

## ارتباط سرعت امواج برشی و امواج طولی در سنگهای کربناته با استفاده از واحدهای جریان هیدرولیکی

سید علی اصغر سیدالحسینی<sup>۱</sup>، دکتر عزت‌اله کاظم زاده<sup>۲</sup>، و امید چیتگر چاری<sup>۳</sup>

### چکیده

توصیف پارامترهای مخزنی برای شناسایی مخازن هیدروکربوری از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. با توجه به این واقعیت که داده‌های امواج طولی بیشتر از امواج برشی می‌باشد، تخمین سرعت امواج برشی از روی داده‌های پتروفیزیکی همیشه یکی از جدیترین چالشها در توصیف مخازن هیدروکربوری می‌باشد. مهمترین پارامترهایی که بر سرعت امواج در سنگهای کربناته تأثیر می‌گذارند؛ شامل: تخلخل، نوع تخلخل، نوع کانی، فشار، اشباع سیالات و دما می‌باشند. در این مقاله با بکارگیری واحدهای جریان هیدرولیکی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی گونه‌های مختلف سنگهای کربناته مورد مطالعه قرار گرفته و ارتباط بین سرعت امواج طولی و برشی در هر واحد جریانی مشخص گردیده است. نتایج بیانگر انطباق خوبی بین سرعتهای موج برشی و موج تراکمی در واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد؛ بطوریکه ضریب همبستگی در واحدهای جریان هیدرولیکی مختلف برابر ۰/۸۹، ۰/۹۴ و ۰/۸۴ می‌باشد. در حالیکه این ضریب برای کل نمونه‌ها برابر ۰/۵۸ است. کلیدواژه‌ها: واحد جریان هیدرولیکی، شاخص کیفیت مخزن، نسبت پوکی

### Relationship between shear waves and compressional waves in carbonate rocks using hydraulic flow units

Seyed Ali Asghar Seyed Alhosseine, Dr. Ezatallah Kazemzadeh and Omid Chitgar Chari

#### Abstract

Descriptions of reservoir parameters are necessary for recognition of hydrocarbon reservoir. According to this fact that the compressional waves data are more available than shear waves data, estimation of shear waves velocity from petrophysical data always is one of the serious challenge in hydrocarbon reservoir description. The significant parameters that affect waves velocity in carbonate rocks are porosity, porosity type, mineralogy, pressure, fluid saturation and temperature. In this paper by using hydraulic flow units based on experimental data, different rock types are studied and then relationship between shear waves velocity and compressional waves velocity is determined in each flow unit. The results represent acceptable match between shear waves velocity and compressional waves velocity in hydraulic flow units, so that correlation coefficient in different hydraulic flow units are 0.89, 0.94, 0.84. whereas this coefficient for all samples is 0.58.

**Keywords:** hydraulic flow units, reservoir quality index, pore to matrix ratio

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال e-mail: seyedalhosseine@yahoo.com

۲- استادیار پژوهشگاه صنعت نفت e-mail: kazemzadehe@ripi.ir

۳- پژوهشگر پژوهشگاه صنعت نفت e-mail: chitgaro@ripi.ir

## مقدمه

واحد جریان هیدرولیکی انجام می‌شود و سپس روابط سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج طولی در هر دسته محاسبه می‌شود. در این راستا فهد و استفن (۲۰۰۰)، با استفاده از تکنیک واحدهای جریان هیدرولیکی، تراوایی را از داده‌های نگارهای چاه‌پیمایی در یک مخزن ماسه سنگی عربستان تخمین زدند. شدید و ریاض (۲۰۰۲)، بر روی ۸۳ نمونه، پارامترهای تخلخل، اشباع آب باقیمانده و تراوایی آب و نفت را اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاصل بیانگر توصیف بهتر مخزن با بکارگیری مفهوم شاخص کیفیت مخزنی نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. همچنین تحقیقات انجام شده توسط پراسد (۲۰۰۳)،

بیانگر بهبود ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی درون واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. ضریب همبستگی بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی برای واحدهای جریان هیدرولیکی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۸۷ گزارش شده است.

**توصیف مخزن به روش واحد جریان هیدرولیکی:** روش‌های توصیف پارامترهای مخزنی بسیار با ارزش بوده زیرا امکان درک بهتر از میزان ذخیره و خواص جریانی از مخازن هیدروکربنی را فراهم ساخته و پایه‌ای برای مدل‌های شبیه‌سازی مخزن می‌باشند. برای توصیف مخزن براساس روش واحدهای جریان هیدرولیکی نیاز به پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن می‌باشد این پارامترها در آزمایشگاه مغزه اندازه‌گیری می‌شوند.

اساس اندازه‌گیری سرعت امواج طولی در داخل چاه ثبت زمان طی شده در سنگ می‌باشد امواج مختلف طولی (فشاری) و عرضی (برشی) توسط گیرنده ثبت می‌شوند. سرعت امواج طولی بیشتر از سرعت امواج عرضی است. در این میان امواج طولی در جامدات و مایعات و گازها منتشر شده اما امواج برشی فقط در جامدات منتشر می‌شود. سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، تخلخل و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند به کار می‌رود. اطلاعات سرعت موج برشی براساس وسایل چاه‌پیمایی کمتر از سرعت امواج طولی در دسترس می‌باشد. بنابراین در چند دهه گذشته تخمین سرعت موج برشی براساس پارامترهای فیزیکی سنگ توسعه یافته است. همچنین روابط پیچیده‌ای در سرعت موج طولی و سرعت موج برشی ارائه شده است که اغلب روابط با یکدیگر متفاوت هستند اما در تمامی این روابط تخمین سرعت موج برشی با استفاده از پارامترهای فیزیکی سنگ از جمله سرعت موج طولی، تخلخل و لیتولوژی، برای یک سیال خاص بصورت اشباع از آب یا خشک، مورد توجه بوده است. اغلب روابط ارائه شده بین سرعت موج فشاری و برشی بصورت تجربی از روی داده‌های مغزه و نمودارهای چاه‌پیمایی حاصل شده است در این مطالعه نیز مانند موارد دیگر از داده‌های مغزه و نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده می‌شود با این تفاوت که توصیف مخزن براساس

در این رابطه تراویبی  $k$  برحسب میکرومتر است. همانطورکه مشاهده می‌شود در این رابطه عامل شکل (FS) نیز آورده شده است. زمانیکه لوله‌های موئینه بصورت استوانه‌ای با مقطع دایره فرض شوند مقدار FS برابر ۲ است در این رابطه  $\tau$  و FS بعنوان ثابت کوزنی شناخته می‌شود و مقدار  $\tau$  بین ۵ تا ۱۰۰ متغیر است در حقیقت عبارت  $F_s \tau^2 S_{gv}^2$  تابعی از خصوصیات زمین شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است. به همین دلیل می‌توان از آن به عنوان معیاری جهت تمایز واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده کرد. با تقسیم رابطه ۵ به  $\phi_e$  و جذرگیری از آن رابطه ساده تری را می‌توان ارائه کرد:

$$0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} = \left( \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \right) \frac{1}{\sqrt{F_s S_{gv} \tau}} \quad (5)$$

در این رابطه می‌توان شاخص کیفیت مخزن، شاخص منطقه جریان و نسبت پوکی را بصورت زیر تعریف کرد:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} \quad (6)$$

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s S_{gv} \tau}} \quad (7)$$

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \quad (8)$$

در این روابط  $K$  بر حسب میلی داری و عدد ثابت  $0.0314$  برای تبدیل  $k$  از میکرومتر مربع به میلی دسی متر مربع آورده شده است. بنابراین می‌توان رابطه ۶ را به صورت زیر نوشت:

$$RQI = \phi_z FZI \quad (9)$$

در حالت کلی زمانی که داده‌های تخلخل و تراویبی را در مقابل هم رسم می‌کنیم اغلب پراکندگی زیادی مشاهده می‌شود. و بعضا از یک توزیع نیمه لگاریتمی تبعیت می‌کنند ولی می‌توان رابطه کلی زیر را بین تراویبی و تخلخل نوشت:

$$\log k = a\phi + b \quad (1)$$

جهت برقراری ارتباطی مناسب بین تراویبی و تخلخل، محیط متخلخل بصورت مجموعه از لوله‌های موئینه فرض می‌شوند و با ترکیب معادله حرکت سیال در محیط متخلخل و رابطه پویزله برای حرکت سیال در لوله‌ها، رابطه جدیدی بین تخلخل و تراویبی بدست می‌آید. در این رابطه عامل پیچاپیچی هم به رابطه اضافه شده است زیرا در یک مدل واقعی، لوله‌های موئینه مستقیم نبوده و دارای خمیدگیهایی هستند (کارمن ۱۹۳۷ و کوزنی ۱۹۲۷).

$$K = \frac{\phi_e \Gamma^2}{8\tau^2} \quad (2)$$

که در آن  $\Gamma$  شعاع لوله‌های موئینه و  $\tau$  عامل پیچاپیچی است. آمیفول و همکاران (۱۹۹۳)، پارامتری به نام شعاع هیدرولیکی میانگین ( $r_{mh}$ ) مطرح کردند و به نقش آن در واحدهای جریان هیدرولیکی توجه بیشتری نمودند و پس از ترکیب آن با معادله ۲ رابطه زیر را بدست آوردند:

$$k = \frac{\phi_e \Gamma_{mh}^2}{\tau^2} \quad (3)$$

و در نهایت آنها رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$K = \left[ \frac{\phi_e^2}{(1 - \phi_e)^2} \right] \frac{1}{F_s \tau^2 S_{gv}^2} \quad (4)$$

مقادیر یکسان FZI هستند. بر روی یک خط با شیب ثابت قرار می‌گیرند و نمونه‌هایی با مقادیر متفاوت FZI بر روی خطوط موازی هم قرار می‌گیرند. اما FZI مربوط به یک واحد جریان هیدرولیکی دقیقاً یکسان نیستند. به همین منظور هم از آنالیز خوشه‌ای برای قرار دادن مقادیر بسیار نزدیک به هم FZI در یک گروه استفاده کرده‌ایم.

### محاسبه FZI یک واحد جریانی هیدرولیکی:

برای بدست آوردن یک مقادیر FZI برای هر واحد جریانی، طبق معادله ۱۱، RQI را برحسب  $\Phi_z$  در یک نمودار لگاریتمی رسم کنیم و یک خط با شیب ثابت ۴۵ بر داده‌ها برازش می‌کنیم با استفاده از این روش می‌توان FZI معادل هر واحد جریان هیدرولیکی را بدست آورد. برای بدست آوردن خطی با زاویه ۴۵ درجه که فاصله نقاط از این خط مینیمم باشد می‌توان از روش کاهش مربع خطاها استفاده نمود:

$$\sum E = \sum (Y - y)^2 = S \quad (11)$$

در فرمول بالا E برابر مربع انحرافات، Y برابر RQI واحد جریان و Y برابر RQI نمونه‌ها می‌باشد. حال فرمول ۱۱ را بصورت یک معادل خطی در نظر می‌گیریم که در آن

$$Y = \log(RQI)$$

$$X = \log(\phi_z)$$

$$b = \log(FZI)$$

برای بدست آوردن تعداد واحد جریان هیدرولیکی ابتدا با استفاده از فرمولهای (۶)، (۷) و (۸) شاخص منطقه جریانی را برای هر نمونه بدست می‌آوریم سپس تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص می‌شود. برای انجام این کار از روش آنالیز هیستوگرام استفاده می‌کنیم. در این روش با استفاده از نرم افزار Matlab بر روی داده‌های لگاریتمی شاخص منطقه جریان، آنالیز هیستوگرام انجام می‌دهیم که حاصل آن ۳ توزیع نرمال می‌باشد که نشان دهنده سه واحد جریان هیدرولیکی می‌باشد.

پس از تعیین تعداد واحد جریان هیدرولیکی، برای اینکه مجموعه‌ای از داده‌ها را که بسیار شبیه هم هستند را در یک گروه قرار دهیم از آنالیز خوشه‌ای (IDX=Kmeans) استفاده می‌کنیم.

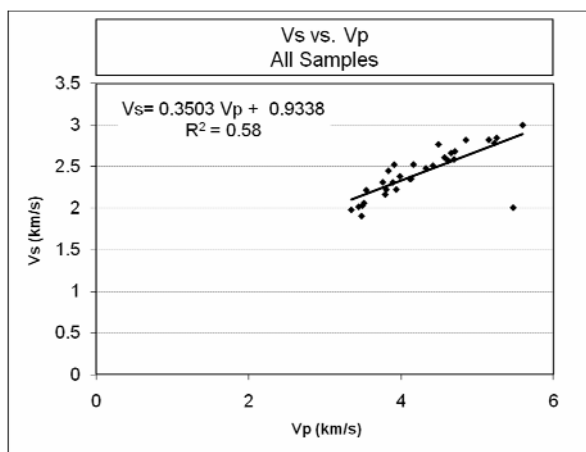
آنالیز خوشه‌ای به روش Kmeans، داده‌ها را در گروه‌های مشخص از هم جدا کرده بطوریکه داده‌های مربوط به هر گروه با سایر گروه‌ها متفاوت است. در این روش بعد از تعیین تعداد دسته‌ها که از آنالیز هیستوگرام استفاده شده است نرم افزار به تعداد دسته‌های تعیین شده نقاطی را به عنوان نقاط مرکزی در نظر می‌گیرد و فاصله سایر نقاط تا نقاط مرکزی را محاسبه و بدین ترتیب داده‌ها را در گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند.

با لگاریتم‌گیری از دو طرف رابطه ۱۰ خواهیم

داشت:

$$\log(RQI) = \log(\phi_z) + \log(FZI) \quad (10)$$

طبق رابطه فوق چنانچه مقادیر  $\phi_z$  و RQI را در یک مقایسه لگاریتمی رسم کنیم داده‌هایی که دارای



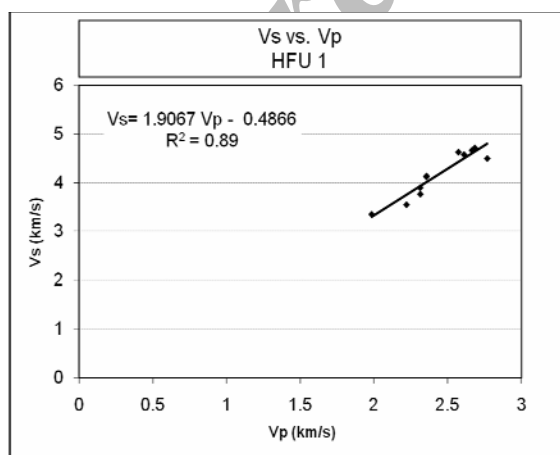
شکل ۲- نمودار سرعت برشی Vs بر حسب سرعت فشاری Vp برای کل نمونه‌ها

در ادامه این ارتباط در هریک از واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص گردید.

بهترین برازش بیانگر ضریب همبستگی برای واحد جریان هیدرولیکی اول برابر ۰/۸۹ می‌باشد (شکل ۳). که بیانگر تطابق قابل قبولی بین سرعت امواج برشی و طولی در واحد جریان هیدرولیکی اول می‌باشد:

$$Vs = 1.9067 Vp - 0.4866 \quad (13)$$

$$R^2 = 0.89$$



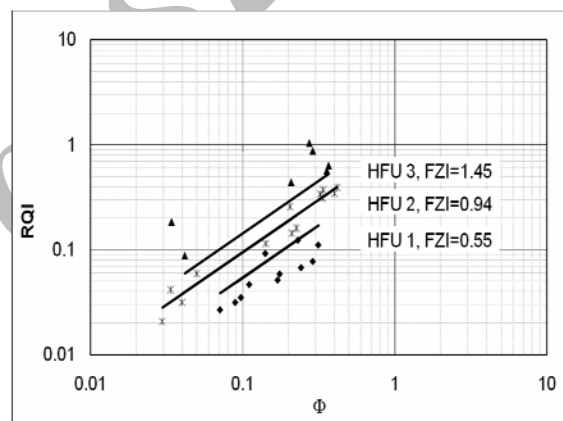
شکل ۳- نمودار سرعت برشی Vs بر حسب سرعت فشاری Vp در واحد جریان هیدرولیکی اول.

برای کاهش انحراف باید مشتق رابطه ۱۲ که مربع انحرافات می‌باشد را نسبت به متغیر b برابر صفر قرار داد:

$$S = \sum (Y - x - b)^2 \quad (12)$$

بعد از انجام دادن مراحل فوق برای نمونه‌ها مورد آزمایش در این مطالعه سه واحد جریان هیدرولیکی مشخص شد که شاخص‌های منطقه‌ای جریان این گروه‌ها به ترتیب عبارتند از:

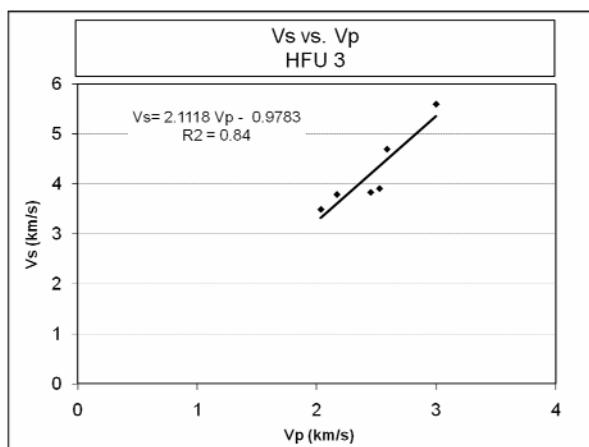
$$HFU_1 = 0/55, HFU_2 = 0/94, HFU_3 = 1/45$$



شکل ۱- ارتباط شاخص کیفیت مخزنی و تخلخل نرمال شده

ارتباط سرعت موج برشی و طولی در واحدهای جریان هیدرولیکی:

ابتدا با رسم نمودار سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج تراکمی برای کل نمونه‌ها ارتباط آنها مشخص گردید. ضریب همبستگی ۰/۵۸ بیانگر ارتباط ضعیف آن دو می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۵- نمودار سرعت برشی Vs بر حسب سرعت فشاری Vp در واحد جریان هیدرولیکی سوم

### نتیجه گیری

- همبستگی بین سرعت موج برشی و طولی در حالت کلی در سنگهای کربناته مورد مطالعه ضعیف می باشد.

- نتایج نشان میدهند که از روش واحدهای جریان هیدرولیکی میتوان جهت تخمین سرعت امواج برشی از امواج طولی استفاده نمود.

- متوسط ضریب همبستگی بین سرعت موج برشی و طولی در واحدهای جریان هیدرولیکی برابر ۰/۸۹ می باشد ولی این مقدار برای کل نمونه ها برابر ۰/۵۸ می باشد.

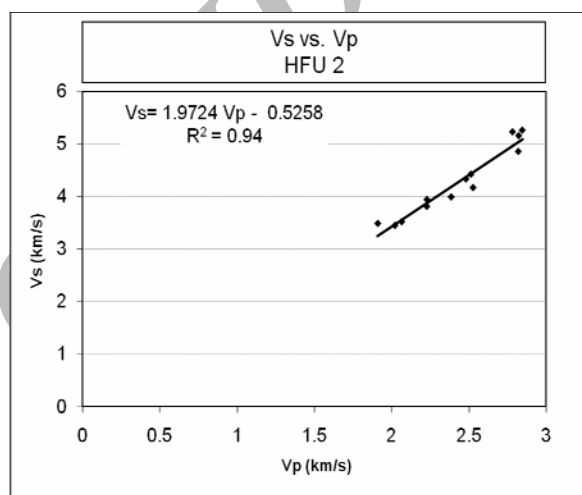
### References

- Amaefule J.O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G., Kedan D.K. 1993: Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) unites and predict permeability in uncored intervals wells, SPE 26436, Presented at 68th Ann. Tech. Conf, and Exhibit. Houston, Tx. SPE. 63254: 787-799.
- Carrman, P. C., 1937, Fluid flow through granular beds, Trans, AIChE, 15, 150-166.

همچنین با رسم سرعت برشی بر حسب سرعت فشاری برای نمونه های واحد جریان هیدرولیکی دوم ضریب همبستگی برای واحد جریان هیدرولیکی دوم برابر ۰/۹۴ می باشد و رابطه بین آنها به شکل معادله ۱۴ است.

$$V_s = 1.9724 V_p - 0.5258 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.94$$



شکل ۴- نمودار سرعت برشی Vs بر حسب سرعت فشاری Vp در واحد جریان هیدرولیکی دوم.

در نهایت ارتباط سرعت موج برشی و فشاری در واحد جریان هیدرولیکی سوم مشخص گردید نتایج بیانگر ضریب همبستگی برابر ۰/۸۴ و رابطه بین آن به صورت زیر می باشد بصورت زیر می باشد:

$$V_s = 2.1118 V_p - 0.9783 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.84$$

- Fahad A. A., and Stephen A. H., 2000, Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir, SPE paper No. 63254, 787-799.
- Kozeny, J., 1927, Uber kapillare leitung des wassers im boden, stuzugsberichte, Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class1, 136, 271-306.
- Prasad, M., 2003, Velocity-permeability relation within hydraulic units: Geophysics 68. 108-117.
- Shedid A. S., and Reyaz A. A., 2002, A new approach of reservoir description of carbonate reservoirs, SPE paper No. 74344, 1-10.

Archive of SID

Surf and download all data from SID.ir: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Translate via STRS.ir: [www.STRS.ir](http://www.STRS.ir)

Follow our scientific posts via our Blog: [www.sid.ir/blog](http://www.sid.ir/blog)

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: [www.sid.ir/workshop](http://www.sid.ir/workshop)