

مدل سازی سه بعدی مقاومت صوتی با استفاده از روش شبیه سازی نوارهای دوار در یکی از میدان های جنوب غربی

مهدی صادقی^۱، نوید امینی^{۲*}، رضا فلاحت^۳، ناصر مدنی^۴ و حمید ثابتی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ محقق، کوکولینک (زیر مجموعه دانشگاه ملی سئول)، کره جنوبی

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

^۴ استادیار، دانشکده معدن و علوم زمین، دانشگاه نظربایف، نورسلطان، قزاقستان

^۵ استادیار، دانشکده معدن دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۲)

چکیده

روش های شبیه سازی تصادفی زمین آماری، امکان تولید مدل های دو یا سه بعدی ویژگی های مخزنی را با استفاده از داده های موجود در محل چاه ها فراهم می کنند. در این تحقیق، مدل سازی سه بعدی مقاومت صوتی با استفاده از روش زمین آماری شبیه سازی نوارهای دوار (TBSim) انجام شده است. اساس روش نوارهای دوار، ساده سازی فرایند شبیه سازی زمین آماری یک مسئله در فضای دو یا سه بعدی به مجموعه ای از شبیه سازی های یک بعدی در راستای تعدادی خطوط با استفاده از توابع سینوسی است. روش نوارهای دوار روشی سریع و قدرتمند است و خصوصیات زمین آماری را با دقت زیادی بازتولید می کند. در مطالعه حاضر، جهت تولید مدل های سه بعدی مقاومت صوتی در یکی از میدان های نفتی جنوب غربی ایران، از این روش استفاده و با نتایج وارون سازی لرزه ای مقایسه شده است. داده های مورد استفاده در این روش شامل نگارهای مقاومت صوتی هفت چاه این میدان است که یکی از چاه ها جهت بررسی میزان درستی و دقت نتایج از محاسبات کنار گذاشته شده است. نتایج حکایت از همبستگی زیاد مقادیر مدل سازی شده با داده های واقعی مقاومت صوتی در محل چاه آزمایش و نیز مدل حاصل از وارون سازی لرزه ای دارد. همچنین بررسی و مقایسه بافت نگار نتایج با بافت نگارهای داده های واقعی و بافت نگار مدل وارون سازی لرزه ای، نشان از توانایی این روش در بازتولید ویژگی های آماری داده ها دارد. به علاوه، نتایج تحلیل عدم قطعیت مدل های تولید شده تأییدی بر مطمئن بودن این مدل ها به ویژه در محل چاه آزمایش است.

واژه های کلیدی: مدل سازی مقاومت صوتی، شبیه سازی نوارهای دوار، شبیه سازی زمین آماری، وارینگرام

۱ مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به منابع هیدروکربوری، تهیه مدل‌های پتروفیزیکی مطمئن ضروری است. در سال‌های اخیر، روش‌های زمین‌آماري (پیوست پ) همگام با پیشرفت و توسعه در سایر علوم، جایگاه ویژه‌ای در مهندسی مخازن هیدروکربوری پیدا کرده‌اند (دوین، ۲۰۰۷). یکی از راه‌های مدل‌سازی خصوصیات پتروفیزیکی، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی (acoustic impedance) است. مدل‌های مقاومت صوتی ابزار مهمی در توصیف و ارزیابی سایر ویژگی‌های پتروفیزیکی مانند نفوذپذیری و تخلخل هستند. ویژگی‌های استاتیک مخزنی اغلب با استفاده از مدل‌های پتروالاستیکی از مقاومت صوتی محاسبه می‌شوند. از روش‌های زمین‌آماري در محاسبه مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی نیز می‌توان استفاده کرد (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹). در روش مذکور، این مدل‌ها با استفاده از نگارهای مقاومت صوتی در محل‌ها تولید می‌شوند. مدل‌سازی مقاومت صوتی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري به اندازه روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای مرسوم نیست، اما در میدان‌هایی که فاقد داده‌های لرزه‌ای هستند، استفاده از این روش‌ها اهمیت دوچندان می‌یابد. همچنین مدل‌های محاسبه‌شده با استفاده از این روش‌ها، حتی در صورت وجود داده‌های لرزه‌ای، توانایی استفاده و تلفیق در برخی از روش‌های وارون‌سازی زمین‌آماري لرزه‌ای را دارند (هاس و دوپرول، ۱۹۹۴؛ سوارز و همکاران، ۲۰۰۷ و ثابتی و همکاران، ۲۰۱۷).

در علم زمین‌آمار، ابزارهای متعددی جهت مدل‌سازی ساختارها و خصوصیات زیرسطحی وجود دارد. یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارها، روش‌های مبتنی بر واریوگرافی هستند که به نوبه خود به روش‌های قطعی (deterministic) و تصادفی (stochastic) تقسیم می‌شوند (دوپرول، ۲۰۰۳). روش‌های قطعی مدل واحدی را تولید

می‌کنند که احتمالاً بهترین پاسخ ممکن است، اما امکان محاسبات عدم قطعیت را فراهم نمی‌کنند. این روش‌ها به علت ماهیت میانگین‌گیری و درون‌یابی، پاسخی هموار شده تولید می‌کنند؛ بنابراین اغلب، پدیده‌های ریزمقیاس را بازتولید نمی‌کنند. شناخته‌شده‌ترین روش تخمین در علم زمین‌آمار، کریجینگ نامیده می‌شود. عملگر کریجینگ که در زمره روش‌های قطعی دسته‌بندی می‌شود، جهت تخمین مقدار یک ویژگی در یک نقطه، اوزان متناسبی بر اساس تابع واریوگرام به نقاط موجود دارای آن ویژگی نسبت می‌دهد. روش‌های شبیه‌سازی تصادفی زمین‌آماري - که در ادامه به اختصار، شبیه‌سازی زمین‌آماري نامیده می‌شوند - مجموعه‌ای از پاسخ‌های ممکن یا تحقق‌ها (realizations) را تولید می‌کنند که همگی با داده‌های موجود سازگار هستند. پاسخ‌های مذکور می‌توانند بسیار مشابه باشند، اما هرگز یکسان نیستند و هر کدام از آنها به یک اندازه محتمل هستند و تغییرات خصوصیات پتروفیزیکی را نشان می‌دهند. تحقیق‌های متعدد، امکان بررسی تغییرات و ناهمگونی‌های زمین‌شناسی را با تولید نقشه‌های احتمالاتی و حجمی ویژگی‌های پتروفیزیکی یا رخساره‌ها فراهم می‌کنند؛ بنابراین در توصیف مخازن هیدروکربوری و تهیه مدل‌های سه‌بعدی از آن بسیار کارآمد هستند (فرانسیس، ۲۰۰۶).

امروزه استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی زمین‌آماري مناسب جهت تولید مدل‌های مطمئن از خصوصیات زیرسطحی چالش برانگیز است. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (Sequential Gaussian Simulation) یا به اختصار، SGS (دوچ و جورنل، ۱۹۹۸؛ نوسبامر، ۲۰۱۸؛ فرد لزرجانی و همکاران، ۱۳۹۵ و محمدحسینی و همکاران، ۱۳۹۸) یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی است که به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری زیاد، از آن بسیار استفاده می‌شود. روش SGS از دیدگاه ریاضی روش مطمئنی است، اما به دلیل

TBSim، نتایج این روش در محل چاه آزمایش بررسی و راستی‌آزمایی می‌شود. علاوه بر این، مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی نیز با نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه می‌شود. همچنین بررسی‌ها و مقایسه‌های آماری مختلفی روی نتایج انجام خواهد شد.

۲ روش شبیه‌سازی نوارهای دوار (TBSim)

ایده اصلی روش TBSim بر مبنای ساده‌سازی فرایند شبیه‌سازی یک مسئله در فضای دو یا سه بعدی به شبیه‌سازی در راستای تعدادی خطوط در فضای یک‌بعدی است. در نهایت، مقدار شبیه‌سازی در هر نقطه از فضای دو یا سه بعدی به صورت مجموع وزنی مقادیر شبیه‌سازی شده در راستای خطوط یک‌بعدی خواهد بود. اگر $\{X(t), t \in R\}$ میدان برداری تصادفی با میانگین صفر، C_X تابع کوواریانس پیوسته و U یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت در کره با شعاع واحد S_d باشد، رابطه میدان برداری تصادفی $\{Y(x), x \in R^d\}$ با میانگین ثابت و کوواریانس همسانگرد C_Y به صورت زیر است (امری و لانتخول، ۲۰۰۶):

$$\forall x \in R^d, Y(x) = X(x \cdot U), \quad (1)$$

که علامت نقطه بیانگر عملگر ضرب داخلی در R^d است. رابطه کوواریانس همسانگرد میدان برداری Y نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود (امری و لانتخول، ۲۰۰۶):

$$C_Y(r) = \int_{S_d} C_X(h \cdot u) \omega_d(du), \quad (2)$$

که h برداری در R^d ، r طول گام کوواریانس همسانگرد و ω_d توزیع یکنواخت بر کره S_d است.

رابطه (۲) در واقع نگاشتی یک به یک بین مجموعه نقاط کوواریانس پیوسته و همسانگرد در فضای R^d و نقاط کوواریانس پیوسته در فضای R است. این ویژگی امکان شبیه‌سازی یک میدان تصادفی چندمتغیره با کوواریانس C_Y را با استفاده از شبیه‌سازی میدان‌های یک‌بعدی با کوواریانس C_X می‌دهد. رابطه (۲) را در مختصات کروی

نیاز به انجام کریجینگ در هر نقطه، روش کندی محسوب می‌شود. این روش برای داده‌های چندمتغیره نیاز به ساده‌سازی برخی از فرضیات مسئله دارد. همچنین این روش ممکن است قادر به بازتولید برخی ویژگی‌های اساسی زمین‌آماري مانند واریوگرام نباشد (نظری استاد و همکاران، ۲۰۱۸). روش شبیه‌سازی نوارهای دوار (Turning Bands Simulation) یا به اختصار، TBSim (ماترون، ۱۹۷۳؛ امری و لانتخول، ۲۰۰۶؛ آرویو و همکاران، ۲۰۱۷؛ ایز و همکاران، ۲۰۱۹ و صادقی و همکاران، ۲۰۱۹)، روشی قدرتمند و سریع است که در سال‌های اخیر کاربرد چشمگیری در مهندسی معدن و علوم زمین داشته است. به طور خلاصه، این روش با استفاده از شبیه‌سازی توابع سینوسی یک‌بعدی در راستای تعدادی خطوط تصادفی، یک فضای چندبعدی را شبیه‌سازی می‌کند. در سال‌های اخیر، گروه‌هایی از پژوهشگران (پراورزر و همکاران، ۲۰۱۵ و نظری استاد و همکاران، ۲۰۱۸) عملکرد روش TBSim را در شبیه‌سازی خصوصیات زیرسطحی بررسی کرده‌اند. نتیجه این بررسی‌ها نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل از روش TBSim، ویژگی‌های آماری مانند واریوگرام و بافت‌نگار را با دقت بهتری نسبت به روش‌های شبیه‌سازی متوالی بازتولید کرده است.

در این تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از روش TBSim در یکی از میدان‌های نفتی جنوب غربی ایران اجرا و مدل‌های مقاومت صوتی محاسبه شده از این روش با نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه می‌شود. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل نگارهای مقاومت صوتی در هفت چاه میدان مذکور است که یکی از چاه‌ها جهت ارزیابی میزان صحت محاسبات و میزان همخوانی نتایج با مقادیر واقعی و نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای از محاسبات کنار گذاشته شده است. پس از تهیه مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی به روش

است و این تابع یک توزیع احتمال خواهد بود. اگر Ω متغیر تصادفی فرکانس با توزیع $f(\omega)$ و φ متغیر تصادفی فاز با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 2\pi]$ باشد، آنگاه می توان نشان داد $C(h)$ کوواریانس تابع $Y(x)$ برابر است با (لانتخول، ۲۰۰۲):

$$Y(x) = \sqrt{2} \cos(\Omega \cdot x + \varphi), \quad (5)$$

جهت محاسبه $Y(x)$ به روش TBSim باید این تابع را بازنویسی کرد (لانتخول، ۲۰۰۲):

$$Y(x) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=1}^N \cos(\Omega_i \cdot x + \varphi_i), \quad (6)$$

بنابراین برای استفاده از روش طیفی، کافی است تابع $f(\omega)$ و تعداد نقاط N مشخص باشد. $f(\omega)$ در فضای d بعدی به صورت زیر محاسبه می شود (لانتخول، ۲۰۰۲):

$$f(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^d} \int e^{2\pi i \omega h} C(h) d(h), \quad (7)$$

اگر θ_t زاویه خط D_t و s_t تصویر نقطه x بر خط D_t باشد، $Y_t(s_t)$ مطابق رابطه (۵) یک تابع سینوسی خواهد بود (شکل ۱) و $Y(x)$ مطابق رابطه (۶) از مجموع همین توابع حاصل می شود.

جهت شبیه سازی داده ها به روش TBSim، داده ها باید توزیع نرمال (گوسی) با میانگین صفر و انحراف معیار یک داشته باشند. پس از نرمال سازی داده ها و مدل سازی واریوگرام (محاسبه کوواریانس)، شبیه سازی غیرشرطی (non-conditional simulation) میدان گوسی انجام می شود. از آنجا که ضرورت دارد نتایج تحقیقها مقید به داده های موجود باشد، ابتدا تفاضل بین مقادیر واقعی و مدل شده در محل داده ها محاسبه و کریجینگ مقادیر حاصل به مقدار شبیه سازی شده در آن نقاط افزوده می شود؛ بنابراین شبیه سازی شرطی (conditional simulation) میدان گوسی Y را به صورت زیر می توان نوشت (امری و داسیلوا، ۲۰۰۹):

$$Y_{CS}(x) = Y_S(x) + [Y(x) - Y_S(x)]^* \quad (8)$$

که اندیس های CS و S به ترتیب بیانگر شبیه سازی شرطی و

به صورت رابطه (۱) می توان بازنویسی کرد. این رابطه تابع کوواریانس C_X را بر حسب C_Y در فضای R^3 محاسبه می کند (امری و لانتخول، ۲۰۰۶):

$$C_X(r) = \frac{d}{dr} [r C_Y(r)], \quad (1)$$

در روش TBSim اگر تعداد بردارهای تصادفی کم باشد، تحقیق های نهایی بردار Y ، در راستای این بردارها نوعی ناهمسانگردی از خود نشان می دهند و پدیده های تصادفی تولید می کنند. برای حل این مشکل باید از تعداد زیادی بردار تصادفی استفاده شود. در این صورت بردار Y با رابطه زیر تعریف می شود (امری و لانتخول، ۲۰۰۶):

$$Y(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N X_i(x, U_i), \quad (2)$$

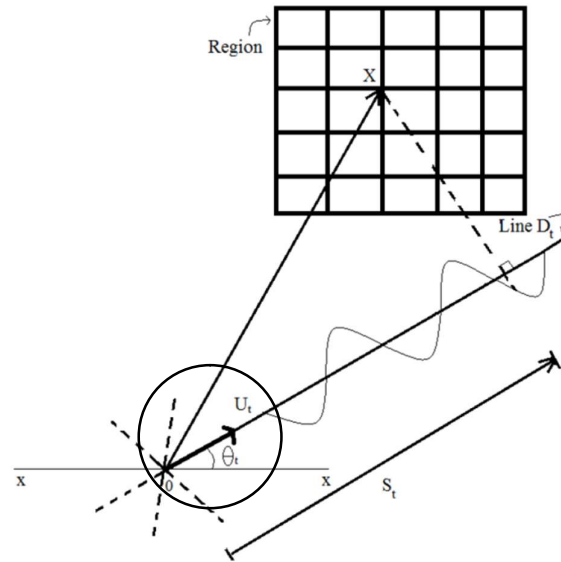
که $\{U_i, i=1, \dots, N\}$ جهت های مستقلی هستند که به طور تصادفی در کره S^3 توزیع شده اند. $\{X_i, i=1, \dots, N\}$ نیز میدان های تصادفی یک بعدی با تابع کوواریانس C_X هستند. C_Y کوواریانس میدان برداری تصادفی $\{Y(x), x \in R^3\}$ ، با رابطه (۳) تعریف می شود. هنگامی که N به اندازه کافی بزرگ باشد، طبق قضیه حد مرکزی، رابطه (۳) مدل کوواریانس نظری را بازتولید می کند (امری و لانتخول، ۲۰۰۶):

$$C_Y(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_X(h, u_i), \quad (3)$$

پژوهشگران روش های متعددی را جهت شبیه سازی میدان تصادفی یک بعدی معرفی کرده اند. امری و لانتخول (۲۰۰۶) برای حل این مسئله از روش طیفی پیوسته استفاده کرده اند. در روش طیفی پیوسته، شبیه سازی یک بعدی با استفاده از توابع سینوسی انجام می شود. این روش بر مبنای نمایش طیفی ماتریس کوواریانس است. هر تابع کوواریانس پیوسته در فضای d می توان به صورت تبدیل فوری یک تابع مثبت نوشت (لانتخول، ۲۰۰۲):

$$C(h) = \int e^{-2\pi i \omega h} f(\omega) d(\omega), \quad (4)$$

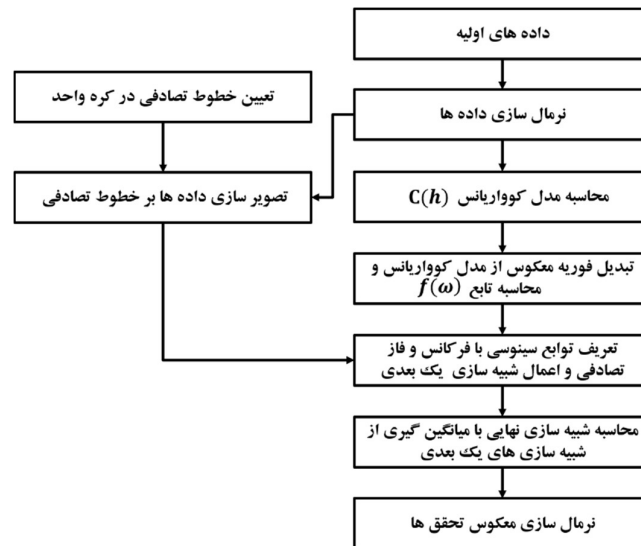
از آنجایی که در روش TBSim داده ها نرمال سازی می شود $C(0) = 1$ است، مقدار انتگرال تابع $f(\omega)$ برابر عدد یک



شکل ۱. اساس روش TBSim در فضای دوبعدی. در این شکل بردار یکه تصادفی است که با محور X زاویه θ_t می‌سازد. D_t خط تصادفی متناظر با بردار یکه تصادفی، X موقعیت داده از مبدأ و S_t موقعیت جدید داده در راستای خط D_t است. تمامی نقاط تصویر شده در راستای خطوط با توابع سینوسی شبیه‌سازی می‌شوند. نتیجه نهایی، مجموع وزنی شبیه‌سازی‌های تک‌بعدی است (آرویو و امری، ۲۰۱۷).

داده‌ها از فضای گوسی به فضای اولیه داده‌ها نیاز است. شکل ۲ چارچوب کلی اعمال روش TBSim را نشان می‌دهد.

غیرشرطی هستند و ستاره، مبین عملگر کریجینگ است. تحققات حاصل از شبیه‌سازی باید توزیع آماری (بافت‌نگار) یکسانی با داده‌های اولیه تولید کنند. به این منظور در آخرین مرحله شبیه‌سازی به غیر نرمال‌سازی



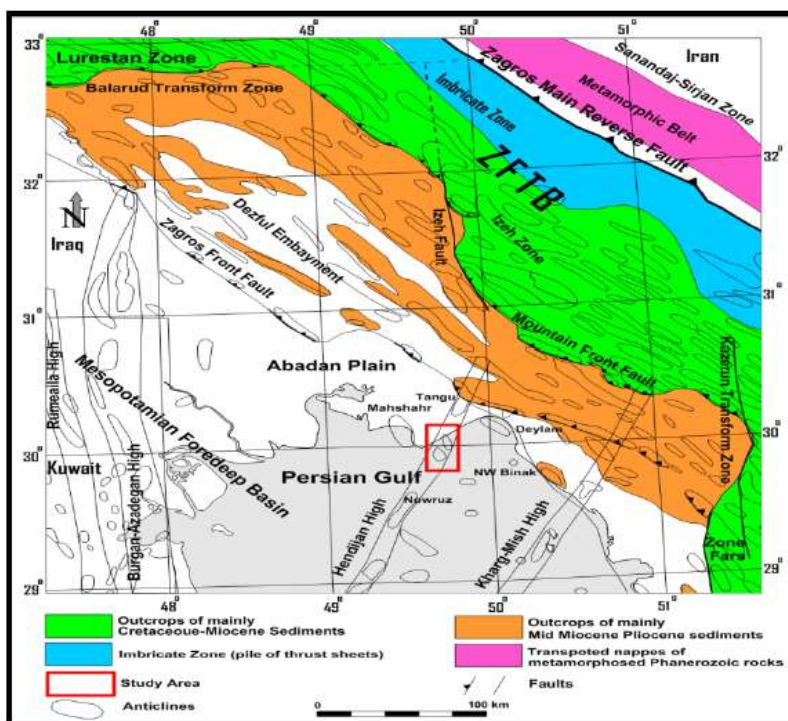
شکل ۲. چارچوب کلی اعمال روش TBSim.

۳ مطالعه موردی

۳-۱ زمین‌شناسی مخزن مورد مطالعه

در گستره خلیج فارس، میدان‌های هیدروکربوری متعددی وجود دارد که سنگ‌های مخزنی آنها از بازه زمانی ژوراسیک میانی (middle Jurassic) تا الیگو-میوسن (Oligo-Miocene) را دربرمی‌گیرد. میدان مورد مطالعه در ناحیه شمال غرب خلیج فارس واقع شده است. ساختار این میدان شامل یک تاقدیس است که یال غربی آن با یک گسل امتداد لغز N-NE و S-SW بریده شده است. مخزن اصلی مورد مطالعه در این تحقیق، شامل بخش ماسه‌سنگی اهواز در قسمت فوقانی سازند آسماری است که معادل سازند غار در کویت است (خسروتهرانی، ۱۳۸۹). مخزن ماسه‌سنگی اهواز

بیشتر شامل ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های شیل و در برخی بخش‌ها دولومیت است که به سه زیرلایه (زون) تقسیم‌بندی شده است که هر زیرلایه با یک لایه شیلی نازک در قاعده از زیرلایه دیگر تشکیل می‌شود. بخش کربناته قاعده‌ای سازند آسماری نیز با یک ناپیوستگی از سازند جهرم جدا شده است. در قسمت شمالی خلیج فارس که شامل ناحیه مورد مطالعه نیز می‌شود، روند عمومی تاقدیس‌ها از جهت N-S و NNE-SSW به جهت NE-SW (عمود بر روند عمومی رشته کوه‌های زاگرس) تغییر یافته است (عبداللهی فرد و همکاران، ۲۰۰۶). شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده از منطقه غربی رشته کوه‌های زاگرس را نشان می‌دهد که شامل میدان مورد مطالعه نیز هست.



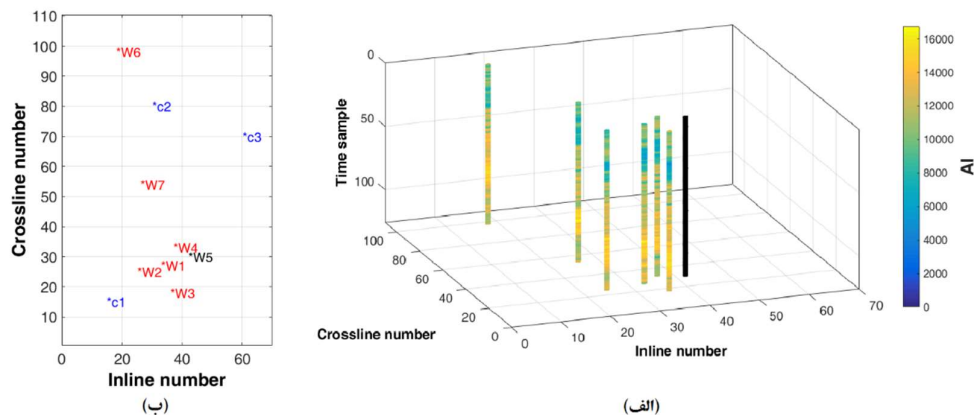
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (گزارش زمین‌شناسی میدان نفتی مورد مطالعه).

۲-۳ آماده‌سازی داده‌ها و ساخت مدل ساختمانی

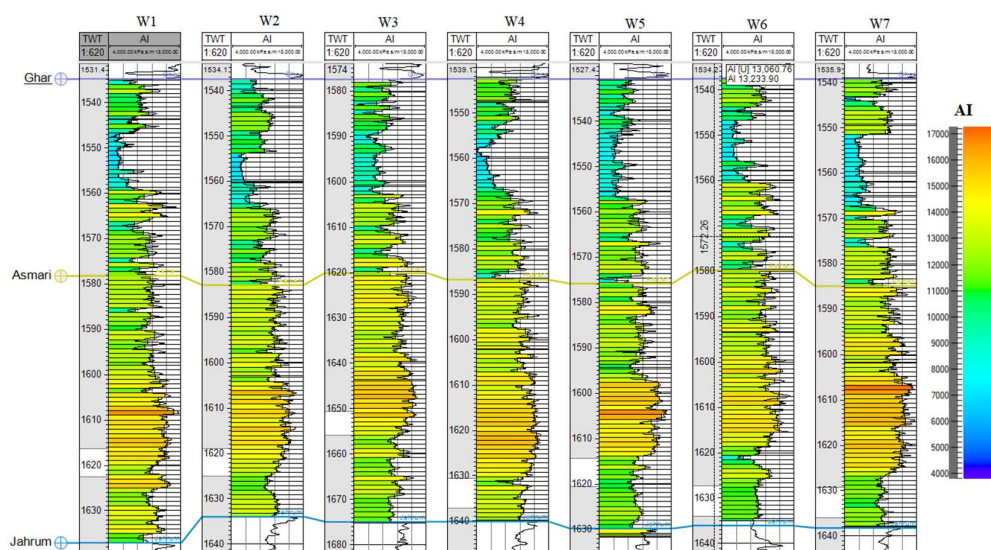
مدل ساختمانی در یک مخزن، شامل شبکه‌بندی سه‌بعدی است. این شبکه سه‌بعدی که قالب اصلی مدل است، امکان ساخت مدل‌های پتروفیزیکی، محاسبات حجمی رخصاره‌ها و طراحی محل چاه را می‌دهد. پس از شبکه‌بندی مخزن، تمامی خصوصیات پتروفیزیکی در تمام حجم یک شبکه یکسان خواهد بود. خصوصیات پتروفیزیکی را می‌توان پس از درشت‌نمایی (up-scaling) اطلاعات چاه‌ها استخراج و در محل متناظر در مدل ساختمانی وارد کرد و در نهایت، با استفاده از روش‌های مدل‌سازی به سایر نقاط شبکه تعمیم داد. در این تحقیق جهت مدل‌سازی، یک شبکه سه‌بعدی دکارتی ساخته شده است که $70 \times 110 \times 126$ سلول به ترتیب در راستاهای x ، y و t دارد. ابعاد هر سلول در راستای افقی، 100×100 متر و در راستای قائم، یک میلی‌ثانیه است. هدف ساخت مدل ساختمانی مذکور، مقایسه و مدل‌سازی تغییرات مقاومت صوتی در دو زیرلایه از سازند آسماری است که این دو زیرلایه، لیتولوژی و کیفیت مخزنی متفاوتی دارند. ابعاد

افقی مدل نیز به گونه‌ای انتخاب شده است که کل تاقدیس میدان مذکور در محدوده مدل قرار بگیرد. در نهایت، محدوده بین سرسازند غار و سازند جهرم انتخاب شد و پس از ناحیه‌بندی و لایه‌بندی و تعیین ابعاد مناسب سلول‌ها در راستای افقی و قائم، مدل ساختمانی مناسب در این محدوده طراحی و ساخته شد.

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه شامل هفت چاه از میدان مذکور است که نگار مقاومت صوتی دارند. جهت بررسی میزان دقت و درستی نتایج، داده‌های چاه W5 (چاه آزمایش) از محاسبات کنار گذاشته شده است. شکل ۴- الف و ۴- ب به ترتیب موقعیت سه‌بعدی و پلان افقی چاه‌های موجود را نشان می‌دهند. چاه آزمایش در این شکل‌ها به رنگ مشکی و چاه‌های تحلیل به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. چاه‌های آبی‌رنگ نیز سه چاه فرضی در مدل هستند که داده‌های مقاومت صوتی اولیه در آن نقاط موجود نبود و تنها جهت مقایسه تغییرات قائم مقاومت صوتی نتایج مدل‌سازی و وارون‌سازی از آن استفاده شده است. در شکل ۴- الف، تغییرات قائم مقاومت صوتی در چاه‌های تحلیل به صورت رنگی نشان داده شده است. برای



شکل ۴. الف) نمای سه‌بعدی از مدل ساختمانی شبکه‌بندی‌شده و موقعیت چاه‌ها (ب) پلان افقی چاه‌ها. چاه آزمایش به رنگ مشکی، چاه‌های تحلیل به رنگ قرمز و چاه‌های فرضی به رنگ آبی نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار مقاومت صوتی درشت‌نمایی شده در چاه‌های تحلیل و آزمایش.

(تنک) است و با هم‌میخت موجک تخمینی با سری بازتاب تنک، داده‌های لرزه‌ای واقعی بازتولید می‌شود. به دلیل آنکه مقادیر مدل‌سازی شده در نقاط شبکه‌بندی شده محاسبه می‌شوند، برای مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای باید داده‌های حاصل از وارون‌سازی را در نقاط شبکه‌بندی باز نمونه‌گیری (resampling) کرد. در بخش‌های بعد، تحقیقات مقاومت صوتی حاصل از اعمال روش TBSim با نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه می‌شود.

۳-۳ اعمال روش TBSim

شکل ۶ چارچوب کلی مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت صوتی به روش TBSim را نشان می‌دهد. جهت مدل‌سازی داده‌ها به روش TBSim، داده‌های درشت‌نمایی شده مقاومت صوتی باید به توزیع گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار یک نرمال‌سازی شوند. پس از نرمال‌سازی داده‌ها و محاسبه واریوگرام تجربی، مدل‌سازی واریوگرام انجام می‌شود. مدل‌سازی واریوگرام ابزار مناسبی برای

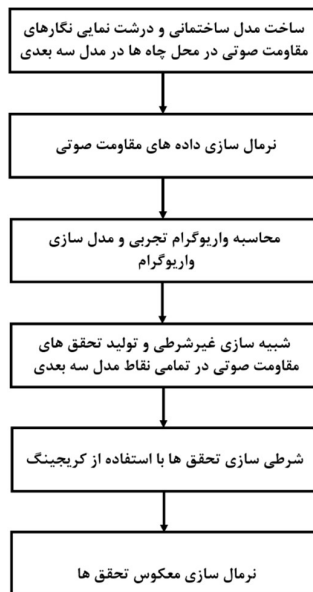
مشاهده بهتر و دقیق‌تر تغییرات مقاومت صوتی، نگارهای مقاومت صوتی درشت‌نمایی نشده در چاه‌های موجود به همراه سرسازندهای غار، آسماری و جهرم در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخشی که مقاومت صوتی کم و متوسط دارد، مربوط به سازند غار و بخشی که مقاومت صوتی بیشتر از متوسط دارد، مربوط به بخش کربناته قاعده سازند آسماری است.

وارون‌سازی لرزه‌ای به روش خارهای پراکنده (sparse spikes) (اولدنبرگ و همکاران، ۱۹۸۳) پیش از این روی داده‌ها انجام شده است. این روش در زمره روش‌های وارون‌سازی قطعی قرار می‌گیرد. روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای قطعی بر مبنای هم‌میخت موجک تخمینی با مدل بازتابی، مقایسه با داده لرزه‌ای و درنهایت، کمینه کردن اختلاف این دو بنا شده است. در روش وارون‌سازی خارهای پراکنده، از کمترین تعداد بازتابنده جهت مدل کردن سری بازتاب استفاده می‌شود. در این روش فرض بر آن است که سری بازتاب لایه‌های زیرسطحی، پراکنده

جدول ۱. ویژگی‌های مدل‌های واریوگرام نظری برازش‌شده.

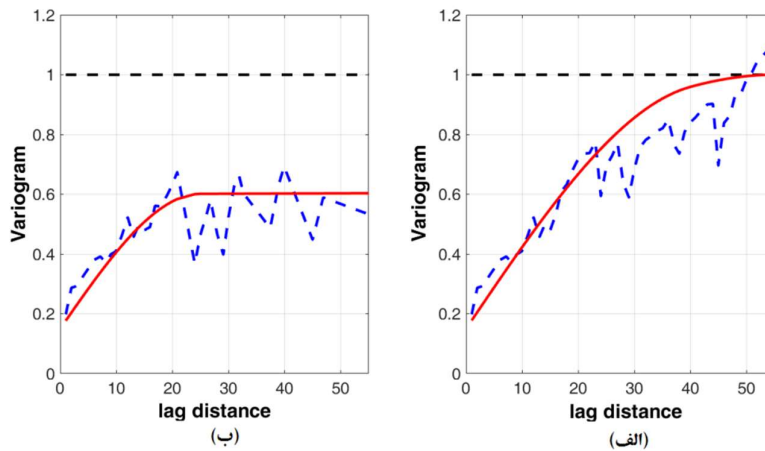
واریوگرام	اثر قطعه‌ای	ساختار ۱	دامنه	سقف	ساختار ۲	دامنه	سقف
افقی	۰/۱۵	کروی	۲۵	۰/۴۵	کروی	بی‌نهایت	۰/۴۰
قائم	۰/۱۵	کروی	۴۰	۰/۴۵	کروی	۵۵	۰/۴۰

(distribution) داده‌ها را بازتولید می‌کنند (امری و لانتخول، ۲۰۰۶). پس از مدل‌سازی واریوگرام‌ها، تعداد ۵۰ تحقق از مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی با استفاده از روش TBSim محاسبه شده است. تعداد خطوط (نوارهای دوار) جهت اجتناب از تولید پدیده‌های تصادفی و بازتولید مدل واریوگرام برابر ۱۰۰۰ قرار داده شد. برای مقید کردن تحقیق‌ها به داده‌های اولیه از کریجینگ با پنجره یکتا استفاده شد. در نهایت، تبدیل معکوس تحقیق‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی از فضای نرمال به فضای اولیه انجام پذیرفت.



شکل ۶. چارچوب کلی مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت صوتی به روش TBSim روی داده‌های واقعی.

توصیف تغییرات فضایی مقادیر مقاومت صوتی است. در این مدل‌سازی، نمونه‌های نزدیک به هم نسبت به نمونه‌های دورتر از هم تشابه بیشتری خواهند داشت. واریوگرام تجربی روی داده‌های درشت‌نمایی شده مقاومت صوتی در جهت افقی و قائم محاسبه و با مدل‌های مناسب برازش شده است. واریوگرام‌های برازش‌شده، واریوگرام‌هایی با دو ساختار کروی و یک اثر قطعه‌ای هستند که خصوصیات آنها خلاصه‌وار در جدول ۱ بیان شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، برخلاف واریوگرام قائم، واریوگرام افقی به سقف یک نمی‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد ناهمسانگردی از نوع ناحیه‌ای (zonal anisotropy) است. ناهمسانگردی ناحیه‌ای به حالتی گفته می‌شود که سقف واریوگرام در جهت‌های مختلف با هم برابر نشود. یکی از دلایل ایجاد ناهمسانگردی ناحیه‌ای می‌تواند تعداد کم داده‌ها باشد (پیرس و همکاران، ۲۰۰۶). در میدان‌های نفتی نیز که بیشتر چاه‌ها قائم هستند، اگر تعداد چاه‌ها کم باشد، به دلیل کمبود داده‌های اندازه‌گیری در راستای افقی، این پدیده اغلب مشاهده می‌شود. شایان ذکر است وجود ناهمسانگردی، جزئی از طبیعت داده‌ها (data nature) است و انتخاب مدل واریوگرام صحیح ضروری است؛ لذا در چنین مواردی، استفاده از واریوگرام‌های همسانگرد و تک‌جهتی معمولاً به نتایج نادرست می‌انجامد. در روش TBSim در صورت انجام واریوگرافی صحیح، با انتخاب بردارهای تصادفی به اندازه کافی، تحقیق‌های تولیدشده، مدل واریوگرام اولیه و در نتیجه، توزیع فضایی (spatial

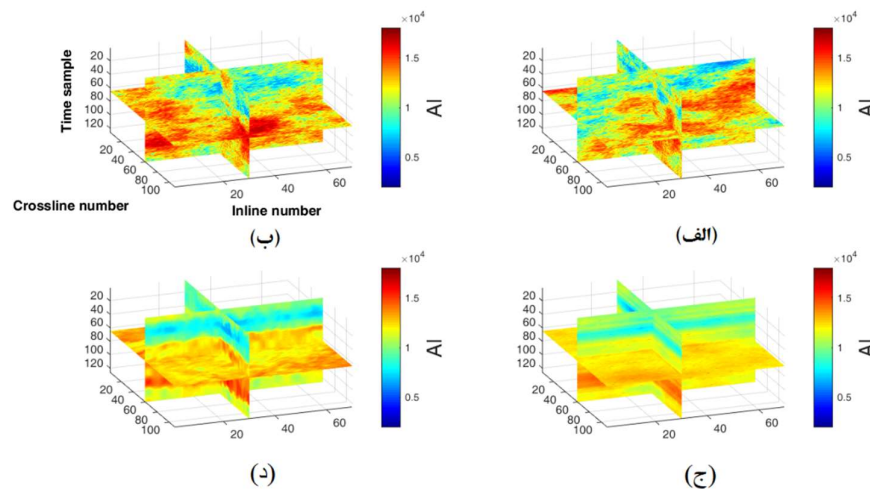


شکل ۷. (الف) واریوگرام قائم تجربی (آبی) و نظری برازش شده (قرمز) داده‌های مقاومت صوتی نرمال شده (ب) واریوگرام افقی تجربی (آبی) و نظری برازش شده (قرمز) داده‌های مقاومت صوتی نرمال شده. خط چین مشکی، واریانس داده‌های گوسی را نشان می‌دهد.

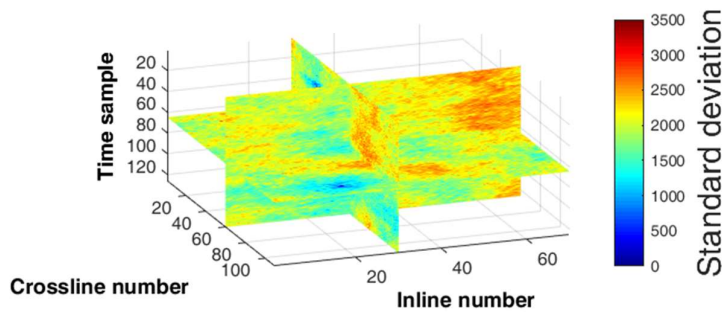
۴-۳ نتایج

شماره‌های ۳۰ و ۶۰ و یک برش افقی از نمونه زمانی ۶۵ ام مدل سه‌بعدی جهت مشاهده تغییرات مقاومت صوتی نمایش داده شده است. طبق شکل ۸-الف و ۸-ب، تحقیق‌های مختلف، هر کدام به نحو متفاوتی داده‌های مقاومت صوتی را تخمین زده و محدوده با مقاومت صوتی کمتر (بخش غار) را از بخش با مقاومت صوتی بیشتر (بخش کربناته قاعده آسماری) جدا کرده‌اند.

در این بخش نتایج مدل‌سازی مقاومت صوتی به روش TBSim بررسی می‌شود. شکل ۸-الف تا ۸-د به ترتیب نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت صوتی دو تحقیق با بیشترین میزان همبستگی در محل چاه آزمایش، میانگین تحقیق‌ها و مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای را نشان می‌دهند. در هر بخش از شکل ۸، دو برش قائم از inline (راستای یه خط) و crossline (راستای عمود به خط)



شکل ۸. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت صوتی. (الف) و (ب) مکعب دو تحقیق مقاومت صوتی با بیشترین میزان همبستگی در محل چاه آزمایش (ج) مکعب میانگین تحقیق‌ها (د) مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای



شکل ۹. مکعب انحراف معیار تحقق‌ها.

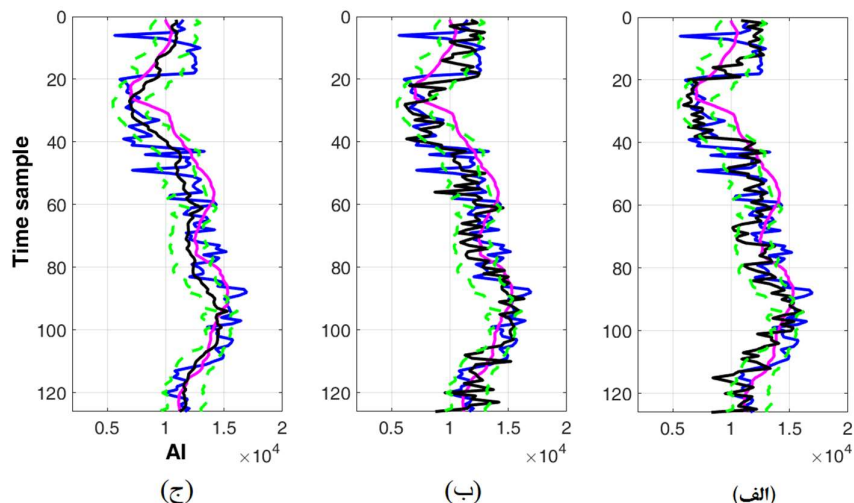
می‌تواند به علت ضخامت بیشتر این بخش و انحراف معیار اولیه کمتر مقادیر مقاومت صوتی در چاه‌ها تفسیر شود. شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب نمودارهای مقاومت صوتی دو تحقق با بیشترین میزان همبستگی با مقادیر واقعی در محل چاه آزمایش و شکل ۱۰-د میانگین تمامی تحقق‌ها را نشان می‌دهد که همگی با مقادیر واقعی و نیز مقادیر حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این تحقق‌ها به خوبی روند تغییرات قائم مقاومت صوتی را مدل‌سازی کرده‌اند و با مقادیر وارون‌سازی لرزه‌ای همخوانی دارند. در این تحقق‌ها بخش با مقاومت صوتی کم و همچنین بخش با مقاومت صوتی بیشتر با دقت مناسبی مدل‌سازی شده‌اند. میانگین تحقق‌ها نیز تخمین هموارشده‌ای را از تغییرات قائم مقاومت صوتی نشان می‌دهد. اثر هموارشدگی در محل مقادیر بیشینه و کمینه مقاومت صوتی بیشتر نمایان است. نمودار سبز رنگ در شکل ۱۰ نشان‌دهنده بازه عدم قطعیت نتایج است که عمده مقادیر مدل‌سازی شده در این بازه قرار گرفته است. ضرایب همبستگی نمودارهای ترسیم‌شده در شکل ۱۰ با مقادیر واقعی مقاومت صوتی در محل چاه آزمایش در جدول ۲ بیان شده است. مطابق این جدول، بیشینه همبستگی مقادیر مقاومت صوتی تحقق‌های مختلف با مقادیر واقعی در محل چاه آزمایش، $78/8$ درصد و برای میانگین تحقق‌ها، برابر $82/9$ درصد است. از آنجایی که ضریب همبستگی تنها میزان همسو بودن

شکل ۸-ج و ۸-د به ترتیب مدل سه‌بعدی میانگین تمامی تحقق‌ها و مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که میانگین سه‌بعدی تحقق‌ها، روند عمومی قائم و جانبی تغییرات امپدانس صوتی را به خوبی مدل‌سازی کرده است و همخوانی چشمگیری با مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای دارد. مدل میانگین سه‌بعدی تحقق‌ها، معادل نتیجه مدل‌سازی قطعی کریجینگ است و بنابراین تخمین هموارشده‌ای از مقادیر مقاومت صوتی ارائه کرده است.

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، یکی از مزایای استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری، امکان تحلیل عدم قطعیت تحقق‌های موجود است. به همین جهت انحراف معیار مقاومت صوتی 50 تحقق موجود محاسبه شده است. شکل ۹ برش‌های مختلف از مکعب انحراف معیار تحقق‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل کمینه مقدار انحراف معیار (عدم قطعیت کم) مربوط به نواحی نزدیک به چاه‌ها و بیشینه مقدار آن (عدم قطعیت زیاد) مربوط به لبه‌ها و فواصل دور از چاه‌هاست که امری طبیعی است. همچنین به دلیل تعداد محدود چاه‌ها، اریوگرام افقی ممکن است به خوبی تغییرات فضایی میدان گوسی را در راستای افقی پیش‌بینی نکرده باشد و در نتیجه، تغییرات جانبی مدل سه‌بعدی در فواصل دور، رفتار تصادفی بیشتری نسبت به فواصل نزدیک‌تر نشان دهد. مقادیر انحراف معیار در بخش قاعده‌ای کمی کمتر است که

تفکیک پذیری، دو تحقق مذکور تفکیک پذیری بیشتری نسبت به میانگین تحقق‌ها دارند. همچنین میزان همبستگی مقاومت صوتی با مقدار حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در محل چاه آزمایش برابر ۷۲/۸ درصد است.

تغییرات دو پارامتر را بیان می‌کند، ضرایب همبستگی بیان شده دور از انتظار نیست؛ زیرا میانگین تحقق‌ها نوسانات محلی کمتری دارد و از لحاظ تغییرات روند کلی، همسویی بیشتری با مقادیر واقعی دارد، اما از لحاظ

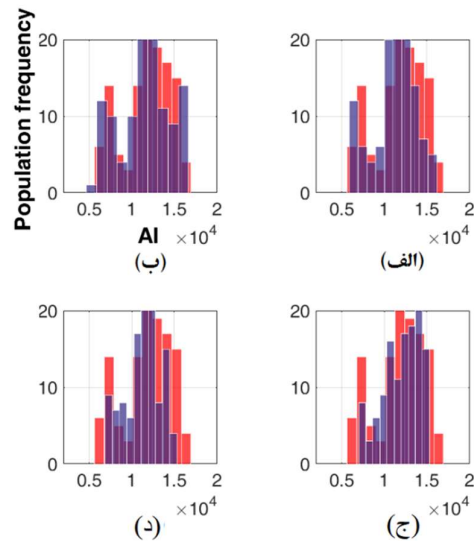


شکل ۱۰. مقایسه نتایج مدل‌سازی شده با مقادیر واقعی مقاومت صوتی و داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای در چاه آزمایش. (الف) و (ب) دو تحقق مختلف با بیشترین میزان همبستگی با مقادیر واقعی (ج) میانگین تحقق‌ها. نمودارهای آبی، مشکی و صورتی به ترتیب مقاومت صوتی واقعی، مدل‌سازی شده و وارون‌سازی را نشان می‌دهند. نمودارهای سبز معرف بازه عدم قطعیت پاسخ‌ها هستند.

هموارشدگی بیشتر و تغییرپذیری تصادفی کمتری (مقدار بیشینه و کمینه نزدیک‌تر به هم) را نشان می‌دهد. چون وارون‌سازی لرزه‌ای به روش خراهای پراکنده نیز در زمره روش‌های قطعی محسوب می‌شود، این بافت‌نگار با بافت‌نگار میانگین تحقق‌ها (معادل کریجینگ) مشابهت بیشتری دارد. همان‌طور که دیده می‌شود، مشخصات آماری این بافت‌نگارها میانگین و انحراف معیار کمتری نسبت به مشخصات آماری بافت‌نگارهای داده‌های واقعی و نیز دو تحقق مذکور دارد. مشخصات آماری بافت‌نگارهای شکل ۱۱ در جدول ۲ بیان شده است.

شکل ۱۲- الف تا ۱۲- د به ترتیب بافت‌نگار مکعب‌های مقاومت صوتی دو تحقق بررسی شده در شکل

در شکل ۱۱ بافت‌نگار نتایج مدل‌سازی زمین‌آماری و نیز وارون‌سازی لرزه‌ای با بافت‌نگار داده‌های واقعی مقاومت صوتی در محل چاه آزمایش مقایسه شده است. مطابق این شکل، داده‌های واقعی مقاومت صوتی در محل چاه آزمایش، دو خوشه با مقاومت صوتی کم و بیشتر از متوسط را تشکیل می‌دهند. به علت ماهیت تصادفی روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری، تحقق‌های مختلف هر کدام به نحوی بافت‌نگار داده‌های واقعی را بازتولید کرده‌اند. بافت‌نگار میانگین تحقق‌ها نیز به خوبی بافت‌نگار مقاومت صوتی و دو خوشه مقاومت صوتی را بازتولید کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بافت‌نگار میانگین تحقق‌ها نسبت به بافت‌نگار دو تحقق مذکور،



شکل ۱۱. مقایسه بافت‌نگارهای مدل‌سازی زمین‌آماری و وارون‌سازی لرزه‌ای با بافت‌نگار داده‌های واقعی مقاومت صوتی در محل چاه آزمایش. (الف) و (ب) بافت‌نگار مقاومت صوتی مربوط به دو تحقق ذکر شده در شکل ۱۰ (ج) بافت‌نگار میانگین تحقق‌ها (د) بافت‌نگار داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای. بافت‌نگار قرمز متعلق به داده‌های واقعی و بافت‌نگار آبی مربوط به نتایج مدل‌سازی و وارون‌سازی لرزه‌ای است.

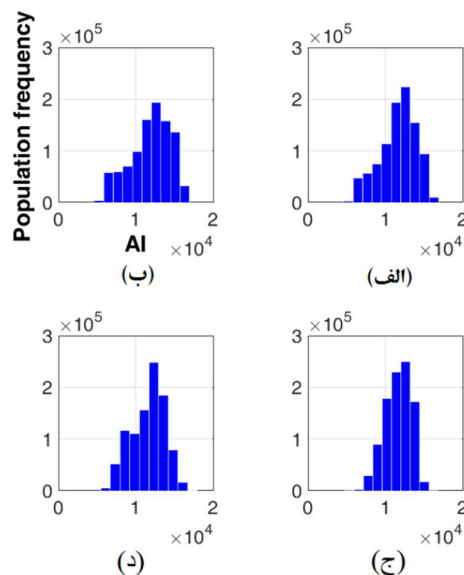
جدول ۲. مشخصات آماری بافت‌نگارهای نمایش داده شده در شکل ۱۱.

نوع داده	میانگین	انحراف معیار	ضریب همبستگی با مقاومت صوتی واقعی
مقاومت صوتی واقعی	$1/1829 \times 10^4$	$2788/2$	٪۱۰۰
مقاومت صوتی تحقق شماره ۱	$1/1615 \times 10^4$	$2873/2$	٪۷۸/۸
مقاومت صوتی تحقق شماره ۲	$1/1347 \times 10^4$	$2392/3$	٪۷۸/۳
مقاومت صوتی میانگین تحقق‌ها	$1/1400 \times 10^4$	$2021/5$	٪۸۲/۹
مقاومت صوتی وارون‌سازی لرزه‌ای	$1/2079 \times 10^4$	$2214/2$	٪۷۳/۸

۸ میانگین تحقق‌ها و داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که بافت‌نگارهای حاصل از مدل‌سازی، شباهت خوبی با بافت‌نگار داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای دارد و تغییرات کمی مقاومت صوتی را به‌خوبی بازتولید کرده است. در جدول ۳، مشخصات آماری بافت‌نگارهای شکل ۱۲ بیان شده است. به علت تعداد کم و نزدیک به هم بودن چاه‌های تحلیل، مقادیر مدل‌سازی شده تحقق‌ها در فواصل بیشتر از دامنه تأثیر

جدول ۳. مشخصات آماری بافت‌نگارهای نمایش داده شده در شکل ۱۲.

نوع داده	میانگین	انحراف معیار
مکعب مقاومت صوتی تحقق شماره ۱	$1/1886 \times 10^4$	$2595/4$
مکعب مقاومت صوتی تحقق شماره ۲	$1/1657 \times 10^4$	$2329/2$
مکعب مقاومت صوتی میانگین تحقق‌ها	$1/1653 \times 10^4$	$1678/4$
مکعب مقاومت صوتی وارون‌سازی لرزه‌ای	$1/1607 \times 10^4$	$2214/2$



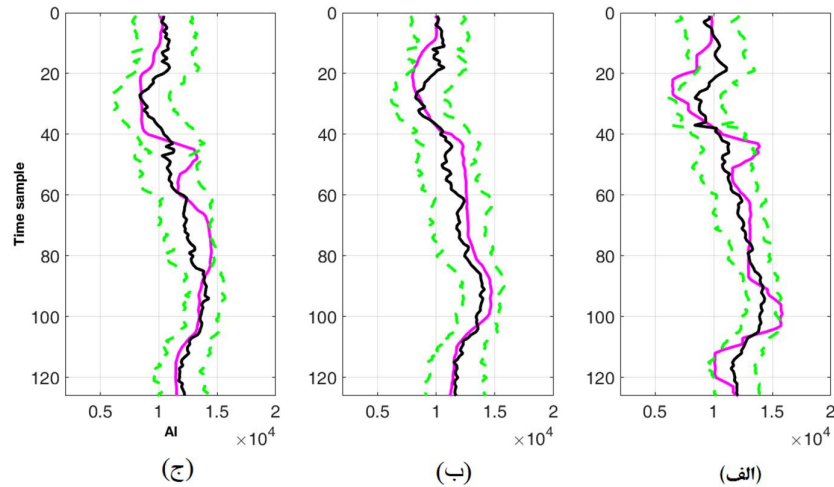
شکل ۱۲. مقایسه بافت‌نگار مکعب‌های مقاومت صوتی حاصل از مدل‌سازی با بافت‌نگار مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای. (الف) و (ب) بافت‌نگار مکعب مقاومت صوتی مربوط به دو تحقق ذکر شده در شکل ۱۰ (ج) بافت‌نگار مکعب مقاومت صوتی میانگین تحقق‌ها (د) بافت‌نگار مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای

سه چاه فرضی در مدل شبکه‌بندی شده استخراج و مقایسه شده است (شکل ۱۳). در این سه محل، میانگین تحقق‌ها روند تغییرات را به خوبی تخمین زده و دنبال کرده است، اما در محل نقاط کمینه و بیشینه تغییرات مقاومت صوتی (مثل لایه ماسه‌سنگی یا برخی از قسمت‌های بخش کربناته) از نمودار وارون‌سازی لرزه‌ای فاصله گرفته است. با توجه به نتایج می‌توان اذعان کرد که مدل‌سازی مقاومت صوتی نمی‌تواند جایگزین حتمی وارون‌سازی لرزه‌ای باشد، اما می‌توان از آن به‌عنوان یک روش اولیه و سریع در تخمین مقاومت صوتی استفاده کرد. در وارون‌سازی لرزه‌ای وجود نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای چه در استخراج موجک و چه در حل معادلات وارون‌سازی تأثیرگذار است و معادلات را ناپایدار می‌کند به گونه‌ای که بسیاری از روش‌های منظم‌سازی جهت حل این مشکل توسعه یافته‌اند. این در حالی است که روش‌های زمین‌آماري پیچیدگی محاسباتی کمتری دارند و کمتر از این مسئله تأثیر می‌پذیرند. نوفه‌های تصادفی بر

واریوگرام افقی، حالت تصادفی‌تری دارند که به نوبه خود باعث افزایش میانگین و انحراف معیار نتایج شده است. همچنین بافت‌نگارهای میانگین تحقق‌ها و وارون‌سازی لرزه‌ای به علت هموارسازی داده‌ها مقدار بیشینه و کمینه نزدیک‌تر به هم و در نتیجه، انحراف معیار کمتری دارند.

۴ بحث

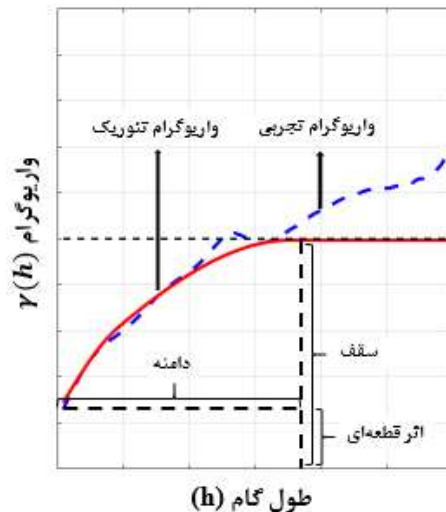
همان‌طور که در شکل ۸-ج و ۸-د مشاهده می‌شود، مکعب میانگین تحقق‌ها همخوانی مناسبی با مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای دارد و روند غالب تغییرات قائم و افقی مقاومت صوتی را بازتولید کرده است. نگاه موشکافانه‌تر به این مکعب‌ها این نکته را آشکار می‌سازد که روش وارون‌سازی لرزه‌ای، دامنه تغییرات عمقی و جانبی عددی بیشتری نسبت به میانگین تحقق‌ها از خود نشان داده است. این موضوع می‌تواند به دلیل تعداد کم چاه‌ها و داده‌های اولیه و همچنین ماهیت میانگین‌گیری باشد. جهت بررسی و مقایسه دقیق‌تر تغییرات عمقی میانگین تحقق‌ها و داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای، نتایج در



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات عمقی میانگین تحقق‌های مقاومت صوتی با داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای در سه چاه فرضی (الف) C_1 (ب) C_2 و (ج) C_3 . نمودارهای مشکی و صورتی به ترتیب مقاومت صوتی میانگین تحقق‌ها و وارون‌سازی لرزه‌ای را نشان می‌دهند. نمودارهای سبز معرف بازه عدم قطعیت پاسخ‌ها هستند.

بیشتر و میزان قطعیت زیادتیر، استفاده از داده‌های لرزه‌ای در روش‌های زمین‌آماري با بهره‌گیری از روش‌های شبیه‌سازی اشتراکی است، استفاده از داده‌های لرزه‌ای در روش TBSim جهت تولید مدل‌های سه‌بعدی مقاومت صوتی و سایر خصوصیات پتروفیزیکی مطلوب خواهد بود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹).

اثر قطعه‌ای و برد واریوگرام تأثیر می‌گذارند، اما اگر این نوفه‌ها شدید نباشند، بر واریوگرام برازش شده اثر چندانی ندارند و نتایج از نوفه تأثیر نمی‌پذیرند. روش‌های مدل‌سازی و از جمله روش TBSim، توانایی استفاده از داده‌های ثانویه و شبیه‌سازی اشتراکی (co-simulation) را نیز دارند. از آنجاکه یکی از راه‌های نیل به نتایج با جزئیات



شکل ۱۴. نمودار یک واریوگرام فرضی همراه با نمایش ویژگی‌های مختلف آن. خط چین آبی، واریوگرام تجربی و خط ممتد قرمز، واریوگرام نظری برازش شده بر آن را نشان می‌دهد.

۵ نتیجه‌گیری

مقایسه نیز حکایت از تطابق بافت‌نگارها داشت. نتایج تحلیل عدم قطعیت تحقق‌های موجود نیز حکایت از قطعیت زیاد نتایج به‌ویژه در نواحی نزدیک به چاه‌ها داشت. با توجه به موارد مطرح‌شده و نتایج امیدوارکننده، استفاده از این روش در مدل‌سازی مقاومت صوتی و سایر پارامترهای پتروفیزیکی مخزنی توصیه می‌شود.

پیوست پ

مروری بر برخی از مباحث پایه زمین‌آمار

در زمین‌آمار، تابعی که ارتباط مکانی بین نقاط را تعیین می‌کند واریوگرام نامیده می‌شود. 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 فاصله h ، عبارت $[Z(x+h) - Z(x)]$ واریانس معینی داشته باشد که به مختصات بستگی نداشته باشد، بلکه تابعی از h باشد. مقدار $\gamma(h)$ را سمی واریوگرام (semi-variogram) می‌نامند که در بسیاری از منابع علمی همان واریوگرام به آن می‌گویند. در این نوشتار نیز منظور از واریوگرام همین است. این مقدار به صورت زیر محاسبه می‌شود (وکرناگل، ۲۰۰۳):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i+h) - Z(x_i))^2 \quad (پ-۱)$$

که $N(h)$ تعداد نقاطی است که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند. در رابطه فوق مقدار فاصله h را طول گام می‌نامند. هر یک از مقادیر محاسبه‌شده واریوگرام به همراه مقدار h آن، نقطه‌ای را در دستگاه مختصات h و $\gamma(h)$ مشخص می‌کند. با برازش یک مدل به این نقاط (واریوگرام تجربی)، منحنی واریوگرام نظری به‌دست می‌آید که ویژگی‌های آن عبارت‌اند از (شکل ۱۴):

(۱) اثر قطعه‌ای: از دیدگاه نظری، مقدار واریوگرام در گام

در این تحقیق مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت صوتی با استفاده از روش TBSim انجام پذیرفت. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل نگارهای مقاومت صوتی هفت چاه از یکی از میدان‌های جنوب غربی ایران است که جهت ارزیابی صحت نتایج، یکی از چاه‌ها با عنوان چاه آزمایش از محاسبات کنار گذاشته شد. پس از ساخت مدل ساختمانی و درشت‌نمایی نگارهای مقاومت صوتی در آن، تعداد ۵۰ تحقق از مقاومت صوتی در مدل شبکه‌بندی‌شده محاسبه شد. مقادیر محاسبه‌شده مقاومت صوتی با مقادیر واقعی و نیز مقادیر حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در محل چاه آزمایش مقایسه و مقدار همبستگی این داده‌ها محاسبه شد. میزان بیشینه همبستگی مقادیر مقاومت صوتی تحقق‌های مختلف در محل چاه آزمایش با مقادیر واقعی برابر با ۷۸/۸ درصد، برای میانگین تحقق‌ها برابر ۸۲/۹ درصد و برای داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای ۷۲/۸ درصد محاسبه شد. همچنین جهت بررسی و مقایسه دقیق‌تر تغییرات عمقی میانگین تحقق‌ها و داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای، نتایج در سه چاه فرضی در نقاط مختلفی از مدل شبکه‌بندی‌شده استخراج و مقایسه شد که نتایج میانگین تحقق‌ها علی‌رغم تعداد کم داده‌های اولیه، همخوانی خوبی با داده‌های وارون‌سازی داشت. بافت‌نگارهای مقاومت صوتی دو تحقق مختلف با میزان بیشینه همبستگی در محل چاه آزمایش و بافت‌نگار میانگین تحقق‌ها در محل چاه آزمایش ترسیم و با بافت‌نگار داده‌های واقعی و بافت‌نگار داده‌های وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه شد. تمامی بافت‌نگارها با بافت‌نگار داده‌های واقعی و وارون‌سازی لرزه‌ای مطابقت داشتند و رفتار آماری آنها را بازتولید کردند. همچنین بافت‌نگارهای مکعب‌های مقاومت صوتی تحقق‌های مذکور و نیز بافت‌نگار مکعب میانگین تحقق‌ها ترسیم و با بافت‌نگار مکعب وارون‌سازی لرزه‌ای مقایسه شدند که این

ناحیه‌ای $Z(x)$ است. جهت سهولت محاسبات، در بسیاری از روش‌های زمین‌آماری از رابطه کوواریانس به جای واریوگرام استفاده می‌شود.

منابع

- خسروتهرانی، خ.، ۱۳۸۹، چینه‌شناسی ایران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، تهران، ایران.
- فرد لزرجانی، س.، کمالی، م. ر.، کدخدایی، ع.، صبحی، ق.، ۱۳۹۵، مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی در یکی از میداین نفتی خلیج فارس: پژوهش نفت، ۸۷، ۸۸-۹۵.
- محمدحسینی، م.، طباطبایی، ه.، عمرانی، م.، توکلی، م.، ۱۳۹۸، مدل‌سازی سه‌بعدی تراکم شکستگی‌ها با استفاده از اطلاعات نشانگرهای لرزه‌ای سه‌بعدی و نمودارهای تصویرگر در یکی از میداین نفتی ایران: اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۶۴، ۴۵-۵۱.
- Abdollahie Fard, I., Braathen, A., Mokhtari, M., and Alavi, S. A., 2006, Interaction of the Zagros fold-thrust belt and the Arabian-type, deep-seated folds in the Abadan plain and the Dezful embayment, SW Iran: *Petroleum Geoscience*, **12**, 347-362.
- Arroyo, D., and Emery, X., 2017, Spectral simulation of vector random fields with stationary Gaussian increments in d-dimensional Euclidean spaces: *Stochastic Environmental Resources Risk Assessment*, **31**, 1583-1592.
- Deutsch, C. V., and Journel, A. G., 1998, *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*: Oxford University Press, New York.
- Doyen, P., 2007, *Seismic Reservoir Characterization: An Earth Modelling Perspective (EEET 2)*: EAGE.
- Dubrule, O., 2003, *Geostatistics for seismic data integration in earth*

صفر ($h=0$) باید به کمترین مقدار خود یعنی صفر تنزل کند، ولی در عمل، واریوگرام‌های واقعی معمولاً از چنین شرطی تبعیت نمی‌کنند. به مقدار واریوگرام در گام صفر، اثر قطعه‌ای گفته می‌شود. مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر و خطاهای نمونه‌برداری موجب پیدایش اثر قطعه‌ای می‌شوند؛

(۲) دامنه: با افزایش فاصله زمانی یا مکانی بین نمونه‌ها، از یک گام خاص به بعد، متغیرهای ناحیه‌ای در نقاط نزدیک به هم، دیگر تأثیر چندانی بر هم ندارند و با افزایش طول گام، مقدار واریوگرام تغییر معنی‌داری نمی‌کند. به این فاصله دامنه یا شعاع تأثیر می‌گویند. بدیهی است که دامنه تأثیر بزرگ‌تر دلالت بر ساختار فضایی گسترده‌تر دارد؛

(۳) سقف واریوگرام: با افزایش h ، مقدار هر واریوگرام از مقادیر کم شروع می‌شود و اغلب به سمت حد ثابتی میل می‌کند. به این مقدار ثابت که تغییرات آن تصادفی است، سقف واریوگرام گفته می‌شود.

هنگامی که شرط پایایی مرتبه دوم در داده‌ها برقرار باشد، رابطه واریوگرام را می‌توان بر اساس تابع کوواریانس نوشت. فرض پایایی مرتبه دوم به این معناست که اولاً امید ریاضی متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ به مختصات بستگی نداشته و برابر با مقدار میانگین $Z(x)$ باشد. ثانیاً کوواریانس متغیر تصادفی در دو نقطه مختلف تنها تابعی از فاصله h دو نقطه باشد. با توجه به شرایط فوق می‌توان نوشت (وکرناگل، ۲۰۰۳):

$$\gamma(h) = C(0) - C(h), \quad (\text{پ-۲})$$

که در رابطه فوق

$$(\text{پ-۳})$$

$$C(h) = E[(Z(x+h) - m)(Z(x) - m)]C(0) =:$$

$$\text{Var}[Z(x)]m = E[Z(x)]$$

که E و Var به ترتیب مین عملگر امید ریاضی واریانس هستند. با توجه به رابطه (پ-۳) مجموع تابع واریوگرام و کوواریانس در هر فاصله h ، ثابت و برابر واریانس متغیر

- models: SEG/EAGE distinguished instructor short course.
- Emery, X., and Lantuéjoul, C., 2006, TBSIM: a computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method: *Computers & Geosciences*, **32**(10), 1615-1628.
- Emery, X., and Silva, D. A., 2009, Conditional co-simulation of continuous and categorical variables for geostatistical applications: *Computers & Geosciences*, **35**(6), 1234-1246.
- Eze, P. N., Madani, N., and Adoko, A. C., 2019, Multi-variate mapping of heavy metals spatial contamination in a Cu-Ni exploration field (Botswana) using turning bands co-simulation algorithm: *Natural Resources Research*, **28**(1), 109-124.
- Francis, A., 2006, Understanding stochastic inversion: part 1, *First Break*, **24**, 69-77.
- Haas, A., and Dubrule, O., 1994, Geostatistical inversion: A sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data: *First Break*, **12**, 561-569.
- Lantuéjoul, C., 2002, *Geostatistical Simulation, Models and Algorithms*: Springer-Verlag, Berlin, 256 p.
- Matheron, G., 1973, The intrinsic random functions and their applications: *Advances in Applied Probability*, **5**, 439-468.
- Nazari Ostad, M., Emami Niri, M., and Darjani, M., 2018, 3D modeling of geomechanical elastic properties in a carbonates and stone reservoir: A comparative study of geostatistical co-simulation methods: *Journal of Geophysics and Engineering*, **15**(4), 1419-1431.
- Nussbaumer, R., Mariethoz, G., Gravey, M., Gloaguen, E., and Holliger, K., 2018, Accelerating sequential Gaussian simulation with a constant path: *Computers & Geosciences*, **112**, 121-132.
- Oldenburg, D.W., Scheuer, T., and Levy, S., 1983, Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms: *Geophysics*, v. **48**, 1318-1337.
- Paravarzar, S., Emery, X., and Madani, N., 2015, Comparing sequential Gaussian and turning bands algorithms for cosimulating grades in multi-element deposits: *Comptes Rendus Geoscience*, **347**, 84-93.
- Pyrzcz, M. J., Gringarten, E., Frykman, P., and Deutsch, C. V., 2006, Representative input parameters for geostatistical simulation, in Coburn, T. C., Yarus, J. M., and Chambers, R. L., eds., *Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies, Volume II: American Association of Petroleum Geologists*, **5**, Tulsa-Oklahoma.
- Sabeti, H., Moradzadeh, A., Doulati Ardejani, F., Azevedo, L., Soares, A., Pereira, P., and Nunes, R., 2017, Geostatistical seismic inversion for non-stationary patterns using direct sequential simulation and co-simulation: *Geophysical Prospecting*, **65**(1), 25-48.
- Sadeghi, M., Amini N., Falahat, R., Sabeti, H., and Madani, N., 2019, 3D Acoustic impedance modeling using turning bands co-simulation and linear multi-attribute transform: 81st EAGE Conference and Exhibition, London.
- Soares, A., Diet, J. D., and Guerreiro, L., 2007, Stochastic inversion with a global perturbation method: *EAGE Petroleum Geostatistics, Cascais, Portugal*, 10-14.

Wackernagel, H., 2003, Multi-Variate Geostatistics: An Introduction with Applications: Springer, Berlin, Heidelberg.

3D Acoustic impedance modeling using turning bands simulation method in an oil field in SW of Iran

Mehdi sadeghi ¹, Navid Amini ^{2*}, Reza Falahat ³, Naser Madani ⁴ and Hamid Sabeti ⁵

¹Ph.D Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Researcher, CoCoLink (Subsidiary of Seoul National University), South Korea

³Assistant Professor, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

⁴Assistant Professor, School of Mining and Geosciences, Nazarbayev University, Nur-Sultan city, Kazakhstan

⁵Assistant professor, Department of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

(Received: 25 October 2020, Accepted: 21 January 2021)

Summary

Petrophysical reservoir properties are usually estimated from elastic properties such as acoustic impedance (AI) using petro-elastic models. AI data are only available at sparse well locations, especially in early exploration stages of oil fields and therefore to quantify the spatial reservoir properties, it is necessary to estimate the AI for the rest of the reservoir area. Alongside the deterministic seismic inversion methods, multi-realization geostatistical simulation approaches can be used for the parameter estimations and uncertainty quantification. Geostatistical simulation methods allow the production of two- or three dimensional models of reservoir properties using existing well log data. Conventionally, sequential Gaussian simulation (SGS) method is used because of its simplicity. However, its accuracy is not always guaranteed. Nowadays, turning bands simulation method (TBSim) has received much attention because of its capability to reproduce the statistical properties of the original data. The main principle behind the TBSim is simplifying a multi-dimensional geostatistical simulation problem into a set of fast 1D simulation problems. The simulations are performed along the uniformly distributed lines spanning a unit sphere using sinusoid functions.

In this study, we are going to generate 3D AI models in an oil field in SW of Iran via the TBSim. We will also compare the results with the AI data computed from seismic inversion. Geostatistical modeling has less computational complexity than seismic inversion. Although AI modeling cannot be used as a definite alternative to seismic inversion, it can be used as a primary method for estimating AI, especially in areas without seismic data. It also has the capability to be involved with some seismic inversion methods known as stochastic seismic inversion methods. The dataset used in this study includes AI logs of seven wells, one of which (known as test well) has been excluded from calculations to check the accuracy of the results. The study reservoir zone includes the Ahwaz sandstone member in the upper part of Asmari formation and also the lower carbonates. The lower carbonates of Asmari formation are separated by an unconformity with Jahrum formation. After constructing the structural model and upscaling the AI logs in it, 50 realizations of AI are generated in the gridded model. The results in the test well indicate a high correlation between the modeled values and real AI data as well as the model obtained by seismic inversion. The maximum correlation of AI values of different realizations with real values in the test well equals to 78.8%. The correlation coefficient achieves to 82.9 % for mean of realizations and is 72.8% for seismic inversion data. The cube of mean of realizations is also in good agreement with the seismic inversion cube and reproduces the dominant trend of vertical and lateral AI variations. Comparison of results histogram with real data as well as the seismic inversion data reveals the capability of geostatistical AI modeling in reproducing the statistical properties of original data. In addition, the results of the uncertainty analysis of produced models also confirm the reliability of these models, especially in the test well. Therefore, we would recommend the TBSim as a powerful method for AI modeling during reservoir characterization.

Keywords: Acoustic impedance modeling, turning bands simulation, geostatistical simulation, variogram

*Corresponding author:

navidamini@cocolink.co.kr