# استفاده از نگار انحراف سرعت برای تخمین نسبت ابعادی حفرات متغیر با عمق

فاطمه بزرگی[۱]، مجید نبی بیدهندی[۲]، رضا فلاحت[۳]، فروغ فرخنیا[۴]
[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، fateme.bozorgi@ut.ac.ir
[۲] استاد گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mnbhendi@ut.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، rezafalahat @ sut.ac.ir
[۴] کارشناس ژئوفیزیک، شرکت مشاوران انرژی تهران، f.farrokhnia@tehranenergy.com

## چکیده

مخازن کربناته به دلیل سیستم منافذ پیچیده‌ای که دارند، نسبت به مخازن آواری دارای پراکندگی بیشتری در رابطه تخلخل - سرعت خود می‌باشند. برای مدلسازی فیزیک سنگ و تخمین سرعت در سنگ‌های کربناته، لحاظ کردن نسبت ابعادی منافذ در روابط و معادلات فیزیک سنگ، باعث بهبود نتایج حاصله می‌شود. یکی از روش‌های تعیین نسبت ابعادی منافذ، از طریق تجزیه و تحلیل مقاطع نازک می‌باشد. گرچه ایراداتی بر آن وارد است. یکی از چالش‌هایی که وجود دارد این مسئله است که در واقعیت نسبت ابعادی می‌تواند با عمق متغیر باشد؛ در حالی‌که ممکن است مقاطع نازک برای تمام بازه مخزن در دسترس نباشد. از این رو ممکن است یک نسبت ابعادی ثابت در نظر گرفته شود که بالطبع خطاهایی به دنبال خود خواهد داشت. در این مقاله به بررسی یکی از روش‌های تعیین نسبت ابعادی متغیر با عمق پرداخته شده است. نهایتاً با دسته بندی انواع منافذ به ۳ دسته کلی، که با عمق متغیر می‌باشند، و استفاده از آن در مدلسازی فیزیک سنگ، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از نسبت ابعادی منافذی که با عمق متغیر است، خطا در مدلسازی فیزیک سنگ را کاهش داده و می‌تواند گام مهمی در بهبود روابط فیزیک سنگ در سنگ‌های کربناته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** فیزیک سنگ، مخازن کربناته، نسبت ابعادی، تخمین سرعت، نگار انحراف سرعت

# Utilization of Velocity Deviation Log for estimating variable pore aspect ratio with depth

Fateme Bozorgi [1], Majid Nabi Bidhendi [2], Reza Falahat [3], Foroogh Farrokhnia [4]
[1]*M.Sc. student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*
[2]*Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*
[3]*Associate Professor, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran*
[4] *Geophysicist,Tehran Energy Consultants, Tehran, Iran*

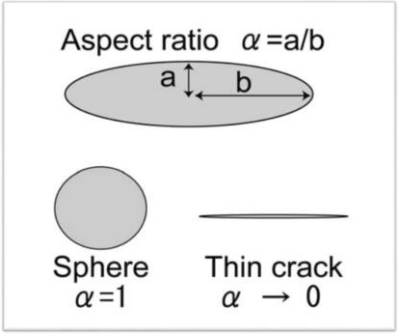
## Abstract

Due to their complex pore system, carbonate reservoirs have more dispersion in their porosity-velocity relationship than clastic reservoirs. For rock physics modeling and velocity estimation in carbonate rocks, considering the pore aspect ratio in the rock physics equations and relationships improves the results. One of the methods of determining the pore aspect ratio is through the analysis of thin sections. However, there are some problems with it. One of the challenges that exists is that in reality, the aspect ratio can vary with depth; While thin sections may not be available for the entire reservoir interval. So, a fixed aspect ratio may be considered, which will most probably cause errors. In this article, one of the methods of determining the variable pore aspect ratio with depth has been investigated. Finally, by classifying the types of pores into 3 general categories that vary with depth, and using it in rock physics modeling, it can be concluded that using the variable pore aspect ratio reduces the error in rock physics modeling and It can be an important step in improving the relations of rock physics in carbonate rocks.

**Keywords:** Rock physics, Carbonate reservoirs, Aspect ratio, Velocity estimation, Velocity Deviation Log

## ۱ مقدمه

وجود انواع تخلخل در سنگ‌های کربناته باعث اضافه شدن پارامتری به نام نسبت ابعادی، به معادلات فیزیک سنگ شد. نسبت ابعادی حفرات برابر است با نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ یک منفذ بیضی شکل. همانطور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، در صورتی که این نسبت برابر با ۱ باشد، منفذ دایره‌ای شکل خواهد بود، و اگر این نسبت به سمت صفر میل کند، منفذ به صورت شکستگی درمی‌آید. این ضریب هندسی را می‌توان از تجزیه و تحلیل مقاطع نازک به دست آمده از نمونه‌های مغزه در آزمایشگاه به دست آورد. اما ایراداتی بر آن وارد است. برای مثال شکل فضاهای منفذ در واقعیت به صورت ۳ بعدی می‌باشد، در صورتیکه مقطع نازک به صورت ۲ بعدی حاصل می‌شود. به همین دلیل نسبت ابعادی واقعی به دست نمی‌آید. همچنین نمونه مغزه معمولاً برای کل فاصله مخزن ثبت شده در دسترس نیست. این که بتوانیم از تمام فواصل مخزن نمونه مغزه داشته باشیم اگر غیرممکن نباشد، بسیار هزینه‌بر است. بنابراین، معمولاً یک نسبت ابعادی ثابت به هر نوع از منافذ اختصاص داده می‌شود. اما با در نظر گرفتن تغییرات رسوبگذاری با عمق و همچنین نقش فرآیندهای دیاژنتیکی بر روی سنگ‌های کربناته، تخصیص یک نسبت ثابت از نسبت ابعادی در طول بازه مخزن می‌تواند عدم قطعیت‌هایی را ایجاد کند (فلاحت و فرخنیا، ۲۰۲۰). بنابراین در این پژوهش به یکی از روش‌های تعیین نسبت ابعادی منافذ متغیر با عمق پرداخته شده است.




**شکل ۰۱.** توصیف نسبت ابعادی در منافذ بیضی شکل (تسوجی و همکاران، ۲۰۰۸).

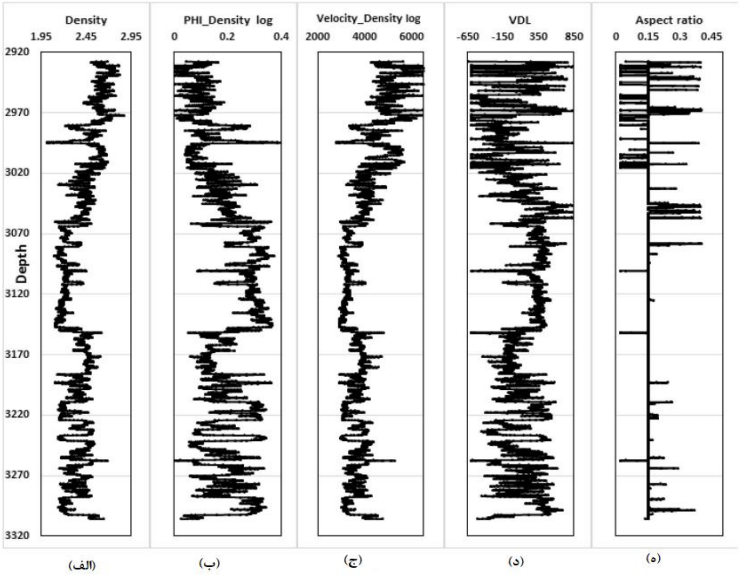
## ۲ روش

آنسلمتی و ابرلی در سال ۱۹۹۹، الگوریتمی مبتنی بر نگار انحراف سرعت، را برای تعیین انواع منافذ در سنگ‌های کربناته ارائه کردند. نگار انحراف سرعت که از تلفیق نگار صوتی با نگار تخلخل نوترون یا نگار چگالی محاسبه می‌شود، ابزاری را برای به دست آوردن اطلاعات منفذ در مورد نوع منفذ غالب در کربناته‌ها فراهم می‌کند. روش کار به این صورت است که ابتدا با استفاده از معادله میانگین زمانی وایلی (۱۹۵۶) سرعت صوت در سنگ بر اساس تخلخل محاسبه شده از طریق نمودار نوترون یا چگالی، محاسبه می‌شود، و در گام بعدی به منظور محاسبه نگار انحراف سرعت، سرعت محاسبه شده از طریق تخلخل به دست آمده از نگارهای نوترون یا چگالی (با استفاده از معادله میانگین زمانی)، از سرعت اندازه‌گیری شده توسط نگار صوتی، کم می‌شود (آنسلمتی و ابرلی، ۱۹۹۹). یا به عبارتی طبق رابطه (۱):

(۱) گیری شده از نگار صوتی = نگار انحراف سرعت‌سرعت محاسبه شده از معادله میانگین زمانی – سرعت اندازه

به دنبال کار آنسلمتی و ابرلی، فلاحت و فرخنیا (۲۰۲۰) انواع منافذ به دست آمده از روی نگار انحراف سرعت را با نگاهی ریاضی محور، به نسبت ابعادی منافذ نسبت داده و بنابراین، با توجه به اینکه در واقعیت نسبت ابعادی با عمق متغیر است، الگوریتمی برای تعیین نسبت ابعادی متغیر با عمق بر اساس تأثیر انواع منافذ مختلف بر روی نگارهای صوتی و چگالی ارائه دادند و از آنجایی که انواع منافذ در مقاطع نازک مشاهده می‌شد، هندسه منافذ را به ۳ دسته کلی: الف) منافذ بین‌دانه‌ای ب) منافذ سفت ج) شکستگی‌ها، دسته‌بندی کردند.

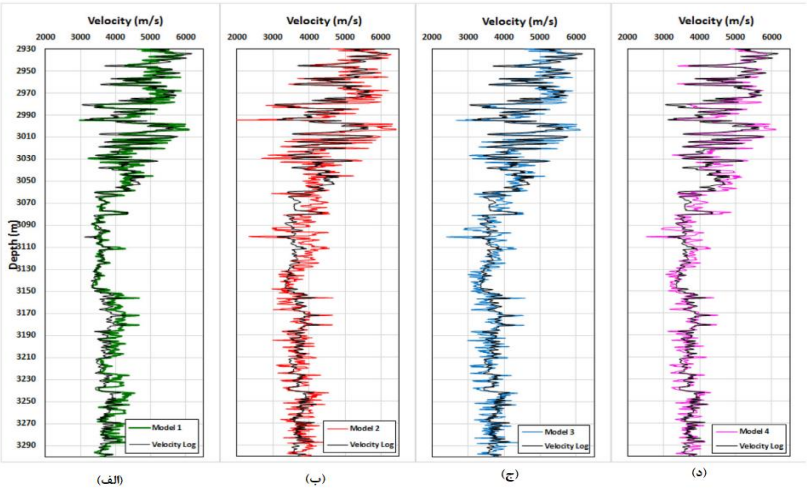
آن‌ها محدوده انحراف سرعت را بین ۵۰۰ - و ۵۰۰ + متر بر ثانیه به مقدار صفر تقریب کردند. این محدوده از مقایسه نگار انحراف سرعت در فواصل مختلف، با انواع منافذ متصل در تجزیه و تحلیل مقاطع نازک انتخاب شد.
همانطور که در شکل ۲ نیز آمده است، آن‌ها ابتدا تخلخل را از نگار چگالی تخمین زدند متعاقباً، با استفاده از تخلخل محاسبه شده و معادله میانگین زمانی وایلی، نگار صوتی را تخمین زدند، سپس از اختلاف نگار صوتی محاسبه شده و نگار صوتی اندازه‌گیری شده، نگار انحراف سرعت به دست آمد. در نگار انحراف سرعت، مقادیر مثبت بزرگ‌تر از ۵۰۰+ متر بر ثانیه مربوط به منافذ سفت است. انحراف سرعت حول صفر نشان‌دهنده سنگ با نوع منافذ متصل (بین ذره‌ای و بین دانه‌ای) با توزیع همگن منافذ است. در نهایت، از آنجایی که در مطالعه موردی آن‌ها گازی وجود نداشت، مقادیر منفی انحراف سرعت (کمتر از ۵۰۰ - متر بر ثانیه) مربوط به منافذ ترک یا شکستگی است.
تجزیه و تحلیل مقطع نازک برای فواصل محدودی در دسترس بود. آن‌ها با دقت فواصل را با یک نوع منفذی (یکی از ۳ گروه نوع منفذی) انتخاب کردند. نسبت ابعادی در این فواصل تعیین و در نظر گرفته شد. ضریب هندسی در این مطالعه موردی به ترتیب ۰.۱۵، ۰.۴ و ۰.۰۵ برای انواع منافذ بین ذره‌ای، سفت و شکستگی‌ها است (فلاحت و فرخ نیا، ۲۰۲۰).




**شکل ۲.** (الف) نگار چگالی. (ب) نگار تخلخل که از روی نگار چگالی تخمین زده شده است. (ج) نگار سرعت که از روی نگار تخلخل تخمین زده شده است. (د) نگار انحراف سرعت. (ه) نگار نسبت ابعادی متغیر با عمق، تخمین زده شده با استفاده از نگار انحراف سرعت (فلاحت و فرخ نیا، ۲۰۲۰).

در مرحله بعد و برای راستی آزمایی، نسبت ابعادی متغیر با عمق را وارد معادلات مدل فیزیک سنگ کرده، و سرعت را تخمین زدند؛ سپس سرعت تخمین زده شده را با سرعت اندازه‌گیری شده از روی نگار صوتی، مقایسه کردند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود ۴ مدل برای مقایسه نتایج در نظر گرفته شده است. الف) مدل ۱: این مدل عمدتاً برای مخازن آواری استفاده می‌شود؛ ب) مدل ۲: در این مدل، از الگوریتم شو و پین (۲۰۰۹) استفاده شده است. برای هر رخساره در کل فاصله مخزن از یک نسبت ابعادی منفرد استفاده می‌شود. این مدل تاثیر فشار بر مدول حجم خشک را شامل نمی‌شود. ج) مدل ۳: این مدل مشابه مدل دوم است؛ اما دارای یک اصلاح فشار اضافی است. از آنجایی که فشار در بازه مخزن متغیر است، تأثیر فشار بر پارامترهای الاستیک با استفاده از معادله مک‌بث (۲۰۰۴) گنجانده شده است. د) مدل ۴: این مدل مشابه مدل سوم است، با این تفاوت که در این مدل از نسبت ابعادی متغیر با عمقی که توسط نگار انحراف سرعت تخمین زده شده بود، استفاده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، استفاده از نسبت ابعادی متغیر با عمق، باعث بهبود نتیجه حاصل، در تطابق بین نگار سرعت اندازه‌گیری شده و نگار سرعت تخمین زده شده می‌شود.
تطابق خوبی بین مدل ۴ و نگار سرعت اندازه‌گیری شده وجود دارد؛ طبق جدول ۱، خطای rms و خطای میانگین این

مدل در بین همه مدل‌ها کمترین است، که نشان از موفقیت‌آمیز بودن مدل مورد استفاده دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از نسبت ابعادی متغیر با عمق، خطای مدلسازی را کاهش می‌دهد.




**شکل۳.** مقایسه نگار سرعت اندازه‌گیری شده (از روی نگار صوتی) و نگار سرعت تخمین زده شده با استفاده از: الف) مدل۱ ب) مدل۲ ج) مدل۳ د) مدل۴ (فلاحت و فرخ نیا، ۲۰۲۰).

**جدول** 2. خطای rms و حطای میانگین برای ۴ مدل مختلف فیزیک سنگ. خطا به صورت اختلاف بین سرعت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده تعریف می‌شود. مقادیر بر حسب متر بر ثانیه هستند (فلاحت و فرخ نیا، ۲۰۲۰).

| Rock physics model | RMS | Average absolute error |
|---|---|---|
| Model 1 | 260.4 | 203.4 |
| Model 2 | 344.9 | 269.0 |
| Model 3 | 258.8 | 201.6 |
| Model 4 | 248.7 | 193.6 |

## ۳ نتیجه‌گیری

با درنظر گرفتن سیستم منفذی پیچیده مخازن کربناته، استفاده از پارامتر نسبت ابعادی منفذ، در مدلسازی فیزیک سنگ کربناته باعث بهبود نتایج حاصل از مدلسازی می‌شود. با توجه به این واقعیت که نسبت ابعادی حفرات با عمق تغییر پیدا می‌کند، بنابراین اختصاص یک مقدار ثابت و ساده شاید نتواند ناهمگنی مربوط به مخازن کربناته را در نظر بگیرد. و این مسئله طبیعتاً در مدلسازی خطا ایجاد خواهد کرد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پارامتر نسبت ابعادی متغیر باعث تطابق بهتر نگار سرعت تخمینی و نگار سرعت اندازه‌گیری شده می‌شود (جدول۱ مفهوم را بیان می‌کند).

## منابع

Anselmetti, F. S. and G. P. Eberli (1999). The velocity-deviation log: a tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. AAPG Bulletin 83(3): 450-466.

Falahat, R. and F. Farrokhnia (2020). Rock physics modelling of the carbonate reservoirs: A log based algorithm to determine the pore aspect ratio. Journal of Applied Geophysics 173: 103930.

MacBeth, C. (2004). A classification for the pressure-sensitivity properties of a sandstone rock frame. Geophysics, 69(2), 497-510.

Tsuji, T., Tokuyama, H., Costa Pisani, P., and Moore, G. (2008). Effective stress and pore pressure in the Nankai accretionary prism off the Muroto Peninsula, southwestern Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B11).

Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, 21(1), 41-70.

Xu, S. and M. A. Payne (2009). Modeling elastic properties in carbonate rocks. The Leading Edge 28(1): 66-74.