

## بررسی دقت ابزار تخلخل سنج نوترونی در سازندهای دارای جاذب نوترون حرارتی

درویش متولی<sup>(۱)</sup>، هادی<sup>(۱)</sup> - رحمانی، فائزه\*<sup>(۱)</sup> - زارع، محمدرضا<sup>(۲)</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه فیزیک هسته‌ای

### چکیده

یکی از ابزارهای مورد استفاده در چاه‌پیمایی هسته‌ای، ابزار تخلخل‌سنج نوترونی است که مبتنی بر رفتار نوترون در هیدروژن برای اندازه‌گیری تخلخل سازند مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین بررسی‌ها برای ارزیابی ابزار، بررسی تأثیر جاذب نوترون حرارتی موجود در سازند بر دقت کار و رفتار ابزار تخلخل‌سنج است. ابزار نوترونی در این کار بر پایه ابزار طراحی شده در کار قبلی می‌باشد که باید در شرایط مختلف در سازندها مورد بررسی قرار بگیرد. براساس نتایج به دست آمده بهترین ابزار برای کار در این شرایط ابزار نوترون فوق‌حرارتی است که می‌تواند در سازندهای دارای جاذب بور و گادولونیوم به ترتیب تا تخلخل ۲۵ و ۲۰ درصد بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: ابزار تخلخل‌سنج، نوترون، جاذب نوترون حرارتی، چاه‌پیمایی، آشکارساز نوترون.

### مقدمه:

برای شناخت مواد سازندها (نفتی یا معدنی) روش‌های متفاوتی وجود دارد. در بسیاری از موارد می‌توان ترکیبات سازند را با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی شناسایی کرد.

یکی از ابزار پرکاربرد در میان ابزارهای موجود در چاه‌پیمایی هسته‌ای، ابزار تخلخل‌سنج نوترونی است. اهمیت اندازه‌گیری تخلخل به این علت است که براساس نوع سازند، می‌تواند به عنوان شاخصی برای وجود نفت یا گاز در سازندهای مورد بررسی تلقی گردد. از نظر تاریخی، ابزار نمودارگیری نوترونی اولین ابزار اندازه‌گیری هسته‌ای برای برآورد تخلخل سازند بوده است.

یک سوند نمودارگیری نوترون شامل یک چشمه نوترونی است که به طور مناسب از هم‌سوساز به سمت سازند خارج شده و در سازند مجاور نفوذ می‌کند. در سال ۱۹۶۶ تیمن و همکارانش ابزار SNP را طراحی کردند که از آشکارسازهای حساس به نوترون فوق‌حرارتی تشکیل شده بود تا در سازندهای با جاذب نوترون‌های حرارتی که ابزار نوترون حرارتی در آنها کارساز نیست، مورد استفاده قرار گیرد [۱]. ابزار نوترونی رایج دیگری که در سال ۱۹۷۰ معرفی شد، ابزار CNL بود که از یک چشمه نوترونی سریع و دو آشکارساز حساس به نوترون‌های حرارتی تشکیل

می‌شود [۲]. با وجود اینکه پاسخ این ابزار در سازندهای دارای جاذب نوترون در مقایسه با SNP مناسب نیست ولی عمق بررسی آن بیشتر است.

از آنجا که پاسخ ابزار نوترونی مبتنی بر شمارش نوترون در آشکارسازهاست لذا هر گونه عاملی به جز تخلخل که بر شمارش آشکارسازها تأثیرگذار باشد، باید به دقت بررسی شود. یکی از این عوامل، وجود جاذب نوترون حرارتی در سازند است. تخلخل آبی باعث گند شدن نوترون‌ها می‌شود اما وجود جاذب باعث خواهد شد که نوترون‌های حرارتی شده، قبل از رسیدن به آشکارساز در سازند جذب شوند. لذا ابزار شمارش کمتری را نشان خواهد داد و ممکن است به اشتباه تخلخل بیشتری را نشان دهد.

یکی از راهکارهای جبران خطا، استفاده از شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی در آشکارساز به جای شمارش نوترون حرارتی است.

از کارهای مرتبطی که به تعیین تخلخل در سازندهای دارای جاذب با استفاده از ابزار نوترونی پرداخته شده است می‌توان به ابزار طراحی شده شرکت شلومبرژه اشاره کرد که از یک چشمه نوترونی و دو آشکارساز حرارتی تشکیل شده است. ابزار مورد نظر در دو سازند کلسیت و ماسه‌سنگ که از مقادیر متفاوت جاذب بور، گادولونیوم و ساماریوم تشکیل شده‌اند مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج ارائه شده نشان دادند که با افزایش تخلخل و جاذب، اختلاف بین تخلخل واقعی و ظاهری سازند کلسیت افزایش یافته و در سازند ماسه‌سنگ این اختلاف کاهش می‌یابد [۳].

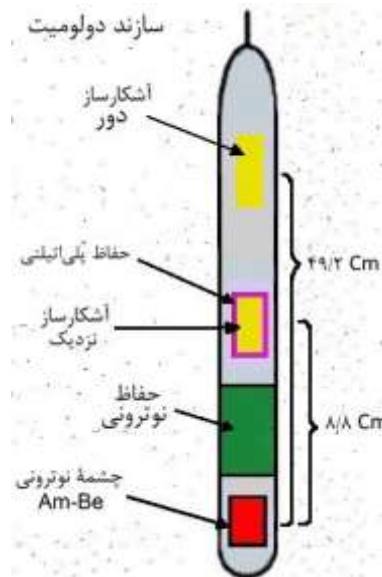
در این مقاله بر اساس ابزاری که در کار قبلی طراحی آن ارائه شده [۴]، دقت عملکرد ابزار در سازندهای حاوی مقادیر مختلف جاذب نوترون بررسی شده و بر اساس منحنی‌های کالیبراسیون در شرایط مختلف سازند، محدوده کاری مورد اعتماد ابزار ارائه شده است.

## روش کار:

ابزار تخلخل‌سنجی که در این کار بررسی شده است، برگرفته از ابزار طراحی شده در کار قبلی می‌باشد [۴]. ابزار تخلخل‌سنج فوق‌حرارتی شامل چشمه نوترون امرسیوم-بریلیوم، دو آشکارساز نوترونی دور و نزدیک به ترتیب در فواصل ۴۹/۲ و ۸/۸ سانتیمتر از چشمه و حفاظ‌های نوترونی است (شکل ۱). با توجه به اینکه استفاده از یک آشکارساز نوترونی می‌تواند تحت تأثیر شرایط محیطی سازند مانند دما و فشار و ... قرار گیرد، از دو آشکارساز در دو فاصله مختلف از چشمه استفاده می‌شود تا با بررسی پاسخ هر دو آشکارساز به صورت همزمان، اثرات محیطی متغیر حذف شوند.

هدف از انجام این پروژه تعیین میزان تخلخل آبی موجود در دو سازند نفتی متداول یعنی دولومیت و کلسیت به ترتیب با سطح مقطع‌های جذب  $4/3$  cu و  $7/1$  cu در حضور جاذب‌های حرارتی بور و گادولونیوم در مقادیر

مختلف با استفاده از نسبت شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی ثبت شده در دو آشکارساز (نسبت آشکارساز نزدیک به دور) می‌باشد.

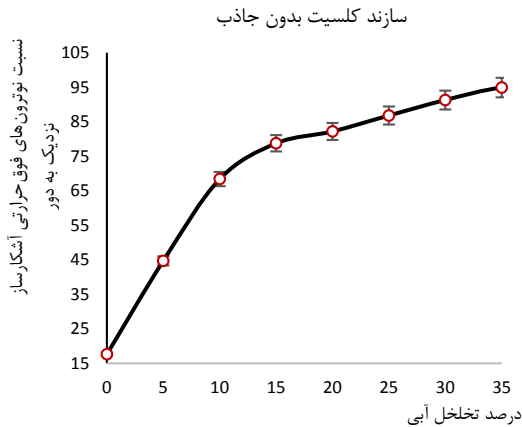


شکل ۱ - هندسه ابزار طراحی شده برای تعیین مقدار تخلخل در سازند دارای جاذب نوترون حرارتی

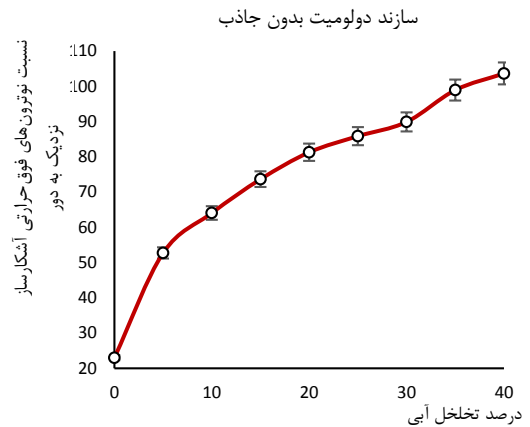
ابزار تخلخل‌سنج نوترون فوق‌حرارتی برای هر دو وضعیت گمانه‌آبی و خشک قابل استفاده می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری تخلخل براساس نسبت شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی ثبت شده در آشکارسازها می‌باشد، لذا شرایطی در طراحی مطلوب‌تر است که منجر به شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی بیشتری در آشکارسازها شوند. با لحاظ کردن حفاظ پلی‌اتیلنی به ضخامت ۴ میلیمتر دور آشکارساز نزدیک، بالاترین شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی در این آشکارساز به ثبت می‌رسد.

نوترون‌ها مسیر طولانی‌تری را تا رسیدن به آشکارساز دور طی می‌کنند لذا در سازند فوق‌حرارتی می‌شوند و نیازی به کندکننده حول آشکارساز دور نیست.

همانطور که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است با استفاده از نسبت شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی آشکارساز نزدیک به دور، ابزار طراحی شده می‌تواند برای سازندهای کلسیت و دولومیت به ترتیب تا تخلخل ۳۵ و ۴۰ درصد مورد استفاده قرار گیرد و تخلخل را شناسایی کند.

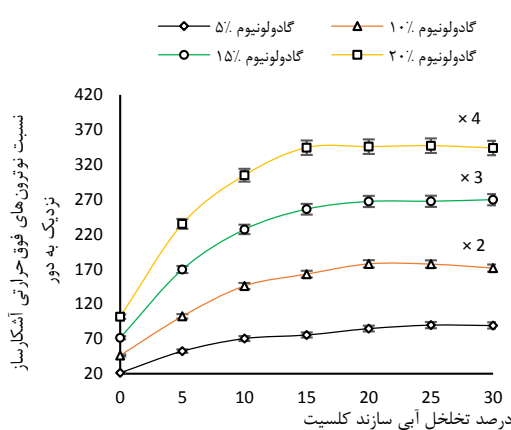


شکل ۳ - نسبت نوترون های فوق حرارتی آشکارساز نزدیک به دور در سازند کلسیت بدون جاذب تا ۳۵ درصد تخلخل آبی

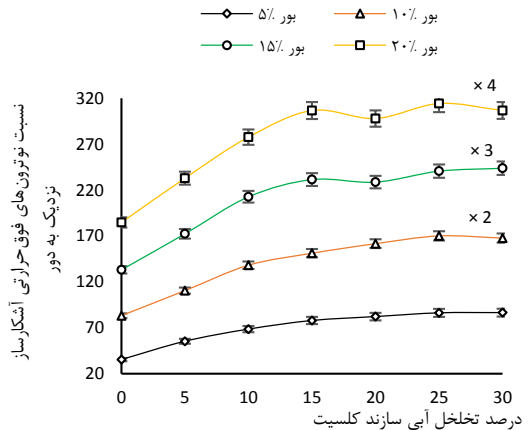


شکل ۲ - نسبت نوترون های فوق حرارتی آشکارساز نزدیک به دور در سازند دولومیت بدون جاذب تا ۴۰ درصد تخلخل آبی

با توجه به شکل های ۲ و ۳، ابزار طراحی شده در سازندهای دولومیت متخلخل قادر است با دقت ۰/۵ درصد تخلخل ۰ تا ۵ درصد، با دقت ۲ درصد تخلخل ۵ تا ۳۰ درصد و با دقت ۴ درصد تخلخل های بالاتر را از یکدیگر تفکیک کند. برای سازند کلسیت بدون جاذب هم بیشترین دقت تا تخلخل ۱۰ درصد است که با دقت ۰/۵ درصد از یکدیگر قابل تفکیک هستند. با افزودن جاذب به سازند به دلیل جذب نوترون های حرارتی شمارش ابزار تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. نسبت شمارش دو آشکارساز بر حسب تخلخل آبی سازند کلسیت متشکل از مقادیر مختلف جاذب های بور و گادولونیوم در شکل های ۴ و ۵ آمده است که نشان می دهد ابزار طراحی شده برای سازند کلسیت حاوی مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جاذب بور به ترتیب تا تخلخل ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۵ درصد را تشخیص می دهد و برای مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جاذب گادولونیوم به ترتیب تا تخلخل ۲۵، ۲۰، ۱۶ و ۱۵ درصد می تواند تخلخل را از هم تشخیص دهد.



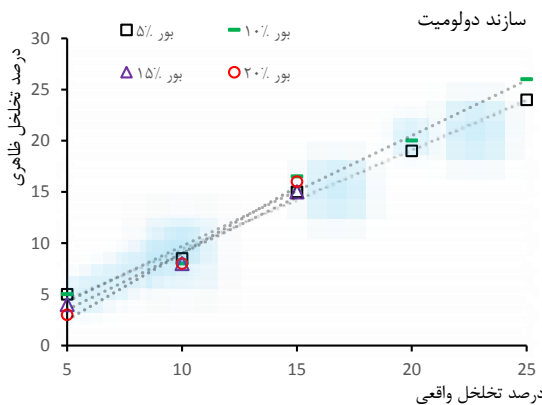
شکل ۵ - رفتار نوترون های فوق حرارتی در سازند کلسیت دارای مقادیر متفاوت جاذب گادولونیوم



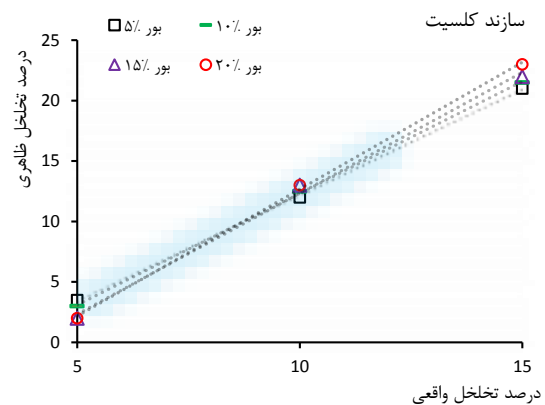
شکل ۴ - رفتار نوترون های فوق حرارتی در سازند کلسیت دارای مقادیر متفاوت جاذب بور

برای سازند دولومیت حاوی مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جاذب بور نیز ابزار طراحی شده می‌تواند به ترتیب تا تخلخل ۴۰، ۲۵، ۱۸ و ۱۵ درصد و برای همین مقادیر جاذب گادولونیوم به ترتیب تا تخلخل ۳۵، ۱۸، ۱۶ و ۱۵ درصد می‌تواند تخلخل را از هم تشخیص دهد.

ارتباط بین تخلخل واقعی (تخلخلی که در سازند بدون جاذب اندازه‌گیری می‌شود) و تخلخل ظاهری سازند (تخلخلی که در سازند دارای جاذب اندازه‌گیری می‌شود) برای دولومیت و کلسیت حاوی درصدهای متغیر بور و گادولونیوم در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است.



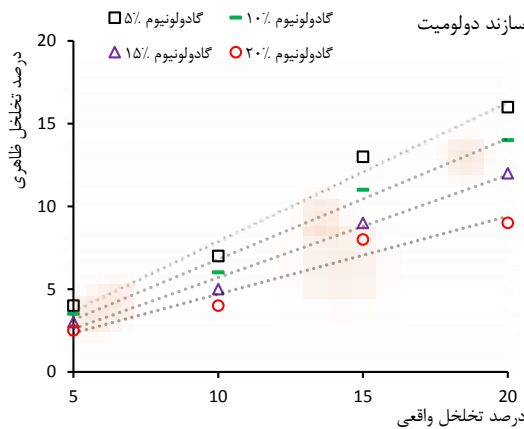
شکل ۷ - نمودار تخلخل واقعی و ظاهری سازند دولومیت دارای مقادیر مختلف جاذب بور



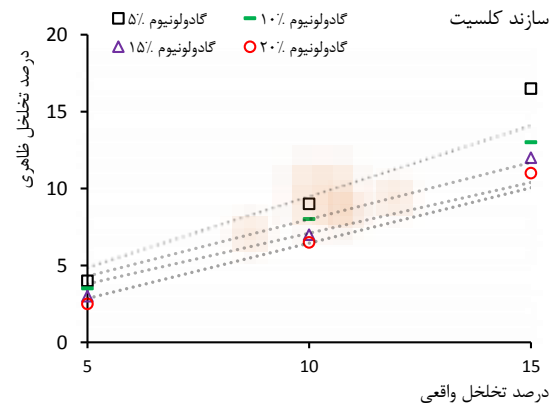
شکل ۶ - نمودار تخلخل واقعی و ظاهری سازند کلسیت دارای مقادیر مختلف جاذب بور

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ نتیجه گرفته می‌شود که در دو سازند کلسیت و دولومیت تا ۲۰ درصد جاذب بور، تا ۱۵ درصد تخلخل قابل اندازه‌گیری است. همچنین این ابزار در سازند دولومیتی با مقدار جاذب بور کمتر از ۱۰ درصد تا تخلخل ۲۵ درصد را اندازه‌گیری می‌کند.

براساس اختلاف بین تخلخل واقعی و ظاهری سازند می‌توان گفت دقت ابزار طراحی شده برای سازند کلسیت حاوی جاذب بور ۲ تا ۶ درصد و برای سازند دولومیت حاوی جاذب بور نیز ۰/۵ تا ۴ درصد است. یعنی برای سازند کلسیت دارای جاذب بور تا ۲۰ درصد، ابزار طراحی شده می‌تواند تخلخل‌ها را بطور متوسط با اختلاف ۳ درصد از هم تفکیک و شناسایی کند.



شکل ۹ - نمودار تخلخل واقعی و ظاهری سازند دولومیت دارای مقادیر مختلف جاذب گادولونیوم



شکل ۸ - نمودار تخلخل واقعی و ظاهری سازند کلسیت دارای مقادیر مختلف جاذب گادولونیوم

بر اساس شکل‌های ۸ و ۹ نیز در سازندهای کلسیت و دولومیت حاوی جاذب گادولونیوم (سطح مقطع جذب ۶۰ برابر بیشتر از سطح مقطع جذب بور) به ترتیب تا تخلخل ۱۵ و ۲۰ درصد قابل اندازه‌گیری است. دقت ابزار طراحی شده برای سازند کلسیت حاوی جاذب گادولونیوم بین ۳ تا ۷ درصد و برای سازند دولومیت حاوی جاذب گادولونیوم بین ۱ تا ۵ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود اختلاف بین تخلخل واقعی و ظاهری سازند برای ابزار طراحی شده با افزایش سطح مقطع جذب و تخلخل سازند افزایش می‌یابد.

## بحث و نتیجه‌گیری:

برای تعیین تخلخل در سازندهای دارای جاذب نوترون حرارتی، بهترین ابزار نوترونی قابل استفاده ابزاری است که بر اساس اندازه‌گیری نوترون‌های فوق‌حرارتی سازند کار می‌کند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت ابزار طراحی شده برای شناسایی تخلخل آبی سازند کلسیت و دولومیت حاوی درصدهای متغیر جاذب بور به ترتیب تا تخلخل ۱۵ تا ۲۵ درصد قابل استفاده و دارای دقت مناسبی می‌باشد. برای سازند دارای جاذب گادولونیوم به علت داشتن سطح مقطع جذب بسیار بالای آن، اختلاف بین تخلخل واقعی و ظاهری ابزار طراحی شده بیشتر و لذا دقت ابزار کمتر خواهد بود. در این کار شبیه‌سازی‌ها در وضعیت گمانه‌پُر شده از آب انجام شده‌اند. با توجه به اینکه ابزارهای تخلخل‌سنج نوترون فوق‌حرارتی قابلیت استفاده در گمانه‌پُر شده از هوا را نیز دارند می‌توان ابزاری را پیشنهاد داد که در وضعیت گمانه‌خشک به شناسایی تخلخل سازند دارای جاذب می‌پردازد. در این وضعیت به دلیل نبودن آب در گمانه به نظر باید از حفاظ‌های پلی‌اتیلنی در ضخامت بیشتر به عنوان کندکننده دور آشکارسازها استفاده نمود.



### مراجع:

- [1] J. Tittman, H. Sherman, WA. Nagel, and R.P. Alger, "The Sidewall Epithermal Neutron Porosity Log" *our. Pet. Tech.* (October 1966).
- [2] IOR.P. Alger, S. Locke, WA. Nagel, and H. Sherman, "The Dual Spacing Neutron Log - CNL" *SPE* 3565, New Orleans (October 1971).
- [3] D. V. Ellis, *Schlumberger-Doll Research*, C. Flaum, J. E. Galford, and H. D. Scott, *Schlumberger Well Services* "The Effect of Formation Absorption on the Thermal Neutron Porosity Measurement" *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 27-30 September, Dallas, Texas, 1987.
- [۴] هادی درویش‌متولی، فائزه رحمانی، محمدرضا زارع؛ طراحی ابزار تخلخل‌سنج نوترونی در سازندهای نفت‌خیز به منظور استفاده چاه‌پیمایی هسته‌ای؛ ارسال شده برای بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران.