

مقاله پژوهشی

معرفی روش بهینه تخمین تخلخل با استفاده از تلفیق نگاره‌های چاه‌پیمایی

محمد جواد بازیار^۱؛ محمد رضا آصف^{۲*}؛ علی میثاقی^۳

۱- کارشناسی ارشد؛ گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

۲- دانشیار؛ گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

۳- دانشیار؛ گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.353770.1177

چکیده

واژگان کلیدی

تخلخل، ژئومکانیک، پتروفیزیکی، تخلخل سنج هلیومی، نگاره نوترون، نگاره چگالی، نگاره صوتی

تخلخل یک عامل بسیار حساس در تعیین سرعت امواج، تخمین پارامترهای ژئومکانیکی و خصوصیات پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شود. امروزه در صنعت نفت این پارامتر با استفاده از روش تزریق گاز هلیوم به نمونه‌های مغزه (پلاگ) به دست می‌آید. تعیین تخلخل توسط روش‌هایی مانند آنالیز مغزه مستلزم صرف زمان و هزینه بالا است. مغزه‌گیری عملی دشوار و پرهزینه است. به علاوه امکان مغزه‌گیری در برخی چاه‌ها (مانند چاه‌های افقی) وجود ندارد. بنابراین به علت نبود مغزه‌های کافی و تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، تعیین این پارامتر توسط روش‌های معمول از دقت چندانی برخوردار نمی‌باشد.

در این پژوهش در یکی چاه‌های نفتی در جنوب غرب کشور تخلخل بر اساس داده‌های نگاره نوترون، چگالی، صوتی، و همچنین تلفیق این نگاره‌ها محاسبه شد. برای تعدادی نمونه مغزه هم تخلخل بر روش تزریق گاز هلیوم محاسبه شد. با استفاده از تحلیل آماری-ریاضی رابطه تجربی برای محاسبه تخلخل بر اساس تلفیقی از نگاره‌های پتروفیزیکی ارائه شد که رابطه پیشنهادی مقدار واقع بینانه‌تری نسبت به سایر روشها بدست می‌دهد. از دیگر مزایای این روش می‌توان گفت که برخلاف سایر روش‌های موجود، هم به صورت برجا و هم بصورت غیر برجا (آزمایشگاهی) قابل اجرا است، و اینکه هزینه‌های تمام شده با این روش بسیار کمتر از سایر روش‌های موجود است. از دیگر نکات مثبت این روش می‌توان به قابل اجرا بودن آن برای همه سنگ‌ها از نظر جنس اشاره کرد. به عبارت دیگر نکته مهم در روش پیشنهادی این است که در این روش برخلاف سایر روش‌ها که فقط از یک عامل برای اندازه‌گیری تخلخل استفاده می‌شود (به عنوان مثال: میزان هیدروژن در روش نگاره نوترون یا سرعت موج طولی در روش نگاره صوتی)، در این روش از سه پارامتر شامل: چگالی، سرعت موج طولی و سرعت موج برشی استفاده می‌شود که میزان خطا را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

۱. پیش‌گفتار

اندازه‌گیری خصوصیات پتروفیزیکی آن‌ها است [۱]. پارامترهای عمومی ژئومکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوری (*Uniaxial Compressive Strength, UCS*)، ضریب اصطکاک داخلی (*Angle of internal friction*)، چسبندگی (*Cohesion*)، مدول یانگ (*Young's Modulus*)، نسبت پواسون (*Poisson's ratio*)، و سایر موارد از داده‌های مهم مربوط به مهندسی نفت و مکانیک سنگ می‌باشند [۲] که به دو روش دینامیکی (*Dynamic*) و استاتیکی (*Static*) قابل اندازه‌گیری هستند. در روش دینامیکی با اندازه‌گیری سرعت

امروزه در بسیاری از عملیات حفاری، تکمیل چاه و بهره برداری از مخازن هیدروکربنی عدم آگاهی از وضعیت ژئومکانیکی (*Geomechanics*) نوعی ریسک بزرگ تلقی می‌شود. بسط یک مدل ژئومکانیکی پایدار از میدان مورد مطالعه، ریسک موجود را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد و مزایای با ارزش دیگری را در طی عمر بهینه پروژه به وجود می‌آورد. تفسیر پتروفیزیکی (*Petrophysics*) یکی از اساسی‌ترین فرایندها برای بررسی ساختارها و سازندهای زمین شناسی و

پارامترهای مخزن و از جمله تخلخل در صنعت نفت دو روش معمول و کاربردی وجود دارد: آنالیز مغزه (*Core analysis*) در آزمایشگاه به عنوان یک روش مستقیم و تحلیل داده‌های چاهنگاری (*Well logging*) به عنوان روش غیر مستقیم. در اغلب موارد برداشت داده‌ها در روش آنالیز مغزه در تعداد معدودی از چاه‌های یک میدان صورت می‌گیرد که یکی از دلایل آن صرف زمان طولانی و غیراقتصادی بودن آن به علت هزینه‌های بسیار زیاد است. از جمله مهمترین روش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری تخلخل سنگ، تزریق گاز هلیوم است که فقط تخلخل موثر را محاسبه می‌کند. البته با توجه به اینکه در مطالعات ژئومکانیکی میزان تخلخل کل اهمیت دارد، باز هم این روش نمی‌تواند به طور کامل و دقیق شرایط سنگ یا زمین را ارزیابی کند. ضمناً این روش با صرف زمان و هزینه زیاد همراه است. همچنین، در پروژه‌های سطحی مهندسی (سدسازی، تونل و امثال آن) تخلخل را با روش اشباع کردن سنگ نسبت به آب اندازه‌گیری می‌کنند، که این روش نیز خالی از اشکال نیست. مثلاً سنگ‌های انحلال پذیر در صورت مستغرق شدن در آب دچار انحلال می‌شود که در نتیجه میزان تخلخل محاسبه شده بیشتر از میزان واقعی خواهد بود. یا شیل‌ها که به علت نفوذپذیری کم حرکت آب در آنها به کندی صورت می‌گیرد [۷]. در سنگ‌هایی از جنس مارن یا نمک نیز این گونه مشکلات وجود دارد. از طرف دیگر این روش‌ها بنا به دلایلی در همه پروژه‌ها اجرایی نمی‌باشد. بنابراین بهتر است از روش‌های جایگزین استفاده شود که در عین دقت کافی، از لحاظ هزینه‌های اجرا نیز مناسب‌تر باشند. نکته قابل توجه این که استفاده از روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری تخلخل در همه شرایط امکان‌پذیر و مقرون به صرفه نیست و مهم‌تر اینکه داده‌های بدست آمده در طول مسیر حفاری به صورت پیوسته نخواهند بود. بنابر این بهتر است از روش‌هایی استفاده شود که نتایج به صورت پیوسته بوده و امکان بهره‌گیری از آن در همه پروژه‌ها وجود دارد. به همین منظور تقریباً در اکثر چاه‌های یک میدان نمودارگیری (چاه‌نگاری) در حین یا بعد از عملیات حفاری صورت می‌گیرد. در حال حاضر تقریباً در تمامی میادین نفتی و گازی دنیا به دنبال روش‌هایی برای دستیابی به پارامترهای مخزنی از روی اطلاعات چاه‌نگاری به منظور ارزیابی سازند، بهبود عملیات حفاری، کاهش ریسک هزینه حفاری و همچنین

عبور امواج تراکمی (*Compression wave, Vp*) و برشی (*Shear wave, Vs*) در شرایط برجا و یا آزمایشگاه، ویژگی‌های کشسان (*Elastic*) دینامیکی سنگ به دست می‌آید. تخلخل (*Porosity*) یک عامل بسیار حساس در تعیین سرعت امواج و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی به روش دینامیکی است و معمولاً با افزایش آن سرعت امواج و مقاومت سنگ کاهش می‌یابد. وجود تخلخل در بافت سنگ مقاومت را کاهش و تغییر شکل‌پذیری سنگ را افزایش می‌دهد. به طوری که مقدار کمی تخلخل گاه می‌تواند اثر مکانیکی قابل توجهی داشته باشد. بعنوان مثال آصف و فرخروز [۳، ۴] نشان دادند که برای تخمین مقاومت فشاری سنگهای کربناته بر اساس مدول الاستیک، و نیز تخمین مدول الاستیسیته استاتیک بر اساس مدول الاستیسیته دینامیک تخلخل نقش اساسی دارد. همچنین در دو مقاله دیگر فرخروز و آصف [۵، ۶] تاکید کردند در سنگ‌های شیلی و همچنین ماسه سنگها برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری بر اساس مدول الاستیسیته، تخلخل پارامتر بسیار مهمی است. گاهی در گزارشهای تشریح پترولوژیکی سنگ اطلاعات مربوط به تخلخل سنگ حذف می‌شود. ولی اگر این تشریح به عنوان راهنمایی برای ارزیابی رفتار مکانیکی سنگ تهیه می‌شود، باید اطلاعات مربوط به تخلخل نیز حتماً قید شود. به عنوان مثال در ماسه سنگ‌ها و کربنات‌ها دامنه وسیعی از حالت‌های مختلف تخلخل می‌تواند ایجاد شود که موجب تنوع زیاد در رفتار مکانیکی آنها می‌شود. بدیهی است که برآورد دقیق از مقدار تخلخل سازندها، برای تخمین پارامترهای مقاومتی بسیار مورد توجه می‌باشد. علاوه بر این تخلخل یکی از پارامترهای بسیار مهم در مخازن هیدروکربنی نیز محسوب می‌شود، به طوری که این پارامتر عامل مهم نفت‌گیر تلقی شده و تخمین صحیح آن، اطلاعات مفیدی از مخازن هیدروکربنی نظیر سنگ‌شناسی (*Petrology*)، حجم سیال منفذی و تفسیر ژئوفیزیکی ارائه می‌دهد، که در تصمیم‌گیری‌های بعدی که در مورد مخزن صورت می‌گیرد اهمیت بسزایی دارد. از طرفی درجه موفقیت بسیاری از فعالیت‌های مهندسی که روی مخزن انجام می‌شود بستگی به دقت روش‌های مورد استفاده در توصیف مخزن دارد. تعیین میزان تخلخل به روش‌های متنوعی انجام می‌شود، ولی هیچ کدام از روش‌های موجود نمی‌تواند طور قطعی مقدار تخلخل موجود در سنگ را ارزیابی کند. برای تعیین

کردند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، هر کدام از روش‌های تعیین تخلخل دارای مقداری متفاوت هستند که این مسئله خود نوعی سرگردانی ایجاد می‌کند که بالاخره برای محاسبه دقیق تخلخل استفاده از کدام روش مناسب‌تر است. با در نظر گرفتن این مطلب که هرچه عمق حفاری افزایش یابد، دشواری به دست آوردن تخلخل نیز افزایش می‌یابد، تخلخل با درجه اعتبار بالا و هزینه کم بر اساس داده‌های موجود بسیار ضروری است [۱۳]. بنابراین بهتر است که اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری تخلخل بر روش‌های آزمایشگاهی با داده‌های مربوط به چاه‌نگاری تلفیق شوند [۱۴]. به همین دلیل انتخاب تکنیک‌های مناسب برای برآورد هر چه دقیق‌تر و کاربردی‌تر تخلخل موجود در لیتولوژی‌های مختلف برای گروه‌های مختلف علمی از جمله متخصصین مهندسی مخزن، نفت و نیز پژوهشگران مکانیک سنگ اهمیت حیاتی دارد [۱۵]. تحقیقات در این زمینه سال‌ها وجود داشته و همچنان فعال است، به طوری که پژوهشگران مختلفی میزان فضای خالی سنگ را بررسی کردند و بیان کردند که تعیین تخلخل به روش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری است و هر کدام از روش‌ها با توجه به نحوه انجام و مکانیزم خاص آن نتایج متفاوتی ارائه می‌دهد، بنابراین بهتر است که روش‌های تلفیقی مورد استفاده قرار گیرند. کازیمر و همکاران [۱۶] با بررسی و مقایسه تخلخل در نمونه‌های درشت دانه و ریز دانه نشان دادند در سنگ‌هایی مانند شیل و رس‌ها که نفوذپذیری اندکی دارند، بهترین روش استفاده از تخلخل سنج هلیومی است. در مقابل کدخدایی و همکاران [۱۷] در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که با توجه به اینکه مغزه‌گیری عملی مشکل و پرهزینه است و استفاده از روش‌های چاه‌پیمایی نیز تخمین دقیقی از شرایط تخلخل به دست نمی‌آید، ابداع و بکارگیری روش‌های جدید لازم و مؤثر است. به همین دلیل قبادی و قربانی صابر [۱۸] با استفاده از سرعت امواج P و همچنین رودریگوس و دسوسا [۱۹] با استفاده از تخلخل سنج گازی تخلخل سنگ‌ها را مورد ارزیابی و محاسبه قرار دادند.

با توجه به اهمیت تخلخل در مباحث ژئومکانیکی و با عنایت به این مسئله که اندازه‌گیری تخلخل به روش‌های متنوعی انجام می‌شود و هر کدام از این روش‌ها مقدار متفاوتی از میزان تخلخل را نشان می‌دهد، در این پژوهش از داده‌های

افزایش تولید هستند [۸]. ویژگی‌های پتروفیزیکی معمولاً از طریق آنالیز مغزه‌ها در آزمایشگاه تعیین می‌شوند. اگر چه مغزه‌گیری به دلیل نوع حفاری، هزینه و افزایش طول زمان حفاری برای تعداد کمی از چاه‌ها انجام می‌گیرد، ولی نگاره-های پتروفیزیکی برای اکثر چاه‌ها به دست می‌آیند. برای پیش‌بینی ویژگی‌های پتروفیزیکی و پارامترهای ژئومکانیکی از روی نگاره‌ها روابط متعددی وجود دارد که قابلیت تعمیم نداشته و در شرایط خاصی قابل استفاده اند [۹].

روش‌های نگاره برداری نیز از مشکلات مبرا نیستند. نگاره نوترون (*Neutron*) از طریق فرستادن ذرات نوترون به داخل زمین و نوترون برگشتی میزان تخلخل را مشخص می‌کند. این ذرات در صورت برخورد با اتم هیدروژن جذب شده و برگشتی نداشته و به همین دلیل میزان ذرات برگشتی کاهش یافته و میزان تخلخل تعیین می‌گردد. بنابراین محاسبه تخلخل از این روش برای سازندهای مختلف نمی‌تواند اعتبار یکسانی داشته باشد. به علاوه درصد اشباع و نوع سیال نیز در مقدار تخلخل محاسبه شده دخیل است. نگاره چگالی (*Density*) و صوتی (*Sonic*) نیز به مانند نگاره نوترون به عواملی نظیر حجم شیل، نوع سیال، میزان چگالی سیال، درصد اشباع سیال بستگی دارند که در محاسبه تخلخل خطا ایجاد می‌کند. جدا از این، نگاره صوتی فقط میزان تخلخل اولیه را محاسبه می‌کند، پس نمی‌تواند این ویژگی سازند را با ضریب قابل اطمینانی تخمین بزند. با توجه به این نکته که سرعت امواج در سنگ‌ها به عوامل دیگری نظیر دیاژنز، کانی‌شناسی، ساختار خلل و فرج، نوع سیال، فشار و دما و همچنین در سنگ‌های نامتراکم نیز به عواملی همچون نسبت دانه به خمیره، شکل، اندازه و جورشدگی بستگی دارد، بنابراین پیش-بینی تخلخل صرفاً از روی داده‌های چاه‌نگاری مشکل و همراه با خطا است. در همین راستا چو و همکاران [۱۰] بیان داشتند که اندازه‌گیری تخلخل صرفاً از طریق انتشار موج فشاری با خطا همراه بوده و نمی‌تواند تخمین دقیقی از میزان تخلخل را ارائه دهد. یون و همکاران [۱۱] معتقد هستند که اندازه-گیری تخلخل از طریق روش‌های آنالیز مغزه به دلیل بیرون کشیدن و جابجایی، ممکن است مغزه با تغییراتی همراه شود و تخمین تخلخل با خطا همراه باشد. والی و همکاران [۱۲] برای غلبه بر معایب فوق‌الذکر، از سرعت موج لرزه ای برای به دست آوردن تخلخل به عنوان یک روش برجا استفاده

نگاره‌ها با هم (*Depth shifting*) با مینا قرار دادن نگاره گاما و حرکت دادن بقیه نگاره‌ها نسبت به آن انجام شد. البته در زون‌های شسته شده که چاه ریختگی دارد، اطلاعات آن دقیق نمی‌باشد و باید بخشی از داده‌ها را حذف کرد. برای تفسیر هر نگاره، داده‌های رقومی به بازه‌های عمقی ۶۰ سانتی‌متری تقسیم شدند و تخلخل سنگ بر اساس هر یک از نگاره‌های نوترون، چگالی و صوتی و آزمایش تزریق گاز هلیوم محاسبه شد.

۱.۳. محاسبه تخلخل بر اساس نگاره نوترون

برای محاسبه تخلخل سازند (ϕ) از رابطه (۱) می‌توان استفاده کرد که در آن مقدار قرائت شده تخلخل نگاره نوترون (ϕ_N) بر اساس داده‌های مربوط به تخلخل ماتریکس (ϕ_{Nma}) و تخلخل سیال (ϕ_{Nft}) به دست می‌آید:

$$\phi = \frac{\phi_N - \phi_{Nma}}{\phi_{Nft} - \phi_{Nma}} \quad (1)$$

در سازندهای شیلی مقدار تخلخل نوترون (ϕ_N) هم متأثر از تخلخل ماتریکسی میزان شیل (V_{sh}) است. با داشتن مقدار تخلخل شیل (V_{Nsh}) برای تصحیح اثر شیل بر نگاره نوترون از رابطه (۲) استفاده می‌کنیم.

$$\phi = \phi_N - (\phi_{Nsh} \times V_{sh}) \quad (2)$$

تخلخل محاسبه شده از نگاره نوترون نشان دهنده تخلخل کل سنگ می‌باشد. در این پژوهش ملاحظه شد که با افزایش میزان حجم شیل، مقدار تخلخل افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر مناطق دارای شیل بیشتر نسبت به آهک و یا ماسه‌سنگ، عموماً تخلخل‌های با درصد بالا دارند (شکل ۱). همچنین جدول (۱) میانگین تخلخل محاسبه شده از نگاره نوترون در لیتولوژی‌های مختلف نشان داده شده است.

۲.۳. محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره چگالی

نگاره چگالی نیز همانند نگاره نوترون تخلخل کل سنگ را نشان می‌دهد (شکل ۱). در جدول (۱) میانگین تخلخل محاسبه شده از نگاره چگالی در لیتولوژی‌های مختلف نشان داده شده است. از رابطه (۳ و ۴) به ترتیب برای محاسبه تخلخل حاصل از نگاره چگالی و تخلخل اصلاح شده نگاره چگالی استفاده می‌شود.

آزمایشگاهی مربوط به اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌های مغزه بروش تزریق گاز هلیوم (به عنوان یکی از روشهای مینا در صنعت نفت) و داده‌های میدانی نگاره‌های متنوع پتروفیزیکی برای محاسبه تخلخل و تحلیل و تفسیر نتایج به‌دست‌آمده استفاده شد.

۲. مشخصات زمین‌شناسی منطقه

این پژوهش بر روی اطلاعات به دست آمده از یکی از چاه‌های یک میدان نفتی در جنوب غرب ایران صورت گرفته است. بدین صورت که عمق حفاری معادل ۳۸۳۴ متر است. در این چاه حدفصل اعماق ۱۳۶۵ تا ۳۸۱۴ متر نگاره‌های مختلفی از چاه گرفته شده است و نهایتاً داده‌های مربوط به فواصل بین ۲۲۷۰ تا ۳۸۱۳ متری مورد استفاده قرار گرفته است.

چاه مذکور شامل سازندهای آسماری، پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، داریان و گدوان به شرح زیر است. در محدوده بررسی شده از این چاه سازند گورپی به ضخامت ۳۲۸ متر متشکل از مارن و شیل‌های خاکستری است که میان لایه‌های آهکی در آن مشاهده می‌شود. در چاه مورد مطالعه این سازند عمدتاً شامل آهک و آهک رسی بوده است. سازند ایلام به عمق ۱۶۱ متر متشکل از آهک، شیل و آهک‌های دولومیتی است. بخش عمیق سروک به عمق ۶۰۷ متر شامل آهک و آهک دولومیتی است. سازند کژدمی با ضخامت ۱۲۷ متر عمدتاً شامل آهک، شیل و آهک دولومیتی می‌باشد. داریان شامل ۲۲۳ متر از سنگ آهک قهوه‌ای-خاکستری است. و نهایتاً سازند گدوان شامل ۵۹ متر شیل است.

۳. محاسبه تخلخل بر اساس نگاره‌های چاه

در این پژوهش از داده‌های میدانی نگاره نوترون (*Neutron log*)، نگاره چگالی (*Density log*)، نگاره صوتی (*Sonic log*) و داده‌های آزمایشگاهی سنجش تخلخل بروش تزریق گاز هلیوم (*Helium gas injection*) استفاده شد. عملیات نگاره‌گیری در این چاه به طول ۱۴۹۳ متر، در حدفصل ۲۳۲۰ تا ۳۸۱۳ متری عمق زمین صورت گرفت. همچنین آزمایش تزریق گاز هلیوم نیز بر روی ۶۴۵ نمونه (افقی و عمودی) در اعماق مشخص انجام شد. همچنین مراحل مختلف آماده سازی داده‌ها شامل رقومی سازی داده‌های خام، یکسان سازی عمق نگاره و عمق مغزه (*Depth matching*) و نیز تطبیق عمق

۳.۳. محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره صوتی

تخلخل سازند با استفاده از رابطه وایلی و همکارانش [۲۰] که معروف به رابطه میانگین زمان است محاسبه می‌شود که در این رابطه کل زمان گذر موج برابر با مجموع زمان گذر موج در بخش جامد سنگ و نیز سیال داخل خلل و فرج است. این رابطه برای سازند بدون شیل و رس فشرده شده است که خلل و فرج در آن یکنواخت پخش شده است. برای سازند شیل‌دار با محاسبه حجم شیل تصحیحاتی انجام می‌شود. هر چقدر چگالی سیال پرکننده کمتر باشد، سرعت موج کمتر خواهد بود. جهت تصحیح اثر نفت و گاز بر میزان تخلخل صوتی روش تجربی ارائه شده که چنانچه سیال پرکننده نفت باشد، تخلخل را در 0.7 و اگر سیال پرکننده گاز باشد، تخلخل را در 0.9 ضرب می‌کنند [۲۱]. در جدول (۱) میانگین تخلخل محاسبه شده از نگاره صوتی و در لیتولوژی‌های مختلف ارائه شده است. مهم‌ترین کاربرد نگاره صوتی، محاسبه تخلخل می‌باشد. در رابطه (۵) محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره صوتی نشان داده شده است. در (شکل ۱) نگاره صوتی مشاهده می‌شود.

$$\varphi_s = \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (5)$$

در رابطه بالا تخلخل نگاره صوتی نگاره (φ_s) ، زمان گذر موج حاصل از نگاره (Δt_{log}) ، زمان گذر موج در ماتریکس (Δt_{ma}) ، زمان گذر موج در سیال (Δt_f) است. نگاره صوتی بیشتر تخلخل بین دانه‌ای و بین بلوری را اندازه‌گیری می‌کند و قادر به اندازه‌گیری تخلخل‌های ثانویه از قبیل تخلخل حفره-ای و قالبی نیست.

۴.۳. محاسبه تخلخل با استفاده از دو نگاره

در این روش نیازی به اطلاعات ماتریکس نیست و با استفاده از کراس پلات‌ها و یا روابط (۶)، (۷) و (۸) می‌توان تخلخل را بر اساس نگاره‌های تلفیقی نوترون-چگالی (φ_{ND}) ، نوترون-صوتی (φ_{NS}) و چگالی-صوتی (φ_{DS}) محاسبه کرد. نوترون و چگالی به حجم شیل و چگالی اجزاء سازند حساسیت بیشتری نشان می‌دهند و با تلفیق این دو نگاره نتایج قابل قبول‌تری می‌توان انتظار داشت که بیانگر تخلخل کل سنگ و یا سازند است. میانگین تخلخل به دست آمده از تلفیق نگاره نوترون-چگالی نسبت به تخلخل نگاره نوترون کاهش و در مقایسه با تخلخل نگاره چگالی افزایش داشته است. مقادیر تخلخل بر

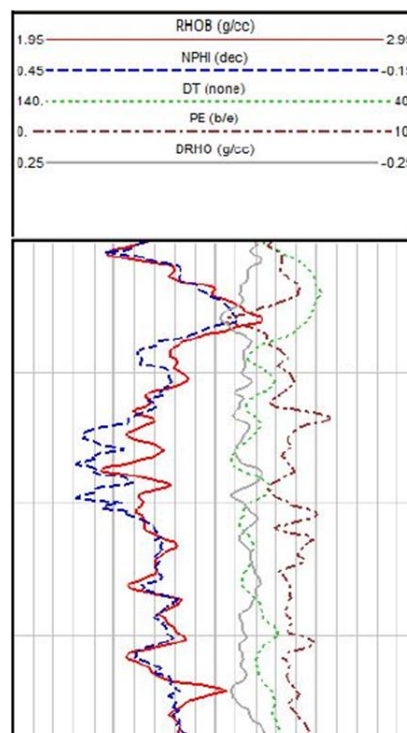
$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}} - V_{sh} \times (1 - V_{sh}) \quad (4)$$

پارامترهای موجود در روابط بالا تخلخل (φ_N) ، چگالی (ρ_b) ، چگالی ماتریکس سازند (ρ_{ma}) ، چگالی سیال سازند (ρ_f) ، چگالی شیل (ρ_{bsh}) ، و حجم شیل (V_{sh}) می‌باشند.

جدول ۱. میانگین تخلخل (%) به روش‌های نگاره نوترون (NPHI)، چگالی (ROHB) و صوتی (Sonic) در لیتولوژی‌های مختلف

روش اندازه‌گیری تخلخل (%)			Lithology
Sonic	ROHB	NPHI	
11.14	15.51	26.99	Limestone <20%
11.33	9.01	15.28	20% < Limestone <50%
12.53	12.73	13.44	50% < Limestone <80%
8.65	10.01	8.92	80% < Limestone <100%
8.68	9.18	15.03	70% < Shale
9.66	18.32	23.41	70% < Sandstone
11.19	11.95	13.36	The entire range



شکل ۱. نگاره‌های چاهی به روش نوترون (NPHI)، چگالی (ROHB) و صوتی (DT)

هایی بررسی و معرفی شوند که در عین قابل استفاده بودن در شرایط مختلف دقت بالایی نیز داشته باشند.

تزریق گاز هلیوم یکی از روش‌های پرکاربرد برای اندازه‌گیری تخلخل در صنعت نفت برای تخمین فضاهای خالی سنگ مخزن و ارزیابی میزان سیال موجود است که با استفاده از قانون بویل میزان تخلخل نمونه سنگ را در شرایط فشار و دمای محیط اندازه‌گیری می‌نماید. از آنجا که گاز هلیوم در بین گازها کمترین شعاع مولکولی را دارد و از کوچک‌ترین منافذ سنگ نیز عبور می‌کند، مناسب‌ترین گاز برای سنجش تخلخل در سنگ است. در این آزمایش حجم موثر خلل و فرج (V_p) را می‌توان با انبساط حجم مشخصی از گاز در یک فشار مشخص درون خلل و فرج سنگ به دست آورد. اگر حجم محافظه مرجع (V_{Re}) در فشار مرجع (P_{Re}) به صورت هم‌دما به حجم (V) در فشار (P) منبسط شود با استفاده از قانون بویل به دست می‌آید:

$$v = \frac{P_{Re} V_{Re}}{p} \quad (9)$$

نتایج حاصل از آزمایش گاز هلیوم نشان دهنده میزان تخلخل موثر نمونه‌ها می‌باشند. نمونه‌های بررسی شده در این آزمایش عمدتاً متشکل از سنگ آهک بوده و حجم شیل آن کمتر از ۲۰ درصد از حجم کل سنگ را شامل می‌شد.

۴. رابطه پیشنهادی، مقایسه با روش‌های

قبلی

همان‌گونه که گفته شد، محاسبه تخلخل در مطالعات مربوط به مباحث ژئومکانیکی و حتی مهندسی مخزن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین استفاده از تکنیکی که بتواند مقدار تخلخل را به طور نسبتاً دقیق محاسبه کند و در عین حال قابل استفاده در همه پروژه‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی باشد لازم و ضروری است. در حال حاضر تخمین تخلخل با روش‌های دینامیکی از طریق سرعت امواج طولی (V_p) صورت می‌گیرد. این تخمین عمدتاً از طریق روابط تجربی انجام می‌شود که مربوط به گروه خاصی از سنگ‌ها هستند و از طرفی تنها پارامتر موثر در بسیاری از این نوع روابط تجربی سرعت موج طولی است و به همین دلیل نمی‌تواند تخمین خوبی از میزان تخلخل داشته باشد. از اهداف مطرح در این پژوهش تدوین رابطه‌ای است

اساس نگاره‌های نوترون-چگالی، نوترون-صوتی و یا چگالی-صوتی در جدول ۲ ارائه شده است.

$$\varphi_{ND} = \frac{\sqrt{\varphi_N^2 + \varphi_D^2}}{2} \quad (6)$$

$$\varphi_{NS} = \frac{\sqrt{\varphi_N^2 + \varphi_S^2}}{2} \quad (7)$$

$$\varphi_{DS} = \frac{\sqrt{\varphi_D^2 + \varphi_{SD}^2}}{2} \quad (8)$$

جدول ۲. میانگین تخلخل به روش‌های نوترون-

چگالی (φ_{ND})، نوترون-صوتی (φ_{NS})، چگالی-صوتی

(φ_{DS}) در لیتولوژی‌های مختلف

روش اندازه‌گیری تخلخل (%)			Lithology
φ_{DS}	φ_{NS}	φ_{ND}	
22.50	20.79	22.50	Limestone <20%
12.81	14.16	14.16	20%< Limestone <50%
13.28	13.47	13.28	50%< Limestone <80%
9.61	9.06	9.61	80%< Limestone <100%
12.98	12.66	12.98	70%< Shale
21.78	18	21.78	70%< Sandstone
12.06	12.82	12.95	The entire range

۵.۳. محاسبه تخلخل با آزمایش تزریق گاز هلیوم

بطور کلی تخلخل در سنگ به دو حالت تخلخل کل (تمام فضاهای موجود در سنگ) و تخلخل مفید (فضاهای متصل به هم) بیان می‌شود، و بطور کلی هرکدام از روش‌های محاسبه تخلخل قادر به محاسبه یک نوع تخلخل هستند که البته هر یک از روش‌های موجود همراه با خطا هستند و نمی‌توان بطور قطع از محاسبه دقیق تخلخل در سنگ صحبت کرد. به عنوان نمونه روش تزریق گاز هلیوم که به عنوان روش مرجع در مطالعات صنعت نفت استفاده می‌شود فقط قادر به محاسبه تخلخل مفید سنگ است نه تخلخل کل. علاوه بر این با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی در اعماق زمین مانند فشار، دما و تغییر تنش در سنگ هم‌زمان با خارج کردن نمونه از عمق، نوع سیال، شعاع مولکولی سیال و گرانشی سیال و مقایسه آن با گاز هلیوم، واضح است نمی‌توان از این روش (و سایر روش‌ها) انتظار نتایج کاملاً واقعی و به دور از خطا داشت. با این حال همواره تلاش بر این خواهد بود که روش یا روش

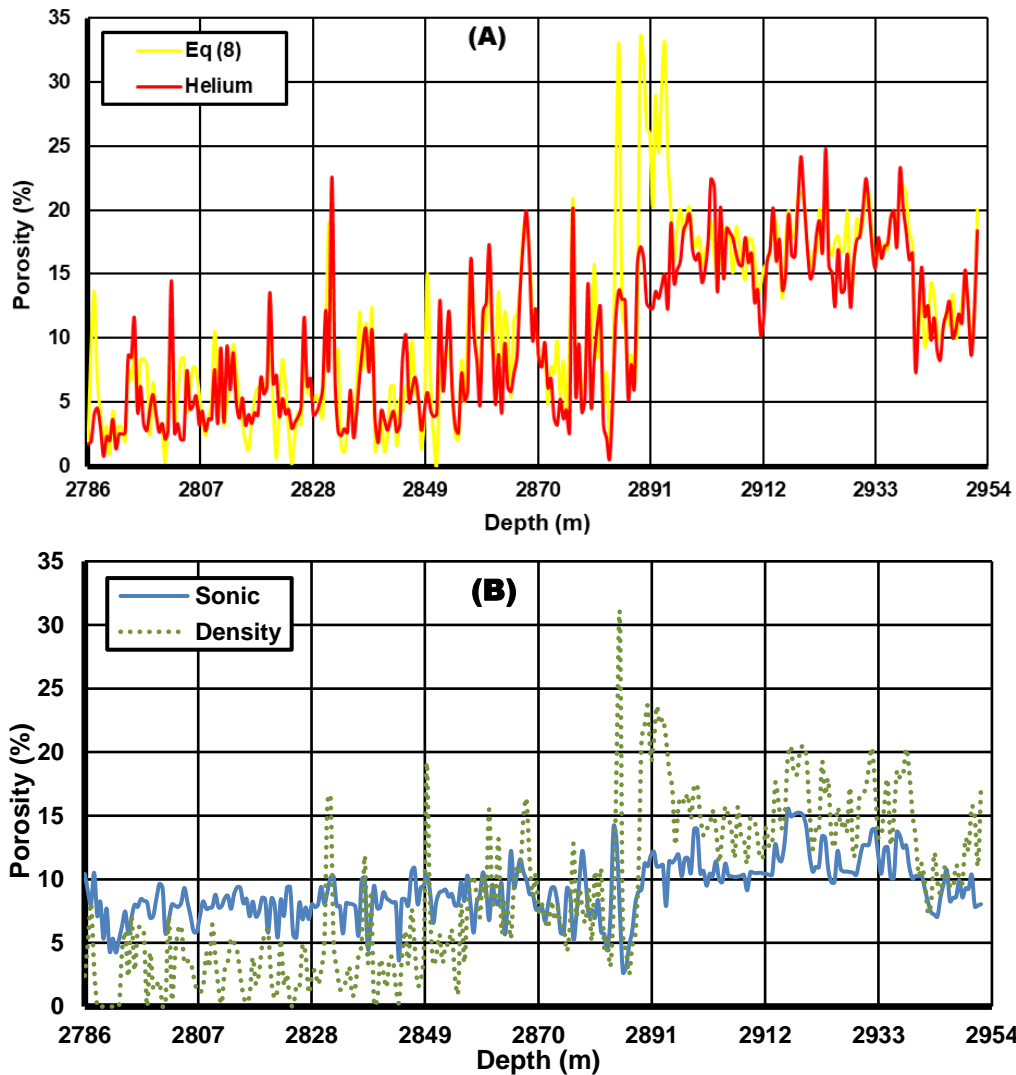
$$\varphi = 51.6\Delta\rho - 26.1 \Delta V_p/V_s + 13.753 \quad (8)$$

در این رابطه تخلخل (φ) بر اساس تغییرات چگالی ($\rho\Delta$) و تغییرات نسبت سرعت موج طولی به موج برشی ($\Delta V_p/V_s$) محاسبه می‌شود. متوسط مقدار تخلخل در لیتولوژی‌های مختلف در جدول ۳ به تفکیک روشهای مختلف محاسباتی ارائه شده است. همچنین تحلیل آماری به روش رگرسیون و مقایسه همبستگی داده‌های تخلخل محاسبه شده بر اساس معادله ۸ با تخلخل محاسبه شده سایر روش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۲ و ۳ نمایش داده شده است. روش پیشنهادی تخلخل کل سنگ را تعیین می‌کند. همان‌گونه که در جدول ۴ مشخص است، روش پیشنهادی (معادله ۸) با 61% بیشترین انطباق را با روش تزریق گاز هلیوم دارد (جدول ۴) و بعد از آن روش نگاره چگالی با 47%، نگاره نوترون با 40%، و نگاره صوتی با 39% انطباق با روش تزریق گاز هلیوم دارند. از طرفی مقایسه آماری روش پیشنهادی با نگاره‌های پتروفیزیکی مشخص نمود که تخلخل محاسبه شده از نگاره چگالی 90% و نگاره نوترون 84% نسبت به روش پیشنهادی انطباق دارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت در مواقعی که داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری تخلخل به روش تزریق گاز هلیوم و نوترون در دست نیست از معادله پیشنهادی در این تحقیق به عنوان یک جایگزین بتوان با دقت نسبتاً خوبی تخلخل را تخمین زد.

که علاوه بر سرعت امواج طولی، با بهره‌گیری از سایر پارامترهای موثر، بتوان تخلخل را به نحوی دقیق‌تر محاسبه کرد. به همین منظور پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند. نکته اساسی که در این میان مطرح است میزان تاثیر و نیز در دسترس بود پارامترهای مورد نظر است. سرعت موج برشی و چگالی از این نظر بسیار مناسب هستند. با توجه به وجود سیالات (نفت، گاز، آب) در سنگ در این نوع پروژها می‌توان به این نکته توجه کرد که در مقایسه با سرعت موج طولی، سرعت موج برشی به میزان سیال در سنگ بسیار حساس‌تر است، چرا که با افزایش نسبت سرعت موج طولی به برشی تخلخل کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان از نسبت این دو پارامتر (V_p/V_s) بعنوان یک شاخص برای تخمین تخلخل استفاده کرد. همچنین قابل توجه است که برای یک لیتولوژی خاص، با افزایش تخلخل به هر حال چگالی کاهش می‌یابد. در این پژوهش با بهره‌گیری از مطالب فوق الذکر، برای محاسبه تخلخل، از داده‌های حدود ۶۴۵ نمونه پلاگ استفاده شد. ابتدا میزان چگالی و سرعت امواج طولی و برشی در هر نمونه اندازه‌گیری شد (نگاره‌های درون چاهی). سپس مقدار تخلخل هر نمونه نیز توسط روش نوترون و چگالی تعیین گردید. در ادامه نمونه‌هایی که میزان چگالی آنها (با دقت ۰/۰۰۰۱) برابر بود تفکیک شد و ارتباط تغییرات تخلخل نسبت به V_p/V_s تعیین شد. در مرحله بعد برای نمونه‌هایی که V_p/V_s برابر داشتند (با دقت ۰/۰۰۰۰۱) میزان تغییرات تخلخل نسبت به مقدار چگالی محاسبه شد. در نهایت با بررسی و تحلیل صورت گرفته از نتایج این مجموعه، برای محاسبه میزان تخلخل رابطه (۸) معرفی گردید.

جدول ۳. مقایسه نتایج محاسبه تخلخل با روش‌های مختلف

روش اندازه‌گیری تخلخل (%)							Lithology
φ_{Pe}	φ_{DS}	φ_{NS}	φ_{ND}	ROHB	NPHI	SONIC	
19.20	22.50	20.79	22.50	11.14	15.51	26.99	Limestone <20%
12.39	12.81	14.16	14.16	11.33	9.01	15.28	20%< Limestone <50%
14.91	13.28	13.47	13.28	12.53	12.73	13.44	50%< Limestone <80%
12.48	9.61	9.06	9.61	8.65	10.01	8.92	80%< Limestone <100%
12.93	12.98	12.66	12.98	8.68	9.18	15.03	70%< Shale
18.88	21.78	18	21.78	9.66	18.32	23.41	70%< Sandstone
14.41	12.06	12.82	12.95	11.19	11.95	13.36	The entire range



شکل ۲. A و B مقایسه تخلخل محاسبه شده از روش پیشنهادی (Eq (8) با نگاره‌های پتروفیزیکی شامل نگاره نوترون (Neutron)، نگاره چگالی (Density)، نگاره صوتی (Sonic) و گاز هلیوم (Helium)

جدول ۴: میزان همبستگی تخلخل محاسبه شده با روش‌های مختلف

روش	رگرسیون (R^2)
روش پیشنهادی نسبت به گاز هلیوم	0.61
روش پیشنهادی نسبت به نگاره نوترون	0.84
روش پیشنهادی نسبت به نگاره چگالی	0.90
روش پیشنهادی نسبت به نگاره صوتی	0.26
نگاره نوترون نسبت به گاز هلیوم	0.40
نگاره چگالی نسبت به گاز هلیوم	0.47
نگاره صوتی نسبت به گاز هلیوم	0.39

of Exploration Geophysicists.

۵. نتیجه‌گیری

تعیین میزان تخلخل به روش‌های متنوعی انجام می‌شود، ولی هیچ کدام از روش‌های موجود نمی‌تواند به طور قطعی مقدار تخلخل موجود در سنگ را ارزیابی کند. در این پژوهش یک رابطه تجربی برای تخمین تخلخل سنگ بصورت برجا در چاه ارائه شد که در آن برای نخستین بار از سه پارامتر نگاره سرعت موج طولی، سرعت موج برشی و چگالی استفاده شده است. مقایسه تخلخل محاسبه شده با داده‌های بدست آمده از آزمایش تعیین تخلخل بروش تزریق گاز هلیوم بر روی تعدادی نمونه مغزه از همان مقطع چاه تطابق قابل توجهی را نشان می‌دهد و گویای این بود که استفاده از این رابطه محاسبه واقع بینانه‌تری از مقدار تخلخل سنگ را ارائه می‌کند. از دیگر مزایای این روش می‌توان گفت که برخلاف سایر روش‌های موجود، هم به صورت برجا و هم بصورت غیر برجا (آزمایشگاهی) قابل اجرا است، و اینکه هزینه‌های تمام شده با این روش بسیار کمتر از سایر روش‌های موجود است. از دیگر نکات مثبت این روش می‌توان به قابل اجرا بودن آن برای همه سنگ‌ها از نظر جنس اشاره کرد. به عبارت دیگر نکته مهم در روش پیشنهادی این است که در این روش برخلاف سایر روش‌ها که فقط از یک عامل برای اندازه‌گیری تخلخل استفاده می‌شود (به عنوان مثال: میزان هیدروژن در روش نگاره نوترون یا سرعت موج طولی در روش نگاره صوتی)، در این روش از سه پارامتر چگالی، سرعت موج طولی و سرعت موج برشی استفاده می‌شود که میزان خطای ناشی از روش‌های تک بعدی را کاهش می‌دهد.

۶. مراجع

- [3] Asef, M R, Farrokhrouz, M. (2010) Governing Parameters for Approximation of Carbonates UCS. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, USA, 1581-1592, Vol. 15, No. N.
- [4] Asef, M. R., M. Farrokhrouz (2017) A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 157 (2017) 359–363
- [5] Farrokhrooz, M., Asef, M. R., Kharrat R (2014) Empirical Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Shale Formations. *Geophysics*, Vol. 79, No. 4: pp. D227-D233. doi:10.1190/geo2013-0315.1.
- [6] Farrokhrouz, M., Asef M. R. (2017). Experimental investigation for predicting compressive strength of sandstone. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 43, 222-229. DOI:10.1016/j.jngse. 2017.03.023.
- [۷] فهیمی فر، ا.، سروش، ح. (۱۳۸۰). آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استاندارد‌ها، جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک.
- [8] Rezaee, M. R., Ilkhchi, A. K., & Barabadi, A. (2007). Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 55(3-4), 201-212.
- [9] Baziar, S., Gafoori, M. M., Mohaimenian Pour, S. M., Bidhendi, M. N., & Hajjani, R. (2015). Toward a Thorough Approach to Predicting Klinkenberg Permeability in a Tight Gas Reservoir: A Comparative Study. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 4(3), 18-36.
- [10] Choo, H., Jun, H., & Yoon, H. K. (2018). Porosity estimation of unsaturated soil using Brutsaert equation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 33-39.
- [1] Ramadhan, A. A., & Mahmood, A. J. (2020). Petrophysical Properties and Well Log Interpretations of Tertiary Reservoir in Khabaz Oil Field/Northern Iraq. *Journal of Engineering*, 26(6), 18-34.
- [2] Goodway, B., Chen, T., & Downton, J. (1997). Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; “ $\lambda\rho$ ”, “ $\mu\rho$ ”, & “ λ/μ fluid stack”, from P and S inversions. In SEG technical program expanded abstracts 1997 (pp. 183-186). Society

- [20] Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., & Gardner, L. W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21(1), 41-70.
- [21] Hilchie, D. W. (1979). Old Electrical Log Interpretation [Pre-1958], Chapter 6: The Microlog.
- [11] Yoon, H. K., Jung, S. H., & Lee, J. S. (2011). Characterisation of subsurface spatial variability using a cone resistivity penetrometer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 1064-1071.
- [12] Whalley, W. R., Jenkins, M., & Attenborough, K. (2012). The velocity of shear waves in unsaturated soil. *Soil and Tillage research*, 125, 30-37.
- [13] Chen, W., Yang, L., Zha, B., Zhang, M., & Chen, Y. (2020). Deep learning reservoir porosity prediction based on multilayer long short-term memory network. *Geophysics*, 85(4), WA213-WA225.
- [۱۴] آصف، م.، ر.، بازیار، م.، ج.، میثاقی، ع. (۱۳۹۷). بهینه سازی ورودیهای مطالعات ژئومکانیک- مقایسه تحلیلی تخلخل سنگ با تلفیق لاهای پتروفیزیکی، سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت.
- [۱۵] بازیار، م.، ج. (۱۳۹۷). تعیین میزان تخلخل در سنگ با استفاده از سرعت امواج و مقایسه آن با تخلخل نگاره نوترون، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی کاربردی دانشگاه خوارزمی.
- [16] Kazimierz, T., Jacek, T., & Stanislaw, R. (2004). Evaluation of rock porosity measurement accuracy with a helium porosimeter. *Acta Montanistica Slovaca*, 3, 316-318.
- [۱۷] کدخدایی، ع.، رضایی، م.، رشیدی، م.، فتحی، ع. (۱۳۸۳). تخمین تخلخل سنگ مخزن با استفاده از سیستم شبکه های عصبی مصنوعی، کنفرانس مهندسی معدن ایران.
- [۱۸] قبادی، م.، قربانی صابر، ا. (۱۳۹۰). استفاده از سرعت عبور موج P جهت تعیین ویژگی های فیزیکی سنگ آهک سازند ایلام-سروک؛ هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
- [19] Rodrigues, C. F., & De Sousa, M. L. (2002). The measurement of coal porosity with different gases. *International Journal of Coal Geology*, 48(3-4), 245-251.