

مدل سازی سه بعدی تخلخل مخزن با استفاده از شبیه سازی توام در یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران

پژوهش نفت

سال بیست و سوم

شماره ۷۶

صفحه، ۱۵۳-۱۳۸ ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۱۸

میثم سلیمی دلشاد^۱، عزت اله کاظم زاده^{۲*}، امید اصغری^۲ و اصغر نادری^۱

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت

۲- دانشگاه تهران، دانشکده معدن

kazemzadehe@ripi.ir

واژه‌های کلیدی: کریجینگ، کوکریجینگ هم مختصات، شبیه سازی گوسی متوالی توأم، اعتبارسنجی متقابل، تخلخل

مقدمه

از آنجایی که امروزه اکتشاف مخازن جدید هیدروکربوری به دلیل ساختار پیچیده مخازن باقی مانده با افزایش هزینه‌ها و ریسک بالاتر صورت می‌گیرد و همچنین به دلیل اهمیت مطالعات اکتشافی در ادامه روند دستیابی به منابع هیدروکربوری، لزوم استفاده از تکنیک‌های پیشرفته و تلفیقی، بیش از پیش درک می‌گردد. تکنیک‌های زمین آماری از جمله تکنیک‌های پیشرفته در زمینه ارزیابی مخزن به شمار می‌رود. ورود روش زمین آمار در عرصه مدل سازی مخازن نفتی، تحولی ایجاد نموده است. افراد بسیاری کاربرد زمین آمار را در مدل سازی مخازن بررسی کرده‌اند. یکی از افرادی که در استفاده از روش زمین آمار برای مدل سازی پیشگام می‌باشد، جرج ماترون است. اساس کار ایشان مدل سازی بر پایه واریوگرام است. مدل‌های بر پایه واریوگرام به دو دسته تقسیم می‌شود [۱].

چکیده

ساخت یک مدل سه بعدی از پارامترهای مخزنی به ویژه تخلخل و تراوایی برای شبیه سازی جریان سیال بسیار حائز اهمیت است. هرچه این مدل به مقادیر واقعی نزدیک تر باشد، شبیه سازی مخزن بهتر انجام می‌گیرد. در این مقاله با استفاده از چهار روش مختلف زمین آماری کریجینگ، کوکریجینگ هم مختصات، شبیه سازی گوسی متوالی و شبیه سازی گوسی متوالی توأم، تخمین و شبیه سازی سه بعدی تخلخل مخزن شده است. در ابتدا از روش کریجینگ و تنها براساس داده های چاه در تخمین استفاده شده است. سپس با استفاده از نشانگر لرزه‌ای مقاومت صوتی به عنوان پارامتر ثانویه در روش کوکریجینگ هم مختصات، اقدام به ساخت مدل سه بعدی می‌شود. در شبیه سازی گوسی متوالی نیز از دو الگوریتم بر پایه روابط کریجینگ و روابط کوکریجینگ هم مختصات استفاده شده است. در نهایت هر یک از روش‌های مذکور اعتبارسنجی گردید که نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل نشان می‌دهد استفاده از داده ثانویه در شبیه سازی بهترین نتایج را به دست می‌دهد.

و تخمین و یا شبیه‌سازی پارامترهای مخزن شده است [۱]. در این مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری، به تخمین مدل سه بعدی از تخریب یکی از مخازن کربناته ایران پرداخته شده است. برای ساخت این مدل استاتیک، از داده‌های چاه به‌عنوان داده اولیه و مقادیر نشان‌گر لرزه‌ای مقاومت صوتی حاصل از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، به عنوان پارامتر ثانویه استفاده شده است.

ناحیه‌بندی مخزنی سازند کربناته مورد مطالعه

این سازند در دامنه جنوبی کوه بنگستان در استان خوزستان واقع شده است. در مقطع، این سازند شامل سه واحد رسوب شناسی با ضخامت کلی ۸۲۲ m می‌باشد. سازند کربناته در محیط کم عمق دریایی رسوب‌گذاری شده است و شامل رسوبات کم عمق دریایی سنومالین است که در جهت خلیج فارس به رسوبات شیلی کم انرژی تغییر می‌یابد. رسوبات حاوی کنگلومرا، برش و آهن بوده و یک ناپیوستگی در قسمت بالایی سازند کربناته وجود دارد که نشان‌گر بالا آمدگی محلی در اواخر تورنین می‌باشد.

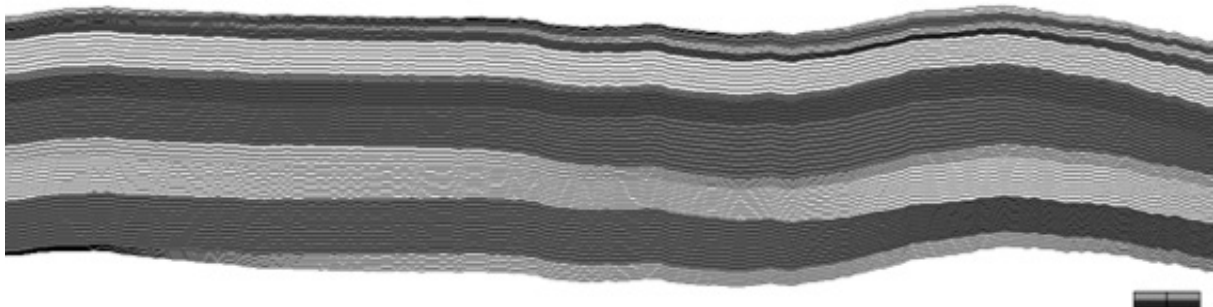
سازند کربناته مورد مطالعه به ۱۲ ناحیه تقسیم بندی شده است. این ۱۲ ناحیه بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی نمودارهای ژئوفیزیکی و اطلاعات تولید که بهترین شواهد برای تعیین مرزهای تمام نواحی سازند کربناته هستند، در ۴ گروه قابل دسته‌بندی است [۲]. شکل ۱ به صورت شماتیک مقطع قائم نواحی ۱۲ گانه را نشان می‌دهد. در این شکل رنگ‌ها صرفاً برای تفکیک نمایشی نواحی بوده که ناحیه یک (S_1) بالاترین و ناحیه دوازده (S_{12}) پایین‌ترین قسمت شکل را تشکیل می‌دهد.

دسته اول، مدل‌های قطعی می‌باشند که روش‌های تخمین نظیر کریجینگ، کریجینگ توام و کریجینگ توام هم‌مختصات را شامل می‌شود. این‌گونه روش‌های تخمین، زمین‌آماری می‌باشند که به ازای هر واریوگرافی، یک مدل به‌دست می‌آید، بدین دلیل روش‌های تخمین، به مدل‌های قطعی منتهی می‌گردد.

دسته دوم، مدل‌های احتمالی نام دارند. اساس این مدل‌ها، روش‌های شبیه‌سازی است. در روش‌های شبیه‌سازی، با یک واریوگرافی چندین مدل به‌دست می‌آید، بدین دلیل از روش‌های شبیه‌سازی، مدل‌های احتمالی حاصل می‌شود. نتیجه مطالعات ماترون به عنوان پایه کارهای افرادی نظیرهان، ایزاک و اسریواستوا، شیلس و دلفینر، ورگاس و یه و دوچ قرار گرفت و به صورت کاربردی‌تر در مطالعات دوچ و ولی و ژیانگ دیده می‌شود.

مدل‌سازی سه بعدی پارامترهای استاتیک مخازن نفتی، از اواسط سال توسط جورنل [۱] به صنعت نفت معرفی شد. از اواسط سال ۱۹۹۰ مدل‌سازی بر پایه شبیه‌سازی در صنعت نفت گسترش یافت. مدل‌های شبیه‌سازی شده ویژگی ناهمسان‌گردی مخازن نفتی را دارا می‌باشند [۱].

از اواسط دهه ۹۰ از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به‌عنوان پارامتر ثانویه در تخمین و شبیه‌سازی پارامترهای مخزن استفاده شد. داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به کمک روش‌های تخمین و یا شبیه‌سازی توام به دست آمد و تا امروز نیز این روش‌ها مدل بهینه‌ای از پارامترهای استاتیک مخزن فراهم می‌سازند. طی ۳۰ سال گذشته توسعه روش‌های زمین‌آماری، همراه با توسعه نرم‌افزارهای گوناگون، سبب تحول در مهندسی مخزن



شکل ۱- مقطع قائم ۱۲ ناحیه تقسیم شده S_1 تا S_{12} (از بالا به پایین) با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی در راستای شرقی-غربی

نواحی مخزنی

رسی و بلور دولومیت تشکیل شده است. درصد کانی‌های رسی و دولومیت کمتر از ۲۰٪ می‌باشد. مرز این ناحیه‌ها را نمی‌توان بر اساس بیواستراتوگرافی تشخیص داد. بهترین نشان‌گرها برای تفکیک این نواحی، نمودارهای ژئوفیزیکی، اطلاعات پتروفیزیکی و لیتواستراتوگرافی هستند [۲]. در جدول شماره ۱ ضخامت میانگین و تخلخل میانگین ۱۲ ناحیه اشاره شده در بالا، آورده شده است.

داده‌های چاه، نشان‌گر لرزه‌ای و وارون‌سازی به روش پایه مدل

داده‌های رقومی شده چاه نگارها

داده‌های چاه‌نگارها به همراه داده‌های لرزه‌ای در مطالعات نفتی، معمولاً به‌عنوان داده اولیه و پارامتر اصلی در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های ۵ چاه و قسمتی از یک داده لرزه‌ای سه بعدی است. در شکل ۲ موقعیت مکانی چاهها را نسبت به موقعیت داده‌های لرزه‌ای نشان داده شده است. در این مطالعه با استفاده از روش آمار چند متغیره، از روی نگارهای نوترون و چگالی، مقدار تخلخل کل به‌دست آمده و از مقادیر تخلخل کلی^۱ حاصل، به عنوان پارامتر چاه در روابط استفاده می‌شود. در شکل ۳ هیستوگرام حاصل از تخلخل کلی چاه‌های منطقه رسم شده است. در شکل ۴ تطابق چاه‌نگارهای مختلف در افق‌های مخزنی نشان داده شده است.

نشان‌گرهای لرزه‌ای

نشان‌گرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از اطلاعات لرزه‌ای هستند که در حوزه زمان و فرکانس، از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند. این اطلاعات پایه‌ای شامل زمان، دامنه، فرکانس و جذب بوده و طبقه‌بندی نشان‌گرها را ممکن می‌سازد.

نواحی S_1 ، S_3 ، S_7 ، S_9 و S_{11} به عنوان نواحی مخزنی شناخته شده‌اند. که دارای ترکیب، پتروگرافی و خصوصیات پتروفیزیکی یکسان هستند. کلسیت مهم‌ترین کانی تشکیل دهنده سنگ مخزن و کانی‌های رسی و بلورهای دولومیت از اجزاء فرعی آن می‌باشند [۲].

نواحی غیر مخزنی

چهار ناحیه S_2 ، S_6 ، S_{10} و S_{12} دارای ترکیب، پتروگرافی و خصوصیات پتروفیزیکی یکسان می‌باشند. سنگ آهک، سنگ آهک آرژیلیک، سنگ آهک شیلی و شیل، اجزای اصلی تشکیل دهنده این نواحی هستند. بنابراین کلسیت (کانی غالب) و رس، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده و دولومیت از اجزاء فرعی آن می‌باشد. بر اساس خصوصیات یک سنگ مخزن، این نواحی قابلیت تولید ندارند و باعث قطع ارتباط تراوایی عمودی در میدان خواهند شد، مگر آن که در نواحی شکستگی وجود داشته باشد [۲].

سازند حد متوسط

ناحیه S_5 توسط دو ناحیه غیر مخزنی S_4 و S_6 به ترتیب از بالا و پایین احاطه می‌شود. سنگ‌شناسی آن شامل سنگ آهک و سنگ آهک آرژیلیک می‌باشد. کانی‌های غالب تشکیل دهنده این لیتولوژی‌ها شامل کلسیت، کانی‌های رسی و بلورهای دولومیت می‌باشد. بر اساس خصوصیات سنگ مخزن، این ناحیه یک سنگ مخزن نسبی است [۲].

ناحیه‌های غیر مخزنی تا مخزنی نسبی

نواحی S_4 و S_8 دو ناحیه غیر مخزنی تا نسبتاً مخزنی در سازند کربناته هستند. S_8 ضخیم‌ترین ناحیه در قسمت میانی سازند کربناته می‌باشد. این ۲ ناحیه عمدتاً از سنگ آهک و سنگ آهک آرژیلیک و از نظر کانی شناسی از کلسیت، کانی‌های

جدول ۱- ضخامت و تخلخل میانگین به‌دست آمده به تفکیک ۱۲ ناحیه موجود با استفاده از داده‌های حاصل از چاه

S_{12}	S_{11}	S_{10}	S_9	S_8	S_7	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1	ویژگی
۶۴/۳۹	۱۱۴/۰۴	۲۵/۹۰	۸۳/۳۹	۱۱۴/۶	۶۷/۶۳	۱۷	۸۳/۶۷	۲۲/۵	۱۷/۱۶	۱۶/۱۷	۶۲/۱۱	ضخامت میانگین (m)
%۰/۰۶	%۱۸/۷	%۵/۴۷	%۲۱/۹	%۹/۵	%۱۷/۱	%۶/۲	%۱۱/۸	%۸/۱	%۲۳/۵	%۴/۵۱	%۱۴/۹	تخلخل میانگین (%)

وارون سازی بر پایه مدل، یکی از روش های وارون سازی داده های لرزه نگاری سه بعدی می باشد. این روش با الگوریتم وارون سازی خطی تعمیم یافته^۲ انجام می شود که در آن مدل اولیه امیدانس صوتی محدوده مورد بررسی را آن قدر تغییر می دهد تا لرزه نگاشت مصنوعی به دست آمده هم خوانی مناسبی با لرزه نگاشت اصلی داشته باشد. هدف از این روش تخمین امیدانس صوتی، بررسی بهتر مخزن از نظر لیتولوژی و تخریب می باشد.

این روش مبتنی بر وارون سازی بر مبنای مدل اولیه^۳ است. این مدل در واقع همان مدل امیدانس صوتی اولیه می باشد و مدل اولیه را آن قدر تغییر می دهند تا هم آمیخت مدل در موجک لرزه ای بهترین انطباق را با لرزه نگاشت واقعی داشته باشد. مدل فرضی اولیه از اطلاعات داده های لرزه نگاری سه بعدی و نگارهای چاه حاصل می شود.

برای محاسبه این مدل ابتدا رابطه بین نگار مقاومت صوتی و لرزه نگاشت در محل چاه ها، محاسبه می شود. سپس این رابطه به کمک درون یابی بر روی تمام لرزه نگاشت ها در محدوده لرزه ای اعمال می شود. به این ترتیب یک مدل اولیه حاصل شده و در مرحله بعد، تغییرات بر روی این مدل اعمال می شود. مراحل وارون سازی به روش پایه مدل، به صورت زیر می باشد.

۱- به دست آوردن موجک لرزه ای

۲- شبکه بندی محدوده مورد نظر و ساخت مدل فرضی اولیه
 ۳- هم آمیخت مدل با موجک لرزه ای جهت حصول لرزه نگاشت مصنوعی و سپس انطباق لرزه نگاشت مصنوعی و لرزه نگاشت واقعی برای به دست آوردن بهترین انطباق.

استخراج موجک لرزه ای

وارون سازی به روش پایه مدل، مانند وارون سازی زمین آماری، نیاز به استخراج موجک لرزه ای دارد. بهترین روش جهت استخراج موجک لرزه ای، استفاده همزمان از داده های چاه نگاری و لرزه نگاری سه بعدی می باشد. از موجک لرزه ای استخراج شده برای ساخت لرزه نگاشت مصنوعی، استفاده می کنند [۳]. شکل ۵ تطابق بین داده های لرزه ای واقعی و نمونه لرزه نگاشت مصنوعی ساخته شده از داده های چاه شماره ۱ و موجک ساخته شده بر اساس روش قطعی رانشان می دهد.

بر اساس مطالعات اخیر، نشانگرهای مشتق شده از زمان شامل اطلاعات ساختمانی، نشانگرهای مشتق شده از دامنه شامل اطلاعات چینه شناسی و مخزنی و نشانگرهای مشتق شده از فرکانس شامل اطلاعاتی در ارتباط با خصوصیات مخزن می باشد و جذب انرژی نشانگر دیگری است که می تواند اطلاعاتی را در ارتباط با سیال و نفوذپذیری ارائه دهد [۳].

یک لرزه نگاشت تحلیلی مانند $F(t)$ شامل یک بخش حقیقی $f(t)$ و یک بخش مختلط $g(t)$ است:

$$F(t) = f(t) + ig(t) \quad (1)$$

بخش حقیقی از داده های لرزه ای و بخش مختلط از تبدیل هیلبرت $f(t)$ به دست می آید [۴].

با استفاده از این تبدیل، تابعی به دست می آید که فقط تابع زمان است و به کمک آن می توان نشانگرهای لحظه ای را محاسبه نمود.

شاید بتوان گفت که مهم ترین نشانگر لرزه ای در بررسی خصوصیات مخزن، نشانگر مقاومت صوتی است. مقاومت صوتی، حاصل ضرب چگالی در سرعت عبور موج از داخل لایه است. این نشانگر معرف سنگ شناسی لایه و نیز تا حدی نشان دهنده سیال مخزنی موجود در لایه ها است. هدف از مطالعات وارون سازی لرزه ای، رسیدن به این نشانگر است. واضح است که سرعت لایه ها متناسب با افزایش عمق و نیز تغییر لیتولوژی، تغییر می کند و لیتولوژی های سخت تر و محکم تر، سرعت انتشار موج را افزایش می دهند. از طرفی افزایش تخریب در مخزن باعث کاهش سرعت انتشار موج و در نتیجه کاهش مقاومت صوتی می شود. تأثیر سیال نیز نقش بسزایی در سرعت موج فشاری در لایه ها دارد، به طوری که حضور سیال باعث کاهش سرعت و چگالی لایه شده و مقاومت صوتی را کاهش می دهد. تأثیر سیال گازی در این مورد بسیار محسوس تر است. بنابراین می توان گفت که مقاومت صوتی، مهم ترین نشانگری است که به خصوصیات مخزنی نظیر تخریب و سنگ شناسی ارتباط دارد. در این تحقیق از این نشانگر به عنوان پارامتر ثانویه در تخمین استفاده می شود [۳].

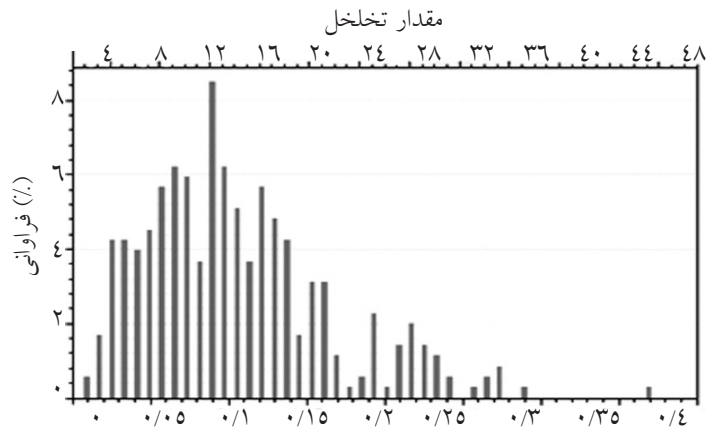
وارون سازی به روش پایه مدل

تجربه نشان می دهد که از بین روش های وارون سازی قطعی^۱

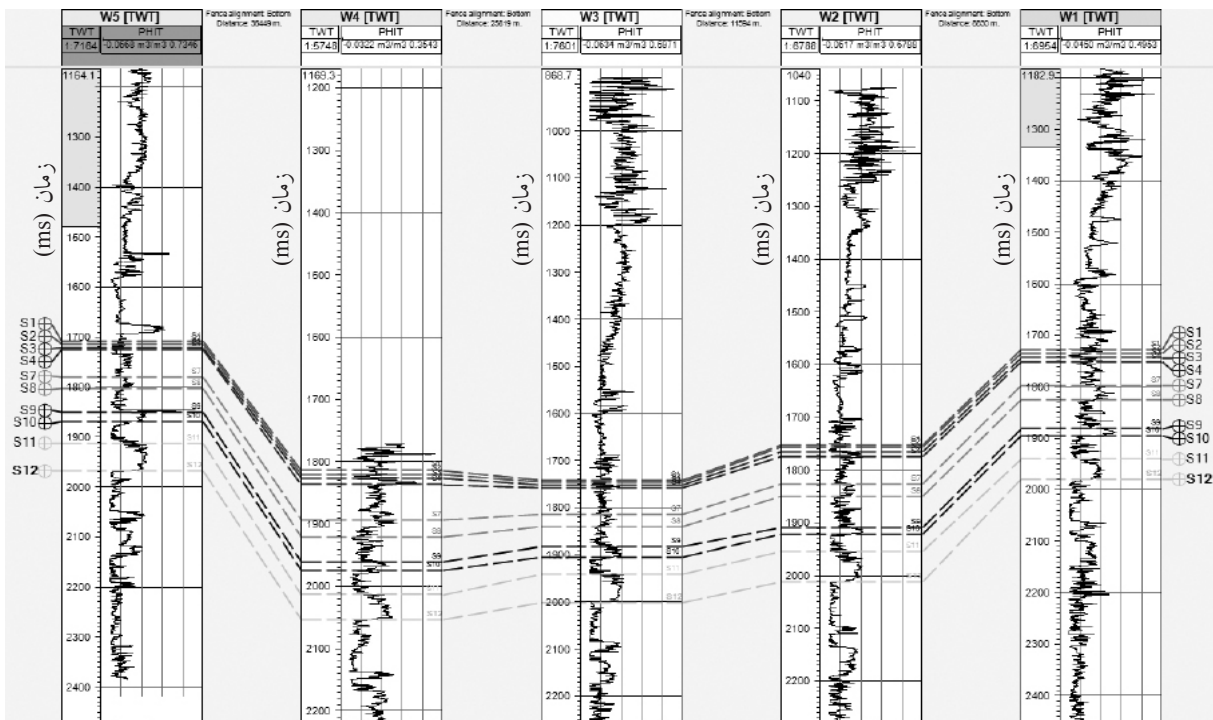
1. Deterministic Inversion Methods
 2. Generalized linear Inversion
 3. Prior Model



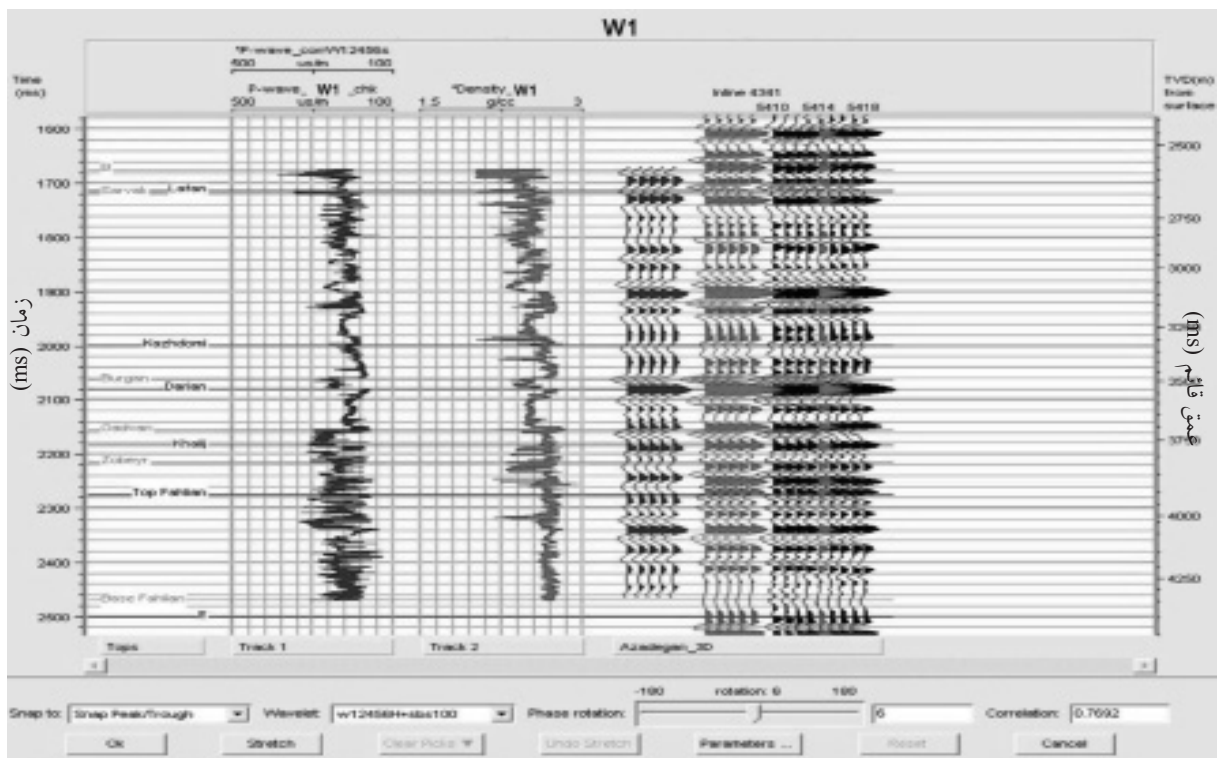
شکل ۲- موقعیت مکانی ۵ چاه و داده لرزه نگاری



شکل ۳- هیستوگرام تخلخل کلی حاصل از داده های چاه



شکل ۴- تطابق عمقی پنج چاه میدان مورد مطالعه در افق های مخزنی



شکل ۵- همبستگی بین لرزه مصنوعی و واقعی در موقعیت چاه ۱ برای موجک ساخته شده براساس روش قطعی

فرآیند وارون سازی، به تدریج تغییر داده می شود تا لرزه نگاشت مصنوعی به دست آمده از این مدل، به همخوانی مناسبی با لرزه نگاشت واقعی برسد. روش های مختلفی برای ساخت مدل اولیه امپدانس صوتی وجود دارد. این روش ها شامل موارد زیر می باشد [۳]:

- ۱- روش عکس مجذور فاصله^۱
- ۲- روش تخمین
- ۳- روش مثلثی^۲

شکل ۶ نمونه ای از مدل فرضی اولیه با استفاده از روش عکس مجذور فاصله را نشان می دهد.

ساخت لرزه نگاشت مصنوعی و حصول بهترین انطباق

مدل فرضی اولیه مانند روش وارون سازی زمین آماری، در موجک لرزه ای هم آمیخت می شود تا لرزه نگاشت مصنوعی به دست آید. سپس با انطباق لرزه نگاشت مصنوعی و لرزه نگاشت واقعی، بهترین انطباق به عنوان مدل امپدانس صوتی محدوده مورد نظر معرفی می شود [۳]. شکل ۷ مدل امپدانس صوتی نهایی حاصل از روش وارون سازی بر پایه مدل را نشان می دهد.

ضریب همبستگی بین داده های لرزه ای واقعی و مصنوعی در جدول شماره ۲ آمده است. همان گونه که مشاهده می شود، داده های لرزه ای مصنوعی ساخته شده همبستگی خوبی با داده های واقعی لرزه ای (غیر از چاه شماره ۵) دارد. علت کم بودن همبستگی در موقعیت چاه ۵ کیفیت بد داده های لرزه ای در این موقعیت است.

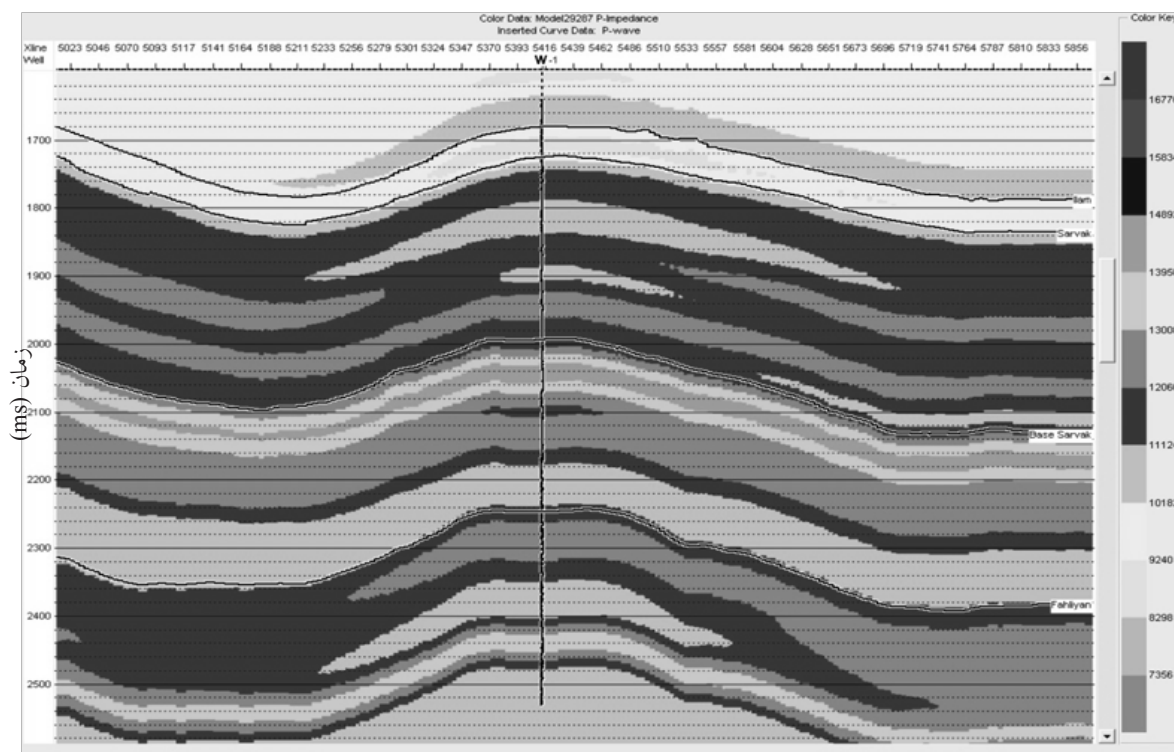
جدول ۲- ضریب همبستگی بین لرزه مصنوعی و واقعی در موقعیت هر چاه

W_5	W_4	W_3	W_2	W_1	
۰/۶۹	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۷	ضریب همبستگی بین لرزه مصنوعی و واقعی

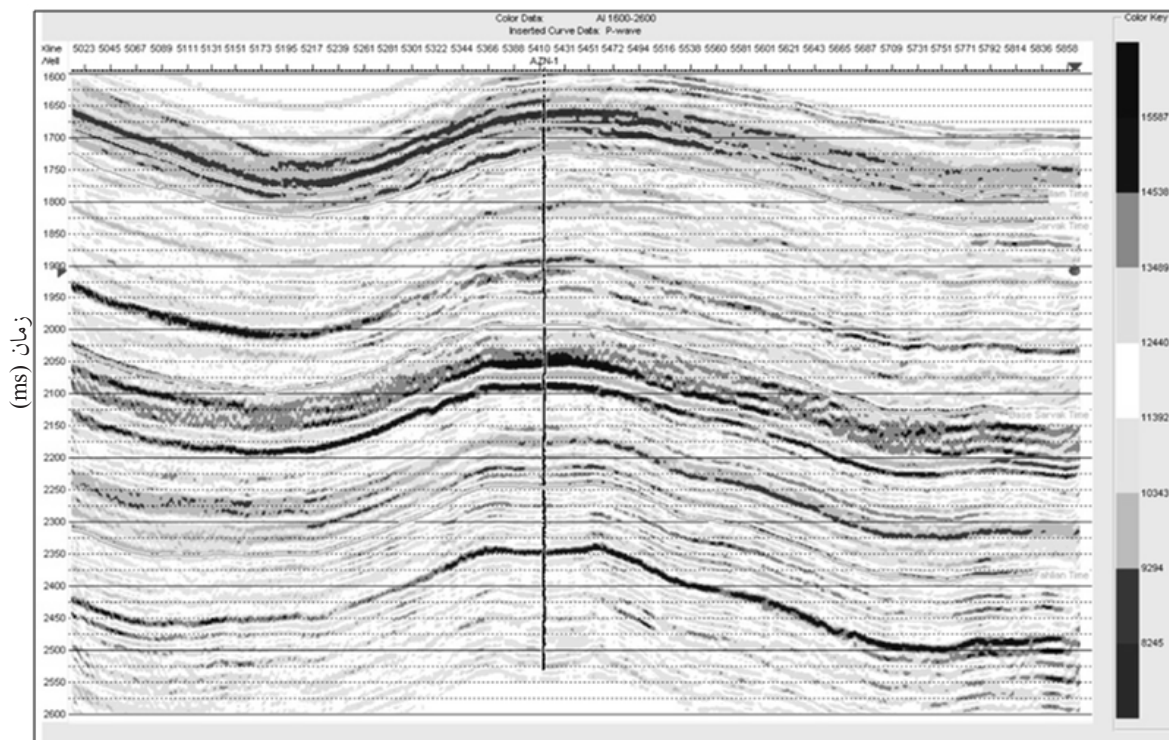
ساخت مدل فرضی اولیه

در این مطالعه از روش وارون سازی بر پایه مدل فرضی اولیه، برای وارون سازی لرزه ای استفاده شده است. مدل فرضی اولیه به طور معمول یک مدل زمین شناسی از مقاومت صوتی است. جهت محاسبه این مدل، ابتدا رابطه بین نگار مقاومت صوتی و لرزه نگاشت واقعی در محل چاه ها به دست می آید. سپس به کمک روش های درون یابی، این رابطه بر روی تمام لرزه نگاشت ها در محدوده لرزه ای اعمال می شود. مدل اولیه در

1. Inverse Distance Power
2. Triangulation



شکل ۶- مدل فرضی اولیه در فرآیند وارون‌سازی بر پایه مدل (محور قائم زمان رفت و برگشت موج بر حسب میلی ثانیه و محور افقی شماره Xline می‌باشد).



شکل ۷- مدل امپدانس صوتی با استفاده از روش وارون‌سازی پایه مدل (محور قائم زمان رفت و برگشت موج بر حسب میلی ثانیه و محور افقی شماره Xline می‌باشد).

$$Z^*_{CCSK}(u_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{z,\alpha} Z(u_\alpha) + \sum_{\mu=1}^{n_{sec}} \lambda_{Y_\mu,0} Y_\mu(u_0) \quad (۳)$$

$$\sigma^2_{CCSK}(u_0) = 1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{z,\alpha} \rho(u_\alpha - u_0) - \sum_{\mu=1}^{n_{sec}} \lambda_{Y_\mu,0} \rho_{Y_\mu,Z} \quad (۴)$$

در این رابطه u_0 موقعیت تخمین و $\lambda_{z,\alpha}$ و $\lambda_{Y_\mu,0}$ به ترتیب وزن‌های مورد استفاده برای داده‌های اولیه و ثانویه می‌باشد. $\rho(u_\alpha - u_0)$ همبستگی فضایی بین داده اولیه و متغیر اولیه در موقعیت تخمین، $\rho_{Y_\mu,Z}$ ضریب همبستگی بین داده اولیه و هر متغیر ثانویه می‌باشد. دو پارامتر α و μ نیز به صورت $\alpha=1, \dots, n$ و $\mu=1, \dots, n_{sec}$ تعریف می‌شوند. داده ثانویه موجود در محل تخمین زده شده و داده اولیه گرفته شده از محل‌های دیگر، در معادله محاسبه $n+n_{sec}$ وزن‌های کوکریجینگ ساده نقطه‌ای در زیر آورده شده است [۶ و ۷]:

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{z,\alpha} \rho(u_\alpha - u_0) + \sum_{\mu=1}^{n_{sec}} \lambda_{Y_\mu,0} \rho_{Y_\mu,Z} (u_\beta - u_0) \quad (۵)$$

$$\rho(u_\beta - u_0), \beta = 1, \dots, n$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{z,\alpha} \rho_{Y_\zeta,Z} (u_\alpha - u_0) + \sum_{\mu=1}^{n_{sec}} \lambda_{Y_\zeta,0} \rho_{Y_\zeta,Y_\mu}$$

$$\rho_{Y_\zeta,Z} (u_\zeta - u_0), \zeta = 1, \dots, n_{sec}$$

$\rho(u_\alpha - u_\beta)$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, n$) همبستگی فضایی بین داده اولیه می‌باشد که به طور مستقیم از روی مقادیر طبیعی واریوگرام (γ_n) محاسبه می‌شود.

$\rho_{Y_\mu,Z} (u_\beta - u_0)$ ($\beta = 1, \dots, n$ و $\mu = 1, \dots, n_{sec}$) همبستگی بین داده اولیه و ثانویه می‌باشد. که از روی مدل مارکوف قابل محاسبه است:

$$p_{Y_\mu,Z}(u_\beta - u_0) = p_{Y_\mu,Z} \cdot p(u_\beta - u_0) \quad (۶)$$

$p_{Y_\mu,Z}$ ($\mu = 1, \dots, n_{sec}$) همبستگی بین داده ثانویه می‌باشد که به طور مستقیم از روی داده ثانویه محاسبه می‌شود [۶ و ۷]. لازم به ذکر است که در این مطالعه، ضریب همبستگی متوسط بین داده‌های چاه و نشان‌گر مقاومت صوتی، $0/6$ می‌باشد که در 12 ناحیه دسته‌بندی شده، متفاوت است. بیشترین ضریب همبستگی مربوط به لایه مخزنی s_{11} با مقدار $0/67$ و کمترین ضریب همبستگی مربوط به لایه s_{12} با ضریب همبستگی $0/17$ می‌باشد. نمودار متقابل بین داده‌های چاه (تخریل) و نشان‌گر مقاومت صوتی در شکل ۸ رسم شده است. این شکل نشان‌دهنده یک ارتباط خطی بین نشان‌گر لرزه‌ای و تخریل می‌باشد.

1. Sequential Gaussian Simulation (SGS)

2. Co-Simulation

3. Collocated Cokriging

روش‌شناسی مدل‌سازی‌های زمین‌آمار

با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، هر سلول موجود در شبکه تخمین مقداردهی می‌شود. مرحله‌ای که در این مطالعه انجام می‌شود به شرح زیر است:

- تخمین مدل سه بعدی از تخریل به وسیله روش کریجینگ و کوکریجینگ هم مختصات
- ساخت مدل سه بعدی از تخریل، با استفاده از شبیه‌سازی گوسی متوالی^۱ و شبیه‌سازی گوسی متوالی^۲ توام
- اعتبار سنجی روش‌های به کارگرفته شده به منظور انجام روش‌های ذکر شده و استفاده از داده‌های چاه و نشان‌گر مقاومت صوتی، واریوگرام داده‌های چاه به‌عنوان متغیر اولیه مورد نیاز است. در ادامه روش‌های مورد بررسی معرفی می‌شوند.

کریجینگ

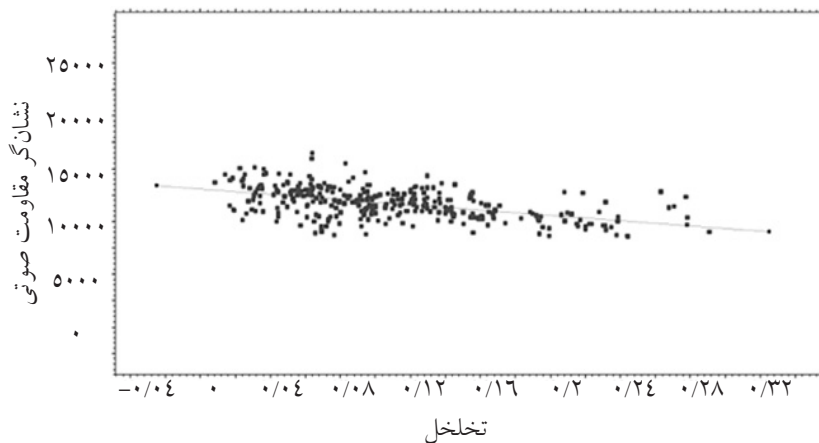
کریجینگ یک روش تخمین می‌باشد که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را، با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم، به‌دست آورد. این روش بر منطق میانگین متحرک وزن دار، استوار است و بهترین تخمین‌گر خطی نااریب محسوب می‌شود [۴]. تخمین‌گر کریجینگ به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$Z^*_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j Z_j \quad (۲)$$

که در آن: Z^*_i مقدار تخمینی، λ_j وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه i ام و Z_j مقدار نمونه i ام می‌باشد [۴].

کوکریجینگ هم مختصات

عمومی‌ترین کوکریجینگ‌های مختلف در زمین‌آمار که در مدل‌سازی مخازن نفتی به کار رفته، کوکریجینگ هم مختصات^۳ است. در این روش معمولاً از متغیر ثانویه‌ای که دارای شبکه برداشت (نمونه‌برداری) منظم بوده و در عین حال همبستگی بالایی با متغیر اولیه دارد، استفاده می‌شود. این روش زمانی به کار می‌رود که داده‌های ثانویه (لرزه‌ای) در تمام نقاط شبکه وجود داشته باشد. مانند زمانی که از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی استفاده می‌شود. به این ترتیب در واقع داده‌های اولیه، در همان نقاطی که داده‌های ثانویه حضور دارند، تخمین زده می‌شوند. دو نشان‌گر کلاسیک کوکریجینگ هم مختصات تخمین‌گر Z^*_{CCSK} و واریانس تخمین σ^2_{CCSK} تحت یک مدل مارکوف [۵] عبارتند از:



شکل ۸- نمودار متقابل بین داده‌های چاه (تخلخل) و نشانگر مقاومت صوتی

شبیه‌سازی گوسی متوالی

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی وجود دارد که هر کدام از آنها مبتنی بر الگوریتم‌های خاصی می‌باشند. از بین تمامی روش‌های شبیه‌سازی، بهترین روش شناخته شده، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی است که از اوایل دهه ۱۹۹۰ برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. این روش به علت کم کردن زمان انجام عملیات و سادگی کاربرد زیادی دارد.

در این روش لازم است داده‌ها نرمال شده و در پایان عکس تبدیل نرمال بر روی نتایج اعمال گردد. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، یک روش شبیه‌سازی تصادفی است که برای داده‌های پیوسته به کار می‌رود. بر اساس داده‌های ورودی مشابه و با تغییر در مسیر شبیه‌سازی سلول‌ها، تعداد زیادی شبیه‌سازی می‌تواند انجام شود.

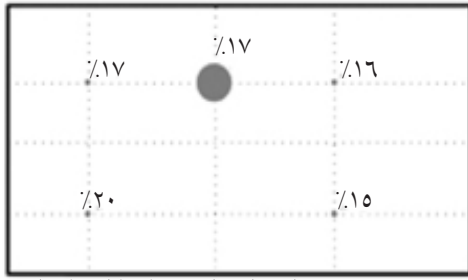
در این روش ابتدا یک شبکه‌بندی انجام شده و داده‌ها در محل صحیح خود قرار می‌گیرند. سپس توسط تولیدکننده عدد تصادفی، یک نقطه انتخاب می‌شود و مقدار کمیت مجهول در آن نقطه، به کمک روش کریجینگ یا کوکریجینگ هم مختصات تخمین زده می‌شود. تخمین در نقطه مورد نظر شامل یک مقدار و یک خطای تخمین استاندارد می‌باشد. حال مقدار تخمین زده شده، در محل شبکه قرار می‌گیرد. در این مرحله مجدداً توسط تولیدکننده عدد تصادفی، یک نقطه جدید از شبکه انتخاب می‌شود و مقدار کمیت، مطابق مراحل قبل در این نقطه تخمین زده می‌شود. شایان ذکر است که نقاط تخمین زده شده قبل نیز در تخمین مقدار نقطه جدید شبکه

به کار می‌رود. پس از اینکه تمام نقاط شبکه با مقادیر پر شد، نقشه کامل می‌شود و می‌توان نقشه جدیدی را آغاز کرد [۸]. به دلیل تفاوت در نحوه انتخاب سلول‌های شبکه در این حالت نسبت به حالت قبل، نقشه جدید با نقشه قبلی متفاوت خواهد بود. برای نمایش نتایج شبیه‌سازی، روش‌های مختلفی وجود دارد. به طور مثال می‌توان نقشه‌ها را به صورت نقشه شاخص نشان داد. این کار به ما امکان می‌دهد که مقادیر نمایش داده شده در یک محدوده مشخص قرار گیرد. در روش دیگر از نقشه‌های شبیه‌سازی شده میانگین‌گیری صورت می‌گیرد که به آن نقشه میانگین یا E-type گفته می‌شود. در شبیه‌سازی اثر هموار شدگی حاصل از تخمین، دیده نمی‌شود. در نتیجه، نقشه حاصل، تمامی تغییرات متغیر موجود در منطقه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، الگوریتم روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، به چهار مرحله تقسیم می‌شود.

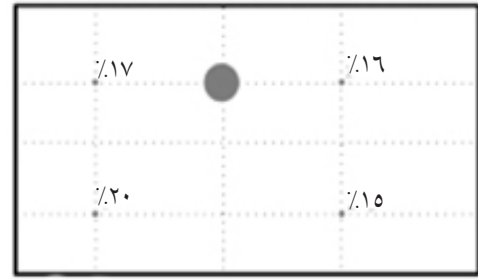
روش شبیه‌سازی در صورت استفاده از داده‌های چاه و معادلات کریجینگ، شبیه‌سازی گوسی متوالی نامیده می‌شود. در صورتی که از روابط کوکریجینگ هم مختصات و داده‌های ثانویه نیز استفاده شود، به آن شبیه‌سازی گوسی متوالی توام گفته می‌شود.

مطالعات زمین آماری بر روی مخزن مورد مطالعه

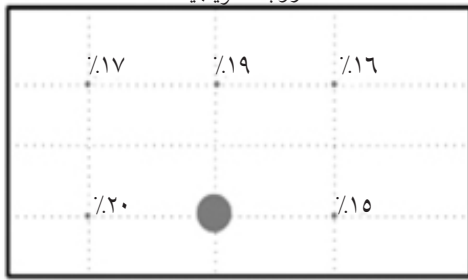
همان‌گونه که گفته شد، تمامی روش‌های ذکر شده بر پایه واریوگرافی است. نتایج واریوگرافی، تحت مدل کروی برای ۱۲ ناحیه دسته بندی شده، در شکل ۱۰ و جدول ۳ ارائه شده است.



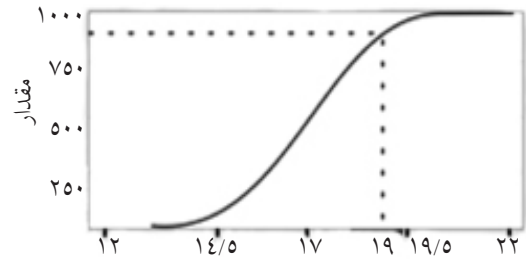
ب- تخمین مقدار و انحراف معیار با استفاده از روابط کریجیج



الف- کشیدن موقعیت تصادفی بین چاه‌ها

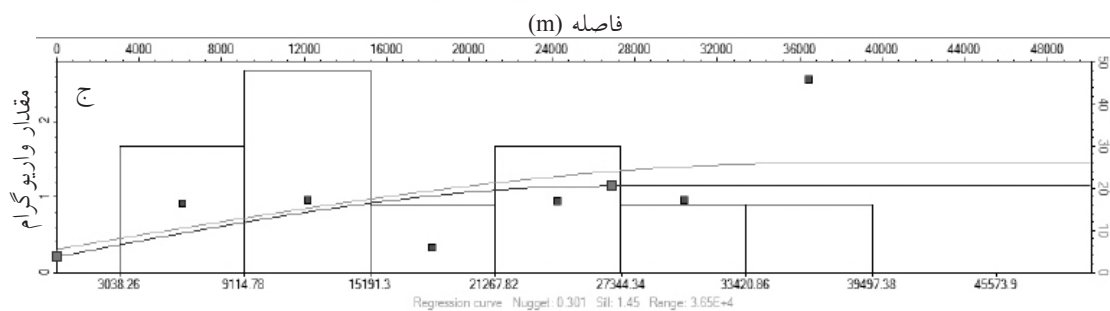
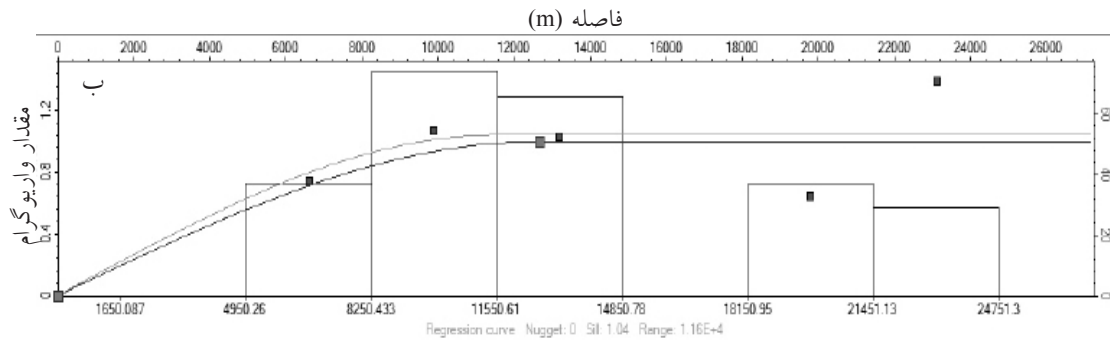
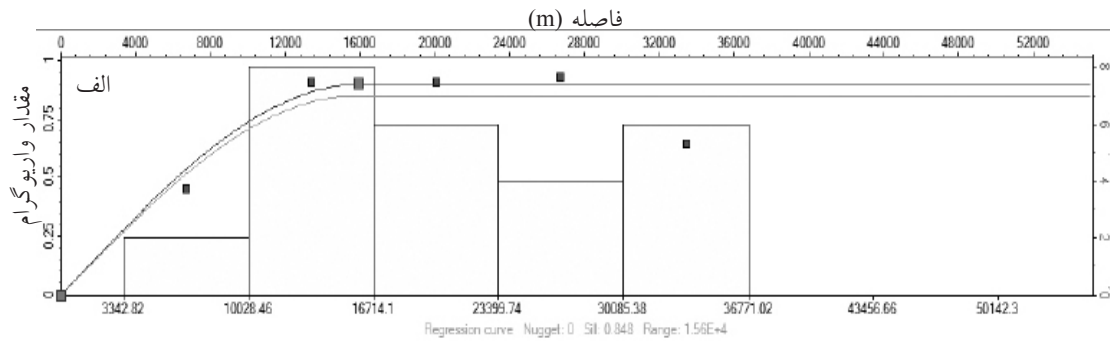


د- ترکیب کردن مقادیر و انحراف معیار به دست آمده انتخاب موقعیت تصادفی جدید



ج- توزیع تجمعی گوسین

شکل ۹- الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی [۸]



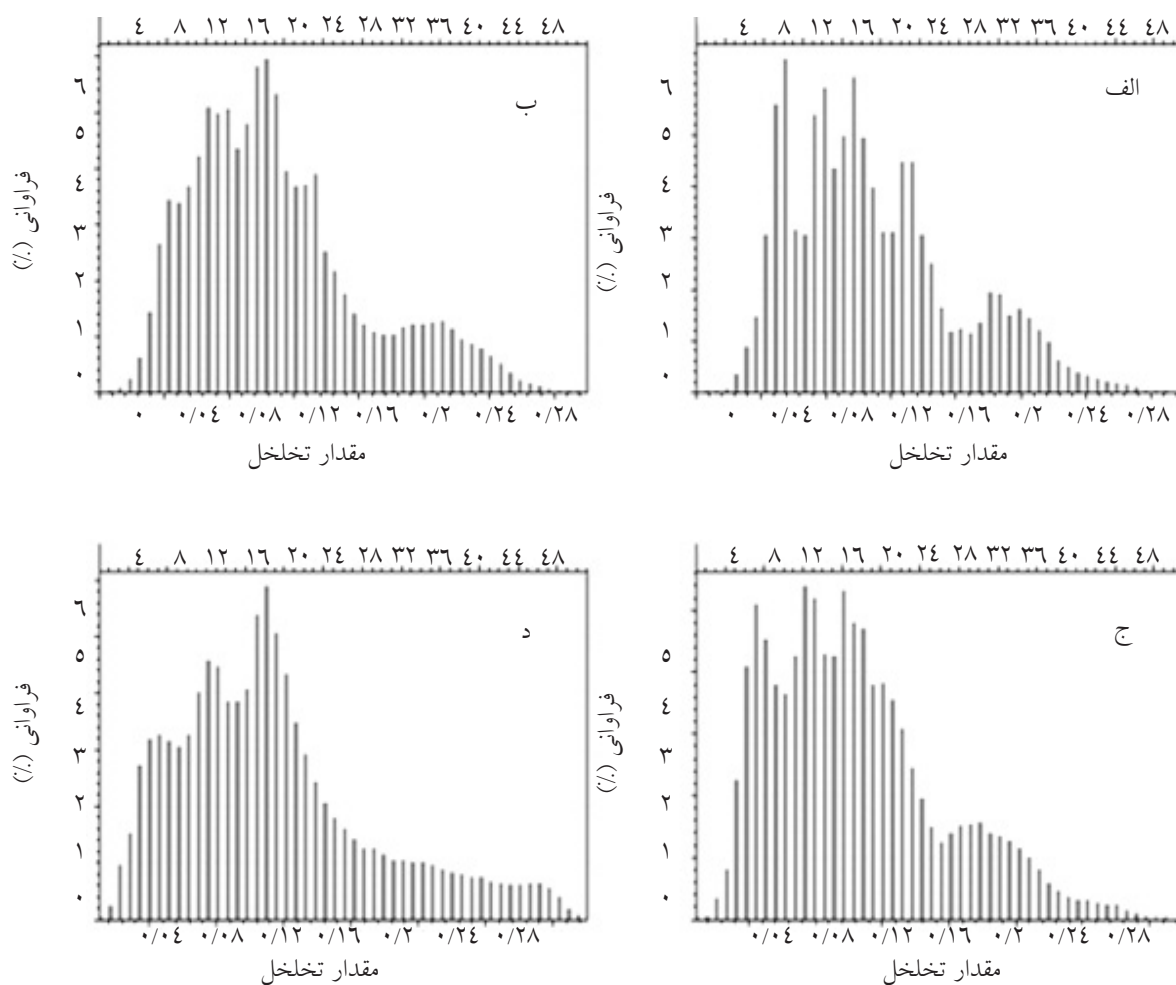
شکل ۱۰- واریوگرام حاصل از داده‌های چاه برای سه افق S_1 (الف)، S_3 (ب)، S_9 (ج)

جدول ۳- نتایج واریوگرافی انجام شده بر روی ۱۲ ناحیه تقسیم شده

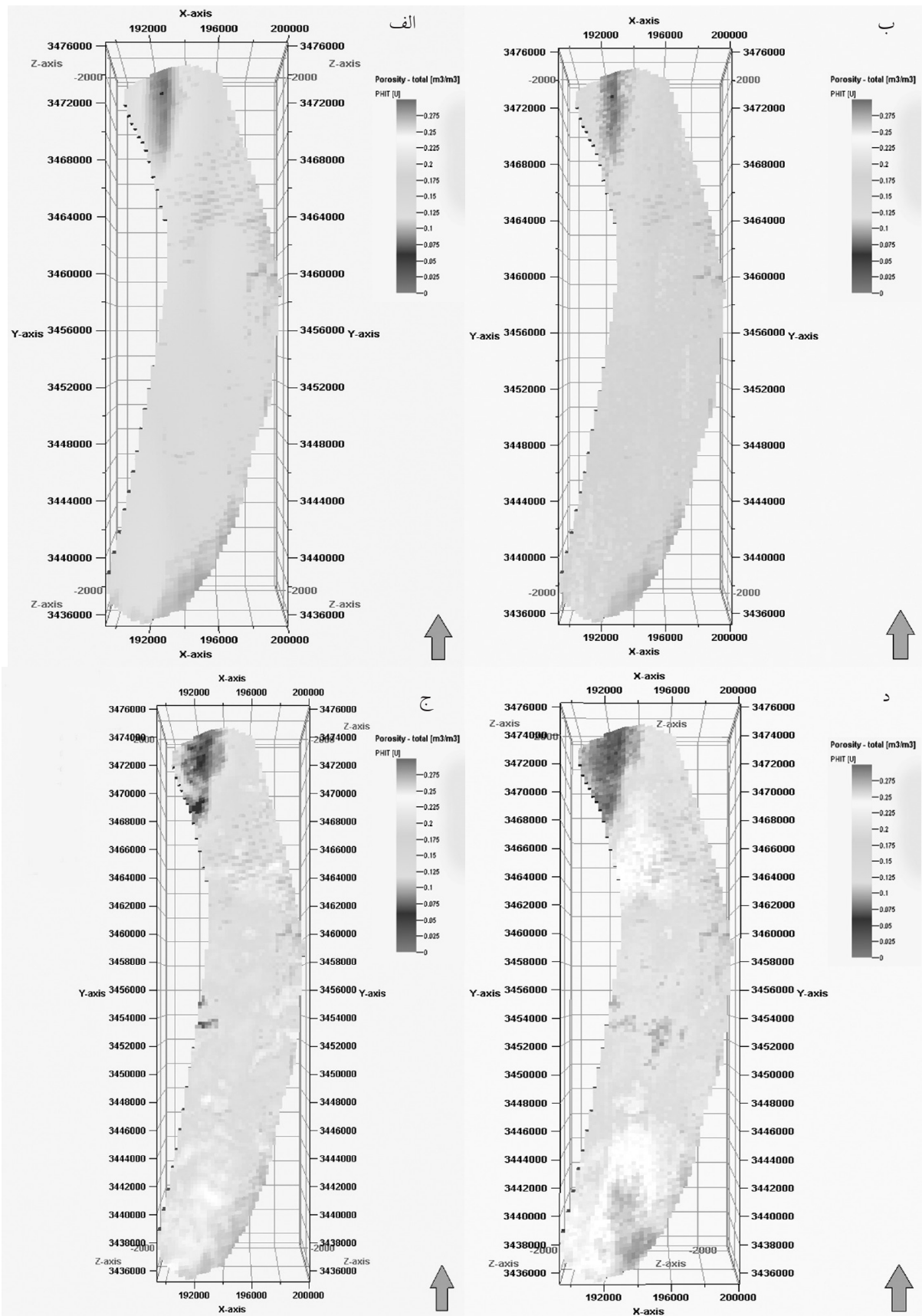
S_{12}	S_{11}	S_{10}	S_9	S_8	S_7	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1	شعاع تأثیر اصلی (m)
۲۷۸۲۷	۲۶۵۵۳	۱۵۵۸۸	۲۶۶۵۵	۱۲۰۰۹	۱۱۲۶۰	۸۳۶۶	۱۲۶۶۵	۳۱۳۶۹	۱۷۰۰۴	۷۰۲۹	۱۸۲۴۶	
۱۲۴۴۸	۱۵۰۶۶	۳۵۳۹	۴۸۸۴	۸۰۰۰	۶۰۵۴	۵۹۹۵	۱۰۸۲۵	۲۴۱۵۳	۱۰۸۳۹	۵۰۶۲	۱۱۸۶۲	شعاع تأثیر (m)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	سقف %
۰/۲۷	۰	۰/۰۹	۰/۲	۰/۱۸	۰/۲	۰/۱	۰	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۲۲	۰	اثر قطعه‌ای %

نتایج حاصل از این ۴ روش در یکی از افق‌های مخزنی (S_9) و همچنین مقطع قائم این مدل‌ها به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. پارامترهای آماری برای هر ۴ روش به تفکیک هر ناحیه از نواحی ۱۲ گانه تهیه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

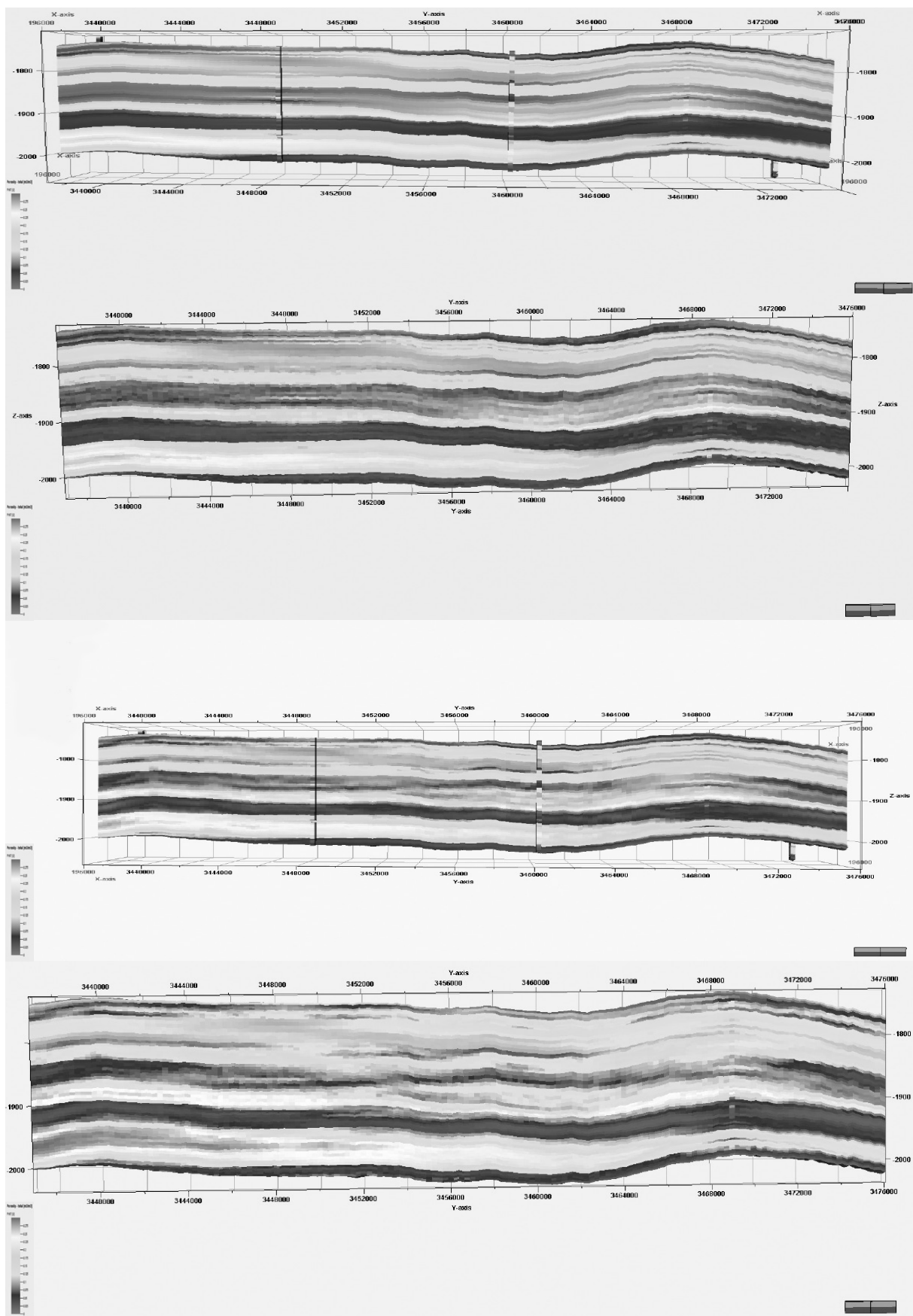
با استفاده از اطلاعات حاصل از واریوگرافی و با توجه به شعاع جستجو، نتایج با استفاده از چهار روش زمین آماری ذکر شده، به دست آمد که هیستوگرام مدل سه بعدی ساخته شده حاصل از این ۴ روش فوق، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- هیستوگرام مدل سه بعدی ساخته شده با استفاده از روش (الف) کریجینگ، (ب) کوکریجینگ هم مختصات، (ج) شبیه‌سازی و (د) شبیه‌سازی توام



شکل ۱۲- تخلخل افق مخزنی S_0 در مدل سه بعدی ساخته شده در راستای شمالی-جنوبی با استفاده از روش (الف) کریجینگ، (ب) شبیه سازی (ج) کوکریجینگ هم مختصات و (د) شبیه سازی توام



شکل ۱۳- مقطع قائم مدل سه بعدی ساخته شده تخلخل در راستای شرقی-غربی با استفاده از روش (الف) کریجینگ، (ب) شبیه‌سازی، (ج) کوکریجینگ هم مختصات و (د) شبیه‌سازی توام

جدول ۴- پارامترهای آماری هر ۴ روش به تفکیک هر ناحیه از نواحی ۱۲ گانه

میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	کواریانس	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	کواریانس
۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۲	S ₁	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۲	S ₁
۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۱	S ₂	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۱	S ₂
۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۲	S ₃	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۳	S ₃
۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۰۲	S ₄	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۰۳	S ₄
۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۱	S ₅	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۱	S ₅
۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۱	S ₆	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۲	S ₆
۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۰۱	S ₇	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۰۲	S ₇
۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۱	S ₈	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۱	S ₈
۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۳	S ₉	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۴	S ₉
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱	S ₁₀	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۲	S ₁₀
۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۲۹	۰/۰۴	S ₁₁	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۲۹	۰/۰۵	S ₁₁
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۳	S ₁₂	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۰۳	S ₁₂
میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	شبیه‌سازی	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	شبیه‌سازی توأم
۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۱	S ₁	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۲	S ₁
۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۱	S ₂	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۲	S ₂
۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۲	S ₃	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۰۳	S ₃
۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۰۲	S ₄	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۰۳	S ₄
۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۱	S ₅	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۰۱	S ₅
۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۱	S ₆	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۰۲	S ₆
۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۰۱	S ₇	۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۰۳	S ₇
۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۱	S ₈	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۰۲	S ₈
۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۳	S ₉	۰/۱۹	۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۰۵	S ₉
۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱	S ₁₀	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۰۳	S ₁₀
۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۲۹	۰/۰۵	S ₁₁	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۰۷	S ₁₁
۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۲	S ₁₂	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۰۲	S ₁₂

اعتبارسنجی متقابل^۱

و با تعدادی از داده‌های باقی‌مانده همسایه تخمین زده می‌شود. هر داده با داده‌ای که یکبار تخمین مجدد زده شده است، جایگزین می‌شود.

اعتبارسنجی متقابل باید به اندازه تخمین واقعی مقادیر نمونه برداری نشده، سخت باشد. برای مثال اگر داده‌ها در امتداد چاه‌ها یا خط‌های تراز شده باشند، لازم است همه داده‌های منشأ از چاه یا خط مشابه، هنگام تخمین مجدد داده حذف شوند تا تخلخل نمونه برداری قابل دسترس در تخمین واقعی انجام شود [5].

برای اعتبارسنجی هر روش در هر مرحله، یکی از چاه‌ها حذف شده و با استفاده از مقادیر چاه‌های دیگر، چاه حذف

در یک مطالعه زمین آماری، مدل‌های ساخته شده وابسته بسیاری وجود دارد که نتایج حاصل از مدل‌های زمین آماری، در تخمین، اعتبارسنجی می‌شود. این کار برای شناسایی اشتباهاتی به کار می‌رود که ممکن است در حین کار به وجود آید. مقادیر تخمینی که از مدل‌های زمین آماری تحت روش‌های مختلف به دست می‌آید، تا حد ممکن باید به نتایج واقعی نزدیک باشد. این روش‌های مختلف، مدل‌های واریوگرام، نوع کواریانس و روش تحقیق را شامل می‌شود. تکنیک‌های تخمین مجدد، در بیشتر آمارهای عملی و کتاب‌های زمین آماری بیان شده است.

در اعتبارسنجی متقابل، داده واقعی یکبار حذف می‌شود

شبیه‌سازی و شبیه‌سازی توام، یک مدل چند تحقیقی^۱ می‌باشد. ناهمسان‌گردی در پارامترهای استاتیک، با کاربرد روش‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. زیرا نتایج حاصل از چند تحقق، درک بهتری از مقادیر واقعی پارامترهای استاتیک مخزن می‌دهد.

- ملاحظه می‌شود که اضافه کردن نشان‌گر مقاومت صوتی به عنوان پارامتر ثانویه در روابط، نتایج را بهبود می‌بخشد. بر اساس نتایج حاصل از اعتبار سنجی متقابل، نتایج کوکریجینگ هم مختصات نسبت به کوریجینگ و همچنین شبیه‌سازی توام نسبت به شبیه‌سازی به طور چشم‌گیری بهبود پیدا کرده است.

- همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، هیستوگرام باز تولید شده به روش شبیه‌سازی توام بیشترین شباهت را به هیستوگرام داده‌های اولیه دارد و اثر هموارشدگی در این روش نسبت به سایر روش‌ها کمتر دیده می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

$F(t)$: لرزه‌نگاشت تحلیلی

$f(t)$: بخش حقیقی لرزه‌نگاشت

$g(t)$: بخش مختلط لرزه‌نگاشت

Z_v^* : مقدار تخمینی

i : وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه i ام

Z_{vi} : مقدار نمونه i ام

u_0 : موقعیت تخمین

ρ_{Y_s, Y_μ} , $S=1, n_{sec}$: همبستگی بین داده ثانویه

$\rho_{Y_\mu, z}$, \dots, n_{sec} و \dots و $\mu=1, \dots, n$: همبستگی بین

داده اولیه و ثانویه

γ_n : واریوگرام

$\lambda_{z,a}$ و $\lambda_{y,u,0}$: وزن‌های به کار برده شده برای داده‌های

اولیه و ثانویه

$p(u_a - u_0)$: همبستگی فضایی بین داده اولیه و متغیر اولیه در

موقعیت تخمین

$\rho_{Y_\mu, z}$: ضریب همبستگی بین داده اولیه (داده چاه) و هر متغیر

ثانویه (نشان‌گرهای لرزه‌ای)

شده تخمین زده می‌شود. نتایج حاصل از اعتبار سنجی روش‌های ذکر شده در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- نتایج اعتبار سنجی (براساس ضریب همبستگی) برای روش‌های مختلف

شماره چاه روش تخمین	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
کوریجینگ	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۸۲	۰/۵۳	۰/۶۴
کوکریجینگ هم مختصات	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۶۲	۰/۵۹
شبیه‌سازی	۰/۶۵	۰/۸	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۶۳
شبیه‌سازی توام	۰/۷۵	۰/۸	۰/۸۶	۰/۶۴	۰/۶۳

نتایج حاصل از اعتبار سنجی نشان می‌دهد که به ترتیب روش شبیه‌سازی گوسی متوالی توام، کوکریجینگ هم مختصات، شبیه‌سازی گوسی متوالی و در نهایت کوریجینگ، بهترین نتایج را خواهد داشت.

همان‌گونه که در اعتبار سنجی مشخص است، نتایج حاصل از چاه‌های شماره ۲ و ۳ بهتر از چاه‌های دیگر می‌باشد. در چاه شماره ۳ مقادیر تخلخل کم است و نشان می‌دهد که به ازای مقادیر کم، نتایج بسیار بهتر است. همچنین چاه ۲ به لحاظ موقعیت جغرافیایی، در وسط ۵ چاه قرار گرفته و داده‌های بیشتری در تخمین آن نقش داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش‌های زمین آماری مختلف، به منظور ساخت مدل تخلخلی قابل اعتماد، استفاده شده است. ۴ روش زمین آماری در این مطالعه به کار گرفته شد که عبارتند از: کوریجینگ، کوکریجینگ هم مختصات، شبیه‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از متغیر ثانویه که شبیه‌سازی توام نامیده می‌شود. ۴ مدل مختلف تخلخل، با به کارگیری روش‌های گفته شده به دست آمد و با استفاده از روش اعتبار سنجی متقابل، اعتبار هر روش محاسبه گردید.

- از کوریجینگ و کوکریجینگ هم مختصات یک مدل قطعی حاصل می‌شود. در حالی که مدل‌های حاصل از

