

مدل سازی دوبعدی غیرخطی سنگ‌بستر برای اکتشاف منابع هیدروکربنی با استفاده از داده‌های گرانی منطقه کارلایل انگلستان

یاسر دهبان^۱، علی نجاتی کلاته^{۱*} و محمد رضایی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۱۱

چکیده

حوضه‌های رسوبی به‌عنوان یکی از مکان‌های مستعد وجود منابع هیدروکربنی همیشه مورد توجه بوده‌اند و مطالعه هندسه سنگ‌بستر این حوضه‌ها همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. در این مقاله از روش زیرفضا برای وارون‌سازی غیرخطی داده‌های گرانی برای مدل‌سازی سنگ‌بستر؛ که به دلیل قابلیت پایداری در برابر نوفه، روش مناسبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی که دارای درصد نوفه زیادی هستند، استفاده شده است. روش زیرفضا روشی مبتنی بر تکرارهای متوالی است که در هر تکرار تغییرات پارامترهای مدل در یک زیر فضای P بعدی از زیر فضای M بعدی پارامترها به دست می‌آید که با استفاده از این روش، پارامترهای مدل اولیه به کار رفته به‌روزرسانی خواهد شد؛ بنابراین وارون‌سازی در تکرارهای متوالی طوری انجام می‌شود که در یک گام از نتایج به‌دست آمده از گام قبلی به‌عنوان مدل اولیه استفاده می‌شود. بردارهای پایه و تشکیل‌دهنده این زیر فضای P بعدی از آنالیز تجزیه به مقادیر منفرد ماتریس مشتقات دوم پارامترهای مدل به دست می‌آید. از این بردارهای پایه ماتریس تصویر از فضای M بعدی پارامترهای مدل به زیر فضای P بعدی از پارامترهای مدل استفاده می‌شود. تعیین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی داده‌های گرانی از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی داده‌های گرانی وجود دارد. در این مقاله از روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته برای تعیین مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی استفاده شده است. در این مقاله ابتدا وارون‌سازی داده‌های مصنوعی بدون نوفه و همراه با نوفه صورت گرفته است و سپس وارون‌سازی داده‌های واقعی برداشت شده در ناحیه کارلایل انگلستان در راستای یک نیم‌رخ صورت گرفته است که نتایج، همخوانی خوبی با نتایج حاصل از مقطع زمین‌شناسی در این منطقه دارد.

کلمات کلیدی: گرانی، مدل‌سازی، غیرخطی، زیرفضا، منابع هیدروکربنی

مقدمه

گرانی در ژئوفیزیک یک ابزار معمول برای تجزیه و تحلیل ساختار پوسته زمین است و در اکتشاف مواد معدنی، هیدروژئولوژی و غیره کاربرد دارد [۵-۱]. گرانی سنجی در شناسایی ساختارهای مستعد زمین شناسی برای تشکیل و ذخیره سازی مواد هیدروکربور کاربرد زیادی دارد که می توان به کمک گرانی سنجی گنبد های نمکی، چین خوردگی طاقدیسی، بالآمدگی های گنبدی شکل را شناسایی کرد. وارون سازی، یک مدل از تغییرات چگالی زیر سطح یا هندسه سطوح زیر سطحی با استفاده از داده های گرانی اندازه گیری شده و اطلاعات قبلی را طراحی می کند [۶]. مسائل وارون سازی گرانی به دو صورت خطی و غیرخطی است که در حالت خطی هندسه مدل را ثابت در نظر می گیریم و چگالی مدل تغییر می کند و در حالت غیرخطی چگالی مدل را ثابت در نظر می گیریم و هندسه مدل متغیر است. برآورد عمق سنگ بستر یکی از هدف های مهم ژئوفیزیک است که کاربرد بسیاری در مهندسی و اکتشافات دارد. برای مثال در سد سازی برای طراحی پی و ساختار سازه سد عامل بااهمیتی است. تعیین عمق سنگ بستر و در نتیجه تعیین حوزه های رسوبی در برآورد خطر زمین لرزه نیز نقش زیادی دارد چراکه حوزه های رسوبی می توانند با به دام انداختن امواج سطحی سبب افزایش بزرگی و طولانی شدن مدت زمین لرزه شوند. یکی از کاربردهای روش وارون سازی غیرخطی داده های گرانی، تخمین ویژگی های سنگ بستر حوزه های رسوبی است [۹-۷]. از جمله مطالعات انجام شده می توان به محاسبه امتداد سنگ بستر در اکتشافات نفت و گاز برای یافتن محل تله های چینه شناسی [۱۰]، مطالعات هیدروژئولوژی برای شناسایی ساختارهای آب زیرزمینی [۱۲-۱۱]، مطالعه یخچال ها و بررسی میزان ذوب شدگی آنها [۱۵-۱۳] اشاره کرد.

در اغلب مسائل وارون رابطه ای غیرخطی میان

مقادیر مشاهده ای و پارامترهای که مدل را توصیف می کنند وجود دارد. راه عمومی به منظور حل مسائل وارون غیرخطی در ژئوفیزیک، استفاده از یک بسط خطی در همسایگی یک مدل مرجع است. در هر تکرار، از مدل به روز شده بعد از اعمال تغییراتی که از تکرار قبل به دست آمده است، در حکم مدل مرجع استفاده می کنیم. این روند را تا زمانی که به همگرایی مطلوب برسیم ادامه می دهیم. بیشتر مسائل وارون غیرخطی می توانند بر اساس تعیین نقطه کمینه که تابع هدف در فضای برداری تعریف شوند. برای رسیدن به این هدف بیشتر از روش های گرادیان استفاده می شود ولی اگر در یک مسئله وارون سازی تعداد داده ها و پارامترهای مدل زیاد باشد این مسئله می تواند از روش زیرفضا حل شود که وارون سازی داده ها در یک فضای کوچک تر داده ها یا پارامترهای مدل صورت خواهد گرفت که در نتیجه، وارون سازی ماتریس ها با شرایط پایدارتری صورت خواهد گرفت [۱۶]. روش زیرفضا برای وارون سازی داده های حجیم زلزله و لرزه در استرالیا برای تعیین سرعت زیرسطحی پوسته به کار گرفته شده است؛ که در مسئله وارون سازی با تعریف قیدهای مناسب مسئله وارون سازی به یک مدل معقول زمین شناسی منجر گردیده است [۱۷]. یک روش پایدار و قابل انعطاف و الگوریتم کارا برای حل مسائل وارون سازی حجیم توسط اولدنبرگ و همکاران معرفی شده است [۱۸].

نقش پارامتر منظم سازی در مدل سازی وارون، ایجاد و برقراری تعادل بین عدم برازش داده ها و تابع منظم ساز در تابع هدف است. انتخاب مقدار مناسب برای پارامتر منظم سازی یکی از مسائل مهم در روش های وارون سازی محسوب می شود [۱۹]. برای محاسبه و انتخاب پارامتر منظم سازی روش های متعددی وجود دارد؛ که از جمله آن می توان به روش منحنی L، روش اصل اختلاف، روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته و روش

واحدهای رخنمون یافته در منطقه به شرح زیر است. (شکل ۱)

ماسه‌سنگ‌های دینانی (Dinantian sandstone)

سازند ماسه‌سنگ‌های دینانی که در اکثر مناطق با گلسنگ (Mudstone) و سنگ‌آهک (Lim stone) همراه هستند از شرق اسکاتلند، از نزدیک دریایی شمال تا قسمت‌های جنوب و جنوب غربی اسکاتلند تا نزدیک شهر کارلایل (Carlisle) ادامه دارند. سن این واحدها به دونین و کربونیفر می‌رسد، در برخی نقاط در داخل واحدها دایک‌هایی به سن کربونیفر و پرمین نفوذ کرده‌اند.

ماسه‌سنگ‌های تریاس (Triassic sandstone)

بخش اصلی واحدهای رخنمون یافته در شرق شهر کارلایل واحدهای ماسه‌سنگی با سن زمین‌شناسی تریاس هستند.

گلسنگ‌های تریاس (Triassic mudstone)

بخش غربی شهر کارلایل شامل گلسنگ‌هایی مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی (سنوزوئیک) است که همانند ماسه‌سنگ‌های شرق کارلایل سن این واحدها به دوره تریاس می‌رسد و واضح است که این واحدها هم‌زمان در یک دوره به وجود آمده‌اند. ماسه‌سنگ‌ها و گلسنگ‌های ژوراسیک (Jurassic sandstone and mudstone)

در داخل واحدهای گلسنگی تریاس که در غرب کارلایل رخنمون دارند در برخی نقاط ماسه‌سنگ‌ها و گلسنگ‌هایی با سن ژوراسیک دیده می‌شوند که این واحدها از واحدهای قبلی جوان‌تر هستند. البته رخنمون اصلی این واحدها در قسمت‌های جنوب و جنوب غربی کارلایل است.

ماسه‌سنگ‌های پرمین (Permian sandstone)

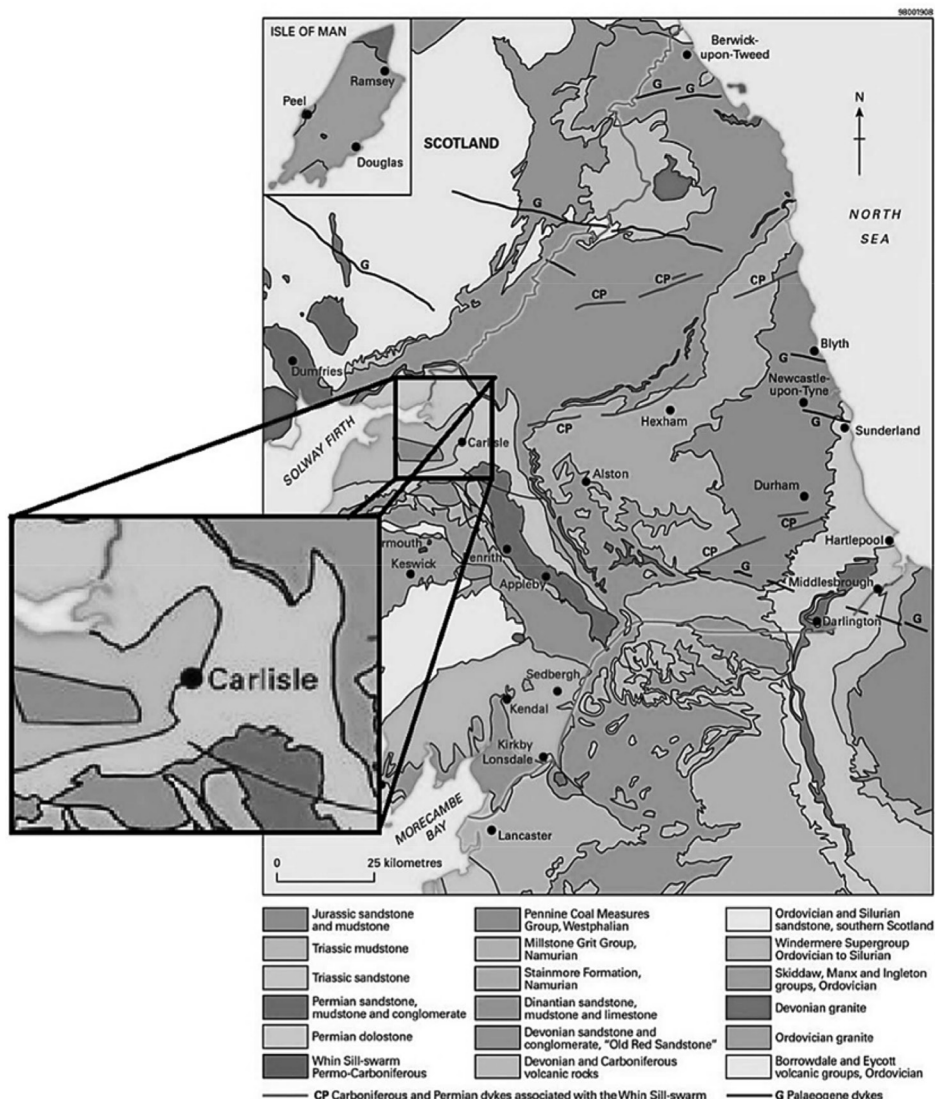
ماسه‌سنگ‌های پرمین نیز در جنوب کارلایل بیشترین رخنمون را دارند. این ماسه‌سنگ‌ها در بسیاری از بخش‌ها همراه گلسنگ و کنگلومرا رخنمون دارند و سن آن‌ها مربوط به دوران اول زمین‌شناسی (پالئوزوئیک) و دوره پرمین است.

متعادل‌سازی قید فعال نام برد. الدنبرگ و لی از روش منحنی L، اصل اختلاف و اعتبارسنجی متقاطع (GCV) برای تعیین پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی داده‌های میدان پتانسیل استفاده کردند [۲۰]. زمانی که مقادیر نوفه در داده‌ها مشخص نباشد و مقادیر انحراف معیار نوفه معلوم نباشد، روش اصل اختلاف کارایی مطلوبی ندارد [۲۱]. با وجودی که روش منحنی L روش خوبی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی است ولی ضمانتی برای اینکه همیشه پارامتر منظم‌سازی مناسبی به کمک آن به دست آید، وجود ندارد. لی و همکاران از روش متعادل‌سازی قید فعال برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی و روش گرادیان مختلط غیرخطی در مدل‌سازی وارون داده‌های مگنتوتلوریک استفاده کردند [۲۲].

در این مقاله روش زیر فضا در وارون‌سازی داده‌های گرانی مصنوعی و واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این روش به دلیل قابلیت پایداری در برابر نوفه، روش مناسبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی که دارای درصد نوفه زیادی هستند به شمار می‌رود. نوآوری این مقاله استفاده از روش زیرفضا با استفاده از بردارهای پایه مناسب برای وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی با استفاده از یک دسته داده است. این وارون‌سازی به منظور تعیین عمق رسوبات یا سنگ‌بستر مورد نظر صورت گرفته است به طوری که با کم‌ترین اطلاعات زمین‌شناسی بهترین ساختار نزدیک به واقعیت زمین‌شناسی را نتیجه می‌دهد. در این روش هندسه سنگ‌بستر با مجموعه‌ای از منشورهای کنار هم چیده شده تقریب زده می‌شود و در نهایت طول این منشورها عمق سنگ‌بستر را نشان می‌دهند.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

گزارش زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ (قابل مشاهده در شکل ۱) از منطقه مورد مطالعه تهیه شده است که



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه

مشتق‌گیری از دیتاها در راستای z به دست می‌آید. برای حل مسائل وارون‌سازی غیرخطی می‌توان یک تابع هدف را \min کرد که این تابع هدف وابسته به داده‌های مشاهده‌ای شده و داده‌های پیش‌بینی شده هست و به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۲۳].

$$F(m) = \frac{1}{2}F_d(m) + \frac{\beta}{2}F_m(m) \quad (1)$$

در صورتی که تابع $F(m)$ یک تابع هموار برای پارامترهای مدل باشد، می‌توان با استفاده از بسط تیلور محدودشده برای این تابع روابط زیر را نوشت [۱۷].

$$F(m + \delta m) = F(m) + \gamma^T \delta m + \frac{1}{2} \delta m^T H m \quad (2)$$

در صورتی که تابع $F(m)$ یک تابع هموار برای پارامترهای مدل باشد، می‌توان با استفاده از بسط تیلور محدودشده برای این تابع روابط زیر را نوشت [۱۷].

نظریه وارون‌سازی داده‌ها

در مورد وارون‌سازی غیرخطی داده‌ها می‌توان گفت [۲۳].

$$\bar{d} = \bar{G} \bar{m}$$

d بردار داده‌ها که یک ماتریس $N \times 1$ می‌باشد. (N تعداد داده‌های برداشت‌شده) m بردار پارامتر مدل که یک ماتریس $M \times 1$ است. (M تعداد پارامترهای مدل)، G ماتریس کرنل که یک ماتریس $N \times M$ است و با

انتخاب پارامتر منظم‌سازی

یکی از مسائل مهم در روش‌های منظم‌سازی از جمله روش تیخونوف، انتخاب مقدار مناسب پارامتر منظم‌سازی است [۲۶-۲۷]. روش‌های متعددی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی در مسائل وارون‌سازی غیرخطی داده‌های ژئوفیزیکی وجود دارد که این روش‌ها تحت شرایط مختلف امکان دارد جواب مطلوب و نامطلوبی بدهند [۲۸]. الدنبرگ و لی از روش‌های مختلفی از جمله روش منحنی L ، اصل اختلاف و اعتبارسنجی مقاطع تعمیم‌یافته برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی داده‌های میدان پتانسیل استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که با استفاده از روش (GCV) می‌توان به مقدار پارامتر منظم‌سازی مناسب نزدیک شد و تا حدودی سطح نوفه موجود در داده‌ها را تخمین زد. روش اصل اختلاف‌زمانی به کار گرفته می‌شود که مقدار نوفه به‌خوبی در داده‌ها مشخص و مقادیر انحراف معیارها برای مقادیر نوفه معلوم باشد [۲۷] هرچند روش منحنی L روش خوبی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی است، ولی ضمانتی برای این‌که همیشه پارامتر منظم‌سازی خوب به‌دست آید، وجود ندارد. ولی تابع مورد استفاده در روش (GCV) در بیشتر اوقات خوب عمل می‌کند [۲۰]. در این مقاله با استفاده از روش GCV پارامتر منظم‌سازی را انتخاب می‌کنیم. در این روش فرض بر این است که جواب مناسب برای یک مسئله وارون‌سازی، جوابی است که بی‌جهت به هیچ داده‌ای حساس نیست. در این روش مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی (β)، مقداری است که بتوان تمام داده‌ها را با استفاده از مدل حاصل از حل مسئله وارون با مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی به بهترین شکل تخمین زد [۲۹].

وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مصنوعی

به‌منظور نشان دادن کارایی روش، در ادامه دو مثال با داده‌های بدون نوفه و نوفه دار ذکر شده است.

در رابطه ۲؛ بردار گرادیان و H ماتریس هسین هستند؛ که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۳].

$$\gamma = -G^T [d_0 - d(m)] \quad (۳)$$

$$H = G^T G + \beta I - \nabla_m G^T [d_0 - d(m)] \quad (۴)$$

$$G_{ij} = \frac{\partial d_i(m)}{\partial m_j} \quad (۵)$$

G_{ij} ماتریس ژاکوبین که مشتق اول امین داده را نسبت به تغییرات m امین پارامتر مدل را نشان می‌دهد. در رابطه ۴ مقدار $\nabla_m G^T$ وابستگی غیرخطی داده‌ها و پارامترهای مدل را بیان می‌کند و در مقایسه با عبارت اول رابطه ۴ مقدار قابل توجهی نیست، بنابراین در محاسبه ماتریس H قابل صرف‌نظر کردن است [۲۴].

با استفاده از روابط بالا مقدار δm به‌صورت رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$\delta m = -V (V^T H V)^{-1} V^T \gamma \quad (۶)$$

در هر تکرار مقدار تغییرات پارامتر مدل (رابطه ۶) حساب‌شده و بر روی مدل اولیه اعمال‌شده و یک مدل جدید ایجاد می‌شود، این مدل جدید به‌عنوان مدل اولیه جدید در نظر گرفته می‌شود و تکرارها تا زمانی که مدل به یک همگرایی مطلوب برسد ادامه می‌یابد.

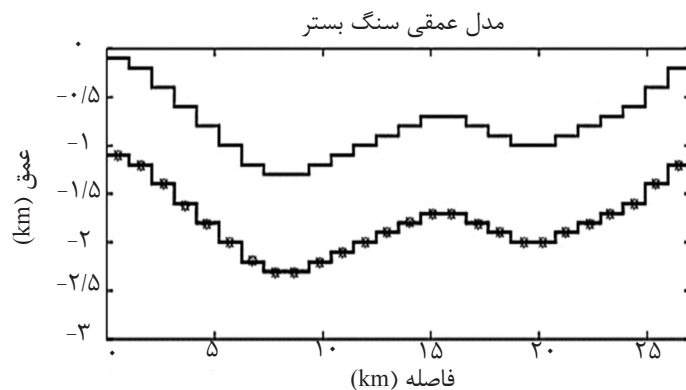
انتخاب بردارهای پایه

بردارهای پایه (V) طوری انتخاب می‌شوند که به‌آسانی قابل محاسبه بوده و حاوی اطلاعاتی از هر دو فضای داده‌ها و پارامترهای مدل است. بردارهای ویژه از ماتریس مربعی و متقارن H که توسط روش تجزیه به مقادیر تکین (SVD) به دست می‌آیند به‌عنوان بردارهای پایه برای ساختن V انتخاب‌شده‌اند. بردارهای پایه V فقط برای یک‌بار از مدل اولیه ساخته می‌شوند و در طول وارون‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شوند از این‌رو بردارهای پایه تنها از تعداد محدودی از بردارهای ویژه که مربوط به بزرگ‌ترین مقادیر منفرد که بیش‌ترین اثر را روی داده‌های پیش‌بینی‌شده دارند انتخاب می‌شوند [۲۵].

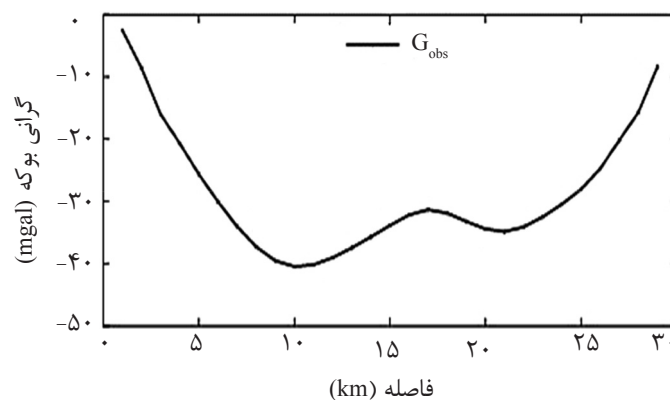
با استفاده از داده‌های گرانی به دست می‌آید و برای اینکه ما به دولایه نیاز داریم مدل اولیه لایه دوم را ۱ km از لایه اول بیشتر در نظر می‌گیریم. دیتای محاسبه شده از مدل مصنوعی در شکل ۳ آمده است. برآزش بین داده‌های مدل مصنوعی و داده‌های مدل به دست آمده از وارون سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است، که برآزش خیلی خوبی دارند. مدل حاصل از وارون سازی در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که در آن پارامتر منظم سازی با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم یافته (GCV) به صورت خودکار انتخاب شده و مقدار آن ۴۹/۴۱۷۱ به دست آمده است (شکل ۶) و برنامه بعد از ۱۴ تکرار به همگرایی بالایی می‌رسد و مقدار RMS^۱ از ۵۱/۰۷۴۵ در تکرار اول به ۰/۰۰۴۸ در تکرار چهاردهم رسیده است (شکل ۷).

مدل مصنوعی بدون نوفه

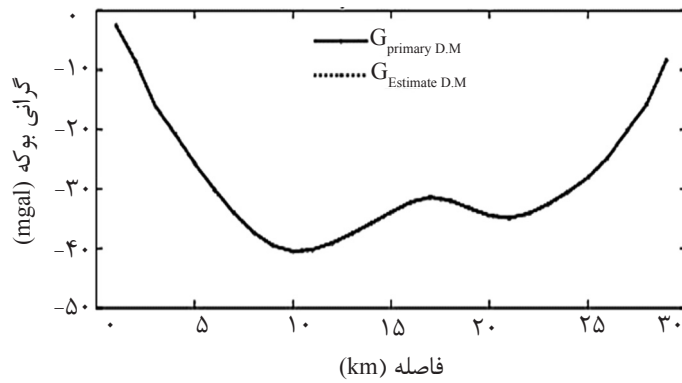
مدل مصنوعی به کار برده شده، سنگ بستری دوبعدی به طول ۲۹ km در نظر گرفته شده است. در این مدل فرض بر این است که داده‌های گرانی سنجی به فواصل مساوی ۱۰۰۰ m و بر روی یک نیمرخ به تعداد ۲۹ نقطه برداشت شده است. مدل مصنوعی و داده‌های مصنوعی ناشی از آن به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است. برای استفاده از برنامه، نیاز به یک تباین چگالی داریم که فرض ما وجود تباین چگالی ۰/۳- و ۰/۶- g/cm^۳ است و نیز چون مدل سازی بر اساس شبیه سازی سنگ بستری با یک سری بلوک‌های کنار هم چیده شده است، فرض شده است که تعداد بلوک‌ها ۲۷ عدد و عرض هر بلوک ۱۰۰۰ m است. برای به دست آوردن مدل اولیه از رابطه بوت استفاده می‌کنیم و یک لایه



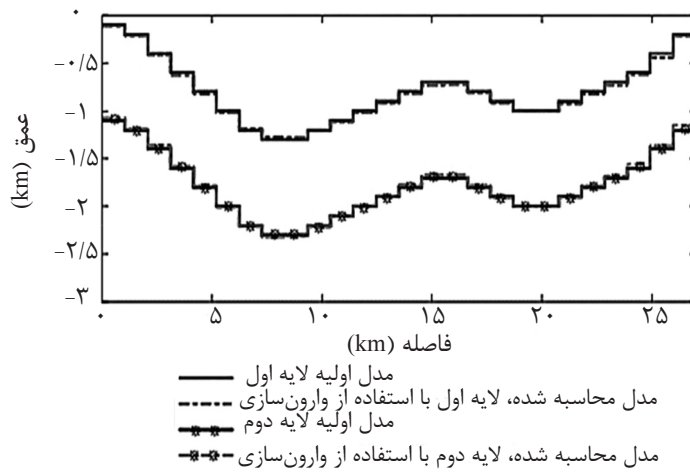
شکل ۲ مدل مصنوعی ورودی برنامه



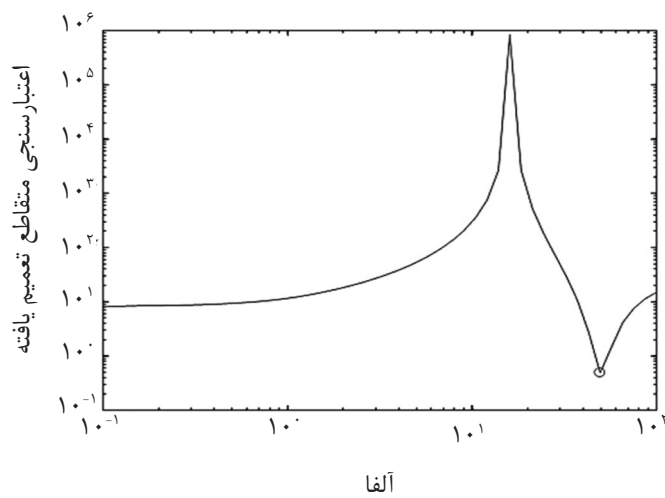
شکل ۳ داده‌های به دست آمده از مدل مصنوعی با صفر درصد نوفه



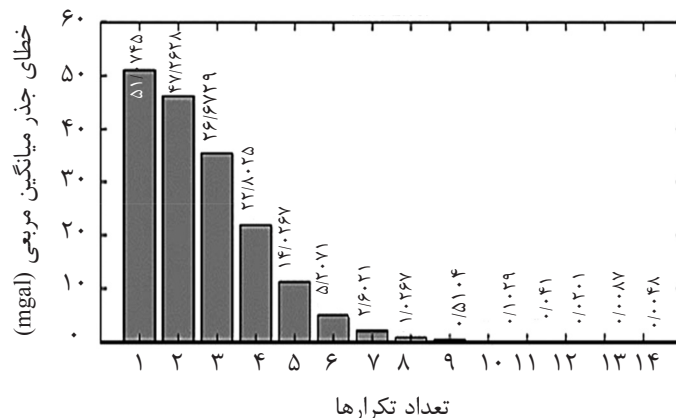
شکل ۴ برآزش بین داده‌های به‌دست‌آمده از مدل مصنوعی با صفر درصد نوفه و داده‌های به‌دست آمده از نتیجه وارون‌سازی



شکل ۵ نتیجه وارون‌سازی داده‌های مصنوعی با صفر درصد نوفه



شکل ۶ نمودار GCV برای محاسبه پارامتر منظم‌سازی در وارون‌سازی داده‌های مصنوعی



شکل ۷ نمودار خطای RMS برای ۱۴ تکرار متوالی با صفر درصد نوفه

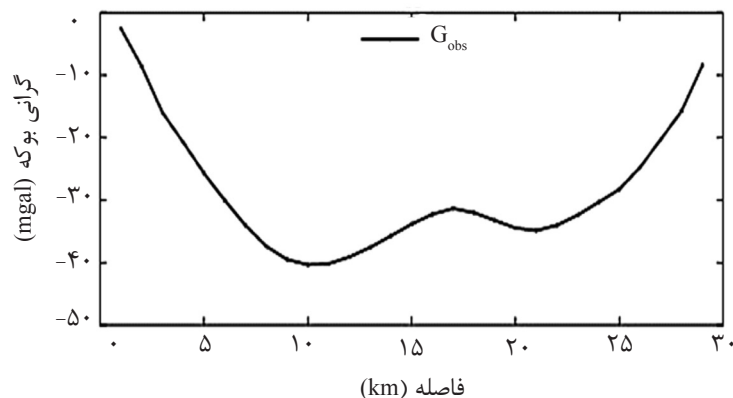
۰/۰۰۷۶ در تکرار چهاردهم رسیده است (شکل ۱۱). نتایج به دست آمده از این مدل سازی با ۵ درصد نوفه در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ آمده است. در این مدل سازی برنامه بعد از ۱۲ تکرار به همگرایی بالای رسیده است، که مقدار RMS از ۵۱/۱۲۵۵ در تکرار اول به ۰/۱۴۵۹ در تکرار دوازدهم رسیده است (شکل ۱۵).

وارون سازی دوبعدی داده های واقعی

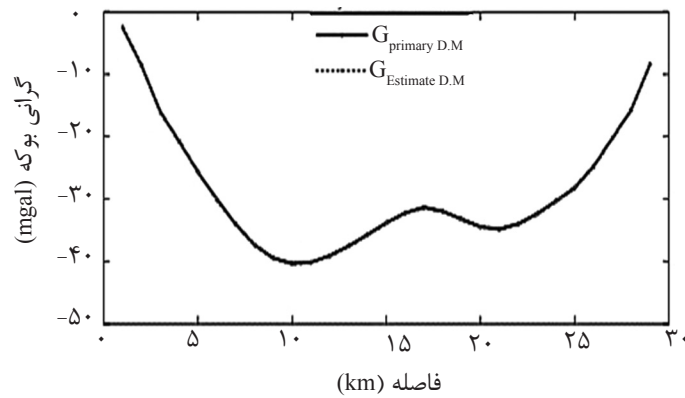
داده های مورد استفاده در این مقاله داده های گرانی منطقه کارلایل انگلستان می باشد که از مقاله [۳۰] دیجیت شده است. از شبکه بندی داده های دیجیت شده بر روی نیمرخ AB نمونه برداری کرده ایم که ۶۸ عدد داده بر روی این نیمرخ به دست آمده است.

مدل مصنوعی همراه با نوفه

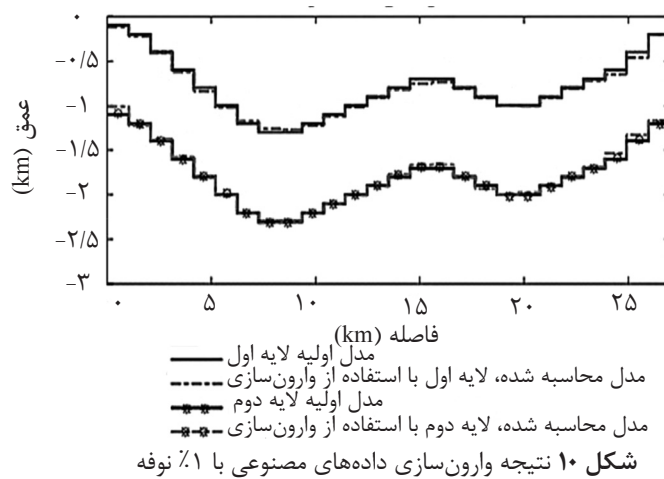
این مدل مانند مدل مصنوعی بدون نوفه است با این تفاوت که به ترتیب به داده ها ۱ و ۵٪ نوفه اضافه کرده ایم. نوفه همراه با داده های ژئوفیزیکی به طور معمول توزیع گوسی یا عددی دارند، بر همین اساس یک منحنی با توزیع گوسی یا عددی با میانگین صفر در نظر می گیریم و با توجه به درصد نوفه به سیگنال واریانس منحنی گوسی تعیین می شود. بر همین اساس دامنه به دست آمده از این منحنی به صورت تصادفی به داده ها اضافه می شود. نتایج به دست آمده از این مدل سازی با ۱٪ نوفه در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ آمده است. در این مدل سازی برنامه بعد از ۱۴ تکرار به همگرایی بالای رسیده است، که مقدار RMS از ۵۱/۰۴۰۲ در تکرار اول به



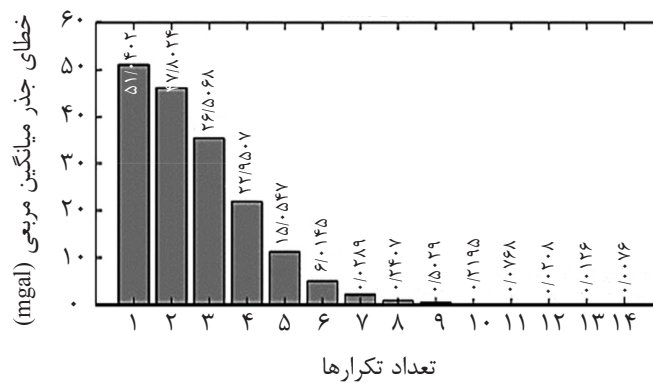
شکل ۸ داده های به دست آمده از مدل مصنوعی با ۱٪ نوفه



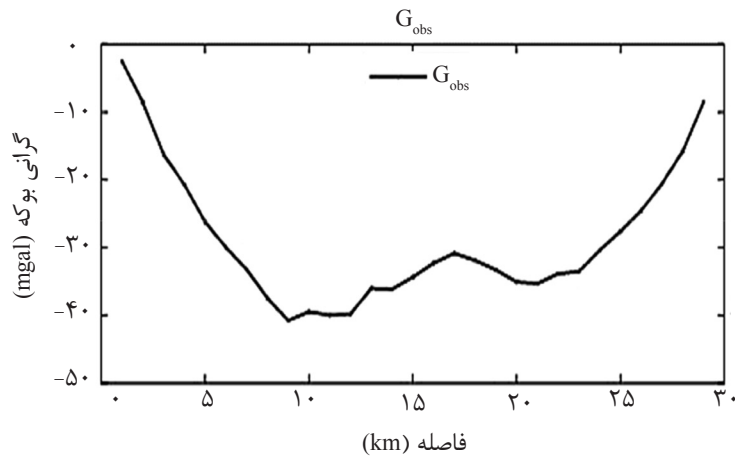
شکل ۹ برآزش بین داده‌های به‌دست آمده از مدل مصنوعی با ۱٪ نوفه و داده‌های به‌دست آمده از نتیجه وارون‌سازی



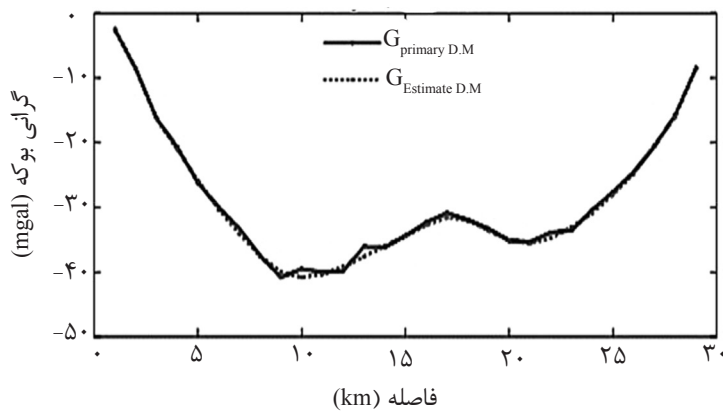
شکل ۱۰ نتیجه وارون‌سازی داده‌های مصنوعی با ۱٪ نوفه



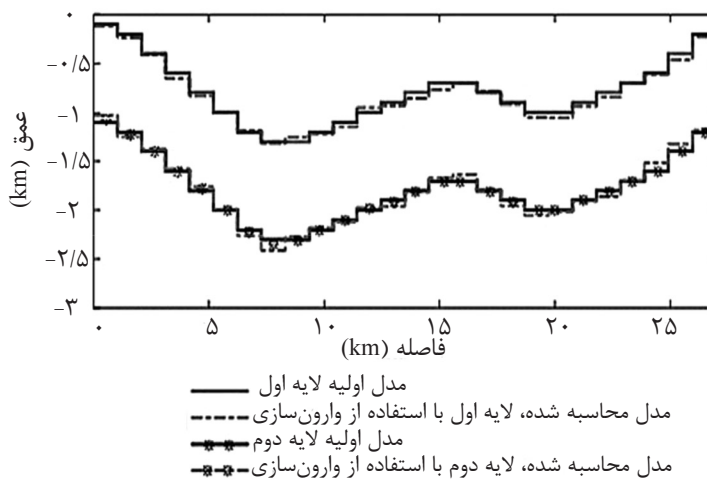
شکل ۱۱ نمودار خطای RMS برای ۱۴ تکرار متوالی با ۱٪ نوفه



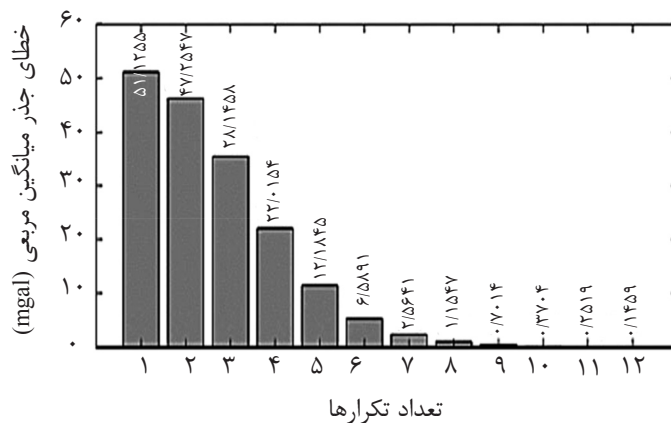
شکل ۱۲ داده‌های به دست آمده از مدل مصنوعی با ۵٪ نوفه



شکل ۱۳ برازش بین داده‌های به دست آمده از مدل مصنوعی با ۵٪ نوفه و داده‌های به دست آمده از نتیجه وارون سازی



شکل ۱۴ نتیجه وارون سازی داده‌های مصنوعی با ۵٪ نوفه



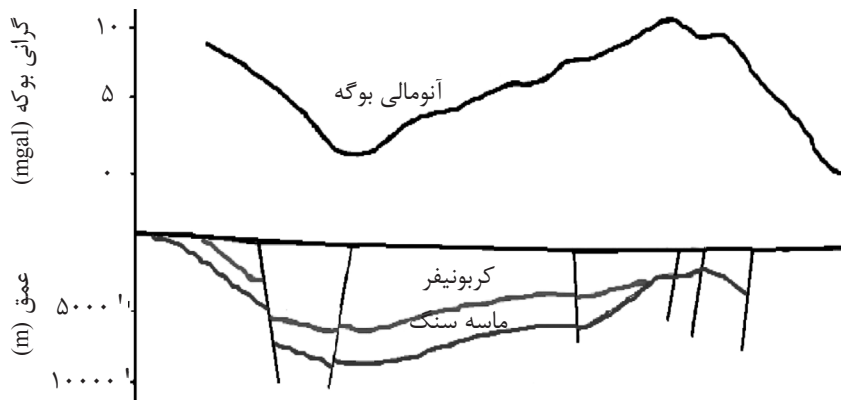
شکل ۱۵ نمودار خطای RMS برای ۱۲ تکرار متوالی با ۵٪ نوفه

محاسبه شده به ترتیب در شکل های ۱۹ و ۲۰ آمده است. مدل نهایی که همان مدل سنگ بستر است در شکل ۲۱ آمده است.

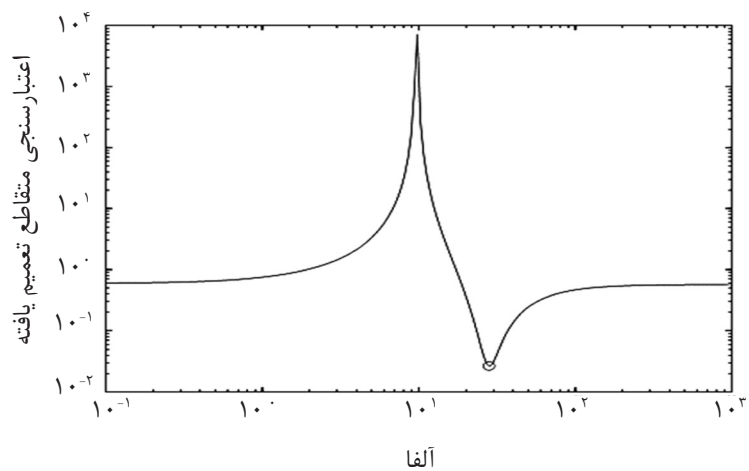
بحث و ارزیابی

در این روش بدون داشتن اطلاعات از لایه اول می توان هم زمان دولایه را مدل سازی کرد. یکی از دلایل استفاده کردن از روش زیر فضا این است که به ما این اجازه را می دهد که بردارهای پایه ای انتخاب کنیم که در لایه دوم اثر می کنند، اگر همه بردارهای پایه را انتخاب کنیم مدل ما همگرا نمی شود. دلیل دیگر انتخاب روش زیر فضا این است که مسائل بزرگ مقیاس را حل کند، اما دلیل اصلی آن این است که ما بتوانیم هم زمان دولایه را با یک دسته داده مدل سازی کنیم.

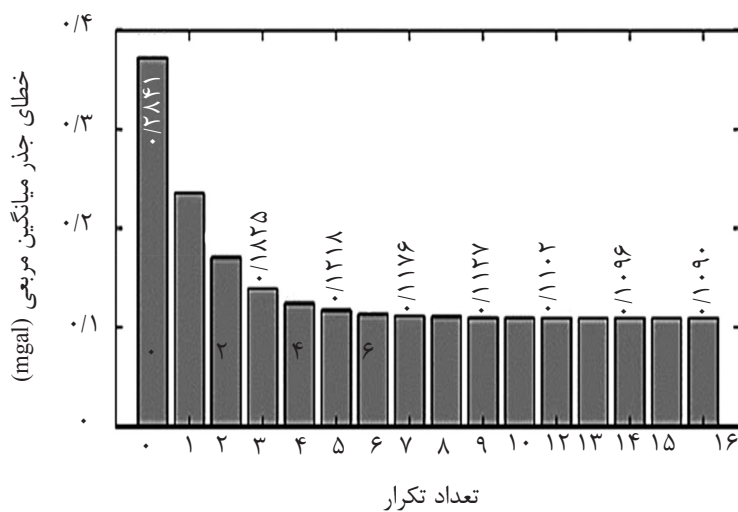
شکل ۱۶ مقطع زمین شناسی نیم رخ AB را نشان می دهد. برای وارون سازی داده ها ابتدا زیر سطح زمین به آرایه های مستطیلی تقسیم شده و عرض هر بلوک ۳۳۸ m در نظر گرفته می شود. با توجه به اطلاعات زمین شناسی منطقه اختلاف چگالی لایه اول $0/3 \text{ g/cm}^3$ و اختلاف چگالی لایه دوم $0/4 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شده است و مدل اولیه برای هر لایه با استفاده از رابطه بوت به دست آمده است. سپس با استفاده از روش (GCV) پارامتر منظم سازی بهینه تخمین زده شد، همانطور که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است مقدار آن حدود $28/3310$ به دست آمده است. پس از انتخاب پارامتر منظم سازی بهینه، وارون سازی داده های گرانی انجام می گیرد. مدل بعد از ۱۶ تکرار با RMS برابر $0/1090$ به همگرایی بالای می رسد (شکل ۱۸). داده های اندازه گیری شده و برآزش داده های اندازه گیری شده با داده های



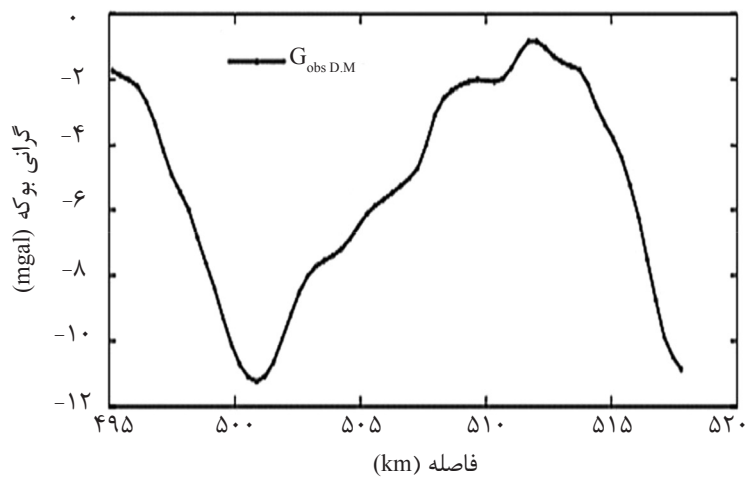
شکل ۱۶ مقطع زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۳۰]



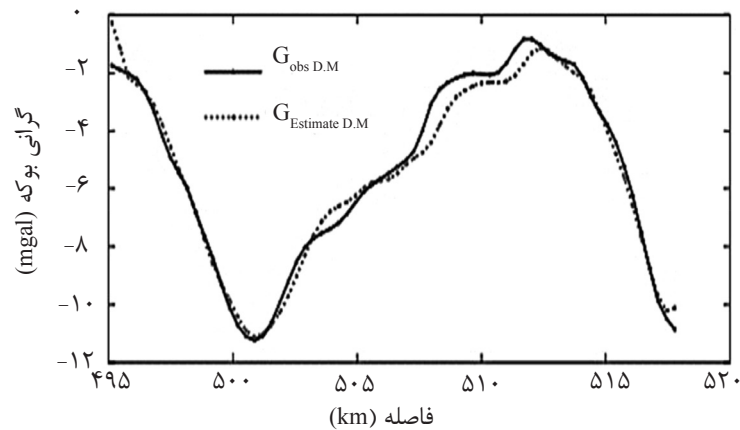
شکل ۱۷ نمودار GCV برای محاسبه پارامتر منظم سازی وارون سازی داده های واقعی



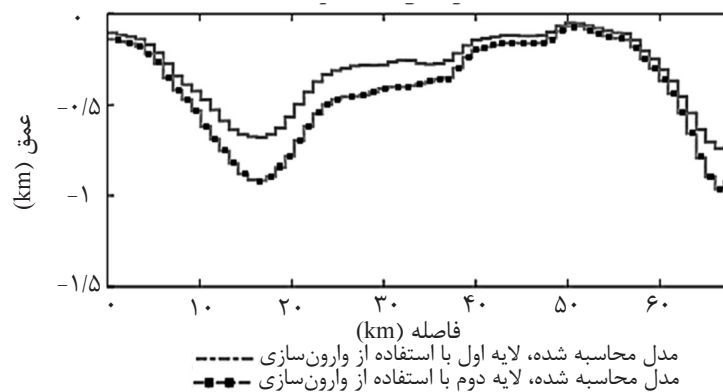
شکل ۱۸ نمودار خطای RMS برای ۱۶ تکرار متوالی



شکل ۱۹ داده های اندازه گیری شده بر روی نیمرخ AB



شکل ۲۰ برآزش داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های محاسبه‌شده از نتیجه وارون سازی



شکل ۲۱ نتیجه وارون‌سازی داده‌های نیم‌رخ AB

تباين چگالی در مرز بين لایه‌ها خود را به‌صورت یک بی‌هنجاری گرانی نشان می‌دهد.

الگوریتم و برنامه‌های کامپیوتری ابتدا روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه (شکل ۳) و داده‌های مصنوعی حاوی نوفه (شکل‌های ۸ و ۱۲) آزمایش شد و در مدل‌سازی داده‌های مصنوعی بدون نوفه مقدار خطای RMS در تکرار اول از ۵۱/۰۷۴۵ به ۰/۰۰۴۸ در تکرار چهاردهم رسیده است و در مدل‌سازی داده‌های مصنوعی با ۵٪ نوفه مقدار خطای RMS در تکرار اول از ۵۱/۱۲۵۵ به ۰/۱۴۵۹ در تکرار دوازدهم (شکل ۱۵) رسیده است، که همگرایی مدل با دقت و کیفیت بالا را تایید می‌کند. در مورد داده‌های واقعی علاوه بر توابع ریاضی از قبیل خطای RMS (شکل ۱۸) و فیت‌شدگی داده‌ها (شکل ۲۰)، شواهد زمین‌شناسی (شکل ۱۶) نیز تأییدکننده نتایج بودند. در نتیجه جواب‌های حاصل، صحت و کارایی برنامه‌ها را تأیید می‌کنند.

نوآوری مقاله این است که با انتخاب بردارهای پایه مناسب دولایه را هم‌زمان مدل‌سازی کنیم. این روش علاوه بر اینکه با انتخاب بردارهای پایه مناسب امکان مدل‌سازی دو لایه با یک دسته داده را به ما می‌دهد در مقابل نوفه پایداری بسیار زیادی دارد.

نتیجه‌گیری

تعیین هندسه سنگ‌بستر و در کنار آن تعیین مرز لایه‌های با تباين چگالی در اعماق مختلف امروزه جزو اهداف حیاتی در بسیاری از پروژه‌های اکتشاف مواد هیدروکربوری است و طرح راه‌کارهای مناسب، کم‌هزینه، آسان و دقیق از اهداف دانشمندان علوم زمین است. از آنجاکه بین سنگ‌بستر که عموماً آذرین است و لایه‌های بالایی که عموماً رسوبی‌اند، تباين چگالی وجود دارد، در نتیجه روش گرانی‌سنجی می‌تواند کمک شایانی در تعیین مرز بین لایه‌ها نماید. زیرا همان‌طور که واضح است هر نوع

مراجع

- [1]. Burnett D. M. and Savit C. H., "Introduction to geophysical prospecting," Vol. 4. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [2]. Lomax N. L. "Gravity and magnetics in oil prospecting," McGraw-Hill, 1976.
- [3]. Robert L. P., "Geophysical inverse theory," Princeton University Press, 1994.
- [4]. Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. and Keys D. A., "Applied geophysics," Cambridge University Press, p. 860, 1976 .
- [5]. Hinze W. J., Ralph R. B. Von Frese and Afif H. S., "Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications," Cambridge University Press, 2013.
- [6]. Nabighian, Grauch V. J. S., Hansen R. O., LaFehr T. R., Li Y., Peirce J. W., Phillips J. D. and Ruder M. E., "The historical development of the magnetic method in exploration," Geophysics, 33ND-61ND, Vol. 70, Issue 6, November-December 2005.
- [7]. Cristina B. V. F., Silva J. B. C. and Medeiros W. E., "Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths," Geophysics, Vol. 62, No. 6, pp. 1745-1757, 1997.
- [8]. Blakely R. J. "Potential theory in gravity and magnetic applications," Cambridge University Press, 1996.
- [9]. Vishnubhotla Ch. and Sundararajan N., "3D gravity inversion of basement relief—A depth-dependent density approach," Geophysics, Vol. 72., No. 2, pp. 123-132, 2007.
- [10]. Silva, J. B., A. S. Oliveira and Valéria C. B., "Gravity inversion of 2D basement relief using entropic regularization," Geophysics, Vol. 75. Vol. 3, pp. 129-135, 2010.
- [11]. Adema G. W., Roy M. B. and Kenneth F. S., "Gravity, Morphology, and Bedrock Depth of the Rathdrum Prairie, Idaho" Idaho Geological Survey, 2007.
- [12]. Bohidar R. N., Jeffrey P. S. and John F. H., "Delineating depth to bedrock beneath shallow unconfined aquifers: a gravity transect across the Palmer river basin," Groundwater, Vol. 39. No. 5, pp. 729-736, 2001.
- [13]. Krimmel R. M., "Gravimetric ice thickness determination, South Cascade Glacier, Washington," Northwest Science, Vol 44, No 3, pp. 147-153, 1970.
- [14]. Stern T. A., "Gravity survey of the Taylor glacier, Victoria land, Antarctica," Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, 1978.
- [15]. Venteris E., and Miller M., "Gravitational profiles on the Taku glacier system," Glaciological and Arctic Sciences Institute, University of Idaho, Open File Report, 1993.
- [16]. Kennett B. L. N. and Williamson P. R., "Subspace methods for large-scale nonlinear inversion," Mathematical Geophysics. Springer, Dordrecht, Vol. 3, pp. 139-154, 1988.
- [17]. Sambridge M. S. "Non-linear arrival time inversion: constraining velocity anomalies by seeking smooth models in 3-D," Geophysical Journal International, Vol. 102. No. 3, pp. 653-677, 1990.
- [18]. Oldenburg D. W., McGillivray P. R. and Ellis R. G., "Generalized subspace methods for large-scale inverse problems," Geophysical Journal International, Vol. 114, No. 1, pp. 12-20, 1993.
- [19] Farquharson C.G. and Oldenburg D. W., "A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in nonlinear inverse problems", Geophysical Journal International, Vol. 156 No. 3, pp. 411-425,

2004.

[20]. Oldenburg D. W. and Li Y., "Inversion for applied geophysics, A tutorial, *Investigations in geophysics*", Vol. 13, pp. 89-150, 2005.

[21]. Kaltenbacher B., Kirchner A. and Vexler B., "Adaptive discretization for the choice of the tikhonov regularization parameter in nonlinear inverse problems", *Inverse Problems*, Vol. 27, No. 12, pp. 125008-125036, 2011.

[22]. Lee S. K., Kim H., J., Song Y. and Lee C., "MT2DInvMatlab- A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion," *Computers and Geosciences*, Vol. 35, Issue 8, pp. 1722-1735, 2009.

[23]. Lelievre P. G. and Douglas W. O., "Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility," *Geophysical Journal International*, Vol. 166., No. 1, pp. 76-90, 2006.

[24]. Yanghua W. and Houseman G. A., "Inversion of reflection seismic amplitude data for interface geometry," *Geophysical Journal International*, Vol. 117, No. 1, pp. 92-110, 1994.

[25]. Mirzaei M. and Bredewout J. W., "3-D Microgravity data inversion for detecting cavities," *European journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 1, pp. 249-270, 1996.

[26]. Yaoguo L. and Douglas W. O., "3-D inversion of gravity data," *Geophysics*, Vol. 63, No. 1, pp. 109-119, 1998.

[27]. Farquharson, C. G. and Douglas W. O., "A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems," *Geophysical Journal International*, Vol. 156, No. 3, pp. 411-425, 2004.

[28]. Hansen Per Ch., "Discrete inverse problems: insight and algorithms," Vol. 7. Siam, 2010.

[۲۹]. رضایی م.، مرادزاده ع.، نجاتی ع. و آقاجانی ح.، "انتخاب خودکار پارامتر منظم‌سازی به روش اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته در وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های گرانی"، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی ایران، ۳ و ۴ اسفند ۱۳۹۳.

[30]. White Peter H. N. and Lovely H. R., "Gravity data obtained in Great Britain by the Anglo-American Oil Company Limited," *Quarterly Journal of the Geological Society*, Vol. 104., pp. 339-364, 1 August 1948.