

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی اکتشاف معدن

رساله دکتری

وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی برای الگوهای فضایی ناپایا در مخازن هیدروکربوری

نگارنده: حمید ثابتی

اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده

دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی

استاد مشاور:

Dr. Amilcar Soares

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۳۴۹۵/۱۷۱۴-۲
 تاریخ: ۹۵/۴/۲۰
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
 (ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم حمید ثابتی دانشجوی دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن به شماره دانشجویی ۹۰۲۳۲۱۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۰ در تاریخ ۱۳/۴/۹۵ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: وارون سازی تصادفی لرزه ای سه بعدی برای الگوهای فضایی ناپایا در مخازن هیدروکربوری دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه: ... نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ (ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵ (د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
 ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	دکتر علی مرادزاده	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر فرامرز دولتی ارده جانی	استاد راهنما	استاد	
۳	Dr. Amilcar Soares	استاد مشاور	استاد	
۴	دکتر محمدرضا بختیاری	استاد مدعو خارجی	استادیار	
۵	دکتر امید اصغری	استاد مدعو خارجی	استادیار	
۶	دکتر امین روشنندل کاهو	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۷	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای حمید ثابتی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۵/۴/۲۰



تقدیم بہ:

ہمسرمہربانم سپیدہ و دتھر عزیزم آیتنا

بہ خاطر خطہ خطہ ای کہ بید با ایشان می گذشت اما صرف این رسالہ شد...

سپاس نامه:

در این مجال، از حمایت‌ها و زحمتهای ارزشمند اساتید راهنمای خویش، جناب آقای دکتر علی مرادزاده و جناب آقای دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی که در این مسیر طولانی همواره پشتیبان من بودند، صمیمانه سپاسگزارم.

این رساله، بر اساس تفاهم‌نامه منعقد بین دانشگاه لیسبون (پرتغال)، انستیتو عالی فنی^۱ و دانشگاه صنعتی شاهرود و با حمایت‌های مادی و معنوی مرکز مطالعات ذخایر طبیعی و محیط زیست^۲ مستقر در دانشگاه لیسبون انجام شده است. بدین وسیله از مدیریت این مرکز قدردانی می‌کنم. همچنین از استاد مشاورم جناب آقای دکتر آمیلکار سوارس^۳ استاد دانشگاه لیسبون که در به ثمر رسیدن این رساله نقش کلیدی داشتند، سپاسگزارم.

¹ Instituto Superior Tecnico, University of Lisbon, Portugal

² Centre for Natural Resources and the Environment

³ Dr. Amilcar Soares

تعهد نامه

اینجانب حمید ثابتی دانشجوی دوره دکتری رشته اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی برای الگوهای فضایی ناپایا در مخازن هیدروکربوری تحت راهنمایی دکتر علی مرادزاده و دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این رساله 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 رساله 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 رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

۱۳۹۵/۶/۱۸

حمید ثابتی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

یکی از مهمترین داده‌های مرتبط با اکتشاف نفت و گاز، داده‌های لرزه‌ای بازتابی است. وارون‌سازی لرزه‌ای از مهمترین مراحل اکتشاف و مدل‌سازی مخازن هیدروکربوری به شمار می‌رود. روش‌های مختلفی برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای وجود دارد که مجموعه روش‌های وارون‌سازی تصادفی جدیدترین روش‌ها در این زمینه می‌باشند. در این روش‌ها، برای حل مسأله وارون از الگوریتم‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده می‌شود. در این رساله، ابتدا الگوریتم بهبودیافته‌ای برای شبیه‌سازی زمین‌آماری متوالی مستقیم ارائه شد و سپس با تهیه کدهای رایانه‌ای در محیط برنامه‌نویسی MATLAB، عملکرد آن برای شبیه‌سازی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، بر اساس این الگوریتم بهبودیافته، الگوریتم‌های جدیدی برای وارون‌سازی تصادفی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای به صورت پایا و ناپایا ارائه شده و با تهیه کدهای لازم، توانایی آن‌ها در مدل‌سازی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد تحلیل قرار گرفت. در انتها الگوریتمی نیز برای بهینه‌سازی پارامترهای واروگرام در حین وارون‌سازی تصادفی ناپایای سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای با روش ازدحام ذرات ارائه شد. نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی نشان از توزیع مناسب‌تر مقادیر مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده نسبت به الگوریتم رایج دارد. این موضوع توسط بازتولید هیستوگرام‌های محلی در هر منطقه توسط الگوریتم بهبودیافته تأیید شده است. نتایج وارون‌سازی صورت گرفته بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه نشان می‌دهند که خطای وارون‌سازی تصادفی در حالت ناپایا، به میزان $6/1$ درصد و برای داده‌های نوفه‌دار، به مقدار $9/7$ درصد نسبت به نتایج وارون‌سازی تصادفی پایا کاهش می‌دهد. همچنین، اعتبارسنجی نتایج وارون‌سازی تصادفی ناپایا با استفاده از داده‌های چاه‌های آزمایشی در حالت بدون نوفه، نشان‌دهنده کاهش خطا به مقدار $4/6$ درصد در چاه شماره یک و $8/1$ درصد در چاه شماره دو نسبت به حالت پایا بوده است. کاهش خطا در مورد داده‌های نوفه‌دار نیز برای چاه‌های شماره یک و دو به ترتیب 12 و $11/3$ درصد محاسبه شده است. مقایسه نتایج وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای میدانی (واقعی) در حالت

ناپایا کاهش ۲/۸ درصدی از خطا را نسبت به حالت وارون‌سازی پایا نشان داده است. همچنین، آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا در این حالت، با استفاده از داده‌های چاه آزمایشی نشان‌دهنده کاهش خطای وارون‌سازی به مقدار ۵/۴ درصد نسبت به حالت پایا بوده است. علاوه بر آن، الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار و داده‌های میدانی توانسته خطای مدل‌سازی را کمی (حدود ۱ درصد) نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کاهش دهد.

کلمات کلیدی: واریوگرام، شبیه‌سازی متوالی مستقیم، وارون‌سازی تصادفی داده‌های لرزه‌ای بازتابی،

الگوی فضایی پایا و ناپایا، الگوریتم ازدحام ذرات

لیست مقالات مستخرج از رساله

- شبیه‌سازی زمین‌آماري سه‌بعدی داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته، سومین همایش ملی نفت و گاز و صنایع وابسته، ۲۲ و ۲۳ مهر ۱۳۹۴، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- وارون‌سازی تصادفی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای بازتابی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین، ۳-۵ اسفند ۱۳۹۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران
- Geostatistical seismic inversion for non-stationary patterns using direct sequential simulation and co-simulation, 2016, SEG Annual Meeting, 18-21 October 2016, Dallas, US.
- A new stochastic 3D seismic inversion using direct sequential simulation and co-simulation in a genetic algorithm framework, Journal of Mining and Environment, 2016, In Press
- شبیه‌سازی زمین‌آماري سه‌بعدی داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، ۱۳۹۵، در دست چاپ
- Geostatistical seismic inversion for non-stationary patterns using direct sequential simulation and co-simulation, Geophysical Prospecting, Under Review

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مسأله و بیان سوال‌های اساسی پژوهش	۸
۱-۳- ضرورت انجام پژوهش و بیان فرضیه‌های آن	۹
۱-۴- اهداف و روش پژوهش	۱۰
۱-۵- ساختار رساله	۱۰
فصل دوم: مروری بر روش‌های وارون‌سازی لرنزهای	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- روش‌شناسی وارون‌سازی لرنزهای	۱۳
۳-۲- روش‌های وارون‌سازی قطعی	۱۶
۱-۳-۲- روش وارون‌سازی بازگشتی	۱۶
۲-۳-۲- روش وارون‌سازی خارهای پراکنده	۱۷
۳-۳-۲- روش بر پایه مدل	۱۹
۴-۳-۲- روش وارون‌سازی رنگی	۲۲
۴-۲- روش‌های وارون‌سازی تصادفی	۲۳
۱-۴-۲- روش‌های ردلرزه به ردلرزه	۲۵
۲-۴-۲- روش‌های وارون‌سازی تصادفی کلی	۳۱
۵-۲- جمع‌بندی	۳۳
فصل سوم: ارائه الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته	۳۵
۱-۳- مقدمه	۳۶
۲-۳- واریوگرام	۳۶
۳-۳- شبیه‌سازی زمین‌آماری متوالی مستقیم	۴۰
۴-۳- کاربرد بر روی داده مصنوعی	۴۳
۱-۴-۳- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده مصنوعی	۴۳
۲-۴-۳- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبود یافته بر روی داده مصنوعی	۴۸
۳-۴-۳- تحلیل عدم قطعیت در مورد داده مصنوعی	۵۲
۵-۳- کاربرد بر روی داده واقعی	۵۴

۵۵	۳-۵-۱- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده واقعی
۵۷	۳-۵-۲- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده واقعی
۶۰	۳-۵-۳- مقایسه نتایج الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته
۶۲	۳-۵-۴- تحلیل عدم قطعیت در مورد داده واقعی
۶۵	فصل چهارم: ارائه الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی پایا
۶۶	۴-۱- مقدمه
۶۶	۴-۲- وارون‌سازی لرزه‌ای سه‌بعدی پایا
۶۹	۴-۳- کاربرد بر روی داده‌های مصنوعی
۸۳	۴-۴- کاربرد بر روی داده‌های واقعی
۹۳	فصل پنجم: ارائه الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی ناپایا
۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۴	۵-۲- وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی ناپایا
۹۷	۵-۳- کاربرد بر روی داده‌های مصنوعی
۱۱۱	۵-۴- کاربرد بر روی داده‌های واقعی
۱۲۱	فصل ششم: مقایسه نتایج وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا
۱۲۲	۶-۱- مقدمه
۱۲۲	۶-۲- مقایسه نتایج مدل‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه
۱۲۸	۶-۳- مقایسه نتایج وارون‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای نوفه‌دار
۱۳۶	۶-۴- مقایسه نتایج وارون‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای واقعی
۱۴۵	فصل هفتم: تهیه الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی تصادفی سه‌بعدی ناپایا با روش ازدحام ذرات
۱۴۶	۷-۱- مقدمه
۱۴۸	۷-۲- بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام با روش ازدحام ذرات
۱۵۰	۷-۳- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه
۱۵۸	۷-۴- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار
۱۶۴	۷-۵- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های واقعی
۱۷۳	فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۷۴	۸-۱- مقدمه
۱۷۴	۸-۲- نتیجه‌گیری

۱۷۷.....پیشنهادها ۳-۸

۱۷۹.....منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- فلوجارت وارون‌سازی بر پایه مدل ۲۰
- شکل ۲-۲- فلوجارت پایه برای کلیه الگوریتم‌های وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه ۲۶
- شکل ۳-۲- دیاگرام مراحل وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه برای تخمین مقاومت صوتی ۲۸
- شکل ۴-۲- مراحل کلی روش وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه برای تولید مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی ۳۰
- شکل ۱-۳- نمونه‌ای از نمودار واریوگرام. همراه با نمایش اثر قطعه‌ای، دامنه یا شعاع تأثیر و سقف واریوگرام. ۳۹
- شکل ۲-۳- نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده مصنوعی و موقعیت چاه‌ها. ۴۳
- شکل ۳-۳- مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده مصنوعی) ۴۴
- شکل ۴-۳- مدل‌سازی واریوگرام با استفاده از داده‌های 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. ۴۵
- شکل ۵-۳- موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی. ۴۶
- شکل ۶-۳- مقاطع قائم مقاومت صوتی براساس شکل ۳-۵. 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. ۴۷
- شکل ۷-۳- 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 شبیه‌سازی متوالی مستقیم. ۴۷
- شکل ۸-۳- 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. ۴۹
- شکل ۹-۳- مقاطع قائم مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی براساس شکل ۳-۵. 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. ۵۰
- شکل ۱۰-۳- 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. ۵۱
- شکل ۱۱-۳- 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. ۵۴
- شکل ۱۲-۳- نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده واقعی و موقعیت چاه‌ها. ۵۵
- شکل ۱۳-۳- مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده واقعی) ۵۶
- شکل ۱۴-۳- مدل‌سازی واریوگرام قائم با استفاده از داده‌های واقعی چاه به صورت کلی ۵۶
- شکل ۱۵-۳- یک مقطع قائم از نتیجه شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده واقعی ۵۶
- شکل ۱۶-۳- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده واقعی. الف) هیستوگرام داده‌های چاه و ب) هیستوگرام مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج. ۵۷

- شکل ۳-۱۷- مدل سازی واریوگرام با استفاده از داده های واقعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) واریوگرام در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ۵۸.....
- شکل ۳-۱۸- یک مقطع قائم از نتیجه شبیه سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده واقعی ۵۹.....
- شکل ۳-۱۹- هیستوگرام های مربوط به منطقه بندی داده واقعی. الف، ب و پ) هیستوگرام های مربوط به مقاومت صوتی در چاه ها به ترتیب در منطقه یک، دو و سه، ت، ث و ج) هیستوگرام های متناظر در داده شبیه سازی شده به روش بهبودیافته. ۵۹.....
- شکل ۳-۲۰- موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از شبکه سه بعدی شبیه سازی جهت مقایسه نتایج شبیه سازی ۶۱.....
- شکل ۳-۲۱- مقاطع قائم مقاومت صوتی در مورد داده واقعی. الف، ب و پ) سه مقطع قائم مربوط به مقاومت صوتی حاصل از شبیه سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج، ت، ث و ج) مقاطع متناظر حاصل از شبیه سازی توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته. ۶۱.....
- شکل ۳-۲۲- برش های عرضی مکعب واریانس مربوط به ۱۰۰ خروجی در مورد داده واقعی. الف، ب و پ) واریانس مقادیر شبیه سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم رایج به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳، ت، پ و ج) واریانس مقادیر شبیه سازی شده توسط الگوریتم متوالی مستقیم بهبودیافته به ترتیب در منطقه ۱، ۲ و ۳. دایره های تو خالی محل دو چاه را نشان می دهند. ۶۳.....
- شکل ۴-۱- فلوجارت و آرون سازی تصادفی لرزه ای کلی. ۶۸.....
- شکل ۴-۲- الف) نمای سه بعدی داده های چاه در شبکه و آرون سازی، ب) موقعیت چاه ها به صورت دوبعدی ۶۹.....
- شکل ۴-۳- موجک لرزه ای داده های مصنوعی. ۷۰.....
- شکل ۴-۴- مدل سازی واریوگرام ها با استفاده از داده های مقاومت صوتی چاه ها، الف) در راستای قائم و ب) در راستای افقی ۷۰.....
- شکل ۴-۵- ضریب همبستگی بین رد لرزه های مصنوعی و واقعی (ثبت شده) که به صورت قطعه ای محاسبه شده اند. الف) تکرار اول، ب) تکرار سوم و پ) تکرار ششم ۷۱.....
- شکل ۴-۶- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده های لرزه ای مصنوعی (و آرون شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده مصنوعی بدون نوفه در تکرار های مختلف. ۷۲.....
- شکل ۴-۷- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه. الف) داده های چاه ها و ب) مدل و آرون شده بر اساس و آرون سازی لرزه ای پایا. ۷۳.....
- شکل ۴-۸- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی و آرون شده مربوط به داده های مصنوعی بدون نوفه. ۷۴.....
- شکل ۴-۹- الف) یک مقطع قائم از داده های لرزه ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده های لرزه ای مصنوعی (و آرون شده) مربوط به داده های مصنوعی بدون نوفه با استفاده از و آرون سازی لرزه ای پایا ۷۴.....
- شکل ۴-۱۰- مقاطع لرزه ای مربوط به داده لرزه ای الف) بدون نوفه و نوفه دار با نسبت های سیگنال به نوفه ب) ۱۶، پ) ۸، ت) ۴ و ث) ۲ دسی بل. ۷۶.....

- شکل ۴-۱۱- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل در الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای پایا. ۷۷.....
- شکل ۴-۱۲- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی و مقطع قائم متناظر وارون‌شده مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه (ب) ۱۶، (پ) ۸، (ت) ۴ و (ث) ۲ دسی‌بل. ۷۹.....
- شکل ۴-۱۳- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی و مقطع قائم متناظر از مکعب لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه (ب) ۱۶، (پ) ۸، (ت) ۴ و (ث) ۲ دسی‌بل. خطای وارون سازی در هر حالت ارائه شده است. ۸۰.....
- شکل ۴-۱۴- مقایسه نتایج وارون‌سازی داده‌های با و بدون نوفه در داده‌های واقعی موجود در محل چاه‌های آزمایشی، الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۸۱.....
- شکل ۴-۱۵- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم در الگوریتم وارون‌سازی پایا، الف) مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه و ب) داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. وجود نوفه باعث افزایش واریانس و در نتیجه افزایش عدم قطعیت در مورد مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده شده است. ۸۳.....
- شکل ۴-۱۶- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در دریای شمال. ۸۴.....
- شکل ۴-۱۷- نمای سه‌بعدی شبکه وارون‌سازی و موقعیت چاه‌ها مربوط به داده واقعی. ۸۵.....
- شکل ۴-۱۸- الف) موجک لرزه‌ای استخراج شده مربوط به داده واقعی و ب) طیف دامنه آن. ۸۵.....
- شکل ۴-۱۹- مدل‌سازی واریوگرام‌ها مربوط به داده‌های واقعی. الف) واریوگرام قائم با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه و ب) واریوگرام افقی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای. ۸۶.....
- شکل ۴-۲۰- روند همگرایی الگوریتم وارون‌سازی مربوط به داده واقعی. ۸۶.....
- شکل ۴-۲۱- هیستوگرام‌های مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. الف) داده‌های چاه و ب) داده‌های وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا. ۸۷.....
- شکل ۴-۲۲- مقطع قائم از مکعب مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا مربوط به داده‌های واقعی. ۸۸.....
- شکل ۴-۲۳- الف) یک مقطع قائم از داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع قائم متناظر از داده لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا) مربوط به داده واقعی. ۸۹.....
- شکل ۴-۲۴- مقایسه نتایج وارون‌سازی پایا با داده‌های واقعی مربوط به چاه آزمایشی. ۹۰.....
- شکل ۴-۲۵- مقطع قائم از مکعب واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی پایا در تکرار نهایی در مورد داده‌های واقعی. ۹۱.....
- شکل ۵-۱- فلوچارت روش ارائه شده برای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا. ۹۶.....
- شکل ۵-۲- منطقه‌بندی داده‌های مصنوعی برای بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی ناپایا. ۹۷.....
- شکل ۵-۳- مدل‌سازی واریوگرام داده‌های مصنوعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) واریوگرام حاصل در راستای افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) واریوگرام حاصل در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ۹۸.....

- شکل ۴-۵- نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا به صورت ضریب همبستگی بین ردلرزه‌های مصنوعی و واقعی (ثبت شده) که به صورت قطعه‌ای محاسبه شده‌اند. الف) تکرار اول، ب) تکرار سوم و پ) تکرار ششم ۹۸
- شکل ۵-۵- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های واقعی در تکرارهای مختلف مربوط به وارون‌سازی پایا. ۹۹
- شکل ۵-۶- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) مدل وارون‌شده بر اساس وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۰۱
- شکل ۵-۷- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۰۱
- شکل ۵-۸- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌ها چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ۱۰۲
- شکل ۵-۹- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۰۳
- شکل ۵-۱۰- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل در الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۰۴
- شکل ۵-۱۱- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی و مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه ب) ۱۶، پ) ۸، ت) ۴ و ث) ۲ دسی‌بل. ۱۰۷
- شکل ۵-۱۲- الف) یک مقطع قائم از داده لرزه‌ای واقعی و مقطع قائم متناظر از مکعب لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا) مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه ب) ۱۶ دسی‌بل، پ) ۸ دسی‌بل، ت) ۴ دسی‌بل و ث) ۲ دسی‌بل. ۱۰۸
- شکل ۵-۱۳- مقایسه نتایج وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای با و بدون نوفه با داده‌های واقعی موجود در محل چاه‌های آزمایشی الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۱۰۹
- شکل ۵-۱۴- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به وارون‌سازی ناپایا، الف) مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه و ب) داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵- منطقه‌بندی داده‌های واقعی با استفاده از افق‌های تفسیر شده لرزه‌ای برای بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی ناپایا. ۱۱۱
- شکل ۵-۱۶- مدل‌سازی واریوگرام‌های مربوط به هر منطقه مربوط به داده واقعی. الف، ب، پ و ت) واریوگرام‌های افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو، سه و چهار. ث، ج، چ و ه) واریوگرام‌های قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو، سه و چهار. ۱۱۳
- شکل ۵-۱۷- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های واقعی در تکرارهای مختلف مربوط به وارون‌سازی ناپایا. ۱۱۴

- شکل ۵-۱۸- هیستوگرام‌های مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. الف) داده‌های چاه و ب) داده‌های وارون‌شده
توسط وارون‌سازی ناپایا. ۱۱۴
- شکل ۵-۱۹- نتایج حاصل از وارون‌سازی ناپایا داده‌های واقعی به صورت هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی. الف، ب، پ و ت) هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو، سه و چهار. ث، ج، چ و ه) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو، سه و چهار. ۱۱۵
- شکل ۵-۲۰- مقطع قائم از مکعب مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا) مربوط به داده واقعی. ۱۱۸
- شکل ۵-۲۲- مقایسه نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا با داده‌های واقعی چاه آزمایشی. ۱۱۹
- شکل ۵-۲۳- مقطع قائم از مکعب واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی ناپایا در تکرار نهایی در مورد داده واقعی. ۱۱۹
- شکل ۶-۱- الف) مقطع مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و پ) مقطع مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۲۴
- شکل ۶-۲- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده‌های واقعی چاه‌ها، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۲۴
- شکل ۶-۳- الف) مقطع لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) بدون نوفه، ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی ناپایا. ۱۲۵
- شکل ۶-۴- مقایسه آزمون چاه‌های آزمایشی در مورد نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده مصنوعی بدون نوفه. الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۱۲۶
- شکل ۶-۵- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف) وارون‌سازی پایا و ب) وارون‌سازی ناپایا. ۱۲۸
- شکل ۶-۶- الف) مقطع مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع مقاومت صوتی مربوط به وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۳۰
- شکل ۶-۷- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده‌های واقعی چاه‌ها، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۳۱
- شکل ۶-۸- الف) مقطع لرزه‌ای واقعی با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل، ب) مقطع لرزه‌ای مصنوعی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی ناپایا. ۱۳۲
- شکل ۶-۹- مقایسه آزمون چاه‌های آزمایشی در مورد نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۱۳۴
- شکل ۶-۱۰- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف) وارون‌سازی پایا و ب) وارون‌سازی ناپایا. ۱۳۵

- شکل ۶-۱۱- الف) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و ب) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی. ۱۳۸.....
- شکل ۶-۱۲- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده‌های مقاومت صوتی چاه، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های واقعی. ۱۳۹.....
- شکل ۶-۱۳- الف) مقطع لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۴۰.....
- شکل ۶-۱۴- مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های واقعی در محل چاه آزمایشی. ۱۴۱.....
- شکل ۶-۱۵- الف) مقطع واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی پایا در تکرار نهایی و ب) مقطع واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی ناپایا در تکرار نهایی. ۱۴۳.....
- شکل ۷-۱- فلوچارت الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات و وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۵۰.....
- شکل ۷-۲- نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارون‌سازی ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۵۲.....
- شکل ۷-۳- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم مقاومت صوتی حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در حین وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۵۴.....
- شکل ۷-۴- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) پاسخ مدل وارون بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۵۴.....
- شکل ۷-۵- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌های چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ۱۵۵.....
- شکل ۷-۶- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه، ب) مقطع حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا که در آن پارامترهای واریوگرام بهینه شده‌اند. ۱۵۶.....
- شکل ۷-۷- آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی در محل چاه‌های آزمایشی الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۱۵۷.....
- شکل ۷-۸- نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارون‌سازی ناپایا داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۵۸.....
- شکل ۷-۹- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی وارون‌شده با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۶۰.....
- شکل ۷-۱۰- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) پاسخ مدل وارون بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۶۱.....
- شکل ۷-۱۱- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌های چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ۱۶۱.....

- شکل ۷-۱۲- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی بل با استفاده از بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۶۲
- شکل ۷-۱۳- آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام به کمک داده‌های مقاومت صوتی در محل چاه‌های آزمایشی، الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. ۱۶۳
- شکل ۷-۱۴- نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارون‌سازی ناپایا داده‌های واقعی. ۱۶۵
- شکل ۷-۱۵- مقطع قائم گذرنده از چاه W1 (شکل ۴-۱۷) از مدل مقاومت صوتی وارون شده با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۶۸
- شکل ۷-۱۶- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. الف) داده چاه و ب) مدل وارون شده بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۶۸
- شکل ۷-۱۷- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به بکارگیری بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های واقعی. الف، ب، پ و ت) هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه به ترتیب مربوط به مناطق یک تا چهار. ث، ج، چ و ه) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون شده به ترتیب مربوط به مناطق یک تا چهار. ۱۶۹
- شکل ۷-۱۸- الف) یک مقطع قائم گذرنده از چاه W1 از داده‌های لرزه‌ای واقعی، ب) مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای مدل شده با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۷۰
- شکل ۷-۱۹- داده‌های چاه آزمایشی جهت آزمون نتایج حاصل از به نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی. ۱۷۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳ - منطقه‌بندی داده مصنوعی. ۴۸.....
- جدول ۲-۳ - ضریب همبستگی بین مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه و نتایج شبیه‌سازی. ۵۲.....
- جدول ۳-۳ - میانگین واریانس سلول‌های شبیه‌سازی شده در دو روش رایج و بهبودیافته به تفکیک منطقه (داده مصنوعی). ۵۳.....
- جدول ۴-۳ - مقایسه واریانس داده‌های مقاومت صوتی کل چاه با داده‌های بعد از منطقه‌بندی (داده مصنوعی). ۵۳.....
- جدول ۵-۳ - منطقه‌بندی داده واقعی. Z نشان‌دهنده شماره سلول در جهت قائم (عمق) است. ۵۷.....
- جدول ۶-۳ - میانگین واریانس سلول‌های شبیه‌سازی شده در دو روش رایج و بهبودیافته به تفکیک منطقه (داده واقعی) ۶۲.....
- جدول ۷-۳ - مقایسه واریانس داده‌های مقاومت صوتی کل چاه با داده‌های بعد از منطقه‌بندی (داده واقعی). ۶۲.....
- جدول ۱-۴ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده از وارون‌سازی پایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۷۲.....
- جدول ۲-۴ - ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی در حالت‌های مختلف داده با و بدون نوفه وارون‌سازی لرزه‌ای پایا. ۷۷.....
- جدول ۳-۴ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده مصنوعی با و بدون نوفه. ۷۷.....
- جدول ۴-۴ - ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۸۱.....
- جدول ۵-۴ - درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۸۲.....
- جدول ۶-۴ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا مربوط به داده واقعی. ۸۷.....
- جدول ۱-۵ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده از وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۹۹.....
- جدول ۲-۵ - ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی در حالت‌های مختلف داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه مربوط به وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا. ۱۰۴.....
- جدول ۳-۵ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده مصنوعی با و بدون نوفه. ۱۰۵.....
- جدول ۴-۵ - خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای وارون‌شده و واقعی در حالت‌های مختلف نسبت سیگنال به نوفه داده‌های لرزه‌ای مصنوعی توسط وارون‌سازی ناپایا. ۱۰۶.....
- جدول ۵-۵ - ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۰۹.....

- جدول ۵-۶- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۱۰
- جدول ۵-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۱۴
- جدول ۶-۱- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۲۳
- جدول ۶-۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا. ۱۲۳
- جدول ۶-۳- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۲۷
- جدول ۶-۴- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۲۷
- جدول ۶-۵- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۲۸
- جدول ۶-۶- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۳۱
- جدول ۶-۷- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا. ۱۳۲
- جدول ۶-۸- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۳۴
- جدول ۶-۹- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۳۵
- جدول ۶-۱۰- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۳۵
- جدول ۶-۱۱- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۳۹
- جدول ۶-۱۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های واقعی. ۱۴۰
- جدول ۶-۱۳- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای واقعی. ۱۴۱
- جدول ۶-۱۴- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای واقعی. ۱۴۲
- جدول ۶-۱۵- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۴۳
- جدول ۷-۱- مدل‌های واریوگرام کروی برای مناطق یک، دو و سه در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۵۱

- جدول ۲-۷- بازه‌های جستجو در بهینه‌سازی برای مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک، دو و سه مربوط داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۵۱.....
- جدول ۳-۷- مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه برای مناطق یک، دو و سه. ۱۵۲.....
- جدول ۴-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی تصادفی ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه. ۱۵۳.....
- جدول ۵-۷- ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه. ۱۵۷.....
- جدول ۶-۷- مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل برای مناطق یک، دو و سه. ۱۵۹.....
- جدول ۷-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و با استفاده فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۵۹.....
- جدول ۸-۷- ضریب همبستگی و درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. ۱۶۳.....
- جدول ۹-۷- مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک تا چهار در مورد داده‌های واقعی. ۱۶۴.....
- جدول ۱۰-۷- بازه‌های جستجو در بهینه‌سازی برای مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک تا چهار مربوط به داده‌های واقعی. ۱۶۵.....
- جدول ۱۱-۷- مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده‌های واقعی برای مناطق یک، دو، سه و چهار. ۱۶۶.....
- جدول ۱۲-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده از فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی. ۱۶۶.....
- جدول ۱۳-۷- ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی. ۱۷۲.....

فصل اول

کلیات

۱-۱- 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^۱ 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 زمین‌آماري بر پایه واریوگرام است. مفهوم واریوگرام در فصل سوم با جزئیات بیشتری شرح داده خواهد شد. مدل‌سازی بر پایه واریوگرام به دو دسته زمین‌آمار قطعی^۲ و زمین‌آمار تصادفی^۳ تقسیم می‌شود. دسته اول شامل انواع روش‌های کریجینگ^۴ است. کریجینگ تنها یک مدل خروجی تولید می‌کند و از این رو، قطعی نامیده می‌شود. زمین‌آمار تصادفی شامل همه روش‌های توسعه یافته حول مفهوم شبیه‌سازی شرطی^۵ است. شبیه‌سازی شرطی از این جهت تصادفی است که همانند شبیه‌سازی مونت کارلو^۶، گروهی از تحقق‌های^۷ (یا همان خروجی‌های) مدل‌های یک، دو یا سه‌بعدی که همگی سازگار با یک مدل اولیه^۸ و داده‌های موجود هستند، را تولید می‌کند [Dubrule 2003]. مدل‌سازی در روش‌های مرسوم بر مبنای اطلاعاتی است که از چاه‌های محدود بدست می‌آید ولی امکان مشروط کردن شرایط مدل‌سازی به یک متغیر دوم که توسط متخصص یا مفسر تعریف می‌شود، وجود دارد. این متغیر دوم می‌تواند یک مدل زمین‌شناسی از مخزن یا داده لرزه‌ای باشد. داده لرزه‌ای با توجه به گسترش فضایی مناسب و در دسترس بودن آن از دیر باز مورد توجه متخصصان مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی مخازن نفتی بوده است اما کاربرد زمین‌آمار و مدل‌سازی بر پایه واریوگرام در مدل‌سازی مخزن مدیون کارهای ارزشمند

¹ Acoustic impedance

² Deterministic Geostatistics

³ Stochastic Geostatistics

⁴ Kriging توضیح: با توجه به تجربه نگارنده از کنفرانس‌های بین‌المللی اخیر و همین‌طور بعضی از کتاب‌های جدید ترجمه شده، در این رساله، واژه کریجینگ به کریجینگ ترجیح داده شده است.

⁵ Conditional simulation

⁶ Monte Carlo simulation

⁷ Realization

⁸ Prior model

ماترون^۱ و همکاران او در مرکز زمین‌آمار دانشگاه پاریس^۲ در دهه ۱۹۶۰ میلادی است [Matheron 1962]. بعدها تئوری زمین‌آمار در کتاب‌های مختلفی آورده شد [Chiles and Delfiner 2012, Deutsch 2002, Hohn 1999, Isaaks and Srivastava 1989, Lantuejoul 2002]. در ادامه کارهای ماترون، کاربرد زمین‌آمار به حوزه‌های مختلفی وارد شد. نخستین ورود زمین‌آمار به علم ژئوفیزیک مربوط به کار هاس (۱۹۷۶) است. هاس در این مقاله، روش کریگینگ را برای تخمین و ترازبندی به منظور تهیه نقشه‌های مختلف مانند نقشه‌های زمانی و سرعت مربوط به داده‌های لرزه‌ای، استفاده کرد [Haas and Viallix 1976]. در این دوره نرم‌افزارهای تجاری تهیه نقشه‌های دوبعدی توسعه یافته‌اند که در میان آنها مقاله مربوط به توانایی کریگینگ توامان^۳ در تهیه نقشه تخلخل با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری و داده‌های چاه خودنمایی می‌کند [Doyen 1988].

از سالهای میانی دهه ۱۹۸۰ تا سالهای میانی دهه ۱۹۹۰ مدل‌سازی تصادفی سه‌بعدی مخزن بر پایه شبیه‌سازی تا حد زیادی توسعه یافت. این رخدادهای نتیجه پیوستن پروفیسور ژورنل^۴ به دانشگاه استنفورد بوده است. با توسعه الگوریتم‌های متوالی^۵، 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 [Deutsch and Journel 1992]. در این کتابخانه، الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی^۶ و شبیه‌سازی شاخص متوالی^۷ ارائه شد. شبیه‌سازی متوالی گوسی برای متغیرهای پیوسته و شبیه‌سازی شاخص متوالی برای متغیرهای گسسته به کار می‌رود. در پی آن، مهندسان مخزن و تولید، این روش‌ها را به عنوان یکی از مهمترین روش‌های مدل‌سازی مخزن پذیرفتند [Dubrule 1998]. در همین راستا نرم‌افزارهای تجاری هم به سرعت توسعه یافتند اما در سطح تولید مدل‌های

¹ Matheron

² Centre de Geostatistique de l'Ecole des Mines de Paris

³ Cokriging

⁴ Journel

⁵ Sequential algorithms

⁶ Sequential Gaussian Simulation (SGS)

⁷ Sequential Indicator Simulation

ناهمگنی در چارچوب‌های نسبتاً ساده چینه‌ای محدود ماندند [Dubrule 2003]. رسیدن مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن به میانه دهه ۱۹۹۰ با توسعه نرم‌افزارهای تجاری جدید پیوند خورد که در آن کریگینگ توامان، به راهبردی ارزشمند جهت ترکیب داده‌های لرزه‌ای و مخزنی تبدیل شد [Bortoli et al. 1992, Doyen et al. 1994, Xu et al. 1993]. در آن زمان ارتباط تنگاتنگی میان روش‌های زمین‌آماري و روش‌هایی که پیشتر توسط ژئوفیزیکدان‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت، به وجود آمد [Dubrule 2003].

روش‌های مختلف مدل‌سازی درجه متفاوتی از جزئیات را در مدل نهایی مخزن ارائه می‌کنند. اما این حقیقت را باید در نظر داشت که همیشه میزان قابل توجهی از عدم قطعیت وجود دارد. این عدم قطعیت مربوط به نبود دانش کافی در مورد فرایندهای فیزیکی و پیچیدگی‌های طبیعت است. به علاوه، توزیع این عدم قطعیت در کل مخزن یکسان نیست. در مناطقی که از محل چاه‌ها دورتر است، داده شرطی^۱ کمی وجود دارد و در نتیجه عدم قطعیت بیشتر است [Caers 2011]. کاهش این عدم قطعیت دارای اهمیت خاصی است و باعث می‌شود هزینه‌های تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به حداقل برسد [Caers 2011, Doyen 2007]. توانایی دیگر شبیه‌سازی که به سرعت آشکار شد، کمی‌سازی^۲ عدم قطعیت بود که کاربردهای فراوانی دارد. اولین کارهای انجام شده در این زمینه نشان داد که ترکیب عدم قطعیت‌های متناظر با مدل‌سازی دویبعدی هندسی ساختار مخزن با عدم قطعیت‌های متناظر با مدل‌سازی سه‌بعدی امکان‌پذیر است [Lia et al. 1997].

بعدها، الگوریتم‌های جدیدی به مجموعه الگوریتم‌های شبیه‌سازی اضافه شد که بهترین آنها الگوریتم شبیه‌سازی شاخص متوالی مستقیم^۳ [Caers 2000]، شبیه‌سازی متوالی شاخص بهبودیافته [Soares 1998]، شبیه‌سازی متوالی مستقیم^۴ و شبیه‌سازی توامان متوالی مستقیم^۵ [Soares 2001, Horta 2001] است.

¹ Conditioning data

² Quantification

³ Direct sequential indicator simulation

⁴ Direct sequential simulation (DSS)

⁵ Direct sequential Cosimulation

land Soares 2010] است. اهمیت کار سوآرس (۲۰۰۱) در گسترش روش جدیدی برای شبیه‌سازی بود که برای شبیه‌سازی داده‌هایی که دارای توزیع غیرنرمال است، قابل استفاده است.

در سال‌های اخیر و با رشد قابلیت‌های سخت افزاری، استفاده از روش‌های زمین‌آمار تصادفی در وارون‌سازی لرزه‌ای منجر به پیدایش گونه جدیدی از روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای با نام وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای شد. بنابراین همانند روش‌های شبیه‌سازی، وارون‌سازی لرزه‌ای نیز به دو دسته قطعی و تصادفی تقسیم‌بندی می‌شود. در روش‌های وارون‌سازی قطعی که دارای سابقه قدیمی‌تری هستند، یک تخمین محلی هموار^۱ از خواص زیرسطحی به دست می‌آید که ممکن است با واقعیت مطابقت نداشته باشد [Bosch et al. 2010]. این هموارشدگی معمولاً باعث می‌شود نتایج وارون‌سازی قطعی برای مقیدسازی مدل‌های مخزن به منظور محاسبات حجمی^۲، تخمین اتصال بین‌دانه‌ای^۳ و شبیه‌سازی جریان سیال^۴ مناسب نباشد [Francis 2006a]. از طرف دیگر، تحلیل عدم قطعیت در روش‌های قطعی، ضعیف و غیردقیق است [Bosch et al. 2010]. وارون‌سازی قطعی داده‌های لرزه‌ای، به طور خاص، دارای محدودیت دیگری نیز هست که ناشی از پهنای باند محدود داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. این محدودیت مربوط به تخمین سری بازتاب به صورت پراکنده^۵ است که منجر به تولید یک پروفایل متوسط مقاومت صوتی می‌شود. به عبارت دیگر، در همه روش‌های قطعی، ما قادر نخواهیم بود فرکانس‌هایی را تخمین بزنیم یا شبیه‌سازی کنیم که در داده لرزه‌ای وجود ندارد [Francis 2006a]. نتایج این روش‌ها همچنین به مقادیر اولیه وابسته هستند [Chen et al. 2012]. در مقابل این محدودیت‌ها، روش‌های وارون‌سازی قطعی مزایایی نیز دارند. این روش‌ها عموماً از نظر محاسباتی سبک‌تر و نرم‌افزارهای آنها در دسترس‌تر هستند. در نتیجه برای انجام پروژه‌ها در وقت و هزینه

¹ Local smooth estimate

² Volumetric calculations

³ Connectivity estimation

⁴ Fluid flow simulation

⁵ Sparse reflectivity series

صرفه‌جویی می‌شود [Bosch et al. 2010, Sams and Saussus 2008]. از طرفی حجم محاسباتی پایین‌تر باعث شده است، روش‌های قطعی پیشینه قدیمی‌تر و توسعه بیشتری داشته باشند.

با رشد قدرت محاسباتی سخت‌افزاری، روش‌های تصادفی در سالهای اخیر گسترش یافته‌اند [Bosch et al. 2010]. نتایج این روش‌ها مستقل از مقادیر اولیه بوده و از این حیث دارای برتری نسبت به روش‌های قطعی هستند [Chen et al. 2012]. از دیگر برتری‌های روش‌های تصادفی، امکان بررسی فضایی عدم قطعیت است. این ویژگی از آنجا ناشی می‌شود که این وارون‌سازی، خروجی‌های متعدد، با احتمال وقوع یکسان، ارائه می‌دهد. در نتیجه در هر موقعیت فضایی امکان بررسی‌های آماری عدم قطعیت فراهم می‌آید [Francis 2006a]. این ویژگی از مهمترین برتری‌های روش‌های تصادفی نسبت به روش‌های قطعی است. از طرف دیگر، در وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای امکان شبیه‌سازی فرکانس‌های پایین‌تر یا بالاتر از فرکانس‌های موجود در داده لرزه‌ای وجود دارد. بنابراین اطلاعات بیشتری، نسبت به روش‌های قطعی، استخراج می‌شود. این پهنای باند گسترده‌تر، امکان تغییرات محلی کوچکتر را در نتایج می‌دهد و مشکل هموارسازی روش‌های قطعی را برطرف می‌کند. اما روش‌های تصادفی معایبی نیز دارد. مهمترین آنها حجم محاسباتی بالا و زمان‌بر بودن آن است. از طرف دیگر، چون این روش‌ها در دو دهه اخیر توسعه یافته‌اند، پیشینه قدیمی ندارند و مطالعات تکمیلی کمتری تاکنون صورت پذیرفته است. بنابراین این رساله، در حوزه وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای تعریف شده است.

پیچیدگی طبیعت بر هیچ کس پوشیده نیست. مخازن نفتی نیز از این قاعده مستثنی نیستند. بسیاری از روش‌های مختلف مدل‌سازی مخزن سعی در یافتن اطلاعات بیشتر از این پدیده پیچیده دارند. در همه این روش‌ها برای فائق آمدن به این شرایط پیچیده، ساده‌سازی و فرضیاتی صورت می‌گیرد. بدون این فرضیات، حل مسائل مربوط به مدل‌سازی مقدور نیست. یکی از این فرضیات همبستگی فضایی داده‌هاست که در فرایند وارون‌سازی تصادفی، به عنوان پارامتر ورودی، مورد نیاز است. پارامتر

واریوگرام مسؤول معرفی همبستگی فضایی داده‌ها به الگوریتم‌های شبیه‌سازی است. این پارامتر نقش مهمی در خروجی شبیه‌سازی دارد زیرا ساختار پیوستگی فضایی را به الگوریتم شبیه‌سازی القاء می‌کند. این ساختار پیوستگی فضایی در مراحل بعدی، مدل وارون‌شده مخزنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در کارهایی که تاکنون توسط محققان متعدد انجام شده برای معرفی ساختار پیوستگی فضایی به دو صورت عمل شده است. در اکثر مطالعات، پارامتر واریوگرام به صورت کلی^۱ به الگوریتم شبیه‌سازی معرفی شده است بدین معنی که برای کل شبیه‌سازی در کل مخزن یک سری پارامتر واریوگرام به الگوریتم ارائه شده است [Bosch et al. 2009, Dubrule et al. 1998, Grijalba-Cuenca et al. 2000, Haas and Dubrule 1994, Kane et al. 1999, Rowbotham et al. 1998, Sams and Saussus 2011, Soares et al. 2007]. این امر حجم محاسبات را به مقدار قابل توجهی پایین می‌آورد. اما باید توجه داشت که الگوهای فضایی مخازن و نحوه همبستگی داده‌های برداشت شده در آن، می‌تواند خیلی پیچیده باشد. این امر به دلیل ناهمگن (هتروژن) بودن مخزن است. از طرفی کمبود اطلاعات و عدم یکتایی نتیجه وارون‌سازی بر پیچیدگی موضوع می‌افزاید. لذا بهتر است برای زون‌های مختلف، پارامترهای واریوگرام مختلف و متناسب با آن زون، جهت انجام عمل وارون‌سازی به الگوریتم ارائه شود. در بعضی از نرم‌افزارهای تجاری این قابلیت وجود دارد که پارامترهای مختلف واریوگرام برای زون‌های مختلف وارد الگوریتم وارون‌سازی شود. الگوریتم شبیه‌سازی در کلیه این نرم‌افزارها، روش شبیه‌سازی متوالی گوسی [Deutsch and Journel 1992] است. در مطالعاتی که بر اساس این نرم‌افزارها انجام گرفته مانند عباسی و ریاحی (۱۳۹۲)، هیچ مقایسه‌ای بین وارد کردن پارامترهای واریوگرام به صورت کلی (الگوی فضایی پایا^۲) و محلی (الگوی فضایی ناپایا^۳) صورت نگرفته است. ضمن اینکه روش شبیه‌سازی گوسی دارای پیش فرض توزیع گوسی برای داده ورودی است و از

¹ Global

² Stationary spatial patterns

³ Non-stationary spatial patterns

تبدیل گوسی داده‌های ورودی قبل از شروع فرایند شبیه‌سازی استفاده می‌کند که یکی از محدودیتهای این روش است. اما در روش سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) از شبیه‌سازی متوالی مستقیم [Soares 2001] استفاده شده است. عمل شبیه‌سازی در شبیه‌سازی متوالی مستقیم، مستقیماً بر روی داده ورودی انجام می‌شود و نیازی به تبدیل داده ورودی به داده با توزیع گوسی نیست [Soares et al. 2007].

۱-۲- تعریف مسأله و بیان سوال‌های اساسی پژوهش

همان‌طور که قبلاً بیان شد، وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای زمین‌آماری از یک الگوریتم شبیه‌سازی متوالی بهره می‌گیرد که می‌تواند یکی از الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی گوسی یا شبیه‌سازی متوالی مستقیم باشد. شبیه‌سازی متوالی مستقیم داراری این برتری است که در آن از تبدیل داده اولیه به گوسی استفاده نمی‌شود و لذا عمل شبیه‌سازی مستقیماً بر روی داده اولیه صورت می‌پذیرد. در این الگوریتم شبیه‌سازی که قبلاً توسعه داده شده است، پارامترهای واریوگرام از داده‌های ورودی به الگوریتم است که میزان پیوستگی فضایی محیط و به عبارت دیگر آنیزوتروپی آن را به الگوریتم وارد می‌کند. این آنیزوتروپی می‌تواند به صورت پایا یا ناپایا باشد. در حالت پایا، حجم محاسباتی بسیار پایین‌تر است اما پیچیدگی پیوستگی فضایی فقط در حالت ناپایا قابل ارائه به وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای است. بنابراین با مطالعه پیشینه موضوع، سؤالات زیر مطرح می‌شود:

۱- آیا امکان ورود یک الگوی ناپایا برای پارامترهای واریوگرام در فرایند شبیه‌سازی متوالی

مستقیم و سپس در وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای وجود دارد؟

۲- آیا ورود یک الگو ناپایا خواهد توانست نتایج بهتری در مکعب مقاومت صوتی تولید شده

توسط شبیه‌سازی متوالی مستقیم و به دنبال آن، مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی ارائه دهد؟

۳- آیا امکان بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام محلی با یک الگوریتم بهینه‌سازی کارآمد مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ وجود دارد؟

۳-۱- ضرورت انجام پژوهش و بیان فرضیه‌های آن

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی جدیدتر از روش‌های قطعی هستند و قابلیت تحلیل عدم قطعیت و بررسی تغییرات کوچک مقیاس را دارند. لذا این رساله، در راستای یک روش وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی انجام شده است. وارون‌سازی تصادفی پایا که توسط سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شد، از شبیه‌سازی متوالی مستقیم به صورت کلی و پایا بهره جسته است. کار ایشان در یک مقاله کنفرانسی ارائه شد ولی به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفت. در سال‌های اخیر، به دلیل حجم محاسباتی بالا، تحقیقات کمی بر روی وارون‌سازی پایا و ناپایا صورت گرفته است. در همه این تحقیقات از شبیه‌سازی متوالی گوسی استفاده شده که جزء قدیمی‌ترین الگوریتم‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری است. در مورد شبیه‌سازی متوالی مستقیم و مقایسه آن در وارون‌سازی پایا و ناپایا پژوهشی انجام نشده است. با توجه به مطالب ارائه شده، گسترش و ارائه الگوریتم‌های جدید که بتواند وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای را به صورت ناپایا انجام دهد، ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به موارد اشاره شده فرضیه‌های پژوهش به صورت زیر قابل بیان هستند:

۱- استفاده از پارامترهای واریوگرام محلی برای شبیه‌سازی متوالی مستقیم

۲- استفاده از توابع توزیع تجمعی محلی برای شبیه‌سازی متوالی مستقیم

۳- ارائه الگوریتم‌های وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا

¹ Particle swarm optimization

۴- استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا

۱-۴- اهداف و روش پژوهش

هدف از این رساله ارائه و گسترش الگوریتم‌های جدید برای وارون‌سازی تصادفی داده‌های لرزه‌ای برای تولید مدل الاستیکی (مقاومت صوتی) از الگوهای فضایی پایا و ناپایا با استفاده از شبیه‌سازی متوالی مستقیم (DSS) و شبیه‌سازی توامان و مقایسه آن‌هاست. همچنین هدف بعدی این رساله، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایاست. روش پژوهش، شامل استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم در قالب الگوریتم ژنتیک و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است.

۱-۵- ساختار رساله

این رساله دارای هشت فصل است. در فصل اول، ابتدا کلیاتی در مورد شبیه‌سازی زمین‌آماری و وارون‌سازی لرزه‌ای بیان شد و در نهایت ضرورت و اهداف این رساله تشریح گردید. فصل دوم به پیشینه پژوهش می‌پردازد. در فصل سوم، شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته معرفی شده و کاربرد آن بر روی داده مصنوعی و واقعی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. فصل چهارم شامل ارائه وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و کاربرد آن بر روی داده مصنوعی و واقعی است. در فصل پنجم، روش جدید وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا ارائه شده و نتایج بکارگیری آن بر روی داده مصنوعی و واقعی تشریح می‌شود. فصل ششم، به مقایسه نتایج حاصل از روش‌های وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا می‌پردازد. فصل هفتم شامل ارائه الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام برای انجام وارون‌سازی ناپایا است. فصل هشتم نیز به بیان نتایج این رساله و پیشنهادهای پژوهش‌های آینده اختصاص یافته است.

فصل دوم

مروری بر روش‌های وارون‌سازی لریه‌ای

۲-۱- مقدمه

وارون‌سازی لرزه‌ای به طور کلی فرایندی است که در آن داده‌های لرزه‌ای بازتابی به یکی از مشخصه‌های فیزیکی زیر سطحی مانند مقاومت صوتی، تخلخل، اشباع سیال، ... تبدیل می‌شوند. داده‌های لرزه‌ای بازتابی برای توصیف هندسی ساختارهای زیرسطحی و همچنین تخمین خواص مخزن مانند تخلخل، لیتولوژی و اشباع سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما تبدیل داده لرزه‌ای به خواص مخزن یک مسأله وارون با جواب غیر یکتاست. حتی برای داده‌های بدون نوفه، فرکانس محدود موج‌های لرزه‌ای دریافت شده، این جواب را غیر یکتا می‌کند. وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به خواص مخزن در عمل پیچیده‌تر است زیرا اولاً داده دارای نوفه است، ثانیاً برای یافتن جواب در زمان منطقی، آسان‌سازی‌های مدل‌سازی مستقیم مورد نیاز است و ثالثاً عدم قطعیت در چندین مسأله مانند تبدیل زمان به عمق، تخمین موجک و ارتباط بین داده‌های لرزه‌ای و خواص مخزن وجود دارد [Bosch et al. 2010]. این عدم قطعیت مربوط به نبود دانش کافی در مورد فرایندهای فیزیکی و پیچیدگی‌های طبیعت است. داده‌های لرزه‌ای بازتابی اطلاعات وسیعی از زمین‌شناسی کل مخزن در اختیار مهندسان قرار می‌دهد که در مقایسه با چاه‌ها، توزیع فضایی بسیار گسترده‌تری دارند. در مقابل این مزیت، داده‌های لرزه‌ای کمتر قابل اطمینان است چون اطلاعات زمین‌شناسی در آن به طور غیرمستقیم برداشت شده است و در نتیجه، رابطه این داده با خواص پتروفیزیکی، غیرخطی و دارای پیچیدگی‌های زیادی است. روش‌های مختلف وارون‌سازی لرزه‌ای از گذشته تا حال سعی در استخراج اطلاعات الاستیکی زیرسطحی و سپس تبدیل آن به خواص متعدد مخزن داشته‌اند. تئوری عمومی مسائل وارون در کتاب‌های زیادی آورده شده است [Menke 1984, Parker 1994, Sen and Stoffa 1995, Tarantola 1987, Oliver et al. 2008, Aster et al. 2013]. در ادامه این فصل، ابتدا روش‌شناسی وارون‌سازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس مهمترین روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای شرح داده خواهند شد.

۲-۲- روش‌شناسی وارون‌سازی لرزه‌ای

هنگامی که زمین به عنوان سیستم در فرایندهای پیش‌بینی قرار می‌گیرد، با فرض یک مدل تئوری می‌توان سیستم را به طور کلی^۱ توصیف نمود. فرایند پیش‌بینی یک پاسخ برای سیستم فیزیکی مورد مطالعه، عموماً با نام مدل‌سازی مستقیم^۲ شناخته می‌شود. مدل‌سازی مستقیم یک فرایند قطعی است که در آن کاربر تلاش می‌کند پارامترهایی را برای حل مسأله تعیین کند. منظور از فرایند قطعی این است که با ورودی‌های (پارامترهای) یکسان، سیستم (مدل زمین) پاسخ یکسانی را پیش‌بینی می‌کند. اما در مدل‌سازی وارون مانند وارون‌سازی لرزه‌ای، کاربر پاسخی از سیستم زمین را به صورت یک سری اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم در اختیار دارد و تلاش می‌کند پارامترهای سیستم را که باعث آن پاسخ شده است، را بدست آورد [Azevedo et al. 2014, Tarantola 2005].

با توجه به موارد فوق می‌توان گفت که هدف از حل مسائل وارون ژئوفیزیکی پی بردن به خواص زمین‌شناسی زیرسطحی است. این خواص همان پارامترهای مدل ($\mathbf{m} \in \mathbf{R}^n$) است که از یک سری مشاهدات یا اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی غیرمستقیم ($\mathbf{d}_{\text{obs}} \in \mathbf{R}^s$) قابل استنتاج است. البته مشاهدات معمولاً دارای مقداری خطا (e) از منابع مختلف است. داده مشاهده شده (\mathbf{d}_{obs}) و خواص زیرسطحی مورد نظر (\mathbf{m}) توسط یک مدل مستقیم (\mathbf{F}) باهم در ارتباط هستند. به طور کلی، یک مسأله وارون ژئوفیزیکی توسط رابطه زیر قابل توصیف است [Tarantola 2005].

$$\mathbf{d}_{\text{obs}} = \mathbf{F}(\mathbf{m}) + e \quad (1-2)$$

در مورد مسائل وارون‌سازی لرزه‌ای، (\mathbf{d}_{obs}) نشان‌دهنده داده لرزه‌ای ثبت شده است و \mathbf{F} معمولاً یک مدل هم‌میخت^۳ است. \mathbf{m} فضای پارامتری مدل است که مربوط به خواصی است که قرار است وارون

¹ Globally

² Forward modeling

³ Convolution

شود که می‌تواند مقاومت صوتی، چگالی، سرعت موج فشارشی و برشی یا غیره باشد. مدل مستقیم، F ، در معادله ۱-۲ به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$A = r * w \quad (2-2)$$

که در آن A دامنه لرزه‌ای و r ضرایب بازتاب زیرسطحی است که با موجک w هم‌امیخت شده است. این ضرایب بازتاب وابسته به خواص الاستیکی (سرعت موج فشارشی و برشی و چگالی) زمین‌شناسی زیرسطحی است.

مسائل وارون‌سازی لرزه‌ای، غیرخطی و بدحالت^۱ است که با توجه به محدودیت‌های ذاتی روش لرزه‌ای، دارای جواب یکتا نیستند. این محدودیت‌ها شامل پهنای باند و قدرت تفکیک محدود، نوفه، خطاهای اندازه‌گیری، تقریب‌های عددی و فرضیه‌های فیزیکی درباره مدل‌های مستقیم بکار برده شده هستند [Bosch et al. 2010, Tarantola 2005, Tompkins et al. 2011]. به همین دلیل، مدل‌های الاستیکی نهایی که در این روش‌ها به دست می‌آید، تنها یک مدل از چندین مدل امکان‌پذیر برای مدل زمینی است که با داده لرزه‌ای هم‌خوانی دارد. به عبارت دیگر، اگر داده لرزه‌ای ثبت شده (واقعی) و مصنوعی (بدست آمده از مدل وارون شده) دارای همبستگی پایینی باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط بین مدل‌های الاستیکی و مدل‌های وارون شده نیز کم است. عکس این مطلب صادق نیست. یعنی ممکن است مدل‌های زیرسطحی واقعی و وارون شده با یکدیگر همراه (سازگار) نشوند اما بتوان همبستگی خوبی بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و مصنوعی یافت. دلیل این پدیده، گرفتار شدن راه حل‌های وارون‌سازی در یک کمینه محلی بجای کمینه کلی است [Tarantola 2005]. در نتیجه، یادآوری این نکته مهم ضروری است که جدا از روش‌ها یا فرضیاتی که برای حل مسائل وارون‌سازی لرزه‌ای انتخاب می‌کنیم، همواره یک عدم قطعیت مرتبط با مدل‌های الاستیکی وارون شده وجود دارد.

¹ Ill-conditioned

بنابراین مهم است که این عدم قطعیت به طور پیوسته در کل فرایند وارون‌سازی تخمین زده شود [Bosch et al. 2010, Grana and Della Rossa 2010, Tompkins et al. 2011].

هر مسأله وارون را می‌توان به عنوان یک مسأله استنباط بیزین^۱ در نظر گرفت که در آن از بروزرسانی اطلاعات بر اساس مشاهدات قبلی استفاده می‌شود [Tarantola 1987, Tarantola 2005, Duijndam 1988a, Duijndam 1988b, Ulrych et al. 2001]. این موضوع را می‌توان با رابطه زیر نشان داد.

$$\sigma_{\text{post}}(\mathbf{m}) = c \rho_{\text{prior}}(\mathbf{m}) \rho_{\text{data}}(\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{g}(\mathbf{m})) \quad (2-3)$$

که در آن، $\sigma_{\text{post}}(\mathbf{m})$ چگالی احتمالاتی پسین^۲ و $\rho_{\text{prior}}(\mathbf{m})$ چگالی احتمالاتی پیشین^۳ است. مقدار $\rho_{\text{data}}(\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{g}(\mathbf{m}))$ تابع احتمال داده است که وابسته به مشاهدات \mathbf{d}_{obs} و عدم قطعیت مرتبط با آنهاست. $\mathbf{g}(\mathbf{m})$ یک اپراتور مدل‌سازی پیشرو^۴ است که فضای مدل را به فضای داده تبدیل می‌کند. \mathbf{m} مشخص‌کننده پارامترهای مدل زمین است. c یک مقدار ثابت است که نقش نرمال‌کننده دارد. اپراتور \mathbf{g} می‌تواند یک تابع تحلیل ساده، یک اپراتور ماتریسی و یا در حالت عمومی‌تر، یک الگوریتم محاسباتی بدون مشخصه تحلیلی باشد [Bosch et al. 2010]. دو روش مختلف برای حل معادله ۲-۳ وجود دارد. اول، جستجوی بیشینه چگالی احتمالاتی پسین و دوم، تولید نمونه‌هایی از چگالی احتمالاتی پسین. روش اول با عنوان روش‌های بهینه‌سازی خطا^۵ یا روش‌های قطعی^۶ و روش دوم با عنوان روش‌های نمونه‌برداری مونت کارلو^۷ یا روش‌های تصادفی^۸ مرسوم است [Bosch et al. 2010]. در ادامه به توضیح این روش‌ها می‌پردازیم.

¹ Bayesian inference

² Posterior probability density

³ Prior probability density

⁴ Forward modeling operator

⁵ Error optimization

⁶ Deterministic methods

⁷ Monte Carlo sampling methods

⁸ Stochastic methods

۲-۳- روش‌های وارون‌سازی قطعی

روش‌های وارون‌سازی قطعی از این رو قطعی نامیده می‌شوند که فقط یک جواب بهینه تولید می‌کنند. مهمترین و پرکاربردترین روش‌های قطعی وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای شامل روش بازگشتی^۱، خارهای پراکنده^۲، روش بر پایه مدل^۳ و وارون‌سازی رنگی^۴ است که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

۲-۳-۱- روش وارون‌سازی بازگشتی

این روش توسط لیندست^۵ (۱۹۷۶) ارائه و توسط اولدنبرگ^۶ و همکاران (۱۹۸۶) توسعه یافت. همان‌طور که می‌دانیم، سری بازتاب با رابطه زیر به تغییرات مقاومت صوتی مرتبط می‌شود.

$$r_i = \frac{\rho_{i+1}v_{i+1} - \rho_i v_i}{\rho_{i+1}v_{i+1} + \rho_i v_i} = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (۴-۲)$$

که در آن، r ضریب بازتاب، ρ چگالی، v سرعت موج فشارشی، Z مقاومت صوتی است و لایه n ام روی لایه $(i+1)$ ام قرار دارد. اگر سری بازتاب در دسترس باشد با استفاده از رابطه ۴-۲، رابطه وارون‌سازی بازگشتی به صورت رابطه ۵-۲ در می‌آید [Oldenburg et al. 1986, Russell 1988].

$$Z_{i+1} = Z_i \left[\frac{1+r_i}{1-r_i} \right] \quad (۵-۲)$$

این رابطه، رابطه بنیادی وارون‌سازی بازگشتی است. این رابطه نشان می‌دهد اگر مقاومت صوتی یک لایه مشخص و ضریب بازتاب در قسمت زیرین این لایه در دسترس باشد، امکان تخمین مقاومت صوتی لایه بعدی وجود دارد. بنابراین مقاومت صوتی لایه n ام به صورت زیر محاسبه می‌شود [Russell 1988].

¹ Recursive inversion method

² Sparse spike method

³ Model-based method

⁴ Colored inversion

⁵ Lindseth

⁶ Oldenburg

$$Z_n = Z_1 \prod_{i=1}^{n-1} \left[\frac{1+r_i}{1-r_i} \right] \quad (۶-۲)$$

بنابراین در این روش باید مقاومت صوتی لایه اول (Z_1) مشخص باشد. به علاوه، این روش دو مشکل دیگر دارد. اول اینکه با توجه به محدود بودن باند فرکانسی داده‌های لرزه‌ای (فرکانس ۱۰ تا ۷۰ هرتز) [Yilmaz 2001]، فرکانس‌های بالا و پایین در نتایج نهایی وارون‌سازی غایب هستند. زیرا در این روش موجک لرزه‌ای مستقیماً با سری بازتاب هم‌میخت می‌شود. دوم اینکه نوفه‌های تصادفی و همدوس^۱ موجود در ردلرزه باعث انحراف سری بازتاب تخمینی از سری بازتاب حقیقی خواهد شد [Russell 1988].

۲-۳-۲- روش وارون‌سازی خارهای پراکنده

روش وارون‌سازی خارهای پراکنده توسط محققان متعددی برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [Hendrick and Hearn 1993, Wang et al. 2016, Brown and Thorne 2013, Zhang and Castagna 2011, Lin and Herrmann 2013, Groenestijn and Verschuur 2015, Maurya and Singh 2009]. این روش بر اساس واهمامیخت احتمالی بیشینه^۲ [Chi et al. 1983, Kormylo and Mendel 1984] ابداع شده است. همپسون^۳ و راسل^۴ (۱۹۸۵) با ایجاد تغییراتی در واهمامیخت احتمالی بیشینه، امکان بکارگیری ساده‌تر این روش برای داده‌های لرزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند [Hampson and Russell 1985]. در مقاله ایشان بیان شد که امکان تعمیم این روش واهمامیخت به یک روش وارون‌سازی وجود دارد. همان‌طور که می‌دانید، مدل پایه برای یک ردلرزه^۵ به صورت زیر قابل بیان است.

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (۷-۲)$$

¹ Coherent

² Maximum likelihood deconvolution

³ Hampson

⁴ Russell

⁵ Trace

که در آن، $s(t)$ ردلرزه، $w(t)$ یک موجک لرزه‌ای^۱، $r(t)$ سری بازتاب زمین^۲ و $n(t)$ نوفه است. توجه شود که راه حل معادله فوق نامعین^۳ است، زیرا سه مجهول دارد. اما با استفاده از فرضیه‌هایی قابل حل می‌باشد. در واهمامیخت احتمالی بیشینه، با تعریف یک تابع هدف و کمینه کردن آن، سری بازتاب بهینه و همین‌طور تخمینی از موجک لرزه‌ای بدست می‌آید. این تابع هدف به صورت رابطه ۸-۲ تعریف می‌شود [Russell 1988].

$$J = \sum_{k=1}^L \frac{r^2(k)}{R^2} + \sum_{k=1}^L \frac{n^2(k)}{N^2} - 2m \ln(\lambda) - 2(L - m) \ln(l - \lambda) \quad (8-2)$$

که در آن، $r(k)$ ضرایب بازتاب در نمونه k ام، m تعداد بازتاب‌ها، L تعداد کل نمونه‌ها، N مجذور واریانس نوفه، n نوفه در نمونه k ام، λ احتمال اینکه نمونه موردنظر دارای بازتاب باشد و R مجذور واریانس خارهای بزرگ است. توالی بازتاب‌ها توسط پارامتر λ کنترل می‌شود که در واقع نسبت تعداد خارهای غیر صفر به تعداد کل نمونه‌های ردلرزه است که به طور معمول، یک عدد بسیار کوچک‌تر از یک است. در واقع با کمینه کردن این تابع، راه حل واهمامیخت به دنبال تعداد کمینه خارها در سری بازتاب و کمترین مقدار نوفه است. توجه شود که در اینجا هیچ فرضی برای موجک لرزه‌ای در نظر گرفته نشده است. لذا ابتدا یک مقدار اولیه برای موجک فرض می‌شود و یک سری بازتاب پراکنده تخمین زده شده و با بهبود موجک یک روند تکراری طی می‌شود تا یک مقدار کمینه موردنظر برای تابع هدف حاصل گردد. بین هر تکرار، یک حلقه تکرار دیگر برای تخمین بازتاب پراکنده انجام می‌شود. این روند به صورت اضافه کردن یک به یک ضرائب بازتاب به یک سری بازتاب است تا زمانی که یک سری پراکنده بهینه از ضرائب بازتاب پدید آید. بنابراین نتیجه الگوریتم واهمامیخت احتمالی بیشینه یک سری بازتاب بهینه است. حال می‌توان با یک مدل همامیخت، وارون‌سازی احتمالی بیشینه را انجام داد. این مدل همامیخت بین مقاومت صوتی و سری بازتاب به صورت رابطه ۹-۲ تعریف می‌شود.

¹ Seismic wavelet

² Earth reflectivity

³ indeterminate

$$\ln Z(i) = 2H(i) * r(i) + n(i) \quad (9-2)$$

که در آن، $Z(i)$ مقاومت صوتی، $r(i)$ سری بازتاب بدست آمده از الگوریتم واهمامیخت احتمالی بیشینه، $n(i)$ میزان خطا و $H(i)$ یک تابع به صورت زیر است.

$$H(i) = \begin{cases} 1 & i < 0 \\ 0 & i > 0 \end{cases} \quad (10-2)$$

حال دو سری زمانی در دست است. اول، یک ردلرزه، $T(i)$ و دوم لگاریتم مقاومت صوتی، $Z(i)$. با کمینه‌سازی تابع رابطه ۲-۸ و استفاده از مدل همامیخت (رابطه ۲-۹) به صورت همزمان، می‌توان ردلرزه‌ای را مدل کرد که منطبق بر یک مدل مقاومت صوتی نیز باشد. بدین ترتیب مدل وارون‌شده داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش خارهای پراکنده ایجاد می‌گردد. از نقطه نظر وارون‌سازی لرزه‌ای، روش خارهای پراکنده این مزیت را نسبت به روش‌های قدیمی واهمامیخت دارند که می‌توانند تخمینی با پهنای باند کامل از سری بازتاب را ارائه دهند [Russell 1988].

در روش خارهای پراکنده، اطلاعات مربوط به سری بازتاب مستقیماً از مقطع لرزه‌ای بدست می‌آید و برای وارون‌سازی استفاده می‌شود. این موضوع باعث تأثیر بسیار زیاد نوفه در بازیابی بازتابنده‌های ضعیف در نتیجه وارون‌سازی خواهد شد.

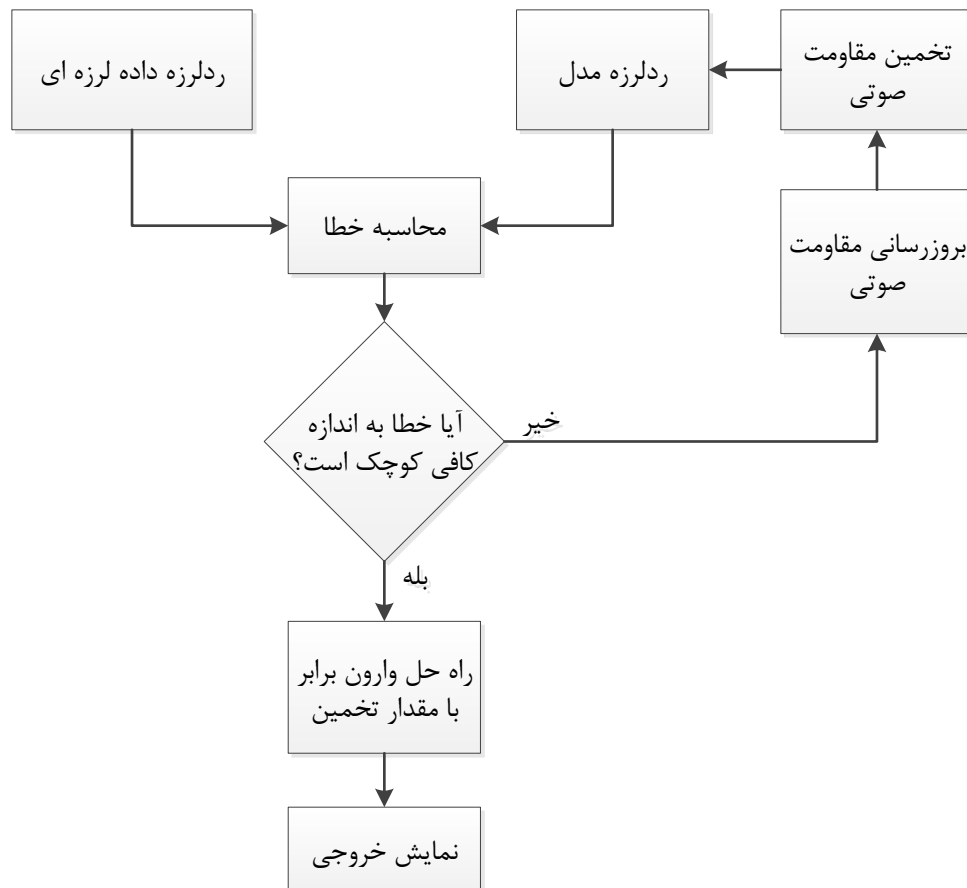
۲-۳-۳- روش بر پایه مدل

روش بر پایه مدل اولین بار توسط کوک^۱ و اشنایدرد^۲ (۱۹۸۳) معرفی شد. این روش توسط محققان زیادی برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است [Pindzhurova 2015, Ashtari and Arzani 2016, Mallick 1995, Francis et al. 2015, Grana and Mukerji 2015, Gang and Goultly 1997, Thornton and Sutton 1986, Hendrick and Hearn 1993]. در روش بر پایه مدل، ابتدا یک مدل زمین‌شناسی ساخته می‌شود و با داده لرزه‌ای مقایسه می‌شود. این مقایسه در یک روند

¹ Cooke

² Schneider

تکرار قرار می‌گیرد و با هر تکرار مدل اولیه بروزرسانی می‌شود. این بروزرسانی تا زمانی ادامه می‌یابد که بهترین تطابق بین مدل و داده لرزه‌ای ایجاد گردد. شکل ۱-۲ فلوچارت وارون‌سازی بر پایه مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- فلوچارت وارون‌سازی بر پایه مدل [با تغییرات Russell 1988].

برای توضیح روش بر پایه مدل با دو سوال اساسی روبرو هستیم. اول، چه رابطه ریاضی بین داده مدل و داده لرزه‌ای وجود دارد؟ دوم، عمل بروزرسانی چگونه انجام شود؟ برای پاسخ به این سؤالات دو روش وارون‌سازی خطی تعمیم‌یافته^۱ [Cooke and Schneider 1983] و مدل‌سازی لیتولوژیک لرزه‌ای^۲ [Gelfand and Lerner 1984] به کمک خواهند آمد [Russell 1988]. روش وارون‌سازی خطی تعمیم‌یافته روشی است که کمابیش در همه اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی برای تعیین وضعیت

¹ Generalized linear inversion (GLI)

² Seismic lithologic modeling (SLIM)

زمین‌شناسی کاربرد دارد. این روش بهترین مدل برازش شده به داده‌های ژئوفیزیکی را بر اساس کمینه مربعات خطا^۱ به دست می‌دهد. از نظر ریاضی، بردار مدل را می‌توان به صورت $\mathbf{M} = (m_1, m_2, \dots, m_k)^T$ و بردار داده‌ها را به صورت $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$ و رابطه این دو را به شکل تابع $t_i = F(m_1, m_2, \dots, m_k)$ ($i = 1, \dots, n$) در نظر گرفت. هرگاه این رابطه مشخص شود، هر سری از پارامترهای مدل ورودی می‌تواند یک خروجی تولید کند. روش وارون‌سازی خطی تعمیم‌یافته با کمینه‌سازی خطای بین پارامترهای مدل و داده‌ها، این رابطه را پیدا می‌کند. تابعی که باید کمینه شود، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$F(\mathbf{M}) = F(\mathbf{M}_0) + \frac{\partial F(\mathbf{M}_0)}{\partial \mathbf{M}} \Delta \mathbf{M} \quad (11-2)$$

که در آن، M_0 مدل اولیه، M مدل واقعی زمین، ΔM تغییر در پارامترهای مدل، $F(M)$ پاسخ مدل (مشاهدات)، $F(M_0)$ مقادیر محاسبه شده از مدل اولیه و $\frac{\partial F(M_0)}{\partial M}$ تغییر در مقادیر محاسبه (ژاکوبین مدل) شده است. توجه شود که خطای بین مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta F = F(\mathbf{M}) - F(\mathbf{M}_0) \quad (12-2)$$

بنابراین معادله ۲-۸ را می‌توان به صورت ماتریسی زیر نوشت.

$$\Delta F = A \Delta \mathbf{M} \quad (13-2)$$

که در آن، ماتریس A ماتریس مشتقات (ماتریس ژاکوبین) با n سطر و k ستون است.

از آنجا که معمولاً تعداد داده‌ها بیشتر از پارامترهاست (یعنی مقدار n از k بیشتر است)، ماتریس A یک ماتریس مربع نیست و در نتیجه معکوس ندارد. برای حل این مشکل، یک روش حداقل مربعات به صورت زیر انجام قابل انجام است [Lines and Treitel 1984].

¹ Least square error

$$\Delta M = (A^T A)^{-1} A^T \Delta F \quad (2-14)$$

اگر بروزرسانی مقاومت صوتی با روش شرح داده شده انجام شود، شکل ۲-۱ را می‌توان به صورت یک فلوجارت وارون‌سازی خطی تعمیم‌یافته در نظر گرفت. اما هنوز باید رابطه بین مدل و داده‌ها تعیین شود. این رابطه با استفاده از روش مدل‌سازی لیتولوژیک لرزه‌ای قابل انجام است [Gelfand and Larner 1984]. روش مذکور با استفاده از یک مدل اولیه، رابطه بین پارامترهای مدل و مشاهدات (داده‌ها) را فرض می‌کند. مدل اولیه معمولاً شامل لایه‌هایی با سرعت، چگالی و ضخامت متغیر در نقاط کنترلی متعدد است. سپس با استفاده از خطای حداقل مربعات، این مدل با مقطع لرزه‌ای مقایسه شده و در یک فرایند تکرار بروزرسانی می‌شود تا همگرایی حاصل گردد. در این روش، کاربر کنترل کاملی بر کلیه پارامترهای زمین‌شناسی و محدودکننده‌ها دارد و این اطلاعات را می‌تواند از هر منبعی دریافت کند. مزیت این روش نسبی به روش‌های پراکنده این است که نوفه‌ای در مقطع لرزه‌ای مدل‌شده وارد نمی‌شود. با توجه به اینکه در این روش، عمل وارون‌سازی مستقیماً روی داده لرزه‌ای ثبت شده انجام نمی‌شود امکان ارائه نتایج خارج از انتظار وجود دارد. به عبارت دیگر، ممکن است نتیجه وارون‌سازی، یک مدل با تطابق بسیار خوب با داده لرزه‌ای ثبت‌شده باشد اما این مدل با مدل واقعی زمین مغایرت داشته باشد. دلیل این پدیده این است که سری‌های مقاومت صوتی مختلف می‌تواند منجر به تولید سری‌های زمانی مشابه گردند. بنابراین در روش وارون‌سازی بر پایه مدل با نوعی عدم یکتایی روبرو هستیم [Russell 1988].

۲-۳-۴- روش وارون‌سازی رنگی

روش وارون‌سازی رنگی یک روش سریع برای وارون‌سازی لرزه‌ای است که اولین بار توسط لنکستر^۱ و وایتکام^۲ (۲۰۰۰) ارائه شد. این روش بعدها توسط بلاش‌فراسر^۳ و نیپ^۴ (۲۰۰۴)،

¹ Lancaster

² Whitecombe

³ Blache-Fraser

⁴ Neep

لائو^۱ و همکاران (۲۰۰۵) و نیپ (۲۰۰۷) برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای استفاده شد [Blache- Fraser and Neep 2004, Neep 2007, Lancaster and Whitcombe 2000, Lau et al]. این روش با محاسبه یک عملگر در حوزه فرکانس و تبدیل آن به حوزه زمان با استفاده از تبدیل معکوس فوریه امکان وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای را فراهم می‌سازد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که بیشتر سری‌های بازتاب زمین دارای طیف دامنه مشابه هستند. این طیف به صورت f^β است که f فرکانس و β یک مقدار ثابت مثبت است [Velzeboer 1981, Walden and Hosken 1985]. اگر داده‌های لرزه‌ای به درستی وارون شوند طیف دامنه آنها باید مشابه طیف دامنه نگارهای چاه باشند. در مورد طیف مقاومت صوتی مقدار ثابت مذکور، عددی منفی (مثلاً α) است [Lancaster and Whitcombe 2000]. مقدار α با استفاده از برازش یک منحنی بر نمودار مقاومت صوتی چاه به دست می‌آید. سپس، طیف دامنه عملگر وارون‌سازی با تصویر کردن طیف میانگین داده‌های لرزه‌ای به نمودار یک منحنی به شکل f^α به دست می‌آید. این عملگر با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به حوزه زمان برده می‌شود و با داده لرزه‌ای هم‌امیخت می‌گردد. نتیجه این هم‌امیخت یک مدل مقاومت صوتی است. با توجه به اینکه عملیات محاسباتی این روش تنها یک واهمامیخت است، این روش به عنوان سریع‌ترین روش وارون‌سازی لرزه‌ای شناخته می‌شود [Lancaster and Whitcombe 2000]. از معایب این روش، وابستگی شدید آن به نوفه لرزه‌ای است. زیرا نوفه می‌تواند طیف دامنه داده‌های لرزه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد و به طور مستقیم نتایج این وارون‌سازی را منحرف سازد.

۲-۴- روش‌های وارون‌سازی تصادفی

مدل‌های مقاومت صوتی وارون‌شده با استفاده از روش‌های وارون‌سازی قطعی دارای نمایش هموارشده‌ای از خواص زیرسطحی زمین هستند و تغییرپذیری فضایی بسیار پایین‌تری نسبت به زمین‌شناسی زیرسطحی واقعی دارند [Russell and Hampson 1991]. همچنین همه آنها دارای

¹ Lau

محدودیت در ارزیابی عدم قطعیت هستند [Francis 2006a, Francis 2006b, Azevedo et al. 2015]. در این روش‌ها، عدم قطعیت معمولاً با استفاده از روش حداقل مربعات ارزیابی می‌شود که یک روش خطی است. در نتیجه این روش‌ها برای مسائل وارون غیرخطی مناسب نیستند [Tarantola 2005, Tompkins et al. 2011].

اولین کاربرد روش‌های زمین‌آماری در صنعت نفت به استفاده از کریگینگ در رسم نقشه‌های عمقی افق‌ها، سرعت‌های لرزه‌ای، ضخامت لایه و خواص پتروفیزیکی بر می‌گردد [Haas and Viallix 1976]. با پیشرفت‌هایی که در سرعت محاسبات رخ داد، امکان به تصویر کشیدن نقشه‌های سه‌بعدی فراهم آمد. اما کارایی این روش‌ها برای تولید مدل‌های ناهمگن کافی نبود. دلیل اصلی این مشکل، مدل‌های به شدت هموارشده و بدون تغییرات کوچک مقیاس بود که با واقعیت زمین و مخزن فاصله زیادی داشت.

در روش‌های زمین‌آماری، راه حل مسأله وارون توسط یک تابع چگالی احتمالی در فضای پارامتری مدل تعیین می‌شود [Bosch et al. 2010]. این کار با نمونه‌برداری از فضای پارامتری مدل با روش مونت کارلو با استفاده از شبیه‌سازی متوالی زمین‌آماری^۱ و ترکیب آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلی^۲ انجام می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک [Mallick 1995, Mallick 1999, Boschetti et al. 1996] و ذوب بخشی^۳ [Soares et al. 2007, Ma 2002, Sen and Stoffa 1991] از جمله روش‌های استفاده شده در وارون‌سازی لرزه‌ای زمین‌آماری هستند. این روش‌ها در مقایسه با سایر روش‌های وارون دارای حجم محاسباتی بالاتری هستند [Bosch et al. 2010]. روش‌های وارون‌سازی تصادفی به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به شرح آنها پرداخته شده است.

¹ Geostatistical sequential simulation

² Global optimization algorithms

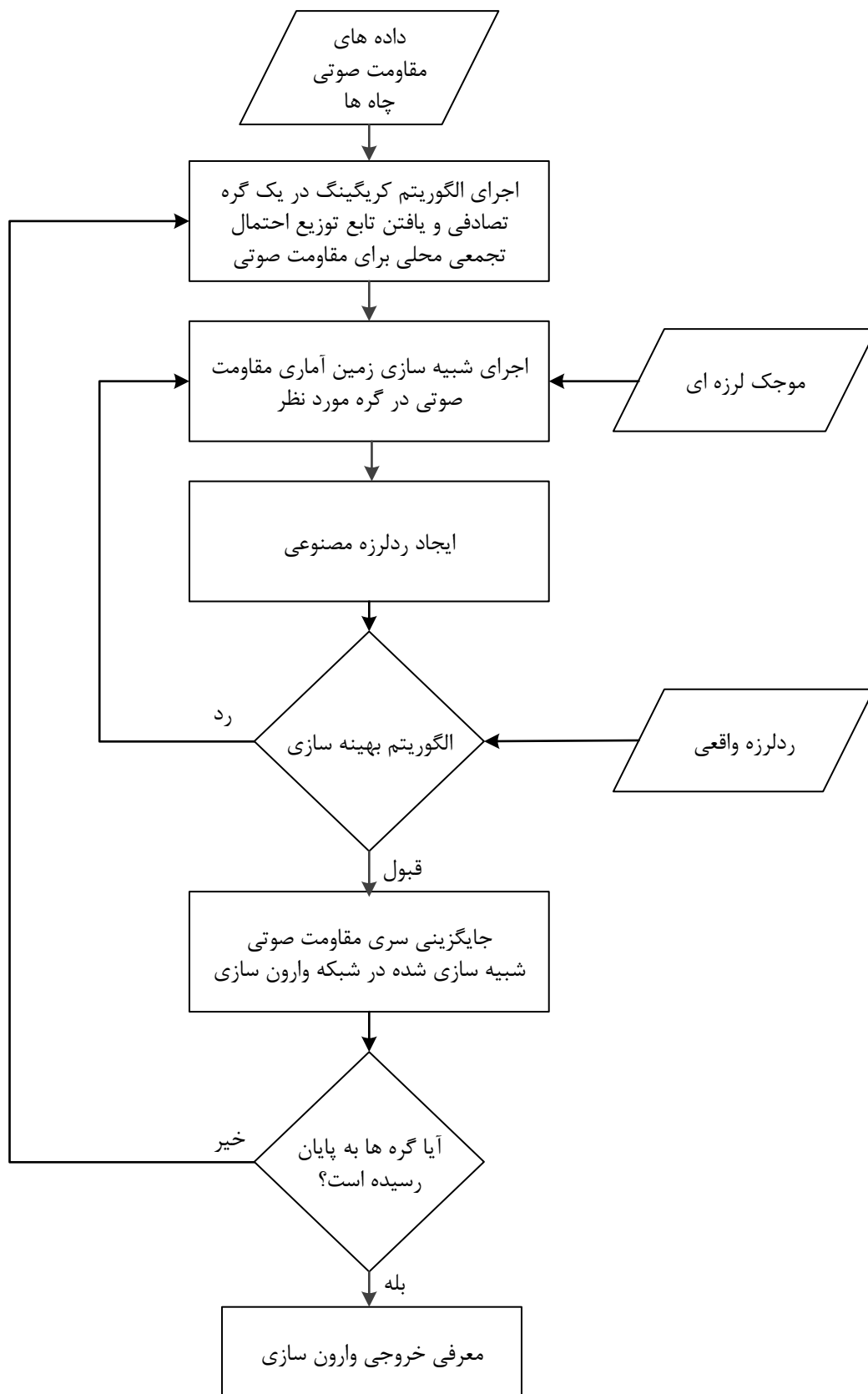
³ Simulated annealing

۲-۴-۱- روش‌های ردلرزه به ردلرزه^۱

در روش‌های ردلرزه به ردلرزه، وارون‌سازی ابتدا بر روی یک ردلرزه انجام می‌شود و سپس این عمل با استفاده از ردلرزه‌هایی که در مراحل قبل وارون شده‌اند ادامه می‌یابد تا اینکه کل شبکه وارون‌سازی را در بر گیرد. شکل ۲-۲ فلوجارتی را نشان می‌دهد که پایه اصلی کلیه روش‌های وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه است. ابتدا با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها در یک گره^۲ (سلول) مفروض که محل آن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، عمل کریگینگ انجام شده و میانگین و واریانس کریگینگ حاصل می‌گردد. با استفاده از این میانگین و واریانس الگوریتم شبیه‌سازی زمین‌آماری اجرا می‌گردد. حاصل این الگوریتم یک توالی از مقاومت صوتی در محل ردلرزه مفروض است. بنابراین سری بازتاب با استفاده از این توالی قابل محاسبه خواهد بود. سپس با استفاده از هم‌میخت موجک لرزه‌ای در این سری یک ردلرزه مصنوعی پدید می‌آید. اختلاف این ردلرزه با ردلرزه واقعی (ثبت شده) در محل این گره باید توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی کمینه شود. در صورت قبول این ردلرزه، الگوریتم به گره بعدی می‌رود و در صورت عدم قبول ردلرزه شبیه‌سازی شده، عمل شبیه‌سازی مجدداً تکرار خواهد شد. این روند تا زمانی که هم گره‌ها در شبکه وارون‌سازی دیده شوند، ادامه می‌یابد.

¹ Trace-by-trace methods

² Node



شکل ۲-۲- فلوچارت پایه برای کلیه الگوریتم‌های وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه.

هاس^۱ و دوبرول^۲ (۱۹۹۴) اولین وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه را با استفاده از شبیه‌سازی تصادفی که در مقاله دوبرول (۱۹۸۹) ارائه شده بود، معرفی کردند. شبیه‌سازی تصادفی [Dubrule 1989] گروهی از مدل‌های ناهمگنی ممکن (یا همان تحقق‌ها) برای فواصل بین چاه‌ها را پیشنهاد کرد که با واقعیت زمین همخوانی بیشتری داشت. نکته مهم کار هاس و دوبرول (۱۹۹۴) استفاده از شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری در مراحل اولیه فرایند وارون‌سازی است. ایده اصلی شامل استفاده مستقیم از شبیه‌سازی‌های تصادفی در وارون‌سازی دامنه‌های لرزه‌ای به مقاومت صوتی سه‌بعدی با قدرت تفکیک بالاست. الگوریتم استفاده شده در مطالعه ایشان، یک الگوریتم شبیه‌سازی متوالی و "بر مبنای مش" است. متوالی بدین معنی است که تحقق‌ها مرحله به مرحله تولید می‌شوند و در هر تحقق از اجزا شبیه‌سازی شده در مرحله قبل برای مقیدسازی داده لرزه‌ای استفاده می‌شود. "بر مبنای مش" به این معنی است که توزیع خواصی مانند لیتولوژی در یک شبکه‌بندی یا مش‌بندی انجام می‌شود. این روش بر روی یک داده لرزه‌ای سه‌بعدی مربوط به یک مخزن ماسه‌سنگی شیل‌دار با تعدادی چاه انجام گردید و مشاهده شد که تصاویر لرزه‌ای مصنوعی با داده واقعی همخوانی قابل‌قبولی دارد [Haas and Dubrule 1994].

استفاده از مقیدسازی با داده لرزه‌ای به بررسی ساختارهای داخلی مخازن کمک می‌کند. اما باید دانش کمی زمین‌شناسی نیز مورد توجه قرار گیرد زیرا تمرکز همه تلاش‌ها بر بازتولید داده لرزه‌ای واقعی بدون توجه به جوانب دیگر زمین‌شناسی بی‌نتیجه است. لامی^۳ و همکاران (۱۹۹۹) وارون‌سازی زمین‌آماری را با ترکیب اطلاعات مختلف شامل داده‌های چاه، داده لرزه‌ای و دانش زمین‌شناسی انجام دادند [Lamy et al. 1999]. آنها یک روش وارون‌سازی زمین‌آماری جدید برای وارون کردن داده لرزه‌ای به مدل مقاومت صوتی ارائه دادند. در این روش، در محل هر ردلرزه تعداد زیادی مقاومت صوتی با استفاده از شبیه‌سازی شرطی تولید شده است و تابع هدف محلی برای یافتن بهترین ردلرزه

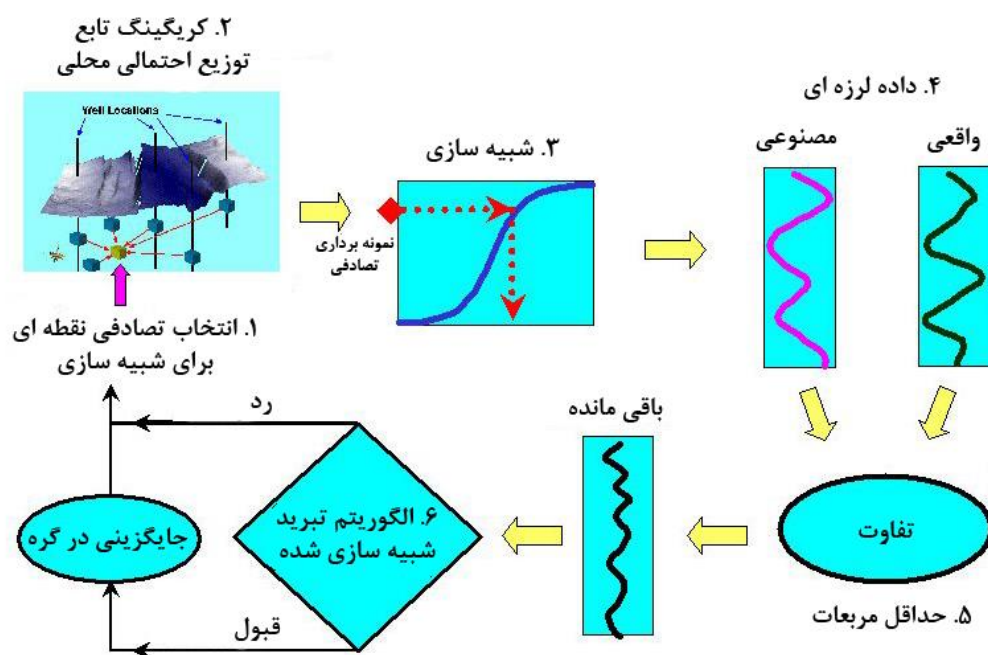
¹ Hass

² Dubrule

³ Lamy

مصنوعی که با ردلرزه واقعی همخوانی داشته باشد، کمینه شده است. اولین مرحله، تفسیر داده لرزه‌ای و ساختن مدل‌های زمین‌شناسی مخزن توسط ردیابی و تفسیر افق‌ها می‌باشد. این افق‌ها در مراحل بعدی ساختار مش‌بندی سه‌بعدی لایه‌بندی را کنترل می‌کنند. ابعاد این مش‌بندی در راستای قائم ممکن است از قدرت تفکیک داده لرزه‌ای بالاتر باشد. ابعاد مش‌بندی در راستای افقی با فاصله ردلرزه‌ها برابر است (یعنی یک ردلرزه در یک سلول). الگوریتم استفاده شده برای وارون‌سازی، الگوریتم شبیه‌سازی متوالی گوسی است. با تکرار عمل وارون‌سازی بلوک‌های مقاومت صوتی مختلفی تولید می‌شود. همه این بلوک‌ها با داده‌های چاه و داده لرزه‌ای همخوانی و هماهنگی دارند ولی در یک سلول، تحقق‌ها یا خروجی‌های مختلف، مقادیر متفاوتی از مقاومت صوتی نشان می‌دهند که از خصوصیت ذاتی روش‌های تصادفی است.

گریجالبا و همکاران (۲۰۰۰) از وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه برای تخمین متغیرهای پتروفیزیکی دور از چاه استفاده کردند [Grijalba-Cuenca et al. 2000]. دیاگرام مربوط به این روش در شکل ۲-۳ آورده شده است.



شکل ۲-۳- دیاگرام مراحل وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه برای تخمین مقاومت صوتی [با تغییرات Grijalba-Cuenca et al. 2000]

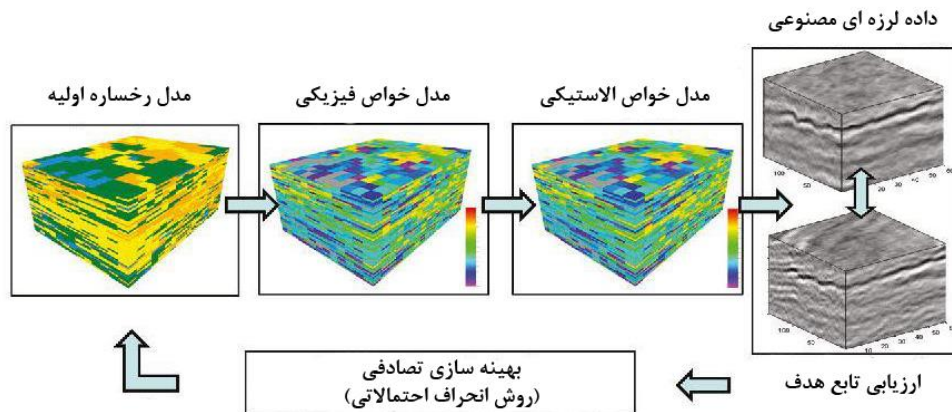
یکی از تفاوت‌های اصلی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و داده‌های چاه، تفاوت در قدرت تفکیک قائم و افقی آنهاست. داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی به طور نسبی دارای قدرت تفکیک جانبی بالاتری نسبت به داده‌ها چاه هستند در صورتیکه داده‌های چاه در راستای قائم قدرت تفکیک بالاتری دارند. روش‌های مختلفی برای استفاده از قدرت تفکیک داده لرزه‌ای برای برون‌یابی جانبی داده‌های چاه وجود دارد. در مطالعه گریجالبا و همکاران (۲۰۰۰)، پارامترهای پتروفیزیکی در فواصل بین چاه‌ها با استفاده از شبیه‌سازی تصادفی به طور مستقیم با داده‌های پس از برانبارش^۱ لرزه‌ای و داده‌های چاه مرتبط شده است. هدف از مطالعه ایشان، ارائه توصیف عمومی از وارون‌سازی زمین‌آماری و بکارگیری آن در داده‌های مربوط به یک مخزن فعال هیدروکربوری بود.

گرانا و همکاران وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه را برای وارون‌سازی داده لرزه‌ای به رخساره‌های لرزه‌ای به کار بردند [Grana et al. 2012]. یکی از اهداف مدل‌سازی مخزن تشریح تغییرپذیری خواص مخزنی است. روش‌های وارون‌سازی تصادفی قادر هستند بر اساس بهینه‌سازی تصادفی یا قطعی مدلهایی از خواص زیرسطحی مانند رخساره‌ها را تولید کنند که در مرحله بعد به خواص الاستیکی قابل تبدیل است. در نهایت، مکعب‌های داده لرزه‌ای مصنوعی محاسبه و تولید می‌شوند که قابل مقایسه با داده واقعی هستند. در مطالعه مذکور، روش جدیدی برای تخمین مدل‌های مخزنی ارائه شد که در آن از ترکیب روش‌های زمین‌آماری مانند شبیه‌سازی متوالی گوسی [Deutsch and Journal 1992] و یک روش بهینه‌سازی تصادفی به نام روش انحراف احتمالاتی^۲ [Caers and Hoffman 2006] و هم‌میخت لرزه‌ای [Mavko et al. 2009] استفاده شده است. نمای کلی روش استفاده شده در شکل ۲-۴ آمده است. ابتدا شبیه‌سازی متوالی گوسی برای تولید مدل‌های رخساره و سپس روش بهینه‌سازی برای بهبود نتایج بکار گرفته شده است. در مرحله بعد، خواص الاستیکی با

¹ Post-stack

² Probability perturbation

بکارگیری مدل فیزیکی سنگ محاسبه و پاسخ داده لرزه‌ای مصنوعی به آن با روش هم‌میکت محاسبه شده است. تابع هدف در بهینه‌سازی، اختلاف بین داده لرزه‌ای مصنوعی و واقعی بوده است.



شکل ۲-۴- مراحل کلی روش وارون‌سازی ردلرزه به ردلرزه برای تولید مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی [با تغییرات [Grana et al. 2012]

این روش بر روی داده واقعی یکی از مخازن دریای شمال در نروژ به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تطبیق بسیار خوبی بین این مدل رخساره و داده لرزه‌ای وجود دارد. همچنین پیوستگی فضایی خوبی در این مدل قابل مشاهده است که هدف اصلی بسیاری از مدل‌های رخساره‌ای است. در این مطالعه، بعد از ۱۰ تکرار و ۱۱۰ شبیه‌سازی دوبردی، بهینه‌سازی همگرا شده است. عباسی و ریاحی (۱۳۹۲) وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه را برای برآورد تک‌مرحله‌ای تخلخل در یکی از میداین هیدروکربوری جنوب غرب ایران به کار بردند. آنها با استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی [Haas and Dubrule 1994] و روش ارائه شده توسط اسپایکس و همکاران (۲۰۰۸)، نقشه تخلخل قطعی و تصادفی را برای یکی از میدان‌های جنوب غرب ایران تولید کردند. چن^۱ و گلینسکی^۲ (۲۰۱۴) روش وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه را برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای چند مؤلفه‌ای به کار برده و از نتایج آن پارامترهای مخزنی را تخمین زدند [Chen and Glinsky 2014]. میرا^۳ و همکاران (۲۰۱۵) وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه را برای داده‌های لرزه‌ای چهار بعدی (ثابت داده لرزه‌ای

¹ Chen

² Glinsky

³ Meira

سه‌بعدی در طول زمان) در حضور نوفه بکار بردند [Meira et al.]. واکر^۱ و همکاران (۲۰۱۶) یک الگوریتم وارون‌سازی یک بعدی برای تخمین پارامترهای مخزنی از قبیل حجم شیل و تخلخل ارائه دادند [Walker et al. 2016].

۲-۴-۲- روش‌های وارون‌سازی تصادفی کلی^۲

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به طور کلی روش‌های وارون‌سازی تصادفی دارای دو مرحله می‌باشند [Bortoli et al. 1993, Grijalba-Cuenca et al. 2000, Haas and Dubrule 1994]. اولین مرحله، شبیه‌سازی مقاومت صوتی در هر ستون از شبکه مش‌بندی شده بر اساس الگوی پیوستگی فضایی (واریوگرام) و مرحله دوم تبدیل این مقاومت‌های صوتی به دامنه‌های لرزه‌ای با استفاده از هم‌میخت با یک موجک لرزه‌ای است که موجب تولید ردلرزه مصنوعی می‌شود. بهترین مقدار شبیه‌سازی شده بر اساس شباهت بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و داده واقعی انتخاب می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا زمانی که همه ستون‌های شبکه شبیه‌سازی شوند. سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) برای اولین بار یک روش کلی را به جای روش ردلرزه به ردلرزه ارائه دادند. تفاوت دیگر روش آنها، استفاده از شبیه‌سازی متوالی مستقیم و همین‌طور شبیه‌سازی توامان متوالی مستقیم [Soares 2001] برای انجام وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای بود. در مرحله اول، بر خلاف روش‌های ردلرزه به ردلرزه، به جای ستون‌های انفرادی، تعداد زیادی تحقق سه‌بعدی از مقاومت صوتی برای کل حجم شبکه وارون‌سازی، شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله دوم و بعد از هم‌میخت، مناطق محلی دارای بیشترین شباهت انتخاب شده و باهم ترکیب می‌شوند. نتیجه این کار تولید یک تصویر ثانویه^۳ یا متغیر ثانویه برای استفاده در شبیه‌سازی توامان در تکرار بعدی است. این فرایند تا زمانی تکرار می‌شود که همگرایی صورت گیرد و شرط توقف حاصل شود. در این روش، پراکندگی فضایی و الگوهای مقاومت صوتی که توسط واریوگرام‌ها و هیستوگرام‌ها

¹ Walker

² Global

³ Secondary image

مشخص می‌شوند، در مکعب نهایی مقاومت صوتی بازتولید می‌شوند. با توجه به اینکه فرایند تکرار بر اساس شبیه‌سازی‌های کلی صورت می‌گیرد، هیچ شباهت مصنوعی محلی به وجود نمی‌آید. این امر در روش‌های ستون به ستون (ردلرزه به ردلرزه) ممکن است اتفاق بیافتد. این روش بر روی داده‌های یک مخزن در خاورمیانه تست شده و نتایج قابل‌قبولی ارائه داده است [Soares et al. 2007]. این روش بعدها توسط چندین محقق برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. ازودو^۱ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ترکیب روشی به نام مقیاس‌بندی چندبعدی^۲ با وارون‌سازی تصادفی کلی، الگوریتمی برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای با زاویه‌های جزئی^۳ به مدل‌های مقاومت صوتی و الاستیکی ارائه دادند. مقیاس‌بندی چندبعدی یک روش آماری چندمتغیره است که بر اساس مفهوم فواصل امکان آشکارسازی الگوهایی از میان چندین مدل چندبعدی را فراهم می‌کند. ازودو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از این روش ترکیبی، خروجی‌های متعدد وارون‌سازی تصادفی کلی را با استفاده از داده مصنوعی و واقعی مورد تحلیل قرار دادند [Azevedo et al. 2014]. ازودو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از وارون‌سازی تصادفی کلی، یک روش جدید برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای تغییر دامنه با زاویه^۴ ارائه دادند. در روش ایشان، داده‌های قبل از برنبارش به مدل‌های سرعت موج برشی و فشارشی وارون می‌شوند [Azevedo et al. 2015]. فرناندز^۵ و همکاران (۲۰۱۶) روش وارون‌سازی تصادفی کلی با روش وارون‌سازی برپایه مدل ترکیب کردند. در کار ایشان، نتیجه وارون‌سازی قطعی به عنوان میانگین محلی در مرحله ابتدایی شبیه‌سازی تصادفی مورد استفاده قرار گرفت. پیرا^۶ و همکاران (۲۰۱۶) از وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای کلی بدون استفاده از داده‌های مقاومت صوتی در منطقه مورد مطالعه بهره جستند. در مطالعه ایشان، از داده‌های آنالوگ مانند رخنمون‌ها و داده چاه‌های میدان‌های

¹ Azevedo

² Multidimensional scaling (MDS)

³ Partial angle stacks

⁴ Amplitude variation with angle (AVA)

⁵ Fernandez

⁶ Pereira

اطراف برای تخمین توابع توزیع احتمالی مقاومت صوتی استفاده شد و سپس این توابع وارد فرایند شبیه‌سازی زمین‌آماری و وارون‌سازی گردید [Pereira et al. 2016].

۲-۵- جمع‌بندی

برای انجام وارون‌سازی تصادفی در همه مطالعات مربوط به وارون‌سازی تصادفی ردلرزه به ردلرزه که در این فصل به آنها اشاره شد، از شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS) استفاده شده است. شبیه‌سازی متوالی گوسی که جزء قدیمی‌ترین الگوریتم‌های شبیه‌سازی تصادفی است، برای انجام عمل شبیه‌سازی از پیش‌فرض گوسی (نرمال بودن) برای داده ورودی استفاده می‌کند. این یکی از محدودیت‌های این روش است. در وارون‌سازی تصادفی کلی [Soares et al. 2007] به جای استفاده از شبیه‌سازی متوالی گوسی از شبیه‌سازی متوالی مستقیم (DSS) استفاده شده است که در آن هیچ گونه پیش‌فرضی برای توزیع احتمالی داده ورودی وجود ندارد و این مسئله می‌تواند با طبیعت داده سازگارتر باشد. در تعداد معدودی از مطالعات برای معرفی پارامترهای واریوگرام از منطقه‌بندی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعه لامی و همکاران (۱۹۹۹) و عباسی و ریاحی (۱۳۹۲) اشاره کرد. در کار این محققان، کماکان از شبیه‌سازی متوالی گوسی استفاده شده و مقایسه‌ای بین الگوهای پیوستگی فضایی در حالت پایا و ناپایا صورت نگرفته است و تنها به ارائه خروجی نتایج وارون‌سازی تصادفی اکتفا شده است. با توجه به مرور منابع که در این فصل انجام شده، از زمان معرفی وارون‌سازی تصادفی کلی [Soares et al. 2007] پژوهشی در مورد وارون‌سازی تصادفی کلی در حالت پایا و ناپایا صورت نگرفته است. لذا مطالعاتی که بتواند در راستای بررسی الگوهای فضایی پیچیده الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم صورت گیرد، از اهمیت بالایی در وارون‌سازی لرزه‌ای برخوردار است. با انجام چنین مطالعاتی امکان مقایسه نتایج حالت پایا و ناپایا به وجود خواهد آمد. بنابراین در فصل‌های آینده سعی می‌شود با ارائه الگوریتم‌های جدیدتر، مدل‌هایی از مقاومت صوتی با مشخصات بهبودیافته ارائه گردد.

فصل سوم

ارائه الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم

بهبود یافته

۳-۱- مقدمه

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^۱ ارائه می‌دهد و امکان مشاهده تغییرات پارامتر مورد نظر از لحاظ احتمالاتی وجود ندارد. شبیه‌سازی با تولید خروجی‌های مختلف که همگی به داده اولیه مقید می‌باشند، امکان بررسی بهتر و بیشتر احتمال تغییرات پارامتر مورد نظر را به مفسر می‌دهد. در این فصل ابتدا مفهوم واریوگرام بطور مختصر شرح داده می‌شود. سپس الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج تشریح شده و تلاش می‌شود تا الگوریتم بهبودیافته آن ارائه گردد. در ادامه، کاربرد این الگوریتم‌ها بر روی داده مصنوعی و واقعی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- واریوگرام

در روش‌های آمار کلاسیک فرض می‌شود که هر نمونه یک حالت تحقق یافته و یا یک رخداد تصادفی و مستقل از یک احتمال (همگن) می‌باشد. این توزیع شامل تمامی نمونه‌هایی است که امکان رخداد (یعنی برداشت) آنها وجود دارد. در این صورت هر نمونه را می‌توان نظیر یک نقطه معین از تابع توزیع احتمال مربوط دانست. در چنین مدلی، موقعیت مکانی و یا زمانی نمونه‌ها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، لذا ممکن است بعضی از ساختارهای موجود به وسیله ابزارهای به کار برده شده در آمار کلاسیک خود را بروز ندهند. اما در زمین‌آمار، موقعیت فضایی نمونه‌ها مورد سنجش قرار می‌گیرد و بسیاری از ساختارهای پنهان که تابع فاصله زمانی و مکانی هستند به وسیله ابزارهای معمول در زمین‌آمار خود را آشکار می‌سازند. یکی از مهمترین این ابزارها، واریوگرام است. متغیر مورد بررسی در زمین‌آمار از نوع

¹ Smooth

متغیر ناحیه‌ای است. متغیر ناحیه‌ای متغیر تصادفی است که تفاضل مقدار آن در دو نقطه مختلف از فضا بستگی به فاصله آن دو نقطه دارد (حسینی پاک ۱۳۸۹).

با فرض پایایی ذاتی می‌توان واریوگرام را فرمول‌بندی کرد. فرض پایایی ذاتی به این معنی است که اولاً امید ریاضی متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ به مختصات بستگی نداشته باشد. در این حالت مقدار این امید ریاضی برابر با مقدار میانگین متغیر $Z(x)$ است. ثانیاً به ازای هر مقدار از h (فاصله)، عبارت $[Z(x+h) - Z(x)]$ دارای واریانس معینی بوده که بستگی به مختصات نداشته باشد، بلکه تابعی از h باشد:

$$\text{Var}\{Z(x+h) - Z(x)\} = 2\gamma(h) \quad (1-3)$$

مقدار $\gamma(h)$ را نیم‌واریوگرام^۱ می‌نامند که در بسیاری از کتاب‌ها و مقالات با همان نام واریوگرام به کار برده شده است. در این نوشتار نیز منظور از واریوگرام همین است. این مقدار به صورت زیر قابل محاسبه و ترسیم است:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(N-h)} \sum_{i=1}^{N-h} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2-3)$$

که در آن N تعداد نقاطی است که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند [Bourges et al. 2012].

هر یک از مقادیر محاسبه شده واریوگرام به همراه مقدار h آن، نقطه‌ای را در مختصات دکارتی h و γ مشخص می‌کند. با برازش یک مدل به این نقاط، منحنی واریوگرام تجربی به دست می‌آید (شکل ۳-۱) که دارای خواص زیر است:

(۱) اثر قطعه‌ای^۲: از نظر تئوری مقدار واریوگرام در $h=0$ باید به حداقل مقدار خود یعنی صفر

تنزل کند. ولی در عمل واریوگرام‌های واقعی که محصول تجربه می‌باشند، معمولاً از چنین

شرایطی تبعیت نمی‌کنند. به مقدار واریوگرام به ازاء $h=0$ ، اثر قطعه‌ای گفته می‌شود. همان

¹ Semivariogram

² Nugget effect

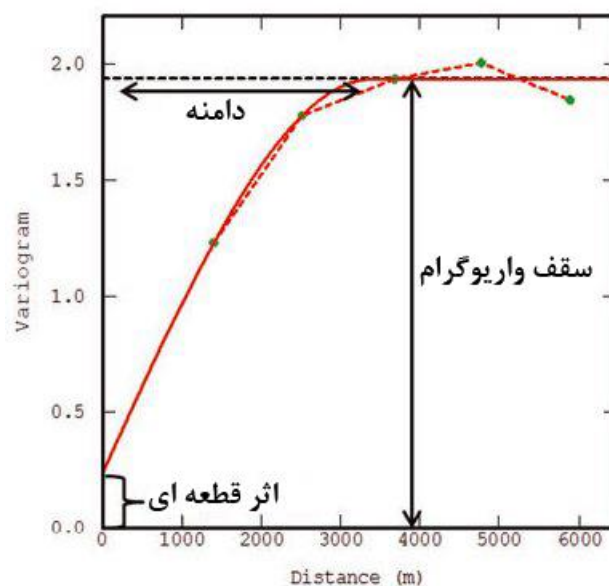
طور که قبلاً اشاره شد، وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر و خطاهای نمونه‌برداری موجب پیدایش اثر قطعه‌ای می‌شوند.

(۲) دامنه^۱ تأثیر (شعاع تأثیر): با افزایش فاصله زمانی یا مکانی بین نمونه‌ها به حدی می‌رسیم که از آن به بعد مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقاط اطراف یکدیگر برهم تأثیر چندانی ندارند و با افزایش فاصله، مقدار واریوگرام تغییر معنی‌داری نمی‌کند. به این فاصله دامنه یا شعاع تأثیر می‌گویند. بدیهی است که دامنه بزرگتر دلالت بر ساختار فضایی گسترده‌تر دارد. این گسترش موجب افزایش محدوده مجازی می‌شود که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای تخمین مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه یا بلوک مجهول استفاده کرد.

(۳) سقف^۲ واریوگرام: همچنان که h افزایش می‌یابد مقدار هر واریوگرام از مقادیر کم شروع شده و پس از فراز و نشیب‌هایی ممکن است به سمت حد ثابتی میل کند. به این مقدار ثابت که تغییرات آن فقط تصادفی است، سیل یا سقف گفته می‌شود. البته بعضی از واریوگرام‌ها با افزایش فاصله در محدوده مورد مطالعه، همواره افزایش می‌یابند که دلالت بر وجود روند است. این گونه واریوگرام‌ها برای تخمین زمین‌آماری مناسب نمی‌باشند [Chiles and Delfiner 2012].

¹ Range

² Sill



شکل ۳-۱- نمونه‌ای از نمودار واریوگرام. همراه با نمایش اثر قطعه‌ای، دامنه یا شعاع تأثیر و سقف واریوگرام. خط ممتد، مدل برازش شده به نقاط را نشان می‌دهد [با تغییرات Bourges et al. 2012].

انواع مختلفی از مدل‌های واریوگرام برای توصیف تغییرپذیری داده، بین مبدأ و دامنه استفاده می‌شوند. مهمترین این مدل‌های به شرح زیر است [Bourges et al. 2012]. در همه این مدل‌ها، C مؤلفه غیرتصادفی تغییرپذیری (سقف)، h فاصله و a دامنه (شعاع) تأثیر است.

۱- مدل کروی: رابطه ریاضی این مدل به صورت زیر است.

$$\begin{cases} \gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) \right] & \text{for } h < a \\ \gamma(h) = C & \text{for } h \geq a \end{cases} \quad (3-3)$$

۲- مدل نمایی: رابطه ریاضی مدل نمایی به صورت زیر است.

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right] \quad (4-3)$$

۳- مدل گوسی: مدل گوسی دارای رابطه ریاضی زیر است.

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{3h}{a}\right)^2\right) \right] \quad (5-3)$$

مدل‌های کروی و نمایی برای مدل کردن واریوگرام با پیوستگی کمتر و مدل گوسی برای مدل کردن واریوگرام با پیوستگی بیشتر استفاده می‌شود [Bourges et al. 2012]. منظور از پیوستگی، شیب کم

نمودار در h های کم (نزدیک مبدأ) است. هر چه این شیب کمتر باشد، پیوستگی بیشتر است. با ورود پارامترهای واریوگرام به الگوریتم‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری، امکان کنترل پیوستگی فضایی متغیر موردنظر در نتایج شبیه‌سازی شده فراهم می‌شود.

۳-۳- شبیه‌سازی زمین‌آماری متوالی مستقیم

روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای شبیه‌سازی زمین‌آماری وجود دارد که همه آنها حول الگوریتم شبیه‌سازی متوالی گوسی [Deutsch and Journel 1992] گسترش یافته‌اند. فرض گوسی بودن توزیع احتمالی اولیه در این الگوریتم‌ها با انجام یک تبدیل گوسی روی داده اولیه انجام می‌شود. در حالی که توزیع داده‌ها می‌تواند دارای چولگی مثبت و منفی و یا چند مدی باشد و از این رو بازتولید تابع توزیع احتمالی اولیه یا هیستوگرام بعد از تبدیل گوسی ممکن است دشوار باشد [Tran et al. 2001]. لازم به یادآوری است که برای رسیدن به مدل‌های مخزنی قابل اطمینان، ضروری است که آماره‌های اولیه (میانگین و واریانس) که از داده‌های چاه‌نگاری به دست آمده‌اند در مدل‌های شبیه‌سازی شده بازتولید گردند. 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 به دست آمده از داده‌های چاه‌نگاری است. مراحل محاسباتی الگوریتم رایج شبیه‌سازی متوالی مستقیم به شرح زیر است [Soares 2001]:

- 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 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 مقدار شبیه‌سازی شده $z^s(x_u)$ 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:

$$y^s = G^{-1}(y(x_u) * \sigma_{sk}^2(x_u) \cdot p) \quad (6-3)$$

- تولید مقدار شبیه‌سازی شده به صورت زیر:

$$z^s(x_u) = \varphi^{-1}(y^s) \quad (7-3)$$

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. برای تولید مقدار شبیه‌سازی در الگوریتم رایج [Soares 2001] 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 خصوصاً در شرایطی که تغییرات پارامتر مورد مطالعه در یک راستا بسیار بیشتر از راستاهای دیگر است، ایجاد مشکل می‌کند. به عنوان 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 گردد. در روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته که در چارچوب این رساله گسترش یافته است، 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 بهبودیافته را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- تولید یک عدد تصادفی برای تعیین مسیر تصادفی در کل شبکه شبیه‌سازی x_u

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 داده‌های تجربی و داده شبیه‌سازی شده قبلی مقید شده است. توجه شود که در این مرحله، کریگینگ براساس مدل واریوگرام و داده‌های کل مناطق انجام می‌شود تا در مرز مناطق ناپیوستگی ایجاد نگردد.

۴- انطباق محل سلول با جدول منطقه‌بندی برای تعیین منطقه‌ای که سلول در آن واقع شده است.

۵- تعیین بازه تابع توزیع محلی $F_Z(Z)$ با استفاده از توزیع تجمعی محلی مربوط به منطقه مورد نظر

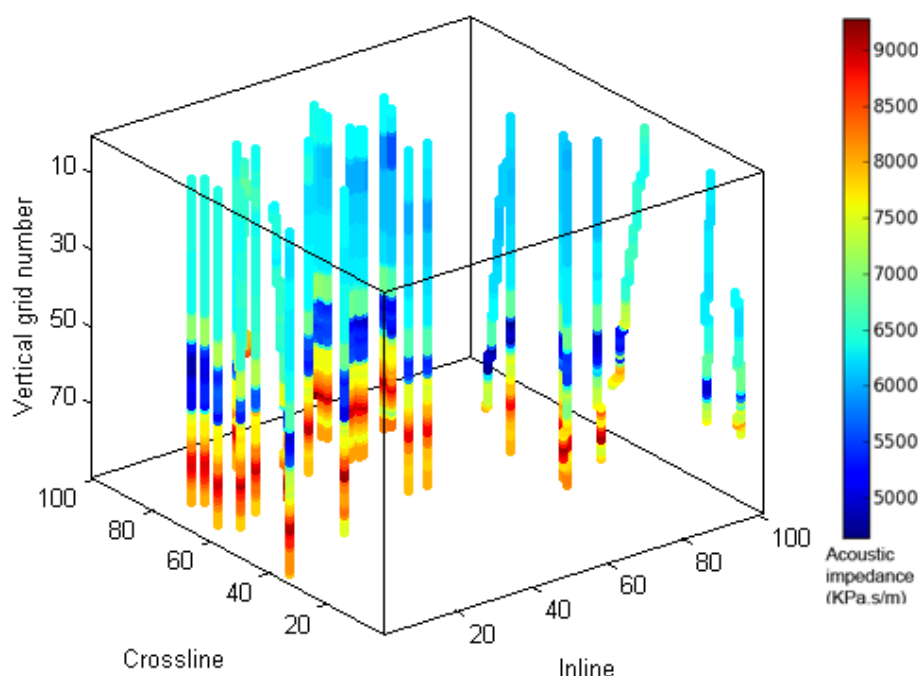
۶- تولید یک مقدار برای $Z^s(x_u)$ از تابع توزیع تجمعی محلی $F_Z(Z)$

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

در ادامه این فصل، کاربرد الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته بر روی داده مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۴- کاربرد بر روی داده مصنوعی

داده مصنوعی استفاده شده در این پژوهش، دارای نگار مقاومت صوتی (حاصل‌ضرب 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 ۳-۲). ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. این داده‌ها از طریق استاد مشاور در دانشگاه لیسبون در اختیار نگارنده قرار گرفته است.

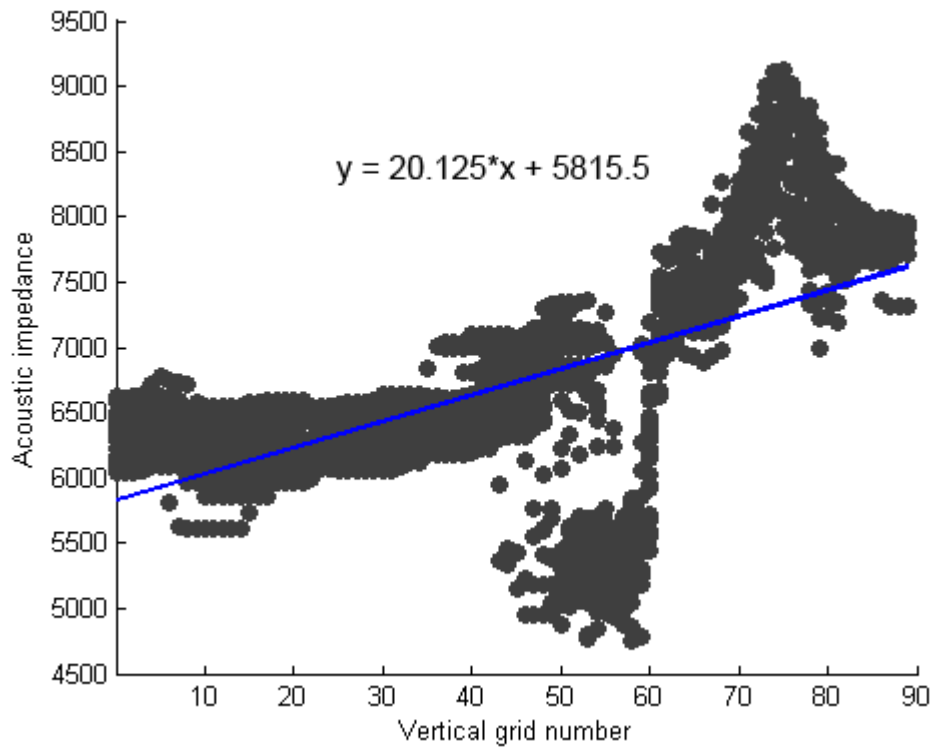


شکل ۳-۲- نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده مصنوعی و موقعیت چاه‌ها.

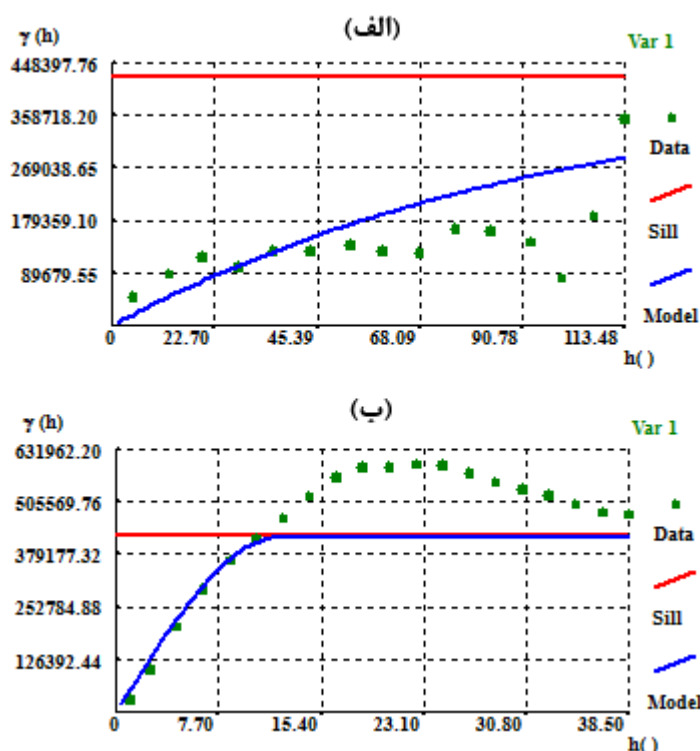
۳-۴-۱- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده مصنوعی

مدل‌سازی واریوگرام به عنوان اولین مرحله در شبیه‌سازی زمین‌آماري می‌بایست انجام شود. برای تحلیل وجود یا عدم وجود روند در راستای قائم، مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق در شکل ۳-۳ 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 شده است. شکل ۳-۴ مدل‌های واریوگرام با استفاده از داده‌های اصلاح شده مقاومت صوتی چاه‌ها را نشان می‌دهد.



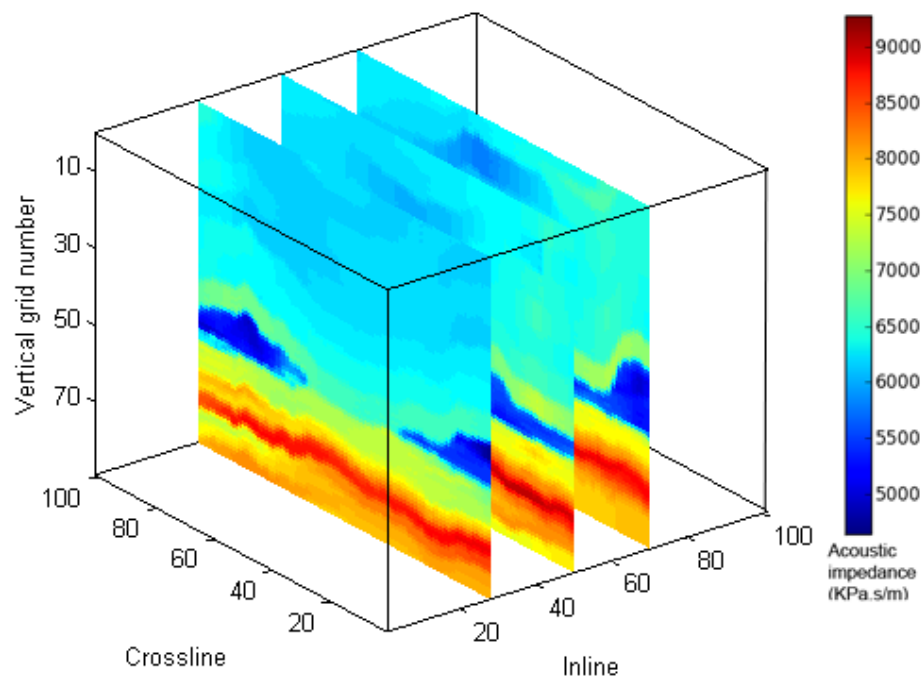
شکل ۳-۳- مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده مصنوعی). یک روند خطی به داده‌ها برآش شده است.



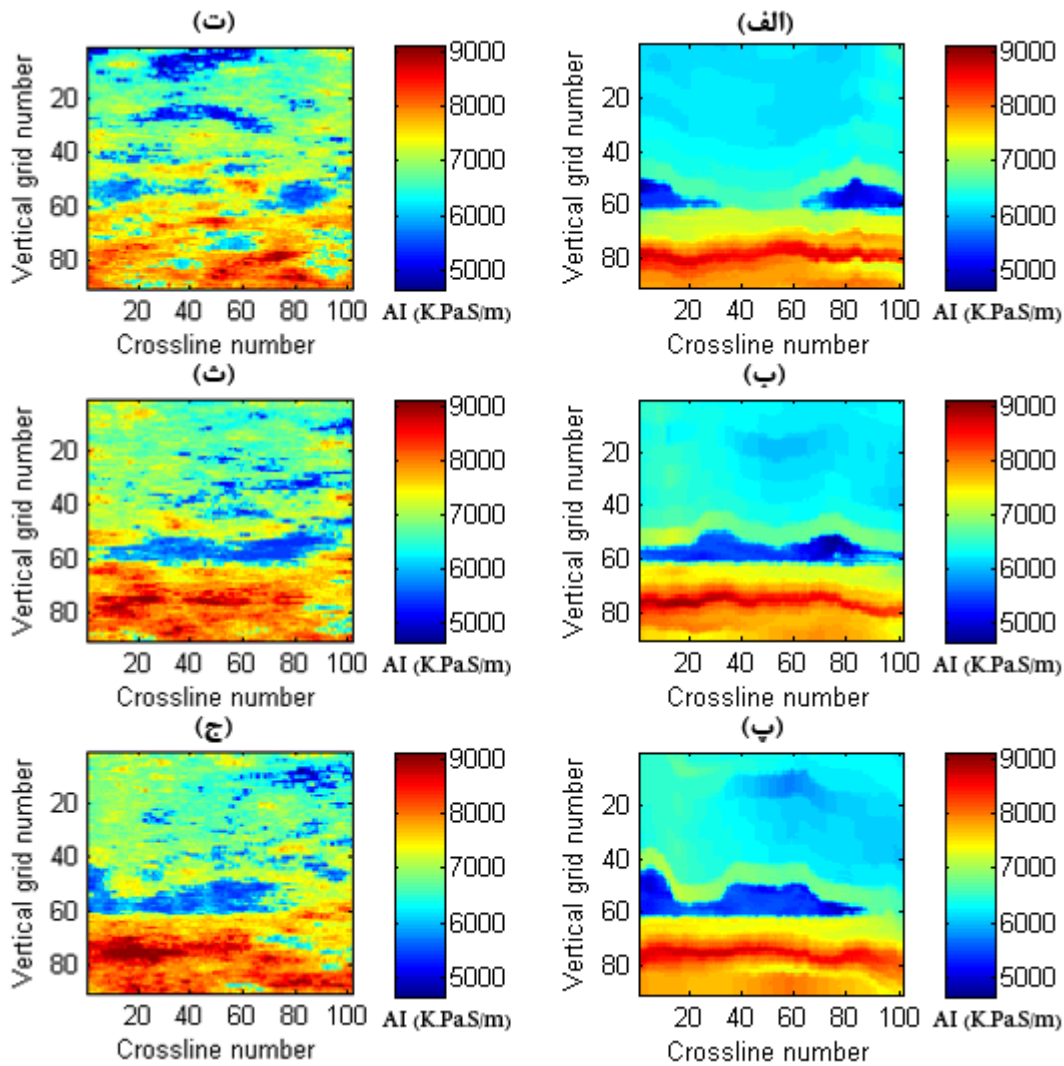
شکل ۳-۴- مدل‌سازی واریوگرام با استفاده از داده‌های مصنوعی چاه به صورت کلی. الف) واریوگرام در راستای افقی، ب) واریوگرام در راستای قائم. محور قائم از جنس واریانس مقاومت صوتی و محور افقی دارای واحد سلول است.

در این مرحله، روش شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج با استفاده از مدل‌های واریوگرام شکل ۳-۴ 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 (اولیه) وجود دارد. سه مقطع قائم از قسمت‌های مختلف شبکه سه‌بعدی مربوط به مدل مقاومت صوتی اولیه، جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، مطابق شکل ۳-۵ 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 ۳-۶ مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و مدل مقاومت صوتی اولیه آورده شده است. همان طور 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

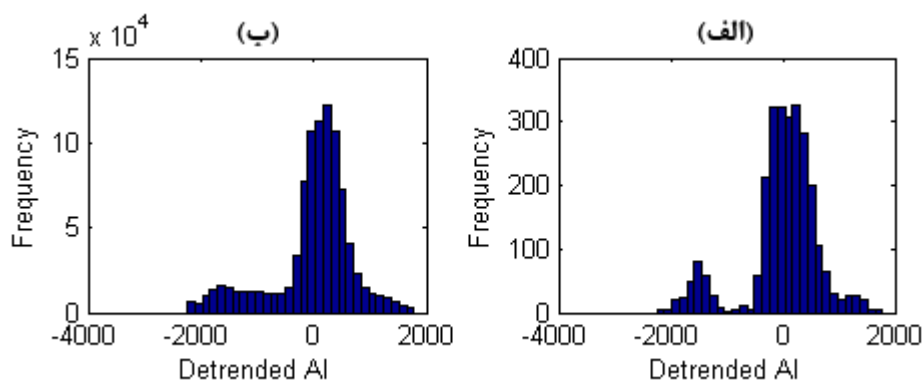
که در بعضی از مناطق مقادیر مقاومت صوتی به درستی شبیه‌سازی نشده است. به عنوان مثال، در قسمت‌های بالایی مقاطع که دارای مقادیر متوسط مقاومت صوتی هستند، مقدار آنها بسیار پایین و یا بسیار بالا شبیه‌سازی شده است. این موضوع علی‌رغم این حقیقت است که هیستوگرام داده‌های چاه (شکل ۳-۷-الف) با داده شبیه‌سازی شده (شکل ۳-۷-ب) متناسب است. به عبارت دیگر، با اینکه شرط بازتولید هیستوگرام مقاومت صوتی در نتایج شبیه‌سازی توسط الگوریتم رایج رعایت شده است اما مقادیر نامتناسب در مقاومت صوتی در بعضی مناطق به چشم می‌خورد. این موضوع ممکن است به دلیل استفاده از تابع توزیع احتمالی کلی برای نمونه‌برداری در روش رایج باشد. در هر مرحله که یک گره شبیه‌سازی می‌شود، احتمال رخداد مقادیر مختلف مقاومت صوتی، حتی اگر از نظر زمین‌شناسی و لیتولوژی متعلق به آن ناحیه نباشد، بر اساس فرض اولیه الگوریتم شبیه‌سازی رایج، وجود دارد. لذا با اینکه هیستوگرام داده اولیه بازتولید شده است، توزیع فضایی مقادیر شبیه‌سازی شده با واقعیت همخوانی کافی را ندارد.



شکل ۳-۵- موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی.



شکل ۳-۶- مقاطع قائم مقاومت صوتی براساس شکل ۳-۵. 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 ۳-۷- 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 شبیه‌سازی متوالی مستقیم.

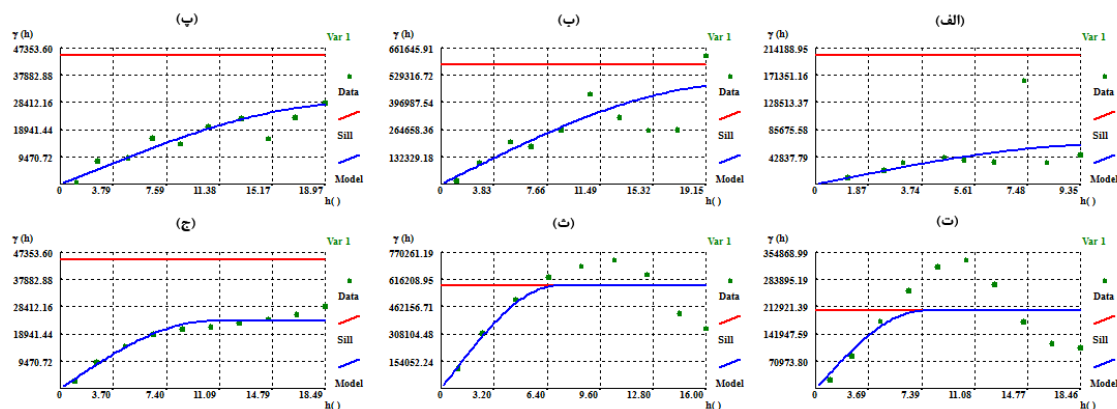
۳-۴-۲- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده مصنوعی

در مرحله بعد، الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته مورد استفاده قرار گرفته است. برای بکارگیری 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 منطقه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد و نرم‌افزار تهیه شده در محیط MATLAB 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 جدول ۳-۱ آورده شده است. توجه شود که مرز جداکننده مناطق، صفحات افقی با مقدار عمقی مشخص (Z) است. Z در اینجا، عدد سلول در راستای قائم می‌باشد

جدول ۳-۱- منطقه‌بندی داده مصنوعی.

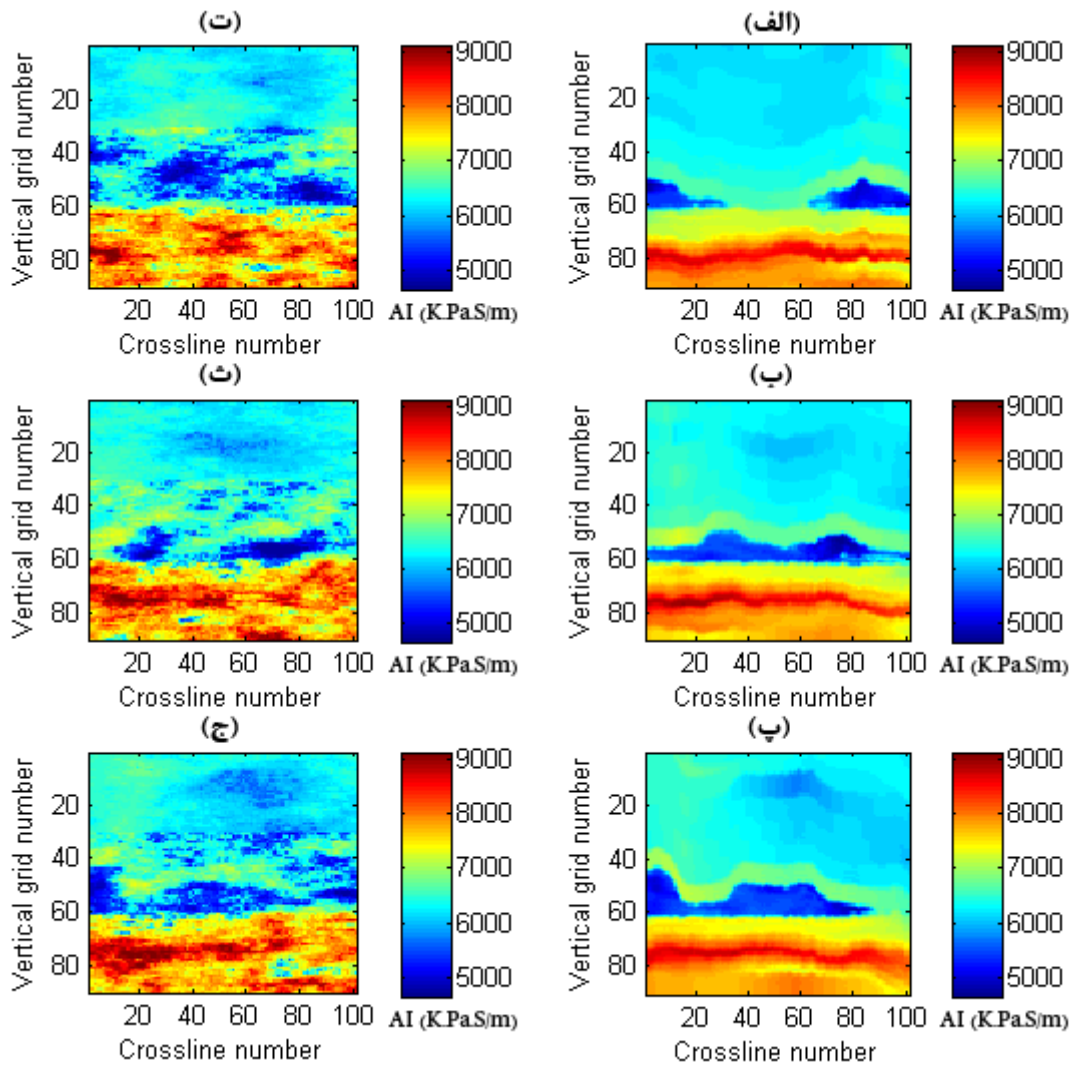
منطقه	مقاومت صوتی	محدوده در جهت قائم
۱	متوسط	از $Z=1$ تا $Z=45$
۲	پایین	از $Z=46$ تا $Z=62$
۳	بالا	از $Z=63$ تا $Z=90$

مدل‌سازی واریوگرام مطابق شکل ۳-۸ برای سه منطقه، به طور مجزا و با استفاده از مدل کروی انجام شده است.

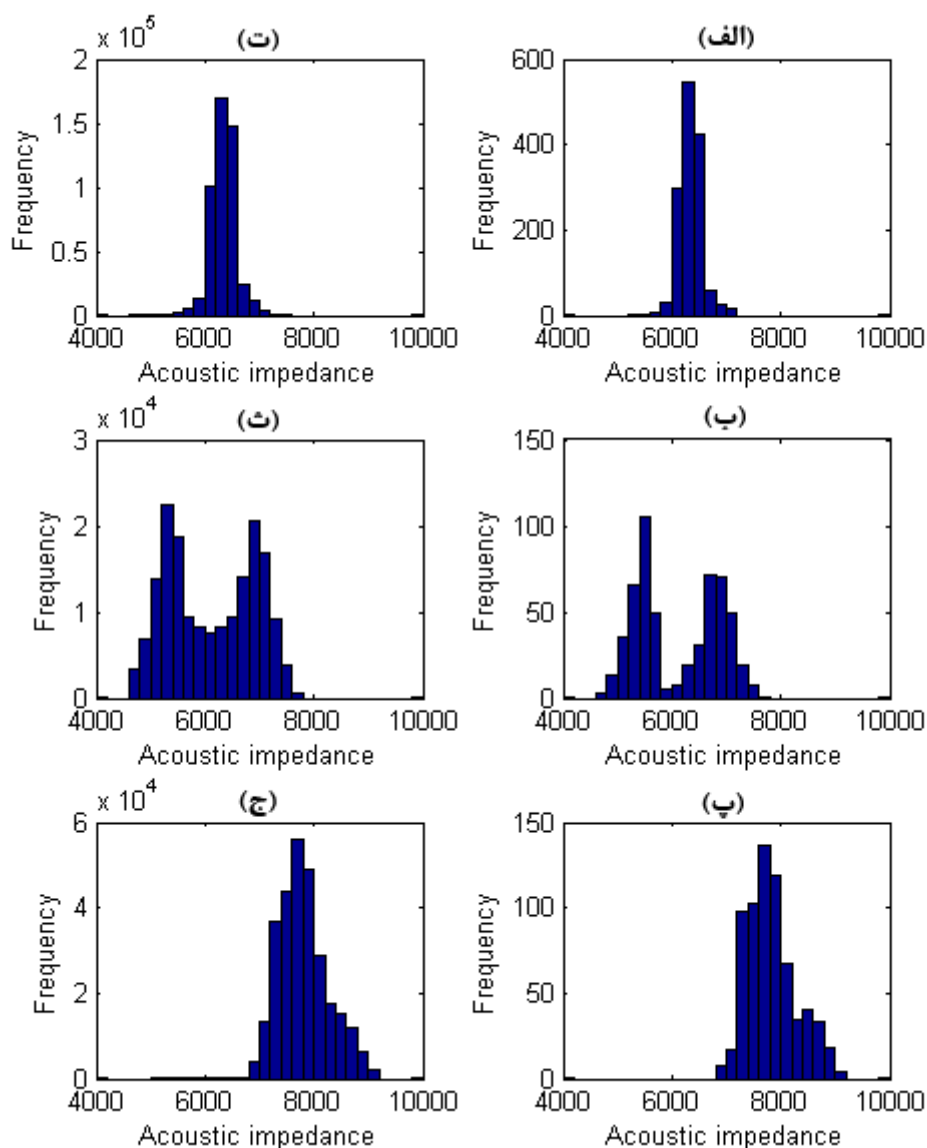


شکل ۳-۸- مدل‌سازی واریوگرام داده‌های مصنوعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) در راستای افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) واریوگرام در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه.

با استفاده از مدل‌های واریوگرام، شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته اجرا شده و نتایج آن در شکل ۳-۹ آورده شده است. در این شکل، سه مقطع قائم متناظر با مقاطع شکل ۳-۶ جهت مقایسه بهتر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۹ قابل مشاهده است، مقادیر شبیه‌سازی شده مقاومت صوتی (شکل ۳-۹-ت، ث و ج) تطابق خوبی با مقادیر واقعی (شکل ۳-۹-الف، ب و پ) دارند و بهبود قابل ملاحظه‌ای در توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی نسبت به شبیه‌سازی قبلی (شکل ۳-۶-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 ۳-۱۰ نشان داده شده است. هیستوگرام‌های شکل ۳-۱۰-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 ۳-۱۰-ت، ث و ج آورده شده است.



شکل ۳-۹- مقاطع قائم مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی براساس شکل ۳-۵. 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 ۳-۱۰- 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.

همچنین ضرایب همبستگی بین مدل سه‌بعدی مقاومت صوتی اولیه و نتایج شبیه‌سازی در دو حالت الگوریتم رایج و بهبودیافته محاسبه شده است. جدول ۳-۲ افزایش قابل توجهی را در ضریب همبستگی حاصل از الگوریتم بهبودیافته نشان می‌دهد که مؤید نتایج مشاهده شده در شکل‌های قبل است.

جدول ۳-۲- ضریب همبستگی بین مدل سه بعدی مقاومت صوتی اولیه و نتایج شبیه سازی.

الگوریتم شبیه سازی بهبود یافته	الگوریتم شبیه سازی رایج	روش
۰/۸۳	۰/۶۷	ضریب همبستگی

۳-۴-۳- تحلیل عدم قطعیت در مورد داده مصنوعی

به منظور تحلیل عدم قطعیت نتایج مربوط به شبیه سازی رایج و بهبود یافته بر روی داده مصنوعی، ۱۰۰ خروجی برای هر دو روش رایج و بهبود یافته تولید شد تا بتوان واریانس مقاومت صوتی در هر سلول را مورد محاسبه قرار داد. میانگین مقادیر واریانس سلول های شبکه شبیه سازی در مورد نتایج الگوریتم رایج و بهبود یافته عموماً نشان دهنده کاهش واریانس و در نتیجه کاهش عدم قطعیت در مورد نتایج الگوریتم بهبود یافته است جدول ۳-۳ میانگین واریانس را به تفکیک روش مورد استفاده نشان می دهد. این جدول نشان می دهد که واریانس کل در الگوریتم بهبود یافته 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 می دهد. دلیل این موضوع را می توان به این صورت تحلیل کرد که واریانس مقاومت صوتی بعد از منطقه بندی در مناطق مختلف به یک نسبت تغییر نکرده است. اگرچه این حقیقت از مقایسه هیستوگرام کل داده چاه (شکل ۳-۷- الف) و هیستوگرام های داده چاه در مناطق مختلف (شکل ۳-۱۰- الف، ب و پ) مشخص است اما به صورت عددی در جدول ۳-۴ آورده شده است. مقدار واریانس در هر سه منطقه نسبت به واریانس کل کاهش را نشان می دهد اما کاهش در منطقه یک بسیار محسوس تر است. در مقابل منطقه دو کمترین کاهش را داشته است. در نتیجه بعد از عمل شبیه سازی با استفاده از الگوریتم بهبود یافته، انتظار بیشترین و کمترین کاهش واریانس را به ترتیب از مناطق یک و دو خواهیم داشت. شکل ۳-۱۱ به خوبی این مسأله را به نمایش گذاشته است. در این شکل، برش های عرضی از مکعب واریانس داده شبیه سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج (شکل ۳-۱۱- الف، ب و پ) در مقابل داده شبیه سازی شده با

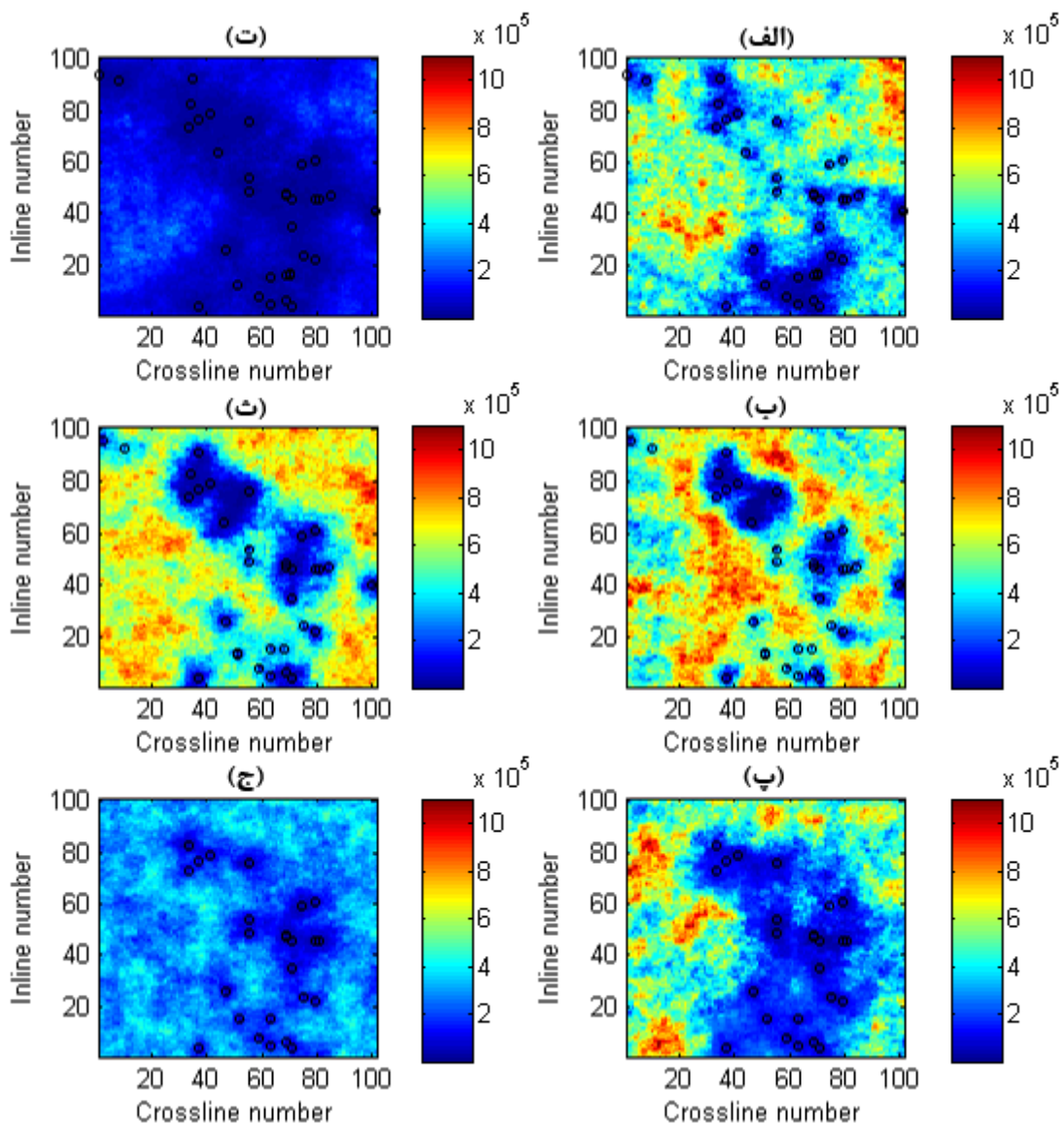
استفاده از الگوریتم بهبودیافته (شکل ۳-۱۱-ت، ث و ج) آورده شده است. به منظور مقایسه راحت‌تر مقیاس رنگی همه شکل‌ها یکسان‌سازی شده است. شکل ۳-۱۱-ت بیشترین کاهش واریانس نسبت به شکل ۳-۱۱-الف را نشان می‌دهد. در حالیکه کمترین کاهش واریانس مربوط به شکل ۳-۱۱-ث نسبت به شکل ۳-۱۱-ب است.

جدول ۳-۳- 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	۳/۴۵۳	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 ۳-۴- مقایسه واریانس داده‌های مقاومت صوتی کل چاه با داده‌های 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 ۳-۱۱- 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.

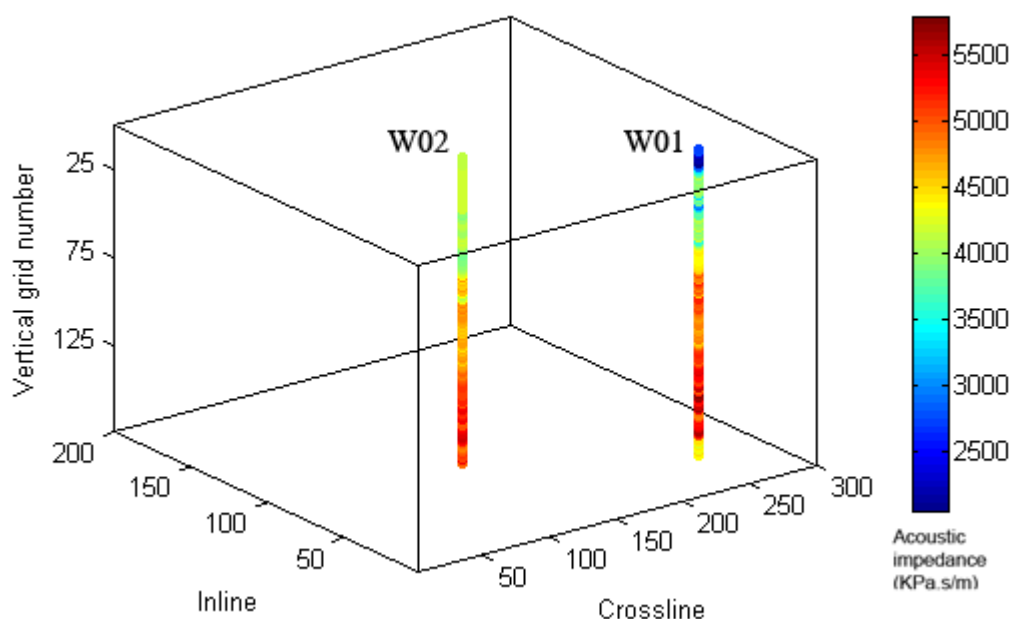
۳-۵- کاربرد بر روی داده واقعی

داده واقعی مورد استفاده در این پژوهش، داده مقاومت صوتی دو چاه قائم مربوط به دریای شمال است. این داده قسمتی از داده‌های اکتشافی یک میدان گازی متعلق به کشور هلند است که در سال ۱۹۸۷ برداشت شده است. برای انجام عمل شبیه‌سازی، محدوده مورد مطالعه به صورت یک شبکه

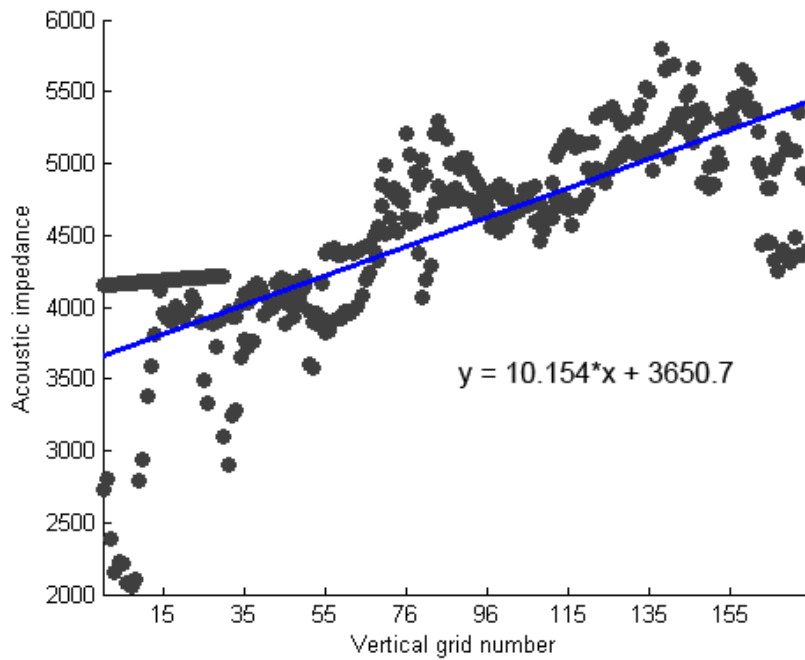
سه‌بعدی به ابعاد $200 \times 300 \times 175$ سلول شبکه‌بندی شده است (شکل ۳-۱۲). ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است.

۳-۵-۱- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده واقعی

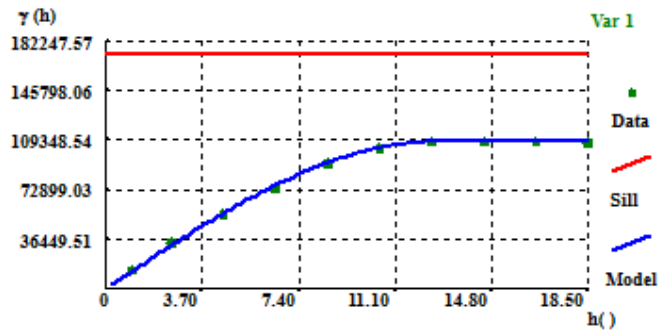
قبل از مدل‌سازی واریوگرام، مطابق شکل ۳-۱۳، مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق رسم شده است. خط برازش شده به این نمودار جهت حذف روند مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی واریوگرام بر روی داده اصلاح شده در شکل ۳-۱۴ آورده شده است. با اجرای الگوریتم شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های دو چاه و مدل واریوگرام به عنوان ورودی، یک مکعب شبیه‌سازی شده از مقادیر مقاومت صوتی در کل شبکه سه‌بعدی تولید می‌شود. شکل ۳-۱۵ نتیجه شبیه‌سازی را در یک مقطع قائم تصادفی که از محل چاه عبور نمی‌کند، نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر شبیه‌سازی شده مقاومت صوتی در محل‌های دور از چاه نمایان شده است. مقایسه هیستوگرام داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده در شکل ۳-۱۶، نشان‌دهنده بازتولید هیستوگرام داده‌های اولیه (چاه‌ها) در نتیجه شبیه‌سازی است.



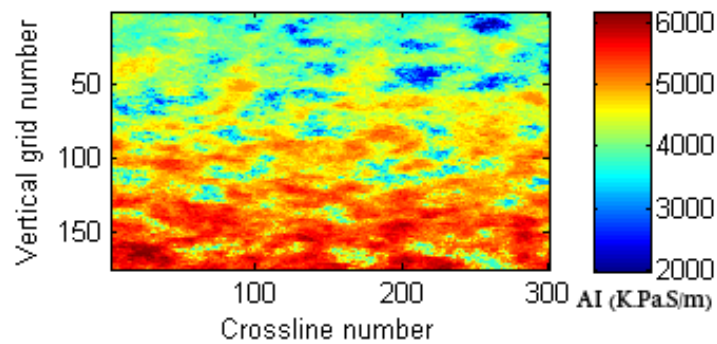
شکل ۳-۱۲- نمای سه‌بعدی از مدل شبکه‌بندی شده برای داده واقعی و موقعیت چاه‌ها.



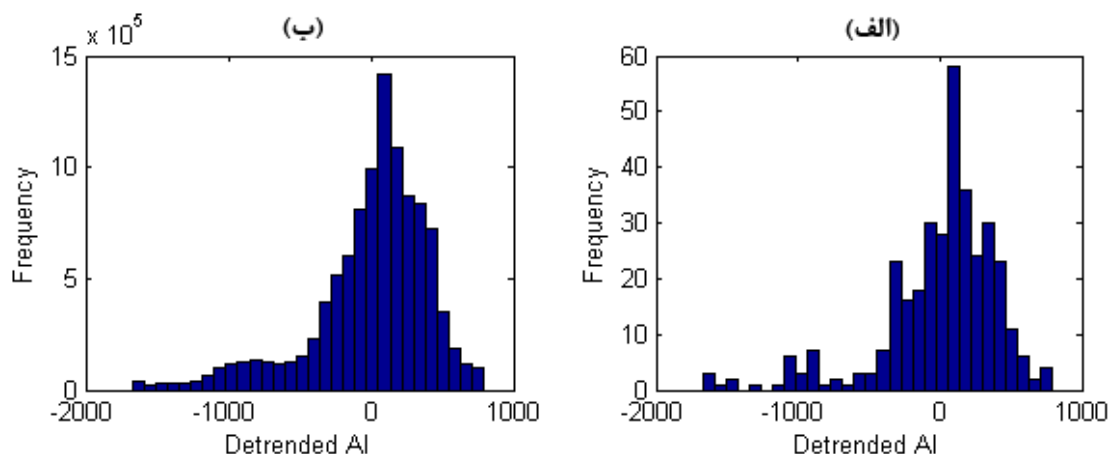
شکل ۳-۱۳- مقادیر مقاومت صوتی چاه‌ها در مقابل عمق (داده واقعی). یک روند خطی به داده‌ها برازش شده است.



شکل ۳-۱۴- مدل‌سازی واریوگرام قائم با استفاده از داده‌های واقعی چاه به صورت کلی. محور قائم از جنس واریانس مقاومت صوتی و محور افقی دارای واحد سلول است.



شکل ۳-۱۵- یک مقطع قائم از نتیجه شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج بر روی داده واقعی



شکل ۳-۱۶- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده واقعی. الف) هیستوگرام داده‌های چاه و ب) هیستوگرام مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج.

۳-۵-۲- کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده واقعی

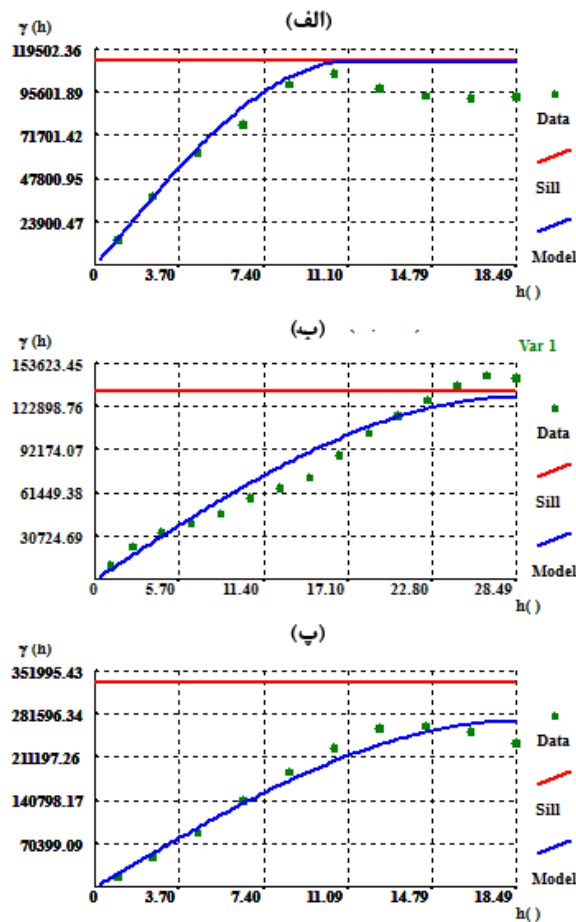
برای به کارگیری روش بهبودیافته همانند داده مصنوعی از تغییرات مقاومت صوتی در راستای قائم برای منطقه‌بندی استفاده شده است. به این ترتیب سه منطقه برای کل فضای سه‌بعدی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده که در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵- منطقه‌بندی داده واقعی. Z نشان‌دهنده شماره سلول در جهت قائم (عمق) است.

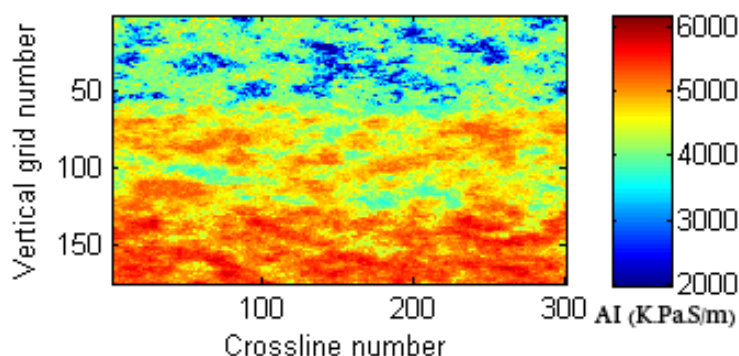
منطقه	مقاومت صوتی	محدوده در جهت قائم
۱	پایین	از $Z=1$ تا $Z=48$
۲	متوسط	از $Z=49$ تا $Z=117$
۳	بالا	از $Z=118$ تا $Z=175$

مدل‌های واریوگرام برای سه منطقه به صورت مجزا محاسبه شده است. شکل ۳-۱۷ این مدل‌ها را نشان می‌دهد. با استفاده از این مدل‌های واریوگرام، شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده‌های مقاومت صوتی اصلاح شده اعمال شده است. شکل ۳-۱۸ نتیجه این شبیه‌سازی را در یک

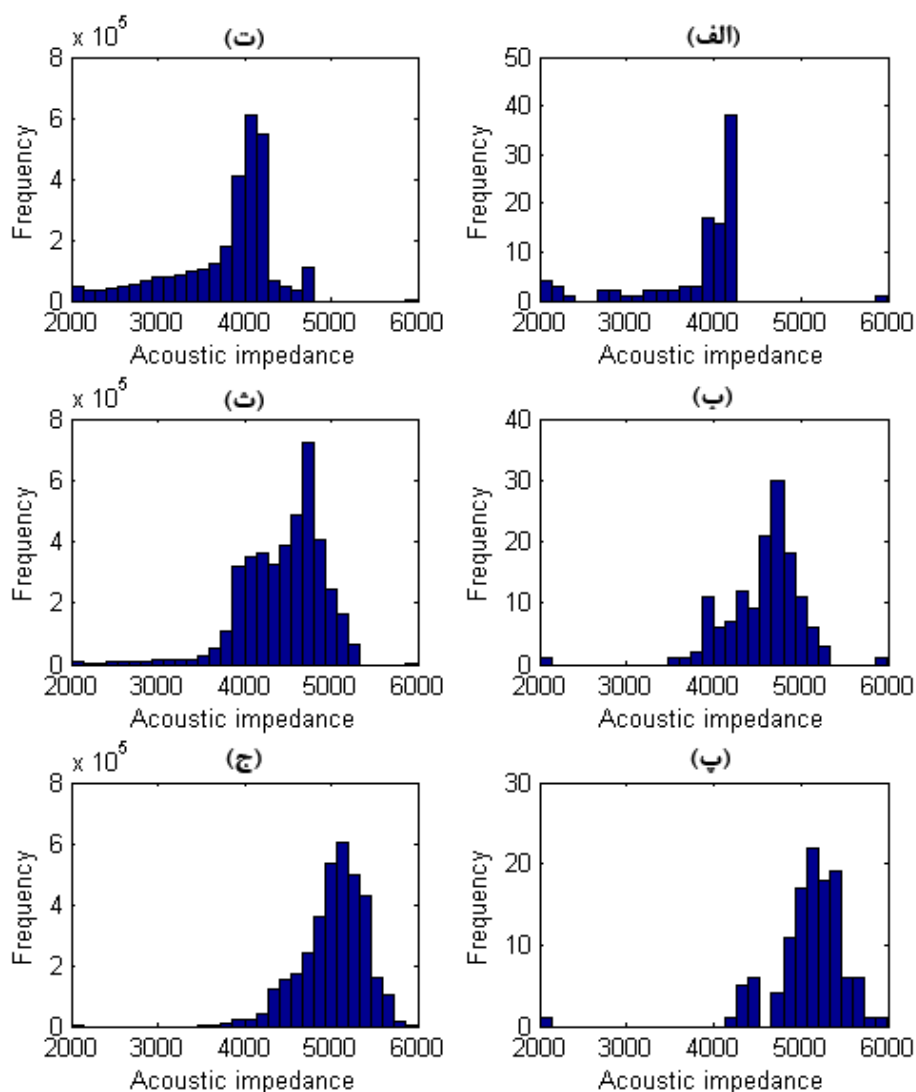
مقطع قائم نشان می‌دهد. در این شکل، توزیع مقادیر شبیه‌سازی شده در محل‌های دور از چاه به خوبی نمایان شده است. شکل ۳-۱۹ هیستوگرام‌های داده‌های چاه و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم بهبودیافته را در سه منطقه به صورت مجزا نشان می‌دهد. هیستوگرام‌های تقریباً مشابه در هر منطقه نشان‌دهنده صحت اجرای الگوریتم شبیه‌سازی بهبودیافته است. در بخش بعدی به مقایسه نتایج شبیه‌سازی رایج و بهبودیافته خواهیم پرداخت.



شکل ۳-۱۷- 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.



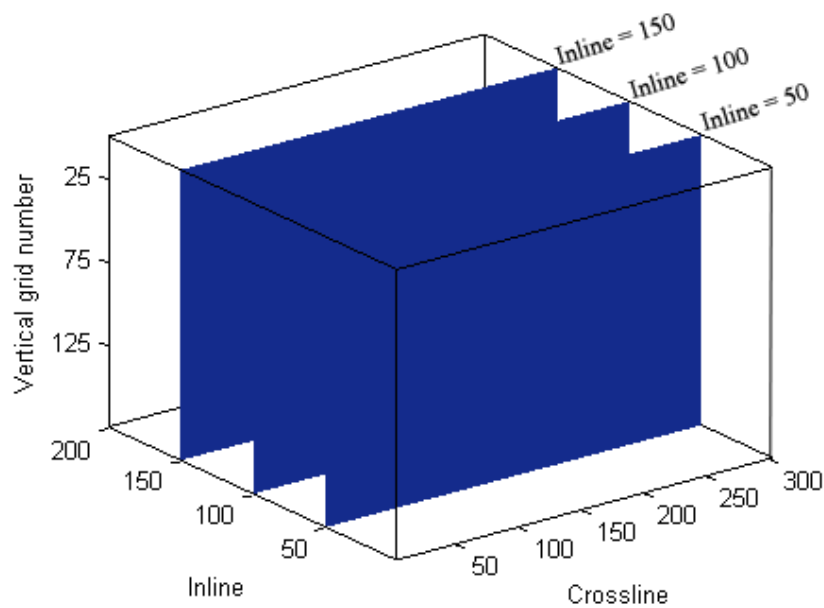
شکل ۳-۱۸- یک مقطع قائم از نتیجه شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته بر روی داده واقعی



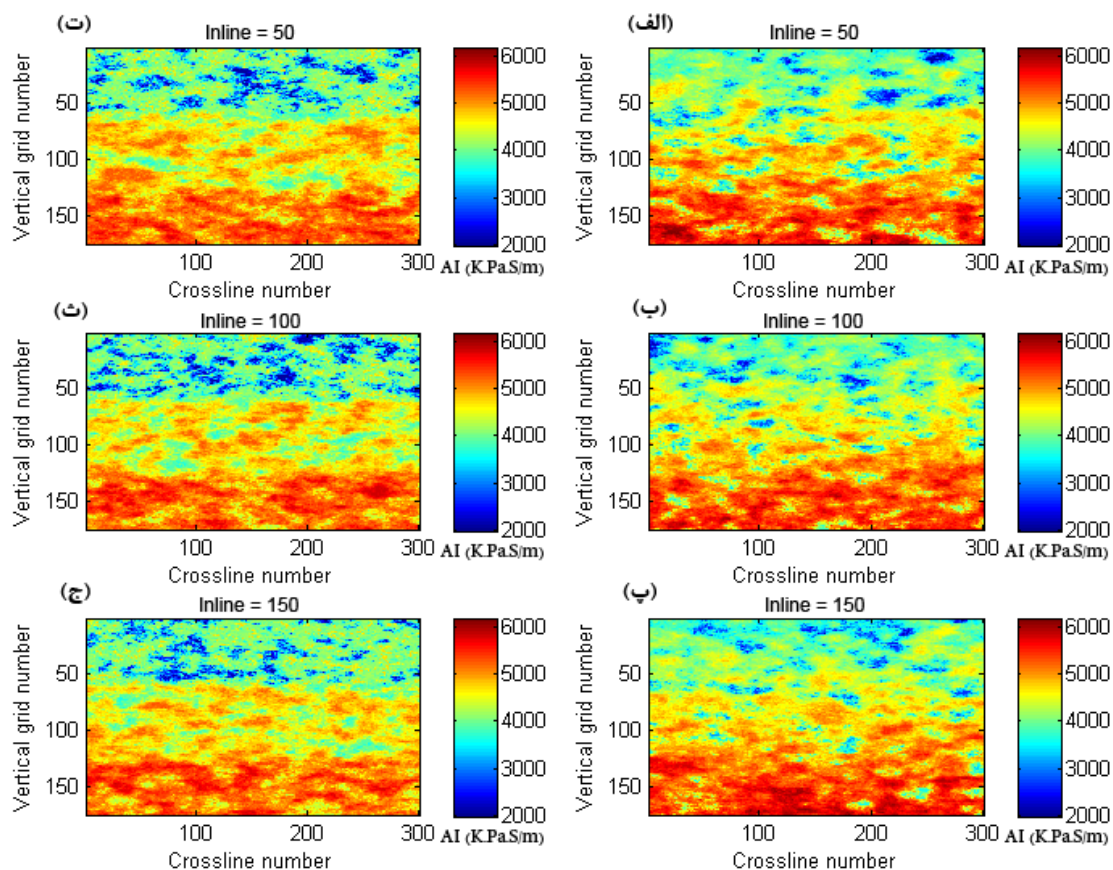
شکل ۳-۱۹- هیستوگرام‌های مربوط به منطقه‌بندی داده واقعی. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های مربوط به مقاومت صوتی در چاه‌ها به ترتیب در منطقه یک، دو و سه، ت، ث و ج) هیستوگرام‌های متناظر در داده شبیه‌سازی شده به روش بهبودیافته.

۳-۵-۳- مقایسه نتایج الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته

مطابق شکل ۳-۲۰، سه مقطع قائم که به طور تصادفی از محل‌هایی که از چاه‌ها عبور نمی‌کنند، جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته انتخاب شده‌اند. نتایج مربوط به اجرای الگوریتم شبیه‌سازی رایج و بهبودیافته در محل این سه مقطع، در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۳-۲۱-الف، ب و پ 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 ۳-۱۲ 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 وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی رایج (شکل ۳-۲۱-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 این وجود، هیستوگرام مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم رایج، هیستوگرام داده‌های چاه را بازتولید کرده است (شکل ۳-۱۶). اما در مورد نتایج روش شبیه‌سازی بهبودیافته، توزیع فضایی مقادیر مختلف مقاومت صوتی به درستی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳-۲۱-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. در صورتیکه اطلاعات تکمیلی دیگری در دسترس نباشد، این نتیجه می‌تواند به واقعیت نزدیک‌تر باشد.



شکل ۳-۲۰- موقعیت مقاطع قائم انتخاب شده از شبکه سه‌بعدی شبیه‌سازی جهت مقایسه نتایج شبیه‌سازی



شکل ۳-۲۱- 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.

۳-۵-۴- تحلیل عدم قطعیت در مورد داده واقعی

برای تحلیل عدم قطعیت در مورد داده واقعی نیز ۱۰۰ خروجی شبیه‌سازی با استفاده الگوریتم رایج و بهبودیافته تولید شد. جدول ۳-۶ میانگین واریانس مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده به تفکیک منطقه را نشان می‌دهد.

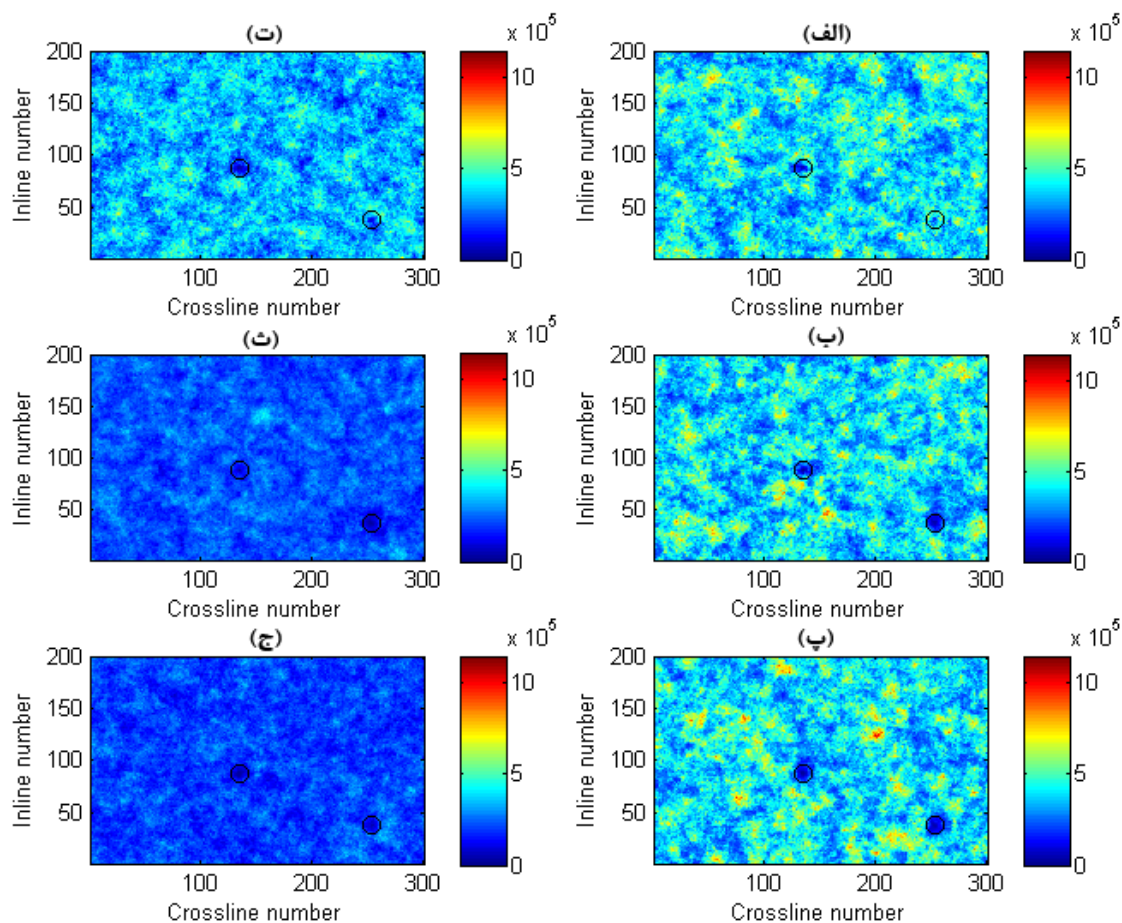
جدول ۳-۶- میانگین واریانس سلول‌های شبیه‌سازی شده در دو روش رایج و بهبودیافته به تفکیک منطقه (داده واقعی)

کل داده	منطقه سه	منطقه دو	منطقه یک	میانگین واریانس
۳/۹۹۵	۳/۹۹۶	۳/۹۸۴	۴/۰۱۰	میانگین واریانس الگوریتم رایج ($\times 10^5$)
۱/۸۱۴	۰/۹۳۳	۱/۱۴۶	۳/۳۳۷	میانگین واریانس الگوریتم بهبودیافته ($\times 10^5$)

با بررسی مقادیر مندرج در جدول ۳-۶ 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 ۳-۷ اشاره نمود. همان‌طور که در جدول ۳-۷ مشخص است، کاهش واریانس بعد از منطقه‌بندی در منطقه یک کمتر از مناطق دو و سه اتفاق افتاده است. شکل ۳-۲۲ برش‌های عرضی را از مناطق مختلف واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم رایج (شکل ۳-۲۲- الف، ب و پ) و الگوریتم بهبودیافته (شکل ۳-۲۲- ت، ث و ج) نشان می‌دهد. در شکل ۳-۲۲- ت، ث و ج، کاهش واریانس در هر سه منطقه مشخص است اما کاهش واریانس در منطقه دو و سه بیشتر از منطقه یک است.

جدول ۳-۷- مقایسه واریانس داده‌های مقاومت صوتی کل چاه با داده‌های بعد از منطقه‌بندی (داده واقعی)

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



شکل ۳-۲۲- 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.

در این فصل، الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج و بهبودیافته مورد ارزیابی قرار گرفتند. با استفاده از این الگوریتم‌ها، مقادیر مقاومت صوتی در منطقه مورد مطالعه، بدون استفاده از داده‌های لرزه‌ای و موجک لرزه‌ای، شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مدل‌سازی دقیق‌تر لایه‌های زیرسطحی با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای امکان‌پذیر است. در فصل آینده تلاش می‌شود از الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج به منظور وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای استفاده شده و نتایج بکارگیری آن‌ها بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی تشریح شود.

فصل چهارم

ارائه الگوریتم وارون سازی تصادفی لرزه‌ای

سه‌بعدی پایا

۴-۱- مقدمه

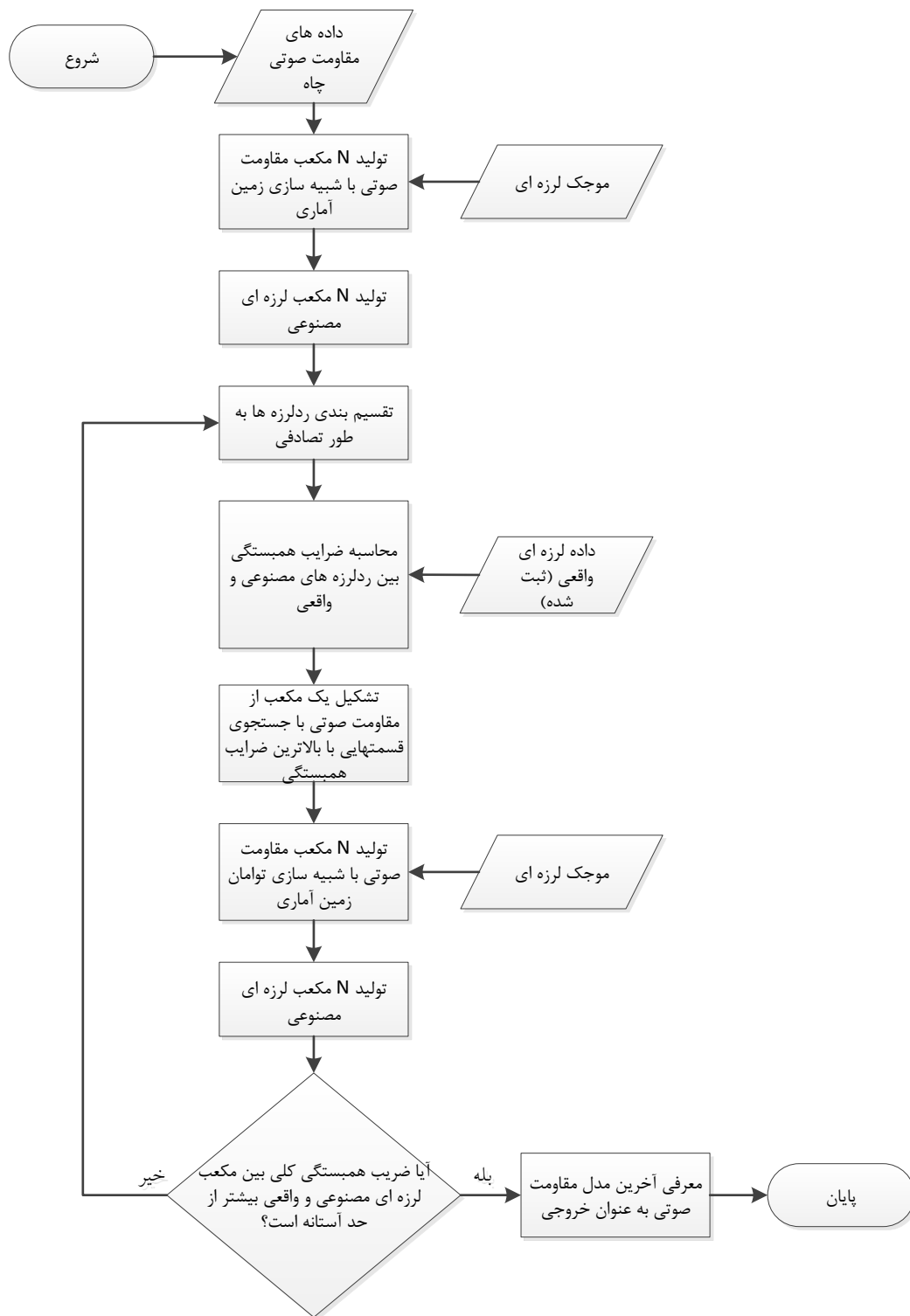
همان‌طور که در فصل‌های گذشته بیان شد، وارون‌سازی تصادفی کلی یکی از جدیدترین روش‌های وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای است که در آن از یک الگوریتم تکرار و بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. این روش اولین بار توسط سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) در یک کنفرانس بین‌المللی EAGE معرفی شد [Soares et al. 2007]. اما به دلایل محرمانه بودن داده مورد استفاده، به طور کامل مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفت. در این فصل، روش مذکور با ارائه تصحیحاتی، در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شده و نتایج بکارگیری آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد تحلیل و بررسی کامل قرار گرفته است.

۴-۲- وارون‌سازی لرزه‌ای سه‌بعدی پایا

وارون‌سازی لرزه‌ای سه‌بعدی پایا یکی از روش‌های زمین‌آماری برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای است که در آن الگوی فضایی داده‌های مقاومت صوتی از دیدگاه زمین‌آماری مورد توجه قرار گرفته است. سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) اولین بار این روش را معرفی کردند و کاربرد آن را به طور بسیار خلاصه بر روی یک داده واقعی شرح دادند [Soares et al. 2007]. این روش بر اساس یک الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند که تابع هدف در آن، اختلاف ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی (ثبت شده) است. در روش ارائه شده توسط آن‌ها، مدل‌های متعددی از مقاومت صوتی با استفاده از داده‌های چاه و شبیه‌سازی متوالی مستقیم [Soares 2001] تولید شده و ضریب همبستگی بین ردلرزه‌های مصنوعی و واقعی (ثبت شده) محاسبه می‌شود. سپس، انتخاب بهترین مدل‌ها در یک روند تکرار، منجر به تولید مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده می‌گردد. در این رساله، با استفاده از کدنویسی در محیط MATLAB، به جای استفاده از کل یک ردلرزه، از ردلرزه‌های بخش‌بندی شده جهت بهبود روند همگرایی استفاده شده است. مراحل این وارون‌سازی در شکل ۴-۱ ارائه شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه، تعداد دلخواهی (N) مکعب مقاومت صوتی با استفاده

از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم تولید می‌شود. توجه شود که همه این مدل‌ها (تحقق‌ها) از لحاظ آماری، احتمال وقوع یکسان دارند و به داده‌های چاه نیز مقید شده‌اند. با استفاده از هم‌امیخت موجک لرزهای و سری بازتاب زمانی حاصل از این مدل‌های مقاومت صوتی، تعداد N مکعب لرزهای مصنوعی به دست می‌آید. در این مرحله، یک تقسیم‌بندی تصادفی برای ردلرزه‌ها انجام می‌شود. به این ترتیب امکان محاسبه ضریب همبستگی به صورت قطعه‌ای فراهم می‌آید. با محاسبه ضرایب همبستگی بین ردلرزه‌های قطعه‌بندی شده داده لرزهای مصنوعی و معادل آنها در داده لرزهای واقعی یک مکعب از مقادیر ضرایب همبستگی تولید می‌شود. در مرحله بعد، مقادیر مقاومت صوتی که دارای بالاترین ضرایب همبستگی بوده‌اند انتخاب شده و در یک مکعب جدید (برای استفاده در تکرار بعدی) جای می‌گیرند. در این زمان، تکرار اول به پایان رسیده است. در تکرار دوم، با بکارگیری شبیه‌سازی متوالی مستقیم توأمان، تعداد N مکعب مقاومت صوتی جدید با استفاده از مکعب منتخب مقاومت صوتی (به عنوان متغیر ثانویه) و مکعب ضرایب همبستگی مربوط به آن، تولید می‌شود. بعد از تولید مکعب سری زمانی و هم‌امیخت موجک لرزهای با آن، تعداد N مکعب لرزهای مصنوعی به دست می‌آید. در این مرحله، ضریب همبستگی کلی بین تک تک مکعب‌های لرزهای مصنوعی و مکعب لرزهای واقعی محاسبه می‌شود. در صورتی که هر یک از این ضرایب از عدد مشخصی بزرگتر باشند، عملیات متوقف شده و مکعب مقاومت صوتی مربوطه به عنوان خروجی معرفی می‌شود. در غیر این صورت، الگوریتم مجدداً به مرحله تقسیم‌بندی تصادفی رفته و تکرار بعدی برای تولید نسل بعدی آغاز می‌گردد. این روند ادامه می‌یابد تا بهترین مکعب مقاومت صوتی تولید شود.

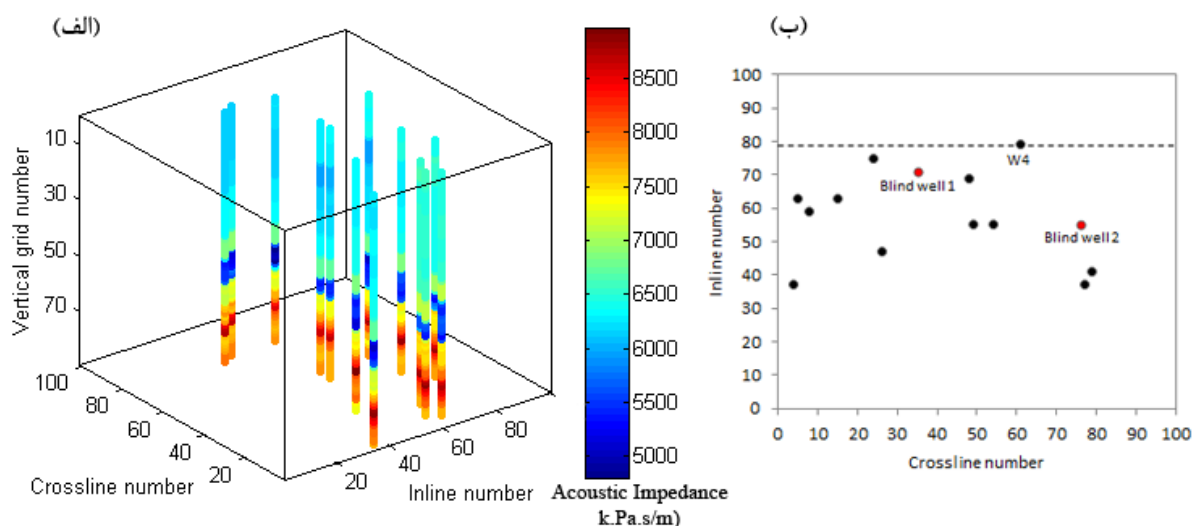
¹ Realizations



شکل ۴-۱- فلوچارت وارون سازی تصادفی لرزه ای کلی.

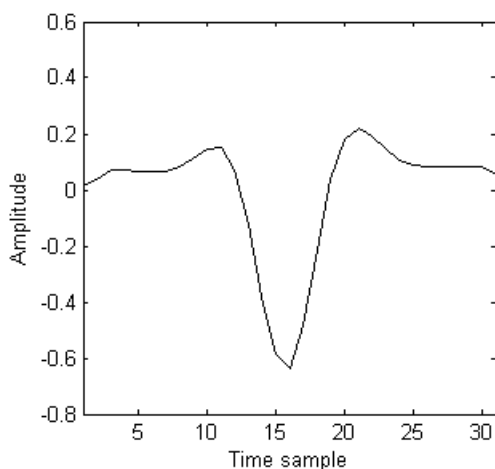
۳-۴- کاربرد بر روی داده‌های مصنوعی

داده‌های مصنوعی استفاده شده، دارای داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بعد از برانبارش و داده‌های مقاومت صوتی ۱۴ چاه می‌باشد. این داده‌ها توسط شرکت Petrobras برزیل تولید شده و از طریق دانشگاه لیسبون در اختیار نگارنده قرار داده شده است. شبکه وارون‌سازی در این داده‌ها، دارای ابعاد $101 \times 101 \times 90$ سلول است. ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. شکل ۲-۴ موقعیت چاه‌ها در شبکه وارون‌سازی را نشان می‌دهد. دو چاه برای آزمون چاه آزمایشی^۱ در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۴-ب). موجک لرزه‌ای مربوط به داده‌های لرزه‌ای مصنوعی در شکل ۳-۴ آورده شده است. این موجک نیز توسط دانشگاه لیسبون تأمین شده است. به منظور انجام عمل وارون‌سازی با استفاده از روش بیان شده، ابتدا باید واریوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها مدل‌سازی شوند. شکل ۴-۴ مدل‌های واریوگرام در راستای قائم (شکل ۴-۴-الف) و راستای افقی (شکل ۴-۴-ب) را نشان می‌دهد.

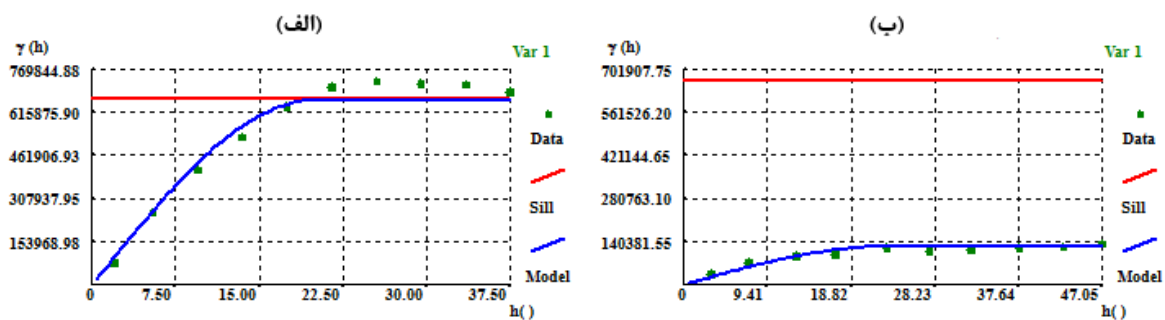


شکل ۲-۴-الف) نمای سه‌بعدی داده‌های چاه در شبکه وارون‌سازی، (ب) موقعیت چاه‌ها به صورت دوبعدی. موقعیت چاه‌های تست با رنگ قرمز مشخص شده است. خط‌چین در شکل ب، نشان‌دهنده محل مقطع قائم برای نمایش نتایج وارون‌سازی است.

¹ Blind well test



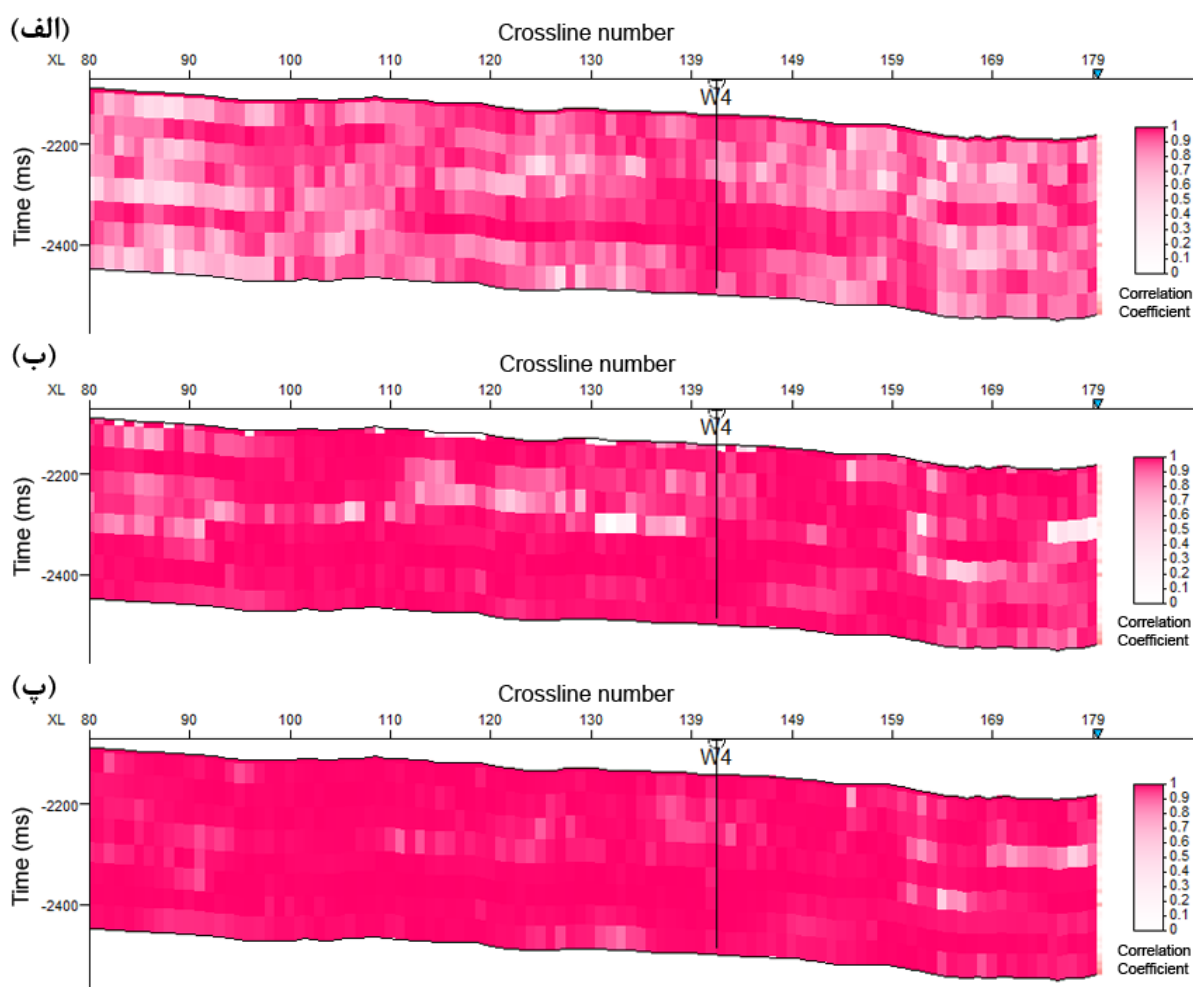
شکل ۴-۳- موجک لرزه‌ای داده‌های مصنوعی.



شکل ۴-۴- مدل‌سازی واریوگرام‌ها با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها، الف) در راستای قائم و ب) در راستای افقی. محور قائم از جنس واریانس مقاومت صوتی و محور افقی دارای واحد سلول است.

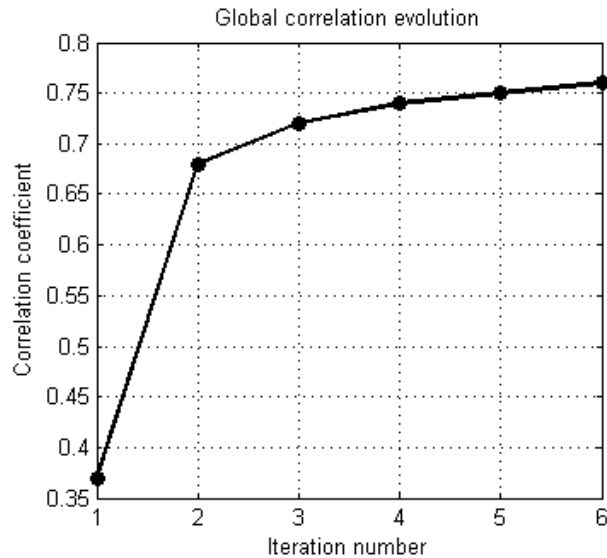
با اجرای الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای پایا، روند همگرایی ضرایب همبستگی بین ردلرزه‌های قطعه‌بندی شده مصنوعی و واقعی (ثبت شده) قابل مشاهده است. در شکل ۴-۵ مقطعی از این ضرایب در تکرار اول، سوم و ششم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بالا رفتن تکرار، ضرایب همبستگی بهبود یافته‌اند. برای بررسی روند کلی عملکرد وارون‌سازی در تکرارهای مختلف، ضریب همبستگی کل داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی (پاسخ مدل) و مشاهده‌ای (واقعی) را می‌توان محاسبه نمود. شکل ۴-۶ نمودار همگرایی این ضریب همبستگی کلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با انجام شش تکرار و در هر تکرار ۶۴ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی،

الگوریتم وارون‌سازی، همگرا شده است. ضریب همبستگی کلی بین پاسخ مدل وارون‌شده نهایی (بعد از تکرار ششم) با داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) ۰/۷۶ محاسبه شده است. همچنین، خطای جذر میانگین مربعات^۱ ۹/۴ درصد محاسبه شده است. با توجه به توزیع فضایی متنوع مقادیر مقاومت صوتی در شبکه وارون‌سازی، این خطای وارون‌سازی می‌تواند قابل قبول باشد.



شکل ۴-۵- ضریب همبستگی بین ردلرزه‌های مصنوعی و واقعی (ثبت شده) که به صورت قطعه‌ای محاسبه شده‌اند. (الف) تکرار اول، (ب) تکرار سوم و (پ) تکرار ششم. روند بهبود ضرایب همبستگی کاملاً مشهود است.

¹ Root mean square (RMS) error

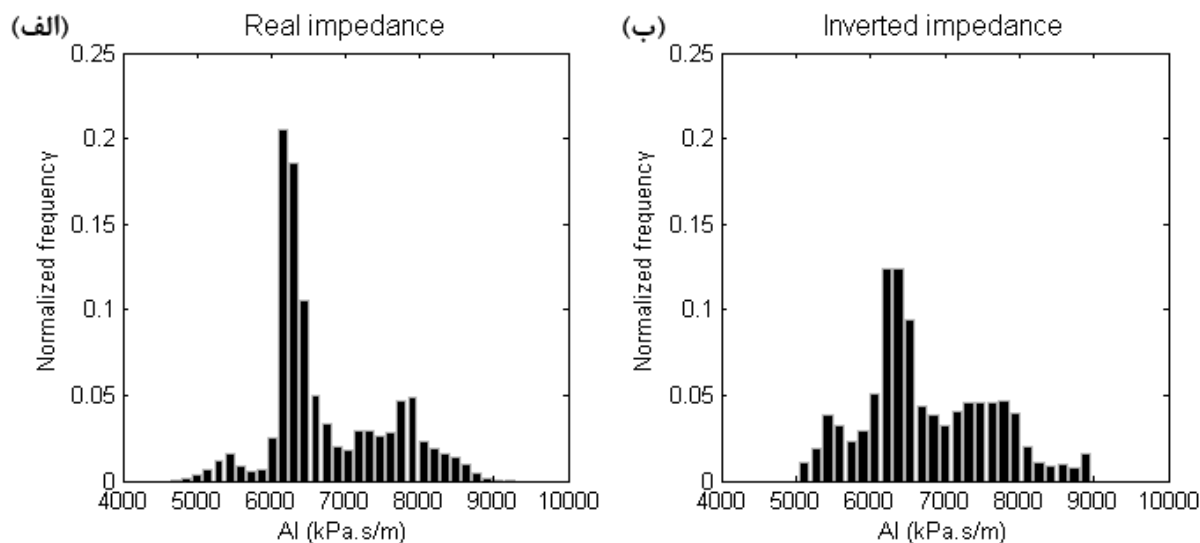


شکل ۴-۶- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده مصنوعی بدون نوفه در تکرارهای مختلف.

در مدل نهایی مقاومت صوتی در هر روش وارون‌سازی تصادفی زمین‌آماري می‌بایست، میانگین و واریانس مقاومت صوتی تولید شده مشابه داده‌های اولیه (چاه‌ها) بازتولید شود. این موضوع در جدول ۴-۱ نشان داده شده است. مطابق این جدول، مقادیر میانگین و واریانس مدل نهایی مقاومت صوتی وارون شده مشابه میانگین و واریانس داده‌های چاه می‌باشند. همچنین در شکل ۴-۷ هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مدل نهایی وارون شده ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هیستوگرام مقاومت صوتی چاه‌ها در مدل وارون شده تقریباً بازتولید شده است.

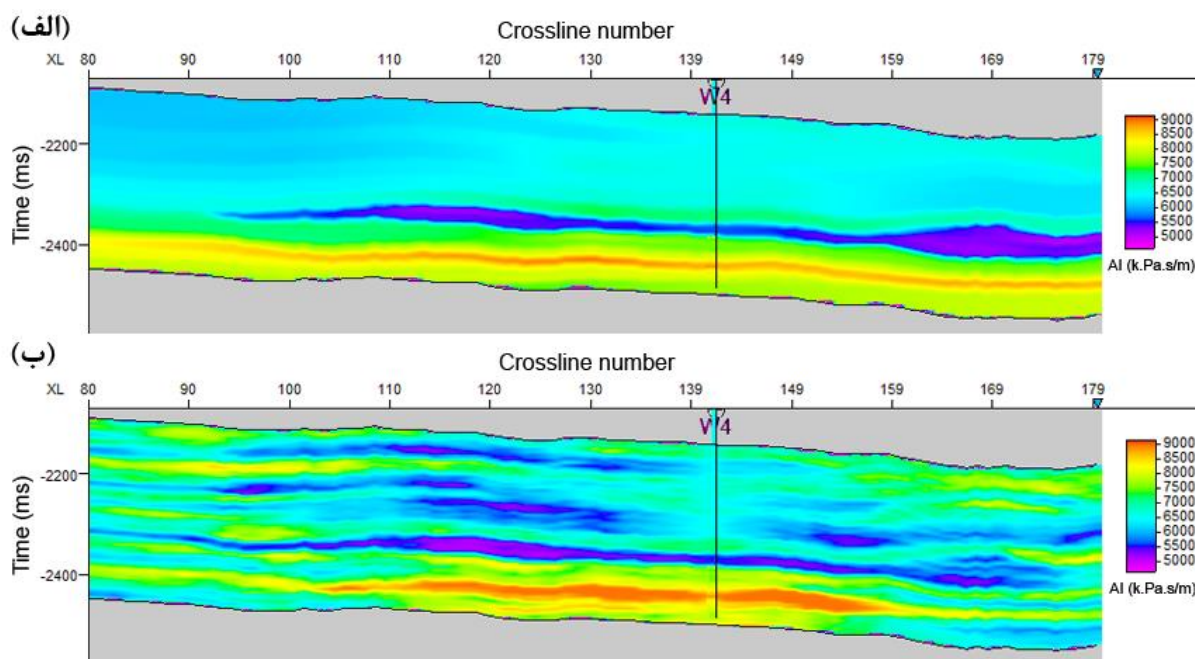
جدول ۴-۱- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون شده با استفاده از وارون‌سازی پایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون شده	۶۶۶۴	۷۱۷۶۶۶

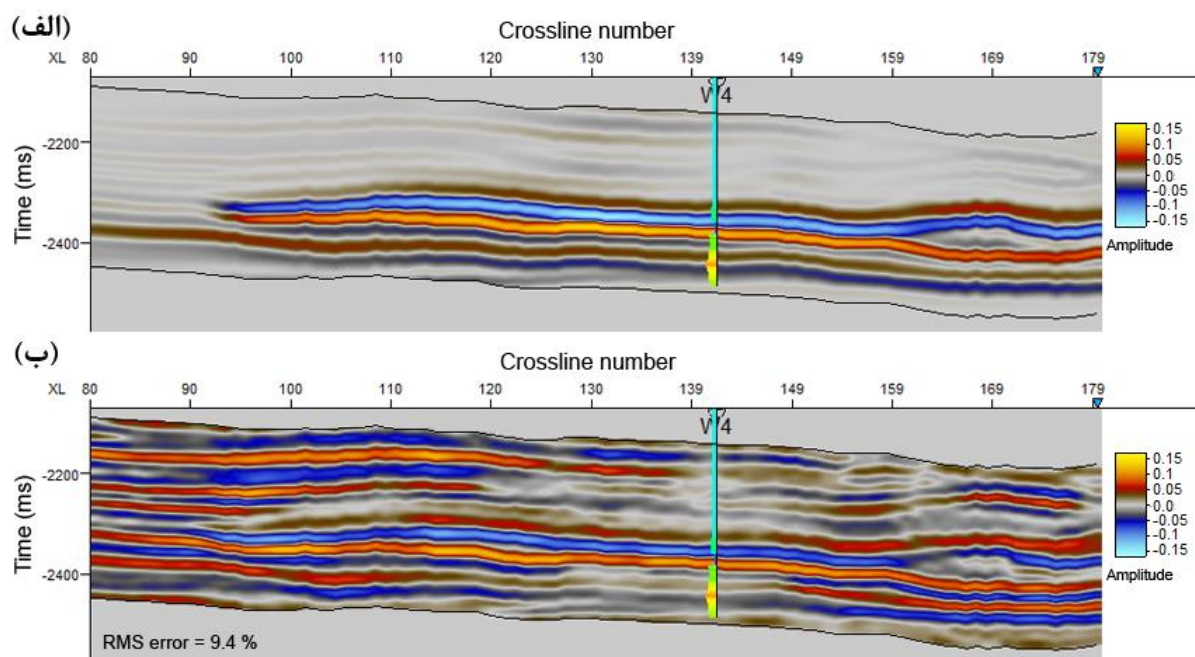


شکل ۴-۷- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) مدل وارون‌شده بر اساس وارون‌سازی لرزه‌ای پایا.

با توجه به اینکه در مورد داده‌های مصنوعی، مکعب مقاومت صوتی واقعی که برای تولید داده‌های لرزه‌ای مصنوعی استفاده شده است، در اختیار است، امکان مقایسه یک مقطع از مدل وارون‌شده با مقاومت صوتی واقعی در شکل ۴-۸ فراهم شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده هماهنگی قابل‌قبولی با مقدار واقعی دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود، این هماهنگی در نزدیکی چاه بیشتر است و با دور شدن از چاه، الگوریتم وارون‌سازی مقادیر مقاومت صوتی غیرمرتبط را تولید کرده است. با محاسبه ضرایب بازتاب و هم‌میخت موجک لرزه‌ای مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی قابل محاسبه است. شکل ۴-۹ مقایسه یک مقطع قائم لرزه‌ای مربوط به داده لرزه‌ای واقعی (شکل ۴-۹-الف) و داده لرزه‌ای وارون‌شده (شکل ۴-۹-ب) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که بازتابنده‌های اصلی در مدل وارون‌شده بازتولید شده‌اند. علاوه بر بازتابنده‌های اصلی، جزئیات بیشتری از بازتابنده‌های دیگر در مدل وارون‌شده وجود دارد. اگرچه این رویداد را می‌توان به طبیعت الگوریتم‌های وارون‌سازی تصادفی نسبت داد، اما در ادامه این فصل خواهیم دید که دامنه‌های لرزه‌ای قوی که به عنوان مثال در قسمت‌های بالایی مقطع شکل ۴-۹-ب دیده می‌شوند به دلیل پایا بودن الگوریتم وارون‌سازی استفاده شده هستند.



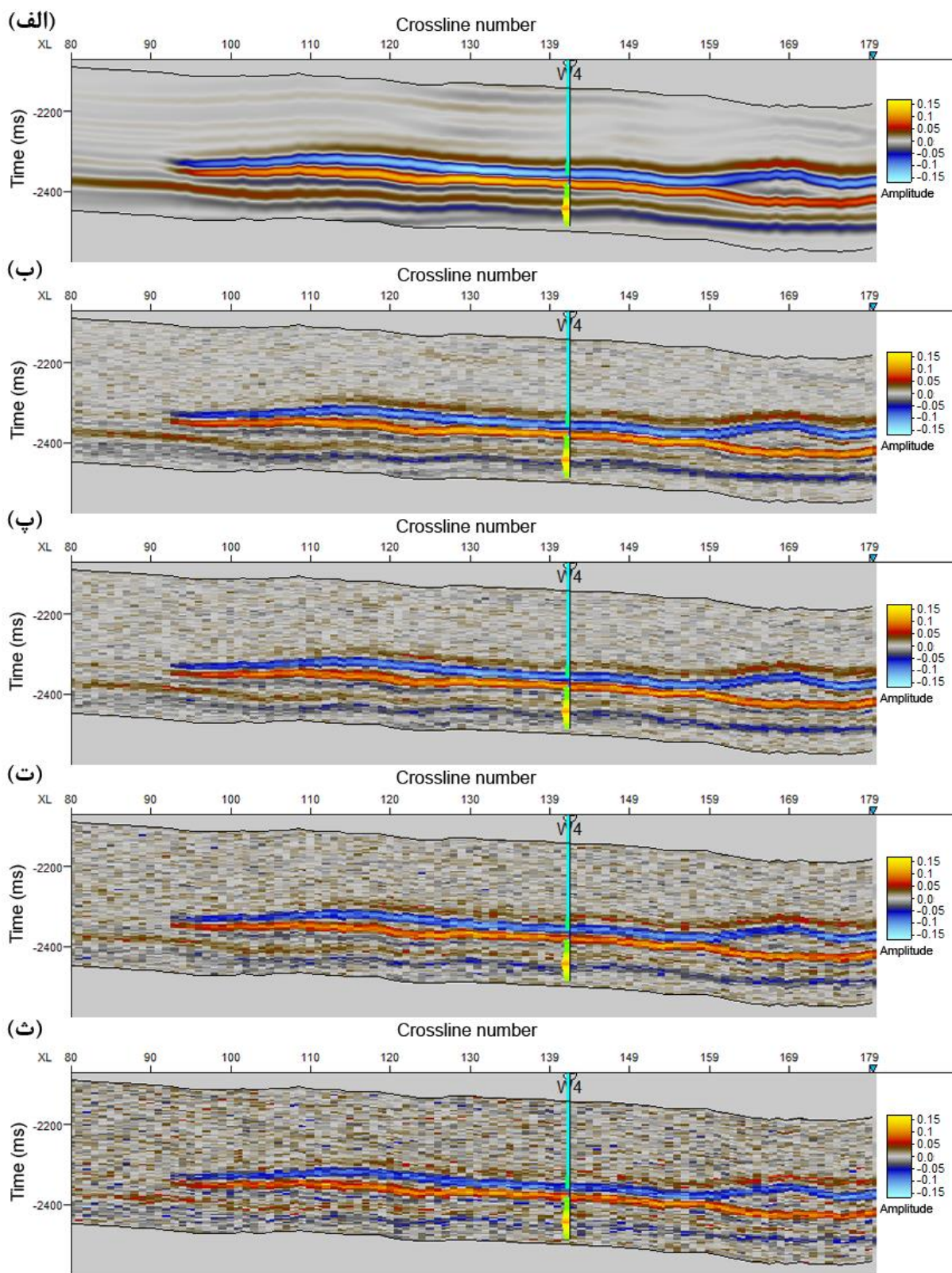
شکل ۴-۸- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی وارون شده مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. مقادیر مقاومت صوتی وارون شده در نزدیک چاه به مقدار واقعی نزدیک تر است.



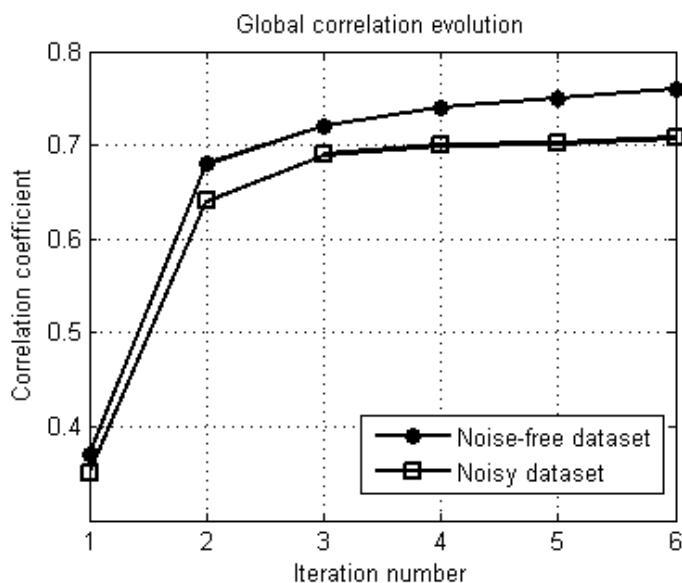
شکل ۴-۹- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای پایا. خطای وارون‌سازی ۹/۴ درصد محاسبه شده است.

به منظور بررسی نتایج وارون‌سازی در حضور نوفه، مکعب‌های لرزهای مختلف با اضافه کردن نوفه تصادفی (نوفه سفید^۱) با نسبت‌های سیگنال به نوفه ۱۶، ۸، ۴ و ۲ دسی‌بل تولید شده است. شکل ۴-۱۰ مقاطع مربوط به داده‌های لرزهای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت‌های مختلف سیگنال به نوفه را نشان می‌دهد. الگوریتم وارون‌سازی لرزهای پایا بر روی تک تک حالت‌های نوفه‌دار اعمال شده است. به منظور مقایسه حالت با و بدون نوفه، روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزهای واقعی و مصنوعی برای حالت بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل، در شکل ۴-۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ضریب همبستگی به دلیل حضور نوفه کاهش یافته ولی روند تغییرات تقریباً حفظ شده است. جدول ۴-۲ ضرایب همبستگی مربوط به حالت‌های مختلف داده‌های با و بدون نوفه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش شدت نوفه، ضریب همبستگی به طور نسبی کاهش جزئی داشته است اما در مورد نسبت سیگنال به نوفه ۲ دسی‌بل این کاهش شدیدتر بوده و به ۰/۶۵ رسیده است. بنابراین به نظر می‌رسد پایین‌ترین نسبت سیگنال به نوفه که نتایج قابل‌قبولی ارائه داده است، نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل می‌باشد. در جدول ۴-۳، میانگین و واریانس مقاومت صوتی در حالت‌های مختلف آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که وجود نوفه در داده لرزهای باعث می‌شود واریانس مقاومت صوتی وارون‌شده با واریانس مقاومت صوتی چاه‌ها اختلاف داشته باشد اما میانگین مقادیر مقاومت صوتی در همه حالت‌ها تقریباً برابر است. این پدیده را می‌توان به این صورت توضیح داد که افزودن نوفه به داده‌های لرزهای باعث بروز تغییرات در مقدار دامنه لرزهای و در نتیجه افزایش واریانس آن می‌شود اما ممکن است مقدار میانگین را تغییر چندانی ندهد. در نتیجه بعد از عمل وارون‌سازی، میانگین مقاومت صوتی داده‌های چاه‌ها توسط مقاومت صوتی وارون‌شده به خوبی بازتولید شده است. اما تأثیر حضور نوفه در داده‌های لرزهای به صورت افزایش واریانس مقاومت صوتی وارون‌شده نمایان شده است.

¹ White noise



شکل ۴-۱۰- مقاطع لرزه‌ای مربوط به داده لرزه‌ای الف) بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه ب) ۱۶، پ) ۸، ت) ۴ و ث) ۲ دسی‌بل.



شکل ۴-۱۱- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزهای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل در الگوریتم وارون‌سازی لرزهای پایا.

جدول ۴-۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده لرزهای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی در حالت‌های مختلف داده با و بدون نوفه وارون‌سازی لرزهای پایا.

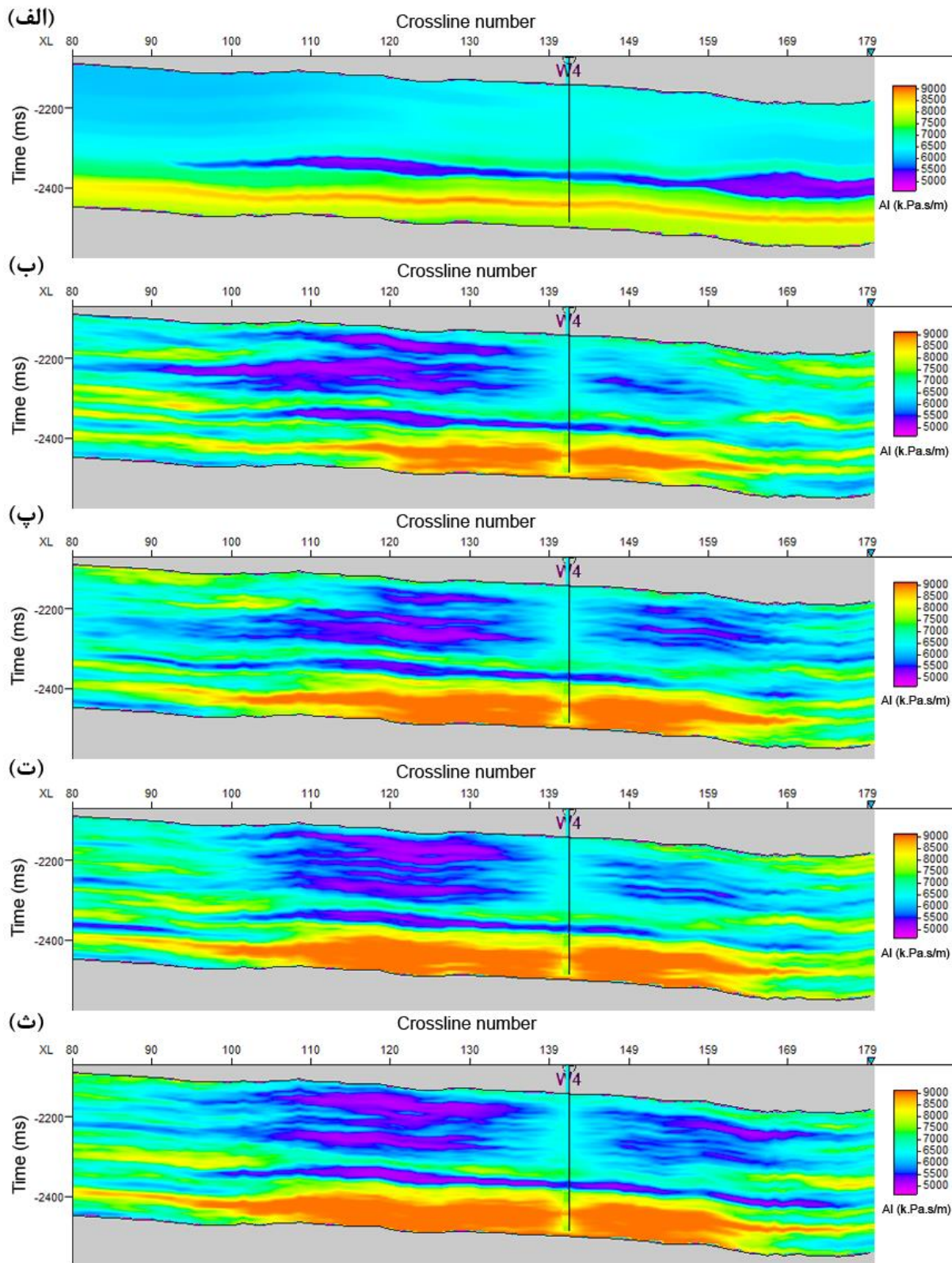
	داده لرزهای بدون نوفه	داده لرزهای نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه			
		SNR=16	SNR=8	SNR=4	SNR=2
ضریب همبستگی	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۶۵

جدول ۴-۳- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده مصنوعی با و بدون نوفه.

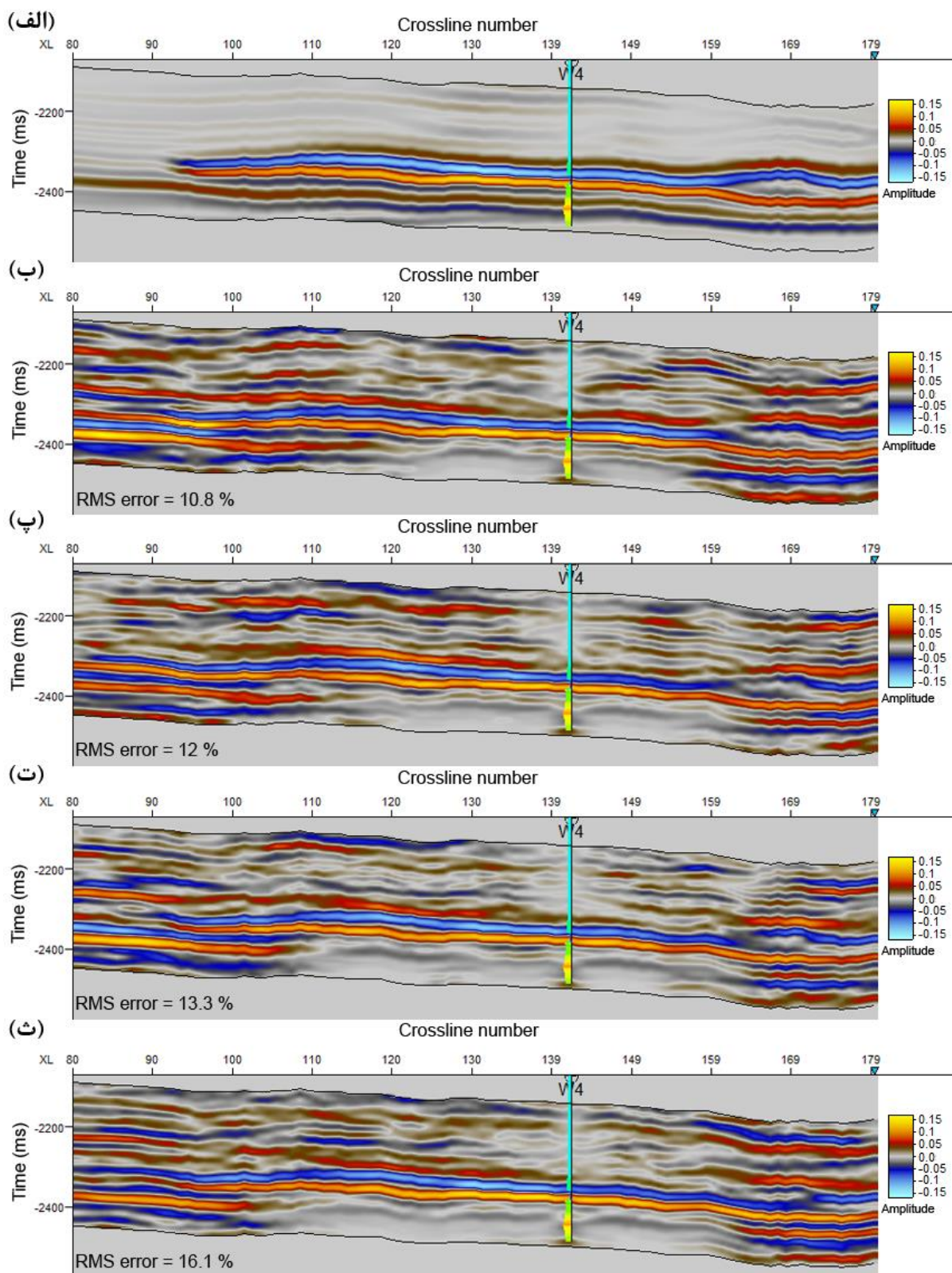
مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت بدون نوفه	۶۶۶۴	۷۱۷۶۶۶
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=16	۶۶۴۰	۸۱۲۱۹۱
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=8	۶۶۳۸	۸۶۸۳۷۸
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=4	۶۶۱۲	۹۳۴۷۶۷
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=2	۶۵۸۶	۱۰۴۲۶۴۷

شکل ۴-۱۲ مقاطع قائم مقاومت صوتی وارون شده در حالت‌های مختلف نسبت سیگنال به نوفه را با مقاومت صوتی واقعی مقایسه می‌کند. همان‌طور در این شکل مشخص است، وجود نوفه باعث ایجاد مقادیر غیر واقعی از مقاومت صوتی در نواحی دور از چاه شده است. در شکل ۴-۱۳ مقاطع لرزه‌ای متناظر ارائه شده است. اگرچه بازتابنده‌های اصلی در همه حالت‌ها بازتولید شده اما وجود نوفه باعث پدید آمدن بازتابنده‌های غیرپیوسته در مناطق مختلف از جمله قسمت‌های بالایی مقطع شده است.

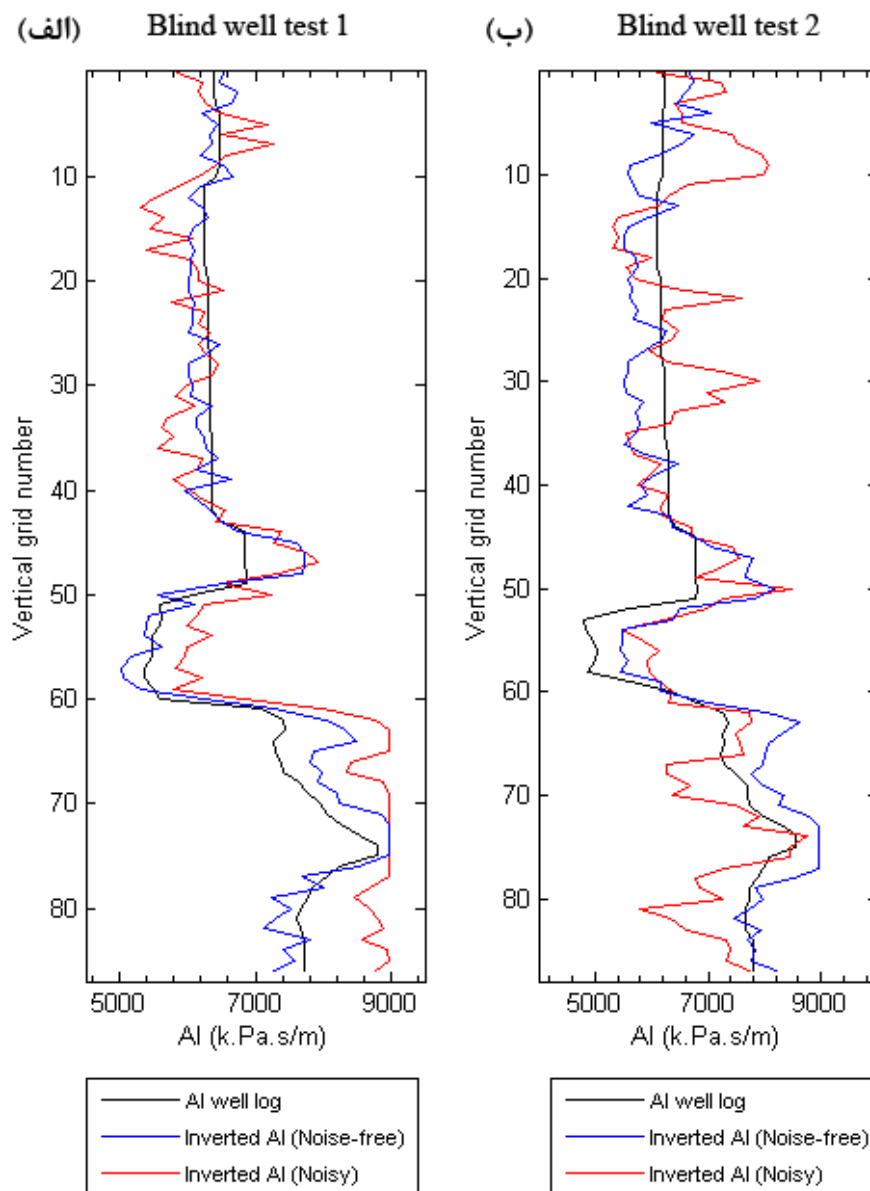
برای تحلیل بهتر نتایج وارون‌سازی، آزمون چاه آزمایشی برای دو چاه انجام شده است. داده‌های این دو چاه از فرایند وارون‌سازی کنار گذاشته شده و سپس مقادیر مقاومت صوتی وارون شده در محل‌های متناظر با محل این دو چاه در دو حالت داده بدون نوفه و داده نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل استخراج شده است. نمودارهای مقاومت صوتی در شکل ۴-۱۴ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی در هر دو چاه مطابقت دارد. این انطباق در حالت داده نوفه‌دار کاهش یافته است. همچنین، در جدول ۴-۴ ضرایب همبستگی بین داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون شده ارائه شده است. در حالت داده‌های بدون نوفه، این ضرایب همبستگی در هر دو چاه آزمایشی بالاست. با حضور نوفه، ضرایب همبستگی خصوصاً در مورد چاه آزمایشی شماره ۲ کاهش یافته است. بنابراین حضور نوفه در داده‌های لرزه‌ای می‌تواند نتایج وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، درصد خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون شده در جدول ۴-۵ ارائه شده است. مطابق این جدول، درصد خطا در حضور نوفه افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۲- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی و مقطع قائم متناظر وارون‌شده مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه (ب) ۱۶، (پ) ۸، (ت) ۴ و (ث) ۲ دسی‌بل.



شکل ۴-۱۳- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی و مقطع قائم متناظر از مکعب لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه (ب) ۱۶، (پ) ۸، (ت) ۴ و (ث) ۲ دسی‌بل. خطای وارون‌سازی در هر حالت ارائه شده است.



شکل ۴-۱۴- مقایسه نتایج وارون‌سازی داده‌های با و بدون نوفه در داده‌های واقعی موجود در محل چاه‌های آزمایشی، (الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و (ب) چاه آزمایشی شماره ۲.

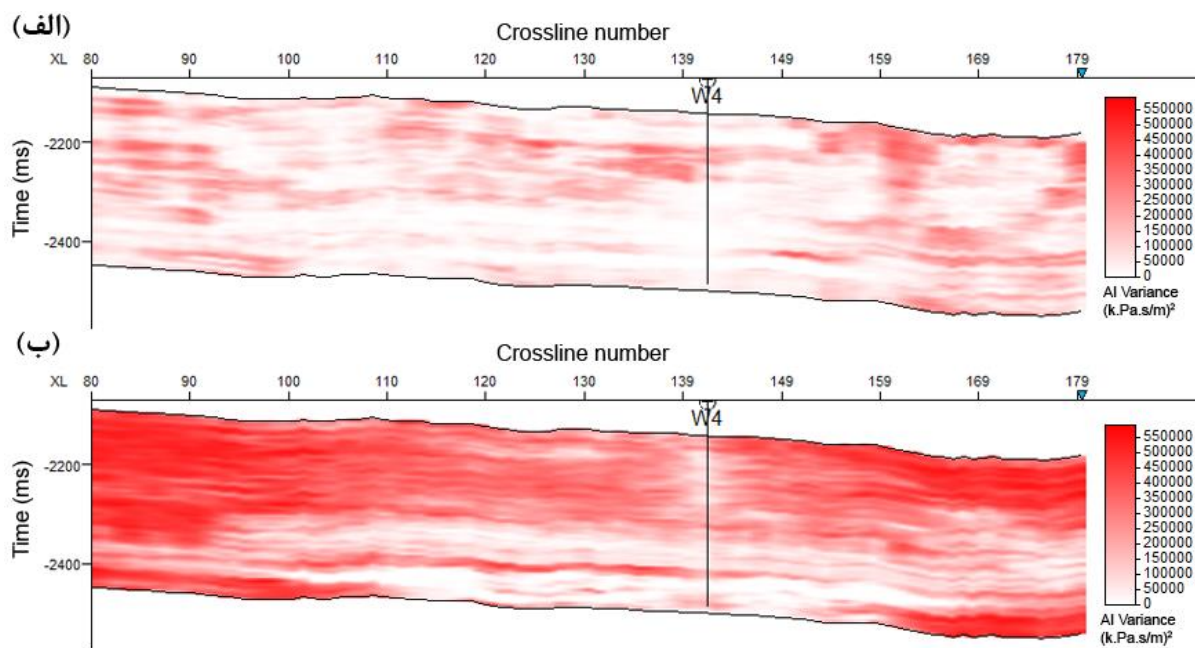
جدول ۴-۴- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده لرزهای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	داده لرزهای بدون نوفه	داده لرزهای نوفه‌دار (SNR=4)
شماره ۱	۰/۹۳	۰/۸۳
شماره ۲	۰/۸۷	۰/۵۶

جدول ۴-۵- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون‌سازی پایا در مورد داده لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

	داده لرزه‌ای بدون نوفه	داده لرزه‌ای نوفه‌دار (SNR=4)
چاه آزمایشی شماره ۱	۸/۷	۱۷/۳
چاه آزمایشی شماره ۲	۱۳/۳	۱۷/۰

یکی از مزایای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای، تولید چندین مدل خروجی در تکرار نهایی با ضرایب همبستگی مشابه است. با استفاده از این داده‌ها می‌توان واریانس مقاومت صوتی در هر سلول را محاسبه نمود و یک مدل واریانس به دست آورد. این عمل را تحلیل عدم قطعیت می‌نامند. شکل ۴-۱۵ دو مقطع از مدل واریانس مربوط به ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم در حالت داده‌های بدون نوفه (شکل ۴-۱۵-الف) و داده‌های نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل (شکل ۴-۱۵-ب) را نشان می‌دهد. افزایش مقدار واریانس به معنی افزایش عدم قطعیت در مورد مقادیر مقاومت صوتی وارون شده است. شکل ۴-۱۵ نشان می‌دهد که عدم قطعیت مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار افزایش قابل توجهی داشته است.



شکل ۴-۱۵- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم در الگوریتم وارون‌سازی پایا، الف) مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه و ب) داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. وجود نوفه باعث افزایش واریانس و در نتیجه افزایش عدم قطعیت در مورد مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده شده است.

۴-۴- کاربرد بر روی داده‌های واقعی

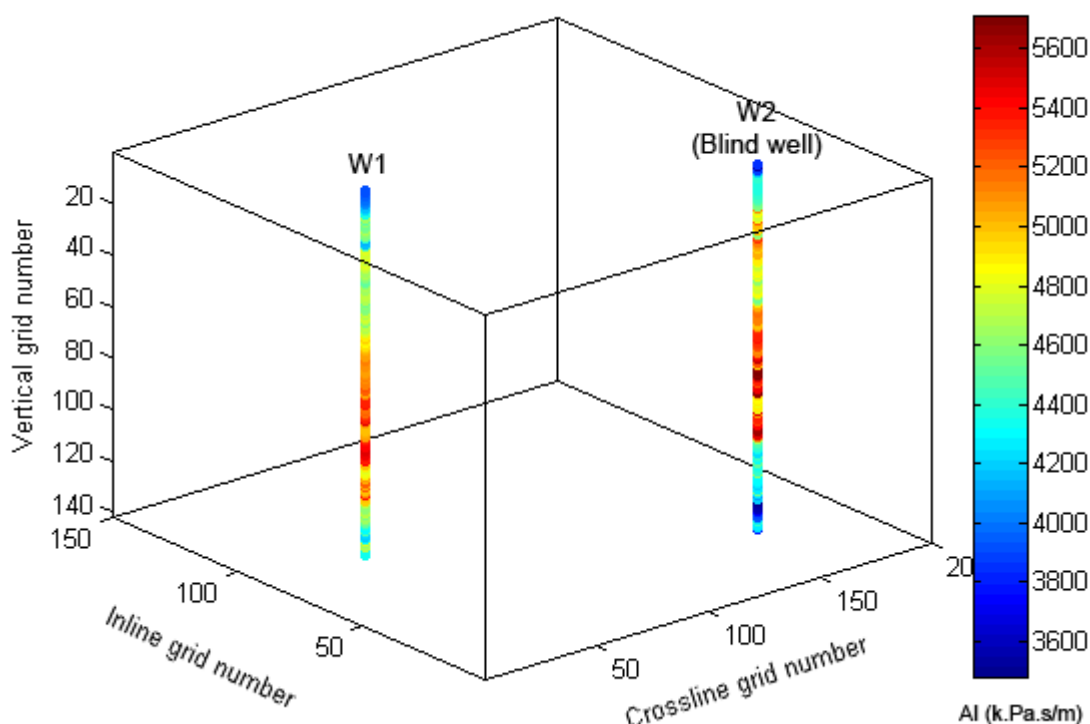
داده‌های واقعی مورد استفاده برای وارون‌سازی، قسمتی از داده‌های اکتشافی مربوط به یک میدان گازی در دریای شمال و متعلق به کشور هلند است (شکل ۴-۱۶). این داده‌ها در سال ۱۹۸۷ برای اکتشاف یک مخزن گازی دلتایی-رودخانه‌ای مربوط به دوره‌های زمین‌شناسی ژوراسیک تا کواترنری برداشت شده است [Overeem et al. 2001, Schroot and Schüttenhelm 2003, Sørensen et al. 1997]. قسمتی از این داده‌ها که لایه‌های بالایی این مخزن گازی است، توسط دانشگاه لیسبون در اختیار نگارنده قرار گرفته است. این داده‌ها شامل داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و نگارهای مقاومت صوتی دو چاه است. شبکه وارون‌سازی به ابعاد $143 \times 200 \times 150$ سلول در نظر گرفته شده است. ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. شکل ۴-۱۷ موقعیت چاه‌ها در

شبکه وارون‌سازی را نشان می‌دهد. یک چاه برای انجام عمل وارون‌سازی و چاه دیگر برای آزمون چاه آزمایشی در نظر گرفته شده است.

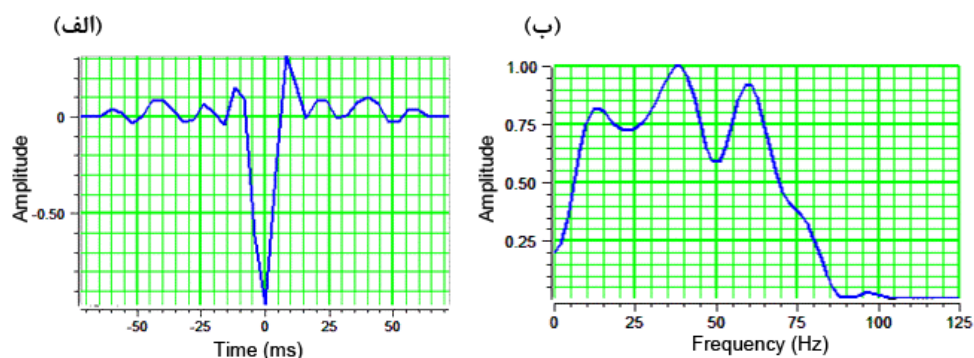
یکی از مراحل اساسی در وارون‌سازی لرزه‌ای تخمین موجک است. محتوای فرکانسی و فاز موجک می‌تواند نتایج وارون‌سازی و کیفیت تحلیل لایه‌های زیرسطحی را تحت تأثیر قرار دهد. تخمین موجک با استفاده از یک فیلتر هدایت می‌شود. این فیلتر ضرایب بازتاب به دست آمده از داده‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای ثبت شده در محل چاه را بهینه می‌کند. با کمینه‌سازی اختلاف بین داده‌های لرزه‌ای و هم‌میخت موجک لرزه‌ای در سری بازتاب در محل چاه، بهترین موجک استخراج می‌شود [Sabeti et al. 2016]. شکل ۴-۱۸، موجک لرزه‌ای استخراج شده و طیف دامنه آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در دریای شمال.



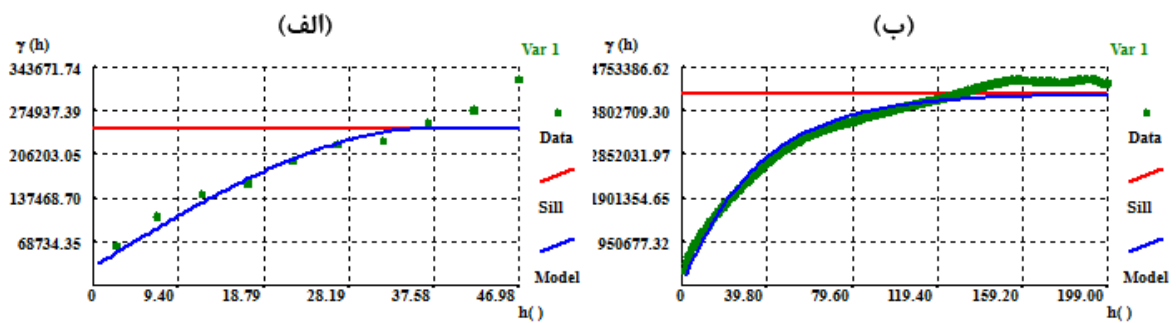
شکل ۴-۱۷- نمای سه‌بعدی شبکه وارون‌سازی و موقعیت چاه‌ها مربوط به داده واقعی.



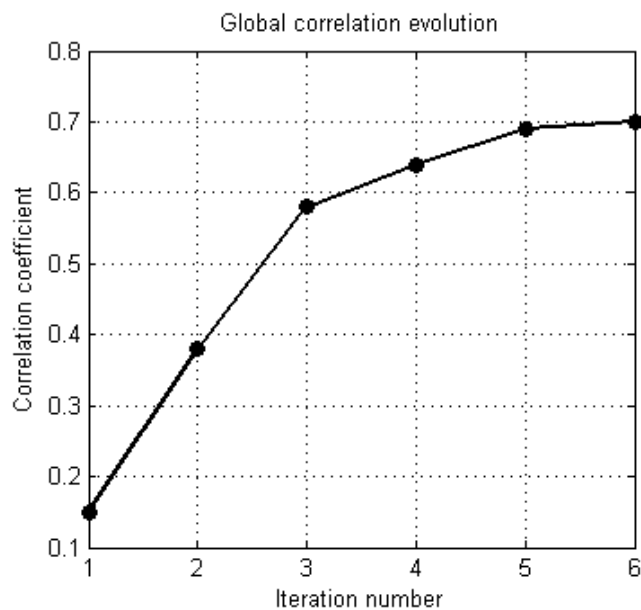
شکل ۴-۱۸- (الف) موجک لرزه‌ای استخراج شده مربوط به داده واقعی و (ب) طیف دامنه آن [Sabeti et al. 2016].

قبل از اجرای الگوریتم وارون‌سازی پایا بر روی داده‌های واقعی، ابتدا واریوگرام‌های قائم و افقی مدل‌سازی شده است. توجه شود که به دلیل عدم وجود داده کافی در راستای افقی، مدل‌سازی واریوگرام افقی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای انجام شده است. شکل ۴-۱۹ نمودار این واریوگرام‌ها را نشان می‌دهد. با اجرای الگوریتم وارون‌سازی پایا بر روی داده‌های واقعی با انجام شش تکرار و در هر تکرار ۶۴ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی، همگرایی صورت گرفت. روند این همگرایی در شکل ۴-۲۰

نمایش داده شده است. جدول ۴-۶ مقادیر میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، الگوریتم وارون‌سازی مقدار میانگین را به خوبی بازتولید کرده است. اختلاف مشاهده شده در بازتولید واریانس مقاومت صوتی ممکن است مربوط به نوفه‌های لرزه‌ای باشد. در شکل ۴-۲۱ هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون شده ارائه شده است. شکل کلی هیستوگرام مقاومت صوتی وارون شده مشابه داده‌های چاه می‌باشد.



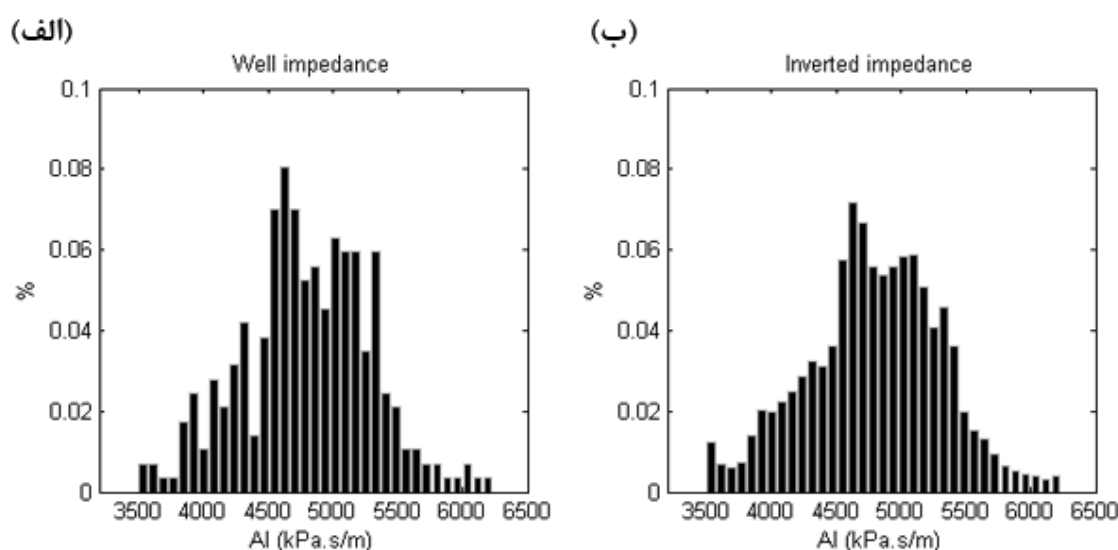
شکل ۴-۱۹- مدل‌سازی واریوگرام‌ها مربوط به داده‌های واقعی. الف) واریوگرام قائم با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه و ب) واریوگرام افقی با استفاده از لرزه‌ای.



شکل ۴-۲۰- روند همگرایی الگوریتم وارون‌سازی مربوط به داده واقعی.

جدول ۴-۶- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا مربوط به داده واقعی.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه	۴۸۰۱	۲۴۸۸۴۰
مقاومت صوتی وارون‌شده	۴۷۹۹	۲۶۴۸۶۰

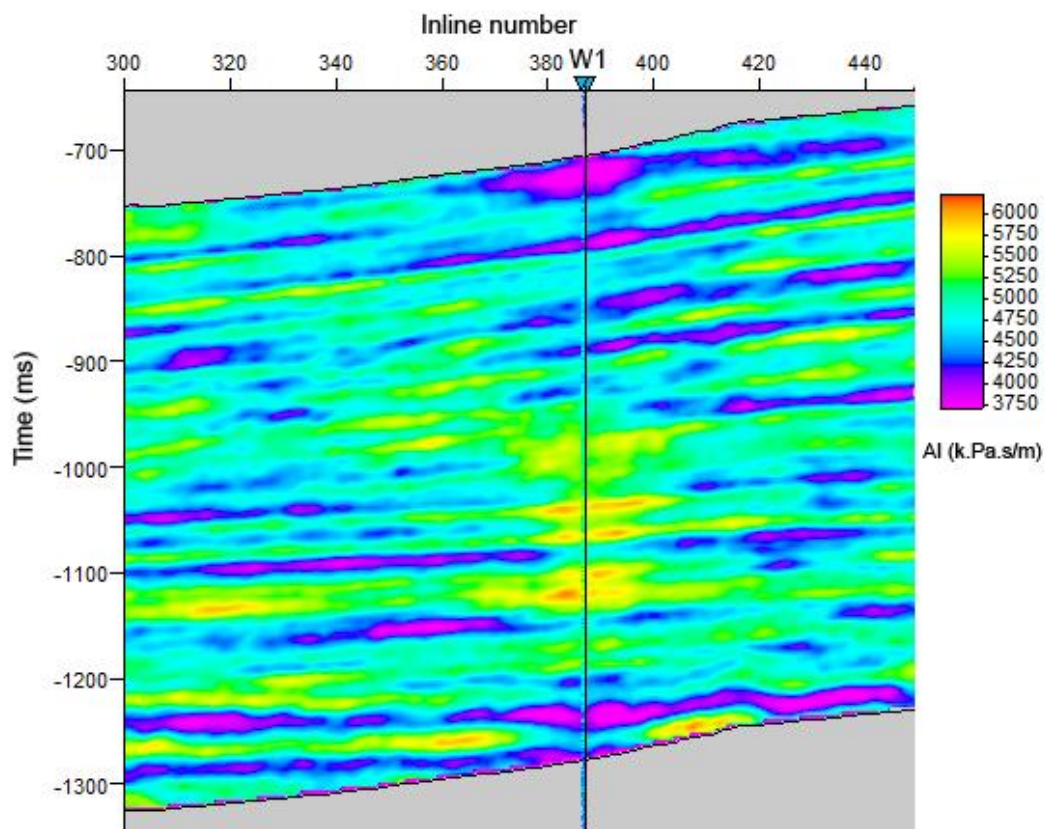


شکل ۴-۲۱- هیستوگرام‌های مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. الف) داده‌های چاه و ب) داده‌های وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا.

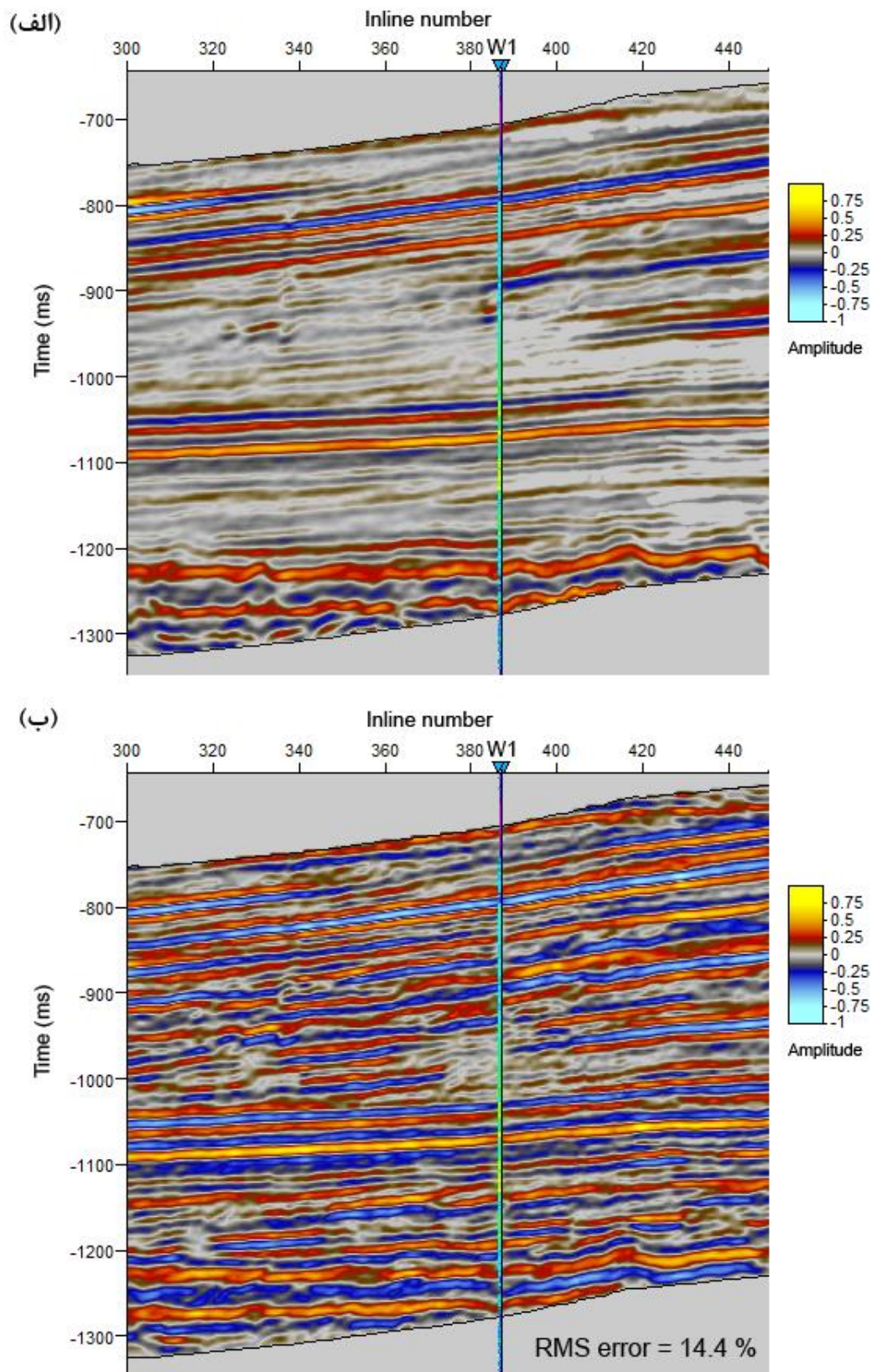
یک مقطع قائم از مدل نهایی مقاومت صوتی که از محل چاه شماره یک می‌گذرد، برای نمایش نتایج وارون‌سازی انتخاب شده است (شکل ۴-۲۲). به طور کلی، روند مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده پیوسته و مناسب است اما در محل چاه و در بعضی مناطق دیگر این پیوستگی دچار نقصان شده است. دلیل این امر را می‌توان ضریب همبستگی پایین داده‌های چاه با داده‌های لرزه‌ای در این مناطق عنوان نمود. همچنین موجک استخراج شده نیز می‌تواند در پدید آمدن این ناپیوستگی مؤثر باشد. اما با توجه به اینکه وارون‌سازی فقط با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی یک چاه انجام شده است، این نتایج می‌تواند قابل قبول باشد. شکل ۴-۲۳ مقاطع لرزه‌ای مرتبط با مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده و همچنین داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی کلی بین

داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی (پاسخ مدل) و داده‌های لرزه‌ای واقعی ۰/۶۲ و خطای جذر میانگین مربعات ۱۴/۴ بوده است. مطابق شکل ۴-۲۳، بازتابنده‌های اصلی در مدل نهایی وارون‌شده به خوبی بازتولید شده‌اند.

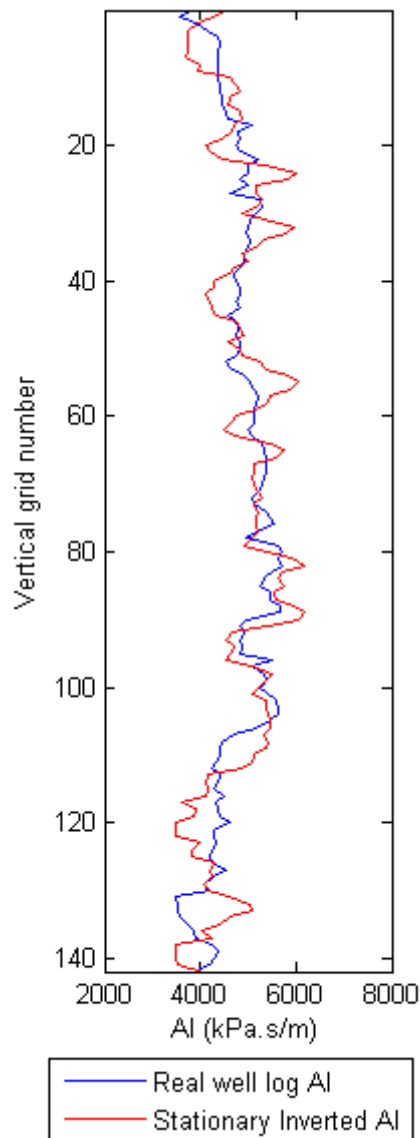
برای تحلیل بهتر نتایج وارون‌سازی، از داده‌های تنها چاه آزمایشی که در وارون‌سازی وارد نشده است، استفاده شد. نمودارهای مقاومت صوتی این چاه و مقادیر وارون‌شده در شکل ۴-۲۴ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه آزمایشی مطابقت خوبی دارد. ضریب همبستگی این دو نمودار ۰/۶۴ و خطای جذر میانگین مربعات ۱۸/۷ درصد محاسبه شده است. با توجه به محدود بودن داده‌های مقیدکننده (داده‌های یک چاه) در فرایند وارون‌سازی، این نتیجه قابل قبول است.



شکل ۴-۲۲- مقطع قائم از مکعب مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا مربوط به داده‌های واقعی. لایه‌بندی و توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی قابل قبول است.



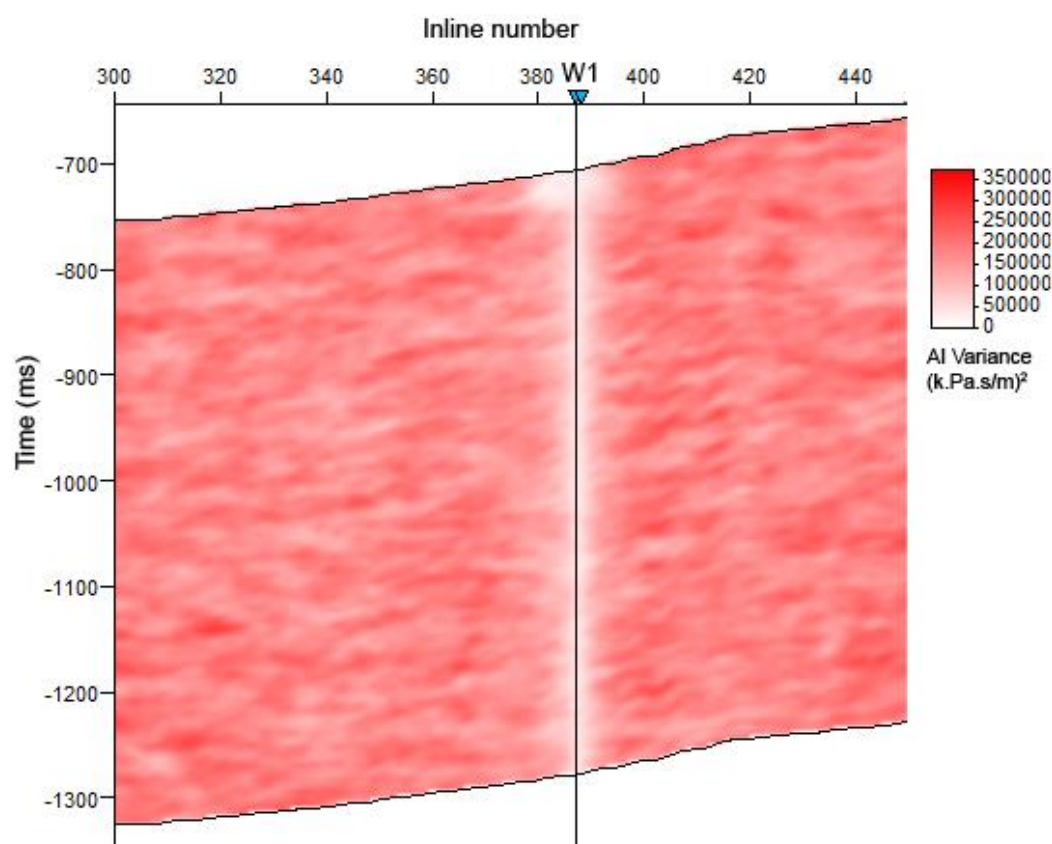
شکل ۴-۲۳- الف) یک مقطع قائم از داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع قائم متناظر از داده لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده توسط وارون‌سازی پایا) مربوط به داده واقعی. خطای وارون‌سازی ۱۴/۴ درصد محاسبه شده است.



شکل ۴-۲۴- مقایسه نتایج وارون‌سازی پایا با داده‌های واقعی مربوط به چاه آزمایشی.

همان‌طور که در مورد داده‌های مصنوعی شرح داده شد، با محاسبه واریانس مربوط به خروجی‌های تکرار نهایی الگوریتم وارون‌سازی، امکان تحلیل عدم قطعیت به وجود می‌آید. در مورد داده‌های واقعی این عمل انجام شده و نتیجه آن در یک مقطع قائم که از چاه W1 گذر کرده، در شکل ۴-۲۵ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲۵ مشاهده می‌شود، مقادیر واریانس در نزدیک چاه به صفر میل کرده و به طور کلی در نقاط دور از چاه افزایش یافته است. دلیل این امر، مقید بودن وارون‌سازی

تصادفی به داده‌های مقاومت صوتی در محل چاه W1 است. در نتیجه، مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده در نزدیکی محل این چاه در تحقیقات مختلف مشابه بوده و باعث کاهش واریانس می‌گردد. به طور کلی، از نقشه‌های عدم قطعیت مربوط به وارون‌سازی لرزه‌ای، می‌توان در مراحل بعدی اکتشاف و حفاری مخازن هیدروکربوری و تهیه نقشه‌های ریسک‌پذیری فنی و اقتصادی استفاده نمود. البته در این فرایند، بسیاری از اطلاعات دیگر اکتشافی مورد نیاز است.



شکل ۴-۲۵- مقطع قائم از مکعب واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی پایا در تکرار نهایی در مورد داده‌های واقعی. مقدار واریانس در مناطق دور از چاه افزایش یافته است.

در این فصل، روش وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا ارائه شد و نتایج بکارگیری آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی تشریح گردید. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این روش وارون‌سازی که از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم رایج استفاده می‌کند، پارامترهای پیوستگی فضایی و توابع توزیع احتمالی به صورت کلی محاسبه شده و در فرایند وارون‌سازی استفاده می‌شود. در فصل آینده تلاش می‌شود،

الگوریتم وارون‌سازی ناپایا ارائه شود که در آن، پارامترهای مذکور به صورت محلی محاسبه شده و وارد الگوریتم وارون‌سازی می‌شوند.

فصل پنجم

ارائه الگوریتم وارون سازی تصادفی لرزه‌ای

سه بعدی ناپایا

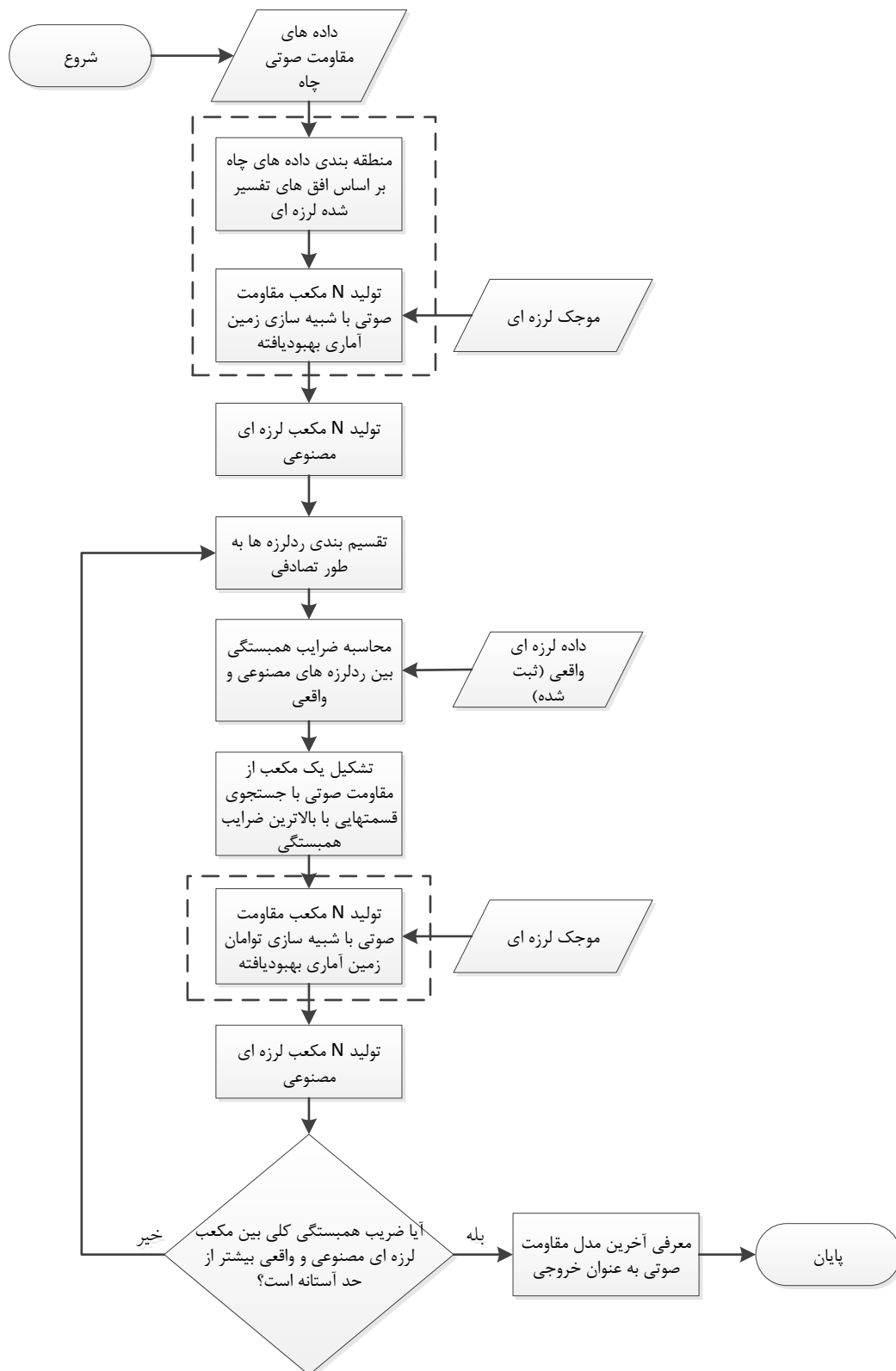
۵-۱- مقدمه

در این فصل، روش جدید وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته (فصل سوم) با کدنویسی در محیط MATLAB ارائه شده و نتایج بکارگیری بر روی داده مصنوعی و واقعی تحلیل شده است. در روش وارون‌سازی ناپایا از پارامترهای پیوستگی فضایی و همین‌طور توابع توزیع احتمالی محلی برای مقادیر مقاومت صوتی استفاده شده است. در ادامه این فصل، ابتدا روش وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا تشریح شده و الگوریتم آن خواهد شد و در ادامه کاربرد آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۵-۲- وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای سه‌بعدی ناپایا

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش‌های وارون‌سازی پایا از پارامترهای پیوستگی فضایی یکسان برای انجام عمل شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده می‌کنند. همچنین، تابع توزیع احتمالی برای نمونه‌برداری مقادیر شبیه‌سازی شده نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. این فرضیه اگرچه به کنترل و کاهش قابل ملاحظه حجم محاسباتی روش‌های پایا می‌انجامد، اما معمولاً با ساختار پیچیده لایه‌های زیرسطحی مطابقت ندارد. زیرا خواص پتروفیزیکی لایه‌های زیرسطحی ممکن است تغییرات جانبی و قائم داشته باشد. در چنین شرایطی با مطالعه دقیق‌تر آماره‌های میانگین و واریانس داده‌های لرزه‌ای و چاه‌نگاری می‌توان یک عمل تقسیم‌بندی یا منطقه‌بندی انجام داد که در آن تغییرات لیتولوژیکی در هر منطقه تغییرات افقی و قائم مناسب‌تری داشته باشد. در این حالت، با مدل‌سازی واریوگرام‌های افقی و قائم در هر منطقه و ورود آن به الگوریتم وارون‌سازی تصادفی به صورت جداگانه، امکان مطالعه دقیق‌تر (ناپایا) خواص الاستیکی لایه‌های زیرسطحی به وجود خواهد آمد. توجه شود که در این حالت، عمل وارون‌سازی به صورت کلی و برای کل منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود اما برای شبیه‌سازی، از پارامترهای پیوستگی فضایی محلی استفاده می‌گردد. شکل ۵-۱ فلوجارت ارائه شده مربوط به وارون‌سازی ناپایا در این مطالعه را نشان می‌دهد. فلوجارت استفاده شده در روش وارون‌سازی تصادفی

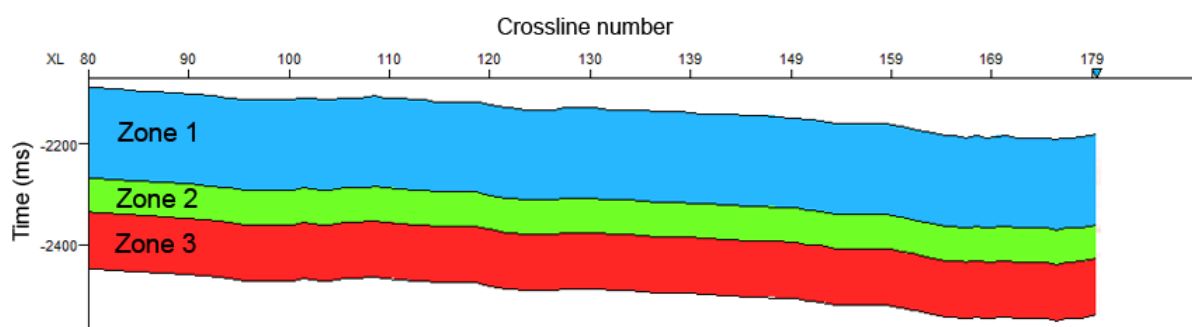
لرزه‌ای ناپایا مشابه روش پایا (شکل ۴-۱) با اندکی تغییرات کلیدی است. این تغییرات که به صورت خط‌چین در شکل ۵-۱ ارائه شده در دو قسمت اصلی رخ می‌دهد. اول، منطقه‌بندی داده‌های مقاومت صوتی چاه است. این منطقه‌بندی به شیوه‌های مختلف و براساس اطلاعات اکتشافی از حوزه‌های گوناگون قابل انجام است. در این تحقیق، منطقه‌بندی بر اساس افق‌های تفسیر شده لرزه‌ای و همین‌طور مقدار مقاومت صوتی صورت گرفته است. بدین صورت، داده‌های مقاومت صوتی چاه تفکیک شده و به صورت جداگانه برای انجام مدل‌سازی وارویوگرام ذخیره می‌شود. دوم، هنگام انجام عمل شبیه‌سازی متوالی مستقیم است که در حالت ناپایا، از الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته (بخش ۳-۴-۲) که در این رساله ارائه شده است، استفاده می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم بهبودیافته با استفاده از مدل‌های وارویوگرام محلی که برای هر منطقه به صورت مجزا دریافت می‌کند، عمل شبیه‌سازی زمین‌آماری را انجام می‌دهد. بنابراین با انجام این عمل، تغییرات محلی در فرایند وارون‌سازی لرزه‌ای وارد می‌شود. بدین ترتیب وارون‌سازی لرزه‌ای مناسب با تغییرات معنی‌دار مقاومت صوتی انجام خواهد شد و مدل نهایی ممکن است مطابقت بیشتری با داده‌های لرزه‌ای ثبت شده داشته باشد.



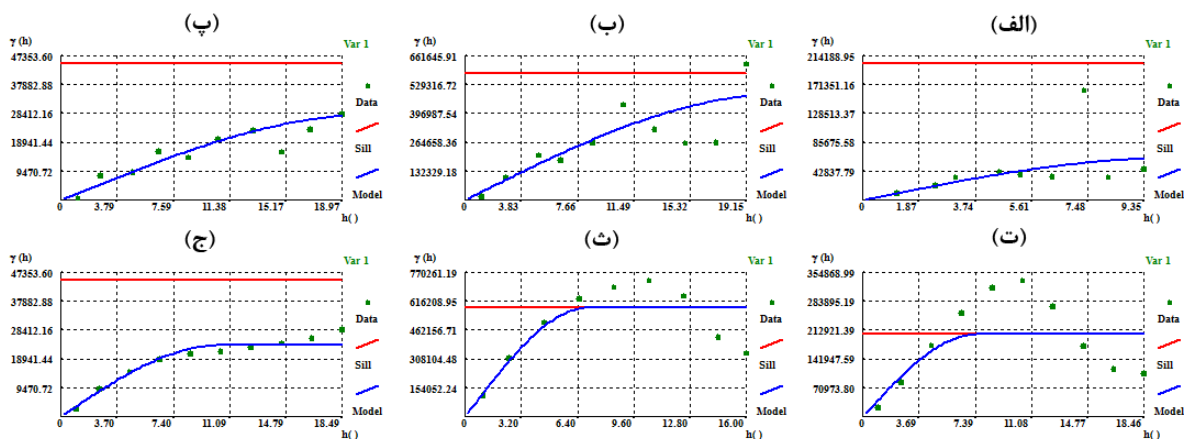
شکل ۵-۱- فلوچارت روش ارائه شده برای وارون سازی تصادفی لرزه ای ناپایا. قسمت های داخل خط چین، تفاوت های بنیادی بین روش وارون سازی پایا و ناپایا را مشخص می کند.

۵-۳- کاربرد بر روی داده‌های مصنوعی

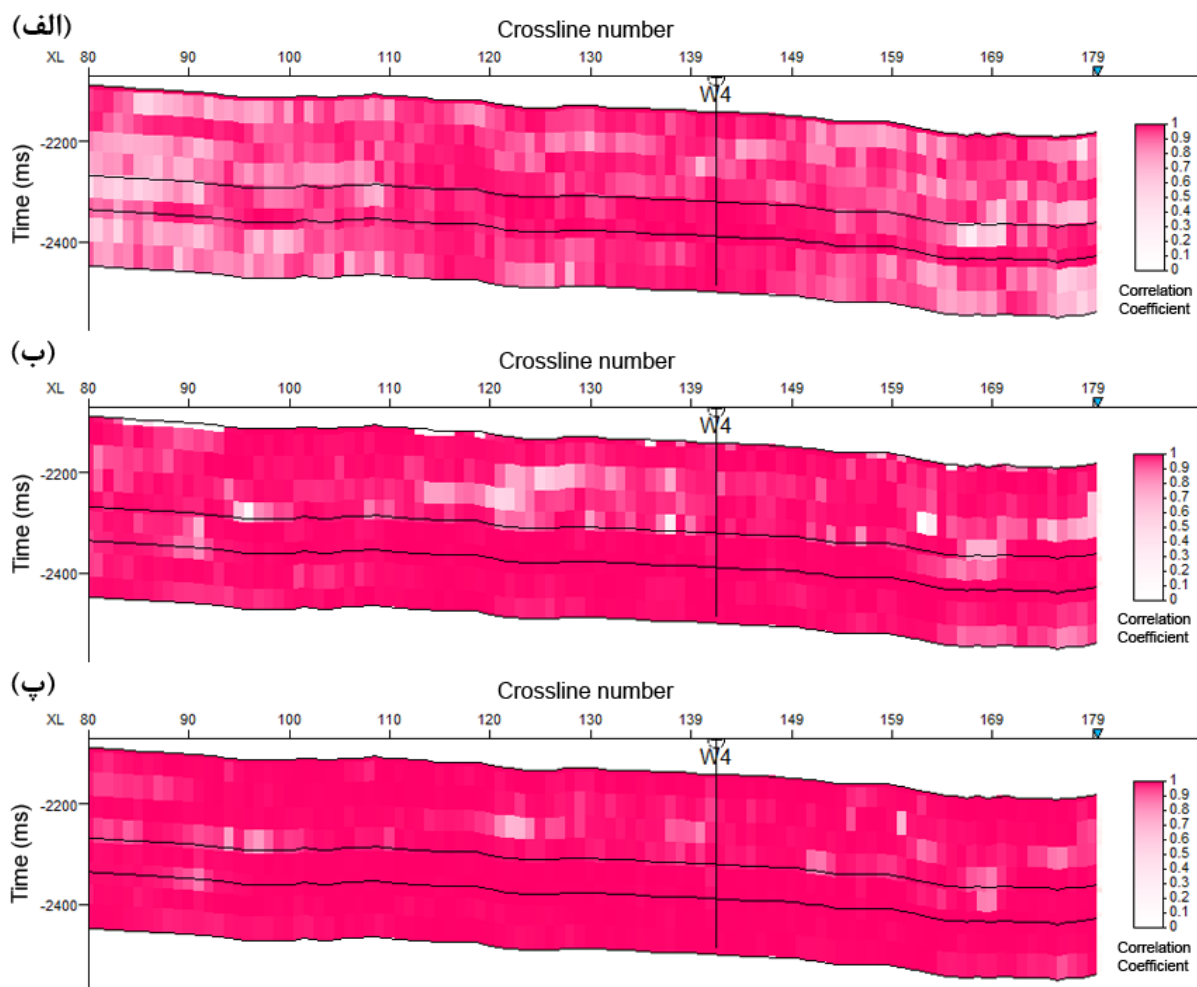
داده‌های مصنوعی مشابه بخش ۴-۲-۱ برای بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مورد استفاده قرار گرفته است. برای بکارگیری وارون‌سازی ناپایا ابتدا داده مورد نظر براساس توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی، به سه منطقه تقسیم شده است. این منطقه‌بندی در شکل ۵-۲ مشخص شده است. سپس داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها در هر منطقه برای مدل‌سازی واریوگرام مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۵-۳ نتایج این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با اجرای الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا، روند همگرایی ضرایب همبستگی بین ردلرزه‌های قطعه‌بندی شده مصنوعی و واقعی (ثبت شده) قابل مشاهده است. در شکل ۵-۴ مقطعی از این ضرایب در تکرار اول، سوم و ششم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بالا رفتن تعداد تکرار، ضرایب همبستگی بهبود یافته است. برای بررسی روند کلی عمل وارون‌سازی در تکرارهای مختلف، ضریب همبستگی کل داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی را می‌توان در شکل ۵-۵ مشاهده نمود. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، با انجام شش تکرار و در هر تکرار ۶۴ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی، الگوریتم وارون‌سازی ناپایا همگرا شده است.



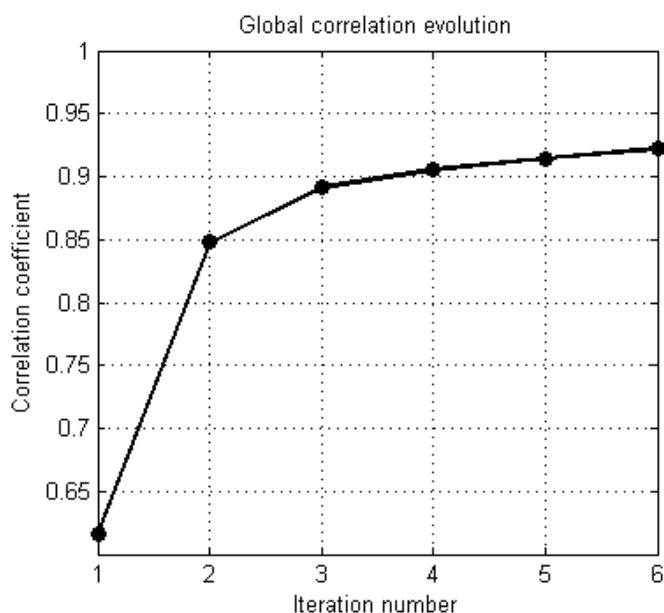
شکل ۵-۲- منطقه‌بندی داده‌های مصنوعی برای بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی تصادفی ناپایا.



شکل ۳-۵- مدل سازی واریوگرام داده های مصنوعی چاه به صورت محلی. الف، ب و پ) واریوگرام حاصل در راستای افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) واریوگرام حاصل در راستای قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو و سه.



شکل ۴-۵- نتایج وارون سازی لرزه ای ناپایا به صورت ضریب همبستگی بین ردلرزه های مصنوعی و واقعی (ثبت شده) که به صورت قطعاتی محاسبه شده اند. الف) تکرار اول، ب) تکرار سوم و پ) تکرار ششم. روند بهبود ضرایب همبستگی کاملاً مشهود است.



شکل ۵-۵- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزهای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های واقعی در تکرارهای مختلف مربوط به وارون‌سازی پایا.

میانگین و واریانس مقاومت صوتی در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. مطابق این جدول، مقادیر میانگین و واریانس مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده مشابه میانگین و واریانس داده‌های چاه می‌باشد. همچنین در شکل ۵-۶ هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مدل نهایی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هیستوگرام مقاومت صوتی چاه‌ها در مدل وارون‌شده به خوبی بازتولید شده است.

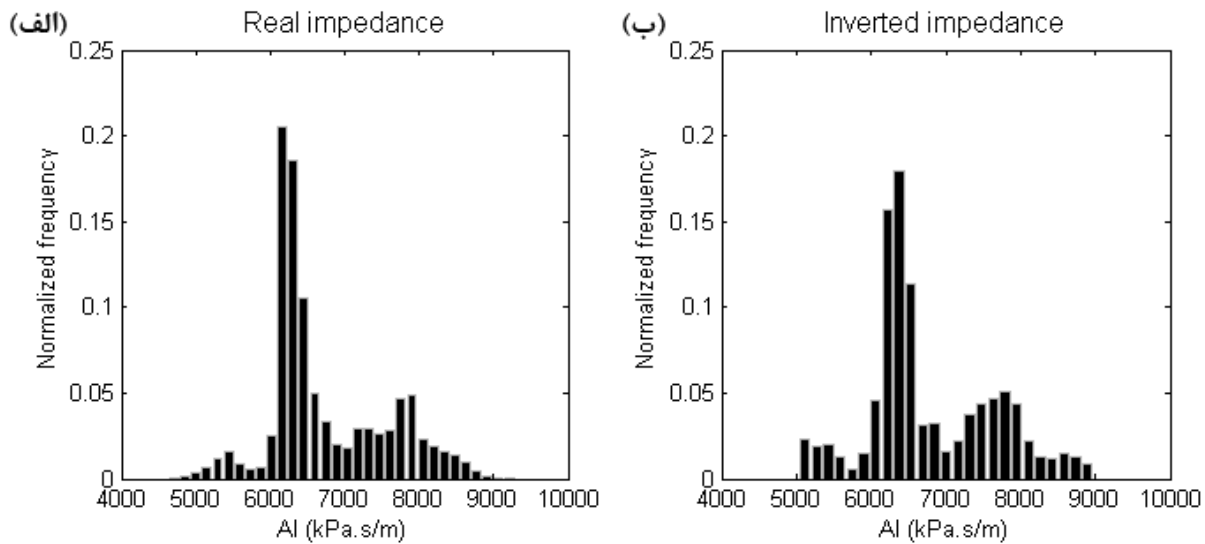
جدول ۵-۱- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده از وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون‌شده	۶۷۶۸	۷۱۵۰۹۰

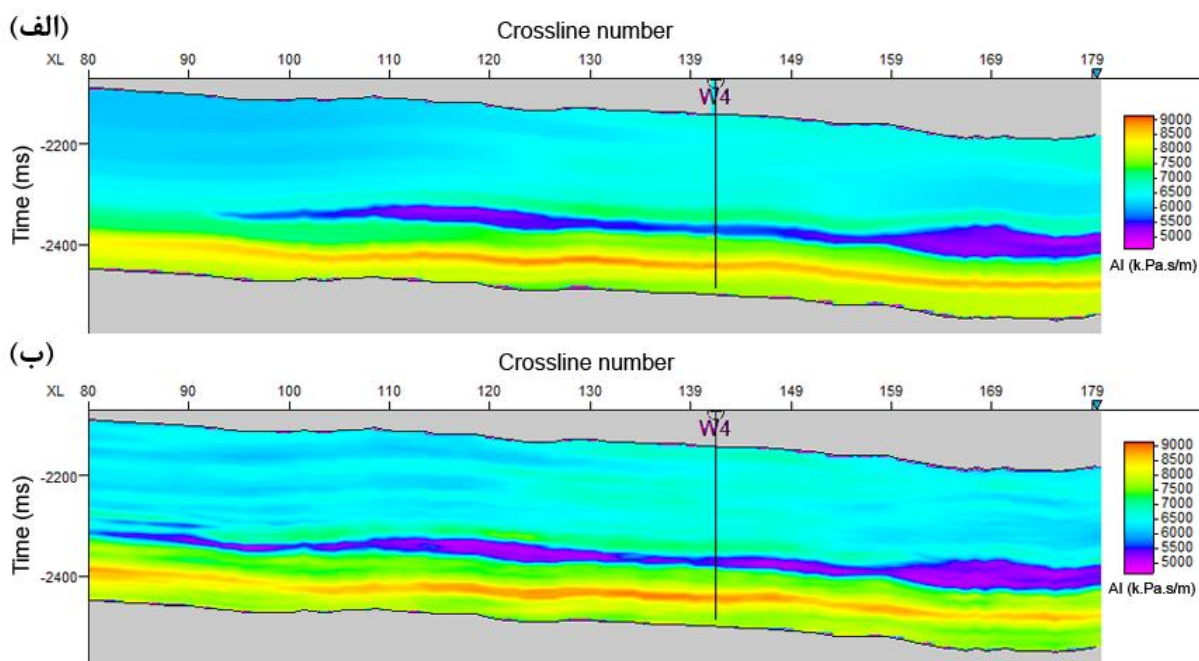
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این حالت، مکعب مقاومت صوتی که برای تولید داده‌های لرزه‌ای مصنوعی استفاده شده است، در اختیار است. در شکل ۵-۷ یک مقطع مقاومت صوتی واقعی با مدل وارون‌شده مقاومت صوتی با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی ناپایا آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا، هماهنگی بسیار خوبی با مقاومت صوتی واقعی دارد. در مورد وارون‌سازی ناپایا امکان مقایسه هیستوگرام‌های مدل وارون‌شده و داده‌های چاه مربوط به هر منطقه وجود دارد. شکل ۵-۸ این هیستوگرام‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه‌ها در مناطق مختلف (شکل‌های ۸-۵-الف، ب و پ) مشابه هیستوگرام‌های مدل مقاومت صوتی وارون‌شده در مناطق متناظر (شکل‌های ۵-۸-ت، ث و ج) هستند. این بدان معنی است که وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا علاوه بر بازتولید هیستوگرام کلی مقاومت صوتی، هیستوگرام‌های محلی مربوط به هر منطقه را در نتیجه وارون‌سازی بازتولید کرده است. به این ترتیب، مقادیر مقاومت صوتی در هر منطقه دارای توزیع فضایی متناسب با همان منطقه است. این نتیجه می‌تواند با طبیعت لایه‌های زیرسطحی هماهنگی خوبی داشته باشد.

در مرحله بعد، با محاسبه ضرایب بازتاب و هم‌امیخت موجک لرزه‌ای مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی قابل محاسبه است. شکل ۵-۹ مقایسه یک مقطع قائم لرزه‌ای مربوط به داده لرزه‌ای واقعی (شکل ۵-۹-الف) و داده لرزه‌ای وارون‌شده (شکل ۵-۹-ب) را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر این واقعیت است که بازتابنده‌های اصلی در مدل وارون‌شده به خوبی بازتولید شده‌اند. اما همان‌طور که در شکل ۵-۹-ب با یک بیضی مشخص شده، دامنه‌های لرزه‌ای در این منطقه با داده‌های لرزه‌ای واقعی اختلاف دارد. دلیل این پدیده می‌تواند عدم تطابق مقادیر دامنه لرزه‌ای بازتابنده‌های این منطقه با داده‌های مقیدکننده چاه‌ها باشد. برای بیان عددی تشابه داده‌های لرزه‌ای وارون‌شده و واقعی، ضریب همبستگی مدل لرزه‌ای وارون‌شده نهایی (تکرار ششم) با داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) محاسبه شده است. این ضریب همبستگی در مورد نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه $0/88$ به

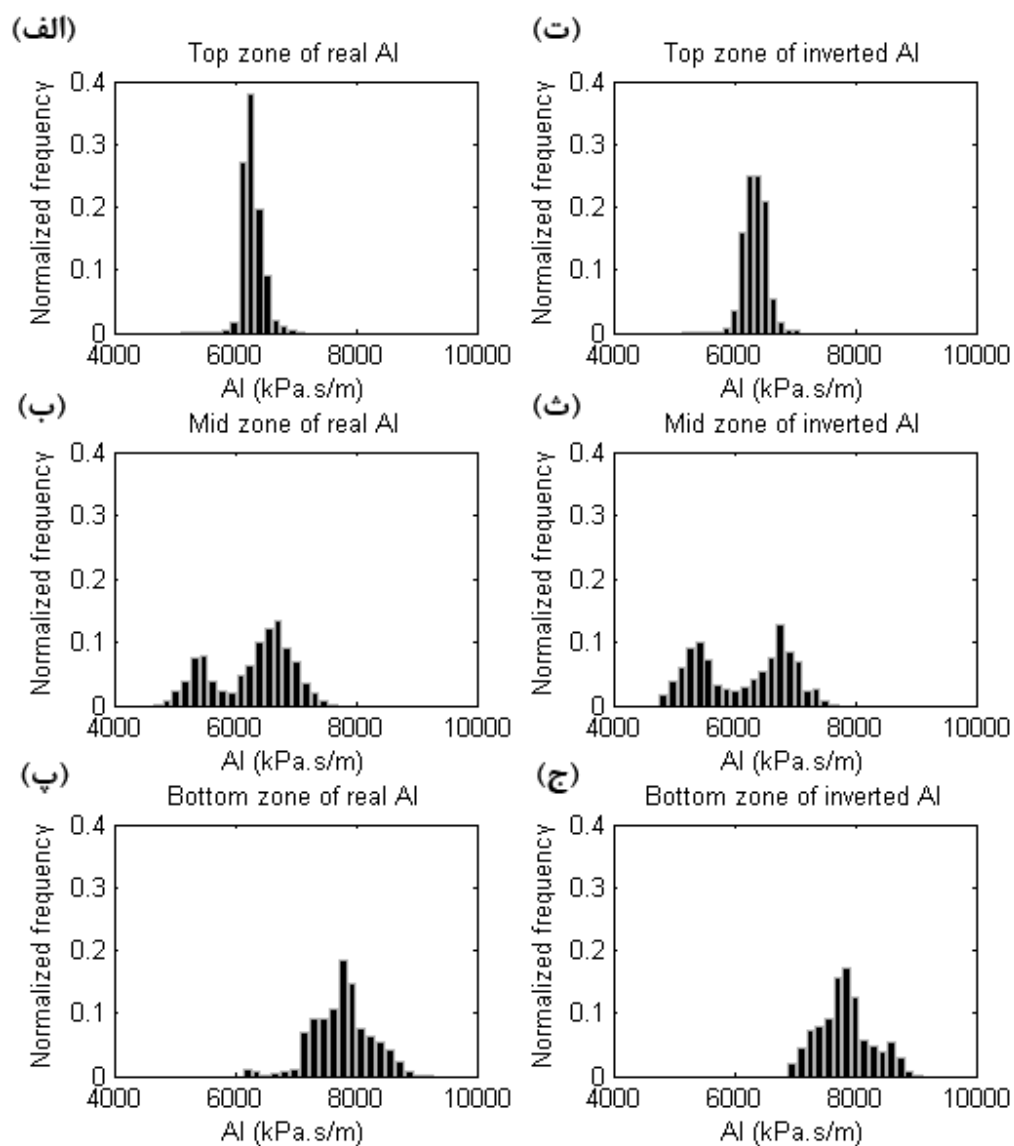
دست آمده که ضریب همبستگی بالایی محسوب می‌شود. همچنین، خطای جذر میانگین مربعات برابر ۳/۳ درصد محاسبه شده است.



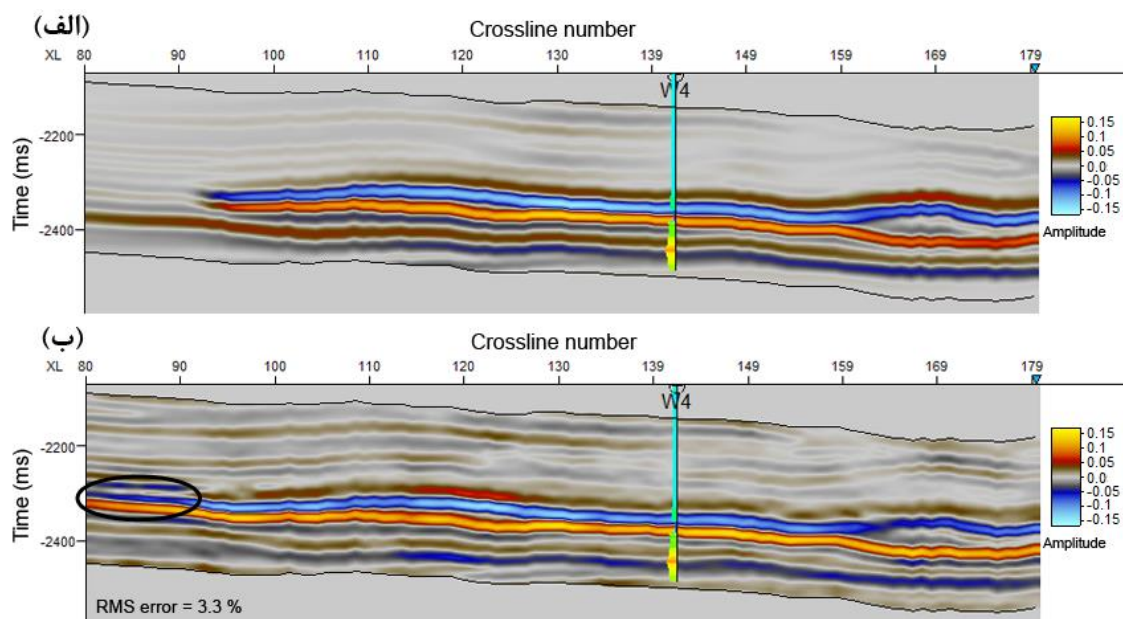
شکل ۵-۶- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده مصنوعی بدون نوفه. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) مدل وارون‌شده بر اساس وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.



شکل ۵-۷- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

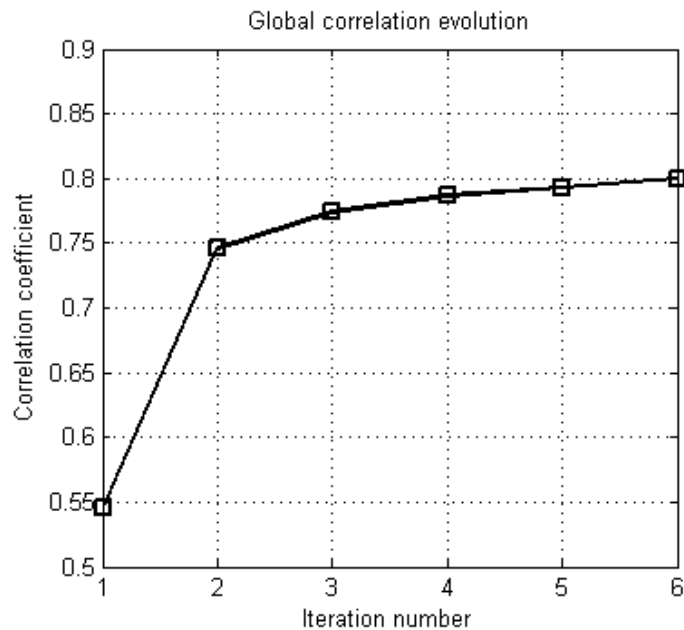


شکل ۵-۸- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌ها چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ج) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه.



شکل ۵-۹-الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

برای بررسی توانایی الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا در شرایط حضور نوفه همانند بخش ۴-۲ از داده لرزه‌ای با نسبت‌های سیگنال به نوفه ۱۶، ۸، ۴ و ۲ دسی‌بل (شکل ۴-۱۰) استفاده گردیده است. روند همگرایی الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا برای نسبت سیگنال به نوفه ۴ به عنوان نمونه در شکل ۵-۱۰ ارائه شده است. مطابق این شکل، الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا بعد از شش تکرار همگرا شده است. جدول ۲-۵ مقادیر کلیه ضرایب همبستگی بین مکعب داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و مصنوعی (وارون شده) در مورد داده با نسبت‌های سیگنال به نوفه مختلف آورده شده است. مطابق این جدول، با افزایش نوفه ضریب همبستگی کاهش یافته است اما این کاهش در مورد نسبت سیگنال به نوفه ۲ دسی‌بل بیشتر است. به نظر می‌رسد افزایش نوفه بعد از نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل نتایج وارون‌سازی را با شدت بیشتر تحت تأثیر قرار داده است. دلیل این پدیده می‌تواند تخریب شدید دامنه‌های لرزه‌ای توسط نوفه باشد.



شکل ۵-۱۰- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل در الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

جدول ۵-۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) و واقعی در حالت‌های مختلف داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه مربوط به وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

	داده لرزه‌ای بدون نوفه	داده لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه			
		SNR=16	SNR=8	SNR=4	SNR=2
ضریب همبستگی	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۰	۰/۷۲

در جدول ۵-۳، میانگین و واریانس مقاومت صوتی در حالت‌های مختلف ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که در مورد وارون‌سازی ناپایا، وجود نوفه در داده لرزه‌ای باعث می‌شود واریانس مقاومت صوتی وارون‌شده با واریانس مقاومت صوتی چاه‌ها اختلاف کمی داشته باشد اما میانگین مقادیر مقاومت صوتی در همه حالت‌ها تقریباً برابر است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل این موضوع می‌تواند تأثیر بیشتر نوفه بر واریانس مقاومت لرزه‌ای وارون‌شده نسبت به میانگین آن باشد.

جدول ۳-۵- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده مصنوعی با و بدون نوفه.

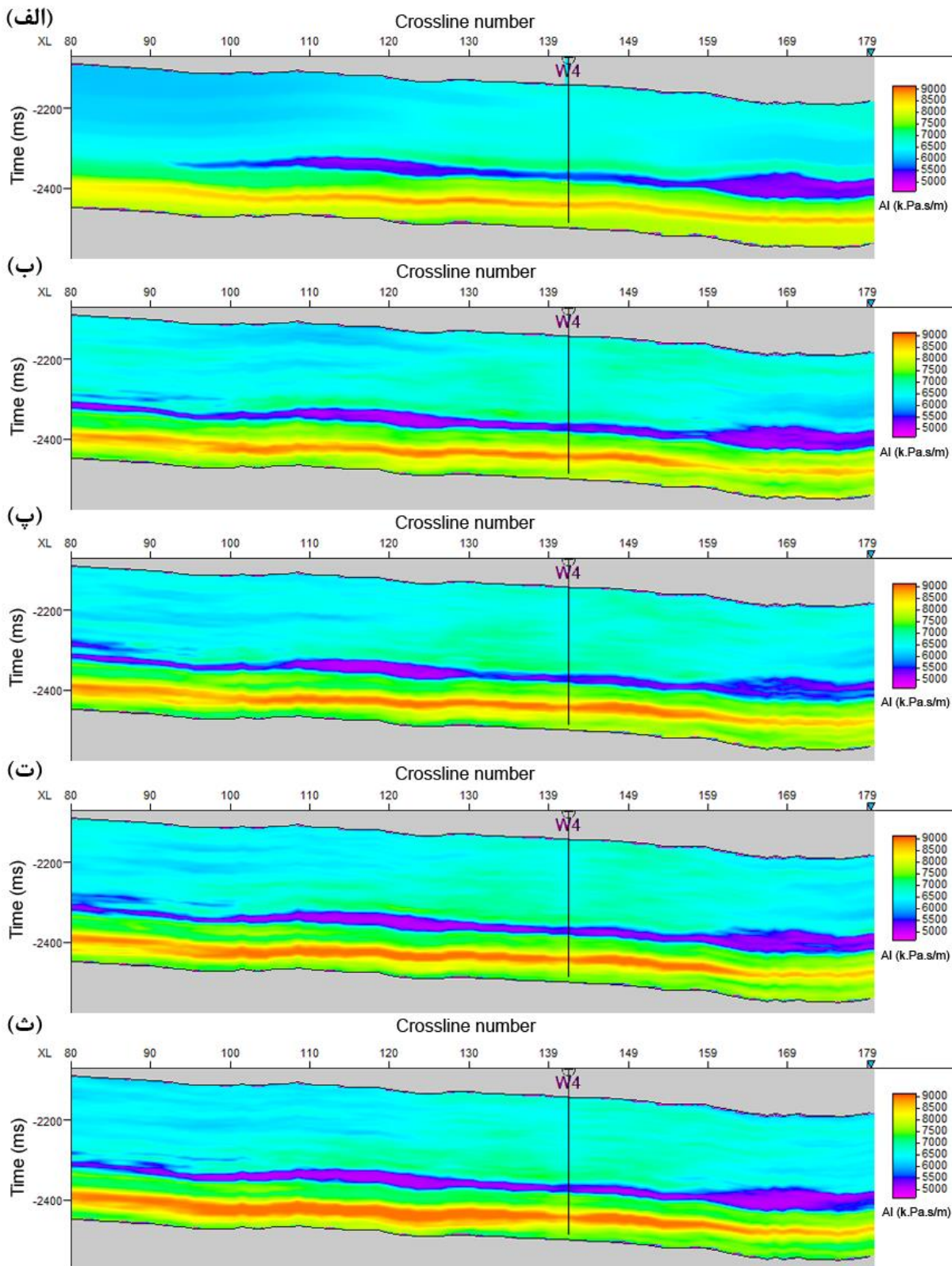
مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت بدون نوفه	۶۷۶۸	۷۱۵۰۹۰
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=16	۶۷۶۶	۷۴۶۱۴۳
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=8	۶۷۶۶	۷۵۸۷۲۶
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=4	۶۷۶۸	۷۶۷۳۳۸
مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت SNR=2	۶۷۶۷	۷۸۵۲۱۳

شکل ۵-۱۱ مقاطع قائم مقاومت صوتی وارون‌شده در حالت‌های مختلف نسبت سیگنال به نوفه را با مقاومت صوتی واقعی مقایسه می‌کند. همان‌طور در این شکل مشاهده می‌شود، وجود نوفه تأثیر کمی در نتایج وارون‌سازی داشته است. با افزایش نوفه، مقادیر پایین مقاومت صوتی (کمتر از ۵۵۰۰) به خوبی وارون شده‌اند و با مقدار واقعی اختلاف بسیار کمی دارند. در مورد مقادیر بالای مقاومت صوتی (بالتر از ۸۵۰۰)، با افزایش نوفه، لایه‌ای که در محل زمانی حدود ۲۴۰۰ میلی‌ثانیه قرار دارد، کمی گسترده‌تر شده است. این گسترش هم در راستای قائم و هم در راستای افقی روی داده است. اما به طور کلی می‌توان گفت که در سایر قسمت‌های مقطع، الگوریتم وارون‌سازی ناپایا به خوبی توانسته است مقادیر مشابه مقدار واقعی مقاومت صوتی را تولید کند. در شکل ۵-۱۲ مقاطع لرزه‌ای متناظر با شکل ۵-۱۱ ارائه شده است. بازتابنده‌های اصلی در همه حالت‌ها بازتولید شده‌اند و تشابه بسیار خوبی با مقطع لرزه‌ای واقعی دارند. این تشابه با محاسبه خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های مختلف در جدول ۴-۵ تأیید شده است. مطابق این جدول، افزودن نوفه به داده‌های لرزه‌ای، تأثیر کمی در نتیجه وارون‌سازی داشته است به طوری که خطای وارون‌سازی از ۳/۳ درصد در حالت بدون نوفه به ۴/۰ درصد در حالت نسبت سیگنال به نوفه ۲ دسی‌بل افزایش یافته است.

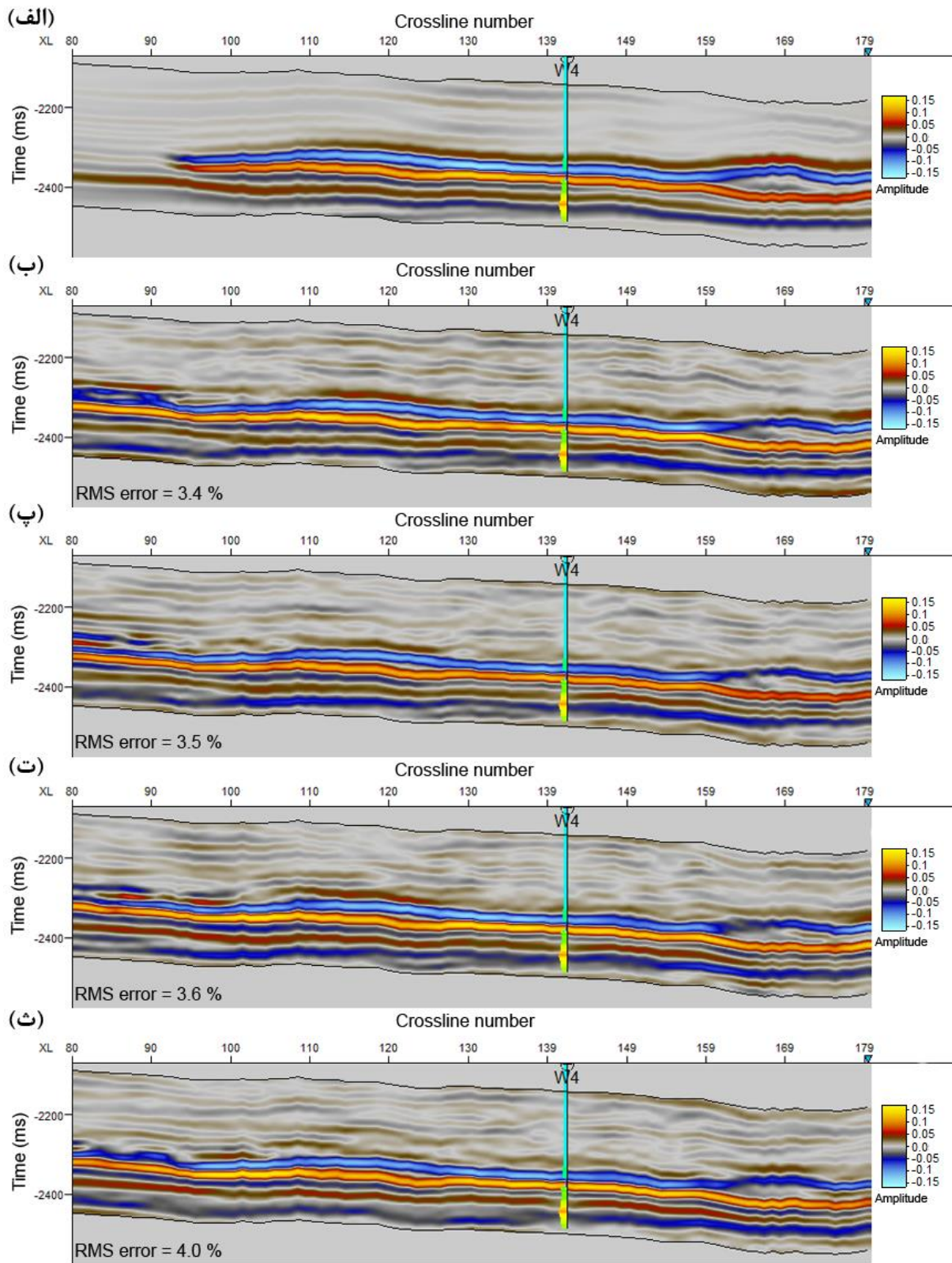
جدول ۴-۵- خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای وارون‌شده و واقعی در حالت‌های مختلف نسبت سیگنال به نوفه داده‌های لرزه‌ای مصنوعی توسط وارون‌سازی ناپایا.

	داده لرزه‌ای بدون نوفه	داده لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه			
		SNR=16	SNR=8	SNR=4	SNR=2
خطای جذر میانگین مربعات (درصد)	۳/۳	۳/۴	۳/۵	۳/۶	۴/۰

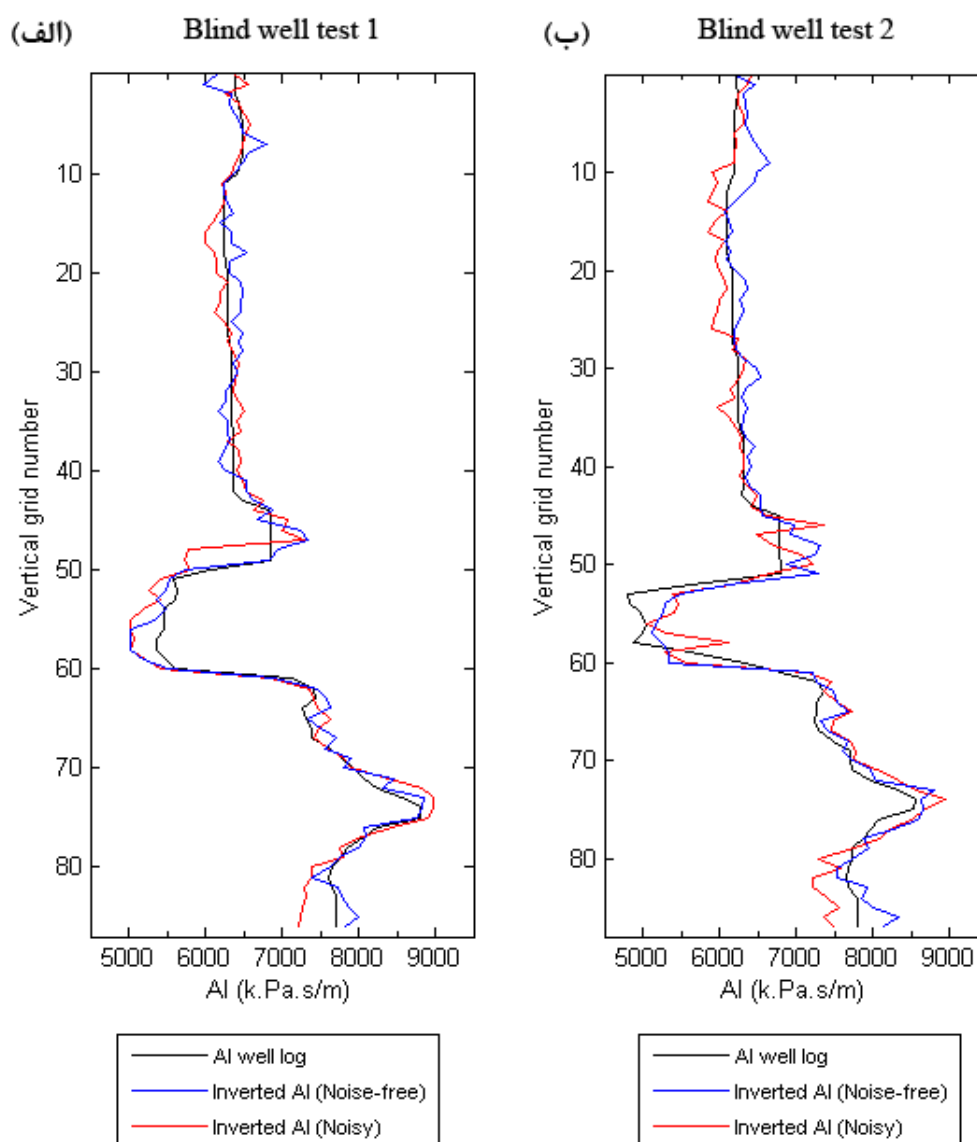
همانند روش وارون‌سازی پایا، آزمون چاه‌های آزمایشی برای دو چاه کنار گذاشته شده از فرایند وارون‌سازی ناپایا انجام شده است. مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده در محل‌های متناظر با محل این دو چاه در دو حالت داده بدون نوفه و داده نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل استخراج شده است. نمودارهای مقاومت صوتی در شکل ۵-۱۳ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی در هر دو چاه تطابق بسیار خوبی دارد. برای توصیف کمی این تطابق، ضرایب همبستگی بین داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده که در جدول ۵-۵ و خطای جذر میانگین مربعات در جدول ۵-۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۵-۵، ضریب همبستگی در هر دو چاه آزمایشی بالاست. همچنین میزان پایین خطای جذر میانگین مربعات در جدول ۵-۶، می‌تواند نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم وارون‌سازی ناپایا در وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی است.



شکل ۵-۱۱-الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی و مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه ب (۱۶، پ) ۸، ت) ۴ و ث) ۲ دسی‌بل.



شکل ۵-۱۲-الف) یک مقطع قائم از داده لرزه‌ای واقعی و مقطع قائم متناظر از مکعب لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده توسط وارون‌سازی ناپایا) مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت‌های سیگنال به نوفه ب) ۱۶ دسی‌بل، پ) ۸ دسی‌بل، ت) ۴ دسی‌بل و ث) ۲ دسی‌بل.



شکل ۵-۱۳- مقایسه نتایج وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای با و بدون نوفه با داده‌های واقعی موجود در محل چاه‌های آزمایشی الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲.

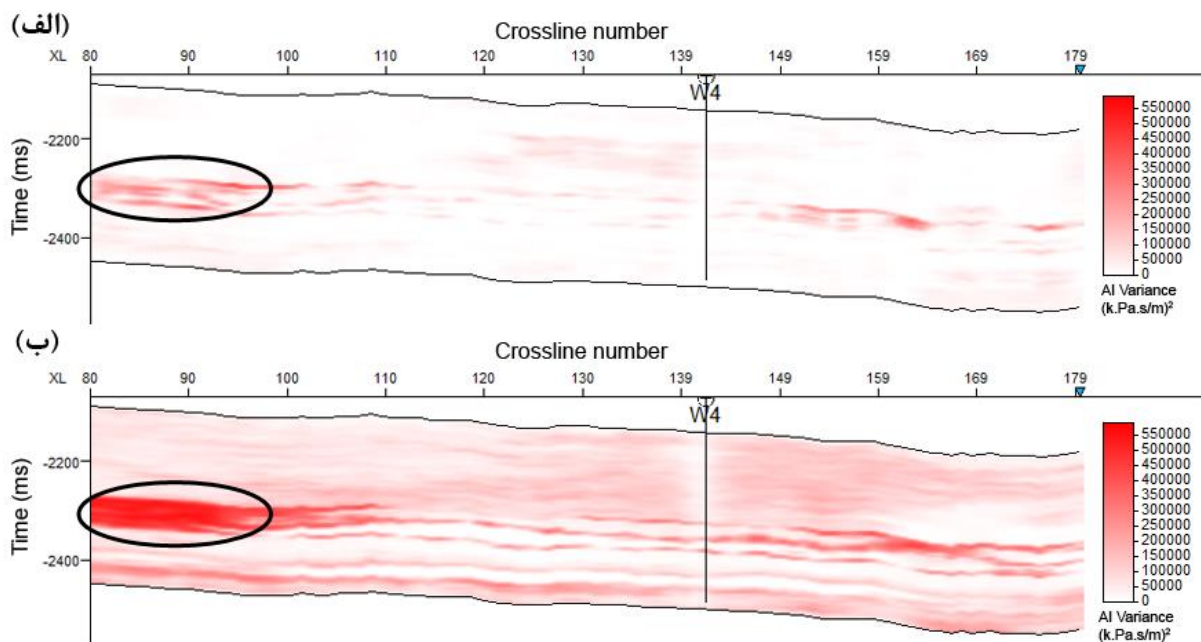
جدول ۵-۵- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	داده لرزه‌ای بدون نوفه	داده لرزه‌ای نوفه‌دار (SNR=4)
شماره ۱	۰/۹۸	۰/۹۵
شماره ۲	۰/۹۶	۰/۹۴

جدول ۵-۶- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه و نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	داده لرزه‌ای بدون نوفه	داده لرزه‌ای نوفه‌دار (SNR=4)
شماره ۱	۴/۱	۵/۳
شماره ۲	۵/۲	۵/۷

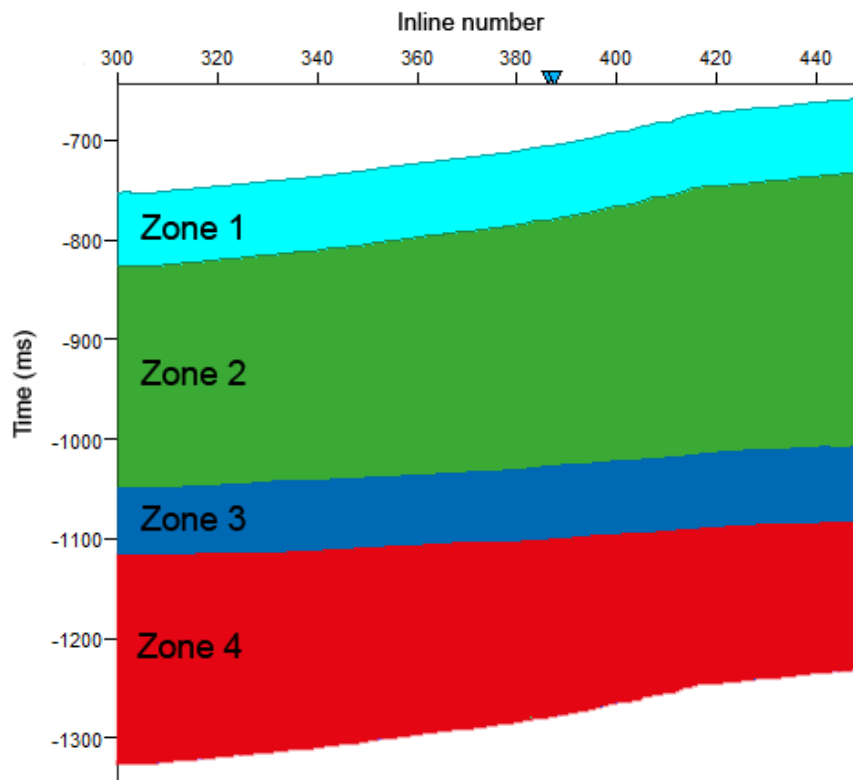
تحلیل عدم قطعیت با استفاده از خروجی‌های تکرار نهایی الگوریتم وارون‌سازی ناپایا انجام شده است. شکل ۵-۱۴ مقاطع قائم گذرنده از چاه W4، از مدل واریانس مربوط به ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم در حالت داده بدون نوفه (شکل ۵-۱۴-الف) و داده نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل (شکل ۵-۱۴-ب) را نشان می‌دهد. شکل ۵-۱۴-ب بیان می‌دارد که عدم قطعیت مربوط به نتایج وارون‌سازی داده مصنوعی نوفه‌دار افزایش کمی داشته است. این افزایش در مناطق دور از چاه‌ها با شدت بیشتری رخ داده است. همچنین، در منطقه داخل شکل بیضی عدم قطعیت افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند عدم تطابق در بازتابنده‌های شکل ۵-۹ را تأیید کند.



شکل ۵-۱۴-مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به وارون‌سازی ناپایا، (الف) مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه و (ب) داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

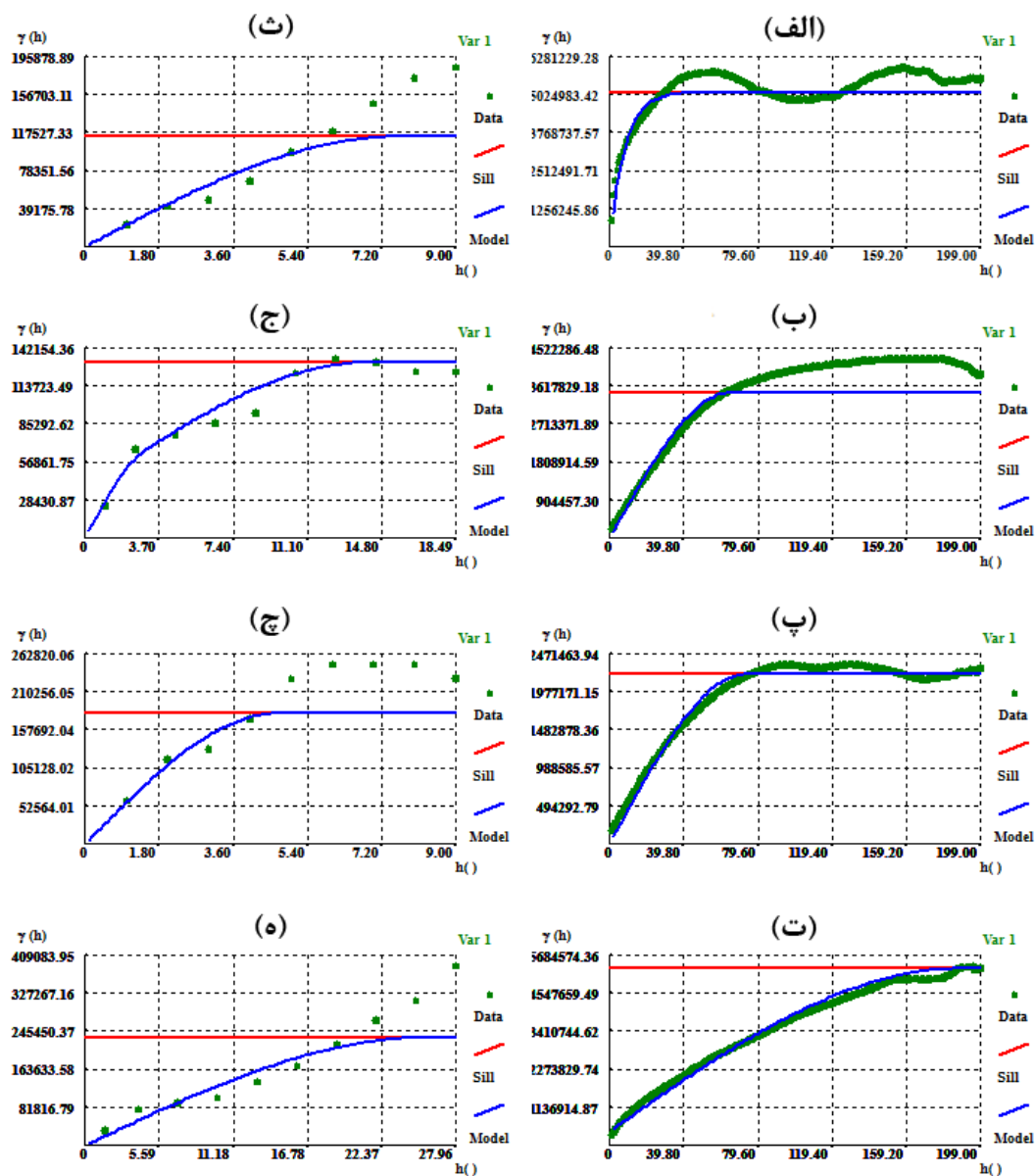
۵-۴- کاربرد بر روی داده‌های واقعی

داده‌های واقعی استفاده شده در این بخش، همانند داده‌های استفاده شده در الگوریتم وارون‌سازی پایا (بخش ۴-۴) است. برای بکارگیری این داده‌ها، ابتدا عمل منطقه‌بندی براساس افق‌های تفسیر شده لرزه‌ای صورت گرفته است (شکل ۵-۱۵). این افق‌های تفسیر شده توسط دانشگاه لیسبون در اختیار نگارنده قرار گرفته است. در مرحله بعد، واریوگرام‌های مربوط به هر منطقه مدل‌سازی شده است. این مدل‌سازی در شکل ۵-۱۶ ارائه شده است. برای مدل‌سازی واریوگرام‌های قائم (شکل‌های ۵-۱۶-ث، ج، چ و ه) از داده‌های مقاومت صوتی چاه و برای مدل‌سازی واریوگرام‌های افقی (شکل‌های ۵-۱۶-الف، ب، پ و ت) از داده‌های لرزه‌ای مربوط به هر منطقه استفاده شده است. با اجرای الگوریتم وارون‌سازی ناپایا، همگرایی در شش تکرار مطابق شکل ۵-۱۷ صورت پذیرفته است. در هر تکرار ۶۴ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی تولید شده است.

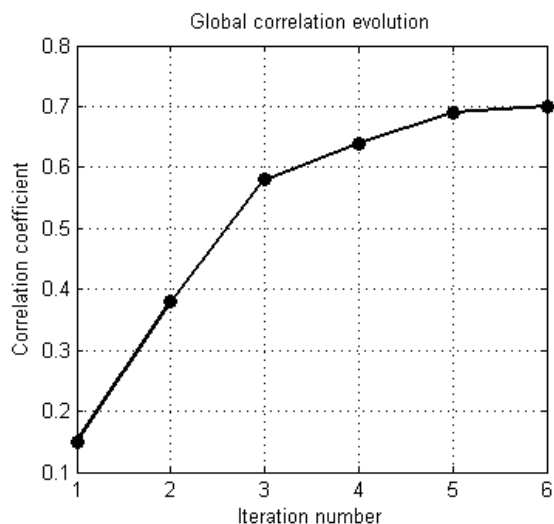


شکل ۵-۱۵- منطقه‌بندی داده‌های واقعی با استفاده از افق‌های تفسیر شده لرزه‌ای برای بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی ناپایا.

جدول ۵-۷ مقادیر میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، الگوریتم وارون‌سازی این مقادیر را در مدل وارون‌شده تقریباً بازتولید کرده است. برای نمایش بازتولید هیستوگرام، در شکل ۵-۱۸ هیستوگرام مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا ارائه شده است. با توجه به اینکه وارون‌سازی به صورت ناپایا انجام شده است، امکان مقایسه هیستوگرام‌های مربوط به هر منطقه در شکل ۵-۱۹ فراهم شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج وارون‌سازی ناپایا توانسته است در هر منطقه، هیستوگرام داده‌های مقاومت صوتی چاه در همان منطقه را تقریباً بازتولید کند.



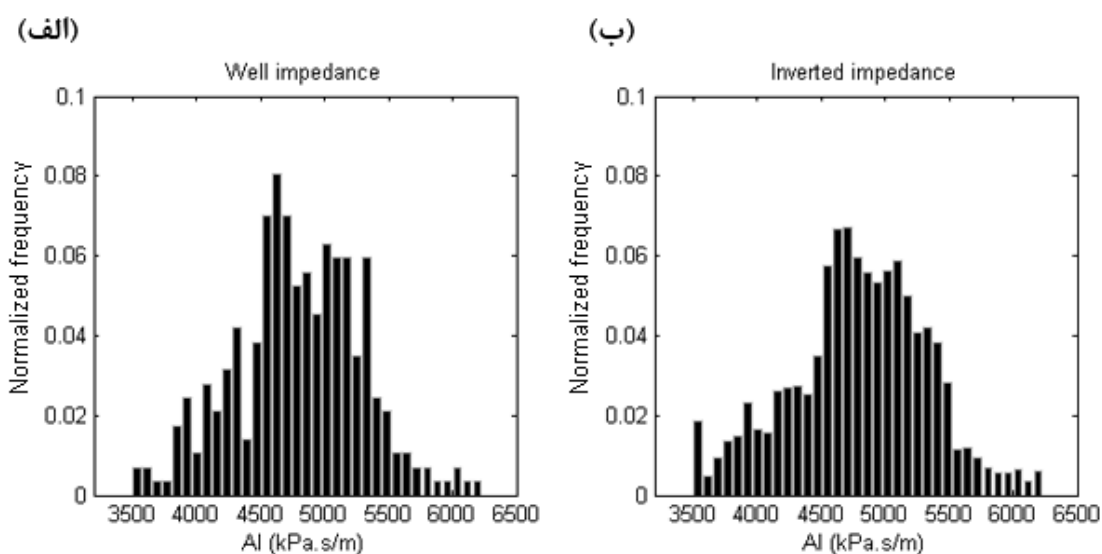
شکل ۵-۱۶- مدل‌سازی واریوگرام‌های مربوط به هر منطقه مربوط به داده واقعی. الف، ب، پ و ت) واریوگرام‌های افقی به ترتیب برای مناطق یک، دو، سه و چهار. ث، ج، چ و ه) واریوگرام‌های قائم به ترتیب برای مناطق یک، دو، سه و چهار.



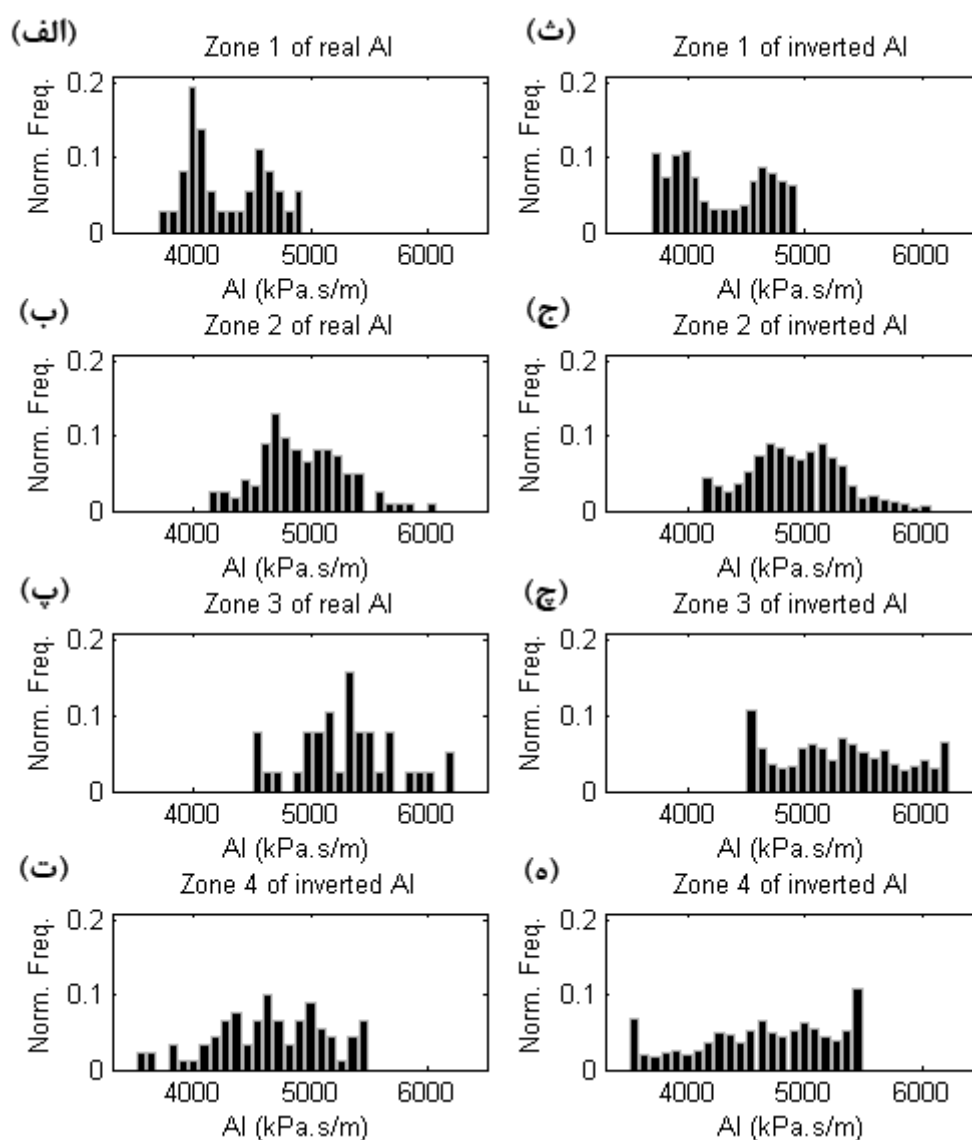
شکل ۵-۱۷- روند همگرایی ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) و واقعی (ثبت شده) در مورد داده‌های واقعی در تکرارهای مختلف مربوط به وارون سازی ناپایا.

جدول ۵-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون شده توسط وارون سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه	۴۸۰۱	۲۴۸۸۴۰
مقاومت صوتی وارون شده	۴۸۰۱	۲۸۹۹۷۶



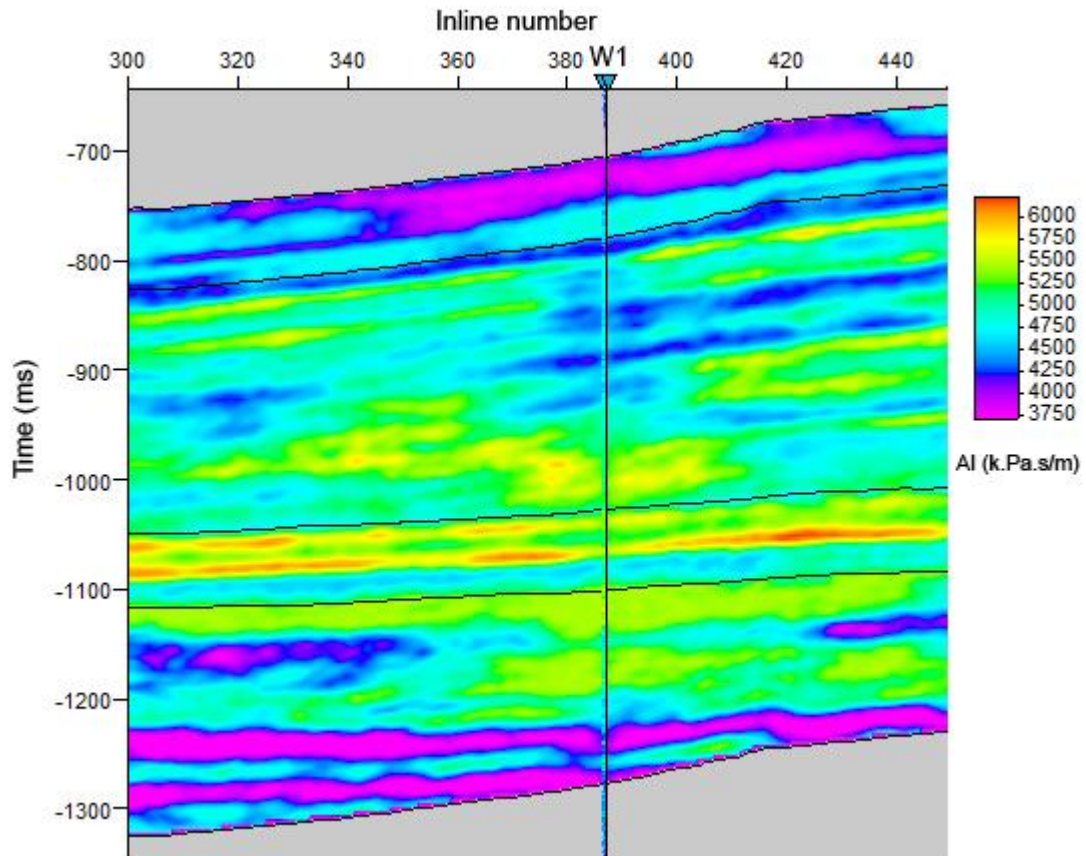
شکل ۵-۱۸- هیستوگرام‌های مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. الف) داده‌های چاه و ب) داده‌های وارون شده توسط وارون سازی ناپایا.



شکل ۵-۱۹- نتایج حاصل از وارون‌سازی ناپایا داده‌های واقعی به صورت هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی. الف، ب، پ و ت) هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو، سه و چهار. ث، ج، چ و ه) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو، سه و چهار.

یک مقطع قائم از مدل نهایی مقاومت صوتی که از محل چاه W1 می‌گذرد، برای نمایش نتایج وارون‌سازی ناپایا انتخاب شده است (شکل ۵-۲۰). شکل ۵-۲۱ مقاطع لرزه‌ای مرتبط با مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده و همچنین داده لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) را نشان می‌دهد. بازتابنده‌های اصلی در مدل نهایی وارون‌شده بازتولید شده‌اند. ضریب همبستگی مدل لرزه‌ای وارون‌شده با داده

لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) ۰/۷۰ محاسبه شده است. همچنین خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای وارون‌شده و واقعی، ۱۱/۶ درصد محاسبه شده است. با توجه به اینکه تنها یک چاه برای عمل وارون‌سازی استفاده شده است، این نتایج می‌تواند قابل قبول باشد.

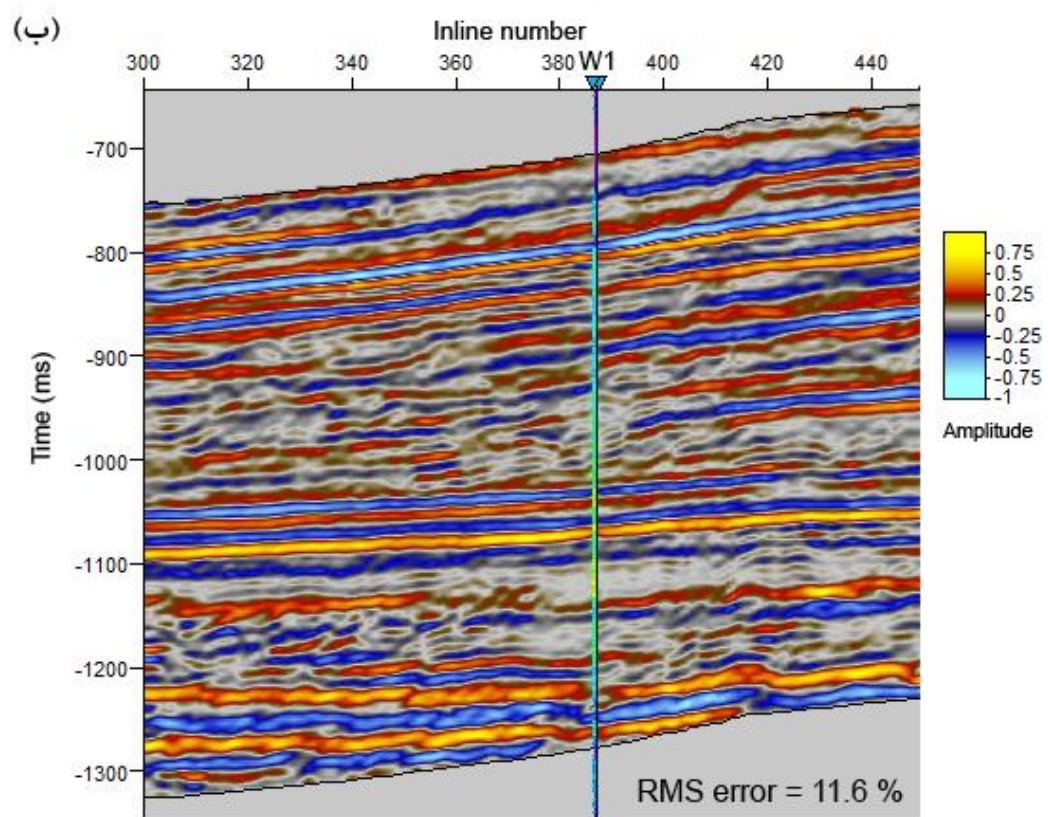
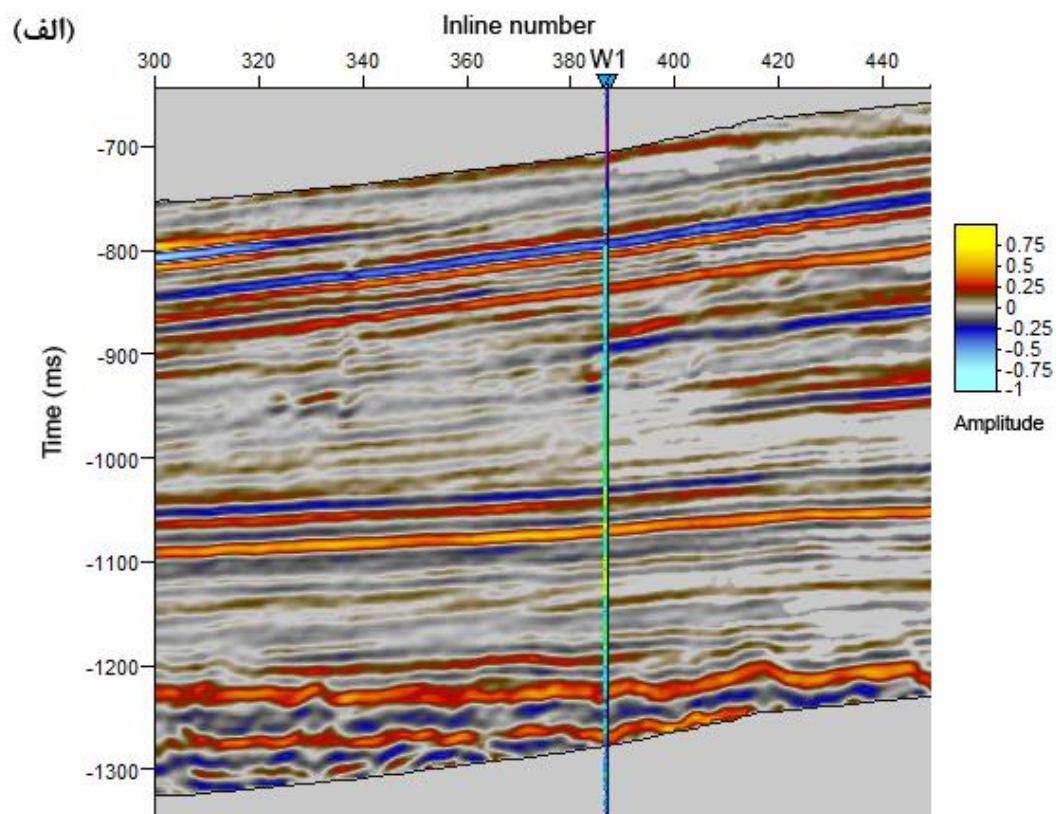


شکل ۵-۲۰- مقطع قائم از مکعب مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.

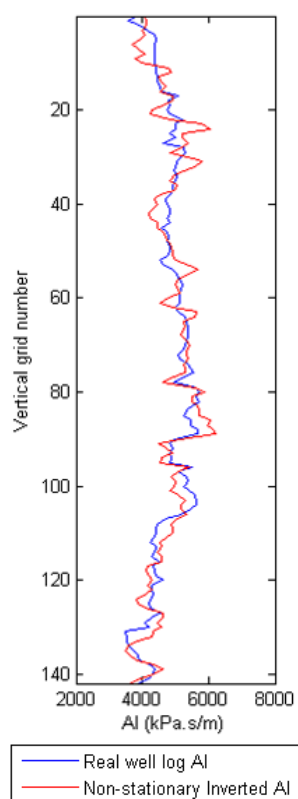
آزمون چاه آزمایشی برای تنها چاه کنار گذاشته شده از فرایند وارون‌سازی ناپایا انجام شده است. نمودارهای مقاومت صوتی این چاه و مقادیر وارون‌شده در شکل ۵-۲۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه آزمایشی مطابقت دارد. ضریب همبستگی این دو نمودار ۰/۷۹ محاسبه شده که نسبتاً همگرایی بالایی را نشان می‌دهد. همچنین، خطای جذر میانگین مربعات بین دو نمودار شکل ۵-۲۲ ۱۳/۳ درصد محاسبه شده است.

با محاسبه واریانس مربوط به خروجی‌های تکرار نهایی الگوریتم وارون‌سازی، امکان تحلیل عدم قطعیت به وجود می‌آید. در مورد وارون‌سازی ناپایا این عمل انجام شده و نتیجه آن در یک مقطع قائم که از چاه W1 گذر کرده، در شکل ۵-۲۳ ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر واریانس در نزدیک چاه به صفر میل کرده و به طور کلی در نقاط دور از چاه افزایش یافته است.

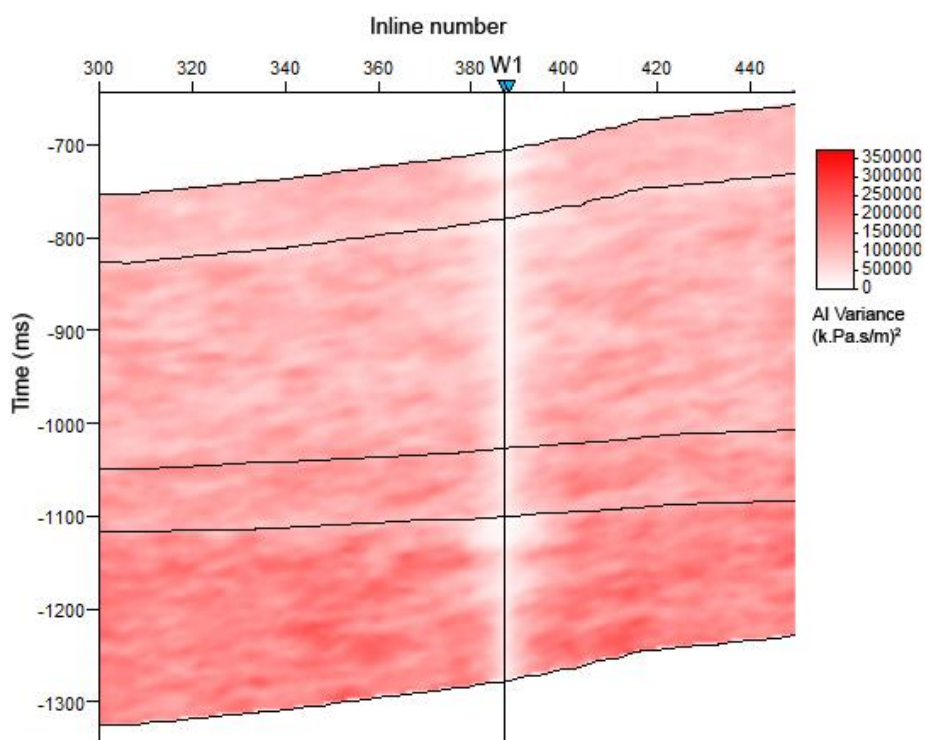
در این فصل، نتایج بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی ارائه شد. در فصل آینده نتایج وارون‌سازی در حالت پایا و ناپایا با هم مقایسه و تحلیل شده است.



شکل ۵-۲۱-الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا) مربوط به داده واقعی.



شکل ۵-۲۲- مقایسه نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا با داده‌های واقعی چاه آزمایشی.



شکل ۵-۲۳- مقطع قائم از مکعب واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی ناپایا در تکرار نهایی در مورد داده واقعی.

فصل ششم

مقایسه نتایج وارون سازی تصادفی لرزه‌های پایا و

ناپایا

۶-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا در کنار یکدیگر آورده شده است تا امکان مقایسه بهتر حاصل گردد. این تحلیل ابتدا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه و سپس نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل انجام شده است. در ادامه نیز نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا در روی داده‌های واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۲- مقایسه نتایج مدل‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای

بدون نوفه

در این قسمت، نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه شرح داده شده در بخش ۴-۲-۱ مقایسه و تحلیل شده است. شکل ۶-۱-الف مقطع مقاومت صوتی واقعی، شکل ۶-۱-ب مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و شکل ۶-۱-پ مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج وارون‌سازی پایا (شکل ۶-۱-ب) در بعضی مناطق خصوصاً قسمت‌های بالایی مقطع، مقادیر غیرواقعی مقاومت صوتی را تولید کرده است. اما وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۱-پ) دارای تشابه بسیار بالاتری با مقطع مقاومت صوتی واقعی است. جدول ۶-۱ نشان می‌دهد که هر دو روش وارون‌سازی، میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها را بازتولید کرده‌اند. اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل تعریف منطقه‌بندی و محاسبه واریوگرام‌های محلی در وارون‌سازی ناپایا، مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا دارای انطباق بیشتری با واقعیت لایه‌های زیرسطحی هستند. این موضوع در هیستوگرام‌های بازتولید شده مربوط به دو روش وارون‌سازی پایا و ناپایا نیز قابل مشاهده است. شکل ۶-۲ نشان می‌دهد که وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۲-پ) بهتر توانسته است هیستوگرام داده‌های اولیه را بازتولید کند.

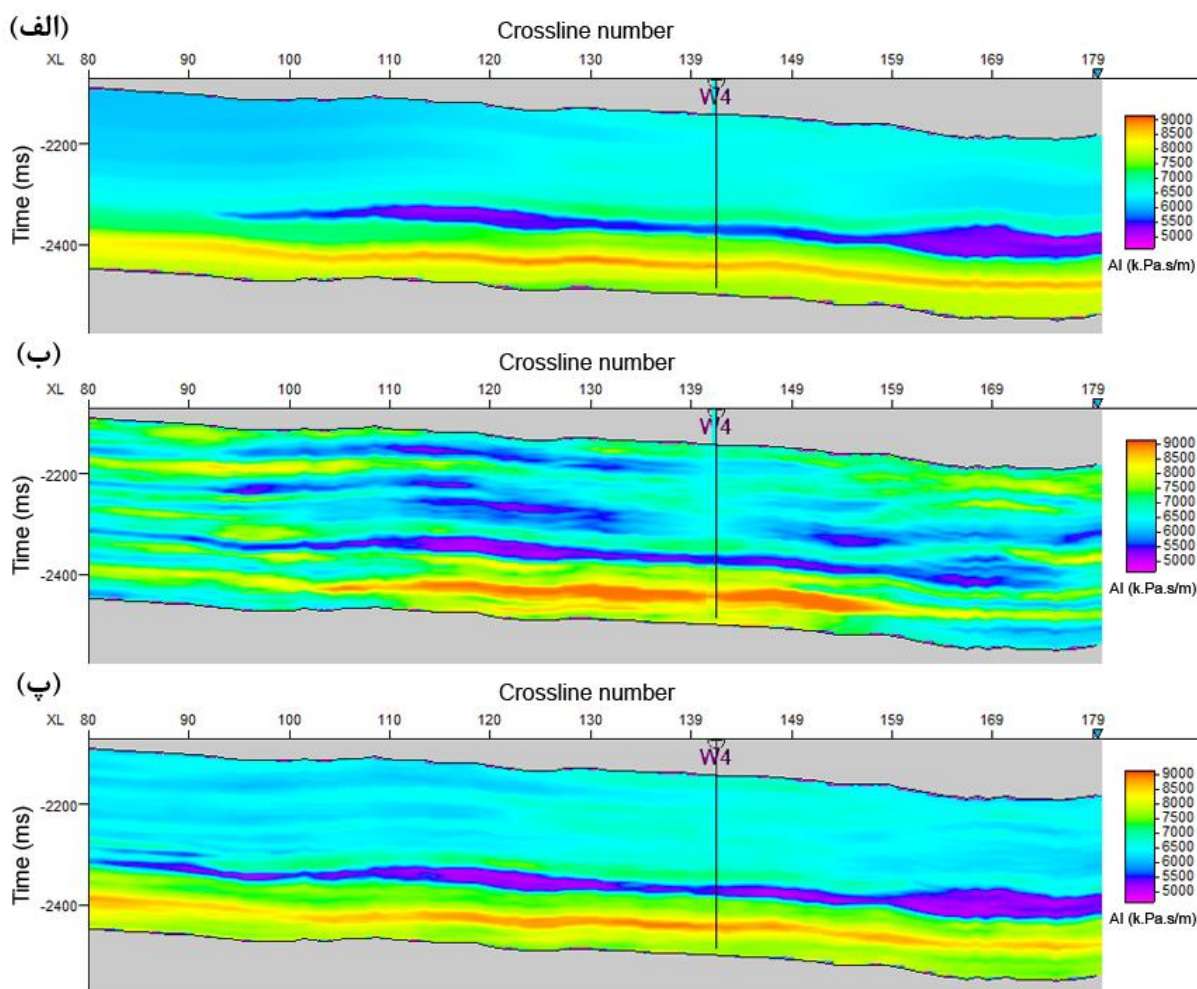
جدول ۶-۱- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا	۶۶۶۴	۷۱۷۶۶۶
مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا	۶۷۶۸	۷۱۵۰۹۰

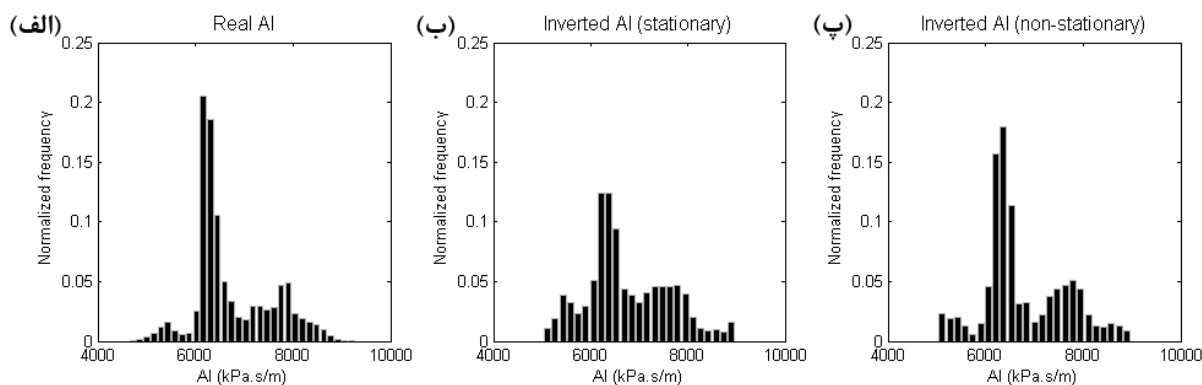
مقاطع لرزه‌ای مربوط به نتایج وارون‌سازی در شکل ۶-۳ ارائه شده است. شکل ۶-۳-الف مقطع لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، شکل ۶-۳-ب مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی پایا و شکل ۶-۳-پ مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی ناپایا را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، الگوریتم وارون‌سازی ناپایا دارای بهبود قابل ملاحظه‌ای در بازتولید مقطع لرزه‌ای واقعی است و خطای مدل‌سازی حدود ۶ درصد کاهش داشته است. این بهبود، در بازتولید بازتابنده‌های قسمت‌های بالا مقطع شکل ۶-۳-پ مشهود است. اما در منطقه نشان داده شده با بیضی، دامنه‌های لرزه‌ای به درستی وارون نشده‌اند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل این موضوع ممکن است عدم تطابق مقادیر دامنه لرزه‌ای با داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها باشد. همچنین، ضریب همبستگی کلی بین پاسخ مدل وارون‌شده نهایی با داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و همین‌طور خطای مدل‌سازی در جدول ۶-۲ مقایسه شده است. مطابق این جدول، نتایج وارون‌سازی ناپایا بهبود قابل توجهی نسبت به حالت پایا داشته است.

جدول ۶-۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا.

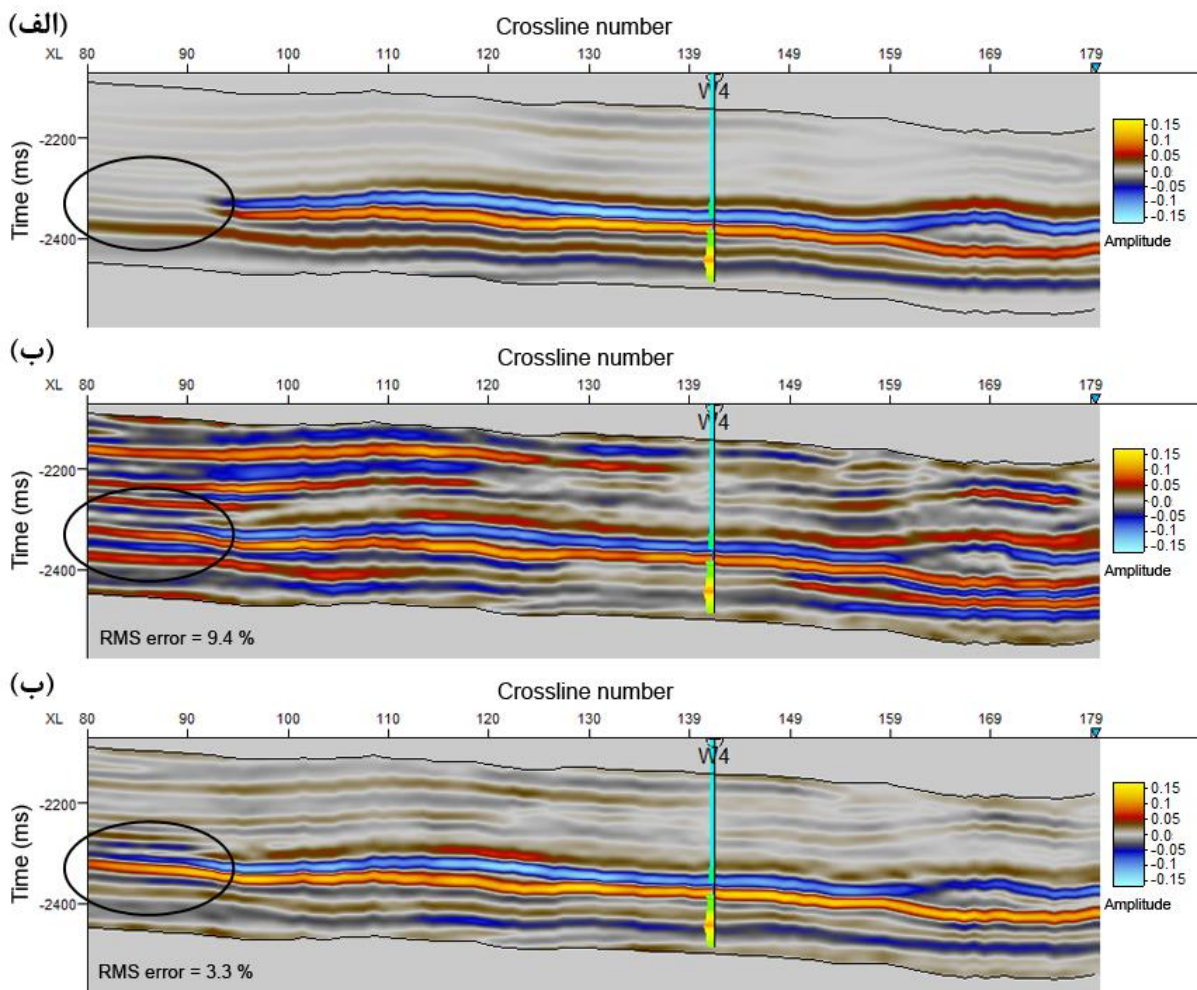
نوع وارون‌سازی	ضریب همبستگی	خطا (درصد)
پایا	۰/۷۶	۹/۴
ناپایا	۰/۸۸	۳/۳



شکل ۶-۱- الف) مقطع مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون سازی پایا و پ) مقطع مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون سازی ناپایا در مورد داده های مصنوعی بدون نوفه.



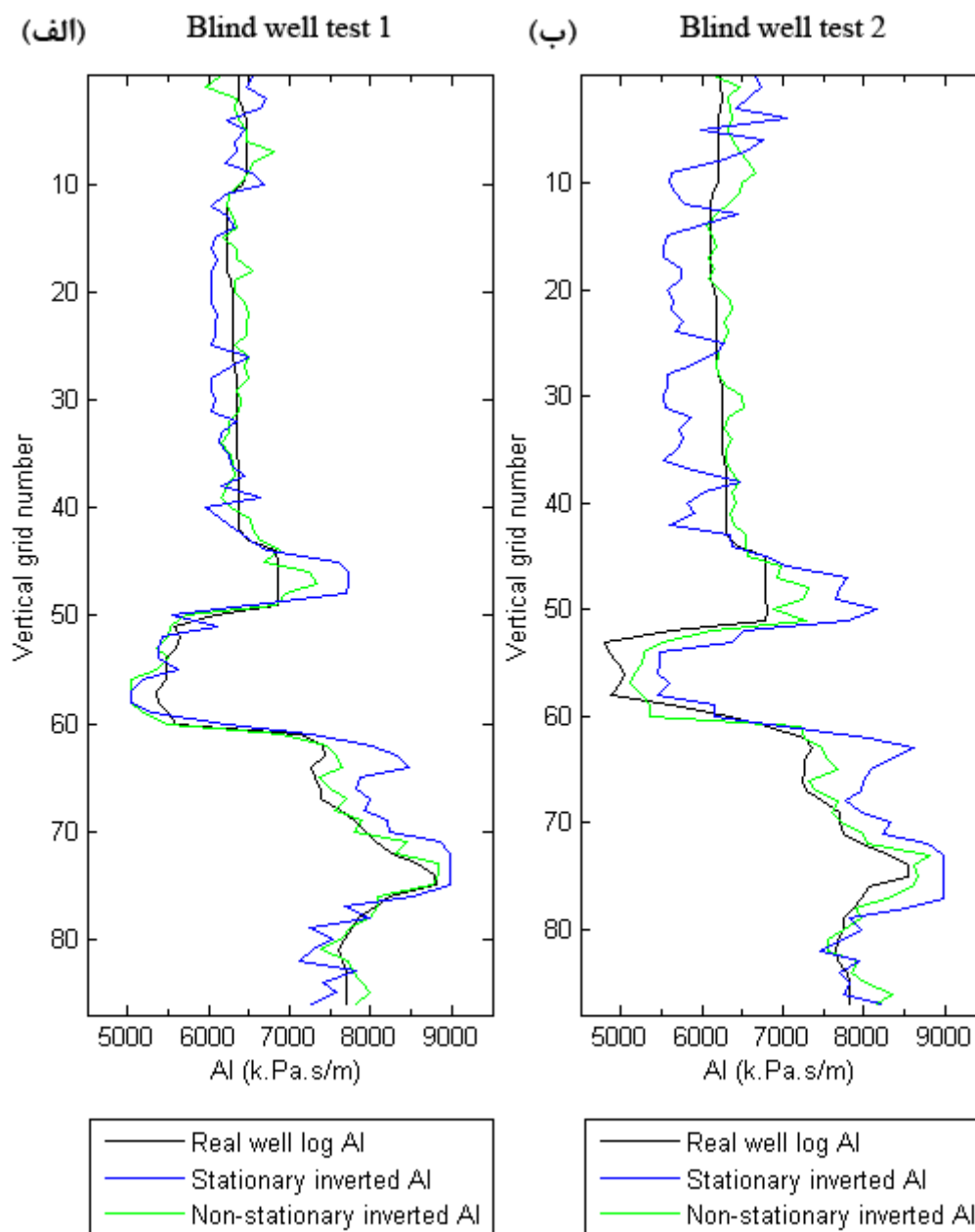
شکل ۶-۲- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده های واقعی چاه ها، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون سازی ناپایا در مورد داده های مصنوعی بدون نوفه.



شکل ۳-۶- الف) مقطع لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) بدون نوفه، ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا و ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی ناپایا.

شکل ۳-۶- نمودار مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی یک و دو (شکل ۳-۴) همراه با مقادیر وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده در محل چاه‌های آزمایشی یک و دو استخراج شده‌اند. بر اساس این شکل، اگرچه هر دو روش وارون‌سازی پایا و ناپایا توانسته‌اند از روند کلی داده‌های مقاومت صوتی واقعی تبعیت کنند، اما نتایج وارون‌سازی ناپایا دارای تطابق بهتری با داده‌های مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی هستند. این موضوع توسط محاسبه ضرایب همبستگی بین مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده

و واقعی در جدول ۳-۶ نیز تایید شده است. همچنین، مطابق جدول ۴-۶، خطای وارون‌سازی در حالت ناپایا کاهش قابل ملاحظه‌ای خصوصاً در چاه آزمایشی شماره ۲ داشته است.



شکل ۴-۶- مقایسه آزمون چاه‌های آزمایشی در مورد نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده مصنوعی بدون نوفه. الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲.

جدول ۳-۶- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

چاه آزمایشی	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۰/۹۳	۰/۹۸
شماره ۲	۰/۸۷	۰/۹۶

جدول ۴-۶- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

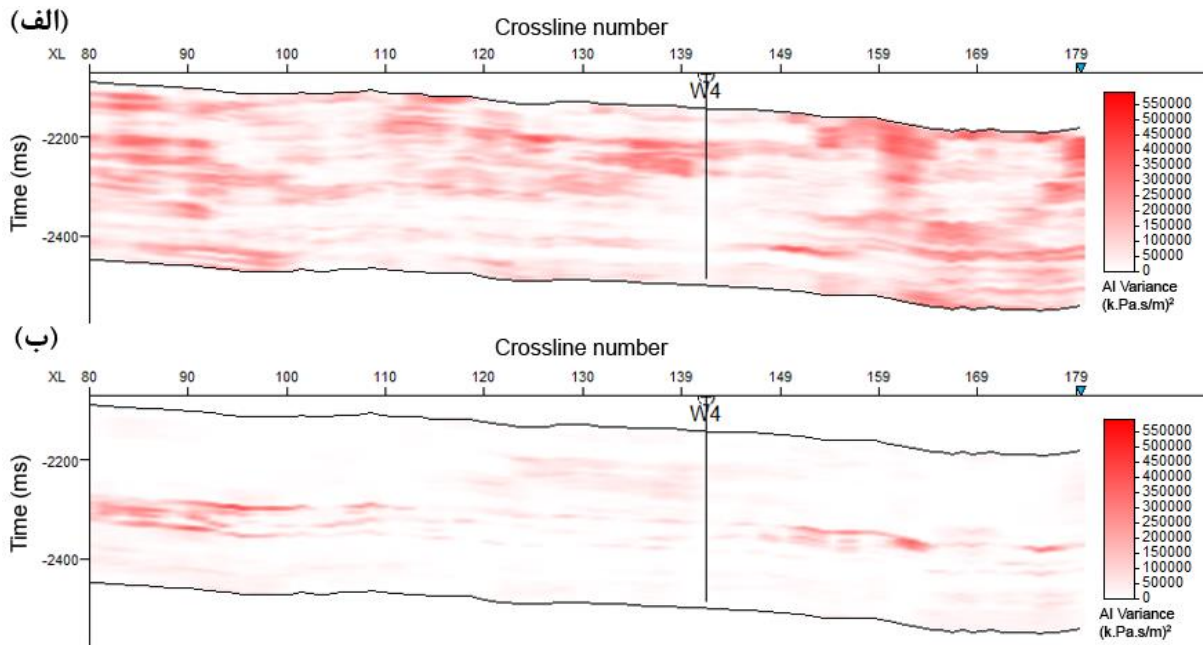
چاه آزمایشی	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۸/۷	۴/۱
شماره ۲	۱۳/۳	۵/۲

برای مقایسه تحلیل عدم قطعیت، به مقاطع واریانس در شکل ۶-۵ توجه شود. این شکل نشان می‌دهد که عدم قطعیت در مورد نتایج وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۵-ب) کاهش یافته است. به عبارت دیگر نتایج وارون‌سازی ناپایا می‌تواند قابل اعتمادتر باشد. در بعضی از نقاط مقطع مربوط به وارون‌سازی ناپایا واریانس همچنان بالاست که این موضوع اولاً می‌تواند به دلیل عدم تطابق مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های لرزه‌ای در آن مناطق باشد. ثانیاً وارون‌سازی در مناطق دور از چاه‌ها به طور کلی باعث افزایش واریانس و عدم قطعیت می‌شود. این موضوع شامل هر دو روش وارون‌سازی پایا و ناپایا می‌شود. اما به طور کلی شکل ۶-۵ نشان‌دهنده کاهش قابل توجه عدم قطعیت در مورد نتایج وارون‌سازی ناپایا می‌باشد.

همچنین، زمان اجرای الگوریتم وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی یک رایانه با پردازنده هشت هسته‌ای 2.20GHz و حافظه تصادفی^۱ 16GB، در جدول ۶-۵ ارائه شده است. همان طور که در این جدول

^۱ Random access memory (RAM)

مشاهده می‌شود، زمان اجرای وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه تقریباً برابر است.



شکل ۵-۶- مقطع قائمی از مدل وارینانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف) وارون‌سازی پایا و ب) وارون‌سازی ناپایا.

جدول ۵-۶- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا (دقیقه)	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا (دقیقه)	درصد افزایش زمان اجرای الگوریتم ناپایا نسبت به پایا
داده‌های مصنوعی بدون نوفه	۲۰۱	۲۰۲	۰/۵

۳-۶- مقایسه نتایج وارون‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های

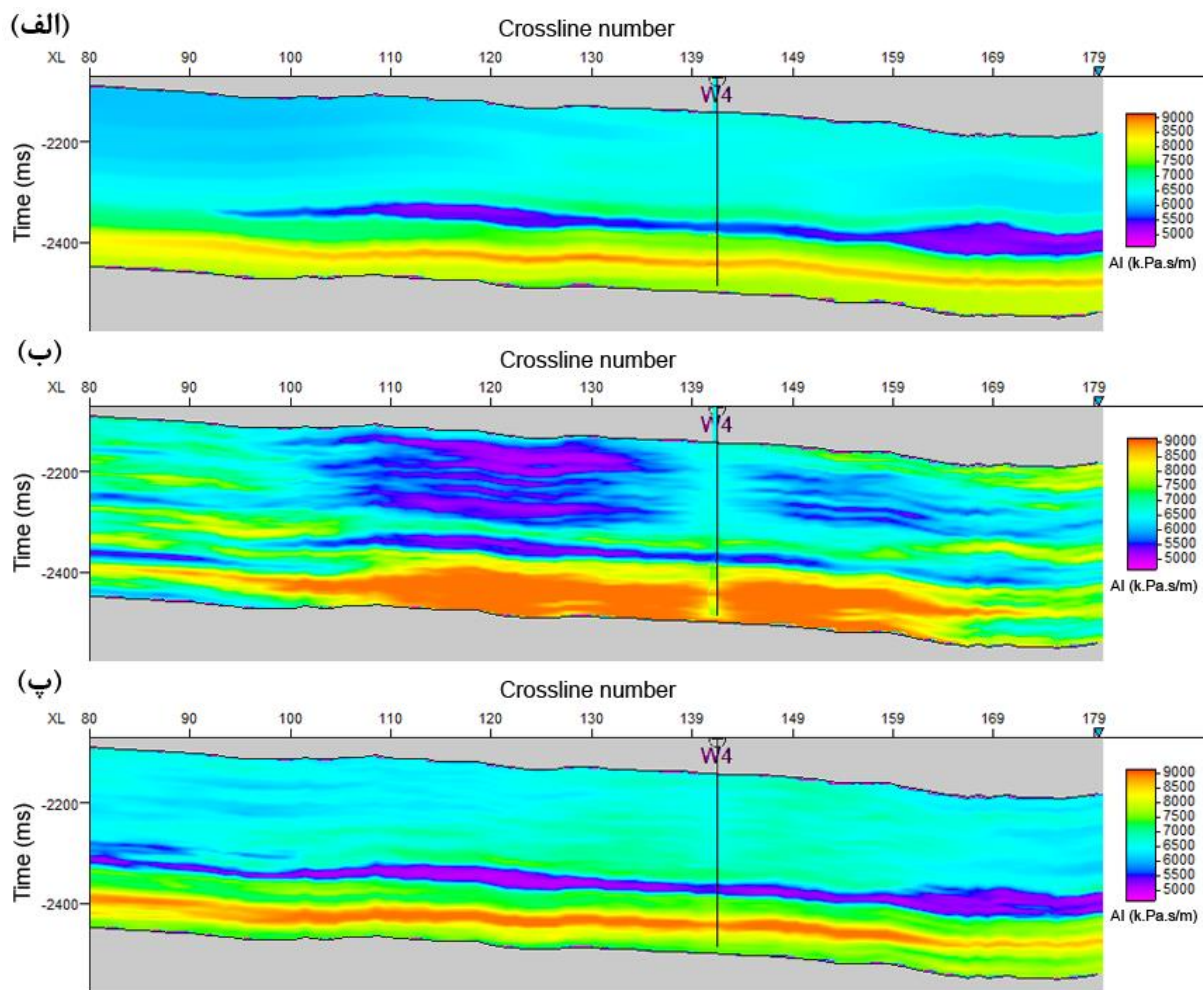
لرزه‌ای نوفه‌دار

در این قسمت نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل مقایسه شده است. شکل ۶-۶-الف مقطع مقاومت صوتی واقعی، شکل ۶-۶-ب مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و شکل ۶-۶-پ مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا را

نشان می‌دهد. وجود نوفه، نتیجه وارون‌سازی پایا (شکل ۶-۶-ب) را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. این تأثیر در نواحی بالایی مقطع با پدید آمدن مقادیر بسیار پایین مقاومت صوتی وارون‌شده روی داده است. با توجه به شکل ۶-۶-الف، یک لایه با مقادیر بالای مقاومت صوتی در قسمت پایینی مقطع و در زمان حدود ۲۴۰۰ میلی‌ثانیه وجود دارد. این لایه در مقطع وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا بسیار گسترده‌تر شده و از واقعیت فاصله گرفته است. اما در مورد وارون‌سازی ناپایا، چنین نواقصی وجود ندارد. مقطع مقاومت صوتی وارون‌شده توسط الگوریتم وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۶-پ) نشان می‌دهد که این الگوریتم به خوبی توانسته است مقادیر مقاومت صوتی مشابه با مقادیر واقعی را علی‌رغم وجود نوفه در داده‌ها، تولید کند. جدول ۶-۶ میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مقادیر وارون‌شده توسط دو روش وارون‌سازی را نشان می‌دهد. ارقام مندرج در این جدول نشان می‌دهند که مقدار واریانس مقاومت صوتی در وارون‌سازی پایا افزایش داشته است. در حالی که در مورد وارون‌سازی ناپایا، واریانس داده‌های وارون‌شده به داده‌های چاه‌ها نزدیک‌تر است. این موضوع در بررسی هیستوگرام‌های مقاومت صوتی نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد. شکل ۶-۷ نشان می‌دهد که هیستوگرام مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا دارای تشابه بالاتری با هیستوگرام داده‌های مقاومت صوتی واقعی نسبت به وارون‌سازی پایا است.

شکل ۶-۸ مقاطع لرزه‌ای مربوط به نتایج وارون‌سازی را نشان می‌دهد. شکل ۶-۸-الف مقطع لرزه‌ای واقعی با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل، شکل ۶-۸-ب مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی پایا و شکل ۶-۸-پ مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی ناپایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-۸ مشخص است، الگوریتم وارون‌سازی ناپایا دارای بهبود قابل ملاحظه‌ای در بازتولید مقطع لرزه‌ای واقعی در مقایسه با وارون‌سازی پایا برای داده‌های نوفه‌دار می‌باشد. همچنین، ضریب همبستگی کلی بین پاسخ مدل وارون‌شده نهایی با داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و همین‌طور خطای جذر میانگین مربعات در جدول ۶-۷ مقایسه شده است. مطابق این جدول، نتایج وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های مصنوعی نوفه‌دار، بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت پایا داشته

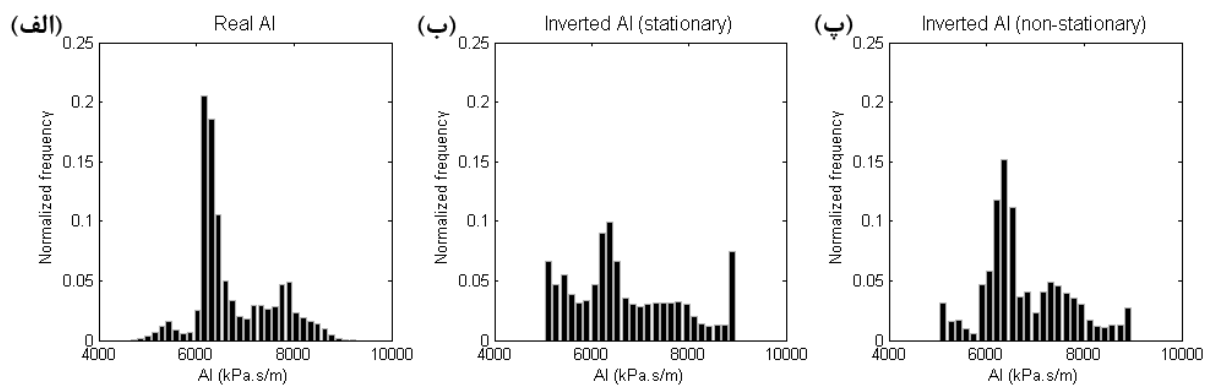
است. ضمن اینکه، با مقایسه جدول ۶-۲ و جدول ۶-۷ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر منفی حضور نوفه بر نتایج وارون‌سازی پایا بیشتر از حالت ناپایاست زیرا افزایش خطای وارون‌سازی پایا در حالت داده‌های بدون نوفه نسبت به نوفه‌دار حدود ۵ درصد است. در حالی که این افزایش در وارون‌سازی ناپایا ۰/۳ درصد بوده است.



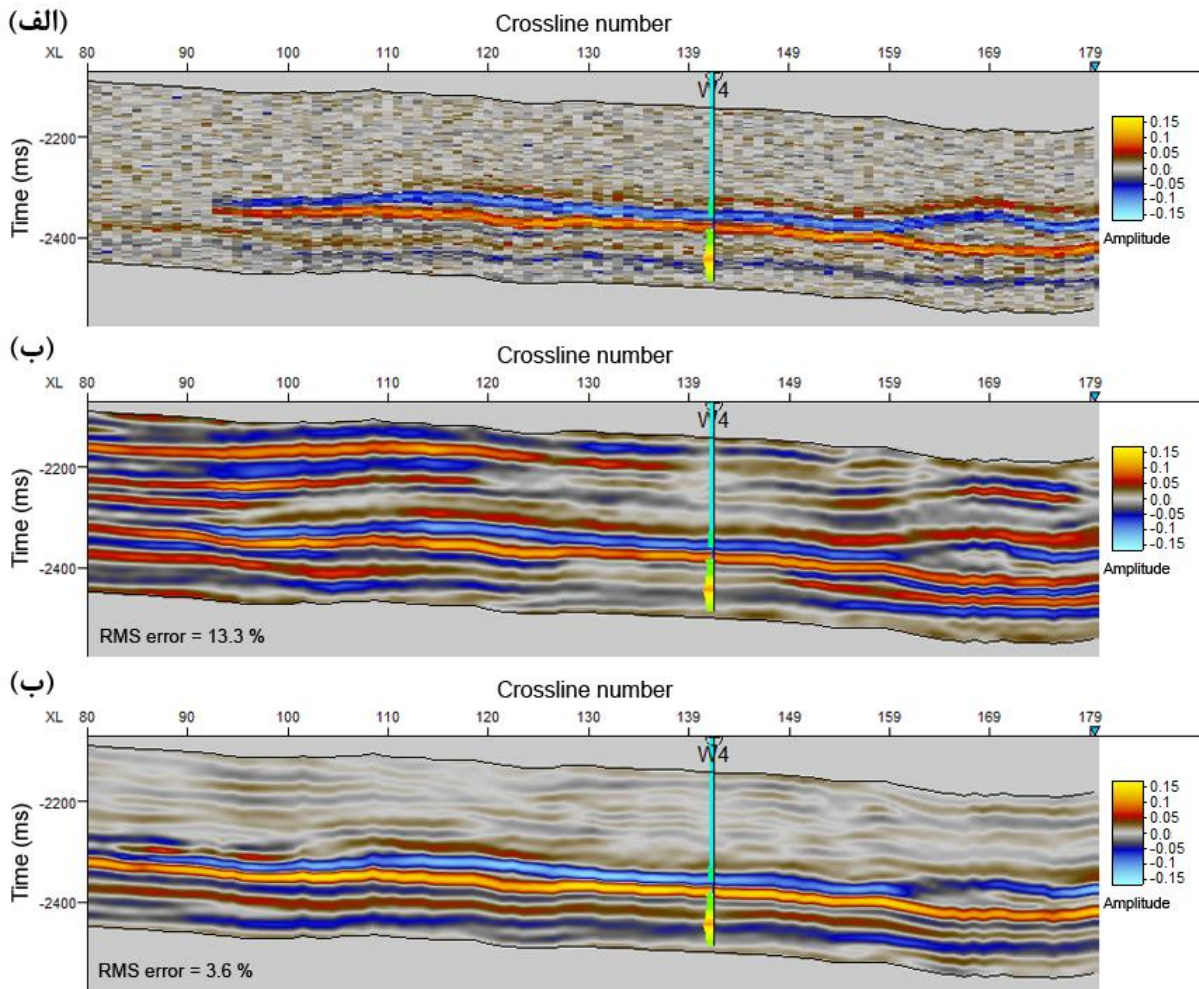
شکل ۶-۶- الف) مقطع مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع مقاومت صوتی مربوط به وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

جدول ۶-۶- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل

وارینانس	میانگین	مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)
۷۰۲۶۹۲	۶۷۵۰	مقاومت صوتی چاه‌ها
۹۳۴۷۶۷	۶۶۱۲	مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا
۷۶۷۳۳۸	۶۷۶۸	مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا



شکل ۶-۷- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده‌های واقعی چاه‌ها، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.



شکل ۶-۸-الف) مقطع لرزه‌ای واقعی با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل، ب) مقطع لرزه‌ای مصنوعی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به وارون‌سازی ناپایا.

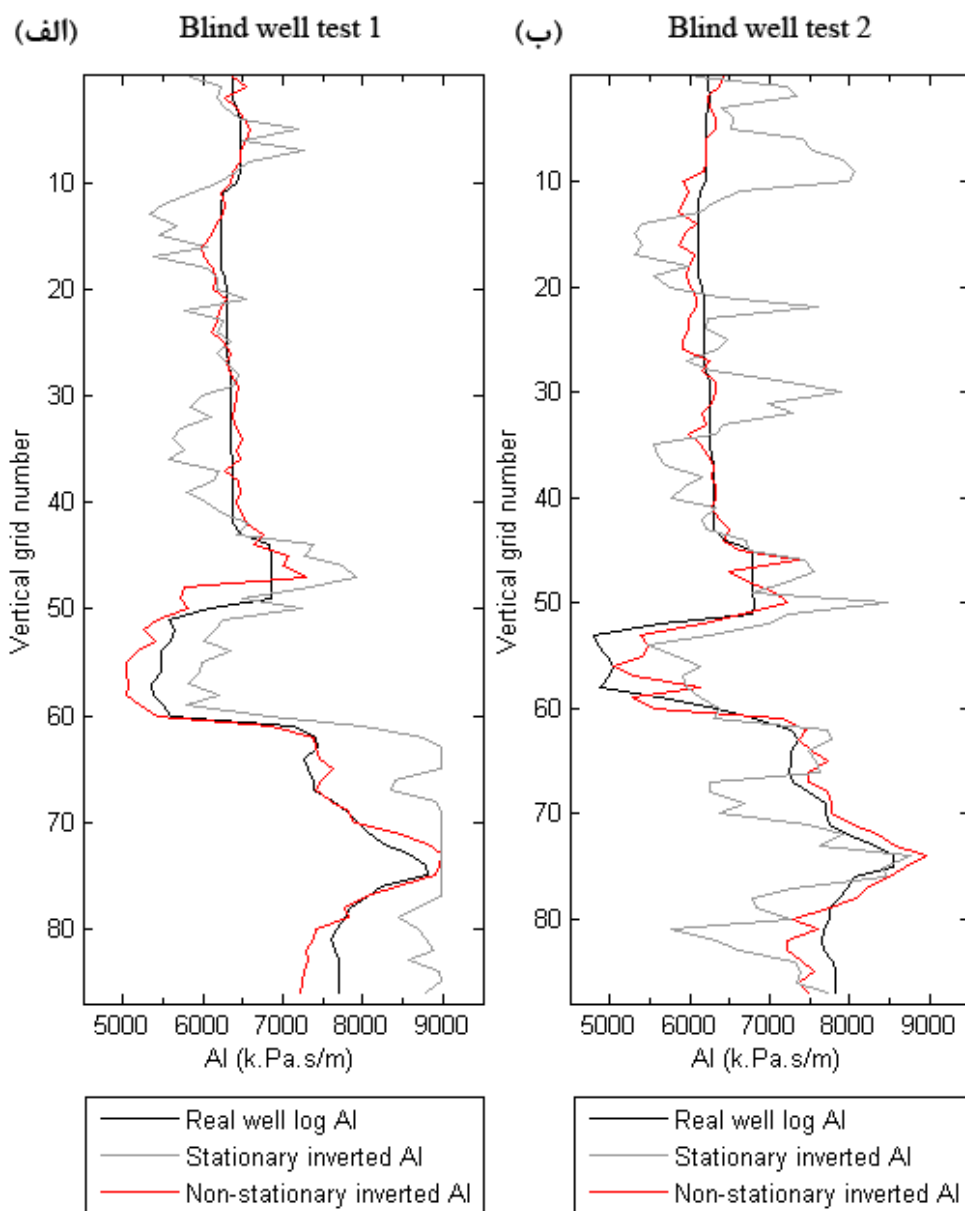
جدول ۶-۷- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا.

نوع وارون‌سازی	ضریب همبستگی	خطا (درصد)
پایا	۰/۷۱	۱۳/۳
ناپایا	۰/۸۰	۳/۶

شکل ۶-۹ نمودار مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی یک و دو (شکل ۴-۲) همراه با مقادیر وارون‌شده آن‌ها را توسط وارون‌سازی پایا و ناپایای داده مصنوعی نوفه‌دار نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، حضور نوفه، تأثیر منفی بر نتایج حاصل از وارون‌سازی پایا گذاشته است. اما در مورد وارون‌سازی ناپایا تطابق خوبی بین داده‌های مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقاومت صوتی وارون‌شده وجود دارد. جدول ۶-۸ ضرایب همبستگی بین مقادیر مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقاومت صوتی وارون‌شده را در هر دو حالت را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، افزایش ضریب همبستگی در مورد وارون‌سازی ناپایا خصوصاً در مورد چاه آزمایشی شماره ۲ مشهود است. بهبود نتایج وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار توسط محاسبه خطای جذر میانگین مربعات مربوط به نمودارهای شکل ۶-۹ نیز تأیید شده است. مطابق ارقام مندرج در جدول ۶-۹، کاهش خطای وارون‌سازی ناپایا در مورد هر دو چاه آزمایشی نسبت به حالت پایا قابل ملاحظه است.

برای مقایسه تحلیل عدم قطعیت، مقاطع واریانس در شکل ۶-۱۰ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که به طور کلی، عدم قطعیت در مورد نتایج وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۱۰-ب) کاهش یافته است.

همچنین، زمان اجرای الگوریتم وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی یک رایانه با پردازنده هشت هسته‌ای 2.20GHz و حافظه تصادفی 16GB، در جدول ۶-۱۰ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، زمان اجرای وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار، حدود ۴ درصد نسبت به حالت پایا افزایش داشته است.



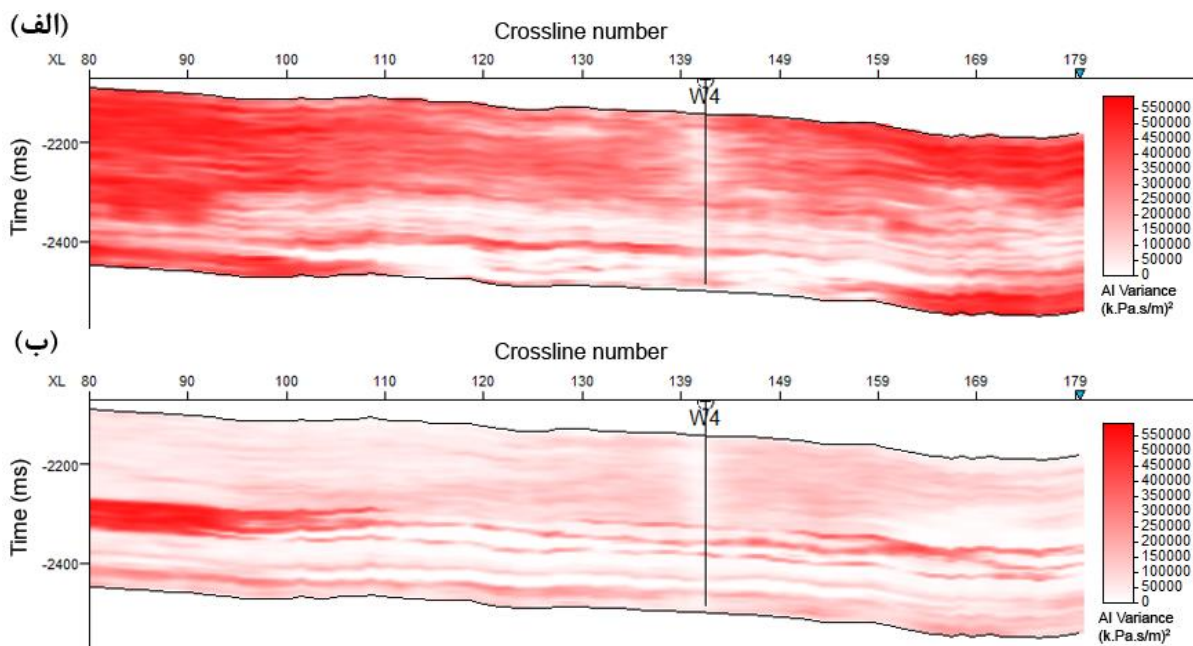
شکل ۶-۹- مقایسه آزمون چاه‌های آزمایشی در مورد نتایج وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲.

جدول ۶-۸- ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۰/۸۳	۰/۹۵
شماره ۲	۰/۵۶	۰/۹۴

جدول ۶-۹- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۱۷/۳	۵/۳
شماره ۲	۱۷/۰	۵/۷



شکل ۶-۱۰- مقطع قائمی از مدل واریانس محاسبه شده از ۶۴ خروجی مقاومت صوتی در تکرار ششم مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. الف) وارون‌سازی پایا و ب) وارون‌سازی ناپایا.

جدول ۶-۱۰- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

داده‌های مصنوعی نوفه‌دار	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا (دقیقه)	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا (دقیقه)	درصد افزایش زمان اجرای الگوریتم ناپایا نسبت به پایا
	۱۶۵	۱۷۲	۴/۲

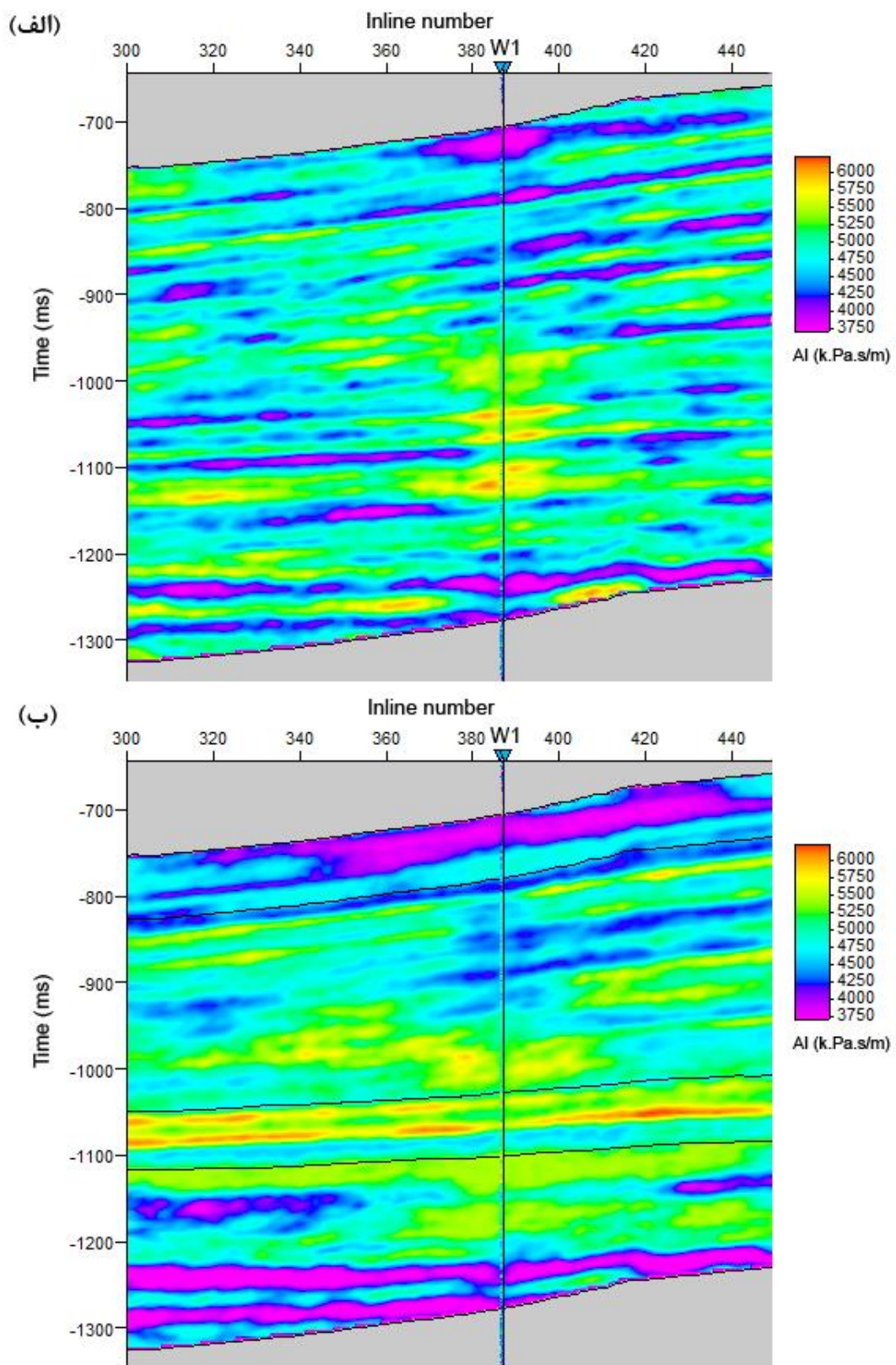
۴-۶- مقایسه نتایج وارون‌سازی حالت پایا و ناپایا برای داده‌های

لرزه‌های واقعی

در این قسمت، نتایج بکارگیری الگوریتم وارون‌سازی پایا و ناپایا بر روی داده‌های واقعی که در بخش ۴-۴ توصیف شده مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. شکل ۶-۱۱ مقطع مقاومت صوتی وارون‌شده توسط الگوریتم وارون‌سازی پایا (شکل ۶-۱۱-الف) و ناپایا (شکل ۶-۱۱-ب) را نشان می‌دهد. در شکل ۶-۱۱-الف توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی به صورت یکسان در کل مقطع پراکنده شده است. به طور خاص می‌توان به مقادیر بالا (رنگ زرد مایل به نارنجی) و مقادیر پایین (رنگ آبی مایل به بنفش) اشاره نمود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل این امر پایا بودن وارون‌سازی و استفاده از یک تابع توزیع احتمالی برای نمونه‌برداری جهت شبیه‌سازی زمین‌آماری است. به این ترتیب از لحاظ زمین‌آماری، احتمال ظهور مقادیر مختلف مقاومت صوتی در کل منطقه مورد مطالعه، ابتدا وابسته به مسیر تصادفی شبیه‌سازی و مقادیر مقاومت صوتی در کل شبکه وارون‌سازی است. همچنین، در مرحله بعد، داده‌های لرزه‌ای و موجک لرزه‌ای می‌توانند بر مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده تأثیر بگذارند. اما در وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۱۱-ب) عمل منطقه‌بندی صورت گرفته است. با توجه به هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت چاه در شکل ۵-۱۹، مقادیر مقاومت صوتی بالای ۵۵۰۰ (کیلو پاسکال ثانیه بر متر) تنها در مناطق دوم و سوم وجود دارند. بر عکس، مقادیر پایین‌تر از ۴۰۰۰ تنها در مناطق اول و چهارم ظاهر شده‌اند. با توجه به اینکه وارون‌سازی به صورت ناپایا و با توجه به پارامترهای پیوستگی فضایی محلی و همین‌طور توابع توزیع محلی انجام شده است، در مدل مقاومت صوتی وارون‌شده نیز هیستوگرام‌های محلی بازتولید شده‌اند. لذا مقادیر بالای مقاومت صوتی تنها در مناطق دوم و سوم (شکل‌های ۵-۱۹-ج و چ) و مقادیر پایین در مناطق اول و چهارم (شکل‌های ۵-۱۹-ث و ه) وارون شده‌اند. از نظر زمین‌شناسی نیز فرض ناپایایی می‌تواند به واقعیت نزدیک‌تر باشد. زیرا منطقه‌بندی بر اساس افق‌های تفسیر شده انجام شده است بنابراین مشخصات الاستیکی لایه‌های زیرسطحی در هر منطقه احتمالاً مختص همان منطقه است. جدول ۶-۶-

۱۱ میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مقادیر وارون‌شده توسط دو روش وارون‌سازی را نشان می‌دهد. هر دو روش تقریباً میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی را بازتولید کرده‌اند. توجه شود که واریانس در حالت ناپایا کمی بیشتر از حالت پایا بدست آمده است. علت این امر می‌تواند عدم وجود داده‌های کافی مقیدکننده (مقاومت صوتی چاه‌ها) در حالت ناپایا بعد از عمل منطقه‌بندی باشد. البته این اختلاف واریانس زیاد نیست و مطابق شکل ۶-۱۲، هیستوگرام‌های مقاومت صوتی وارون‌شده توسط هر دو روش مشابه مقاومت صوتی واقعی چاه به دست آمده است.

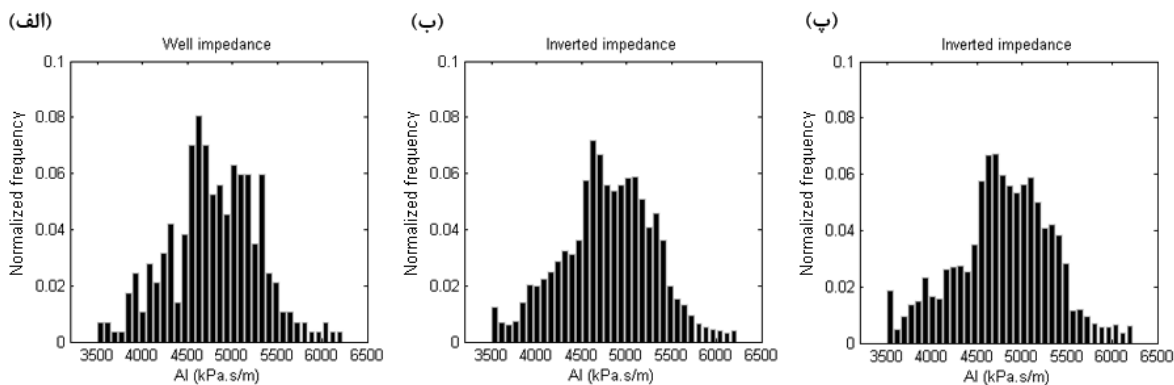
شکل ۶-۱۳ مقاطع لرزه‌ای مرتبط با وارون‌سازی پایا و ناپایا را نشان می‌دهد. اگرچه هر دو روش وارون‌سازی بازتابنده‌های اصلی را به درستی وارون کرده‌اند، تشابه مقطع مربوط به وارون‌سازی ناپایا (شکل ۶-۱۳-پ) با مقطع لرزه‌ای واقعی (شکل ۶-۱۳-الف) کمی بیشتر است. این موضوع توسط جدول ۶-۱۲ قابل بیان است. مطابق ارقام مندرج در این جدول، ضریب همبستگی در حالت ناپایا افزایش و خطای جذر میانگین مربعات در حالت ناپایا حدود ۳ درصد کاهش یافته و به ۱۱/۶ درصد رسیده است.



شکل ۶-۱۱-الف) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و ب) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی.

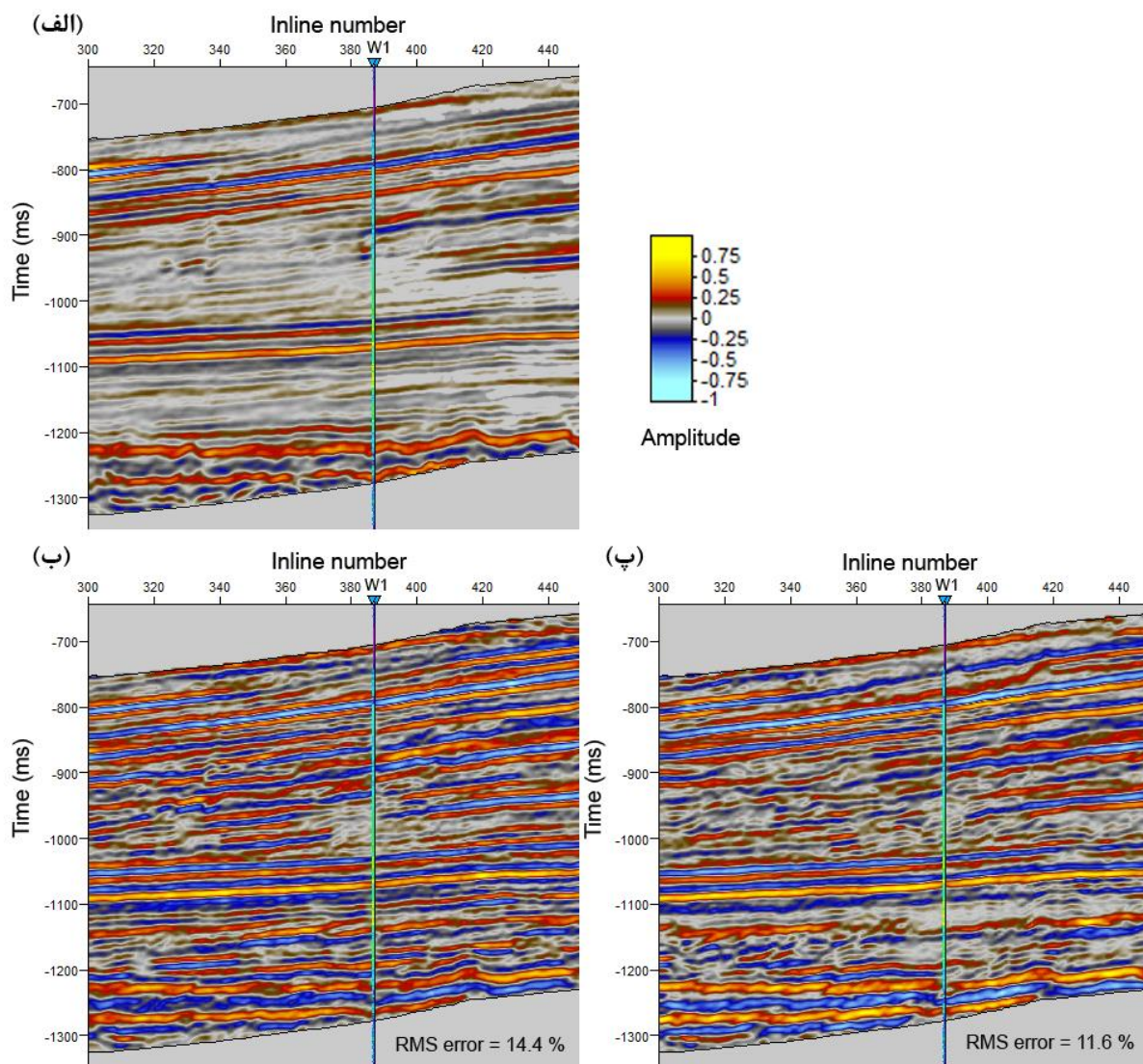
جدول ۱۱-۶- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه	۴۸۰۱	۲۴۸۸۴۰
مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا	۴۷۹۹	۲۶۴۸۶۰
مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا	۴۸۰۱	۲۸۹۹۷۶



شکل ۱۲-۶- الف) هیستوگرام مقاومت صوتی داده‌های مقاومت صوتی چاه، ب) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی ناپایا در مورد داده‌های واقعی.

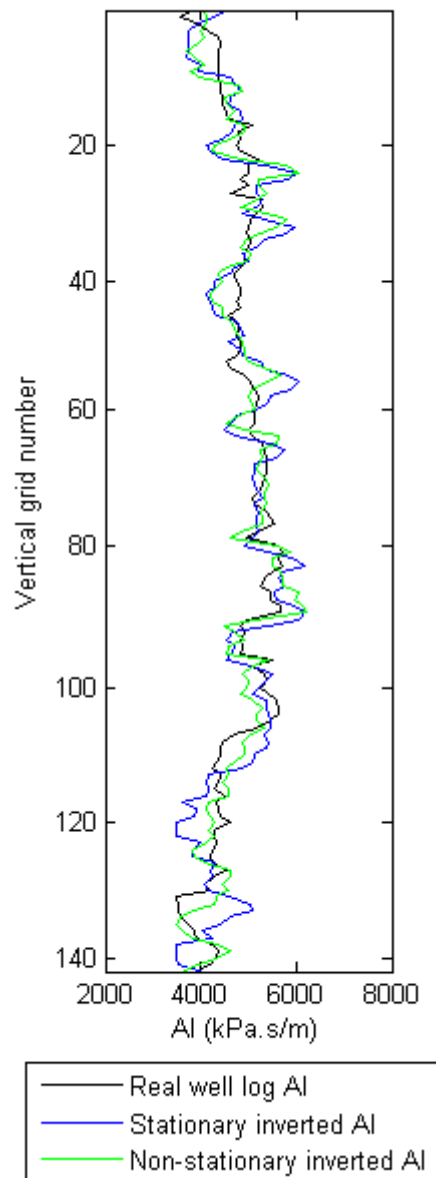
شکل ۱۴-۶ نمودار مقاومت صوتی چاه آزمایشی همراه با مقادیر وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، اگرچه نتایج هر دو روش وارون‌سازی پایا و ناپایا در محل چاه آزمایشی، توأسته‌اند از روند کلی مقاومت صوتی واقعی تبعیت کنند، اما نتیجه وارون‌سازی ناپایا دارای تطابق بهتری با داده‌های مقاومت صوتی چاه آزمایشی است. این موضوع توسط محاسبه ضرایب همبستگی بین مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده و واقعی در جدول ۱۳-۶ نیز تایید شده است. همچنین مطابق جدول ۱۴-۶، خطای جذر میانگین مربعات بین دو نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده (شکل ۱۴-۶) از ۱۸/۷ درصد در حالت پایا به ۱۳/۳ درصد در حالت ناپایا کاهش یافته است.



شکل ۶-۱۳- الف) مقطع لرزه‌ای واقعی (ثبت شده)، ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا و پ) مقطع لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.

جدول ۶-۱۲- ضرایب همبستگی کلی بین مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون‌شده) و واقعی (ثبت شده) و خطای جذر میانگین مربعات در حالت‌های وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های واقعی.

نوع وارون‌سازی	ضریب همبستگی	خطا (درصد)
پایا	۰/۶۲	۱۴/۴
ناپایا	۰/۷۰	۱۱/۶



شکل ۶-۱۴ - مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های واقعی در محل چاه آزمایشی.

جدول ۶-۱۳ - ضریب همبستگی بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط وارون‌سازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای واقعی.

چاه آزمایشی	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۰/۶۴	۰/۷۹

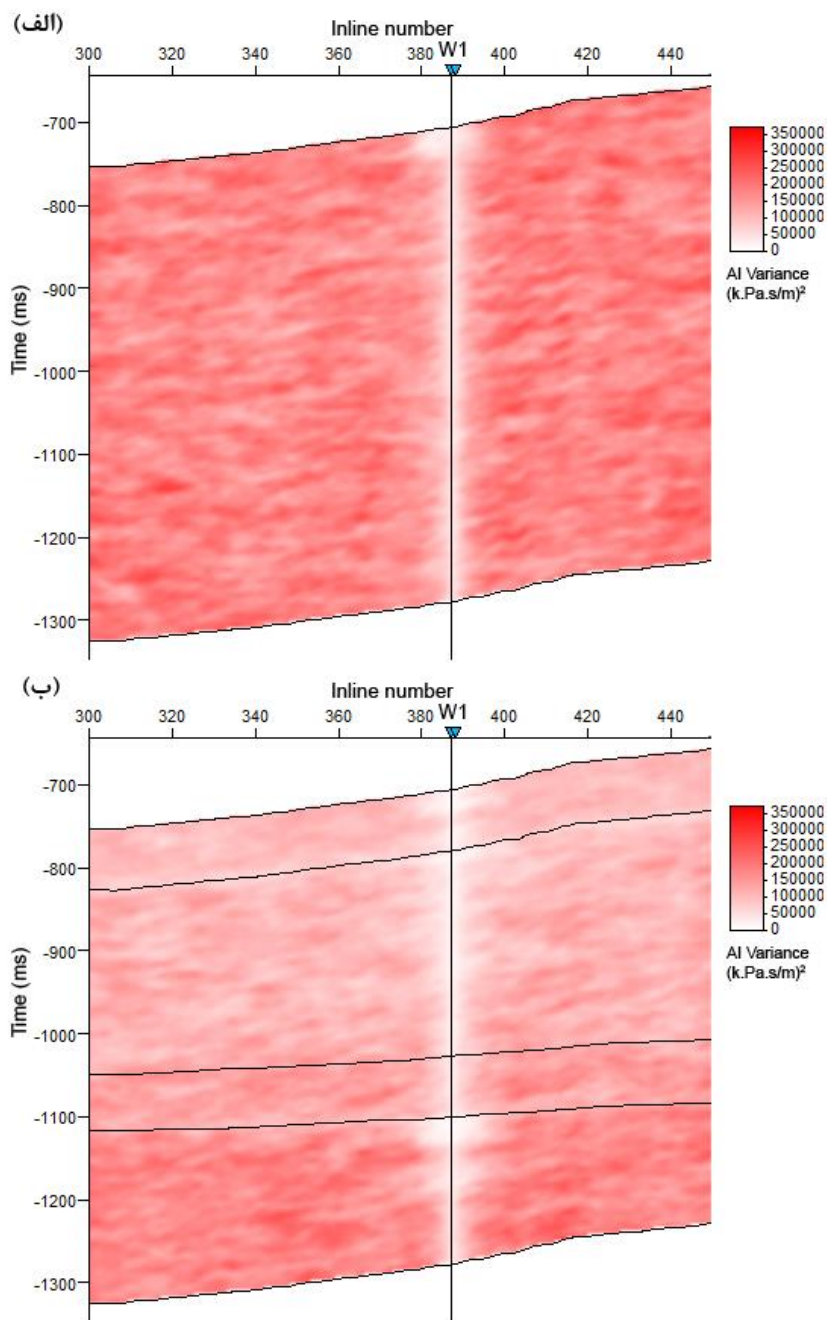
جدول ۶-۱۴- درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون سازی پایا و ناپایا در مورد داده های لرزه ای واقعی.

وارون سازی لرزه ای ناپایا	وارون سازی لرزه ای پایا	چاه آزمایشی
۱۳/۳	۱۸/۷	شماره ۱

مقایسه تحلیل عدم قطعیت در مورد نتایج وارون سازی پایا و ناپایا در شکل ۶-۱۵ ارائه شده است. شکل ۶-۱۵-الف مقطع قائم از مکعب واریانس مقاومت صوتی مربوط به ۶۴ خروجی تکرار نهایی وارون سازی پایا و شکل ۶-۱۵-ب مقطع قائم مشابه مربوط به وارون سازی ناپایا را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، به طور کلی مقادیر واریانس و در نتیجه عدم قطعیت در مورد وارون سازی ناپایا کاهش یافته است.

همچنین، زمان اجرای الگوریتم وارون سازی پایا و ناپایا بر روی یک رایانه با پردازنده هشت هسته ای 2.20GHz و حافظه تصادفی 16GB، در جدول ۶-۱۵ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، زمان اجرای وارون سازی ناپایا بر روی داده های واقعی، ۷/۸ درصد نسبت به حالت پایا افزایش داشته است.

در این فصل، نتایج بکارگیری وارون سازی تصادفی لرزه ای در حالت پایا و ناپایا بر روی داده های مصنوعی و واقعی مقایسه و تحلیل شد. همان طور که قبلاً اشاره شد، پارامترهای پیوستگی فضایی در حالت ناپایا توسط کاربر مدل سازی شده و به عنوان ورودی در اختیار الگوریتم وارون سازی قرار می گیرد. در فصل آینده، تلاش می شود الگوریتمی ارائه شود که بتواند در حین فرایند وارون سازی تصادفی لرزه ای ناپایا، پارامترهای واریوگرام را توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بهینه کند.



شکل ۶-۱۵-الف) مقطع واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی پایا در تکرار نهایی و ب) مقطع واریانس مربوط به ۶۴ خروجی وارون‌سازی ناپایا در تکرار نهایی. عدم قطعیت در مورد نتایج وارون‌سازی ناپایا کاهش یافته است. جدول ۶-۱۵- مقایسه زمان اجرای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا و ناپایا بر روی داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

	وارون‌سازی لرزه‌ای پایا (دقیقه)	وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا (دقیقه)	درصد افزایش زمان اجرای الگوریتم ناپایا نسبت به پایا
داده‌های واقعی	۳۴۵	۳۷۲	۷/۸

فصل هفتم

**تهیه الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام
در واریون‌سازی تصادفی سه‌بعدی ناپایا با روش
ازدحام ذرات**

امروزه از الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی مسائل در علوم گوناگون استفاده می‌شود. اکثر این الگوریتم‌ها با الهام از فرایندهای فیزیکی یا رفتارهای طبیعی موجودات بوجود آمده‌اند و هر کدام خصوصیات منحصر به خود را دارند. استفاده از الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری^۱ در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری، الگوریتم‌هایی هستند که با الهام از فرایندهای فیزیکی و بیولوژیکی طبیعی به وجود آمده‌اند. الگوریتم‌های هوش جمعی^۲ یکی از زیرمجموعه‌های الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری هستند. از خصوصیات الگوریتم‌های هوش جمعی این است که از اعضای تشکیل شده‌اند که رفتارهای ساده‌ای از خود بروز می‌دهند اما اثر جمعی این رفتارها به گونه‌ای است که هوش جمعی را نتیجه می‌دهد. همه این روشها جزء روش‌های تکرارشونده^۳ هستند [Olariu and Zomaya 2005, Hoorfar 2007]. در طی سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در راستای مقایسه الگوریتم‌های مختلف ابتکاری به عمل آمده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مختلف در کاربردهای متفاوت عملکردهای یکسانی ندارند. بنابراین، در هر کاربرد یک الگوریتم ممکن است از سایر الگوریتم‌های ابتکاری در یافتن جواب بهینه مؤثرتر و کارا تر عمل کند. این امر باعث شده است که نتوان به‌طور قاطع یک الگوریتم جستجو را نسبت به سایرین برتر دانست [Zhang et al. 2015, Clerc 2013].

مثال‌های فراوانی از الگوریتم‌های ابتکاری وجود دارد که موضوع بحث این نوشتار نیست. یکی از روش‌هایی که کارایی آن در بسیاری از مسائل مهندسی به اثبات رسیده است، بهینه‌سازی ازدحام ذرات است که با تقلید از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها، به وجود آمده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از اجتماعی از ذرات تشکیل شده که بین موقعیت‌های مختلف جواب مسأله حرکت می‌کنند. هر ذره به سمت بهترین موقعیتی که خودش تاکنون کشف کرده و بهترین موقعیتی که

¹ Heuristic

² Swarm intelligence algorithms

³ Iterative

تاکنون توسط ذرات جمعیت پیدا شده است، شتاب می‌گیرد [Olariu and Zomaya 2005, Hoorfar 2007]. این روش بهینه‌سازی، در حل مسائل مختلف ژئوفیزیکی بکار گرفته شده است. شاو^۱ و سریواستاوا^۲ (۲۰۰۷) الگوریتم ازدحام ذرت را برای وارون‌سازی داده‌های قطبیدگی القایی^۳ و مگنتوتلوریک^۴ استفاده کردند [Shaw and Srivastava 2007]. فرناندز^۵ و همکاران (۲۰۱۰) این روش بهینه‌سازی را برای تخمین سطح ایستایی آب از روی داده‌های پتانسیل خودزا^۶ بکار بردند [Fernández-Martínez et al. 2010]. تکلی^۷ و بال^۸ (۲۰۱۲) با استفاده از روش ازدحام ذرات داده‌های گرانی‌سنجی را مدل کردند [Tekkeli and Bal 2012]. هوانگ^۹ و همکاران (۲۰۱۲) از روش ازدحام ذرات برای آموزش نرون‌های شبکه عصبی مصنوعی در وارون‌سازی نگارهای چاه استفاده کردند [Huang et al. 2012]. لیپری^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) تحلیل سرعت لرزه‌ای را با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود بخشیدند [Lipari et al. 2013]. در این رساله برای اولین بار از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا استفاده شده است. برای این منظور، از نرم‌افزار RAVEN که در خود این الگوریتم بهینه‌سازی را جای داده، بهره‌برداری شده است. این نرم‌افزار توسط دانشگاه هریوت-وات^{۱۱} تهیه و توسط دانشگاه لیسبون در اختیار نگارنده قرار گرفته است. نرم‌افزار RAVEN قابلیت برقراری ارتباط با کدهای نوشته شده در محیط MATLAB را دارد.

¹ Shaw

² Srivastava

³ Induced polarization (IP)

⁴ Magnetotellurics (MT)

⁵ Fernández

⁶ Self potential

⁷ Tekkeli

⁸ Bal

⁹ Huang

¹⁰ Lipari

¹¹ Heriot-Watt University

۷-۲- بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام با روش ازدحام ذرات

برای تعریف تابع هدف^۱ در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از اختلاف ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و مصنوعی (وارون‌شده) استفاده شده است. بنابراین در این روش، هدف از بهینه‌سازی، کمینه‌کردن این تابع بعد از انجام تعداد مشخصی تکرار است. با توجه به اهمیت دامنه تأثیر در مدل‌سازی واریوگرام، در این رساله، بازه‌ای از اعداد حقیقی در همسایگی دامنه‌های تأثیر مدل‌های واریوگرام به عنوان فضای جستجو به الگوریتم ازدحام ذرات معرفی شده است.

الگوریتم ترکیب بهینه‌سازی ازدحام ذرات و وارون‌سازی تصادفی ناپایا مطابق شکل ۷-۱ تهیه و ارائه شده است. ابتدا دامنه‌های تأثیر مربوط به مدل‌های واریوگرام در هر منطقه استخراج می‌شود. سپس بازه‌های جستجو برای دامنه واریوگرام‌ها تعیین می‌گردد. در این رساله، برای تعریف فضای جستجو برای هر یک از دامنه‌های تأثیر رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$S = [a - 0.1 \times a, a + 0.1 \times a] \quad (۷-۱)$$

که در آن، S بازه اعداد حقیقی قابل جستجو و a دامنه تأثیر مدل واریوگرام در منطقه مورد نظر است. این بدان معنی است که یک بازه عدم قطعیت با دامنه تغییرات ۱۰ درصد برای دامنه تأثیر در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تابع هدف (OF) به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

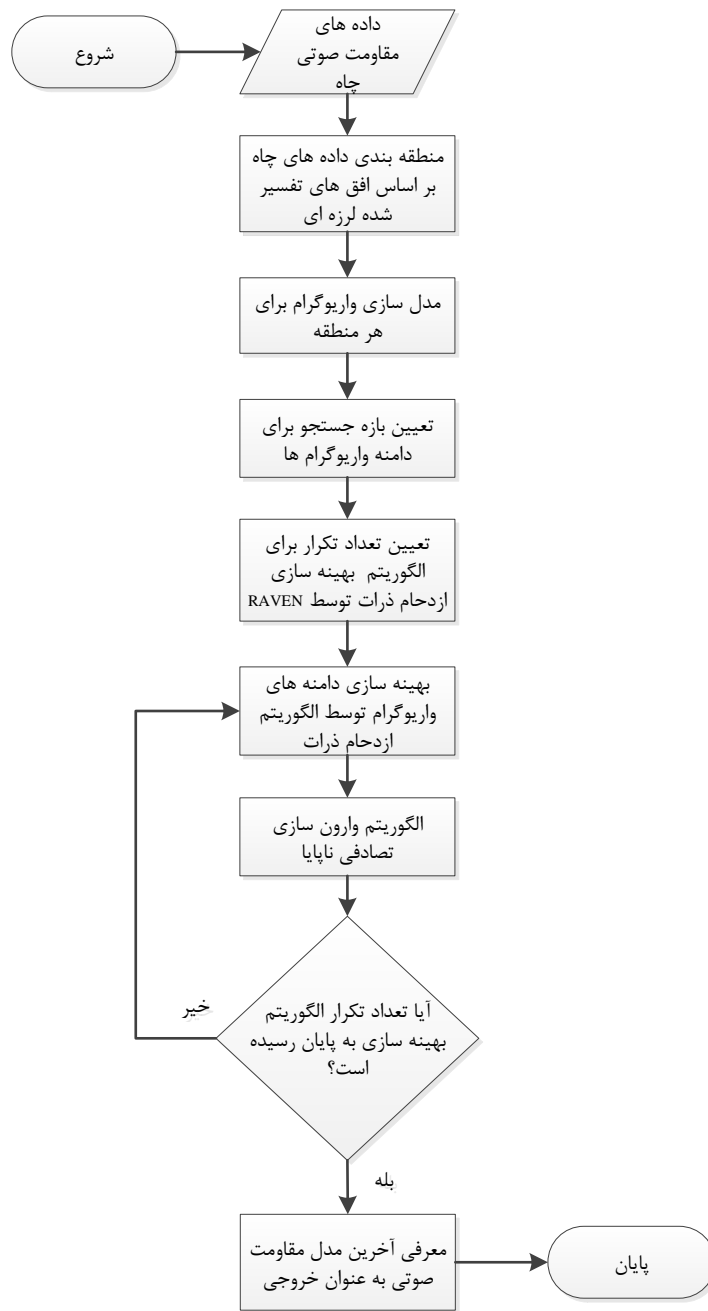
$$OF = Corr_{n+1}(\mathbf{r}, \mathbf{s}_{n+1}) - Corr_n(\mathbf{r}, \mathbf{s}_n) \quad (۷-۲)$$

که در آن، $Corr_n$ ضریب همبستگی بین داده لرزه‌ای واقعی و وارون‌شده در تکرار n ام، \mathbf{r} داده لرزه‌ای واقعی و \mathbf{s}_n داده لرزه‌ای وارون شده در تکرار n ام است.

^۱ Objective function

با اجرای اولین تکرار الگوریتم بهینه‌سازی، اولین سری از دامنه‌های بهینه شده به الگوریتم وارون‌سازی تصادفی ناپایا معرفی می‌شوند. سپس الگوریتم وارون‌سازی ناپایا با استفاده از این دامنه‌های واریوگرام اجرا شده و خروجی مقاومت صوتی وارون‌شده را معرفی می‌کند. اجرای الگوریتم وارون‌سازی تا زمانی که تعداد تکرار الگوریتم بهینه‌سازی به اتمام برسد ادامه یافته و در پایان، آخرین مدل مقاومت صوتی به عنوان خروجی معرفی می‌شود.

در ادامه این فصل، بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر روی وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی تشریح شده است.



شکل ۷-۱- فلوچارت الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات و وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

۷-۳- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه

داده‌های مصنوعی استفاده شده در این بخش همانند بخش ۴-۲-۱ است. مجدداً از ۱۴ چاه موجود، ۱۲ چاه برای فرایند وارون‌سازی و ۲ چاه برای آزمون در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۲). برای

وارون‌سازی ناپایا، منطقه‌بندی مطابق شکل ۵-۲ در نظر گرفته شده و مدل‌سازی اولیه پارامترهای واریوگرام در هر منطقه مطابق جدول ۷-۱ محاسبه شده است.

جدول ۷-۱- مدل‌های واریوگرام کروی برای مناطق یک، دو و سه در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

نام منطقه	مدل‌های واریوگرام افقی	مدل‌های واریوگرام قائم
۱	$\gamma(h) = 125972 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{70} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{70} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 184016 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{8} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{8} \right)^3 \right]$
۲	$\gamma(h) = 428492 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{18} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{18} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 597536 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{5} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{5} \right)^3 \right]$
۳	$\gamma(h) = 40565 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{55} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{55} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 40473 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{40} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{40} \right)^3 \right]$

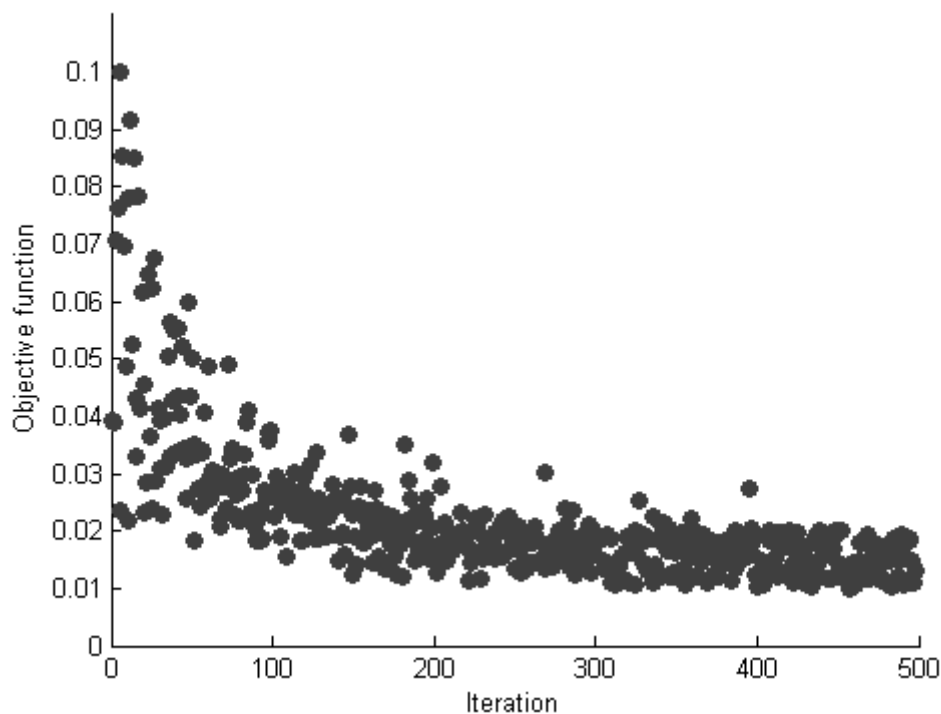
در مورد داده مصنوعی بدون نوفه با توجه به مدل‌های جدول ۷-۱، بازه‌های جستجو بر اساس رابطه ۷-۱ به صورت جدول ۷-۲ تعریف شده است.

جدول ۷-۲- بازه‌های جستجو در بهینه‌سازی برای مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک، دو و سه مربوط داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

نام منطقه	بازه دامنه واریوگرام افقی	بازه دامنه واریوگرام قائم
۱	[۶۳, ۷۷]	[۶/۲, ۷/۸]
۲	[۱۶/۲, ۱۹/۸]	[۴/۵, ۵/۵]
۳	[۴۹/۵, ۶۰/۵]	[۳۶, ۴۴]

با اجرای بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ۵۰۰ تکرار و در هر تکرار ۵ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی، نمودار همگرایی تابع هدف به صورت شکل ۷-۲ حاصل شده است. توجه شود که تعداد تکرار بیشتر تأثیری در بهبود نتایج نداشته است. جدول ۷-۳ مقادیر بهینه شده دامنه‌های واریوگرام برای مناطق مختلف را بعد از ۵۰۰ تکرار نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و

مصنوعی (وارون شده) در پایان فرایند بهینه‌سازی ۰/۸۹ محاسبه شده است. این ضریب همبستگی در حالت بدون استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام، ۰/۸۸ به دست آمده بود (بخش ۵-۳).



شکل ۷-۲- نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارون‌سازی ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

جدول ۷-۳- مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه برای مناطق یک، دو و سه.

نام منطقه	دامنه واریوگرام افقی	دامنه واریوگرام قائم
۱	۶۸/۴	۷/۱
۲	۱۶/۴	۵/۲
۳	۵۳/۷	۴۲/۶

همچنین، میانگین و واریانس مقاومت صوتی در جدول ۷-۴ ارائه شده‌اند. مطابق این جدول، مقادیر میانگین و واریانس مدل نهایی مقاومت صوتی وارون شده مشابه میانگین و واریانس داده‌های چاه می‌باشد.

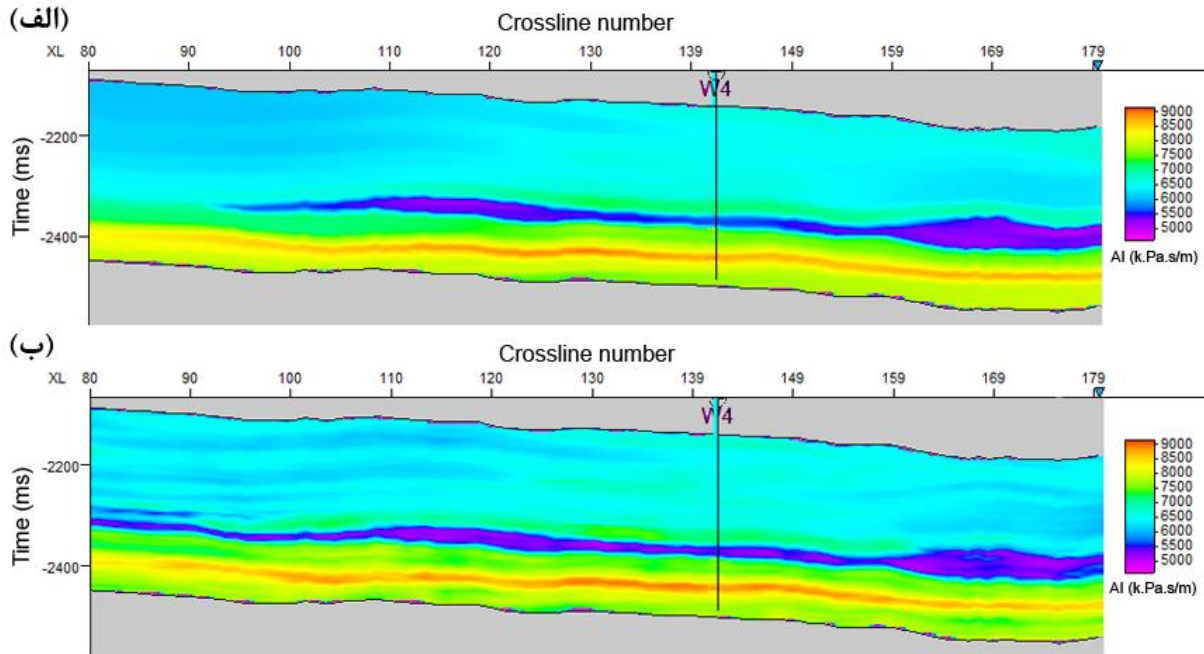
جدول ۷-۴- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون شده با استفاده فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی تصادفی ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون شده	۶۷۶۸	۷۱۶۸۴۳

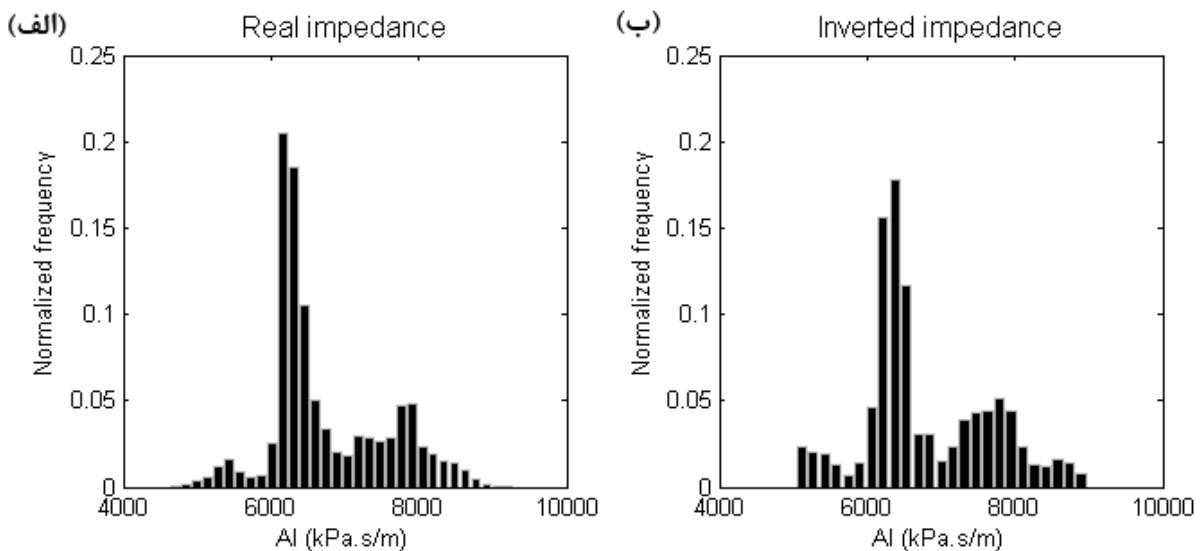
در شکل ۷-۳ یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی با مدل وارون شده با استفاده از بهینه‌سازی وارون‌سازی تصادفی ناپایا ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت صوتی وارون شده توسط وارون‌سازی، تشابه خوبی با مقاومت صوتی واقعی دارد. این موضوع براساس هیستوگرام‌های مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مدل نهایی وارون شده توسط وارون‌سازی ناپایا در شکل ۷-۴ تأیید شده است. همان‌طور که در شکل ۷-۴ مشاهده می‌شود، هیستوگرام مقاومت صوتی چاه‌ها در مدل وارون شده به خوبی بازتولید شده است. علاوه بر هیستوگرام کلی، هیستوگرام‌های مربوط به هر منطقه نیز در شکل ۷-۵ مقایسه شده است. مطابق این شکل، هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه‌ها در مناطق مختلف (شکل‌های ۷-۵-الف، ب و پ) مشابه هیستوگرام‌های مدل مقاومت صوتی وارون شده در مناطق متناظر (شکل‌های ۷-۵-ت، ث و ج) هستند.

با محاسبه ضرایب بازتاب و هم‌امیخت موجک لرزه‌ای (شکل ۴-۳)، مکعب داده‌های لرزه‌ای مصنوعی قابل محاسبه است. شکل ۷-۶ مقایسه یک مقطع قائم لرزه‌ای مربوط به داده‌های لرزه‌ای واقعی (شکل ۶-۷-الف) و داده‌های لرزه‌ای وارون شده (شکل ۷-۶-ب) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که بازتابنده‌های اصلی در مدل وارون شده به خوبی بازتولید شده‌اند. اما همانند شکل ۵-۹ در منطقه‌ای به که به صورت بیضی مشخص شده است، اختلاف زیادی بین دامنه لرزه‌ای وارون شده با دامنه لرزه‌ای واقعی وجود دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل این پدیده می‌تواند عدم تطابق مقادیر دامنه

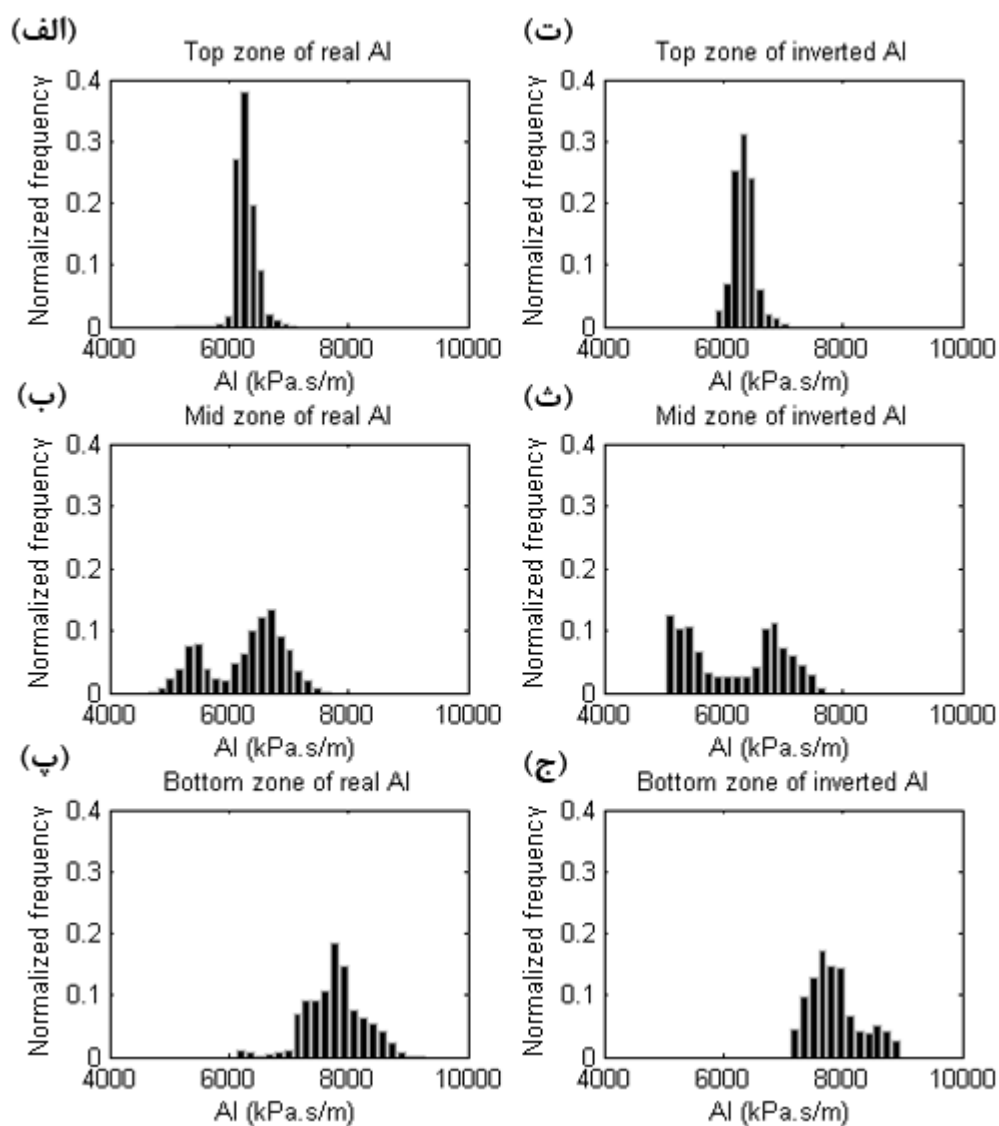
لرزه‌های بازتابنده‌های این منطقه با داده‌های مقیدکننده چاه‌ها باشد. خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای وارون‌شده و واقعی برابر $3/2$ درصد محاسبه شده است.



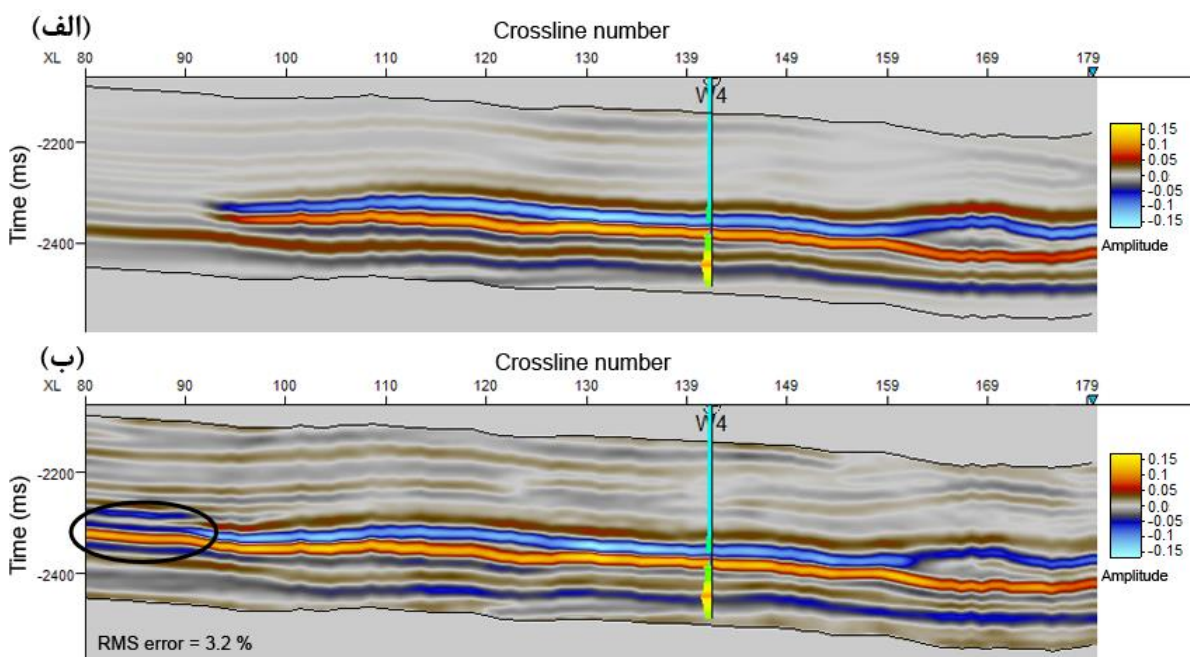
شکل ۷-۳- الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم مقاومت صوتی حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در حین وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه.



شکل ۷-۴- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف) داده‌های چاه‌ها و ب) پاسخ مدل وارون بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.



شکل ۷-۵- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی بدون نوفه. الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌های چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. ت، ث و ح) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه.

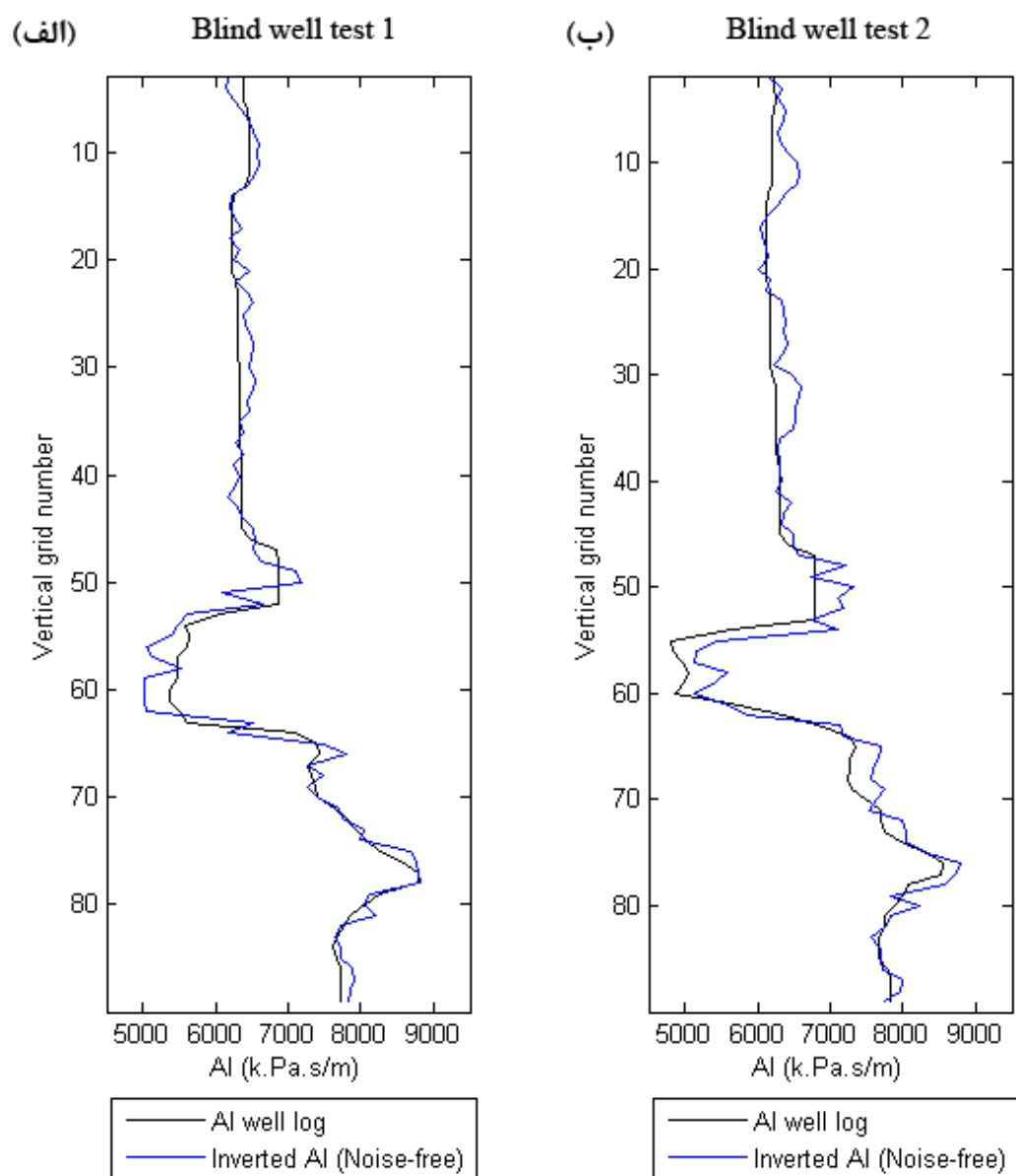


شکل ۷-۶-الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه، ب) مقطع حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا که در آن پارامترهای واریوگرام بهینه شده‌اند.

آزمون فرایند وارون‌سازی ناپایا در این حالت با استفاده از داده‌های موجود دو چاه آزمایشی (مطابق شکل ۴-۲) انجام شده است. مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده در محل این دو چاه استخراج شده و نمودارهای آن در شکل ۷-۷ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی در هر دو چاه تطابق بسیار خوبی دارد. ضرایب همبستگی بین داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده در جدول ۷-۵ آورده شده است. در مورد چاه آزمایشی شماره ۱ نتایج بهینه‌سازی مشابه حالت بدون بهینه‌سازی (جدول‌های ۵-۵ و ۶-۵) به دست آمده است. اما در مورد چاه آزمایشی شماره ۲، ضریب همبستگی به میزان حدود ۰/۰۱ افزایش و خطا به مقدار ۰/۱ درصد کاهش داشته است.

جدول ۵-۷- ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای بدون نوفه.

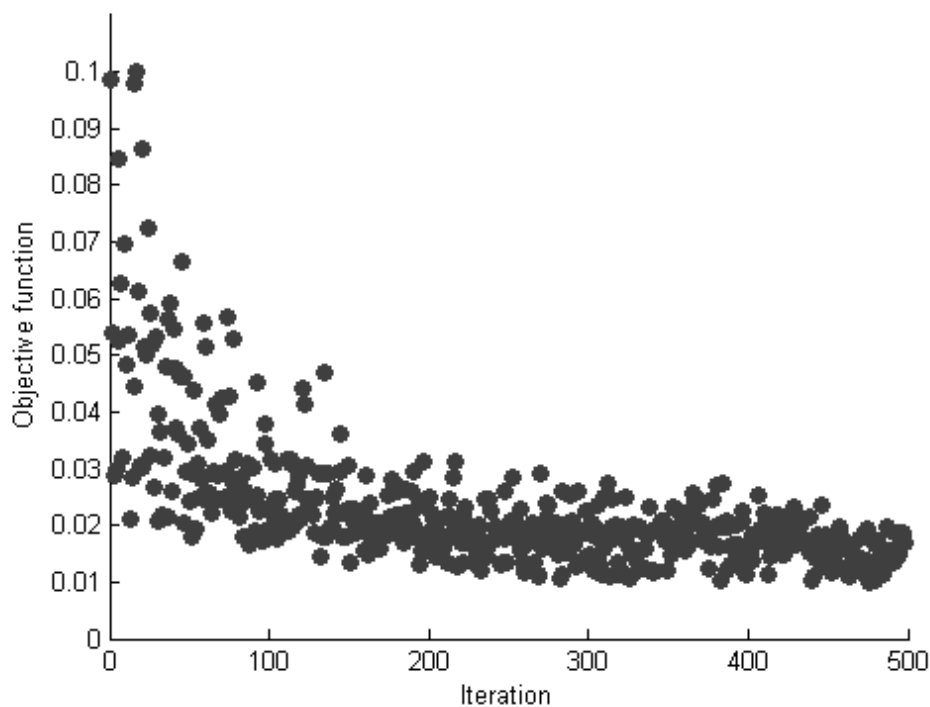
چاه آزمایشی	ضریب همبستگی	خطا
شماره ۱	۰/۹۸	۴/۱
شماره ۲	۰/۹۷	۵/۱



شکل ۷-۷- آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی در محل چاه‌های آزمایشی الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲.

۷-۴- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار

داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل برای استفاده در این بخش در نظر گرفته شده است. همانند بخش قبل، از چاه ۱۴ چاه موجود، ۱۲ چاه برای فرایند وارون‌سازی و ۲ چاه برای آزمون استفاده شده است (شکل ۴-۲). با توجه به اینکه داده‌های چاه، تغییری نسبت به بخش قبل (بخش ۵-۲) نداشته‌اند مجدداً از جدول‌های ۷-۱ و ۷-۲ برای تعریف بازه جستجو جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. در این حالت وارون‌سازی، با اجرای بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ۵۰۰ تکرار و در هر تکرار ۵ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی نمودار همگرایی تابع هدف به صورت شکل ۷-۷ حاصل شده است. جدول ۷-۶ مقادیر بهینه شده دامنه‌های واریوگرام برای مناطق مختلف را نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی کلی بین داده لرزه‌ای واقعی و مصنوعی (وارون شده) در پایان فرایند بهینه‌سازی ۰/۸۱ محاسبه شده است. این ضریب همبستگی در حالت بدون استفاده از بهینه‌سازی ۰/۸۰ بدست آمده بود (بخش ۴-۳-۱).



شکل ۷-۸- نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارون‌سازی ناپایا داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

جدول ۷-۶- مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل برای مناطق یک، دو و سه.

نام منطقه	دامنه واریوگرام افقی	دامنه واریوگرام قائم
۱	۷۰/۳	۷/۵
۲	۱۷/۹	۴/۹
۳	۵۸/۸	۴۰/۳

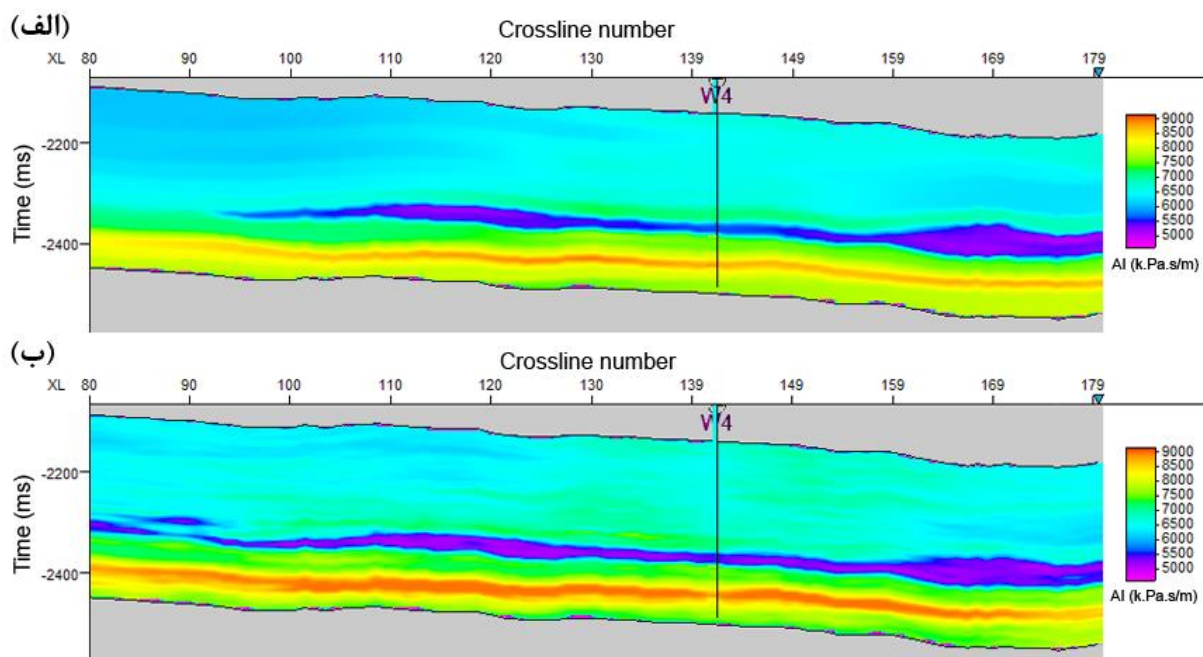
همچنین، میانگین و واریانس مقادیر مقاومت صوتی در جدول ۷-۷ نشان داده شده است. مطابق این جدول، مقادیر میانگین و واریانس مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده مشابه میانگین و واریانس داده‌های چاه می‌باشد. در مقایسه با حالت بدون نوفه (جدول ۷-۴)، مقدار میانگین مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی کاملاً مشابه است. اما افزایش کمی در واریانس مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی رخ داده است. این افزایش می‌تواند به دلیل تأثیر نوفه بر دامنه‌های لرزه‌ای باشد.

جدول ۷-۷- مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و با استفاده فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

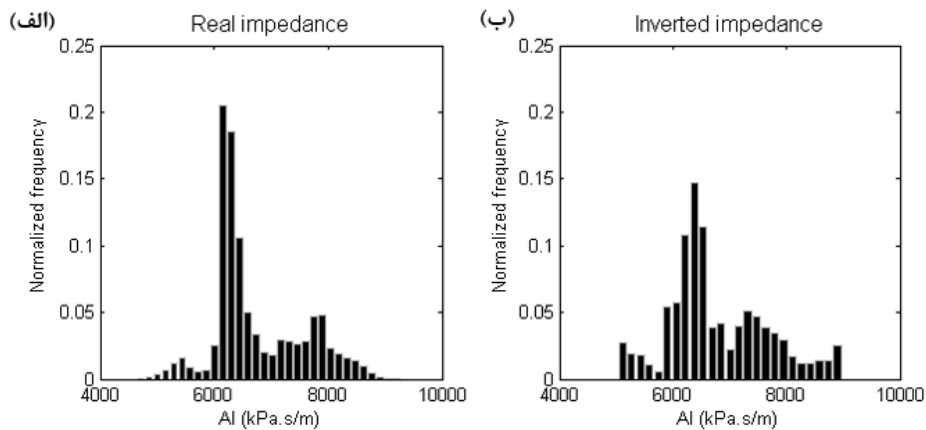
مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه‌ها	۶۷۵۰	۷۰۲۶۹۲
مقاومت صوتی وارون‌شده	۶۷۶۷	۷۶۷۵۹۰

در شکل ۷-۹، یک مقطع از مقاومت صوتی واقعی با مدل وارون‌شده با استفاده از بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده مصنوعی نوفه‌دار ارائه شده است. همان‌طور که در این مشخص است، با وجود اینکه مقدار قابل توجهی نوفه به داده‌های لرزه‌ای اضافه شده، مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده، تشابه خوبی با مقاومت صوتی واقعی دارند. این موضوع براساس هیستوگرام‌های مربوط به

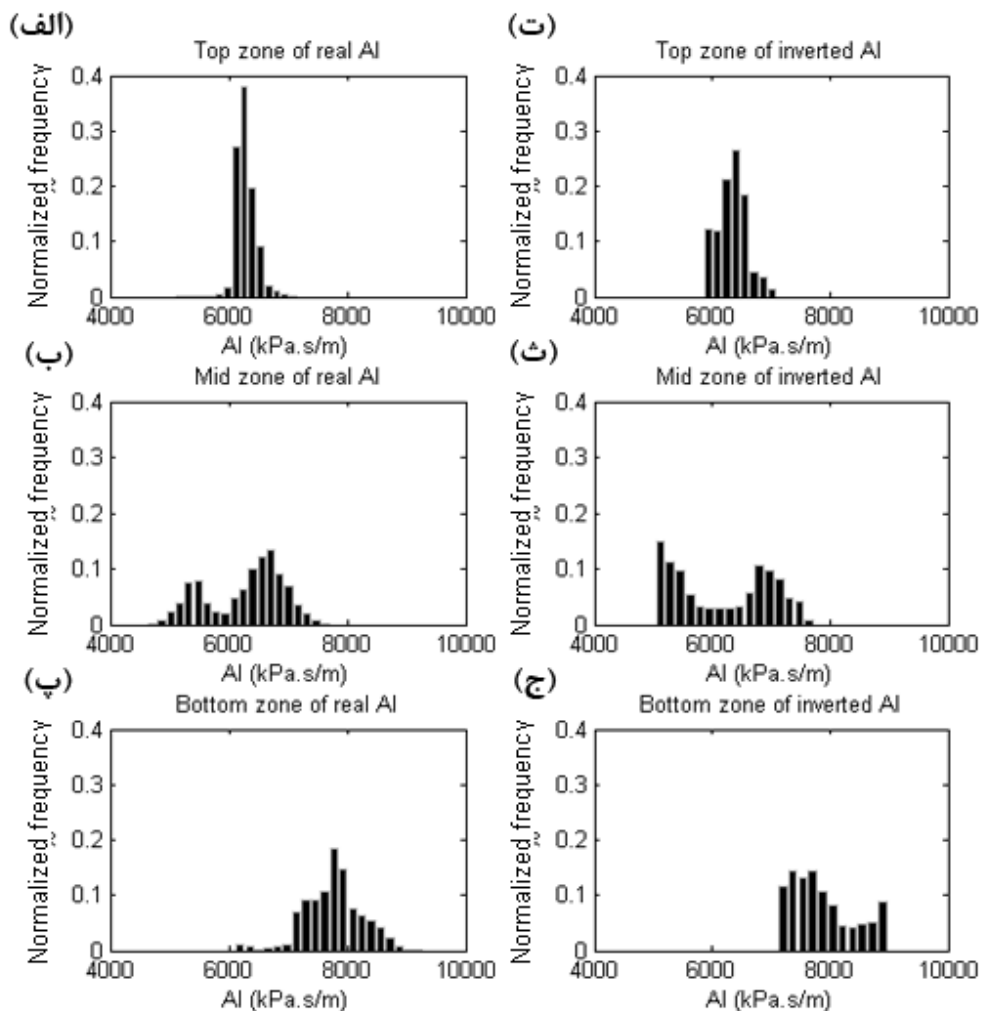
داده‌های مقاومت صوتی چاه‌ها و مدل نهایی وارون‌شده توسط وارون‌سازی ناپایا در شکل ۷-۱۰ تأیید شده است. همان‌طور که در شکل ۷-۱۰ مشاهده می‌شود، هیستوگرام مقاومت صوتی چاه‌ها در مدل وارون‌شده بازتولید شده است. علاوه بر هیستوگرام کلی، هیستوگرام‌های مربوط به هر منطقه نیز در شکل ۷-۱۱ ارائه شده است. مطابق این شکل، هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه‌ها در مناطق مختلف (شکل‌های ۷-۱۱-الف، ب و پ) تقریباً مشابه هیستوگرام‌های مدل مقاومت صوتی وارون‌شده در مناطق متناظر (شکل‌های ۷-۱۱-ت، ث و ج) هستند. شکل ۷-۱۲ مقایسه یک مقطع قائم لرزه‌ای مربوط به داده‌های لرزه‌ای واقعی (شکل ۷-۱۲-الف) و داده‌های وارون‌شده (شکل ۷-۱۲-ب) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بازتابنده‌های اصلی در مدل وارون‌شده به خوبی بازتولید شده‌اند. خطای جذر میانگین مربعات نتایج وارون‌سازی $3/4$ به دست آمده است. این خطا در حالت بدون بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام (شکل ۵-۱۲) به $3/6$ دست آمده بود.



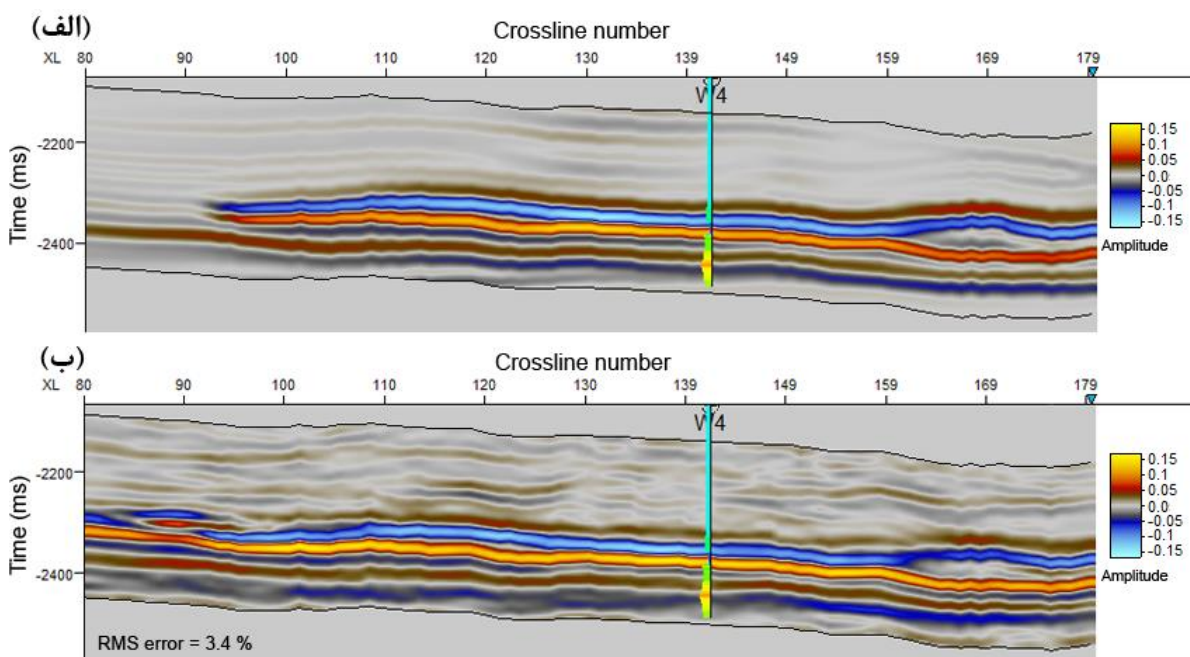
شکل ۷-۹-الف) یک مقطع قائم از مقاومت صوتی واقعی، ب) مقطع قائم متناظر از مقاومت صوتی وارون‌شده با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.



شکل ۷-۱۰- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. (الف) داده‌های چاه‌ها و (ب) پاسخ مدل وارون بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.



شکل ۷-۱۱- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل. (الف، ب و پ) هیستوگرام‌های داده‌های چاه‌ها به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه. (ت، ث و ج) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک، دو و سه.

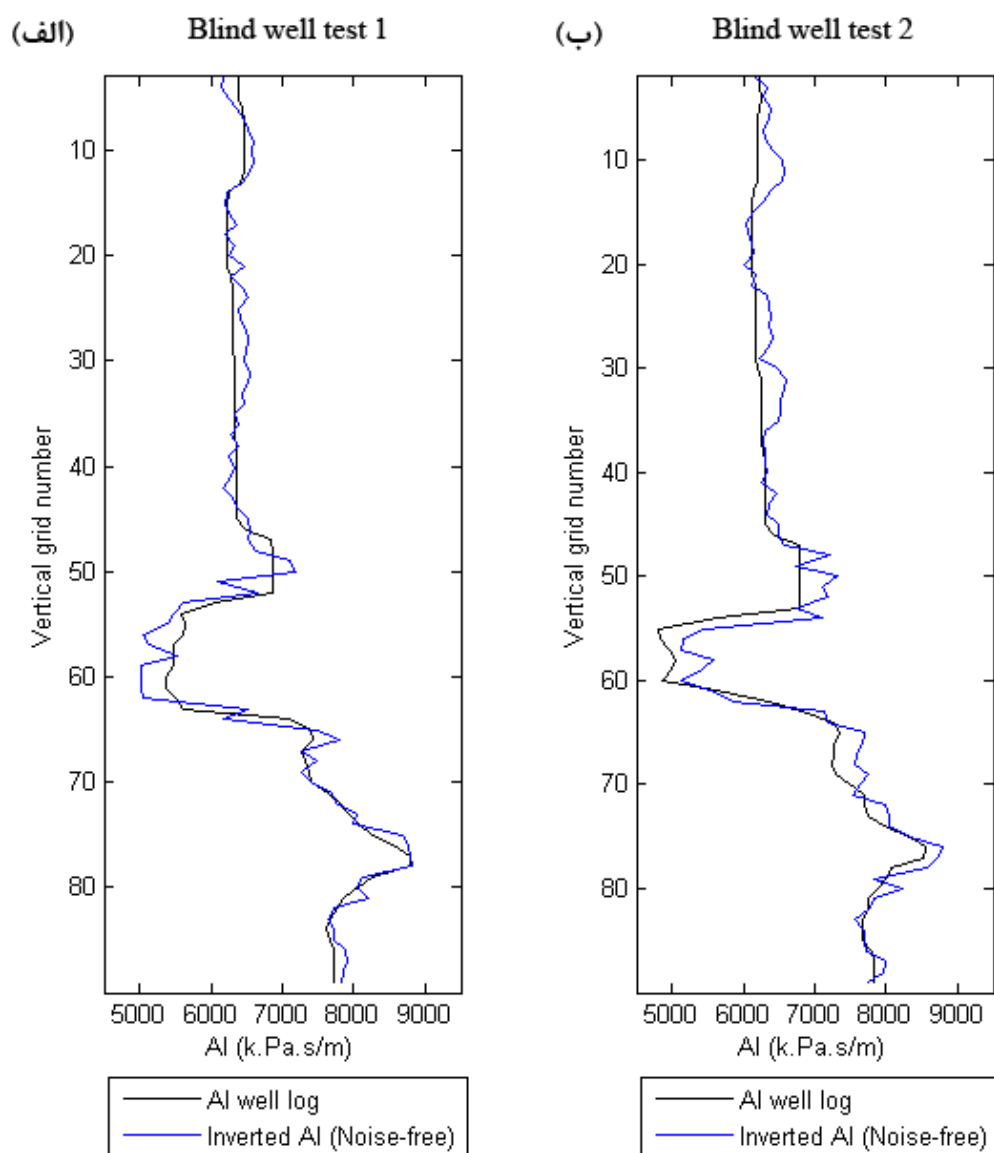


شکل ۷-۱۲- الف) یک مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای واقعی یا ثبت شده، ب) مقطع قائم متناظر از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی (وارون شده) مربوط به داده‌های مصنوعی نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل با استفاده از بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا در این حالت به کمک داده‌های واقعی دو چاه آزمایشی انجام شده است. مقایسه نمودارهای مقاومت صوتی در شکل ۷-۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی در هر دو چاه تطابق بسیار خوبی دارد. ضرایب همبستگی و درصد خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون شده در جدول ۷-۸ آورده شده است. مطابق این جدول، ضرایب همبستگی در هر دو چاه آزمایشی نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام (جدول‌های ۵-۵ و ۵-۶) بهبود نشان دهند. همچنین، در مورد چاه آزمایشی شماره ۱، خطا به مقدار ۰/۳ درصد و در مورد چاه آزمایشی شماره ۲، به مقدار ۰/۲ درصد نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کاهش نشان می‌دهد.

جدول ۷-۸- ضریب همبستگی و درصد خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه‌های آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسی‌بل.

چاه آزمایشی	ضریب همبستگی	خطا
شماره ۱	۰/۹۷	۵/۰
شماره ۲	۰/۹۵	۵/۵



شکل ۷-۱۳- آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام به کمک داده‌های مقاومت صوتی در محل چاه‌های آزمایشی، الف) چاه آزمایشی شماره ۱ و ب) چاه آزمایشی شماره ۲. در این حالت از داده‌های مصنوعی نوفه‌دار استفاده شده است.

۷-۵- بکارگیری بهینه‌سازی بر روی داده‌های واقعی

داده‌های واقعی استفاده شده در این بخش، همانند بخش ۴-۴ است. برای بکارگیری این داده برای بهینه‌سازی وارون‌سازی تصادفی ناپایا، ابتدا عمل منطقه‌بندی براساس افق‌های تفسیر شده لرزه‌ای صورت گرفته است (شکل ۵-۱۵). مدل‌های واریوگرام مربوط به هر منطقه در جدول ۷-۹ ارائه شده است. برای مدل‌سازی واریوگرام‌های قائم از داده‌های مقاومت صوتی چاه و برای مدل‌سازی واریوگرام‌های افقی از داده‌های لرزه‌ای مربوط به هر منطقه استفاده شده است.

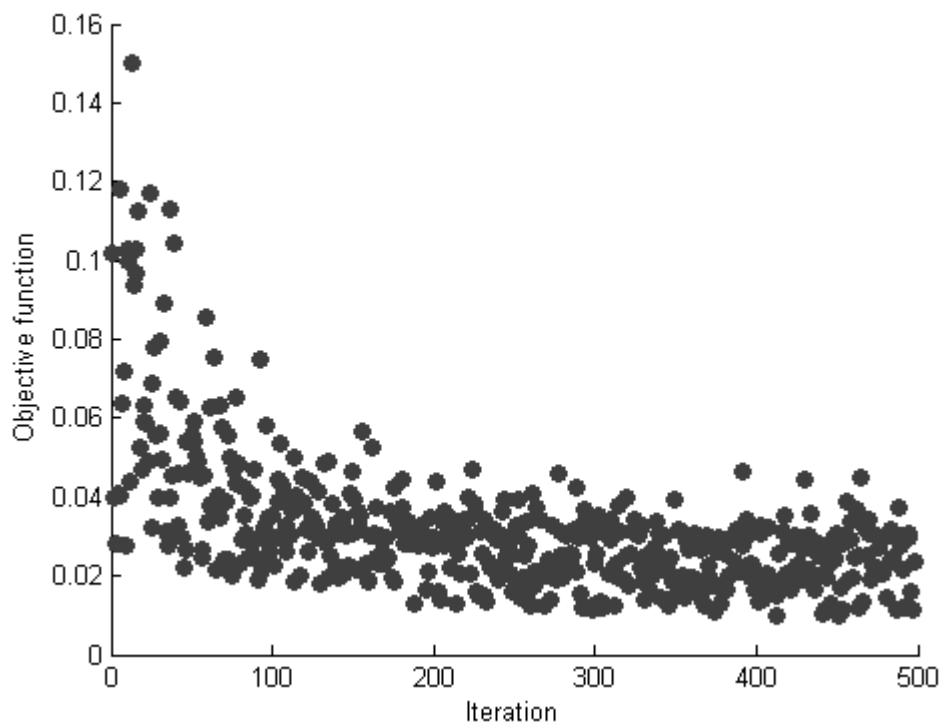
جدول ۷-۹- مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک تا چهار در مورد داده‌های واقعی. واریوگرام‌های قائم با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی چاه و واریوگرام‌های افقی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مدل‌سازی شده‌اند

نام منطقه	مدل‌های واریوگرام افقی	مدل‌های واریوگرام قائم
۱	$\gamma(h) = 5107228 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{24} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{24} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 113248 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{7.5} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{7.5} \right)^3 \right]$
۲	$\gamma(h) = 3469017 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{65} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{65} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 95674 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{14} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{14} \right)^3 \right]$ $+ 35538 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{3} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{3} \right)^3 \right]$
۳	$\gamma(h) = 2201765 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{73} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{73} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 180393 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{4.5} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{4.5} \right)^3 \right]$
۴	$\gamma(h) = 4855159 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{186} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{186} \right)^3 \right]$	$\gamma(h) = 231873 \times \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{25} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{25} \right)^3 \right]$

بازه‌های جستجو برای بهینه‌سازی بر اساس رابطه ۷-۱ محاسبه شده و در جدول ۷-۱۰ ارائه شده است. با اجرای بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ۵۰۰ تکرار و در هر تکرار ۵ مدل شبیه‌سازی مقاومت صوتی، نمودار همگرایی تابع هدف به صورت شکل ۷-۱۴ حاصل شده است. توجه شود که در این حالت نیز، تعداد تکرار بیشتر تأثیری در بهبود نتایج نداشته و تابع هدف همواره در یک بازه کوچک نوسان داشته است.

جدول ۷-۱۰ - بازه‌های جستجو در بهینه‌سازی برای مدل‌های واریوگرام برای مناطق یک تا چهار مربوط به داده‌های واقعی.

نام منطقه	بازه دامنه واریوگرام افقی	بازه دامنه واریوگرام قائم
۱	[۲۱/۶ , ۲۴/۶]	[۶/۷۵ , ۸/۲۵]
۲	[۵۸/۵ , ۷۱/۵]	[۲/۷ , ۳/۳] و [۱۲/۶ , ۱۵/۴]
۳	[۴۹/۵ , ۶۰/۵]	[۴/۰۵ , ۴/۹۵]
۴	[۱۶۷/۴ , ۲۰۴/۶]	[۲۲/۵ , ۲۷/۵]



شکل ۷-۱۴ - نمودار همگرایی تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای وارن‌سازی ناپایا داده‌های واقعی.

جدول ۷-۱۱ مقادیر بهینه شده دامنه‌های واریوگرام برای مناطق مختلف را نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی کلی بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و مصنوعی (وارون شده) در پایان فرایند بهینه‌سازی ۰/۷۱ محاسبه شده است. این ضریب همبستگی در حالت بدون استفاده از بهینه‌سازی

۰/۷۰ بدست آمده بود (۴-۵). توجه شود که علی‌رغم بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام، ممکن است به دلیل محدودیت داده‌های مقاومت صوتی یک چاه در فرایند وارون‌سازی ناپایا، نتیجه بهینه‌سازی بهبود کمی را نشان داده است.

جدول ۷-۱۱ - مقادیر بهینه دامنه مدل‌های واریوگرام مربوط به داده‌های واقعی برای مناطق یک، دو، سه و چهار.

نام منطقه	دامنه واریوگرام افقی	دامنه واریوگرام قائم
۱	۲۱/۹	۶/۹
۲	۶۳/۳	۱۴/۴ و ۴/۸
۳	۵۴/۸	۴/۵
۴	۱۸۱/۶	۲۳/۲

جدول ۷-۱۲ مقادیر میانگین و واریانس داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، الگوریتم وارون‌سازی مقادیر مربوط به چاه را در مدل وارون‌شده بازتولید کرده است.

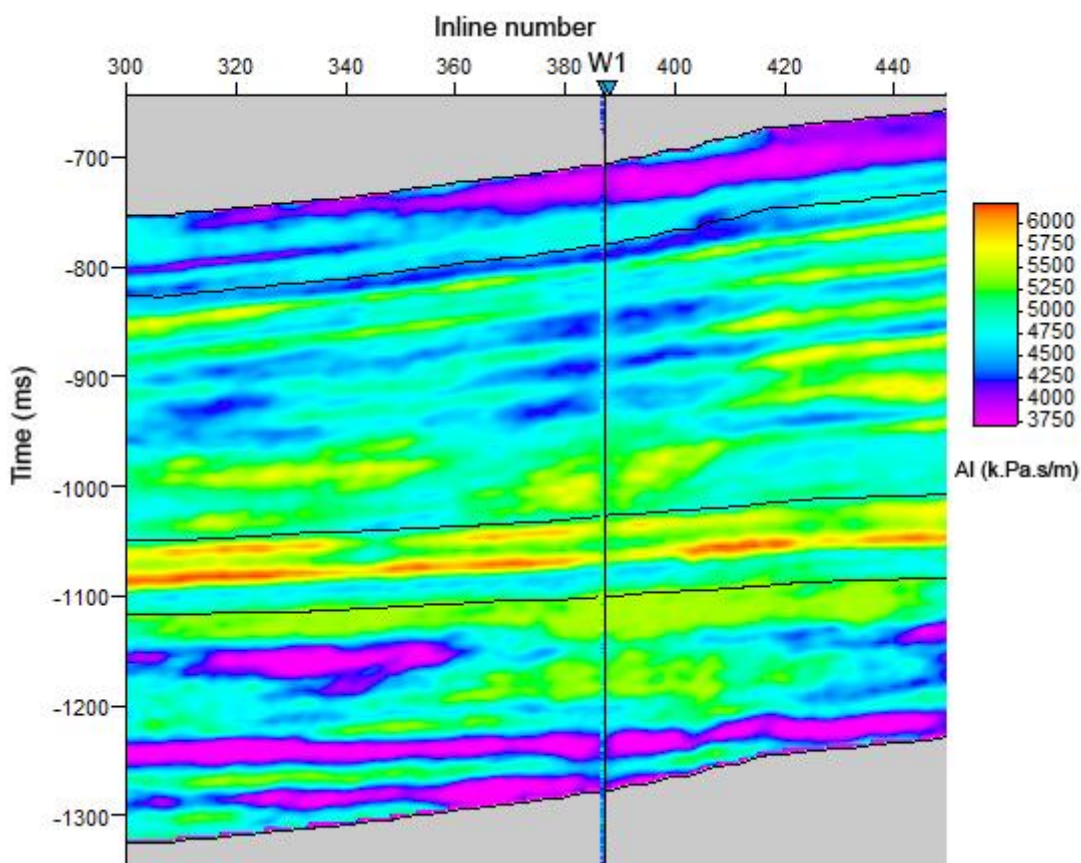
جدول ۷-۱۲ - مقایسه میانگین و واریانس مقاومت صوتی واقعی و وارون‌شده با استفاده از فرایند بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.

مقاومت صوتی (k.Pa.s/m)	میانگین	واریانس
مقاومت صوتی چاه	۴۸۰۱	۲۴۸۸۴۰
مقاومت صوتی وارون‌شده	۴۸۰۱	۲۹۰۰۴۱

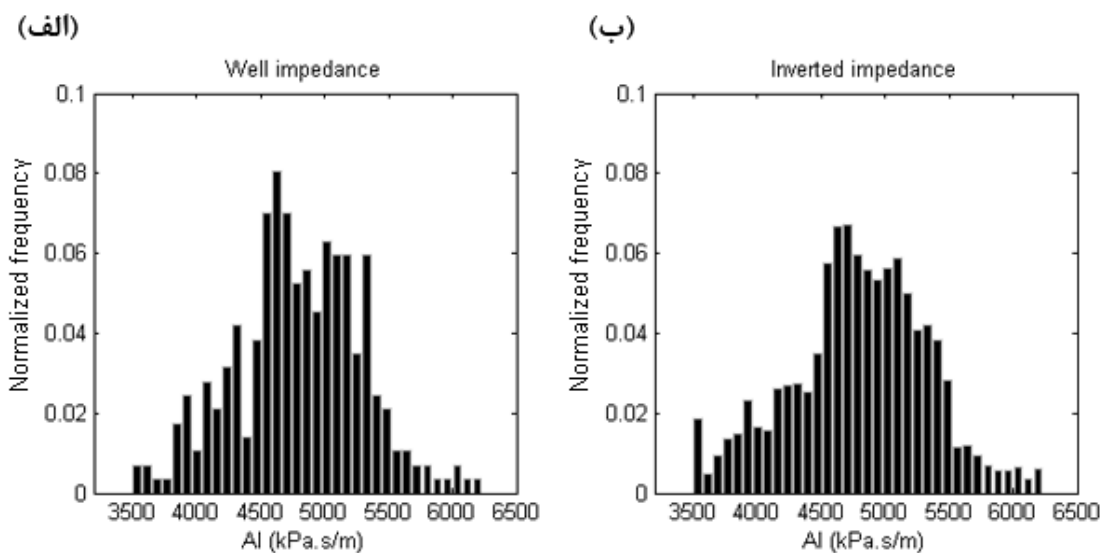
یک مقطع قائم از مدل نهایی مقاومت صوتی که از محل تنها چاه استفاده شده در فرایند وارون‌سازی می‌گذرد، برای نمایش نتایج وارون‌سازی انتخاب شده است (شکل ۷-۱۵). همان‌طور که در شکل ۷-۱۵ مشخص است، توزیع مقادیر مقاومت صوتی با توجه به لایه‌بندی زیرسطحی به دست آمده است.

برای نمایش بازتولید هیستوگرام، در شکل ۷-۱۶، هیستوگرام‌های کلی مربوط به داده‌های مقاومت صوتی چاه و مدل وارون‌شده توسط بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا ارائه شده است. مطابق این شکل، هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی مشابه مقاومت صوتی داده‌های چاه است. همچنین در شکل ۷-۱۷، هیستوگرام مربوط به هر منطقه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیستوگرام مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی در هر منطقه مشابه هیستوگرام داده‌های چاه در همان منطقه است. وجود اختلاف‌های جزئی در فراوانی بعضی از مقادیر می‌تواند به دلیل کمبود داده‌های مقیدکننده در فرایند وارون‌سازی باشد. اما به‌رحال بازه کمترین و بیشترین مقادیر مقاومت صوتی کاملاً مشابه است. این بدین معنی است که توزیع فضایی مقادیر مقاومت صوتی به درستی و بر اساس هر منطقه صورت گرفته است.

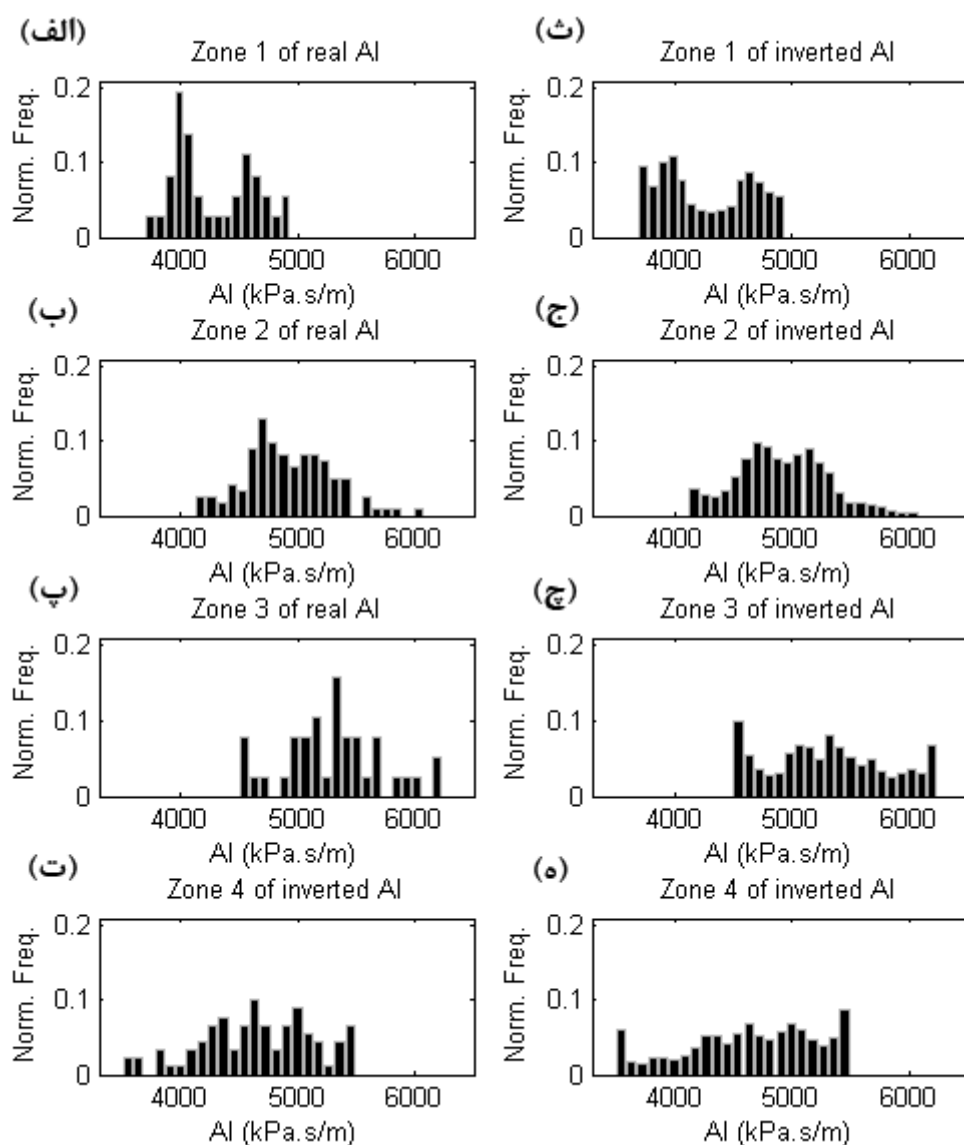
شکل ۷-۱۸ مقاطع لرزه‌ای مرتبط با مدل نهایی مقاومت صوتی وارون‌شده در چنین حالتی را همراه با داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) را نشان می‌دهد. بازتابنده‌های اصلی در مدل نهایی وارون‌شده به خوبی بازتولید شده‌اند. خطای جذر میانگین مربعات در این حالت برابر $11/5$ درصد به دست آمده است که $0/1$ درصد بهبود را نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی نشان می‌دهد.



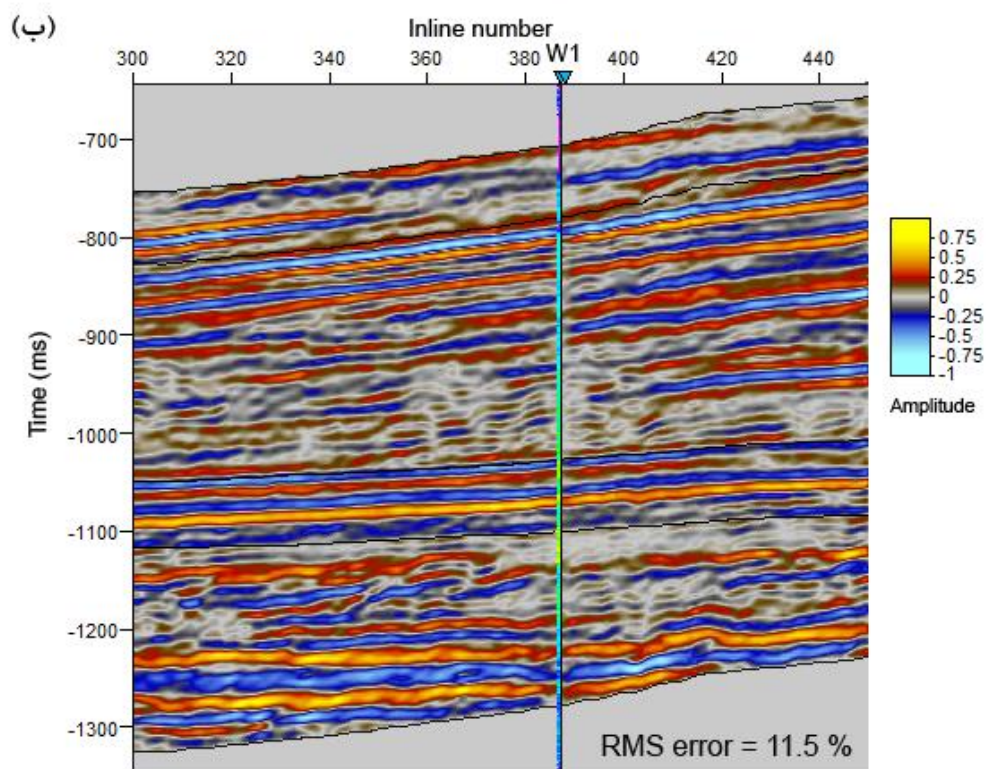
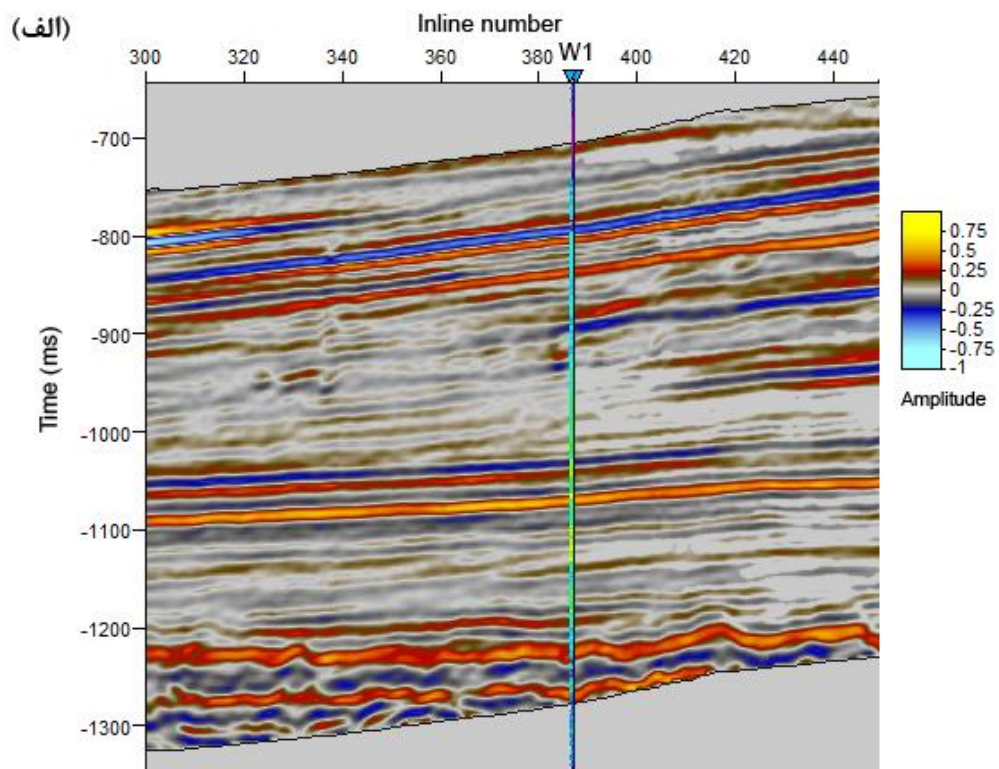
شکل ۷-۱۵- مقطع قائم گذرنده از چاه W1 (شکل ۴-۱۷) از مدل مقاومت صوتی وارون شده با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا مربوط به داده‌های واقعی.



شکل ۷-۱۶- هیستوگرام مقاومت صوتی مربوط به داده‌های واقعی. (الف) داده چاه و (ب) مدل وارون شده بر اساس بهینه‌سازی وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

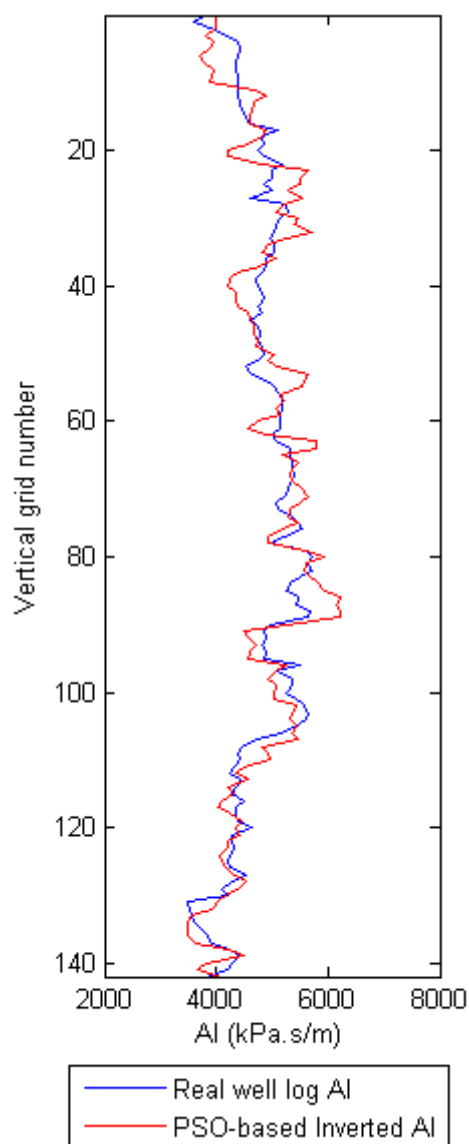


شکل ۷-۱۷- هیستوگرام‌های محلی مقاومت صوتی مربوط به بکارگیری بهینه‌سازی وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های واقعی. الف، ب، پ و ت) هیستوگرام‌های مقاومت صوتی چاه به ترتیب مربوط به مناطق یک تا چهار. ث، ج، چ و ه) هیستوگرام‌های داده‌های مقاومت صوتی وارون‌شده به ترتیب مربوط به مناطق یک تا چهار.



شکل ۷-۱۸- الف) یک مقطع قائم گذرنده از چاه W1 از داده‌های لرزه‌ای واقعی، ب) مقطع قائم از داده‌های لرزه‌ای مدل شده با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای وارپوگرام در وارون‌سازی لرزه‌ای ناپایا.

آزمون نتایج وارون‌سازی در این حالت با داده‌های تنها چاه آزمایشی که از فرایند وارون‌سازی ناپایا کنار گذاشته شده بود، انجام شده است. نمودارهای مقاومت صوتی این چاه و مقادیر وارون‌شده آن در شکل ۷-۱۹ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار مقاومت صوتی وارون‌شده با داده‌های مقاومت صوتی واقعی چاه آزمایشی مطابقت دارد. ضریب همبستگی و خطای این دو نمودار در جدول ۷-۱۳ ارائه شده است. در مقایسه با جدول‌های ۶-۱۱ و ۶-۱۲، ضریب همبستگی در حالت بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی، حدود ۰/۳ افزایش و خطا حدود ۰/۲ درصد کاهش داشته است.



شکل ۷-۱۹- داده‌های چاه آزمایشی جهت آزمون نتایج حاصل از به نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی.

جدول ۷-۱۳- ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات بین مقاومت صوتی چاه آزمایشی و مقادیر مقاومت صوتی وارون‌شده توسط بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های واقعی.

چاه آزمایشی	ضریب همبستگی	خطا
چاه آزمایشی شماره ۱	۰/۸۲	۱۳/۱

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۸-۱- مقدمه

در این رساله، در ابتدا الگوریتم بهبودیافته شبیه‌سازی زمین‌آماری متوالی مستقیم ارائه و به کمک داده‌های مصنوعی و واقعی اعتبارسنجی شد. سپس، از این روش برای معرفی و توسعه الگوریتم‌های جدیدی برای وارون‌سازی تصادفی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای بازتابی در حالت پایا و ناپایا استفاده شد. همچنین در ادامه، با استفاده از یک سری داده‌های مصنوعی و میدانی، قابلیت‌های روش‌های وارون‌سازی سه‌بعدی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت و در هر مورد مقایسه‌های لازم انجام شد. سپس یک الگوریتم ترکیبی جدید برای بهینه‌سازی پارامترهای واروگرام در وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا معرفی و نتایج بکارگیری آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی ارائه گردید.

در ادامه این فصل، مهمترین نتایج بدست آمده از این رساله، بیان خواهد شد. در پایان نیز پیشنهادهایی جهت پژوهش‌های آتی ارائه خواهد گردید.

۸-۲- نتیجه‌گیری

خلاصه‌ای از اهم نتایج حاصل در این رساله به صورت زیر بیان می‌گردد.

* مقایسه نتایج بکارگیری الگوریتم شبیه‌سازی متوالی مستقیم و الگوریتم بهبودیافته آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی (میدانی) نشان‌دهنده بهبود مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی شبیه‌سازی شده در الگوریتم بهبودیافته می‌باشند.

* الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا، قادر به وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار بوده است. خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا برای داده‌های بدون نوفه $9/4$ درصد و برای داده‌های نوفه‌دار $13/3$ درصد به دست آمد.

* آزمون نتایج وارون‌سازی پایا بر روی داده‌های مصنوعی با استفاده از داده‌های چاه‌های آزمایشی شماره ۱ و ۲ در حالت بدون نوفه، به ترتیب دارای ضریب همبستگی ۰/۹۳ و ۰/۸۷ و در حالت نوفه‌دار به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۵۶ بود. همچنین خطای جذر میانگین مربعات، در حالت بدون نوفه به ترتیب، ۸/۷ و ۱۳/۳ درصد و در حالت نوفه‌دار به ترتیب، ۱۷/۳ و ۱۷/۰ درصد بود.

* الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای پایا، قادر به وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای واقعی بوده است. خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی پایا ۱۴/۴ درصد به دست آمد.

* آزمون نتایج وارون‌سازی پایا بر روی داده‌های واقعی با استفاده از داده‌های یک چاه آزمایشی، دارای ضریب همبستگی ۰/۶۴ و خطای جذر میانگین مربعات ۱۸/۷ درصد بود.

* وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا قادر به وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار با دقت قابل‌قبولی بوده است. خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا داده‌های مصنوعی بدون نوفه، ۶/۱ درصد کاهش نسبت به حالت پایا نشان داد. در حالت داده‌های نوفه‌دار، کاهش خطا به مقدار ۹/۷ درصد بود.

* آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی با استفاده از داده‌های چاه‌های آزمایشی شماره ۱ و ۲ در حالت بدون نوفه، نشان‌دهنده افزایش ضریب همبستگی به ترتیب به میزان ۰/۰۵ و ۰/۰۹ نسبت به حالت پایا بود. این افزایش در حالت نوفه‌دار به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۳۸ بود. همچنین کاهش خطای جذر میانگین مربعات در حالت بدون نوفه، به ترتیب ۴/۶ و ۸/۱ درصد و در حالت نوفه‌دار، ۱۲ و ۱۱/۳ درصد بود.

* الگوریتم وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا، برای وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های لرزه‌ای واقعی به کار برده شده است. خطای جذر میانگین مربعات بین داده‌های لرزه‌ای واقعی (ثبت شده) و داده‌های لرزه‌ای دارای کاهش به میزان ۲/۸ درصد نسبت به حالت پایا بود.

* آزمون نتایج وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های واقعی با استفاده از داده‌های یک چاه آزمایشی، نشان‌دهنده افزایش ضریب همبستگی به مقدار ۰/۱۵ و کاهش خطای مدل‌سازی به میزان ۵/۴ درصد نسبت به حالت پایا بود.

* تحلیل عدم قطعیت در مورد وارون‌سازی ناپایا داده‌های مصنوعی و واقعی نشان‌دهنده کاهش مقادیر واریانس (اعتماد به نتیجه مدل‌سازی) در مقایسه با وارون‌سازی پایا می‌باشد.

* با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام توسط ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های مصنوعی، خطای وارون‌سازی در حالت بدون نوفه، ۰/۱ درصد و در حالت نوفه‌دار ۰/۲ درصد نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کاهش نشان داد.

* آزمون نتایج بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های مصنوعی با استفاده از داده‌های چاه‌های آزمایشی شماره ۱ و ۲ انجام شد. در حالت داده‌های بدون نوفه و در مورد چاه شماره ۱، خطای جذر میانگین مربعات، مشابه حالت بدون بهینه‌سازی به دست آمد. اما در مورد چاه آزمایشی شماره ۲، این خطا به مقدار ۰/۱ کاهش یافت. در حالت داده‌های نوفه‌دار و در مورد چاه شماره ۱، خطا به مقدار ۰/۳ درصد و در مورد چاه آزمایشی شماره ۲، به مقدار ۰/۲ درصد نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کاهش نشان داد.

* با بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام توسط ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم وارون‌سازی ناپایا بر روی داده‌های واقعی، خطای وارون‌سازی به مقدار ۰/۱ درصد کاهش نشان داد.

* آزمون نتایج بهینه‌سازی پارامترهای واریوگرام در وارون‌سازی ناپایا مربوط به داده‌های واقعی با استفاده از داده‌های یک چاه آزمایشی انجام شد. خطای جذر میانگین مربعات، به میزان ۰/۲ درصد نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کاهش نشان داد.

۸-۳- پیشنهادها

* وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا در این رساله توسط منطقه‌بندی داده‌های مقاومت صوتی چاه در راستای قائم انجام شد. با توجه به وجود تغییرات جانبی در بعضی از لایه‌های زیرسطحی، پیشنهاد می‌شود منطقه‌بندی داده‌ها به صورت جانبی نیز مورد تحلیل قرار گیرد.

* در این رساله، برای هم‌میخت موجک لرزه‌ای در سری بازتاب، از مدل هم‌میخت پایا استفاده شد. پیشنهاد می‌شود از مدل هم‌میخت ناپایا که در آن، محتوای فرکانسی موجک با عمق تغییر می‌کند، استفاده شود.

* داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی که در این رساله استفاده شدند، دارای لایه‌بندی افقی یا نزدیک به افقی بودند. پیشنهاد می‌شود از مدل‌های پیچیده‌تر زمین‌شناسی مانند چین‌خوردگی یا گنبد نمکی برای بررسی وارون‌سازی پایا و ناپایا استفاده شود.

* در این رساله، از الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی دامنه‌های واریوگرام استفاده گردید. توصیه می‌شود از این روش یا سایر روش‌های بهینه‌سازی برای بهینه کردن سایر پارامترها مانند ضخامت منطقه‌بندی نیز استفاده شود.

* ترکیب داده‌های سایر روش‌های ژئوفیزیکی با داده‌های لرزه‌ای برای وارون‌سازی تصادفی داده‌ها جهت استخراج خواص مخزنی مانند تخلخل، نفوذپذیری و ... پیشنهاد می‌شود.

منابع

عباسی، م. و ریاحی، م.ع.، ۱۳۹۲، برآورد تک‌مرحله‌ای تخلخل با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی تصادفی در یکی از میدادین هیدروکربنی جنوب غرب ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹، شماره ۲، صفحه ۴۹-۳۹.

حسینی پاک، ع.ا.، ۱۳۸۹، زمین‌آمار (ژئواستاتیسیتیک)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.

Ashtari, A. and Arzani, A. (2016), “*Seismic spectral decomposition and inversion for buried channels delineation: a case study from the Asmari Reservoir, southwestern Iran*”, **First Break**, **34**, 5.

Aster, R.C., Borchers, B. and Thurber, C.H. (2013), “*Parameter Estimation and Inverse Problems*”, Academic Press.

Azevedo, L., Nunes, R., Correia, P., Soares, A., Guerreiro, L. and Neto, G. (2014), “*Multidimensional scaling for the evaluation of a geostatistical seismic elastic inversion methodology*”, **Geophysics**, **79**, M1-M10.

Azevedo, L., Nunes, R., Soares, A., Mundin, E.C. and Neto, G.S. (2015), “*Integration of well data into geostatistical seismic amplitude variation with angle inversion for facies estimation*”, **Geophysics**, **80**, M113-M128.

Blache-Fraser, G. and Neep, J. (2004), “*Increasing seismic resolution using spectral blueing and colored inversion: Cannonball field, Trinidad*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004*, pp. 1794-1797.

Bortoli, L.-J., Alabert, F., Haas, A. and Journel, A. (1993), “*Constraining Stochastic Images to Seismic Data*”, *Geostatistics Tróia '92*, Vol. 5 (ed. A. Soares), pp. 325-337. Springer Netherlands.

Bosch, M., Campos, C. and Fernández, E. (2009), “*Seismic inversion using a geostatistical, petrophysical, and acoustic model*”, **The Leading Edge**, **28**, 690-696.

Bosch, M., Mukerji, T. and Gonzalez, E. (2010), “*Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review*”, **Geophysics**, **75**, 75A165-75A176.

Boschetti, F., Dentith, M. and List, R. (1996), “*Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms*”, **Geophysics**, **61**, 1715-1727.

Bourges, M., Mari, J. and Jeannée, N. (2012), “*A practical review of geostatistical processing applied to geophysical data: methods and applications*”, **Geophysical Prospecting**, **60**, 400-412.

Brown, S.P. and Thorne, M.S. (2013), “*Viterbi sparse spike detection*”, **Geophysics**, **78**, V157-V169.

Caers, J. (2000), “*Direct sequential indicator simulation*”, *Sixth International Geostatistics Congress*, pp. 39-48.

Caers, J. (2011), “*Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*”, Wiley-Blackwell.

Caers, J. and Hoffman, T. (2006), “*The Probability Perturbation Method: A New Look at Bayesian Inverse Modeling*”, **Mathematical Geology**, **38**, 81-100.

- Chen, J. and Glinsky, M.E. (2014), “*Stochastic inversion of seismic PP and PS data for reservoir parameter estimation*”, **Geophysics**, **79**, R233-R246.
- Chen, J., Hoversten, G., Key, K., Nordquist, G. and Cumming, W. (2012), “*Stochastic inversion of magnetotelluric data using a sharp boundary parameterization and application to a geothermal site*”, **Geophysics**, **77**, E265-E279.
- Chi, C.Y., Mendel, J.M. and Hampson, D. (1984), “*A computationally fast approach to maximum-likelihood deconvolution*”, **Geophysics**, **49**, 550-565.
- Chiles, J. and Delfiner, P. (2012), “*Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*”, *Geostatistics*, pp. 726. John Wiley & Sons, Inc.
- Clerc, M. (2013), “*Particle Swarm Optimization*”, John Wiley & Sons.
- Cooke, D.A. and Schneider, W.A. (1983), “*Generalized linear inversion of reflection seismic data*”, **Geophysics**, **48**, 665-676.
- Deutsch, C.V. (2002), “*Geostatistical reservoir modeling*”, Oxford University Press.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1992), “*GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*”, **Oxford Univ Press, New York**. 340.
- Doyen, P. (1988), “*Porosity from seismic data: A geostatistical approach*”, **Geophysics**, **53**, 1263-1275.
- Doyen, P. (2007), “*Seismic reservoir characterization: an earth modelling perspective*”, EAGE publications.
- Doyen, P., Psaila, D.E. and Strandenes, S. (1994), “*Bayesian Sequential Indicator Simulation of Channel Sands from 3-D Seismic Data in The Oseberg Field, Norwegian North Sea*”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Dubrule, O. (1989), “*A Review of Stochastic Models for Petroleum Reservoirs*”, *Geostatistics*, Vol. 4 (ed. M. Armstrong), pp. 493-506. Springer Netherlands.
- Dubrule, O. (1998), “*Geostatistics in petroleum geology*”, American Association of Petroleum Geologists.
- Dubrule, O. (2003), “*Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models*”, Society of Exploration Geophysicists.
- Dubrule, O., Thibaut, M., Lamy, P. and Haas, A. (1998), “*Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data*”, **Petroleum Geoscience**, **4**, 121-128.
- Duijndam, A.J.W. (1988a), “*Bayesian Estimation in Seismic Inversion. Part I: Principles*”, **Geophysical Prospecting**, **36**, 878-898.
- Duijndam, A.J.W. (1988b), “*Bayesian Estimation in Seismic Inversion. Part II: Uncertainty Analysis*”, **Geophysical Prospecting**, **36**, 899-918.
- Fernández-Martínez, J., García-Gonzalo, E. and Naudet, V. (2010), “*Particle swarm optimization applied to solving and appraising the streaming-potential inverse problem*”, **Geophysics**, **75**, WA3-WA15.

- Francis, A., Lewis, M. and Booth, C. (2015), “*Sea Lion Field, North Falkland Basin: seismic inversion and quantitative interpretation*”, **Petroleum Geoscience**, **21**, 151-169.
- Francis, A.M. (2006a), “*Understanding stochastic inversion: part 1*”, **First Break**, **24**, 9.
- Francis, A.M. (2006b), “*Understanding stochastic inversion: part 2*”, **First Break**, **24**, 6.
- Gang, T. and Goult, N.R. (1997), “*Seismic inversion for coal-seam thicknesses: trials from the Belvoir coalfield, England*”, **Geophysical Prospecting**, **45**, 535-549.
- Gelfand, V.A. and Lerner, K.L. (1984), “*Seismic lithologic modeling*”, **The Leading Edge**, **3**, 30-34.
- Grana, D. and Della Rossa, E. (2010), “*Probabilistic petrophysical-properties estimation integrating statistical rock physics with seismic inversion*”, **Geophysics**, **75**, O21-O37.
- Grana, D. and Mukerji, T. (2015), “*Bayesian inversion of time-lapse seismic data for the estimation of static reservoir properties and dynamic property changes*”, **Geophysical Prospecting**, **63**, 637-655.
- Grana, D., Mukerji, T., Dvorkin, J. and Mavko, G. (2012), “*Stochastic inversion of facies from seismic data based on sequential simulations and probability perturbation method*”, **Geophysics**, **77**, M53-M72.
- Grijalba-Cuenca, A., Torres-Verdin, C. and van der Made, P. (2000), “*Geostatistical Inversion of 3D Seismic Data to Extrapolate Wireline Petrophysical Variables Laterally Away From the Well*”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Groenestijn, G.J.A.v. and Verschuur, D.J. (2009), “*Estimation of primaries and near-offset reconstruction by sparse inversion: Marine data applications*”, **Geophysics**, **74**, R119-R128.
- Haas, A. and Dubrule, O. (1994), “*Geostatistical Inversion – A sequential Method for Stochastic Reservoir Modeling Constrained by Seismic Data*”, **First Break**, **12**, 561-569.
- Haas, A.G. and Viallax, J.R. (1976), “*KRIGEAGE APPLIED TO GEOPHYSICS THE ANSWER TO THE PROBLEM OF ESTIMATES AND CONTOURING*”, **Geophysical Prospecting**, **24**, 49-69.
- Hampson, D. and Russell, B. (1985), “*Maximum likelihood seismic inversion*”, *National Canadian CSEG meeting*, pp. SP-16.
- Hendrick, N. and Hearn, S. (1993), “*Evaluation of seismic trace inversion techniques*”, **Exploration Geophysics**, **24**, 549-560.
- Hohn, M. (1999), “*Geostatistics and Petroleum Geology*”, Springer.
- Hoorfar, A. (2007), “*Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization: A Review*”, **Antennas and Propagation, IEEE Transactions on**, **55**, 523-537.

- Horta, A. and Soares, A. (2010), “*Direct Sequential Co-simulation with Joint Probability Distributions*”, **Mathematical Geosciences**, **42**, 269-292.
- Huang, K.-Y., Shen, L.-C., Chen, K.-J. and Huang, M.-C. (2012), “*Particle Swarm Optimization in Multilayer Perceptron Learning for Well Log Data inversion*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, pp. 1-5.
- Isaaks, E. and Srivastava, R.M. (1989), “*Applied Geostatistics*”, Oxford University Press.
- Kane, J., Rodi, W., Herrmann, F. and Toksöz, M. (1999), “*Geostatistical seismic inversion using well log constraints*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999*, pp. 1504-1507.
- Kormylo, J.J. and Mendel, J.M. (1983), “*Maximum-Likelihood Seismic Deconvolution*”, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **GE-21**, 72-82.
- Lamy, P., Swaby, P.A., Rowbotham, P.S., Dubrule, O. and Haas, A. (1999), “*From Seismic to Reservoir Properties With Geostatistical Inversion*”, **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, **2**, 7.
- Lancaster, S. and Whitcombe, D. (2000), “*Fast-track ‘coloured’ inversion*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000*, pp. 1572-1575.
- Lantuejoul, C. (2002), “*Geostatistical Simulation Models and Algorithms*”, Springer.
- Lau, A., Dai, J., Robinson, A., Flack, B., Shih, C.C., Utech, R. and Banik, N. (2005), “*Colored Inversion: Application In A Tertiary Basin Offshore China*”. Offshore Technology Conference.
- Lia, O., Omre, H., Tjelmel, H., Holden, L. and Egel, T. (1997), “*Uncertainties in reservoir production forecasts*”, **AAPG Bulletin**, **81**, 775-802.
- Lin, T.T.Y. and Herrmann, F.J. (2013), “*Robust estimation of primaries by sparse inversion via one-norm minimization*”, **Geophysics**, **78**, R133-R150.
- Lines, L.R. and Treitel, S. (1984), “*A Review Of Least-Squares Inversion and its Application to Geophysical Problems*”, **Geophysical Prospecting**, **32**, 159-186.
- Lipari, V., Maggi, D., Ferla, M. and Fortini, C. (2013), “*Particle swarm optimization for seismic velocity analysis*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013*, pp. 4864-4868.
- Ma, X. (2002), “*Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing*”, **Geophysics**, **67**, 1877-1885.
- Mallick, S. (1995), “*Model-based inversion of amplitude-variations-with-offset data using a genetic algorithm*”, **Geophysics**, **60**, 939-954.
- Mallick, S. (1999), “*Some practical aspects of prestack waveform inversion using a genetic algorithm: An example from the east Texas Woodbine gas sand*”, **Geophysics**, **64**, 326-336.
- Matheron, G. (1962), “*Traité de géostatistique appliquée*”, Editions Technip.

- Maurya, S.P. and Singh, K.H. (2015), “*LP and ML Sparse Spike Inversion for Reservoir Characterization - A Case Study from Blackfoot Area, Alberta, Canada*”, 77th EAGE Conference and Exhibition.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (2009), “*The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*”, Cambridge University Press.
- Meira, M.G.C., Gunning, J., Gurevich, B. and Pevzner, R. “*Implications of noise contamination in stochastic time lapse inversion*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015*, pp. 5513-5517.
- Menke, W. (1984), “*Geophysical data analysis — Discrete inversion theory*”, Academic Press Inc.
- Neep, J. (2007), “*Time Variant Coloured Inversion and Spectral Blueing*”, 69th EAGE Conference and Exhibition.
- Olariu, S. and Zomaya, A.Y. (2005), “*Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications*”, Taylor & Francis Group.
- Oldenburg, D.W., Levy, S. and Stinson, K.J. (1986), “*Inversion of band-limited reflection seismograms: Theory and practice*”, **Proceedings of the IEEE**, **74**, 487-497.
- Oliver, D.S., Reynolds, A.C. and Liu, N. (2008), “*Inverse Theory for Petroleum Reservoir Characterization and History Matching*”, Cambridge University Press.
- Overeem, I., Weltje, G.J., Bishop-Kay, C. and Kroonenberg, S.B. (2001), “*The Late Cenozoic Eridanos delta system in the Southern North Sea Basin: a climate signal in sediment supply?*”, **Basin Research**, **13**, 293-312.
- Parker, R. (1994), “*Geophysical inverse theory*”, Princeton University Press.
- Pereira, Â., Nunes, R., Azevedo, L., Soares, A. and Guerreiro, L. (2016), “*Seismic inversion using analogs for reservoir characterization and uncertainty assessment in early stages of exploration*”, *International Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 3-6 April 2016*, pp. 304-304.
- Pindzhurova, T. (2015), “*Colored Inversion and Acoustic Model-based Inversion Techniques*”, *8th Congress of the Balkan Geophysical Society*.
- Rowbotham, P.S., Lamy, P., Swaby, P.A., Dubrule, O. and Cadoret, T. (1998), “*Geostatistical inversion for reservoir characterization*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998*, pp. 886-889.
- Russell, B. (1988), “*Introduction to seismic inversion methods*”, pp. 90. Society of Exploration Geophysicists.
- Russell, B. and Hampson, D. (1991), “*Comparison of poststack seismic inversion methods*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1991*, pp. 876-878.
- Sabeti, H., Moradzadeh, A., Doulati Ardejani, F. and Soares, A. (2016), “*A new stochastic 3D seismic inversion using direct sequential simulation and co-simulation in a genetic algorithm framework*”, **Journal of Mining and Environment**, In Press.

- Sams, M. and Saussus, D. (2008), “*Comparison of uncertainty estimates from deterministic and geostatistical inversion*”, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008*, pp. 1486-1490.
- Sams, M. and Saussus, D. (2011), “*Building realistic facies models through geostatistical inversion*”, *Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, Kyoto, Japan, 20-22 November 2011*, pp. 1-4.
- Schroot, B.M. and Schüttenhelm, R.T.E. (2003), “*Expressions of shallow gas in the Netherlands North Sea*”, **Netherlands Journal of Geosciences**, **82**, 91-105.
- Sen, M. and Stoffa, P. (1991), “*Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing*”, **Geophysics**, **56**, 1624-1638.
- Sen, M. and Stoffa, P. (1995), “*Global optimization methods in geophysical inversion*”, Elsevier Science Publ. Co., Inc.
- Shaw, R. and Srivastava, S. (2007), “*Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data*”, **Geophysics**, **72**, F75-F83.
- Soares, A. (1998), “*Sequential Indicator Simulation with Correction for Local Probabilities*”, **Mathematical Geology**, **30**, 761-765.
- Soares, A. (2001), “*Direct Sequential Simulation and Cosimulation*”, **Mathematical Geology**, **33**, 911-926.
- Soares, A., Diet, J.D. and Guerreiro, L. (2007), “*Stochastic Inversion with a Global Perturbation Method*”, *EAGE Petroleum Geostatistics* Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers.
- Sørensen, J.C., Gregersen, U., Breiner, M. and Michelsen, O. (1997), “*High-frequency sequence stratigraphy of Upper Cenozoic deposits in the central and southeastern North Sea areas*”, **Marine and Petroleum Geology**, **14**, 99-123.
- Tarantola, A. (1987), “*Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*”, Elsevier Scientific Publ. Co., Inc.
- Tarantola, A. (2005), “*Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*”, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tekkeli, A.B. and Bal, O.T. (2012), “*Modeling of Gravity Data Using Particle Swarm Optimization*”, *International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, Istanbul, Turkey, 17-19 September 2012*, pp. 1-4.
- Thornton, B.S. and Sutton, G.R. (1986), “*A New approach To The Inversion Of Seismic Data*”, **Geophysical Prospectin**, **34**, 208-219.
- Tompkins, M., Fernández Martínez, J., Alumbaugh, D. and Mukerji, T. (2011), “*Scalable uncertainty estimation for nonlinear inverse problems using parameter reduction, constraint mapping, and geometric sampling: Marine controlled-source electromagnetic examples*”, **Geophysics**, **76**, F263-F281.

- Tran, T.T., Deutsch, C.V. and Xie, Y. (2001), “*Direct Geostatistical Simulation With Multiscale Well, Seismic, and Production Data*”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Vol. SPE Paper Number 71323. Society of Petroleum Engineers.
- Ulrych, T.J., Sacchi, M.D. and Woodbury, A. (2001), “*A Bayes tour of inversion: A tutorial*”, **Geophysics**, **66**, 55-69.
- Velzeboer, C.J. (1981), “*The theoretical seismic reflection response of sedimentary sequences*”, **Geophysics**, **46**, 843-853.
- Walden, A.T. and Hosken, J.W.J. (1985), “*An Investigation Of The Spectral Properties of Primary Reflection Coefficient*”, **Geophysical Prospecting**, **33**, 400-435.
- Walker, M., Grant, S., Connolly, P. and Smith, L. (2016), “*Stochastic inversion for facies: A case study on the Schiehallion field*”, **Interpretation**, **4**, SL9-SL20.
- Wang, L., Zhao, Q., Gao, J., Xu, Z., Fehler, M. and Jiang, X. (2016), “*Seismic sparse-spike deconvolution via Toeplitz-sparse matrix factorization*”, **Geophysics**, **81**, V169-V182.
- Xu, W., Tran, T.T., Srivastava, M. and Journel, A.G. (1992), “*Integrating Seismic Data in Reservoir Modeling: The Collocated Cokriging Alternative*”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers
- Yilmaz, Ö. (2001), “*Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*”, Society of Exploration Geophysicists.
- Zhang, R. and Castagna, J. (2011), “*Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition*”, **Geophysics**, **76**, R147-R158.
- Zhang, Y., Wang, S. and Ji, G. (2015), “*A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications*”, **Mathematical Problems in Engineering**, **2015**, 38.

Abstract

One of the most important data used for oil and gas exploration is reflection seismic data. Seismic inversion is one of the main steps in hydrocarbon exploration and reservoir modeling. There are various approaches for seismic inversion where series of stochastic inversion methods are the latest for this purpose. These methods work with geostatistical simulations algorithms. In this thesis, firstly, an improved direct sequential simulation (DSS) algorithm was presented in which local spatial parameters are entered in the simulation algorithm based on some zonation criteria. The required computer codes of this new algorithm was then developed in MATLAB programming environment and its capability tested by using synthetic and real datasets. Secondly, new stationary and non-stationary 3D stochastic seismic inversion algorithms, based on the conventional and improved DSS methods, were presented and their performance was evaluated by using both synthetic and real datasets. Finally, the variogram parameters were optimized during 3D stochastic non-stationary inversion by using the particle swarm optimization (PSO) method. The obtained results indicate that a more suitable spatial distribution of acoustic impedance values was achieved using the new improved DSS compared to those of the conventional DSS method. The results of non-stationary stochastic seismic inversions of noise free and noise contaminated synthetic datasets show a reduction of respectively 6.1 and 9.7% value of RMS error with respect to those produced by stationary stochastic inversion. Furthermore, validation of non-stationary stochastic seismic inversion results for noise-free dataset using the real data of two blind wells illustrates a decrease of the RMS error of 4.6 % in blind well 1 and 8.1 % in blind well 2 compared to those acquired by stationary inversion. Whereas for noisy dataset, there were RMS error decreasing of 12 % and 11.3 % using blind well 1 and 2 respectively. The results obtained for real dataset indicates the non-stationary inversion caused a reducing of 2.8 % in RMS error between inverted and real seismic data compared to the stationary inversion method. In addition, a comparison of the real data of a blind well in this case with the results of inversion showed the RMS error was decreased about 5.4 % compared to the stationary inversion. Moreover, inversion of noisy and noise free synthetic and real datasets by the optimized non-stationary stochastic seismic inversion method using the PSO approach showed a slight (about 1%) reduction of inversion error relative to the ordinary non-stationary seismic inversion.

Keywords: Variogram, direct sequential simulation (DSS), stochastic reflection seismic inversion, stationary and non-stationary spatial patterns, particle swarm optimization (PSO)



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

PhD Thesis in Mining Exploration Engineering

**3D stochastic seismic inversion for nonstationary spatial
patterns in hydrocarbon reservoirs**

By: Hamid Sabeti

Supervisors:

Dr. Ali Moradzadeh

Dr. Faramarz Doulati Ardejani

Advisor:

Dr. Amilcar Soares

September 2016