

# تعیین جهت جریان سیال تک فازی در مخازن نفتی با استفاده از روش‌های آماری و زمین‌آماري (مطالعه موردی)

حسن حمزه‌پور سوینی<sup>i</sup>؛ وامق رسولی<sup>ii</sup>؛ ناصر علیزاده<sup>iii</sup>

## چکیده

یکی از موضوعات مهم در مطالعات مخزن، تعیین مسیر حرکت سیال است، که با مقدار پارامترهای تخلخل و همچنین نفوذپذیری مخزن ارتباط دارد. در حالت کلی جریان سیال را می‌توان در راستای حداکثر نفوذپذیری در نظر گرفت. با این فرض و با داشتن مقادیر نفوذپذیری مخزن به عنوان داده‌های فضایی، تحلیل زمین‌آماري، امکان تعیین جهت حداکثر نفوذپذیری را فراهم می‌کند.

در این مقاله تحلیل زمین‌آماري بر روی مقادیر تخلخل و نفوذپذیری یکی از مخازن هیدروکربنی ایران به انجام رسیده است. در ابتدا با استفاده از تحلیل‌های آماری، همبستگی بین این دو پارامتر مطالعه شده است. سپس از یک نرم‌افزار زمین‌آماري برای ایجاد مدل فضایی مقادیر تخلخل و نفوذپذیری استفاده شده، تغییرات فضایی پارامترها با رسم تابع واریوگرام تعیین شده است؛ براین اساس، جهت حداکثر نفوذپذیری در آزیموت ۱۳۵ درجه به دست آمده که در این مطالعه به عنوان جهت حرکت سیال در نظر گرفته شده است.

## کلمات کلیدی

زمین‌آمار، تخلخل، نفوذپذیری، جهت حرکت سیال

## *Determination of the Single Phase Fluid Flow Direction In Petroleum Reservoirs Using Statistical and Geostatistical Methods (case study)*

H. Hamzhepour S.; V. Rasouli; N. Alizadeh

### ABSTRACT

One of the important characteristics in the reservoir studies is the determination of the fluid flow direction. This is related to reservoir porosity and permeability parameters. In general, fluid flow direction can be considered in direction of maximum permeability. With this assumption and considering the reservoir permeability values as spatial data, geostatistical analyses allow determining the direction of maximum permeability.

In this paper, geostatistical analysis performed on the porosity and permeability in one of the reservoirs. Firstly, the correlations between two parameters have been studied using statistical analysis. Then, geostatistical software was used to construct the spatial model of porosity and permeability, where the spatial variation was determined by plotting the variogram. The direction of maximum permeability was found to be at an azimuth 135 degree, which in this study considered to be the direction of fluid flow.

### KEYWORDS

Geostatistical, Porosity, Permeability, Fluid Flow

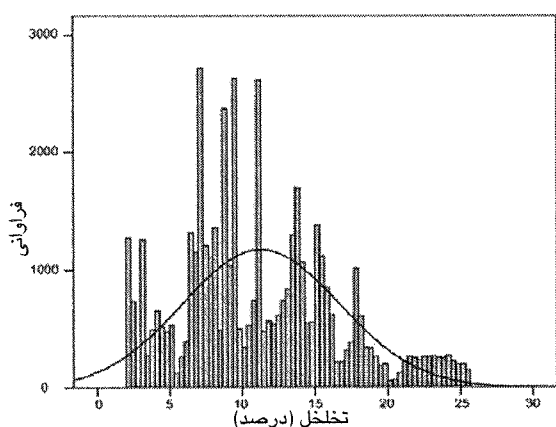
<sup>i</sup> کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران؛ Email: hasan.hamzhepour@gmail.com

<sup>ii</sup> عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ Email: vrasouli@aut.ac.ir

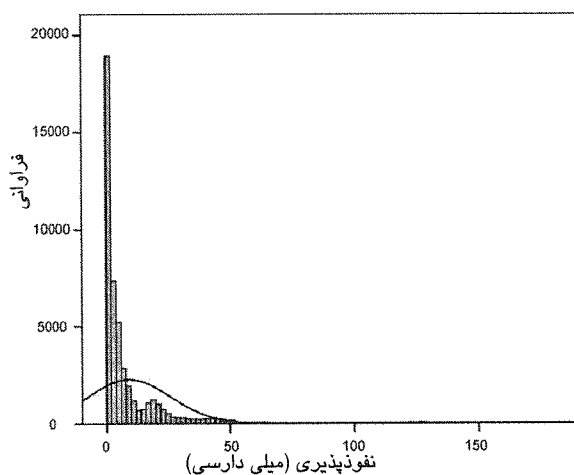
<sup>iii</sup> عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ Email: nalizadeh@aut.ac.ir

نسبت به هم صورت گرفته است و مدلی برای تخمین مقادیر نفوذپذیری از روی مقادیر تخلخل بر روی داده‌های یکی از مخازن هیدروکربنی ایران ارائه شده است.

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق، از یکی از مخازن هیدروکربنی ایران به طول ۳۰ کیلومتر و عرض ۲۵ کیلومتر و ضخامتی در حدود ۴۲۰ متر به دست آمده است و با توجه به نحوه برداشت داده‌ها، محدوده مورد مطالعه در راستای  $x$  به ۴۷، در راستای  $y$  به ۷۸ و در راستای  $z$  به ۱۲ بخش تقسیم شده است. شکل (۱)، نمودار هیستوگرام داده‌های خام تخلخل و شکل (۲)، هیستوگرام داده‌های خام نفوذپذیری را نشان می‌دهد. مقدار میانگین برای تخلخل ۱۱/۲۸ درصد و برای نفوذپذیری ۹/۱۸ میلی داری است که نشان دهنده مخزنی با کیفیت متوسط از نظر میزان تخلخل و نفوذپذیری است.



شکل (۱): هیستوگرام داده‌های تخلخل



شکل (۲): هیستوگرام داده‌های نفوذپذیری

همان طور که از شکل نمودار هیستوگرام داده‌های تخلخل و نفوذپذیری مشخص است، توزیع داده‌های تخلخل نسبت به توزیع داده‌های نفوذپذیری به توزیع نرمال نزدیک‌ترند و از پراکندگی بهتری برخوردارند، اما توزیع داده‌های نفوذپذیری

دو پارامتر پتروفیزیکی و مهم که در مخازن نفت و گاز اندازه‌گیری می‌شود، مقدار تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن است. از آنجا که امکان اندازه‌گیری برای تعیین مقادیر این دو پارامتر، به خصوص نفوذپذیری، در کل مخزن وجود ندارد و یا نیازمند صرف هزینه‌های بسیار زیاد است، بررسی نحوه تغییرات این دو پارامتر و ارائه مدلی برای بیان رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری به منظور تخمین مقادیر نفوذپذیری از روی مقادیر تخلخل، از مباحث مورد توجه در مطالعات مخازن است. با به کار گرفتن روش‌های آماری و انجام رگرسیون‌های دوگانه یا چندگانه، مدل‌ها و روابطی ارائه شده تا بتوان مقادیر نفوذپذیری را با توجه به مقادیر تخلخل و دیگر پارامترهای قابل دسترس، تعیین کرد.

یکی از مباحث مهم در مطالعات مخازن نفت و گاز، تعیین جهت حرکت سیال است. معین شدن این نکته در تعیین محل بهینه چاه‌های بعدی و برنامه ریزی تولید نقش مهمی ایفا می‌کند. جریان سیال در محیط‌های متخلخل، تابع عوامل زیادی است. مهم ترین این عوامل، میزان نفوذپذیری و اختلاف فشار است.

اختلاف فشار، نقش عامل محرک در جریان سیال را دارد، اما عامل اصلی برای اینکه سیال بتواند در یک محیط متخلخل جریان یابد، نفوذپذیر بودن محیط و وجود ارتباط مناسب بین مقادیر نفوذپذیری است؛ پس در حالت کلی می‌توان جهت جریان سیال را در راستای حداکثر نفوذپذیری در نظر گرفت. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت ضرورت وجود پیوستگی بین مقادیر نفوذپذیری و دارا بودن تغییرات منظم ساختار دار و صعودی است؛ زیرا عدم وجود پیوستگی باعث اغتشاش در جریان خواهد شد.

در این پژوهش، ابتدا ارتباط میان پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری با استفاده از روش‌های آماری مطالعه شده و معادله رگرسیون که ارتباط دهنده بین تخلخل و نفوذپذیری است، محاسبه شده است. سپس با استفاده از نرم افزار *WinGslib* مدل فضایی تخلخل و نفوذپذیری ایجاد و بر اساس آن تغییرات فضایی دو پارامتر با کمک تابع واریوگرام به شیوه زمین‌آماری مطالعه شده و بر مبنای آن راستای حداکثر نفوذپذیری معین شده است.

## ۲- مطالعات آماری

در این بخش تحلیل آماری و انجام رگرسیون دوگانه به منظور بررسی نحوه تغییرات دو پارامتر تخلخل و نفوذپذیری

دارای چولگی و کشیدگی بالایی است و کاملاً نسبت به توزیع نرمال انحراف دارند. در جدول (۱) پارامترهای آماری داده‌های تخلخل و نفوذپذیری ارائه شده است.

با توجه مقدار چولگی بالای داده‌های نفوذپذیری، می‌توان دریافت که تعداد زیادی از مقادیر نفوذپذیری مقدار پایینی دارند که این امر در نمودار هیستوگرام شکل (۲) آشکار است و همچنین با توجه به مقدار مُد نشان داده شده در جدول (۱) نیز قابل استنباط است. مقدار واریانس برای داده‌های تخلخل در حدود ۲۹ و برای داده‌های نفوذپذیری ۲۸۲ است. این مقدار واریانس برای نفوذپذیری، نشان دهنده وجود داده‌هایی با اختلاف‌های بسیار زیاد نسبت به میانگین است که بیانگر وجود مقادیر خارج از ردیف در بین داده‌ها است.

قبل از محاسبه ضریب همبستگی و انجام رگرسیون، تعیین مقادیر خارج از ردیف و اصلاح آنها حائز اهمیت است [۱]. برای شناسایی مقادیر خارج از ردیف در بین داده‌های موجود، از نمودار جعبه‌ای استفاده شد. جدول (۲) مقدار مرزهای داخلی و خارجی محاسبه شده برای هر دو متغیر را نشان می‌دهد.

بعد از تعیین مرزهای داخلی و خارجی، مقادیر بیشتر از مرزهای خارجی به عنوان مقادیر خارج از ردیف قوی معرفی می‌شوند [۲]. مقادیر خارج از ردیف قوی تنها در بین داده‌های نفوذپذیری وجود داشتند و چون تعداد آنها نسبت به کل داده‌ها کم بود (۶٪ کل داده‌ها می‌باشد) از بین مقادیر موجود حذف شدند.

جدول (۱): پارامترهای آماری داده‌های تخلخل و نفوذپذیری

| آماره         | تخلخل (درصد) | نفوذپذیری (میلی‌داریسی) |
|---------------|--------------|-------------------------|
| میانگین       | ۱۱/۲۸۸۷      | ۹/۱۸۰۳                  |
| میانه         | ۱۰/۷۰        | ۲/۲۶۰                   |
| مُد           | ۱۱/۱۰        | ۱/۱۳۰                   |
| انحراف معیار  | ۵/۲۰۲۵       | ۱۶/۷۹۸                  |
| واریانس       | ۲۹/۲۰۹       | ۲۸۲/۲۰۶                 |
| چولگی         | ۰/۵۰۸        | ۲/۱۱۱                   |
| کشیدگی        | -۰/۲۰۶       | ۲۲/۰۸۸                  |
| کمترین مقدار  | ۲/۰۲         | ۰/۰۰۵                   |
| بیشترین مقدار | ۲۵/۵۷۱۰      | ۱۷۴                     |
| چارک پایین    | ۷/۲۸۲۷       | ۰/۶۰۵                   |
| چارک بالا     | ۱۲/۸۱۵۲      | ۹/۱۹۰                   |

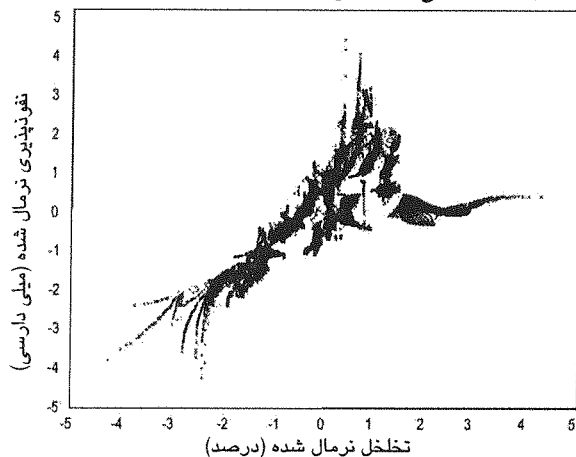
جدول (۲): مقدار مرزهای داخلی و خارجی هر یک از داده‌های تخلخل و نفوذپذیری

| نوع مرز         | تخلخل (درصد) | نفوذپذیری (میلی‌داریسی) |
|-----------------|--------------|-------------------------|
| مرز داخلی پایین | -۱/۰۱۲       | -۱۲/۲۷۲                 |
| مرز داخلی بالا  | ۲۱/۱۱۲       | ۲۲/۰۶۷                  |
| مرز خارجی پایین | -۹/۳۱۰       | -۲۵/۱۵۰                 |
| مرز خارجی بالا  | ۲۹/۴۰۹       | ۳۲/۹۴۵                  |

پس از حذف مقادیر خارج از ردیف قوی، میانگین داده‌های نفوذپذیری به ۵/۷۸ میلی‌داریسی و مقدار واریانس به ۵۵/۹۹ کاهش پیدا کرد. ملاحظه می‌شود که مقادیر خارج از ردیف تأثیر بسیاری بر میانگین و واریانس داشته‌اند که با خارج کردن تنها ۲۹۱۶ داده از بین کل داده‌ها، مقدار واریانس کل به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است.

نکته دیگری که قبل از محاسبه ضریب همبستگی پیرسون باید به آن توجه داشت، نرمال بودن توزیع دو متغیر است. شکل (۳)، نمودار پراکنش داده‌ها را پس از نرمال شدن توزیع داده‌ها نشان می‌دهد. بر اساس نمودار، پراکنش مقادیر نرمال شده دو متغیر دارای کشیدگی مناسب است. این پدیده نشان می‌دهد که در این حالت می‌توان به ضریب همبستگی پیرسون اعتماد کرد. در واقع در این حالت تغییرات دو متغیر نسبت به هم تا حدود زیادی رفتار خطی از خود نشان می‌دهند. مقدار ضریب همبستگی بین داده‌های تخلخل و نفوذپذیری برابر با ۰/۷۲۳ است.

بعد از نرمال شدن توزیع داده‌ها می‌توان از رگرسیون خطی برای برازش یک خط بر داده‌ها استفاده کرد. هدف از این کار ارائه معادله‌ای است که بتوان با کمک آن مقادیر متغیر وابسته (نفوذپذیری) را از روی مقادیر متغیر مستقل (تخلخل) تخمین زد. در این حالت معادله به شکل  $K = 0.723 \varphi$  درمی‌آید، که در آن  $K$  بیانگر نفوذپذیری و  $\varphi$  بیانگر تخلخل است. مقدار خطای معیار ضریب رگرسیون برابر با ۰/۰۰۳ بوده و ضریب رگرسیون در سطح ۵٪ معنی دار است.



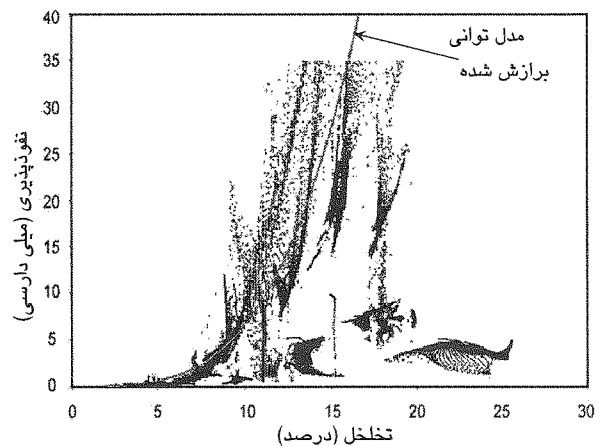
شکل (۳): نمودار پراکنش مقادیر نرمال شده تخلخل در برابر نفوذپذیری

انجام تعدادی از روش‌های رگرسیون از جمله مدل‌های توانی و نمایی برای مقادیر نرمال شده ممکن نیست؛ زیرا در این روش‌ها نباید مقادیر منفی در بین داده‌ها وجود داشته باشد، اما در مقادیر نرمال شده تحقق این شرط امکان پذیر نیست و

این نوع روش‌های رگرسیون بر روی داده‌های تبدیل نیافته باید انجام گیرد.

بیشتر روابط تجربی بین داده‌های تخلخل و نفوذپذیری بر اساس دو مدل توانی و نمایی شکل گرفته‌اند. مدل توانی در حالت کلی به صورت  $K = \alpha \cdot \exp(\beta\phi)$  و مدل نمایی در حالت کلی به صورت  $K = \alpha \cdot \beta^\phi$  است [۴]. مدل توانی برای داده‌های مورد استفاده به صورت  $K = 0.001\phi^{2.7719}$  و مدل نمایی به صورت  $K = 0.07918e^{-0.1789\phi}$  محاسبه شد.

مقدار خطای معیار ضریب رگرسیون در مدل توانی برابر با ۰/۰۰۹ و برای مدل نمایی برابر با ۰/۰۱۵ است. نتیجه آزمون  $t$  بر روی ضریب رگرسیون و مقدار ضریب ثابت برای مدل توانی نشان می‌دهد که ضرایب رگرسیون در سطح ۵٪ معنی‌دار است. جمع توان دوم مقادیر باقی مانده در مدل توانی برابر با ۵۹۱۷۴ و برای مدل نمایی برابر با ۸۵۴۷۵ است که نشان می‌دهد مقادیر باقی مانده برای مدل توانی کمتر است و می‌توان دریافت که مدل توانی نسبت به مدل نمایی تخمین بهتری برای مقادیر نفوذپذیری ارائه می‌کند. شکل (۴) مدل توانی برازش شده بر داده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار پراکنش مقادیر داده‌های تخلخل در برابر نفوذپذیری به همراه مدل توانی

### ۳- مطالعات زمین آماری

در روش‌های آمار کلاسیک فرض می‌شود که هر نمونه، یک حالت تحقق یافته و مستقل از نمونه‌های دیگر است که این نوع استقلال به ندرت در داده‌های حاصل از برداشت نمونه‌های مربوط به زمین یافت می‌شود. در این حالت موقعیت مکانی و یا زمانی نمونه‌ها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد؛ به همین دلیل برخی از ساختارهای موجود به وسیله ابزارهای مورد استفاده در آمار کلاسیک خود را بروز نمی‌دهند. در صورتی که در زمین‌آمار موقعیت فضایی نمونه‌ها مورد سنجش قرار می‌گیرد و بسیاری از ساختارهای پنهان که تابع فاصله زمانی یا مکانی

هستند، به وسیله ابزارهای معمول در زمین‌آمار (بویژه واریوگرام) خود را آشکار می‌سازند. از آنجا که روش زمین‌آماري چندان شناخته شده نیست، در ابتدا نکاتی درباره نحوه محاسبه واریوگرام و ویژگی‌های آن بیان می‌شود.

واریوگرام مهم ترین ابزار بروز همبستگی‌های فضایی بین داده‌ها است، در واقع واریوگرام، میانگین مربعات تفاضل دو مقدار را به عنوان تابعی از نمو فاصله بین آنها نشان می‌دهد. واریوگرام، پایه اصلی محاسبات زمین‌آماري است و مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که در آن  $\gamma(h)$  را نیمه واریوگرام<sup>۱</sup> و  $2\gamma(h)$  را واریوگرام می‌نامند؛ ولی چون در عمل بیشتر از  $\gamma(h)$  استفاده می‌شود، به عنوان یک قرارداد در اکثر مراجع از  $\gamma(h)$  به عنوان واریوگرام نام برده می‌شود. در (۲)،  $n$  تعداد جفت نقاطی است که به فاصله  $h$  (گام<sup>۲</sup>) از یکدیگر قرار دارند و در محاسبه واریوگرام شرکت می‌کنند،  $x_i$  مقدار متغیر مورد بررسی در نقطه  $i$ ،  $x_{i+h}$  مقدار متغیر مورد بررسی در نقطه‌ای به فاصله  $h$  از نقطه  $i$  است. با محاسبه مقدار واریوگرام به ازای گام‌های مختلف، می‌توان نمودار  $\gamma(h)$  برحسب  $h$  را رسم کرد. واریوگرامی را که به این طریق حاصل می‌شود، واریوگرام تجربی<sup>۳</sup> می‌نامند [۳].

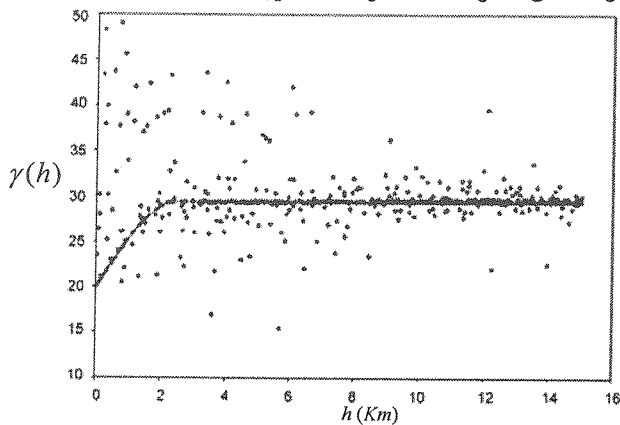
برای معین شدن مقدار یک واریوگرام، سه پارامتر اثر قطعه‌ای، سقف و دامنه باید تعیین شوند. اثر قطعه‌ای<sup>۴</sup> مقدار واریوگرام در نقطه صفر است. معمولاً با افزایش مقدار گام ( $h$ ) واریوگرام به مقدار ثابتی می‌رسد که به آن سقف واریوگرام گویند. سقف<sup>۵</sup> اندازه کلی تغییرات فضایی پارامتر مورد بررسی را نشان می‌دهد (همان گونه که مشخص است اثر قطعه‌ای و سقف هم واحد بوده، واحد آنها برابر با مربع واحد متغیر مورد بررسی است). دامنه<sup>۶</sup>، فاصله‌ای است که در خارج از آن، مقدار واریوگرام قدری ثابت باقی می‌ماند و در داخل این فاصله، ارتباط فضایی بین داده‌ها وجود داشته و کوواریانس بین داده‌ها مخالف صفر است. دامنه واریوگرام معیاری از میزان پیوستگی واریوگرام را ارائه می‌کند [۵]. اگر در محاسبه واریوگرام به ازای هر گام معین، بردار  $h$  نظیر آن گام در فضا در هر جهتی بتواند قرار گیرد، واریوگرام حاصل را واریوگرام غیر جهتی<sup>۷</sup> و اگر بردار تنها در جهتی خاص قرار بگیرد، آن را واریوگرام جهتی<sup>۸</sup> می‌نامند.

#### ۳-۱- تئوری مدل

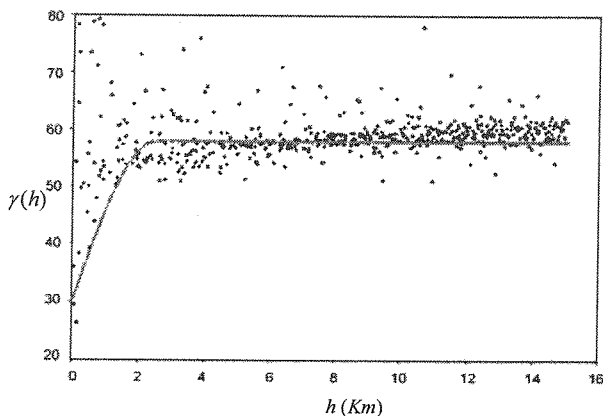
مهم‌ترین قانون برای بررسی جریان در محیط‌های متخلخل قانون داریسی<sup>۹</sup> است. جریان سیال در محیط‌های متخلخل، بطور

متغیر وجود دارد. به این دلیل، تحلیل‌ها بر روی هر دو پارامتر صورت می‌گیرد تا با مقایسه نتایج حاصل از دو متغیر تأییدی بر درستی نتایج به دست آمده نیز حاصل شود.

در ابتدا برای بررسی ساختار فضایی داده‌های مورد مطالعه واریوگرام‌های غیر جهتی محاسبه و رسم شدند. شکل (۵) واریوگرام غیر جهتی مقادیر تخلخل را به همراه مدل برازش شده نشان می‌دهد. این مدل دارای اثر قطعه‌ای ۲۰ و سقف ۲۹/۵ و دامنه ۲۵۰۰ متر است. شکل (۶) واریوگرام غیر جهتی مقادیر نفوذپذیری را به همراه مدل کروی برازش شده بر آن نشان می‌دهد. مدل کروی برازش شده بر این واریوگرام تجربی دارای اثر قطعه‌ای ۳۰ و سقف ۵۸ و دامنه تأثیر ۲۵۰۰ متر است.



شکل (۵): واریوگرام غیر جهتی مقادیر تخلخل به همراه مدل کروی برازش شده بر آن



شکل (۶): واریوگرام غیر جهتی مقادیر نفوذپذیری به همراه مدل کروی برازش شده بر آن

به منظور سنجش تغییرات در راستای قائم (عمود بر لایه‌ها) یک واریوگرام نیز باید در این راستا رسم شود. شکل (۷) واریوگرام جهتی مقادیر تخلخل را در راستای قائم و شکل (۸) همان واریوگرام را برای مقادیر نفوذپذیری نشان می‌دهد.

در هر دو مورد، واریوگرام قائم دارای تغییرات شدیدی است که نشان دهنده وجود یک ساختار تناوبی در جهت قائم

کامل از قانون داریوسی پیروی نمی‌کند، ولی تا حد زیادی می‌توان نتایج را از روی آن پیش بینی کرد. علل اصلی انحراف از قانون داریوسی، زبری سطوح و تأثیر پیچش‌هاست. در حالت کلی، عامل مهم و مؤثر بر جریان سیال، نفوذپذیری محیط است که نسبت مستقیم با مقدار سیال عبوری از سطح مقطع مورد نظر دارد.

به طور کلی می‌توان گفت اگر چه اختلاف فشار در مخزن، عامل محرک در حرکت سیال است اما می‌توان جریان سیال را در راستای حداکثر نفوذپذیری در نظر گرفت. در ادامه با استفاده از زمین‌آمار، روشی برای تعیین جهت حداکثر نفوذپذیری که نشان دهنده جهت حرکت سیال است، ارائه می‌شود.

اینک با بررسی واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری، باید در جستجوی جهتی بود که مقادیر نفوذپذیری جهت یافتگی خاصی را در آن امتداد نشان دهد. در این جهت مقادیر تابع واریوگرام نفوذپذیری، بیشترین دامنه تأثیر را از خود نشان می‌دهند [۵]. بیشترین دامنه تأثیر در تابع واریوگرام نفوذپذیری نشان دهنده تغییرات اندک و ساختاردار در مقادیر نفوذپذیری، به ازای افزایش فاصله بین دو نقطه اندازه‌گیری است.

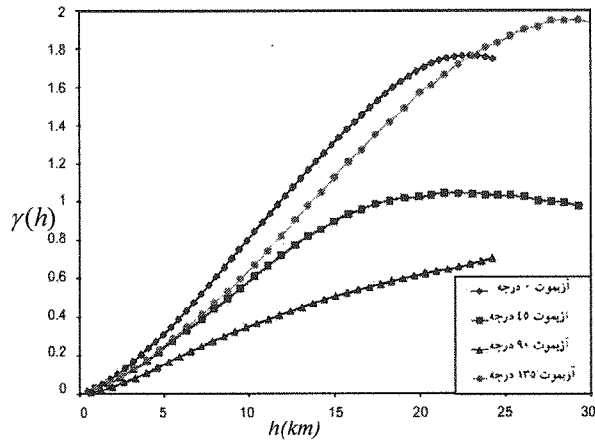
به عبارت ساده‌تر، در این جهت مشخص، مقادیر نفوذپذیری، اندک اندک زیاد می‌شود و در نتیجه اختلاف بین آنها نیز به آرامی افزایش می‌یابد. این تغییرات در مقادیر نفوذپذیری، در تابع واریوگرام منعکس شده، موجب ایجاد یک روند صعودی منظم در مقادیر تابع واریوگرام می‌شود تا به بیشترین مقدار خود می‌رسد و تغییرات آن ثابت می‌ماند.

در راستای مشخص شده و در فواصل کم، تفاوت میان مقادیر نفوذپذیری کم است و باعث ایجاد پیوستگی در تابع واریوگرام می‌شود. با افزایش فاصله، به دلیل افزایش مقادیر نفوذپذیری، اختلاف مقادیر بین دو نقطه که فاصله زیادی از هم دارند نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش مقادیر تابع واریوگرام در این جهت می‌شود [۶].

باید توجه داشت تنها افزایش مقادیر نفوذپذیری کافی نیست بلکه این افزایش باید با پیوستگی همراه باشد، زیرا اگر مقادیر تابع واریوگرام در جهتی خاص تغییرات ناگهانی داشته باشد، نشان دهنده افزایش یا کاهش ناگهانی مقادیر نفوذپذیری در آن جهت است. در این حالت جریانی وجود ندارد؛ زیرا این تغییرات موجب ایجاد اغتشاش در جریان می‌شود.

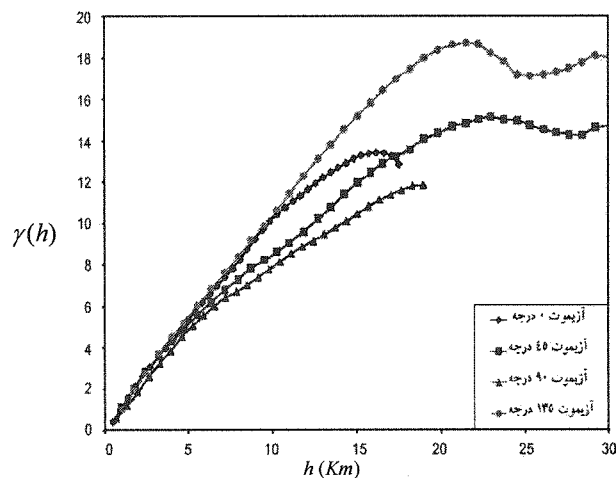
### ۳-۲- بررسی ساختار فضایی

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات آماری و از آنجا که بین دو پارامتر مورد مطالعه ارتباط آماری مناسبی مشاهده شد، انتظار بروز رفتارهای مشابهی در تحلیل زمین‌آماري دو



شکل (۹): واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل  
جدول (۳): پارامترهای مدل‌های برازش شده بر واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل

| نوع مدل | آزیموت (درجه) | اثر قطعه‌ای | سقف  | دامنه (متر) |
|---------|---------------|-------------|------|-------------|
| گوسی    | ۰             | ۰           | ۱/۵۳ | ۱۱۰۰۰       |
| گوسی    | ۴۵            | ۰           | ۱/۰۴ | ۱۰۵۰۰       |
| گوسی    | ۹۰            | ۰           | ۰/۵  | ۹۸۰۰        |
| گوسی    | ۱۳۵           | ۰           | ۱/۷  | ۱۵۰۰۰       |

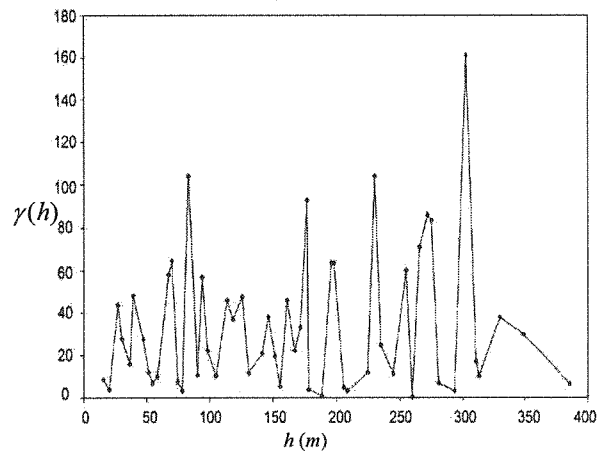


شکل (۱۰): واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری  
جدول (۴): پارامترهای مدل‌های برازش شده بر واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری

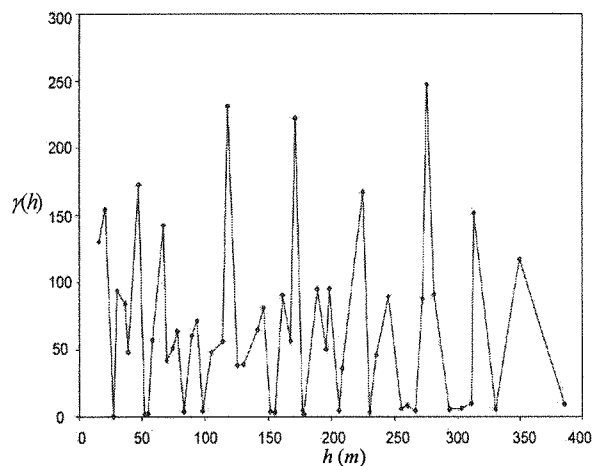
| نوع مدل | آزیموت (درجه) | اثر قطعه‌ای | سقف  | دامنه (متر) |
|---------|---------------|-------------|------|-------------|
| کروی    | ۰             | ۰           | ۱۲/۸ | ۱۷۰۰۰       |
| کروی    | ۴۵            | ۰/۴         | ۱۴/۵ | ۲۰۰۰۰       |
| کروی    | ۹۰            | ۰           | ۱۰   | ۱۵۵۰۰       |
| کروی    | ۱۳۵           | ۰/۲         | ۱۸/۴ | ۲۵۰۰۰       |

به منظور بررسی ناهمسانگردی و تعیین دقیق جهت‌هایی که پارامترهای مورد بررسی دارای بیشترین و کمترین دامنه

است. یعنی اینکه مقدار متغیر مورد بررسی در راستای عمود بر لایه‌ها افزایش و کاهش می‌یابد که نشان دهنده تغییر در ساختار هر لایه و تغییر مقدار تخلخل و نفوذپذیری آن است.



شکل (۷): واریوگرام جهتی مقادیر تخلخل در راستای قائم



شکل (۸): واریوگرام جهتی مقادیر نفوذپذیری در راستای قائم

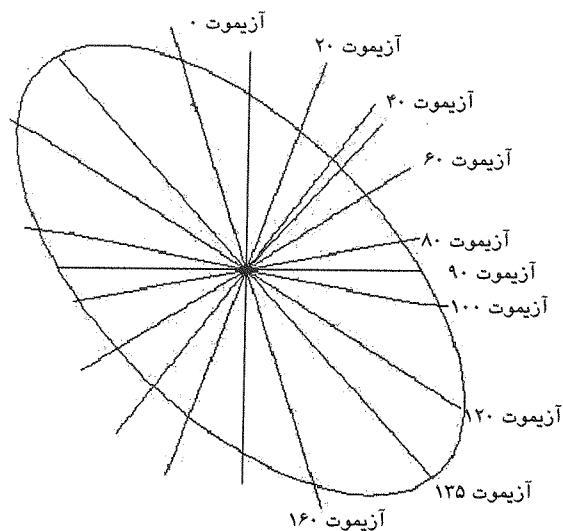
### ۳-۳- بررسی ناهمسانگردی

به منظور بررسی ناهمسانگردی این منطقه از نظر مقادیر تخلخل و نفوذپذیری، در ابتدا چهار واریوگرام جهتی در آزیموت‌های اصلی (۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ درجه) رسم شدند. شکل (۹) واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل را در چهار جهت اصلی که مشخصات هر یک از مدل‌های آن در جدول (۳) آمده، نشان می‌دهد. شکل (۱۰) نیز واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری را که مشخصات مدل‌های آن در جدول (۴) ارائه شده نشان می‌دهد.

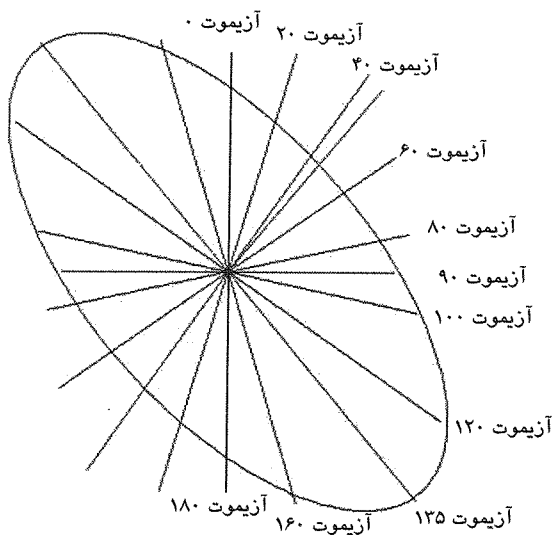
همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار دامنه تأثیر برای هر دو پارامتر مورد بررسی در آزیموت ۱۳۵ درجه روی می‌دهد. با توجه به تغییر مقادیر دامنه‌ها، احتمال وجود ناهمسانگردی هندسی در منطقه وجود دارد.

هندسی وجود دارد. در این بیضی ناهمسانگردی، امتداد محور کوچک بیضی معرف امتدادی با تغییرپذیری شدیدتر و امتداد محور بزرگ بیضی معرف امتدادی با کمترین تغییرپذیری و بیشترین پیوستگی است.

شکل (۱۱) نمودار دامنه تأثیر هر یک از واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل را در آزیموت مربوطه به همراه بیضی برازش شده بر آنها و شکل (۱۲) همین نمودار را برای مقادیر دامنه تأثیر نفوذپذیری نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود، بیشترین دامنه تأثیر در آزیموت ۱۳۵ درجه مشاهده می‌شود که مقدار دامنه تأثیر نفوذپذیری برابر با ۲۵۰۰۰ متر است.



شکل (۱۱): دامنه تأثیر هر یک از واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل به همراه بیضی برازش شده بر آنها



شکل (۱۲): دامنه تأثیر هر یک از واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری به همراه بیضی برازش شده بر آنها

تأثیرند، واریوگرام‌های جهتی با اختلاف زاویه ۲۰ درجه و تئرانس افقی ۱۰ درجه رسم شدند تا کل منطقه مورد مطالعه را پوشش دهند. پارامترهای مدل‌های برازش شده بر این واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل در جدول (۵) و پارامترهای مدل‌های برازش شده بر واریوگرام‌های جهتی مقادیر نفوذپذیری در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به مقادیر دامنه تأثیر واریوگرام‌ها که در این جدول‌ها آمده است، ملاحظه می‌شود که برای هر دو متغیر بیشترین مقدار دامنه تأثیر در همان آزیموت ۱۳۵ درجه و کمترین مقدار دامنه تأثیر در آزیموت ۹۰ درجه رخ داده است.

جدول (۵): پارامترهای مدل‌های برازش شده بر واریوگرام‌های

| جهتی مقادیر تخلخل در سایر جهتها |               |             |      |             |
|---------------------------------|---------------|-------------|------|-------------|
| نوع مدل                         | آزیموت (درجه) | اثر قطعه‌ای | سقف  | دامنه (متر) |
| گوسی                            | ۰             | ۰           | ۱/۵۲ | ۱۱۰۰۰       |
| گوسی                            | ۲۰            | ۰           | ۱/۶۴ | ۱۲۵۰۰       |
| گوسی                            | ۴۰            | ۰           | ۱/۱۵ | ۱۱۰۰۰       |
| گوسی                            | ۶۰            | ۰           | ۰/۸۲ | ۱۰۵۰۰       |
| گوسی                            | ۸۰            | ۰           | ۰/۵۸ | ۹۸۰۰        |
| گوسی                            | ۱۰۰           | ۰           | ۰/۶  | ۹۸۰۰        |
| گوسی                            | ۱۲۰           | ۰           | ۱/۳  | ۱۲۵۰۰       |
| گوسی                            | ۱۴۰           | ۰           | ۱/۸  | ۱۴۰۰۰       |
| گوسی                            | ۱۶۰           | ۰           | ۱/۸  | ۱۳۰۰۰       |

جدول (۶): پارامترهای مدل‌های برازش شده بر واریوگرام‌های

| جهتی مقادیر نفوذپذیری در سایر جهتها |               |             |       |             |
|-------------------------------------|---------------|-------------|-------|-------------|
| نوع مدل                             | آزیموت (درجه) | اثر قطعه‌ای | سقف   | دامنه (متر) |
| کروی                                | ۰             | ۰           | ۱۲/۸  | ۱۷۰۰۰       |
| کروی                                | ۲۰            | ۰           | ۱۳/۳۶ | ۱۸۰۰۰       |
| کروی                                | ۴۰            | ۰/۴         | ۱۵/۳  | ۲۰۰۰۰       |
| کروی                                | ۶۰            | ۰           | ۱۲/۲۲ | ۱۸۰۰۰       |
| کروی                                | ۸۰            | ۰           | ۱۰/۲۶ | ۱۷۰۰۰       |
| کروی                                | ۱۰۰           | ۰           | ۱۱/۸  | ۱۸۰۰۰       |
| کروی                                | ۱۲۰           | ۰           | ۱۶/۹  | ۲۲۰۰۰       |
| کروی                                | ۱۴۰           | ۰           | ۱۷/۲  | ۲۲۵۰۰       |
| کروی                                | ۱۶۰           | ۰           | ۱۵/۴۳ | ۱۹۰۰۰       |

نتایج حاصل از محاسبه واریوگرام‌های جهتی مقادیر تخلخل و نفوذپذیری، احتمال وجود یک ناهمسانگردی هندسی در منطقه را تقویت می‌کند. به منظور بررسی درستی یا عدم درستی این احتمال باید بیضی ناهمسانگردی با توجه به مقادیر دامنه‌های واریوگرام‌ها در جهت‌های مختلف، ترسیم شود. برای ترسیم بیضی ناهمسانگردی در منطقه مورد نظر، دامنه‌های تأثیر هر یک از واریوگرام‌ها به صورت بردارهایی از مبدأ مختصات در جهت واریوگرام جهتی متناظر هر یک رسم می‌شوند. بعد از آن اگر بتوان با تقریب مناسب بر این نمودار یک بیضی برازش داد، می‌توان گفت که در منطقه ناهمسانگردی

چنان که مشاهده شد، بیشترین دامنه تأثیر تابع واریوگرام مقادیر نفوذپذیری مانند مقادیر تخلخل در آزمون ۱۳۵ درجه رخ داده است؛ یعنی در این جهت شاهد تغییرات ساختار دار و منظم در مقادیر نفوذپذیری بوده و تفاوت میان مقادیر نفوذپذیری اندک است و با افزایش فاصله بین نقاط، مقدار نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل آنست که حداکثر نفوذپذیری - که دارای تغییرات منظم و ساختاردار افزایشی باشد - در امتداد آزمون ۱۳۵ درجه رخ می‌دهد و طبق آنچه که در بخش [۳-۱-۸] بیان شد نشان دهنده جهت حرکت سیال است.

#### ۴- نتایج

- اگر پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری همبستگی خوبی از خود بروز دهند، می‌توان از این ویژگی برای انجام رگرسیون و ارائه مدلی جهت تخمین مقادیر نفوذپذیری استفاده کرد.  
- با رسم تابع واریوگرام در راستای قائم، نحوه و میزان تغییرات پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری بررسی شد که نشان دهنده ساختاری تناوبی در این راستاست، بر این اساس ملاحظه شد که مقادیر تخلخل و نفوذپذیری در اعماق مختلف

#### ۵- مراجع

کاملاً متفاوت است و تغییرات شدیدی را نشان می‌دهند.  
- تابع واریوگرام، تغییرات فضایی متغیر مورد بررسی را نشان می‌دهد و با محاسبه مقادیر این تابع در جهت‌های مختلف، می‌توان جهتی را که در آن راستا مقادیر تخلخل و نفوذپذیری بیشترین دامنه تأثیر را دارند، تعیین کرد. در مخزن مورد مطالعه، جهت حداکثر تخلخل و نفوذپذیری در آزمون ۱۳۵ درجه به دست آمد؛ این امر حاکی از آن است که افزایش تخلخل باعث افزایش نفوذپذیری در این جهت شده است. این نتیجه با نتایج تحلیل آماری، که همبستگی خوبی را برای این دو پارامتر نشان می‌داد، مطابقت دارد.

- با صرف نظر کردن از اختلاف فشار در مخزن به عنوان عامل محرک در جریان سیال می‌توان جهت حرکت سیال را در امتداد حداکثر نفوذپذیری در نظر گرفت. در مخزن مورد مطالعه جهت حرکت سیال در آزمون ۱۳۵ درجه تعیین شد. نتایج به دست آمده با شرایط کلی موجود در منطقه نیز مطابقت داشته است؛ اما به علت شرایط خاص امنیتی امکان ارائه جزئیات اطلاعات فراهم نشد.

- |     |  |     |  |
|-----|--|-----|--|
| [۱] | حسنی پاک، علی اصغر؛ 'زمین‌آمار'، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۷۷.              | [۴] | James, W.; Jennings, Jr; Lucia, F. Jerry; "Predicting Permeability From Well Logs in Carbonates With a Link to Geology for Interwell Permeability Mapping", SPE 71336, 2002. |
| [۲] | پارسیان، احمد؛ 'مبانی آمار و احتمال'، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ اول، ۱۳۸۴.  | [۵] | Starzec, P.; Fehler, M.; Baria, R.; "Anisotropy of Source Parameters From Induced Microseismicity", Journal of Geophysical Research., 1997.                                  |
| [۳] | حسنی پاک، علی اصغر؛ 'تحلیل داده‌های اکتشافی'، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۸۰. | [۶] | Journel, A.G. and Huijbergts, C., "Mining Geostatistics" New York Academic, Fifth Printing 2002.   |

#### ۶- زیرنویسها

- ۱ Semi-Variogram
- ۲ Lag
- ۳ Experimental Variogram
- ۴ Nugget Effect
- ۵ Range
- ۶ Sill
- ۷ Omni-directional Variogram
- ۸ Directional Variogram
- ۹ Darcy Low