌های پیشرو و وارون برحسب داده‌ها و مدل ۱۱
- شکل ۱-۲ تصویر شماتیک منشور قائم دو بعدی با دانسیته ثابت (ρ) و نقطه اندازه‌گیری (P) ۳۷
- شکل ۲-۲ بلوک‌بندی فضای مدل به منشورهای قائم با تغییرات تک بعدی (تنها در راستای عمق) ۳۸
- شکل ۳-۲ منشور قائم شماتیک با تباین دانسیته متغیر نسبت به عمق و تأثیر میدان آن در نقاط برداشت ۴۰
- شکل ۴-۲ تصویر شماتیک بلوک‌بندی با منشورهای دو نیم بعدی (پهنای زیاد منشور نسبت به عرض و عمق) ۴۱
- شکل ۵-۲ منشور قائم شماتیک (با مغناطیدگی همگن) و تأثیر میدان مغناطیس آن در نقاط برداشت ۴۴
- شکل ۶-۲ نمودارهای شماتیک تغییرات داده بر حسب یک مدل تک بعدی؛ (۱) محدوده جواب متصل و با مرزهای بسته. (۲) محدوده جواب منقطع ولی بار مرزهای بسته. (۳) محدوده جواب متصل ولی با مرزهای باز. (۴) محدوده جواب منقطع با مرزهای باز است ۴۹
- شکل ۷-۲ ناحیه معادل برای یک مسأله وارون خطی. ناحیه جواب ساده و به صورت یک بخش پیوسته است. عدم یکتایی اپراتور پیشرو مسأله (F) باعث کشیدگی محدوده مدل در راستای فضاهای خالی اپراتور شده است. قید هم پوشانی با دایره حول مدل مرجع، محدوده جواب را محدود نموده است. ۵۱
- شکل ۸-۲ ناحیه معادل برای یک مسأله وارون خطی. $Mtol$ در این حالت محدوده پاسخ پیچ و خم دار و بومرنگ شکل می‌باشد. دایره C قید هم پوشانی با مدل مرجع می‌باشد که تنها بخشی از جواب را پوشش داده است. ۵۲
- شکل ۱-۳ انتخاب کوتاه‌ترین مسیر به وسیله مورچه‌ها: شکل الف: آغاز رسیدن مورچه‌ها به دو راهی است، لذا شانس انتخاب مسیر برابر است. در شکل ب: بعد از چند تکرار رفت و برگشت، اغلب مورچه‌ها مسیر کوتاه‌تر را انتخاب می‌کنند ۶۲
- شکل ۲-۳ تقسیم‌بندی فضای مدل پیوسته به لایه‌های فرضی با تقسیم‌بندی به گره‌هایی فرضی، و عبور مورچه‌ها از این لایه و گره‌های فرضی ۶۳

- شکل ۳-۳ مراحل الگوریتم کلونی مورچگان ۶۷
- شکل ۴-۳ جمعیت اولیه از کشورهای شامل استعمارگران و مستعمره در الگوریتم رقابت استعماری ۶۹
- شکل ۵-۳ مدل حرکتی مستعمرات به سمت استعمارگر همراه با یک انحراف تصادفی ۷۰
- شکل ۶-۳ جا به جایی بهترین عضو امپراطوری با امپراطور (استعمارگر فعلی گروه) (شکل سمت چپ). وضعیت جدید امپراطوری پس از تبدیل وضعیت بهترین عضو به امپراطور (استعمارگر جدید گروه) (شکل سمت راست) ۷۲
- شکل ۷-۳ شمای کلی رقابت استعماری (امپراطوری‌های با قدرت بیشتر برای جذب اعضای ضعیف امپراطوری‌های ضعیف با یکدیگر رقابت می‌کنند (باتغییرات)) ۷۳
- شکل ۸-۳ مراحل الگوریتم رقابت استعماری ۷۴
- شکل ۹-۳ الگوی اجرای الگوریتم CSO، در هر مرحله از الگوریتم، ذرات بطور تصادفی به صورت دو به دو انتخاب می‌شوند و موقعیت هر دو ذره ارزیابی و ذره‌ای که موقعیت بهتری دارد؛ ثابت مانده و ذره بازنده را به سمت خود جذب می‌نماید. ۷۷
- شکل ۱۰-۳ فلوچارت الگوریتم CSO. ۷۸
- شکل ۱-۴ مدل مصنوعی گرانی یک حوضه رسوبی (با دانسیته ثابت) منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی گرانی بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا) ۸۴
- شکل ۲-۴ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده‌های گرانی سنجی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) و قیاس آنها با داده‌های اصلی. ۸۵
- شکل ۳-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.23mGal$) ۸۸
- شکل ۴-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.29mGal$) ۸۹
- شکل ۵-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.36mGal$) ۸۹
- شکل ۶-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.90mGal$) ۹۰

شکل ۴-۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMSdata = 1.61mGal$) ۹۰

شکل ۴-۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). ($RMSdata = 0.21mGal$) ۹۲

شکل ۴-۹ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.40mGal$) ۹۳

شکل ۴-۱۰ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.59mGal$) ۹۳

شکل ۴-۱۱ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.93mGal$) ۹۴

شکل ۴-۱۲ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 1.6mGal$) ۹۴

شکل ۴-۱۳ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین). ($RMSdata = 0.07mGal$) ۹۶

شکل ۴-۱۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.38mGal$) ۹۷

شکل ۴-۱۵ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.35mGal$) ۹۷

شکل ۴-۱۶ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.93mGal$) ۹۸

شکل ۴-۱۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMSdata = 1.53mGal$) ۹۸

شکل ۴-۱۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین). ($RMSdata = 0.08mGal$) ۱۰۰

شکل ۴-۱۹ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.27mGal$) ۱۰۱

شکل ۴-۲۰ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.56mGal$) ۱۰۱

شکل ۴-۲۱ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMSdata = 0.89 mGal$) ۱۰۲

شکل ۴-۲۲ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMSdata = 1.52mGal$) ۱۰۲

شکل ۴-۲۳ مدل مصنوعی گرانی یک حوضه رسوبی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی گرانی بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا) ۱۰۳

شکل ۴-۲۴ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده‌های گرانیسنجی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) و قیاس آنها با داده‌های اصلی ۱۰۴

شکل ۴-۲۵ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 17.2mGal$) ۱۰۶

شکل ۴-۲۶ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۱ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 16.53mGal$) ۱۰۷

شکل ۴-۲۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 28.5mGal$) ۱۰۷

شکل ۴-۲۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۳ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 32.41mGal$) ۱۰۸

شکل ۴-۲۹ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMSdata = 40.77mGal$) ۱۰۸

شکل ۴-۳۰ مدل مصنوعی مغناطیسی یک حوضه رسوبی منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی میدان مغناطیس کل بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا) ۱۱۰

شکل ۴-۳۱ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده‌های میدان مغناطیس کل مدل مصنوعی و قیاس آنها با داده‌های اصلی..... ۱۱۱

شکل ۴-۳۲ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین). (RMSdata =6.9 nT)..... ۱۱۳

شکل ۴-۳۳ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین). (RMSdata =7.8 nT) . ۱۱۴

شکل ۴-۳۴ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین). (RMSdata =7.3 nT) . ۱۱۴

شکل ۴-۳۵ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین). (RMSdata =7.8 nT)..... ۱۱۵

شکل ۴-۳۶ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) (RMSdata =8.0. nT)..... ۱۱۵

شکل ۴-۳۷ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۱۰ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) (RMSdata =8.9 nT)..... ۱۱۶

شکل ۴-۳۸ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). (RMSdata =7.1 nT)..... ۱۱۷

شکل ۴-۳۹ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). (RMSdata =5.9 nT) . ۱۱۸

شکل ۴-۴۰ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). (RMSdata =6.2 nT)..... ۱۱۸

شکل ۴-۴۱ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). (RMSdata =6.1 nT)..... ۱۱۹

شکل ۴-۴۲ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین). (RMSdata =9.6 nT) . ۱۱۹

- شکل ۴-۴ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۱۰ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 7.5 \text{ nT}$) ۱۲۰
- شکل ۵-۱ راهنمای نقشه زمین‌شناسی دشت مغان ۱۲۶
- شکل ۵-۲ راهنمای نقشه زمین‌شناسی دشت مغان ۱۲۷
- شکل ۵-۳ ستون چینه شناسی حوضه مغان و آذربایجان ۱۲۸
- شکل ۵-۴ نقشه آنومالی گرانی منطقه مغان ۱۳۱
- شکل ۵-۵ نقشه آنومالی گرانی باقیمانده منطقه شمالی مغان و پروفیل مدنظر ۱۳۲
- شکل ۵-۷ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۳۳
- شکل ۵-۸ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۳۴
- شکل ۵-۹ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۳۶
- شکل ۵-۱۰ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۳۷
- شکل ۵-۱۱ نقشه مغناطیسی کل باقیمانده منطقه مغان ۱۳۸
- شکل ۵-۱۲ نقشه مغناطیسی کل باقیمانده شمال منطقه مغان و پروفیل مدنظر ۱۳۹
- شکل ۵-۱۲ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی مغناطیس کلی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۴۰
- شکل ۵-۱۳ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی مغناطیسی کلی محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ۱۴۱
- شکل ۵-۱۴ نقشه خطوط تراز آنومالی گرانی حوضه لس‌آنجلس [۵۵] (AA') پروفیل استخراج داده‌های گرانی از نقشه ۱۴۷
- شکل ۵-۱۵ آنومالی گرانی باقیمانده حوضه لس‌آنجلس در مسیر پروفیل AA' ۱۴۴

شکل ۱۶-۵ مقطع دوبعدی مدل سازی شده از داده های گرانی حوضه لس آنجلس: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل تولید شده و مدل های مطالعات گذشته (تصویر پایین). ۱۴۵

شکل ۱۷-۵ نقشه پدیده های مهم ساختاری حوضه رسوبی لس آنجلس به همراه خطوط توپوگرافی سنگ بستر حوضه ۱۴۶

شکل ۱۸-۵ موقعیت جغرافیایی منطقه صحرای آتاکاما (شیلی). ۱۴۷

شکل ۱۹-۵ موقعیت نقاط برداشت داده های گرانی (مثلث های سیاه رنگ) به همراه موقعیت ایستگاه مبنا (مربع تو خالی) بر روی تصویر توپوگرافی SRTM ۱۴۸

شکل ۲۰-۵ داده های آنومالی باقیمانده گرانی حاصل از کاستن روند ناحیه ای از داده های بوگه کل در پروفیل ۱۵۳

شکل ۲۱-۵ مدل سازی دوبعدی پروفیل گرانی حوضه رسوبی آتاکاما: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشت (تصویر بالا) مدل تولید شده و مرزهای فضای جستجو؛ (تصویر پایین). ۱۵۰

فصل اول: مقدمه، مفاهیم اساسی و تبیین مسائل تحقیق

۱- مقدمه

امروزه تعیین هندسه سنگ بستر مدفون؛ شامل تعیین ضخامت رسوبات و تعیین مشخصات گسل‌های احتمالی پی‌سنگی و در کنار آن تعیین مرز لایه‌های مختلف در اعماق، از اهداف مهم بسیاری پروژه‌های عمرانی از جمله ایجاد سازه‌های سازه‌های بزرگ و همچنین اکتشاف منابع زیرزمینی مانند آب و منابع هیدروکربنی است. به‌ویژه در اکتشاف منابع هیدروکربنی که ضخامت رسوبات از عوامل مؤثر در ارزش‌گذاری پتانسیل حوضه رسوبی است [۱ و ۲ و ۳].

مطالعات ژئوفیزیکی از سریع‌ترین و در بیشتر موارد، کم‌هزینه‌ترین روش‌ها در مسیر کشف اهداف زیرسطحی می‌باشند. هدف اصلی مطالعات ژئوفیزیکی بیان کمی وضعیت درون زمین است [۴]. در بخش عمده‌ای از این مطالعات، ساختارهای زمین‌شناسی بوسیله یک یا چند مدل ریاضی تقریب زده می‌شوند و پارامترهای مدل بر اساس داده‌های برداشت شده تعیین می‌گردند [۵].

یکی از کاربردی‌ترین مطالعات ژئوفیزیکی، اندازه‌گیری داده‌های میدان پتانسیل است. اندازه‌گیری‌های میدان گرانی و مغناطیس از مشهورترین این روش‌ها می‌باشند؛ که بوسیله آن‌ها می‌توان مناطق وسیعی را با دقت، سرعت و هزینه قابل قبول تحت پیمایش و مطالعه قرار داد. برای آشنایی و شناخت هر چه بهتر این مطالعات نخست لازم است درک صحیح و کاملی از مفهوم میدان، نیرو، پتانسیل و دسته‌بندی‌های مربوط به هر یک داشته باشیم [۶ و ۷].

میدان^۱: تابعی است از فضا و زمان. در واقع در طبیعت دو نوع میدان با تفاوت ماهوی کاملاً متمایز

^۱ Field

وجود دارند؛ میدان‌های مادی و میدان‌های نیرو [۷].

میدان مادی^۱: برخی خواص فیزیکی ماده در هر نقطه از ماده و در یک زمان معین را توصیف می‌نماید.

دانسیته، نفوذپذیری، مغناطیدگی و درجه حرارت مثال‌هایی از میدان‌های مادی هستند [۷].

میدان‌های نیرو^۲: نیروهایی را که در هر نقطه در یک زمان معین عمل می‌نمایند؛ توصیف می‌کنند.

نیروی جاذبه کره زمین و میدان مغناطیس القا شده بوسیله جریان‌های الکتریکی، مثال‌هایی از میدان نیرو محسوب می‌شوند [۷].

نیرو در حرکت ذره از یک نقطه به نقطه دیگر، بکار انجام شده توسط میدان نیرو تعبیر می‌شود. قانون

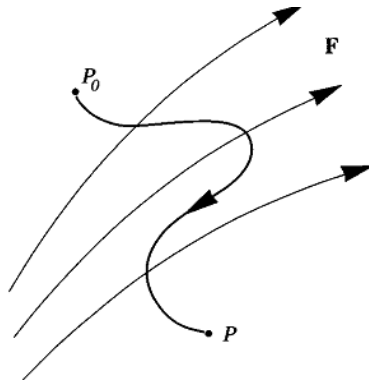
دوم نیوتن درباره‌ی حرکت مستلزم آن است که اندازه حرکت ذره در هر لحظه، متناسب با دامنه نیرو و در جهتی موازی با جهت میدان نیرو در محل ذره عمل کند. به بیانی دیگر:

$$\lambda \vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (1-1)$$

در این رابطه : λ مقدار ثابتی است که به سیستم واحدهای اعمال شده، بستگی دارد؛ v بردار سرعت و t زمان می‌باشند [۷].

۱ Material Field

۲ Force Field



شکل ۱-۱ جابجایی ذره با جرم m از پتانسیل P_0 در مسیر دلخواه به سوی نقطه ای با پتانسیل P تحت تأثیر میدان نیرو F [۷].

میدان پایستار: در میدان‌هایی خاص که کار لازم برای حرکت ذره از نقطه P_0 به P مستقل از مسیر حرکت باشد؛ میدان برداری اصطلاحاً پایستار بوده و آن را میدان پتانسیل می‌نامند. میدان‌های پایستار را می‌توان با گرادیان تابع کار آن‌ها نشان داد. پتانسیل φ مربوط به میدان F به عنوان "تابع کار" یا به عنوان منفی آن (بسته به جهت قراردادی میدان) تعریف می‌شود (رابطه (۲-۱)) [۷].

$$\vec{F} = \nabla\varphi \quad (۲-۱)$$

در میدان‌های پایستار، پتانسیل مساوی است با کار انجام شده توسط ذره بر ضد یا به عبارتی خلاف جهت میدان. یعنی:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \int_{P_1}^{P_2} \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (۳-۱)$$

که در این رابطه، dl المان کوچکی از بردار جابجایی است [۸].

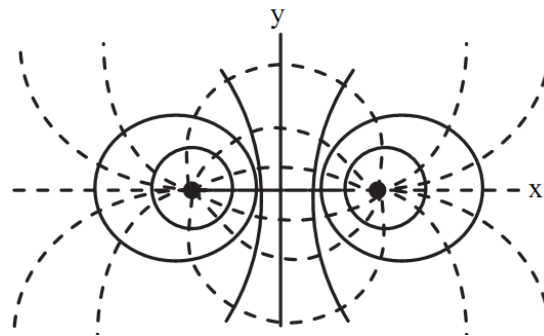
سطوح هم‌پتانسیل: سطحی که در روی آن پتانسیل ثابت می‌ماند، یک سطح هم‌پتانسیل تعریف می‌شود.

اگر s بردار واحد مماس بر یک سطح هم‌پتانسیل میدان F در هر نقطه باشد، خواهیم داشت:

$$\hat{S} \cdot \vec{F} = \frac{\partial\varphi}{\partial s} \quad (۴-۱)$$

رابطه (۴-۱) برای یک سطح هم‌پتانسیل (S)، بر اساس تعریف سطح هم‌پتانسیل باید همواره صفر شود. بر این اساس نتیجه می‌شود که خطوط میدان در هر نقطه همواره بر سطوح هم‌پتانسیل عمود و برعکس، هر سطحی که در تمام نقاط به هم‌ی خطوط میدان عمود است، باید سطحی هم‌پتانسیل باشد. بدیهی است در هر نقطه از فضا تنها یک سطح هم‌پتانسیل می‌تواند موجود باشد [۸].

فاصله میان سطوح هم‌پتانسیل معیاری است از چگالی خطوط میدان، به عبارتی یک میدان در ناحیه‌ای بیشترین مقدار را دارد، که سطوح هم‌پتانسیل آن کمترین فاصله را دارند [۸]. شکل ۲-۱ تصویر شماتیک خطوط هم‌پتانسیل شکل گرفته در محدوده یک میدان دوقطبی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱ تصویر شماتیک خطوط هم‌پتانسیل و خطوط میدان برای یک میدان دوقطبی [۸].

توابع هارمونیک^۱: از خواص مهم میدان‌های پتانسیل این است که تابع پتانسیل میدان (φ) در خارج از منشأ میدان، در معادله دیفرانسیل درجه دوم مهمی به نام معادله لاپلاس^۲ صدق می‌کند. یعنی می‌توان نوشت:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (۵-۱)$$

رابطه (۵-۱) که به معادله لاپلاس مشهور است؛ تنها برای نقاطی برقرار است که در آن‌جا چشمه میدان

^۱ Harmonic Function

^۲ Laplace Equation

وجود نداشته باشد [۷].

مدل ژئوفیزیکی: در واقع المانی^۱ است از یک فضای ریاضی، که در بردارنده تمام پارامترسازی‌های قابل قبول از ویژگی‌های زمین است؛ که معمولاً از این فضا به عنوان فضای مدل یاد می‌شود. در واقع مدل‌ها با ساده‌سازی‌هایی توصیف کمی از پدیده‌های درون زمین را ارائه می‌دهند [۴].

تئوری وارون:^۲ دسته‌ای از روش‌های ریاضی است که بر مبنای استنتاج از داده‌های مشاهده‌ای، با کاهش داده‌ها اطلاعات مفیدی از جهان فیزیکی ارائه می‌نماید. عبارت تئوری وارون در مقابل عبارت تئوری پیشرو^۳ بکار می‌رود که در واقع فرآیند پیش‌بینی نتایج اندازه‌گیری (پیش‌بینی داده‌ها) بر مبنای برخی مدل‌ها و در شرایط خاصی از مسأله است [۹]. مفهوم وارون‌سازی در مسائل ژئوفیزیکی، ارائه مدل زمین با تعیین دسته‌ای از پارامترهای فیزیکی است [۱۰].

مسأله وارون خطی: به‌طور کلی یک سیستم را خطی گویند اگر $f_1(P)$ میدان ایجاد شده با پخش منشأ $s_1(Q)$ و $f_2(P)$ میدان ایجاد شده دیگری با پخش منشأ $s_2(Q)$ باشد. در این صورت میدان ایجاد شده توسط $as_1(Q)+bs_2(Q)$ برابر با $af_1(P)+bf_2(P)$ است؛ a و b مقادیر ثابت هستند.

در صورتی که هدف محاسبه $S(Q)$ (پارامتری فیزیکی از قبیل مغناطیدگی یا چگالی) باشد؛ عموماً مسأله از جنس وارون‌سازی خطی است؛ هر چند اگر هدف تعیین حدود منشأ (ب‌طور کلی پارامترهای هندسی از قبیل عمق و ضخامت) باشد، مسأله وارون‌سازی از جنس غیرخطی خواهد بود [۶].

^۱ element

^۲ Inverse Theory

^۳ Forward Theory

۱-۲ تخمین عمق سنگ بستر بوسیله مدل سازی داده های میدان

پتانسیل

در حوضه های رسوبی، بین سنگ بستر و لایه های رسوبی فوقانی عمدتاً تباینی^۱ از ویژگی های فیزیکی از قبیل چگالی، مغناطیدگی، رسانایی الکتریکی و انتقال امواج وجود دارد. در این بین برداشت های میدان پتانسیل از قبیل گرانی سنجی و مغناطیس سنجی به دلایلی که پیش تر بیان شد؛ بر سایرین ارجحیت داشته و می توانند در تعیین هندسه سنگ بستر بکار گرفته شود. تاکنون روش های مختلفی برای تعیین عمق سنگ کف بر اساس داده های گرانی سنجی و مغناطیس سنجی ارائه شده اند؛ که به طور کلی در دو دسته روش های تخمین عمق خودکار و غیر خودکار قابل تفکیک اند [۱۱].

روش های خودکار: عمده روش های شاخص این دسته؛ روش اوایلر دکانولوشن^۲ و ورنر دکانولوشن^۳ می باشند [۱۲ و ۱۳]؛ که هر یک برای شرایط ساختمانی خاص خود کاربرد دارند. به عنوان نمونه، کاربرد روش اوایلر منوط به داشتن اطلاعات اولیه ای با عنوان شاخص ساختمانی بوده و همچنین روش ورنر دکانولوشن برای ساختارهای حاصل از گسل خوردگی کاربرد دارد [۱۱].

روش های غیر خودکار: این دسته روش ها خود به دو زیر دسته کلی قابل روش های طیفی و غیر طیفی قابل تفکیک هستند.

- **روش های طیفی:** این مجموعه به دو زیر گروه تقسیم می شوند: دسته اول روش های طیف آماری بر اساس روش اسپکتور و گرانت^۴ می باشند [۱۴]؛ که در تخمین عمق متوسط منابع گرانی و مغناطیس

۱ contrast

2 Euler deconvolution

3 Werner deconvolution

4 Spector and Grant

بکار می‌روند. دسته دوم روش‌هایی هستند که بر پایه روش پیشرو پارکر^۱ [۱۵] یعنی محاسبه سریع تأثیرات گرانی و مغناطیس فصل مشترک دو محیط استوارند برای این امر از اعمال تبدیل فوریه بر داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها سرعت بالای محاسباتی آن‌هاست؛ اما مهم‌ترین محدودیت آن‌ها، نیاز به اطلاعات در مورد عمق متوسط فصل مشترک می‌باشد [۱۱].

- **روش‌های غیرطیفی:** این دسته شامل مجموعه‌ای از روش‌های حوزه مکان است؛ که در این روش‌ها لایه رسوبات روی سنگ کف به صورت دسته‌ای از منشورها (و به‌طور کلی بلوک‌ها) در نظر گرفته می‌شوند. حل این دسته از روش‌ها از طریق کمینه‌سازی ترکیبی از تابع برازش و قیود منظم‌ساز می‌باشد. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها این است که توپوگرافی تخمین زده شده لزوماً نسخه کوچکی از داده‌های مشاهده‌ای نیست و مهم‌ترین محدودیت آن‌ها، حجم بالای محاسبات است [۱۱].

۱-۲-۱ مدل‌سازی پیشرو

یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی عبارت است از ساختن مدل‌های مختلف زمین‌شناسی و مقایسه داده‌های فرضی ژئوفیزیکی حاصل از این مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای (برداشت شده). مدل‌سازی عددی داده‌های ژئوفیزیکی به ازای پارامترهای مدل در نظر گرفته شده را مدل‌سازی پیشرو می‌نامند [۹]. مدل‌سازی پیشرو نقش مهمی در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه برداشت‌های گرانی و مغناطیس دارد. مدل‌سازی پیشرو به‌گونه‌ای پایه و اساس مدل‌سازی‌های وارون هم به شمار می‌رود [۱۶]. مدل‌سازی پیشرو امکان پیش‌بینی داده‌های حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی برای یک سری

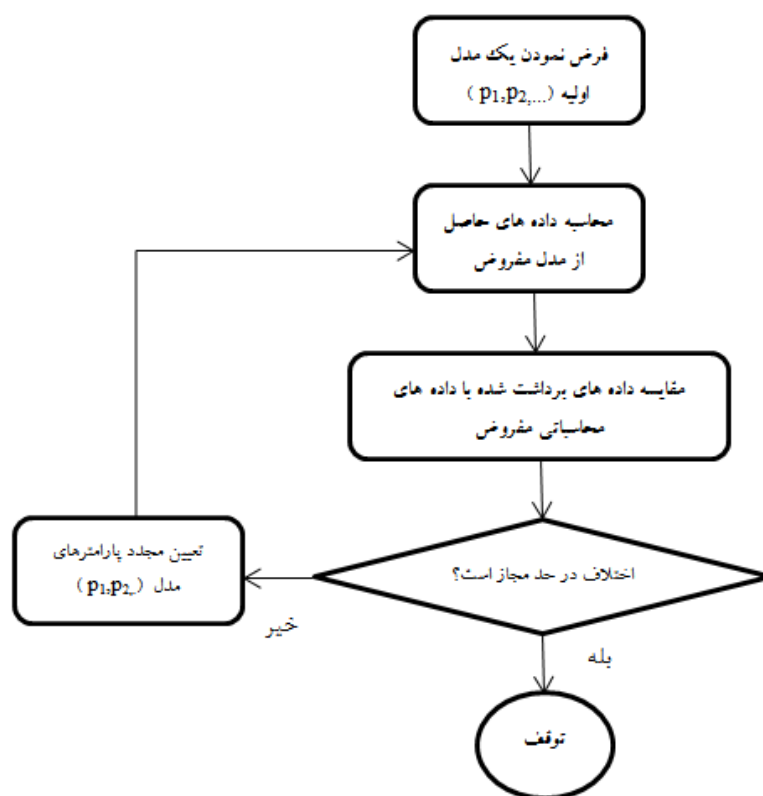
1 Parker

ساختارهای زمین‌شناسی خاص را فراهم می‌آورد [۹]. در واقع مدل‌سازی پیشرو مدل‌هایی کمی بر اساس ساختارهای مفروض زمین‌شناسی از قبیل مدل‌های یک بعدی، زمین لایه‌ای دو بعدی یا سه بعدی کروی یا سیلندر در یک محیط همگن^۱ و همسانگرد^۲ و... ارائه می‌نماید [۸].

در این روش یک مدل اولیه برای توده‌ی منشأ بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی یا ژئوفیزیکی در نظر گرفته می‌شود. بی‌هنجاری احتمالی مدل در نظر گرفته شده محاسبه و اختلاف آن با بی‌هنجاری بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها تعیین می‌گردد. به بیان دیگر، میزان برازش داده‌های تولیدی از مدل به داده‌های واقعی برداشت شده محاسبه می‌شود و در صورتی که این میزان برازش در حد مطلوب نباشد؛ این فرآیند مجدداً با تنظیم دوباره پارامترهای مدل و تولید داده‌های متناظر آنها تا آنجا تکرار می‌شود؛ تا میزان برازش به حد مطلوب برسد [۶]. الگوریتم مراحل کلی این نوع مدل‌سازی در شکل ۱-۱ ارائه شده است.

۱ homogeneous

۲ isotropic



شکل ۱-۳ الگوریتم مدل سازی پیشرو [۷].

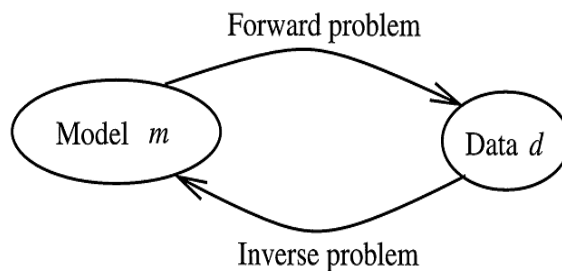
حل پذیری مسائل پیشرو با پیشرفت سریع ابزارهای محاسباتی و بکارگیری روش های عددی اجزا محدود^۱ و تفاضل محدود^۲ پیشرفت چشم گیری یافت. به عبارت دیگر مدل های پیچیده تری با تعداد پارامترهای بیشتر نیز حل شده اند.

^۱ Finite element

^۲ Finite difference

۲-۲-۱ مدل سازی وارون

مدل سازی وارون همان طور که پیش تر بیان شد، عموماً در بسیاری از متون علمی در نقطه مقابل مدل سازی پیشرو بکار می رود. شکل ۲-۱ وضعیت این دو روش را نسبت به هم نشان می دهد.



شکل ۴-۱ روابط شماتیک مدل سازی های پیشرو و وارون بر حسب داده ها و مدل [۴].

شکل ۴-۱ روابط دو روش مدل سازی وارون و پیشرو را برای درک آسان به صورت کاملاً ساده به تصویر کشیده است؛ که با واقعیت تفاوت هایی دارد و پذیرش آن منوط به برخی شفاف سازی هاست. مهم ترین نکته ای که در مورد روابط و تفاوت های دو روش مدل سازی وارون و پیشرو باید ذکر نمود، این است که در واقع کارکرد اصلی مدل سازی وارون، تولید اطلاعات در مورد پارامترهای عددی مجهول متناسب به مدل است؛ نه تعیین خود مدل. با این حال مدل سازی وارون می تواند ابزاری برای تشخیص صحت مدل در نظر گرفته شده و یا تفکیک مدل های مختلف ممکن؛ تولید نماید [۶].

نکته دیگری که در مورد روابط مدل سازی های وارون و پیشرو باید در نظر داشت؛ عدم کفایت داده ها نسبت به پارامترهای مدل است. چرا که ممکن است به ازای برخی پارامترها داده ای که از آنها تأثیر پذیرفته، موجود نباشد و یا برخی متغیرهای بی تأثیر در داده ها وجود داشته باشد. بنابراین مجموعه این عوامل می تواند سبب پیدایش درجه آزادی های بعضاً بالا در مسائل وارون گردند [۴ و ۱۷]. پر واضح است در چنین مواردی مسأله می تواند متناسب با درجات آزادی، پاسخ هایی داشته باشد، که همگی داده های برداشت شده را ارضا نموده و درعین حال متفاوت از یکدیگر باشند. به بیان ساده تر تعیین پاسخ یکتا برای

مسأله سخت و پیچیده خواهد شد.

۱-۳ سابقه تحقیق و بیان مسأله

برای مدل سازی ضخامت رسوبات بر روی سنگ بستر با استفاده از داده های میدان پتانسیل، تاکنون مدل های مختلفی ارائه شده است. در این بین دو مدل جمع دوبعدی منشورها [۱۸] و مدل چندضلعی نامنظم تالوانی^۱ [۱۹] رواج و کاربرد بیشتری دارند [۲۰]. در مدل بات^۲ ضخامت رسوبات به شکل منشورهایی که تباین مغناطیدگی یا دانسیته با سنگ بستر دارند؛ به صورت دو یا سه بعدی مدل می شوند. به طور کلی مسأله مدل سازی ضخامت لایه رسوبات با استفاده از داده های میدان پتانسیل، فارغ از نوع داده و نوع مدلی که برای آن در نظر گرفته شود؛ مسأله ای است وارون و عمدتاً غیرخطی. برای حل این مسائل وارون، اغلب از روش های جستجوی محلی استفاده می شود.

۱-۳-۱ روش های جستجوی محلی

این روش ها که روش های جستجوی حریصانه^۳ هم نامیده می شوند؛ شامل روش هایی از قبیل تندترین شیب^۴ روش نیوتن^۵، گرادیان مزدوج^۶ و مارکوارت-لونبرگ^۷ می شوند. اساس این روش ها اغلب بر مبنای

۱ Talwani

۲ Bott

۳ Greedy

۴ Steepest Descent

۵ Newton Method

۶ Conjugated Gradient

۷ Levenberg-Marquardt

تغییرات گرادیان تابع هدف مسأله حول یک مدل اولیه از پیش تعیین شده می‌باشد [۲۱]. بدین صورت که از یک مدل از پیش تعیین شده همراه با قیود تکمیلی استفاده و با خطی‌سازی تابع هدف در هر تکرار به انتها می‌رسد [۲۲-۲۴]. روش‌های محلی با وجود مزایایی از قبیل سرعت بالای همگرایی، در حل مسائل غیرخطی دارای نارسایی‌ها و مشکلاتی هستند؛ که عمده‌ترین آن‌ها به دام افتادن در نقاط کمینه محلی است. چرا که در این مسائل ممکن است تابع هدف دارای چندین نقطه کمینه محلی با مقادیر مختلف باشد و بدیهی است بکارگیری روش‌های جستجو بر پایه گرادیان تابع هدف با احتمال به دام افتادن در کمینه محلی همراه خواهد بود. مگر این که انتخاب مدل اولیه به اندازه کافی به پاسخ حقیقی نزدیک باشد؛ که این امر نیز خارج از کنترل است [۲۵].

از سوی دیگر مسائل میدان پتانسیل اغلب با مشکل بدحالت^۱ شدن ناشی از غیریکتا بودن پاسخ مواجه هستند. از این رو ارزیابی عدم قطعیت یکی از مهم‌ترین مراحل وارون‌سازی است [۱ و ۵]؛ که در این موارد نیز روش‌های محلی در ارزیابی عدم قطعیت برای مسائل غیرخطی با مشکل روبرو می‌شوند [۲۶-۲۸]. علاوه بر موارد یاد شده، پاسخ این روش‌ها به شدت تحت تأثیر مدل و اطلاعات اولیه‌ای است که در شروع مدل‌سازی تعریف می‌شوند [۲۹ و ۳۰]. همچنین تعیین گرادیان تابع هدف در هر تکرار؛ بعضاً در مسائلی که ممکن است تابع هدف مشتق تحلیلی نداشته باشد، با مشکلاتی همراه است [۳]. روش دیگر حل این مسائل، استفاده از روش‌های جستجوی عمومی (سراسری، کلی)^۲ است.

^۱ ill-posed

^۲ Global Search

۱-۳-۲ روش‌های جستجوی عمومی

با توجه به مشکلاتی که در مورد امکان کاربرد روش‌های جستجوی محلی در مسائل وارون غیرخطی و به‌طور کلی در مسائلی دارای چند کمینه محلی بیان شد؛ روش‌های جستجوی عمومی شکل گرفتند؛ که هدفشان جستجوی کمینه عمومی در مسائلی با کمینه‌های متعدد است. این روش‌ها اساساً از روش شبکه‌بندی و جستجوی منظم فضای مدل و یا الگوریتم‌هایی جستجوی نامنظم چیزی شبیه الگوریتم مونت کارلو^۱ استفاده می‌نمایند [۳۱]. هریک از این روش‌ها بر مبنای نمونه‌گیری از فضای پارامترهای مدل بنا شده‌اند و از این رو به‌طور ذاتی تا حدود زیادی از مشکلاتی از جنس ناپایداری مصون هستند.

الف-روش جستجوی شبکه‌ای^۲

این روش به صورت جستجوی منظم و سامان‌مند در نقاطی از شبکه‌ای از پیش تعیین شده در فضای مدل است؛ تا مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترهای مدل که بیشترین برازش در تابع هدف را داشته باشند؛ ارائه نماید.

از آن‌جا که فضای مدل در مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی بسیار بزرگ است؛ محاسبه متعدد پاسخ پیشروی مسأله و در نتیجه تعیین مقدار خطای مزبور به نقاط شبکه؛ امری بسیار زمان‌بر است. به‌گونه‌ای که تقریباً کاربرد روش مزبور را برای اغلب مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی غیرممکن می‌سازد؛ هرچند برای مسائل ژئوفیزیکی با تعداد پارامترهای کم، کاربردهای موفقی از آن گزارش شده است [۳۲]. به عنوان نمونه والتر^۳ در سال ۱۹۹۳ برای تخمین پارامترهای مربوط به مرکز یک زلزله (شیب و امتداد گسل منشأ) از این روش

^۱ Monte Carlo Algorithm

^۲ grid-search techniques

^۳ Walter

استفاده نمود [۳۳].

ب- روش‌های جستجوی تصادفی

۱- الگوریتم مونت کارلو

الگوریتم مونت کارلو یک الگوریتم مدل‌سازی وارون است؛ که با جستجو در فضای مدل، بهترین مدلی را که خطای تخمین آن با داده‌های واقعی برداشت شده تا حد امکان کمینه است؛ ارائه می‌نماید. ساز و کار اصلی این الگوریتم، جستجوی تمام تصادفی در فضای مدل و مقایسه پاسخ‌های محاسبه از مدل، با داده‌های برداشت شده است. در این نوع مدل‌سازی، پارامترهای مدل می‌توانند آزادانه هر مقداری را در یک بازه از پیش تعیین شده اختیار نمایند و برای هر پارامتر خواهیم داشت [۳۱]:

$$m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max} \quad (۶-۱)$$

عملکرد الگوریتم به صورت انتخاب یک عدد تصادفی (rn) از توزیع یکنواخت^۱ در بازه (0,1) و در تصویر نمودن آن در فضای پارامترهای مدل است. به گونه‌ای که هر پارامتر مدل با فرض توزیع یکنواخت از رابطه (۷-۱) تعیین می‌شود [۳۱].

$$m_i^{\text{new}} = m_i^{\min} + (rn)(m_i^{\max} - m_i^{\min}) \quad (۷-۱)$$

پس از تولید تمامی مؤلفه‌های بردار مدل (m^{new})، داده‌های مصنوعی و متناظر با بردار مدل مربوطه تولید می‌شوند و با بردار داده‌های مشاهده‌ای مقایسه و اختلاف آن‌ها تعیین و ذخیره می‌گردد. این عمل تا زمانی ادامه می‌یابد که شروط اتمام از قبیل کوچکتر شدن اختلاف از حدی از پیش تعیین شده، ارضا شود.

^۱ Uniform distribution

نخستین استفاده از الگوریتم مونت کارلو در مطالعات ژئوفیزیکی را پرس^۱ در سال ۱۹۶۸ برای مدل سازی وارون پارامترهای لرزه ای^۲ زمین به انجام رساند. وی مرزهای تغییرات پارامترها را بزرگتر از مقدار کمینه و بیشینه ای که تا آن زمان در مطالعات بدست آمده بود؛ قرار داد [۳۱].

استفاده از روش مونت کارلو در مدل سازی های وارون ژئوفیزیکی با افزایش توان محاسباتی رایانه ها گسترش یافته است. به ویژه پس از دهه ۸۰ میلادی با توسعه روش های اجرای آن، الگوریتم مونت کارلو از جایگاه ویژه ای در مدل سازی های ژئوفیزیکی برخوردار شد [۳۲-۳۳].

بازتعریف و بهبود قالب اولیه هر الگوریتم، از ملزومات گسترش کاربری آن است. یکی از این تغییرات و توسعه های اساسی که موجب ارتقا الگوریتم مونت کارلو شد، استفاده از توزیع های غیریکنواخت^۳ برای جستجو در فضای مدل بود؛ که با واقعیت نیز همخوانی بیشتری داشت [۳۲].

۲- مونت کارلو هدایت شده:

متأسفانه الگوریتم مونت کارلو، برای اغلب مسائل بسیار زمان بر است، چرا که نیازمند آن است که برای تعداد بسیار زیادی نقطه در فضای مدل، پاسخ پیشرو مسأله را محاسبه و با مقدار برداشت شده مقایسه کرده و اختلافشان پس از محاسبه ذخیره نماید. بر این اساس، کاربرد شکل عمومی الگوریتم برای بسیاری مسائل چندان مقرون به صرفه نبوده و هدایت فرآیند نمونه گیری به گونه ای که هم وجه تصادفی مسأله حفظ شده و هم سرعت رسیدن به پاسخ سریع تر شود؛ ضروری است [۳۱].

اجرای الگوریتم مونت کارلو با بکارگیری توأمان قوانین احتمال در جستجوی های تصادفی، نمونه گیری را به سمت مناطقی با احتمال نزدیک تر بودن به جواب سوق می دهد. از این رو روش هایی بنام روش های

^۱ Press

^۲ Seismic

^۳ Non uniform

فراابتکاری^۱ بر مبنای اصول الگوریتم مونت کارلو شکل گرفتند.

۳- الگوریتم‌های فراابتکاری:

این الگوریتم‌ها مجموعه‌ای گسترده از روش‌های جستجوی پاسخ می‌باشند؛ که بر مبنای جستجوی تصادفی، اما مدیریت شده و جهت‌دار بر اساس برخی قوانین احتمال عمل کرده و پاسخ‌های راضی‌کننده‌ای را در زمان جستجوی معقول ارائه می‌کنند.

این روش‌ها اغلب بر مبنای برخی پدیده‌ها و فرآیندهای فیزیکی موجود در طبیعت شکل گرفته‌اند. در این الگوریتم‌ها جستجوها گرچه تصادفی هستند، ولی مستقل نبوده و هر نمونه‌گیری معمولاً دست‌کم از یک نمونه پیش از خود تأثیر می‌پذیرد [۱۷ و ۲۱ و ۳۴].

امروزه روش‌های فراابتکاری متعددی بر مبنای الگوها و رویکردهای مختلف به وجود آمده‌اند؛ که بعضاً تفاوت‌های اساسی و چشم‌گیری در اصول و اجرا با یکدیگر دارند. البته آنچه در همه‌ی طراحی‌ها مورد توجه است، موازنه و حرکت میان دو معیار کاوش در فضای جستجو و تبعیت از بهترین پاسخ‌های بدست آمده است. کنش میان خاصیت جستجوگری الگوریتم (عامل تنوع و گوناگونی^۲ پاسخ‌ها) و نیز خاصیت همگرایی و تشدید^۳ جستجوها (سوق دادن پاسخ‌ها به سمت پاسخ‌های مطلوب)؛ مهم‌ترین عامل در تفاوت‌های رفتاری الگوریتم‌های فراابتکاری است. به نوعی تلقی و شناخت از هر الگوریتم، وابسته به وزن تعیین شده برای هر یک از این دو خاصیت در آن الگوریتم است. پر واضح است الگوریتم‌هایی که وزن جستجوگری بالایی داشته باشند، بیشتر به سمت الگوریتم مونت کارلو و جستجوی خالص تصادفی تمایل دارند و زمان‌بر بودن و مسائل و ویژگی‌هایی که برای الگوریتم‌های جستجوی کاملاً تصادفی بیان شد را نیز، بسته به این وزن همراه

^۱ Metaheuristic

^۲ diversification

^۳ intensification

خواهند داشت [۳۵].

نخستین کاربرد روش‌های فراابتکاری در مسائل وارون‌سازی ژئوفیزیکی به‌ویژه میدان پتانسیل، به کاربرد الگوریتم‌های انجماد تدریجی فلزات^۱ [۳۶ و ۳۷] و ژنتیک^۲ در حدود دو دهه پیش مربوط می‌شود [۶]. پس از آن کاربردها؛ الگوریتم‌های فراابتکاری بر مبنای هوش جمعی از قبیل کلونی مورچگان^۳ [۳۸ و ۳۹] و تجمع ذرات^۴ [۲۹ و ۳۰ و ۴۰ و ۴۱] از دیگر این روش‌ها بودند؛ که در جستجوی پاسخ مسائل وارون‌سازی میدان پتانسیل بکار گرفته شدند.

۱-۴ مسأله مدل‌سازی وارون غیرخطی سنگ بستر بوسیله داده‌های میدان پتانسیل

همچنان که اشاره شد، مسأله مدل‌سازی وارون غیرخطی داده‌های میدان پتانسیل، با غیریکتایی و بدحالتی ذاتی همراه است و حل دقیق آن‌ها تنها در حالات ایده‌آل و بر اساس مکانیک کوانتومی امکان‌پذیر خواهد بود؛ که پتانسیل به صورت شعاعی و متقارن به صورت یکنواخت تغییر کند و فاقد کمینه‌های محلی باشد [۱۷ و ۴۲] بر این اساس، بکارگیری الگوریتم‌های جستجوی محلی در این مسائل، نیازمند اعمال قیود تکمیلی و مدل اولیه مناسبی است؛ تا بتوان تا حد امکان درجه آزادی پارامترهای مدل و به عبارتی فضای پاسخ‌های معادل را کاهش داده و از به دام افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری شود؛ که این امر خود مستلزم داشتن اطلاعات تکمیلی و اولیه از فضای مسأله است. از آنجا که در بسیاری از مطالعات ژئوفیزیکی

۱ Simulate Annealing (SA)

۲ Genetic Algorithm (GA)

۳ Ant Colony (ACO)

۴ Particle Swarm Optimization (PSO)

(به‌ویژه مطالعات برداشت‌های میدان پتانسیل، که عمدتاً مربوط به مطالعات مقدماتی می‌باشند)، اطلاعات اولیه و تکمیلی از منطقه در دست نیست؛ انتخاب مدل اولیه مناسب و اعمال قیود تکمیلی، به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

علاوه بر مشکلات بیان شده، وجود نوفه^۱ در داده‌های ژئوفیزیکی نیز عامل دیگری است که سبب تشدید بدحالتی مسائل وارون‌سازی به‌ویژه در مدل‌سازی‌های غیرخطی شده و عدم قطعیتی همیشگی را به پاسخ این مسائل تحمیل می‌نماید. از این رو، در وارون‌سازی مسائل ژئوفیزیکی ارزیابی پاسخ و آنالیز عدم قطعیت، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

با جمع‌بندی مطالب مطروحه به نظر می‌رسد برای مدل‌سازی ضخامت رسوبات حوضه رسوبی به وسیله داده‌های میدان پتانسیل، با مسأله ای وارون بدحالت روبرو هستیم؛ که به دلیل عواملی همچون وجود نوفه در داده‌ها و نیز غیریکتایی ذاتی مسأله امکان به دام افتادن پاسخ مسأله در بهینه‌های محلی وجود دارد. لزوم همخوانی و مطابقت مدل بدست آمده با واقعیت‌های طبیعت از یکسو و نیز کمبود اطلاعات اولیه و فقدان مدل اولیه مناسب از سوی دیگر، اعمال قیود تکمیلی در حل این مسائل را با پیچیدگی و دشواری مواجه می‌نماید.

۱-۵ ضرورت تحقیق حاضر

هدف از این تحقیق مدل‌سازی غیرخطی هندسه سنگ بستر حوضه‌های رسوبی؛ با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیس است.

تعیین ضخامت رسوبات بر اساس داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی مستلزم حل مسأله ای وارون

^۱ Noise

و غیرخطی است. بر این اساس و با توجه به جمیع مطالب مطرح شده در مورد حل چنین مسائلی؛ تصمیم بر آن شد تا مدل‌سازی‌های مورد نظر با روش جستجوی عمومی و بوسیله روش‌های فراابتکاری الگوریتم کلونی مورچگان^۱ (ACO) و رقابت استعماری^۲ (ICA) انجام شود و با توجه به عدم قطعیت ذاتی این مسائل، مقرر شد پاسخ‌های بدست آمده برای هر یک از این روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و عدم قطعیت هر یک از آن‌ها تعیین گردند.

انتخاب روش‌های فراابتکاری نام‌برده از میان روش‌های متعددی که در این زمینه وجود دارد، بر اساس گزارش‌های کاربرد موفق آن‌ها در علوم مختلف از جمله در مدل‌سازی‌های علوم زمین بوده است. در این میان الگوریتم کلونی مورچگان ویژگی‌های لازم را دارد و در کنار آن برخی روش‌های جدیدتر مانند روش رقابت استعماری، که گزارش‌های متعددی از موفقیت کاربرد آن در سایر زمینه‌ها وجود دارد؛ نیز انتخاب شد. لازم به ذکر است که در زمان پیشنهاد این رساله الگوریتم رقابت استعماری صرفاً به عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید که موفقیت کاربرد آن در زمینه‌های متعددی گزارش شده بود، برای حل مسأله انتخاب شد؛ هر چند بررسی امکان بکارگیری الگوریتم‌های جدیدتر نیز هرگز از نظر دور نماند. با آغاز این پژوهش، به مرور موفقیت کاربردهای موفقیت‌آمیز الگوریتم‌های جدیدتری نیز گزارش شد. لذا در این پژوهش کارآیی الگوریتم‌های دیگری علاوه بر الگوریتم‌های رقابت استعماری و کلونی مورچگان بصورت مطالعه موردی برای مدل‌سازی سنگ بستر حوضه مغان واقع در شمال غرب، مورد بررسی قرار گرفتند. در مطالعات گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی انجام شده در این منطقه، ولکانیک‌های ائوسن شامل جریان‌ات بازالتی به عنوان ساختارهای پی‌سنگی این ناحیه در نظر گرفته شده‌اند؛ که تباین وزن مخصوص و

^۱ Ant Colony Algorithm (ACO)

^۲ Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

مغناطیدگی مناسبی با رسوبات بالایی خود دارند و شرایط مناسبی را برای تصویر نمودن پی‌سنگ ایجاد می‌نمایند [۴۳ و ۴۴].

۱-۶ اهداف تحقیق

نظر به مطالب بیان شده در مورد اهمیت مدل‌سازی ضخامت رسوبات حوضه‌های رسوبی و نیز شناسایی هندسه سنگ بستر در آن‌ها؛ تحقیق حاضر به منظور مدل‌سازی غیرخطی سنگ بستر و مطالعه موردی بر حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیس صورت پذیرفت. با توجه به شرایط مسأله و مطالبی که پیش‌تر در مورد شرایط بکارگیری بهینه‌سازی عمومی و مزایا و معایب آن نسبت به سایر روش‌های وارون‌سازی عنوان شد؛ مدل‌سازی‌های مورد نظر با روش جستجوی عمومی و بوسیله روش‌های فراابتکاری الگوریتم کلونی مورچگان و رقابت استعماری انجام پذیرفت. با توجه به عدم یکتایی ذاتی پاسخ این دسته روش‌ها، مقرر شد برای هر یک مدل‌های بدست آمده ارزیابی عدم قطعیت انجام شود.

در این پژوهش که با هدف مدل‌سازی غیرخطی سنگ بستر حوزه یاد شده با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیس بر اساس روش‌های فراابتکاری فوق‌الذکر انجام پذیرفته است.

۱-۷ روش تحقیق

به منظور نیل به اهداف مدنظر این تحقیق، در گام نخست فرضیات، معلومات و مجهولات این تحقیق در قالب مسأله ای وارون غیرخطی معین گردید. بر این اساس در مدل‌سازی‌های مزبور، مجهولات ضخامت بلوک‌های دو یا دو و نیم بعدی هستند؛ که مقطع رسوبات قرار گرفته بر روی سنگ بستر به آن‌ها افزای می‌گردد. به بیانی دیگر هر مدل (پاسخ) بیانگر ضخامت همه بلوک‌های مفروض است. حداقل اطلاعات مورد

نیاز برای حل این مسائل، داده‌های گرانی و مغناطیس برداشت شده در منطقه مورد مطالعه و نیز توزیع و روند تباین‌های دانسیته و مغناطیدگی میان رسوبات و سنگ بستر می‌باشند.

تعیین مدل‌های پیشرو مناسب در گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی از دیگر ملزومات اولیه این تحقیق است؛ که به انجام رسید و این مدل‌های پیشرو در ادامه رساله معرفی و بکار گرفته شده‌اند.

نظر به عدم وجود نرم‌افزارهای تجاری با قابلیت انجام مدل‌سازی‌های مورد نظر و نیز با توجه به شرایط مدل‌سازی و قابلیت‌های زبان برنامه‌نویسی متلب^۱ از جمله قابلیت‌های ارائه نتایج بصری در آن نسبت به سایر زبان‌های برنامه‌نویسی؛ توسعه کدها با برنامه‌نویسی در محیط متلب انجام شد.

پس از تعیین مدل‌های پیشرو مورد نظر و محیط مدل‌سازی‌ها، با در نظر گرفتن اطلاعات و امکانات در دسترس و محدودیت‌های اطلاعاتی و زمانی، فرآیند مدل‌سازی در منطقه مورد مطالعه در شش مرحله تفکیک شد؛ که مراحل مزبور عبارتند از:

۱- دریافت داده‌های لازم گرانی و مغناطیس و سایر اطلاعات از مطالعات انجام شده در منطقه مورد مطالعه و اعمال تصحیحات مورد نیاز:

نخست ضروری است داده‌های منطقه هدف شامل داده‌های گرانی، مغناطیس، اطلاعات زمین‌شناسی و نیز سایر مطالعات احتمالی انجام شده در گذشته؛ اعم از مدل‌سازی‌های احتمالی و نیز زمان و سطح دقت مطالعات انجام شده و نیز همه پیمایش‌ها و اطلاعات میدانی مربوطه جمع‌آوری گردند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، بررسی دقیق داده‌ها شامل بررسی نیاز احتمالی آن‌ها به اعمال تصحیحات و داده‌های مورد نظر به منظور شناسایی منابع احتمالی خطا، بخش لاینفک مطالعات کتابخانه‌ای است.

۲- جداسازی آنومالی باقیمانده از آنومالی ناحیه‌ای و آماده‌سازی نهایی برای مدل‌سازی:

^۱ MATLAB

آنومالی‌های میدان پتانسیل حاصل از برداشتهای گرانی‌سنجی و مغناطیس از دو مولفه آنومالی‌های ناحیه‌ای ناشی از ساختارهای بزرگ مقیاس و آنومالی‌های باقیمانده ناشی از ساختارهای محلی کوچک مقیاس تشکیل شده است. بسته به هدف و مقیاس برداشتهای میدان پتانسیل؛ از آنومالی‌های ناحیه‌ای^۱ و باقیمانده^۲ استفاده می‌شود. از آن‌جا که آنومالی ثبت شده داده‌های گرانی و مغناطیس در این مطالعه به تباین ویژگی‌های دانسیته و مغناطیدگی رسوبات نهشته در حوزه و سنگ بستر مربوط می‌شود؛ بدیهی است در این تحقیق تنها مولفه آنومالی/های باقیمانده مد نظر است و آنومالی/های ناحیه‌ای باید محاسبه و از داده‌های برداشتی کاسته شوند. تاکنون روش‌های مختلفی از قبیل فیلترهایی بر مبنای طول موج دریافتی، بدین منظور ارائه شده است [۴۵ و ۴۶]. پس از جداسازی آنومالی باقیمانده؛ داده‌ها به قالبی سازگار با ورودی‌های کدهای توسعه داده شده تبدیل شدند.

۳- تهیه و توسعه کدهای حل مسأله سیستم غیرخطی در گرانی و مغناطیس به صورت دو بعدی: برای مدل‌سازی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، باید تابع هدفی که یکی از اجزای اصلی آن اختلاف بین داده‌های حاصل از مدل محاسباتی و داده‌های مشاهده‌ای است؛ کمینه گردد. از این رو لازم بود ابتدا کدهای مدل‌سازی پیشروی آن‌ها به گونه‌ای توسعه یابند که داده‌های حاصل از مدل‌های مختلف در تابع هدفی معین منظور گردد. سپس مدلی که به ازای آن مدل تابع مذکور کمینه گردد؛ به وسیله الگوریتم‌های کلونی مورچگان یا رقابت استعماری جستجو گردد.

۴- صحت‌سنجی کدها با ساخت مدل‌های مصنوعی^۳ استاندارد و تنظیم پارامترهای ویژه هر الگوریتم: پیش از شروع مدل‌سازی‌ها به منظور صحت‌سنجی هر یک از روش‌های مدل‌سازی، لازم است یک مدلی

۱ Regional

۲ Residual

۳ synthetic model

مصنوعی استاندارد برای آن ایجاد و با مدل سازی بر مبنای تابع هدف از پیش تعیین شده داده های فرضی تولید گردد. سپس با مدل سازی وارون این داده ها، مدل مصنوعی اولیه مورد بازسازی قرار گرفته و با مقایسه آن با مدل اولیه، میزان انحراف از پاسخ حقیقی و به عبارتی رواداری پاسخ های ارائه شده برای آن روش معین گردد. بر این اساس، بر مبنای الگوریتم های کلونی مورچگان و رقابت استعماری و عملگرهای مورد نیاز هریک، کدهای مورد نظر در محیط متلب توسعه داده شدند. سپس با تولید داده های مصنوعی از مدل های مفروض عملکرد کد و تابع های مربوطه به انضمام پارامترهای تنظیمی هر یک از الگوریتم ها به صورت تجربی مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفتند. پس از آن تأثیر اعمال نوفه بر داده های مصنوعی مورد بررسی قرار گرفتند و مدل مصنوعی با اعمال درصدهایی از نوفه سفید نسبت به سیگنال ساخته و میزان حساسیت مدل سازی به نوفه تحلیل شد.

۵- مدل سازی و تولید مدل های گرانی و مغناطیس بر مبنای الگوریتم های کلونی مورچگان و رقابت استعماری و به ازای توابع هدف گوناگون:

با بررسی شرایط محدوده ای که باید مدل شود، نوع مدل ها و به عبارتی شیوه پارامتری سازی مسأله معین می شود. بدین منظور باید برای هر نوع مدل تابع هدف معین شده و پارامترسازی های مربوطه انجام شود. حجم محاسبات در الگوریتم های فراابتکاری به شدت تحت تأثیر ابعاد محدوده است. بنابراین در صورت امکان، استفاده از روابطی تجربی برای تحدید مرزهای جستجوی پاسخ می تواند در کاهش حجم محاسبات بسیار مؤثر باشد. پس از تعیین مرزهای فضای جستجوی مدل ها و پارامترسازی فضای مسأله و تعیین آیتم های هر کدام از الگوریتم های کلونی مورچگان و رقابت استعماری به ازای دو مدل های پیشرو گرانی و مغناطیس، داده ها مدل سازی شدند.

۶- تخمین عدم قطعیت و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده و نهایتاً تجزیه و تحلیل نتایج روش ها و مدل های مختلف:

همچنان که تاکید شد، بکارگیری روش‌های جستجوی عمومی در مدل‌سازی‌های میدان پتانسیل همواره با عدم قطعیت ذاتی همراه است؛ که باید مقدار آن برای هر مدل‌سازی تعیین گردد. از این رو در هر مدل‌سازی عدم قطعیت پاسخ ارائه شده از طریق تکرار مدل‌سازی‌ها و تعیین انحراف معیار پاسخ‌های بدست آمده تعیین شده است [۳]. در هر مدل‌سازی نتایج بدست آمده با اطلاعات میدانی از قبیل برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعات ژئوفیزیکی پیشین اعتبارسنجی گردید.

۸-۱ ساختار رساله

به دنبال مطالبی که در این فصل از رساله به عنوان پیش زمینه موضوع تحقیق بیان شد، در ادامه و در فصل دوم مبانی حل پیشرو و وارون مسائل میدان پتانسیل از مبانی تئوری تا پارامتری‌سازی و روش‌های این مسائل به تفصیل بیان می‌شود. پس از بیان مبانی و روش‌های حل مسائل وارون‌سازی، بکارگیری روش‌های فراابتکاری در وارون‌سازی داده‌های میدان پتانسیل به صورتی مبسوط در فصل سوم بیان می‌شوند. بخش نخست فصل چهارم به تولید داده‌های مصنوعی میدان پتانسیل از مدل‌های مصنوعی و فرضی اختصاص یافته و در ادامه بکارگیری و ارزیابی روش‌های پیشنهادی بر روی داده‌های مزبور ارائه شده است. در فصل پنجم نخست محدوده مورد مطالعه (دشت مغان)، به صورت اجمالی معرفی و سپس نتایج بکارگیری روش‌های پیشنهادی بر روی داده‌های میدان پتانسیل برداشتی از منطقه در انتهای این فصل ارائه می‌شود. فصل پایانی این رساله نیز به جمع‌بندی و تفسیر نتایج حاصله از این تحقیق و نیز ارائه پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی اختصاص دارد.

فصل دوم: مبانی مدل سازی پیشرو و وارون در مسائل میدان پتانسیل

۲-۱ مقدمه

داده‌های صحرایی میدان پتانسیل در صورت عدم وجود نوفه سیستماتیک، بیش از هر چیز از تغییرات خواص فیزیکی از قبیل دانسیته و خودپذیری مغناطیسی مواد زیرسطحی تأثیر می‌پذیرد. همان‌طور که اشاره شد در هر مطالعه‌ی ژئوفیزیکی دست‌کم یک مدل ریاضی از فیزیک سیستم‌های مورد مطالعه مفروض است که بتواند داده‌های مشاهده‌ای ناشی از یک ساختار زمین‌شناسی خاص را تولید کند [۴]. بازسازی ساختارها و منابع درون زمین بر اساس داده‌های ژئوفیزیکی از شاخص‌ترین مسائل حوزه مدل‌سازی وارون است [۴۷].

نخستین گام در مدل‌سازی‌های وارون وجود راه‌حل پیشرو مسأله است [۷]. طراحی و یا انتخاب روش‌های پیشرو در مسائل میدان پتانسیل، نیازمند شناخت دقیق مبانی فیزیکی روش‌های میدان پتانسیل است. از این رو بخش نخست فصل دوم این رساله به بیان مبانی مذکور اختصاص یافته است. در ادامه این فصل مدل‌های حل پیشرو مسائل گرانی و مغناطیس بیان شده است. در بخش پایانی این فصل روش‌های مدل‌سازی وارون داده‌های میدان پتانسیل که در فصل قبل نیز اشاره شدند به تفصیل با جزئیاتی بیشتر ارائه شده است.

۲-۲ مبانی فیزیکی روش‌های میدان پتانسیل

هر نوع مدل‌سازی و تبیین ارتباط ریاضی میان داده‌های برداشت شده میدان پتانسیل و منشأ زیرسطحی ایجاد میدان، درگرو شناخت و درک دقیق مبانی فیزیکی میدان‌های پتانسیل می‌باشد. در فصل پیش ماهیت و خصوصیات بنیادین میدان‌های پتانسیل بیان شد. همچنان که اشاره شد تابع پتانسیل این میدان‌ها در خارج از منشأ میدان، از معادله لاپلاس (رابطه ۱-۵)) پیروی می‌نماید. برقرار بودن این رابطه چندین نتیجه مهم در تحلیل میدان‌های پتانسیل در پی دارد. مهم‌ترین این نتایج در ادامه بیان شده است [۷].

مشتق دوم یک تابع، معیاری است از انحنای منحنی آن تابع، بنابراین معادله لاپلاس به خوبی نشان می‌دهد که هر تابعی که در محدوده‌ای از دامنه خود در معادله لاپلاس صدق کند؛ در آن محدوده فاقد انحنای بوده و نقاط بیشینه و کمینه آن تنها می‌توانند در ابتدا و انتهای ناحیه مذکور قرار گیرند.

از تعریف مشتق دوم یک تابع، خاصیت مهم دیگری از یک تابع هارمونیک بدست می‌آید. مشتق دوم تابع $\varphi(x)$ را می‌توان از رابطه (۱-۲) محاسبه نمود.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x^2} \{ \varphi(x - \Delta x) + \varphi(x + \Delta x) \} = -\frac{1}{2} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \quad (1-2)$$

اگر $\varphi(x)$ در معادله لاپلاس تک بعدی صدق نماید در این صورت سمت راست تساوی (۱-۲) باید برابر صفر شود؛ یعنی:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\varphi(x - \Delta x) + \varphi(x + \Delta x)] \quad (2-2)$$

رابطه (۲-۲) نشان می‌دهد مقدار یک تابع هارمونیک φ در هر نقطه از دامنه آن، میانگین مقدار تابع φ در نقاط مجاور آن است؛ که این موضوع به سادگی خاصیت شناخته شده پتانسیل را بیان می‌نماید [۷].

معادلات گرین^۱: از نتایج مهم معادله لاپلاس تولید سه معادله مشهور به معادلات گرین است؛ که توسط جورج گرین^۲ ریاضیدان مشهور انگلیسی ارائه شدند. این معادلات به تولید چندین فرضیه مهم و اطلاعات ارزشمندی درباره طبیعت میدان‌های پتانسیل منجر شد. شرح و توضیح این سه معادله بسیار حجیم بوده و از حوصله این بحث خارج است و تنها نتایج کلیدی مستخرج از این معادلات در این بخش ارائه شده است. از مهم‌ترین نتایجی که از معادلات گرین به‌ویژه معادله سوم گرین بدست آمد، رابطه (۳-۲) است [۷].

1 Green's Formula

2 George Green (1793-1841)

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right] ds \quad (3-2)$$

در این رابطه، n بردار یکه عمود بر سطح S است و r فاصله نقطه اندازه‌گیری میدان تا مرکز میدان می‌باشد. رابطه (3-2) نشانگر آن است که یک تابع هارمونیک را می‌توان در هر نقطه از یک ناحیه که در آن هارمونیک است به آسانی از مقادیر تابع و مشتقات قائم آن در روی مرز ناحیه، محاسبه کرد [7].

توابع گرین¹: از کلیدی‌ترین نتایج معادله لاپلاس، توابع گرین می‌باشند که ابزار مهمی برای حل بسیاری مسائل در تئوری پتانسیل است. بدین‌صورت که با استفاده از یک روش ابتکاری و در نظر گرفتن یک سیستم مکانیکی، نتایج مهمی قابل تعمیم برای دیگر توابع هارمونیک بدست می‌آید. بر این اساس معادله دیفرانسیل حرکت یک ذره که تحت مقاومت R و نیروی خارجی $f(t)$ قرار دارد را می‌توان به صورت رابطه (4-2) در نظر گرفت:

$$m \frac{d}{dt} v(t) = -R \cdot v(t) + f(t) \quad (4-2)$$

در این رابطه v و m به ترتیب سرعت و جرم ذره می‌باشند. یک روش حل این معادله آن است که بر ذره به‌طور انفصال ضربه وارد شود و عکس‌العمل آن ثبت شود. یعنی به عبارتی نیرو را به جز در فواصل زمانی کوتاه $\Delta\tau$ مساوی صفر قرار گیرد (رابطه (5-2)).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{I}{\Delta\tau} & \tau < t < \tau + \Delta\tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-2)$$

بدیهی است به محض این که نیرو صفر شود، سرعت ذره به صورت یک تابع نمایی کاهش خواهد یافت؛ و پاسخ مسأله بصورت رابطه (6-2) خواهد بود

$$v(t) = A \cdot \exp \left[-\frac{R}{m} (t - (\tau + \Delta\tau)) \right] \quad t < \tau + \Delta\tau \quad (6-2)$$

¹ Green's functions

اگر فرض شود که به ذره یک سری ضربه‌های I_k در زمان‌های τ_k که $k=1,2,\dots,N$ وارد شود و ضربه‌ها به اندازه کافی سریع در نظر گرفته شوند، ذره تحت تأثیر یک نیروی پیوسته قرار می‌گیرد و خواهیم داشت $(I_k \rightarrow f(\tau)d\tau)$. بر این اساس صرف‌نظر از این که از چه تابع نمایی برای نزول سرعت در نظر گرفته شود، به ازای هر جرم دلخواه؛ فرم کلی تعیین سرعت ذره به شکل رابطه (۷-۲) خواهد بود.

$$v(t) = \int_{-\infty}^t \Psi(t, \tau) f(\tau) d\tau \quad t > \tau_0 \quad (7-2)$$

تساوی (۷-۲) در واقع حل معادله حرکت مزبور رابطه (۴-۲) می‌باشد. از این تساوی چنین استنباط می‌شود که عکس‌العمل ذره در هر لحظه برخورد، مستقل از سایر برخوردهاست. بر این اساس، عکس‌العمل ذره در مقابل $f(\tau)$ جمع تمام نیروهای لحظه‌ای خواهد بود. ثابت شده است بسیاری از سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و بسیاری از مسائل میدان‌های پتانسیل از این خاصیت پیروی می‌نمایند [۷].

تابع $\Psi(t, \tau)$ عکس‌العمل ذره در زمان t مربوط به یک تحریک در زمان τ است و آن را "عکس‌العمل تحریک" یا "تابع گرین سیستم خطی" می‌نامند. تابع گرین شرایط اولیه را ارضا نموده و تحت شرایط اولیه، هنگامی که تابع نیرو یک ضربه باشد، حل معادله دیفرانسیل (۴-۲) خواهد بود [۷].

استفاده از مکانیسم تولید تابع گرین برای حل معادله دیفرانسیل مربوط به حرکت یک ذره بر اثر ضربات متوالی و البته مستقل از یکدیگر، الگویی بسیار نزدیک برای حل مسائل میدان پتانسیل را در اختیار قرار می‌دهد. این شباهت و قیاس از آن جا است که تابع گرین در واقع عکس‌العملی در مقابل یک نیروی محرک $f(\tau)$ تعریف شده است. پس می‌توان تباین دانسیته یا مغناطیدگی در زمین را به عنوان ضربه‌هایی نشان دهیم؛ که البته شرط مستقل بودن ضربات از هم نیز، در استقلال بلوک‌بندی‌های ناحیه مورد نظر ارضا شده است.

بر مبنای این مقایسه، با داشتن مقادیر داده‌های مشاهده‌ای در واقع مجهول مسأله تابع تحریکی $f(\tau)$ است؛ که عامل تحریک‌هاست و ضربه‌هایش عامل ثبت پاسخی شده که در روش میدان پتانسیل مورد نظر از زمین ثبت شده است.

بر اساس توصیف بیان شده، در اغلب مسائل میدان پتانسیل به‌ویژه مسائل خطی می‌توان ارتباط داده‌های برداشت شده و عامل تحریک را به فرم کلی رابطه (۷-۲) نوشت. به عنوان مثال بخواهیم آن را برای یک مسأله داده‌های مطالعات یک کمیت فیزیکی مثل دانسیته یا مغناطیس بازنویسی کنیم، مسأله به صورت یک معادله انتگرالی^۱ با فرم کلی رابطه (۸-۲) درخواهد آمد [۷]. به طوری که حدود بالا و پایین انتگرال مقادیر ثابتی باشند، از آن با عنوان انتگرال فردهم^۲ نوع اول یاد می‌شود (رابطه (۸-۲)). در غیر این صورت انتگرال ولترا^۳ نوع اول نامیده می‌شود (رابطه (۹-۲)) [۸].

$$U(P) = \int_a^b \Psi(P, Q) S(Q) dv \quad (۸-۲)$$

$$U(x) = \int_a^x \Psi(x, Q) S(Q) dv \quad (۹-۲)$$

در روابط (۸-۲) و (۹-۲)، dv نماینده ابعاد بلوک‌های مسأله و $S(Q)$ در واقع همان تابع تحریک است؛ که در این مسأله می‌تواند توزیع تباین کمیتی فیزیکی (به عنوان نمونه دانسیته یا مغناطیس) در بلوک‌ها (در نقاط Q که متعلق به منشأ می‌باشند) باشد. a و b مقادیری ثابت برای مرزهای پایین و بالای محدوده پارامترهای مسأله هستند؛ که در رابطه (۹-۲) مرز بالا متغیر بوده و با x نشان داده شده است. همچنین $U(P)$ نیز همان داده‌های میدان پتانسیل برداشت شده در نقاط (P) و $\Psi(x, Q)$ تابع گرین که تابع کرنل^۴

۱ Integral Equation

۲ Integral Fredholm Equation

۳ Volterra

۴ Kernel Function

هم نامیده می‌شود؛ ارتباط دهنده عکس‌العمل هر تحریک ایجاد شده در منشأ میدان (Q) در نقاط ثبت داده (P) می‌باشد [۷ و ۸].

انتگرال‌های فردی هم در حل مسائل پیش‌رو و هم در حل مسائل وارون کاربرد گسترده‌ای دارند. به‌گونه‌ای که در روش‌های پیش‌رو محاسبه $f(p)$ با استفاده از توابع معلوم یا فرضی $S(Q)$ و $\Psi(P, Q)$ در حجم معلوم R به صورت تک مقداری تعیین می‌شود.

حل وارون مسأله بر اساس رابطه (۸-۲) و تعیین ویژگی‌های منشأ از داده‌های میدان پتانسیل $f(p)$ بر اساس پارامتر مجهول مسأله به دو دسته تقسیم می‌گردد. مسائلی که پارامتر مجهول، توزیع تباین فیزیکی منشأ یا به عبارتی $S(Q)$ باشد مسأله وارون خطی است و اگر پارامتر مجهول پارامترهای هندسی و ابعادی منشأ باشد، این پارامترها در تابع $\Psi(P, Q)$ و یا حدود انتگرال لحاظ می‌گردند و حل این مسائل، وارون غیرخطی است [۷].

به‌طور کلی حل وارون مسأله و تخمین مدل، از روی داده‌های میدان پتانسیل با مشکلات و پیچیدگی‌های ویژه‌ای همراه است؛ که ناشی از ماهیت فضای اندازه‌گیری در این روش‌هاست. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، میدان‌های پتانسیل به‌طور پیوسته در مکان و زمان انتشار می‌یابند؛ اما فضای ثبت داده‌ها در اغلب موارد به صورت گسسته است. البته این موضوع باعث محدودیتی نمی‌شود. چرا که با نمونه‌برداری از طول موجی کوتاه‌تر از طول موج‌های پدیده‌های مورد انتظار، می‌توان از دست رفتن اطلاعات را به حداقل ممکن رساند. نکته مزبور همواره در داده‌های حوزه زمان مورد توجه قرار می‌گیرد؛ اما در مورد حوزه مکان وجود محدودیت‌های هزینه و مشکلات دسترسی، اغلب سبب می‌شود که نتوان نمونه‌برداری را با چگالی مطلوب انجام داد. بدیهی است این مشکل در برداشت داده‌ها به صورت زمینی عموماً شایع‌تر و حادتر است. اگر مدل به صورت مجموعه‌ای پیوسته از توابع پایه‌ای فرض شود حل این مسأله و تخمین مدل از مجموعه‌ای داده‌ی متناهی و گسسته، نیازمند پارامترسازی فضای مدل است [۱۰ و ۴۸]؛ که در

ادامه شرح داده شده است.

۲-۳ پارامترسازی^۱ مسائل میدان پتانسیل

پارامترسازی و بلوک‌بندی فضای مدل نقش مهمی در اغلب مطالعات ژئوفیزیکی به‌ویژه در وارون‌سازی داده‌های میدان پتانسیل دارد [۱۰]. تقسیم فضای مدل به فضایی با ابعاد متناهی (اغلب به صورت بردار مفروض m بعدی نمایش داده می‌شود)، یکی از اساسی‌ترین و حساس‌ترین مراحل در فرمولاسیون مسأله است. به‌گونه‌ای که مراحل بعدی فرآیند وارون‌سازی از قبیل منظم‌سازی^۲ و بهینه‌سازی به‌شدت تحت تأثیر روش تقسیم‌بندی^۳ فضای مدل قرار خواهند داشت [۱۰ و ۴۹].

در این میان مسأله تعیین مقیاس مناسب و بهینه برای بلوک‌بندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حساسیت این انتخاب به اندازه‌ای است که مسائلی از قبیل فروبرآورد^۴ یا فرابرآورد^۵ بودن و بدحالتی مسأله نیز در بسیاری موارد به‌وضوح تحت تأثیر مقیاس بلوک‌بندی مدل می‌باشد [۵۰-۵۲].

نوع بلوک‌بندی فضای مدل تحت تأثیر روش حل پیشروئی است، که برای ارتباط داده‌ها و فضای مدل در نظر گرفته شده است و بر اساس خطی یا غیرخطی بودن، دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل‌سازی؛ متفاوت خواهد بود.

تا به امروز روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی پیشرو داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی ارائه شده است. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، مرسوم‌ترین و

۱ Parameterization

۲ Regularization

۳ Model Discretization

۴ Underdetermine

۵ Overdetermine

پربکاربردترین روش‌های مدل‌سازی پیشرو دو و دو و نیم بعدی مورد استفاده در هریک از این دو زمینه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و در هر مورد به تناسب نیاز، دو روش از کاربردی‌ترین روش‌های موجود به منظور بکارگیری در این تحقیق انتخاب شد. شرح اصول کلی و عملکرد روش‌های مزبور در ادامه آمده است.

۲-۴ حل مسأله پیشرو در گرانی‌سنجی

پیشتر بیان شد که، تاکنون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ضخامت لایه رسوبات با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی ارائه شده است. مدل‌سازی‌های مورد نظر بر اساس مدل توصیفی در نظر گرفته شده می‌توانند دو بعدی یا سه بعدی باشند.

مدل‌سازی دو بعدی روشی بسیار مرسوم است، که از داده‌های یک یا چند پروفیل برای مدل‌سازی عمق رسوبات حوضه رسوبی استفاده می‌نماید و عموماً عمیق‌ترین نقطه حوضه را در بر می‌گیرد. در حوضه‌های دارای کشیدگی در یک جهت؛ از مدل‌سازی تعدادی پروفیل متعامد با راستای کشیدگی حوضه استفاده شده و در نهایت با بررسی و تلفیق مدل‌ها با یکدیگر، مدل شبه سه بعدی از گسترش عمقی رسوبات بدست می‌آید.

در روش‌های دو بعدی گسترش رسوبات (به‌طور کل گسترش توده هدف مورد مطالعه) در راستای عمود بر پروفیل برداشت داده‌ها به صورت نامتناهی در نظر گرفته شده و از تغییرات جانبی دانسیته صرف نظر می‌شود. بدین ترتیب می‌توان مقطع دو بعدی رسوبات را با منشورهایی قائم مکعب مستطیل یا پهنای بی‌انتهای (بسیار بزرگ نسبت به ابعاد دیگر) مدل نمود. در این روش‌ها الگوهای مختلفی برای تغییرات دانسیته درون منشورها (از مقدار ثابت تا تغییرات خطی و سهموی و نمایی) در نظر گرفته شده است. بر همین اساس برای محاسبه شتاب گرانش منشورهای قائم در فضای اطراف آن‌ها، مدل‌های ریاضی متعددی ارائه شده است. مدل‌سازی‌های پیشرو گوناگونی بر مبنای روش‌های مزبور برای مدل‌سازی ضخامت رسوبات

گزارش شده است [۳ و ۲۲ و ۳۰ و ۵۳-۶۱].

در این تحقیق به منظور مدل سازی غیرخطی دو بعدی ضخامت لایه رسوبات با استفاده از داده های گرانی سنجی، دو نوع مدل منشور قائم دو بعدی با دانسیته ثابت [۵۴] و نیز مدل منشور قائم سه بعدی با دانسیته متغیر نسبت به عمق ارائه شده توسط (گالاردو- دلگادو و همکاران^۱) [۶۰]؛ انتخاب شدند؛ که در ادامه شرح داده شده اند.

۲-۴-۱ مدل منشور دو بعدی با دانسیته ثابت

در این روش به منظور مدل سازی پیشرو آنومالی گرانی رسوبات، مقطع رسوبات به تعدادی منشور قائم دوبعدی افراز و دانسیته هر منشور ثابت فرض می شود. تأثیر شتاب گرانش هریک از منشورها بر اساس رابطه (۲-۱۰) محاسبه می گردد [۵۴].

$$F_{ij} = F(x, z, x_m, x_M, Z_{top}, Z_{bottom}, \rho) \quad (2-10)$$

$$= G\rho \left[A \cdot \ln \frac{A^2 + D^2}{A^2 + C^2} - B \cdot \ln \frac{B^2 + D^2}{B^2 + C^2} - 2C \left(\tan^{-1} \frac{A}{C} - \tan^{-1} \frac{B}{C} \right) + 2D \left(\tan^{-1} \frac{A}{D} - \tan^{-1} \frac{B}{D} \right) \right]$$

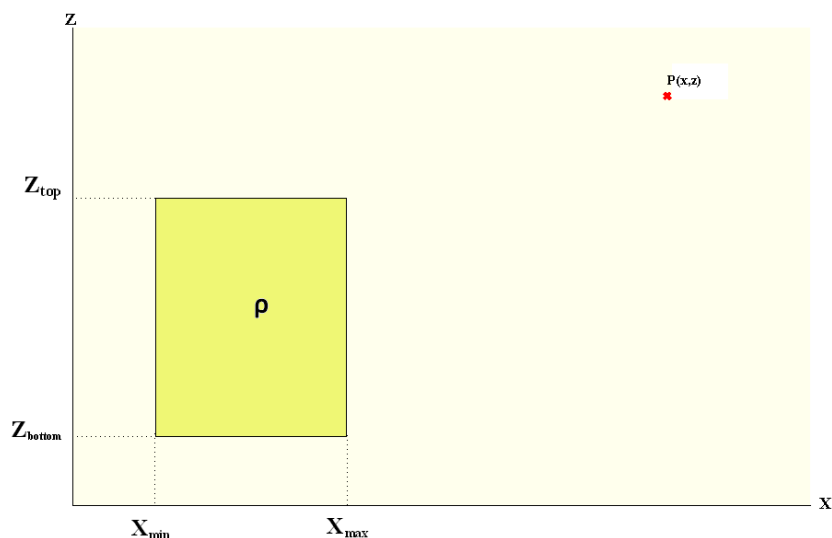
در رابطه (۲-۱۰) پارامتر F_{ij} شتاب گرانی بلوک زام در نقطه i ام؛ و پارامتر G نیز ثابت گرانش^۲ نامیده می شود و برابر با 6.67×10^{-11} نیوتن در مجذور متر بر مجذور کیلوگرم است. نحوه محاسبه پارامترهای A ، B ، C و D در رابطه (۲-۱۱) ارائه شده است [۵۴]. شکل ۲-۱ بیان شماتیک موقعیت پارامترهای مذکور است.

$$A = x - x_m, B = x - x_M \quad (2-11)$$

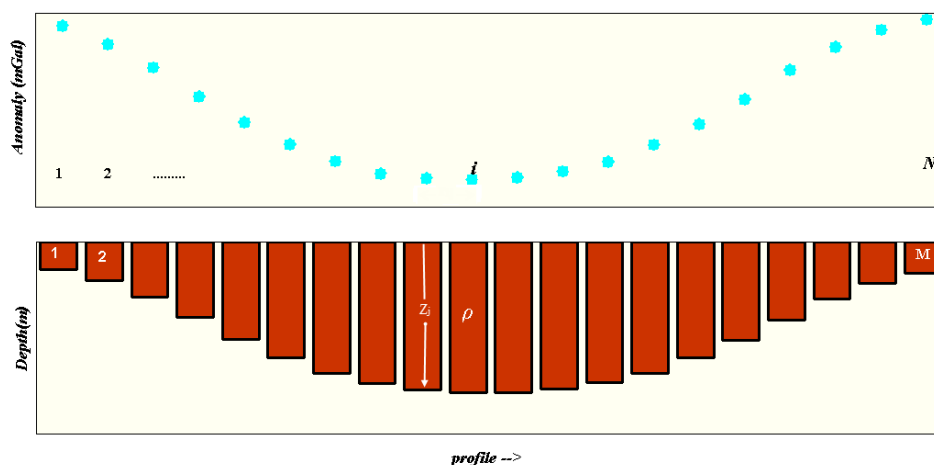
¹ Gallardo-Delgado et al

^۲ Gravitational Constant

$$C = Z - Z_{\text{top}}, D = Z - Z_{\text{bottom}}$$



شکل ۱-۲ تصویر شماتیک منشور قائم دو بعدی با دانسیته ثابت (ρ) و نقطه اندازه‌گیری (P) [۲۹]. در این روش، بسته به شرایط لایه‌ها و فصل مشترک سنگ کف، بلوک‌بندی پارامترهای مدل می‌تواند به صورت منشورهای قائم در نظر گرفته شود؛ که در شرایط مدل‌سازی غیرخطی تنها تغییرات در بعد مربوط به عمق بلوک در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ بلوک‌بندی فضای مدل به منشورهای قائم با تغییرات تک بعدی (تنها در راستای عمق).

شکل ۲-۲ مدلی فرضی متشکل از تعداد M منشور دو بعدی قائم را به همراه تعداد N نقطه برداشتی آنومالی گرانی متناظر آن را نشان می‌دهد. مقدار آنومالی گرانی باقیمانده متاثر از دسته منشورهای مزبور را در نقطه برداشتی i ام (Δg_i) را بوسیله رابطه (۲-۱۲) می‌توان تعیین نمود [۵۸].

$$\Delta g_i = \sum_{j=1}^M F_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2-12)$$

در رابطه (۲-۱۲) پارامتر F_{ij} شتاب گرانی بلوک j ام در نقطه i ام است که بر اساس رابطه (۲-۱۰) تعیین می‌شود.

۲-۴-۲ مدل منشور سه بعدی با دانسیته متغیر نسبت به عمق

پارامترسازی مشابه شکل ۲-۲ و انتساب یک تباین دانسیته ثابت از لبه بالایی تا عمق منشور؛ در مسائلی که ضخامت لایه مدل زیاد است با مدل واقعی رسوبات در طبیعت همخوانی ندارد. چرا که مطالعات نشان داده است به دلیل افزایش عمق، تباین دانسیته بسته به رسوبات و عمق متناسب با افزایش عمق به صورت خطی، نمایی، سهموی و یا استفاده از نمودارهای استاندارد تغییر می‌کند [۲۲ و ۵۳ و ۵۶ و ۵۷ و ۶۰ و ۶۲ و ۶۳].

باسکارا رئو^۱ در سال ۱۹۸۶ با برازش یک چند جمله‌ای به داده‌های تغییرات دانسیته رسوبات نسبت به عمق نشان داد، این تغییرات می‌تواند از الگوی سهموی پیروی کند (رابطه (۲-۱۳)). تا پیش از آن، افزایش احتمالی دانسیته رسوبات در اعماق تنها به صورت خطی [۶۳] یا نمایی [۵۳] در نظر گرفته می‌شد.

$$\Delta \rho(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 \quad (2-13)$$

در رابطه (۲-۱۳)، $\Delta \rho$ تغییرات دانسیته نسبت به عمق (z) را نشان می‌دهد و ضرایب a_0 و a_1 و a_2 با

^۱ D.Bhaskara Rao

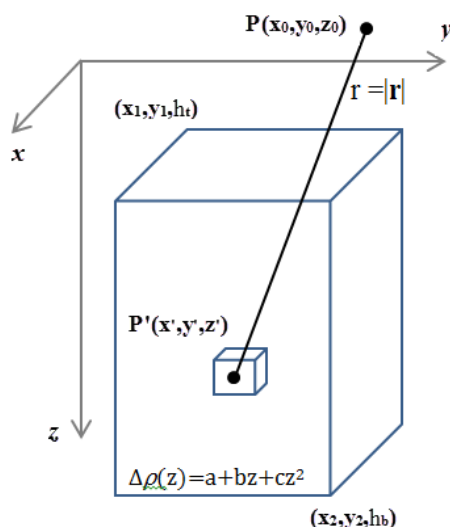
استفاده از داده های چاه پیمایی^۱ در عمق تعیین می گردند.

گرچه برازش نمایی و سهموی عموماً نتایجی با دقت و کیفیتی مشابه ارائه می دهند؛ اما برای مدل سازی پیشرو آنومالی گرانی در حوزه مکان، بکارگیری مدل تغییرات سهموی مناسب تر است [۵۶]. گالاردو-دلگادو و همکاران در سال ۲۰۰۳ رابطه ای تحلیلی (رابطه ۲-۱۴)) برای مدل سازی پیشرو شتاب گرانش یک منشور مکعب مستطیل قائم با تغییرات دانسیته سهموی نسبت به عمق (شکل ۲-۳) و نیز با فرض قابل چشم پوشی بودن تغییرات جانبی دانسیته در منشور؛ در هر ارتفاع دلخواه ارائه نمودند [۶۰].

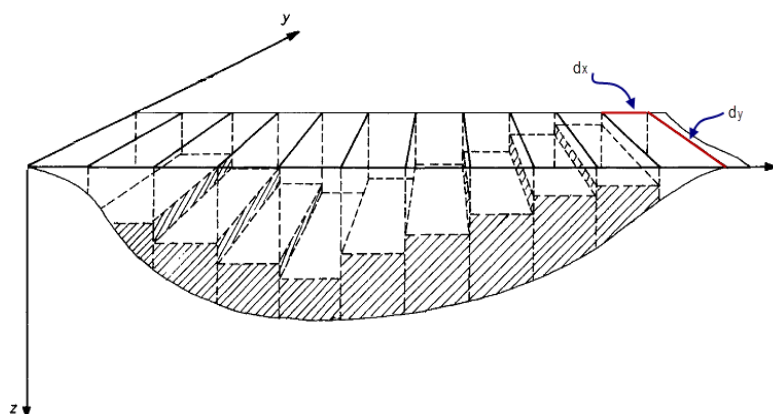
$$\begin{aligned} \rho(z+z_0) &= \rho(z_0) + b(z+z_0) + c(z+z_0)^2 \\ g_z(x_0, y_0, z_0) &= G(a + bz_0 + cz_0) \iiint z \tan^{-1} \left(\frac{xy}{zr} \right) \\ &\quad - x \ln(r+y) - y \ln(r+x) \left| \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \right| \left| \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} \right| \left| \frac{\Delta z_2}{\Delta z_1} \right| \\ &\quad + G(b + 2z_0c) \iiint \frac{z^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{xy}{zr} \right) - \frac{x^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{yz}{xr} \right) \\ &\quad - \frac{y^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{xz}{yr} \right) + xy \ln(r+z) \left| \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \right| \left| \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} \right| \left| \frac{\Delta z_2}{\Delta z_1} \right| \\ &\quad + Gc \iiint z^3 \tan^{-1} \left(\frac{xy}{zr} \right) + x^3 \ln(r+y) \\ &\quad + y^3 \ln(r+x) + 2xyr \left| \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \right| \left| \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} \right| \left| \frac{\Delta z_2}{\Delta z_1} \right|. \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{aligned} \quad (2-14)$$

که در این رابطه، a و b و c ضرایب ثابت چندجمله ای سهموی تغییرات دانسیته نسبت به عمق بوده و نیز $\Delta x_i = x_i - x_0$ و $\Delta y_i = y_i - y_0$ و $\Delta z_i = z_i - z_0$ و به ازای $i=1,2$ که در شکل ۲-۳ تعریف شده اند؛ محاسبه می گردند. همچنین z_1 و z_2 به ترتیب به ارتفاع های h_t و h_b مربوط به منشور نشان داده شده، اشاره دارند.

^۱ Well-logging



شکل ۳-۲ منشور قائم شماتیک با تباین دانسیته متغیر نسبت به عمق و تأثیر میدان آن در نقاط برداشت [۶۰].
 شکل ۳-۲ و نیز رابطه (۱۴-۲) نشان می‌دهند که این روش پیشرو، قابلیت بکارگیری در مدل‌سازی‌های
 غیرخطی با الگوهای پارامترسازی گوناگون از سه بعدی تا دو نیم بعدی (شکل ۴-۲) را دارد.



شکل ۴-۲ تصویر شماتیک بلوک‌بندی با منشورهای دو نیم بعدی (پهنای زیاد منشور نسبت به عرض و عمق)
 شکل ۴-۲ مدلی فرضی متشکل از دسته منشورهای با پهنای طویل نسبت به عرض و عمق را نشان
 می‌دهد. در صورتی که پهنای منشورهای مزبور نسبت به دو بعد دیگر بسیار بزرگ باشد، می‌توان مسأله را
 دو نیم بعدی فرض نمود. مقدار آنومالی گرانی باقیمانده متأثر از دسته منشورهای مزبور در نقطه برداشتی

Δi (م)، مشابه رابطه (۲-۱۲)، از حاصل جمع شتاب گرانی هر یک از پارامترهای مدل در نقطه Δm بدست می‌آید.

۲-۵ حل مسأله پیشرو در مغناطیس‌سنجی

در کنار روش‌های گرانی‌سنجی برای مدل‌سازی ضخامت رسوبات، روش‌های مختلفی نیز برای مدل‌سازی ضخامت لایه رسوبات با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی تاکنون ارائه شده است [۶۰-۶۴]. الگوی کلی کار در مغناطیس‌سنجی نیز مشابه گرانی‌سنجی است، در مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی عمدتاً مولفه میدان مغناطیسی کل مورد ثبت و مدل‌سازی قرار می‌گیرد [۶۸].

روش‌های بلوک‌بندی تعریف شده برای مدل‌سازی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی قابل کاربرد در مغناطیس‌سنجی نیز بوده و انتساب یک خودپذیری مغناطیسی^۱ ثابت به هر بلوک قابل انجام است. برای محاسبه شدت میدان مغناطیس منشورهای قائم در فضای اطراف آن‌ها، مدل‌های ریاضی متعددی ارائه شده است. مدل‌سازی‌های پیشرو متعددی بر مبنای روش‌های مزبور برای مدل‌سازی ضخامت رسوبات گزارش شده است [۱۶ و ۶۹-۷۲].

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی غیرخطی ۲/۵ بعدی ضخامت لایه رسوبات با استفاده از داده‌های مغناطیسی، مدل منشور قائم سه بعدی ارائه شده کونارتنام در سال ۱۹۸۱؛ انتخاب شد که در ادامه شرح داده شده است.

۲-۶ مدل کونارتنام در سال ۱۹۸۱

در این روش که بر مبنای مدل پیشرو ارائه شده توسط باتاچاریا در سال ۱۹۶۴ برای محاسبه آنومالی

1 Susceptibility

مغناطیسی یک منشور سه بعدی قائم شکل گرفته است؛ مدل ریاضی مذکور به فرم ساده‌تری مورد بازنویسی قرار گرفته است. بر این اساس مدلی ریاضی رابطه (۲-۱۵) برای محاسبه میدان کل مغناطیس ناشی از یک منشور قائم با فرض مغناطیدگی همگن در هر عمق دلخواه (شکل ۲-۵)؛ ارائه شده است [۷۱].

$$\Delta T(x, y, 0) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 S [G_1 \cdot (\ln(R_{ijk} + \alpha_i)) + G_2 \cdot (\ln(R_{ijk} + \beta_j)) + G_3 \cdot (\ln(R_{ijk} + h_k)) + \dots \\ G_4 \cdot (\tan^{-1}(\frac{\alpha_i \cdot h_k}{R_{ijk} \cdot \beta_j})) + G_5 \cdot (\tan^{-1}(\frac{\beta_j \cdot h_k}{R_{ijk} \cdot \alpha_i}))]; \quad (15-2)$$

$$R_{ijk} = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_j^2 + h_k^2}$$

$$S = (-1)^{i+j+k}$$

$$\alpha_i = a_i - x, \quad i = 1, 2$$

$$\beta_j = b_j - x, \quad j = 1, 2$$

در رابطه (۲-۱۵) پارامتر $\Delta T(x, y, 0)$ آنومالی مغناطیسی در نقطه اندازه‌گیری به مختصات x, y و سطح ارتفاع فرضی صفر است. همچنین پارامترهای G_1 تا G_5 از رابطه (۲-۱۶) تعیین می‌گردند [۷۱].

$$G_1 = EI \cdot (M \cdot r + N \cdot q); G_2 = EI \cdot (L \cdot r + N \cdot p); \quad (16-2)$$

$$G_3 = EI \cdot (L \cdot q + M \cdot p);$$

$$G_4 = EI \cdot (N \cdot r - M \cdot q); G_5 = EI \cdot (N \cdot r - L \cdot p);$$

بصورتیکه EI شدت مغناطیدگی^۱ و پارامترهای L و M و N کسینوس‌های جهتی مغناطیدگی را نشان می‌دهند و نیز پارامترهای p و q و r به کسینوس‌های جهتی میدان ژئومغناطیس اشاره دارند. این روش پیشرو، قابلیت بکارگیری در مدل‌سازی‌های غیرخطی داده‌های مغناطیس کل را با الگوهای پارامترسازی گوناگون از سه بعدی تا دو نیم بعدی را دارد.

برای حالاتی که سطح افقی منشور موازی محورهای جغرافیایی نباشد و به اندازه زاویه فرضی θ نسبت به شمال جغرافیایی چرخیده باشد (شکل ۲-۵). مختصات‌های مربوطه می‌بایست در دستگاه جدید بروز

^۱ Intensity of Magnetization

رسانی شوند؛ به صورتی که خواهیم داشت [۷۱].

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (۱۷-۲)$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

همچنین کسینوس های جهتی زاویه میل و زاویه انحراف میدان مغناطیسی از رابطه زیر بدست می آیند:

$$p = \cos I \cdot \cos(D - \theta) \quad (۱۸-۲)$$

$$q = \cos I \cdot \sin(D - \theta)$$

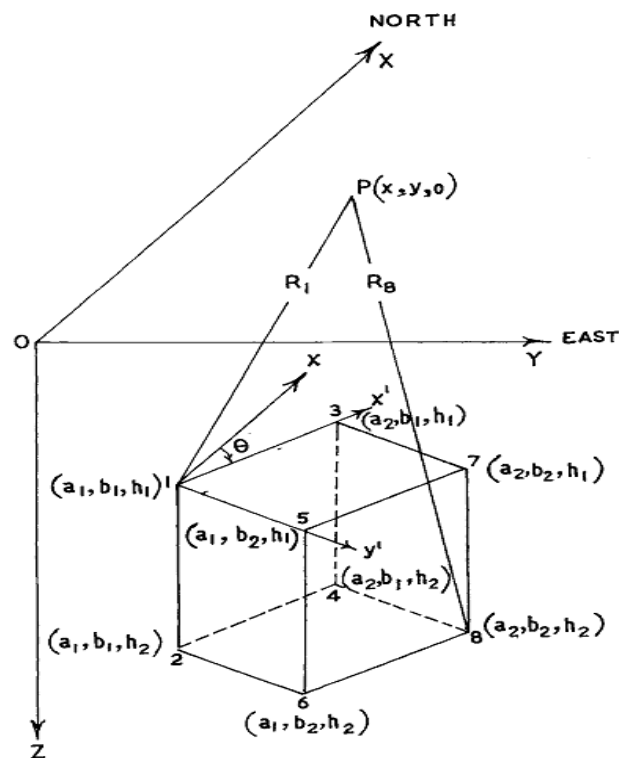
$$r = \sin I$$

بطور مشابه برای زوایای میل وانحراف بردار مغناطیدگی خواهیم داشت:

$$p = \cos I_0 \cdot \cos(D_0 - \theta) \quad (۱۹-۲)$$

$$q = \cos I_0 \cdot \sin(D_0 - \theta)$$

$$r = \sin I_0$$



شکل ۵-۲ منشور قائم شماتیک (با مغناطیدگی همگن) و تأثیر میدان مغناطیس آن در نقاط برداشت [۷۲].

۲-۷ مدل سازی وارون

همچنان که پیش تر تعریف شد، هدف از مدل سازی وارون داده های میدان پتانسیل تخمین پارامترهایی از مدل منشأ مورد مطالعه؛ بر اساس داده های برداشتی است. در مدل سازی وارون اطلاعات از فضای داده ها به فضای مدل و بالعکس انتقال می یابد. در فرآیند مدل سازی وارون، جابجایی هایی و حرکتی مداوم در فضای مدل و نیز در فضای داده به انجام می رسد نقل و انتقالات مذکور، در فضای داده به منظور کمینه نمودن فاصله داده های مشاهده ای (d_{obs}) از داده های محاسبه ای (d_{cal}) و در فضای مدل با هدف کمینه نمودن فاصله مدل تخمینی ($m_{estimate}$) و مدل اطلاعات پیش فرض (m_{prior}) انجام می شود [۸].

۲-۸ یکتایی پاسخ مدل سازی

یکتایی یک پاسخ در مدل سازی بدین صورت تعریف می شود که اگر یک مدل از m_1 به m_2 تغییر کند، داده های متناظر آن از d_1 به d_2 ($d_2 \neq d_1$) تغییر یابد؛ در غیر این صورت مدل مورد نظر یکتا نیست [۳۱].

همچنان که پیش تر بیان شد، مدل سازی های وارون در علوم زمین همواره با مشکل عدم یکتایی روبرو هستند؛ چرا که هر مدل با پارامترهای مفروض همواره یک پاسخ یکتا از خود به روز می دهد؛ اما عکس آن صادق نیست و به ازای هر پاسخ می تواند مدل های منشأ گوناگونی با پارامترهای متفاوت وجود داشته باشد [۸].

اگرچه کمبود و گسستگی داده ها و نیز حضور اجتناب ناپذیر نوفه در داده ها، از اصلی ترین دلایل شناخته شده برای عدم یکتایی پاسخ در مدل سازی های داده های میدان پتانسیل هستند [۹ و ۳۰]؛ با این وجود حتی اگر اندازه گیری هایی سراسر عاری از نوفه به شمار نامتناهی نیز در دسترس باشد، نمی توان وجود

مدلی یکتا برای داده‌های مزبور را تضمین نمود. این پدیده در مدل‌سازی‌های میدان پتانسیل به‌ویژه گرانی‌سنجی امری اجتناب‌ناپذیر است. به عنوان نمونه داده‌های حاصل از میدان یک توده گرانی تنها به جرم کل^۱ آن وابسته است؛ نه صرفاً به شعاع توزیع گرانی [۳۰ و ۵۱].

برای کاهش بدحالتی و محدود نمودن فضای جواب‌های قابل قبول در مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی، تاکنون روش‌های متعددی ارائه شده است. این روش‌ها شامل اعمال قیودی در جهت برجسته‌سازی محلی^۲ یا منظم‌سازی و هموارسازی^۳ مدل هستند؛ که به روش‌های مختلفی بدست می‌آیند و همواره این روش‌ها در حال تکامل بوده و همچنان محل مطالعه و تحقیق می‌باشند [۷۳-۸۰].

۲-۸-۱ منظم‌سازی و هموارسازی

نخستین بار در سال ۱۹۷۰ تیخونوف و آرسنین^۴ واژه منظم‌سازی را وارد ادبیات مدل‌سازی وارون نموده و مفهوم مسائل وارون خوش حالت^۵ را بیان نمودند. بر مبنای این تعریف، در این‌گونه مسائل نیازی به حل پذیر بودن مسأله بر روی تمام فضای مدل نیست. آن‌ها روش‌های منظم‌سازی را برای تقریب زدن مسائل اساساً بدحالت، به صورت دسته‌ای از مسائل خوش‌حالت منظم شده ارائه کردند [۷۶ و ۵۰].

ایشان نشان دادند که ساده‌ترین راه برای پایدارسازی در مسائل وارون، اضافه نمودن یک ترم جریمه کننده به تابع هدف است؛ که این ترم نشان دهنده فاصله مدل تا مدل مدنظر بر اساس اطلاعات قبلی است

۱ Total Mass

۲ Focusing

۳ Smoothing

۴ Tikhonov and Arsenin

۵ Well-Posed condition

[۲۸]. رابطه (۲۰-۲) بیان ریاضی تئوری مذکور بوده و رابطه منظم‌سازی تیخونوف مرتبه صفر نامیده می‌شود.

$$\min_{m \in \mathbb{R}^n} \|F(m) - d\|_2^2 + \varepsilon^2 \|m - m_{\text{ref}}\|_2^2 \quad (20-2)$$

تیخونوف و آرسنین پارامتر $\varepsilon > 0$ را به عنوان پارامتر منظم‌سازی^۱ معرفی نمودند؛ که با میل تدریجی این پارامتر به سمت صفر، پاسخ به سمت مدل حقیقی سوق پیدا می‌کند [۲۸ و ۷۶].

از آن جا که کمینه شدن رابطه (۲۰-۲) مستلزم صفر شدن گرادیان عبارت مزبور است، با مشتق‌گیری از رابطه (۲-۱۶) خواهیم داشت:

$$m_s = m_{\text{ref}} + (F^T F + \varepsilon^2 I_n)^{-1} F^T (d - F m_{\text{ref}}) \quad (21-2)$$

در این رابطه، m_{ref} مدل پیش فرض با استفاده از اطلاعات اولیه می‌باشد [۲۶ و ۷۶] در غیاب هرگونه اطلاعات اولیه از پاسخ احتمالی تعیین مدل مرجع و پیش‌فرضی ممکن نیست و یا از دقت لازم برخوردار نیست، یک یک راه مؤثر در انتخاب پاسخ بهینه، اعمال قیودی است که پاسخ مورد نظر را نرم و هموار می‌کند. مدل‌های هموار که در آن‌ها تغییرات بین پارامترهای مجاور نرم تر و هموارتر هستند شباهت بیشتری با واقعیت مدل دارند [۸۱ و ۸۲]. در این مسائل با چشم پوشی از m_{ref} یعنی ($m_{\text{ref}}=0$) در رابطه تیخونوف مرتبه صفر؛ خواهیم داشت.

$$\min_{m \in \mathbb{R}^n} \|F(m) - d\|_2^2 + \varepsilon^2 \|m\|_2^2 \quad (22-2)$$

در بسیاری موارد بر مبنای شرایط مسأله ترجیح داده می‌شود به جای کمینه کردن طول بردار مدل (m) ، پارامتر خاصی از آن مدل شود. به عنوان مثال؛ ضابطه مورد نظر می‌تواند کمینه نمودن مشتق مرتبه اول، دوم و یا لاپلاسین مدل باشد [۲۶ و ۵۱].

^۱ Tikhonov's regularization

برای مدل‌سازی ضخامت لایه رسوبات بر اساس برداشت‌های گرانی‌سنجی، گزارش‌های گوناگونی از بکارگیری الگوریتم‌های جستجوی محلی همچون الگوریتم مارکوارت-لونبرگ، بعضاً همراه با پارامتر منظم-ساز تیخونوف و یا بهبود با روش‌هایی از قبیل زیرفضا^۱، ارائه شده است. بدین صورت که از یک مدل اولیه با تباین چگالی (ثابت یا متغیر نسبت به عمق) همراه با قیود تکمیلی استفاده می‌شود و با خطی‌سازی تابع هزینه در هر تکرار به انتها می‌رسد [۲۳ و ۲۹ و ۵۸ و ۷۹ و ۸۳]. همچنین بطور مشابه مدل‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی، بوسیله الگوریتم‌های جستجوی محلی مانند گرادیان مزدوج و الگوریتم مارکوارت-لونبرگ و به همراه استفاده از منظم‌ساز تیخونوف و قیود تکمیلی گزارش شده است [۶۸ و ۷۲ و ۸۴-۸۶].

هرچند بکارگیری روش‌های منظم‌سازی، سبب کم شدن مجموعه پاسخ‌های قابل قبول و در نتیجه کاهش عدم قطعیت نتایج مدل‌سازی وارون می‌شوند اما تحقیقات نشان می‌دهد حتی بکارگیری این روش‌ها نیز به حذف کامل عدم قطعیت پاسخ منتج نخواهد شد [۲۸ و ۸۷] بنابراین تخمین عدم قطعیت مدل نهایی، در مدل‌سازی‌های وارون داده‌های میدان پتانسیل، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

۲-۸-۲ تخمین عدم قطعیت در مدل‌سازی وارون غیرخطی

در ریاضیات، تخمین عدم قطعیت به معنای یافتن خانواده‌ای از مدل‌ها (M_{tol}) است که با اطلاعات اولیه سازگار و نتایج آن‌ها با داده‌های مشاهده‌ای برازشی در حد تلورانسی^۲ از پیش تعیین شده (E_{tol}) داشته باشند. این دسته از مدل‌ها در رابطه (۲-۲۳) معرفی شده است.

$$M_{tol} = \left\{ m \in M : \frac{\|F(m) - d\|_p}{\|d\|_p} \leq E_{tol} \right\} \quad (2-23)$$

^۱ Subspace

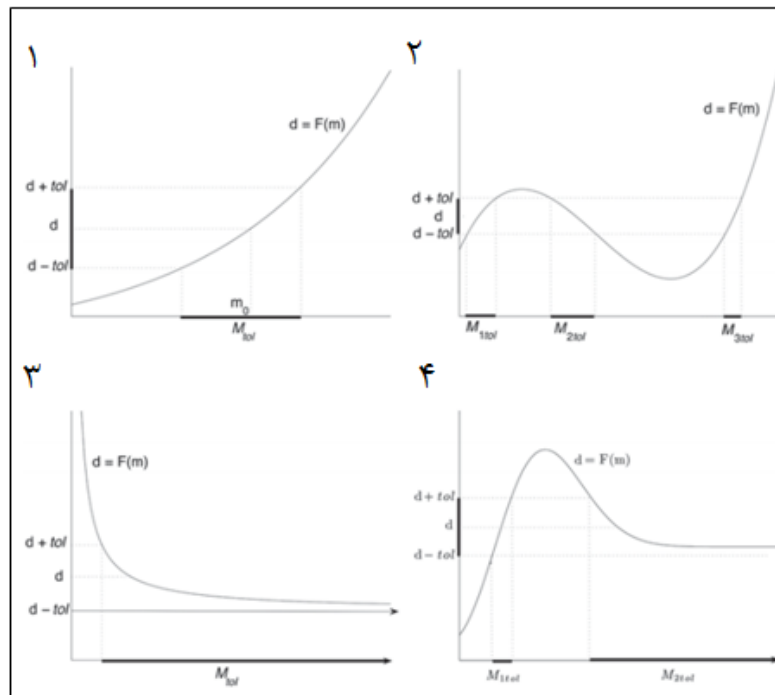
^۲ Tolerance

در این رابطه: $\|x\|_p$ به نرم p ام بردار x اشاره دارد؛ که البته کاربرد این رابطه برای نرم اقلیدسی یا همان $p=2$ تا حدودی عمومیت بیشتری دارد. آنالیز عدم قطعیت در مسائل وارون خطی بوسیله جبر خطی و تئوری وارون به خوبی قابل درک است؛ اما در مسائل مدل سازی وارون غیرخطی، ارتباط مستقیم با روش های نمونه گیری تصادفی و چارچوب های بیزین^۱ دارد [۸۸].

در مسائل وارون غیرخطی، محدوده های مدل قابل پذیرش، لزوماً پیوسته نبوده و بعضاً در برخی مسائل به صورت محدوده هایی ناپیوسته و جزیره مانند است. علاوه بر این موارد محدوده های مزبور می توانند دارای مرزهای بسته و کشیده و یا مرزهای باز باشند. به طور کلی در مسائل وارون غیرخطی شناخت توپولوژی محدوده جواب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. چرا که به عنوان نمونه در صورتی که فقط یک محدوده بسته وجود داشته باشد، می توان جواب را به صورت یکتا و محدوده ای مشخص از پاسخ های قابل قبول فرض نمود. از سوی دیگر بسته نبودن مرزهای جواب به معنی وجود جواب هایی است که مستقل از داده های مشاهده ای می باشند و به فضای پوچی^۲ اپراتور تولید داده تعلق دارند. حالات بیان شده، در شکل ۲-۵ به طور شماتیک ارائه شده است [۲۶].

^۱ Bayesian

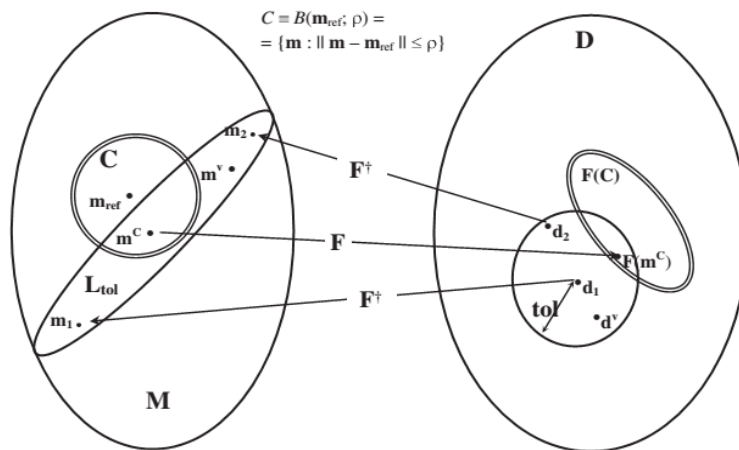
^۲ Null or Kernel



شکل ۲-۶ نمودارهای شماتیک تغییرات داده بر حسب یک مدل تک بعدی؛ (۱) محدوده جواب متصل و با مرزهای بسته. (۲) محدوده جواب منقطع ولی بار مرزهای بسته. (۳) محدوده جواب متصل ولی با مرزهای باز. (۴) محدوده جواب منقطع با مرزهای باز است [۲۶]

همان‌طور که شکل ۲-۵ نشان می‌دهد، در وضعیتی که توپوگرافی تابع هزینه به‌گونه‌ای باشد که مرزهای جواب باز باشد، در این وضعیت با تغییر مدل، تغییری در داده‌های خروجی ایجاد نخواهد شد؛ ولی بالعکس آن در وارون‌سازی، به ازای بازه کوچکی از تغییرات روی داده‌ها، محدوده‌ای نامتناهی از مدل‌ها وجود خواهد داشت [۲۶].

تأثیر منظم‌سازی بر روی یک ناحیه جواب یک مسأله مدل‌سازی خطی (M_{tol}) در شکل ۲-۶ به تصویر کشیده شده است.



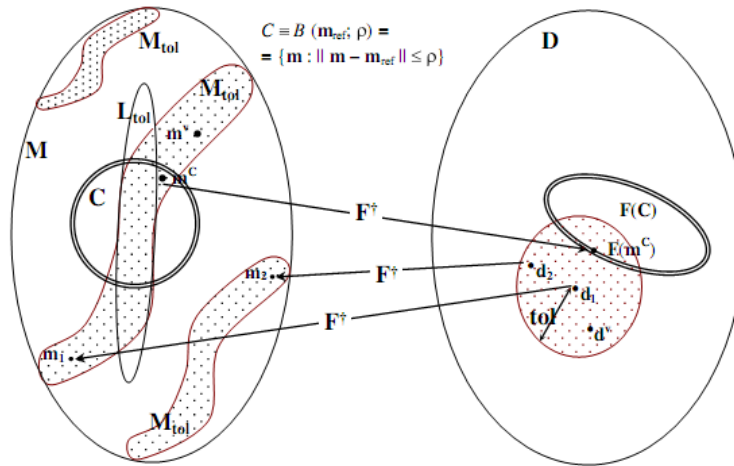
شکل ۷-۲ ناحیه معادل برای یک مسأله وارون خطی. ناحیه جواب ساده و به صورت یک بخش پیوسته است. عدم یکتایی اپراتور پیشرو مسأله (F) باعث کشیدگی محدوده مدل در راستای فضاهاى خالی اپراتور شده است. قید هم پوشانی با دایره حول مدل مرجع، محدوده جواب را محدود نموده است [۲۸].

در این مسأله منظم‌سازی ناحیه بیضی شکل جواب مسأله را به فصل مشترک آن با دایره شعاع ρ حول مدل مرجع (m_{ref}) محدود نموده است (رابطه ۲-۲۴). این امر تحت تأثیر ضریب میرایی مسأله ($\mathcal{E}^2$) تعریف شده برای منظم‌سازی می‌باشد ($m_{\mathcal{E}} \in B(m_{ref}; \rho)$). با نزدیک شدن این ضریب به صفر و در صورت عدم وجود سطح ملموسی از نوفه، مدل مورد نظر به همان نسبت به مدل واقعی (m_{true}) مسأله نزدیک می‌شود [۲۸].

$$B(m_{ref}; \rho) = \{m: \|m - m_{ref}\| \leq \rho\} \quad (2-24)$$

شکل ۷-۲ تأثیر منظم‌سازی را بر روی ناحیه جواب یک مسأله مدل سازی غیرخطی (M_{tol}) نشان می‌دهد. برای مسائل غیرخطی هم مشابه وضعیت منظم‌سازی در مسائل خطی که ناحیه هم‌پوشانی قید منظم‌ساز و محدوده مدل بر آمده از برازش داده‌ها به عنوان محدوده جواب در نظر گرفته می‌شود؛ عمل می‌شود؛ یعنی به‌طور مجدد خواهیم داشت: ($m_{\mathcal{E}} \in B(m_{ref}; \rho)$). البته در مسائل غیرخطی با اپراتور غیر یک به یک، عموماً محدود جواب پیوسته نبوده و به صورت مجموعه‌ای جزیره مانند است. در این حالت تنها بخشی از محدوده جواب، پوشش داده خواهد شد و حتی ممکن است در برخی موارد با هیچکدام از

جزیره‌های پاسخ، فصل مشترکی پیدا نکند. شکل ۸-۲ خطاهای احتمالی کاربرد روش‌های منظم‌سازی در مسائل غیرخطی را به روشنی به تصویر کشیده است.



شکل ۸-۲ ناحیه معادل برای یک مسأله وارون خطی. M_{tol} در این حالت محدوده پاسخ پیچ و خم دار و بومرنگ شکل می‌باشد. دایره C قید هم پوشانی با مدل مرجع می‌باشد؛ که تنها بخشی از جواب را پوشش داده است [۲۸].

بر اساس آنچه ارائه شد، می‌توان بیان داشت که بکارگیری اپراتورهای منظم‌سازی از جمله منظم‌ساز تیخونوف، اگرچه موجب پایدارسازی مسأله و کاهش محدوده جواب می‌شود؛ ولی حذف کامل عدم قطعیت را در پی نخواهند داشت و این معضل در مسائل غیرخطی بسته به پیچیدگی‌های مسأله بعضاً به شکل حادث‌تری بروز می‌نماید. چرا که در بسیاری از مسائل غیرخطی، محدوده جواب پیوسته نبوده و از محدوده‌های موزی و بومرنگ شکل (به‌طور کلی منحنی‌وار و دارای پیچش) تشکیل شده‌اند (شکل ۸-۲) و پوشش تمام این نواحی به وسیله قیود منظم‌ساز تقریباً ناممکن است [۲۶ و ۸۹]. به بیان دیگر همواره دسته‌ای از مدل‌ها وجود خواهند داشت؛ که داده‌های تولید شده از مدل‌سازی پیش‌روی آن‌ها؛ نتیجه یکسانی در تابع هدف مسأله خواهند داشت. دلایل گوناگونی برای این موضوع ارائه شده است؛ که در این بین می‌توان به اشتباه در انتخاب مدل اولیه، اعمال قیود اشتباه، وجود نوفه در داده‌های مشاهده‌ای، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و ساده‌سازی‌های مدل پیشرو؛ به عنوان مهم‌ترین این دلایل اشاره داشت [۸۷].

یافتن جواب بهینه از طریق نمونه‌گیری، مشکلات سایر روش‌های جستجوی پاسخ، از قبیل بد حالت شدن را ندارد و صرفاً با حل پیشرو که در واقع متناظر با وضعیت خوش حالت مسأله می‌باشد، ارتباط دارد. این روش‌ها عموماً بر اساس تئوری بیزین عمل می‌کنند [۲۶ و ۲۸ و ۸۹]. تئوری بیزین و عملکرد روش‌های مربوط به آن در ادامه به‌طور اجمالی معرفی شده‌اند.

۲-۸-۳ روش‌های بیزین

روش‌های بیزین کاربرد گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی‌های وارون ژئوفیزیکی دارند. این مسأله از آن‌جا نشأت می‌گیرد که در واقع برداشت‌های ژئوفیزیکی در چارچوب برخی اطلاعات و حدسیات اولیه و به منظور به‌روز شدن و تکمیل اطلاعات صورت می‌پذیرد و روش بیزین این امکان را فراهم می‌نماید؛ که با ترکیب احتمال اطلاعات اولیه، همراه با اطلاعات حاصله از برداشت‌ها، مجموعه اطلاعات را به‌روز نمایند [۹۰]. روش‌های بیزین تنها در جستجوی حداکثر برازش نیستند؛ بلکه توزیع آماری پارامترهای مدل را هم مورد بررسی قرار می‌دهند [۸۷]. اساساً در این‌گونه روش‌ها نیازی به خطی‌سازی اپراتور پیشرو مسأله نیست. چرا که در واقع این روش‌ها پاسخ مسأله را از طریق روش‌های بهینه‌سازی محلی و به کمک ماتریس‌های ژاکوبین^۱ و یا هسین^۲ جستجو نمی‌کنند؛ بلکه بر اساس نمونه‌گیری از فضای پاسخ جستجو می‌کنند. مجموعه روش‌های مونت کارلو از جمله روش‌های بهینه‌سازی عمومی که پیش‌تر معرفی شدند؛ بر همین مبنا عمل می‌نمایند. استراتژی روش‌های مزبور حرکت تصادفی در فضاها با احتمال بالای وجود جواب می‌باشد [۲۶]. در کنار امتیازات بیان شده در مورد بکارگیری روش‌های جستجوی تصادفی و مونت-کارلو، باید افزود که تعداد بالای مدل تولیدی و به طبع آن محاسبات بالا از مشکلات بکارگیری این

1 Jacobian

2 Hessian

روش‌هاست [۲۸]. همچنان‌که در ابتدای رساله نیز اشاره شد، در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری بر مبنای روش‌های مونت کارلو شکل گرفته‌اند و با الهام از برخی پدیده‌های طبیعی، همواره تلاش دارند روند جستجوی پاسخ را در موازنه‌ای میان بهینه‌بودن عمومی و سرعت همگرایی هدایت نمایند. تاکنون روش‌های فراابتکاری گوناگونی با الگوهای متفاوت ارائه شده‌اند. تشریح فلسفه و عملکرد این روش‌ها و نیز شیوه بکارگیری آن‌ها در مدل‌سازی‌های وارون، در ادامه آمده است.

فصل سوم: بکارگیری روش های فراابتکاری در وارون سازی داده های میدان

پتانسیل

۳-۱ مقدمه

پیش‌تر اشاره شد که در معرفی اجمالی روش‌های فراابتکاری اشاره شد، این روش‌ها شامل طیف گسترده-ای از روش‌های جستجوی پاسخ می‌شوند، که گرچه لزوماً تضمینی برای یافتن بهینه عمومی ارائه نمی‌کنند؛ اما پاسخ‌های راضی‌کننده‌ای در زمان جستجوی معقول ارائه می‌نمایند.

فرآیند جستجو در فراابتکاری‌ها اغلب از پدیده‌های طبیعی، فیزیکی و بعضاً اجتماعی الگوبرداری شده است. روش جستجوی پاسخ در آن‌ها گرچه تصادفی، ولی مستقل نیست و هر نمونه‌گیری معمولاً دست‌کم از یک نمونه پیش از خود تأثیر می‌پذیرد [۳۵ و ۹۱].

با وجود تشابهاتی در الگوی کلی فراابتکاری‌ها، این روش‌ها اغلب تفاوت‌های اساسی و چشمگیری در اصول و اجرا با یکدیگر دارند. هرچند آنچه در طراحی همه آن‌ها مورد توجه است، موازنه و حرکت میان دو معیار کاوش در فضای جستجو و تبعیت از بهترین پاسخ‌های بدست آمده می‌باشد. کنش میان خاصیت جستجوگری الگوریتم که عامل تنوع و گوناگونی^۱ پاسخ‌ها است و نیز همگرایی و تشدید^۲ جستجوها به سمت پاسخ‌های مطلوب؛ مهم‌ترین عامل در تفاوت‌های رفتاری روش‌ها است. به عبارت بهتر، تلقی و شناخت از هر الگوریتم، تا حدود زیادی به وزن تعیین شده برای هر یک از این دو خاصیت در آن الگوریتم؛ وابسته است.

۳-۲ دسته‌بندی روش‌های فراابتکاری

دسته‌بندی‌های مختلفی برای روش‌های فراابتکاری ارائه شده است. بطوری که این روش‌ها از مناظر گوناگون مورد تحلیل قرار گرفته و دسته‌بندی شده‌اند. مشهورترین طبقه‌بندی‌ها عبارتند از:

۱ diversification

۲ intensification

- الهام از طبیعت، در مقابل عدم الهام از طبیعت: بسیاری از فراابتکاری‌ها از فرآیندهای طبیعی الهام گرفته‌اند؛ از قبیل: الگوریتم‌های تکاملی مانند ژنتیک و یا هوش جمعی مورچه‌ها و زنبورهای عسل^۱ و کرم شب‌تاب^۲ و یا فرآیندهای فیزیکی مثل بازپخت فلزات^۳ [۳۵].
- جستجوی مبتنی بر جمعیت در مقابل جستجوی مبتنی بر راه‌حل تکی: الگوریتم‌های مبتنی بر راه‌حل‌های تکی (از قبیل بازپخت فلزات)، یک راه‌حل اولیه را مورد استفاده قرار داده و آن را در طول فرآیند جستجو تغییر می‌دهند؛ اما در الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت (از قبیل الگوریتم ژنتیک) یک جمعیت از راه‌حل‌ها را مورد استفاده قرار داده و در طول فرآیند جستجو آن‌ها را تغییر می‌دهند. الگوریتم‌های مبتنی بر یک راه‌حل تکی، اغلب تبعیت‌گرا (تبعیت از پاسخ‌های بهینه بدست آمده تا آن تکرار) می‌باشند؛ درحالی‌که الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، عمدتاً کاوش‌گرا هستند [۳۵].
- روش‌هایی که از حافظه استفاده می‌کنند، در مقابل روش‌های کم‌نیاز و بعضاً بی‌نیاز به حافظه: بعضی از الگوریتم‌ها بویژه الگوریتم‌های محلی، نیاز کمتری به استخراج اطلاعات در حین جستجو دارند. اطلاعات در این الگوریتم‌ها با هر جستجو، به‌روز و جایگزین شده و نیازی به ذخیره و نگهداری اطلاعات قبلی نیست. روش‌هایی از قبیل بازپخت فلزات از این دست الگوریتم‌ها می‌باشند. هرچند برخی روش‌ها مثل جستجوی ممنوع^۴ و یا الگوریتم^۵ تجمع ذرات نیازمند بررسی اطلاعات در هر تکرار هستند، بنابراین باید اطلاعات نتایج تکرارهای قبلی ذخیره گردند [۳۵ و ۹۱].

۱ Artificial Bee Colony

۲ Firefly Algorithm

۳ Simulated annealing (SA)

۴ Tabu search

۵ Particle swarm Optimization

- بکارگیری تابع هدف ایستا در مقابل پویا: در بعضی از این روش‌ها، مانند جستجوی محلی هدایت شده^۱ (GLS)، تابع هدف در حین جستجو، تغییر کرده و اصلاح می‌گردد. ایده این عمل، گریز از کمینه محلی از طریق اصلاح چشم‌انداز جستجو است. بر این اساس سعی می‌شود تابع هدف با بکارگیری اطلاعات جمع‌آوری شده در حین فرآیند جستجو، تغییر یافته و بروز رسانی گردد [۱۷].
- بهینه‌سازی چند هدفه^۲ (چندین تابع هدف) در مقابل بهینه‌سازی تک هدفه (تابع هدفی با یک ضابطه): روش‌های بهینه‌سازی بر حسب تعداد توابعی که مقدار بهینه آن‌ها جستجو می‌گردد، به دو دسته تک هدفه و چند هدفه تقسیم می‌گردند. روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه خود به دو دسته کلی روش‌های تجزیه^۳ و مستقیم تقسیم می‌شوند. در روش‌های تجزیه، مسأله بهینه‌سازی چندهدفه ابتدا به یک مسأله تک هدفه تبدیل شده و سپس حل می‌شود. ولی در روش‌های مستقیم، مسأله بهینه‌سازی چندهدفه به همان صورت چندهدفه حل می‌شود. روش‌های الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^۴، الگوریتم تکاملی قوت پارتو^۵ و نیز تجمع ذرات چند هدفه^۶ از مشهورترین این روش‌ها می‌باشند [۹۲].

۳-۳ بکارگیری الگوریتم فراابتکاری در مدل‌سازی غیرخطی داده‌های میدان پتانسیل

شرایط انتخاب الگوریتم فراابتکاری مناسب برای بکارگیری در مدل‌سازی و ارون داده‌های میدان پتانسیل، متناسب با شرایط هر مسأله می‌تواند متفاوت باشد. این شرایط شامل خطی یا غیرخطی بودن مسأله،

1 Guided Local Search

2 Multiobjective

3 Decomposition

4 NSGA

5 Strength Pareto Evolutionary Algorithm

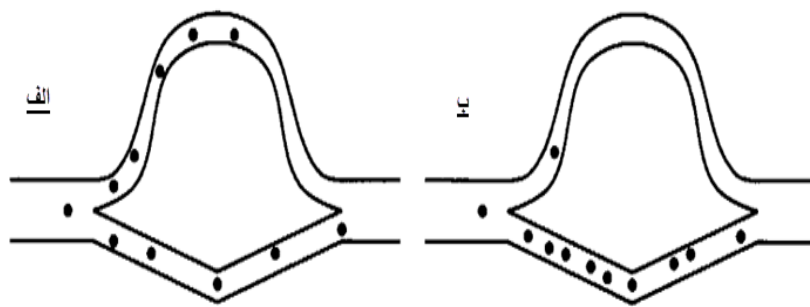
6 MPSO

تعداد پارامترهای مسأله، نوع و تعداد ضوابط تابع می‌شود. در این تحقیق که با هدف تعیین ضخامت رسوبات بر اساس داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی انجام می‌پذیرد، با مسأله ای غیرخطی با تعداد پارامترهای عموماً زیاد مواجه هستیم. از سوی دیگر با فرض عدم وجود مدل و اطلاعات اولیه، احتمال به دام افتادن در بهینه‌های محلی می‌تواند فزونی یابد. بر این اساس با توجه به مطالعات صورت گرفته، در پیشنهاد این رساله الگوریتم‌های کلونی مورچگان و رقابت استعماری از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت با قابلیت کاوشگری مناسب انتخاب شدند.

۳-۱-۳ الگوریتم کلونی مورچگان

الگوریتم کلونی مورچگان یکی از روش‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است؛ که در سال ۱۹۹۱ توسط مارکو دوریگو بر مبنای رفتار مورچه‌ها در جستجوی غذا، ارائه شد [۹۳] و خیلی زود در بسیاری مسائل از جمله در مسیریابی و مسائل راه‌ها، برنامه‌ریزی و تولید، مسیر یابی شبکه‌های کامپیوتری به کار گرفته شد [۳۵ و ۹۴]. این الگوریتم مبنای و الگوی ساختاری متفاوتی نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر جمعیت دارد. این الگوریتم با الهام‌گیری از الگوی انتخاب مسیر در مورچه‌ها؛ روش جدیدی را برای انتخاب بهترین راه‌حل‌ها، ارائه نموده است.

الگوی حرکت مورچه‌ها به گونه‌ای است که همواره کوتاه‌ترین مسیر را بین منبع غذا و لانه‌شان می‌یابند. مورچه‌ها در طی مسیر بین منبع غذایی و لانه، ماده‌ای به نام فرومون آزاد می‌کنند و وقتی می‌خواهند مسیری را برای رفتن انتخاب کنند، به احتمال بیشتر، مسیری را انتخاب می‌کنند که با فرومون غلیظ‌تری علامت‌گذاری شده است [۹۱]. شکل ۱-۳ تصویر شماتیک انتخاب کوتاه‌ترین مسیر توسط مورچه‌ها را نشان می‌دهد.



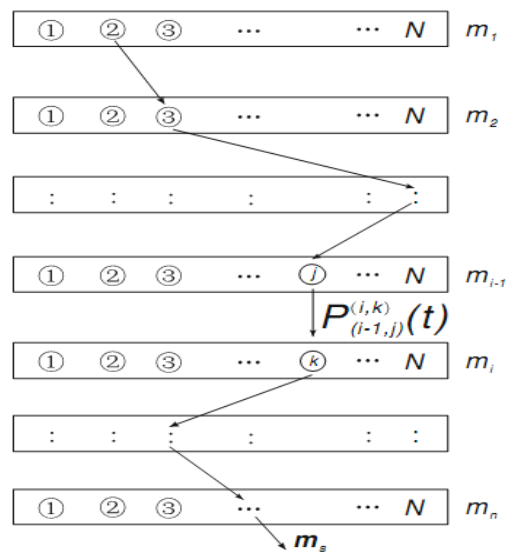
شکل ۱-۳ تصویر شماتیکی از انتخاب کوتاه‌ترین مسیر به وسیله مورچه‌ها: شکل الف: آغاز رسیدن مورچه‌ها به دو راهی است، لذا شانس انتخاب مسیر برابر است. در شکل ب: بعد از چند تکرار رفت و برگشت، اغلب مورچه‌ها مسیر کوتاه‌تر را انتخاب می‌کنند [۳۵].

همان‌طور که در شکل ۱-۳ به تصویر کشیده شده است، مورچه‌ها این توانایی را دارند که کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا را پیدا کنند. در طول زمان رفت و برگشت مورچه‌ها، در مسیرهای کوتاه‌تر به علت این که مورچه‌ها سریع‌تر به لانه بر می‌گردند؛ مقدار غلظت فرومون بیشتری وجود خواهد بود. از سوی دیگر و از آنجاکه فرومون در طول زمان تبخیر می‌شود و به همین علت در مسیرهای طولانی‌تر نسبت به مسیرهای کوتاه‌تر، تبخیر و در نتیجه کاهش غلظت فرومون شدیدتر است [۳۵ و ۹۴].

به سبب ساختار خاص و گسسته الگوریتم کلونی مورچگان؛ ضروری است برای مدل‌های پیوسته نیز تقسیم‌بندی و به نوعی گسسته‌سازی فرضی مدل صورت گیرد. بر این اساس لازم است برای هر پارامتر فضای مدل، یک مرز بالا و پایین تعیین و بر اساس تقسیماتی از پیش تعیین شده، هر پارامتر به صورت مجموعه‌ای از گره‌ها در نظر گرفته شود (شکل ۲-۳). به بیان ریاضی فضای پارامترهای مدل‌های پس از گره بندی به صورت رابطه (۱-۳) خواهد بود.

$$m_i^{\min} \leq m_i \leq m_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-3)$$

در رابطه (۱-۳)، پارامتر n به تعداد پارامترهای مدل اشاره دارد. اگر تعداد تقسیم‌بندی پارامترهای مدل N فرض شود؛ تعداد گره‌ها در کل مدل برابر $n \times N$ خواهد بود.



شکل ۲-۳ تقسیم‌بندی فضای مدل پیوسته به لایه‌های فرضی با تقسیم‌بندی به گره‌هایی فرضی، و عبور مورچه‌ها از این لایه و گره‌های فرضی [۹۵].

• پیمایش مسیر

در شکل ۲-۳ نشان داده شده که پیمایش مسیر به وسیله مورچه‌های مصنوعی از جابجایی از یک گره از یک لایه به لایه بعدی انجام می‌پذیرد. به گونه‌ای که از اولین لایه تا آخرین لایه را به ترتیب با عبور از تنها یک گره از هر لایه انجام می‌دهند. این جابجایی‌ها بر اساس پارامتری به نام احتمال انتقال، انجام می‌شود. احتمال انتقال تابعی غیرخطی از میزان فرومون‌های هر مسیر است.

در ابتدای اولین پیمایش، برای یکنواختی شانس احتمال پیموده شدن تمامی مسیرها و افزایش شانس اکتشاف همه مناطق، مقدار قابل توجه فرومون به طور مساوی بر روی تمامی گره‌ها توزیع می‌شود؛ اما به مرور زمان این غلظت متناسب با مسیری که در آن قرار دارند؛ کاهش و یا افزایش خواهد داشت. تابع احتمال هر جابجایی که تابعی از غلظت فرومون در مسیرهای مختلف است؛ از رابطه (۲-۳) بدست می‌آید [۳۸ و ۹۵].

$$p_{(i-1,j)}^{(i,k)}(t) = \frac{[\tau_{(i,k)}(t)]^\alpha [\eta_{(i,k)}(t)]^\beta}{\sum_{l=1}^N [\tau_{(i,l)}(t)]^\alpha [\eta_{(i,l)}(t)]^\beta} \quad (2-3)$$

در این رابطه، $\tau_{(i,k)}$ میزان فرومون روی گره k ام از لایه i ام و η تابع مربوط به اطلاعات پیمایش‌های گذشته

است. همچنین در رابطه مزبور، پارامترهای α و β ضرایب وزنی می‌باشند؛ که بین قابلیت‌های کاوشگری الگوریتم و تبعیت از بهترین جواب (همگرایی) تعادل ایجاد می‌نمایند؛ به گونه‌ای که اگر α برابر صفر باشد، سبب می‌شود اطلاعات فرومونی مورد استفاده قرار نگیرد و اطلاعات جستجوهای گذشته از بین رفته و جستجو شکل کاملاً تصادفی به خود بگیرد و اگر β برابر صفر باشد، بعد فراابتکاری و کاوشگری همه مناطق را از دست خواهد داد [۹۵] و برای برقراری تعادل بین بعد کاوشگری الگوریتم و استفاده از اطلاعات فرومونی می‌توان این دو ضریب برابر ۱ در نظر گرفت.

• ارزیابی مسیر و به‌روزرسانی فرومون مسیرها

پس از این‌که هر مورچه از تمامی لایه‌ها عبور کند، در واقع یک راه‌حل ایجاد می‌شود؛ که باید به‌وسیله تابع هدف مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از آن‌که همه مورچه‌ها مسیر را طی نمودند و به تعداد مورچه‌ها، راه حل ایجاد شد؛ راه حل‌ها با تابع هدف ارزیابی و متناسب با میزان برازندگی هر راه حل، مقدار فرومون‌های مسیر سازنده افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر پس از ارزیابی هر راه حل، فرومون گره‌هایی که مورچه سازنده آن راه حل از آن‌ها عبور کرده است، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر برای کمتر کردن شانس مسیرهای کم تردد و نیز جلوگیری از همگرایی زودرس به برخی مسیرهای پرتردد و طبیعتاً با فرومون بالا؛ در این الگوریتم از عاملی به نام تبخیر فرومون در هر تکرار استفاده شده است. تبخیر فرومون پدیده‌ای است که در طبیعت زندگی مورچه‌ها رخ می‌دهد و با الگوبرداری از آن، الگوریتم در جهت مشابهت هر چه بیشتر به الگوی طبیعی نیل می‌نماید.

پس از هر چرخه پیمایش مسیرهای مختلف توسط مورچه‌ها، میزان فرومون هر گره به‌وسیله دو عامل تبخیر و افزوده شدن فرومون ناشی از میزان تردد مورچه‌ها از هر گره، دستخوش تغییر قرار می‌گیرد؛ که شیوه اعمال کمی این دو عامل در ادامه بیان شده است. رابطه (۳-۳) تغییرات فرومون در گره‌ها را پس از

هر تکرار بیان می‌نماید [۳۸ و ۹۵].

$$\tau_{(i,j)}(t+1) = (1-\rho)\tau_{(i,j)}(t) + \nabla\tau_{(i,j)}(t) \quad (3-3)$$

در این رابطه ρ ضریب تبخیر فرومون و $0 < \rho < 1$ بوده و در هر تکرار بر روی همه گره‌های حاوی فرومون عمل کرده و باعث تبخیر و از دست رفتن درصدی از فرومون گره می‌شود، بدیهی است در گره‌های با فرومون بیشتر، مقدار فرومون بالاتری تبخیر و در نتیجه از همگرایی زودرس الگوریتم جلوگیری خواهد شد.

$\nabla\tau_{(i,j)}(t)$ قسمت افزایشی فرومون در گره‌ها است؛ که از رابطه (۳-۴) بدست می‌آید [۳۹ و ۹۵].

$$\nabla\tau_{(i,j)}(t) = \sum_{s=1}^{N_a} \nabla\tau_{(i,j)}^{(s)}(t) \quad (4-3)$$

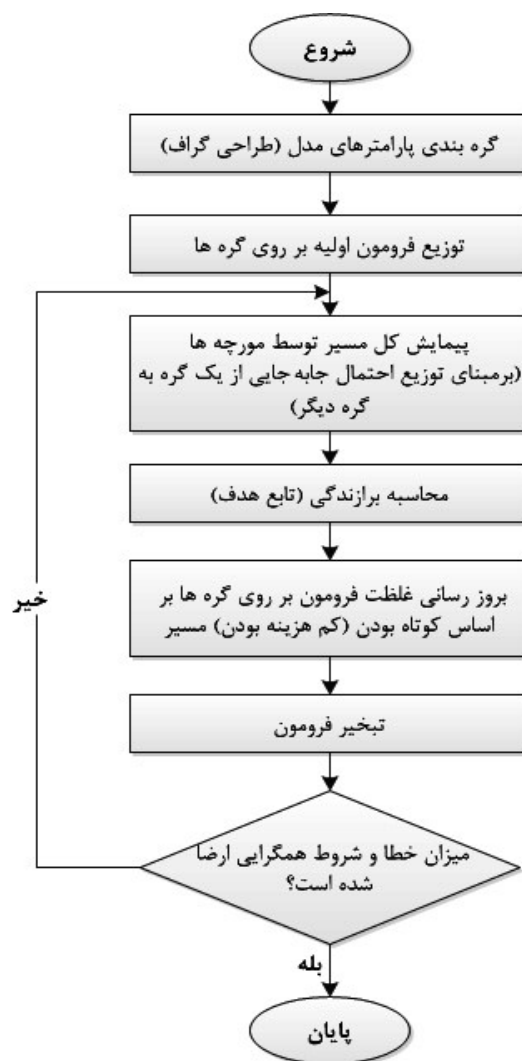
در رابطه (۳-۴) اندیس s شمارنده مورچه‌ها و N_a تعداد مورچه‌ها است. $\nabla\tau_{(i,j)}^{(s)}(t)$ تغییرات فرومون حاصل از عبور مورچه s ام از گره j ام از لایه i ام را نشان می‌دهد؛ که بر اساس ارزیابی تابع هدف از مسیر پیموده شده، تعیین می‌شود. بدیهی است تأثیر توزیع فرومون می‌تواند بر نرخ همگرایی و کیفیت جستجو نیز مؤثر باشد. از این‌رو روش‌های مختلفی برای توزیع فرومون بوجود آمده‌اند؛ که رایج‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها سیستم چرخه مورچه است. در این روش تغییرات غلظت فرومون پس از عبور مورچه‌ها از هر مسیر بر اساس رابطه (۳-۵) تعیین می‌شود [۹۶].

$$\nabla\tau_{(i,j)}^{(s)}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{if ants travels the node}(i,j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-3)$$

بر اساس رابطه (۳-۵)، تغییرات فرومون به ازای هر مورچه، تنها مربوط به گره‌هایی است که از آن‌ها عبور کرده و سایر گره‌ها تغییر فرومون نخواهند داشت. گره‌هایی که مورچه از آن‌ها عبور کرده بر مبنای ارزیابی مسیر (طول مسیر) تعیین می‌شود؛ به گونه‌ای که از تقسیم مقدار مشخصی فرومون بر طول مسیر طی شده (L_k) تعیین می‌گردد. پر واضح است که این رابطه سبب می‌شود مسیرهایی که طول (مقدار تابع هدف) کمتری دارند؛ مقدار فرومون بیشتری به آن‌ها اضافه شود [۹۵ و ۹۶].

• همگرایی و شروط توقف

با تکرار چرخه الگوریتم، به تدریج مسیرهای کوتاه (کمینه کننده تابع هدف) شناسایی و غلظت فرومون در آنها افزایش می‌یابد و این عمل سبب سوق دارن هرچه بیشتر مورچه‌ها به این مسیرها خواهد شد؛ تا جایی که به تدریج بخش قابل توجهی از مورچه‌ها تنها از یک مسیر عبور خواهند نمود و این می‌تواند به معنای توقف الگوریتم باشد. البته شاخصه‌ای که تعیین می‌کند به ازای هم مسیر شدن چه تعدادی از مورچه‌ها، الگوریتم باید متوقف شود، در الگوریتم‌ها و مسائل مختلف می‌تواند متفاوت باشد [۳۹ و ۹۵]. در این تحقیق از شرط توقف الگوریتم به ازای تعداد معینی از تکرار حلقه مربوط به تردد جمعیت مورچه‌ها؛ استفاده شده است. در شکل ۳-۳ مراحل الگوریتم کلونی مورچگان ارائه شده است.



شکل ۳-۳ مراحل الگوریتم کلونی مورچگان

۳-۲-۲ الگوریتم رقابت استعماری

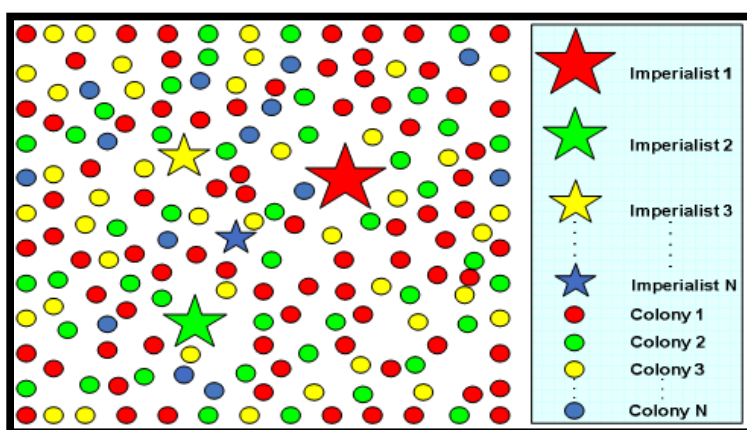
اغلب روش‌های عمده و شناخته شده محاسبات تکاملی، شبیه‌سازی کامپیوتری فرایندهای طبیعی و زیستی هستند. از آن‌جا که تکامل فکری و فرهنگی بشر بسیار سریع‌تر از تکامل زیستی و ژنتیکی او صورت می‌گیرد؛ دسته‌ای دیگر از الگوریتم‌های تکاملی موسوم به الگوریتم‌های فرهنگی بوجود آمدند. ایده‌ی اصلی

الگوریتم‌های فرهنگی بدین صورت است که با افزودن قابلیت تکامل فرهنگی به الگوریتم‌های موجود، سرعت همگرایی را افزایش دهند [۹۷].

آتش‌پز گرگری و لوکاس در سال ۲۰۰۷ الگوریتم جدیدی با نام رقابت استعماری در زمینه محاسبات تکاملی ارائه نمودند؛ که از یک پدیده اجتماعی- انسانی الهام گرفته است [۹۸ و ۹۹]. این الگوریتم که در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، از الگوریتم‌های به نسبت جدید محسوب می‌شود؛ در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و گزارش‌های متعددی از کاربرد موفقیت‌آمیز آن در مسائل بهینه‌سازی عمومی ارائه شده است [۱۰۰-۱۰۶]. الگوریتم مذکور علاوه بر کارکرد اصلی آن در بهینه‌سازی، دارای ویژگی‌هایی است که می‌توان از آن به صورت ترکیبی در روش‌های خوشه‌بندی^۱ استفاده نمود [۱۰۷].

در الگوریتم رقابت استعماری، هر عنصر جمعیت، یک کشور (پاسخ‌های ممکن مسأله) نامیده می‌شود. در واقع در یک مسأله بهینه‌سازی N بعدی به وسیله این الگوریتم یک کشور یک آرایه‌ی $1 \times N$ است. هدف در حل یک مسأله بهینه‌سازی با الگوریتم مزبور، یافتن بهترین کشور (کشوری با بهترین ویژگی‌های اجتماعی-سیاسی) است. تعیین این کشور در واقع معادل یافتن بهترین پارامترهای مسأله است، که کمترین مقدار تابع هزینه را تولید می‌نماید. در الگوی این روش، کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند (شکل ۳-۴). بر این اساس و بر مبنای پارامترهای از پیش تعیین شده مسأله، تعدادی از کشورهای کمترین هزینه را دارند به عنوان استعمارگران و بقیه کشورهای باقیمانده به عنوان مستعمره‌ها در نظر گرفته می‌شوند [۹۷ و ۹۸].

^۱ Clustering



شکل ۳-۴ جمعیت اولیه از کشورهای شامل استعمارگران و مستعمره در الگوریتم رقابت استعماری هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم است [۹۷]. برای محاسبه قدرت هر استعمارگر، از پارامتری به نام هزینه نرمالایزه^۱ شده استفاده می‌شود. بر اساس این الگو کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. پس از محاسبه هزینه همه استعمارگران، هزینه نرمال شده هر استعمارگر تعیین خواهد شد [۹۸].

$$C_n = c_n - \max_i \{c_i\} \quad (۳-۶)$$

در این رابطه، C_n هزینه نرمال شده هر استعمارگر بر مبنای بزرگترین هزینه مشاهده شده میان استعمارگرها می‌باشد. پس از تعیین هزینه نرمال شده، قدرت نسبی هر استعمارگر از رابطه (۳-۷) محاسبه شده و بر مبنای آن کشورهای مستعمره، بین استعمارگران تقسیم می‌شوند [۹۸].

$$p_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \quad (۳-۷)$$

که در رابطه (۳-۷)، p_n قدرت نرمال شده هر استعمارگر و N_{imp} تعداد استعمارگران است. قدرت نرمالایزه

^۱ Normalized

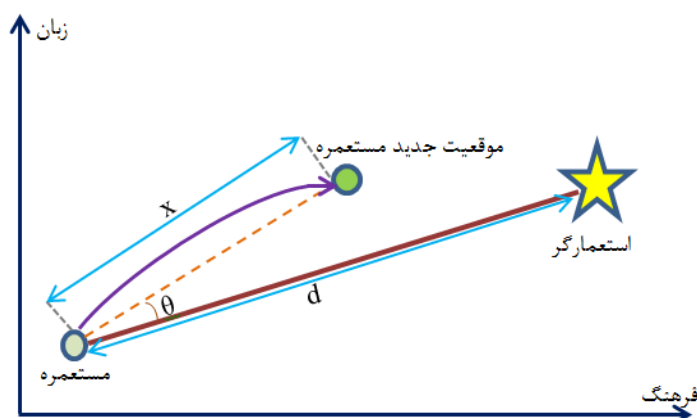
شده هر استعمارگر تعیین کننده تعداد مستعمراتی خواهد بود که به آن استعمارگر تعلق خواهد گرفت.

الف - سیاست جذب^۱

هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. در طی تاریخ، استعمارگران میکوشیدند با اقداماتی از قبیل احداث مدارس به زبان خود و گسترش آداب و رسوم خود در مستعمره، سعی در جذب حداکثری مستعمره به سوی خود داشته باشند. در این الگوریتم سیاست جذب با حرکت دادن کشورهای مستعمره یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می‌پذیرد. بردار جابجایی مستعمره به سمت استعمارگر ($\vec{x}$) در رابطه (۸-۳) تعریف شده است.

$$\vec{x} \sim U(0, \beta \times \vec{d}) \quad (۸-۳)$$

که در این رابطه β یک پارامتر بزرگ‌تر از ۱ و d فاصله بین مستعمره و استعمارگر مربوطه است. در شکل ۵-۳ اصول این جابجایی به صورت شماتیک به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵-۳ مدل حرکتی مستعمرات به سمت استعمارگر همراه با یک انحراف تصادفی

همچنان‌که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است؛ برای جلوگیری از همگرایی زودرس و افزایش فرصت اکتشاف مناطق مختلف فضای مدل؛ به مستعمره اجازه داده می‌شود؛ که در مسیر نیل به سمت امپراطور به اندازه

¹ assimilation

زاویه‌ای مشخص از مسیر مستقیم منحرف شود. زاویه انحرافی مذکور، به صورت تصادفی در بازه‌ای از پیش تعیین شده نوسان می‌کند. به عبارتی:

$$\theta = U(-\gamma, \gamma) \quad (9-3)$$

در این رابطه θ زاویه انحراف، γ حدود انحراف نسبت به مسیر مستقیم بین مستعمره و استعمارگر و تابع U تابع توزیع یکنواخت است [۹۸].

ب- انقلاب^۱

انقلاب‌ها سبب تغییرات ناگهانی در جنبه‌های اقتصادی، فرهنگی و سیاسی کشورها و بعضاً یک امپراطوری شده‌اند. بگونه‌ای که مستعمرات موجود در یک امپراطوری به جای این‌که توسط استعمارگر مربوطه خود جابجا شوند، می‌توانند به طور تصادفی ویژگی‌های سیاسی - اجتماعی خود را تغییر دهند.

دوآن^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰، با در نظر گرفتن امکان پدیده انقلاب در کشورها، آن را به صورت مرحله جدید به قالب سنتی الگوریتم ICA اضافه نمودند [۱۰۲ و ۱۰۸]. گام انقلاب مشابه پدیده جهش^۳ در برخی روش‌های تکاملی پیشین عمل می‌نماید. در این الگوریتم پارامتری به نام نرخ انقلاب^۴، درصدی از کشورهای یک امپراتوری (شامل استعمارگر و مستعمرات) را نشان می‌دهد که این پدیده را تجربه می‌کنند [۱۰۵].

ج- جابجایی‌های درون امپراطوری

وقتی که مستعمره‌های یک امپراطوری به سمت استعمارگر خود نیل می‌کنند، ممکن است به واسطه این جابجایی؛ در موقعیتی قرار بگیرند که تابع هزینه آن‌ها به کمترین مقدار درون امپراطوری تبدیل شود. از

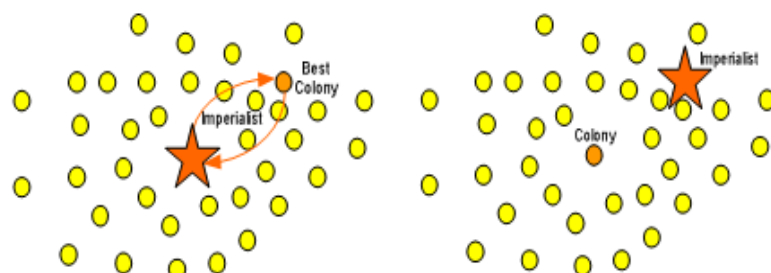
۱ Revolution

2 Duan et al.,

3 Mutation

4 Revolution Rate

آن لحظه به بعد آن عضو موقعیتش با امپراطور تعویض خواهد شد. به بیان ساده تر از آن لحظه به بعد او استعمارگر و امپراطور خواهد بود و امپراطور قبلی مانند سایرین تبدیل به مستعمره امپراطور جدید خواهد شد. بدیهی است با این انتقال قدرتی که درون امپراطوری اتفاق می‌افتد، وضعیت قدرت کل امپراطوری دستخوش تغییرات زیادی خواهد شد. شکل ۳-۶ این جابجایی قدرت را نشان می‌دهد [۹۸].



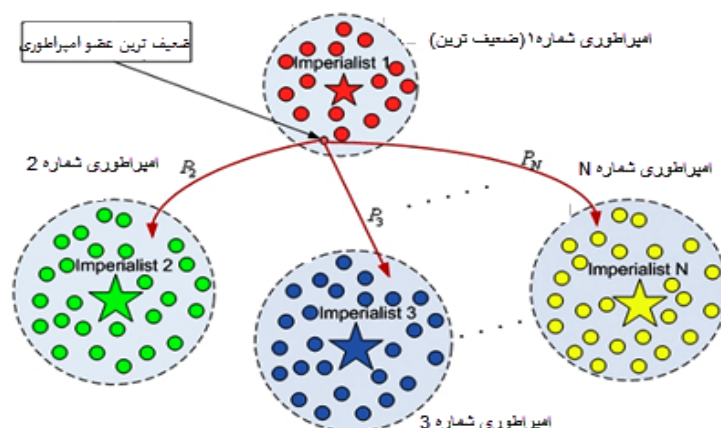
شکل ۳-۶ جا به جایی بهترین عضو امپراطوری با امپراطور (استعمارگر فعلی گروه) (شکل سمت چپ). وضعیت جدید امپراطوری پس از تبدیل وضعیت بهترین عضو به امپراطور (استعمارگر جدید گروه) (شکل سمت راست) [۹۸].

د- رقابت استعماری

رقابت استعماری، بخش مهمی از این الگوریتم را تشکیل می‌دهد. طی رقابت استعماری، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج قدرت خود را از دست داده و به مرور زمان، با تضعیف شدن از بین می‌روند. معیار سنجش قدرت و ضعف یک امپراطوری بر مبنای قدرت کل آن امپراطوری تعریف می‌شود. قدرت هر امپراطوری حاصل جمع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن است. رابطه (۳-۹) نحوه محاسبه قدرت کل امپراطوری‌ها را بیان می‌کند [۹۷].

$$T.C_n = \text{Cost}(\text{imperialist}) + \xi \cdot \text{mean}\{\text{Cost}(\text{colonies of empire})\} \quad (10-3)$$

در این رابطه، $T.C_n$ قدرت امپراطوری کل و ξ ضریبی بین صفر تا یک و عمدتاً نزدیک به صفر می‌باشد. شکل ۳-۷ شمای کلی رقابت استعماری را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۳ شمای کلی رقابت استعماری (امپراطوری‌های با قدرت بیشتر برای جذب اعضای ضعیف امپراطوری-های ضعیف با یکدیگر رقابت می‌کنند) ([۹۷] با تغییرات).

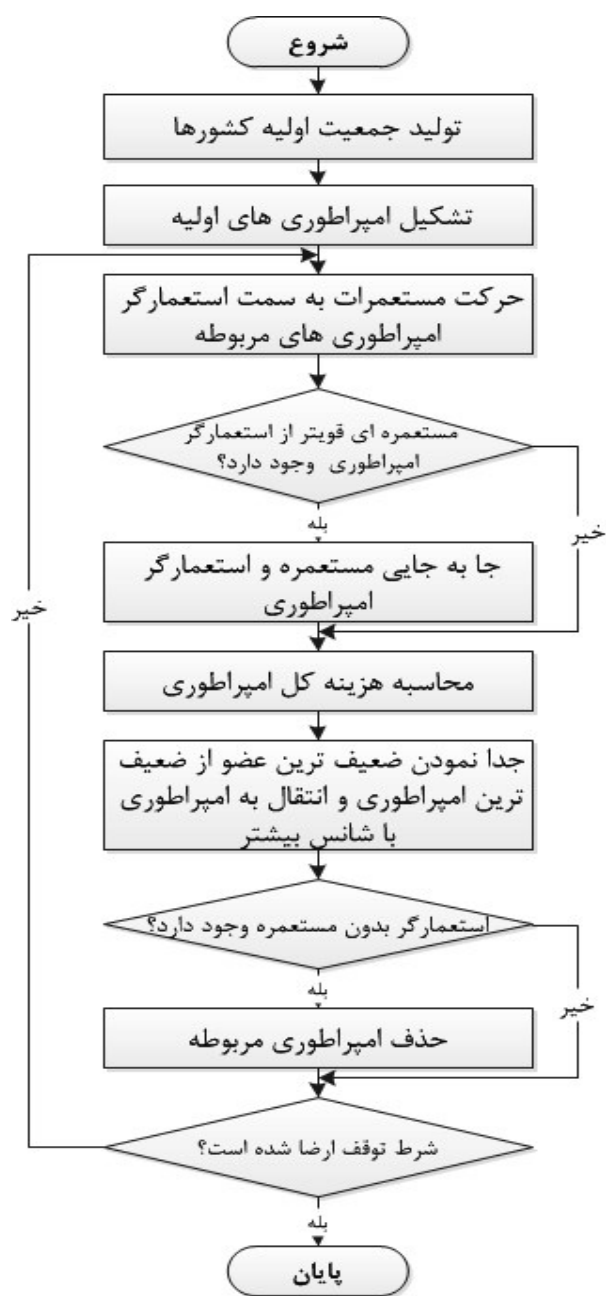
شکل ۷-۳ نشان می‌دهد که ضعیف‌ترین امپراطوری یکی از مستعمرات خود را از دست داده و رقابت استعماری بین امپراطوری‌های دیگر بر سر تصاحب آن به جریان می‌افتد. در این رقابت همان‌طور که اشاره شد، شانس بیشتر با امپراطوری است که قدرت کل بیشتری (هزینه کمتر) داشته باشد [۹۸].

پس از تعیین احتمال تصاحب هر امپراطوری، مکانیزمی همانند چرخ رولت^۱ در الگوریتم ژنتیک مورد نیاز است؛ تا مستعمره مورد رقابت را با احتمال متناسب با قدرت امپراطوری‌ها در اختیار یکی از آن‌ها قرار دهد. با تصاحب مستعمره توسط یکی از امپراطوری‌ها، عملیات این مرحله از الگوریتم نیز به پایان می‌رسد.

ه- سقوط امپراطوری‌های ضعیف و همگرایی به سمت قدرت برتر

چرخه رقابت بین امپراطوری‌ها منجر به تضعیف و نابودی امپراطوری‌های ضعیف و قوی و برتر شدن امپراطوری‌های با هزینه کمتر خواهد شد. در نتیجه، در نهایت همه امپراطوری‌ها منقرض و به استعمار امپراطوری برتر در خواهند آمد. در شکل ۸-۳ فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری ارائه شده است.

1 Roulette Wheel



شکل ۳-۸ مراحل الگوریتم رقابت استعماری

۳-۳-۳ الگوریتم رقابت ذرات^۱

روش بهینه‌سازی رقابت ذرات یا CSO از روش‌های نوین جستجوی عمومی است؛ که در سال ۲۰۱۴ توسط چنگ^۲ و جین^۳ بر مبنای روش تجمع ذرات، به منظور بکارگیری در مسائل بزرگ مقیاس ابداع شد [۱۰۹ و ۱۱۰]. روش تجمع ذرات با وجود مزایای متعددی از قبیل سهولت در تنظیم پارامترها و نیز سرعت همگرایی بالا؛ همچون سایر الگوریتم‌ها نقطه ضعف‌هایی نیز دارد. عمده‌ترین نقطه ضعف این الگوریتم، همگرایی زودرس و بعضاً ناتوانی در فرار از نقطه بهینه محلی است. ویژگی مزبور در مسائلی با ابعاد زیاد و بهینه‌های محلی فراوان بیشتر نمود پیدا می‌کند. برای رفع و یا کاهش حداکثری این مشکل، تاکنون مطالعات فراوانی انجام و راهکارهای گوناگونی نیز ارائه شده است. چنگ و جین با حفظ چارچوب اصلی و تئوری روش تجمع ذرات و با ایجاد تغییرات بنیادین در اجرای این روش، روش جدید رقابت ذرات را ارائه نمودند. در الگوریتم CSO با تغییر الگوی حرکت ذرات به جای حرکت به سمت بهترین عضو گروه و بهترین موقعیت ذره در حرکت قبلی، حرکت هر ذره تنها وابسته به نتیجه رقابت آن ذره با ذره ای دیگر است؛ که بصورت تصادفی برای آن در نظر گرفته شده است [۱۰۹].

مبانی و روش اجرای الگوریتم CSO

ایده اساسی این الگوریتم به دسته‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت بازمی‌گردد؛ که به جای استفاده از یک جمعیت از راه حل‌ها، چندین جمعیت استفاده می‌شود؛ تا فاز جستجوگری الگوریتم تقویت و از همگرایی زودرس آن جلوگیری گردد [۱۱۱]. بر همین اساس، الگوریتم CSO ذرات را به تعدادی

^۱ Competitive Swarm Optimizer (CSO)

^۲ Ran Cheng

^۳ Yaochu Jin

زوج ذره تقسیم می‌کند و پس از قیاس موقعیت دو ذره، ذره‌ای که موقعیت ضعیف‌تری دارد، به سمت ذره بهتر حرکت کرده و ذره پیروز در رقابت، در موقعیت خود ثابت می‌ماند. بدین ترتیب نقش جذب به سمت بهترین ذره و نیز جذب به سمت بهترین خاطره از بین می‌رود.

الف- مراحل اجرای CSO

- تولید اولیه تعدادی از ذرات (راه‌حل‌ها) بصورت تصادفی شامل موقعیت تصادفی و یک بردار سرعت تصادفی.
 - دسته‌بندی ذرات در گروه‌های دوتایی بصورت تصادفی.
 - ارزیابی ذره‌ها در هر گروه، تعیین ذره پیروز و شکست خورده در رقابت.
 - به روز شدن موقعیت ذرات:
- ذره پیروز بدون تغییر در موقعیت می‌ماند و ذره مغلوب با برآیند سرعت قبلی خود و آموزش از طرف ذره پیروز، حرکت خواهد نمود. معادله به‌روز شدن موقعیت و سرعت ذره مغلوب، به ترتیب در روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) ارائه شده است.

$$X_{l,k}(t+1) = X_{l,k}(t) + V_{l,k}(t+1) \quad (11-3)$$

اندیس‌های l, k در این رابطه اشاره به ذره مغلوب^۱ و شماره رقابت می‌باشند.

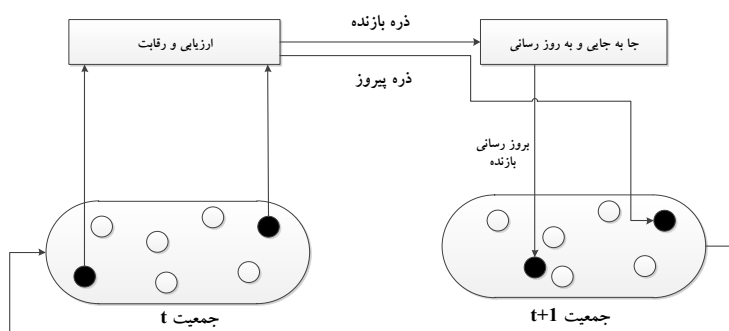
$$V_{l,k}(t+1) = R_1(k, t)V_{l,k}(t) + R_2(k, t)(X_{w,k}(t) - X_{l,k}(t)) + \varphi R_3(k, t)(\bar{X}_k(t) - X_{l,k}(t)) \quad (12-3)$$

در رابطه (۱۲-۳) پارامترهای $R_1(k, t)$ و $R_2(k, t)$ و $R_3(k, t)$ ضرایبی در بازه $[0, 1]$ می‌باشند. $X_{w,k}(t)$ و $\bar{X}_k(t)$ به ترتیب به موقعیت ذره پیروز در رقابت و میانگین موقعیت کل ذره‌ها اشاره دارند. پارامتر φ نیز کنترل‌کننده تعادل بین گرایش به میانگین ذرات و مولفه شناختی (ذره پیروز رقابت) است.

- دسته‌بندی مجدد ذرات در گروه‌های دوتایی و از سرگیری مراحل قبلی تا ارضای شرط توقف الگوریتم.

^۱ loser

در شکل ۹-۳ الگوی کلی اجرای الگوریتم CSO به تصویر کشیده شده است.



شکل ۹-۳ الگوی اجرای الگوریتم CSO، در هر مرحله از الگوریتم، ذرات بطور تصادفی به صورت دو به دو انتخاب می‌شوند و موقعیت هر دو ذره ارزیابی و ذره‌ای که موقعیت بهتری دارد؛ ثابت مانده و ذره بازنده را به سمت خود جذب می‌نماید [۱۰۹].

ب-همگرایی و شروط توقف

با تکرار چرخه الگوریتم، به تدریج ذرات به صورت دو به دو به یکدیگر نزدیک شده و در نهایت میانگین موقعیت‌ها در وضعیتی تقریباً ثابت قرار گرفته و به یک موقعیت بهینه خاص همگرا می‌شوند. شکل ۱۰-۳ نمایانگر فلوچارت مراحل اجرای الگوریتم CSO است.



شکل ۳-۱۰ فلوجارت الگوریتم CSO.

۳-۳-۴ هیبرید^۱ رقابت استعماری و کرم شب تاب

بطور کلی سه عامل دلیل بالا بودن قابلیت جستجوگری^۲ در روش ICA است. ۱- کشورهای (راه

^۱ Hybrid

^۲ exploration

حل‌هایی) که در ابتدا در کل فضای مسأله توزیع شده‌اند، توسط امپراطورهای متعددی از فواصل مختلف جذب می‌شوند. ۲- همچنین ممکن است در حین رقابت استعماری، ناگهان از یک امپراطوری به امپراطوری دیگر جذب شوند. ۳- از سویی دیگر در هر چرخه جستجو استعمارگر هر امپراطوری ممکن است تغییر کرده و همه مسیرهای جذب به سوی استعمارگر جدید تغییر یابد [۹۸ و ۱۰۱ و ۱۰۵ و ۱۱۲].

با این حال با تمام مزایای ذکر شده در مورد این الگوریتم، فرآیند جذب کشورها توسط استعمارگر امپراطوری سبب شبیه هم شدن پاسخ‌ها شده و به تدریج فاصله مستعمره‌های یک امپراطوری به یکدیگر نزدیک و نزدیک‌تر شده و با توجه به روابط (۳-۸) و (۳-۹) بازه جابجایی هایشان کوچک و کوچکتر شده و سبب افت جستجوگری الگوریتم می‌شود [۱۰۶ و ۱۱۲].

به منظور رفع مشکل یاد شده که در فرآیند جذب الگوریتم ICA پدید می‌آید، پیشنهاد شد تا الگوی حرکتی کشورها از فرم‌های سنتی تغییر یابد و به سمت الگویی با جستجوگری بیشتر ارتقا یابد. در این راستا از الگوی هیبرید این الگوریتم با الگوریتم کرم شب تاب (FA) (از الگوریتم‌های با قابلیت جستجوی محلی) که پیشتر کاربرد موفقیت آمیز آن در زمینه‌های متفاوت بهینه‌سازی گزارش شده [۱۰۵ و ۱۱۲]، استفاده شد. بدین صورت که از الگوی حرکتی کرم‌های شب تاب در الگوریتم FA در پروسه جذب الگوریتم ICA استفاده شد. الگوریتم FA یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت می‌باشد که با اندکی ایده‌آل سازی از فرآیند جذب بر اساس میزان شدت نور کرم‌های شب تاب الگو گرفته است [۱۱۳].

الف- جذب مستعمرات در الگوریتم هیبرید ICA و FA

در الگوریتم پیشنهادی، استراتژی جذب مستعمره‌ها از الگوی جذب و حرکت کرم‌های شب تاب در الگوریتم استفاده شد. الگوی جابجایی کرم‌های شب تاب در الگوریتم FA در رابطه (۳-۱۳) ارائه شده است.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha (\text{rand}(0,1) - 0.5) \quad (۳-۱۳)$$

در این رابطه x_i^t و x_j^t به ترتیب موقعیت کرم‌های شب تاب i ام و j ام در تکرار t ام و rand تولید کننده عدد

تصادفی با توزیع یکنواخت است. پارامترهای β_0 و γ به ترتیب بیشینه ضریب جذب (جذب در فاصله صفر) و ضریب جذب افت در الگوریتم کرم شب تاب می‌باشند. ضریب α اندازه گام جستجوی تصادفی است، که در بازه صفر تا یک اختیار می‌شود. همچنین r_{ij} فاصله میان موقعیت کرم های شب تاب i ام و j ام است که بر مبنای فضای کارتزین^۱ در رابطه (۱۴-۳) ارائه شده است.

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (14-3)$$

در این رابطه x_{ik} و x_{jk} به ترتیب به بعد k ام کرم‌های شب تاب و موقعیت کرم های شب تاب i ام و j ام اشاره داشته و M نیز ابعاد مسأله را نشان می‌دهد.

بر اساس الگوی بیان شده در جذب کرم‌های شب تاب به سوی یکدیگر، الگوی جذب مستعمرات توسط استعمارگر در الگوریتم حاصل از هیبرید ICA و FA بدین صورت بازنویسی خواهد شد:

$$col_i^{t+1} = col_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (col_i^t - imp_{col_i}^t) + \alpha(rand - 0.5) \quad (15-3)$$

در این رابطه، col_i^t موقعیت مستعمره i ام در تکرار t ام و $imp_{col_i}^t$ موقعیت استعمارگر مربوطه در تکرار t ام است.

از مزایای هیبرید نمودن فرم سنتی الگوریتم ICA با الگوریتم FA این است که الگوریتم جدید دیگر این گونه نخواهد بود که نقطه بهینه از فاصله ای دورتر بتواند بقیه را به سمت خود جذب کند. در این سیستم، کشورهای دور از هم نمی‌توانند به یک باره یک راه حل را به سمت خود جذب کنند.

ضمن آن که در ICA سنتی، کشور استعمارگر هر امپراطوری تا زمانی که از کشورهای زیر مجموعه اش بهتر باشد، حرکتی نخواهد داشت؛ ولی در هیبرید این الگوریتم با FA، کشورهای استعمارگر نیز نسبت به

^۱ Cartesian

سایر استعمارگرانی که بهتر از خود باشند، مورد جذب قرار می‌گیرند؛ که این جذب از الگوی FA پیروی نموده و در عین حال همچون FA تنها حرکت‌هایی مورد پذیرش خواهد بود که موقعیت جدید کشور نسبت موقعیت قبلی بهتر باشد. از این رو در الگوریتم هیبرید شاهد یک حرکت آرام و نرم استعمارگران به سمت مناطق بهتر خواهیم بود؛ که سبب فزونی جستجو و نیز سرعت همگرایی می‌گردد [۱۱۲].

ب- جابجایی استعمارگران

از دیگر نکات ضعف در شیوه اجرای کلاسیک این الگوریتم، بی‌حرکی استعمارگران می‌باشد و استعمارگر یک امپراطوری تا زمانی که استعمارگر باقی می‌ماند تحرکی هم نخواهد داشت و کشورهای دیگر را به سمت خود جذب خواهد کرد. از این رو در الگوریتم بکار گرفته شده، مطابق الگوریتم ICA بهبود یافته [۱۰۹] در نظر گرفته شد تا در حین اجرای الگوریتم، وضعیت هر استعمارگر نسبت به وضعیت استعمارگران مشابه بصورت دو به دو مقایسه و به سمت هر استعمارگر بهتر از خود حرکتی بر مبنای رابطه (۱۶-۳) خواهد داشت.

$$\text{imp}_i^{t+1} = \text{imp}_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\text{imp}_i^t - \text{imp}_j^t) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (16-3)$$

در این رابطه imp_i^t و imp_j^t به ترتیب موقعیت استعمارگر امپراطوری‌های i ام و j ام هستند.

فصل چهارم: بکارگیری و ارزیابی روش های پشته‌ای بر روی داده های میدان تانسیل از مدل های مصنوعی

۴-۱ مقدمه

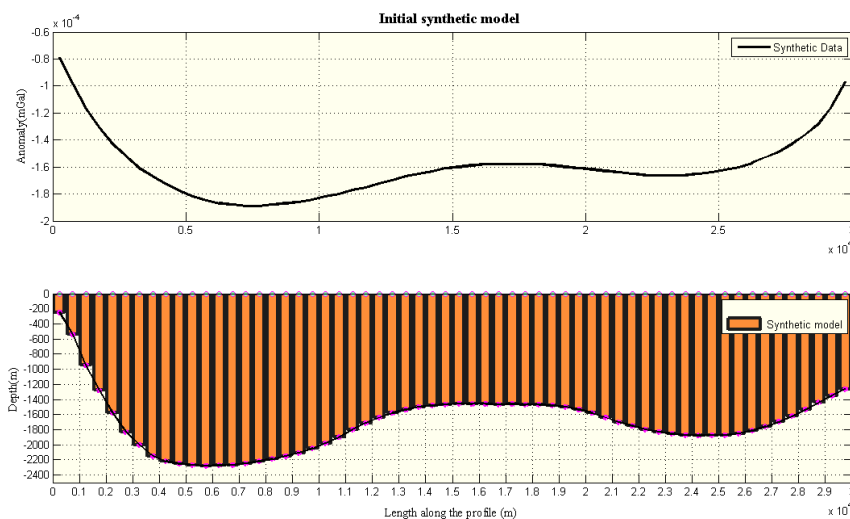
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این تحقیق به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم توسعه داده شده برای وارون سازی غیرخطی داده‌های گرانی، از داده‌های شبیه‌سازی شده یک مدل مصنوعی با فرضیاتی مشخص استفاده شد. داده‌های این مدل مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و همراه با نوفه سفید مستقل تولید و مدل‌سازی شدند و با مقایسه آن با مدل اولیه، میزان انحراف از پاسخ حقیقی و به عبارتی رواداری پاسخ‌های ارائه شده برای آن روش معین گردید.

۴-۲ مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت)

الف - مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت) - بدون نوفه

مدل مصنوعی دوبعدی سنگ بستر در نظر گرفته شده در این تحقیق، از ۶۰ منشور با عرض ۵۰۰ متر و تغییرات عمقی نسبتاً پیچیده به صورت دو فروافتادگی با عمق‌های متفاوت تشکیل شده است. توپوگرافی سطح زمین مسطح و تباین چگالی رسوبات و سنگ بستر منفی ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

همچنین به منظور اجرای الگوریتم پیشنهادی و مدل‌سازی داده‌های گرانی، مغناطیس و نیز ارائه نتایج به صورت بصری، یک برنامه در محیط متلب نوشته شد. با استفاده از برنامه پیشروی گرانی نوشته شده، در هر یک از نقاط اندازه‌گیری فرضی (در سطح زمین با فواصل مساوی و درست در نقطه میانی منشورها در نظر گرفته شد) تاثیر گرانی تک منشورها محاسبه و مقدار آنومالی گرانی مورد انتظار در آن نقاط بر اساس روابط ((۲-۱۰) و ((۲-۱۲) محاسبه شد. در شکل ۴-۱ مدل مصنوعی مزبور به همراه نمودار تغییرات اثر گرانی حاصل از منشورهای مدل مصنوعی، نمایش داده شده است.

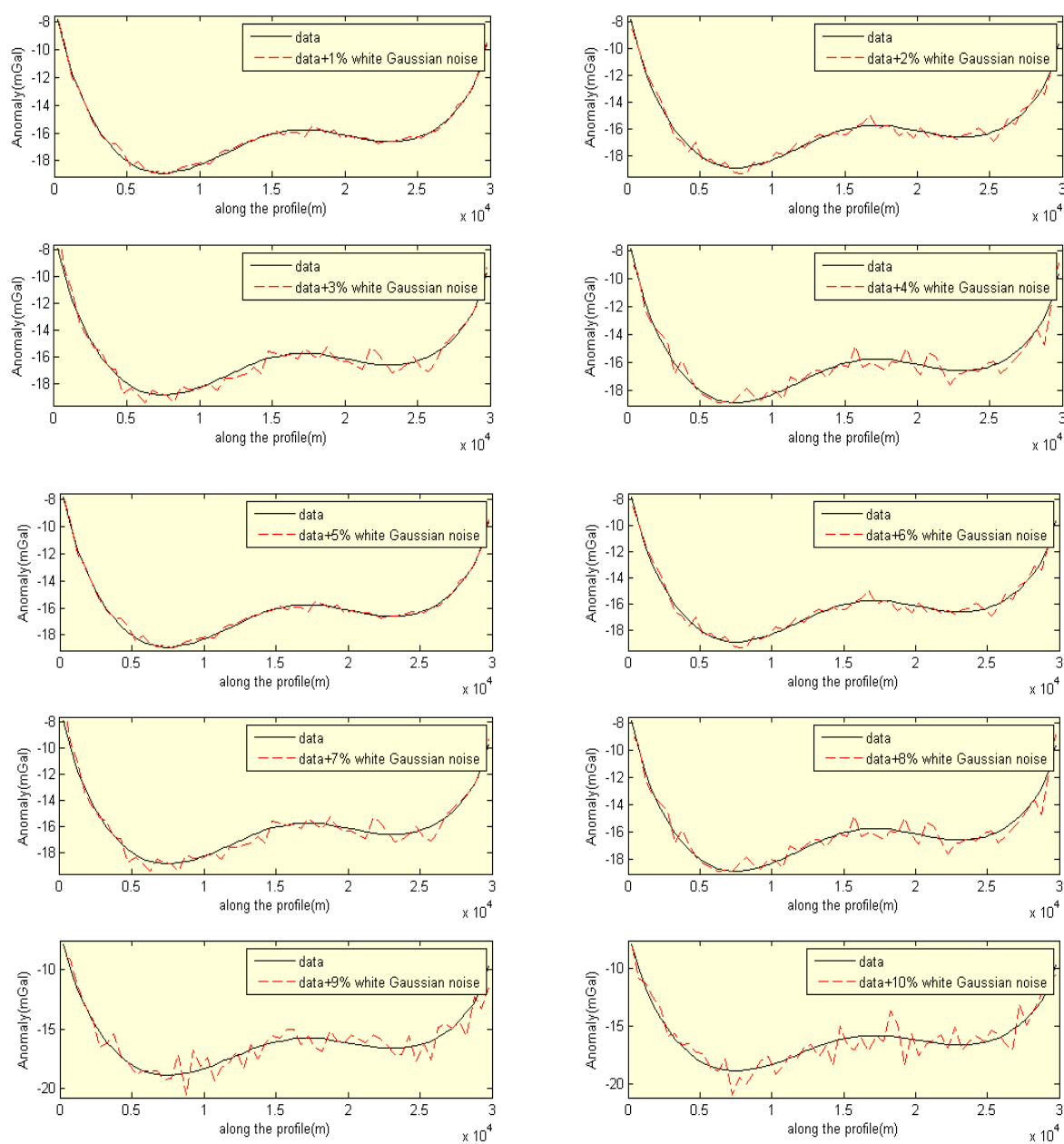


شکل ۴-۱ مدل مصنوعی گرانی یک حوضه رسوبی (با دانسیته ثابت) منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی گرانی بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا).

ب- مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت) – همراه با نوفه

از آنجا که داده‌های واقعی برداشت شده از طبیعت همواره همراه با نوفه‌هایی می‌باشند، لازم است کارایی الگوریتم و برنامه تولید شده برای مدل‌سازی این نوع از داده‌ها مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گیرد. از آنجا که توزیع نوفه در حالت طبیعی توزیعی گوسی با میانگین صفر است؛ در این تحقیق به منظور ارزیابی بررسی تاثیرپذیری و عملکرد الگوریتم توسعه داده شده در برابر نوفه‌های سفید گوسی، نوفه‌ای مستقل از داده با توزیع گوسی با دامنه‌های از ۱ تا ۱۰ درصد داده‌ها به داده‌های خام مدل مصنوعی افزوده شد و برای هر سری از داده‌ها مدل‌سازی‌ها و مقایسه با مدل اصلی انجام شد.

در شکل ۴-۲ وضعیت داده‌های بدست آمده پس از اضافه نمودن نوفه با داده‌های بدون نوفه مقایسه شده است.



شکل ۴-۲ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده‌های گرانی‌سنجی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) و قیاس آنها با داده‌های اصلی.

۴-۲-۱ مدل سازی وارون داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت) با استفاده از الگوریتم مورچگان

در این تحقیق برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) هر منشور، از یک تخمین عمق اولیه بر مبنای رابطه تصحیح بوگه استاندارد استفاده شد. بدین شکل که با استفاده از هر یک از داده‌های گرانی، یک تخمین عمق تقریبی سنگ بستر صورت گرفت. برای تعیین عمق تقریبی منشورهای مدل از رابطه (۴-۱) استفاده شد [۵۸].

$$Z_j^0 = \frac{\Delta g_j^{obs}}{2\pi G \Delta \rho} \quad (۴-۱)$$

در این رابطه: Z_j^0 تخمین عمق اولیه برای منشور j ام، G ثابت جهانی گرانش، Δg_j^{obs} آنومالی گرانی در نقطه مرکزی لبه بالایی منشور j ام (در صورتی که در نقطه مزبور چنین داده‌ای وجود نداشته باشد، می‌توان از طریق درونیابی داده‌های مجاور را تعیین نمود) و $\Delta \rho$ نیز تباین چگالی منشور j ام است. پس از تخمین عمق اولیه، مرزهای بالا و پایین جستجوی عمق هر منشور (Z) برابر را می‌توان از طریق ضرب دو فاکتوری با مشخصات $Bound_{min} < 1$ و $Bound_{max} > 1$ تعیین نمود (رابطه (۴-۲)).

$$depth \in [Bound_{min} \cdot Z^0, Bound_{max} \cdot Z^0] \quad (۴-۲)$$

بدیهی است که به این ترتیب می‌توان برای هر منشور مرزهای جستجو را به اندازه‌ای مشخص محدود و یا روی بعضی منشورهای خاص به یک مقدار خاص مقید نمود. به طور کلی اعمال قیود در روش‌های جستجوی عمومی تنها با هدف محدود نمودن فضای جستجو به پاسخ‌های سازگار با اطلاعات پیشین و مدل طبیعت زمین است و با اهداف اعمال قیود در روش‌های محلی که برای پایدارسازی عملیات وارون‌سازی انجام می‌شود؛ تفاوت دارد [۲۹]. بر این اساس در مدل‌سازی‌های به روش جستجوی عمومی برای همخوانی بیشتر پاسخ‌های تولیدی با واقعیت‌های طبیعی مدل زمین، قیودی برای هموارسازی پاسخ‌ها اعمال می‌گردد؛ تا

تغییرات پارامترهای مجاور یکدیگر هموار شده و با طبیعت همخوانی بیشتری داشته باشد. یکی از قیود هموارکننده که در مدل سازی های سنگ بستر می توان بکار گرفت، استفاده از پنجره میانگین متحرک است؛ که از تولید مدل های دندان دندانه و اره ای شکل که با واقعیت طبیعت همخوانی ندارند؛ جلوگیری می نماید که در این مدل سازی نیز بکار گرفته شد [۲۹].

در این مدل سازی که تابع هدف تابعی از اختلاف آنومالی محاسبه شده و آنومالی اندازه گیری شده است؛ در نهایت با بررسی و مرور مطالعات مشابه گذشته [۲۹] در زمینه مدل سازی داده های گرانی؛ تابع هزینه در نظر گرفته شده مطابق رابطه (۳-۴) طراحی شد.

$$C^g = \left\| \frac{\Delta g^{obs} - \Delta g^{cal}}{\Delta g^{obs}} \right\|_2 \quad (3-4)$$

در این رابطه C^g هزینه و Δg^{obs} و Δg^{cal} به ترتیب آنومالی گرانی مشاهده ای و آنومالی گرانی محاسبه شده بر مبنای راه حل نمونه برداری از فضای مدل است. همچنین برای توزیع غلظت فرومون بر روی گره ها مسئله با توجه مطالعات مشابه پیشین از یکی از جدیدترین روش ها به نام روش سیستم گاوسی [۳۸] استفاده شد:

$$\nabla \tau_{(i,j)}^{(s)}(t) = \begin{cases} Ae^{-\frac{(C^g)^s - \mu(C^g)}{\sigma(C^g)}} & \text{if ants travels the node}(i,j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-4)$$

در این رابطه μ و σ به ترتیب به میانگین و انحراف از میانگین را نشان می دهند و A ثابت کنترلی است که در این مطالعه مقدار آن ۱ در نظر گرفته شده است.

پارامترهای q_0 ، ضریب تبخیر، فرومون اولیه، فاصله گره ها در عمق و تعداد مورچه ها بر اساس سوابق کاربرد این الگوریتم در مسائلی با تعداد متغیر مشابه و مقایسه با شرایط مسئله فعلی تعیین شدند [۳۵] و ۳۸ و ۳۹ و ۹۶ و ۱۱۵]. برای تعیین q_0 با توجه به مطالعات مشابه [۳۹] و در نظر داشتن تعادل در دو وجه جستجوگری و استفاده از جنبه فرااکتشافی الگوریتم مقدار آن دقیقاً ۰/۵ در نظر گرفته شد تا تعادل حفظ گردد. ضریب تبخیر با توجه به مطالعات مشابه [۳۹] و نیز منابع پایه معرفی این الگوریتم [۳۵] و [۱۱۵]

اگر در بازه $0/1$ تا $0/2$ اختیار شود عمدتاً عملکرد مطلوبی خواهد داشت و از این رو مقدار آن در این مدل سازی $0/1$ در نظر گرفته شد. فرومون اولیه که ارتباط مستقیم با میزان جستجوگری مسئله در ابتدای جستجو دارد در این مسئله نسبت به مسائل مشابه [۳۹]، مقدار بالاتری در نظر گرفته شد و مقدار عددی ۱ برای آن لحاظ گردید. فاصله گره ها در عمق برای افزایش سطح دقت مدل سازی و نزدیک تر شدن به حالت جستجوی پیوسته، مقدار آن ۱ متر در نظر گرفته شد. برای تعیین تعداد مورچه ها اگرچه در برخی منابع پایه ای این الگوریتم، برای مسائل گسسته توصیه شده است تا این عدد برابر با تعداد گره های طراحی شده در مسئله باشد اما از آنجاکه این پارامتر تاثیر بسیار زیادی بر حجم محاسباتی اجرای برنامه دارد در مدل سازی ها گرانی سنجی با تعداد پارامترهای بسیار بالا، امکان اعمال این تعداد مورچه وجود نداشته و در صورت اعمال، اجرای برنامه بسیار زمانبر خواهد شد. بر این اساس و باتوجه به مدل سازی های پیشتر و با سعی و خطا در این مدل سازی، تعداد آن ها ۵۰۰ عدد تعیین شد.

پارامترهای تنظیمی الگوریتم مورچگان طراحی شده برای مدل سازی داده های این مدل مصنوعی در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

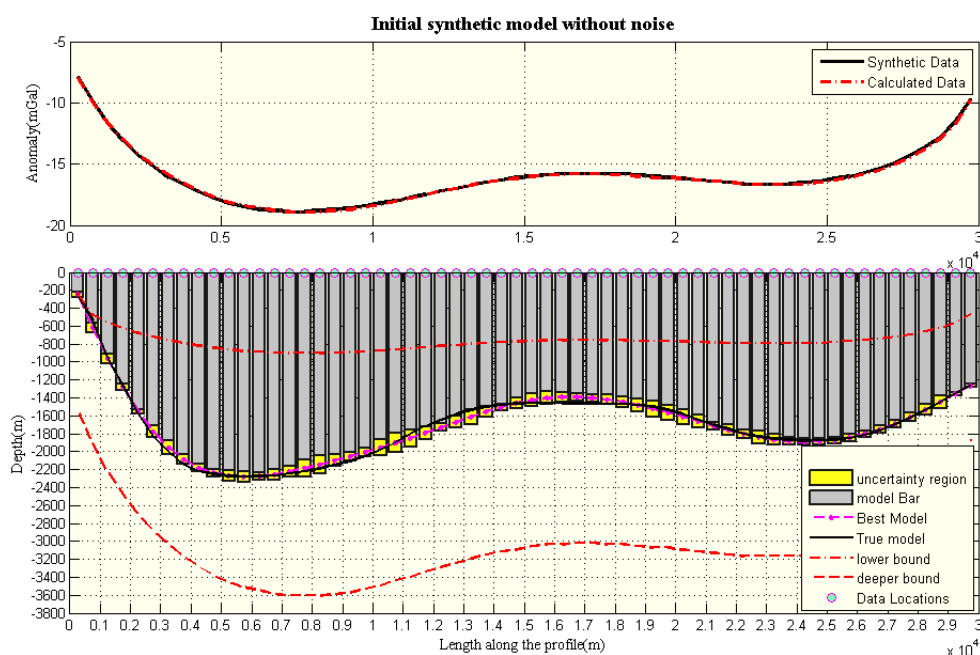
جدول ۱-۴ پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل سازی داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت).

q_0	ضریب تبخیر	فرومون اولیه	فاصله گره ها در عمق (m)	تعداد مورچه ها
۰/۵	۰/۱	۱	۱	۵۰۰

همچنین برای تعیین مرزهای جستجو از روابط (۱-۴) و (۲-۴) استفاده شد و مقدار $\text{Bound}_{\min}$ و $\text{Bound}_{\max}$ با توجه به مقادیر بکار گرفته شده در گزارشات مطالعات با روش های فراابتکاری مشابه [۲۹]، به ترتیب $0/5$ و ۲ تعیین گردید.

بمنظور تعیین عدم قطعیت پاسخ ها، نظر به شرایط مسئله و با بررسی و مرور مطالعات مشابه گذشته [۳۶]؛ ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف معیار پاسخ های بهینه برای تک تک بلوک ها تعیین شد و بر

مبنای مطالعات مشابه گذشته [۳۰]؛ مقدار ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر بلوک تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات^۱ اختلاف داده‌های حاصل از مدل بدست آمده با داده‌های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای تمامی مدل‌سازی بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم مورچگان در این مدل‌سازی در پیوست الف-۱ ارائه شده است.



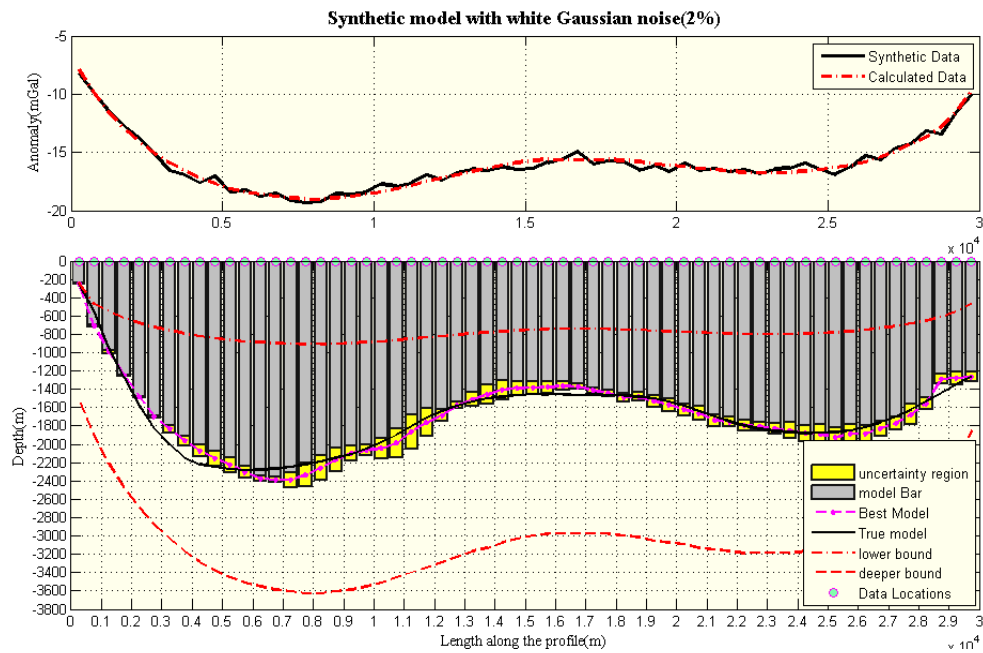
شکل ۳-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) RMSdata (=0.23mGal).

همانطور که در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است، اختلاف مدل و داده‌های تولیدی با مدل مصنوعی و داده‌های مصنوعی اولیه بسیار اندک می‌باشد و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصله از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به

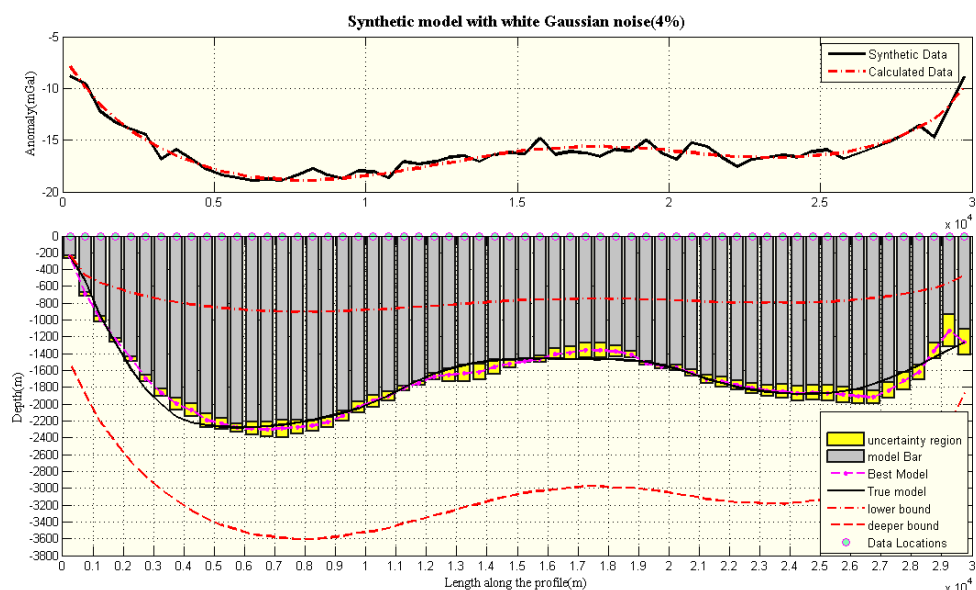
^۱ Root Mean Squar (RMS)

صورت کمی بر این امر دلالت می‌نماید.

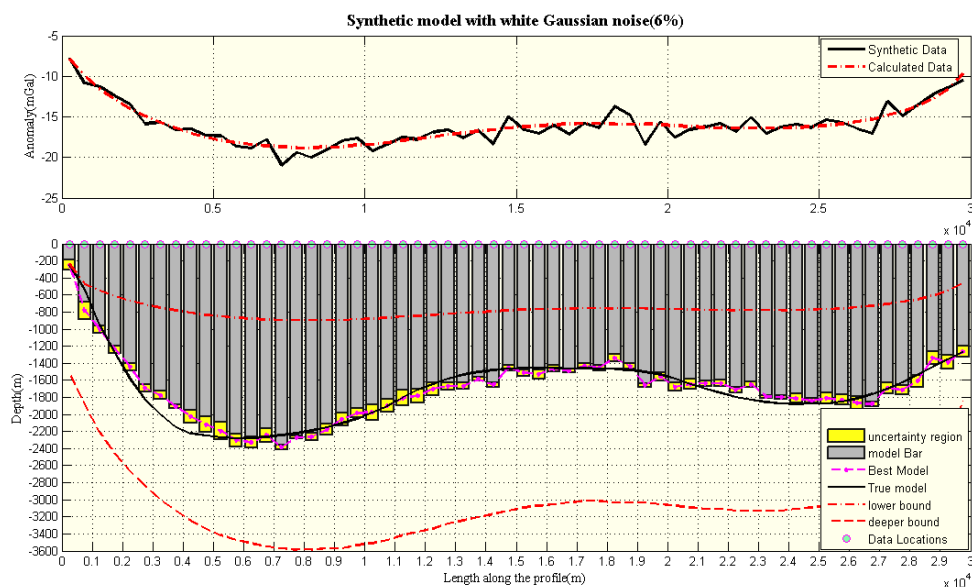
همه سری داده‌های آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی شدند و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۴ تا شکل ۴-۷ آورده شده است.



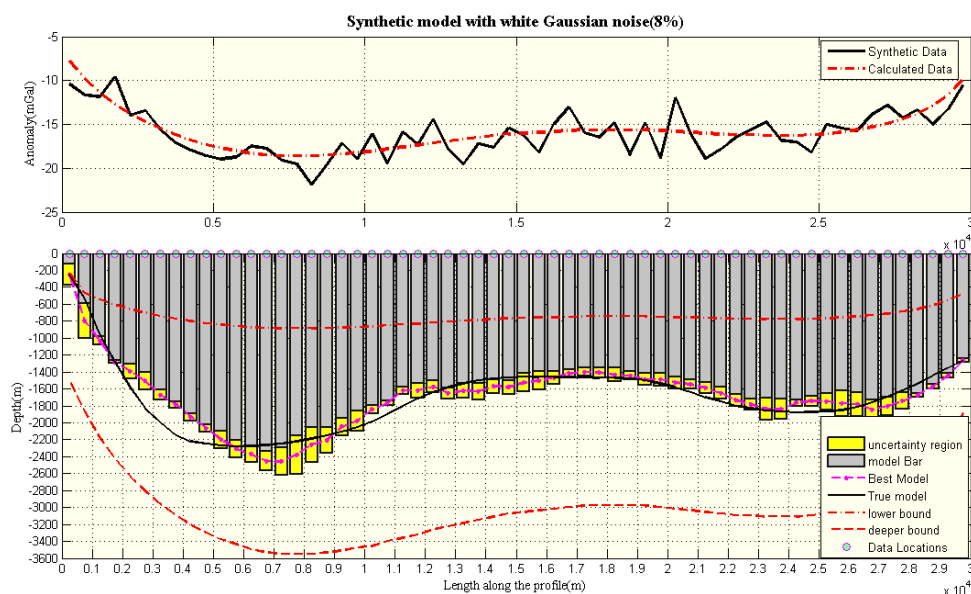
شکل ۴-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.29mGal$)



شکل ۴-۵ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 0.36 \text{ mGal}$).



شکل ۴-۶ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 0.90 \text{ mGal}$).



شکل ۴-۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 1.61 \text{ mGal}$).

۴-۲-۲ مدل‌سازی وارون داده‌های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) هر منشور مشابه مدل‌سازی داده‌های گرانی مدل مصنوعی با دانسیته ثابت؛ از رابطه (۴-۱) استفاده و نیز برای تعیین مرزهای بالا و پایین جستجوی عمق هر منشور (Z) رابطه (۴-۲) بکار گرفته شد و مقادیر $Bound_{min}$ و $Bound_{max}$ با توجه به مقادیر استفاده شده در مطالعات و تحقیقات منتشر شده با روش‌های فراابتکاری مشابه [۲۹] و شرایط مسأله به ترتیب ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شد. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی نیز مطابق رابطه (۴-۳) در نظر گرفته شد.

پارامترهای تعداد کشورها، تعداد امپراطوری‌های اولیه، حداکثر زاویه انحراف در حرکت به سمت استعمارگر، ضریب حرکت مستعمره به سمت استعمارگر، فاکتور انقلاب در پاسخ‌ها و ضریب در محاسبه

هزینه کلی یک امپراطوری بر اساس سوابق کاربرد این الگوریتم در مسائلی با تعداد متغیر مشابه و مقایسه با شرایط مسئله فعلی تعیین شدند [۹۷-۱۰۶]. تعداد جمعیت کشورها بر اساس سوابق کاربرد این الگوریتم در مسائلی با تعداد متغیر تقریباً مشابه [۹۷-۱۰۶] بین ۵۰ تا بیشینه ۳۰۰ گزارش شده است؛ در این مدل سازی برای افزایش جستجوگری الگوریتم و همچنین حفظ زمان مطلوب برای همگرایی، از مقدار ۲۵۰ استفاده شد. برای تعیین تعداد امپراطوریه‌ها یا همان تعداد استعمارگرهای اولیه با توجه به اینکه در برخی منابع و گزارشات جدید از اجرای این الگوریتم، پیشنهاد شده است تا این عدد نزدیک به ریشه دوم تعداد کل کشورها باشد [۱۰۵] این پارامتر ۱۵ در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای حداکثر زاویه انحراف در حرکت به سمت استعمارگر و ضریب حرکت مستعمره به سمت استعمارگر، بر اساس منابع پایه‌ای این الگوریتم [۹۷ و ۹۸ و ۱۰۳]، به ترتیب $\pi/4$ رادیان و ۲ در نظر گرفته شدند. همچنین فاکتور انقلاب در پاسخ‌ها نیز که در برخی گزارشات یا در نظر گرفته نشده و یا در حدود ۰/۱ تا نهایتاً ۰/۳ لحاظ شده است [۱۰۲ و ۱۰۳ و ۱۰۶]، مقدار آن ۰/۱ در نظر گرفته شد.

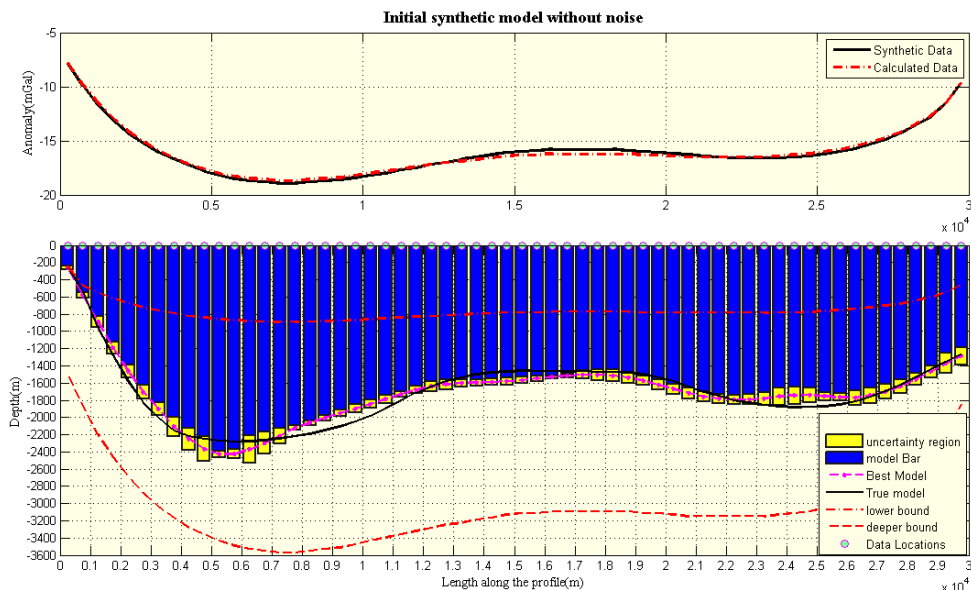
پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA طراحی شده برای مدل سازی داده‌های این مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر) در جدول ۲-۴ ارائه شده است.

جدول ۲-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA در مدل سازی داده‌های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت).

تعداد کشورها	تعداد امپراطوری‌های اولیه	حداکثر زاویه انحراف در حرکت به سمت استعمارگر(رادیان)	ضریب حرکت مستعمره به سمت استعمارگر	فاکتور انقلاب در پاسخ‌ها	ضریب محاسبه هزینه کلی یک امپراطوری از میانگین سایر مستعمرات(۸)
۲۵۰	۱۵	$\pi/4$	۲	۰/۱	۰/۱۵

همچنین مشابه سایر مدل سازی‌های انجام پذیرفته برای روی داده‌های مدل مصنوعی گرانی با دانسیته ثابت؛ در این مدل سازی نیز جهت تعیین عدم قطعیت پاسخ‌ها، ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف معیار پاسخ‌های بهینه برای تک تک بلوک ها تعیین شد و ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر

بلوک تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده‌های حاصل از مدل بدست آمده با داده‌های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای همه مدل‌سازی‌ها بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم رقابت استعماری در این مدل‌سازی در پیوست الف-۲ ارائه شده است.

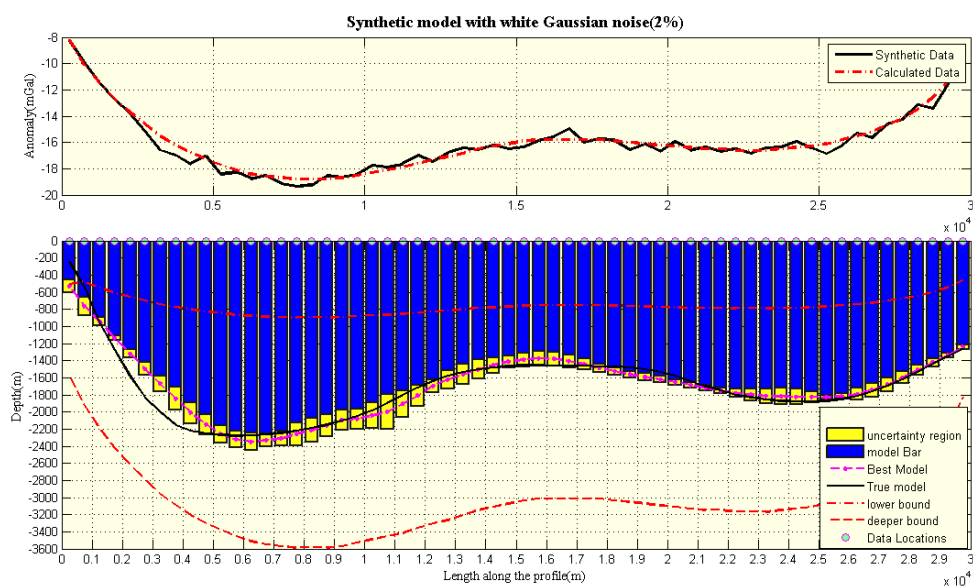


شکل ۴-۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) RMSdata (=0.21mGal).

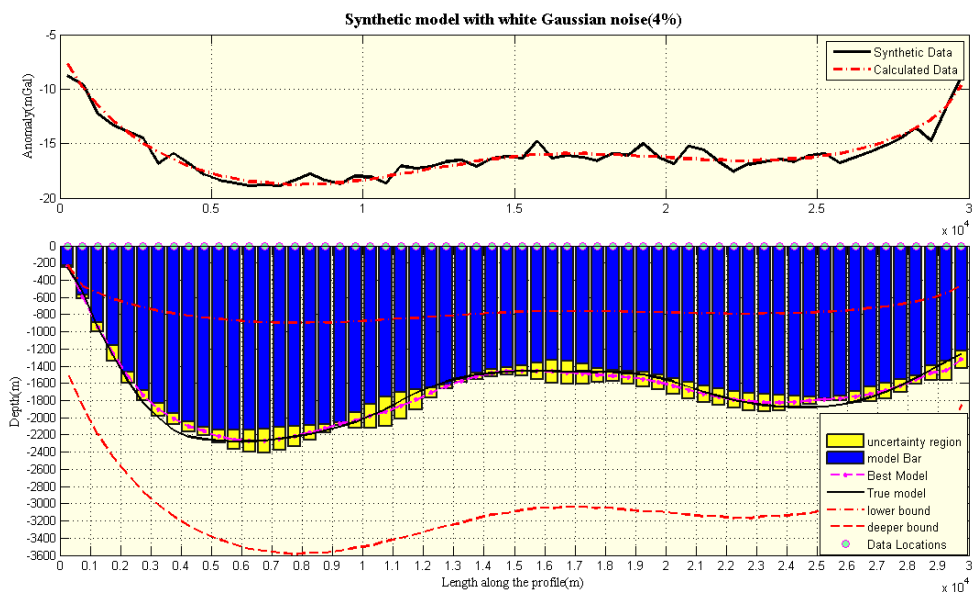
در شکل ۴-۸ مطابقت مطلوب بین مدل و داده‌های تولیدی با مدل مصنوعی و داده‌های مصنوعی اولیه به روشنی نمایان است و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصله از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی بر این امر دلالت می‌نماید.

هر یک از دسته داده‌های آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی شدند و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۸ تا شکل

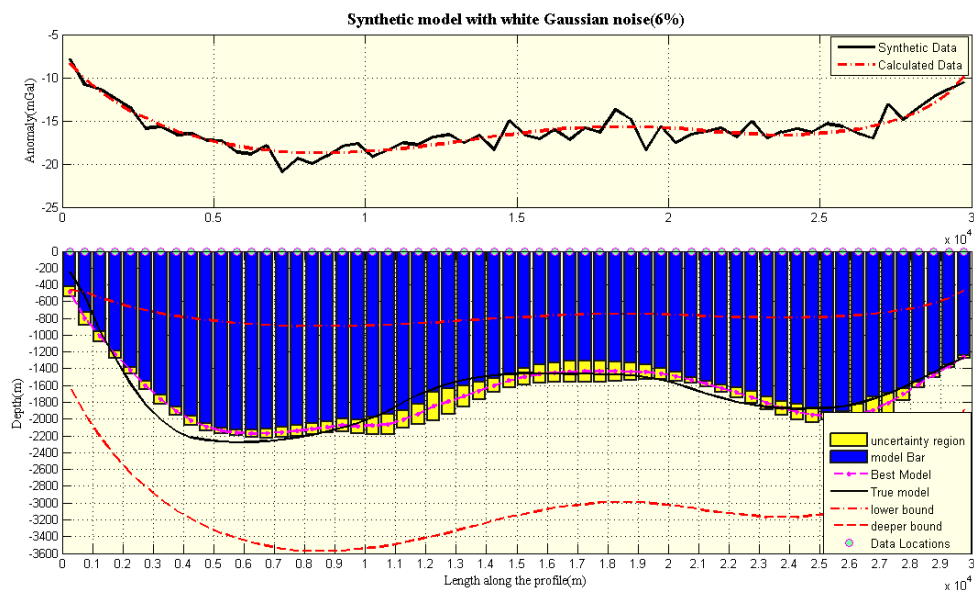
۱۱-۴ آمده است.



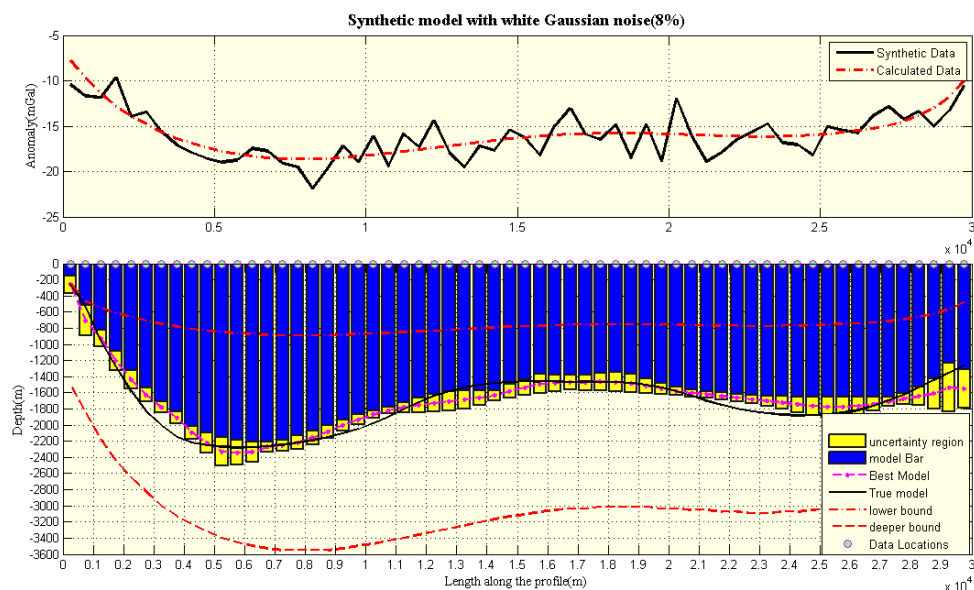
شکل ۹-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 0.40 \text{ mGal}$)



شکل ۱۰-۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 0.59 \text{ mGal}$).



شکل ۴-۱۱ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.93\text{mGal}$).



شکل ۴-۱۲ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data}=1.6\text{mGal}$).

۳-۲-۴ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از هیبرید الگوریتم های رقابت استعماری و کرم شب تاب (ICA-FA)

برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) هر منشور مشابه مدل سازی داده های گرانی مدل مصنوعی با دانسیته ثابت؛ از رابطه (۱-۴) استفاده و نیز برای تعیین مرزهای بالا و پایین جستجوی عمق هر منشور (Z) رابطه (۲-۴) بکار گرفته شد و مقادیر $Bound_{min}$ و $Bound_{max}$ با توجه به مقادیر بکار گرفته شده در مطالعات و تحقیقات منتشر شده با روش های فراابتکاری مشابه [۲۹] و شرایط مسأله به ترتیب ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شد. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل سازی نیز مطابق رابطه (۳-۴) در نظر گرفته شد. در این مدل سازی پارامترهای مربوط به الگوریتم ICA مشابه مدل سازی داده های مصنوعی گرانی سنجی توسط الگوریتم ICA تعیین شدند و تنها به سبب افزایش ذاتی سرعت جستجو و همگرایی این الگوریتم در نسخه هیبریدی، در این نسخه تعداد کشورها تا حدودی کاهش داده شد و به عدد ۲۰۰ رسید. همچنین دو پارامتر ضریب جذب نور و حداکثر جذابیت؛ که مربوط به بخش الگوریتم کرم شب تاب بودند بر اساس گزارشات پیشین مربوط به هیبرید این دو الگوریتم [۱۰۵ و ۱۱۲] تعیین شدند.

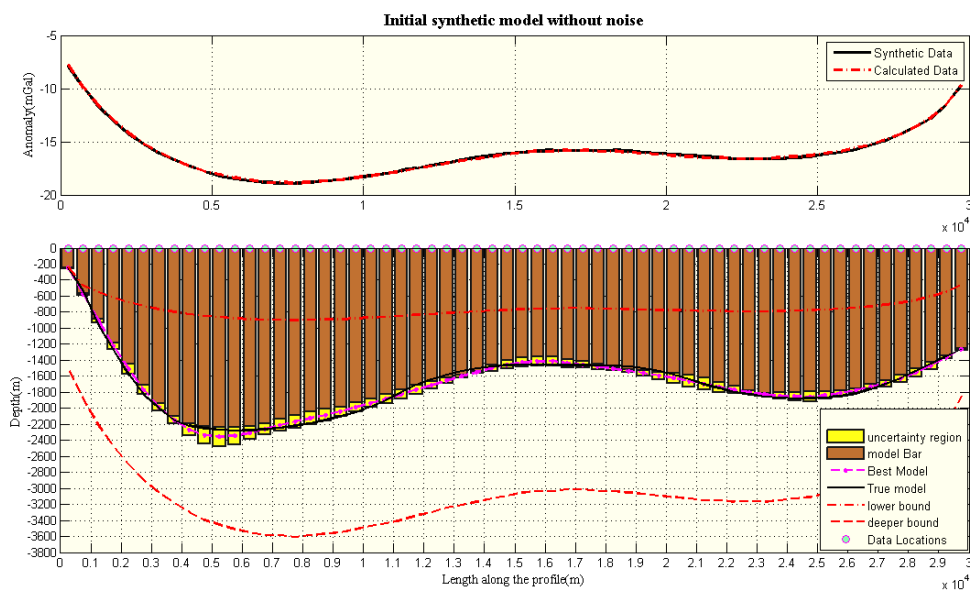
پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA-FA طراحی شده برای مدل سازی داده های این مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر) در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴ پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA-FA در مدل سازی داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته ثابت).

تعداد کشورها	تعداد امپراطوری های اولیه	فاکتور انقلاب در پاسخ ها	ضریب جذب نور	حداکثر ضریب جذابیت	ضریب محاسبه هزینه کلی یک امپراطوری از میانگین سایر مستعمرات (A)
۲۰۰	۱۵	۰/۱	۱	۲	۰/۱۵

همچنین مشابه سایر مدل سازی های انجام پذیرفته برای روی داده های مدل مصنوعی گرانی با دانسیته ثابت؛ در این مدل سازی نیز جهت تعیین عدم قطعیت پاسخ ها، ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف

معیار پاسخ‌های بهینه برای تک تک بلوک‌ها تعیین شد و ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر بلوک تعیین شد. همچنین بطور مشابه به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده‌های حاصل از مدل بدست آمده با داده‌های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای تمامی مدل‌سازی بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم ICA-FA در این مدل‌سازی در پیوست الف-۳ ارائه شده است.

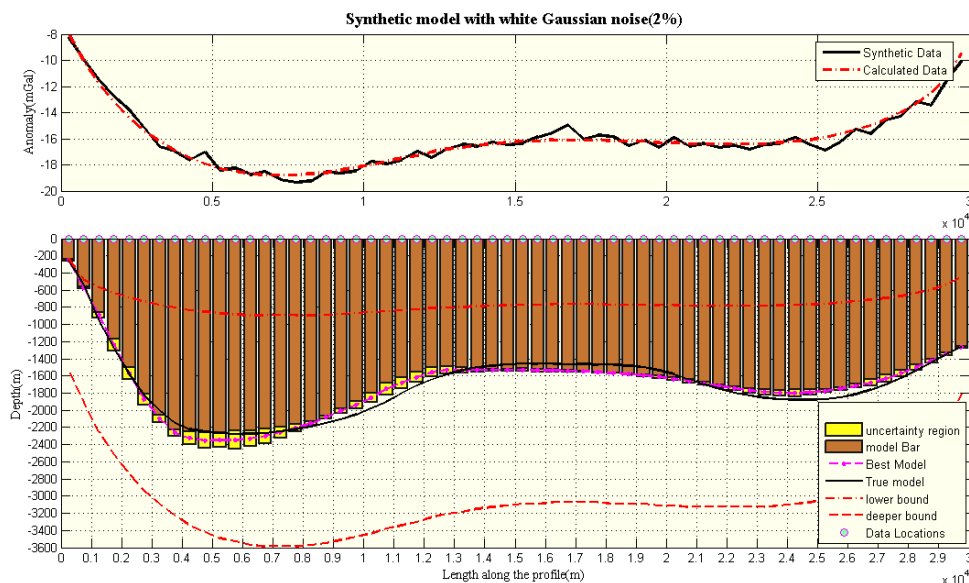


شکل ۴-۱۳ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) $RMS_{data} (=0.07mGal)$.

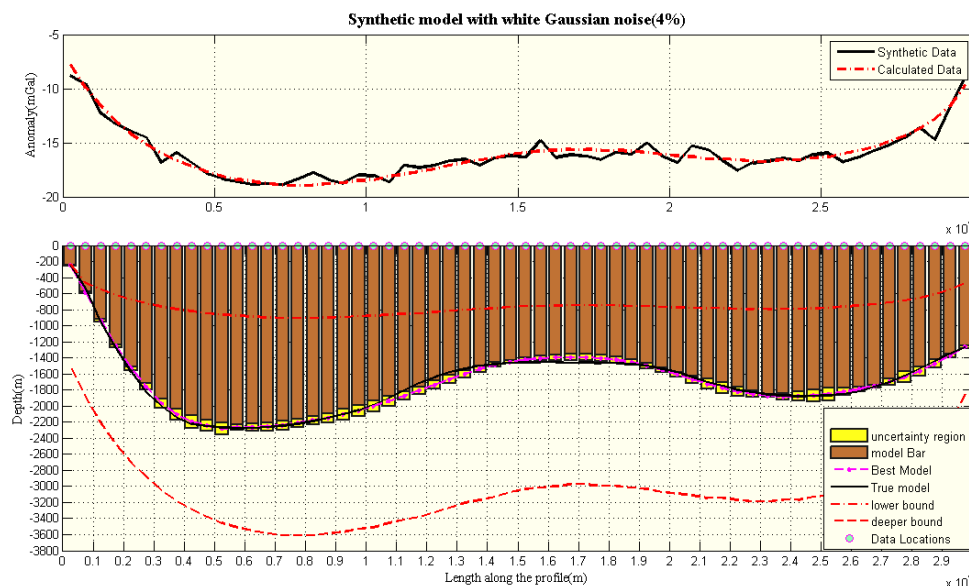
در شکل ۴-۱۸ مطابقت مطلوب بین مدل و داده‌های تولیدی با مدل مصنوعی و داده‌های مصنوعی اولیه بروشنی نمایان است و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصله از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی بر این امر دلالت می‌نماید.

هر یک از دسته داده‌های آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی شدند و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های

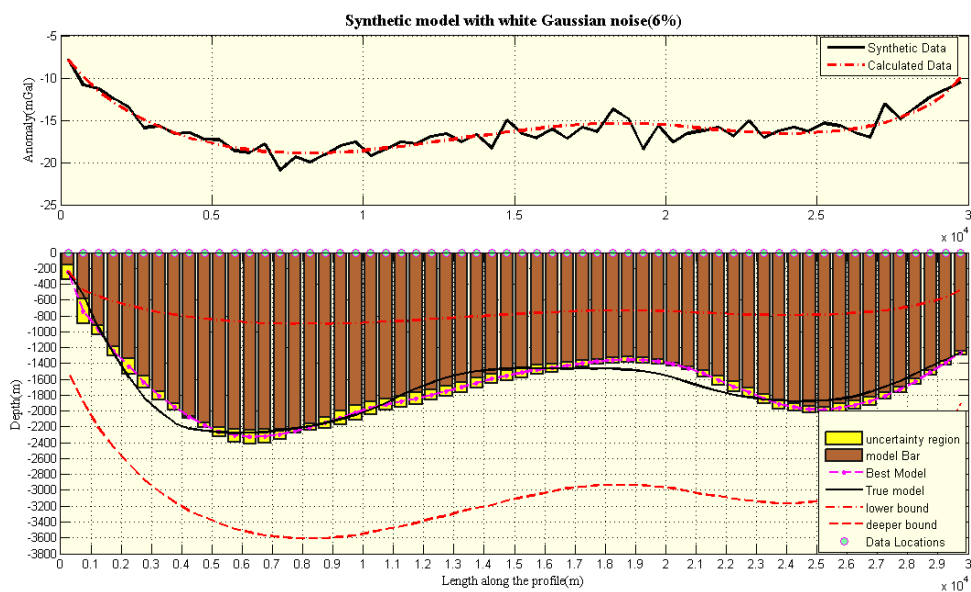
اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۱۴ شکل ۴-۱۷ آمده است.



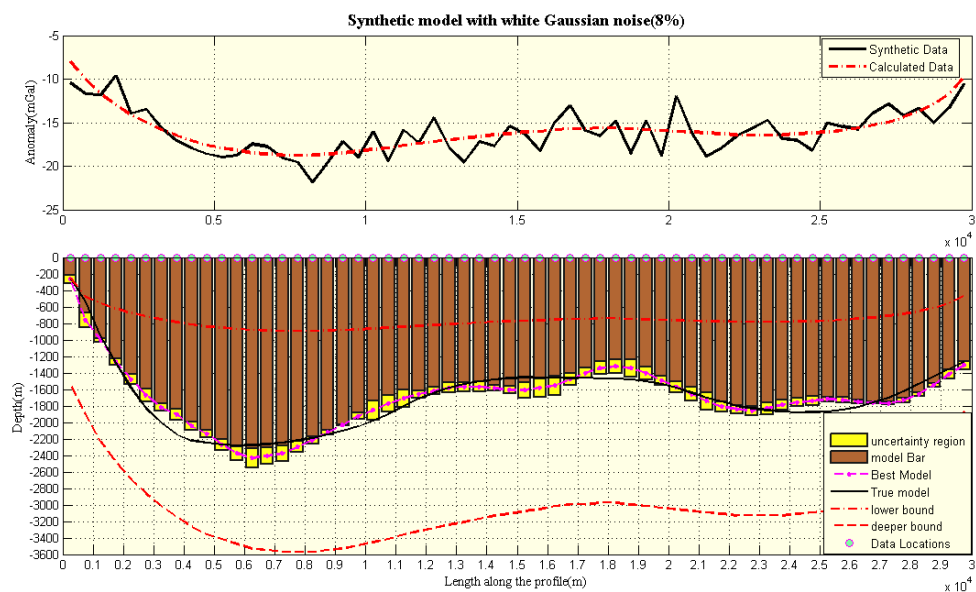
شکل ۴-۱۴ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.38mGal$).



شکل ۴-۱۵ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.35mGal$).



شکل ۴-۱۶ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 0.93 \text{ mGal}$).

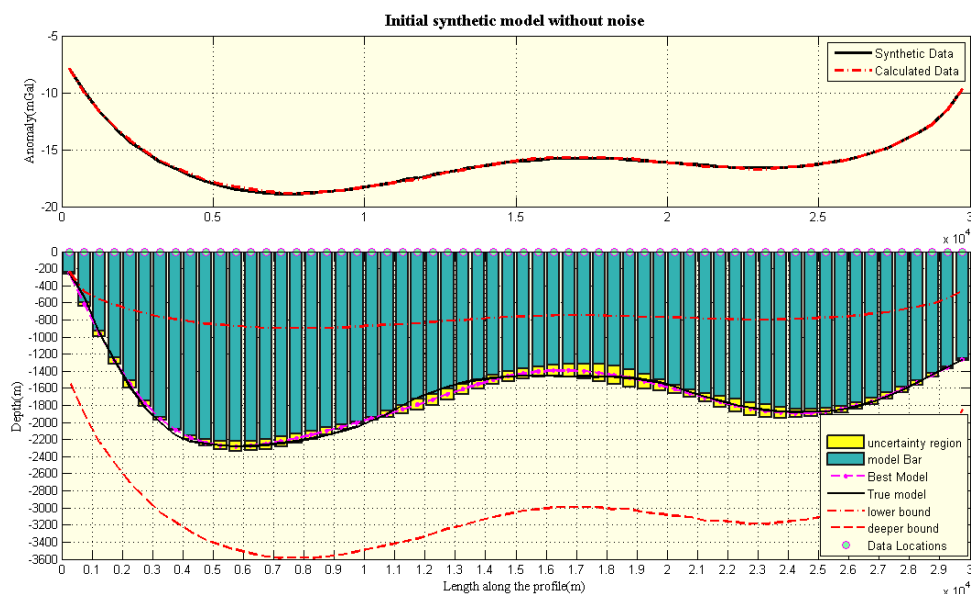


شکل ۴-۱۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 1.53 \text{ mGal}$).

۴-۲-۴ مدل سازی وارون داده‌های مدل مصنوعی گرانی با استفاده از الگوریتم رقابت ذرات

برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) هر منشور مشابه مدل سازی داده‌های گرانی مدل مصنوعی با دانسیته ثابت، از رابطه (۱-۴) استفاده و نیز برای تعیین مرزهای بالا و پایین جستجوی عمق هر منشور (Z) رابطه (۲-۴) بکار گرفته شد و مقادیر $Bound_{min}$ و $Bound_{max}$ با توجه به مقادیر بکار گرفته شده در مطالعات و تحقیقات منتشر شده با روش‌های فراابتکاری مشابه [۲۹] و شرایط مسأله به ترتیب ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شد. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل سازی نیز مطابق رابطه (۳-۴) در نظر گرفته شد.

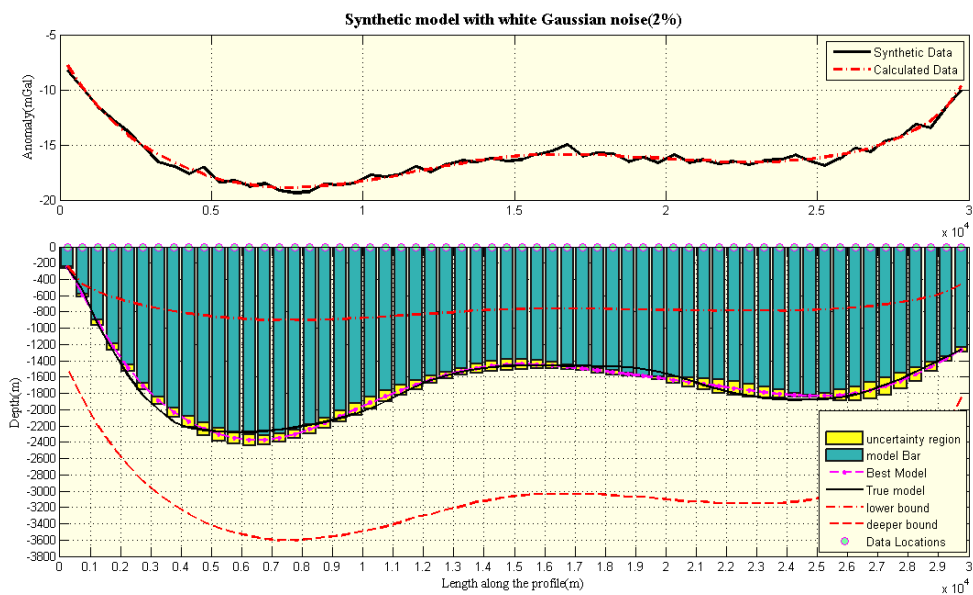
همچنان‌که پیشتر اشاره شد این الگوریتم پارامترهای تنظیمی کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مشابه داشته و اغلب پارامترهای آن مقادیر تصادفی در بازه صفر و یک می‌باشند و شاید تنها پارامترهای مسأله اندازه جمعیت ذرات باشد که در این مدل سازی برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین برای تعیین عدم قطعیت پاسخ‌ها، مشابه سایر مدل سازی‌های انجام پذیرفته برای روی داده‌های مدل مصنوعی گرانی با دانسیته ثابت عمل شد. همچنین بطور مشابه به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده‌های حاصل از مدل بدست آمده با داده‌های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای همه مدل سازی‌ها بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم رقابت ذرات در این مدل سازی در پیوست الف-۴ ارائه شده است.



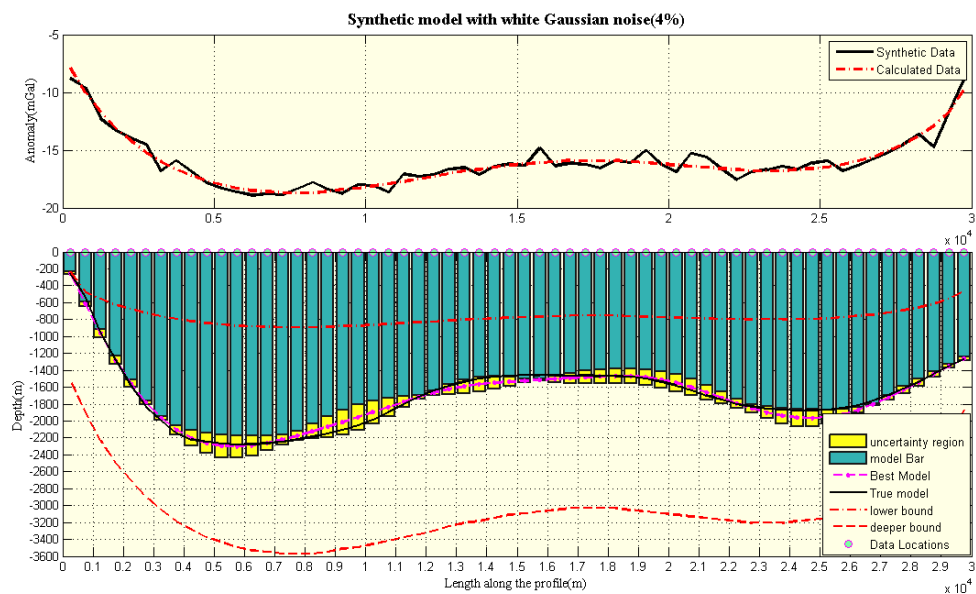
شکل ۴-۱۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) RMSdata (=0.08mGal).

شکل ۴-۱۸ اختلاف بسیار اندک مدل و داده‌های تولیدی با مدل مصنوعی و داده‌های مصنوعی را به تصویر کشیده است و بصورت کیفی نشان می‌دهد و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصله از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی بر این امر دلالت می‌نماید.

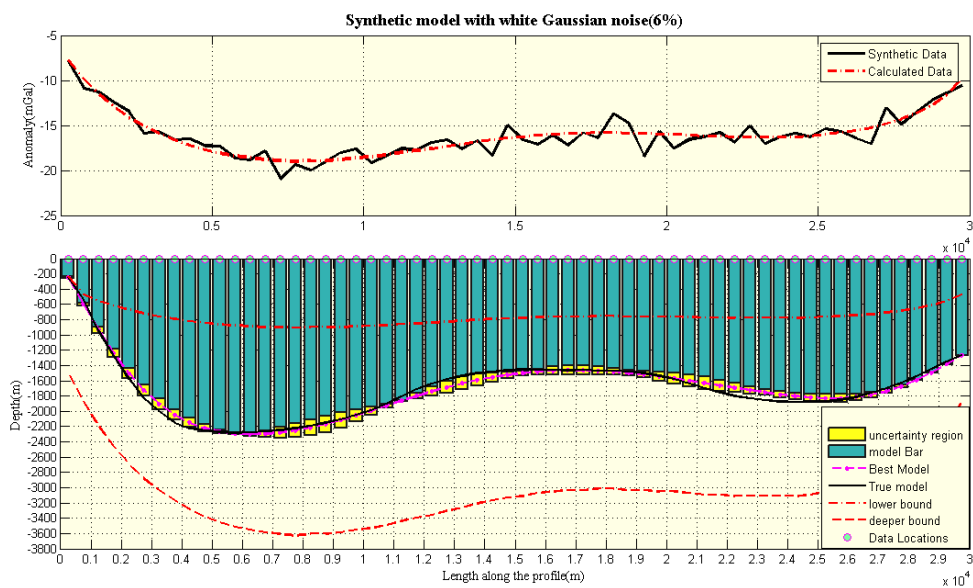
هر یک از دسته داده‌های آلوده به نوفه تولید شده، به کمک الگوریتم CSO مدل‌سازی شدند و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج مدل‌سازی‌های مذکور در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۱۹ تا شکل ۴-۲۲ آورده شده است.



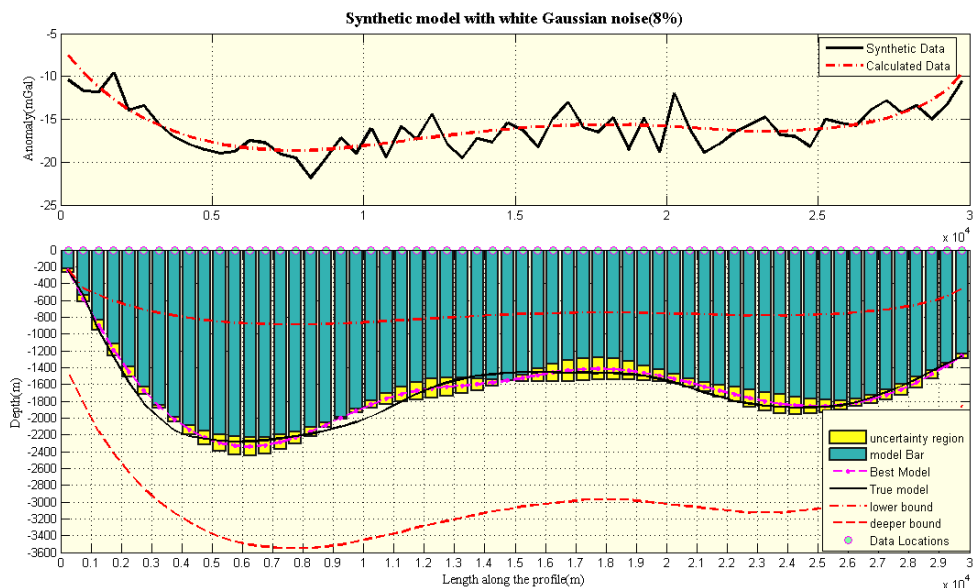
شکل ۴-۱۹ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.27mGal$)



شکل ۴-۲۰ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.56mGal$).



شکل ۴-۲۱ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.89 \text{ mGal}$).

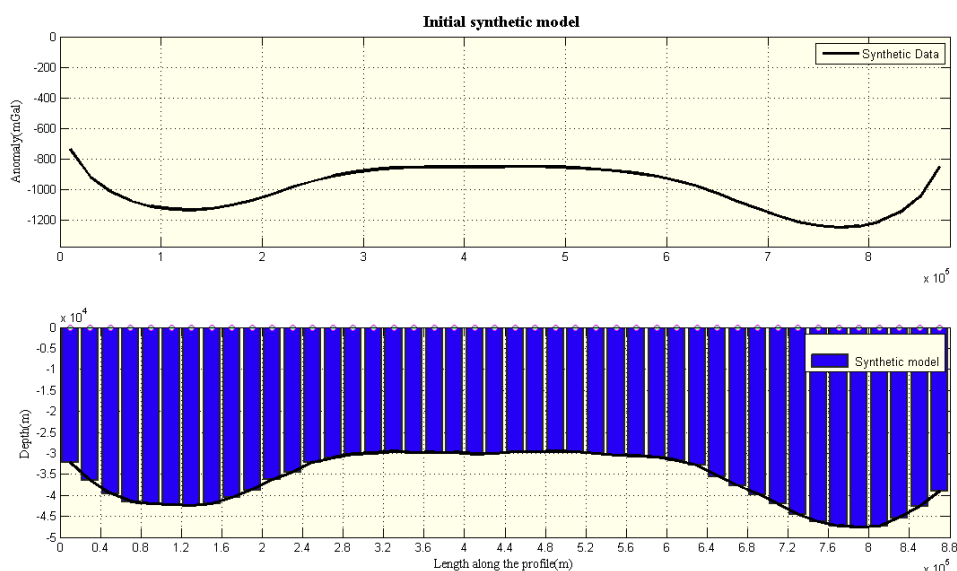


شکل ۴-۲۲ داده‌های گرانی مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=1.2 \text{ mGal}$).

۳-۴ مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق)

• مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) - بدون نوفه

به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌های عمیق، یک مدل مصنوعی با ضخامت بالا و بزرگ مقیاس شبیه به مدل مصنوعی‌های در نظر گرفته شده در مطالعات گذشته بر روی حوضه زاگرس ایران [۳۰]، در نظر گرفته شد و از این رو مدلی به طول ۸۸۰ کیلومتر با دو فروافتادگی با عمق حدود ۴۰ کیلومتر و تباین دانسیته سطحی ۶۰۰- کیلوگرم بر مترمکعب که با ضریب خطی ۰/۰۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب به ازای هر متر در عمق از آن کاسته می‌شود در نظر گرفته شد. با استفاده از برنامه پیشروی گرانی نوشته شده، در هر یک از نقاط اندازه‌گیری فرضی (در سطح زمین با فواصل مساوی و درست در نقطه میانی منشورها در نظر گرفته شد) تاثیر گرانی تک منشورها محاسبه و مقدار آنومالی گرانی مورد انتظار در آن نقاط بر اساس روابط (۲-۱۲) و (۲-۱۴) محاسبه شد. در شکل ۴-۲۳ مدل مصنوعی مزبور به همراه داده‌های گرانی حاصل از آن نمایش داده شده است.

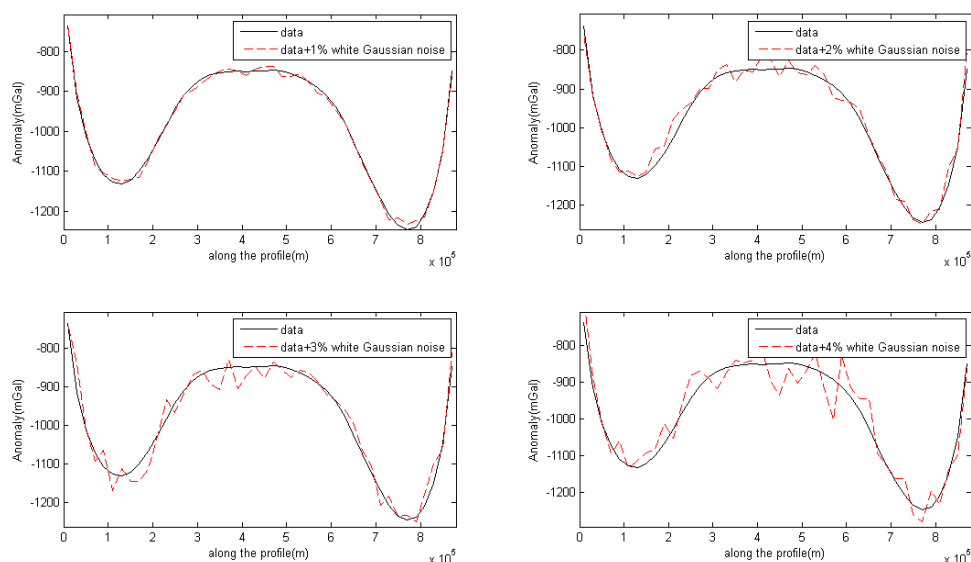


شکل ۴-۲۳ مدل مصنوعی گرانی یک حوضه رسوبی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی گرانی بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا).

• مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) – همراه با نوفه

مشابه مدل سازی داده های گرانی مدل مصنوعی با دانسیته ثابت، در این بخش از تحقیق نیز به منظور ارزیابی بررسی تاثیرپذیری و عملکرد الگوریتم توسعه داده شده در برابر نوفه های سفید گاوسی، نوفه ای مستقل از داده با توزیع گاوسی اما با دامنه های از ۱ تا ۴ درصد داده ها به داده های خام مدل مصنوعی افزوده شد و برای هر سری از داده ها مدل سازی ها و مقایسه با مدل اصلی انجام شد.

در شکل ۴-۲۴ وضعیت داده های بدست آمده پس از اضافه نمودن نوفه با داده های بدون نوفه مقایسه شده است.



شکل ۴-۲۴ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده های گرانی سنجی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) و قیاس آنها با داده های اصلی.

۴-۳-۱ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) با استفاده از ICA

برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) هر منشور مشابه مدل سازی داده های گرانی مدل مصنوعی

با دانسیته ثابت؛ از رابطه (۱-۴) با اندک تغییراتی استفاده شد. بدین صورت که برای مدلی ۲/۵ بعدی و تغییرات دانسیته (بصورت سهموی یا خطی) نسبت به عمق، رابطه (۱-۴) به فرم زیر قابل بکارگیری است [۵۶]:

$$Z_j^0 = \frac{\Delta g_j^{\text{obs}}}{2\pi G a_0} \quad (۵-۴)$$

که a_0 ترم اول رابطه سهموی تغییرات دانسیته نسبت به عمق یا همان تباین دانسیته در سطح زمین می باشد سایر پارامترهای در رابطه (۳-۴) در رابطه (۱-۴) تعریف شده اند.

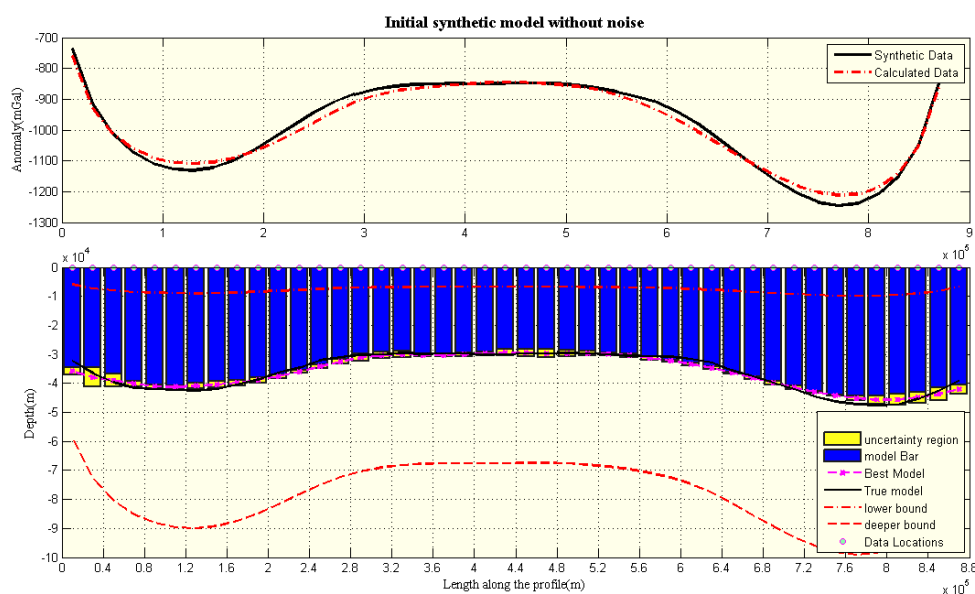
پس از تخمین عمق اولیه، برای تعیین مرزهای بالا و پایین جستجوی عمق هر منشور (Z) رابطه (۲-۴) بکار گرفته شد و مقادیر $\text{Bound}_{\min}$ و $\text{Bound}_{\max}$ با توجه به مقادیر بکار گرفته شده در گزارشات مطالعات با روش های فراابتکاری مشابه [۲۹] و شرایط مسأله به ترتیب ۰/۲۵ و ۲ در نظر گرفته شد. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل سازی نیز مطابق رابطه (۳-۴) در نظر گرفته شد. پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA برای این مدل سازی، تقریباً مشابه مدل سازی مدل مصنوعی گرانی سنجی با دانسیته ثابت در نظر گرفته شد تنها با این تفاوت که چون در بلوک بندی این مدل مصنوعی خاص، تعداد بلوک ها کمتر بود تعداد کشورها و به طبع آن استعمارگرهای اولیه نیز کاهش یافته و بترتیب ۱۰۰ و ۸ تعیین شدند.

پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA طراحی شده برای مدل سازی داده های این مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر) در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA در مدل سازی داده های مدل مصنوعی گرانی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق).

تعداد کشورها	تعداد امپراطوری های اولیه	حداکثر زاویه انحراف در حرکت به سمت استعمارگر	ضریب حرکت مستعمره به سمت استعمارگر	فاکتور انقلاب در پاسخ ها	ضریب محاسبه هزینه کلی یک امپراطوری از میانگین سایر مستعمرات (۸)
۱۰۰	۸	$\pi/4$	۲	۰/۱	۰/۱۵

همچنین مشابه مدل سازی های انجام پذیرفته برای روی داده های مدل مصنوعی گرانی با دانسیته ثابت؛ در این حالت نیز به منظور تعیین عدم قطعیت پاسخ ها، ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف معیار پاسخ های بهینه برای تک تک بلوک ها تعیین شد و ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر بلوک تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده های حاصل از مدل بدست آمده با داده های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای کلیه مدل سازی بکار گرفته شد.

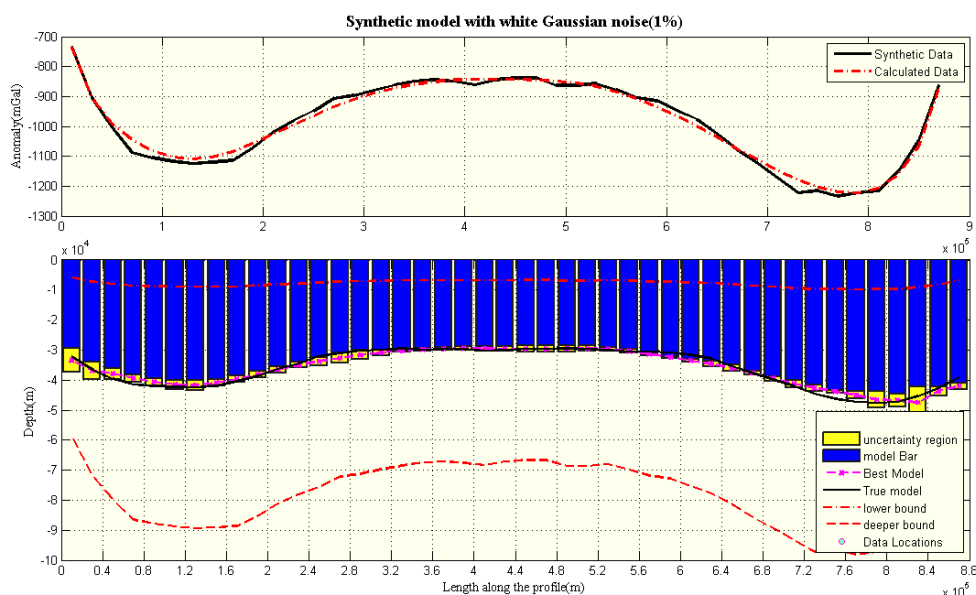


شکل ۴-۲۵ داده های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) به همراه داده های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی (با دانسیته ثابت) به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) (RMSdata = 17.2mGal).

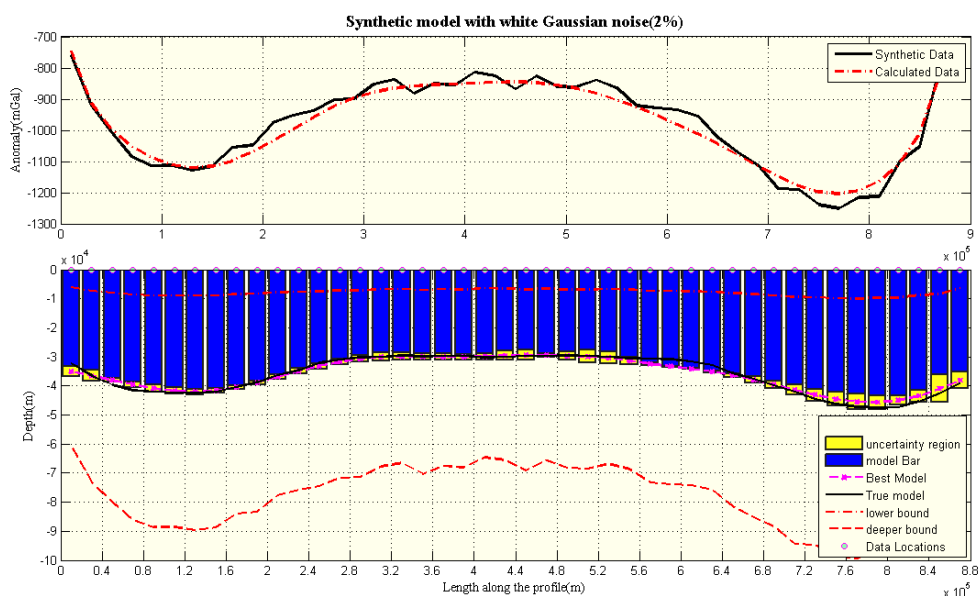
همانطور که در شکل ۴-۲۵ مشاهده می شود اختلاف مدل و داده های تولیدی با مدل مصنوعی و داده های

مصنوعی اولیه بسیار اندک می‌باشد و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های تولیدی حاصله از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی بر این امر دلالت می‌نماید.

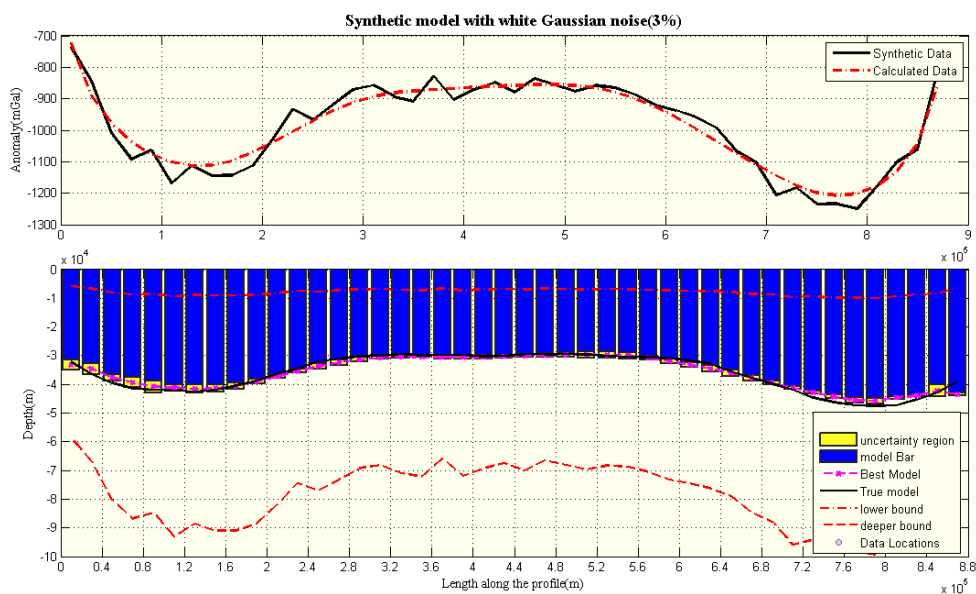
هر یک از دسته داده‌های آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی شدند و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۲۶ تا شکل ۴-۲۹ آمده است.



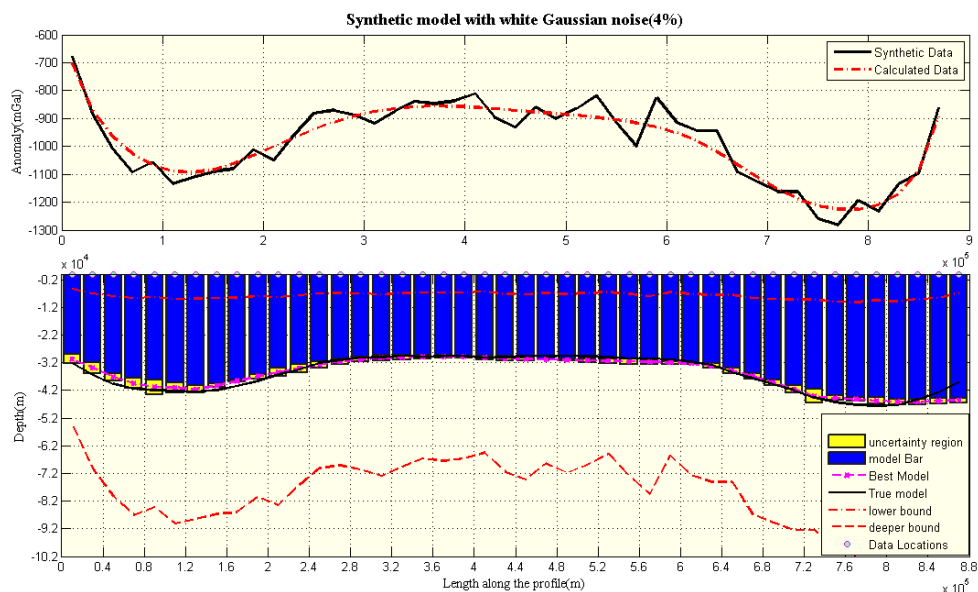
شکل ۴-۲۶ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۱ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) RMSdata (=16.53mGal)



شکل ۴-۲۷ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 28.5 \text{ mGal}$)



شکل ۴-۲۸ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۳ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 32.41 \text{ mGal}$)



شکل ۴-۲۹ داده‌های گرانی مدل مصنوعی (با دانسیته متغیر نسبت به عمق) همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 40.77 \text{ mGal}$).

۴-۴ مدل مصنوعی مغناطیس

الف - مدل مصنوعی مغناطیس - بدون نوفه

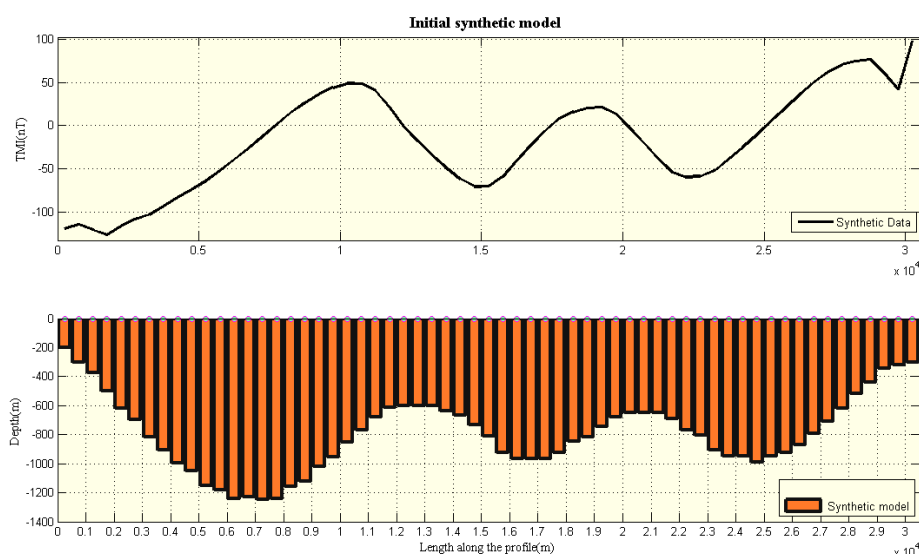
مدل مصنوعی دو و نیم بعدی سنگ بستر در نظر گرفته شده در این تحقیق از ۶۱ منشور با عرض ۵۰۰ و پهنای ۱۴۰۰۰ متر، توپوگرافی سطح زمین مسطح و تغییرات عمقی نسبتاً پیچیده به صورت سه فروافتادگی با عمق‌های متفاوت تشکیل شده است.

میدان مغناطیسی کل زمینه با بزرگی ۴۸۰۰۰ نانوتسلا، زاویه میل^۱ ۴۵ درجه، زاویه انحراف^۲ صفر و زاویه انحراف برای بردار مغناطیدگی در هر بلوک به تبعیت از میدان زمینه دارای زاویه میل و انحراف ۴۵ و صفر درجه در نظر گرفته شده است. راستای پروفیل داده‌ها در جهت عمود بر میدان مغناطیسی فرض

1 declination

2 inclination

شده است. خودپذیری مغناطیسی نیز در هر بلوک 0.002 (در سیستم SI) در نظر گرفته شده است. با استفاده از برنامه پیشروی مغناطیس نوشته شده، در هر یک از نقاط اندازه‌گیری فرضی (در سطح زمین با فواصل مساوی و درست در نقطه میانی منشورها در نظر گرفته شد) تاثیر میدان مغناطیس کل تک منشورها محاسبه و مقدار آنومالی مغناطیس کل مورد انتظار در آن نقاط بر اساس رابطه (۲-۱۵) محاسبه شد. در شکل ۴-۳۵ مدل مصنوعی مزبور به همراه داده‌های مغناطیس کل باقیمانده حاصل از آن نمایش داده شد.

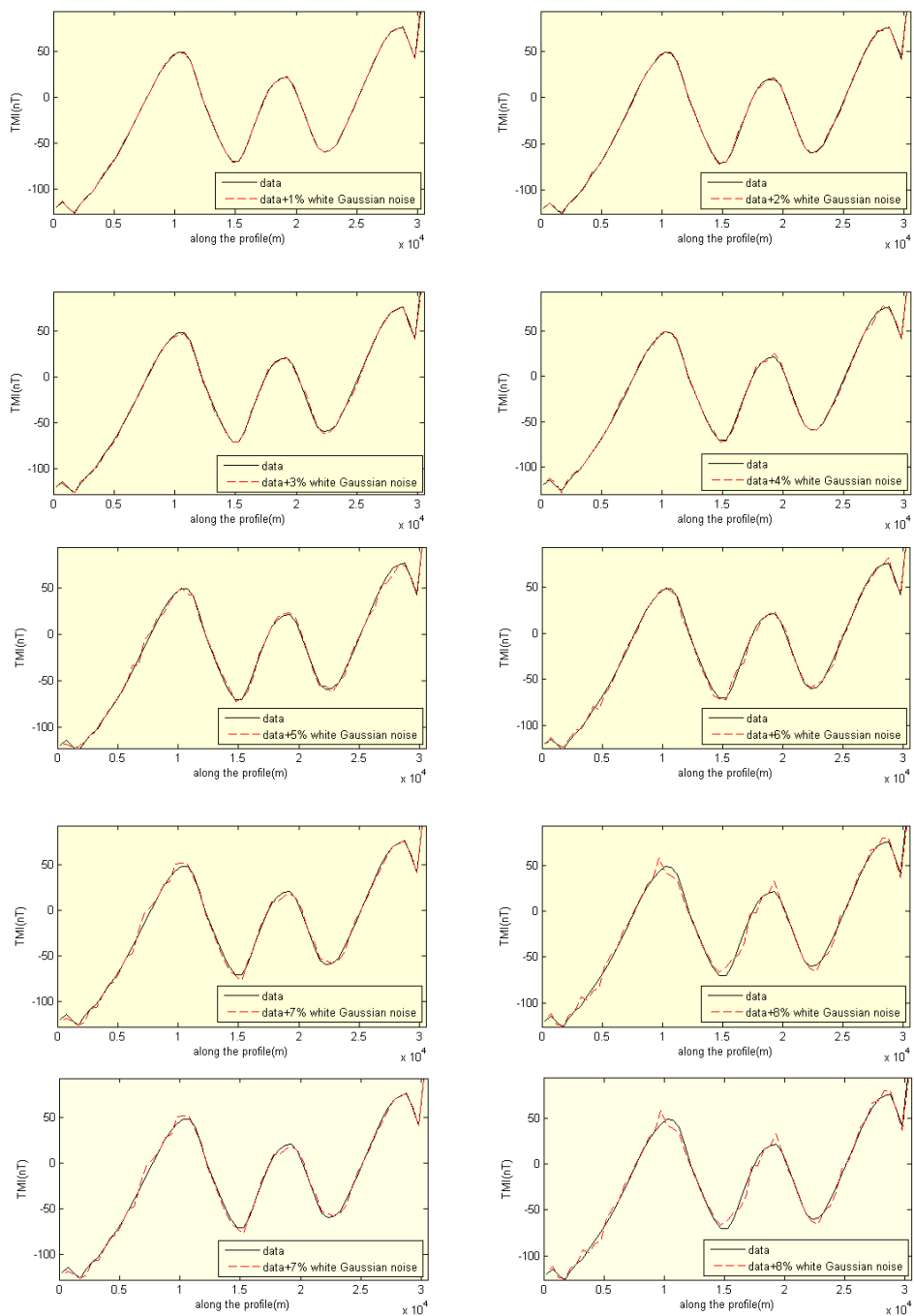


شکل ۴-۳۰ مدل مصنوعی مغناطیسی یک حوضه رسوبی منشوربندی شده (تصویر پایین)، آنومالی میدان مغناطیس کل بدست آمده از مدل مصنوعی (تصویر بالا).

ب- مدل مصنوعی مغناطیس - همراه با نوفه

به دلایل مشابه آنچه در بخش مدل‌سازی داده‌های گرانی مدل مصنوعی در باب واقع بینانه سازی داده‌ها و لزوم اضافه نمودن نوفه سفید به داده‌های مدل مصنوعی بیان شد، در مورد داده‌های مغناطیس مدل مصنوعی نیز نوفه‌ای مستقل از داده با توزیع گوسی با دامنه‌های از ۱ تا ۱۰ درصد داده‌ها به داده‌های خام مغناطیس کل مدل مصنوعی افزوده شد و برای هر سری از داده‌ها مدل‌سازی‌ها و مقایسه با مدل اصلی

انجام شد. در شکل ۳۱-۴ وضعیت داده‌های بدست آمده پس از اضافه نمودن نوفه با داده‌های بدون نوفه مقایسه شده است.



شکل ۳۱-۴ اعمال مقادیر مختلف نوفه گاوسی سفید به داده‌های میدان مغناطیسی کل مدل مصنوعی و قیاس آنها با داده‌های اصلی.

۴-۴-۱ مدل سازی وارون داده های مدل مصنوعی مغناطیس با استفاده از الگوریتم مورچگان

در این تحقیق برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق)؛ با توجه به اطلاعات اولیه از مدل مصنوعی مفروض، برای کلیه منشورها بطور ثابت بین ۱۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این مدل سازی که تابع هدف تابعی از اختلاف آنومالی مغناطیسی محاسبه شده و آنومالی مغناطیسی اندازه گیری شده است؛ در نهایت با بررسی و مرور مطالعات مشابه گذشته [۱۱۴] در زمینه مدل سازی داده های مغناطیس-سنجی؛ تابع هزینه در نظر گرفته شده مطابق رابطه (۴-۵) طراحی شد.

$$C^{\Delta T} = \|\Delta T^{obs} - \Delta T^{cal}\|_2 \quad (4-6)$$

در این رابطه $C^{\Delta T}$ هزینه و ΔT^{obs} و ΔT^{cal} به ترتیب آنومالی مغناطیس کل مشاهده ای و آنومالی مغناطیس کل محاسبه شده بر مبنای راه حل نمونه برداری از فضای مدل است.

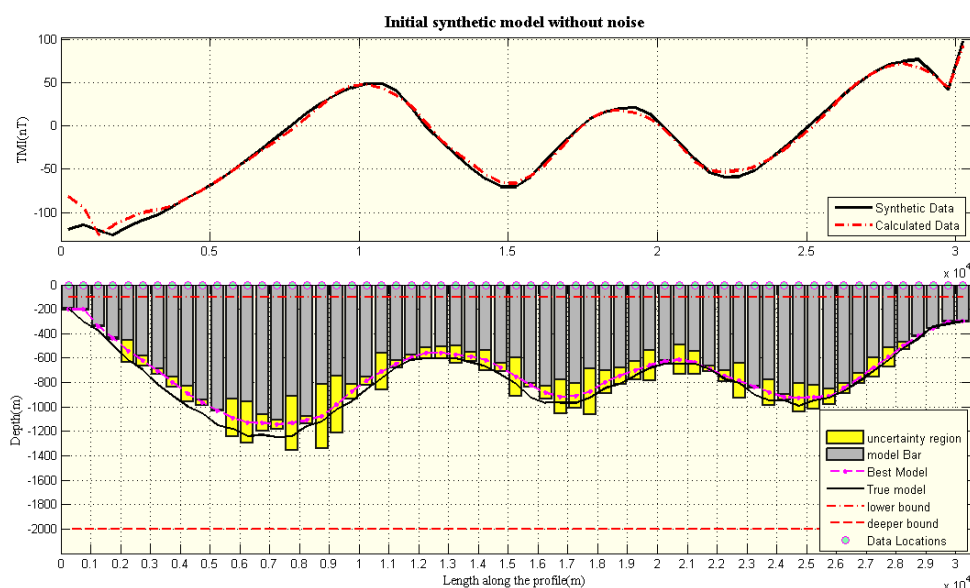
الگوی توزیع غلظت فرومون بر روی گره ها نیز، مشابه مدل سازی های داده های مصنوعی گرانی سنجی، رابطه (۴-۴) در نظر گرفته شد. پارامترهای q_0 ، ضریب تبخیر، فرومون اولیه، فاصله گره ها در عمق و تعداد مورچه ها به شیوه آنچه در مورد مدل سازی داده های مصنوعی گرانی سنجی بوسیله الگوریتم ACO بیان شد؛ تعیین گردیدند. بر این اساس با توجه به شکل مدل مغناطیسی و بزرگتر بودن فضای جستجو، فاصله گره ها در عمق به ۵ متر افزایش یافت. همچنین به منظور افزایش جستجوگری الگوریتم ضریب تبخیر افزایش یافته و مقدار ۰/۱۵ برای آن در نظر گرفته شد. سایر پارامترها نیز مشابه مدل سازی داده های مصنوعی گرانی-سنجی در نظر گرفته شد.

پارامترهای تنظیمی الگوریتم مورچگان طراحی شده برای مدل سازی داده های این مدل مصنوعی در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵ پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل سازی داده های مدل مصنوعی مغناطیس.

q_0	ضریب تبخیر	فرمون اولیه	فاصله گره ها در عمق (m)	تعداد مورچه ها
۰/۵	۰/۱۵	۱	۵	۵۰۰

مشابه مدل سازی های انجام پذیرفته برای روی داده های مدل مصنوعی گرانی؛ جهت تعیین عدم قطعیت پاسخ ها، ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف معیار پاسخ های بهینه برای تک تک بلوک ها تعیین شد و ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر بلوک تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده های حاصل از مدل بدست آمده با داده های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای تمامی مدل سازی ها بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم مورچگان در این مدل سازی در پیوست ب-۱ ارائه شده است.

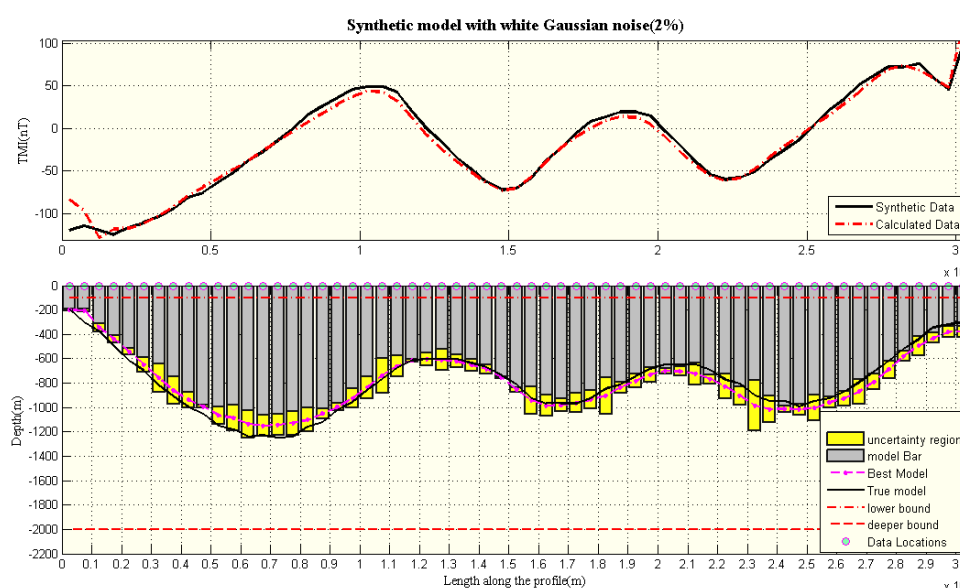


شکل ۴-۳ داده های مغناطیس کل مدل مصنوعی به همراه داده های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین). ($RMS_{data} = 6.9 \text{ nT}$)

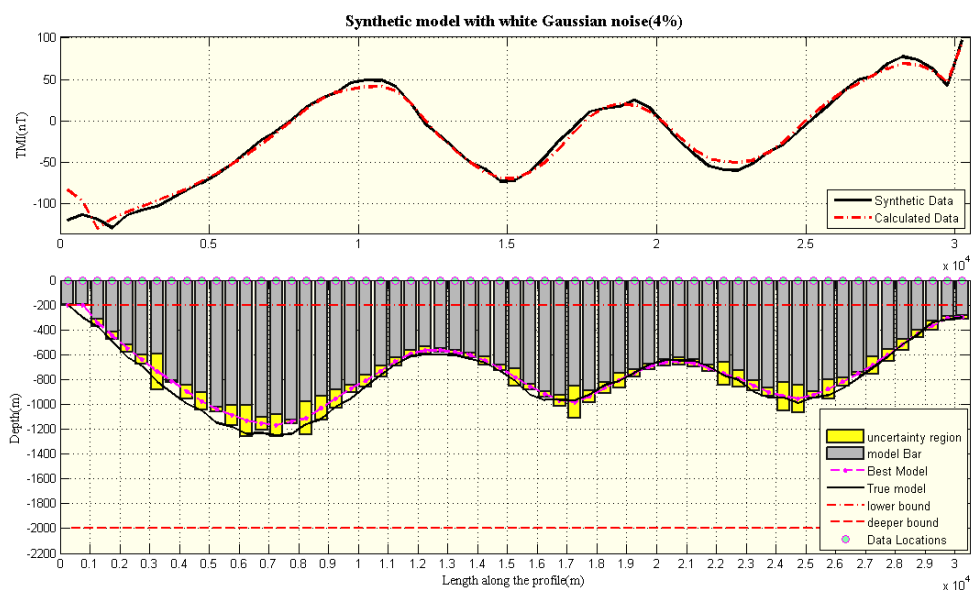
همچنان که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است اختلاف مدل و مدل مصنوعی اولیه و نیز داده های مصنوعی اولیه و داده های تولیدی بسیار اندک بوده و مدل سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین

مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های مغناطیس کل تولید شده از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی این اختلاف کوچک را نشان می‌دهد.

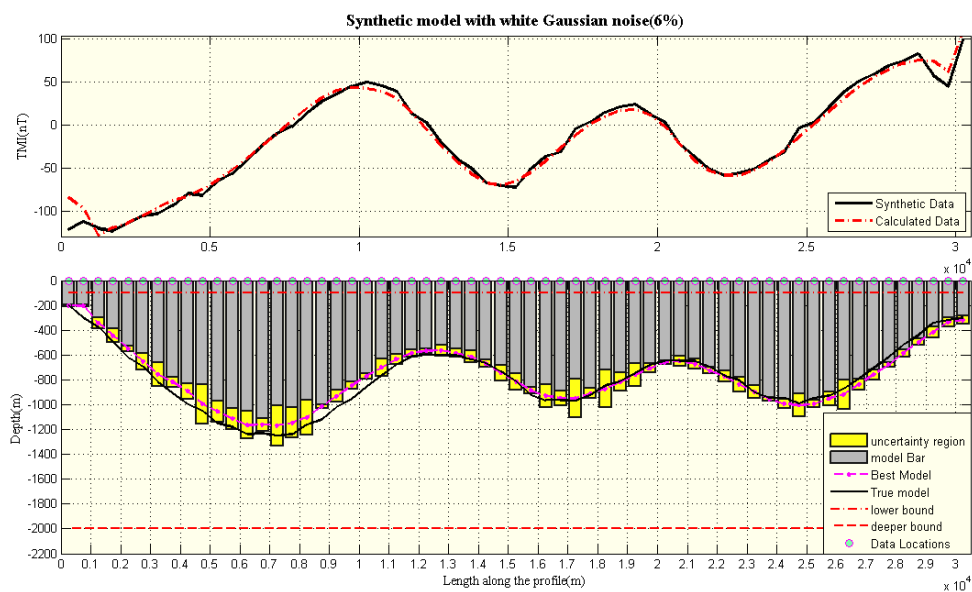
مشابه مدل‌سازی‌های صورت پذیرفته در بخش داده‌های گرانی؛ در مورد هر یک از دسته داده‌های مغناطیسی آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی صورت پذیرفت و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۳۳ تا شکل ۴-۳۶ آمده است.



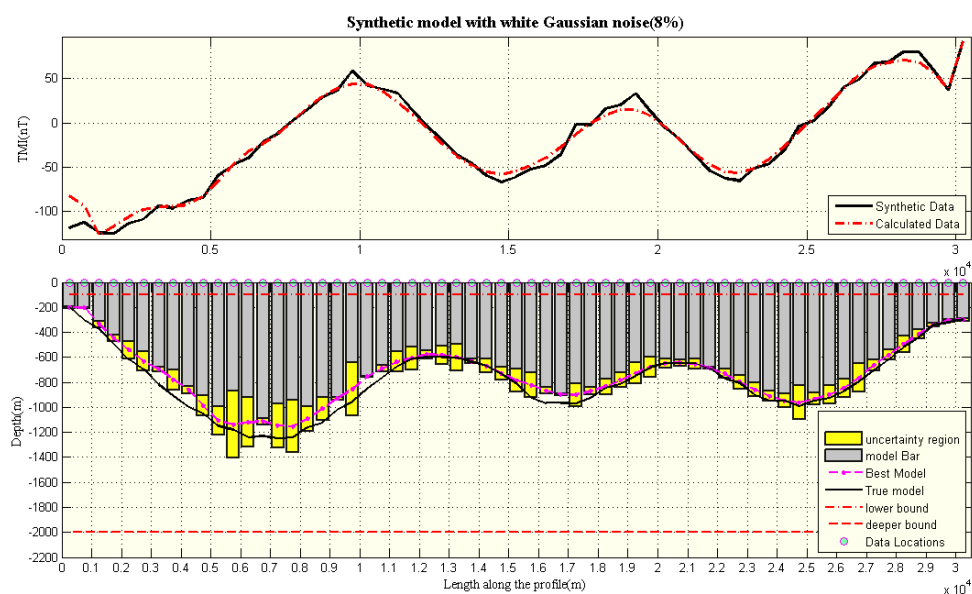
شکل ۴-۳۳ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 7.8 \text{ nT}$).



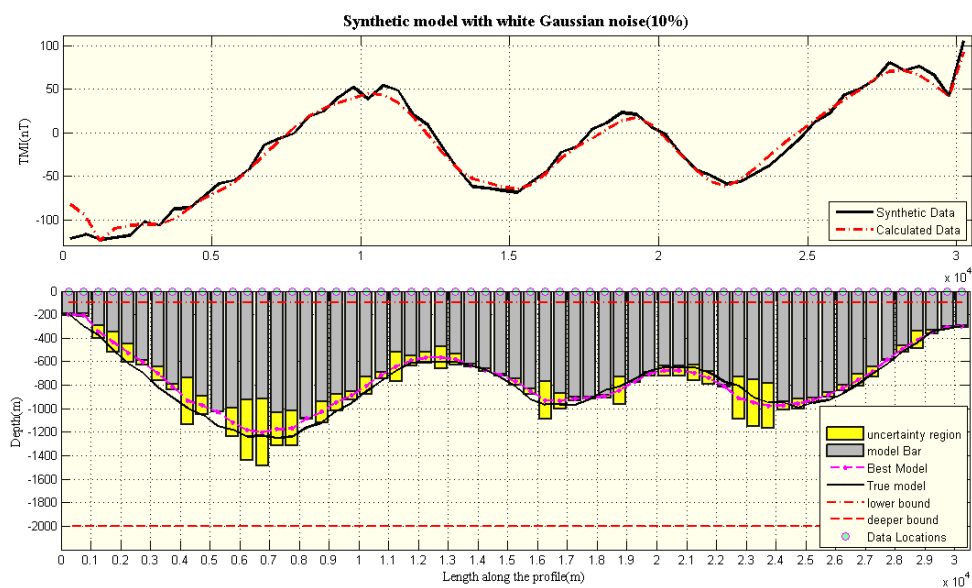
شکل ۴-۳۴ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=7.3 \text{ nT}$).



شکل ۴-۳۵ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=7.8 \text{ nT}$).



شکل ۴-۳۶ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=8.0$ nT).

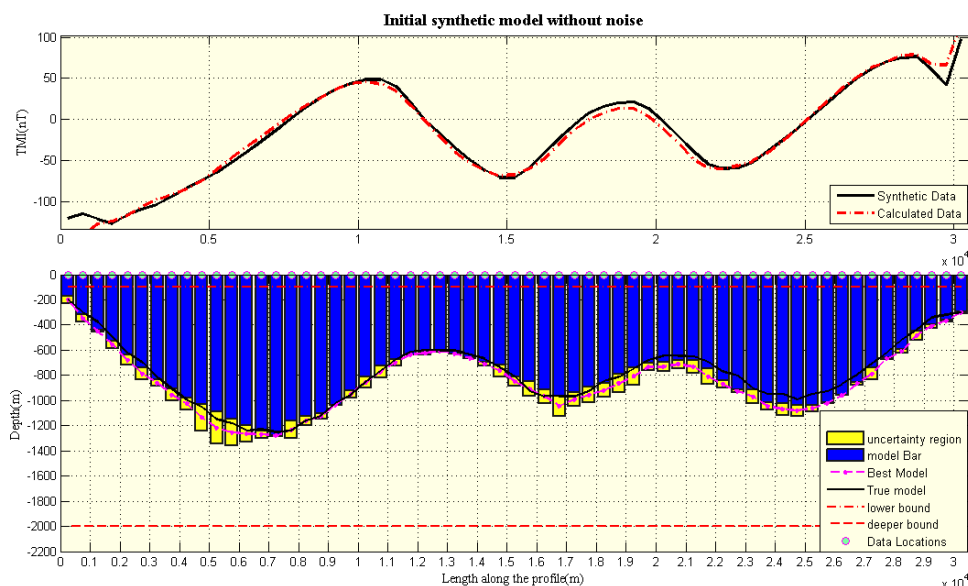


شکل ۴-۳۷ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۱۰ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO (تصویر پایین) ($RMS_{data}=8.9$ nT).

۴-۲ مدل سازی وارون داده‌های مدل مصنوعی مغناطیس با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

در این مدل سازی مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) برای همه منشورها مشابه مدل سازی بوسیله الگوریتم ACO بطور ثابت بین ۱۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. مشابه مدل سازی وارون داده‌های مدل مصنوعی مغناطیس توسط الگوریتم مورچگان، تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل سازی نیز مطابق رابطه (۴-۵) در نظر گرفته شد.

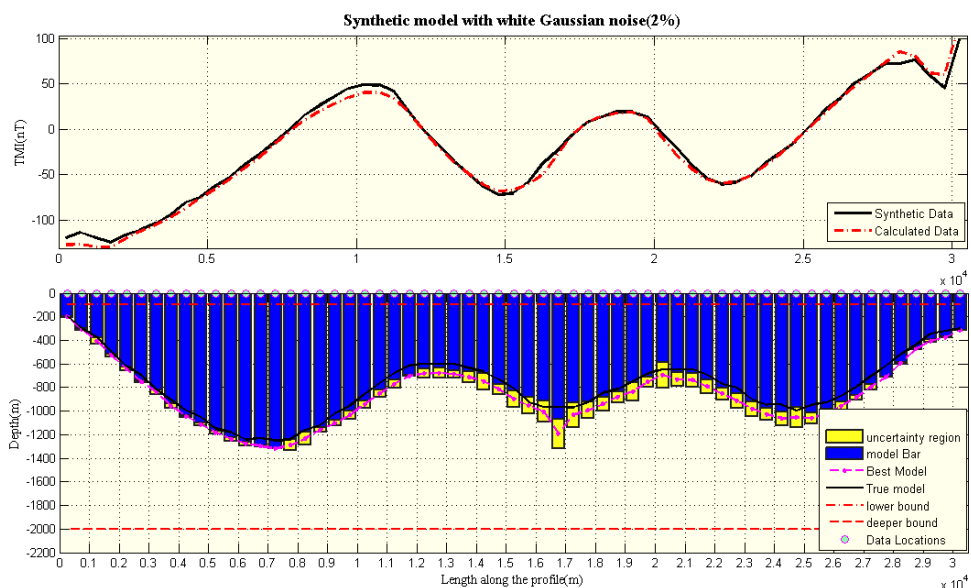
پارامترهای تنظیمی الگوریتم ICA طراحی شده برای مدل سازی داده‌های این مدل مصنوعی، مطابق پارامترهای مربوط به مدل سازی داده‌های مصنوعی گرانی؛ ارائه شده در جدول ۴-۲ در نظر گرفته شد. مشابه سایر مدل سازی‌های انجام پذیرفته در این تحقیق؛ به منظور تعیین عدم قطعیت پاسخ‌ها، ۱۵ مرتبه مدل سازی ها تکرار شد و انحراف معیار پاسخ‌های بهینه برای تک تک بلوک ها تعیین شد و ۲ برابر انحراف معیار به عنوان عدم قطعیت هر بلوک تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی کمی اختلاف نتایج بدست آمده با مدل مرجع، از تعیین ریشه میانگین مربعات اختلاف داده‌های حاصل از مدل بدست آمده با داده‌های اولیه استفاده شد و پارامتر مزبور برای تمامی مدل سازی‌ها بکار گرفته شد. شبه کد الگوریتم رقابت استعماری در این مدل سازی در پیوست ب-۲ ارائه شده است.



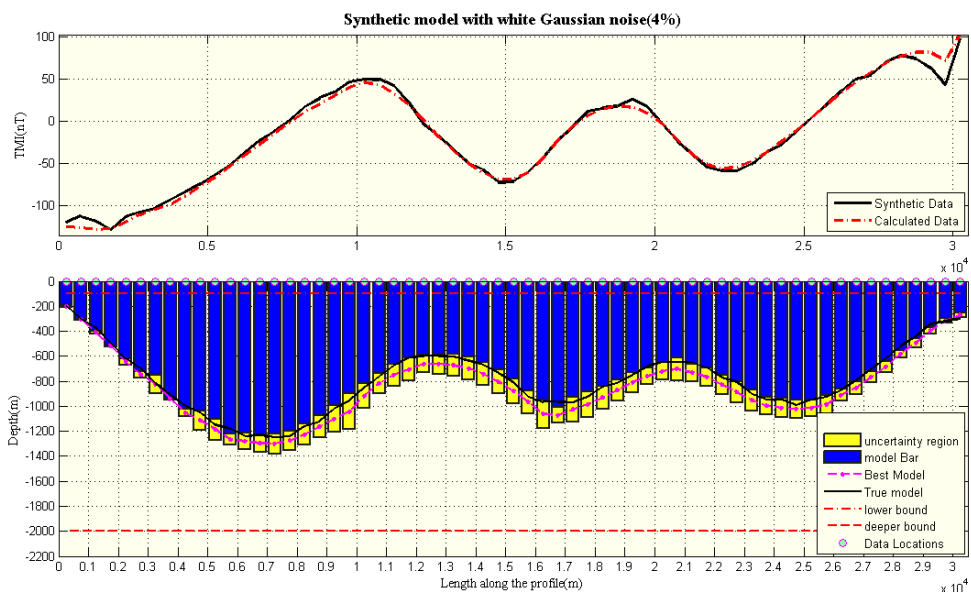
شکل ۴-۳۸ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی به همراه داده‌های با تولیدی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 7.1 \text{ nT}$).

همچنان که در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است اختلاف مدل و مدل مصنوعی اولیه و نیز داده‌های مصنوعی اولیه و داده‌های تولیدی بسیار اندک بوده و مدل‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین مقادیر بسیار کوچک ریشه مربعات اختلاف داده‌های مغناطیس کل تولید شده از مدل‌سازی با داده‌های مصنوعی اولیه، به صورت کمی این اختلاف کوچک را نشان می‌دهد.

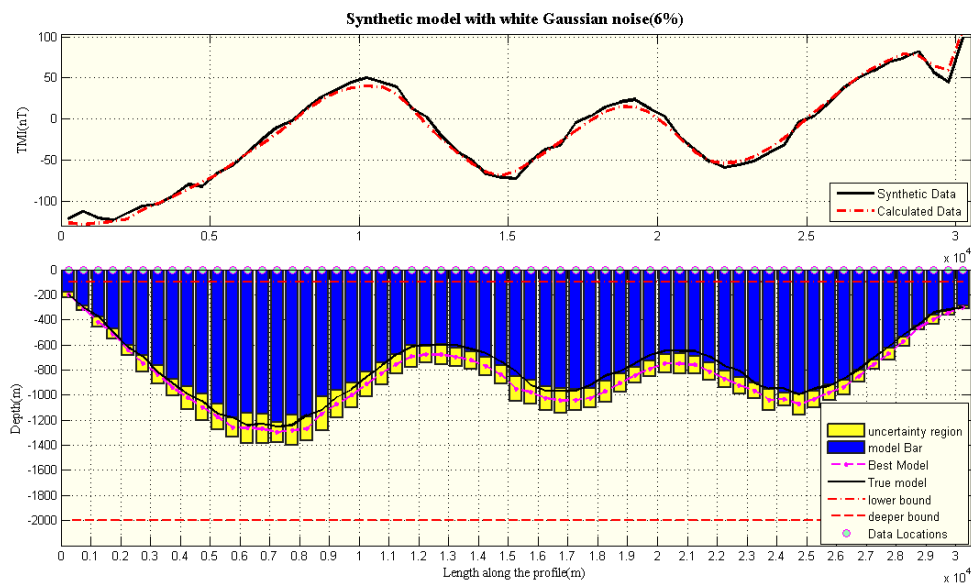
مشابه مدل‌سازی‌های صورت پذیرفته در بخش داده‌های گرانی؛ در مورد هر یک از دسته داده‌های مغناطیسی آلوده به نوفه تولید شده، مدل‌سازی صورت پذیرفت و مدل‌های بدست آمده با مدل‌های اولیه مورد مقایسه کمی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در کنار مدل اصلی، در شکل ۴-۳۹ تا شکل ۴-۴۳ آمده است.



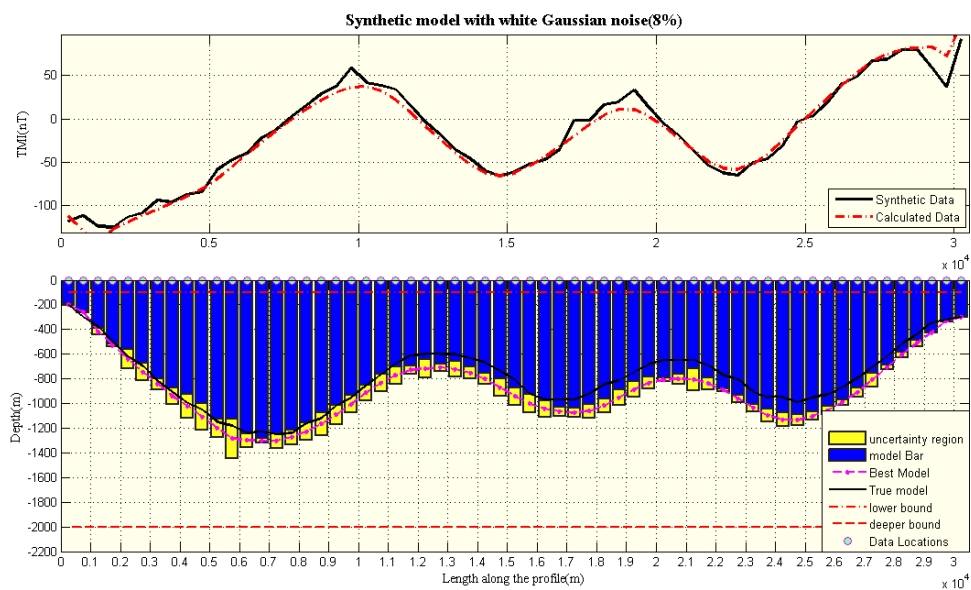
شکل ۴-۳۹ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۲ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 5.9 \text{ nT}$).



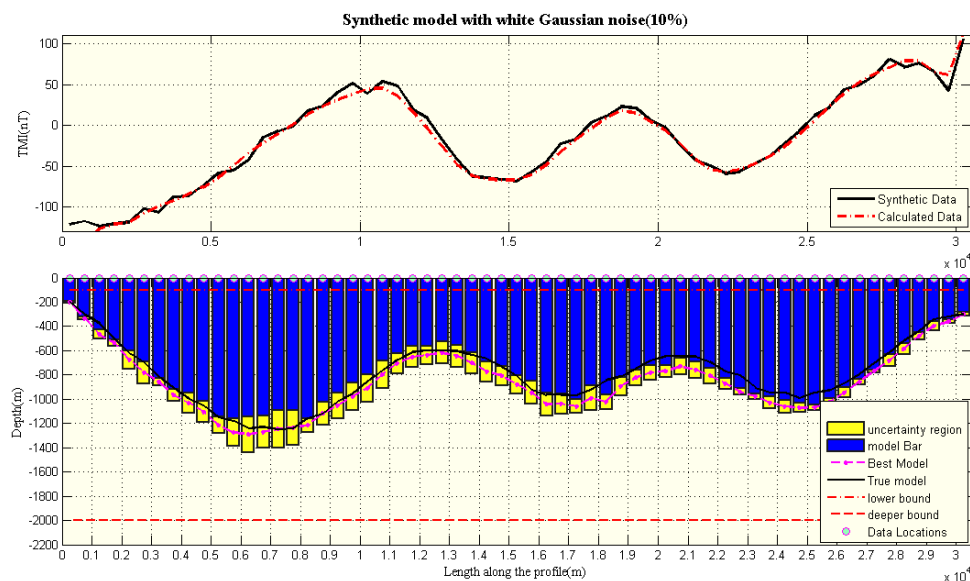
شکل ۴-۴۰ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۴ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 6.2 \text{ nT}$).



شکل ۴-۴۱ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۶ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 6.1 \text{ nT}$)



شکل ۴-۴۲ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۸ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 9.6 \text{ nT}$).



شکل ۴-۴ داده‌های مغناطیس کل مدل مصنوعی همراه با ۱۰ درصد نوفه سفید گاوسی (تصویر بالا)، مدل مصنوعی به همراه مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 7.5 \text{ nT}$).

۴-۵ جمع‌بندی

در این فصل مدل‌سازی وارون داده‌های گرانی‌سنجی مدل مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و رقابت استعماری بر اساس پیشنهاد رساله انجام شد. نتایج مدل‌سازی‌های مزبور علاوه بر مطابقت قابل قبول با مدل‌های اولیه، پایداری مناسبی نیز در برابر وجود نوفه تصادفی در داده‌ها از خود نشان دادند. در این بین، بکارگیری الگوریتم رقابت استعماری سرعت بهتری نشان داد.

علاوه بر الگوریتم‌های یاد شده، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم رقابت استعماری از الگوی جدید هیبرید آن با الگوریتم کرم شبتاب استفاده شد. تغییرات صورت گرفته سبب بهبود سرعت همگرایی و افزایش جستجوگری الگوریتم مذکور در مدل‌سازی انجام پذیرفته شد. همچنین الگوریتم جدید رقابت ذرات، که هنوز به نسبت سایر الگوریتم‌های نام‌برده نتایج تحقیقات کمتری از بکارگیری آن موجود است؛ در این تحقیق بکار گرفته شد، که این الگوریتم سریع که نسبت به سایر الگوریتم‌ها نیاز بسیار کمتری به تنظیم

پارامتر داشته و نتایج مطلوبی نشان داد. با توجه به اهداف تحقیق و از آن جا که برای مدل سازی ضخامت لایه رسوبات، نمی توان در تمامی موارد از مدل های پیش روی بر مبنای دانسیته ثابت استفاده نمود؛ مدل مصنوعی بزرگ مقیاس و عمیقی که دانسیته در آن بصورت خطی نسبت به عمق تغییر نماید در نظر گرفته شد و بر اساس رابطه پیشرو با تغییرات دانسیته خطی و سهموی استفاده شد و بوسیله الگوریتم رقابت استعماری مورد مدل سازی قرار گرفت؛ که نتایج این مدل سازی دقت مناسب و پایداری مطلوب در برابر نوفه از خود نشان داد. نظر به مقیاس بزرگ این مدل، بکارگیری الگوریتم مورچگان، پارمترهای مسأله و به طبع آن زمان حل مسأله را به اندازه ای بالا می برد؛ که عملاً بکارگیری این الگوریتم برای چنین مسائلی مقرون به صرفه نیست.

در بخش دوم این فصل وارون داده های مغناطیس سنجی برای مدل مصنوعی متفاوت از بخش قبلی، با استفاده از الگوریتم های مورچگان و رقابت استعماری انجام پذیرفت؛ که نتایج این مدل سازی های نیز علاوه بر مطابقت مناسبی با مدل اولیه، پایداری مناسبی نیز در برابر وجود نوفه تصادفی در داده ها از خود نشان دادند؛ به گونه ای که حتی تا ۱۰ درصد نوفه تصادفی نیز تاثیر چندانی بر نتایج مدل سازی ها نداشت.

فصل پنجم: مدل سازی داده های صحرایی کرانی سنجی و مغاطیس سنجی با استفاده از

روش های پیشهادی

۵-۱ مقدمه

صحت بکارگیری برنامه‌های نوشته شده برای الگوریتم‌های فراابتکاری نام برده در این تحقیق، در فصل گذشته مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این فصل الگوریتم‌های نام برده بر روی داده‌های واقعی گرانی و مغناطیس برداشت شده در حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران برای مدل‌سازی توپوگرافی سنگ بستر بکار گرفته شد. علاوه بر حوضه مغان، داده‌های گرانی سنجی حوضه رسوبی لس‌آنجلس^۱ در آمریکا نیز؛ به عنوان حوضه رسوبی عمیقی که اطلاعات تغییرات دانسیته رسوبات نسبت به عمق در آن موجود است؛ بوسیله الگوریتم ICA مورد مدل‌سازی شد.

۵-۲ مدل‌سازی داده‌های گرانی و مغناطیس در حوضه رسوبی مغان

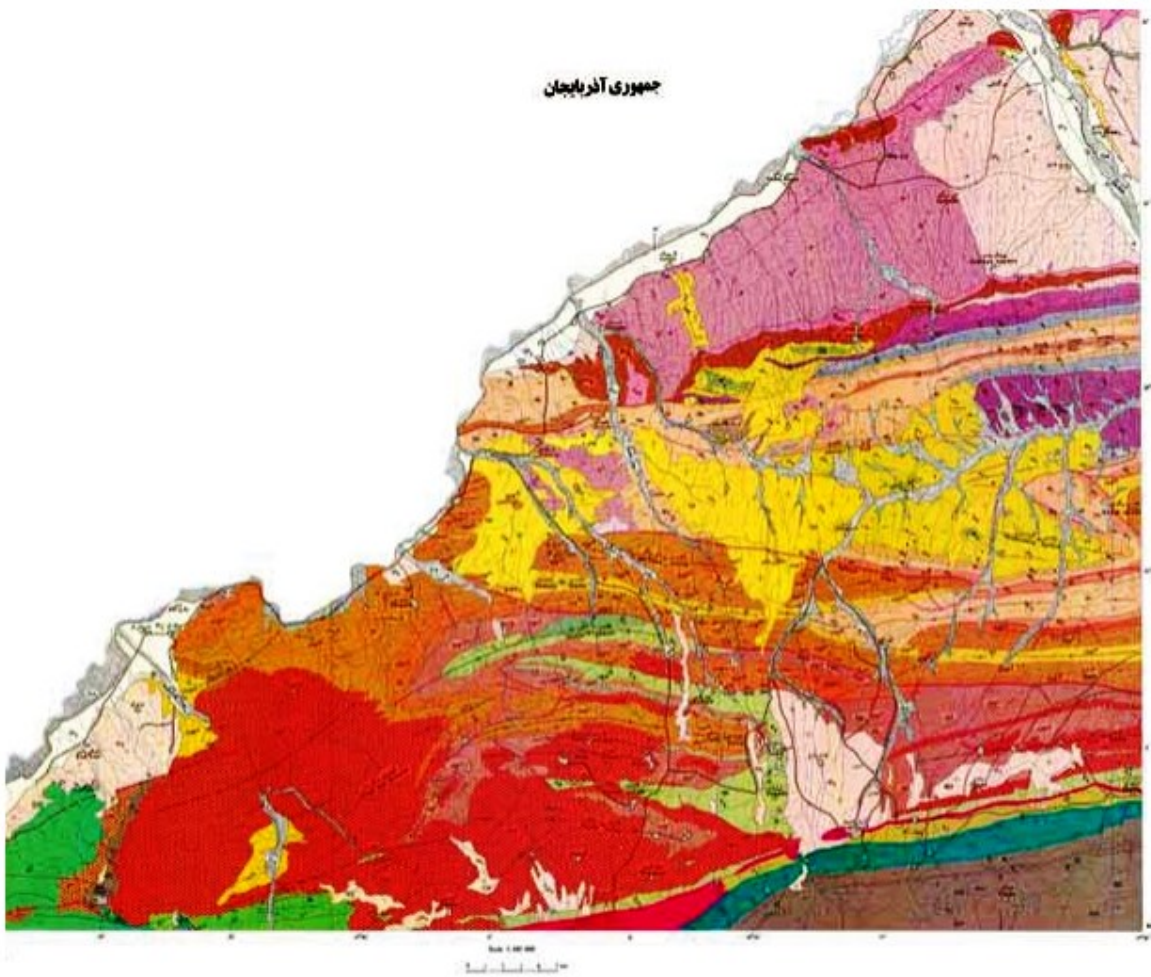
۵-۲-۱ زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه مغان

حوضه رسوبی مغان واقع در غرب دریای خزر، از شمال و غرب به کشور آذربایجان و از جنوب به رشته جبال قره داغ محدود می‌شود. شکل ۵-۱ نقشه زمین‌شناسی و شکل ۵-۲ ستون چینه‌شناسی این منطقه را نشان می‌دهد. واقعه برخورد صفحات عربی و اوراسیا با یکدیگر و حاکم شدن رژیم فشارشی، سبب فعالیت‌های کوهزایی و تشکیل کمربندی از چین‌ها و گسل‌های متعدد در زمان نئوژن و کواترنر در این ناحیه شده است.

منطقه مغان در اوایل دوران سوم زمین‌شناسی با فعالیت‌های شدید آتشفشانی همراه بوده؛ که مواد خروجی حاصل به صورت روانه‌های بازالتی و قطعات ولکانیکی در داخل واحدهای رسوبی برجای مانده

^۱ Los Angeles

است. در اوایل ائوسن میانی، آخرین فعالیت آتشفشانی قابل توجه در منطقه بوقوع می‌پیوندد؛ که بطور وسیع باعث تشکیل جریان‌های ولکانیکی بازالتی شده است و از منظر پتروگرافی عمدتاً بصورت لابرادور-اوژیت و اندزین شناسایی شده‌اند. گدازه‌های مذکور به وسیله طبقات پیشرونده که در برخی نقاط با وجود کنگلومرای قاعده‌ای و ناپیوستگی مشخص شده است، پوشیده شده‌اند. پی‌سنگ حوضه رسوبی مغان متشکل از سنگ‌های دگرگونی شامل میکاشیست و آمفیبولیت‌های به سن پرکامبرین است؛ که پوشش‌های منقطعاً از رسوبات کرتاسه بالایی، روی آن‌ها را پوشانده است. این هسته‌ها بطور کلی با دگرشیبی مشخصی زیر پوششی از رسوبات ائوسن مدفون هستند [۱۱۶].



شکل ۵-۱ نقشه زمین شناسی $\frac{1}{100000}$ دشت مغان [۱۱۶]

QUATERNARY		Qal	: Recent alluvium
		Qt ₂	: Younger alluvial terraces
		Qt ₁	: Old terraces, dissected alluvial plains
		Q ^c	: Dark grey conglomerate.
		Q _b	: clay, silt, sand, conglomerate and pumice.
		Q _{ap}	: Alternation of clay, gravelly sand and ash.
PLIO		Plag	: conglomerate, silt, sandstone, clay and ash.
MIOCENE		M ₅	: conglomerate with sandstone, silt, clay.
		Q ₁	: Gypsiferous silty clay with intercalations of sandstone.
		S ₁	: Sandstone with intercalation of clay.
		L	: Oolitic limestone.
		M ₄	: Clay, sandstone with some conglomerates.
		M ₃	: Multicoloured gypsiferous clays.
		M ₂ ^c	: Conglomerate with intercalations of sandstone.
		M ₁	: Variably coloured clay, sandstone, sand.
		OM ²⁴	: Red and pink gypsiferous silty clay
		OM ²²	: Dark grey conglomerate.
OLIGO-MIOCENE		OM ²³	: Alternation of sandstone and silty clay.
		OM ²²	: Fluvial tuffaceous sandstone.
		V	: Andesite
		t	: Tuff
		OM ²¹	: Gypsiferous clay containing limestone nodules.
		E ₄ ^s	: Black to dark grey sandstone
		E ₄	: Clay and sandstone with intercalations of limestone.
		E ₄ ^{ab}	: Andesitic-basaltic lava flows.
		E ₃ ^h	: Andesite, basalt and basaltic breccia.
		E ₃	: Clay with intercalation of thin limestone and sandstone.
E O C E		E ₂ ^v	: Basalt and basaltic breccia.
		E ₂	: Thick bedded tuffaceous sandstone, shale with intercalations of thin limestone.
		E ₁ ^v	: Basaltic lava flows.
		E ₁	: Sandstone, shale and tuff with intercalations of thin limestone.
		P ^m	: Gypsiferous marl.
PALEO		P ¹	: Andesitic tuff.
Late Cret.		K ¹	: Reefal and marly limestone.
		K ^a	: Andesite
		K ^d	: Splittic Diabase and sandstone
		K ^{sh}	: Greenish grey shale.

شکل ۵-۲ راهنمای نقشه زمین شناسی دشت مغان [۱۱۶].

Era	Period	Epoch	sub Epoch	Stage	Formations in Moghan	sub Formation	Symbol	Equivalent in Azerbaijan	Thickness (m)	Lithology	Lithographic characteristic				
Cenozoic	Neogene	Miocene	Middle	Tortonian			To4	Konk	100		Sandstone with red claystone and marl				
							To3	Karagan	200		Sandstone and dolomitic limestone				
							To2	Chokrak	200		Clay, sandstone, dolomitic limestone				
							To1	Tarkhan	500		Marl, limy clay and dolomitic limestone				
											Clay, sandstone, conglomerate				
			?	Lower	Zivah	Upper Zivah	Z3	OM ^{Z5}	Melikassum	350-700		Claystone, silty clay conglomerates in the bases			
		OM ^{Zc2}													
		OM ^{Z4}						1000			Alternation sandstone with silt and clay				
		OM ^{Z3}													
		OM ^{Z2}													
		?	Middle	Middle Zivah		Z2	OM ^{Z3}	Shishnavar	370-505		Sandstone with interbeds of siltstone claystone and conglomerate				
									Lower Zivah	Z1	OM ^{Z2}	Perembel	650		Silty clay with interbeds of sandstones
											OM ^{Zs}				
											OM ^{Z1}			1200-1500	
		?	Lower				OM ^{Zc1}								
				Upper Ojagheslagh		O1	Tjakend	13-585		Marls and Clays with sandstone					
	Paleogene	Eocene	Upper			Lower Ojagheslagh		E4	Arkevan	140-650		Marl, sandstone, bituminous clay shale			
								LO							
						Peshtasar		E3b	Peshtesari	30-1000		Lava flows of basalt and andesite tuff and tuffaceous breccias			
								E3		600		Clay sandstone, marl with prolayers of tuffaceous sandstone			
				Middle			Shekarlu		E2	Nasli	60-600		Marl, tuff, tuffaceous sandstone with prolayers of limestone		
		Lower			Ghare Aghash		E1	Komoljon	2500		Tuffaceous sandstones with lava flows and shales				
		Paleocene				Qara Su		E0	Astrata	0-1000		Sandy marly limestone Polygenic breccia layers			
Mesozoic		Cretaceous	Upper							> 100		Breccia, limestone, sandstone Claystone, shale, marl			
			Lower									Spilitic volcanic rocks with limestone			

	Shale		Sandstone		Limestone		Volcanics		Alluvial deposits
	Marl		Conglomerate		Dolomitic Limestone		Breccias		Unconformity

شکل ۳-۵ ستون چینه شناسی حوضه مغان و آذربایجان [۱۱۷].

۲-۲-۵ مطالعات ژئوفیزیک گرانی و مغناطیس سنجی در حوضه مغان

این حوضه بدلیل عواملی از جمله نزدیکی به مناطق نفت خیز باکو و نیز ضخامت زیاد سنگ‌های رسوبی و وجود چشمه‌های نفتی و آبگرم متعدد، در اکتشافات هیدروکربوری مورد توجه واقع شده و مطالعات ژئوفیزیکی مختلفی در این منطقه صورت پذیرفته است [۱۱۶].

در مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده در این منطقه، ولکانیک‌های ائوسن شامل جریان‌ات بازالتی، به عنوان ساختارهای پی‌سنگی این ناحیه در نظر گرفته شده‌اند؛ که تباین وزن مخصوص و مغناطیدگی مشخصی با

رسوبات بالاسری خود دارند و شرایط مناسبی را برای تصویر نمودن پی‌سنگ ایجاد می‌نمایند [۱۱۶].
مهم‌ترین برداشت‌هایی که در زمینه‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی که در ناحیه مغان انجام شده،
بدین شرح است:

۱- پیمایش شرکت UGC^۱: در این پروژه اطلاعات گرانی و مغناطیس‌سنجی توسط شرکت
UGC و به سفارش شرکت ملی نفت ایران در سال ۱۹۶۱ میلادی برداشت گردید؛ که مشخصات
آن به شرح زیر است:

- نوع عملیات: گرانی و مغناطیس‌سنجی
 - وسعت منطقه عملیاتی: حدود ۱۹۰۰ کیلومتر مربع
 - نوع شبکه: منظم
 - تعداد ایستگاه گرانی‌سنجی: ۲۳۶۹ ایستگاه به طول ۱۷۱۲ کیلومتر
 - تعداد ایستگاه مغناطیس‌سنجی: ۱۰۲۳ ایستگاه
- ۲- شرکت عملیات اکتشاف و مهندسی توسعه نفت: عملیات گرانی و مغناطیس‌سنجی ناحیه مغان
توسط شرکت مهندسی توسعه نفت (متن) به منظور مطالعات و طرح ذخیره‌سازی گاز انجام
پذیرفت. شرکت عملیات اکتشاف نفت (OEOC) به عنوان پیمانکار عملیات اجرائی این پروژه را
سال ۱۳۸۰ آغاز و در سال ۱۳۸۱ به اتمام رسانده است؛ که مشخصات آن در ذیل آمده است:

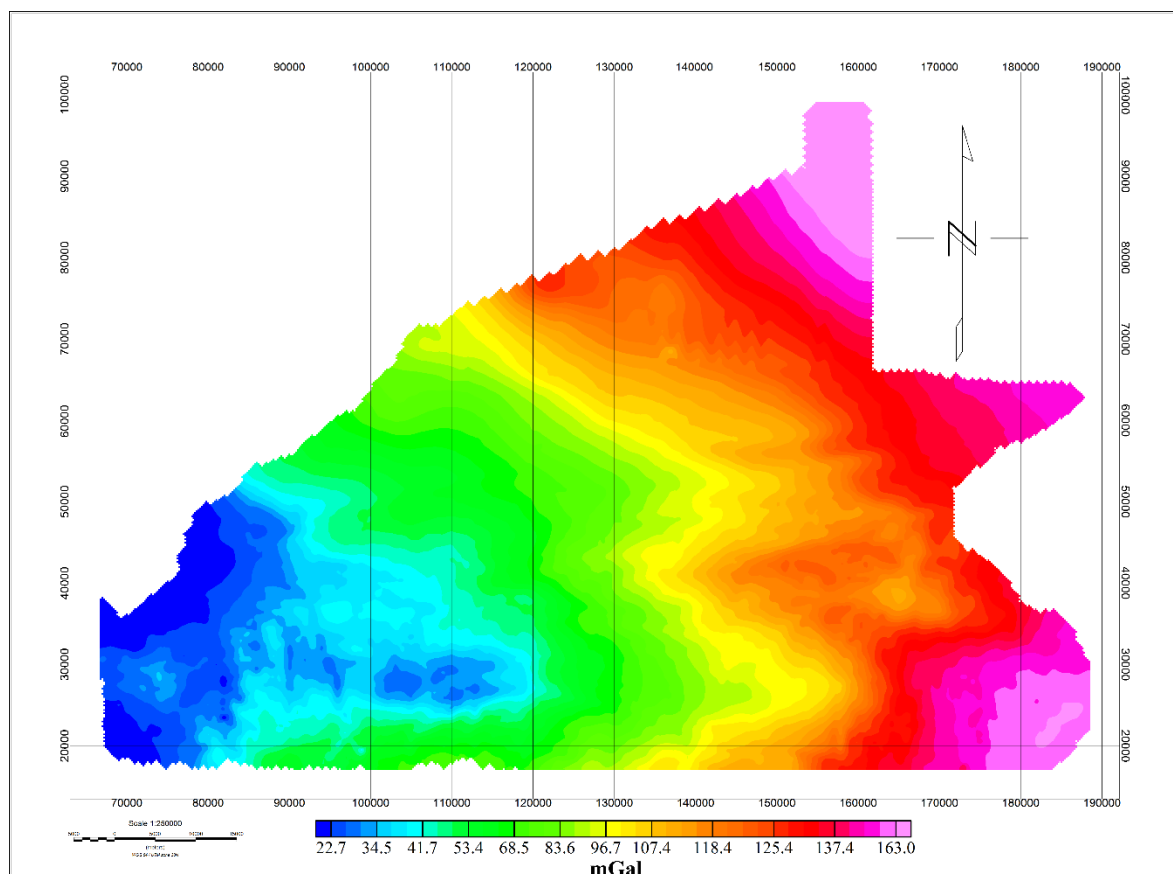
- نوع عملیات: گرانی و مغناطیس‌سنجی
- وسعت منطقه عملیاتی: حدود ۵۸۹۰ کیلومتر مربع
- شبکه برداشت: منظم با فواصل ۱۰۰۰×۵۰۰ متر و ۲۵۰۰×۱۰۰۰ متر
- تعداد ایستگاه گرانی‌سنجی: ۱۰۰۱ ایستگاه

^۱ United Geophysical Company

- تعداد ایستگاه مغناطیس‌سنجی : ۹۹۶۹ ایستگاه
 - هدف عملیات: کشف مخزن با قابلیت ذخیره‌سازی گاز
- داده‌های برداشت شده حاصل از پیمایش دوم پس از تصحیحات لازم، بصورت نقشه‌های رقومی تهیه شدند [۱۱۶].

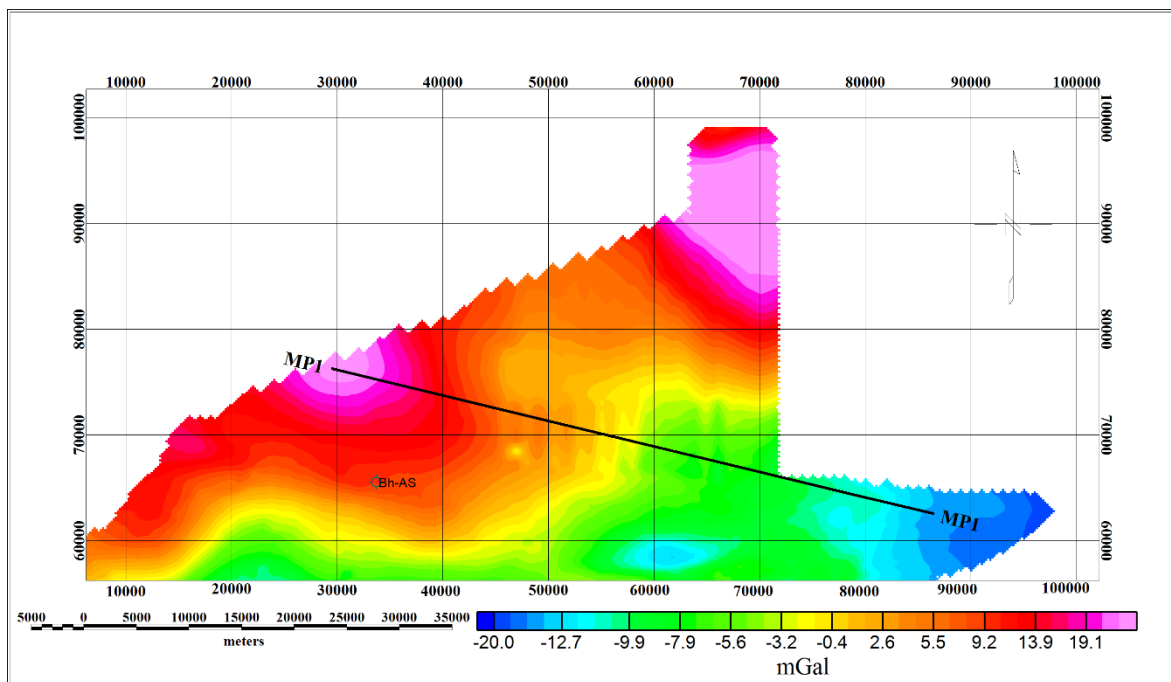
۵-۲-۳ مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی حوضه رسوبی مغان

پس از پردازش و رقومی‌سازی داده‌های مغناطیس کل منطقه مغان، نقشه تغییرات مغناطیس کل منطقه مغان بدست آمد (شکل ۵-۳). نقشه‌های آنومالی گرانی یک بالاراندگی در قسمت شمال و شمال شرقی منطقه را نشان می‌دهند. اختلاف گرانی در نقشه حدود ۱۴۰ میل گال می‌باشد. باتوجه به این که در قسمت شمال منطقه یک بالاراندگی و قسمتهای جنوب غربی و تا حدودی جنوب آن یک فروافتادگی مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان درمورد وضعیت ساختمانی منطقه این گونه اظهار نمود که پی سنگ در قسمت‌های شمالی بالا آمده و در قسمت‌های جنوبی حالت پایین افتاده دارد.



شکل ۴-۵ نقشه آنومالی گرانی منطقه مغان.

به منظور مدل سازی بستر ولکانیک محدوده مغان بر اساس داده های گرانی سنجی، بر روی نقشه داده های گرانی حوضه رسوبی مغان در نرم افزار Oasis montaj، یک پروفیل از داده ها منطبق بر مسیری که پیشتر نیز در دو مطالعه جداگانه با مدل سازی های گرانی و لرزه نگاری مورد مطالعه و مدل سازی قرار گرفته بود و برای مدل سازی با الگوریتم های فراابتکاری بکار گرفته شده در این تحقیق، در نظر گرفته شد. در شکل ۴-۵ که نقشه گرانی باقی مانده ناحیه شمالی دشت مغان را نشان می دهد؛ موقعیت مقطع مزبور مشخص شده است.



شکل ۵-۵ نقشه آنومالی گرانی باقیمانده منطقه شمالی مغان و پروفیل مدنظر

پروفیل MP1 دارای طول افقی تقریباً ۵۸۵۰۰ متر شامل ۱۱۸ نقطه در فواصل افقی برابر ۵۰۰ متری است.

مدل سازی پروفیل گرانی سنجی در منطقه مغان بوسیله الگوریتم مورچگان

به منظور مدل سازی مقطع پروفیل مزبور، مسیر پروفیل به منشورهایی قائم با عرض برابر ۵۰۰ متر تقسیم و مقطع مورد نظر با ۱۱۷ منشور با عرض ثابت ۵۰۰ متر افراز شد و تباین دانسیته بر اساس نتایج نمونه گیری های گذشته از لایه ها و سازندهای مختلف بصورت متوسط ۳۰۰- کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. تابع هزینه این مدل سازی و نیز الگوی توزیع غلظت فرومون بر روی گره ها، مشابه مدل سازی های داده های مصنوعی گرانی سنجی، به ترتیب مطابق روابط (۳-۴) و (۴-۴) در نظر گرفته شد.

پارامترهای q_0 ، ضریب تبخیر، فرومون اولیه، فاصله گره ها در عمق و تعداد مورچه ها به شیوه آنچه در مورد مدل سازی داده های مصنوعی گرانی سنجی بوسیله الگوریتم ACO بیان شد؛ تعیین گردیدند. بر این اساس با توجه افزایش بزرگتر بودن فضای جستجو هم در طول پروفیل و هم در عمق، فاصله گره ها در عمق به ۱۰ متر افزایش یافت. همچنین به منظور افزایش جستجوگری الگوریتم، ضریب تبخیر افزایش یافته و مقدار

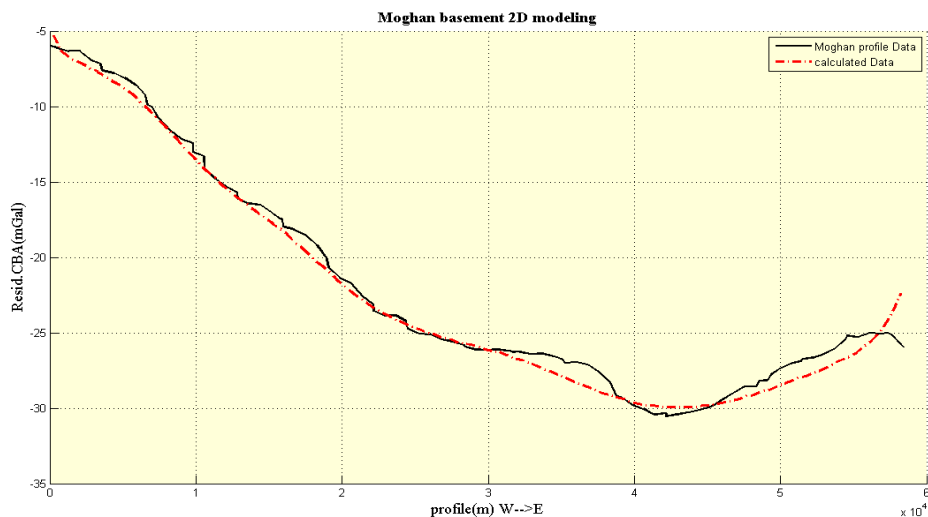
۰/۲ لحاظ شد. نظر به افزایش قابل توجه فضای جستجو و تعداد گره‌های مسأله، تعداد مورچه‌ها نیز به ۱۰۰۰ عدد افزایش یافت.

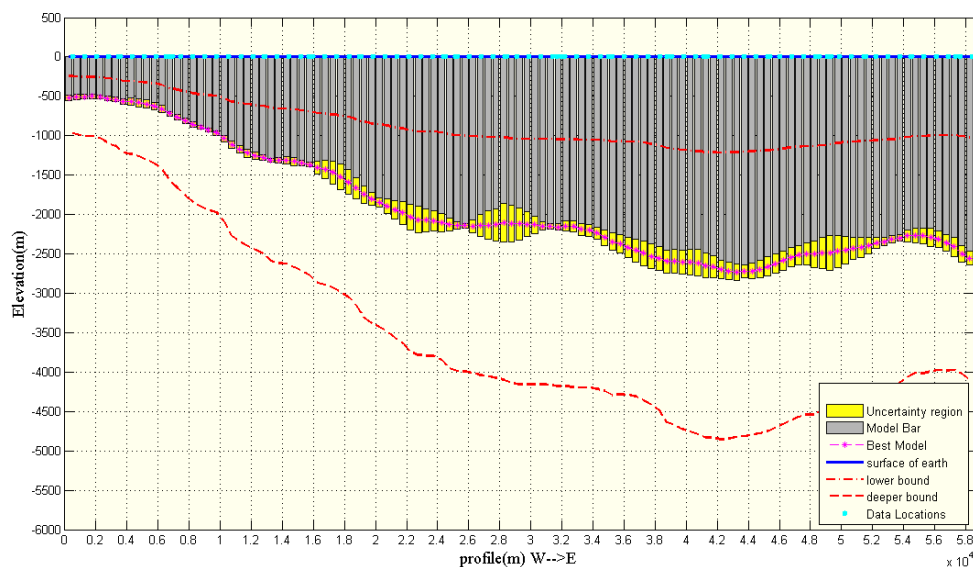
در جدول ۱-۵ مجموعه پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در این مدل‌سازی ارائه شده است.

جدول ۱-۵: پارامترهای تنظیمی الگوریتم ACO در مدل‌سازی پروفیل داده‌های گرانی حوضه رسوبی مغان.

q_0	ضریب تبخیر	فرمون اولیه	فاصله گره‌ها در عمق (m)	تعداد مورچه‌ها
۰/۵	۰/۲	۱	۱۰	۱۰۰۰

برای هموارتر شدن پاسخ‌های بدست آمده، فیلتر میانگین متحرک به صورت ۵ نقطه‌ای بر پاسخ‌ها اعمال شد. شکل ۶-۵ نتایج این مدل‌سازی را به همراه داده‌های برداشتی و داده‌های مدل نهایی نشان می‌دهد.



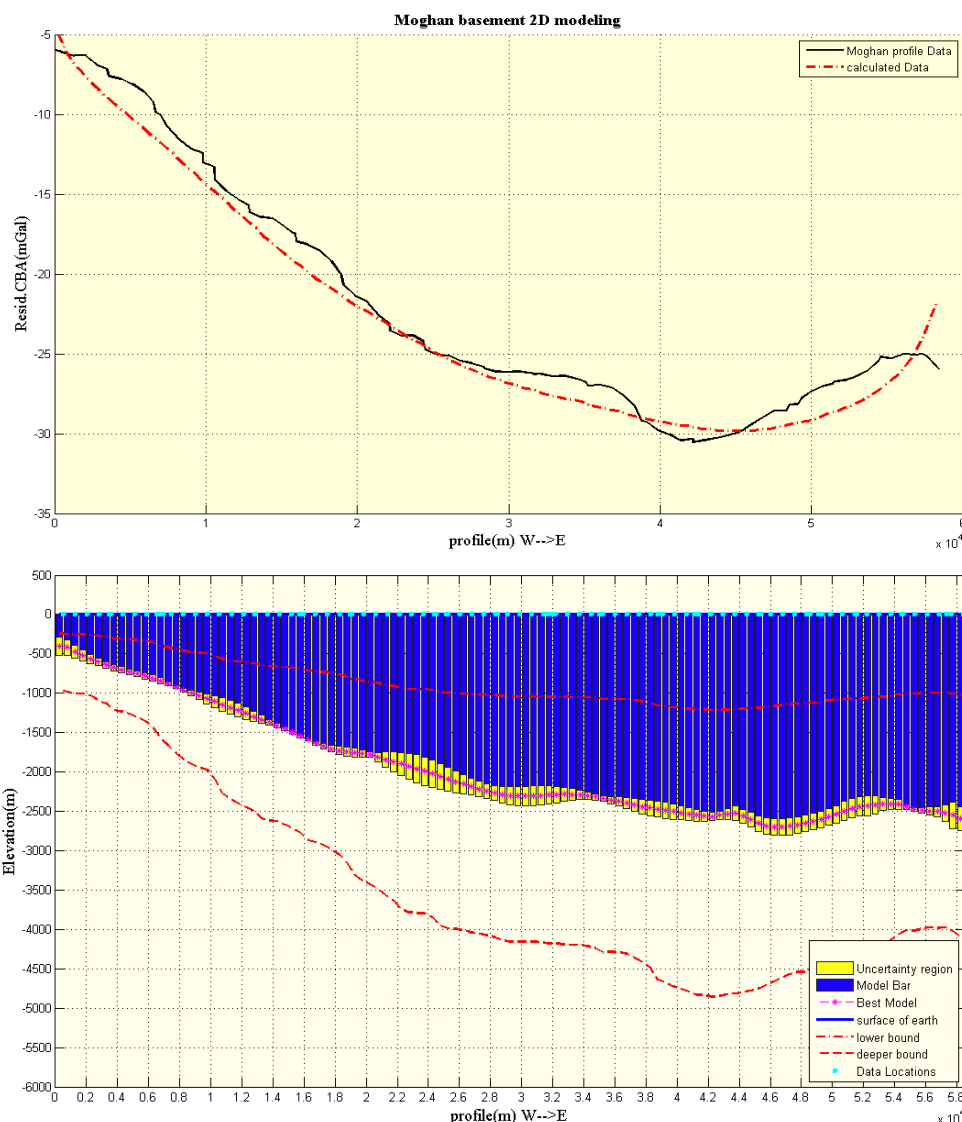


شکل ۵-۶ مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) $(RMS_{data}=0.67\text{mGal})$

مدل سازی پروفیل گرانی سنجی در منطقه مغان بوسیله الگوریتم رقابت استعماری

به منظور مدل سازی مقطع پروفیل مزبور، مسیر پروفیل به منشورهایی قائم با ابعاد و تباین دانسیته بیان شده برای بلوک بندی در بخش مدل سازی بوسیله الگوریتم مورچگان؛ افزاز شد. تابع هدف این مدل سازی نیز همچون مدل سازی های داده های مصنوعی گرانی سنجی توسط الگوریتم ICA، مطابق رابطه (۳-۴) در نظر گرفته شد.

پارامترهای تنظیمی الگوریتم و نیز پارامترهای تنظیمی فضای جستجو مطابق شرایط شرح داده شده در جدول ۴-۲ در نظر گرفته شد. برای هموارتر شدن پاسخ های بدست آمده، از فیلتر میانگین متحرک مشابه مدل سازی در الگوریتم مورچگان استفاده شد. شکل ۵-۷ نتایج این مدل سازی را به همراه داده های برداشتی و داده های مدل نهایی نشان می دهد.

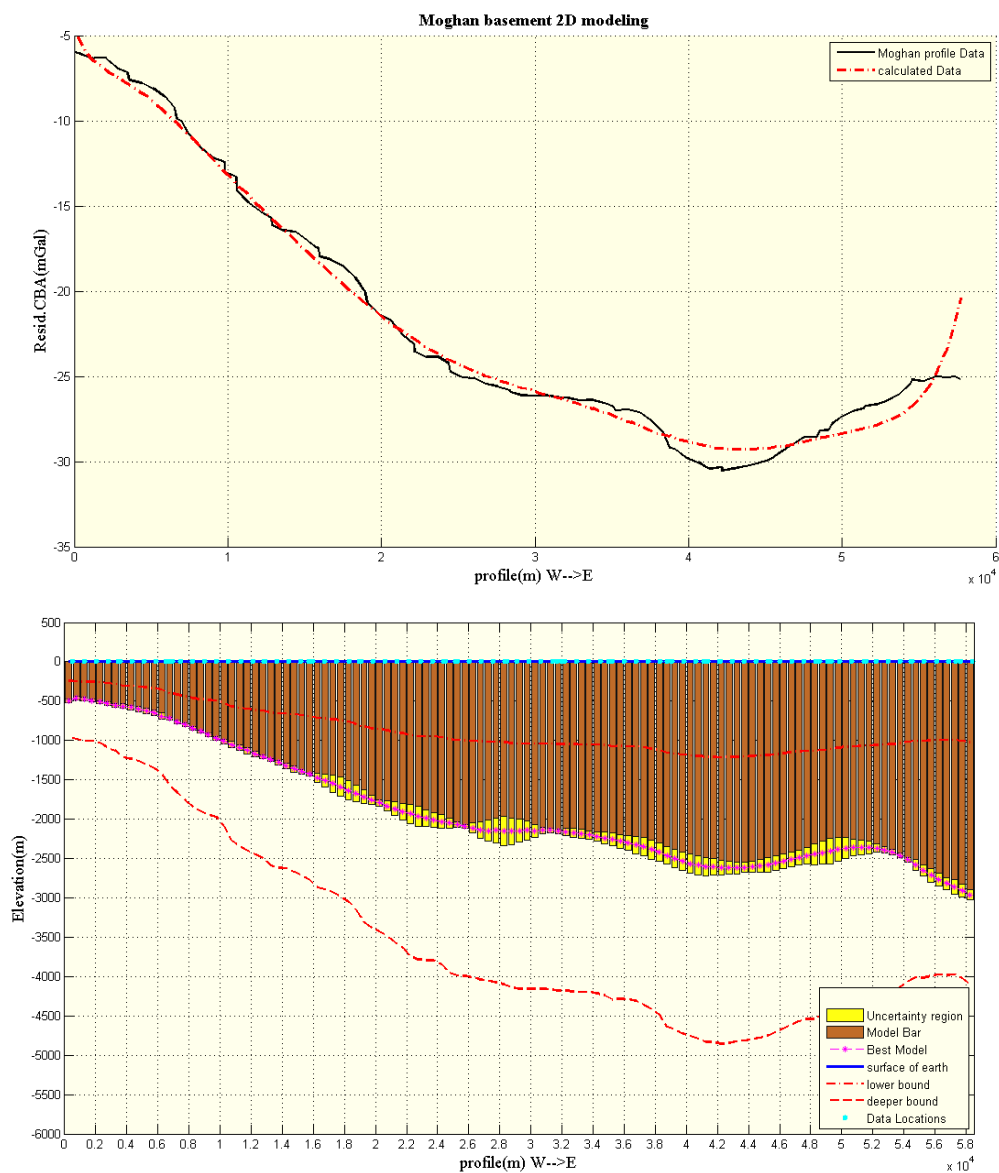


شکل ۵-۷ مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ($RMS_{data}=1.27mGal$).

مدل سازی پروفیل گرانی سنجی در منطقه مغان بوسیله هیبرید الگوریتم های رقابت استعماری و کرم شب تاب

به منظور مدل سازی مقطع پروفیل مزبور، مسیر پروفیل به منشورهای قائم با ابعاد و تباین دانسیته بیان شده برای بلوک بندی در بخش پیشین؛ افراز شد. پارامترهای تنظیمی الگوریتم و نیز پارامترهای تنظیمی فضای جستجو مطابق شرایط شرح داده شده در جدول ۴-۳ در نظر گرفته شد.

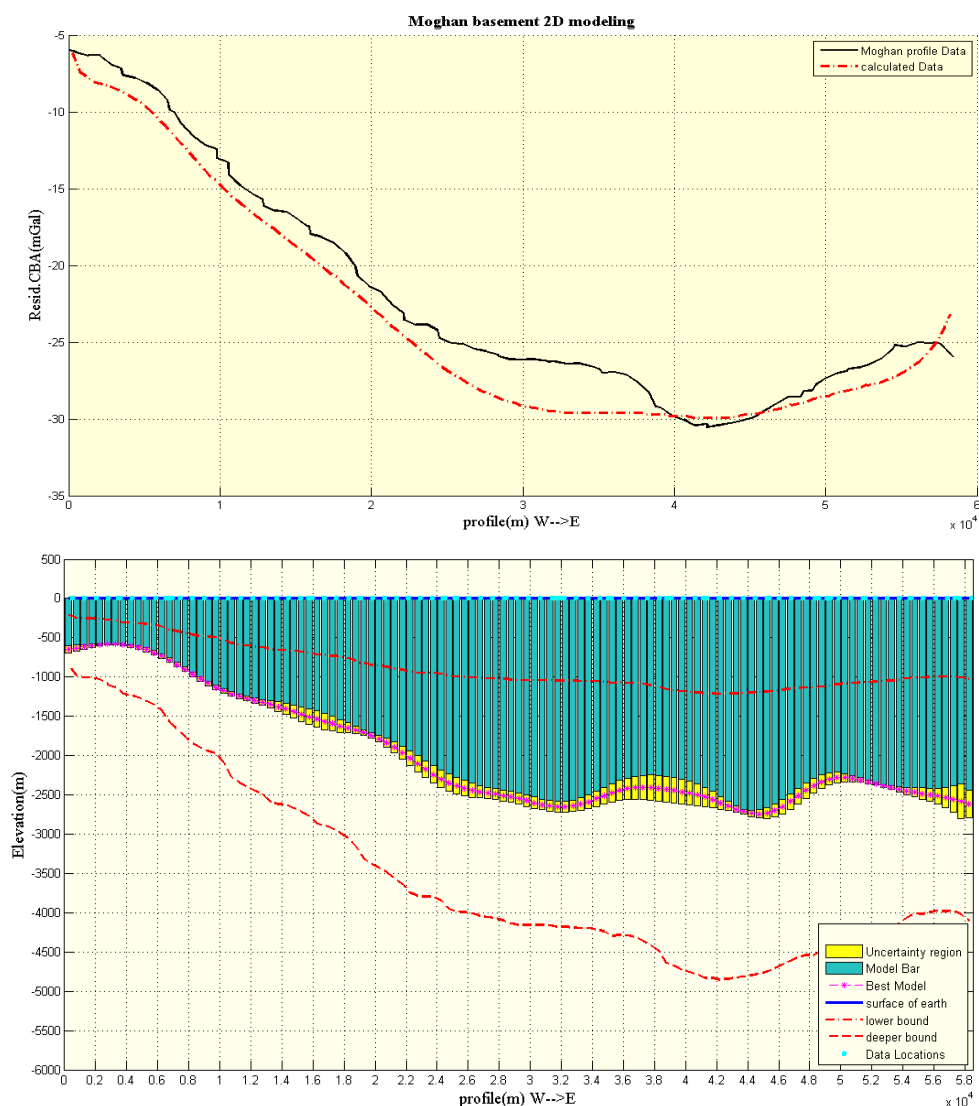
جهت هموارتر شدن پاسخهای بدست آمده، از فیلتر میانگین متحرک مشابه مدل سازی در الگوریتم ICA استفاده شد. شکل ۵-۸ نتایج این مدل سازی را به همراه داده های برداشتی و داده های مدل نهایی نشان می دهد.



شکل ۵-۸ مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA-FA و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 1.14 \text{ mGal}$).

مدل سازی پروفیل گرانی سنجی در منطقه مغان بوسیله الگوریتم رقابت ذرات

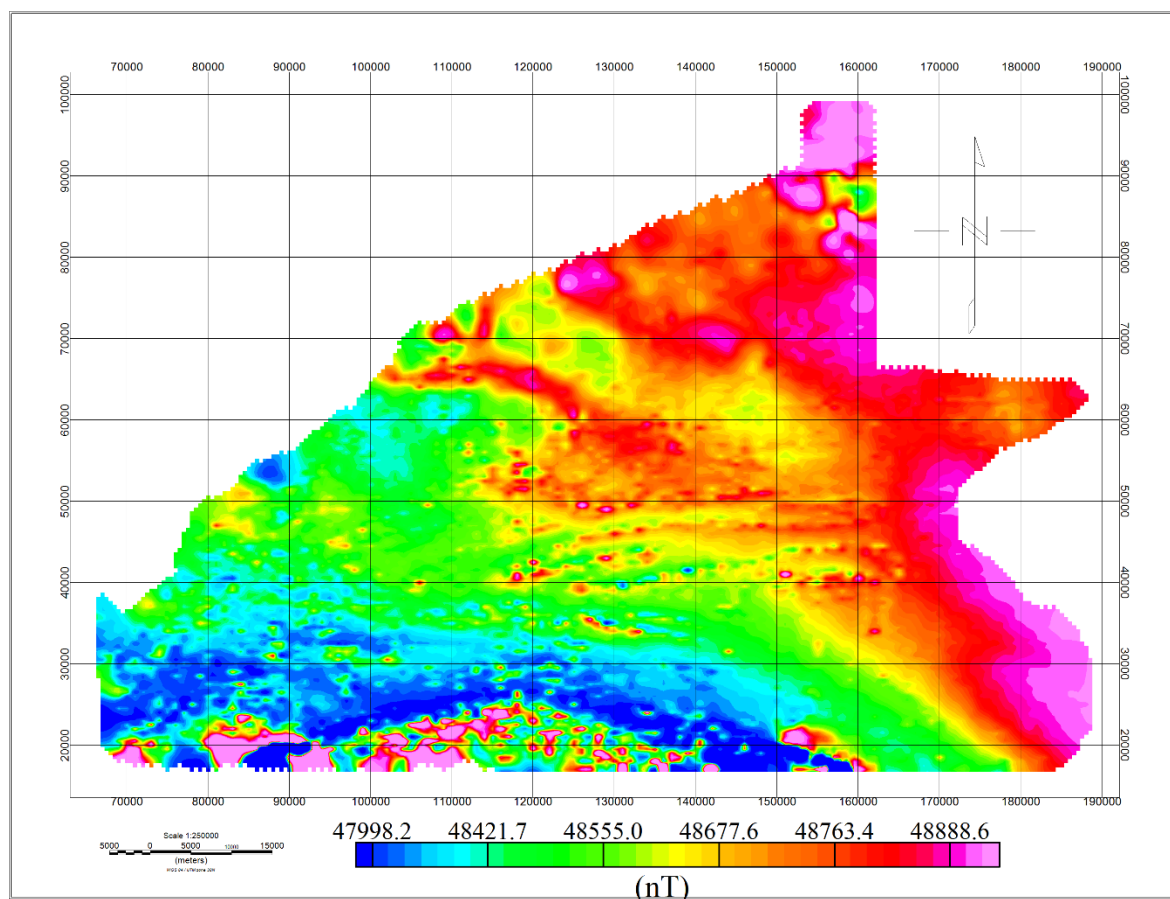
به منظور مدل سازی مقطع پروفیل مزبور، مسیر پروفیل به منشورهای قائم با ابعاد و تباین دانسیته بیان شده برای بلوک بندی در بخش پیشین؛ افراز شد. پارمترهای الگوریتم بصورت تصادفی و آزاد در بازه صفر و یک و اندازه جمعیت نیز ۲۵۰ در نظر گرفته شد. شکل ۵-۹ نتایج مدل سازی پروفیل مذکور بوسیله الگوریتم CSO را به همراه داده های برداشتی و داده های مدل نهایی نشان می دهد.



شکل ۵-۹ مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم CSO و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ($RMS_{data}=1.78mGal$).

۵-۲-۴ مدل سازی داده های مغناطیسی سنجی حوضه رسوبی مغان

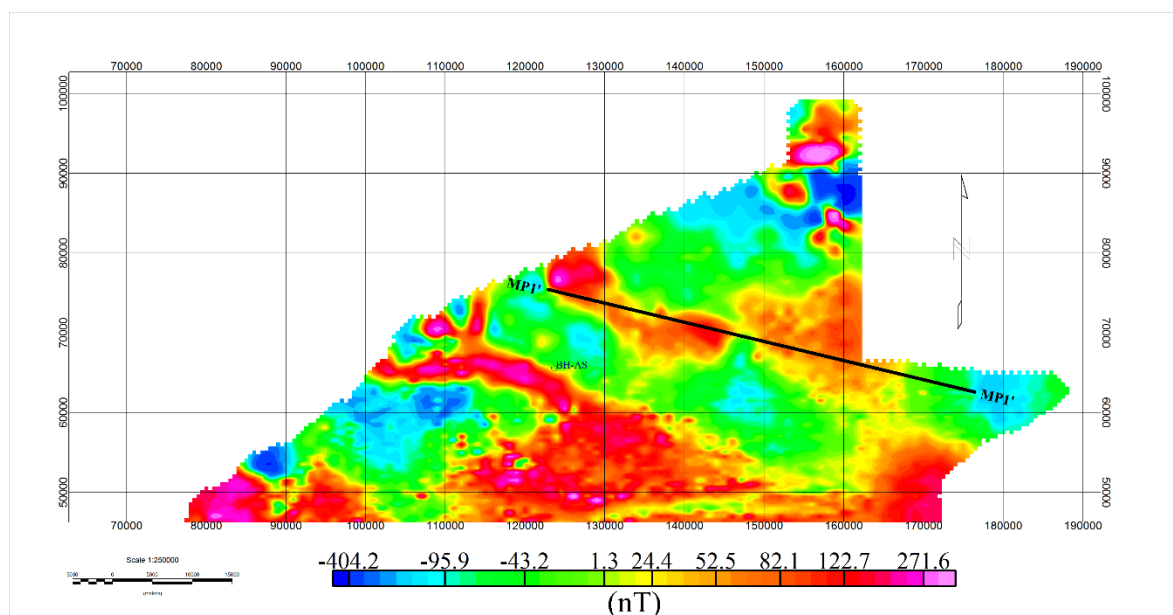
پس از پردازش و رقومی سازی داده های مغناطیسی کل منطقه مغان، نقشه تغییرات مغناطیسی کل منطقه مغان بدست آمد (شکل ۵-۱۰). بازه تغییرات شدت میدان کل مغناطیسی حدود ۹۰۰ نانوتسلا است. نویزهای مغناطیسی سبب افت کیفیت اطلاعات مغناطیسی شده است. اگر از آنومالی های قسمت جنوبی منطقه صرف نظر شود، روند تغییرات شدت میدان مغناطیسی انطباق خوبی با آنومالی بوگه دارد. پیوستگی شکل آنومالی های مغناطیسی موجود در قسمت شمالی و شرق منطقه (محدوده برداشت گرانی و ومغناطیسی سنجی) حاکی از منشاء آذرین (پی سنگی) است.



شکل ۵-۱۰ نقشه مغناطیسی کل باقیمانده منطقه مغان.

به منظور مدل سازی بستر ولکانیک محدوده مغان بر اساس داده های مغناطیسی سنجی، بر روی نقشه

داده‌های مغناطیس کل باقیمانده حوضه رسوبی مغان در نرم‌افزار Oasis montaj، یک پروفیل از داده‌ها منطبق بر راستایی که پیشتر نیز در بخش مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی مورد مطالعه و مدل‌سازی قرار گرفته بود؛ برای مدل‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری بکار گرفته شده در این تحقیق، در نظر گرفته شد. در شکل ۱۱-۵ موقعیت مقطع مزبور بر روی نقشه مغناطیس کل باقی‌مانده ناحیه شمالی دشت مغان مشخص شده است.

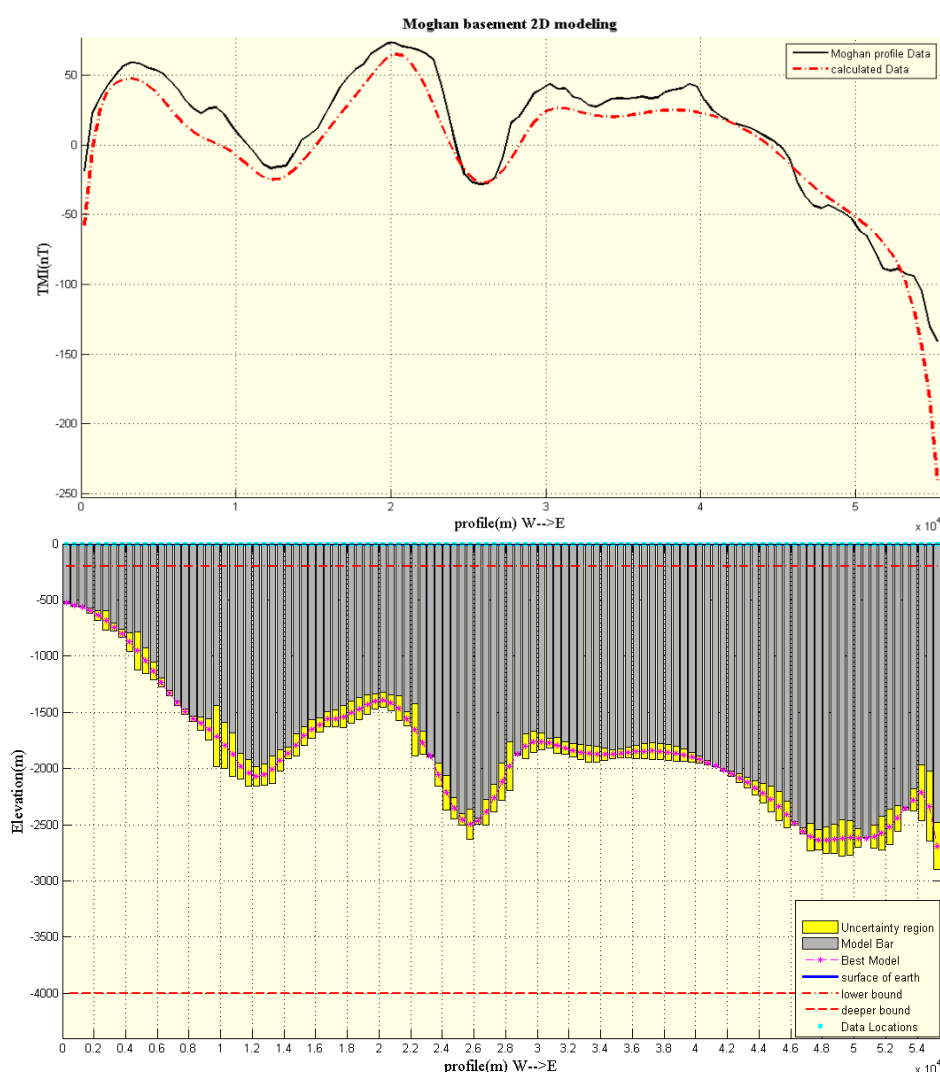


شکل ۱۱-۵ نقشه مغناطیسی کل باقیمانده شمال منطقه مغان و پروفیل مدنظر.

مدل‌سازی پروفیل مغناطیس‌سنجی در منطقه مغان بوسیله الگوریتم مورچگان

به منظور مدل‌سازی مقطع پروفیل 'MP1'، مسیر ۵۶ کیلومتری پروفیل به منشورهایی قائم با عرض برابر ۵۰۰ متر تقسیم و مقطع مورد نظر با ۱۱۲ منشور با عرض ثابت ۵۰۰ متر افراز و پهنای این بلوک‌ها ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. تباین خودپذیری مغناطیسی رسوبات و لایه بازالتی با استفاده از اطلاعات موجود زمین‌شناسی در هر بلوک ۰/۰۰۱۱ (در سیستم SI) در نظر گرفته شده است. همچنین بر اساس اطلاعات زمان برداشت داده در منطقه مورد مطالعه میدان مغناطیسی کلی زمین ۴۹۰۰۰ نانوتسلا و با زاویه میل ۵۷/۴ درجه، زاویه انحراف ۴/۵ بوده است.

برای تعیین مرزهای جستجوی ضخامت (عمق) برای کلیه منشورها بر اساس اطلاعات اولیه از مطالعات و مدل‌سازی‌های پیشین، و نیز چندین بار اجرای برنامه با مقادیر مختلف مرز جستجو، در نظر گرفته شد که فضای جستجو بطور ثابت بین ۲۰۰ متر تا ۴۰۰۰ متر در نظر گرفته شود. پارامترهای تنظیمی الگوریتم مطابق پارامترهای تنظیمی این الگوریتم مربوط به مدل‌سازی داده‌های مصنوعی گرانی؛ ارائه شده در جدول ۱-۵ در نظر گرفته شد. شکل ۱۲-۵ نتایج این مدل‌سازی را به همراه داده‌های برداشتی و داده‌های مدل نهایی نشان می‌دهد.

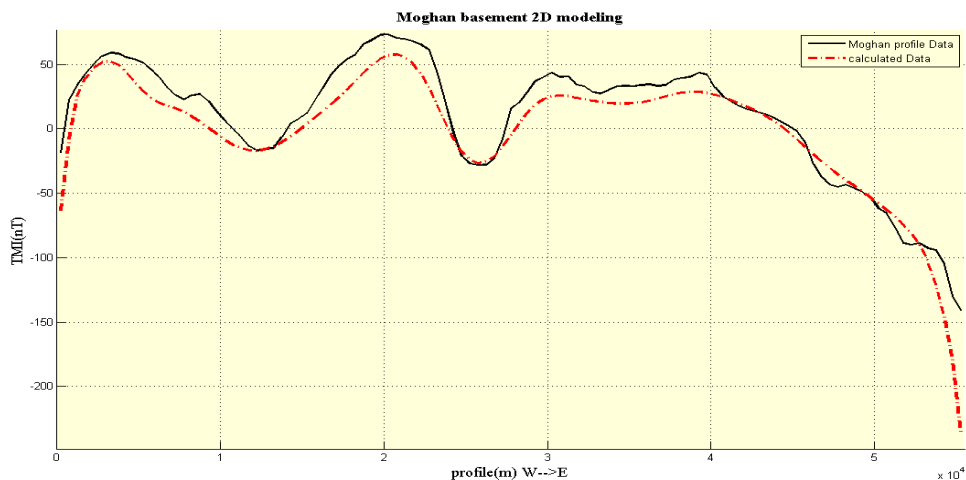


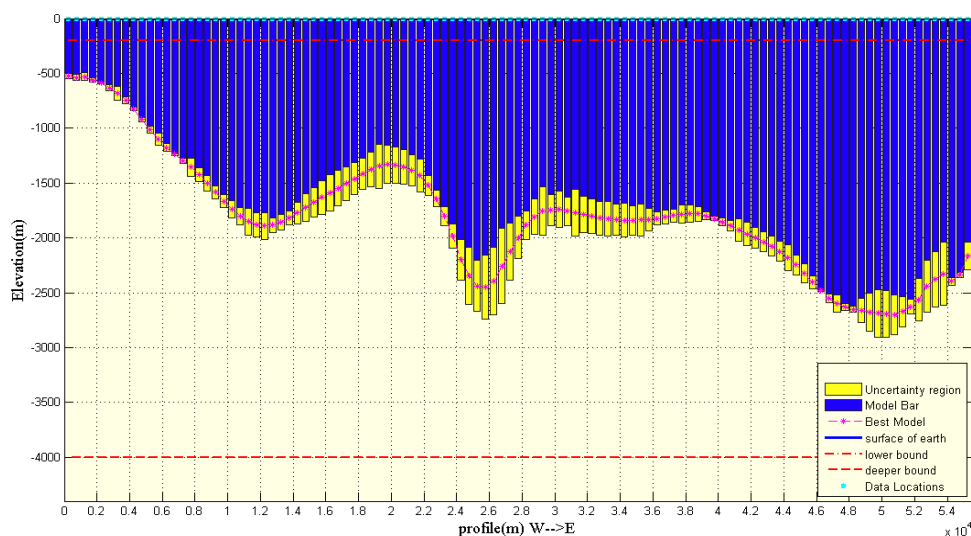
شکل ۱۲-۵ مدل‌سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی مغناطیسی کل محاسبه شده و داده‌های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ACO و مرزهای فضای جستجو (تصویر

پایین) ($RMS_{data} = 18.21 \text{ nT}$).

مدل سازی پروفیل مغناطیس سنجی در منطقه مغان بوسیله الگوریتم رقابت استعماری

به منظور مدل سازی مقطع پروفیل مزبور، مسیر پروفیل به منشورهای قائم با ابعاد و مغناطیدگی بیان شده برای بلوک بندی در بخش مدل سازی بوسیله الگوریتم مورچگان؛ افزاز شد. تابع هدف این مدل سازی نیز همچون مدل سازی های داده های مصنوعی مغناطیس سنجی توسط الگوریتم ICA، مطابق رابطه (۳-۴) در نظر گرفته شد. پارامترهای تنظیمی الگوریتم مطابق پارامترهای تنظیمی این الگوریتم مربوط به مدل سازی داده های مصنوعی گرانی؛ ارائه شده در جدول ۴-۲ در نظر گرفته شد. برای هموارتر شدن پاسخ های بدست آمده، از فیلتر میانگین متحرک مشابه مدل سازی در الگوریتم مورچگان استفاده شد. شکل ۵-۸ نتایج این مدل سازی را به همراه داده های برداشتی و داده های مدل نهایی نشان می دهد.





شکل ۵-۱۳ مدل سازی دوبعدی حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد مطالعه: آنومالی مغناطیسی کلی محاسبه شده و داده-های برداشتی (تصویر بالا) مدل حاصل از بکارگیری الگوریتم ICA و مرزهای جستجو (تصویر پایین) ($RMS_{data} = 17.61 \text{ nT}$).

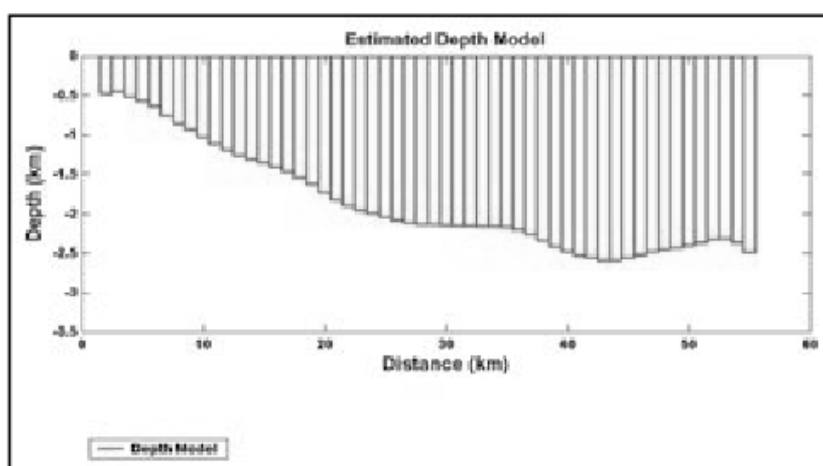
۵-۲-۵ بحث و تحلیل نتایج مدل سازی های داده های گرانی و مغناطیس سنجی حوضه مغان

در مدل سازی داده های واقعی، از آنجا که مدل حقیقی برای مقایسه دقیق کمی وجود ندارد، باید از تمام اطلاعات و شواهد زمین شناسی و ژئوفیزیکی موجود در منطقه به منظور اعتبار سنجی استفاده شود. بر این اساس به منظور صحت سنجی نتایج بدست آمده از مدل سازی های صورت گرفته از رسوبات حوضه رسوبی مغان در مقطع مورد اشاره، این نتایج ابتدا با اطلاعات زمین شناسی موجود از منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت سپس با نتایج لرزه نگاری و نیز نتایج مطالعات گرانی پیش تر انجام شده در منطقه بوسیله روش های دیگر مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفت.

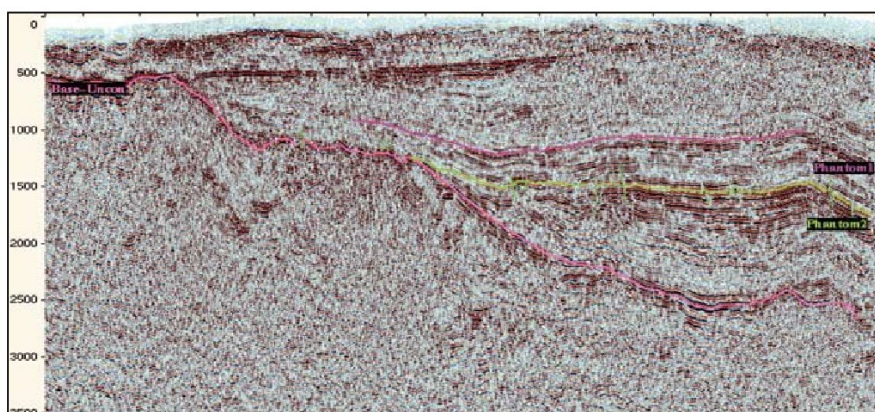
مدل های بدست آمده بطور کلی موید بالا آمدگی سنگ بستر در قسمت غربی پروفیل و فروافتادگی تدریجی در قسمت شرقی می باشد که با روند زمین شناسی بدست آمده از مقاطع زمین شناسی پیشین و نیز ستون چینه شناسی منطقه مطابقت دارد. در میان حفاری های صورت گرفته در منطقه نزدیک ترین چاه که در منطقه اصلاندوز در بخش شمال غربی منطقه حفاری شده است (موقعیت آن در شکل های ۵-۵ و

۱۱-۵ نشان داده شده است). نتایج حفاری چاه مورد اشاره از وجود لایه بازالتی سنگ بستر در عمق حدود ۱۱۰۰ متری را نشان می‌دهد. که با توجه به نتایج مطالعات زمین شناسی و عدم وجود گسل خوردگی مهمی در حد فاصل چاه مزبور و مسیر پروفیل، مشابهت و نزدیکی نتایج مدل سازی با عمق بدست آمده از این حفاری مناسب و منطقی به نظر می‌رسد.

همچنین بررسی مقایسه نتایج این مدل سازی با نتایج مدل سازی های گرانی پیشین با الگوریتم مارکوارت-لونبرگ در این مقطع (شکل ۵-۱۵) و نیز نتایج لرزه نگاری در این مقطع (شکل ۵-۱۴) و همچنین نتایج حفاری های صورت گرفته در دو قسمت شمال غرب و شمال شرق ساختار یکسانی از روند تغییرات عمق سنگ بستر را نشان می‌دهد که با نتایج مدل سازی صورت گرفته در این تحقیق مطابقت خوبی نشان می‌دهند.



شکل ۵-۱۴ مدل سازی پیش تر انجام شده مقطع مورد مطالعه بوسیله الگوریتم مارکوارت-لونبرگ [۱۱۸].



شکل ۵-۱۵ مقطع لرزه نگاری نیم‌رخ مورد مطالعه [۱۱۸].

۵-۳ مدل‌سازی داده‌های گرانی حوضه رسوبی لس‌آنجلس (کالیفرنیا)

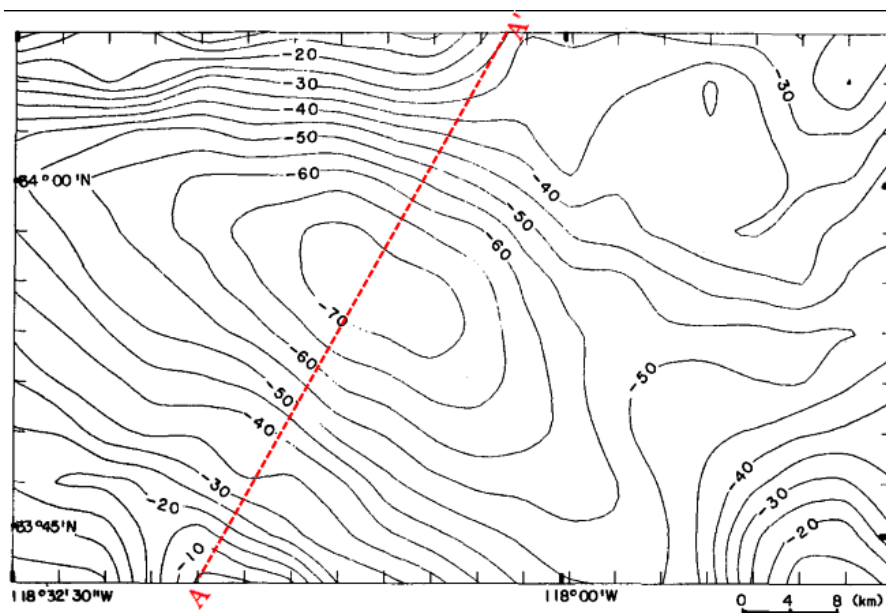
سنگ‌های جنوب غرب کالیفرنیا، شامل حوضه رسوبی لس‌آنجلس بوسیله یک ناپیوستگی (دگرشیبی) متعلق به دوران کرتاسه میانی؛ به دو زیر گروه بزرگ تقسیم می‌شوند. زیر ناپیوستگی سنگ بستری از جنس دگرگونی و آذرین کریستاله از پرکامبرین تا اوایل کرتاسه وجود دارد و در بالای ناپیوستگی مقطع نازکی از رسوبات دریایی و غیردریایی به همراه سنگ‌های آذرینی از اواخر کرتاسه تا عصر حاضر وجود دارد [۱۱۹]. بخش بزرگی از سنگ بستر عمیقاً توسط رسوبات حوضه لس‌آنجلس مدفون شده است و شواهد ساختار اولیه سنگ؛ پس از تکامل سنوزوئیک تا حدود زیادی پوشانده شده یا از بین برده است [۲۲ و ۱۱۹]. نقشه خطوط تراز گرانی حوضه لس‌آنجلس نخست توسط هینز و چائی تفسیر شد [۵۵]. این تفسیر به کمک یک تابع چگالی نمایی^۱ که از برازش به داده‌های اندازه گیری شده دانسیته-عمق توسط مک کولوه^۲ بدست آمده بود؛ انجام شد [۲۲].

^۱ Exponential Density Function

^۲ McCulloh, 1960

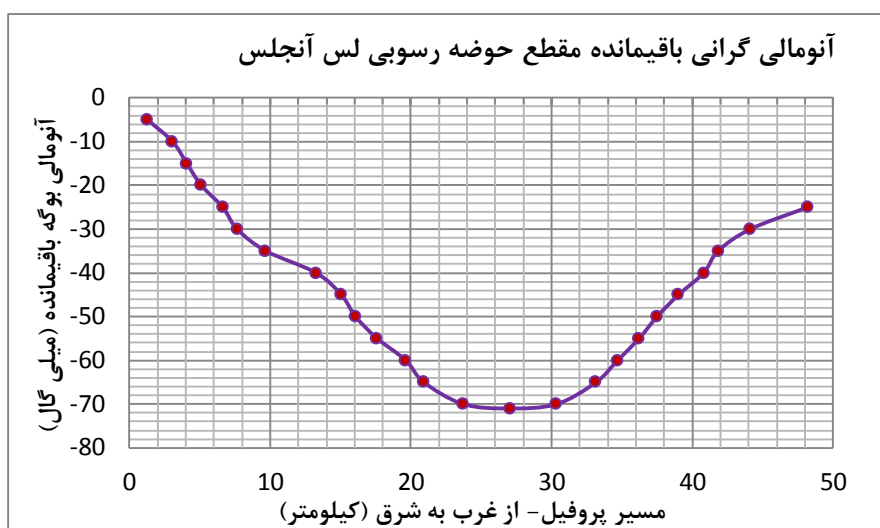
رئو^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۰ یک تابع درجه دوم به داده‌های اندازه‌گیری شده دانسیته-عمق، رسوبات حوضه لس آنجلس برازش نموده و ضرایب این تابع درجه دوم را تعیین نمودند [۵۶]. این ضرایب که در این رساله نیز استفاده شد عبارتند از: $a_0 = -0.49 \text{ g/cm}^3$, $a_1 = 0.067 \text{ g/cm}^3/\text{Km}$, $a_2 = -0.0028 \text{ g/cm}^3/\text{Km}^2$. در این مطالعه برای مدل‌سازی مقطع حوضه لس آنجلس بوسیله داده‌های گرانی؛ پروفیل از نقشه خطوط تراز گرانی باقیمانده حوضه (ترسیم شده توسط هینز و همکاران - ۱۹۸۸) [۵۵] استخراج و استفاده شد (خط AA' در شکل ۵-۱۰).

شکل ۵-۱۰ نقشه خطوط تراز گرانی باقیمانده حوضه لس آنجلس را نشان می‌دهد؛ که با حذف یک اثر ناحیه‌ای خطی از نقشه آنومالی گرانی بوگه بدست آمده است [۵۵]؛ به گونه‌ای که در سه ناحیه رخنمون‌های اطراف حوضه، مقادیر گرانی نسبی صفر در نظر گرفته شده است [۱۲۱].



شکل ۵-۱۶ نقشه خطوط تراز آنومالی گرانی حوضه لس آنجلس [۵۵] (AA' پروفیل استخراج داده‌های گرانی از نقشه).

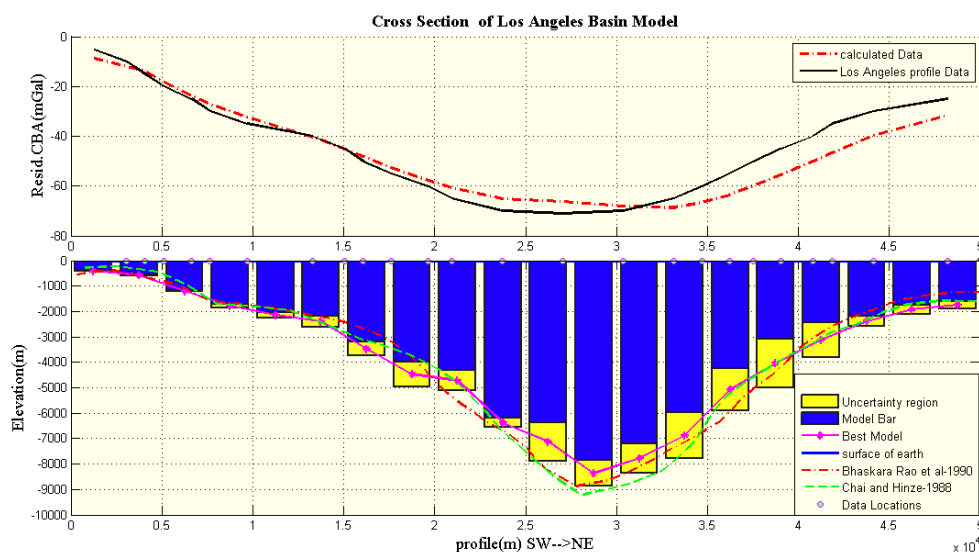
طول پروفیل AA' که در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده، حدود ۵۰ کیلومتر است. از اطلاعات این نقشه در ۲۵ نقطه بر روی پروفیل AA' نمونه برداری شده است. داده‌های مستخرج از این پروفیل‌زنی، در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۷ آنومالی گرانی باقیمانده حوضه لس آنجلس در مسیر پروفیل AA'.

برای آنالیز دو و نیم بعدی پروفیل گرانی AA'، مسیر پروفیل به منشورهایی با عرض ۲۵۰۰ متر تقسیم شد. بر این اساس، مقطع مورد نظر شامل ۲۰ منشور با عرض ثابت ۲۵۰۰ متر است. نیم پهنای هر منشور از نقشه خطوط تراز گرانی در راستای عمود بر AA' در نظر گرفته شد. بنابراین در این مدل‌سازی نیم پهنای هر منشور منحصر به خود آن منشور و متفاوت با بقیه در نظر گرفته شد.

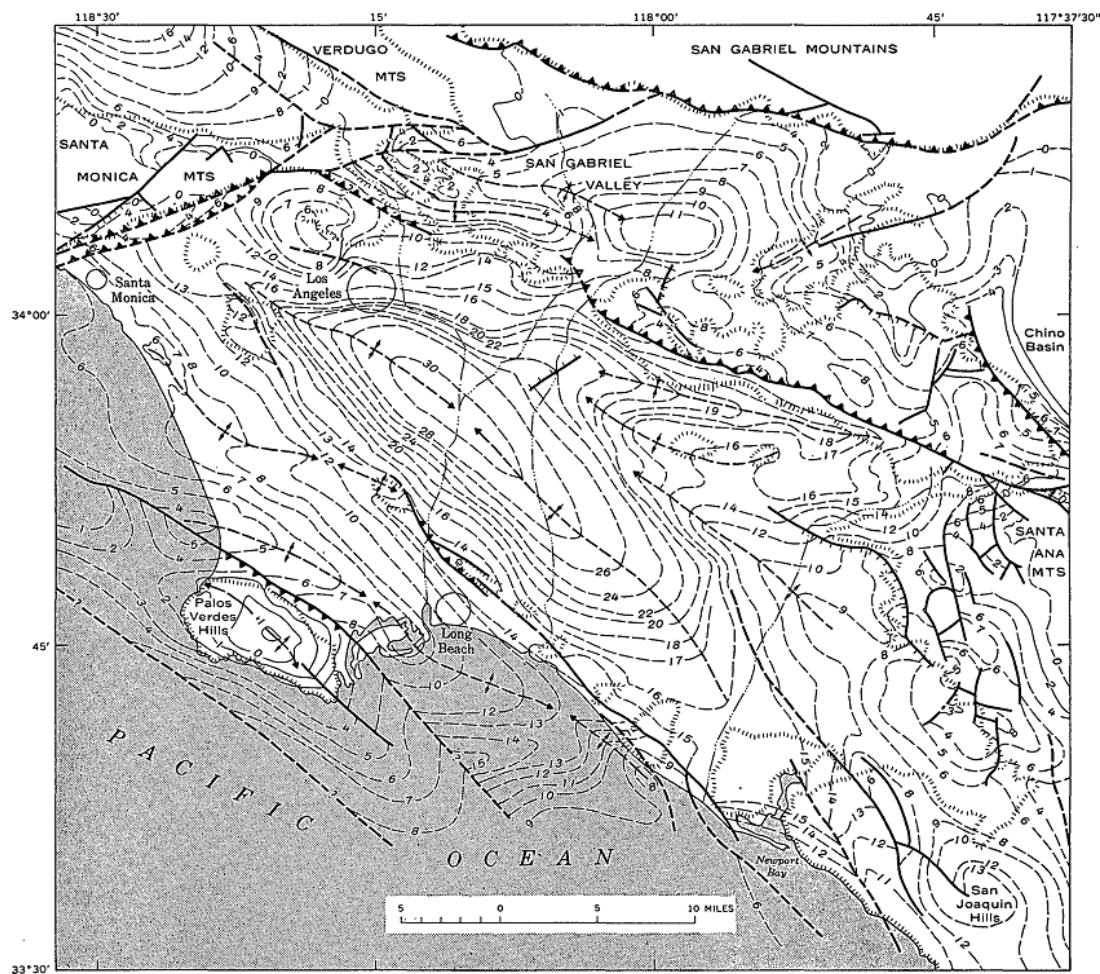
بر مبنای ضرایب تابع سهموی تغییرات دانسیته، حوضه مذکور تباین بین رسوبات و سنگ بستر در سطح زمین ۰/۴۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب در نظر گرفته شد؛ که با افزایش عمق کاهش می‌یابد. پارامترهای تنظیمی الگوریتم در این مدل‌سازی و نیز پارامترهای تنظیمی فضای جستجو مطابق شرایط شرح داده شده در جدول ۴-۴ نظر گرفته شد. شکل ۵-۱۸ نتایج این مدل‌سازی را به همراه داده‌های برداشت و داده‌های مدل نهایی و نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۸ مقطع دوبعدی مدل سازی شده از داده های گرانی حوضه لس آنجلس: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشتی (تصویر بالا) مدل تولید شده و مدل های مطالعات گذشته (تصویر پایین).

شکل ۵-۱۸ نشان می دهد آنومالی محاسبه شده از مدل، با آنومالی داده های اولیه مطابقت بسیار خوبی دارد. مدل بدست آمده در این تحقیق با نتایج مدل سازی های گذشته داده های گرانی [۱ و ۲۲ و ۵۵ و ۵۶ و ۱۲۲] و نیز مطالعات پیشین لرزه نگاری [۱۲۳ و ۱۲۴] در حوضه لس آنجلس همخوانی خوبی دارد و صحت نتایج مدل سازی صورت گرفته بوسیله الگوریتم ICA را به تایید می رساند. همچنین نقشه ساختاری منطقه لس آنجلس که در شکل ۵-۱۳ به تصویر کشیده شده، نشان می دهد حد کثر عمق رسوبات به ۳۰ فوت^۱ تقریباً معادل ۹/۱ کیلومتر می رسد و از شیب نسبتاً تند توپوگرافی سنگ بستر به ویژه در قسمت جنوب غربی حوضه (قسمت سمت چپ مدل) حکایت می کند؛ که مطابقت مناسب مدل حاصله با نتایج مطالعات زمین شناسی است.

^۱ ۱ feet



EXPLANATION

Structure contours
 Drawn on basement rock surface. Dashed where inferred. Contour interval is 1000 feet except where odd-numbered contours dropped for clarity; numbers are zero or minus except at crest of Palos Verdes Hills. Datum is mean sea level

Fault
 Dashed where approximately located; queried where doubtful

Reverse fault
 Dashed where approximately located; teeth on upthrown side

Normal fault
 Hachures on down-thrown side

Anticline
 Showing direction of plunge

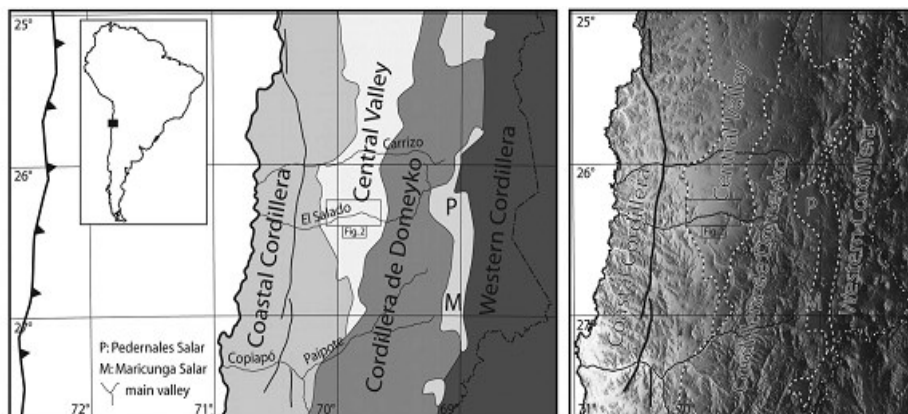
Syncline
 Showing direction of plunge

شکل ۵-۱۹ نقشه پدیده‌های مهم ساختاری حوضه رسوبی لس‌آنجلس به همراه خطوط توپوگرافی سنگ بستر حوضه [۱۱۹]

۵-۴ مدل‌سازی داده‌های گرانی رسوبات صحرای آتاکاما (شیلی)

صحرای آتاکاما واقع در شیلی یک حوضه رسوبی کم عمق است؛ که می‌توان تباین دانسیته رسوبات و سنگ بستر آن را ثابت فرض نمود. داده‌های یک پروفیل گرانی در صحرای آتاکاما که قبلاً نیز در دو مطالعه

جداگانه با الگوهایی متفاوت مورد مطالعه و مدل سازی قرار گرفته؛ برای مدل سازی در نظر گرفته شد. در شکل ۵-۲۰ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر ارائه شده است.



شکل ۵-۲۰ موقعیت جغرافیایی منطقه صحرای آتاکاما (شیلی) [۱۲۵].

منطقه مورد مطالعه در آتاکاما، حوضه‌ای رسوبی در حاشیه رشته کوه‌های آند^۱ است؛ که با حجم عظیمی از رسوبات قاره‌ای ناشی از فرسایش کوه‌های مزبور پر شده است. این رسوبات که به عنوان سازند گراول آتاکاما^۲ نیز شناخته می‌شوند؛ اغلب از رسوبات با چگالی وزنی پایین (شن‌های رودخانه‌ای و ماسه و رس) تشکیل شده‌اند و در سمت غربی کمان آتشفشانی آند و بر روی سنگ بستری آندزیتی^۳ قرار گرفته‌اند. به سبب اختلاف چگالی شدیدی که بین رسوبات این حوزه با سنگ بستر آندزیتی آن (حدود ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) وجود دارد [۱۲۵]؛ این منطقه می‌تواند نامزد خوبی برای حل مسائل وارون سازی داده‌های گرانی‌سنجی باشد.

در این تحقیق از داده‌های یک پروفیل برداشت داده‌های گرانی که در سال ۲۰۰۴ در این حوزه رسوبی (دره ال سالادو^۴) با هدف شناسایی توپوگرافی سنگ بستر سازند آتاکاما انجام پذیرفته و گزارش آن

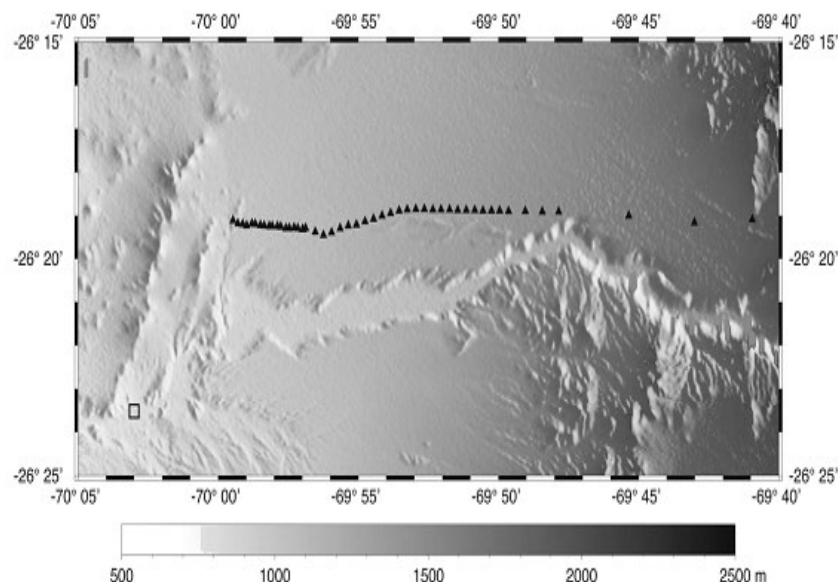
1 Andes mountains

2 Atacama gravel formation

3 Andesitic

4 El Salado valley

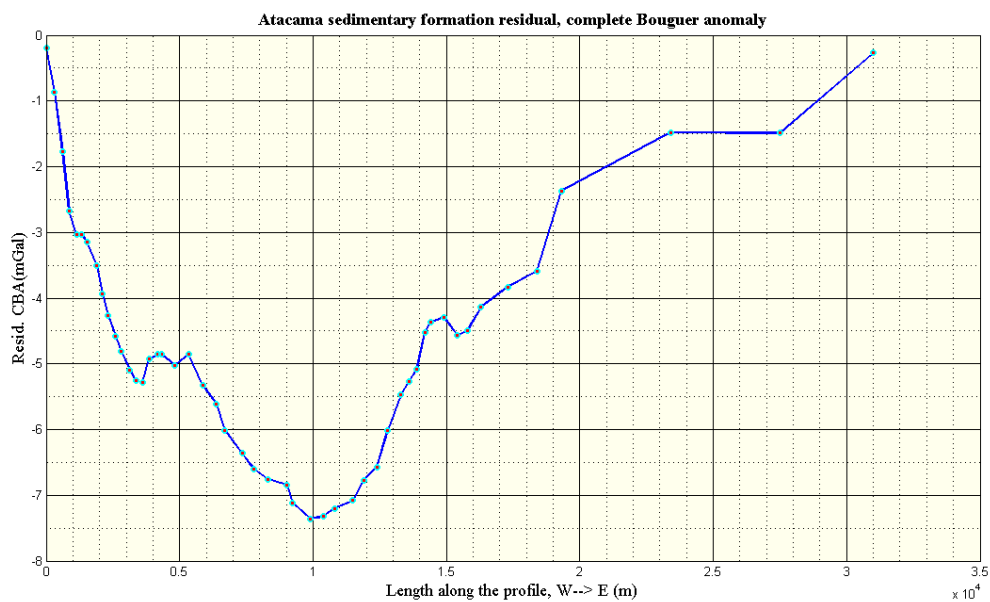
مطالعات انتشار یافته است؛ استفاده شد. شکل ۵-۲۱ موقعیت این برداشت‌ها را بر روی تصویر توپوگرافی SRTM منطقه نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱ موقعیت نقاط برداشت داده‌های گرانی (مثلث‌های سیاه‌رنگ) به همراه موقعیت ایستگاه مبنا (مربع تو خالی) بر روی تصویر توپوگرافی SRTM [۱۲۵]

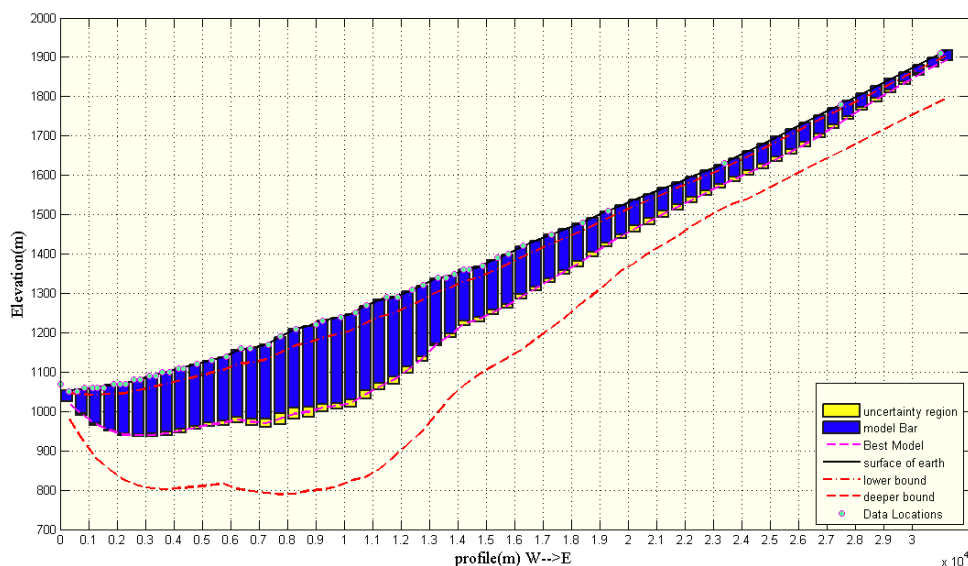
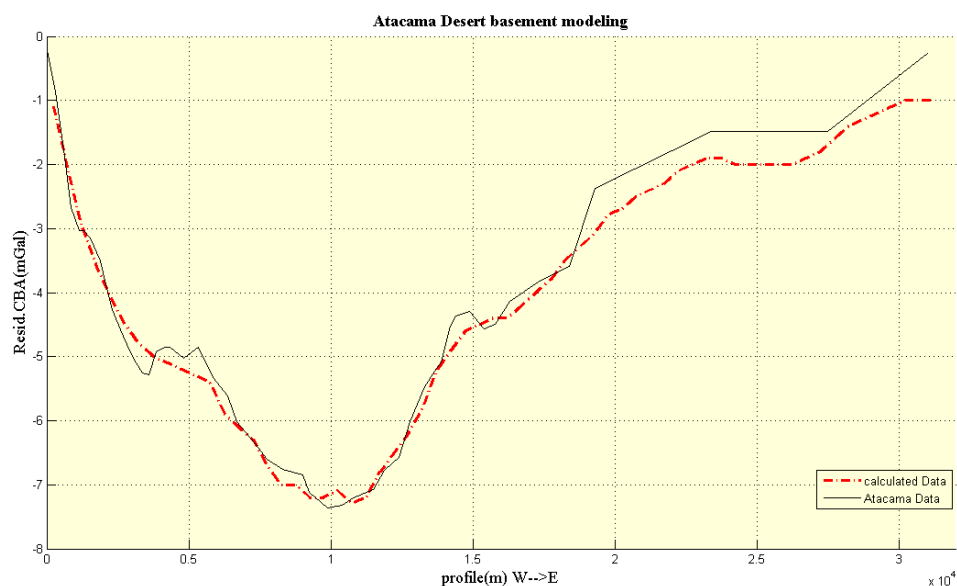
پروفیل مذکور حاوی ۵۳ نقطه گرانی در فواصل نامنظم در مسیری به طول حدود ۳۱ کیلومتر است؛ که به وسیله دستگاه گرانی‌سنج سینترکس^۱ CG3-3M برداشت شده‌اند. دقت تقریبی این داده‌ها حدود ۲۰ میکروگال است. در شکل ۵-۲۲ داده‌های آنومالی بوگه باقیمانده این پروفیل (پس از انجام تصحیحات لازم و نیز کاستن یک روند سطحی ناشی از صفحه فرورانش) نمایش داده شده است.

1 Scintrex



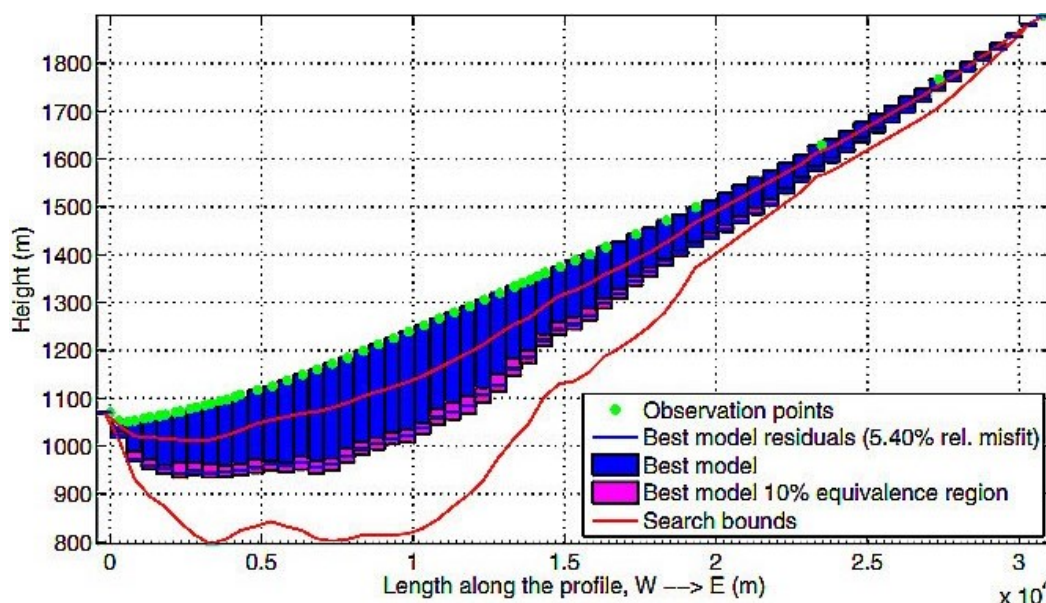
شکل ۵-۲۲ داده های آنومالی باقیمانده گرانی حاصل از کاستن روند ناحیه ای از داده های بوگه کل در پروفیل. برای مدل سازی این داده ها، ابتدا مقطع رسوبات بوسیله ۶۳ منشور با عرض ۵۰۰ متر مدل شد و پارامترهای تنظیمی الگوریتم و نیز پارامترهای تنظیمی فضای جستجو مطابق شرایط شرح داده شده در جدول ۴-۲ نظر گرفته شد. برای اعمال قید هموارساز از فیلتر میانگین متحرک پنج نقطه ای تولید شده بر اساس توزیع نرمال، استفاده شد و بر روی هر راه حل تولیدی پیش از مرحله ارزیابی، راه حل در تابع هزینه اعمال گردید.

شکل ۵-۲۳ نتایج این مدل سازی را به همراه داده های برداشتی و داده های مدل نهایی نشان می دهد.



شکل ۲۳-۵ مدل سازی دوبعدی پروفیل گرانی حوضه رسوبی آتاکاما: آنومالی گرانی محاسبه شده و داده های برداشت (تصویر بالا) مدل تولید شده و مرزهای فضای جستجو (تصویر پایین) ($RMS_{data}=0.34mGal$)

مدل ارائه شده در شکل ۲۳-۵ با نتایج مطالعات پیشین [۲۹ و ۱۲۵] (شکل ۲۴-۵) همخوانی مناسبی داشته و می توانند صحت نتایج مدل سازی با الگوریتم ICA را تایید می نماید. همچنین آنومالی محاسبه شده از مدل، با آنومالی داده های اولیه مطابقت بسیار خوبی نشان می دهد.



شکل ۵-۲۴ مدل سازی پیش تر انجام شده مقطع پروفیل مورد مطالعه در صحرای آتاکاما [۲۹]

۵-۵ جمع بندی

در این فصل مدل سازی وارون داده های صحرایی مطالعات گرانی سنجی و مغناطیس سنجی حوضه رسوبی مغان، با استفاده از الگوریتم های مورچگان و رقابت استعماری بر اساس پیشنهاد رساله انجام پذیرفت. نتایج مدل سازی های مزبور مطابقت مناسبی با نتایج مطالعات زمین شناسی موجود و نیز نتایج مطالعات ژئوفیزیکی گذشته از طریق لرزه نگاری و گرانی سنجی، از خود نشان داد.

همچنین با توجه به اهداف تحقیق و از آن جا که برای مدل سازی ضخامت لایه رسوبات، نمی توان در تمامی موارد از مدل های پیشروی بر مبنای دانسیته ثابت استفاده نمود؛ با توجه به شرایط حوضه مغان و عدم دسترس بودن چنین اطلاعاتی از تغییرات دانسیته اعماق حوضه، مدل سازی معکوس داده های واقعی حاصل از مطالعات گرانی سنجی بر روی حوضه رسوبی لس آنجلس در کالیفرنیا به کمک الگوریتم ICA به انجام رسید. در مدل سازی ضخامت رسوبات در مورد حوضه لس آنجلس از مدل پیشرو با دانسیته متغیر بصورت سهموی استفاده شد. علاوه بر این حوضه رسوبی صحرای آتاکاما در شمال شیلی به عنوان حوضه رسوبی کم عمق ولی با تباین دانسیته بسیار شدید و توپوگرافی بسیار تند، به عنوان حوضه ای با شرایط

بسیار متفاوت با حوضه مغان مورد بررسی و مدل سازی با الگوریتم ICA قرار گرفت.

مدل های بدست آمده در هر از این دو مدل سازی با نتایج مطالعات پیشین صورت گرفته در آن دو حوضه همخوانی مناسبی دارد و امکان کاربرد الگوریتم ICA برای مدل سازی داده های گرانی سنجی حوضه های رسوبی با شرایط مشابه حوضه های مزبور را به اثبات می رساند.

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل‌سازی ضخامت رسوبات حوضه رسوبی به وسیله داده‌های میدان پتانسیل، مسأله‌ای وارون بدحالت است؛ که به دلیل عواملی همچون وجود نوفه در داده‌ها و نیز غیریکتایی ذاتی مسأله امکان به دام افتادن پاسخ مسأله در بهینه‌های محلی وجود دارد. در این رساله مدل‌سازی‌های مذکور با روش‌های جستجوی عمومی و بوسیله روش‌های فراابتکاری الگوریتم کلونی مورچگان و رقابت استعماری پیشنهاد گردید و با توجه به عدم قطعیت ذاتی این مسائل، پاسخ‌های بدست آمده برای هر یک از این روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و عدم قطعیت هر یک از آن‌ها تعیین گردید.

مطابق روش تحقیق معین شده برای رساله، در گام نخست لازم بود کدهای حل مسأله سیستم غیرخطی در گرانی و مغناطیس به صورت دو بعدی تهیه و یا توسعه داده شوند که در این راستا، بر مبنای الگوریتم‌های کلونی مورچگان و رقابت استعماری و عملگرهای مورد نیاز هریک، کدهای مورد نظر در محیط متلب توسعه داده شدند.

صحت‌سنجی کدهای مورد اشاره با ساخت مدل‌های مصنوعی استاندارد و تنظیم پارامترهای ویژه هر الگوریتم داده‌های گرانی‌سنجی مدل مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و رقابت استعماری انجام پذیرفت. نتایج مدل‌سازی‌های مزبور علاوه بر مطابقت قابل قبول با مدل‌های اولیه، پایداری مناسبی نیز در برابر وجود نوفه تصادفی در داده‌ها از خود نشان دادند. به گونه‌ای که با افزودن ۸ درصد نوفه سفید به داده‌های آنومالی گرانی مصنوعی تولید شده، هر دو الگوریتم از پایداری مناسبی برخوردار بوده و توانستند مدل پیش‌فرض را با دقت مناسبی بازسازی نمایند. علاوه بر الگوریتم‌های مورچگان و رقابت استعماری، با توجه به برخی نارسایی‌های بیان شده در مورد الگوریتم رقابت استعماری، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم مذکور؛ از الگوی جدید هیبرید آن با الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده شد. تغییرات صورت گرفته سبب بهبود سرعت همگرایی و افزایش جستجوگری الگوریتم ICA در مدل‌سازی انجام پذیرفته شد. الگوریتم رقابت

ذرات، که هنوز به نسبت سایر الگوریتم‌های نام‌برده نتایج تحقیقات کمتری از بکارگیری آن موجود است؛ بر روی داده‌های گرانی‌سنجی مصنوعی مورد اشاره؛ بکار گرفته و ارزیابی گردید. این الگوریتم با سرعت همگرایی بالا که نسبت به سایر الگوریتم‌ها نیاز بسیار کمتری به تنظیم پارامتر دارد نتایج مطلوبی در مدل‌سازی داده‌های گرانی از خود نشان داد.

از آن‌جا که برای مدل‌سازی ضخامت لایه رسوبات، نمی‌توان در تمامی موارد از مدل‌های پیش‌روی بر مبنای دانسیته ثابت استفاده نمود؛ مدل مصنوعی بزرگ مقیاس و عمیقی که دانسیته در آن بصورت خطی نسبت به عمق تغییر نماید در نظر گرفته شد و بر اساس رابطه پیشرو با تغییرات دانسیته خطی و سهموی استفاده شد و بوسیله الگوریتم رقابت استعماری مورد مدل‌سازی قرار گرفت؛ که نتایج این مدل‌سازی دقت مناسب و پایداری مطلوب تا ۴ درصد نوفه سفید از خود نشان داد.

صحت‌سنجی کدهای توسعه داده شده برای مدل‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی نیز مشابه کدهای گرانی‌سنجی از مدلی مصنوعی متفاوت از مدل گرانی استفاده و داده‌های حاصل از مدل مذکور با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و رقابت استعماری مدل‌سازی شدند. نتایج این مدل‌سازی‌های نیز علاوه بر مطابقت مناسبی با مدل اولیه، پایداری مناسبی نیز در برابر وجود نوفه تصادفی در داده‌ها از خود نشان دادند؛ به‌گونه‌ای که حتی تا ۱۰ درصد نوفه تصادفی بر داده‌های مورد استفاده قادر به بازسازی مدل مرجع بودند. باتوجه به ماهیت بسیار متفاوت داده‌های صحرایی با داده‌های مدل مصنوعی (حتی با درصدهای نسبتاً بالای نوفه تصادفی) برای ارزیابی عملکرد کدهای توسعه داده شده از مطالعه موردی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی حوضه رسوبی مغان در شمال غرب ایران در استان اردبیل استفاده شد. مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته با نتایج مطالعات زمین‌شناسی موجود و نیز نتایج مطالعات ژئوفیزیکی گذشته از طریق لرزه نگاری و نیز مدل‌سازی‌های گرانی‌سنجی به کمک روش مارکوارت-لونبرگ؛ عملکرد مناسب کدهای نوشته شده را به اثبات می‌رساند. بطوریکه مدل‌های بدست آمده بطور کلی موید بالاآمدگی سنگ

بستر در قسمت غربی پروفیل و فروافتادگی تدریجی در قسمت شرقی می‌باشد که با روند زمین شناسی بدست آمده از مقاطع زمین شناسی پیشین و نیز ستون چینه شناسی منطقه مطابقت دارد. همچنین عمق بدست آمده از بستر بازالتی حوضه در بخش‌های غربی پروفیل با نتایج تنها چاه حفر شده در نزدیکی بخش غربی پروفیل (چاه اصلاندوز) مطابقت مناسبی نشان می‌دهد.

چنانچه اطلاعات حفاری در مسیر پروفیل موجود باشد می‌توان مدل‌سازی را مقید و با دقت بالاتری انجام داد.

در پایان، نظر به آنچه تفاوت‌های توزیع دانسیته در حوضه‌های رسوبی بیان شد وارون‌سازی داده‌های صحرایی مطالعات گرانی‌سنجی بر روی دو حوضه رسوبی لس‌آنجلس در کالیفرنیا و نیز حوضه رسوبی صحرای آتاکاما در شمال شیلی بوسیله الگوریتم ICA به انجام رسید. در مدل‌سازی ضخامت رسوبات در حوضه لس‌آنجلس از مدل پیشرو با دانسیته متغیر بصورت سهموی و صحرای آتاکاما، از مدل پیشرو با تباین دانسیته ثابت اما در منطقه‌ای با توپوگرافی شدید و نیز تباین دانسیته چشمگیر؛ استفاده شد. مدل‌های بدست آمده در هر یک از این دو مدل‌سازی با نتایج مطالعات پیشین صورت گرفته در آن دو حوضه همخوانی مناسبی داشته و امکان کاربرد الگوریتم پیشنهادی را به عنوان جایگزینی برای روش‌های پیشین مدل‌سازی؛ که قادر است مدلی با دقت مطلوب به همراه نتایج آنالیز عدم قطعیت ارائه نماید را نشان می‌دهد.

۶-۲ پیشنهادات

تحقیق حاضر بر مبنای فرضیه‌های تعریف شده در موعد ارائه طرح پیشنهاد رساله و نیز برنامه زمان -

بندی ارائه شده در آن؛ به انجام رسیده است. از این‌رو ارائه چارچوبی کلی از رویکردهای تکمیلی که

موجب ارتقای کیفیت و در نهایت توسعه این تحقیق می‌شود ضروری می‌نماید. مهم‌ترین رویکردهای

تکمیلی رساله از دیدگاه نگارنده به ترتیب اولویت به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- مدل‌سازی سه‌بعدی گرانی و مغناطیس: در این رساله مدل‌سازی‌های داده‌های گرانی‌سنجی و

مغناطیس سنجی بر اساس مدل‌های پیشرو دو بعدی و نهایتاً دو و نیم بعدی انجام پذیرفت. در حالیکه در صورت فراهم بودن شرایط و اطلاعات لازم جهت مدل‌سازی سه بعدی این مدل‌سازی نسبت به مدل‌های دو و دو و نیم بعدی همخوانی بیشتری با طبیعت دارد.

- بکارگیری مدل‌های پیشرو گوناگون گرانی بر اساس توزیع دانسیته‌های مختلف: اگر چه در این رساله دو مدل پیشرو پر کاربرد گرانی سنجی یعنی دانسیته ثابت و تغییر دانسیته سهموی به کار گرفته شد اما از آن‌جا که الگوهای دیگری برای حوضه‌های رسوبی مختلف همچون تغییرات نمایی توسعه داده شده است امکان بکارگیری این الگوریتم برای چنین الگوهایی می‌تواند سبب افزایش کاربری الگوریتم موجود در موارد مطالعاتی بیشتری گردد.

- بررسی امکان بکارگیری این الگوریتم در سایر بخش‌های مطالعات گرانی سنجی و مغناطیس سنجی: الگوریتم‌های بکارگرفته شده در این رساله، تنها در بخش مدل‌سازی بکار گرفته شدند در حالی که شواهد و گزارشات پیشین و نیز نتایج این تحقیق؛ امکان بکارگیری این روش‌ها را در بخش‌هایی چون پردازش اولیه اطلاعات نیز نشان می‌دهد.

- بهبود الگوریتم‌های موجود از طریق ترکیب و هیبرید نمودن و یا بکارگیری الگوریتم‌های جدیدتر: همان‌طور که در مورد چرایی انتخاب الگوریتم‌های استفاده شده در این تحقیق بیان شد، گزینه‌های مزبور بر اساس ملاحظات در زمان پیشنهاد رساله اتخاذ شده است. بررسی این موضوع که در طی سال‌های تحقیق الگوریتم‌های جدیدتری ارائه و یا امکان کاربردشان به اثبات رسیده باشد که می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های بکارگرفته در این تحقیق داشته باشند؛ ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این موضوع همچنان که در مورد مزایای هیبرید نمودن این الگوریتم‌ها بیان شد هیبرید و نمودن و بروزرسانی‌های این الگوریتم‌ها می‌تواند سبب برطرف نمودن برخی معایب این الگوریتم‌ها از جمله زمان‌بر بودن آن‌ها، گردد.

- بکارگیری الگوریتم‌های هوشمند چند هدفه: در مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی بوسیله الگوریتم‌های جستجوی عمومی، در نبود قیدها و اطلاعات تکمیلی، تمرکز بر کمینه‌سازی اختلاف داده‌های مدل‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای است. در صورت وجود اطلاعات و قیود تکمیلی، اعمال چنین قیودی در حل مسأله مستلزم کمینه‌سازی توامان اختلاف در برازش داده و اختلاف مدل با قیود و اطلاعات اولیه است. پر واضح است که این کمینه‌سازی توامان نیازمند عاملی کنترل‌کننده همچون ضریب منظم‌سازی در روش‌های جستجوی محلی است؛ تا تعادل در جستجوی مقدار کمینه میان ضوابط مختلف را حفظ نماید. از آن‌جا که فرآیند جستجو در روش‌های جستجوی عمومی بسیار کندتر از روش‌های جستجوی محلی است؛ بکارگیری روش‌های مرسوم انتخاب ضریب منظم‌سازی در آن‌ها سخت‌تر از روش‌های محلی بوده و با پیچیدگی‌های بیشتری همراه است. اما در راهبرد حل مستقیم مسائل چندهدفه، به جای بسط ضوابط در یک تابع هدف؛ حل مستقیم و کمینه‌سازی هم‌زمان هر یک از توابع و قیود، مد نظر است. بر این اساس بکارگیری نسخه‌های بروزرسانی شده و چند هدفی الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به تلفیق اطلاعات و حل توامان مسائل ژئوفیزیکی کمک کند.

پیوست ۱

پیوست الف - شبه کدهای الگوریتم‌های مورچگان، رقابت استعماری، هیبرید رقابت استعماری و کرم شب تاب، رقابت ذرات برای مدل سازی داده‌های گرانی سنجی.

پ-الف-۱ شبه کد الگوریتم مورچگان برای مدل سازی داده‌های گرانی سنجی

ACO FlowChart (For Gravity Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of gravity data, density constrast).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search according to equations (4-1)–(4-2).

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Gridding each block to set of nodes.

Initialize:

Set $it:=0$ {it is iteration counter}

For every node (i,j) set an initial pheromones $\tau_{ij} = C(\text{constant value})$.

BestCost= ∞ .

While Stopping criteria is not reached do

For $k:=1$ to nAnt **do**

For $i:=1:M$ **do**

 Place ant k on a node of block (i) , according to the probability $p_{(i-1,j)}^{(i,k)}$ given by Equation. (3-2).

End of loop on i

 Evaluate the cost of traveled path by ant k (Cost k) accordance with equation (4-3).

If Cost $k <$ BestCost

 BestSol=ant k .

End If

End of loop on k

 For every node (i,j) **do**

For $k:=1$ to nAnt **do**

 Update the pheromone trail density s_{ij} according to Equations (3-3)–(3-5).

End of loop on k

$it:=it + 1$;

End While

 Return the best solution found

Stop

ICA FlowChart (For Gravity Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of gravity data, density constrast).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search according to Equations (4-1)–(4-2).

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Initialize:

Producing N_{pop} initial countries randomly (D-dimensional countries).

Appraise all of countries accordance with equation (4-3); and initialize the imperialists, colonies.

While termination criteria is not reached do

For $i = 1$ to N_{imp}

For $j = 1$ to N_{col} /* movement of colonies */

Moving colony j towards its imperialist accordance with Equations (3-8) and (3-9).

End of loop on j

Select some colonies of imp and apply revolution by re-initialization

Sorting the countries in empire(j) in ascending order based on their cost values with its imperialist at the first

End of loop on i

Calculation of the total cost per each empire accordance with equation (3-10).

Elect the weakest colony of the weakest empire and allow to it to be the empire(Imperialist competition)

If there is imperialist without colonies

Removing the empire and allocating its imperialist other empire

End If

End While

End

پ-الف-۳ شبه کد هیبرید الگوریتم‌های رقابت استعماری و کرم شبتاب برای مدل‌سازی داده‌های

گرانی‌سنجی

ICA-FA FlowChart (For Gravity Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of gravity data, density constraint).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search according to Equations (4-1)–(4-2).

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Initialize:

Generate N_{pop} initial countries randomly (D-dimensional countries)

Appraise all of the countries accordance with equation (4-3); and initialize the imperialists and colonies

While termination criteria is not reached, do to the following steps:

For $i = 1$ to N_{imp} (Number of imperialist)

For $j = 1$ to N_{col} (Number of colonies)

Move colony j toward its imperialist accordance to Equation(3-15) /* movement of colonies */

End For

apply revolution on new colonies.

Appraise new position of colonies accordance with equation (4-3).

Sorting the countries in empire (j) in ascending order based on their cost values with its imperialist at the first position.

For $k = 1$ to i /* movement of imperialists */

If $\text{cost}(\text{imp}_i) > \text{cost}(\text{imp}_k)$

Move imperialist i toward imperialist k accordance to Equation (3-16)

End If

End of Loop on k

End of Loop on i

calculate the total cost of all empires

choose the weakest colony of the weakest empire

and allow to it to be the empire (Imperialist competition)

If there is an imperialist without colonies

Remove the empire and allocate its imperialist to another empire

End If

End While

End

CSO FlowChart (For Gravity Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of gravity data, density constrast).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search according to Equations (4-1)–(4-2).

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Initialize:

Set $t:=0$ {t is iteration counter}.

Generate Npop initial particles randomly (D-dimensional particles) P (0).

Evaluate the cost of all particles in P(t) accordance with equation (4-3).

While Stopping criteria is not reached do

Evaluate the cost of all particles.

$U = P(t)$, $P(t + 1) = \emptyset$;

While $U \neq \emptyset$ **do**

randomly choose two particles $X1(t)$, $X2(t)$ from U;

If $f(X1(t)) \leq f(X2(t))$ **Then**

$Xw(t) = X1(t)$, $Xl(t) = X2(t)$;

Else

$Xw(t) = X2(t)$, $Xl(t) = X1(t)$;

End If

add $Xw(t)$ into $P(t + 1)$;

update $Xl(t)$ using accordance with Equations (3-11) and (3-12);

add the updated $Xl(t + 1)$ to $P(t + 1)$;

remove $X1(t)$, $X2(t)$ from U;

End While

$t = t + 1$.

End While

Sorting U based on their cost values.

Return the best solution found.

Stop

پیوست ب- شبه کدهای الگوریتم‌های مورچگان و رقابت استعماری برای مدل- سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی.

پ-ب-۱ شبه کد الگوریتم مورچگان برای مدل‌سازی داده‌های مغناطیس‌سنجی

ACO FlowChart (For Magnetic Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of total field magnetic data, inclination and declination of the magnetic field, inclination and declination angles of the magnetization, susceptibilities contrast).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search.

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Gridding each block to set of nodes.

Initialize:

Set $it=0$ {it is iteration counter}

For every node (i,j) set an initial pheromones $\tau_{ij} = C(\text{constant value})$.

BestCost= ∞ .

While Stopping criteria is not reached do

For $k:=1$ to nAnt do

For $i:=1:M$ do

Place ant k on a node of block (i), according to the probability $p_{(i-1,j)}^{(i,k)}$ given by Equation. (3-2).

End of loop on i

Evaluate the cost of traveled path by ant k (Cost k) accordance with equation (4-6).

If Cost k < BestCost

BestSol=ant k.

End If

End of loop on k

For every node (i,j) do

For $k:=1$ to nAnt do

Update the pheromone trail density s_{ij} according to Equations (3-3)–(3-5)–(4-4).

End of loop on k

$it:=it + 1$

End While

Return the best solution found

Stop

پ-ب-۲ شبه کد الگوریتم رقابت استعماری برای مدل سازی داده های مغناطیس سنجی

ICA FlowChart (For Magnetic Data Modeling)

Begin

Input (coordinate and value of total field magnetic data, inclination and declination of the magnetic field, inclination and declination angles of the magnetization, susceptibilities contrast).

Parameterization of problem:

Determination of boundary search according to Equations (4-1)–(4-2).

Discretization domain to set of blocks (M blocks).

Initialize:

Producing N_{pop} initial countries randomly (D-dimensional countries).

Appraise all of countries accordance with equation (4-6); and initialize the imperialists, colonies.

While termination criteria is not reached do

For $i = 1$ to N_{imp}

For $j = 1$ to N_{col} /* movement of colonies */

Moving colony j towards its imperialist accordance with Equations (3-8) and (3-9).

End of loop on j

Select some colonies of imp and apply revolution by re-initialization

Sorting the countries in empire(j) in ascending order based on their cost values with its imperialist at the first

End of loop on i

Calculation of the total cost per each empire accordance with equation (3-10).

Elect the weakest colony of the weakest empire and allow to it to be the empire(Imperialist competition)

If there is imperialist without colonies

Removing the empire and allocating its imperialist other empire

End If

End While

End

- [1] Chakravarthi, V., and Narasimman S., (2007), "3D gravity inversion of basement relief—A depth-dependent density approach" *Geophysics.*, 72, 2, pp:23-32.
- [2] Bohidar, R.N., Sullivan, J.P., Hermance, J.F., (2001), "Delineating depth to bedrock beneath shallow unconfined aquifers: a gravity transect across the Palmer river basin" *Ground Water.*, 39, 5, pp:729–736.
- [3] Jamasb, A., Motavalli-Anbaran, S.H., (2016), "Non-linear stochastic inversion of regional Bouguer anomalies by means of Particle Swarm Optimization: Application to the Zagros Mountains" *Iranian Journal of Geophysics*, 10, 5, pp:10 – 21.
- [4] Scales, J.A., and Snieder, R., (2000), "The anatomy of inverse problems" *Geophysics*, 65, 6, pp:1708-1710.
- [5] Zhdanov, M. S., (2002), "*Geophysical inverse theory and regularization problems*". Vol. 36. Elsevier.
- [6] Boschetti, F., Dentith, M., and List, R., (1997), "Inversion of potential field data by genetic algorithms" *Geophysical Prospecting*, 45, 3, pp: 461-478.
- [7] Blakely, R.J., (1996), "*Potential theory in gravity and magnetic applications*" Cambridge University Press.
- [8] Kumar.R, K., (2007), "*Potential theory in applied geophysics*". Springer Science and Business Media.
- [9] Menke, W., (2012), "*Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory Academic*" MATLAB edn. New York: Academic.
- [10] Barhen, J., Berryman, J.G., Borcea, L., Dennis, J., de Groot-Hedlin, C., Gilbert, F., and More, J., (2000), "Optimization and geophysical inverse problems", Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States).
- [11] Barbosa, V.C.F., and Silva, J.B.C., (2011), "Reconstruction of geologic bodies in depth associated with a sedimentary basin using gravity and magnetic data." *Geophysical Prospecting*, 59, 6, pp: 1021-1034.
- [12] Thompson, D.T., (1982), "EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data" *Geophysics*, 47, 1, pp: 31-37.

- [13] Werner, S., (1953), "Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies" *Gen.-stab: s lit. anst.(distr.)*.
- [14] Spector, A., and Grant, F. S., (1970), "Statistical models for interpreting aeromagnetic data" *Geophysics*, 35, 2, pp: 293-302.
- [15] Parker, R.L., (1973), "The rapid calculation of potential anomalies" *Geophysical Journal International*, 31, 4, pp:447-455.
- [16] Yao, L., and Yao, C., (2007), "Forward modeling of gravity, gravity gradients, and magnetic anomalies due to complex bodies" *Journal of China University of Geosciences* 18,3, pp:280-286.
- [17] Snieder, R., (1998), "The role of nonlinearity in inverse problems" *Inverse Problems* 14, 3, 387-404.
- [18] Bott, M.H.P., (1960), "The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins" *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 3, 1, pp:63-67.
- [19] Talwani, M., Worzel, J. and Ladisman, M., (1959), "Rapid computation of gravitational attraction of three dimensional bodies of arbitrary shape" *Journal of Geophysical research*, 64, 1, pp:49-59.
- [20] Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., (2013), "*an introduction to geophysical exploration*", John Wiley & Sons.
- [21] Yuan, S., Shangxu W., and Tian, N., (2009), "Swarm intelligence optimization and its application in geophysical data inversion" *Applied Geophysics*, 6, 2, pp:166-174.
- [22] Chakravarthi, V., (1995), "Gravity interpretation of nonoutcropping sedimentary basins in which the density contrast decreases parabolically with depth" *Pure and Applied Geophysics*, 145, 2, pp:327-335.
- [23] Silva, J.B.C., Costa, D.C.L., and Barbosa, V.C.F., (2006), "Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth" *Geophysics*, 71, 5, pp: 51-58.
- [24] Silva, J. B., Santos, D. F., and Gomes, K. P., (2014), "Fast gravity inversion of basement relief" *Geophysics*, 79, 5, pp:79-91.

- [25] Yuan, S., Tian, N., Chen, Y., Liu, H., and Liu, Z., (2008), “Nonlinear geophysical inversion based on ACO with hybrid techniques”. In *Natural Computation, ICNC'08. Fourth International Conference on* (Vol. 4, pp. 530-534). IEEE.
- [26] Fernandez-Martinez, J.L., Fernandez-Muniz, M.Z., and Tompkins, M.J., (2012), “On the topography of the cost functional in linear and nonlinear inverse problems” *Geophysics*, 77, 1, pp: 1-15.
- [27] Fernández-Martínez, J.L., Mukerji, T., García-Gonzalo, E., Suman, A., (2012b), “Reservoir characterization and inversion uncertainty via a family of particle swarm optimizers”. *Geophysics*, 77, 1, pp: 1–16.
- [28] Fernández-Martínez, J. L., Fernández-Muñiz, Z., Pallero, J.L.G., and Pedruelo-González, L.M., (2013), “From Bayes to Tarantola: New insights to understand uncertainty in inverse problems”. *Journal of Applied Geophysics*, 98, pp: 62-72.
- [29] Pallero, J. L. G., Fernández-Martínez, J. L., Bonvalot, S., and Fudym, O., (2015), “Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization”. *Journal of Applied Geophysics*, 116, pp: 180-191.
- [30] Jamasb, A., Motavalli-Anbaran, S.H., and Zeyen, H., (2017), “Non-linear stochastic inversion of gravity data via quantum-behaved particle swarm optimisation: application to Eurasia–Arabia collision zone (Zagros, Iran)” *Geophysical Prospecting*, 65, pp: 274-294.
- [31] Sen, M.K., and Stoffa, P.L., (2013), “*Global optimization methods in geophysical inversion*” Cambridge University Press.
- [32] Sambridge, M., and Mosegaard, K., (2002), “Monte Carlo methods in geophysical inverse problems” *Reviews of Geophysics* 40.3.
- [33] Walter, W.R., (1993), “Source parameters of the Little Skull Mountain earthquake from complete regional waveforms at a single station” *Geophysical Research Letters*, 20, 5, pp: 403-406.
- [34] Tarantola, A., (2005), *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*” Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [35] Talbi, El-Ghazali., (2009), “*Metaheuristics: from design to implementation*” Vol. 74. John Wiley & Sons.

- [36]Nagihara, S., and Hall, S.A., (2001), "Three-dimensional gravity inversion using simulated annealing: Constraints on the diapiric roots of allochthonous salt structures" *Geophysics*, 66, 5, pp: 1438-1449.
- [37]Mundim, K. C., Lemaire, T. J., and Bassrei, A., (1998), "Optimization of non-linear gravity models through generalized simulated annealin" *Physica A*, 252(3-4), pp: 405-416.
- [38]Liu, S., Hu, X., and Liu, T., (2014), "A stochastic inversion method for potential field data: ant colony optimization" *Pure and Applied Geophysics* 171, 7, pp: 1531-1555.
- [۳۹] محمدزاده شادمهری، م.، شریفی، م. ع.، ابراهیم زاده اردستانی، صفری، ع.ا و باغانی. ا. (۱۳۹۴)، "استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان جهت مدل سازی، وارون داده های ثقل سنجی". نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، ۴، ۴.
- [40]Shaw, R., and Srivastava, S., (2007), "Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data", *Geophysics*, 72, 2, pp:75-83.
- [41]Pallero, J., Fernández-Muñiz, M., Cernea, A., Álvarez-Machancoses, Ó., Pedruelo-González, L., Bonvalot, S., and Fernández-Martínez, J., (2018), "Particle swarm optimization and uncertainty assessment in inverse problems" *Entropy*, 20, 2, pp:96.
- [42]Sabatier, P.C., (1973), "Discrete ambiguities and equivalent potentials" *Physical Review A*, 8(2), 589.
- [43]Vakil-Baghmisheh, M.T., and Navarbafe, A., (2008), "A modified very fast simulated annealing algorithm" *Telecommunications*,. IST 2008. International Symposium on. IEEE,.
- [۴۴]نجاتی کلاته، ع.، سیاه کوهی، ح.ر.، حسین زاده گویا، ن و میرزایی، م.، (۱۳۸۹) "وارون سازی غیرخطی داده های مغناطیسی با استفاده از روش گرادیان زیر فضا" *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد ۴، شماره ۲، ص ۳۱-۱۳.
- [45]Li, Y., and Oldenburg, D.W., (1998), "Separation of regional and residual magnetic field data" *Geophysics* 63.2: pp: 431-439.
- [46]Fedi, M., Rapolla, A., and Russo, G., (1999), "Upward continuation of scattered potential field data" *Geophysics* 64, 2: pp: 443-451.

- [47]Zhdanov, M. S., (2015), *Inverse theory and applications in geophysics* (Vol. 36). Elsevier.
- [48]Ward, R.W., and Young, C.Y., (1980), "Mapping seismic attenuation within geothermal systems using teleseisms with application to the Geysers-Clear Lake region" *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B10), pp: 5227-5236.
- [49]Tolstoy, A., Diachok, O., and Frazer, L. N., (1991), "Acoustic tomography via matched field processing", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 3, pp: 1119-1127.
- [50]Meju, M. A., (1994), "*Geophysical data analysis: Understanding inverse problem theory and practice*" Society of Exploration Geophysicists.
- [51]Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C. H., (2013), "*Parameter estimation and inverse problems*" Academic.
- [52]Snieder, R., (1991), "An extension of Backus-Gilbert theory to nonlinear inverse problems" *Inverse Problems*, 7, 3, pp: 409-433.
- [53]Cordell, L., (1973), "Gravity analysis using an exponential density-depth function—San Jacinto Graben, California" *Geophysics*, 38(4), pp: 684-690.
- [54]Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L.P., and Sheriff, R. E., (1990), "*Applied geophysics*", Vol. 1, Cambridge university press.
- [55]Chai, Y., and Hinze, W. J., (1988), "Gravity inversion of an interface above which the density contrast varies exponentially with depth" *Geophysics*, 53, 6, pp: 837-845.
- [56]Rao, D. B., Prakash, M. J., and Babu, N. R., (1990), "3D and 2½ D modelling of gravity anomalies with variable density contrast ". *Geophysical Prospecting*, 38, 4, pp: 411-422.
- [57]Rao, C.V., Raju, M.L., Chakravarthi, V., (1995), "Gravity modelling of an interface above which the density contrast decreases hyperbolically with depth" *J. Appl. Geophys*, 34 (1), pp:63–67.
- [58]Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., and Medeiros, W.E., (1997), "Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths" *Geophysics*, 62, 6, pp: 1745–1757.
- [59]Nagy, D., Papp, G., and Benedek, J., (2000), "The gravitational potential and its derivatives for the prism" *Journal of Geodesy*, 74(7-8), pp, 552-560.

- [60] Gallardo-Delgado, L.A., Pérez-Flores, M.A., and Gómez-Treviño, E., (2003), “A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data” *Geophysics*, 68 (3), pp:949-959.
- [61] Afonso, J. C., Fernandez, M., Ranalli, G., Griffin, W. L., and Connolly, J. A. D., (2008), “Integrated geophysical-petrological modeling of the lithosphere and sublithospheric upper mantle: Methodology and applications” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, 5.
- [62] Rao, D.B., and Rao, C. M., (1999), “Two-dimensional interpretation of gravity anomalies over sedimentary basins with an exponential decrease of density contrast with depth” *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 108, 2, pp: 99-106.
- [63] Agarwal, B. N. P., (1971), “Direct gravity interpretation of sedimentary basin using digital computer—Part I” *Pure and applied geophysics*, 86, 1, pp: 5-12.
- [64] Mickus, K. L., and Peeples, W. J. (1992), “Inversion of Gravity and Magnetic Data for the Lower Surface of a 2.5 Dimensional Sedimentary BASIN1” *Geophysical Prospecting*, 40, 2, pp: 171-193.
- [65] Bosch, M., Meza, R., Jiménez, R., and Hönig, A., (2006), “Joint gravity and magnetic inversion in 3D using Monte Carlo methods” *Geophysics*, 71, 4, pp: 153-156.
- [66] Caratori-Tontini, F., Cocchi, L., and Carmisciano, C., (2006), “Depth-to-the-bottom optimization for magnetic data inversion: Magnetic structure of the Latium volcanic region, Italy” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B11.
- [67] Martelet, G., Perrin, J., Truffert, C., and Deparis, J., (2013), “Fast mapping of magnetic basement depth, structure and nature using aeromagnetic and gravity data: combined methods and their application in the Paris Basin” *Geophysical prospecting*, 61, 4, pp: 857-873.
- [68] Cai, H., and Zhdanov, M. S., (2014), “Modeling and inversion of magnetic anomalies caused by sediment–basement interface using three-dimensional Cauchy-type integrals” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12, 3, pp:477-481.
- [69] Bhattacharyya, B.K., (1966), “A method for computing the total magnetization vector and the dimensions of a rectangular block-shaped body from magnetic anomalies” *Geophysics*, 31, 1, pp:74-96.

- [70]Barnett, C.T., (1976), "Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three-dimensional body" *Geophysics*, 41, 6, pp:1353-1364.
- [71]Kunaratnam, K., (1981), "Simplified expressions for the magnetic anomalies due to vertical rectangular prisms" *Geophysical Prospecting* 29, 6: pp: 883-890.
- [72]Rao, D.B., and Babu, N.R., (1991), "A rapid method for three-dimensional modeling of magnetic anomalies" *Geophysics* 56.11: pp: 1729-1737.
- [73]Silva, J. B., Medeiros, W.E., and Barbosa, V. C. F., (2001), "Pitfalls in nonlinear inversion" *Pure and Applied Geophysics*, 158(5-6), pp: 945-964.
- [74]Penrose, R., (1955), "A generalized inverse for matrices" *Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society*, 51, 3, pp:406-413
- [75]Marquardt, D.W., (1963), "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters" *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11, 2, pp: 431-441.
- [76]Tikhonov, A.N., and Arsenin, V.Y., (1977), "Solutions of ill-posed problems" New York, 1-30.
- [77]De Boor, C. (1978), "*A practical guide to splines*", Vol. 27, pp. 325). New York: Springer-Verlag.
- [78]Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., (1987), "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data." *Geophysics* 52, 3, pp: 289-300.
- [79]Last, B.J., and Kubik, K., (1983), "Compact gravity inversion" *Geophysics*, 48, 6, pp:713-721.
- [80]Bertsekas, D.P., (1999), "*Nonlinear programming*" Belmont: Athena scientific.
- [81]Meju, M. A., (1994), "Biased estimation: a simple framework for inversion and uncertainty analysis with prior information" *Geophysical Journal International*, 119, 2, pp: 521-528.
- [82]Meju, M.A., (1994), "A general program for linear parameter estimation and uncertainty analysis." *Computers & Geosciences*, 20, 2, pp: 197-220.
- [83]Li, Y., and Oldenburg, D. W., (1998), "3-D inversion of gravity data" *Geophysics*, 63, 1, pp: 109-119.

- [84]Cuma, M., Wilson G.A., and Zhdanov M.S. (2012), "Large-scale 3D inversion of potential field data" *Geophysical Prospecting*, 60, 6, pp:1186–1199.
- [85]Portniaguine, O., Zhdanov, M.S., (2002), "3-D magnetic inversion with data compression and image focusing" *Geophysics*, 67, pp: 1532–1541.
- [86]Li, Y., and Oldenburg, D. W. (1996), "3-D inversion of magnetic data" *Geophysics*, 61, 2, pp: 394-408.
- [87]Roy, L., Sen, M. K., Blankenship, D. D., Stoffa, P. L., and Richter, T. G., (2005), "Inversion and uncertainty estimation of gravity data using simulated annealing: An application over Lake Vostok, East Antarctica" *Geophysics*, 70, 1, pp: 1-12.
- [88]Fernández-Martínez, J.L., (2015), "Model reduction and uncertainty analysis in inverse problems" *The Leading Edge* 34, 9, pp: 1006-1016.
- [89]Fernández-Martínez, J. L., Pallero, J. L. G., Fernández-Muñiz, Z., and Pedruelo-González, L. M., (2014), "The effect of noise and Tikhonov's regularization in inverse problems. Part I: The linear case" *Journal of Applied Geophysics*, 108, pp: 176-185.
- [90]Scales, J.A., and Luis Tenorio. (2001), "Prior information and uncertainty in inverse problems" *Geophysics*, 66, 2, pp: 389-397.
- [91]Blum, Christian, and Andrea Roli. (2003), "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison" *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35, 3, pp: 268-308.
- [92]Coello, C. A. C., Lamont, G. B., and Van Veldhuizen, D. A. (2007), "*Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*", Vol. 5, Springer, New York, pp: 79-104.
- [93]Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A., (1991), "The ant system: An autocatalytic optimizing process" Technical Report 91-016.
- [۹۴] فتاحی، پرویز، (۱۳۹۰)، "الگوریتم های فراابتکاری"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- [95]Dorigo, M., and Di Caro, G. (1999), Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Vol. 2, pp: 1470-1477), Washington, DC.

[96]Dorigo, M., (1992), Ph. D. Thesis "Optimization, learning and natural algorithms." , Politecnico di Milano, Italy.

[۹۷] آتش‌پز گرگری، الف. (۱۳۸۷) پایان نامه کارشناسی ارشد. توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و توسعه کاربرد آن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

[98]Atashpaz-Gargari, E., and Lucas, C., (2007), "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialist Competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp: 4661-4667, Singapore.

[99]Atashpaz-Gargari, E., Hashemzadeh, F., Rajabioun, R., and Lucas, C., (2008), "Colonial competitive algorithm: a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process", *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 1, 3, pp: 337-355.

[100]Talatahari, S., Azar, B. F., Sheikholeslami, R., and Gandomi, A. H., (2012), "Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization" *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17, 3, 1312-1319.

[101]Aliniya, Z., and Keyvanpour, M., (2018), "Solving constrained optimisation problems using the improved imperialist competitive algorithm and Deb's technique" *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 30, 6, 927-951.

[102]Ardeh, M. A., Menhaj, M. B., Esmailian, E., and Zandhessami, H., (2017), "EXPLICA: An Explorative Imperialist Competitive Algorithm based on the notion of Explorers with an expansive retention policy" *Applied Soft Computing*, 54, 74-92.

[103]Kashani, A. R., Gandomi, A. H., and Mousavi, M. (2016), "Imperialistic competitive algorithm: a metaheuristic algorithm for locating the critical slip surface in 2-dimensional soil slopes", *Geoscience Frontiers*, 7, 1, 83-89.

[104]Maheri, M. R., and Talezadeh, M., (2018), "An Enhanced Imperialist Competitive Algorithm for optimum design of skeletal structures" *Swarm and Evolutionary Computation*, 40, 24-36.

[105]Sadhu, A. K., Rakshit, P., and Konar, A., (2016), "A modified imperialist competitive algorithm for multi-robot stick-carrying application", *Robotics and Autonomous Systems*, 76, 15-35.

[106]Xu, S., Wang, Y., and Lu, P., (2017), "Improved imperialist competitive algorithm with mutation operator for continuous optimization problems" *Neural Computing and Applications*, 28, 7, 1667-1682.

- [107] Niknam, T., Fard, E. T., Pourjafarian, N., and Rousta, A., (2011), "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering" *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24, 2, 306-317.
- [108] Duan, H., Xu, C., Liu, S., and Shao, S. (2010), "Template matching using chaotic imperialist competitive algorithm" *Pattern recognition letters*, 31, 13, 1868-1875.
- [109] Cheng, Ran, and Yaochu Jin. (2015), "A competitive swarm optimizer for large scale optimization." *IEEE transactions on cybernetics* 45.2: 191-204.
- [110] Guo, W., Zhu, L., Wang, L., Wu, Q., and Kong, F. (2019), "An Entropy-Assisted Particle Swarm Optimizer for Large-Scale Optimization Problem" *Mathematics*, 7(5), 414.
- [111] Cheng, Ran, Chaoli Sun, and Yaochu Jin. (2013), "A multi-swarm evolutionary framework based on a feedback mechanism" *Evolutionary Computation*.
- [112] Chen, W., Li, D., and Liu, Y. J. (2018). "A novel hybrid ICA-FA algorithm for multi-period uncertain portfolio optimization model based on multiple criteria". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.
- [113] Pal, S. K., Rai, C. S., and Singh, A. P., (2012). "Comparative study of firefly algorithm and particle swarm optimization for noisy non-linear optimization problems" *International Journal of intelligent systems and applications*, 4(10), 50.
- [114] Balkaya, Ç., Ekinçi, Y. L., Göktürkler, G., and Turan, S., (2017). "3D non-linear inversion of magnetic anomalies caused by prismatic bodies using differential evolution algorithm" *Journal of Applied Geophysics*, 136, 372-386.
- [115] Jones, K. O. (2005). "Ant Colony Optimization", by Marco Dorigio and Thomas Stützle, A Bradford Book, , 23(6), 815-815.
- [۱۱۶] گزارش نهایی زمین شناسی: طرح جامع اکتشاف حوضه رسوبی مغان، (۱۳۸۸)، شرکت ملی نفت ایران.
- [117] Jafarzadeh, M., Harami, R. M., Friis, H., Amini, A., Mahboubi, A., and Lenaz, D. (2014). "Provenance of the Oligocene–Miocene Zivah Formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses". *Journal of African Earth Sciences*, 89, 56-71.
- [۱۱۸] نجاتی کلاته، علی، ابراهیم زاده اردستانی، و، ش، ا، متولی عنبران، س.ه، قمی، ش، جوان، ا، ۱۳۸۸، "مدل سازی وارون دو بعدی غیر خطی داده های گرانی سنجی ناحیه مغان با استفاده از روش مارکوارت لونبرگ" *مجله علوم زمین*، شماره ۷۴، صفحه ۱۳-۲۰.

- [119]Yerkes, R. F., (1965). *Geology of the Los Angeles Basin*, California:-an Introduction. US Government Printing Office.
- [120]McCulloh, J. H. 1960. "Gravity Variation and the Geology of the Los Angeles Basin of California, U.S.G.S.," Prof. Paper 400B, 320-325.
- [121]Martins, C. M., Barbosa, V. C., and Silva, J. B. 2010. "Simultaneous 3D depth-to-basement and density-contrast estimates using gravity data and depth control at few points" *Geophysics*, 75 (3), I21-I28.
- [122]Chakravarthi, V., Raghuram, H. M., and Singh, S. B. 2002. "3-D forward gravity modeling of basement interfaces above which the density contrast varies continuously with depth" *Computers and Geosciences*, 28 (1), 53-57.
- [123]Davis, T. L., Namson, J., and Yerkes, R. F. 1989. A cross section of the Los Angeles area: Seismically active fold and thrust belt, the 1987 Whittier Narrows earthquake, and earthquake hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (7), 9644-9664.
- [124]Wald, D. J., and Graves, R. W. (1998). The seismic response of the Los Angeles basin, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), 337-356.
- [125]Gabalda, G., Nalpas, T., and Bonvalot, S., (2005), "The Base of the Atacama Gravels Formation (26°S, Northern Chile): first results from gravity data. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona)." IRD, Paris, pp. 286–289 (Extended Abstracts).

Abstract

Determining the depth and geometry of the basement in sedimentary basins is one of the strategic goals of many exploration projects, especially groundwater and hydrocarbon reserves. Measurement and modeling of potential field data are one of the most widely used geophysical methods in this field.

The main purpose of this dissertation is to investigate the possibility of using public search algorithms, ant colonies, and colonial competition as an alternative to local response search methods such as Marquardt-Levenberg and Gauss-Newton; in nonlinear modeling, the thickness of sediments in sedimentary basins using gravimetric and magnetometric data. For this purpose, first by examining the existing leading models to calculate the model response at data measurement points, the leading models (Telford-1976) for modeling, gravimetric data, and the model (Kunartnam-1981) for the model The construction of magnetometric data was considered. To perform inverse modeling of gravimetric and magnetometric data by the proposed algorithms and also to present the results visually, the required codes were written in the MATLAB software package.

In order to validate the developed codes, first, designing and implementation of the mentioned algorithms for the data belonging to two synthetic and magnetic and gravity models were validated in two stages of noise-free data. A quantitative comparison of the difference between the data obtained from the initial models and the calculated data was performed by determining the root mean square of the error, which is a parameter for gravimetric modeling from 0.23 mGal, and For magnetometry modeling, it did not exceed 7.1 nT, which shows the good performance of the designed algorithms on both types of modeled data. Also, in this study, the effectiveness of this method against the amount of possible common noises on the mentioned synthetic data was investigated. The results of this study; Demonstrates the good stability of this algorithm for modeling data of both types of artificial models against Gaussian white noises. By adding up to 8% white noise to artificially expensive anomaly data, and up to 10% white noise to artificial magnetic anomaly data, both algorithms have good stability and were able to model Rebuild the default with proper care.

Also, the performance of the colonial competition algorithm on the data obtained from an artificial model of a deep sedimentary basin with density with parabolic changes to the depth, based on the leading model (Gallardo-2003) on two types of data without noise and with white noise quantitatively Based on the root mean square error, it was estimated that the results show the proper performance of the algorithm for this type of sedimentary basins. To evaluate the performance of the developed codes, field data from the case study of gravimetric and magnetometry data of Moghan sedimentary basin in northwestern Iran were used. Comparison of modeling results with the results of existing geological studies as well as the results of past geophysical studies through seismography and gravimetric modeling using the Marquardt-Levenberg method; Demonstrates proper performance of written code.

Finally, due to the differences in the density distribution in sedimentary basins; Inversion of Field Data Gravimetric studies were performed on two Los Angeles sedimentary basins in California and the Atacama Desert sedimentary basin in northern Chile using a colonial competition algorithm. In modeling the sediment thickness of Atacama Desert sediments, the forward model with constant density contrast was used and in the case of Los Angeles Basin, the forward model with variable specific gravity was used Quadratic. The models obtained in each of these two modeling's are in agreeing well with the results of previous gravity and seismic studies conducted in those two basins.

Keywords: Potential Field Data, Inversion, Global Optimization, Ant Colony Algorithm, Imperialist Competition Algorithm, Basement Geometry Identification, Moghan Sedimentary Basin.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
Ph.D Thesis in Mineral Exploration

Identification of Basement Geometry by Potential Field Data with Using Ant Colony Algorithm and Imperialist Competitive Algorithm - Case Study of Moghan Sedimentary Basin

By: Amir Joolaei

Supervisors:

Dr Alireza Arabamiri

Dr Ali Nejati Kalateh

Sep-2020