

استفاده از روش کریجینگ شاخص در مدل سازی مناطق با هرزروی بحرانی در مخزن آسماری یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

کیومرث طاهری^{۱*} و فرهاد محمد تراب^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

۲- معاونت زمین شناسی گسترشی، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲

چکیده

هرزروی سیال حفاری در سازندهای مخزنی در میادین نفتی می تواند باعث هدر رفتن سرمایه و آسیب های جدی به لایه های بهره ده هیدروکربوری گردد. به دلیل وجود هرزروی های شدید در سازندهای مخزنی، ارائه راه حل های پیشگیرانه از این پدیده نا مطلوب، اهمیت ویژه ای دارد. بر این اساس در این تحقیق به بررسی و پیش بینی هرزروی سیال حفاری در مخزن آسماری و مدل سازی مناطق بحرانی هرزروی با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ شاخص در یکی از میادین نفتی جنوب غرب پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا وضعیت توزیع داده های هرزروی در کل مخزن با توجه به اطلاعات ۳۶۳ حلقه چاه حفاری شده در میدان به دست آمده و با استفاده از الگوریتم کریجینگ شاخص و در نظر گرفتن حد آستانه بحرانی برای هرزروی، داده های مذکور بصورت باینری تبدیل و توسط واریوگرافی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، سپس با ساخت یک مدل بلوکی، احتمال وجود هرزروی های بحرانی در کل مخزن به روش کریجینگ شاخص تخمین زده شده است. تخمین های به دست آمده نشان می دهد که هرزروی ها در مخزن آسماری از تغییر پذیری بالایی برخوردار بوده و نقاط بحرانی هرزروی (با هرزروی بالای ۱۰۰ bbl/hr) در بخش شمال غربی در قطاع ۲ و جنوب شرقی میدان در قطاع ۹، به خصوص در زون های عمیق تر پراکنده شده است.

کلمات کلیدی: کریجینگ شاخص، مدل سازی، هرزروی سیال، مخزن آسماری، مدل بلوکی.

مقدمه

انتخاب روش مناسب پهنه بندی^۲ و تهیه نقشه تغییرات هرزروی سیال حفاری در مخزن و سازندهای بهره ده گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع هیدروکربوری مناطق مختلف به شمار می رود [۱].

یکی از راه هایی کاهش هزینه های ناشی از هرزروی سیال حفاری، پیش بینی مناطق دارای هرزروی و نواحی که احتمال هرزروی^۱ در آن بیشتر است.

1. Probability Lost
2. Zonation

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی kio.taheri@stu.yazd.ac.ir

برنامه اسیدزنی و شکاف هیدرولیکی، تا حد زیادی به بازگشت شاخص تولید^۱ چاه‌های آن کمک شده بود [۶]. محققان برای بررسی تغییرات مکانی غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی منطقه‌ای در جنوب شرقی میشیگان از روش کریجینگ شاخص استفاده کردند [۷]. جهت تعیین خطر آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی سطحی دشت شمالی چین از روش کریجینگ شاخص استفاده شده است [۸]. به منظور ارزیابی چندین پارامتر هیدروشیمیایی برای سه استاندارد کیفیت آب در تایوان از روش کریجینگ شاخص چند متغیره استفاده شد و پارامترهای هیدروشیمیایی آب زیرزمینی را به چهار دسته اصلی خطر شوری، خطر نیتروژن، خطر آرسنیک و خطر آهن منگنز تقسیم‌بندی کردند [۹]. برای تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی و ارزیابی خطر آلودگی منابع آب زیر زمینی در دشت نجف گاره هندوستان از روش‌های زمین آماری استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ شاخص برای ارزیابی خطر ابتلا به آلودگی آب‌های زیرزمینی مناسب است [۱۰]. در معدن سنگ آهن سه چاهون در استان یزد از روش کریجینگ شاخص چند گانه در تعیین دقیق مرز کانی‌سازی آهن استفاده شد [۱۱]. به منظور تهیه مدل سه بعدی پتروفیزیکی مخزن نفتی از روش‌های زمین آماری برای تخمین پارامترهای مورد بررسی در کل مخزن استفاده شد که در آن مطالعه نمودارهای پتروفیزیکی در مدل سه بعدی ارائه شد [۱۲]. هدف از این پژوهش مدل‌سازی هرزروی و تعیین مناطق بحرانی هرزروی در مخزن آسماری میدان مورد مطالعه است.

در این مطالعه با مشخص کردن بخش‌های با هرزروی بالا، می‌توان تدابیری برای استفاده از وزن گل مناسب و افزاینده‌های ضد هرزروی جهت جلوگیری

بدین منظور استفاده از روش‌های زمین آماری بهترین گزینه خواهد بود و مدل‌های سه بعدی زمین‌شناسی نقش مهمی در مهندسی نفت دارند. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی سه بعدی وجود دارد، که در هر یک از این روش‌ها از اطلاعات زمین‌شناسی، ریاضیات و آمار استفاده می‌شود [۲]. روش‌های زمین آماری برای توصیف ناهمگنی در مخازن به کار می‌رود و به‌طور کلی زمین آماری مطالعه پدیده‌هایی است که در مکان و زمان تغییر می‌کنند [۳]. تاکنون پژوهش‌های اندکی راجع به استفاده از روش کریجینگ شاخص^۱ برای بررسی هرزروی سیال حفاری در دنیا انجام گرفته است. با انجام سه مورد مطالعه میدانی بر روی چاه‌ها در مناطق خشکی در آمریکا، نشان داده شد که هرزروی‌های شدید در حین حفاری چاه‌ها با عمق نفوذهای بسیار زیاد در بخش‌های مختلف مخزن موجب گیر کردن رشته حفاری و آسیب‌های جدی به مخزن شده بود. با بررسی‌های انجام شده سیال حفاری کم آسیب‌زنده‌ای جهت جلوگیری از هرزروی تهیه شد، که بازگشت تراوایی^۲ بالای ۹۵٪ داشته‌اند [۴]. با مطالعه بر روی مغزه‌های چند چاه تولیدی در میدان تاریم واقع در کشور چین، مشخص شد که بر اثر هرزروی سیال حفاری و نفوذهای شدید سیال به درون سازند موجب شکستگی‌های القایی^۳ و انسداد آبی در مخزن شده و کاهش دبی و تولید چاه‌ها را به دنبال داشته است. با تهیه سیال کم آسیب‌زنده‌ای به نام میکس‌متال هیدروکسید^۴ که سازگاری زیادی با سازند دارد، توانسته بودند هرزروی در چاه‌های جدید را تا حد زیادی کنترل و بازگشت تراوایی در آنها را به ۸۵٪ برسانند [۵]. در میدان نفتی اریدو واقع در ایالت ادو نیجریه مطالعه‌ای بر روی چاه‌های این میدان صورت گرفت و باتوجه به هرزروی‌های اتفاق افتاده در این چاه‌ها در حین حفاری و عملیات تکمیل باعث آسیب دیدگی^۵ شدید مخزن و کاهش شاخص تولید آن شده بود که با پیشنهاد

1. Indicator Kriging
2. Return Permeability
3. Induction Fracture
4. Mix Metal Hydroxide
5. Formation Damage
6. Productivity Index

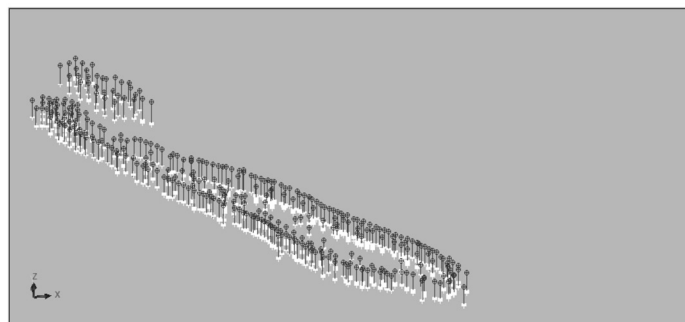
افتادگی دزفول جنوبی قرار گرفته است [۱۳]. میدان مورد مطالعه در جهت عمومی شمال غربی، جنوب شرقی طاقدیس‌های میادین نفتی جنوب ایران واقع شده است. عمده تولید نفت، از سازند آسماری این میدان صورت می‌گیرد که عمدتاً از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است. میانگین تخلخل مخازن این میدان حدود ۳۰٪ بوده، که با افزایش عمق کاهش می‌یابد. تاکنون ۳۹۵ حلقه چاه در این میدان حفاری شده است و در این مطالعه از اطلاعات هرزروی و وزن گل موجود در آنها استفاده شده است (شکل ۱).

ضخامت متوسط حفاری شده سازند کربناته آسماری ۵۲۰ m است، که از طرف شمال غرب به سمت جنوب شرق روند کاهشی دارد و حداقل به ۲۸۰ m می‌رسد. اطلاعات تولیدی چاه‌ها نشان می‌دهد که با توجه به گازدهی و آبدهی چاه‌ها، نیاز به عملیات تعمیر در آنها گسترش یافته است [۱۴]. این مخزن دارای ۴ زون اصلی A، B، C و D می‌باشد، که زون A خود به دو بخش A_1 و A_2 و زون B به پنج بخش B_1 ، B_2 ، B_3 ، B_4 و B_5 و زون C به دو بخش C_1 و C_2 و D به دو بخش D_1 و D_2 تقسیم می‌شود [۱۴]. برآوردهای اولیه نشان می‌دهد که زون B_2 بیشترین سهم (حدود ۲۰٪) نفت درجا^۳ و پس از آن زون‌های C_2 با ۱۳٪، A_1 با ۱۵٪ و B_4 به میزان ۱۶٪ از حجم نفت درجا را به خود اختصاص داده‌اند.

از هرزروی سیال و در نتیجه کاهش آسیب به مخزن دست یافت، همچنین می‌توان نقاط بهینه حفاری را با کمترین میزان هرزروی، جهت توسعه میدان تعیین کرد. با تهیه مدل بلوکی مخزن آسماری و پارامترهای کمی هرزروی با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده مربوط به هرزروی در مخزن آسماری، به منظور ارزیابی ریسک هرزروی انواع سیالات حفاری، با رسم نقشه‌های احتمال، از روش کریجینگ شاخص استفاده شده و براساس این نقشه‌ها مناطق با ریسک هرزروی بالا تعیین شده است. با تعیین مناطق دارای هرزروی‌های شدید (بالای ۱۰۰ bb/hr) و با استناد به آنها، حتی‌الامکان از حفاری مناطق بحرانی خودداری کرده تا از هدر رفت سرمایه جلوگیری به عمل آید.

معرفی میدان مورد مطالعه

در ناحیه فروفادگی دزفول^۱ حدود ۴۵ میدان عظیم نفتی وجود دارد که غالب این مخازن با پوشش گازی^۲ همراه است و میدان مورد مطالعه جزو میادین خیلی بزرگ با ذخیره نفت درجای بیش از یک میلیارد بشکه می‌باشد. میدان مورد بررسی یکی از بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین میادین کربناته جنوب غرب است و ساختمان این میدان برروی افق آسماری تاقدیسی کشیده و نامتقارن به طول ۶۳ km و عرض متغیر بین ۶ تا ۱۲ km است که در فرو



شکل ۱ موقعیت قرارگیری چاه‌های حفاری شده و کامپوزیت میزان هرزروی آنها در مخزن آسماری میدان مورد مطالعه.

1. Dezful Embayment Dezful
2. Gas Cap
3. Oil in Place (OIP)

عوامل مختلف، در اختیار کاربر قرار دهد. بنابراین روش کریجینگ شاخص می‌تواند، خطر هرزروی توسط عوامل مختلف، بیش از حداکثر مقدار مجاز به درون سازند مورد ارزیابی قرار دهد و برای توسعه استراتژی مدیریت علمی هرزروی در منطقه مورد مطالعه مفید باشد.

ساخت بانک اطلاعاتی

برای تهیه مدل بلوکی هرزروی و ویژگی‌های مورد نظر که نیاز بوده در مدل اعمال شود، از قبیل مختصات جغرافیایی چاه‌ها، میزان هرزروی، عمق هرزروی و وزن گل، به صورت داده در نرم‌افزار اکسل در چهار فرمت با نام‌های Lost، Collar، Zone و Survey برای ورود داده‌ها به نرم‌افزار Surpac انجام شده است. لازم به ذکر است فایل‌های تهیه شده، بازه‌های عمقی یازده زون آسماری را در بر می‌گیرد. در این مرحله از گزارشات حفاری و زمین‌شناسی، گزارش نهایی حفاری، اطلاعات مهندسی مخازن، اطلاعات CDR مربوط به حفاری و انحراف چاه‌ها، آزمایش چاه^۳، نقشه‌ها و مدل سه بعدی استاتیک میدان مورد استفاده قرار گرفته است. در فایل Lost نیز وزن گل و میزان هرزروی برحسب bbl/hr نیز قرار دارد، که در این فرآیند چهار سری داده تهیه و به فرمت CSV تبدیل شده است. در فرآیند استخراج داده‌های مختصات چاه‌ها^۴ نیاز بود مختصات یو تی ام شرق و شمال سر چاه^۵ برای تمامی مخزن آسماری به دست آید. این فرآیند برای ۳۶۳ حلقه چاه موجود در مدل بلوکی به دست آمد. مختصات حاصل شده برای ۳۶۳ حلقه چاه در تمام بازه‌های عمقی یکسان بوده و فقط مقدار آن برای چاه‌های انحرافی و افقی تغییر می‌کند، که با توجه به میزان انحراف آنها و حرکت آنها در جهت افق، مختصات شرق و شمال عمقی آنها نیز تغییر می‌کند.

سایر زون‌ها شامل C_1 ، B_3 ، B_3 ، A_2 و B_1 هر یک با سهم بین ۹ تا ۳/۶٪ در رده بعدی قرار دارند و زون‌های D_1 و D_2 مجموعاً حدود ۳٪ هیدروکربور را ذخیره کرده‌اند [۱۴]. با مطالعه و بررسی هرزروی و چگونگی انتشار آن در هر نقطه از مخزن، می‌توان در بهره‌برداری بهینه از مخزن نقش عمده‌ای داشته و برنامه‌ریزی‌های توسعه میادین را در بخش‌های عملیات حفاری، مهندسی مخزن و ازدیاد برداشت از مخازن کنترل نماید [۱۵].

روش مطالعه

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی مناطق بحرانی هرزروی از روش زمین آماری کریجینگ شاخص استفاده شده است. برخلاف روش‌های دیگر کریجینگ همچون کریجینگ معمولی یا لاگ کریجینگ، روش کریجینگ شاخص ضمن آنکه نسبت به داده‌های خارج از ردیف حساس نمی‌باشد، نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها نیز ندارد. در تخمین به روش کریجینگ شاخص، آنچه که سنجیده می‌شود، احتمال گذر هرزروی یک بلوک از یک یا چند هرزروی حد متوالی می‌باشد. با این اوصاف، کریجینگ شاخص قابلیت فائق آمدن بر هر دو مسئله پارامتری بودن و اثر هموارسازی کریجینگ معمولی را دارد. تخمین‌گر زمین آماری^۱ کریجینگ شاخص (IK) نه تنها مستقل از شیوه توزیع داده‌هاست، بلکه قادر به مدل کردن میزان قطعی نبودن تخمین نیز است. در این مطالعه کاربرد IK برای تخمین ارزیابی مقدار هرزروی سیال حفاری استفاده شده است. نقشه‌های احتمال هرزروی برای حدود آستانه^۲ ۱۰۰ bbl/hr با استفاده از IK تهیه شده است. در این تحقیق داده‌های هرزروی مربوط به ۳۶۳ حلقه چاه حفاری شده در مخزن آسماری مورد بررسی قرار گرفته است. از سوی دیگر، استفاده مناسب از روش کریجینگ شاخص می‌تواند پتانسیل حجم‌های مختلف هرزروی‌ها را در منطقه به تصویر بکشد و اطلاعات مفیدی را در مورد احتمال هرزروی توسط

1. Geostatistical Estimator

2. Threshold Limits

3. Well Test

4. Wells Coordinates

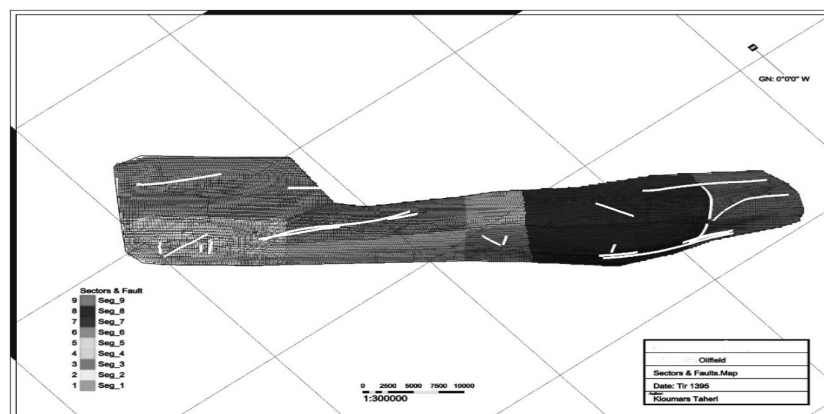
5. Wellhead East(X) & North(Y) UTM

برحسب بشکه بر ساعت و وزن گل حفاری مورد استفاده در هر یک از چاه‌ها بر حسب pcf^3 استخراج شد. برخی از چاه‌ها به دلیل قدیمی بودن و عدم دسترسی به سازند آسماری، فاقد اطلاعات هرزروی و وزن گل بودند و لذا به جای مقادیر هرزروی یا وزن گل برای این قبیل چاه‌ها، عدد ۹۹۹- قرار داده شد. در این حالت نرم‌افزار عدد ۹۹۹- را نامشخص فرض می‌کند.

بررسی توزیع هرزروی و وزن گل و ارتباط آنها

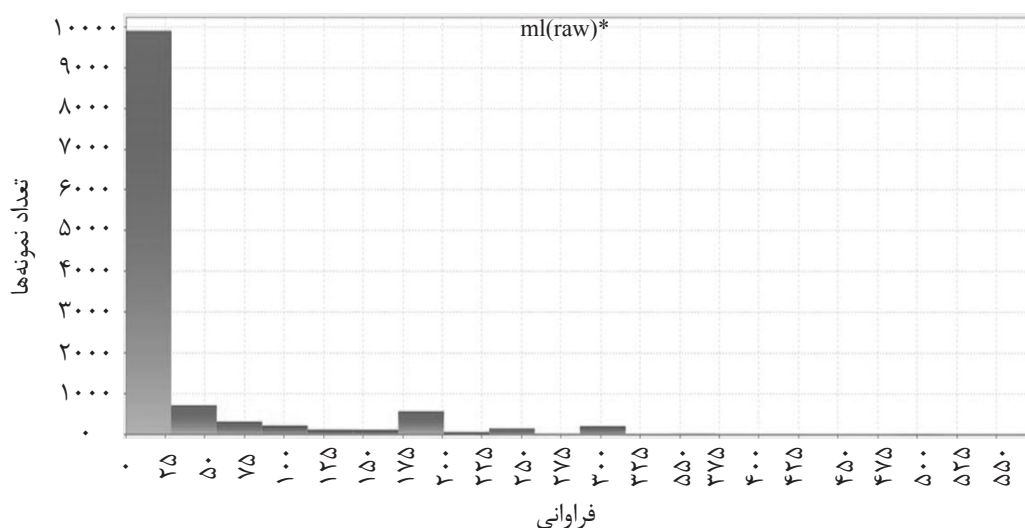
در فرآیند بررسی داده‌های هرزروی و شناسایی محدوده میزان هرزروی‌ها برحسب بشکه بر ساعت، اقدام به رسم نمودار فراوانی داده‌های هرزروی شده است. همان‌گونه که مشخص شده است تعداد داده‌های با هرزروی صفر زیاد بوده است که منجر به غیر نرمال بودن نمودار فراوانی هرزروی شده است. در این نمودار داده‌های هرزروی دارای مقادیری بین ۰ تا 450 bbl/hr هرزروی می‌باشند، که نشان دهنده تغییر پذیری بسیار زیاد داده‌های هرزروی است (شکل ۳). در بخش‌های مختلف میدان، حجم هرزروی‌های رخ داده بسیار متفاوت بوده و در مقایسه میزان هرزروی در یک چاه نسبت به چاه مجاور، تغییرات شدیدی دیده می‌شود که باعث شده تا اهمیت مطالعات هرزروی در این میدان را دو چندان کند.

برای شناسایی موقعیت چاه‌های حفاری شده در میدان (شکل ۱) ارائه شده است و مشاهده می‌شود موقعیت قرارگیری چاه‌ها بر روی یال‌های شمالی، جنوبی و بخش لیشر میدان و موقعیت قرارگیری آنها حاوی کامپوزیت میزان هرزروی نمایش داده شده است. برای تهیه مدل بلوکی مناسب از نقشه پهنه‌بندی (شکل ۲) میدان استفاده شد. در این مطالعه قطاع‌بندی^۱ و خط اثر گسل‌ها در مخزن آسماری توسط نرم‌افزار RMS مدل شده است، تا در بخش‌های بعدی از آن استفاده گردد. در فرآیند استخراج داده‌های میزان هرزروی و وزن گل باید فقط به هرزروی‌های در حین حفاری توجه گردد. عمق هرزروی^۲، میزان وزن گل، فواصل عمقی حفاری شده، میزان هرزروی سیال در حین حفاری برحسب bbl/hr ، میزان هرزروی انباشتی در سازند طی یک روز و مجموع ساعات حفاری شده در همین مدت، مواردی هستند که از گزارش‌ها برداشت و ثبت شده است. با داشتن جدول زون‌بندی مرز سازند آسماری از مخازن بنگستان در ۳۶۳ حلقه چاه تفکیک گردید و با استفاده از ضخامت‌های به دست آمده از مخزن آسماری در هر چاه، میزان هرزروی و وزن گل مربوط به آن تفکیک و متمایز گردید. همچنین میزان هرزروی سیال حفاری در فواصل عمقی مختلف،



شکل ۲ قطاع‌بندی و خط اثر گسل‌ها در مخزن آسماری مورد مطالعه.

1. Sector
2. Depth Loss
3. Pound Cubic Foot (PCF)



شکل ۳ هیستوگرام داده‌های خام هرزروی برای ۳۶۳ حلقه چاه در مخزن آسماری.

در این مطالعه ابتدا بررسی هرزروی در یازده لایه و زیر لایه مخزن آسماری انجام شده است، سپس اقدام به رسم هیستوگرام داده‌های هرزروی در کل مخزن و تخمین احتمال هرزروی در مخزن شده است. میزان هرزروی‌های رخ داده در مخزن هر کدام در بازه‌های عمقی مختلف و مربوط به لایه‌های متفاوتی بوده است که با توجه به عمق قرارگیری سر لایه‌ها در هر چاه، مرز لایه‌ها تفکیک و میزان هرزروی در هر لایه و در هر چاه مشخص شده است. در این مطالعه میزان هرزروی‌های رخ داده در هر لایه برای ۳۶۳ حلقه چاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با رسم هیستوگرام برای هر لایه اطلاعات آماری آنها از قبیل میانگین، تغییرپذیری، ماکزیمم و مینیمم هرزروی در هر لایه (مطابق جدول ۱) به دست آمده است. به بررسی داده‌های وزن گل پرداخته شد و نمودار فراوانی وزن گل برای ۳۶۳ حلقه چاه ترسیم شد (شکل ۴). نمودار فراوانی داده‌های وزن گل نسبت به داده‌های هرزروی از تغییرات کمتری برخوردار بوده است. از آنجایی که متوسط وزن گل حفاری جهت حفاری سازند مخزنی آسماری در میدین جنوب غرب کشور ۵۵ pcf است، در این نمودار نیز مشخص شده است که در بیشتر چاه‌ها در سازند آسماری با وزن گل ۵۵ pcf حفاری شده است. محدوده وزن گل به کار رفته در سازند

آسماری میدان مورد مطالعه بین ۲۸ تا ۱۴۵ pcf است که وزن گل ۲۸ در شرایط استفاده از تکنیک حفاری فرو تعادلی در این میدان بوده است. پس از رسم نمودار فراوانی داده‌های هرزروی و وزن گل، برای بررسی بیشتر ارتباط آنها با یکدیگر و توزیع هرزروی در مناطق مختلف میدان در مخزن آسماری، اقدام به رسم نمودار همبستگی آنها با وزن گل شده است (شکل ۵). با رسم نمودار همبستگی بین داده‌های هرزروی و وزن گل مشخص شد که همبستگی بسیار ضعیفی وجود دارد و نشان می‌دهد هرزروی‌های انجام شده ارتباطی با وزن گل نداشته و تحت تاثیر عوامل دیگری همچون شکستگی‌های طبیعی و القایی سازند، بوده است.

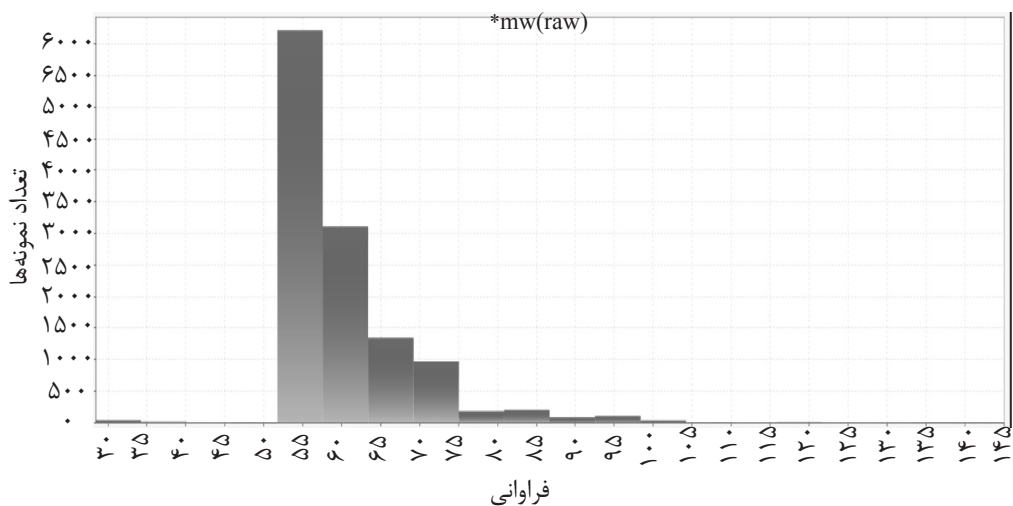
تبدیل باینری داده‌ها جهت کریجینگ شاخص

در اینجا با استفاده از روش کریجینگ شاخص برای پارامترهایی که کمتر از حد استاندارد بودند طبق فرمول عدد صفر و برای پارامترهایی که بیشتر از حد استاندارد بودند، طبق فرمول عدد یک در نظر گرفته شد و پهنه‌بندی بر این اساس انجام گردید. مراحل انجام روش کریجینگ شاخص به اختصار در زیر آمده است. مقادیر متغیر براساس حد یا حدود آستانه داده شده به مقادیر شاخص تبدیل می‌شوند.

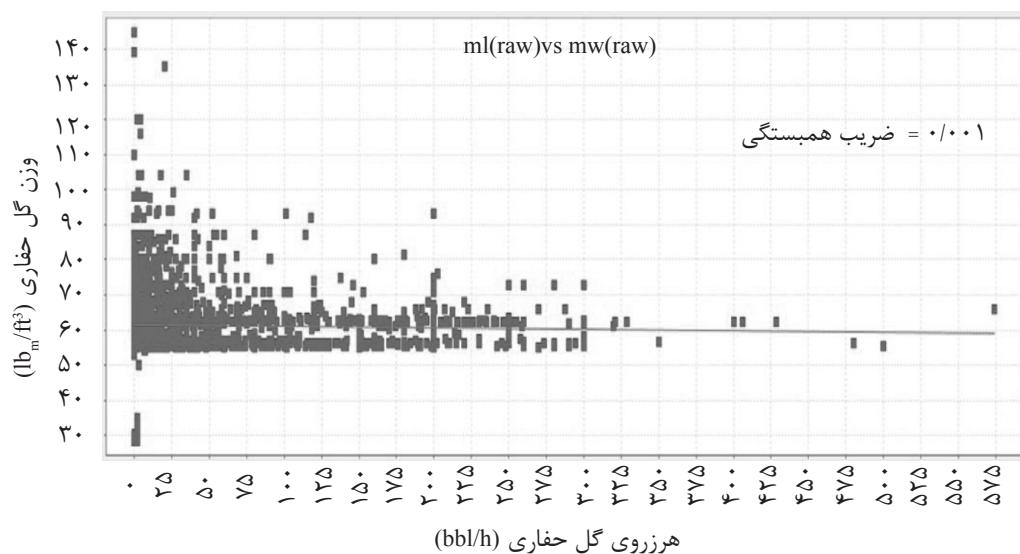
* Mud Loss (bbl/h)

جدول ۱ پارامترهای آماری هرزروی گل در ۱۱ لایه مخزن آسماری میدان مورد مطالعه.

نام لایه	میانگین	واریانس $(\text{bbl/hr})^2$	ماکزیمم	مینیمم	میانه
A ₁	۲۳/۵۵	۲۶۹۸	۲۸۰	۰	۳
A ₂	۲۱/۸۴	۲۴۶۸	۲۰۰	۰	۳
B ₁	۲۹/۶۹	۳۴۳۳	۲۵۰	۰	۴
B ₂	۳۱/۰۹	۳۵۱۰	۲۹۲	۰	۵
B ₃	۳۳/۵۹	۵۰۶۶	۴۵۰	۰	۵
B ₄	۲۸/۱۹	۳۷۲۶	۳۷۸	۰	۵
B ₅	۲۳/۹	۲۷۵۷	۳۲۱	۰	۴
C ₁	۲۱/۹۴	۲۰۴۳	۲۰۰	۰	۴
C ₂	۲۷/۶۲	۳۰۶۸	۲۵۰	۰	۴
D ₁	۲۴/۹۶	۳۵۹۷	۲۸۸	۰	۳
D ₂	۱۷/۲۷	۲۳۸۷	۲۵۰	۰	۳



شکل ۴ هیستوگرام داده‌های خام وزن گل برای ۳۶۳ حلقه چاه در مخزن آسماری.



شکل ۵ نمودار همبستگی هرزروی و وزن گل در مخزن آسماری میدان مورد مطالعه.

* Mud Weight $(\text{lb}_m/\text{ft}^3)$

شاخص محاسبه، ترسیم و به آنها مدل واریوگرام برآزش داده شد. در شکل ۶ واریوگرام شاخص جهتی (تجربی) و مدل کروی برآزش شده بر آن نشان داده شده است. در جدول ۲ مشخصات واریوگرام‌های شاخص در جهت اصلی، متوسط و کوچک نمایش داده شده است که مدل هر سه واریوگرام شاخص کروی بوده است. میزان اثر قطعه‌ای نسبتاً بالا در آنها نشان‌دهنده تغییرپذیری هرزروی حتی در فواصل کم دارد، همان‌گونه که شکل توزیع و عدم تقارن نمودار فراوانی داده‌های خام هرزروی، این مسئله را تأیید می‌کند.

تعیین بیضوی آنیزوتروپی و تخمین هرزروی

در شکل ۷ بیضوی ناهمسان‌گردی هرزروی نشان داده شده است که در سه جهت محور اصلی، محور متوسط و محور کوچک با شیب صفر و آزیموت 120° در جهت محور اصلی در فضا توجیه شده است. در این بررسی محور بزرگ در راستای کشیدگی میدان است و محور کوچک عمود بر محور تاقدیس میدان مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۳ پارامترهای بیضوی ناهمسان‌گردی^۲ و نسبت‌های ناهمسان‌گردی هرزروی که براساس واریوگرام‌های شاخص جهتی به‌دست آمده است، نشان داده شده است.

لذا با استفاده از رابطه (۱) داده‌ها به داده‌های شاخص تبدیل می‌شوند.

$$I = \begin{cases} 1 & \text{if } Lost > Cut\ off = 100 \\ 0 & \text{if } Lost < Cut\ off = 100 \end{cases} \quad (1)$$

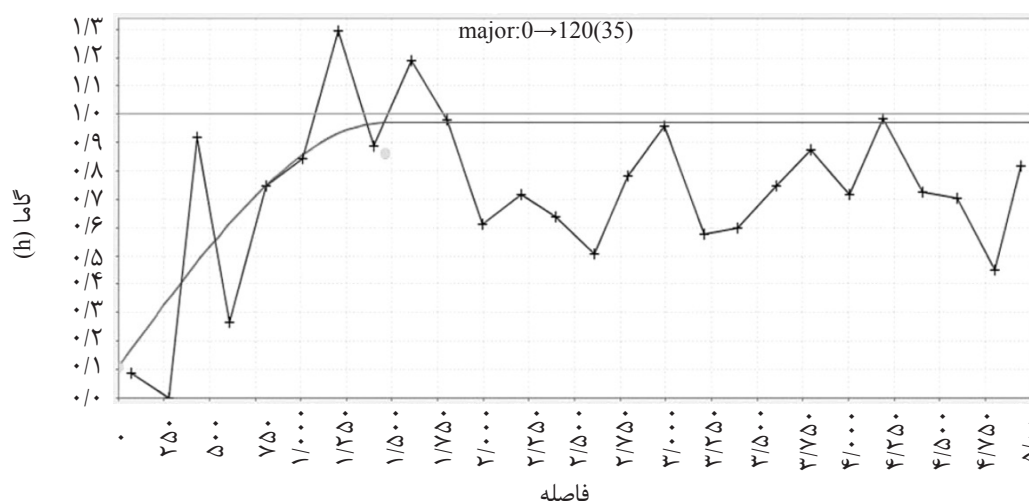
کریجینگ شاخص با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر در همسایگی نقطه مورد برآورد، احتمال مقادیر متغیر که بالاتر از یک حد آستانه معلوم هستند را تعیین می‌کند. مقدار تخمینی متغیر شاخص برای هر نقطه از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$I_k(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j i_k(x_j) \quad (2)$$

که در آن مقدار شاخص نمونه k ام به مختصات x_j و λ_j وزن کریجینگ شاخص برای نمونه به مختصات x_j است که در تخمین نقطه x_0 شرکت می‌کند. مقدار تخمینی شاخص یعنی $I_k(x_0)$ بین حداقل صفر و حداکثر یک تغییر می‌کند و معرف احتمال میزان بلوک مورد تخمین که از حد آن کوچک‌تر یا بزرگ‌تر باشد [۱۶].

واریوگرافی داده‌های شاخص^۱

در حل دستگاه معادلات کریجینگ شاخص، از پارامترهای مدل واریوگرام شاخص استفاده می‌شود. به این جهت واریوگرام‌های شاخص غیر جهتی و جهتی در راستاهای مختلف با استفاده از داده‌های

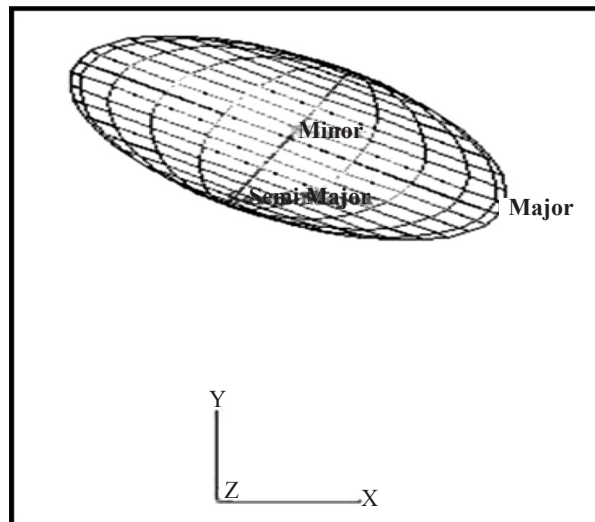


شکل ۶ واریوگرام تجربی شاخص در جهت آزیموت 120° (جهت کشیدگی مخزن) و مدل کروی برآزش شده بر آن.

1. Indicator Variogram
2. Anisotropy

جدول ۲ مشخصات واریوگرام‌های شاخص.

شعاع تاثیر	آستانه	اثر قطعهای	شیب واریوگرافی	آزیموت	نوع مدل	واریوگرام
۱۴۶۵/۳	۰/۸۶	۰/۱۰۷	۰	۱۲۰	کروی	جهت اصلی
۷۳۶/۳	۰/۸۶	۰/۱۰۷	۰	۳۰	کروی	متوسط
۶۶۶	۰/۸۶	۰/۱۰۷	۹۰	۳۰	کروی	کوچک



شکل ۷ مدل بیضوی ناهمسانگردی هرزروی سیال حفاری و توجیه آن در فضا.

جدول ۳ مشخصات بیضوی ناهمسانگردی هرزروی سیال حفاری.

نسبت ناهمسانگردی (محور اصلی به کوچک)	نسبت ناهمسانگردی (محور اصلی به متوسط)	شیب	پلانژ	آزیموت
۲/۲	۱/۹۹	۰	۰	۱۲۰

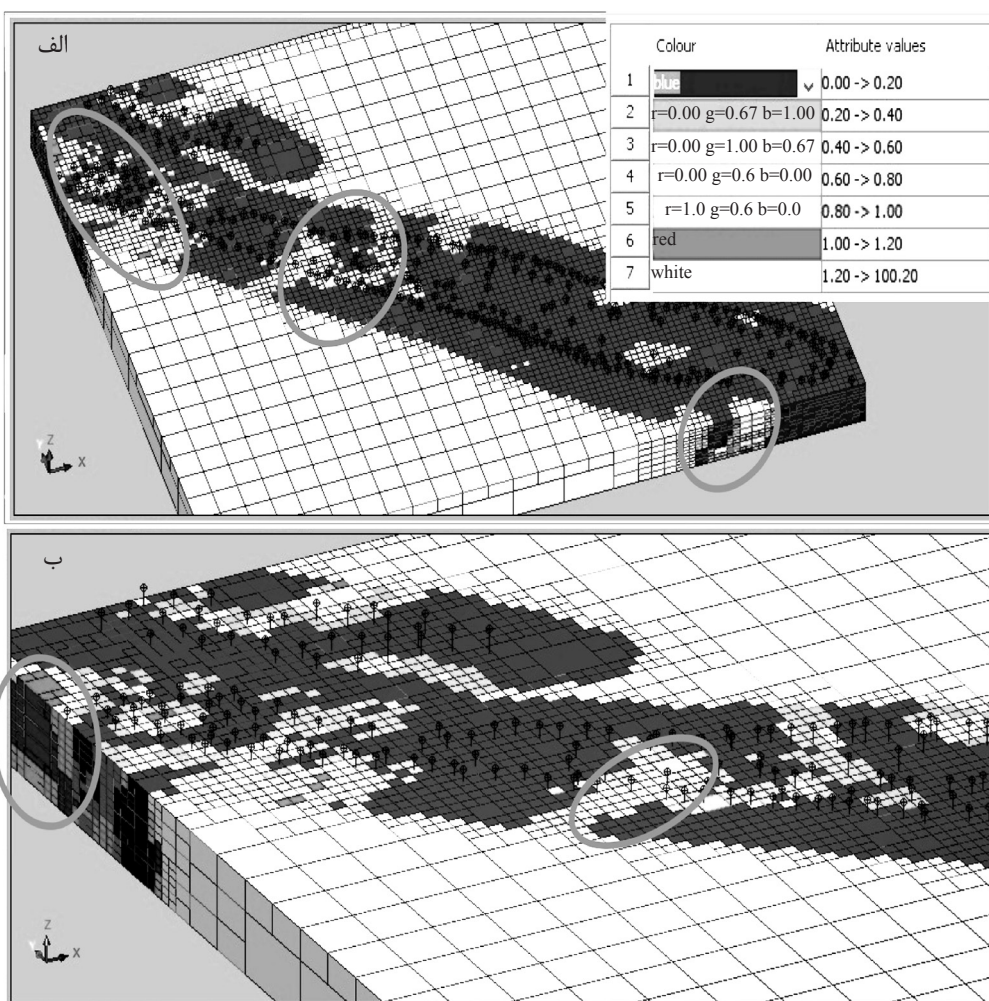
هر یک به ترتیب مربوط به محور افقی، عمودی و قائم هر بلوک است. در مدل بلوکی ساخته شده احتمال هرزروی‌های بالاتر از ۱۰۰ bbl/hr مورد تخمین قرار گرفته است. انتخاب هرزروی ۱۰۰ bbl/hr براساس مقیاس در نظر گرفته شده در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز است که رخ دادن این حجم از هرزروی را برابر هرزروی کامل^۱ در نظر می‌گیرند. با انجام مدل‌سازی بلوکی مخزن آسماری میدان مورد مطالعه مشخص شده است که در بخش‌های مختلف از میدان احتمال هرزروی‌ها، چه میزان می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹). در شکل ۸ احتمال هرزروی بالای ۱۰۰ bbl/hr مدل شده است و همان‌گونه که مشخص شده است.

با در دست داشتن پارامترهای واریوگرام، میزان احتمال هرزروی لایه‌ها و زیر لایه‌های مخزن به روش کریجینگ شاخص (با استفاده از نرم‌افزار سورپک) مورد تخمین قرار گرفت و برای کلیه لایه‌ها و زیر لایه‌ها احتمال گذر مقدار متوسط هرزروی از حد آستانه‌ای ۱۰۰ bbl/hr و به عبارتی درصدی از حجم لایه‌ها که دارای هرزروی بالای ۱۰۰ bbl/hr است، محاسبه شد.

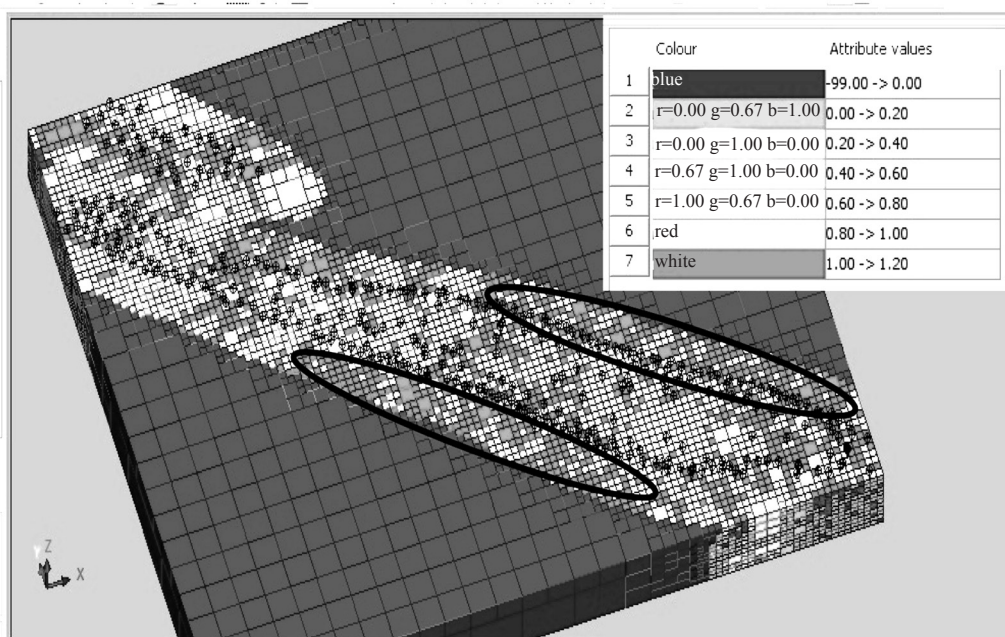
نتایج و بحث

در این مرحله با استفاده از کریجینگ شاخص مدل بلوکی هرزروی و توزیع آن در مخزن آسماری ساخته شده است. در مدل بلوکی ساخته شده ابعاد هر بلوک ۵۰×۵۰×۲۵۰ می‌باشد که مقدار عددی

1. Complete Loss



شکل ۸ مدل بلوکی احتمال هرزروی سیال حفاری بالای ۱۰۰ bbl/hr در مخزن آسماری. الف: نما از جهت عمودی و ب: نما از جهت افقی



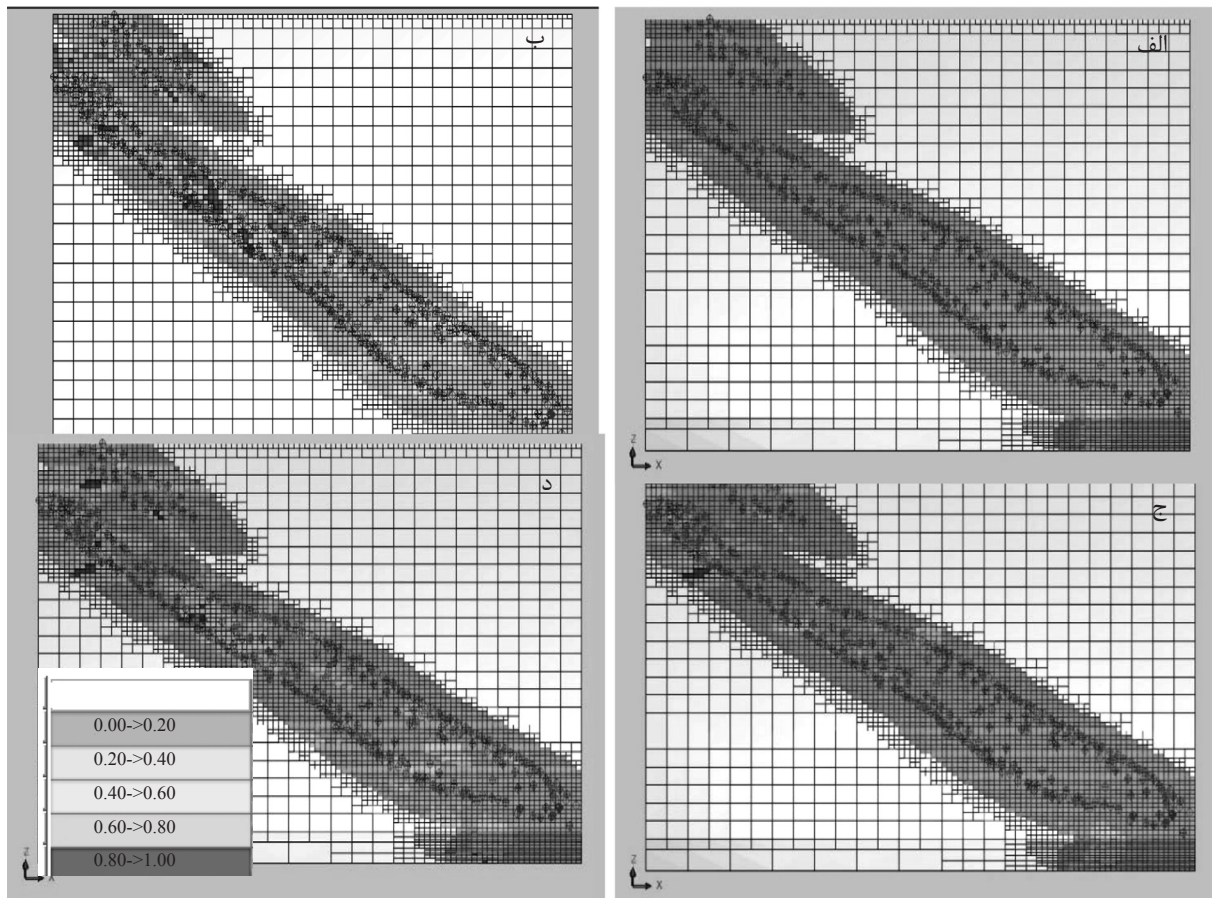
شکل ۹ مدل بلوکی احتمال هرزروی سیال حفاری کمتر از ۱۰۰ bbl/hr در مخزن آسماری.

بشکه فاقد تمرکزی از گسل‌های اصلی است. با توجه به اینکه تمامی مراحل فوق الذکر، برای شاخص‌های دیگر نیز انجام شده است، در شکل ۱۰ به‌عنوان نمونه، نقشه‌های بلوک‌بندی احتمال هرزروی برای شاخص‌های ۲۰، ۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ bbl/hr نیز ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که هرچه قدر شاخص هرزروی بالاتر در نظر گرفته می‌شود، احتمال محدوده‌ای که تحت تاثیر هرزروی قرار می‌گیرد کمتر می‌شود و خلاصه این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۱۰ یک انطباق بسیار خوبی بین گسل‌های موجود در مخزن (شکل ۲) و نقشه احتمال هرزروی‌های بیش از ۲۰ bbl/hr را نشان می‌دهد و گسل‌ها را به‌عنوان عامل عمده هرزروی‌ها در این منطقه معرفی می‌کند. جهت مقایسه شاخص‌های مختلف با یکدیگر، جدول ۴ ارائه شده است.

در ستون اول ۵ شاخص مورد بررسی را نشان می‌دهد که میانگین احتمال بیش از آنها و حجمی از مخزن که احتمال دارد این میزان هرزروی‌ها در آن اتفاق بیفتد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص شده است، هرزروی‌های تا ۲۰ bbl/hr در حجم بیشتری از مخزن اتفاق افتاده است و بیشترین میانگین احتمال هرزروی را به خود اختصاص داده است. کمترین میزان حجم مخزن با هرزروی‌های بالای ۳۰۰ bbl/hr درگیر است که در شکل ۱۰ (د) قابل مشاهده است. همان‌گونه که در جدول زیر مشاهده می‌شود در حدود ۶٪ از حجم کل مخزن تحت تاثیر هرزروی‌های بیش از ۲۰ bbl/hr قرار گرفته است و کمترین میزان آن در حدود ۰/۰۵ به هرزروی‌های بیش از ۳۰۰ bbl/hr اختصاص دارد و این امر نشان‌دهنده این است که مخزن بیشتر تحت تاثیر هرزروی‌های از ۲۰ تا ۱۰۰ bbl/hr است.

در بخش شمال غربی میدان در قطاع ۲ (با توجه به قطاع بندی در شکل ۲) و نواحی مربوط به بخش انتهایی یال جنوبی، در جنوب شرق میدان مورد مطالعه، احتمال حجم هرزروی‌های بالای ۱۰۰ بشکه وجود دارد که این امر حکایت از وجود دو منطقه با شرایط بحرانی هرزروی در حین عملیات حفاری دارد. همچنین این میزان هرزروی با شدت کمتری و در حدود ۷۰-۸۰ bbl/hr در قطاع‌های ۱ و ۴ و تا قسمتی در بخش ابتدایی کوهانه اصلی تاقدیس آسماری مشاهده می‌شود. با توجه به شکل شماره ۲ که در آن خط اثر گسل‌ها در مخزن آسماری میدان مورد بررسی مشخص شده است و وجود همبستگی بسیار ضعیف در ارتباط بین هرزروی‌ها با وزن گل می‌تواند بحث‌های جدی‌تری مطرح شود، که این حجم از هرزروی‌ها با خطوط گسلی موجود در مخزن بی ارتباط نمی‌باشد. مناطق مشخص شده در شکل ۸ که دارای احتمال هرزروی‌های شدید است، دارای خط اثر گسل در همان نواحی است که احتمالات هرزروی بالای ۱۰۰ bbl/hr برای این مناطق به درستی تخمین زده شده است. در شکل ۹ مدل بلوکی احتمال هرزروی کمتر از ۱۰۰ bbl/hr تهیه شده است و همان‌گونه که مشخص شده است در بخش‌های کم شیب یال جنوبی و شمالی در کل میدان دارای احتمال هرزروی برابر صفر و قطاع‌های ۵ و ۶ و ۷ و ۸ احتمال هرزروی زیر ۱۰۰ bbl/hr را دارا می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نواحی که با رنگ قرمز مشخص شده دارای احتمال بسیار بالایی است که هرزروی در این مناطق زیر ۱۰۰ bbl/hr رخ می‌دهد.

با مقایسه این تخمین با نقشه پهنه‌بندی و توزیع گسل‌ها در قطاع‌های مختلف (شکل ۲) مشخص است که نواحی با احتمال بالای هرزروی زیر ۱۰۰



شکل ۱۰ نقشه مدل بلوکی احتمال هرزروی سیال حفاری در مخزن آسماری میدان مورد مطالعه جهت مقایسه:

(الف) هرزروی بیش از ۲۰ bbl/hr (ب) هرزروی بیش از ۵۰ bbl/hr
(ج) هرزروی بیش از ۲۰۰ bbl/hr (د) هرزروی بیش از ۳۰۰ bbl/hr

جدول ۴ درصد احتمال و حجم مخزن تحت تاثیر هرزروی براساس شاخص های هرزروی متفاوت.

شاخص هرزروی (bbl/hr)	میانگین احتمال هرزروی بیش از شاخص در کل مخزن (%)	حجم مخزن دستخوش هرزروی بیش از شاخص (بیلیون متر مکعب) با احتمال بالای ۹۵٪	درصد تحت تاثیر هرزروی بیش از شاخص نسبت به حجم کل مخزن (%)
۲۰	۲۵/۶۴	۱۴۱/۶	۵/۸۱
۵۰	۱۵/۴۱	۵۲/۳	۲/۱۵
۱۰۰	۱۰/۴۳	۴۴/۸	۱/۸۴
۲۰۰	۷/۰۱	۱۸/۵	۰/۷۶
۳۰۰	۱/۶۴	۱/۲	۰/۰۵

نتیجه گیری

هرزروی سیال شده است. با بررسی نتایج به دست آمده مشخص شد که روش کریجینگ شاخص، تعداد بیشتری از زونها را در رده قطعا بدون هرزروی تعیین و نیز تصویر بهتری از پیوستگی متغیر هرزروی ارائه کرده است. همچنین روش کریجینگ شاخص با در اختیار گذاردن نقشه های

۱- نتایج آنالیز همبستگی داده ها نشان داد که داده های هرزروی و وزن گل همبستگی مکانی ضعیفی دارند؛ که این همبستگی ضعیف نشان می دهد هرزروی های رخ داده جز در مواردی خاص، ارتباطی با وزن گل نداشته است و عوامل دیگری موجب

هرزروی برای شاخص‌های دیگر، مشخص گردید که بیشترین میانگین احتمال هرزروی متعلق به هرزروی‌های بیش از ۲۰ bbl/hr است که حجم زیادی از مخزن تحت تاثیر این میزان هرزروی قرار گرفته است. همچنین کمترین میانگین احتمال هرزروی متعلق به هرزروی‌های بیش از ۳۰۰ bbl/hr است که حجم بسیار کمی از مخزن را تحت تاثیر خود قرار داده است و نتایج حاکی از آن است که حجم عمده‌ای از مخزن تحت تاثیر احتمال هرزروی‌های ۲۰ تا ۱۰۰ قرار دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اداره پژوهش و فناوری مناطق نفتخیز جنوب به واسطه حمایت‌های مادی و معنوی در انجام این طرح تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

توزیع احتمال گذر از حد آستانه‌ای هرزروی، تصویر قابل اعتمادتری جهت کنترل هرزروی و برنامه ریزی کوتاه مدت در اختیار مهندسين طراح چاه قرار داده و امکان انجام عملیات کنترل محدود جهت جلوگیری از هرزروی با پیش بینی از میزان هرزروی را فراهم می‌آورد.

۲- نقشه‌های احتمال هرزروی نشان دادند که احتمال تجاوز مقدار هرزروی از حدود آستانه ۱۰۰ bbl/hr در نواحی شمال غرب و جنوب شرق منطقه بیشتر است. نقشه‌های احتمال هرزروی تهیه شده در بسیاری از فرآیندهای تصمیم‌گیری از جمله مدیریت منابع هیدروکربوری و به حداقل رساندن ریسک آسیب دیدگی مخازن هیدروکربوری ابزار سودمندی به شمار می‌روند. از این نقشه‌ها می‌توان در طراحی مناسب‌تر محل حفاری‌های تکمیلی در مخزن مورد مطالعه استفاده نمود.

۳- با مقایسه نتایج حاصل از مدل بلوکی احتمال

مراجع

- [1]. Taheri, K., & Mohammad Torab, F. (2017). Modeling Mud Loss in Asmari Formation Using Geostatistics in RMS Software Environment in an Oil Field in Southwestern Iran. *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 11(11), 1.
- [2]. Chit forosh A., Makvandi A. and Homaei M., "Three-dimensional model (3d) asmari formation," National Iranian South Oil Company, Iran, 2011.
- [3]. Edward Hohn M., "Geostatistics and petroleum geology," Publisher Springer Netherlands, ed. 2^{ed}, Pages 151-179, 1999.
- [4]. Reid P. and Ssantos H., "Novel drillin, completion and workover fluids for depleted zones: avoiding losses formation damage and stuck pipe," Drilling Technology Conference & Exhibition Held in Abu Dhabi, UAE, Society of Petroleum Engineers, SPE 80406, p. 9, 2003.
- [5]. Yong S. and Jienian Y., "Characterization and prevention of formation damage for fractured carbonate reservoir formation with low permeability," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, China University Petroleum, Beijing 102249, China, pp 326-333, 2008.
- [6]. Oluwagbenga O., Oseh J., Oguamah I., Ogungbemi O. and Adeyi A., "Evaluation of formation damage and assessment of well productivity of oredo field, edo state, nigeria," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol. 4, Issue 3, pp. 1-10, 2015.
- [7]. Goovaerts P., AvRuskin G., Meiliker J., Slotnick M., Jacquez G. and Nriagu J., "Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan," *Water Resources Research*. Vol. 41, pp. 1-19,

- [8]. Hu K., Huang Y., Li H., Li B., Chen D. and White R. E., "Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in north China plain," *Environment International*. Vol. 31, pp. 896-903, 2005.
- [9]. Lee J. J., Jang C. S., Wang S. W. and Liu C. W., "Evaluation of potential health risk of arsenic-affected groundwater using indicator kriging and dose response model," *Science of the Total Environment*. Vol. 384, pp. 151-162, 2007.
- [10]. Adhikary P., Chandrasekharan H., Debashis Ch. and Kalpana K., "Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach," *Environ. Monit. Assess.* Vol. 167, pp. 599-615, 2010.
- [11] Kasraee S. and Torab F. M., "Risk reduction in sechahun iron ore deposit by geological boundary modification using multiple indicator kriging," *Journal of Central South University*, Vol. 21, pp. 201-217, 2014.
- [12] Amanipoor H., Ghafoori M. and Lashkaripour G. R., "The application of geostatistical methods to prepare the 3d petrophysical model of oil reservoir," *Open Journal of Geology*, Vol. 3, pp. 7-18, 2013.
- [13]. Taheri, K. (2016). Prediction & Modeling of Mud Circulation Loss Using Geostatistical Methods in Asmari Reservoir, Gachsaran Oil Field Yazd University].
- [14]. Taheri, K. (2013). Integrated Management of Drilling Operation with aim of Decreasing Ineffective Times Islamic Azad University of Omidyeh]. 1388.
- [15]. Ahmed T., *Reservoir Engineering Handbook*, 4th Edition, Publishing Elsevier, p. 1454, 2010.
- [۱۶]. حسنی پاک ع. ا.، شرف‌الدین م.، "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۹۶ ص، ۱۳۹۱.