

مقاله پژوهشی

تأثیر توأمان تخلخل و رس بر سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی

محمد رضا آصف^{۱*}؛ علی میثاقی^۲؛ محمد سرمدی واله^۳

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین دانشگاه خوارزمی، تهران

۳- دانشیار دانشکده معدن و نفت، دانشگاه کرتین استرالیا

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.402053.1198

واژگان کلیدی	چکیده
سرعت موج برشی، موج K ، موج فشاری، تخلخل، سنگ شیل، رس	سرعت موج برشی و فشاری (به ترتیب V_s و V_p) پارامترهای بسیار اساسی و ضروری برای هر نوع مدل‌سازی ژئومکانیکی در شرایط عمیق زمین هستند. با این وجود هر دو مورد پارامترهای پیچیده‌ای هستند که به شدت تحت تأثیر سایر خواص سنگ مانند تخلخل، تنش برجا، پرشدگی منافذ، محتوای رس و غیره قرار می‌گیرند. بنابراین اطلاعات دقیق در مورد سهم هر یک از این مولفه‌ها می‌تواند نتایج بدست آمده در مدل‌های ژئومکانیکی را ارتقا بدهد. به ویژه زمانی که سرعت موج در شرایط سطحی باید از داده‌های برجا مثلاً لاگ‌های ژئوفیزیکی از چاه و یا نمونه‌های مغزه و یا خرده سنگ‌های حفاری تخمین زده شود اهمیت این موضوع بسیار بیشتر می‌شود.
	در این پژوهش، داده‌های تجربی بیش از ۱۸۰ نمونه سنگ شیلی منتشر شده در منابع مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که تخلخل مهمترین پارامتر موثر بر سرعت موج برشی است. با این حال، محتوای رس نیز یک پارامتر مهم است. بر اساس تحلیل آماری این داده‌ها، یک معادله پیش‌بینی معرفی شد که با قطعیت بالا می‌تواند سرعت موج برشی در نمونه سنگ‌های شیلی را تخمین زد. بر اساس این مدل، برای نمونه‌هایی با تخلخل یکسان، تغییر در محتوای رس منجر به مقادیر متفاوت سرعت موج می‌شود.

۱. مقدمه
سنگ^۱ سالم، محدود یا گاهی غیرممکن است [۲]. خصوصاً این وضعیت برای سنگ شیل تشدید می‌شود چرا که نسبت به سایر لیتولوژی‌ها (مثلاً سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ) از نظر مقاومت ماده سنگ ضعیف‌تر و تراکم ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های ژنتیکی هم بیشتر است. به همین دلیل تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در این موارد کاملاً متکی به داده‌های پتروفیزیکی و لاگ‌های درون‌چاهی است. سرعت موج برشی (موج K) و فشاری یا تراکمی (موج P) و نیز چگالی (ρ) مهم‌ترین ویژگی‌های مورد استفاده برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای سنگی از جمله مدول یانگ (E)، نسبت پواسون (ν)، مقاومت فشاری تک‌محوری^۲، مقاومت چسبندگی

با وجود اینکه جنبه‌های زمین‌شناسی مهندسی شیل برای چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفته است، هنوز ناشناخته‌ها در مورد وجوه مختلف رفتار این سنگ در پروژه‌های نفت، معدن و مهندسی عمران وجود دارد. نکته جالب‌تر اینکه با توسعه اخیر منابع غیرمتعارف نفت و گاز در شیل، استفاده از اصول ژئومکانیک اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱]. در مواردی مثل تحلیل رفتار مهندسی سنگ در مخازن نفتی که تحت عنوان کلی ژئومکانیک نفت قرار می‌گیرد و نیز سایر پروژه‌های زیرسطحی و عمیق، دسترسی به نمونه‌های مغزه

Uniaxial Compressive Strength (UCS)^۲

core^۱

در سنگ‌های با تخلخل بالا، فضای خالی بین دانه‌های سنگی می‌تواند باعث کاهش سرعت موج شود. این امر به این دلیل است که موج در فضای خالی از دانه‌های سنگی به صورت پراکنده و با تأخیر عبور می‌کند. بنابراین، سنگ‌های با تخلخل بالا معمولاً سرعت موج کمتری نسبت به همان سنگ با تخلخل کمتر دارند.

از طرفی، ساختار منافذ [۸] نقش مهمی در کاهش بازده انتشار موج دارد. وگر و همکاران [۹] بر اساس تجزیه و تحلیل تصویر دیجیتال (*DIA*) از مقاطع نازک، پارامترهای کمی فضای منفذی در کربنات‌ها شامل اندازه منافذ، گردی، نسبت ابعاد و پیچیدگی شبکه منفذی را تولید کردند. این نوع تحقیقات نشان می‌دهد که حتی در شرایط تخلخل مساوی، سایر پارامترهای تخلخل می‌توانند متفاوت باشند و در نتیجه مثلاً دو نمونه سنگ‌آهک با تخلخل یکسان می‌توانند سرعت موج متفاوت داشته باشد، زیرا سایر پارامترهای مربوط به تخلخل متفاوت بوده است. علاوه بر این، تخلخل، مدول برشی سنگ را نیز کاهش می‌دهد.

فیر، هولت و رایو [۱۰] نشان دادند که سرعت امواج S و P در نمونه‌های شیل با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. با این حال همانطور که در بالا به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفت، مکانیسم این کاهش به نوعی پیچیده است زیرا بسیاری از پارامترهای موثر با یکدیگر مرتبط هستند. یو، جی و لی [۱۱] یک قانون مخلوط تعمیم‌یافته^۳ را برای ارائه یک چارچوب یکپارچه برای توصیف مدول یانگ (E) و سرعت موج S و P به‌عنوان تابعی از تخلخل در انواع مواد و سنگ‌های همسانگرد معرفی کردند.

به‌طور کلی می‌توان گفت تخلخل پارامتر کلیدی در بحث تخمین پارامترهای ژئومکانیکی بر اساس سرعت موج است. آصف و فرخ‌روز [۱۲] رابطه بین مدول‌های یانگ استاتیک (E_s) و دینامیک (E_d) محاسبه شده بر اساس V_p و V_s برای انواع سنگ‌های مختلف را به طور جامع مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که تخلخل نقش بسیار مهمی دارد. آنها از مفهوم مدول یانگ موثر برای مدل‌سازی تأثیر تخلخل و برآورد دقیق مدول یانگ استاتیک از مقادیر دینامیکی استفاده کردند. نکته کلیدی این است که سرعت موج به شدت به تخلخل بستگی دارد، در حالی که سایر مولفه‌های موثر مانند فشار همه جانبه،

(c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) هستند. البته استفاده از سرعت موج در سنگ برای تخمین پارامترهای مذکور کار چندان آسان و معمولی هم نیست. زیرا سرعت امواج برشی و فشاری (به ترتیب V_p و V_s) تحت تأثیر بسیاری از خواص دیگر سنگ از جمله تخلخل، و مقدار رس موجود در سنگ [۳، ۴] و نیز شرایط زمین قرار دارند. خصوصاً زمانی که از اندازه‌گیری‌های برجا (در عمق زمین، با استفاده از لاگ سرعت موج) برای تجزیه و تحلیل رفتار سنگ در شرایط سطح زمین استفاده می‌شود، داشتن دانش کافی در مورد پارامترهای مؤثر بر سرعت موج بسیار مهم است [۵]. اگر چه این نکته در حال حاضر اغلب نادیده گرفته می‌شود. تخلخل، فشار (تنش‌های برجا)، پر شدن منافذ (جایگزینی با آب، نفت یا گاز)، فرکانس موج و اثر اندازه (اندازه نمونه) از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر سرعت موج تأثیر می‌گذارند [۶]. بی‌توجهی و اغماض در مورد تأثیر هر یک از این مولفه‌های موثر بر سرعت موج به نحوی بر دقت اندازه‌گیری و تحلیل‌ها موثر خواهد بود.

بر اساس معادلات پایه (رابطه ۱ و ۲)، سرعت موج در سنگ با ریشه دوم مدول برشی (G) رابطه مستقیم و با ریشه دوم چگالی (ρ) رابطه معکوس دارد [۷].

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

از سوی دیگر، برای نمونه‌ای با حجم V و جرم M ، بر اساس معادله (۳) چگالی با تخلخل (ϕ) مرتبط است:

$$\rho = M(1-\phi)/V \quad (3)$$

به همین دلیل با افزایش تخلخل، چگالی کاهش می‌یابد و به دنبال کم شدن چگالی، کارآمدی ماده سنگ برای انتقال انرژی موج کاهش می‌یابد. یعنی اینکه سرعت موج در سنگ‌های سخت‌تر از سنگ‌های نرم‌تر بیشتر است. همچنین تخلخل می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر سرعت موج داشته باشد.

موج و سایر ویژگی‌های ۱۴ نمونه سنگ شیل از استرالیا مربوط به نقاط متنوع از نظر مکانی را توصیف کردند. این نمونه‌ها دارای تخلخل از ۴ تا ۱۸ درصد و میزان رس از ۳۲ تا ۶۶ درصد هستند. هان [۱۵] داده‌های تجربی روی ۸۰ ماسه‌سنگ شیلی حاوی طیف وسیعی از تخلخل (از ۳ تا ۳۱ درصد) و محتوای رس (از ۰ تا ۵۱ درصد) را منتشر کرد. جیزبا [۱۶] تعداد ۸۰ نمونه آزمایشگاهی و ماریون و جیزبا [۱۷] تعداد ۱۳ نمونه داده از شیل و ماسه‌سنگ‌های شیلی را منتشر کردند. این مجموعه داده شامل طیف وسیعی از تخلخل (از ۱ تا ۲۰٪) و محتوای رس (از ۰ تا ۶۳٪) را شامل می‌شود. در مجموع داده‌های مورد استفاده در این تحقیق بیش از ۱۸۰ نمونه بود. بدلیل تنوع درصد تخلخل و نیز درصد رس موجود در این نمونه‌ها و با توجه به تعداد این نمونه‌ها می‌توان گفت توزیع و تنوع کافی از نظر درصد تخلخل و رس موجود در نمونه‌ها وجود دارد. بنابراین اظهارنظر در مورد چگونگی تأثیر تخلخل و نیز مقدار رس بر سرعت موج برشی با قطعیت بیشتر امکان‌پذیر خواهد بود.

۱.۲. تحلیل داده‌ها

تحلیل اولیه روی مجموعه داده‌های فوق نشان داد که تخلخل یک پارامتر بسیار موثر و ضروری برای پیش‌بینی سرعت موج است. شکل ۱ پراکندگی تمام داده‌ها را نشان می‌دهد. واضح است که تخلخل به شدت بر سرعت موج تأثیر می‌گذارد. باوجود پراکندگی قابل توجه داده‌ها، دو روند کلی را می‌توان متمایز کرد. اولاً، افزایش تخلخل منجر به کاهش چشمگیر سرعت موج برشی می‌شود. ثانیاً، برای یک مقدار تخلخل، طیف نسبتاً وسیعی از سرعت ممکن است مشاهده شود. براساس تحلیل رگرسیون، معادله (۴) بهترین برازش برای این داده‌ها بود:

$$V_{s \text{ estimated}} = A + B\phi \quad (4)$$

$$A = 3.2; B = -5.7$$

در این معادله تخلخل (ϕ) بین صفر تا یک است. اگر تخلخل برحسب درصد باشد مقدار B باید بصورت 0.057 - استفاده شود.

پرشدگی منافذ، فرکانس موج و اندازه نمونه به نوعی تحت تأثیر تخلخل قرار دارند. بعبارت دیگر می‌توان گفت اگر قرار باشد برای ساده‌سازی مدل به جای همه این پارامترها فقط یکی را انتخاب کنیم، تخلخل بهترین گزینه است. نکته دیگر اینکه شیو و وایت [۱۳] نشان دادند که بدلیل تفاوت ساختاری تخلخل موجود در میان دانه‌های ماسه‌ای (تقریباً کروی) و رس‌ها (تقریباً کشیده)، تأثیر تخلخل مربوط به این مواد بر سرعت موج متفاوت است. از نظر مفهومی این واقعیت می‌تواند به این معنی باشد که احیاناً بخشی از تخلخل موجود در ساختار رس‌ها توسط روش‌های اندازه‌گیری تخلخل قابل ثبت و اندازه‌گیری نیست.

این بررسی‌ها نشان می‌دهد که تخمین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از سرعت امواج برشی و فشاری یک موضوع ساده و روتین نیست و همچنان یک مبحث تحقیقاتی فعال است. هنوز مجهولات زیادی وجود دارد و تحقیقات بیشتر برای مدل‌سازی ریاضی اثر توأم پارامترهای ذکر شده در نمونه آزمایشگاهی و یا شرایط برجا واقعاً ضروری است. در مورد سنگ‌های ضعیف مانند شیل این امر حتی حادثر است، زیرا آنها به شدت مستعد هوازدگی هستند و تهیه نمونه‌های سالم حتی از رخنمون‌های نزدیک به سطح زمین هم چندان ساده نیست. به عنوان مثال، تعیین اینکه سرعت امواج برشی و تراکمی در سازندهای شیلی مختلف چگونه تغییر می‌کنند بسیار مهم است، زیرا تخلخل برای سازندهای مختلف شیل بسته به ماهیت سنگ ممکن است متفاوت باشد. علاوه بر این حتی اندازه‌گیری تخلخل در سنگ شیل نیز به خودی خود چالش برانگیز است، زیرا روش‌های تعیین تخلخل ممکن است نتایج متفاوتی را برای یک نمونه سنگ نشان دهد.

در این پژوهش چگونگی تأثیر تخلخل بر سرعت موج در سازندهای شیل مورد بررسی قرار گرفته و راهکار متفاوتی برای تخمین و مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

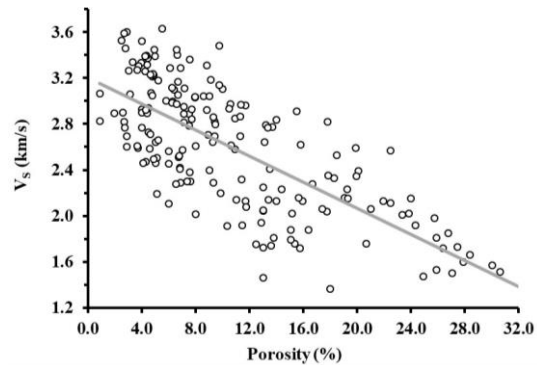
۲. جمع‌آوری داده‌ها

مطالعات جامعی برای شناسایی و جمع‌آوری تعداد قابل توجهی داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. حداقل داده‌های مورد نیاز برای این تحقیق اندازه‌گیری سرعت موج روی نمونه‌های سنگ شیل بود که داده‌های تخلخل و درصد رس نمونه‌ها هم ثبت شده باشد. هورست و همکاران [۱۴] سرعت

سرعت موج بر اساس متغیر تخلخل تأثیر بگذارد. از نظر تئوریک رگرسیون خطی یک روش آماری برای تحلیل روابط بین متغیرها است. در رگرسیون کلاسیک دقیق بودن متغیرها، مشاهدات مربوط به آن‌ها و روابط بین متغیرها فرض گرفته می‌شود. در بعضی از مسائل در طبیعت ممکن است یک یا چند مورد از فرض‌های مربوط به رگرسیون کلاسیک برقرار نباشد به نحوی که پراکندگی و ناهمگنی برخی از مشاهدات باعث شود معادله رگرسیونی نتواند برازش خوبی به داده‌ها داشته باشد. یک راهکار البته خوشه‌بندی داده‌ها و تبدیل یک معادله به چند معادله است.

در این روش سعی بر این است که مشاهدات واقع در هر خوشه بیشترین تشابه را از نظر متغیرهای مورد نظر با هم داشته باشند. به‌طور کلی روش‌های خوشه‌بندی به دو دسته قطعی^۴ و فازی^۵ تقسیم می‌شوند. یکی از نارسایی‌های روش‌های خوشه‌بندی قطعی این است که هر مشاهده می‌تواند متعلق به یک و فقط یک خوشه باشد، که باز هم ممکن است نتواند معیار مناسبی برای مدل‌سازی داده‌ها ارائه دهد. در روش‌های خوشه‌بندی فازی، یک مشاهده هم‌زمان می‌تواند به بیش از یک خوشه با یک درجه عضویتی تعلق داشته باشد. یک نکته مهم دیگر نوع داده‌ها است. اغلب روش‌های خوشه‌بندی (اعم از قطعی یا فازی) برای داده‌های دقیق^۶ مطرح شده‌اند. مدل ارائه شده توسط یانگ و کو [۱۹] برای خوشه‌بندی فازی، برای حالتی است که داده‌ها فازی^۷ مشاهده شده باشند. یانگ و کو داده‌ها را خوشه‌بندی فازی نموده و برای هر خوشه یک معادله رگرسیونی بر اساس داده‌های فازی، برازش نمودند. برای مدل‌سازی این نوع داده‌ها، ضرایب رگرسیون خطی بر اساس متغیر وابسته فازی و متغیرهای مستقل فازی و غیرفازی به روش کمترین قدر مطلق خطا برآورد می‌شود.

خوشه‌بندی فازی با دو روش رگرسیون فازی وزنی دو مرحله‌ای و روش تعمیم یافته یک مرحله‌ای انجام می‌شود [۲۰]. برای روش وزنی دومرحله‌ای، ابتدا مشاهدات مربوط به متغیرهای مستقل و متغیر وابسته با یک روش، خوشه‌بندی فازی شده و مقادیر درجه عضویت به دست می‌آید. سپس این مقادیر به عنوان وزن برای برآورد ضرایب رگرسیونی کمترین



شکل ۱. سرعت موج برشی (V_s) تابعی از تخلخل در نمونه‌های سنگ شیل

مقدار ضریب همبستگی (R^2) برای این خط برازش ۰,۰۵۲ محاسبه شده است. همانطور که در مقدمه مطرح شد، این وضعیت از پراکنش داده‌ها با ضریب همبستگی نسبتاً متوسط، نشان می‌دهد که علاوه بر تخلخل پارامترهای دیگری هم می‌توانند به طور نسبتاً قابل توجه بر سرعت موج برشی تأثیر بگذارند. در همین رابطه هورست و همکاران [۱۸] اشاره کردند که سرعت موج در شیل تحت تأثیر ماهیت تماس دانه‌ها قرار می‌گیرد به نحوی که اگر دانه‌های صلب (مانند کوارتز یا فلدسپات) به جای شناور شدن در زمینه رسی در تماس با یکدیگر باشند، سرعت حرکت موج به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نکته دیگر اینکه در شکل ۱ این‌طور به نظر می‌رسد که هر مقدار تخلخل افزایش می‌یابد پراکندگی حول خط برازش کمتر می‌شود که احتمالاً به دو دلیل این وضعیت قابل توجیه است. اول اینکه تعداد نمونه‌های با تخلخل بزرگتر، کمتر است (تعداد زیادی از نمونه‌ها تخلخل کمتر از ۱۵٪ دارند). نکته دوم اینکه در نمونه‌های با تخلخل کم، چگالی بیشتر و در نتیجه جرم بیشتری در یک حجم معین ملاحظه می‌شود. در نمونه‌های شیلی با تخلخل کمتر و جرم بیشتر، طبیعتاً مقدار رس بیشتری (نسبت به نمونه‌های با تخلخل زیاد) موجود است و عموماً سرعت موج بیشتری نیز دارند. در نتیجه پراکنش بیشتری نسبت به خط برازش می‌تواند ایجاد کنند. از این‌رو، بررسی شد که چگونه محتوای کانی رسی بعنوان یک متغیر دیگر می‌تواند بر معادله رگرسیونی تخمین

Crip data^۶
Fuzzy data^۷

Crip clustering^۴
Fuzzy clustering^۵

مقدار $A=3.2$ در معادله (۴) کاهش خطی قابل توجهی می‌تواند داشته باشد که بصورت معادله (۶) احصا شده است:

$$A_{Ideal} = 3.5 - 1.8c \quad (۶)$$

در این معادله محتوای رس (c) بصورت فازی بوده و عددی بین صفر تا یک است. البته اگر مقدار رس برحسب درصد باشد در معادله (۶) ضریب ۱٫۸ بصورت $۰٫۰۱۸$ باید استفاده شود. بنابراین با تلفیق معادله (۴) و (۶) نهایتاً مدل داده‌ها بصورت معادله (۷) قابل استفاده خواهد بود:

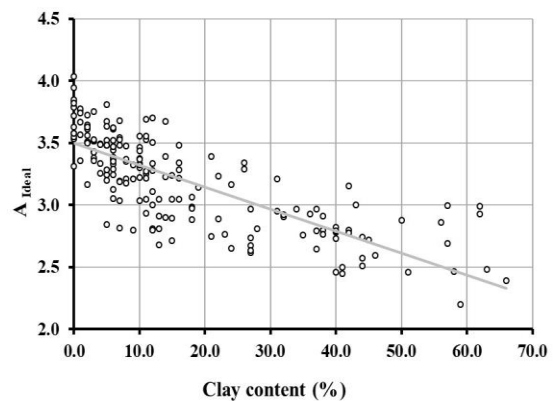
$$V_s \text{ estimated} = 3.5 - 1.8c - 5.7\phi \quad (۷)$$

در ادامه این تحقیق، تجزیه و تحلیل بیشتر با ترسیم داده‌های اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده (بر اساس معادله ۷) روی یک خط تقارن ۴۵ درجه‌ای ($y=x$) مطابق شکل ۳ انجام شد. اگر همه مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های مشاهده شده مطابقت داشته باشند، همه نقاط روی ۴۵ قرار می‌گیرند. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود برای تمام محدوده‌های سرعت موج داده‌ها در اطراف خط تقارن توزیع متقارن و متوازن دارند. از این نکته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فرضیه اولیه تأیید می‌شود و این معادله در تمام محدوده‌های سرعت موج برشی (یعنی از محدوده ۱٫۳ تا ۳٫۳ کیلومتر بر ثانیه) قدرت پیشگویی خوبی دارد. اگر معادله مبنا برای خط تقارن در حالت کلی را $y=1.0x+0.0$ در نظر بگیریم، معادله پیش‌گویی در شکل ۳ یعنی خط برازش (بصورت نقطه‌چین) $y=1.06x + 0.15$ مبین این نکته است که ضریب x یعنی ۱٫۰۶ برای خط تقارن ۴۵ درجه بسیار نزدیک به ۱ و کاملاً قابل قبول است. اگر چه به هر حال مبین این است که در سرعت‌های پایین مقدار اندکی کم‌برآورد و در سرعت‌های بالای ۲٫۵ کیلومتر بر ثانیه مقدار اندکی بیش‌برآورد داریم. همچنین مقدار عرض از مبدا ۰٫۱۵ بسیار نزدیک به مقدار صفر در معادله خط تقارن ۴۵ درجه است. علاوه بر این، سایر پارامترهای آماری بصورت معنی‌داری معادله پیشنهادی را تأیید می‌کنند. مقدار محاسبه شده ۰٫۸۱ برای ضریب همبستگی (R^2) در مقایسه با رویکردهای مشابه رضایت‌بخش است. خاطر نشان می‌شود که ضریب همبستگی بسیار معنادار و بی‌طرفانه است، زیرا در این تحقیق بیش از

مربعات خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش یک‌مرحله‌ای، خوشه‌بندی فازی و رگرسیون کمترین مربعات با یکدیگر تلفیق می‌شوند و داده‌ها به‌طور هم‌زمان خوشه‌بندی شده و معادله خط رگرسیون برای هر خوشه به دست می‌آید. بر این اساس، و با الهام از مفاهیم مذکور، رابطه بین پارامتر "A" در معادله (۴) و محتوای رس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. معادله (۴) برای پارامتر "A" با دانستن V_s اندازه‌گیری شده برای همه نمونه‌ها حل شد. در مرحله اول مقدار ایده‌آل برای پارامتر "A" یعنی A_{Ideal} بصورت هوشمند و دقیق برای تمام ۱۸۰ نمونه به این صورت تعریف و محاسبه شد که V_s پیش‌بینی شده برابر با V_s اندازه‌گیری شده باشد. بنابراین، به‌جای $A=3.2$ در معادله ۴، مقدار "A" ایده‌آل برای هر نمونه بر اساس معادله ۵ محاسبه شد:

$$A_{Ideal} = V_s \text{ measured} - B\phi \quad (۵)$$

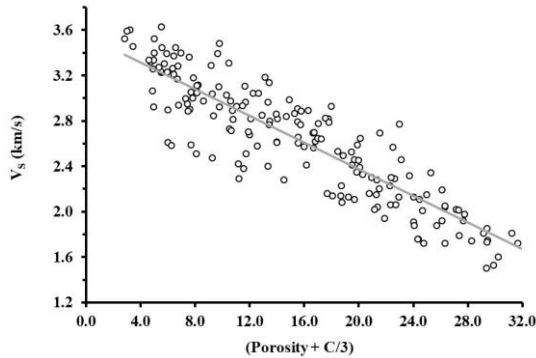
در شکل ۲ چگونگی پراکنش مقادیر محاسبه شده A_{Ideal} برای تمام نمونه‌ها به عنوان تابعی از متغیر دوم یعنی محتوای رس ملاحظه می‌شود. در مرحله بعد، مقادیر محاسبه شده A_{Ideal} بصورت نیمه‌هوشمند (با استفاده از معادله ۶) به‌عنوان وزن برای برآورد ضرایب رگرسیون معادله (۴) مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲. مقدار A_{Ideal} محاسبه شده بر اساس معادله (۶) به‌عنوان تابعی از محتوای رس

علیرغم پراکندگی داده‌ها در شکل ۲، از روند توزیع داده‌ها در این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش محتوای رس

شکل ۴ وضعیت بسیار مناسب‌تری را نشان می‌دهد. یعنی اینکه پراکنش داده‌ها در فاصله نسبتاً کمتری حول خط پیشگویی ملاحظه می‌شود که بصورت معادله (۸) ارائه شده است:



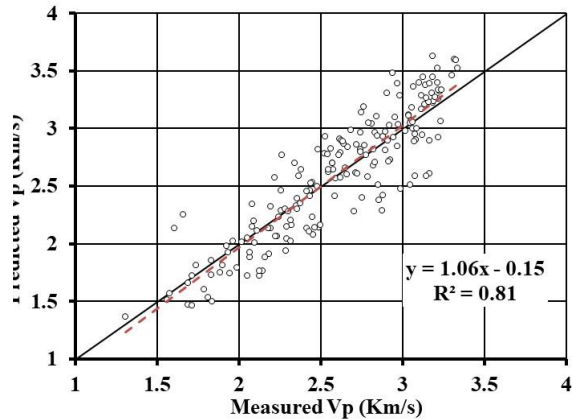
شکل ۴. سرعت موج برشی (V_s) تابعی از تخلخل بعلاوه یک سوم محتوای رس در نمونه‌های سنگ شیل

$$V_{s \text{ estimated}} = 3.6 - 6(\phi + c/3) \quad (8)$$

در این معادله تخلخل (ϕ) و محتوای رس (c) عددی بین صفر تا یک است. اگر تخلخل و مقدار رس برحسب درصد باشند مقدار عدد ۶ باید بصورت ۰٫۰۶ استفاده شود. مقدار ضریب همبستگی (R^2) برای این خط برازش ۰٫۸۱ محاسبه شده است.

برای تجزیه و تحلیل بیشتر، داده‌های اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده (بر اساس معادله ۸) روی نمودار با یک خط تقارن ۴۵ درجه‌ای ($y=x$) مطابق شکل ۵ ترسیم شدند. همانطور که ملاحظه می‌شود داده‌ها در اطراف خط تقارن توزیع متقارن و متوازن دارند. این ترسیم نشان می‌دهد که معادله مدل پیش‌بینی‌کننده فرضیه مورد نظر را تأیید می‌کند. مقدار محاسبه شده ۰٫۸۱ برای ضریب همبستگی (R^2) که مشابه مقدار بدست آمده برای معادله ۷ است به نحو دیگری این فرض را تأیید می‌کند که دو معادله ۷ و ۸ علیرغم تفاوت ظاهری از نظر مفهومی هم‌ارز هستند. مقدار ۰٫۲۴ کیلومتر بر ثانیه خطای استاندارد (Se) برای معادله ۸ مبین خطای کم برای پیشگویی با استفاده از این معادله است. اگر معادله مبنا برای خط تقارن را در حالت کلی $y=1.0x+0.0$ در نظر بگیریم، تطابق کامل آن با معادله پیش‌گویی یعنی خط $y=1.0x + 0.0$ (بصورت نقطه‌چین) در شکل ۸ مبین این

۱۸۰ نقطه داده از منابع و مناطق جغرافیایی مختلف جمع‌آوری شده است.



شکل ۳. ترسیم داده‌های اندازه‌گیری شده (محور X) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس معادله ۷ (محور Y) در امتداد یک خط تقارن ۴۵ درجه.

۳. مدل مفهومی بهینه برای معادله پیش‌گویی

همانطور که ملاحظه می‌شود در معادله (۷) ضریب مربوط به محتوای رس (c) تقریباً یک سوم ضریب مربوط به پارامتر تخلخل است، یعنی:

$$\frac{1.8}{5.7} \approx \frac{1}{3} \approx 0.33$$

این نسبت می‌تواند مبین این نکته باشد که تقریباً هر ۳ درصد رس موجود در نمونه‌ها به اندازه یک درصد تخلخل در کاهش سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی نقش دارد. از نظر مفهومی و فیزیکی این واقعیت می‌تواند به این معنی باشد که در واقع بخشی از تخلخل موجود در ساختار رس‌ها توسط روش‌های اندازه‌گیری تخلخل قابل اندازه‌گیری نبوده که این تحقیق نشان داد ارزش آن تقریباً حدود یک سوم حجم رس موجود در سنگ است. در اینجا یادآوری می‌شود که شیو و وایت [۱۱] با انجام آزمایشات مختلف تفاوت تأثیر تخلخل ماسه و رس بر سرعت موج را به گزارش کردند. اگر این نکته را بپذیریم، در این صورت ممکن است بتوانیم معادله پیش‌گویی سرعت موج برشی (V_s) را به شکل نسبتاً ساده‌تری برحسب " $\phi+c/3$ " بیان کنیم. شکل ۴ مقادیر سرعت موج برشی (V_s) را بصورت تابعی از " $\phi+c/3$ " نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود پراکنش داده‌ها در مقایسه با

درصد تخلخل است.

بنابراین یک معادله برای پیش‌بینی سرعت موج برشی به‌عنوان تابعی از هر دو مولفه تخلخل و محتوای رس پیشنهاد شد. با تکنیک‌های آماری و گرافیکی مختلف نشان داده شد که کیفیت پیش‌بینی معادله در نمونه‌های دارای سرعت موج پایین و سرعت موج بالا یکسان و خوب است.

۲. مراجع

[1] Zoback M. D., and Kohli, A. H., (2019). Unconventional Reservoir Geomechanics: Shale Gas, Tight Oil and Induced Seismicity. Cambridge.

[2] Roshan, H., H. Masoumi, and P.C. Hagan, (2016), On size-dependent uniaxial compressive strength of sedimentary rocks in reservoir geomechanics. In 50th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

[3] Borges, A. F. (2017), Analysis of wave velocity anisotropy of rocks using ellipse fitting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 96, 23-33.

[4] Fereidooni, D. (2018). Assessing the effects of mineral content and porosity on ultrasonic wave velocity. Geomechanics and Engineering, 14(4), 399-406.

[5] Anemangelya M., A Ramezanzadeh, H. Amiri, S. A. Hoseinpour, (2019), Machine learning technique for the prediction of shear wave velocity using petrophysical logs, Journal of Petroleum Science and Engineering, 174, 306-327.

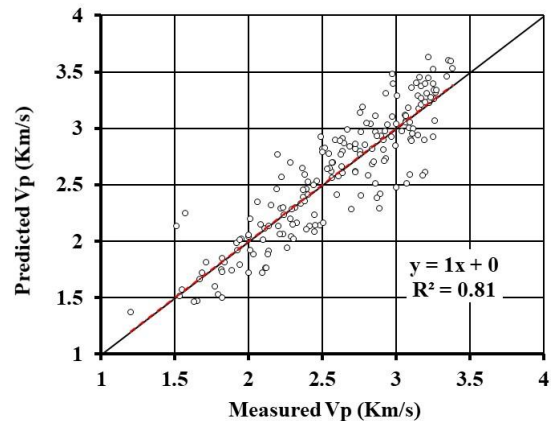
[6] Mohammad Reza Asef, (2015) Wave velocity in rock, a key parameter to solve problems in petroleum geomechanics. Keynote speaker at the First National Conference on Petroleum Geomechanics, Tehran, 12-13 May.

[7] Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., & Raaen, A. M. (2008). Petroleum related rock mechanics. Elsevier.

[8] Liu K., M. Ostadhassan, L. Sun, J. Zou, Y. Yuan, T. Gentz, Y. Zhang, H. Carvajal-Ortiz, R. Rezaee, (2019), A comprehensive pore structure study of the Bakken Shale with SANS, N2 adsorption and mercury intrusion, Fuel, 245, 274-285.

[9] Weger R. J., G. P. Eberli, G. T. Baechle, J. L. Massaferrero, and Y. F. Sun, (2009) Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates. AAPG Bulletin, 93, 10,

نکته ارزشمند است که توزیع مقدار این خطا نیز در نمونه‌های دارای سرعت موج برشی کمتر (حدود ۱٫۵ کیلومتر بر ثانیه) و نمونه‌های دارای سرعت موج برشی بالاتر (بالاتر از ۲٫۵ کیلومتر بر ثانیه) مشابه است. بنابراین معادله ۸ در مجموع نسبت به معادله ۷ از نظر مفهومی ساده‌تر و از نظر توزیع خطا در محدوده مورد مطالعه یکنواخت‌تر و متوازن‌تر است.



شکل ۵. نمودار داده‌های اندازه‌گیری شده (محور x) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده (محور y) بر اساس معادله (۸) نسبت به یک خط تقارن ۴۵ درجه.

۴٫۲. نتیجه‌گیری

سرعت موج یک پارامتر ضروری برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یا مخزنی است. با این وجود، تنوع آن در سازندهای مختلف شیل به چند مولفه بستگی دارد. دانش کافی در این زمینه، سهم نسبی هر یک از این مولفه‌ها را روشن می‌کند. بدلیل کمبود نمونه سنگ در پروژه‌های عمق زیاد، پیش‌نیاز اساسی برای هر نوع تحلیل رفتار مهندسی زمین، تولید داده‌های سرعت موج در شرایط سطح زمین است. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سازندهای مختلف سنگ شیل نشان داد که سرعت موج برشی به شدت به تخلخل بستگی دارد. همچنین مشخص شد که با افزایش تخلخل، سرعت موج به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. با این وجود، برای یک مقدار تخلخل، طیف وسیعی از سرعت ممکن است مشاهده شود. بر اساس این مشاهدات در این تحقیق فرض شد که علاوه بر تخلخل، محتوای رس یکی دیگر از پارامترهای کلیدی موثر بر سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی است به‌نحوی که تأثیر ۳ درصد رس مشابه تأثیر یک

1297-1317.

[10] Holt, R. M., Fjær, E., Rzayev, E., (2004), P- and S-wave velocities in shales: experiments and a model, ARMA/NARMS 04-543.

[11] Yu C., S. Ji, Q. Li, (2016), Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson's ratios of solid materials and rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 1, 35-49.

[12] Asef, M. R., M. Farrokhrouz, (2017), A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 359-363.

[13] Shiyu, X., & White, R. E. (1995). A new velocity model for clay-sand mixtures. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 32, p. 333A).

[14] Dewhurst D. N., J. Sarout, C. D., Piane, A. F. Siggins, and M. D. Raven, (2015), Empirical strength prediction for preserved shales. *Marine and Petroleum Geology* 67, 512-525.

[15] Han D., (1986), Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments. PhD Thesis. Stanford, USA: Stanford University.

[16] Jizba, D. L. (1991), Mechanical and acoustical properties of sandstones and shales. PhD thesis. Stanford University.

[17] Marion, D., and D. Jizba, (1992), Acoustic properties and their dependence on porosity, mineralogy and saturation: applications to field-scale measurements. Proc. 3rd Core Analysis Symposium, Paris.

[18] Dewhurst, D. N., M. D. Raven, P. van Ruth, P. R. Tingate and A. F. Siggins, (2002), Acoustic properties of Muderong shale. *The APPEA Journal* 42, 1, 241-257. Doi: 10.1071/AJ01014.

[19] Yang, M. S., & Ko, C. H. (1996). On a class of fuzzy c-numbers clustering procedures for fuzzy data. *Fuzzy sets and systems*, 84(1), 49-60.

[20] Asadollahi, M, Akbari, M. G. (2017) Fuzzy Semi-Parametric Partially Cluster-Wise Regression Analysis. *Journal of Advanced mathematical modeling*. 7 (1), 37-58.