

استفاده از روش‌های زمین‌آماری در تخمین و درونیابی تخلخل و تراوایی مخازن نفتی

مسین ذکریپور رودپشتی*^۱، محمد موسوی رومبفش^۲، علی امیری^۱ و محمد سعید مسین‌زاد^۳

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرنند، fariad_84@yahoo.com

(۲) مدیریت اکتشاف شرکت نفت کندوکاو

(۳) شرکت ملی نفت خزر، اکتشاف نفت

(* عهده‌دار مکاتبات)

تاریخ دریافت: ۹۰/۲/۳۰؛ تاریخ دریافت اصلاح شده: ۹۰/۶/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۲۵؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۶/۳۰

پیکیده

توزیع تخلخل و تراوایی در مخازن نفتی برای انجام مطالعات شبیه‌سازی دینامیکی مخزن و پیش‌بینی سناریوهای مهم تولید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با استفاده از روش کریجینگ (Kriging)، توزیع تخلخل و تراوایی با استفاده از اطلاعات ۳ چاه در یکی از میدان‌های نفتی ایران تخمین زده شد. مسیر تحقیق شامل دو بخش مطالعات زمین‌آماري و بخش شبیه‌سازی است. با استفاده از خصوصیات پتروفیزیکی به‌دست آمده از مغزه چاه‌های مورد مطالعه، محاسبات اولیه زمین‌آماري توسط نرم‌افزار متلب (Matlab) انجام و تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه تخمین زده شد. در ادامه، برای افزودن عدم قطعیت به داده‌های به‌دست آمده از روش کریجینگ (Kriging)، از روش اضافه باقیمانده تصادفی (Random Residual Addition, RRA) استفاده و نتایج تخمین به صورت تصویرهای گرافیکی نمایش داده شد. تخلخل و تراوایی در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین ۱۰/۵۱ درصد و ۱۶۵ میلی‌داری (mD) محاسبه شد. بررسی و مقایسه نتایج به‌دست آمده با آزمایشات سرچاهی و نمودارهای هرزروی گل حفاری، نشان داد که روش به‌کار رفته دقت بالایی داشته و می‌توان با تکیه بر روش‌های محاسباتی، برای پیش‌بینی رفتار مخزن در تولید، از آن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، کریجینگ، تراوایی، تخلخل.

۱- مقدمه

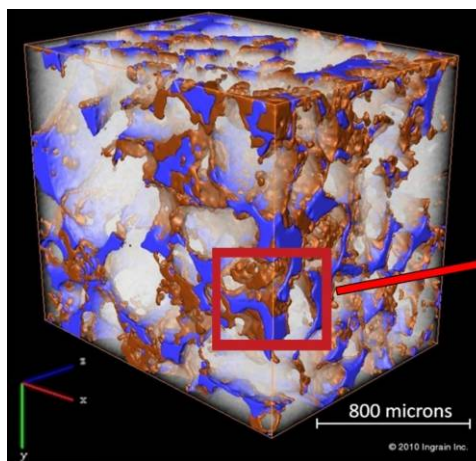
تخلخل و تراوایی در مخازن نیز جزو این موارد بوده و این پارامترها تحت تاثیر ناهمگنی مخزن می‌باشند (Grader et al. 2009). تعیین و تخمین توزیع تخلخل و تراوایی، همواره در محاسبه ذخیره در جای هیدروکربن، بررسی تغییرات رخساره، برنامه‌ریزی بهینه جهت توسعه میدان‌های نفتی، کاهش ریسک، همچنین حفر تعداد کمتری چاه

اندازه‌گیری و کمیت‌های مرتبط با تمام پدیده‌ها را می‌توان از دو دیدگاه قطعیت‌پذیر و احتمال‌پذیر مورد بررسی قرارداد (حسنی‌پاک ۱۳۷۷). بیشتر پدیده‌های طبیعی و تجربی، پدیده‌هایی هستند که عدم قطعیت در کمیت‌های مربوط به آن‌ها قابل مشاهده است. توزیع

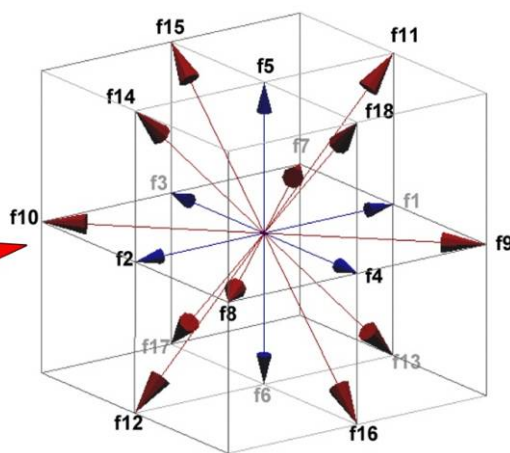
اکتشافی و استخراجی و در نتیجه کاهش هزینه‌های حفاری اهمیت زیادی دارد (Jensen et al. 2000). باتوجه به اهمیت ویژه خصوصیات پتروفیزیکی، می‌توان با استفاده از روش‌های زمین آماری، مشکلات موجود را حل کرد. آمار و احتمالات زمین آمار، شاخه‌ای از آمار است که برخلاف آمار کلاسیک موقعیت فضایی جامعه آماری را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. این علم راهکاری جدید برای در نظر گرفتن پیوستگی فضایی همراه با وابستگی یک کمیت به آمار مربوطه ارائه می‌کند. آمار و احتمالات زمین آمار، بین مقادیر مختلف یک کمیت، در جامعه‌ای از نمونه‌ها و فاصله و جهت قرارگیری آن‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار می‌کند، که رابطه ریاضی این پیوستگی فضایی ساختار نامیده می‌شود (حسنی‌پاک ۱۳۷۷). زمین آمار اولین بار توسط ماترون (Matheron 1973) و در مرکز ریاضیات مونولوژی فرانسه مطرح شد (Shaw et al. 2009). بوشر و همکاران (Bushara et al. 2002) در سال ۲۰۰۲ بر اساس روش‌های زمین آماری، مدل سه‌بعدی را برای بررسی چگونگی توزیع تخلخل و تراوایی مطلق شکاف‌ها در مخازن نفتی شکاف‌دار پیشنهاد دادند. کرس (Caers 2001) در سال ۲۰۰۱ در دانشگاه استنفورد، به کمک روش‌های زمین آماری، تحقیقی را بر روی انواع روش‌های شبیه‌سازی مخزن انجام داد. وی موفق شد با استفاده از روابط ارائه شده در آمار کلاسیک و علوم زمین‌شناسی، به یک سری روابط جدید برای مختصات فضایی داده‌ها در زمین آمار دست پیدا کند. به عبارتی، روش‌های شبیه‌سازی را که محدود به رسم واریوگرام و به کارگیری آن بود گسترش داد. به دلیل اثرات نامطلوب خطای تخمین در افزایش ریسک سرمایه‌گذاری، لازم است دقیق‌ترین روش تخمین ذخیره که تضمین‌کننده‌ی حداقل خطای تخمین است، مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور، لازم است کل محدوده به صورت بلوک‌هایی تقسیم‌بندی شده و سپس کمیت مورد نظر برای هر بلوک تخمین زده شود. هیچ‌یک از روش‌های تخمین ذخیره سنتی

۲- مطالعات زمین آماری (روش کریجینگ)

زمین آمار شامل ۶ مرحله مشخص است. مرحله اول مشخص کردن جامعه آماری یا محدوده مورد مطالعه است. مرحله دوم شامل انجام محاسبات آماری و به دست آوردن نمودارهای توضیحی است. مرحله سوم تخمین واریوگرام تجربی و تعیین ساختار فضایی تئوریک کمیت مورد بررسی است. مرحله چهارم شامل تطبیق یک مدل استاندارد برای به دست آوردن پارامترهای منحنی واریوگرام است. در مرحله پنجم از روش کریجینگ (Kriging) برای تعیین توزیع کمیت در محدوده مورد مطالعه استفاده خواهد شد. مرحله ششم شامل وارد کردن اثر عدم قطعیت در نتایج کریجینگ با استفاده از روش‌های آماری است (حسنی‌پاک ۱۳۸۰).



تصویر ۱- ارتباط و ساختار فضایی بین کمیت‌های تخمینی بلوک‌ها (Tölke 2011).



تصویر ۱- ارتباط و ساختار فضایی بین کمیت‌های تخمینی بلوک‌ها (Tölke 2011).

۱-۱-۲- پارامترهای آماری

۱-۱-۱- میانگین (Average): گشتاور مرتبه اول یا مقدار میانگین مهم‌ترین پارامتر یک جامعه آماری است.

۱-۱-۲- مد (Mode): مد، مقداری از متغیر تصادفی است که بیشترین تکرار را در بین رخدادها داشته باشد.

۱-۱-۳- میانه (Middle): میانه از نظر تعداد رخدادها (نه مقدار آن‌ها) در وسط قرار می‌گیرد. یعنی نیمی از تعداد رخدادها مقداری کمتر از آن و نیمی دیگر دارای مقداری بیشتر از آن است.

۱-۱-۴- واریانس (Variance): واریانس هر توزیع معیاری از پراکندگی مقادیر حول میانگین است (رابطه ۱).

$$\sigma^2 = E(x - \mu)^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (X_i - E(X))^2 \quad (1)$$

علت استفاده از توان دوم، اختلاف مقادیر از میانگین آن است که پراکندگی حول میانگین چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی باید منظور شود (Bohling 2005).

۱-۱-۵- کوواریانس (Covariance): در روش‌های آماری

چندمتغیره، جهت بررسی میزان شباهت تغییرات دو متغیر تصادفی، از معیاری به نام کوواریانس استفاده می‌شود. هر چه تغییرات دو متغیر شباهت بیشتری به یکدیگر داشته باشد، کوواریانس بیشتری نیز خواهند داشت (Zimmermann 2010).

۱-۲- تئوری واریوگرام (Variogram Theory):

تخمین زمین‌آماری ذخایر زیرزمینی شامل دو بخش است. بخش اول، شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی کمیت مورد تخمین است که در

آن مفهوم پیوستگی، همگنی، ناهمگنی و ساختار فضایی بوسیله واریوگرام بررسی می‌شود (تصویر ۲). بخش دوم، تخمین به‌روش کریجینگ است که به مشخصات مدل واریوگرام برازش شده در بخش اول وابسته است. مهم‌ترین ویژگی واریوگرام نسبت به سایر ابزار آماری، ساده‌سازی ساختار تغییرپذیری است که موجب کاربرد بسیار وسیع آن در همه زمینه‌های وابسته به صنعت شده است (حسنی پاک ۱۳۷۷).

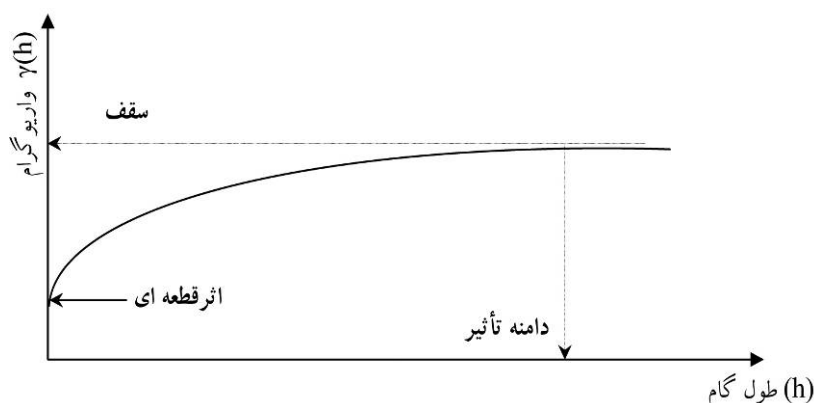
واریوگرام مربوطه، یک نمودار (تصویر ۲) در دستگاه مختصات (XY) می‌باشد. محور (X) نشان‌دهنده فاصله بین نقاط است که با (h) نمایش داده شده و محور (Y) مقدار واریوگرام است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Negreiros et al. 2010).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+h})^2 = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2)$$

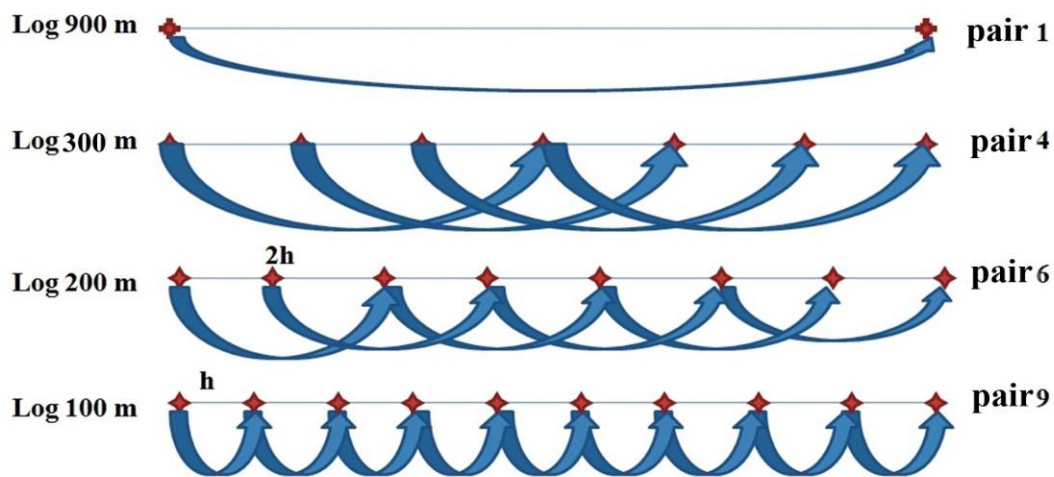
در تئوری واریوگرام، مربع اختلاف عیار برای هر زوج نمونه به فاصله معین، محاسبه می‌شود. سپس مقادیر به دست آمده با یکدیگر جمع شده و بر تعداد زوج نمونه‌های با همان فاصله (معادل تعداد گام‌ها می‌باشد) تقسیم می‌شوند (تصویر ۳).

۱-۲-۳- روش کریجینگ

کریجینگ اولین بار در سال ۱۹۵۱، توسط شخصی به نام کریج (Krige 1981) برای تخمین رگه‌های طلای معادن در آفریقای جنوبی استفاده شد (Clifton & Neuman 1982). در حالت کلی، کریجینگ فرآیندی محاسباتی است که در آن مقدار کمیت یک نقطه نامعلوم از طریق نقاط معلوم اطرافش محاسبه می‌شود. این تخمین، بر مبنای محاسبات وزنی بنا نهاده شده است (در صورتی که داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند (Negreiros et al 2010) و به آن (BLUE)، به معنی بهترین تخمین‌گر خطی نارایب (Best Linear Unbiased Estimator) گویند.



تصویر ۲- تصویری از اجزای یک نمودار واریوگرام (حسنی پاک ۱۳۷۷)



تصویر ۳- نحوه ارتباط جفت نمونه‌ها، (h) طول گامها و (pair) تعداد گامها (Shaw et al. 2009).
 K(2.1 3.1 2.8 2.3 2.4 2.8 3.1 4.1 4.2 3)

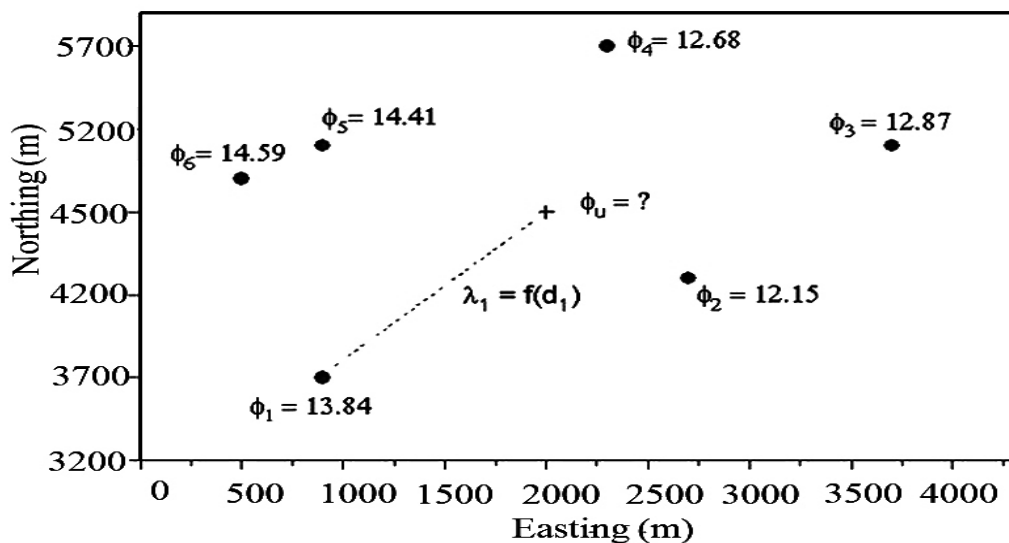
ب) مقدار اندازه‌گیری برای موقعیت (i) ام. در رابطه (۳)، هدف تعیین مقدار (Z) برای هر نقطه (X0) که فاقد اندازه‌گیری است (تصویر ۴). تخمین‌گر کریجینگ مورد استفاده در این پژوهش، معمولی بوده که به صورت رابطه (۳) قابل تعریف است (حسنی‌پاک ۱۳۸۰).

کریجینگ با تأثیر دادن اطلاعات موجود در اطراف یک نقطه، علاوه بر حذف خطای سیستماتیک وابسته به تخمین، مقادیر عیار نمونه‌ها را طوری وزندهی کرد که یک تخمین ناریب حاصل شود. به طور کلی کریجینگ، مجموعه‌ای از روش‌های رگرسیون خطی تعمیم داده شده در ابعاد بزرگ است (حسنی‌پاک ۱۳۷۷).

$$Z_0 = \sum_{i=1}^I \lambda_i Z_i \quad (3)$$

۲-۳-۱- فرضیات کریجینگ

الف) (X1,.....Xn) موقعیت (n) ایستگاه اندازه‌گیری.



تصویر ۴- ارتباط نمونه‌ها، (Phi1, Phi2, Phi3) توزیع داده‌های تخلخل معلوم، (Phiu) داده‌های تخلخل مجهول و (lambda) ضریب لاگرانژ (Bohling 2005).

کاملی در آنها انجام شده و دارای اطلاعات کامل‌تری از نظر تراوایی و تخلخل در عمق موردنظر بودند انتخاب شدند. در ادامه، نمودارهای تراوایی بر حسب تخلخل برای هر سه چاه تهیه شد.

اطلاعات تراوایی و تخلخل موجود، مربوط به آنالیز مغزه بوده بنابراین به جرأت می‌توان گفت که نتایج به‌دست آمده از محاسبات در مراحل آخر از درجه اعتماد بیشتری برخوردارند.

چاه‌ها مورد مطالعه با اسامی (K1)، (K2) و (K3) نام‌گذاری شدند. محدوده مورد مطالعه از $(X=0)$ تا $(X=900)$ و $(Y=0)$ تا $(Y=900)$ و به عمق ۲۸۶۵ تا ۳۳۷۵ متر می‌باشد.

تصاویر ۵ و ۶، نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین تخلخل و تراوایی برای دوچاه (K1) و (K3) با خصوصیات مخزنی ماسه‌سنگی می‌باشند. در تصویر ۵ با وجود تخلخل بالا، تراوایی افزایش نیافته اما در تصویر ۶، با افزایش تخلخل، تراوایی نیز افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به دلیل وجود شکستگی و شکاف در مخزن باشد.

۳-۱- ورود اطلاعات در بخش نرم‌افزاری

تخمین و گرفتن خروجی با کمترین خطا با تعداد داده‌های زیاد، بدون استفاده از کامپیوتر امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای رسیدن به نتیجه مثبت، از نرم‌افزار متلب که پایه طراحی آن ماتریس است، استفاده شد. این نرم‌افزار، با توجه به داده‌های اولیه، خروجی‌ها و نتیجه‌ای که قرار است برنامه‌نویسی و کدنویسی شود قابل استفاده خواهد بود. در نرم‌افزار کدنویسی شده و در بخش زمین‌آماری، اطلاعات مربوط به فیلد موردنظر (جدول ۱)، تعداد چاه‌ها، وسعت منطقه مورد مطالعه، موقعیت مکانی چاه‌ها و همچنین داده‌های تخلخل و تراوایی عمق‌های مختلف هر یک از چاه‌ها وارد گردید.

ناهمگونی‌ها و عدم قطعیت در نتایج به‌دست آمده، از شبیه‌سازی‌های بسیاری استفاده شده است (Chambers et al. 2000).

۲-۵-۱- روش اضافه باقیمانده تصادفی (Random Residual Addition, RRA)

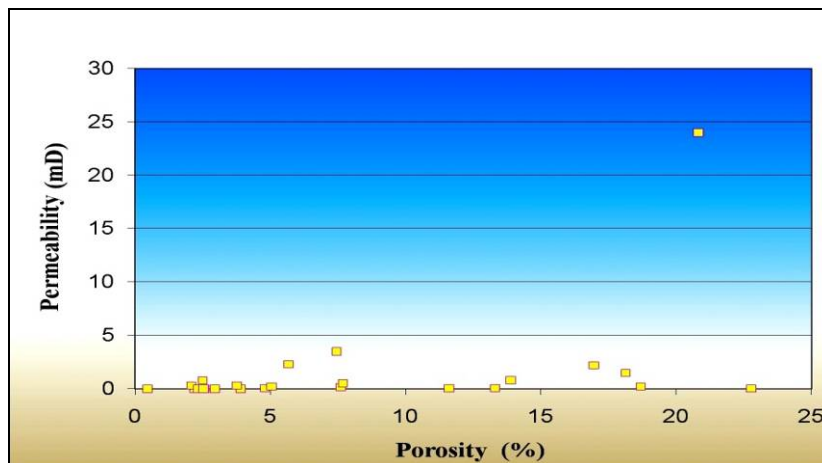
این روش، یکی از روش‌های اضافه کردن عدم قطعیت به داده‌های به‌دست آمده از روش کریجینگ می‌باشد. ابتدا مقادیر کمیت برای همه گریدها با استفاده از داده‌های موجود برای نقاط اندازه‌گیری شده از روش کریجینگ محاسبه شده، سپس با استفاده از روش (Fractal Brownian Motion, FBM) برای همه گریدها مقادیر کمیت مورد نظر تولید می‌شود (Kim et al. 2000).

اصطلاح فرکتال (Fractal)، اشیای هندسی با ابعاد کسری را گویند که اولین بار توسط بنیوت ماندلبرات، در سال ۱۹۸۲ (Mandelbrot 1982) مطرح شد. بر اساس نظر آنها، ابرها نمی‌توانند شکل کروی داشته باشند، کوه‌ها نمی‌توانند به صورت مخروط باشند و خطوط ساحلی به شکل دایره هستند (Estrada 2011).

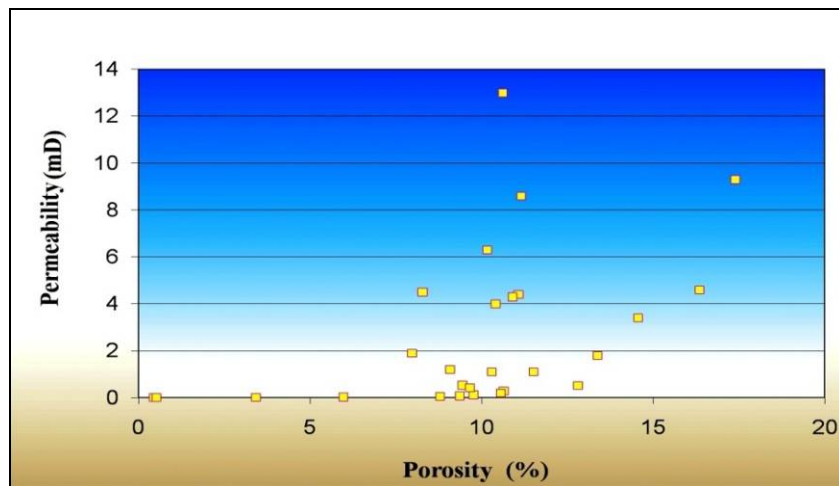
برای به‌دست آوردن داده‌های اف بی ام (FBM) باید تابع هرست (Hurst exponent) هر یک از چاه‌ها را داشته باشیم. بنابراین با استفاده از روش بیشینه‌ی آنتروپی (Maximum Entropy MEM)، تابع هرست هر یک از چاه‌ها به‌دست آمد. با استفاده از این روش، می‌توان روند و ساختارهای آن را در مقیاسی وسیع بررسی کرد. در غیراین صورت دوباره مراحل تولید اعداد سنتتیک (Synthetic)، FBM تکرار خواهد شد (McKeague & Sen 2010).

۳- روش مطالعه

در یکی از میدادین نفتی جنوب غرب ایران، ۳ حلقه چاه که مغزه گیری



تصویر ۵- توزیع تخلخل و تراوایی برای چاه K1



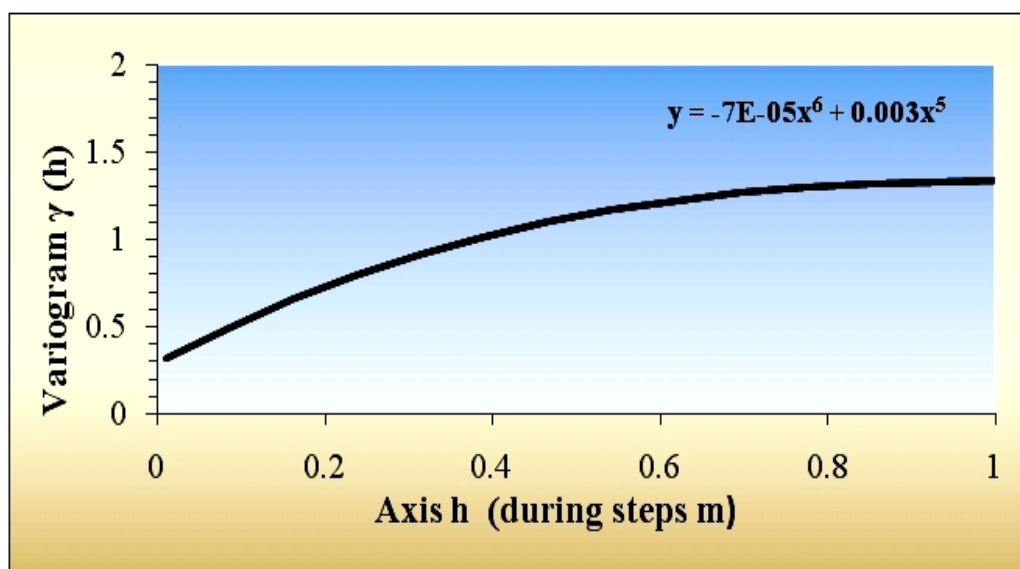
تصویر ۶- توزیع تخلخل و تراوایی برای چاه K3

۱۳-۲- فروری نمودارهای واریوگرام از زیرافزار

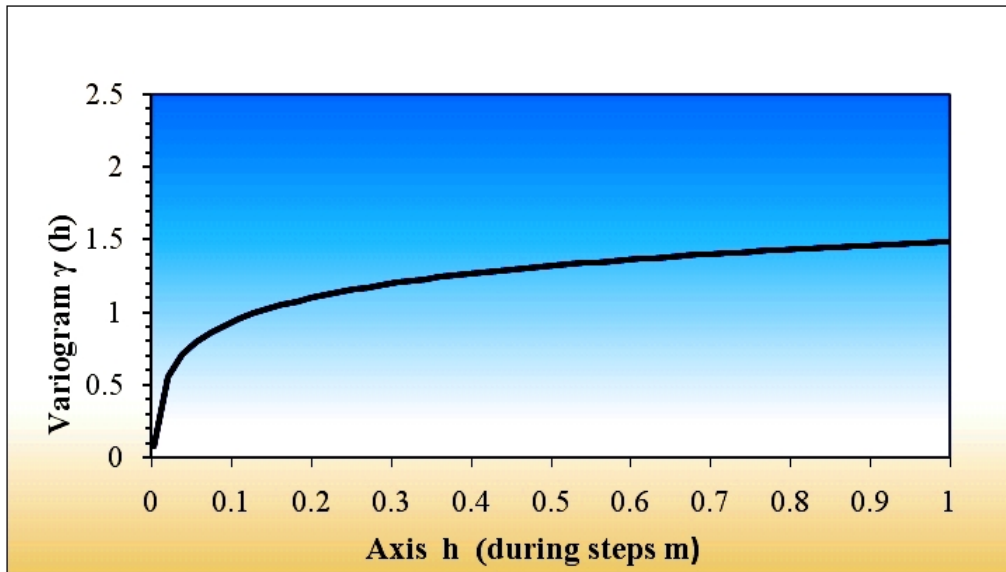
مدل‌های واریوگرام تئوری برازش شده به نقاط به دست آمده، برای واریوگرام تجربی شامل مدل‌های کروی و نمایی می‌باشند. اطلاعات تراوایی و تخلخل چاه K1 به مدل کروی (تصاویر ۷ و ۸)، اطلاعات تراوایی چاه K2 به مدل نمایی و تخلخل به مدل کروی و اطلاعات تراوایی و تخلخل چاه K3 به مدل نمایی برازش شده‌اند. مقادیر پارامترهای (C0- C1-A) مرتبط به دست آمده از نمودارهای واریوگرام تخلخل و تراوایی در جدول ۲ ارائه شده است. طبق شیب نمودارها مقادیر هورست (Hourst) به ترتیب جدول ۳ به دست آمده است. محاسبات مربوط به کریجینگ با استفاده از روش‌های ذکر شده انجام شده و در نهایت خصوصیات پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی تخمین زده شد.

جدول ۱- نمونه‌ای از اطلاعات اولیه تخلخل و تراوایی چاه K1

ردیف	شماره مغزه	عمق (متر)	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داریسی)
۱	۱	۲۶۳۴/۱۵	۰/۴	۶۰
۲	۱	۲۶۵۴/۴۰	۱۷/۹	۱۶۵
۳	۱	۲۶۹۵	۲/۴	۹۵
۴	۱	۲۷۵۵/۳۰	۲/۴	۹۶
۵	۱	۲۷۹۵	۱۲/۸	۱۰۷
۶	۱	۲۸۱۰	۶/۸	۱۰۲



تصویر ۷- نمودار واریوگرام تخلخل برای چاه K1، (h) طول گامها و $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام



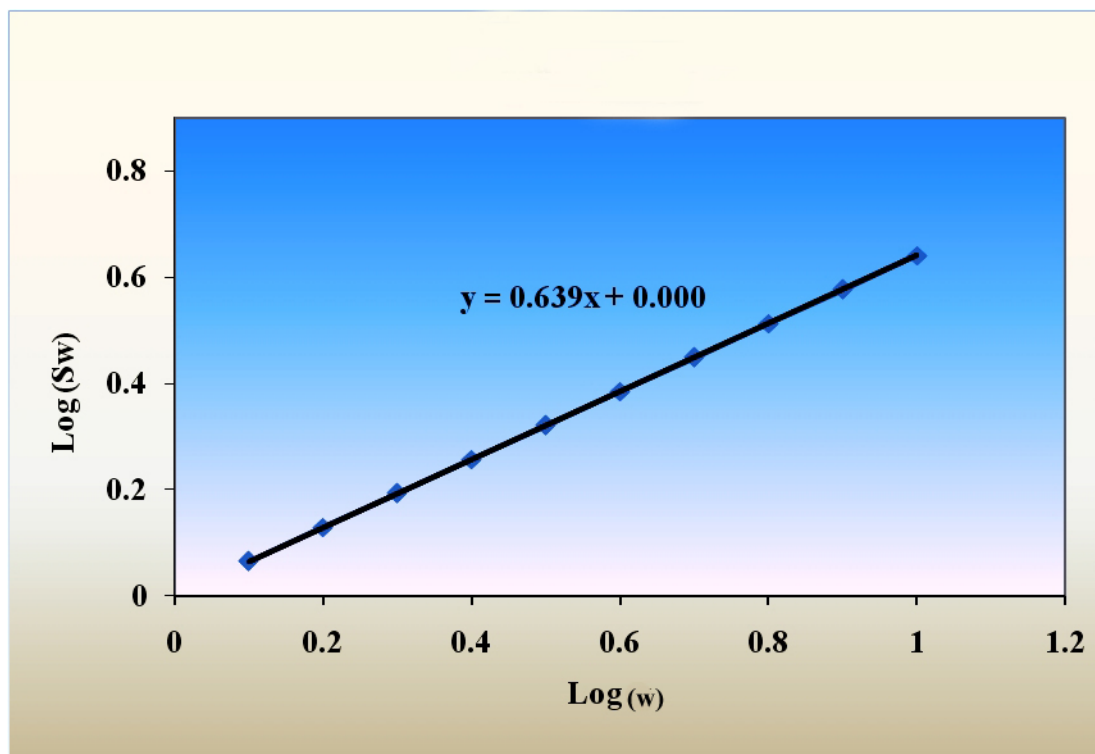
تصویر ۸- نمودار واریوگرام تراوایی برای چاه K1. طول گامها و $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام

جدول ۳- مقادیر هورست

0.3	HK1
0.31	HK2
0.64	HK3

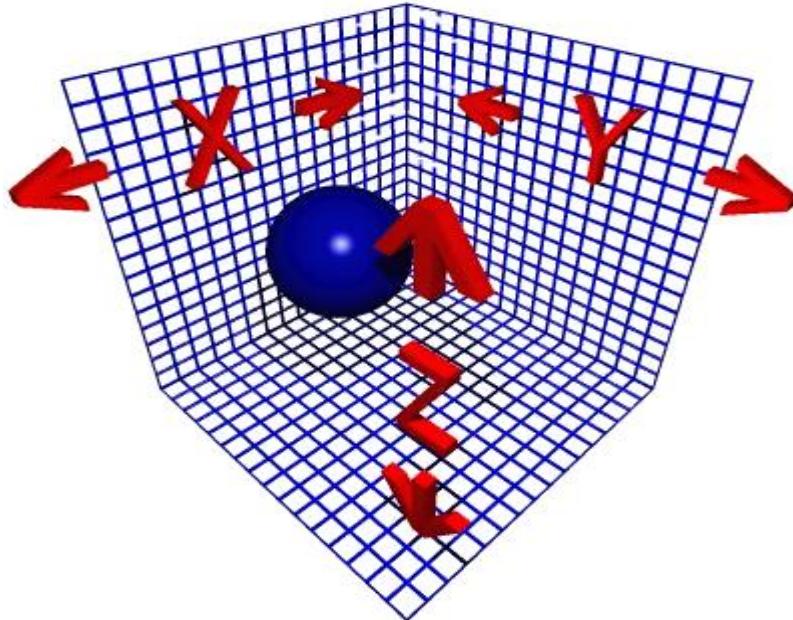
جدول ۲- پارامترهای به دست آمده از نمودارهای واریوگرام

تراوایی				تخلخل			
A	C1	C0	شماره چاه	A	C1	C0	شماره چاه
401/7	1/5	0/09	K1	327	1/2	0/25	K1
368/4	1/7	0/2	K2	385/2	1/6	0/2	K2
378/4	1/3	0/35	K3	373/2	1/4	0/22	K3

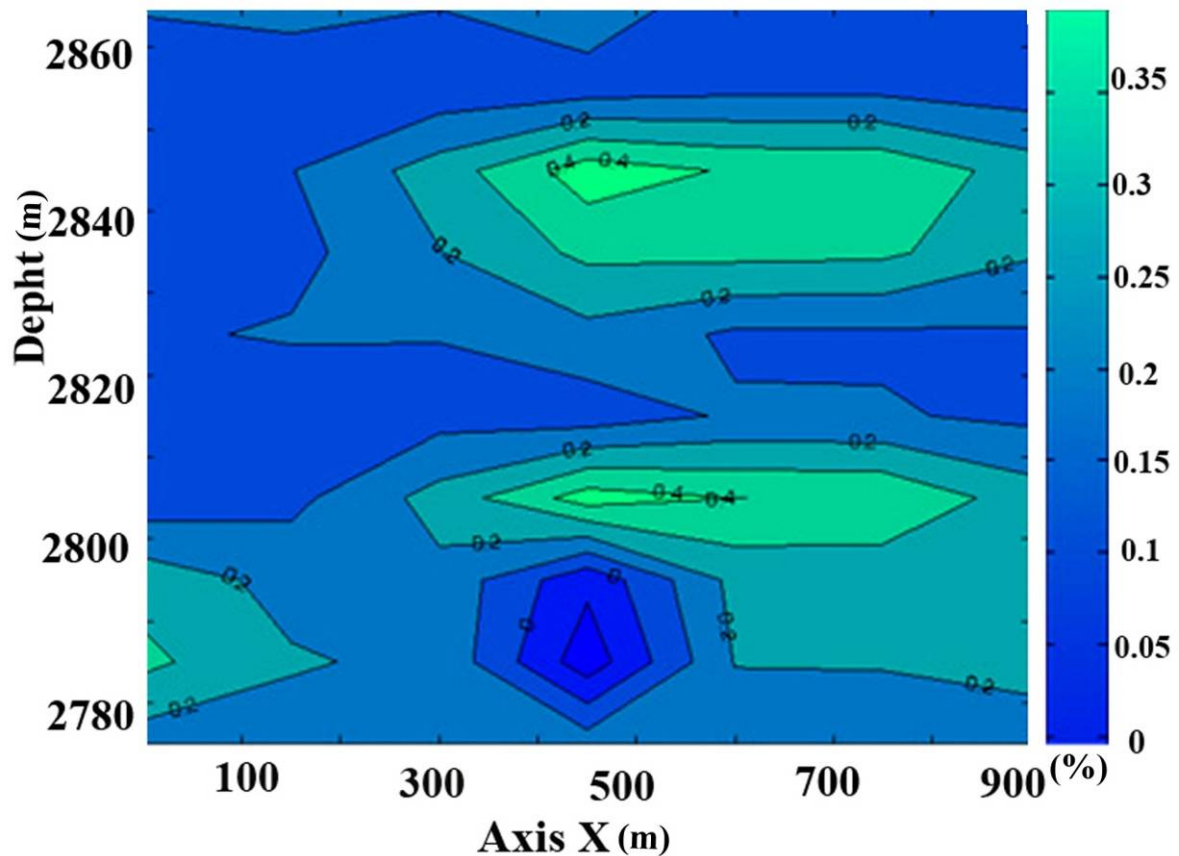


تصویر ۹- نمودار $\text{Log}(w)$ فرکانس زاویه ای نسبت به $\text{Log}(S_w)$ دانسیته طیفی

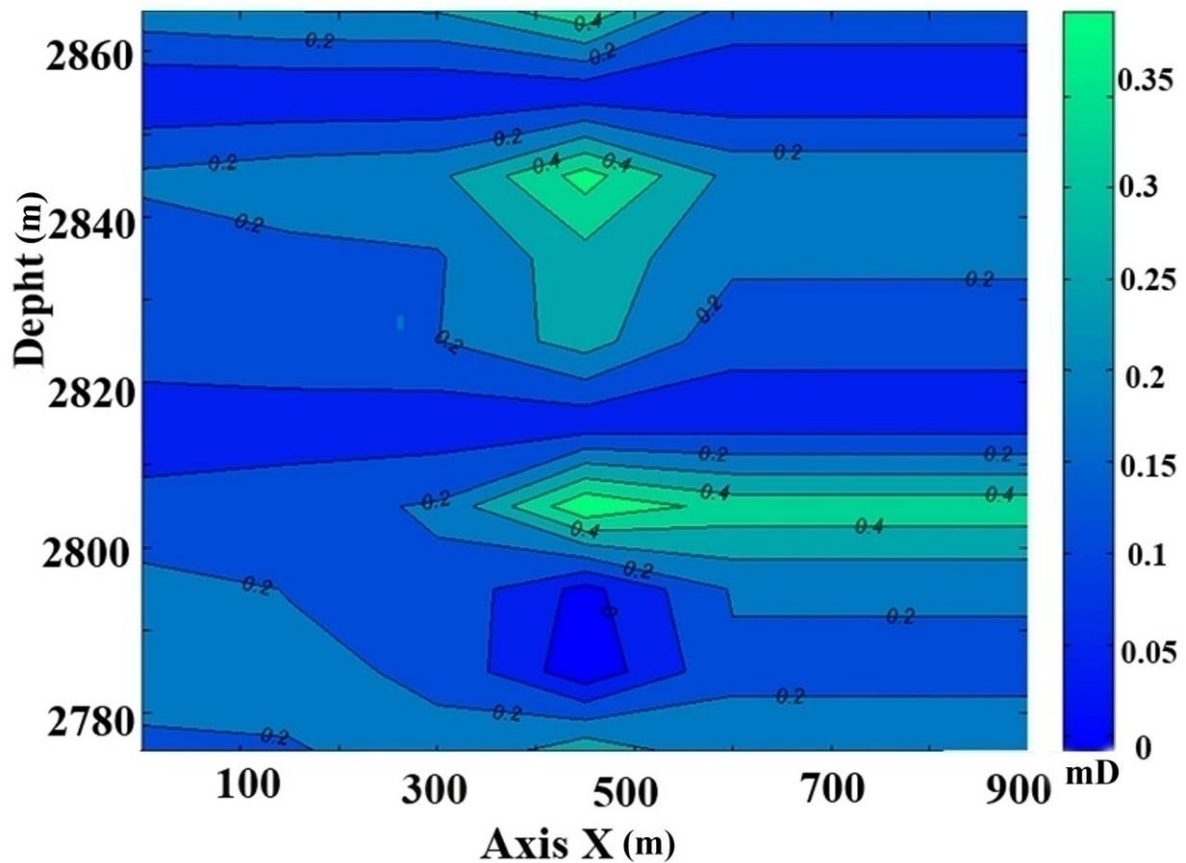
برای بررسی بهتر و جامع‌تر نتایج به‌دست آمده، شمای گرافیکی توزیع تخلخل و تراوایی محدوده مورد مطالعه تهیه شد. محدوده سبز رنگ بیانگر مناطق با تخلخل و تراوایی زیاد است (تصاویر ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶). در تصویرهای گرافیکی، ابعاد هر یک از بلوک‌ها ۳/۵ × ۳/۵ متر می‌باشد. بنابراین تعداد بلوک‌ها در راستای (X و Y) ۲۵۶ و در راستای عمق (Z) ۳۲ عدد می‌باشند (تصویر ۱۰).



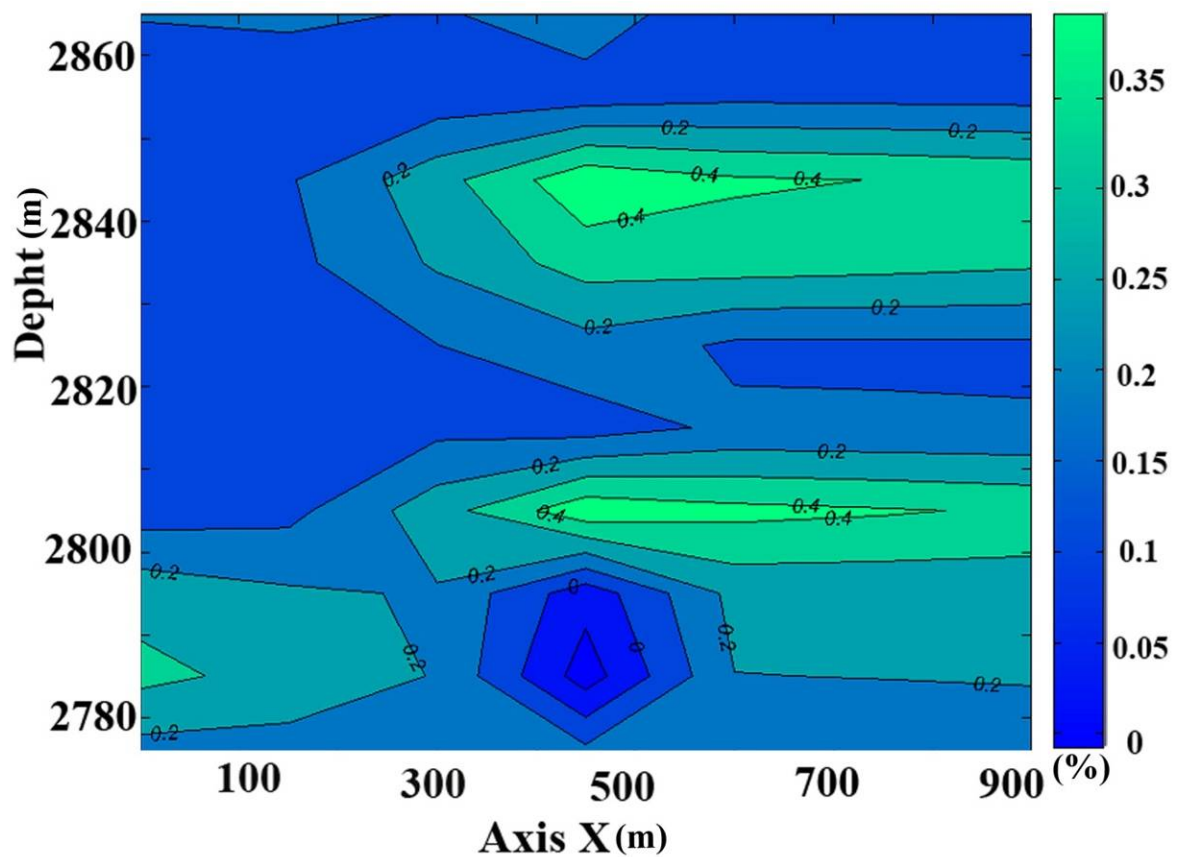
تصویر ۱۰- جهت محور مختصات به‌کار رفته تصویرهای گرافیکی در سه بعد (X-Y-Z) (Tölke 2011).



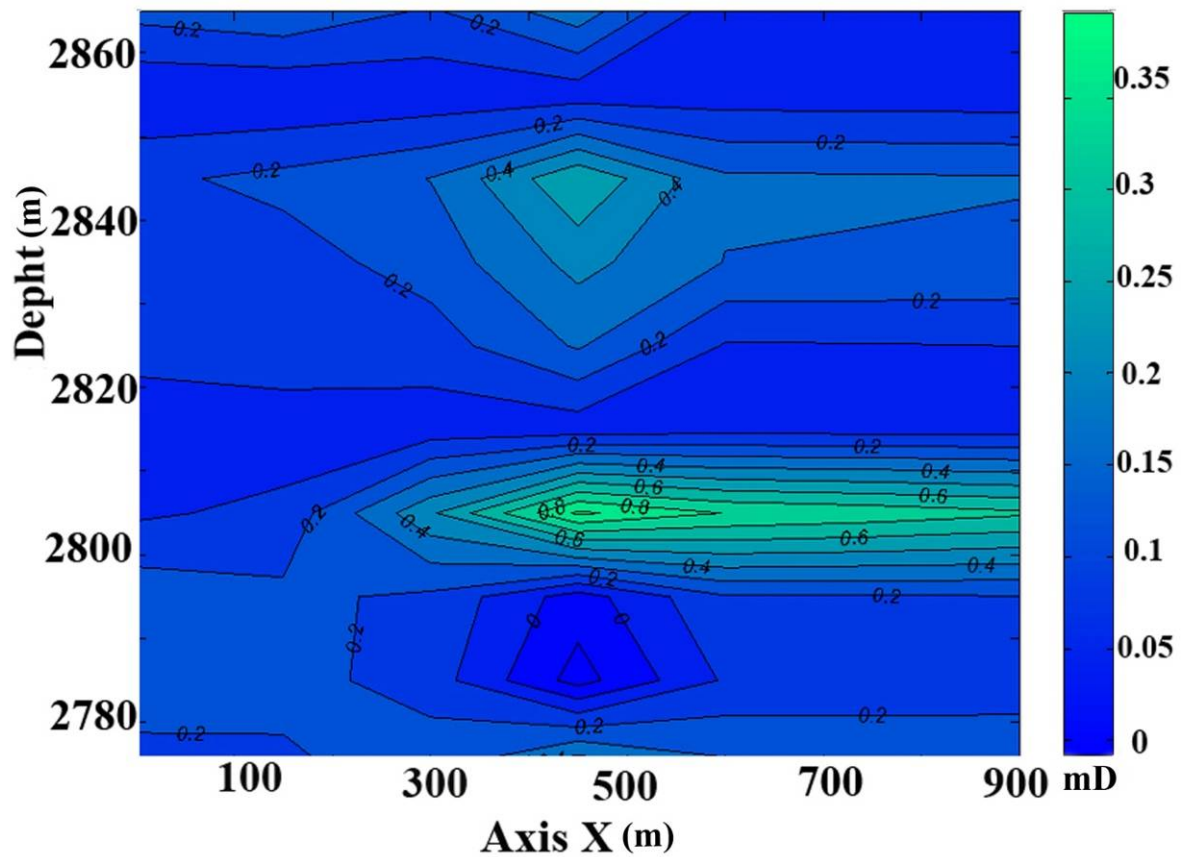
تصویر ۱۱- تخمین زمین آماری تخلخل در محور X=۱۵۰m



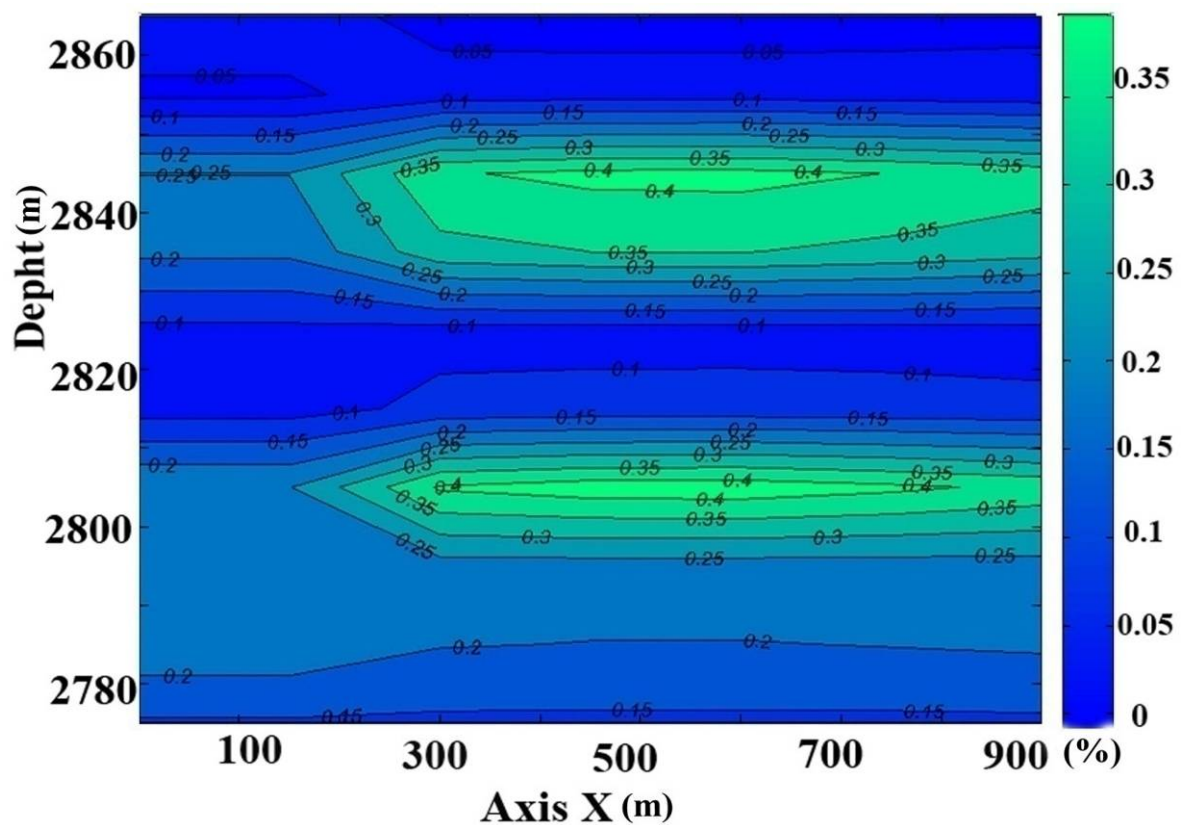
تصویر ۱۲- تخمین زمین آماری تراوایی در محور $X=150\text{m}$



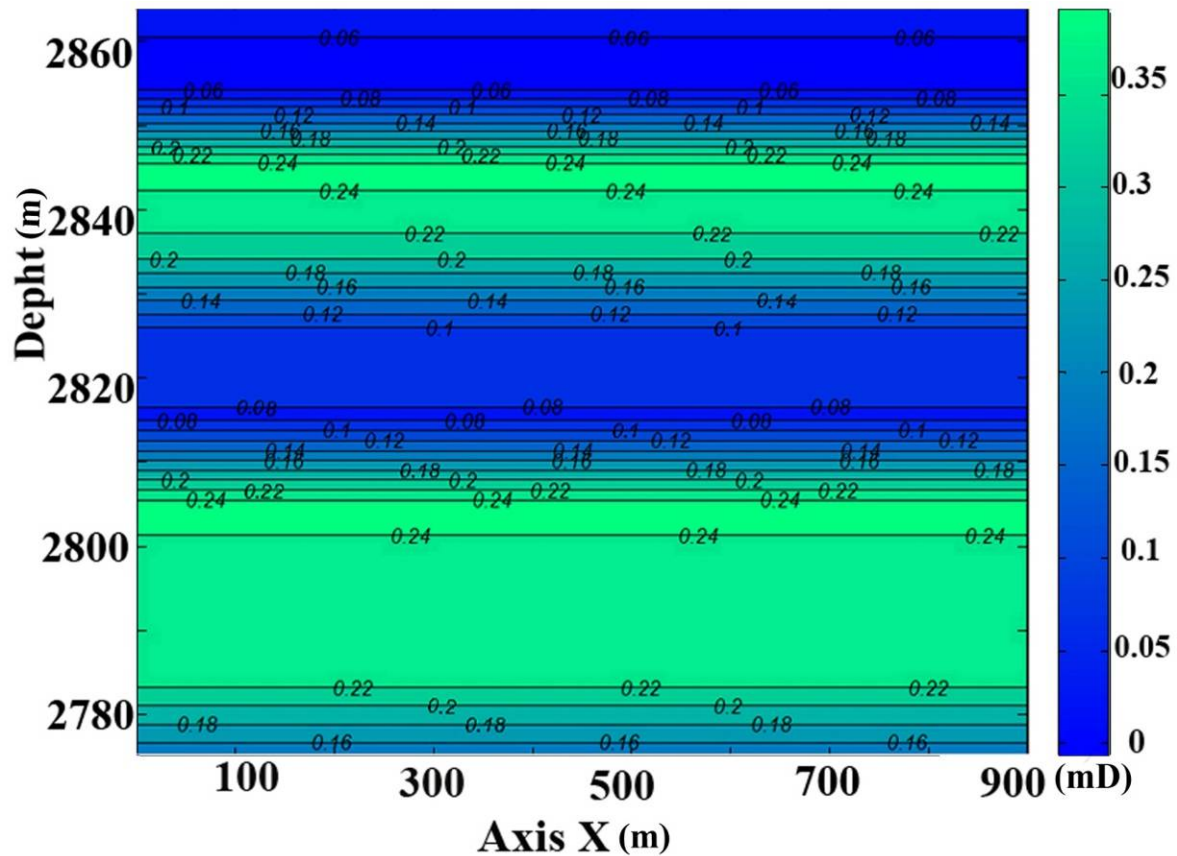
تصویر ۱۳- تخمین زمین آماری تخلخل در محور $X=300\text{m}$



تصویر ۱۴- تخمین زمین آماری تراوایی در محور $X=300\text{m}$



تصویر ۱۵- تخمین زمین آماری تخلخل در محور $X=600\text{m}$



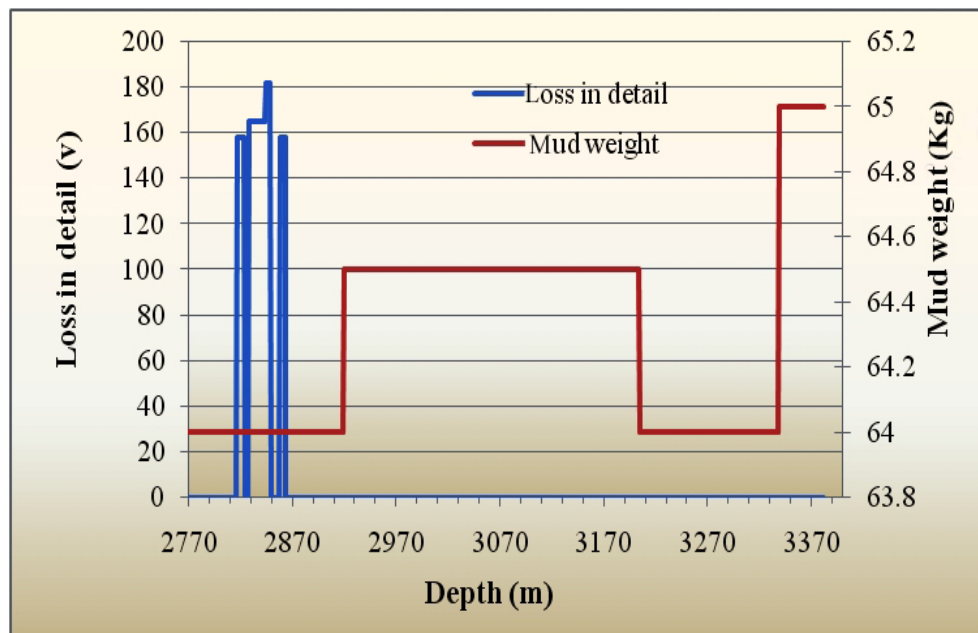
تصویر ۱۶- تخمین زمین آماری تراوایی در محور $X=600m$

کدنویسی شده، وجود تخلخل و تراوایی با مقدار زیاد را در عمق‌های ۲۷۷۰ تا ۲۸۷۰ متری نشان داد که احتمال وجود شکاف در این عمق وجود دارد. برای بررسی وجود شکاف و مقایسه با اطلاعات خروجی از روش کریجینگ، از نمودار هرزروی گل حفاری که یکی از نشانه‌های وجود شکاف و درزه در چاه‌های نفتی است، استفاده شد (تصاویر ۱۷ و ۱۸).

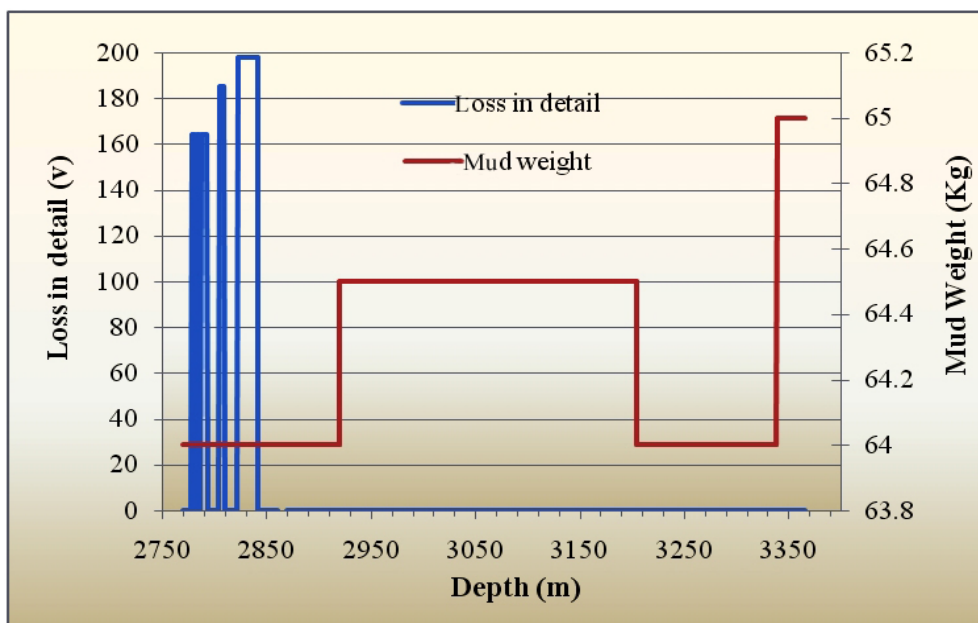
با توجه به تصویرهای گرافیکی، میانگین تخلخل و نفوذپذیری محاسبه شده (با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ) و میانگین تخلخل و نفوذپذیری اندازه‌گیری شده موجود در چاه‌های مورد مطالعه، مقایسه و نتیجه در جدول ۴ آورده شده است. این جدول نشان‌دهنده اختلاف بسیار جزئی در نتایج به‌دست آمده است. تصویرهای گرافیکی حاصل از تخمین به روش کریجینگ و نرم‌افزار

جدول ۴- میانگین تخلخل و نفوذپذیری

میانگین	پارامتر	
۱۰/۵۱ درصد	محاسبه شده	تخلخل
۱۰/۸۵ درصد	اندازه‌گیری شده	
۱۵۰ میلی‌داریسی	محاسبه شده	نفوذپذیری
۱۶۵ میلی‌داریسی	اندازه‌گیری شده	



تصویر ۱۷- نمودار هرزروی گل حفاری چاه K1 در عمق ۲۷۷۰ تا ۲۸۷۰ متری، (Loss in detail) حجم هرزروی گل حفاری، (Mud weight) وزن گل حفاری.



تصویر ۱۸- نمودار هرزروی گل حفاری در چاه K2 در عمق ۲۷۶۵ تا ۲۸۱۰ متری، (Loss in detail) حجم هرزروی گل حفاری، (Mud weight) وزن گل حفاری.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تنها اطلاعات مربوط به سه چاه (K1، K2 و K3) و خصوصیات پتروفیزیکی، مورد بررسی قرار گرفت. نکته جالب، هم‌خوانی در مقایسه تصویرهای گرافیکی توزیع تخلخل تراوایی و نمودارهای هرزروی گل حفاری در محدوده مورد مطالعه است.

مقایسه نمودار هرزروی گل حفاری چاه‌ها با تصویرهای گرافیکی در عمق‌های ۲۷۷۰ تا ۲۸۷۰ متر، تأیید کننده وجود شکاف و درزه است. می‌توان گفت مقایسه نمودار هرزروی گل حفاری و تصویرهای گرافیکی خروجی از نرم‌افزار، نشان‌دهنده صحت محاسبات روش زمین آماری کریجینگ است.

Science and Engineering, Vol. 29 (3-4): 177-188.

Chambers, R. L., Yarus, J. M. & Hird, K. B., 2000, "Petroleum geostatistics for nongeostatiticians", *Part 2, The Leading Edge, Vol. 19 (6): 592-599.*

Clifton, P. M. & Neuman, S. P., 1982, "Effects of kriging and inverse modeling on conditional simulation of the Avra valley aquifer in southern Arizona", *Water Resources Research, Vol. 18 (4): 1215-1234.*

Estrada, F., 2011, "Benoit Mandelbrot (1924 - 2011): A Greek among Romans", *History of Economic Ideas/ Fabrizio Serra Editore/ Pisa-Roma, Vol. XIX (1): 1-13.*

Jensen, J. L., Lake, L. W., Corbett, P. W. M. & Goggin, D. J., 2000, "Statistics for petroleum engineers and geoscientists", *2nd Edition, Handbook of Petroleum Exploration and Production, Elsevier Science Ltd, 338 pp.*

Hohn, M. E., 1998, "Geostatistics and petroleum geology", *Springer; 2nd Edition, 248 pp.*

Kim, K., Kang, J. S., Chang, S. W. & Choi, H. S., 2000, "Comparison of regenerated distribution patterns of deep-sea bed manganese nodule abundance using random residual addition and fractal geometry transformation procedure", *The Korean Society for Geosystem Engineering, Vol. 37 (1): 38-44, (Abstract: English), available at: (ksge.or.kr/linker/download.php?sid=6, 2 Oct. 2011).*

Krige, D. G., 1981, "Lognormal-de Wijsian geostatistics for ore evaluation", *Johannesburg [South Africa]: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2nd Edition, 51 pp.*

Mandelbrot, B. B., 1982, "The fractal geometry of nature", *W. H. Freeman, 1st Edition, 460 pp.*

Matheron, G., 1973, "The intrinsic random functions and their applications", *Advances in Applied Probability, Vol. 5 (3): 439-468.*

McKeague, I. W. & Sen, B., 2010, "Fractals with point impact in functional linear regression", *The Annals of Statistics, Vol. 38 (4): 2559-2586.*

Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F. & Aguilar, M., 2010, "Geographical information systems principles of ordinary kriging interpolator", *Journal of Applied Sciences, Vol. 10: 852-867.*

Shaw, J., You, Y., Haberman, R. & Maidment, D., 2009, "Geostatistical analysis", *CE 397 Statistics in Water Resources, Exercise 9, University of Texas at Austin, doc), 30 pp, available at: (www.ce.utexas.edu/prof/maidment/statwr2009/Ex9/Ex9, 2 Oct. 2011).*

Tölke, J., 2011, "Lattice Boltzmann multi-phase simulations using GPUs", *Minneapolis, MN, Ingrain's Digital Rock Physics Lab, 52 pp.*

Zimmermann, R., 2010, "Asymptotic behavior of the likelihood function of covariance matrices of spatial Gaussian processes", *Journal of Applied Mathematics Vol. 2010 (2010), Article ID 494070, 17 pp.*

روش زمین آماری کریجینگ و نتایج تخمین، نشان‌دهنده شرایط خوب منطقه‌ی مورد مطالعه از لحاظ تخلخل، تراوایی، رخساره مخزنی و حضور زون‌های شکستگی در عمق‌های ۲۷۸۰ تا ۲۸۱۰ و ۲۸۳۰ تا ۲۸۵۰ متری است.

براساس نتایج این پژوهش، درون‌یابی منطبق بر کریجینگ، وابستگی زیادی به تعداد نقاط نمونه‌برداری و فاصله نقاط از یکدیگر دارد، به طوری که با تغییر در تعداد نمونه‌ها الگوی ساختار فضایی نیز تغییر خواهد کرد. در روش کریجینگ، اگر تعداد نقاط نمونه‌برداری کم باشد، واریانس و خطا افزایش خواهند یافت. مقایسه‌ی نتایج حاصل، نشان‌دهنده آن است که روش زمین آماری در کنار سایر روش‌های ریاضی، نمودارگیری چاه و چاه آزمایشی، از اهمیت بالایی برخوردار است. باید توجه داشت که هر چه اطلاعات اولیه موردنیاز برای محاسبات بیشتر و از درجه صحت بالاتری برخوردار باشند، می‌توان به صحت و درستی نتایج حاصل از این مطالعات بیشتر امیدوار بود.

تشکر و قدردانی

از شرکت نفت خزر به جهت حمایت مالی از این پژوهش و آقایان مهندس خودآفرین، بحرینی و خردمند تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۷۷، "زمین آمار"، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۱ ص.

حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۸۰، "نمونه‌برداری معدنی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ ص.

خیری، ح. و شکرپور، ر.، ۱۳۸۶، "تجزیه LU و ساختار عددی"، دانشکده علوم ریاضی تبریز و دانشکده پیام‌نور تبریز، ۲۵۰ ص.

Grader, A. S., Clark, A. B. S., Al-Dayyani, T. & Nur, A., 2009, "Computations of porosity and permeability of sparic carbonate using Multi-Scale CT images", *International Symposium of the Society of Core Analysts, The Netherlands 27-30 September, SCA2009-Temp Paper #03-10, 10 pp.*

Bohling, G., 2005, "Introduction to geostatistics and variogram analysis", *Vol. C&PE 940, 17 Oct. 2005: 1-20, available at: (http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940, 2 Oct. 2011).*

Bushara, M. N., Tawel, A. El, Borouha, H., Dabbouk, C. & Qotb, M., 2002, "Effective permeability modeling: geostatistical integration of permeability indicators, offshore Abu Dhabi", *Society of Petroleum Engineers, 78583-MS, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 13-16 October, Abu Dhabi, 8 pp.*

Caers, J., 2001, "Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition", *Journal of Petroleum*