

شبیه سازی زمین آماری پارامترهای تخلخل، نفوذپذیری و شکاف با استفاده از دو روش آماری در مخازن هیدروکربنی شکافدار

امیر حسن اطمینانⁱ؛ عباس سیفیⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، برای اولین بار به کمک روش شبیه سازی شرطی گوسی و شاخص، توزیع شکاف‌های در مخازن هیدروکربنی شکافدار مدل‌سازی و تأثیر توزیع پارامترهای شکاف بر پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری نشان داده شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های ۱۳ حلقه چاه مغزه دار مربوط به یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب کشور، چهار گروه بر اساس طبیعت شکاف‌ها شامل ماتریکس، استیلولیت، حفره و شکستگی طبقه بندی؛ سپس یک مدل اولیه از طبیعت شکاف‌ها به کمک روش شبیه سازی شرطی شاخص ساخته شده است. مدل مزبور برای بهبود دقت مدل‌های تخلخل و تراوایی با استفاده از روش شبیه سازی شرطی شاخص استفاده شده است. برای مدل سازی تراوایی، تنها بلوک‌های دارای شکستگی از مدل مزبور انتخاب شده، در ساخت مدل‌های سه بعدی توزیع فضایی آزیموت، شیب و دانسیته شکاف‌ها بکار رفته‌اند. اطلاعات آزیموت، شیب و دانسیته شکستگی‌ها از تفسیر نمودارهای تصویری شش حلقه چاه از میدان F در سازند کنگان به دست آمده است. در ادامه با معرفی یک تابع جدید به نام فاکتور اثر شکاف‌ها، تأثیر توزیع پارامترهای شکاف بر روی پارامتر نفوذپذیری در بلوک‌های دارای شکستگی محاسبه شده است. مدل تراوایی ساخته شده، با تأثیر تابع فاکتور اثر شکاف‌ها در موقعیت بلوک‌های حاوی شکستگی، به روز شده است. مدل تخلخل نیز در تلفیق با مدل طبیعت شکاف‌ها بهبود یافته است. به این صورت که با توجه به مدل طبیعت شکاف‌ها، در هر بلوک از مخزن مورد مطالعه، از واریوگرام مربوطه استفاده شده است. در نهایت، هدف ما در این مقاله بهینه سازی پارامترهای مخزن و استفاده از مدل‌های تخلخل واحد به منظور شبیه سازی در یک نمونه از مخزن شکافدار نسبتاً ضعیف است. مدل پیشنهادی با مدل تخلخل دوگانه روی یک مخزن شکافدار در ناحیه جنوب ایران در یک بازه ۱۸ ساله مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این روش می‌تواند با صرف زمان و هزینه کمتر، تخمین واقع‌تری از رفتار استاتیکی و دینامیکی مخزن را به تصویر بکشد.

کلمات کلیدی

لاگ تصویر شکاف، دانسیته شکاف، آزیموت شکاف، شیب شکاف، شبیه سازی شرطی نرمال، شبیه سازی شرطی شاخص

ⁱ کاندیدای دکترای مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، etminan@aut.ac.ir

ⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، aseifi@aut.ac.ir

An Improved Model for Geostatistical Simulation of Porosity, Permeability and Fracture Parameters Distributions Using Two Statistical Methods in Fractured Reservoirs

A.H. Etminan and A. Seifi

ABSTRACT

This article presents a method for simulation of continuous and discontinuous fractures distributions in hydrocarbon reservoirs using the sequential indicator simulation (SIS) method. Then, the effect of fracture models including fractures azimuth, dip and density is included in the porosity and permeability models. At the first step, on the basis of the fractures nature four classes comprising of matrix, stylolith and occluded fractures, vuges (isolated pores) and open fractures were identified using core data of 13 wells in one of the southern Iran hydrocarbon fields. Next, a model of fractures nature was constructed using SIS method. This model is used to enhance the accuracy of the porosity and permeability models using Sequential Gaussian Simulation (SGS) method. For this purpose, only the fractured blocks of the mentioned model were selected for fractures density, azimuth and dip modeling. Afterward, a novel function named Fracture Effect Factor (FEF) was introduced to include the effect of fracture distribution on permeability model in fractured blocks. Then, the permeability model is updated using FEF function. For porosity modeling, fractures nature model was used as an aid in increasing the accuracy of the work. Therefore, for the mentioned four classes of fractures, individual variograms were constructed and porosity estimation in each block was performed based on its related variogram.

In this study, a comparison was made between the performances of the proposed model with that of the dual porosity model based on a fractured reservoir in the southern area of Iran for a period of 18 years. The result of this study showed that this method can better estimate the static and dynamic behavior of fractured reservoirs.

KEYWORDS:

FMI log, fracture density, fracture azimuth, fracture dip, Sequential Gaussian Simulation (SGS), Sequential Indicator Simulation (SIS).

و گروه تحقیقاتی او شبیه سازی عددی جریان سیال در محیطهای متخلخل شکافدار در مقیاس بزرگ را به کار گرفتند [۱۷]، [۲۰].

از آنجا که حل دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال در مخزن در طول زمان، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیتها به نتایج نامنتطبق با واقعیت رفتار مخزن منجر می شود؛ مهندسی مخزن بر آن شدند تا عدم قطعیت پارامترهای ورودی و عوامل طبیعی مخزن از جمله نفوذپذیری، تخلخل، اشباع آب و شکاف را شبیه سازی کنند.

اولین مطالعه سازمان یافته در خصوص با عدم قطعیت حاکم بر نفوذ پذیری و تخلخل را در سال ۱۹۸۸ Bertiy انجام داد. پس از آن روش هایی را برای کمی سازی عدم قطعیت Journal در سال ۱۹۹۰ و Abrahamsen در سال ۱۹۹۲ ارائه کردند. سرانجام در سال ۲۰۰۵ مدل سازی و بهینه سازی توزیع شکافها با استفاده از روشهای آماری Object Modeling Tran را و همکارانش ارزیابی کردند. در این مقاله با استفاده از این ایده و به کمک روشهای توانمند شبیه سازی شرطی به

۱- مقدمه

مخازن شکافدار بسیار پیچیده، و ارزیابی آنها مشکل است. به منظور ارزیابی مؤثر پیش بینی و برنامه ریزی برای اینگونه مخازن، تشخیص زود هنگام نقش شکل گیری شکافهای طبیعی و کسب یک دید سیستماتیک نسبت به جمع آوری و تجزیه و تحلیل دادههای مربوطه نیاز است. البته، همیشه باید مراقب بود و مطمئن شد که سطح تحلیل و ارزیابی متناسب با موضوع مربوطه باشد.

با وجود کارهای مطالعاتی متنوع انجام شده در سالهای گذشته بر روی مخازن به منظور شناسایی مکانیسم حرکت سیال چند فاز، مکانیسم حرکت سیال چند فاز مخازن شکافدار هنوز به طور کامل شناخته نشده است.

در این راستا می توان به تئوری Warren & Root در سال ۱۹۶۳ در خصوص مفهوم تخلخل دوگانه در مخازن شکاف دار اشاره کرد. البته، تئوری اولیه Warren & Root برای جریان تک فاز در محیط متخلخل شکافدار ارائه شده بود که کاظمی

بررسی عدم قطعیت پارامترهای مخزن و شکاف به منظور کاهش ریسک و بهبود تخمین تولید می‌پردازیم [۱۳]، [۱۶].

در این مقاله، بر اساس نمونه مطالعات انجام شده بر روی میدان مشخص F، تأثیر توزیع پارامترهای شکاف^۲ (عوامل مؤثر بر رفتار شکاف) در یک مخزن کربناته به وسیله شبیه سازی عددی نشان داده شده است؛ سپس با استفاده از اطلاعات اولیه تخلخل و نفوذ پذیری و به کمک شبیه سازی شرطی گوسین در نرم افزار PETREL برای شبیه سازی استاتیکی پارامترهای مخزن، مدل زمین آماری^۲ مخزن، میسر و همچنین مدل زمین آماری توزیع پارامترهای شکاف به کمک شبیه سازی شرطی شاخص در نرم افزار فوق مشخص می‌شود.

مرحله اول این روش کاربردی شامل تبدیل شکاف به شاخص تراکم شکاف بر اساس تفسیر اطلاعات لاگ تصویری^۱ و داده‌های مغزه برای هر بلوک مدل است. در این مقاله، یک روش جدید برای اساس شبیه سازی شرطی نرمال و شبیه سازی شرطی شاخص برای شبیه سازی چگالی شکاف و رخساره های شکاف در کل مخزن توسعه داده شده است. در نتیجه، اطلاعات حاصل از مدل چگالی شکاف و مدل رخساره شکاف به صورت یک ضریب ثابت مقدار نفوذپذیری در کل مدل آماری دخالت داده شده است. در این مطالعه، از تجسم سه بعدی مدل زمین شناسی به کمک نرم افزار PETERL برای تایید و نشان دادن هر چه بهتر پیوستگی مخزن و همچنین نشان دادن وجود مانع (لایه غیر قابل نفوذ) و نواحی با تخلخل و نفوذ پذیری توسعه یافته استفاده شده است.

در پایان، مدل استاتیک مخزن ساخته و برازش شده، برای پیش بینی و بررسی بهره دهی و بازده مخزن در آینده در سناریوی مختلف، اجرا و نتایج آن ارائه شده است.

۲- تحلیل ساختاری

تحلیل ساختاری، مدل سازی محاسباتی الگوهایی از متغیرهای وابسته فضایی است که متغیرهای ناحیه ای را مشخص می کند و تا حد زیادی با مطالعه واریوگرام مترادف است. تحلیل ساختاری، یک مرحله مقدماتی پیش از مدل سازی متغیرهای ناحیه ای است که از تکنیک‌هایی چون کریجینگ یا شبیه سازی شرطی^۳ استفاده می‌کند و به حل سیستم معادلات با پارامتر واریوگرام ملزم می‌باشد [۳].

اکثر روش‌های معمول زمین آماری؛ که برای نسبت دادن مقادیر پارامترهای مخزن به مدل‌های دو و سه بعدی به کار می‌روند، به پارامترهایی نظیر هیستوگرام و واریوگرام نیاز دارند.

واریوگرام‌ها عمدتاً در سه جهت اصلی x, y, z بررسی می‌شوند. واریوگرام‌های عمودی معمولاً با استفاده از داده‌های چاه پیمایی یا داده‌های مغزه محاسبه می‌شود. متأسفانه در راستای افقی، به دست آوردن واریوگرام آماری با استفاده از تعداد محدودی چاه مشکل است؛ ولی چنانچه از نظر مدل رسوب شناسی تایید شوند، قابل استفاده هستند؛ بنابراین نوع لیتولوژی و محیط رسوب گذاری می‌تواند نقش بسزایی در ساختار فضایی یا به عبارتی واریوگرام داشته باشد. در این راستا، ابتدا با استفاده از شبیه سازی شرطی شاخص توزیع نوع لیتولوژی در کل میدان مشخص شده، سپس به عنوان شرط^۲ در تخمین پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری مورد استفاده می‌شود.

واریوگرام‌های عمودی و افقی، برای تعیین همبستگی فضایی و جهت ناهمگونی برای ساختارهای محدوده طولانی^۷ تخلخل، نفوذپذیری و پارامترهای شکاف به کار می‌روند. از آنجا که واریوگرام عامل اصلی کنترل کردن شبیه سازی شرطی است، نسخه های مختلف با تغییرات اندک مدل‌های واریوگرام ایجاد می شود تا حساسیت آنها سنجیده شود. در نهایت، به کمک شبیه سازی دینامیکی با نرم افزار Eclipse، بهترین مدل از نظر توزیع ساختاری تخلخل، نفوذپذیری و اثر شکاف انتخاب می‌شود. ذکر این نکته لازم است که نسخه‌های تولید شده، باید شرایط زیر را داشته باشند:

- ۱- با داده‌های اندازه گیری شده در محل چاهها تطابق داشته باشند.
- ۲- هیستوگرام توزیع پارامترها را دوباره تولید کنند.
- ۳- با مدل واریوگرام تطابق داشته باشند.
- ۴- با تاریخچه تولید چاه همخوانی داشته باشند.

۳- ساختار فضایی

ساختار فضایی^۸ یا به عبارتی دیگر واریوگرام، اطلاعات وسیعی راجع به پارامترهای تخلخل، نفوذپذیری، توزیع شکاف‌ها در فضا، الگوهای ویژه ممکن، خوشه بندی و نظم توزیع شکاف‌ها را در بر دارد. کمیت ساختار فضایی با استفاده از ابزارهای مختلف زمین آماری قابل دستیابی خواهد بود.

واریوگرام یک گشتاور مرتبه دوم است که برای نمایش، مدل سازی و مشخص کردن پیوستگی فضایی و نوسانات فضایی متغیرهای ناحیه ای استفاده می‌شود. واریوگرام یک متغیر کلی به صورت غیر تصادفی است که قابلیت استفاده وسیع در مدل سازی زمین آماری در بررسی توزیع فضایی را امکان پذیر می‌کند [۲].

نیمه واریوگرام $\gamma(h)$ ، تغییرات یک متغیر ناحیه ای (Z) در فضا را به صورت یک تابع از فاصله طولی^۱ بین دو نقطه اندازه گیری x_i و x_i+h مشخص می‌کند. این نیمه واریوگرام به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

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

که در آن، $N(h)$ تعداد کل نقاط جفتی است.

در این تحقیق از واریوگرام تک متغیره برای متغیرهای ناحیه‌ای خواص پارامترهای مخزن استفاده شده است.

۴- شبیه سازی شرطی نرمال و شاخص

هدف اصلی روش‌های شبیه سازی شرطی شاخص و شبیه سازی شرطی گوسین، شبیه سازی یک مقدار متغیر برای یک بلوک در یک فضای سه بعدی با شبکه بندی سه بعدی است. چون بعد از شبیه سازی هر بلوک، از آن بلوک در تخمین شبیه سازی سایر بلوک‌ها استفاده می‌شود، به نام شبیه سازی ترتیبی^۱ نامگذاری شده است [۲].

در این روش، ابتدا توزیع احتمال در هر گره براساس اطلاعات موجود در فضای بیضوی سه بعدی مشخص و سپس یک مقدار از توزیع احتمال به صورت تصادفی انتخاب و با استفاده از تئوری کریجینگ، مقدار پارامتر در گره مورد نظر تخمین زده می‌شود. نکته قابل ذکر این است که، در روش شبیه سازی شرطی نرمال، استفاده از توزیع نرمال استاندارد برای هر پارامتر ضروری است؛ بنابراین ابتدا داده‌ها را به فضای نرمال انتقال داده و پس از اتمام عملیات شبیه سازی، تمام داده‌های شبیه سازی شده به فضای اصلی خود برگردانده می‌شود. عمدتاً تکنیک‌های شبیه سازی شرطی گوسین برای متغیرهای پیوسته مانند تخلخل، نفوذ پذیری و تراکم شکاف‌ها استفاده می‌شود. این الگوریتم به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- داده‌های اولیه به مقادیر استاندارد نرمال انتقال داده می‌شود.

۲- واریوگرام داده‌های تبدیل یافته را محاسبه و مدل سازی می‌شود.

۳- یک مسیر تصادفی^{۱۱} برای تمام شبکه هایی که مقادیر آن قرار است شبیه سازی شود، تعریف می‌شود.

۴- در هر گره یک مقدار از تمام مقادیر دیگر (معلوم و شبیه سازی شده) کریج و توزیع نرمال مربوط به آن مشخص می‌شود.

۵- یک مقدار تصادفی از توزیع نرمال، انتخاب به مجموعه مقادیر شبیه سازی شده اضافه می‌شود.

۶- مراحل ۴ و ۵ را تکرار می‌کنیم تا مقادیر شبیه سازی شده برای تمام گره‌ها حاصل شود.

۷- مقادیر شبیه سازی شده به فضای اصلی خود انتقال داده می‌شود [۱].

شبیه سازی شرطی، شاخص بسیار نزدیک به شبیه سازی شرطی نرمال است با این اختلاف که در این شبیه سازی دیگر به انتقال داده‌ها به فضای نرمال نیازی نیست و فقط با احتمال صفر و ۱ بیان می‌شود. احتمال صفر بیانگر عدم حضور متغیر مورد نظر و یک بیانگر حضور صد در صد متغیر مورد بحث است. مراحل الگوریتم شبیه سازی شرطی شاخص مشابه روش شبیه سازی شرطی گوسین است با این تفاوت که مرحله ۱ در آن وجود ندارند. این الگوریتم به صورت تابع ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$I(u) = \begin{cases} 1, & u \in \text{Variable} \\ 0, & u \notin \text{Variable} \end{cases}$$

۵- ابعاد مربوط به شبکه بندی در مدل

به منظور تکمیل موارد مربوط به مدل‌سازی، شبیه سازی تصادفی پارامترهای مخزن به صورت استاتیکی بررسی شد. در این راستا با توجه به ابعاد مخزن حدود ۲۱ کیلومتر در ۴۰ کیلومتر، یک شبکه بندی در جهت شمال به جنوب با تعداد ۱۶۴ بلوک در جهت x، ۸۸ بلوک در راستای y و ۹۵ لایه در جهت z را پوشش داده است. ابعاد شبکه بندی در مدل مذکور ۱۰۰×۱۰۰×۱ متر منظور شده است.

۶- شبیه سازی مخازن شکافدار

شکاف‌ها باعث ایجاد ناپیوستگی‌ها در خصوصیات مخزن می‌شوند که می‌توانند کل رفتار مخزن را تحت تأثیر قرار دهند. شبیه سازی این ناپیوستگی‌ها و رابطه آن با بلوک ماتریس یک، موضوع مهم در مطالعات ارزیابی مخازن شکافدار است [۴].

گاهی شکاف‌ها یک الگوی خیلی پیچیده دارند که ترکیبی از چندین مجموعه شکاف است و هر کدام از این مجموعه‌ها با دیگری از نظر مشخصاتی، مانند جهت، فاصله شکاف‌ها و ژئومکانیک تفاوت دارند. این مجموعه‌ها با تنش‌های طبیعی میدان و زمین شناسی مرتبط می‌شوند و به کمک داده‌های چاه آزمایشی مغزه و چاه پیمایی قابل تحلیل هستند.

۶-۱- شبیه سازی شکاف

وجود شکاف‌ها در مغزه‌ها قابل مشاهده است و از طریق تفسیر چاه پیمایی ویژه ای چون FMS، FMI قابل بررسی می‌باشند. مخازنی با این گونه شکاف‌ها در چاه آزمایشی پاسخی

مربوط به مخازن شکافدار می‌دهند و به نحوه بارزی می‌توانند گذردهی مخازن و به تبع آن شاخص بهره دهی چاه را بهبود بخشند و در ضریب بازدهی میدان اثر مثبتی ارایه کنند. در صورت نادیده گرفتن شکاف‌ها، شاخص بهره دهی چاه‌ها^{۱۲} در مدل به میزان کمتر و گرادیان فشار به میزان بیشتری تخمین زده می‌شوند.

۶-۲- روش شبیه سازی شکاف

روش طراحی شده برای شبیه سازی مخازن شکافدار به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

۶-۲-۱ ارزیابی طبیعت شکاف

طبیعت شکستگی‌ها به نوع منشأ شکل گیری آنها، ویژگی‌های مکانیکی سنگ، تکنیک و دیاژنز زیر سطحی بستگی دارد. ترکیبی از این فاکتورها عوارضی را ایجاد می‌کند که عامل افزایش و یا عامل کاهش پارامترهای مخزن (تخلخل و تراوایی) باشند. خلل و فرج در مخازن هیدروکربنی از دیدگاه‌های مختلفی تقسیم بندی شده است (مانند طبقه بندی (Archie, 1952; Choquette and Pray, 1970) [۱۸]، [۱۹]). در این تحقیق، به منظور افزایش دقت مدل‌های ساخته شده، سنگ‌های مخزن از دیدگاه نوع خلل و فرج و نحوه ارتباط آنها به ۴ گروه کلی زیر طبقه بندی شده اند:

گروه ۱: شامل ماتریکس یا بخش‌هایی از سنگ مخزن است که تخلخل نسبتاً خوب دارند.

گروه ۲: سنگ‌های دارای خلل و فرج بسته یا پر شده با سیمان، مانند استیلولیت‌ها و شکستگی‌های پر شده با سیمان ثانویه (تخلخل بین صفر تا ۱۰ درصد و نفوذپذیری خیلی پایین).

گروه ۳: شامل سنگ‌های با تخلخل‌های ایزوله و غیر مرتبط (تخلخل‌های غیر مفید) مانند تخلخل‌های مولدیک و واگی (تخلخل بالا و نفوذپذیری بسیار پایین).

گروه ۴: سنگ‌های دارای شکستگی و تخلخل‌های به هم مرتبط (تخلخل نسبتاً پایین و نفوذپذیری عالی).

هدف از تقسیم بندی فوق ارایه یک مدل اولیه بر حسب طبیعت شکاف‌ها به منظور افزایش دقت مدل‌های ساخته شده در مراحل بعدی شامل مدل‌های تخلخل، تراوایی، دانسیته، جهت و شیب شکاف‌هاست. به عنوان مثال، برای مدل‌سازی تراوایی در هر بلوک از مخزن بسته به نوع طبیعت شکاف در آن بلوک از واریوگرام مربوطه استفاده شده است.

در این تحقیق، تمام اطلاعات حاصل از نوع طبیعت شکاف و خلل و فرج براساس اطلاعات مغزه و مطالعه ۱۵۰۰ مقطع نازک

میکروسکوپی از ۱۳ حلقه چاه در میدان مورد مطالعه مشخص شده است. تصاویر نمونه از تقسیم بندی سنگ‌های مخزن بر اساس طبیعت شکاف‌ها در شکل (۱) تا (۴)، نشان داده شده است.

مهم‌ترین مسأله در آنالیز آماری هر جامعه (شکاف)، مشخص کردن ساختار فضایی آن جامعه به کمک ابزار واریوگرام است. براساس تئوری روش‌های شبیه سازی شرطی شاخص به منظور ارزیابی پارامترهای ناپیوسته می‌بایست یک طبقه بندی مجزا براساس خصوصیات شکستگی از نظر زمین شناسی انجام شود. براین اساس، چهار طبقه بندی مزبور به صورتی تعریف شده است که کد صفر، بیانگر ماتریکس یا به عبارتی عدم حضور شکاف؛ کد یک، بیانگر شکاف از نوع بسته (استیلولایت و شکستگی‌های بسته) که میزان نفوذپذیری آن تقریباً صفر است، کد دو، بیانگر حفره^{۱۳} از خانواده شکاف با میزان تخلخل بالا و نفوذپذیری پایین و در نهایت، کد سه، بیانگر شکاف از نوع باز که مکانیزم اصلی تولید مخازن به عهده این نوع شکاف‌هاست.

بنابراین، براساس مطالعه ۱۳ حلقه چاه حاوی اطلاعات مغزه، ساختار فضایی (واریوگرام) طبیعت شکاف در مدل برای هرکدام از طبقه بندی به صورت مجزا براساس فاصله طولی ثابت مطابق با ابعاد بلوک معین شد. نتایج این ارزیابی در شکل (۵)، نشان داده شده است. در ادامه، با بهره گیری از تکنیک شبیه سازی شرطی شاخص، توزیع آن در کل میدان شبیه سازی شد. نتایج این ارزیابی بر مبنای بهترین نسخه در شکل (۶)، نشان داده شده است.

بر مبنای تئوری تحلیل ساختاری، متغیرهای ناحیه ای پس از شبیه سازی، نسخه های تولید شده از آن باید بتوانند هیستوگرام توزیع پارامترها را دوباره تولید کند (شکل ۷).

۶-۲-۲ ارزیابی دانسیته و جهت شکاف‌ها

مهم‌ترین اطلاعاتی که از تفسیر نمودارهای تصویری به دست می‌آیند، شامل آزیموت، شیب و دانسیته شکاف‌ها (تعداد شکستگی‌های موجود در واحد حجم) است.

در این مطالعه، با استفاده از اطلاعات لاگ تصویری، برای ۶ حلقه چاه و اطلاعات مغزه، دانسیته و آزیموت و شیب شکاف‌ها با استفاده از نرم افزار BorTex ارزیابی شده است. یک حلقه چاه علاوه بر شش حلقه به منظور اعتبار بخشیدن به مدل، استفاده شده است.

نتایج این تفسیر برای نمونه در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است. در این شکل، دنباله جهت دار، بیانگر آزیموت شکاف، موقعیت و محل قرار گیری Tadpole با توجه به مقیاس

صفر تا ۹۰ درجه، بیانگر شیب شکاف و توزیع Tadpole با توجه به عمق، نشان دهنده دانسیته شکاف است.

آنچه که در مدل سازی مخازن شکافدار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، نحوه توزیع این شکافها در کل میدان می باشد. چرا که توزیع شکافها ارتباط بسیار زیادی به نحوه اعمال تنش‌های تکتونیکی در منطقه دارد. بر اساس تفسیرهای انجام شده در این میدان، تنش تکتونیکی وارد شده به میدان در جهت شمال غرب- جنوب شرق است؛ لذا این توزیع تنش باعث به وجود آوردن شکافهایی در جهت عمود بر تنش میدان خواهد شد. مطمئناً توزیع این شکافها آزمون شمال شرق- جنوب غرب شکل خواهد گرفت. شکل (۱۰)، توزیع استریونت آزمون و شیب شکافها را به خوبی نمایش می دهد.

نکته حائز اهمیت، استفاده زمین آمار در تخمین شیب سازی توزیع پارامتر شکاف (دانسیته، آزمون و شیب) و نحوه به کار گیری اثر شکافها بر روی نفوذپذیری است، که به بررسی آن خواهیم پرداخت.

عموماً، متغیرهایی که در زمین آمار با آن سر کار خواهیم داشت از نوع متغیرهای ناحیه ای است که حالت تصادفی و قالب فاصله‌ای داشته باشد. بنابراین، موضوع رفتار تصادفی متغیرها در زمین آمار از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به اهمیت تکتونیک منطقه، دانسیته شکافها می تواند نرخ تغییرات وسیعی در جهت عمود بر تنش را متحمل شود. به عبارت دیگر، دانسیته شکاف همانند توزیع تخلخل، متغیر ناحیه ای با قالب فاصله‌ای محسوب می شود؛ لذا می توان توزیع دانسیته شکافها را با استفاده از روشهای زمین آماری شیب سازی کرد. نتایج این تحقیق، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می دهد.

این موضوع در مورد شیب شکافها کمی متفاوت تر خواهد بود؛ چرا که شیب شکافها ارتباط مستقیم با تکتونیک منطقه خواهد داشت. برای نمونه، نرخ تغییرات شیب شکافهای این میدان در فاصله ۳۵ تا ۷۵ درجه در نوسان است، به طوری که در این بازه هر مقداری را می تواند به خود اختصاص دهد. در نتیجه، در بازه ۳۵ تا ۷۵ درجه، شیب شکاف می تواند توزیع تصادفی و قالب فاصله ای به خود گیرد (هر چه نقاط نزدیک تر به هم شباهت پذیری بیشتر و نقاط دورتر شباهت پذیری کمتر). موضوع آزمون کمی پیچیده تر است. همان طوری که در شکل (۱۰)، مشاهده می شود، نرخ تغییرات آزمون در دو بازه ۶۰-۳۵ (شمال غرب-شمال شرق) و ۱۸۰-۲۴۰ (جنوب شرق) در نوسان است؛ بنابر این، در مرحله اول به جداسازی بلوک- های حاوی شکاف در این دو بازه نیاز است. این کار با تعریف بسیار ساده دو کد صفر و ۱ (کد صفر نماینده بلوکهای

شکافدار در بازه ۶۰-۳۵ و کد ۱ نماینده شکافها در بازه ۱۸۰-۲۴۰) قابل تصحیح است. با استفاده از روش شیب سازی شرطی شاخص محدوده دو بازه آزمون در کل بلوکهای حاوی شکاف، شیب سازی می شود.

به منظور شیب سازی آزمون به یک تغییر متغیر در بازه ۶۰-۳۵ به منظور همگن سازی و پیوستگی متغیر آزمون نیاز است. با استفاده از تغییر متغیر $\alpha_{correct} = \alpha / 360$ ، که α بیانگر آزمون شکاف در یک واحد حجمی از بلوک مدل زمین شناسی است، به صورت جداگانه به بررسی تغییرات آزمون شکاف با استفاده از روش شیب سازی شرطی گوسین می پردازیم. بعد از مشخص شدن توزیع آزمون در دو بازه، دو مدل با هم ترکیب می شود و یک مدل واحد از توزیع آزمون در بلوکهای حاوی شکاف به دست می آید. ذکر این مطلب ضروری است که در تمام مراحل شیب سازی پارامترهای شکاف (شدت، آزمون و شیب)، آنالیز فقط بر روی بلوکهای حاوی شکاف شیب سازی در یک مرحله قبل از آن به کمک شیب سازی شرطی شاخص، انجام می شود.

بعد از مشخص شدن ساختار فضایی دانسیته، آزمون و شیب شکاف شکل (۱۱) تا (۱۳)، با بهره گیری از روشهای شیب سازی شرطی نرمال، توزیع پارامترهای دانسیته، آزمون و شیب در فضای بین چاهها در کل میدان ارزیابی می شود. نتایج این ارزیابی بر مبنای بهترین نسخه در شکل (۱۴) تا (۱۶) نشان داده شده است.

۷- تبدیل دانسیته و جهت شکافها به ضریب

گذردهی

در این تحقیق، یک با معرفی یک تابع جدید به نام فاکتور اثر شکاف^{۱۱}، تأثیر مدل دانسیته، شیب و جهت شکافها بر روی نفوذپذیری، با یک ضریب گذردهی برای هر یک از مجموعه شکافهای هر بلوک مشخص شده است.

تابع مزبور در سه جهت فضایی (دو جهت افقی و یک جهت عمودی) قادر به محاسبه تصحیح ضریب گذردهی برای شکافهای هر بلوک به صورت زیر است:

$$FEF_x = 1 + A \frac{\ln(N_f + 1)}{\ln(N_{f_{max}} + 1)} + B \sin(\pm\alpha) \cdot \sin \gamma$$

$$FEF_y = 1 + A \frac{\ln(N_f + 1)}{\ln(N_{f_{max}} + 1)} + B \cos(\pm\alpha) \cdot \sin \gamma$$

$$FEF_z = 1 + A \frac{\ln(N_f + 1)}{\ln(N_{f_{max}} + 1)} + B \sin \gamma$$

در رابطه های بالا، FEF_x فاکتور اثر شکاف در جهت X،

FEF_y فاکتور اثر شکاف در جهت Y و نهایتاً FEF_z فاکتور اثر شکاف در جهت Z است.

این ضرایب از یک مقدار حداقل یک برای ماتریکس یا عدم حضور شکاف تا یک مقدار ماکزیمم مربوط به حضور شکاف تغییر می کند. در رابطه های بالا، N_f دانسیته شکاف (تعداد شکستگی های موجود در واحد حجم بلوک مدل زمین شناسی)، N_{fmax} ماکزیمم دانسیته شکاف (ماکزیمم تعداد شکستگی های موجود در واحد حجم بلوک مدل زمین شناسی)، α آزمون شکاف و γ شیب شکاف در هر بلوک است.

ضرایب A و B، از طریق برازش مناسب بین داده های واقعی چاه و نتایج شبیه سازی دینامیکی با تاریخچه تولید، بهینه سازی می شود.

طبق بهینه سازی انجام شده در مطالعه این میدان، ضریب A حدوداً ۱/۶ و ضریب B حدوداً ۱/۲ معین شد.

معادلات مزبور به روشنی تأثیر پارامترهای جهت، شیب و دانسیته شکستگی ها را روی ضریب گذردهی نشان می دهند؛ مثلاً هر چه شکستگی های قائم در مخزن غالب باشند (γ به ۹۰ درجه نزدیک باشد) تأثیر تابع FEF_z در محاسبه ضریب تراوایی بیشتر از توابع FEF_x و FEF_y است. برعکس هرچه شکستگی های افقی بیشتر باشند (γ به صفر درجه نزدیک باشد) توابع FEF_x و FEF_y در محاسبه ضریب گذردهی نقش بیشتری دارند. نقش آزمون شکاف ها بیشتر در محاسبه FEF_x و FEF_y است.

در نهایت با استفاده از توابع معرفی شده مزبور برای هر بلوک حاوی شکاف، فاکتور اثر شکاف محاسبه شده است.

۸- مدل سازی تخلخل و نفوذپذیری

پارامترهای اصلی؛ که در این تحقیق بررسی شدند، شامل تخلخل و نفوذپذیری هستند. تخلخل و نفوذپذیری در طبقه بندی های متغیرهای زمین آماری جزء متغیرهای ناحیه ای پیوسته محسوب می شوند.

در این مطالعه، برای به دست آوردن دیدگاه واقع بینانه تری از توزیع فضاهای خالی در مخزن مورد مطالعه، مدل ماهیت شکافها برای بهبود مدل تخلخل استفاده شده است. به این مفهوم که واریوگرام های توزیع تخلخل با توجه به مدل ماهیت شکافها به دست آمده است. واریوگرام های افقی و قائم برای تخلخل های مربوط به ماتریکس، استیلولیت، واگ و شکستگی به طور جداگانه ای محاسبه شده است (۴ بیضوی واریوگرام). سپس به منظور تخمین تخلخل در هر بلوک مخزن با توجه به مدل طبیعت شکافها از واریوگرام مربوطه استفاده شده است. بر اساس نتایج لاگ های پتروفیزیکی تخلخل و

استفاده از شبیه سازی شرطی نرمال، ۳۰ نسخه از توزیع تخلخل در کل فواصل مخزنی شبیه سازی شد. شکل (۱۷)، یکی از بهترین نسخه ها است که بیانگر رفتار واقعی مخزن است.

در مدل سازی نفوذپذیری، اساساً از مقادیری که به وسیله آنالیز مغزه به دست آمده بودند، استفاده شد. داده های تراوایی برای ۱۳ حلقه چاه از مخزن مورد مطالعه در دسترس بودند. در میدان مورد مطالعه در مرحله اول یک مدل ساده از تراوایی در مخزن مورد مطالعه با استفاده از روش شبیه سازی شرطی گوسین ساخته شد. در مرحله بعد، مدل ماهیت شکافها با مدل تراوایی تلفیق شد تا مدل تراوایی در بخش های دارای شکستگی بهبود یابد؛ بنابراین بلوک های حاوی شکاف از مدل ماهیت شکافها جدا شد تا تنها بخش های دارای شکستگی در مدل تراوایی تأثیر داده شوند؛ سپس در بلوک های دارای شکاف مقدار ضریب گذر دهی در دو جهت افقی و قائم برای تراوایی محاسبه شد و بدین وسیله مدل تراوایی اولیه به روز شده است.

بر مبنای تئوری آمار، ۲۰ نسخه هم احتمال با توزیع متفاوت شبیه سازی شد. شکل (۱۸) تا (۲۰)، یکی از معتبرترین نسخه های تولید شده با اعمال ماهیت پارامترهای شکاف بر مبنای تئوری تحلیل ساختاری است.

۸-۱- شبیه سازی جریان سیال

به منظور مقایسه مدل های تخلخل دوگانه^{۱۰} (مدل استاتیک آن از نوع قطعیت پذیر) و مدل تخلخل واحد^{۱۱} (مدل استاتیک آن از نوع آماری)، نرم افزار Eclipse استفاده شد. شکل های (۲۱) تا (۲۶) نرخ تولید میعانات و تغییرات فشار مخزن گازی میعانی در یک بازه ۱۸ ساله را نشان می دهد.

در این شبیه سازی، هدف ما تطبیق تاریخچه با نتایج شبیه سازی نبوده است؛ بلکه هدف فقط مقایسه میزان تولید و تغییرات فشار بین مدل های استاتیکی زمین آماری به کمک مدل دینامیکی تخلخل واحد و مدل های استاتیکی عمومی و مدل جریان تخلخل دوگانه با در نظر گرفتن شرایط یکسان اولیه مخزن است.

همانطور که مشاهده می شود، مدل تخلخل واحد در بازه تاریخچه تولید، رفتار واقعی مخزن را بخوبی نشان می دهد؛ در صورتی که مدل تخلخل دوگانه، این رفتار را بخوبی از خود نشان نمی دهد و به تعدیل بر روی توزیع پارامترهای مخزن نیاز دارد. نتایج نشان داده شده بعد از اعمال تعدیلات می باشد.

امامطلب دیگر این است که، اختلاف این دو مدل بعد از تاریخچه تولید و فشار (۲۰۰۴) شروع شده که کاهش تولید و افزایش افت فشار در مدل تخلخل دوگانه نسبت به مدل تخلخل

۱- مراجع

Nam H. Tran; Zhixi Chen; Sheik S. Rahman; "Integrated conditional global optimization for discrete fracture network modeling", ELSEVIER, 2005

Colin, D; Dietmar, M; "Characterization and modeling of fractured reservoirs (Static Model)", Roxar Limited, London, 2004

Ponting D.; "Characterization and modeling of fractured reservoirs (Flow Simulation)", proc 9th European Conference on the Mathematics of oil recovery, cannes, Sept 2004

Luis Guerreiro; Antonio Costa Silva; "Integrated Reservoir Characterisation of a Fractured Carbonate Reservoir", SPE58995, 2000 .

Knipe, R. J.; Jones, G; Fisher, Q.J.; "fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs", Geological Society, London, Special Publications, 147, vii-xxi, 1998

Deutsh, Clayton V.; Journel, André G.; "GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide", second edition, Oxford University Press, 1998.

Soares; Amilcar; "Sequential Indicator Simulation with Correction for Local Probabilities", Mathematical Geology, Vol. 30, No.6, 1998.

Goovaerts, P.; "Stochastic Simulation of Categorical Variables Using a Classification Algorithm and Simulated Annealing", Mathematical Geology, Vol. 28, No. 7, 1996

Guo, G.; Evans, R.D.; "Geologic and Stochastic Characterisation of Naturally Fractured Reservoirs", SPE 27025, 1994

Townsend, C.; Firth, I. R.; Westerman, R.; "Small seismic-scale fault identification and mapping", Geological Society, London, Special Publications, 147, 1-25

Guerreiro, L.; "Permeability Simulation in Poor Sampling Conditions", SPE49451, 1998

Walsh, J.J.; Watterson, J.; Heath, A.; Gillespie, P.A.; Childs, C.; "Assessment of the effects of sub-seismic faults on bulk permeabilities of reservoir sequences", Geological Society, London, Special Publications, 127, 99-114.

Abrahamsen, P.; geland, T., Lia; O., Omre, H.; "An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures," SPE24276, 1992.

Samson, P. ; Dubrule, O. ; Euler, N. ; "Quantifying the impact of structural uncertainties on gross-rock volume estimates", SPE 35535, 1996

Floris, F.J.T. ; Peersmann, M.R.H.E.; "Uncertainty estimation in volumetrics for supporting hydrocarbon E&P decision making", J. of Petroleum Geoscience, Vol 4, No1, pp3 -40, 1998

Deutsch, C.; Journel, A.; "GSLIB: Geostatistical Software Library", published by Oxford University Press, New York, NY, 1992

Warren, J.E. ; Root P.J.; "The behavior of naturally fractured reservoirs", SPE Journal, 1963

Archie, G.E.; "Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical consideration", AAPG Bulletin, v. 36 p. 278-298, 1952

واحد قابل توجه است. بر مبنای چند حلقه چاه جدید حفاری شده در سال ۲۰۰۷ و مقایسه میزان تولید این چاه‌ها با مدل‌های شبیه سازی مشخص شد مدل تخلخل واحد به کمک تکنیک‌های زمین آماری رفتار واقعی مخازن را بهتر نشان می‌دهد.

هدف ما در این تحقیق، رد نظریه‌های کاربرد مدل تخلخل دوگانه در مخازن شکافدار نیست. بلکه با بهینه سازی پارامترهای مخزن و استفاده از مدل تخلخل واحد، علاوه بر صرفه جویی زمان و کاهش هزینه‌های گزاف، می‌توان به رفتار واقعی مخزن دست یافت.

۹- نتیجه گیری

❖ پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری به عنوان دو پارامتر ارزیابی مخزن بر پایه تئوری های آمار و احتمالات با در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در رفتار مخزن با استفاده از روش‌های SIS, SGS به صورت استاتیکی مدل-سازی شده است.

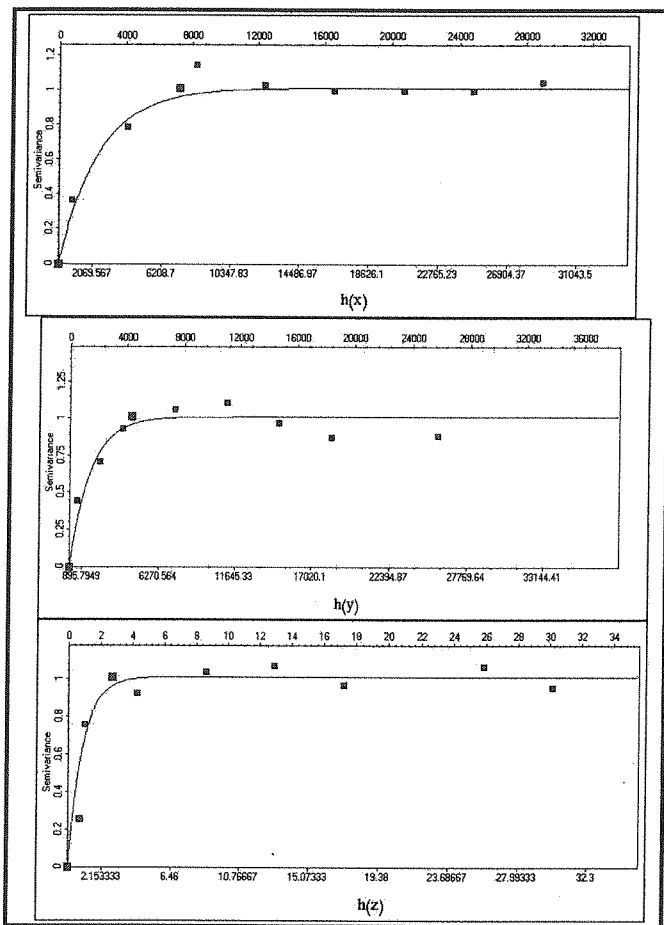
❖ توزیع تخلخل و نفوذپذیری، یکی از پارامترهای مهم در مخازن شکافدار محسوب می‌شود. حضور شکاف در مخازن با تخلخل پایین و منجر به افزایش نفوذپذیری می‌شود (چرا که شکاف در مخزنی که تخلخل پایین باشد، اتفاق می‌افتد). در این مطالعه، با استفاده از روش‌های شبیه سازی شرطی شاخص، توزیع طبیعت شکاف‌ها با استفاده از اطلاعات مغزه و مقاطع نازک ارزیابی شد و به عنوان کنترل کننده ناهمسان‌گردی پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری به کمک ابزار واریوگرام (ساختار فضایی) منظور می‌شود.

❖ توزیع و دانسیته شکاف‌ها با استفاده از روش‌های SGS, SIS بررسی شد و با توجه به اهمیت این پارامتر در ارزیابی مخازن و تأثیر بسیار زیاد آن بر روی نفوذ پذیری به عنوان یکی دیگر از پارامترهای دخیل در ارزیابی مخازن نفت و گاز استفاده می‌شود.

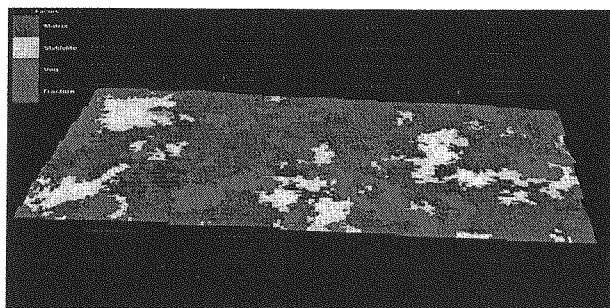
❖ یک تابع بهینه مناسب به منظور اندازه گیری اثر شکاف روی رفتار جریان سیال در مخزن معرفی شده است.

❖ با دسته بندی و اعمال مدیریت صحیح می‌توان نقش موثر شکاف‌ها در مدل‌های مخزن را ارزیابی کرد.

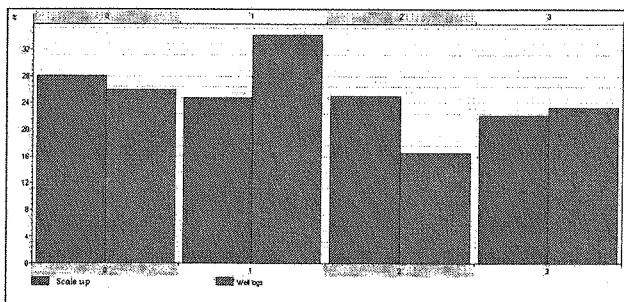
❖ نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که بهینه سازی پارامترهای مخزن، توزیع شکاف‌ها و استفاده از مدل‌های تخلخل واحد می‌تواند رفتار واقعی مخازن را با حجم محاسبات کمتر بخوبی نشان دهد.



شکل (۵): ساختار فضایی طبیعت شکاف در سه جهت z, y, x



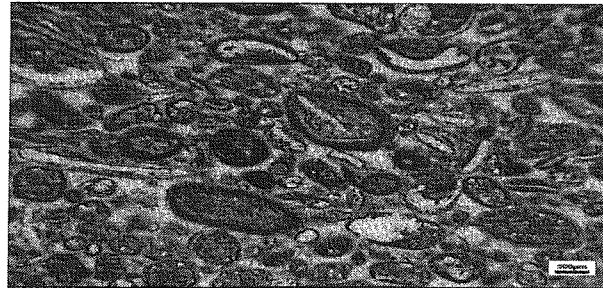
شکل (۶): مدل سه بعدی طبیعت شکاف ها



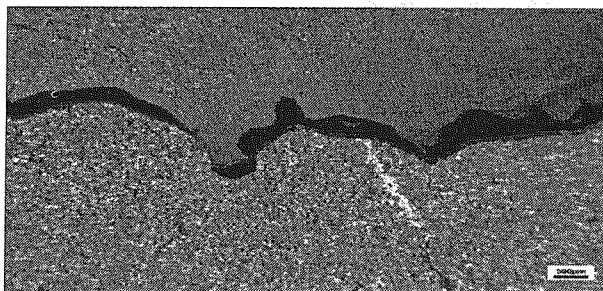
شکل (۷): نتایج Scale Up و Well log هیستوگرام طبیعت شکاف ها بر اساس چهار طبقه بندی ماتریکس با کد صفر، استیلولایت با کد یک، حفره یا واگ با کد دو و شکاف با کد سه

Choquette, P.W; Pray, L.C.; "Geologic nomenclature and classification of Porosity in sedimentary carbonates", AAPG Bulletin, v.54 p. 207-250, 1970. [۱۹]

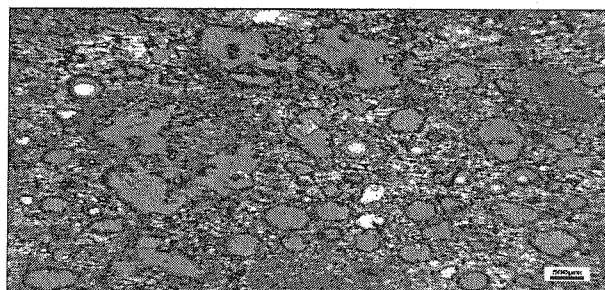
Kazemi; "Improvements in Simulation of Naturally Fractured Reservoirs", SPE Paper 10511, Texas, USA 1983. [۲۰]



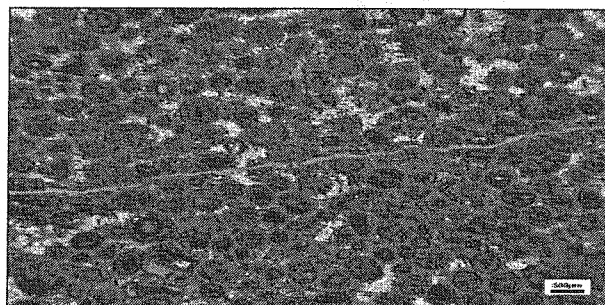
شکل (۱): مقطع نازک از ماتریکس با مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



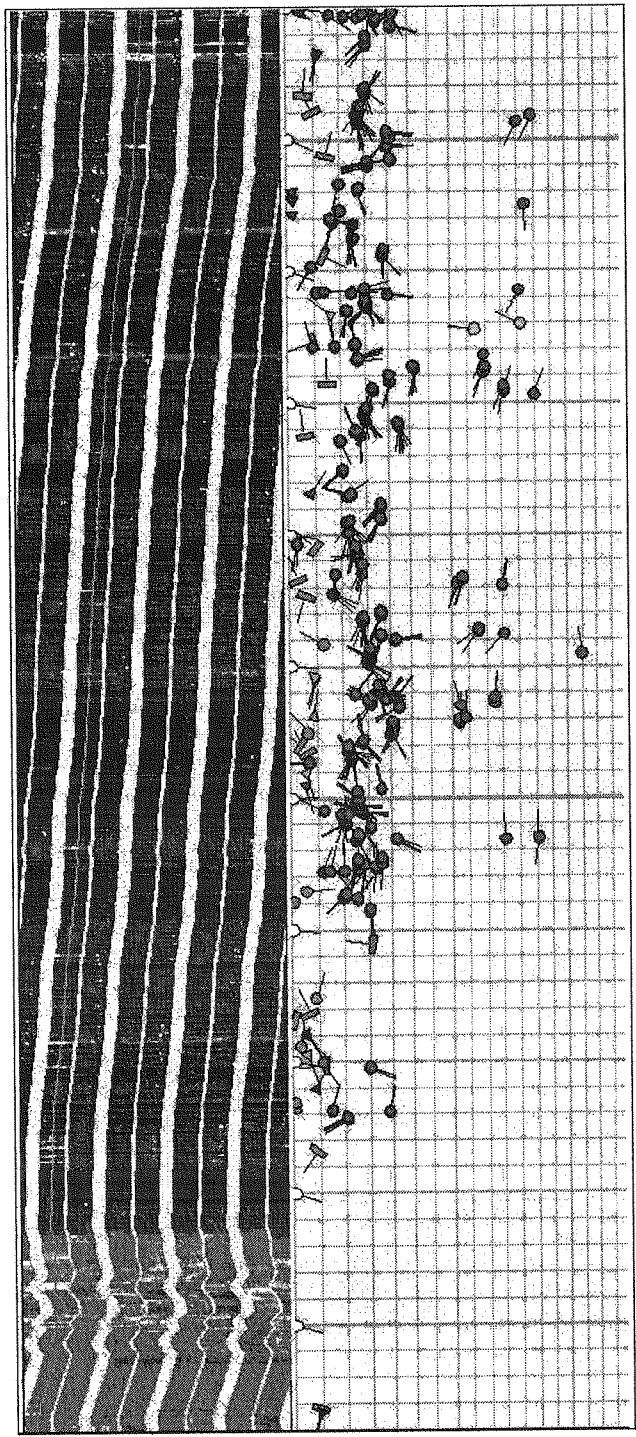
شکل (۲): مقطع نازک از استیلولایت با مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



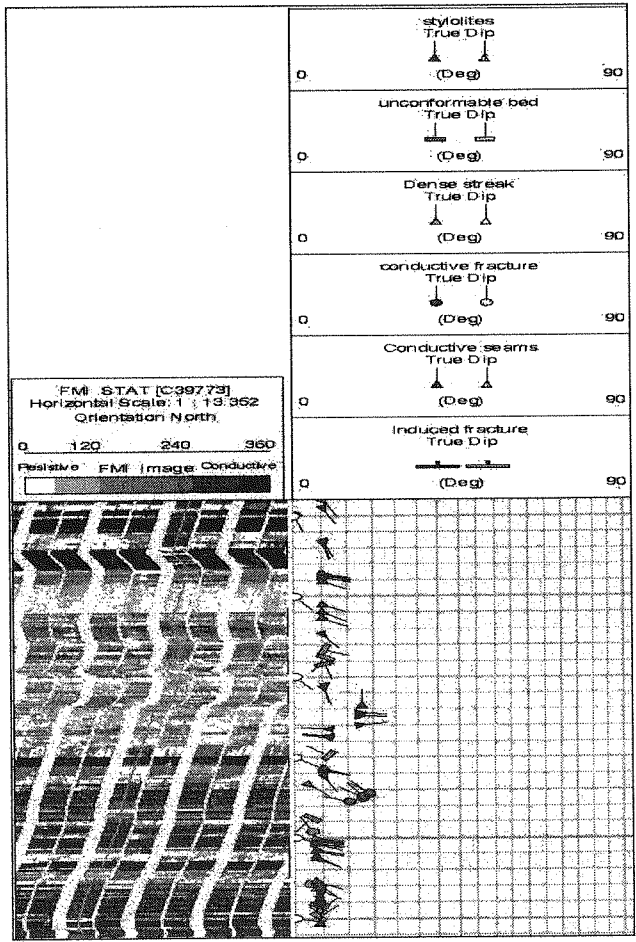
شکل (۳): مقطع نازک از واگ با مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



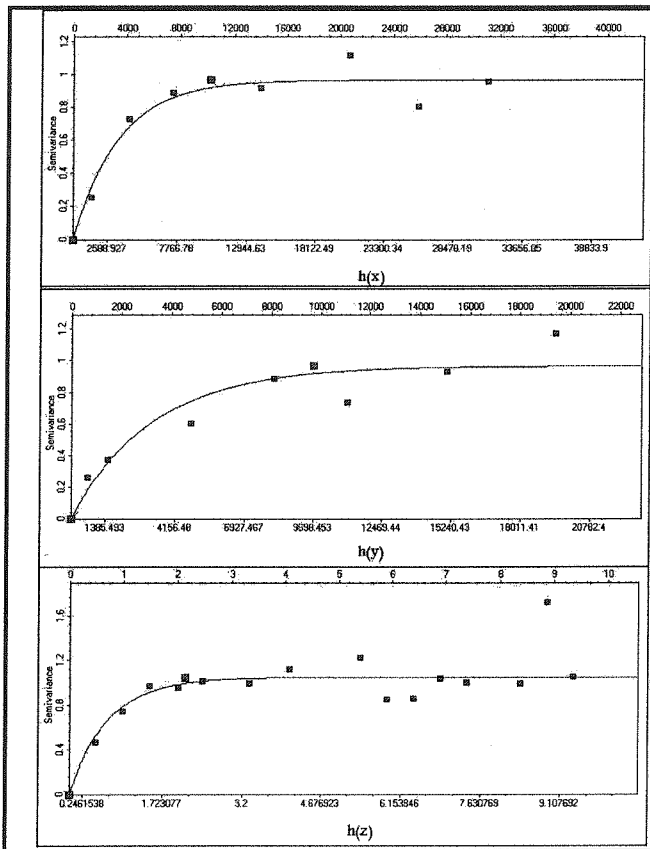
شکل (۴): مقطع نازک از شکاف با مقیاس ۵۰۰ میکرومتر



شکل (۹): نتایج آنالیز لاک تصویری دانسیته، آزیموت و شیب شکاف (ادامه)



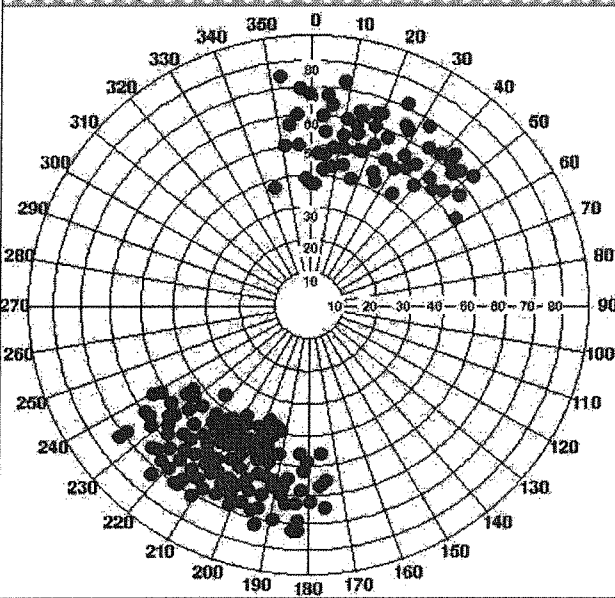
شکل (۸): نتایج آنالیز لاک تصویری دانسیته، آزیموت و شیب شکاف [SNPC]



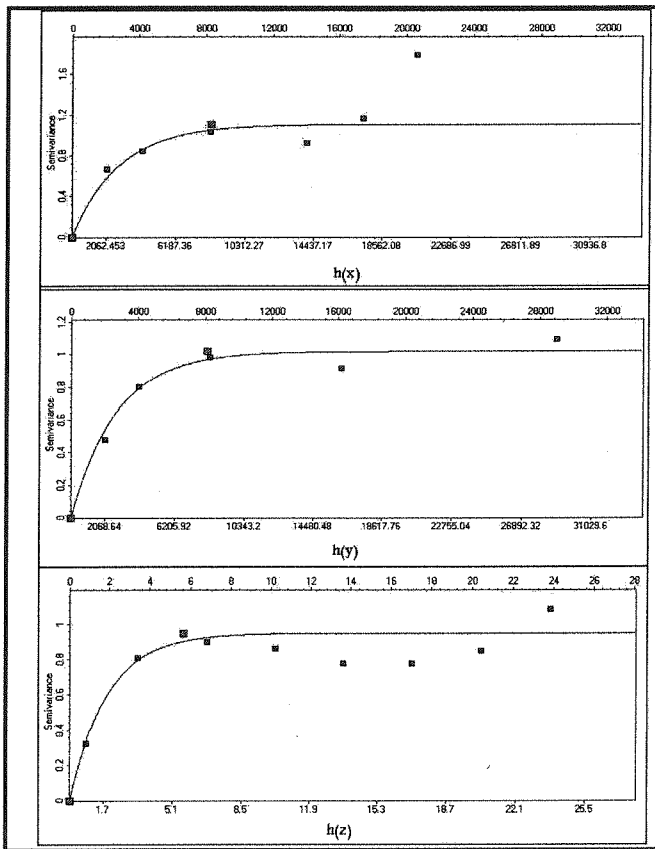
شکل (۱۲): واریوگرام شیب شکاف در جهت z, y, x

SetName	Nb of Dips	Great Circle (Dip & Azimuth)	Mean Orientation (Dip & Azimuth)
conductivefrac...	40	0.0/108.0	89.4/198.0

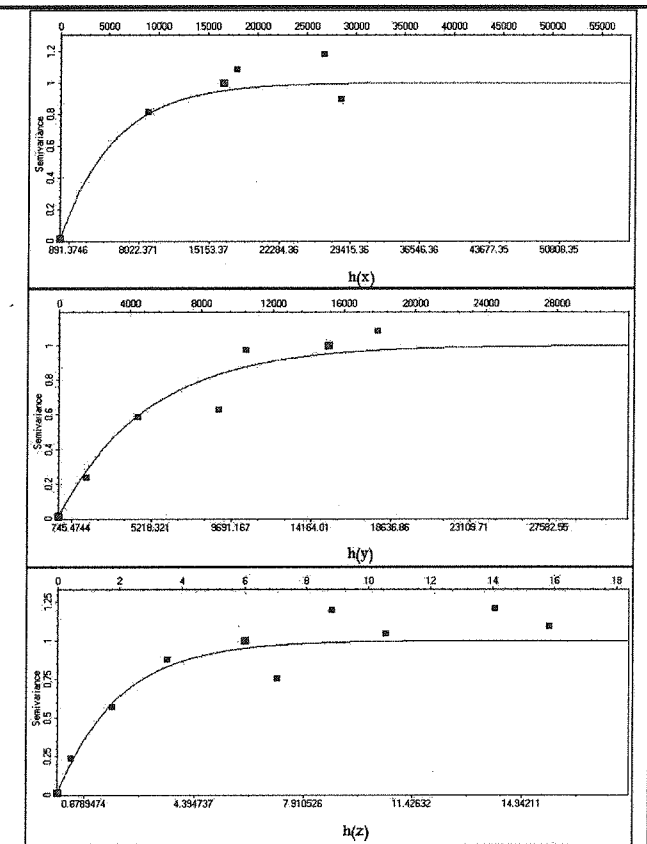
Center : 0 deg. Outer Edge : 90 deg.
Reference: True Object Representation: Plane



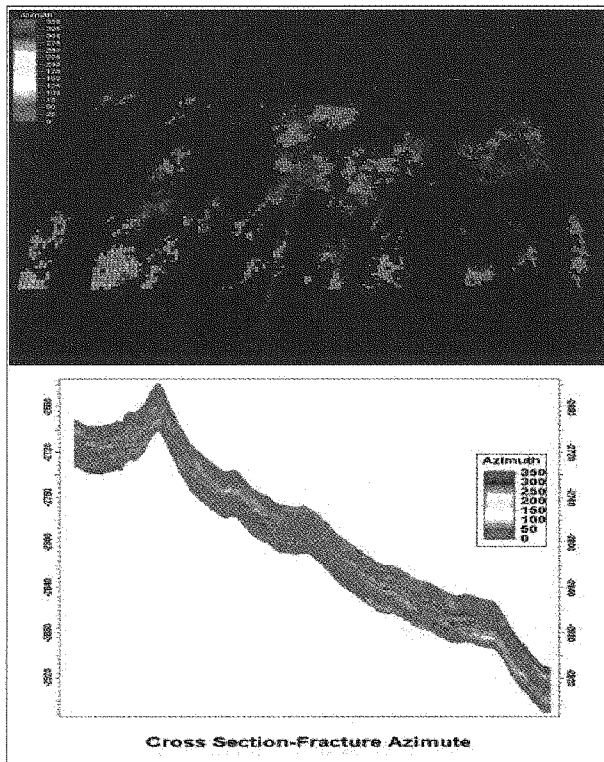
شکل (۱۰): نمودار استریونت توزیع آزمون و شیب شکاف بر اساس ابعاد حجمی مدل زمین شناسی



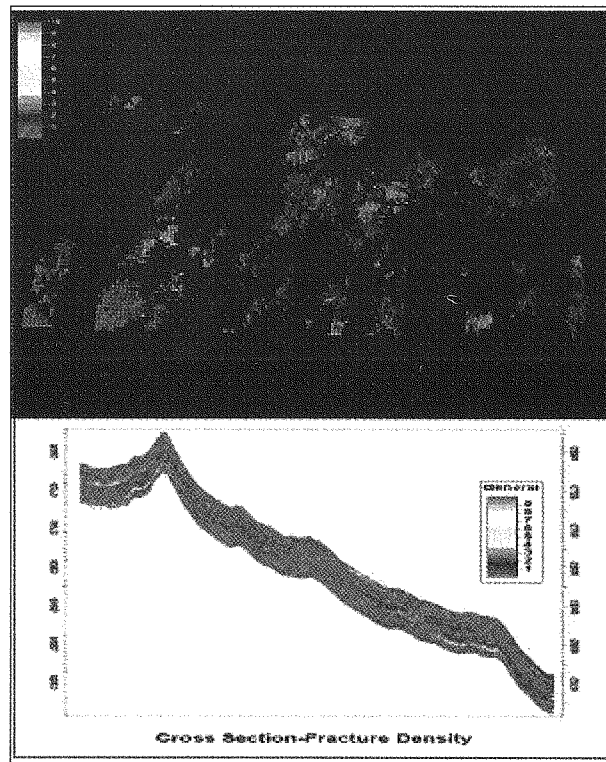
شکل (۱۳): واریوگرام آزمون شکاف در جهت z, y, x



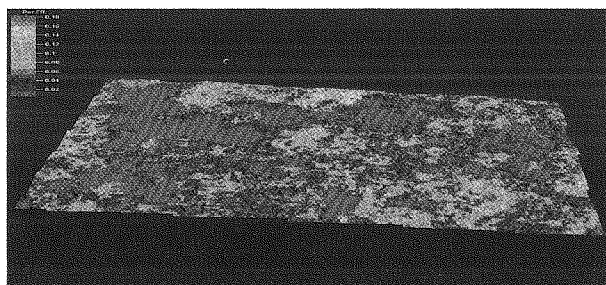
شکل (۱۱): واریوگرام دانسیته شکاف در جهت z, y, x



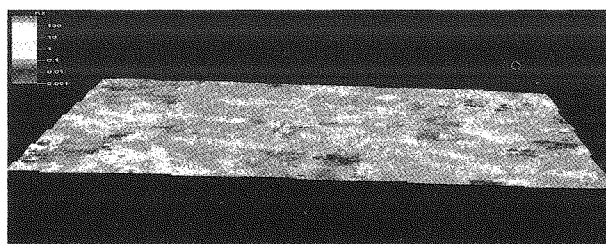
شکل (۱۶): مدل سه بعدی توزیع آزیموت شکاف و مقطع عرضی از آن



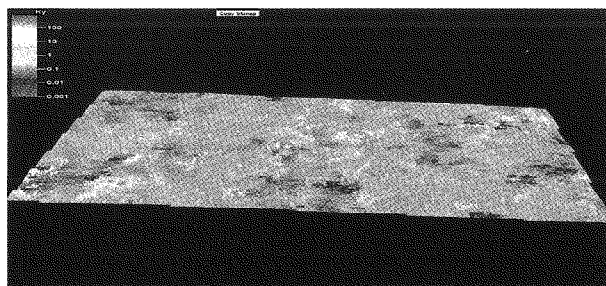
شکل (۱۴): مدل توزیع سه بعدی دانسیته شکاف و مقطع عرضی از آن



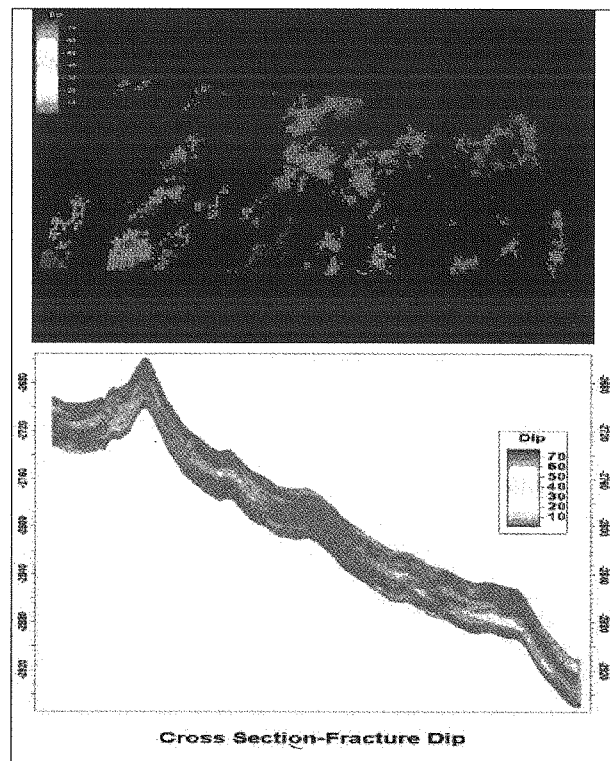
شکل (۱۷): مدل سه بعدی توزیع تخلخل



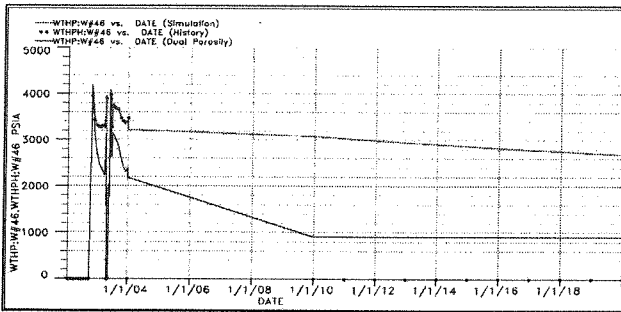
شکل (۱۸): مدل سه بعدی توزیع نفوذپذیری در جهت X



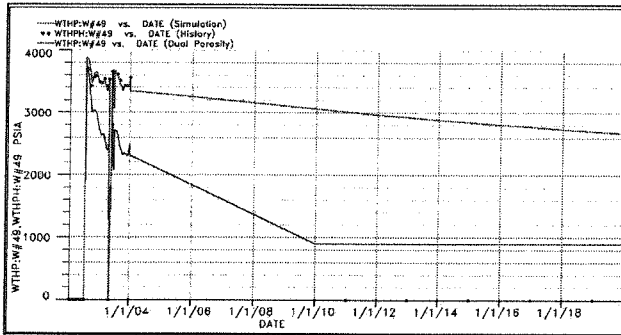
شکل (۱۹): مدل سه بعدی توزیع نفوذپذیری در جهت Y



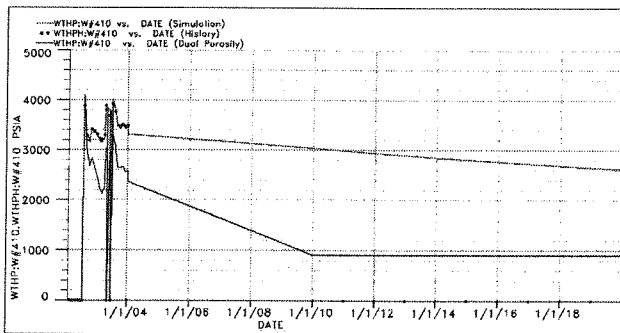
شکل (۱۵): مدل سه بعدی توزیع شیب شکاف و مقطع عرضی از آن



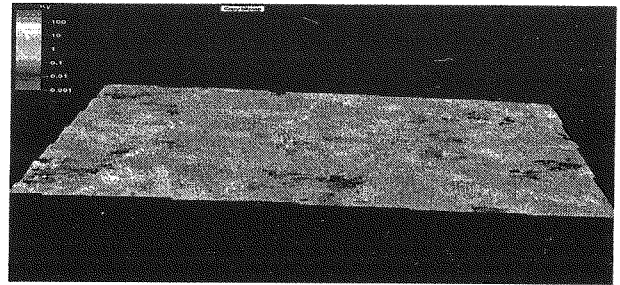
شکل (۲۴): مقایسه شبیه سازی تغییرات فشار بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۶ میدان F



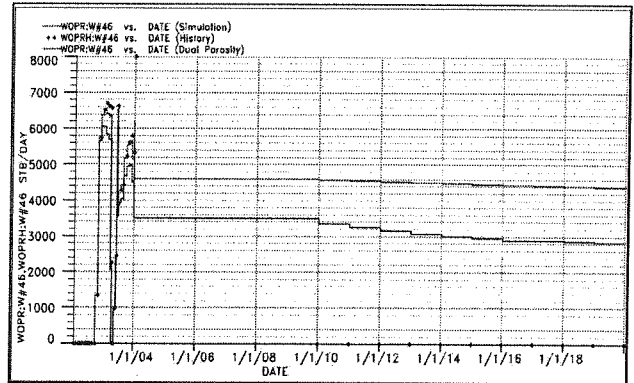
شکل (۲۵): مقایسه شبیه سازی تغییرات فشار بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۹ میدان F



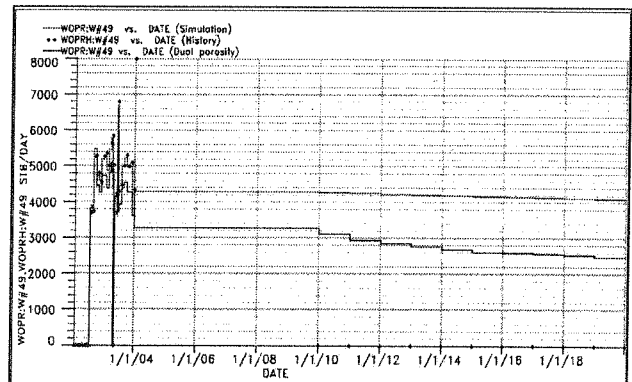
شکل (۲۶): مقایسه شبیه سازی تغییرات فشار بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۱۰ میدان F



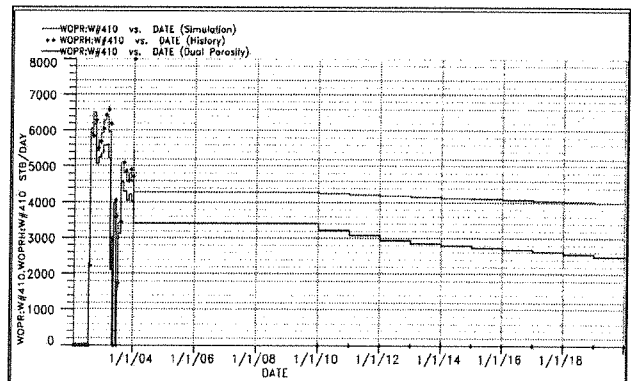
شکل (۲۰): مدل سه بعدی توزیع نفوذپذیری در جهت Z



شکل (۲۱): مقایسه شبیه سازی میزان تولید نفت (میعانات) بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۶ میدان F



شکل (۲۲): مقایسه شبیه سازی میزان تولید نفت (میعانات) بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۹ میدان F



شکل (۲۳): مقایسه شبیه سازی میزان تولید نفت (میعانات) بین مدل تخلخل دوگانه و تخلخل واحد در چاه شماره ۴۱۰ میدان F

۱۱- زیر نویس ها

- 1 Fracture Micro Image
- 2 Fracture distribution
- 3 Geostatistic
- 4 Fracture Micro Image
- 5 Conditional Simulation
- 6 Condition
- 7 Long-range
- 8 Spatial Structure
- 9 Lag Distance
- 10 sequential simulation
- 11 Random
- 12 Productivity Well Index
- 13 Vug
- 14 Fracture Effect Factor
- 15 Dual Porosity
- 16 Single Porosity