



مقاله پژوهشی

کاربرد آنتروپی شانون در کمی سازی ناهمگنی زمین شناسی، تخلخل و تراوایی: مطالعه موردی سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس

وحید توکلی^۱، مهدی نخستین مرتضوی^۲

^۱ استاد، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

^۲ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، عضو جهاد دانشگاهی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.579708.1261

واژگان کلیدی	چکیده
آنتروپی شانون، ناهمگنی مخزن، سازند کنگان، خلیج فارس، پتروفیزیک، دیاژنز	هدف این پژوهش به کارگیری آنتروپی شانون برای تحلیل و مقایسه ناهمگنی رخساره‌ای و پتروفیزیکی دو واحد $K1$ و $K2$ از سازند کنگان است. ابتدا رخساره‌ها بر اساس مطالعات پتروگرافی در ۱۲ گروه طبقه‌بندی شدند و آنتروپی رخساره‌ها بر اساس فراوانی نسبی هر گروه محاسبه گردید. سپس آنتروپی شانون تخلخل و تراوایی مغزه در رخساره‌ها به صورت مستقل محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که آنتروپی شانون قادر است تفاوت‌های ساختاری دو واحد را به صورت کمی بیان کند. مقدار آنتروپی رخساره‌ها در دو واحد مشابه است، اما الگوی توزیع رخساره‌ها متفاوت است. آنتروپی تخلخل در $K2$ برابر ۱.۵۸ و در $K1$ برابر ۱.۱۲ است که بیانگر توزیع گسترده‌تر تخلخل در $K2$ است. همچنین آنتروپی تراوایی در $K2$ مقدار ۱.۹۵ و در $K1$ مقدار ۱.۶۰ را نشان می‌دهد و حاکی از تنوع بیشتر کلاس‌های تراوایی در $K2$ است. افزایش آنتروپی تخلخل و تراوایی در واحد $K2$ با ویژگی‌های دیاژنتیکی این واحد نیز سازگار است. در این واحد، حضور انحلال بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای موجب ایجاد یا گسترش فضاهای ثانویه شده و باعث توزیع مقادیر تخلخل و تراوایی در چندین کلاس مختلف شده است. در مقابل، شدت بیشتر دولومیتی شدن ریزبلور، سیمانی شدن و به ویژه انیدریتی شدن در $K1$ سبب پرشدگی یا تنگ‌شدگی منافذ و تمرکز داده‌ها در کلاس‌های کم‌تراوا و کم‌تخلخل شده است. بنابراین، فرایندهای دیاژنتیکی کاهش‌دهنده تخلخل در $K1$ ، آنتروپی پایین‌تر و فرایندهای افزایش‌دهنده یا حفظ‌کننده فضای خالی در $K2$ ، آنتروپی بالاتر را سبب شده‌اند. بر اساس این نتایج، آنتروپی شانون رویکردی مناسب، ساده و قابل اعتماد برای ارزیابی ناهمگنی مخازن کربناته است و می‌تواند مکمل ارزشمندی در کنار روش‌های کلاسیک پتروفیزیکی و رسوب‌شناسی برای تحلیل واحدهای مخزنی و مدل‌سازی رفتار مخزن باشد.

۱. پیش‌گفتار

ماهیت رسوبی پیچیده و فرایندهای متعدد دیاژنتیکی، غالباً با ناهمگنی‌های قابل توجهی همراه هستند که پیش‌بینی رفتار مخزنی را با چالش مواجه می‌سازد [۱-۳]. این ناهمگنی‌ها از مقیاس میکروسکوپی تا مقیاس سازندی گسترش می‌یابند و در بسیاری از موارد پیش‌بینی رفتار مخزنی، مدل‌سازی جریان،

مخازن کربناته یکی از مهم‌ترین واحدهای سنگی در تولید جهانی هیدروکربن به شمار می‌روند و بخش قابل توجهی از ذخایر نفت و گاز جهان در چنین سیستم‌هایی قرار دارد. این مخازن به دلیل

^۱ تهران، دانشگاه تهران، دانشکده زمین‌شناسی - تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۲۲۲۲۲ - دورنگار: ۰۲۱-۶۱۱۲۲۲۲۳ - رایانامه: v.tavakoli@ut.ac.ir

طراحی توسعه و حتی تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی و مغزه را با مسائل پیچیده‌ای مواجه می‌کنند. سازند کنگان (تریاس زیرین تا میانی) در خلیج فارس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین واحدهای تولیدی گاز در زاگرس، نمونه بارزی از مخازن کربناته-تبخیری است که پیچیدگی‌های محیط رسوبی و دیاژنتیکی آن موجب ناهمگنی گسترده در کیفیت مخزن شده است [۷-۴]. این سازند معادل سازند خوف فوقانی در صفحه عربی است و عمدتاً از سنگ‌آهک، دولومیت و انیدریت تشکیل شده است [۸].

در دهه‌های اخیر، روش‌های متعددی برای ارزیابی این ناهمگنی ارائه شده‌است که بسیاری از آن‌ها وابسته به فرضیات خاص یا فاقد قابلیت مقایسه کمی مستقیم هستند. این روش‌ها شامل تحلیل رخساره‌ای، رویکردهای مبتنی بر شاخص زون جریان^۱، استفاده از واحدهای جریان هیدرولیکی^۲، تحلیل ساختار منافذ، خوشه‌بندی آماری، و مدل‌سازی‌های پتروفیزیکی است [۳، ۸]. با وجود کارآمدی این روش‌ها، بسیاری از آن‌ها وابسته به مقیاس محدود یا پیچیدگی محاسباتی هستند و امکان مقایسه مستقیم میان پارامترهای مختلف را فراهم نمی‌کنند. به همین دلیل، نیاز به روشی که بتواند ناهمگنی را به شکل عددی، ساده و در عین حال قابل مقایسه میان پارامترهای مختلف بیان کند، همچنان احساس می‌شود. در این چارچوب، آنتروپی شانون به‌عنوان ابزاری از نظریه اطلاعات، رویکردی جدید و انعطاف‌پذیر برای تحلیل ناهمگنی ارائه می‌دهد [۹]. این روش میزان پراکندگی یا عدم قطعیت موجود در یک مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند و می‌تواند برای داده‌های گسسته (مانند رخساره‌ها) و پیوسته (مانند تخلخل و تراوایی) به کار رود [۱۰]. مزیت اصلی آنتروپی شانون نسبت به بسیاری از شاخص‌های رایج ناهمگنی آن است که تنها دامنه تغییرات یا میانگین مقادیر را نشان نمی‌دهد، بلکه میزان پراکندگی و یکنواختی توزیع داده‌ها را نیز به‌صورت عددی بیان می‌کند. از این رو، دو واحد مخزنی که دامنه تخلخل یا تراوایی مشابهی دارند، در صورت تفاوت در نحوه توزیع داده‌ها می‌توانند مقادیر آنتروپی متفاوتی نشان دهند. همچنین، این

شاخص امکان مقایسه پارامترهایی با ماهیت متفاوت، مانند رخساره‌های گسسته و داده‌های پیوسته تخلخل و تراوایی، را در قالب یک معیار مشترک فراهم می‌کند. بنابراین، آنتروپی شانون می‌تواند مکملی ساده و مفید برای روش‌های کلاسیک ارزیابی ناهمگنی مخزن باشد. به همین دلیل ابزاری مناسب برای ارزیابی ناهمگنی توزیع‌های واقعی در مخازن است. ویژگی مهم این آنتروپی آن است که به مقیاس وابسته نیست و می‌تواند برای مقایسه مستقیم میان پارامترهایی با ماهیت متفاوت استفاده شود. به بیان دیگر، این روش به پژوهشگر اجازه می‌دهد میزان ناهمگنی رخساره‌ها، تخلخل و تراوایی را در قالب یک عدد مشترک ارزیابی کند و رابطه میان آن‌ها را بهتر درک کند.

استفاده از آنتروپی شانون در زمین‌شناسی مخزن و مطالعات پتروفیزیکی نسبتاً جدید است و بیشتر تحقیقات گذشته بر تحلیل ساختار شکستگی‌ها، تعیین پیچیدگی داده‌های لرزه‌ای یا ارزیابی کیفیت اطلاعات تمرکز داشته‌اند. با این حال، کاربرد آنتروپی در مقایسه واحدهای مخزنی بر اساس توزیع ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه در مخازن کربناته خلیج فارس، که در آن‌ها ناهمگنی یک ویژگی بنیادی است، استفاده از آنتروپی می‌تواند دیدگاه تازه‌ای در تحلیل تفاوت‌های واحدهای مخزنی ارائه دهد. همچنین، این روش می‌تواند خلأ موجود در رویکردهای سنتی را که غالباً دامنه تخلخل و تراوایی را بررسی می‌کنند اما پراکندگی و یکنواختی آن‌ها را به‌صورت کمی بیان نمی‌کنند، پر کند.

الگوهای رسوبی سازند کنگان شامل طیفی از رخساره‌های مادستونی تا گرینستونی، همراه با واحدهای انیدریتی، لایه‌های تبخیری و تناوب‌های دولومیتی است [۷]. از دیدگاه مخزنی، چنین تنوعی نه تنها بافت و ساختار اولیه سنگ را شکل می‌دهد، بلکه زمینه را برای اعمال فرایندهای دیاژنتیکی متعدد از جمله سیمانی‌شدن، انیدریتی‌شدن، دولومیتی‌شدن و انحلال فراهم می‌سازد. نتیجه این فرایندها توزیع بسیار متفاوتی از تخلخل و تراوایی در بخش‌های مختلف سازند است؛ به‌طوری‌که نمونه‌هایی

¹FZI (Flow Zone Indicator)

²HFU (Hydraulic Flow Units)

با تخلخل و تراوایی بالا در کنار سنگ‌هایی کاملاً فشرده و کم‌تراوا مشاهده می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، به‌کارگیری آنتروپی شانون به‌عنوان یک رویکرد نوین برای کمی‌سازی ناهمگنی مخزن در دو واحد $K1$ و $K2$ از سازند کنگان است. این رویکرد تاکنون در مطالعات رسوب‌شناسی و پتروفیزیکی این سازند به‌ندرت به‌کار گرفته شده است. در اغلب مطالعات پیشین، ناهمگنی مخزن بر اساس شاخص‌های تکراری مانند دامنه تغییرات تخلخل و تراوایی، نسبت واریانس، واحدهای هیدرولیکی یا دسته‌بندی‌های رخساره‌ای توصیف شده است. این روش‌ها به‌طور مستقیم میزان پراکندگی، یکنواختی یا عدم قطعیت توزیع داده‌ها را بیان نمی‌کنند. آنتروپی شانون این امکان را فراهم می‌کند که ناهمگنی رخساره‌ها، تخلخل و تراوایی با وجود تفاوت ماهیتی میان آن‌ها در قالب یک شاخص کمی مشترک قابل مقایسه شوند. چنین قابلیت‌هایی در رویکردهای سنتی وجود ندارد. اهمیت انتخاب سازند کنگان نیز در این است که این سازند یکی از ناهمگن‌ترین مخازن کربناته-تبخیری منطقه خلیج فارس است و مجموعه‌ای پیچیده از رخساره‌های گل‌پشتیبان، دانه‌پشتیبان، میکروبی و تبخیری را در کنار فرایندهای گسترده‌ای چون دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن، سیمانی‌شدن و انحلال در خود جای داده است. این تنوع رسوبی و دیاژنتیکی، سازند کنگان را به یک الگوی ایده‌آل برای ارزیابی توان تفکیکی آنتروپی شانون در تحلیل تفاوت‌های مخزنی تبدیل می‌کند. در این مطالعه ابتدا توزیع رخساره‌های هر واحد استخراج و آنتروپی رخساره‌ها محاسبه شده است. سپس داده‌های تخلخل و تراوایی در کلاس‌های مقدار، دسته‌بندی و آنتروپی شانون برای هر پارامتر در هر واحد محاسبه و مقایسه شده است. در نهایت، شواهد دیاژنتیکی بررسی شده‌اند تا رابطه میان فرایندهای مخرب یا سازنده تخلخل با مقادیر آنتروپی مشخص شود. ترکیب هم‌زمان داده‌های رخساره‌ای، پتروفیزیکی و دیاژنتیکی با آنتروپی شانون، چارچوبی نوآورانه برای فهم سازوکارهای کنترل‌کننده ناهمگنی مخزن فراهم می‌کند و می‌تواند الگویی برای تحلیل مخازن مشابه در منطقه باشد. بر اساس این رویکرد، این مطالعه نه تنها به توصیف تفاوت‌های رخساره‌ای و پتروفیزیکی میان دو واحد

می‌پردازد، بلکه آن‌ها را بر اساس آنتروپی شانون به‌صورت عددی و قابل مقایسه بیان می‌کند. این امر می‌تواند در مطالعات مدل‌سازی مخزن، شبیه‌سازی جریان و تعیین راهبردهای توسعه میادین گازی اهمیت ویژه‌ای داشته باشد؛ زیرا بخش‌هایی از مخزن که آنتروپی بالاتری دارند، معمولاً با پیچیدگی بیشتر، رفتار غیرخطی‌تر و پاسخ نامطمئن‌تر همراه هستند.

۲. مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش حاصل از مغزه‌گیری یک چاه در سازند کنگان و شامل دو واحد $K1$ و $K2$ است. در مجموع، ۲۱۲۳ مقطع نازک و ۱۹۸۴ داده آزمایشگاهی تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار گرفت. در هر نقطه مغزه، اطلاعات عمق، لیتولوژی اصلی، رخساره، تخلخل و تراوایی ثبت شده است. لیتولوژی‌های ثبت‌شده شامل آهک (l)، دولومیت (d)، انیدریت (a)، دولومیت‌آهکی (ld)، و آهک‌دولومیتی (dl) است. مقاطع نازک با میکروسکوپ پلاریزان بررسی شدند و برای تفکیک دقیق آهک از دولومیت، یک‌سوم هر مقطع با محلول آلزایرین قرمز رنگ‌آمیزی شد.

داده‌های آزمایشگاهی تخلخل و تراوایی بر روی مغزه‌ها پس از انجام فرآیند آماده‌سازی شامل استخراج سیالات با استفاده از دستگاه ساکسلت با به‌کارگیری حلال‌های متانول و تولوئن اندازه‌گیری شدند. در این مرحله، به‌منظور حذف کامل هیدروکربن‌ها و سایر مواد آلی باقی‌مانده در فضاهای متخلخل، نمونه‌ها تحت چرخه‌های متوالی استخراج قرار گرفتند تا از پاک‌سازی کامل منافذ اطمینان حاصل شود. پس از اتمام فرآیند استخراج، نمونه‌ها در آون با دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا هرگونه رطوبت و حلال باقیمانده از نمونه‌ها خارج گردد و شرایط یکنواختی برای اندازه‌گیری فراهم شود. پس از خشک‌کردن، حجم کل هر نمونه مغزه بر اساس اندازه‌گیری‌های هندسی (شامل طول و قطر نمونه‌ها) محاسبه گردید. تعیین تخلخل نمونه‌ها با استفاده از قانون بویل و بر پایه روش گاز (گاز هلیوم به‌دلیل نفوذپذیری بالا و عدم واکنش‌پذیری) انجام شد، به‌طوری‌که حجم فضای خالی (حجم حفرات) از طریق تغییرات فشار گاز در یک سیستم بسته

$$H = - \sum_{i=1}^n (p_i) \ln p_i \quad (1)$$

که در آن p_i فراوانی نسبی هر کلاس (رخساره، تخلخل یا تراوایی) و n تعداد کلاس‌ها است. برای هر پارامتر فراوانی رخساره‌ها، کلاس‌های تخلخل و کلاس‌های تراوایی به‌طور جداگانه محاسبه شد و آنتروپی هر واحد $K1$ و $K2$ استخراج گردید.

از آن‌جا که آنتروپی با افزایش تعداد کلاس قابل افزایش است، تمامی کلاس‌ها در هر دو واحد یکسان تعریف شدند تا امکان مقایسه مستقیم فراهم گردد. به منظور مقایسه رفتار دو واحد، آنتروپی شانون برای هر سه پارامتر در $K1$ و $K2$ به‌طور جداگانه محاسبه و سپس مقایسه شد. نمودارهای میله‌ای و نمودار رادار نیز برای نمایش بصری این مقایسه‌ها ترسیم گردیدند. همچنین برای ارزیابی ارتباط میان تخلخل و تراوایی، نمودار پراکندگی ترسیم و یک رابطه نیمه‌لگاریتمی ($\log-k$ vs ϕ) برای هر واحد برآزش شد.

۳. زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج فارس واقع شده و بخشی از حاشیه پیشانی کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس محسوب می‌شود. این ناحیه در حاشیه شمال شرقی ورقه عربی قرار دارد. این ورقه از اواخر مزوزوئیک تا کنون به سمت شمال-شمال شرق حرکت کرده و سبب بسته شدن دریاهای تغییرات پهنه‌های رسوبی و شکل‌گیری کمربند زاگرس شده است. خلیج فارس از دیدگاه زمین‌ساختی در ناحیه‌ای نسبتاً پایدار از صفحه عربی واقع است و برخلاف کمربند چین‌خورده فعال، در این بخش پهنه‌های رسوبی گسترده و آرام تشکیل شده‌اند. این پایداری زمین‌ساختی موجب انباشت ضخیم توالی‌های رسوبی پالئوزوئیک تا سنوزوئیک شده است. حرکت هم‌گرای صفحه عربی به سمت صفحه اوراسیا از اواخر کرتاسه تا کنون عامل اصلی شکل‌گیری ساختارهای عمده منطقه، از جمله پهنه چین‌خورده زاگرس و گسل‌های عمیق پی‌سنگی بوده است. هرچند بخش مرکزی خلیج فارس نسبت به زاگرس فعال دگرشکلی کمتری نشان می‌دهد، اما اثرات این هم‌گرایی در قالب خمیدگی‌های

محاسبه گردید. در ادامه، مقدار تخلخل کل از نسبت حجم حفرات به حجم کل نمونه به‌دست آمد. همچنین اندازه‌گیری تراوایی بر اساس قانون دارسی و با عبور سیال (هوا) از میان نمونه تحت دو فشار مشخص انجام گرفت. در این فرآیند، نرخ جریان سیال عبوری از نمونه در شرایط پایدار اندازه‌گیری شده و با استفاده از پارامترهای گرانبوی سیال، طول نمونه و اختلاف فشار اعمال‌شده، مقدار تراوایی محاسبه گردید.

بر اساس بررسی‌های پتروگرافی، رخساره‌ها بر اساس روش دانام طبقه‌بندی شدند. این طبقه‌بندی بر پایه ویژگی‌های بافتی، نوع دانه‌ها، سیمان، نسبت ماتریکس به اجزای دانه‌پشتیبان و حضور ساخت‌های میکروبی انجام شد. فراوانی نسبی هر رخساره در دو واحد $K1$ و $K2$ استخراج شد و برای محاسبه آنتروپی رخساره‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

برای تحلیل توزیع تخلخل و تراوایی، ابتدا داده‌ها از نظر کیفیت، حذف مقادیر پرت و حذف مقادیر نامعتبر پاک‌سازی شدند. سپس تخلخل (درصد) در چندین کلاس مقدار (بازه‌های ۵ درصدی) دسته‌بندی شد و تراوایی، به دلیل گستره وسیع تغییرات، پس از تبدیل لگاریتمی ($\log I0$) در کلاس‌های مساوی گنجانده شد. بازه‌های ۵ درصدی برای تخلخل به این دلیل انتخاب شدند که تخلخل به‌صورت درصد بیان می‌شود و دامنه تغییرات آن در داده‌های مغزه محدودتر و قابل تفکیک‌تر است؛ بنابراین، این بازه‌ها امکان نمایش مناسب تفاوت‌های اصلی میان کلاس‌های کم تخلخل، متوسط و پرت تخلخل را فراهم می‌کنند. در مقابل، تراوایی در مخازن کربناته معمولاً دامنه تغییرات بسیار گسترده و توزیع نامتقارن دارد و ممکن است از مقادیر بسیار کم تا مقادیر چند ده یا چند صد میلی‌داری تغییر کند. به همین دلیل، برای کاهش اثر مقادیر بسیار بزرگ و نمایش بهتر پراکندگی داده‌ها، تراوایی ابتدا به مقیاس لگاریتمی تبدیل و سپس در کلاس‌های مساوی گروه‌بندی شد. در هر دو پارامتر، کلاس‌ها برای واحدهای $K1$ و $K2$ به‌صورت یکسان تعریف شدند تا مقایسه مقادیر آنتروپی میان دو واحد قابل اعتمادتر باشد. فراوانی نسبی نمونه‌ها در هر کلاس برای محاسبه آنتروپی استفاده شد. برای کمی‌سازی ناهمگنی مخزن، از آنتروپی شانون به‌صورت زیر استفاده شد:

می‌کند. این سازند عمدتاً از سنگ‌آهک، دولومیت، دولومیت‌آهکی، تبخیری‌ها (به‌ویژه انیدریت)، و لایه‌های نازک شیل تشکیل شده است. بافت‌های سنگی شامل مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون و همچنین رخساره‌های میکروبی جلبکی (استروماتولیت‌ها و ترومبولیت‌ها) است. رخساره‌های مختلف نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در یک پلتفرم کم‌عمق با انرژی متغیر هستند که تحت تأثیر چرخه‌های متعدد پسروی-پیشروی قرار داشته است. سازند کنگان بخشی از سری رسوبی عربی (*Arabian Platform*) است که به‌صورت چرخه‌های کم‌عمق شونده به سمت بالا تکرار می‌شود. این چرخه‌ها موجب شده‌اند که رخساره‌های تبخیری، میکروبی، و کربناته به‌صورت تناوبی در طول توالی ظاهر شوند؛ الگویی که در نتایج پتروگرافی این مطالعه نیز دیده می‌شود. سازند کنگان به دو واحد مخزنی *K1* در بالا و *K2* پایین تقسیم می‌شود.

پهن، پهنه‌های گنبدی ملایم، و روندهای ساختاری شمال‌غرب-جنوب‌شرق مشاهده می‌شود. این شرایط زمین‌ساختی موجب ایجاد محیط‌های پلاتفرمی کم‌عمق در سراسر دوره تریاس شده است. سازند کنگان در این محیط نهشته شده است. آرامش نسبی زمین‌ساختی خلیج فارس در زمان رسوب‌گذاری سازند کنگان، در کنار شرایط گرم و خشک حاکم بر منطقه، زمینه را برای تشکیل توالی‌های کربناته-تبخیری گسترده و چرخه‌های رسوبی کم‌عمق فراهم کرده است. سازند کنگان با سن تریاس زیرین تا میانی یکی از مهم‌ترین واحدهای سنگی مخزنی در مخازن گازدار خلیج فارس است [۱۱]. این سازند در کنار سازند دالان مجموعه عظیم مخزن کنگان-دالان را تشکیل می‌دهد که در اغلب میدان‌های گازی خلیج فارس (از جمله پارس جنوبی) به‌عنوان مخزن اصلی شناخته می‌شود [۱۲]. ستبرای سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس متفاوت است اما معمولاً بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر تغییر

Age		Saudi Arabia	Bahrain	Qatar	Abu Dhabi	Oman	Iraq	Iran
Lower Mesozoic	Triassic	Sudair	Sudair	Sudair	Sudair	Sudair	Bedih	Dashak
		Khuff-A	K0	K1	K1, D1	K1	Mirja Mir	Kangan P1U
	Lower Permian	Khuff-B Upper	K1	K2, D1 Upper	K3, D3	K2, D2	Upper Chia Zati Formation	Upper Dalan
		Khuff-C Upper	K2	K4	K4, D4	K4	Upper Chia Zati Formation	Upper Dalan
Upper Paleozoic	Permian	Khuff-D Anhydrite	Anhydrite	Middle Anhydrite	Upper Khuff	K5	Safra Anhydrite	Safra Anhydrite
		Khuff-D Upper	K3	K5, D5	K6, D6	K5	Middle Khuff	Lower Dalan
	Middle Permian	Khuff-D Middle	K3	K6	K6, D6	K6	Lower Khuff	Lower Dalan
		Khuff-D Lower	K3	K7	K7, D7	K7	Lower Chia Zati Formation	PKU
Lower Permian	Urayzab	Urayzab	Hushbi	Urayzab	Gharif	Cosim	Firgdon	

Legend: Anhydrite, Limestone, Dolomite, Sandstone, Shale, PKU: Pre-Khuff Unconformity, P1U: Permian-Triassic Unconformity

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه (a) به همراه ستون چینه‌شناسی سازند کنگان و سازندهای همجوار (از [۱۳] با تغییرات)

۴. نتایج

۱.۴. رخساره‌ها و الگوی توزیع آنها

مطالعه پتروگرافی مغزه‌های دو واحد $K1$ و $K2$ در سازند کنگان نشان می‌دهد که این سازند از نظر رخساره‌ای تنوع بسیار بالایی دارد و تقریباً تمامی انواع بافت‌های کربناته قابل انتظار در یک سکوی کم‌عمق تبخیری در آن مشاهده می‌شود (جدول ۱). در مجموع، دوازده رخساره متفاوت (از $MF1$ تا $MF12$) در این سازند شناسایی شد که نمایانگر طیفی گسترده از شرایط رسوب‌گذاری، از محیط‌های فوق‌جزر و مدی و فوق‌کم‌عمق تا نواحی نسبتاً ژرف‌تر با انرژی بالاتر هستند. حضور هم‌زمان رخساره‌های مادستونی، وکستونی، پکستونی، گرینستونی، و نیز فابریک‌های استروماتولیتی و ترومبولیتی، طیف کامل سیستم‌های رسوبی رایج در توالی‌های پرمین-تریاس خلیج فارس را نشان می‌دهد.

از منظر فراوانی، رخساره‌های پکستونی و گرینستونی بیشترین سهم را در داده‌ها دارند، به‌ویژه رخساره $MF8$ که فراوان‌ترین نوع شناسایی شده است. این رخساره معمولاً با بافت پکستونی و ترکیبی از اوئیدها، پلوئیدها و بایوکلاست‌ها مشخص می‌شود و نشان‌دهنده محیطی با انرژی متوسط تا نسبتاً بالا است. پس از آن، رخساره‌های $MF2$ (مادستون با تبخیرات) و $MF6$ (وکستون پلوئیدی-بایوکلاست) قرار می‌گیرند که هر یک بخشی از ستون رسوبی را تشکیل داده و تغییرات انرژی محیطی را منعکس می‌کنند. رخساره‌های کم‌فراوان‌تر مانند $MF3$ ، $MF4$ ، $MF7$ و $MF9$ معمولاً نشان‌دهنده شرایط خاص‌تری هستند. برای مثال، رخساره $MF3$ (استروماتولیت باندستون) $MF4$ (ترومبولیت باندستون) اغلب بیانگر تجمع‌های میکروبی و فعالیت‌های زیستی در نواحی فوق‌کم‌عمق، بالای سطح جزر و مد و تحت تأثیر چرخه‌های تبخیری هستند.

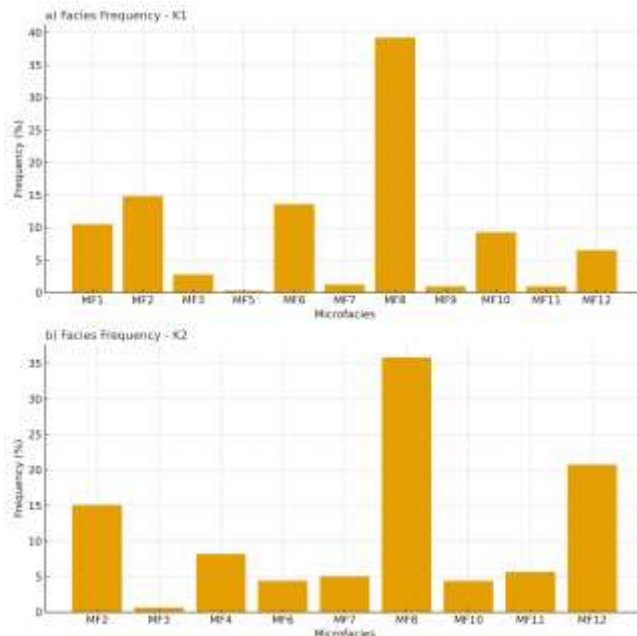
از نظر توزیع قائم، بخش‌های پایین‌تر سازند یعنی واحد $K1$ نسبت به $K2$ رخساره‌های مادستونی، دولومیتی و فابریک‌های مرتبط با محیط‌های بالاتر از سطح جزر و مد بیشتری دارد. این موضوع با فراوانی بالاتر رخساره‌های $MF2$ و $MF6$ در واحد $K1$ نیز سازگار است. توالی این رخساره‌ها، همراه با حضور متناوب

انیدریت ($MF1$)، نشانگر شرایطی با انرژی پایین‌تر، تبخیر بیشتر و گاه محصورشدگی محیط است که از مشخصه‌های بخش‌های بالایی چرخه‌های پس‌روی-پیش‌روی این سازند محسوب می‌شود. در مقابل، واحد $K2$ از تنوع بیشتری در رخساره‌های دانه‌پشتیبان و انرژی بالاتر برخوردار است. رخساره‌های پکستونی و گرینستونی به‌ویژه $MF8$ ، $MF10$ و $MF12$ سهم بیشتری در این واحد دارند و نشان‌دهنده شرایطی با انرژی بالاتر، تهویه بهتر و پویایی جریان بیشتر هستند. حضور این رخساره‌ها در بخش‌های میانی و بالایی، نشانه افزایش نسبی عمق، یا دست‌کم کاهش محدودیت‌های محیطی و تبخیری در مقایسه با $K1$ است. این الگوی قائم رخساره‌ای در سازند کنگان با مدل‌های شناخته‌شده برای سکوه‌های کربناته پرمین-تریاس خلیج فارس همخوانی دارد. در این محیط‌ها، رسوب‌گذاری در محیط‌های کم‌عمق و تحت تأثیر چرخه‌های متعدد پیش‌روی و پس‌روی رخ می‌داده است. حضور متوالی لایه‌های مادستونی، پکستونی و گرینستونی در کنار انیدریت‌ها، بازتاب تغییرات تراز آب، شدت تبخیر، و ورود تناوبی جریان‌های پرانرژی‌تر است. از نظر زمین‌شناسی مخزن، چنین تنوع رخساره‌ای یکی از عوامل اصلی ایجاد ناهمگنی در کیفیت مخزن است؛ زیرا هر رخساره میزان متفاوتی از تخلخل مؤثر، پیوستگی بافتی و قابلیت جریان سیال را ایجاد می‌کند. برای مثال، رخساره‌های مادستونی و انیدریتی معمولاً تخلخل و تراوایی پایینی دارند، در حالی که رخساره‌های پکستونی و گرینستونی می‌توانند فضاهای بین‌دانه‌ای و حفره‌های ثانویه بیشتری را توسعه دهند.

نکته مهم دیگر، تفاوت محسوس در فراوانی نسبی رخساره‌ها بین دو واحد است که نشانگر تفاوت در نوع و شدت فرایندهای رسوبی و دیاژنتیکی در مراحل مختلف تکامل سازند است. توزیع رخساره‌های $K2$ ، با حضور بیشتر رخساره‌های دانه‌پشتیبان و انرژی بالا، نشان‌دهنده دوره‌های پویاتر جریان و توسعه بهتر محیط‌های بازتر در مقایسه با $K1$ است. این تفاوت، در بخش‌های بعدی نتایج، به شکل تفاوت در آنتروپی تخلخل، تراوایی و رخساره‌ها نیز مشاهده می‌شود.

می‌دهد و تصویر روشنی از غلبه رخساره‌های خاص و تأثیر آنها بر پیکربندی رسوبی و کیفیت مخزنی سازند ارائه می‌کند.

در نهایت، نمودار فراوانی رخساره‌ها که در شکل ۲ ارائه شده است، توزیع نسبی رخساره‌ها در دو واحد را به روشنی نمایش



شکل ۲. فراوانی رخساره‌های مشاهده شده در واحدهای K1 و K2 از سازند کنگان در چاه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات رخساره‌های تعیین شده در این مطالعه. فرآیندهای اصلی دیاژنزی به همراه محیط رسوبی نیز مشخص است.

Facies Code	Facies Groups	Description	Main diagenesis	Environment
MF1	Anhydrite	-	Dolomitization	Supratidal
MF2	Mudstone	-	Dolomitization, anhydrite nodular	Peritidal
MF3	Stromatolite boundstone	Fine bioclast, ooid, intraclast	Micritization, neomorphism, anhydrite nodular	Peritidal
MF4	Thrombolite boundstone	Fine bioclast, intraclast, ooid	Dolomitization, neomorphism, micritization	Peritidal
MF5	Fossiliferous mudstone	Fine bioclast, intraclast, peloid	Dolomitization, anhydrite nodular, neomorphism	Lagoon
MF6	Peloid/intraclast, bioclast wackestone	Fine bioclast, peloid, intraclast	Dolomitization, dissolution, anhydrite nodular	Lagoon
MF7	Oncoid/peloid packstone	Fine bioclast, peloid, intraclast	Dolomitization, micritization, cementation, dissolution	Lagoon
MF8			Dissolution, dolomitization, cementation	Leeward shoal

کاربرد آنتروپی شانون در کمی‌سازی ناهمگنی زمین‌شناسی، تخلخل و تراوایی: مطالعه موردی سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

MF9	<i>Ooid, bioclast packstone</i> <i>Peloid ooid/bioclast grainstone</i>	<i>Ooid, peloid, intraclast, fine bioclast</i> <i>Peloid, ooid, fine bioclast and some intraclast</i>	<i>Dissolution, dolomitization, cementation</i>	<i>Leeward shoal</i>
MF10	<i>Bioclast/intraclast ooid grainstone</i>	<i>Ooid, intraclast, bioclast</i>	<i>Dissolution, dolomitization, cementation</i>	<i>Shoal</i>
MF11	<i>Intraclast bioclast/ooid packstone</i>	<i>Ooid, intraclast, bioclast, peloid</i>	<i>Dolomitization, micritization, cementation</i>	<i>Seaward shoal</i>
MF12	<i>Crystalline carbonate</i>	-	<i>Dolomitization, dissolution, anhydrite nodular</i>	<i>NON</i>

۲.۴. ویژگی‌های دیاژنتیکی و اثرات آن بر بافت

سنگ

مطالعه مقاطع نازک در دو واحد *K1* و *K2* نشان می‌دهد که سازند کنگان تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرایندهای دیاژنتیکی قرار گرفته است که بر حفظ یا از بین رفتن خلل و فرج و در نهایت بر مقدار تخلخل و تراوایی تأثیر داشته‌اند. مهم‌ترین فرایندهای شناسایی شده شامل دولومیتی‌شدن، سیمانی‌شدن، انیدریتی‌شدن، تراکم مکانیکی و انحلال است که شدت و پراکندگی آنها در دو واحد متفاوت است.

در واحد *K1*، فرایندهای دولومیتی‌شدن و انیدریتی‌شدن گسترده‌تر مشاهده می‌شوند. حضور لایه‌ها و پراکندگی‌های انیدریتی در مقاطع نازک و همچنین ظهور بلورهای دولومیت ریز تا متوسط، نشان می‌دهد که این واحد در مراحل اولیه دیاژنز تحت تأثیر محیط‌های کم‌عمق و تبخیری قرار گرفته است. این فرایندها در بسیاری از نمونه‌ها باعث کاهش تخلخل مؤثر شده‌اند و در برخی موارد، منافذ کاملاً پر شده است. شواهد تراکم مکانیکی، مانند شکستگی‌های دانه‌ها و کاهش فضای بین‌دانه‌ای، نیز به‌ویژه در رخساره‌های ریزدانه‌تر دیده می‌شود. سیمانی‌شدن کربناته نیز در این واحد متداول است و به‌صورت سیمان اسپاریتی یا ریزبلور در میان دانه‌ها دیده می‌شود که موجب کاهش پیوستگی منافذ در بخش‌هایی از ستون رسوبی شده

است. اثر ترکیبی این فرایندها باعث شده بخش قابل توجهی از رخساره‌های *K1* بافتی متراکم و کم‌تخلخل داشته باشند.

در واحد *K2*، الگوی دیاژنز متنوع‌تر است و فرایندهای مؤثری مانند انحلال نیز در برخی رخساره‌ها مشاهده می‌شود. وجود حفرات انحلالی بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای، به‌ویژه در رخساره‌های پکستونی و گرینستونی، از نشانه‌های حضور این فرایند است. در کنار آن، دولومیتی‌شدن در *K2* نیز مشاهده می‌شود اما گستره و شدت آن نسبت به *K1* کمتر است. سیمانی‌شدن کربناته به‌صورت محدودتر ظاهر می‌شود و در بسیاری از نمونه‌ها فضای بین‌دانه‌ای حفظ شده است. این وضعیت باعث شده که رخساره‌های دانه‌پشتیبان در *K2* بخش قابل توجهی از تخلخل اولیه خود را حفظ کنند. با وجود این، آثار تراکم نیز در *K2* مشاهده می‌شود، اما شدت آن نسبت به *K1* کمتر است و بیشتر در رخساره‌های ریزبافت دیده می‌شود.

حضور فرایندهای متنوع در دو واحد سبب شده هر رخساره الگوی متفاوتی از حفظ یا از بین رفتن تخلخل داشته باشد. در برخی نمونه‌ها، انحلال توانسته است فضای ثانویه قابل توجهی ایجاد کند و در مقابل، در نمونه‌های دیگر، سیمانی‌شدن یا انیدریتی‌شدن موجب کاهش شدید تخلخل مؤثر شده است. این تفاوت در سبک و شدت دیاژنز باعث ایجاد تنوع بافتی در طول ستون رسوبی شده است.

۳.۴. تخلخل و تراوایی در واحدهای K1 و K2

داده‌های آزمایش مغزه در دو واحد K1 و K2 نشان می‌دهد که تخلخل و تراوایی در سازند کنگان دامنه تغییرات وسیعی دارند و الگوی توزیع آن‌ها در هر واحد متفاوت است. در واحد K1، بخش قابل توجهی از داده‌های تخلخل در بازه‌های بسیار پایین قرار دارند. بیشترین فراوانی مربوط به کلاس تخلخل کمتر از ۵ درصد است و بازه‌های ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۵ درصد سهم محدودتری دارند. این تمرکز در بازه‌های پایین باعث می‌شود توزیع تخلخل در K1 شکلی نسبتاً فشرده داشته باشد. با این حال، نمونه‌هایی با تخلخل بالاتر (تا حدود ۳۰ درصد) نیز وجود دارند، اگرچه فراوانی آن‌ها نسبتاً کم است (شکل ۳).

در واحد K2، گستره تخلخل گسترده‌تر است و نمونه‌ها در چندین کلاس تخلخل پخش شده‌اند. علاوه بر بازه ۰ تا ۵ درصد، که همچنان سهم مهمی دارد، کلاس‌های ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ درصد نیز تعداد قابل توجهی از داده‌ها را شامل می‌شوند. تخلخل‌های بالاتر از ۲۰ درصد نیز در K2 نسبت به K1 حضور بیشتری دارند. این الگوی توزیع نشان می‌دهد که در K2، تخلخل تنها به یک یا دو محدوده محدود نیست و بخش بیشتری از ستون رسوبی در چند کلاس متوالی قرار می‌گیرد. رفتار تراوایی نیز در دو واحد تفاوت آشکاری دارد. در واحد K1، تراوایی عمدتاً در محدوده‌های بسیار پایین قرار دارد. تعداد زیادی از نمونه‌ها مقادیر کمتر از ۰/۱ میلی‌داری را نشان می‌دهند، و مقادیر بالاتر تنها در تعداد محدودی نمونه مشاهده می‌شود. این تفاوت میان تعداد نمونه‌های کم‌تراوا و تراوا باعث می‌شود توزیع تراوایی در K1 شکلی ناهمگن، با تمرکز زیاد در پایین‌ترین کلاس‌ها، داشته باشد. اگرچه مقادیر بالا (گاه بیش از ۱۰۰ میلی‌داری) نیز دیده می‌شوند، اما این داده‌ها در مقایسه با داده‌های با تراوایی پایین سهم اندکی دارند.

در واحد K2، تراوایی در بازه بسیار گسترده‌تری قرار می‌گیرد. علاوه بر نمونه‌های کم‌تراوا، تعداد قابل توجهی از داده‌ها در محدوده‌های متوسط تا نسبتاً بالا قرار دارند. برخی از نمونه‌ها تراوایی چند ده تا چند صد میلی‌داری نشان می‌دهند. این گستره وسیع‌تر در مقایسه با K1 باعث می‌شود توزیع تراوایی در K2 چندکلاسه‌تر باشد و بخش بیشتری از نمونه‌ها در کلاس‌های

مختلف قرار گیرند. در مجموع، K2 دارای تنوع بیشتری در مقدار تراوایی است، درحالی‌که K1 بیشتر در کلاس‌های بسیار پایین متمرکز است.

نمودارهای پراکندگی تخلخل-تراوایی نیز این تفاوت‌ها را به خوبی نمایش می‌دهند (شکل ۳). در واحد K1، نمونه‌های با تخلخل مشابه می‌توانند تراوایی‌های بسیار متفاوتی داشته باشند و نقاط نمودار پراکندگی قابل توجهی دارند. در K2، توزیع نقاط نسبتاً گسترده‌تر است و افزایش تخلخل در بسیاری از نمونه‌ها با افزایش تراوایی همراه است. گرچه در هر دو واحد پراکندگی داده‌ها مشاهده می‌شود، اما دامنه تغییرات تراوایی در K2 بیشتر است و نمودار آن گستره وسیع‌تری را پوشش می‌دهد (شکل ۳). داده‌های تخلخل و تراوایی در هر دو واحد نشان می‌دهد که هر واحد ویژگی‌های رسوبی و پتروفیزیکی خاص خود را دارد و الگوی توزیع این دو پارامتر در K1 و K2 یکسان نیست.

۴.۴. آنتروپی شانون در رخساره‌ها

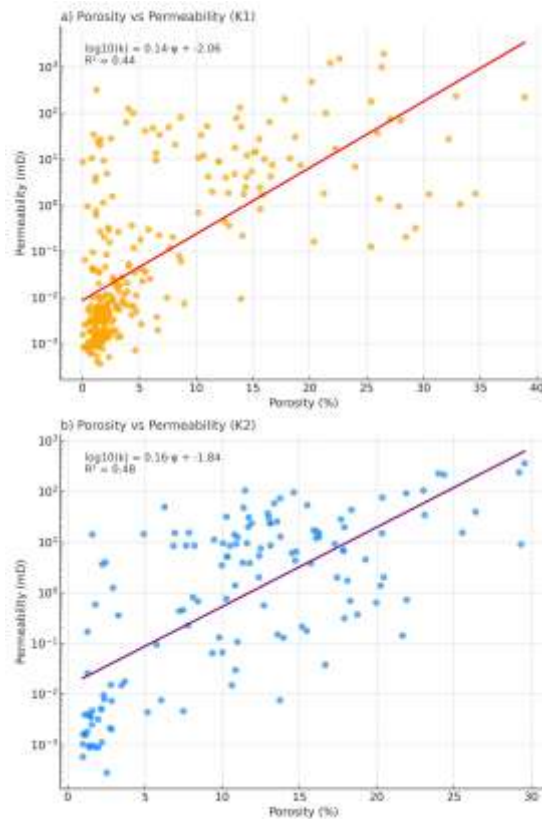
بررسی توزیع رخساره‌ها در دو واحد K1 و K2 و محاسبه آنتروپی شانون بر اساس فراوانی نسبی هر رخساره نشان می‌دهد که هر دو واحد از نظر تنوع رخساره‌ای و تعداد کلاس‌های حاضر رفتار متفاوتی دارند. در واحد K1، برخی رخساره‌ها سهم بسیار بیشتری نسبت به دیگر رخساره‌ها دارند. رخساره‌هایی مانند MF2، MF6 و MF8، MF7، MF5، MF9 و MF11 فراوانی بسیار کمی دارند. این توزیع به صورت مستقیم در مقدار آنتروپی محاسبه شده منعکس شده است. مقدار آنتروپی رخساره‌ها در K1 برابر با ۱.۸۱ به دست آمد. هرچند تعداد رخساره‌ها در این واحد زیاد است، اما توزیع نامتقارن آنها باعث می‌شود سهم رخساره‌های فراوان‌تر در مقدار نهایی آنتروپی اثر بیشتری داشته باشد (شکل ۴).

برخوردار است. نزدیکی مقدار آنتروپی رخساره‌ای در دو واحد $K1$ و $K2$ به این معنی نیست که الگوی رخساره‌ای آنها یکسان است. آنتروپی شانون تنها میزان کلی پراکندگی یا یکنواختی توزیع رخساره‌ها را نشان می‌دهد، اما نوع رخساره‌های غالب و نحوه حضور آنها در ستون رسوبی را به‌تنهایی مشخص نمی‌کند. در واحد $K1$ ، تعداد رخساره‌های مشاهده‌شده بیشتر است، اما فراوانی آنها نامتقارن بوده و چند رخساره اصلی سهم غالب را تشکیل می‌دهند. در مقابل، واحد $K2$ تعداد رخساره‌های کمتری دارد، اما فراوانی آنها در چند گروه اصلی متعادل‌تر است. بنابراین، دو واحد می‌توانند مقدار آنتروپی نزدیک داشته باشند، در حالی که از نظر ترکیب رخساره‌ای، رخساره‌های غالب و پیامدهای مخزنی تفاوت قابل توجهی نشان دهند.

مقایسه مقدار آنتروپی میان $K1$ و $K2$ نشان می‌دهد که الگوی توزیع رخساره‌ها در هر واحد ویژگی‌های خاص خود را دارد. در $K1$ تنوع رخساره‌ای بیشتر است، اما این تنوع با فراوانی نامتقارن همراه است. در مقابل، $K2$ تعداد کمتری از رخساره‌ها را دربرمی‌گیرد، اما توزیع آنها در چند کلاس اصلی متعادل‌تر است. نمودار فراوانی رخساره‌ها که در شکل ۲ ارائه شده است این تفاوت در تعداد کلاس‌ها و توزیع آنها را به‌خوبی نشان می‌دهد و پایه محاسبه مقادیر آنتروپی رخساره‌های هر واحد بوده است.

۵.۴. آنتروپی شانون در تخلخل

بر اساس داده‌های تخلخل مغزه در دو واحد $K1$ و $K2$ ، توزیع تخلخل در قالب چندین کلاس مقدار بررسی و آنتروپی شانون برای هر واحد محاسبه شد. در واحد $K1$ ، تخلخل عمدتاً در کلاس‌های پایین متمرکز است و بخش زیادی از نمونه‌ها در بازه صفر تا ۵ درصد قرار می‌گیرند. کلاس‌های ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۵ درصد نیز سهم قابل توجهی دارند، اما نسبت آنها به کلاس اول به‌مراتب کمتر است. کلاس‌های بالاتر از ۱۵ درصد فراوانی محدودی دارند و تنها در تعداد کمی از نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. این توزیع باعث شده که مقدار آنتروپی تخلخل در $K1$ برابر با ۱.۱۲ به‌دست آید (شکل ۴). این مقدار نشان‌دهنده وجود چند کلاس اصلی با فراوانی بالا و تعداد بیشتری کلاس با فراوانی کم در این واحد است.



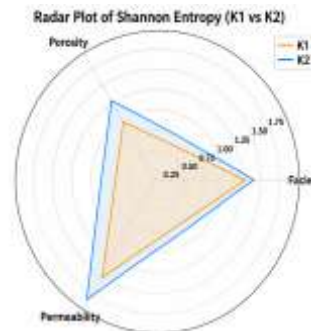
شکل ۳. توزیع تخلخل در برابر تراوایی در واحدهای مورد مطالعه. معادله و ضریب تعیین (R^2) در شکل مشخص شده است.

در واحد $K2$ ، اگرچه تعداد رخساره‌های مشاهده‌شده کمی کمتر از $K1$ است، اما توزیع فراوانی‌ها شکل متفاوتی دارد. در این واحد، مجموعه‌ای از رخساره‌های دانه‌پشتیبان مانند $MF8$ و $MF12$ سهم قابل توجهی دارند و در کنار رخساره‌های دیگری مانند $MF2$ ، $MF4$ و $MF11$ ، بخش عمده توالی را تشکیل می‌دهند. رخساره‌هایی با فراوانی بسیار پایین نیز در $K2$ دیده می‌شود، اما نسبت آنها کمتر از $K1$ است و توزیع کلی رخساره‌ها در چند کلاس اصلی متمرکز شده است. آنتروپی رخساره‌های $K2$ برابر با ۱.۸۰ محاسبه شد. اگرچه این مقدار از نظر عددی بسیار نزدیک به مقدار $K1$ است، اما با توجه به تعداد کمتر کلاس‌های رخساره‌ای، توزیع نسبی رخساره‌ها در $K2$ از یکنواختی بیشتری

در واحد $K2$ ، الگوی توزیع تخلخل گسترده‌تر است و نمونه‌ها در چندین بازه تخلخل پخش شده‌اند. علاوه بر کلاس ۰ تا ۵ درصد، کلاس‌های ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ درصد سهم قابل توجهی از داده‌ها را تشکیل می‌دهند. همچنین، حضور نمونه‌هایی با تخلخل بالاتر از ۲۰ درصد در این واحد نسبت به $K1$ بیشتر است. این توزیع متنوع‌تر سبب شده مقدار آنتروپی تخلخل در $K2$ برابر با ۱.۵۸ محاسبه شود (شکل ۴). وجود چند کلاس با فراوانی قابل ملاحظه و توزیع گسترده‌تر داده‌ها میان کلاس‌های مختلف از ویژگی‌های این واحد است.

مقایسه میان دو واحد نشان می‌دهد که تفاوت در توزیع تخلخل به شکل مستقیم در مقادیر آنتروپی منعکس شده است. واحد $K1$ دارای تمرکز بالایی در یکی دو کلاس پایین است و کلاس‌های دیگر سهم محدودی دارند. در مقابل، $K2$ توزیع متعادل‌تری در کلاس‌های مختلف دارد و نمونه‌ها در چندین بازه مقدار مشاهده می‌شوند. این تفاوت در شکل توزیع، علت اختلاف مقدار آنتروپی میان $K1$ و $K2$ است.

برای هر دو واحد، کلاس‌بندی تخلخل و فراوانی نسبی آنها مبنای محاسبه آنتروپی بوده و نحوه توزیع نمونه‌ها در کلاس‌های مختلف در مقادیر نهایی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته است. نتایج محاسبه آنتروپی، همراه با نمودارهای مربوط به توزیع تخلخل، تصویر روشنی از نحوه پراکندگی داده‌ها در هر واحد ارائه می‌دهد و تفاوت میان $K1$ و $K2$ را از نظر گستره مقادیر تخلخل نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه مقادیر آنتروپی شانون در رخساره‌ها، تخلخل و تراوایی واحدهای $K1$ و $K2$ سازند کنگان در چاه مورد مطالعه

۶.۴. آنتروپی شانون در تراوایی

توزیع تراوایی در دو واحد $K1$ و $K2$ پس از تبدیل لگاریتمی و دسته‌بندی در چندین کلاس مقدار، بررسی شد و بر اساس فراوانی نسبی کلاس‌ها، آنتروپی شانون برای هر واحد محاسبه گردید. در واحد $K1$ ، بخش بسیار بزرگی از نمونه‌ها تراوایی‌های کم و در محدوده‌های پایین قرار دارند. فراوان‌ترین کلاس‌ها شامل بازه‌هایی با مقادیر زیر ۰.۱ میلی‌داری هستند و تعداد نمونه‌هایی که در کلاس‌های بالاتر قرار می‌گیرند به مراتب کمتر است. با وجود این، چند نمونه با مقادیر تراوایی نسبتاً بالا نیز مشاهده می‌شود، اما سهم آن‌ها در مقایسه با داده‌های کم‌تراوا بسیار محدود است. این الگوی توزیع، که بیشترین تراکم آن در کلاس‌های پایین تشکیل می‌شود، موجب شد مقدار آنتروپی تراوایی در $K1$ برابر با ۱.۶۰ محاسبه شود (شکل-۴).

در واحد $K2$ ، گستره تراوایی متنوع‌تر است و داده‌ها در چندین بازه مقدار، پخش شده‌اند. علاوه بر کلاس‌های با تراوایی بسیار کم، تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها در کلاس‌های متوسط تا بالاتر—در محدوده چند میلی‌داری تا چند ده میلی‌داری— قرار دارند و برخی نمونه‌ها نیز تراوایی‌های بالاتری نشان می‌دهند. این توزیع چندکلاسه باعث شده مقدار آنتروپی تراوایی در $K2$ برابر با ۱.۹۵ به دست آید. تفاوت میان کلاس‌ها در این واحد کمتر از $K1$ است و نمونه‌ها در کلاس‌های بیشتری حضور دارند.

مقایسه میان دو واحد نشان می‌دهد که تراوایی در $K1$ عمدتاً در چند کلاس پایین متمرکز است و بخش قابل توجهی از توزیع در همان محدوده‌ها قرار می‌گیرد، در حالی که در $K2$ ، داده‌ها در کلاس‌های مختلف با فراوانی بیشتری پخش شده‌اند. این تفاوت در نحوه پراکندگی نمونه‌ها علت اختلاف مقادیر آنتروپی میان دو واحد است. در هر دو واحد، روش دسته‌بندی لگاریتمی و فراوانی نسبی نمونه‌ها در کلاس‌های مختلف مبنای محاسبه آنتروپی قرار گرفته و شکل نهایی توزیع تراوایی عامل تعیین‌کننده مقدار آنتروپی بوده است.

۵. بحث

نتایج به‌دست‌آمده از توزیع رخساره‌ها، داده‌های تخلخل و تراوایی و ویژگی‌های دیاژنتیکی در دو واحد $K1$ و $K2$ از سازند کنگان نشان می‌دهد که هر دو واحد دارای ناهمگنی قابل توجهی هستند، اما الگوی ناهمگنی آن‌ها متفاوت است. برای ارزیابی این ناهمگنی، در این پژوهش از آنتروپی شانون به‌عنوان یک شاخص کمی استفاده شده است. این روش امکان می‌دهد میزان پراکندگی و تنوع داده‌ها در هر واحد، بدون وابستگی به نوع پارامتر، به‌صورت یک عدد قابل مقایسه بیان شود. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش بررسی ناهمگنی مخزن بر پایه رویکرد آنتروپی است، تحلیل‌ها و تفسیرهای ارائه‌شده در این بخش عمدتاً بر اساس رفتار آنتروپی پارامترهای مختلف صورت می‌گیرد.

نخستین جنبه بررسی‌شده در این مطالعه، توزیع رخساره‌ای دو واحد است. رخساره‌ها یکی از بنیادی‌ترین عناصر کنترل‌کننده کیفیت مخزن هستند، زیرا بیانگر شرایط رسوب‌گذاری و ریخت‌شناسی اولیه سنگ‌اند. مقدار آنتروپی رخساره‌ها در $K1$ و $K2$ به ترتیب ۱.۸۱ و ۱.۸۰ به دست آمد که از نظر عددی بسیار نزدیک‌اند. این نزدیکی در نگاه اول ممکن است بیانگر شباهت ناهمگنی رخساره‌ای دو واحد باشد، اما بررسی جزئیات توزیع نشان می‌دهد که ماهیت تنوع رخساره‌ای در دو واحد متفاوت است. در $K1$ تعداد رخساره‌ها بیشتر است، اما فراوانی آن‌ها نامتقارن است و چند رخساره اصلی بخش عمده‌ای از ستون رسوبی را تشکیل می‌دهند. این وضعیت باعث می‌شود آنتروپی با وجود تعداد زیاد رخساره‌ها مقدار نسبتاً متوسطی داشته باشد. در مقابل، $K2$ تعداد کمتری رخساره دارد اما توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها باعث شده مقدار آنتروپی آن از نظر اثرگذاری مشابه $K1$ باشد. بنابراین، نتیجه کلی آنتروپی رخساره‌ها این است که هر دو واحد دارای الگوی ناهمگنی رخساره‌ای هستند، اما منشأ این ناهمگنی در دو واحد متفاوت است $K1$: متنوع‌تر اما نامتقارن، و $K2$ کم‌تنوع‌تر اما متعادل‌تر.

دومین جنبه بررسی‌شده، توزیع تخلخل است که فاصله میان توزیع دو واحد را به‌خوبی نشان می‌دهد. آنتروپی تخلخل در واحد $K1$ برابر ۱.۱۲ محاسبه شد، در حالی که در $K2$ مقدار ۱.۵۸ به دست آمد. این اختلاف نشان می‌دهد که تخلخل در $K1$ عمدتاً در یک یا دو کلاس پایین متمرکز است، در حالی که در $K2$ میان چندین کلاس مختلف توزیع شده است. بیشترین سهم در $K1$ مربوط به بازه تخلخل کمتر از ۵ درصد است و بخش کوچکی از نمونه‌ها وارد کلاس‌های بالاتر می‌شود. در مقابل، $K2$ دارای گستره بزرگ‌تری از مقادیر تخلخل است و چندین دسته از تخلخل‌های متوسط نیز سهم قابل توجهی دارند. این تفاوت در مقدار آنتروپی به‌صورت مستقیم نشان می‌دهد که $K2$ از نظر پراکندگی تخلخل، ناهمگن‌تر است و توزیع مقادیر در آن چندساختاری‌تر است. این نکته اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که واحد $K2$ در مقیاس مخزنی ممکن است رفتار پیچیده‌تری داشته باشد و مدل‌سازی آن نیازمند توجه به توزیع چندکلاسه تخلخل است.

سومین پارامتر بررسی‌شده، تراوایی است که بیشترین تفاوت را میان دو واحد نشان می‌دهد. مقدار آنتروپی تراوایی در $K1$ برابر با ۱.۶۰ و در $K2$ برابر با ۱.۹۵ به دست آمد. این اختلاف قابل توجه نشان می‌دهد که تراوایی در $K2$ به‌طور معنی‌داری در کلاس‌های بیشتری توزیع شده و دامنه وسیع‌تری از مقادیر را دربرمی‌گیرد. در $K1$ ، بخش اعظم داده‌ها در مقادیر بسیار کم قرار دارند و تنها مقدار محدودی از نمونه‌ها دارای تراوایی‌های متوسط یا بالا هستند. این تمرکز شدید در کلاس‌های پایین باعث کاهش آنتروپی شده است. در مقابل، $K2$ علاوه بر داشتن نمونه‌های کم‌تراوا، شامل مقادیر متوسط و بالای بیشتری نیز هست و توزیع آن گسترده‌تر و چندکلاسه‌تر است. از دیدگاه آنتروپی، چنین توزیعی نشان‌دهنده بیشترین سطح ناهمگنی در میان پارامترهای مطالعه‌شده است و بیان می‌کند که تراوایی در $K2$ نه تنها گسترده‌تر، بلکه پیچیده‌تر و متنوع‌تر نیز هست.

با کنار هم قرار دادن سه شاخص آنتروپی، می‌توان دریافت که الگوی ناهمگنی مخزن در $K2$ نسبت به $K1$ توسعه‌یافته‌تر است. اگرچه رخساره‌های $K2$ تنوع کمتری دارند، اما تخلخل و تراوایی آن در کلاس‌های بیشتری توزیع شده‌اند و این موجب شده مقدار

به‌تنهایی به‌عنوان شاخص قطعی کیفیت مخزن تفسیر شود، بلکه لازم است همراه با شناخت رخساره‌ای، شواهد دیاژنتیکی و الگوی توزیع داده‌های پتروفیزیکی بررسی گردد. در این مطالعه، برای کاهش اثر این محدودیت، کلاس‌ها در دو واحد $K1$ و $K2$ به‌صورت یکسان تعریف شدند تا امکان مقایسه مستقیم میان آنها فراهم شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آنتروپی شانون ابزار مناسبی برای تحلیل ناهمگنی مخازن کربناته است و می‌تواند تفاوت میان واحدهای سنگی را به‌صورت عددی و قابل مقایسه بیان کند. ترکیب تحلیل آنتروپی با داده‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی تصویری جامع از کنترل‌کننده‌های اصلی کیفیت مخزن ارائه می‌دهد و امکان ارزیابی دقیق‌تر تفاوت‌های مخزنی میان واحدها را فراهم می‌کند. این روش می‌تواند در سایر مخازن ناهمگن نیز کاربرد داشته باشد و به‌ویژه در بخش‌هایی از مخزن که رفتار پیچیده یا غیرخطی نشان می‌دهند، راهنمای مناسبی برای شناسایی الگوهای پراکندگی پارامترها باشد.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی ناهمگنی مخزن در دو واحد $K1$ و $K2$ از سازند کنگان، از رویکرد آنتروپی شانون به‌عنوان یک شاخص کمی استفاده کرد تا بتوان رفتار رخساره‌ای، تخلخل و تراوایی را به‌صورت عددی مقایسه و تفسیر کرد. ترکیب نتایج رسوب‌شناسی، داده‌های آزمایش مغزه و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که هر دو واحد دارای ناهمگنی قابل توجهی هستند، اما نحوه بروز و شدت این ناهمگنی در آن‌ها متفاوت است. توزیع رخساره‌ای دو واحد نشان داد که $K1$ با وجود داشتن تعداد بیشتری رخساره، پراکنش نامتقارنی دارد و چند رخساره اصلی بخش عمده داده‌ها را تشکیل می‌دهند. در مقابل، واحد $K2$ رخساره‌های کمتری دارد اما توزیع آنها یکنواخت‌تر است. مقدار آنتروپی رخساره‌ها در هر دو واحد نزدیک بود، اما شواهد نشان داد که منشأ ناهمگنی در این دو واحد متفاوت است. تحلیل تخلخل بیان کرد که $K1$ دارای تمرکز در مقادیر پایین است و داده‌ها بیشتر در یک یا دو کلاس محدود تجمع یافته‌اند. در مقابل، تخلخل در $K2$ در چندین کلاس مختلف توزیع شده

آنتروپی در دو پارامتر اصلی کیفی سنگ (تخلخل و تراوایی) در $K2$ بیشتر باشد. از آنجا که تخلخل و تراوایی پارامترهای کلیدی کنترل‌کننده کیفیت مخزن هستند، افزایش آنتروپی آن‌ها نشان می‌دهد که $K2$ نه‌تنها متغیرتر است، بلکه رفتار مخزنی آن نیز می‌تواند پیچیده‌تر باشد.

این تفاوت‌ها را می‌توان با شواهد سنگ‌شناسی و دیاژنتیکی نیز تطبیق داد. واحد $K1$ به‌طور گسترده‌تری تحت تأثیر انیدریتی‌شدن و دولومیتی‌شدن قرار گرفته و فرایندهای سیمانی‌شدن و تراکم در آن شدیدتر دیده می‌شود. این فرایندها معمولاً موجب کاهش تخلخل اولیه و انسداد مسیرهای جریان می‌شوند و بنابراین طبیعی است که توزیع تخلخل و تراوایی در $K1$ محدودتر و متمرکزتر باشد. این موضوع در مقدار آنتروپی تخلخل و تراوایی نیز بازتاب دارد. در مقابل، $K2$ علاوه بر آنکه رخساره‌های دانه‌پشتیبان بیشتری دارد، تحت تأثیر انحلال نیز قرار گرفته است و این امر در برخی نمونه‌ها موجب تشکیل یا گسترش فضای ثانویه شده است. این تفاوت دیاژنتیکی یکی از دلایل افزایش آنتروپی تخلخل و تراوایی در $K2$ است.

نکته مهم دیگر آن است که آنتروپی شانون امکان مقایسه مستقیم میان پارامترهایی با ماهیت متفاوت (رخساره، تخلخل، تراوایی) را فراهم می‌کند. این مزیت باعث می‌شود بتوان دریافت کدام بخش از مخزن از نظر توزیع داده‌ها پیچیده‌تر است. نتایج نشان داد که تراوایی بیشترین مقدار آنتروپی را دارد، سپس تخلخل و پس از آن رخساره‌ها. این ترتیب بیانگر آن است که پیچیدگی مخزنی سازند کنگان در وهله اول توسط رفتار تراوایی کنترل می‌شود، نه توسط رخساره‌ها یا تخلخل. این نکته برای مدل‌سازی جریان و پیش‌بینی رفتار تولیدی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که توزیع تراوایی بیش از دیگر پارامترها در تعیین ناهمگنی نقش دارد.

با وجود کارایی آنتروپی شانون در بیان کمی ناهمگنی، باید توجه داشت که مقدار این شاخص به شیوه آماده‌سازی و طبقه‌بندی داده‌ها نیز وابسته است. تعداد کلاس‌ها، دامنه هر کلاس و روش تفکیک داده‌ها می‌تواند بر مقدار نهایی آنتروپی اثر بگذارد؛ به‌ویژه در داده‌های پیوسته‌ای مانند تخلخل و تراوایی که ابتدا باید در بازه‌های مشخص گروه‌بندی شوند. بنابراین، مقدار آنتروپی نباید

کاربرد آنتروپی شانون در کمی‌سازی ناهمگنی زمین‌شناسی، تخلخل و تراوایی: مطالعه موردی سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

Persian Gulf. Carbonates and Evaporites, 39(2). <https://doi.org/10.1007/s13146-024-00972-3>

[4] Tavakoli, V. (2020). Carbonate Reservoir Heterogeneity: Overcoming the Challenges. Springer.

[5] Fakhar, M., Rezaee, P., & Karimian Torghabeh, A. (2024). Investigating the reservoir quality of the Early Triassic succession with a new perspective on diagenesis and sequence stratigraphy in the center of the Persian Gulf, South Pars. *Geoenergy Science and Engineering*, 232, 212367-212391.

[۶] فخار، م.، رضایی، پ.، و کریمیان طرقي، ا. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت مخزنی توالی تریاس پیشین با نگاهی نو بر فرایندهای دیاژنزی و چین‌نگاری سکانشی در مرکز خلیج فارس، پارس جنوبی. *علوم و مهندسی نفت*، ۲۳۲، ۲۱۲۳۶۷-۲۱۲۳۹۱.

[7] Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., & Tavakoli, V. (2010). Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran: controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33(1), 43-66.

<https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x>

[8] Moradi, M., Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H., & Kadkhodaie, R. (2024). Integrated reservoir characterization of the Permo-Triassic gas reservoirs in the Central Persian Gulf. *Petroleum*, 10(4), 594-607. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2024.03.005>

[9] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.

[10] Silva, L.C.V. et al. (2025). Entropy-based measure of rock sample heterogeneity derived from micro-CT images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110123.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110123>

[۱۱] طهماسبی، م.، و مسیحی، م. (۱۳۹۳). مقاله رتبه‌بندی تحقیقاتی مدل مخزن بر اساس روش آنتروپی. کنفرانس بین‌المللی مهندسی نفت .

[۱۲] عمرانی، س.، و توکلی، و. (۱۴۰۳). بررسی عوامل کلیدی مؤثر بر دقت محاسبات اشباع آب در مخازن کربناته: سازندهای کنگان و دالان، غرب خلیج فارس. *نشریه ژئومکانیک نفت*، ۱۲(۳)، ۴۵-۶۰.

[13] Tavakoli, V., & Jamalian, A. (2019). Porosity evolution in dolomitized Permian-Triassic strata of the Persian Gulf: Insights into the porosity origin of dolomite reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106191.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191>

و گستره مقادیر آن وسیع‌تر است. اختلاف مقدار آنتروپی تخلخل میان دو واحد، بازتاب همین تفاوت در نحوه پراکندگی داده‌ها است.

تراوایی نیز تفاوت آشکاری میان دو واحد نشان داد. بخش اعظم تراوایی‌های $K1$ در مقادیر بسیار پایین قرار داشتند، در حالی که $K2$ دارای مجموعه‌ای گسترده‌تر از مقادیر، از کم تا بالا، بود. مقدار آنتروپی تراوایی در $K2$ بیشترین مقدار در میان تمام پارامترها را داشت که نشان‌دهنده ناهمگنی شدیدتر و چندکلاسه بودن توزیع تراوایی در این واحد است.

بررسی ویژگی‌های دیاژنتیکی نیز نشان داد که فرآیندهایی مانند انیدریتی‌شدن، سیمانی‌شدن و تراکم در $K1$ نقش پررنگ‌تری دارند و موجب کاهش مؤثر تخلخل و تراوایی شده‌اند؛ در حالی که در $K2$ حضور رخساره‌های دانه‌پشتیبان و آثار انحلال، به حفظ بخشی از فضای خالی و ایجاد مسیرهای جریان کمک کرده است. این تفاوت دیاژنتیکی با تفاوت مقادیر آنتروپی در تخلخل و تراوایی همخوانی دارد.

در نهایت آنتروپی شانون توانست تصویر روشنی از ناهمگنی مخزنی در هر واحد ارائه دهد و تفاوت‌های ساختاری میان $K1$ و $K2$ را به‌صورت کمی بیان کند. این روش می‌تواند ابزاری مؤثر در تحلیل ناهمگنی مخازن کربناته و مقایسه واحدهای سنگی مختلف باشد و در تکمیل مدل‌های مخزنی، شبیه‌سازی جریان و ارزیابی کیفیت مخزن مورد استفاده قرار گیرد.

۷. مراجع

[1] Ahr, W. M. (2008). Geology of carbonate reservoirs: the identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks. John Wiley & Sons.

[2] Asgari, A., Kadkhodaie, A., & Rahimpour-Bonab, H. (2024). Sequence stratigraphy, diagenesis and geological zonation of the lower Triassic carbonate reservoir of the Kangan formation from the central to Northern Persian Gulf. *Carbonates and Evaporites*, 39(3), 85. <https://doi.org/10.1007/s13146-024-00972-3>

[3] Mohammadi, M., Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H., Kadkhodaie, R., & Aleali, M. (2024). Stratigraphic framework and diagenetic features related to reservoir quality of the triassic carbonates in central to northern