

## ارائه مدل به منظور مطالعه اثر مقیاس بر پارامتر تخلخل مخازن نفتی (مطالعه موردی)

علی پرهیزکار میاندهی<sup>۱</sup>، وامق رسولی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه کرتین استرالیا

### چکیده

پارامتر تخلخل مخزن از جمله مهمترین مشخصه‌های مورد بررسی در مطالعات مهندسی نفت به شمار می‌رود. میزان تخلخل مخزن، معرف مقدار هیدروکربن درجا می‌باشد، درحالیکه میزان تولید به درصد ارتباط بین تخلخل‌ها وابسته است. تعیین ویژگی مذکور به شیوه‌های مختلف از طریق آزمایش نمونه‌های کوچک در آزمایشگاه تا تعیین از روی نمودارهای چاه‌پیمایی به صورت درجا انجام می‌گیرد. به تجربه اثبات شده است که نتایج آزمایشگاهی و نتایج تست‌های درجا با یکدیگر کاملاً متفاوت هستند. این تفاوت ناشی از اثر مقیاس اندازه‌گیری می‌باشد، به طوری که با تغییر حجم نمونه مورد مطالعه مقادیر متفاوتی بدست خواهد آمد. لذا بررسی اثر مقیاس به منظور انجام ارزیابی صحیح از کمیت مورد نظر دارای اهمیت فراوانی بوده و مطالعه این اثر به شیوه‌های مختلف انجام شده است. در این مقاله با استفاده از زمین‌آمار که ابزار قدرتمندی در بررسی تغییرات فضایی داده‌ها می‌باشد، داده‌های تخلخل مربوط به یکی از میادین نفتی ایران (منطقه پارس جنوبی) تحلیل شده و براساس آن تأثیر مقیاس بر این پارامترها بررسی شده است. برای بررسی اثر مقیاس پذیری هر پارامتر از رفتار واریانس میانگین آن پارامتر (بر مبنای رفتار واریانس پراکندگی) استفاده شده است. همچنین با رسم تابع واریوگرام که معرف میزان پراکندگی داده‌ها می‌باشد، ویژگی ناهمسانگردی مخزن مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس شاخصی برای بیان میزان مقیاس پذیری مخزن به نام حجم المان معرف تعیین گردید که می‌تواند معیاری برای مقایسه تغییرپذیری جوامع مختلف باشد. به علاوه با استفاده از واریوگرام‌های جهتی مشخص گردید که مخزن مورد مطالعه ناهمسانگرد است.

**واژه های کلیدی:** اثر مقیاس، حجم المان معرف، زمین‌آمار، واریانس پراکندگی، واریانس میانگین.

## ۱- مقدمه

تمام کمیت‌های پتروفیزیکی در مقیاسی کاربرد دارند، که با مقیاسی که در آغاز برای اندازه‌گیری آنها استفاده شده است، متفاوت است. این موضوع، تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده را قبل از استفاده ضروری می‌سازد که به این تصحیح افزایش مقیاس<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این فرایند به علت ویژگی‌هایی که دارای توزیع فضایی ناهمگن<sup>۲</sup> بوده و خود همبسته‌اند<sup>۳</sup>، پیچیده می‌شود. این پیچیدگی بدان جهت است که ویژگی‌های دارای توزیع ناهمگن، پس از افزایش مقیاس، باید به گونه‌ای تنظیم شوند که اندازه‌گیری‌های تصحیح شده عارضه مورد نظر را به شکل واقعی منعکس کنند.

۲- واریانس میانگین<sup>۴</sup>

تشخیص دادن تفاوت بین داده‌هایی که در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری شده‌اند، مسئله مهمی در مدل کردن ذخیره‌ها و مخزن است. به عنوان مثال، مقیاس اندازه‌گیری کمیت‌های پتروفیزیکی (مقیاس کوچک<sup>۵</sup>) کوچکتر از مقیاس کاربردی (مقیاس بزرگ<sup>۶</sup>) است. آن‌طور که بر اساس تحلیل‌های محاسباتی و شبیه‌سازی اثبات شده است، ناهمگنی ذاتی نقش مهمی را در افزایش مقیاس بازی می‌کند. به علاوه، مقادیر تصحیح شده حاصل از افزایش مقیاس و اندازه‌گیری‌های کوچک مقیاس می‌توانند به سادگی، توزیع فضایی متفاوت داشته باشند [۱].

اگر  $Z$  را به عنوان متغیری اسکالر در فضای پیوسته، گوسی، تصادفی و یک بعدی در نظر بگیریم، واریانس مقدار میانگین  $Z$  ( $\bar{Z}$ ) در فاصله  $L$  (مقیاس میانگین) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Var(\bar{Z}) = \frac{2\sigma^2}{L^2} \left( \int_{\xi=0}^L \int_{\eta=0}^{\xi} \rho(\eta) d\eta d\xi \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\rho$  تابع خود همبستگی فضایی<sup>۷</sup> و  $\sigma^2$  واریانس کل<sup>۸</sup> می‌باشد. واریانس میانگین می‌بایست با افزایش  $L$  کاهش پیدا کند. وقتی  $L$  به سمت صفر میل می‌کند، واریانس میانگین به واریانس کل ( $\sigma^2$ ) نزدیک می‌شود. واریانس یک نقطه درون  $L$  با افزایش  $L$  بیشتر می‌شود. (زیرا خصوصیات در حجم‌های بزرگ ناجوری بیشتری دارند تا در حجم‌های کوچک). همان‌طور که اشاره شد، خصوصیات در حجم‌های بزرگ ناهمگونی بیشتری دارند تا در حجم‌های کوچک. این موضوع از رابطه گسترش پذیری

1. Scale up.
2. Heterogeneity.
3. Autocorrelated.
4. Variance of mean.
5. Fine scale.
6. Coarse scale.
7. Spatial autocorrelation function.
8. Population variance.

واریانس<sup>۱</sup> قابل برداشت است:

$$\sigma_{o/D}^2 = \sigma_{o/L}^2 + \sigma_{L/D}^2 \quad (۲)$$

که در رابطه فوق:

$\sigma_{o/D}^2$ : واریانس یک نقطه در یک حجم بزرگ ( $D$ ),

$\sigma_{o/L}^2$ : واریانس یک نقطه در حجم کوچک ( $L$ ) و

$\sigma_{L/D}^2$ : واریانس میانگین در طول  $L$  در داخل  $D$  می‌باشد.

در معادله ۲،  $Var(\bar{Z}) = \sigma_{L/D}^2$  و  $\sigma_{o/D}^2 = \sigma^2$ . این دو تساوی، کل نمونه‌ها را در حجم  $D$  معرفی کرده‌اند. واریانس یک نقطه درون  $L$  از معادله زیر بدست می‌آید:

$$Var(Z) = \sigma^2 - Var(\bar{Z}) = \sigma^2 - \frac{2\sigma^2}{L^2} \left( \int_{\xi=0}^{\xi=L} \int_{\eta=0}^{\eta=\xi} \rho(\eta) d\eta d\xi \right) \quad (۳)$$

به مدل زیر در مورد تابع خود همبسته  $\rho$  توجه کنید:

$$Var(\bar{Z}) = \frac{2\sigma^2}{L} \sum_{k=0}^{k=K} f_k \lambda_k \left( 1 - \frac{\lambda_k}{L} [1 - e^{-L/\lambda_k}] \right) \quad (۴)$$

در رابطه فوق  $f_k$  سهم واریانس کل در مقیاس  $k$  و  $\lambda_k$  اندازه همبستگی در مقیاس  $k$  می‌باشد. با استفاده از این مدل، تعیین مقیاس‌های تغییرپذیری  $Z$  (به کمک  $\lambda_k$ ) و سهمی که هر یک در واریانس نهایی دارد (به کمک  $f_k$ ) امکان پذیر می‌شود.

### ۳- حجم المان معرف در مخازن نفتی

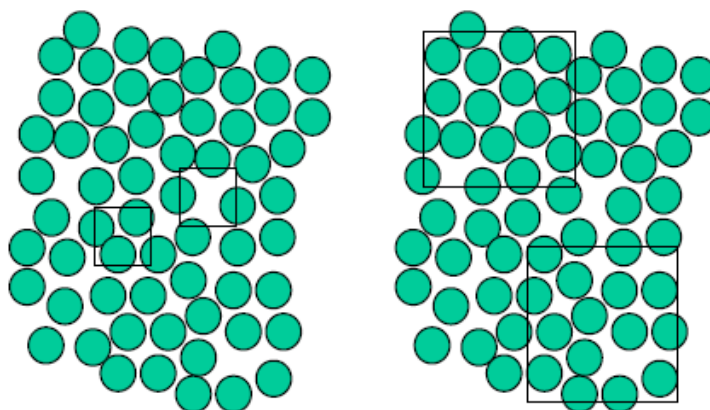
برای تفسیر تخلخل (یا هر پارامتر مرتبط با مخازن نفتی یا سفره‌های آبی) تعریف مفهوم حجم المان معرف مفید است. اهمیت این مفهوم بدان جهت است که هر حجمی کوچکتر از حجم المان معرف، پارامترهای مختلفی از مخزن را تسلیم می‌دارد که بر مبنای یک مکان در نمونه می‌باشند.

برای نشان دادن این موضوع، به شکل ۱ توجه کنید. هر دو قسمت در شکل ۱، یکسان است. در قسمت سمت چپ شکل، المان‌ها با اندازه‌های مساوی، دو قسمت مختلف از شکل را نشان می‌دهند که مقدار تخلخل برای هر یک متفاوت است. یعنی تخلخل به ازای المان سمت راست بزرگتر از مقدار تخلخل در المان سمت چپ است. حال می‌بایست اندازه المان یا سطح مربع موردنظر را افزایش دهیم. این افزایش اندازه آنقدر ادامه می‌یابد که هر دو المان یک مقدار را برای تخلخل بدست دهند.

اکنون به شکل سمت راست توجه کنید. در این شکل برای دو المان با اندازه‌های مساوی که در مکان‌های مختلف (هر نقطه دلخواهی از شکل مورد نظر) قرار گرفته‌اند، یک مقدار یکسان برای تخلخل بدست

1. Variance additivity relationship.
2. Population.

می‌آید. بنابراین سطح (یا حجم) این المان را می‌توان به عنوان سطح (یا حجم) المان معرف در نظر گرفت. زیرا اگر این المان در هر نقطه از محیط متخلخل قرار گیرد یک مقدار ثابت را برای تخلخل به دست می‌دهد. به عبارت دیگر المان نشان داده شده در شکل سمت راست کوچکترین المان از نظر اندازه است که معرف خصوصیت محیط (در اینجا تخلخل) بوده و مقداری که برای تخلخل به دست می‌دهد مستقل از مکان قرارگیری آن در محیط است.



شکل ۱: تاثیر حجم المان در معرف بودن آن [۲].

برای روشن‌تر شدن مطلب به شکل ۲ توجه کنید. اگر مطابق شکل، رنگ سفید فضای خالی و رنگ سیاه بخش جامد سنگ باشد، مقدار تخلخل برای المان اول ۱۰۰٪، برای المان دوم ۶۹٪، برای المان سوم ۶۷٪ و برای المان چهارم ۵۰٪ می‌باشد. این اعداد حاصل تقسیم بخش سفید رنگ به بخش سیاه رنگ در هر المان هستند. به صورت زیر:

$$n = 1/1 = 100\% \quad \text{برای المان اول:}$$

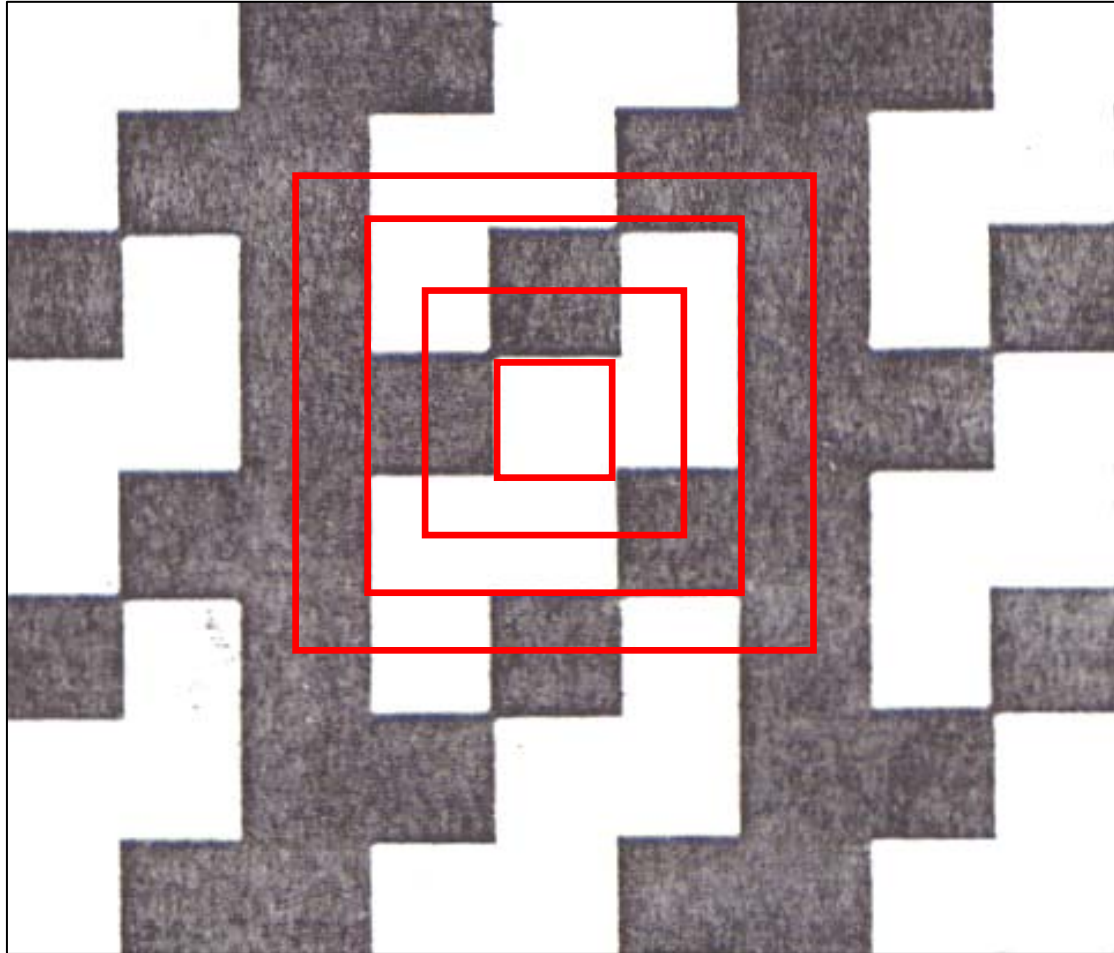
$$n = 3/5 = 69\% \quad \text{برای المان دوم:}$$

$$n = 6/9 = 67\% \quad \text{برای المان سوم:}$$

$$n = 8/16 = 50\% \quad \text{برای المان چهارم:}$$

$$n = 8/20 = 40\% \quad \text{برای المان پنجم:}$$

$$n = 11/25 = 45\% \quad \text{برای المان ششم:}$$

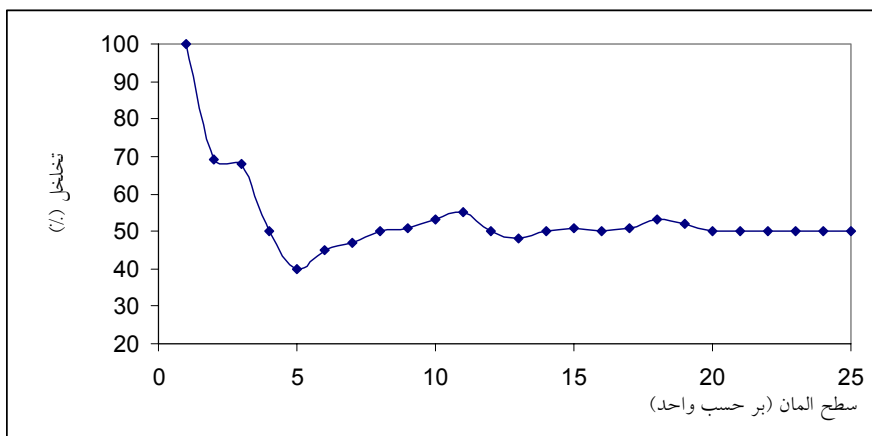


شکل ۲: مقدار تخلخل به ازای المان‌های مختلف

ملاحظه می‌شود که مقدار تخلخل در محیط مورد بحث، به شدت تحت تأثیر اندازه سطح المان قرار دارد. به طوریکه این مقدار از حداکثر اندازه تا مقادیر کمتر برای پارامتر تخلخل در تغییر است. برای مشاهده تخلخل به ازای المان‌های بزرگتر به شکل ۳ مراجعه کنید. مطابق شکل ۳، در قسمت ابتدای نمودار که سطح المان مورد نظر برای اندازه‌گیری تخلخل، کوچکتر است، مقدار تخلخل حداکثر است. با افزایش سطح المان، مقدار تخلخل کاهش می‌یابد و این روند کاهشی ادامه پیدا می‌کند تا اینکه مقدار تخلخل در برابر سطح المان، روند نسبتاً ثابتی به خود می‌گیرد به گونه‌ای که می‌توان گفت مقدار تخلخل به ازای اندازه مشخصی از سطح المان، مستقل از اندازه المان می‌باشد و بزرگتر شدن اندازه المان تأثیری در مقدار تخلخل ندارد. به عبارت دیگر حجم المان معرف (در این مثال، سطح المان معرف<sup>۱</sup>)، حجمی است که تغییرات تخلخل در حجم‌های بزرگتر از آن قابل چشم‌پوشی است. با عنایت به مطالب مذکور و با توجه به شکل ۳، مقدار سطح المان معرف برای پارامتر تخلخل در شکل ۲، ۲۰ (واحد) تعیین می‌گردد. راه حل عملی برای به دست آوردن اندازه حجم

1. Representative elementary area.

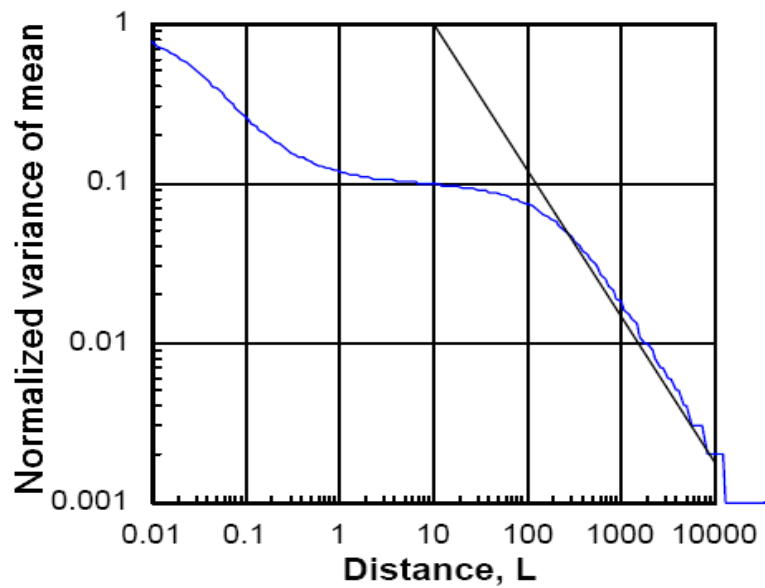
المان معرف در مخازن نفتی، استفاده از زمین آمار<sup>۱</sup> و بررسی رفتار واریانس میانگین<sup>۲</sup> با مقیاس می باشد. بدین منظور رفتار واریانس میانگین تخلخل در برابر مقیاس بررسی شده و مقیاسی را که در آن، مقدار تخلخل از حجم نمونه مستقل می شود به عنوان مقیاس حجم المان معرف در نظر می گیرند. روش یافتن این مقیاس به کمک رفتار واریانس میانگین در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۳: نمودار تخلخل - سطح المان برای تعیین سطح المان معرف

هر تابع خود همبسته با افزایش فاصله در یک اندازه مشخص، کاهش می یابد و بعد از آن در واریانس ثابتی پایدار می شود. شکل ۴ به بیان این موضوع می پردازد. در این شکل، تغییرپذیری کوچک مقیاس، ۹۰ درصد از واریانس کل را تشکیل می دهد و تغییرپذیری بزرگ مقیاس در ۱۰ درصد باقیمانده سهمیم است. تغییرپذیری در مقیاس متوسط حذف شده است. دو مقیاس باقیمانده به وضوح روی محور  $X$  و در مکان های شروع و پایان خم مشخصند. شیب نمودار برای  $L > \lambda_3 = 100$  به ۱- نزدیک می شود که می بایست به خاطر استقلال  $Z$  باشد.

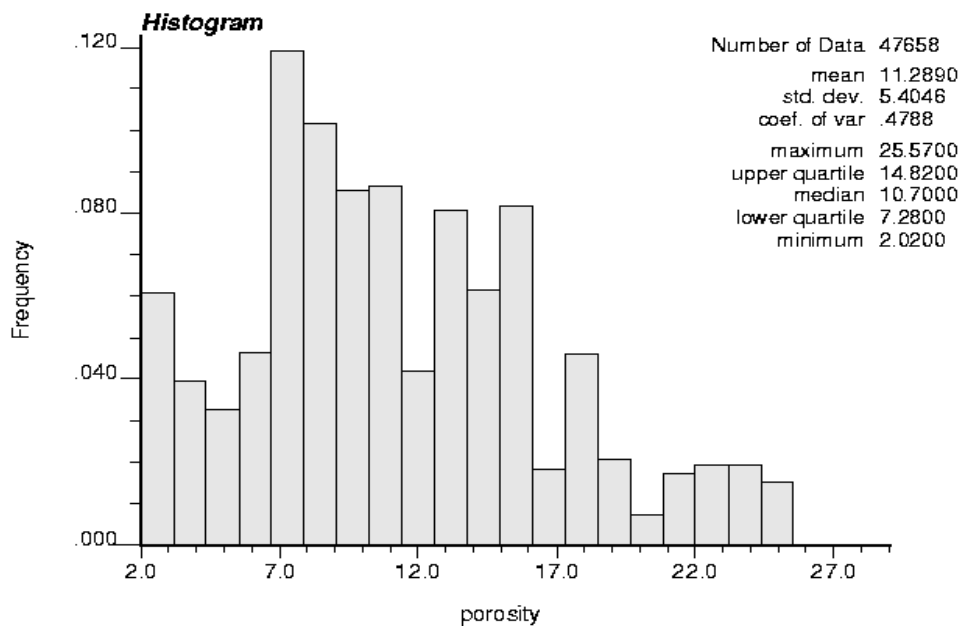
1. Geostatistic.
2. Variance of mean.



شکل ۴: واریانس میانگین برای رابطه ۵ (که به وسیله  $2\sigma^2$  نرمال شده است) به عنوان تابعی از  $L$  برای مدلی با  $K = 3$  که  $f_1 = 0.9$ ,  $f_2 = 0$ ,  $f_3 = 0.1$ ,  $\lambda_1 = 0.01$ ,  $\lambda_2 = 1$  و  $\lambda_3 = 100$ . خط راست شیبی در حدود ۱- دارد [۱]

#### ۴- بررسی داده‌های یکی از مخازن نفتی ایران

داده‌های استفاده شده در انجام مطالعه حاضر، مجموعه داده‌های تفسیر شده لگ‌های تخلخل و نفوذپذیری می‌باشند، که جهت انجام مطالعات و تحلیل‌های آماری از آنها استفاده شده است. تعداد داده‌ها ۴۷۶۵۸ داده می‌باشد که از تفسیر لگ چاه‌ها حاصل شده‌اند. شکل ۵ هیستوگرام داده‌های خام تخلخل را نشان می‌دهد. جدول ۱ پارامترهای آماری داده‌های خام تخلخل را نشان می‌دهد.



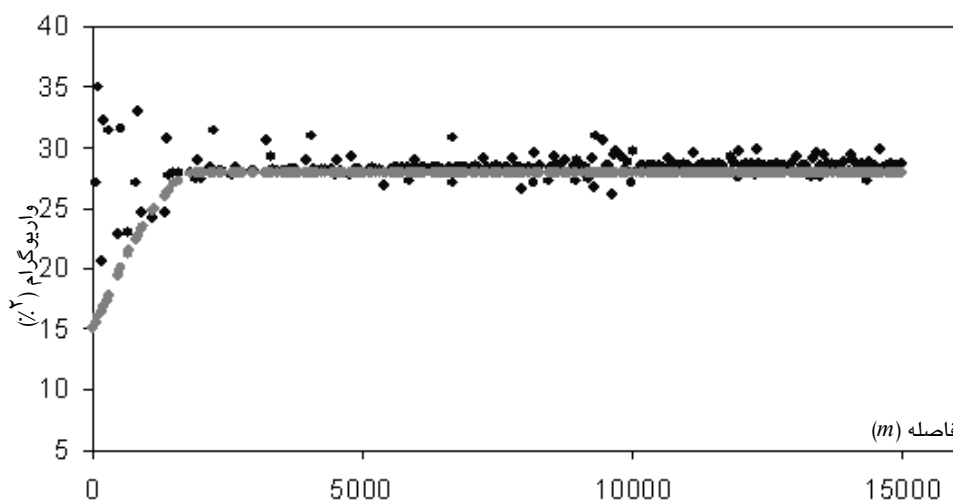
شکل ۵: هیستوگرام داده‌های خام تخلخل

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌های خام تخلخل

میانگین (%)	انحراف معیار	ضریب تغییرات	حداکثر	چارک بالا	میان	چارک پایین	حداقل
۱۱/۲۹	۵/۴	۰/۴۸	۲۵/۵۷	۱۴/۸۲	۱۰/۷	۷/۲۸	۲/۰۲

در بررسی موردی خصوصیات این مخزن، لاگ‌های چاه‌های مجاور هم، آنالیز شدند و مدل مخزن به وسیله همبستگی بین اثرات لاگ‌ها در چاه ساخته شد. چندین روش برای بررسی همبستگی آنها پیشنهاد شد. بعد، در این تکنیک‌ها، مقیاس تغییر داده شد تا حداکثر همبستگی بین اثرات چاه‌های مجاور ایجاد شود. تغییرات مشاهده شده در لاگ‌های چاه، تغییرپذیری عمودی در خصوصیات پتروفیزیکی را در مقیاس نقطه‌ای نشان می‌دهند. این تغییرپذیری‌های با مقیاس نقطه‌ای می‌باید، به مقیاس حجم المان معرف (REV) تصحیح شوند (Scale up). در مقیاس حجم المان معرف به بلوک‌های عمودی مجاور مقادیری نسبت داده می‌شود که از یکدیگر مستقلند. فرضیه‌ای که وجود دارد این است که آنالیز همبستگی بین چاه‌های مجاور در این مقیاس (REV) درک بهتری از مخزن ارائه می‌دهد.

واریوگرامی که با استفاده از اطلاعات لاگ چاه‌ها و مدل مورد نظر، محاسبه شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر بحث شد، واریانس میانگین بلوک‌ها، بیشتر یا مساوی با واریانس کل ( $\sigma_{o/D}^2$ ) باقی می‌ماند. واریانس با افزایش سایز بلوک کاهش می‌یابد و سرانجام در مقدار ثابتی پایدار می‌شود که حاکی از آن است که در مقیاس حجم المان معرف (REV) یا بالاتر قرار داریم (شکل ۷).



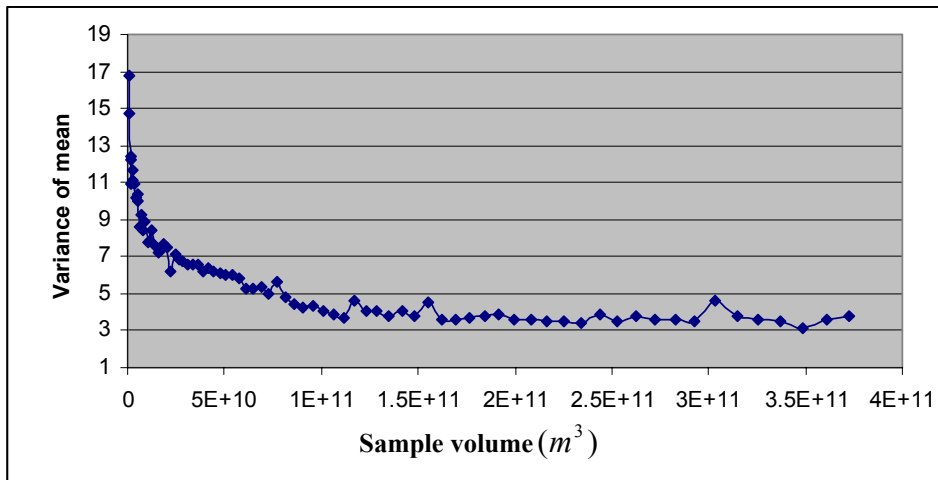
شکل ۶: واریوگرام غیرجهتی تخلخل و مدل کروی برازش شده به آن

##### ۵- بررسی ناهمسانگردی

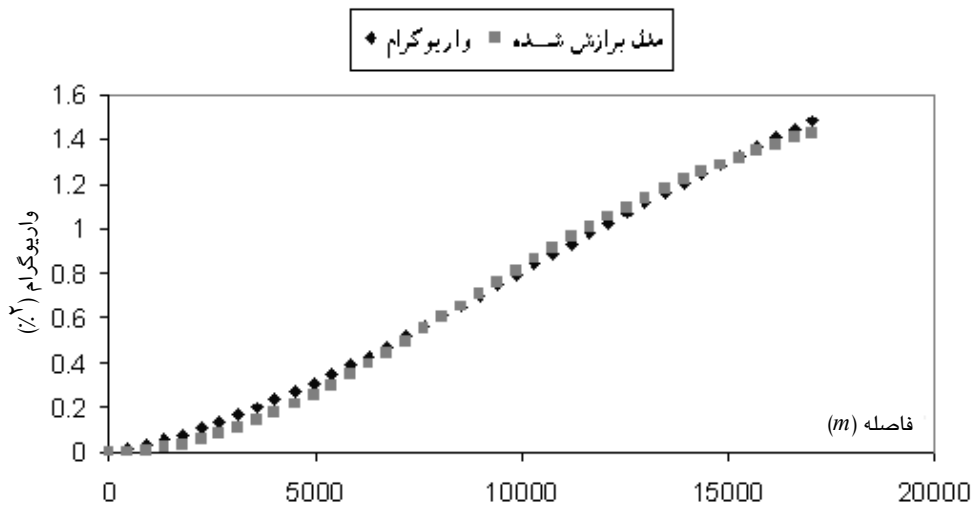
برای بررسی ویژگی ناهمسانگردی، تابع واریوگرام در جهات مختلف رسم شد. این نمودارها دارای سقف و دامنه‌ی تاثیر متفاوت هستند که نشان دهنده ناهمسانگرد بودن مخزن است. واریوگرام‌های محاسبه شده در



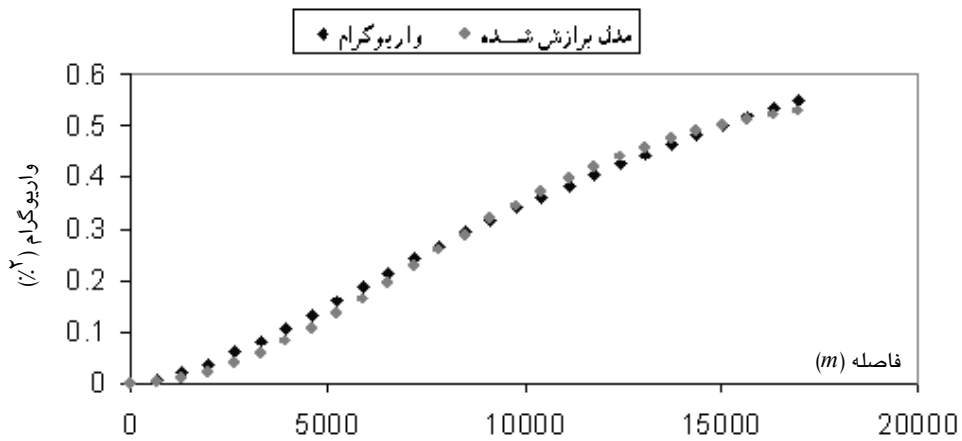
راستای شمالی \_ جنوبی و شرقی \_ غربی در شکل های ۸ و ۹ مشاهده می شوند.



شکل ۷: واریانس میانگین تخلخل و ارتباط آن با حجم نمونه



شکل ۸: واریوگرام تخلخل در جهت شمالی \_ جنوبی و مدل برازش شده به آن



شکل ۹: واریوگرام تخلخل در جهت شرقی \_ غربی و مدل برازش شده به آن

## ۶- نتیجه گیری

واریانس میانگین و وابستگی آن به مقیاس، منجر به تعریف حجم المان معرف گردید. واریانس میانگین برای بررسی تغییرات میانگین تخلخل با مقیاس استفاده شد. همینطور با رسم تابع واریوگرام در جهت‌های مختلف مشخص گردید که کل تغییرپذیری در جهات مختلف متفاوت است و بزرگی محدوده‌ای که داده‌ها در آن از خود ساختار فضایی بروز می‌دهند و در واقع به نحوی باهم در ارتباطند نیز در راستاهای مختلف متفاوت است که نشان دهنده ناهمسانگرد بودن مخزن می‌باشد. همچنین با بررسی رفتار واریانس میانگین در اثر تغییر حجم بلوک مقدار حجم المان معرف برای مخزن تعیین گردید.

## ۷- منابع

1. Larry W. Lake and Sanjay Srinivasan., 2004, Statistical Scale-up: Tools for forecasting Production under Uncertainty. Department of petroleum and geosystems engineering. The University of Texas at Austin.
2. Dr. Pengfie Zhang, 2000.,EAS 44600 Groundwater Hydrology Lecture 4: Porosity and Permeability.
3. Larry W. Lake, Sanjay Srinivasan and Abraham John., 2004, Statistical Scale-up: Concepts and application to reservoir flow simulation practice. Department of petroleum and geosystems engineering. The University of Texas at Austin, United States.
4. Clayton V. Deutsch., 2002, Geostatistical Reservoir Modeling. Oxford university Press.
5. Bear,J., 1972, Dynamics of Fluids in porous Media, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co.
6. Frykman, P. and C.V. Deutsch, 2002, Practical application of geostatistical scaling laws for data integration, Petrophysics, Vol.43, No.3, Pages 153-171.
7. Neuman, Shlomo P., 1994, Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale , Geophysical Research Letters, vol. 21,no. 5, pp. 349-352, March 1.
8. Varela, O.J., Torres-Verdin, C and Lake, L.W., 2002, Assessing the value of 3D seismic data in reducing uncertainty in reservoir production forecasts, SPE 77359, presented at the 2002 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 29- October 2.
9. Journel, A.G. and C. Hujbergts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, New York City.