

شبیه‌سازی زمین‌آماری سه‌بعدی داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته

حمید ثابتی^۱؛ علی مرادزاده^{۲*}؛ فرامرز دولتی ارده جانی^۲؛ آمیلکار سوآرس^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، hamid.sabeti@gmail.com

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران،

۳- استاد بخش نفت، انستیتو فنی عالی، دانشگاه لیسبون، پرتغال.

(دریافت ۵ دی ۱۳۹۴، پذیرش ۲۹ تیر ۱۳۹۵)

چکیده

شبیه‌سازی زمین‌آماری امکان تولید مدل‌های دو و سه‌بعدی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل‌های محدود (چاه) را فراهم می‌کند. در این مطالعه، روش جدیدی به نام شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته ارائه شده و با روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج، برای شبیه‌سازی داده‌های مقاومت صوتی مقایسه شده است. در الگوریتم رایج پارامترهای شبیه‌سازی واریوگرام و تابع توزیع احتمالاتی به صورت کلی معرفی می‌شود بنابراین احتمال توزیع فضایی نامناسب مقادیر شبیه‌سازی شده در نتیجه الگوریتم وجود دارد. در روش بهبود یافته، امکان معرفی این پارامترها به صورت محلی به الگوریتم شبیه‌سازی فراهم شده است. تحلیل و بررسی مقاطع قائم از مقادیر شبیه‌سازی شده توسط روش رایج و بهبود یافته روی داده مصنوعی نشان می‌دهد که در روش بهبود یافته مقادیر شبیه‌سازی شده توزیع فضایی مناسب‌تری دارند. همچنین هر دو روش رایج و بهبود یافته بر روی یک داده واقعی اعمال شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد روش جدید نسبت به روش رایج است. ضمن این‌که هیستوگرام محلی در نتیجه الگوریتم بهبود یافته باز تولید شده است. همچنین برای تحلیل عدم قطعیت، ۱۰۰ خروجی شبیه‌سازی با استفاده از هر دو روش تولید شده است تا امکان محاسبه واریانس در هر سلول به وجود آید. کاهش واریانس و در نتیجه کاهش عدم قطعیت در روش بهبود یافته، هم در مورد داده مصنوعی و هم در مورد داده واقعی، مؤید کارایی بهتر این روش نسبت به روش رایج است.

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی زمین‌آماری، مقاومت صوتی، شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته، واریوگرام

۱- مقدمه

مدل‌های عددی سه‌بعدی از مخازن هیدروکربوری یکی از ابزارهای ارزشمند در توصیف خواص پتروفیزیکی و الاستیکی مخازن مانند تخلخل، نفوذپذیری، اشباع سیال و مقاومت صوتی است. بسته به نوع داده و فرضیاتی که در نظر گرفته می‌شود، روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی سه‌بعدی ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی وجود دارد که یکی از آن‌ها مدل‌سازی زمین‌آماری بر پایه واریوگرام است. کاربرد مدل‌سازی بر پایه واریوگرام به دو دسته تقسیم می‌شود. نخستین آن‌ها را می‌توان زمین‌آمار قطعی (Deterministic) نامید که اساساً تمامی آن‌چه که حول کریگینگ، توسعه می‌یابد را شامل می‌شود. روش کریگینگ تنها یک مدل خروجی تولید می‌کند، از این رو، قطعی نامیده می‌شود. دسته دوم را می‌توان زمین‌آمار تصادفی (Stochastic) نامید که شامل همه روش‌های توسعه یافته حول مفهوم شبیه‌سازی شرطی می‌شود. شبیه‌سازی شرطی از این جهت تصادفی است که همانند شبیه‌سازی مونت کارلو، گروهی از تحقق‌ها یا همان خروجی‌های مدل‌های یک، دو یا سه‌بعدی را که همگی سازگار با یک مدل اولیه و داده‌های موجود هستند، تولید می‌کند [۲ و ۱].

کاربرد زمین‌آمار و مدل‌سازی بر پایه واریوگرام در مدل‌سازی مخزن مدیون کارهای ارزشمند ماترون و همکاران او در مرکز زمین‌آمار دانشگاه پاریس در دهه ۱۹۶۰ میلادی است [۳]. در ادامه کارهای ماترون، کاربرد زمین‌آمار به حوزه‌های مختلفی وارد شد. نخستین ورود زمین‌آمار به علم ژئوفیزیک مربوط به کار هاس (۱۹۷۶) است [۴]. وی در این مطالعه، روش کریگینگ را برای تخمین و ترازبندی به‌منظور تهیه نقشه‌های مختلف مانند نقشه‌های زمانی و سرعت مربوط به داده‌های لرزه‌ای، استفاده کرد. در این دوره نرم‌افزارهای تجاری تهیه نقشه‌های دوبعدی توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها مطالعاتی مربوط به توانایی کریگینگ وابسته در تهیه نقشه تخلخل با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری و داده‌های چاه دیده می‌شوند [۵]. از سال‌های میانی دهه ۱۹۸۰ تا سال‌های میانی دهه ۱۹۹۰ مدل‌سازی تصادفی سه‌بعدی مخزن بر پایه شبیه‌سازی تا حد زیادی توسعه یافت. با توسعه الگوریتم‌های متوالی، قابلیت شبیه‌سازی برای تولید مدل‌های سه‌بعدی

ناهمگنی مخزن به اثبات رسید و موجب تولید و انتشار عمومی کتابخانه نرم‌افزاری GSLIB به زبان فورترن ۹۰ شد [۶]. در این نرم‌افزار، الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی و شبیه‌سازی شاخص متوالی ارائه شد. شبیه‌سازی متوالی گوسی برای متغیرهای پیوسته و شبیه‌سازی شاخص متوالی برای متغیرهای گسسته به کار می‌رود. در سال‌های اخیر محققان زیادی بر روی بازدهی و سرعت اجرای الگوریتم‌های گوسی کار کرده‌اند [۷-۱۰]. در این میان، الگوریتم‌های جدیدی به مجموعه الگوریتم‌های شبیه‌سازی گوسی اضافه شد که مهم‌ترین آن‌ها الگوریتم شبیه‌سازی شاخص متوالی مستقیم [۱۱]، شبیه‌سازی متوالی شاخص بهبودیافته [۱۲]، شبیه‌سازی متوالی مستقیم و شبیه‌سازی وابسته متوالی مستقیم [۱۴-۱۳] می‌باشند. یکی از فرض‌های اولیه در روش گوسی، توزیع احتمالی اولیه گوسی است که می‌تواند به‌عنوان محدودیت روش‌های گوسی در نظر گرفته شود [۱۵]. در این روش‌ها، یک تبدیل گوسی بر روی داده اولیه انجام می‌شود و شبیه‌سازی بر روی داده تبدیل شده انجام می‌شود. بنابراین در انتهای الگوریتم، یک تبدیل معکوس گوسی ضروری است. با توجه به این نقیصه، سوآرس (۲۰۰۱) روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم را برای شبیه‌سازی داده‌هایی که توزیع غیرنرمال دارند توسعه داد [۱۳]. در این روش، عمل شبیه‌سازی بر اساس تابع توزیع تجمعی کلی قابل انجام است و امکان معرفی این تابع به صورت محلی وجود ندارد. بعدها محققانی تلاش کردند میزان بازتولید هیستوگرام الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم را بهبود بخشند [۱۶-۱۷]. در همه این پژوهش‌ها، فرض یکسان بودن مدل واریوگرام برای کل داده و همین‌طور تابع توزیع تجمعی کلی در نظر گرفته شده است. اما در عمل طبیعت زمین‌شناسی و لیتولوژی به شدت تغییرپذیر است. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد تغییرات محلی چه در راستای قائم و چه در راستای افقی شود. در چنین شرایطی، استفاده از یک مدل واریوگرام واحد و تابع توزیع یکسان در فرایند شبیه‌سازی اگرچه حجم محاسباتی پایین‌تر و ساده‌سازی بیشتری به دنبال دارد اما می‌تواند باعث مخفی ماندن تغییرات محلی از چشم مفسر شود و حتی در بعضی موارد، تولید مدل‌های کاذب کنند. بنابراین توجه به تغییرات محلی در مدل‌سازی خواص زیرسطحی می‌تواند باعث بهبود نتایج و انطباق بیشتر مدل با

داده‌های تجربی و داده شبیه‌سازی شده قبلی مقید شده است.

۴- تعیین بازه تابع توزیع $F_Z(Z)$ که قرار است نمونه‌برداری شود.

۵- تولید یک مقدار برای $Z^S(x_u)$ از تابع توزیع تجمعی کلی $F_Z(Z)$:

- تولید عددی مانند p از توزیع یکنواخت بین صفر و یک

- تولید یک مقدار y^S از تابع توزیع گوسی $G(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u))$ به صورت زیر:

$$y^S = G^{-1}(y(x_u)^*, \sigma_{sk}^2(x_u), p) \quad (1)$$

- تولید مقدار شبیه‌سازی شده به صورت زیر:

$$Z^S(x_u) = \varphi^{-1}(y^S) \quad (2)$$

که در آن φ^{-1} تبدیل معکوس گوسی است.

۶- تکرار مراحل فوق تا زمانی که همه گره‌ها شبیه‌سازی شوند.

توجه شود که تابع توزیع گوسی فقط برای نمونه‌برداری از تابع توزیع تجمعی استفاده می‌شود و نیازی به فرض گوسی بودن تابع توزیع تجمعی اولیه نیست.

۳- شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته

همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، برای تولید مقدار شبیه‌سازی در الگوریتم رایج از تابع توزیع تجمعی کلی استفاده می‌شود. این بدان معنی است که در کل شبکه سه‌بعدی شبیه‌سازی احتمال ظهور یک مقدار شبیه‌سازی شده یکسان است. از طرف دیگر، یک مدل پیوستگی فضایی مشابه برای کل شبکه در نظر گرفته می‌شود. این امر موجب ساده‌سازی الگوریتم و در نتیجه سرعت بالای اجرا آن خواهد شد اما در بعضی شرایط ممکن است با واقعیت منطبق نباشد. این موضوع به‌خصوص در شرایطی که تغییرات پارامتر مورد

واقعیت شود. به همین دلیل در این کار تحقیقی، الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم در محیط برنامه‌نویسی MATLAB به‌گونه‌ای بهبود یافته است که بتواند توابع مختلف توزیع تجمعی و همچنین مدل‌های واریوگرام را به صورت محلی دریافت کرده و عمل شبیه‌سازی را انجام دهد. در ادامه نتایج الگوریتم جدید روی داده مصنوعی و واقعی با نتایج مربوط به الگوریتم قبلی، هم از نظر مدل شبیه‌سازی شده و هم از نظر آزمون عدم قطعیت، مقایسه و تحلیل خواهد شد.

۲- شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج

استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری با استفاده از مدل‌های پیوستگی فضایی (واریوگرام) منجر به تولید مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی در فضای دور از چاه‌ها می‌شود. البته این امر توسط الگوریتم کریگینگ نیز امکان‌پذیر است اما کریگینگ تنها یک خروجی هموار ارائه می‌دهد و امکان مشاهده تغییرات پارامتر مورد نظر وجود ندارد. شبیه‌سازی با تولید خروجی‌های مختلف که همگی به داده اولیه مقید می‌باشند، امکان بررسی بهتر و بیشتر تغییرات پارامتر مورد نظر را به مفسر می‌دهد.

همان‌طور که بیان شد، فرض گوسی بودن توزیع احتمالی اولیه در الگوریتم‌هایی مانند شبیه‌سازی متوالی گوسی انجام شده است [۶]. در حالی که توزیع داده‌ها می‌تواند دارای چولگی مثبت و منفی و یا چند وجهی (مدی) باشد و از این رو بازتولید تابع توزیع احتمالی اولیه یا هیستوگرام بعد از تبدیل گوسی ممکن است دشوار باشد [۱۸]. لازم به یادآوری است که برای رسیدن به مدل‌های مخزنی قابل اطمینان، ضروری است که آماره‌های اولیه (میانگین و واریانس) که از داده‌های چاه‌نگاری به‌دست آمده‌اند در مدل‌های شبیه‌سازی شده بازتولید شوند. استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم توسعه داده شده سوارس (۲۰۰۱) به دلیل امتیاز ویژه آن در عدم فرض گوسی بودن برای تابع توزیع احتمالی اولیه به‌دست آمده از داده‌های چاه‌نگاری است. مراحل محاسباتی الگوریتم رایج به شرح زیر است [۱۳]:

- ۱- تولید یک عدد تصادفی برای تعیین مسیر تصادفی در کل شبکه شبیه‌سازی
- ۲- تعیین سلولی که قرار است شبیه‌سازی شود x_u
- ۳- تخمین میانگین محلی $Z(x_u)^*$ و واریانس $\sigma_{sk}^2(x_u)$ با استفاده از تخمین کریگینگ که به

۴- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبود یافته بر روی داده مصنوعی

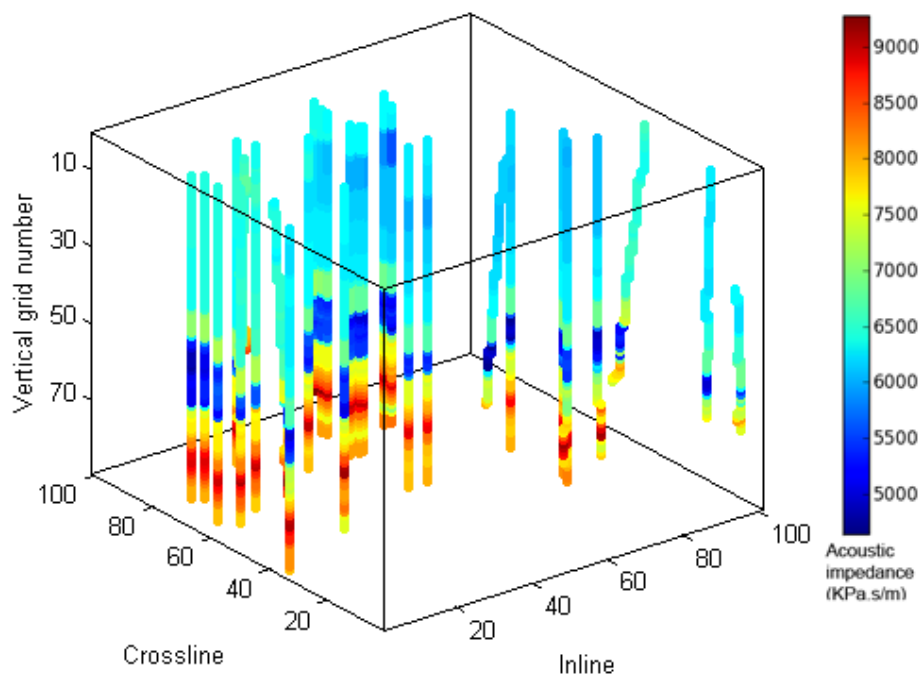
داده مصنوعی استفاده شده در این پژوهش، دارای نگار مقاومت صوتی (حاصل ضرب سرعت موج فشارشی در چگالی) مربوط به ۳۲ حلقه چاه در یک فضای سه‌بعدی شبکه‌بندی شده به ابعاد $101 \times 101 \times 90$ سلول است (شکل ۱). ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. برای تحلیل وجود یا عدم وجود روند در راستای قائم، مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق در شکل ۲ رسم شده است. در این شکل یک خط به داده‌ها برازش شده است. با توجه به معادله این خط، داده‌های چاه اصلاح شده و آماده انجام مدل‌سازی واریوگرام گشته است. واریوگرام‌های افقی و قائم با استفاده داده اولیه اصلاح شده مدل شده‌اند (شکل ۳). همه مدل‌های واریوگرام کروی هستند. در این مرحله، روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج با استفاده از مدل‌های واریوگرام شکل ۳ بر روی داده مصنوعی اعمال شده است. با توجه به این‌که در مورد داده مصنوعی، مکعب مدل مقاومت صوتی اولیه (مکعبی که از روی آن سری بازتاب و سپس مکعب لرزه‌ای تولید می‌شود)، در اختیار است، امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقاومت صوتی واقعی وجود دارد. سه مقطع قائم از قسمت‌های مختلف شبکه سه‌بعدی مربوط به مدل مقاومت صوتی اولیه، برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، مطابق شکل ۴ انتخاب شده است. این انتخاب بر اساس این نکته صورت گرفته که تقاطعی با محل چاه‌ها نداشته باشد. به این صورت امکان بررسی نتایج در گره‌هایی که با چاه فاصله دارند فراهم می‌شود. در شکل ۵ مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و مدل مقاومت صوتی اولیه آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، الگوریتم شبیه‌سازی رایج تا حدودی توانسته است توزیع فضایی مقاومت صوتی را شبیه‌سازی کند. نگاه دقیق‌تر به این شکل این نکته را آشکار می‌سازد که در بعضی از مناطق مقادیر مقاومت صوتی به درستی شبیه‌سازی نشده است. به‌عنوان مثال، در قسمت‌های بالایی مقاطع که دارای مقادیر متوسط مقاومت صوتی هستند، مقدار آن‌ها بسیار پایین و یا بسیار بالا شبیه‌سازی شده است. این موضوع علی‌رغم این حقیقت است که هیستوگرام داده‌های چاه (شکل ۶-الف) با داده شبیه‌سازی شده (شکل ۶-ب) متناسب است. به‌عبارت دیگر، با اینکه شرط بازتولید هیستوگرام

مطالعه در یک راستا بسیار بیشتر از راستاهای دیگر است، ایجاد مشکل می‌کند. به‌عنوان مثال در شرایطی که لایه‌ها زیرسطحی تقریباً افقی یا با شیب کم هستند، بیشترین تغییرات مقاومت صوتی تنها در جهت قائم وجود دارد و تغییرات جانبی خفیف است. در این شرایط، استفاده از تابع توزیع تجمعی کلی برای شبیه‌سازی نقاطی که از نظر موقعیت فضایی در قسمت‌های مختلفی قرار دارند، ممکن است موجب تولید مقادیر شبیه‌سازی نادرست شود. در روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته حاضر، امکان شبیه‌سازی متوالی مستقیم به گونه‌ای فراهم شده است که مدل‌های پیوستگی فضایی متعدد محلی بنا به نظر مفسر قابل استفاده باشد. این امکان به صورت منطقه‌بندی ناحیه مورد مطالعه صورت می‌پذیرد. همچنین در شرایط منطقه‌بندی، به جای استفاده از تابع توزیع تجمعی کلی از تابع توزیع تجمعی محلی (مربوط به همان منطقه) برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. این امر با معرفی منطقه واقع شده برای هر سلولی که قرار است شبیه‌سازی شود، میسر شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، مراحل شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته به صورت زیر است:

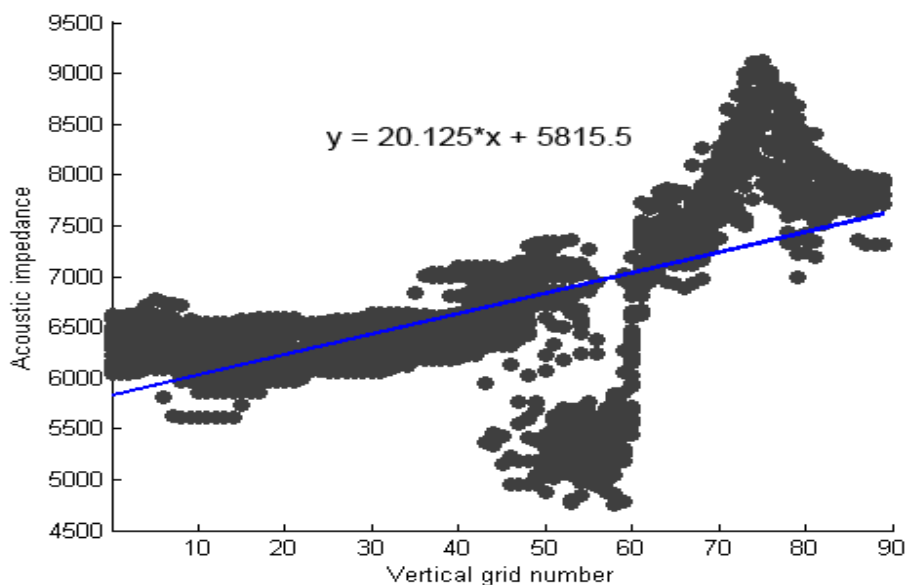
- ۱- تولید یک عدد تصادفی برای تعیین مسیر تصادفی در کل شبکه شبیه‌سازی x_{ii}
- ۲- تعیین سلولی که قرار است شبیه‌سازی شود x_{ii}
- ۳- انطباق محل سلول با جدول منطقه‌بندی برای تعیین منطقه‌ای که سلول در آن واقع شده است.
- ۴- تخمین میانگین محلی $Z(x_{ii})^*$ و واریانس $\sigma_{sk}^2(x_{ii})$ با استفاده از تخمین کریگینگ که به داده‌های تجربی و داده شبیه‌سازی شده قبلی مفید شده است. توجه شود که در این مرحله، کریگینگ براساس مدل واریوگرام و داده‌های کل مناطق انجام می‌شود تا در مرز مناطق ناپیوستگی ایجاد نشود.
- ۵- تعیین بازه تابع توزیع محلی $F_Z(z)$ با استفاده از توزیع تجمعی محلی
- ۶- تولید یک مقدار برای $Z^S(x_{ii})$ از تابع توزیع تجمعی محلی $F_Z(z)$
- ۷- تکرار مراحل فوق تا زمانی که همه گره‌ها شبیه‌سازی شوند.

بعضی مناطق به چشم می‌خورد.

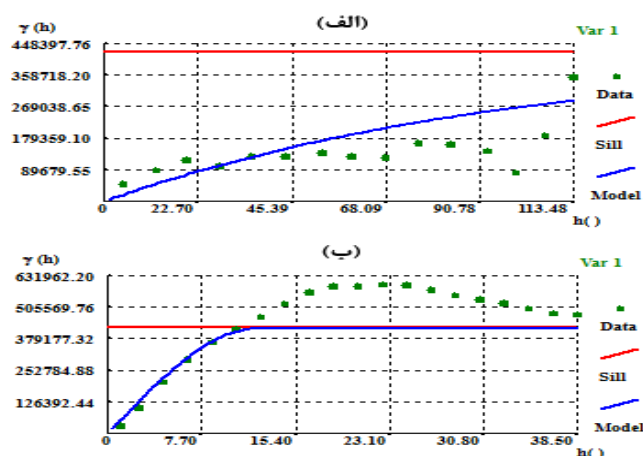
مقاومت صوتی در نتایج شبیه‌سازی توسط الگوریتم رایج رعایت شده است اما مقادیر نامتناسب در مقاومت صوتی در



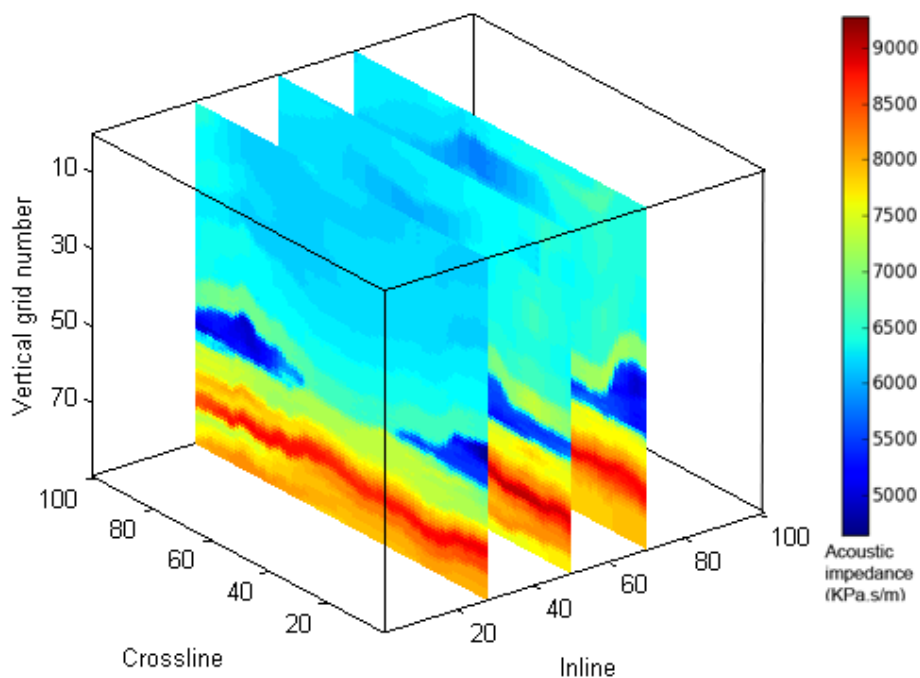
شکل ۱: نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده مصنوعی و موقعیت چاه‌ها



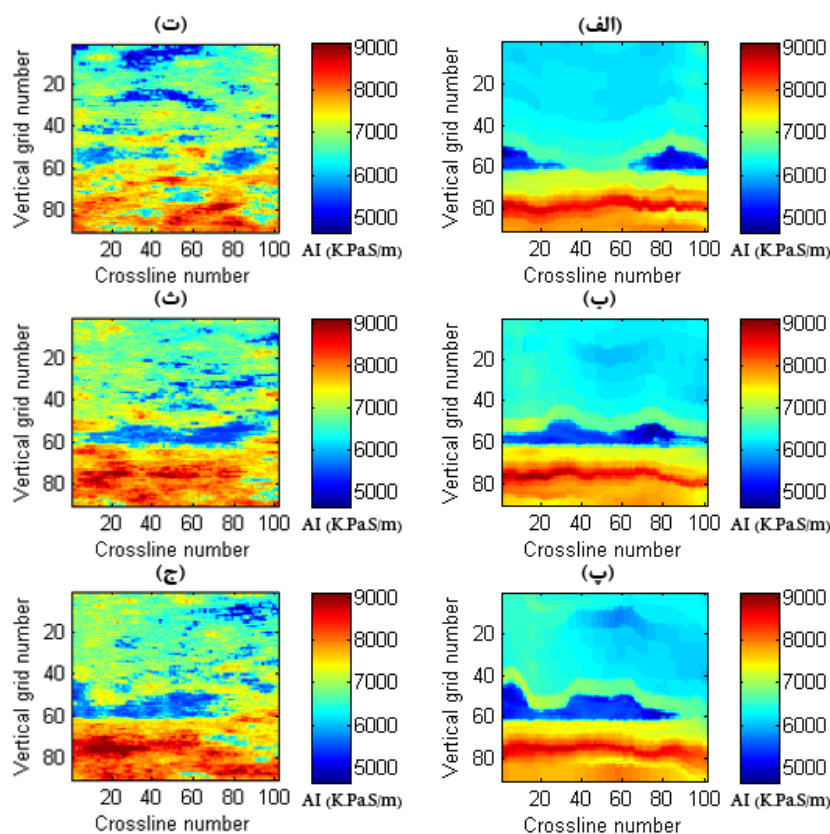
شکل ۲: مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده مصنوعی). یک روند خطی به داده‌ها برازش شده است.



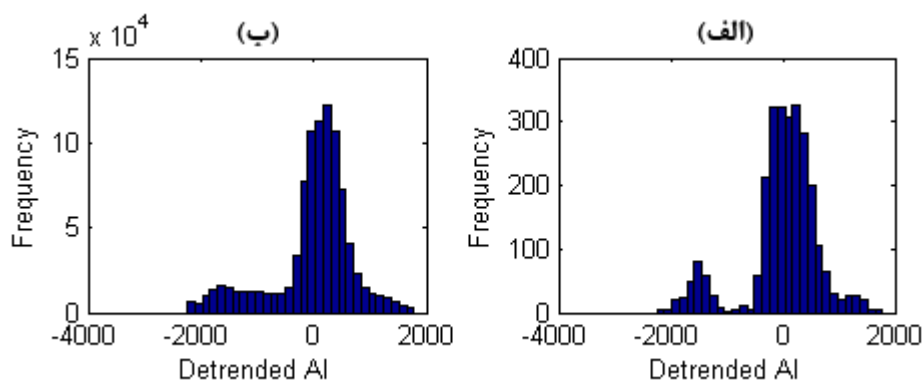
شکل ۳: مدل سازی واریوگرام با استفاده از داده های مصنوعی چاه به صورت کلی. (الف) واریوگرام در راستای افقی، (ب) واریوگرام در راستای قائم. محور قائم از جنس واریانس مقاومت صوتی و محور افقی دارای واحد سلول است که برای تبدیل به متر باید در ۲۵ ضرب شود.



شکل ۴: موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از مدل سه بعدی مقاومت صوتی اولیه برای مقایسه با نتایج شبیه سازی



شکل ۵: مقاطع قائم مقاومت صوتی براساس شکل ۳. الف، ب و پ) سه مقطع قائم مربوط به مکعب مدل مقاومت صوتی اولیه، ت، ث و ج) مقاطع متناظر حاصل از شبیه‌سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج



شکل ۶: هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی مقاومت صوتی. الف) هیستوگرام داده‌های چاه و ب) هیستوگرام مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج

منطقه‌بندی استفاده شود و نرم‌افزار تهیه شده در این مورد کاملاً انعطاف‌پذیر است. در اینجا، منطقه‌بندی بر اساس توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی صورت گرفته است. به این ترتیب که سه منطقه با مقادیر مقاومت صوتی بالا، پایین و متوسط در نظر گرفته شده است. مشخصات این منطقه‌بندی

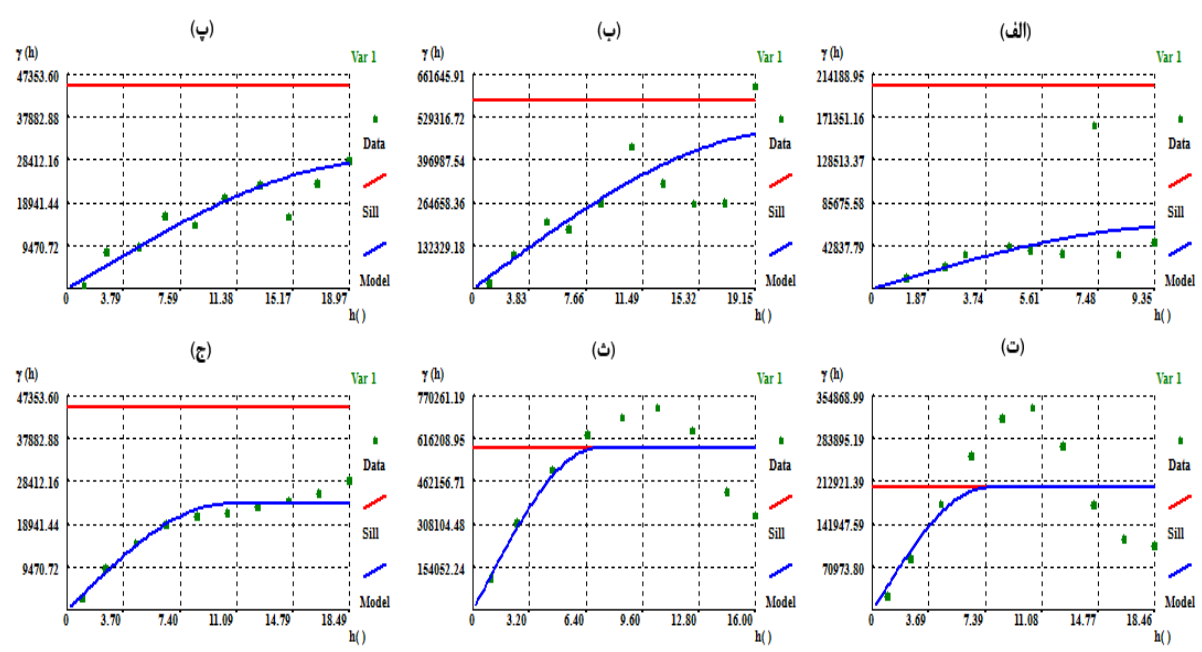
در مرحله بعد، الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته استفاده شده است. برای به‌کارگیری الگوریتم بهبودیافته می‌بایست عمل منطقه‌بندی صورت گیرد تا امکان ارائه پارامترهای محلی به الگوریتم شبیه‌سازی بهبودیافته، به وجود آید. هر ضابطه‌ای می‌تواند برای تعیین مرزهای

در جدول ۱ آورده شده است. توجه شود که مرز جداکننده مناطق، صفحات افقی با مقدار عمقی مشخص (Z) است. جدول ۱: منطقه‌بندی داده مصنوعی

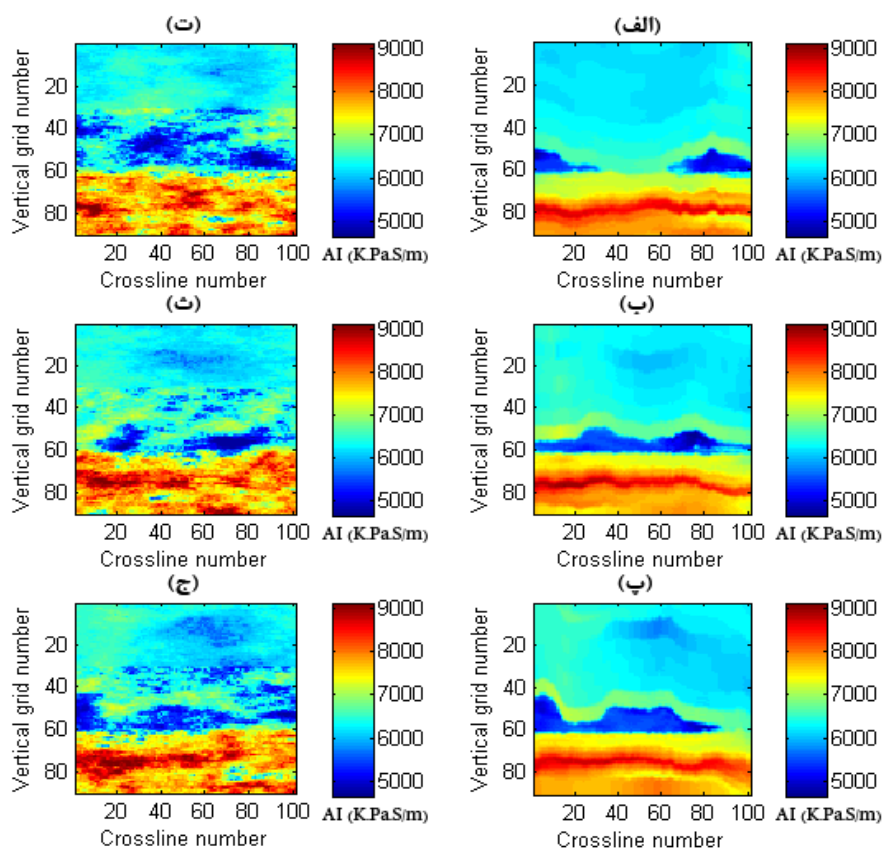
منطقه	مقاومت صوتی	محدوده در جهت قائم
۱	متوسط	از Z=1 تا Z=45
۲	پایین	از Z=46 تا Z=62
۳	بالا	از Z=63 تا Z=90

ت، ث و ج) حاصل شده است. در روش شبیه‌سازی بهبودیافته با توجه به اینکه از توابع توزیع محلی برای نمونه‌برداری استفاده می‌شود هیستوگرام داده شبیه‌سازی شده در هر منطقه با هیستوگرام داده چاه در همان منطقه متناسب است. این موضوع در شکل ۹ نشان داده شده است. هیستوگرام‌های شکل ۹- الف، ب و پ به ترتیب مربوط به منطقه یک، دو و سه در داده مقاومت صوتی چاه‌ها هستند و هیستوگرام‌های متناظر با آن‌ها در داده شبیه‌سازی شده به ترتیب در شکل‌های ۹- ت، ث و ج آورده شده است.

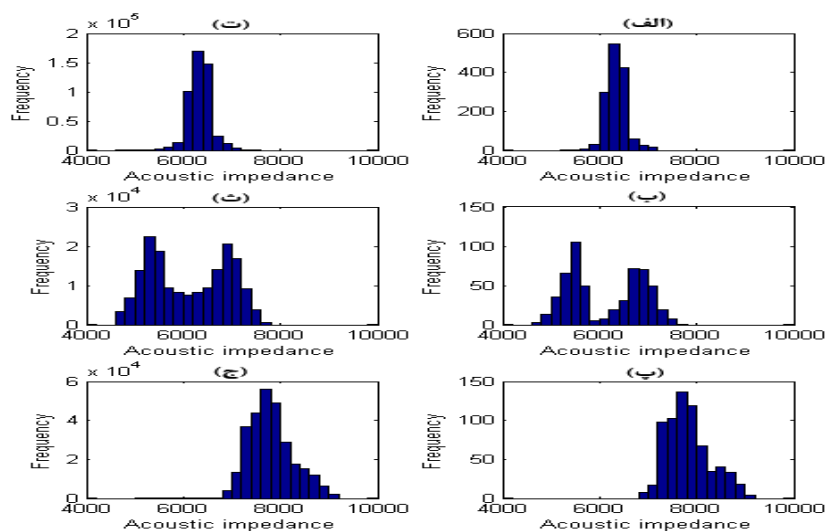
مدل‌سازی واریوگرام مطابق شکل ۷ برای سه منطقه، به‌طور مجزا با استفاده از مدل کروی انجام شده است. استفاده از این مدل‌های واریوگرام، شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته اجرا شده و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. در این شکل، سه مقطع قائم متناظر با مقاطع شکل ۵ برای مقایسه بهتر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ قابل‌مشاهده است، مقادیر شبیه‌سازی شده مقاومت صوتی (شکل ۸- ت، ث و ج) تطابق خوبی با مقادیر واقعی (شکل ۸- الف، ب و پ) دارند و بهبود قابل ملاحظه‌ای در توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی نسبت به شبیه‌سازی قبلی (شکل ۵-



شکل ۷: مدل‌سازی واریوگرام داده‌های مصنوعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) در راستای افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) واریوگرام در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه



شکل ۸: مقاطع قائم مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی براساس شکل ۳. الف، ب و پ) سه مقطع قائم مربوط به مکعب مدل مقاومت صوتی اولیه، ت، ث و ج) مقاطع متناظر حاصل از شبیه‌سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته



شکل ۹: هیستوگرام‌های مربوط به منطقه‌بندی داده مصنوعی. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های مربوط به مقاومت صوتی در چاه‌ها به ترتیب در منطقه یک، دو و سه، ت، ث و ج) هیستوگرام‌های متناظر در داده شبیه‌سازی شده به روش بهبودیافته

را در ضریب همبستگی حاصل از الگوریتم بهبودیافته نشان می‌دهد که مؤید نتایج مشاهده شده در شکل‌های قبل است.

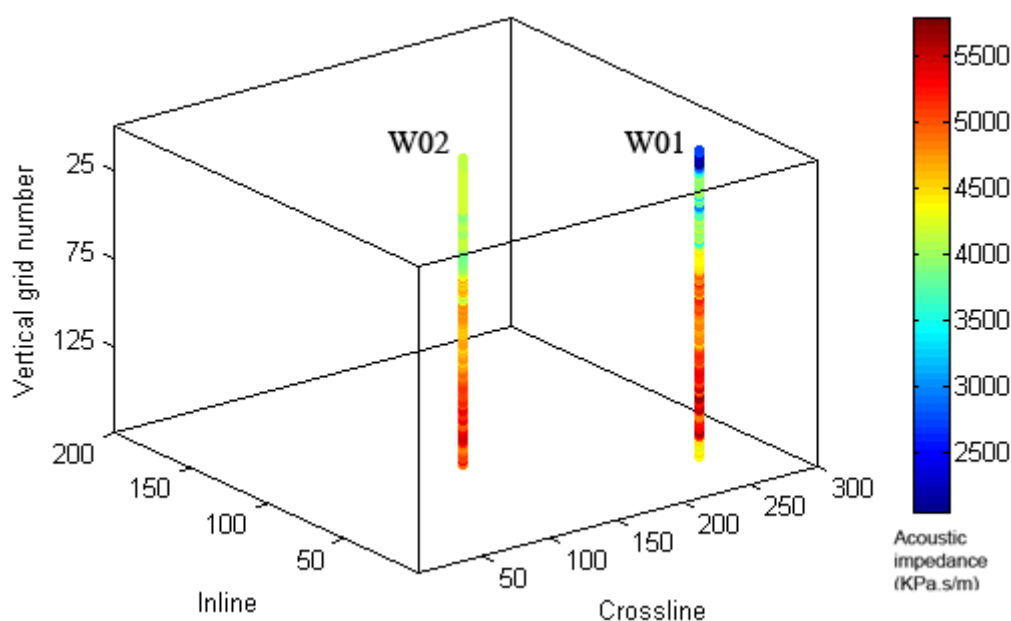
همچنین ضرایب همبستگی بین مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه و نتایج شبیه‌سازی در دو حالت الگوریتم رایج و بهبودیافته محاسبه شده است. جدول ۲ افزایش قابل توجهی

جدول ۲: ضریب همبستگی بین مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه و نتایج شبیه‌سازی

روش	الگوریتم شبیه‌سازی رایج	الگوریتم شبیه‌سازی بهبودیافته
ضریب همبستگی	٪ ۶۷	٪ ۸۳

داده واقعی مورد استفاده در این پژوهش، داده مقاومت صوتی دو چاه قائم است. محدوده مورد مطالعه به صورت یک شبکه سه‌بعدی به ابعاد $200 \times 300 \times 175$ سلول است (شکل ۱۰).

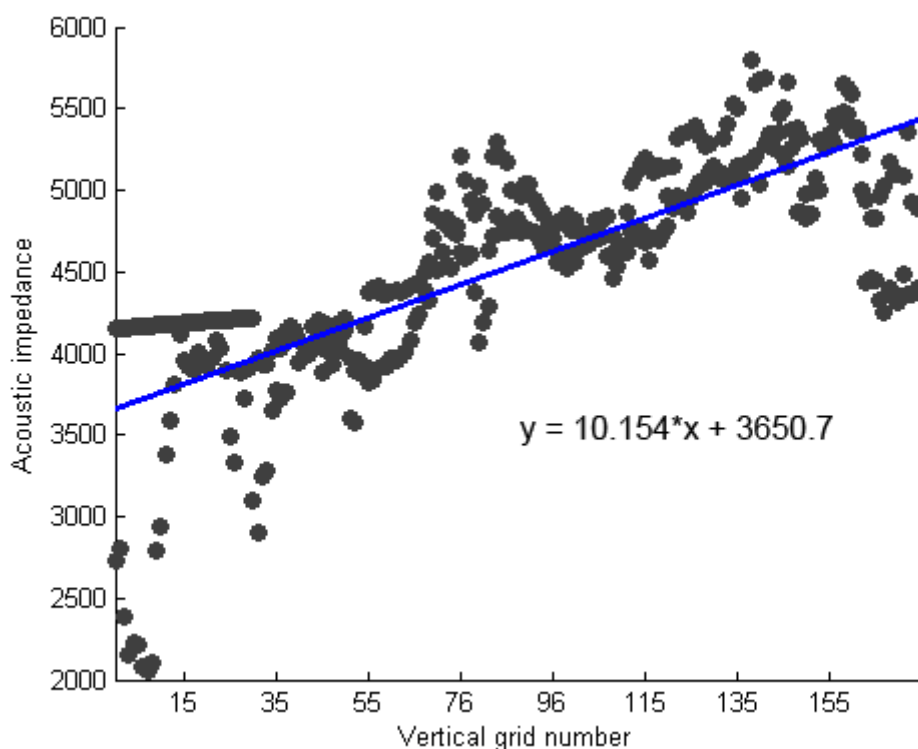
۵- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته بر روی داده واقعی



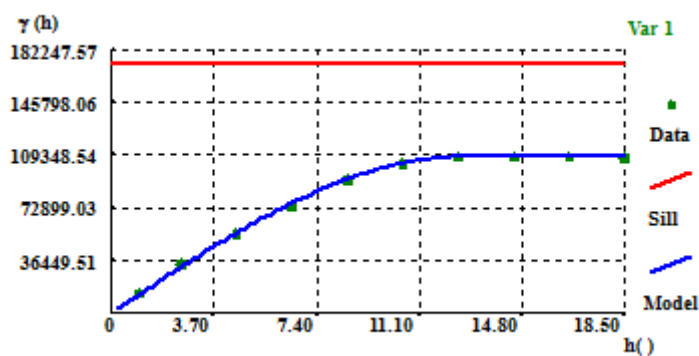
شکل ۱۰: نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده واقعی و موقعیت چاه‌ها

که در جدول ۳ آمده است. همچنین این منطقه‌بندی در شکل ۱۳ آورده شده است.

ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. شکل ۱۱ مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها را در مقابل عمق نشان می‌دهد. برای حذف روند، یک خط با معادله مشخص به داده‌ها برازش شده است. بعد از حذف روند، مدل‌سازی واریوگرام قابل انجام است. با توجه به محدود بودن تعداد چاه‌ها، واریوگرام تنها در راستای قائم محاسبه شده که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. برای به کارگیری روش بهبودیافته همانند داده مصنوعی از تغییرات مقاومت صوتی در راستای قائم استفاده شده است. به این ترتیب سه منطقه برای کل فضای سه‌بعدی مورد مطالعه در نظر گرفته شده



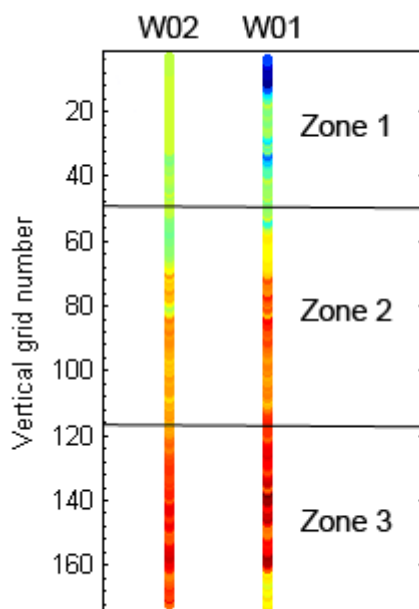
شکل ۱۱: مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده واقعی). یک روند خطی به داده‌ها برازش شده است.



شکل ۱۲: مدل‌سازی واریوگرام قائم با استفاده از داده‌های واقعی چاه به صورت کلی

جدول ۳: منطقه‌بندی داده واقعی

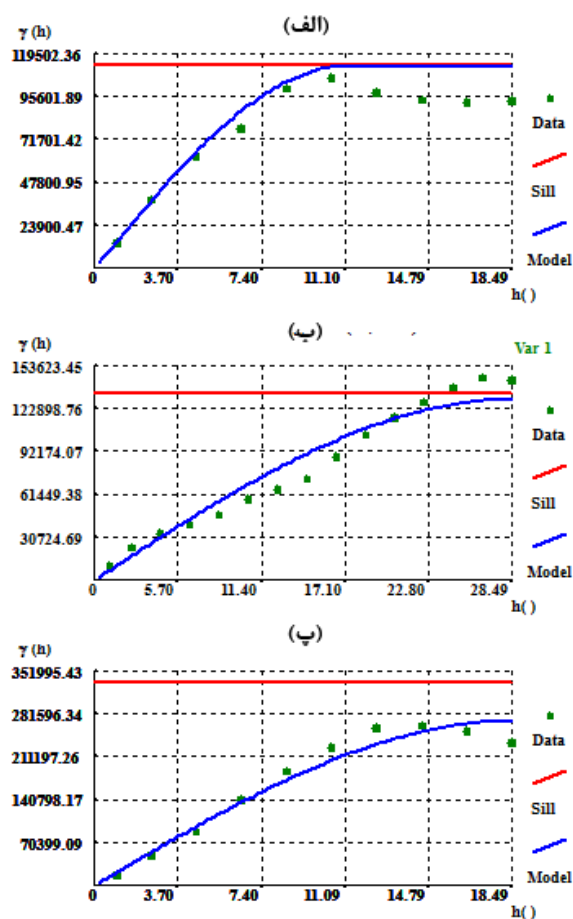
منطقه	مقاومت صوتی	محدوده در جهت قائم
۱	پایین	از $Z=1$ تا $Z=48$
۲	متوسط	از $Z=49$ تا $Z=117$
۳	بالا	از $Z=118$ تا $Z=175$



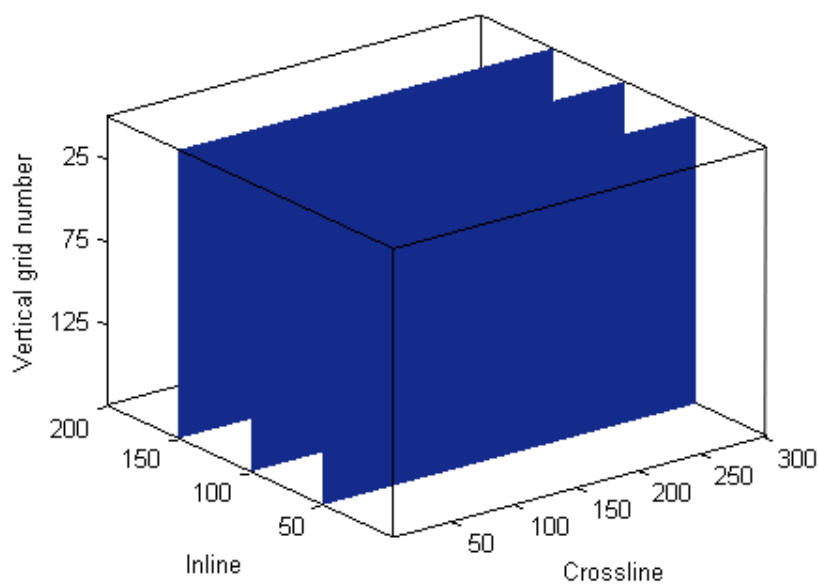
شکل ۱۳: منطقه‌بندی داده واقعی بر اساس مقادیر مقاومت صوتی

وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی رایج (شکل ۱۶- الف، ب و پ) این موضوع را نشان نمی‌دهد. اگرچه اظهار نظر قطعی در مورد توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی نیازمند اطلاعات تکمیلی دیگر از حوزه‌های مختلف اکتشافی است. با وجود این، هیستوگرام مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم رایج، هیستوگرام داده‌های چاه را بازتولید کرده است (شکل ۱۷). اما در مورد نتایج روش شبیه‌سازی بهبودیافته، توزیع فضایی مقادیر مختلف مقاومت صوتی به خوبی رعایت شده است (شکل ۱۶- ت، ث و ج). در افق‌های بالایی شاهد حضور مقادیر پایین مقاومت صوتی هستیم و به تدریج به سمت افق‌های پایین تر مقادیر مقاومت صوتی افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۸ هیستوگرام‌های داده‌های چاه و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم بهبودیافته را در سه منطقه به صورت مجزا نشان می‌دهد. هیستوگرام‌های مشابه در هر منطقه نشان‌دهنده صحت اجرای الگوریتم شبیه‌سازی بهبودیافته است.

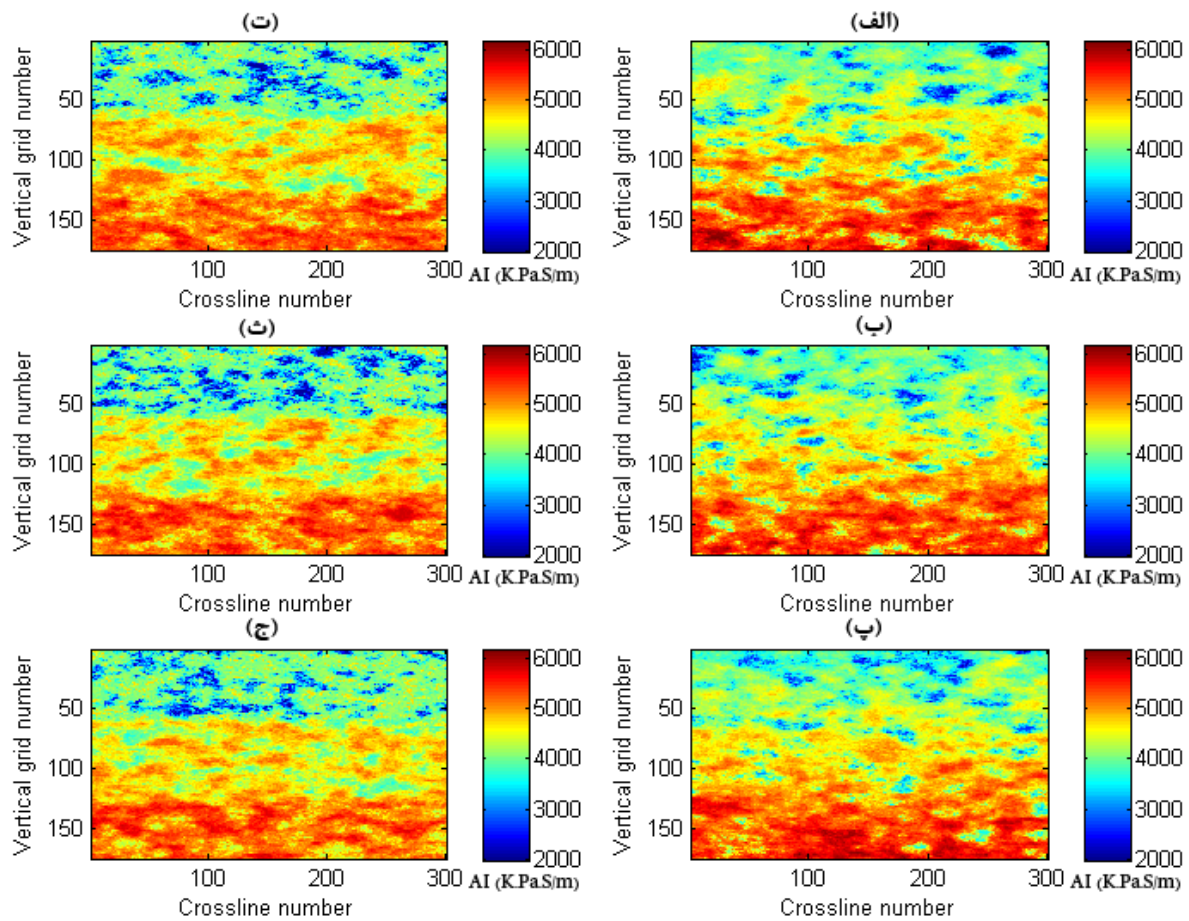
مدل‌های وارپیوگرام برای سه منطقه به صورت مجزا محاسبه شده است. شکل ۱۴ این مدل‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۵، سه مقطع قائم از مناطق مختلف شبکه سه‌بعدی منطقه مورد مطالعه برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی انتخاب شده است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی رایج و بهبودیافته در این سه مقطع، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۶- الف، ب و ت مقاطع شبیه‌سازی رایج و شکل‌های ت، ث و ج مقاطع شبیه‌سازی بهبودیافته را نمایش می‌دهند. توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی در روش شبیه‌سازی رایج، نشأت گرفته از تابع توزیع کلی، در کل منطقه پراکنده شده‌اند اما مطالعه داده‌های چاه مطابق شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقادیر پایین مقاومت صوتی (کمتر از 3000 KPa.S/m) تنها در افق‌های بالایی چاه شماره W01 مشاهده می‌شود و در افق‌های پایین هیچ کدام از دو چاه تکرار نشده است. بنابراین فرض اولیه می‌تواند بر این نکته استوار باشد که احتمال حضور مقادیر پایین مقاومت صوتی تنها در افق‌های بالای مدل سه‌بعدی



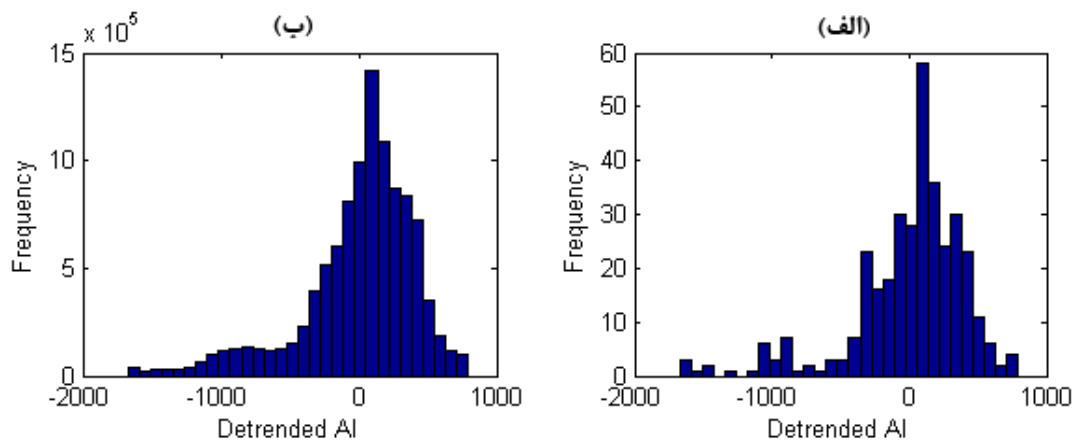
شکل ۱۴: مدل‌سازی واریوگرام با استفاده از داده‌های واقعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) واریوگرام در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه



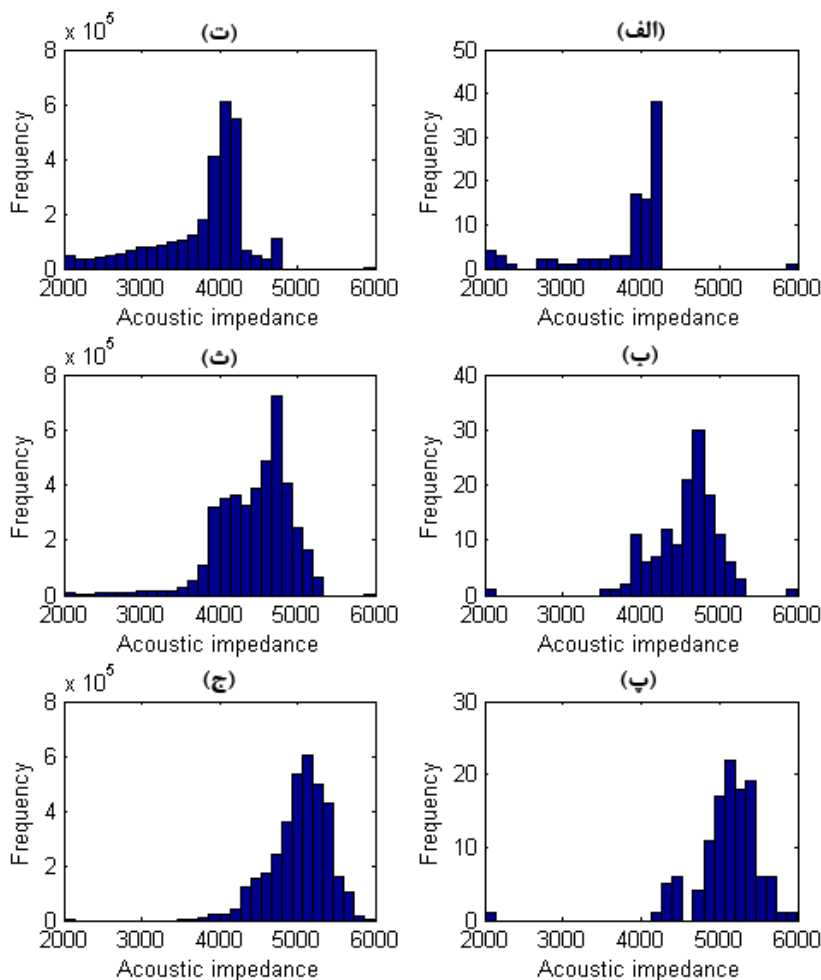
شکل ۱۵: موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از شبکه سه‌بعدی شبیه‌سازی برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی



شکل ۱۶: مقاطع قائم مقاومت صوتی در مورد داده واقعی. الف، ب و پ) سه مقطع قائم مربوط به مقاومت صوتی حاصل از شبیه‌سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج، ت، ث و ج) مقاطع متناظر حاصل از شبیه‌سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته



شکل ۱۷: هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده واقعی. الف) هیستوگرام داده‌های چاه و ب) هیستوگرام مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج



شکل ۱۸: هیستوگرام‌های مربوط به منطقه‌بندی داده واقعی. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های مربوط به مقاومت صوتی در چاه‌ها به ترتیب در منطقه یک، دو و سه، ت، ث و ج) هیستوگرام‌های متناظر در داده شبیه‌سازی شده به روش بهبودیافته

۶- تحلیل عدم قطعیت

به‌منظور تحلیل عدم قطعیت در مورد داده مصنوعی، ۱۰۰ خروجی برای هر دو روش رایج و بهبودیافته تولید شد تا بتوان واریانس مقاومت صوتی در هر سلول را مورد محاسبه قرار داد. میانگین مقادیر واریانس سلول‌های شبکه شبیه‌سازی در مورد نتایج الگوریتم رایج و بهبودیافته اغلب نشان دهنده کاهش واریانس و در نتیجه کاهش عدم قطعیت در مورد نتایج الگوریتم بهبودیافته است جدول ۴ میانگین واریانس را به تفکیک روش مورد استفاده نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که واریانس کل در الگوریتم بهبودیافته به بیشتر از

نصف کاهش یافته است. در مورد واریانس مربوط به هر منطقه این کاهش متفاوت است. منطقه یک بیشترین و منطقه دو کمترین کاهش را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان به این صورت تحلیل کرد که واریانس مقاومت صوتی بعد از منطقه‌بندی در مناطق مختلف به یک نسبت تغییر نکرده است. اگرچه این حقیقت از مقایسه هیستوگرام کل داده چاه (شکل ۶- الف) و هیستوگرام‌های داده چاه در مناطق مختلف (شکل ۹- الف، ب و پ) مشخص است اما به صورت عددی در جدول ۵ آورده شده است. مقدار واریانس در هر سه منطقه نسبت به واریانس کل کاهش را نشان می‌دهد اما کاهش در

(شکل ۱۹- الف، ب و پ) در مقابل داده شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم بهبودیافته (شکل ۱۹- ت، ث و ج) آورده شده است. به‌منظور مقایسه راحت‌تر مقیاس رنگی همه شکل‌ها یکسان‌سازی شده است. شکل ۱۹- ت بیشترین کاهش واریانس نسبت به شکل ۱۹- الف را نشان می‌دهد. در حالی‌که کمترین کاهش واریانس مربوط به شکل ۱۹- ث نسبت به شکل ۱۹- ب است.

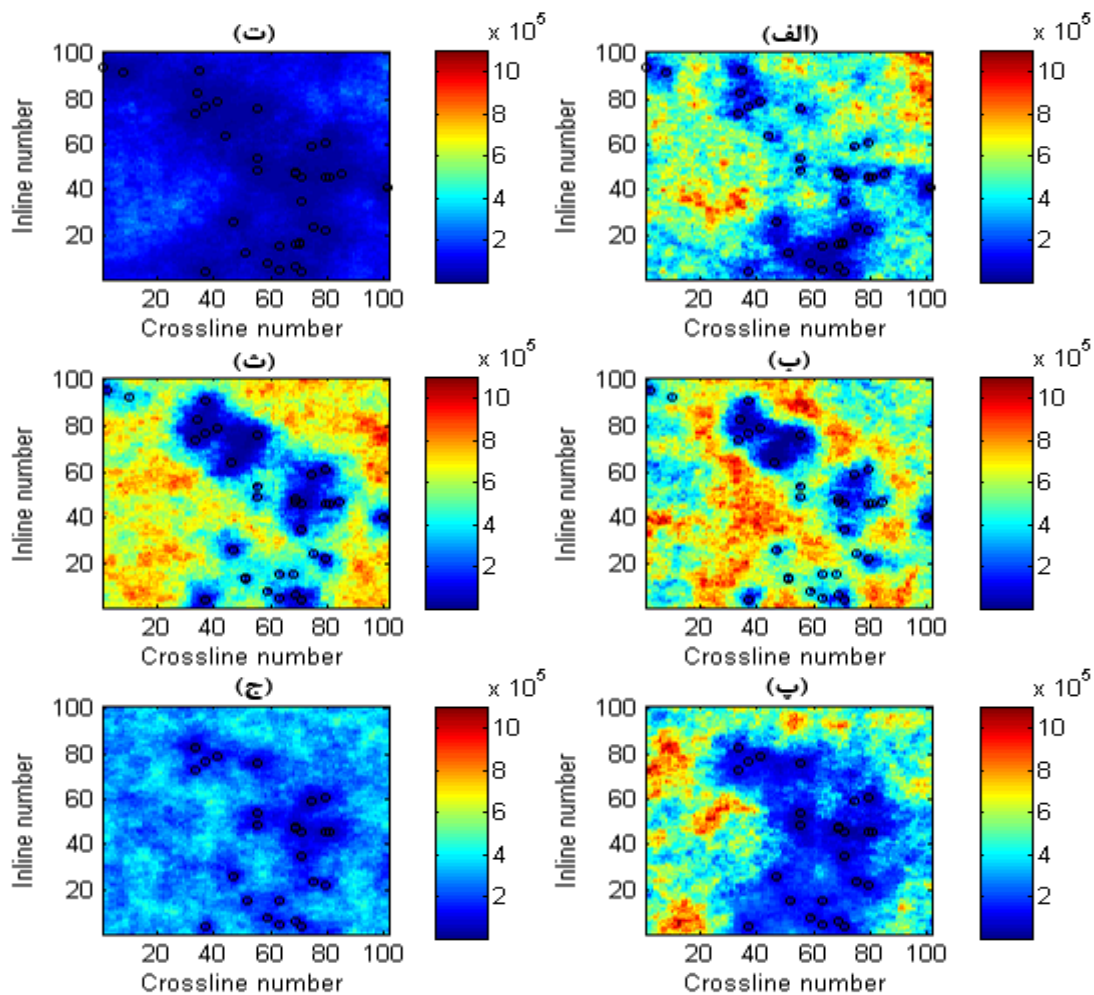
منطقه یک بسیار محسوس تر است. در مقابل منطقه دو کمترین کاهش را داشته است. در نتیجه بعد از عمل شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهبودیافته، انتظار بیشترین و کمترین کاهش واریانس را به ترتیب از مناطق یک و دو خواهیم داشت. شکل ۱۹ به خوبی این مسأله را به نمایش گذاشته است. در این شکل، برش‌های عرضی از مکعب واریانس داده شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج

جدول ۴: میانگین واریانس سلول‌های شبیه‌سازی شده در دو روش رایج و بهبودیافته به تفکیک منطقه (داده مصنوعی)

کل داده	منطقه سه	منطقه دو	منطقه یک	میانگین واریانس
۳/۱۴۴	۲/۷۷۷	۳/۹۷۲	۳/۲۶۲	میانگین واریانس الگوریتم رایج ($\times 10^5$)
۱/۸۶۰	۱/۴۵۳	۳/۸۹۷	۰/۲۳۲	میانگین واریانس الگوریتم بهبودیافته ($\times 10^5$)

جدول ۵: واریانس داده اولیه چاه قبل و بعد از منطقه‌بندی (داده مصنوعی)

واریانس داده چاه در منطقه سه	واریانس داده چاه در منطقه دو	واریانس داده چاه در منطقه یک	واریانس کل داده چاه
$2/02 \times 10^5$	$5/84 \times 10^5$	$4/47 \times 10^4$	$6/62 \times 10^5$



شکل ۱۹: برش‌های عرضی مکعب واریانس مربوط به ۱۰۰ خروجی در مورد داده مصنوعی. الف، ب و پ) واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳، ت، پ و ج) واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳. دایره‌های تو خالی محل چاه‌ها را نشان می‌دهند.

تولید شد. جدول ۶ میانگین واریانس مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده به تفکیک منطقه را نشان می‌دهد.

برای تحلیل عدم قطعیت در مورد داده واقعی نیز ۱۰۰ خروجی شبیه‌سازی با استفاده الگوریتم رایج و بهبودیافته

جدول ۶: میانگین واریانس سلول‌های شبیه‌سازی شده در دو روش رایج و بهبودیافته به تفکیک منطقه (داده واقعی)

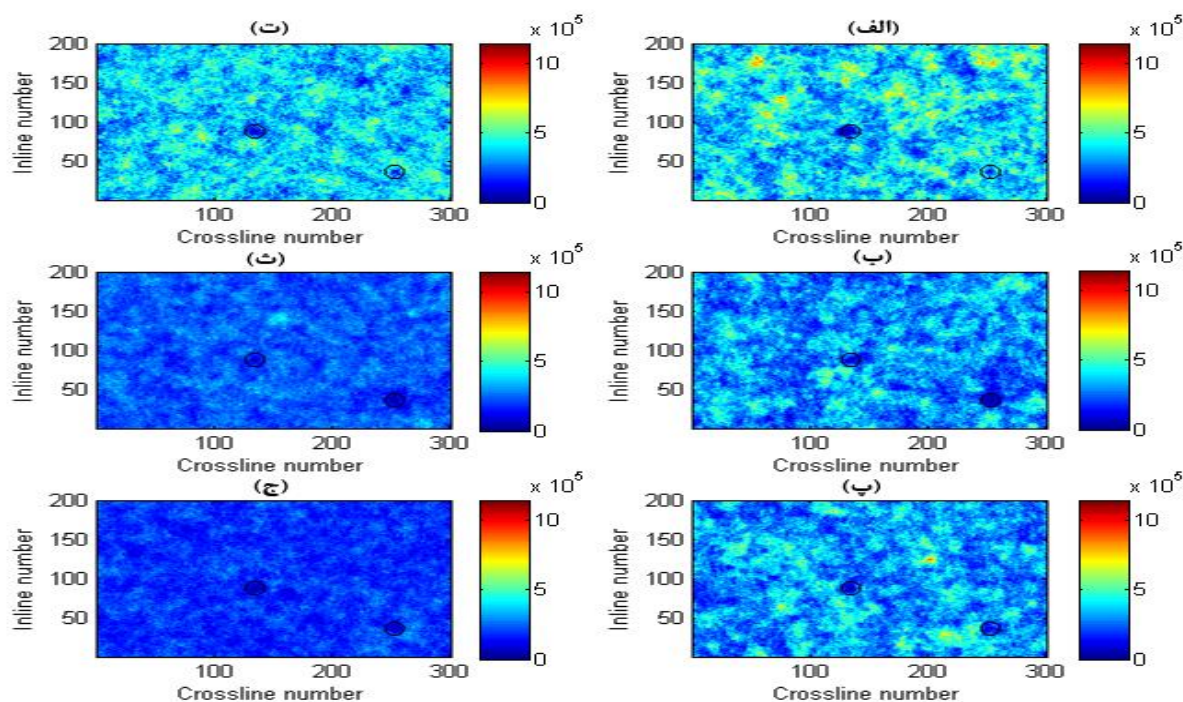
میانگین واریانس	منطقه یک	منطقه دو	منطقه سه	کل داده
میانگین واریانس الگوریتم رایج ($\times 10^5$)	۳/۴۲۰	۱/۶۷۲	۱/۸۱۴	۲/۶۷۸
میانگین واریانس الگوریتم بهبودیافته ($\times 10^5$)	۳/۳۳۷	۱/۱۴۶	۰/۹۳۳	۱/۸۱۴

می‌دهد. در این شکل کاهش واریانس در هر سه منطقه مشخص است اما کاهش واریانس در منطقه دو و سه بیشتر از منطقه یک است.

جدول ۷: واریانس داده اولیه چاه قبل و بعد از منطقه‌بندی (داده واقعی)

واریانس کل داده چاه	واریانس داده چاه در منطقه یک	واریانس داده چاه در منطقه دو	واریانس داده چاه در منطقه سه
$4/36 \times 10^5$	$3/35 \times 10^5$	$1/35 \times 10^5$	$1/14 \times 10^5$

با بررسی مقادیر مندرج در جدول ۶ به این نتیجه می‌رسیم که میانگین واریانس در همه موارد کاهش داشته است. این کاهش در مورد منطقه دو و سه نسبت به منطقه یک محسوس‌تر است. در تحلیل این پدیده می‌توان به اطلاعات جدول ۷ اشاره نمود. همان طور که در جدول ۷ مشخص است، کاهش واریانس بعد از منطقه‌بندی در منطقه یک کمتر از مناطق دو و سه اتفاق افتاده است. شکل ۲۰ برش‌های عرضی را از مناطق مختلف واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج (شکل ۲۰- الف، ب و پ) و الگوریتم بهبودیافته (شکل ۲۰- ت، ث و ج) نشان



شکل ۲۰: برش‌های عرضی مکعب واریانس مربوط به ۱۰۰ خروجی در مورد داده واقعی. الف، ب و پ) واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳، ت، پ و ج) واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳. دایره‌های تو خالی محل دو چاه را نشان می‌دهند.

۷- نتیجه‌گیری

در الگوریتم ارائه شده در این پژوهش، کاملاً انعطاف‌پذیر است بنابراین می‌توان در صورت در دسترس بودن اطلاعات اضافی در مورد زمین‌شناسی و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، این اطلاعات مورد استفاده را به عنوان ضابطه‌ای جهت تعیین مرزهای منطقه‌بندی قرار داد.

در نهایت، نتایج تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های انجام شده در مورد داده مصنوعی و واقعی حاکی از کاهش واریانس و در نتیجه کاهش عدم قطعیت خروجی الگوریتم شبیه‌سازی بهبودیافته نسبت به روش رایج شبیه‌سازی است. به عبارت دیگر، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم بهبودیافته به مقدار واقعی نزدیک‌تر و در نتیجه دارای احتمال وقوع بیشتر هستند.

منابع

- [1] Dubrule, O. 1998. Geostatistics in petroleum geology. American Association of Petroleum Geologists.
- [2] Dubrule, O. 2003. Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models. Society of Exploration Geophysicists.
- [3] Matheron, G. 1962. *Traité de géostatistique appliquée*. Editions Technip.
- [4] Haas, A.G., Viallix, J.R. 1976. Kriging Applied To Geophysics The Answer To The Problem Of Estimates And Contouring. *Geophysical Prospecting* **24**, 49- 69.
- [5] Doyen, P. 1988. Porosity from seismic data: A geostatistical approach. *Geophysics* **53**, 1263- 1275.
- [6] Deutsch, C.V., Journel, A.G. 1992. *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*: Oxford Univ. Press, New York.
- [7] Manchuk, J.G. and Deutsch, C.V. 2012. A flexible sequential Gaussian simulation program: USGSIM. *Computers & Geosciences* **41**, 208- 216.
- [8] Tahmasebi, P., Sahimi, M., Mariethoz, G. and Hezarkhani, A. 2012. Accelerating geostatistical simulations using graphics processing units (GPU). *Computers & Geosciences* **46**, 51- 59.
- [9] Peredo, O., Ortiz, J.M. and Herrero, J.R. 2015. Acceleration of the Geostatistical Software Library (GSLIB) by code

در این مقاله، روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته ارائه و نتایج آن با روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج برای شبیه‌سازی داده‌های مقاومت صوتی مقایسه شد. چون در روش رایج، نمونه‌برداری تصادفی برای تولید مقادیر شبیه‌سازی شده از تابع توزیع تجمعی کلی صورت می‌گیرد، این امکان وجود دارد که مقدار شبیه‌سازی شده از نظر موقعیت فضایی مناسب نباشد. این مشکل به دلیل طبیعت الگوریتم رایج در بازتولید هیستوگرام کلی داده اولیه در خروجی شبیه‌سازی بدون توجه به توزیع فضایی مقادیر است. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، این ویژگی می‌تواند منجر به ظهور مقادیر مقاومت صوتی در مناطقی شود که از نظر زمین‌شناسی و لیتولوژی امکان پذیرش این مقادیر را با احتمال بسیار پایین داشته باشند. در مطالعه حاضر با ارائه الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته، امکان ورود پارامترهای شبیه‌سازی به صورت محلی مهیا شده است. نتایج به کارگیری هر دو روش شبیه‌سازی رایج و بهبود یافته بر روی مجموعه‌ای از داده مصنوعی نشان می‌دهد که الگوریتم بهبودیافته به خوبی توانسته است مقادیر شبیه‌سازی شده را با توزیع فضایی مناسب‌تر و محتمل‌تر ارائه دهد. با توجه به وجود مدل اولیه سه‌بعدی داده مقاومت صوتی در مورد داده مصنوعی و مقایسه آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نتیجه‌گیری در مورد برتری روش بهبودیافته پررنگ‌تر شده است. افزایش ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مدل اولیه مقاومت صوتی در مورد روش بهبودیافته، نشان‌دهنده کارایی بهتر این روش می‌باشد. هیستوگرام‌های محلی نیز در الگوریتم بهبودیافته بازتولید شده که نشان از عملکرد صحیح این الگوریتم دارد.

همچنین این دو روش بر روی داده واقعی اعمال شده است. نتایج حاصل از الگوریتم‌های رایج و بهبودیافته در مورد داده واقعی نشان می‌دهند که الگوریتم بهبودیافته توانسته است عمل شبیه‌سازی را به درستی انجام دهد طوری که توزیع فضایی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم بهبودیافته با داده‌های چاه همخوانی بهتری دارد. ضمن اینکه هیستوگرام‌های محلی داده‌های چاه با مقادیر شبیه‌سازی شده متناسب است. علاوه بر آن، نحوه منطقه‌بندی و تعداد مناطق

- with histogram reproduction: A comparison of algorithms. *Computers & Geosciences* **32**, 382- 395.
- [16] Azevedo, L., Nunes, R., Correia, P., Soares, A., Guerreiro, L., Neto, G. 2014. Multidimensional scaling for the evaluation of a geostatistical seismic elastic inversion methodology. *Geophysics* **79**, M1- M10.
- [17] Oz, B., Deutsch, C.V., Tran, T.T. and Xie, Y. 2003. DSSIM- HR: A FORTRAN 90 program for direct sequential simulation with histogram reproduction. *Computers & Geosciences* **29**, 39- 51.
- [18] Tran, T.T., Deutsch, C.V. and Xie, Y. 2001. Direct Geostatistical Simulation With Multiscale Well, Seismic, and Production Data. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Vol. SPE Paper Number 71323. Society of Petroleum Engineers, ISBN 978- 1- 55563- 154- 3.
- optimization and hybrid parallel programming. *Computers & Geosciences* **85, Part A**, 210- 233.
- [10] Raseira, L.G., Machado, P.L. and Costa, J.F.C.L. 2015. A conflict- free, path- level parallelization approach for sequential simulation algorithms. *Computers & Geosciences* **80**, 49- 61.
- [11] Caers, J. 2000. Direct sequential indicator simulation. Sixth International Geostatistics Congress, 39-48.
- [12] Soares, A. 1998. Sequential Indicator Simulation with Correction for Local Probabilities. *Mathematical Geology* **30**, 761- 765.
- [13] Soares, A. 2001. Direct Sequential Simulation and Cosimulation. *Mathematical Geology* **33**, 911- 926.
- [14] Horta, A., Soares, A. 2010. Direct Sequential Co- simulation with Joint Probability Distributions. *Mathematical Geosciences* **42**, 269- 292.
- [15] Robertson, R.K., Mueller, U.A. and Bloom, L.M. 2006. Direct sequential simulation