مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۹، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۸

بهینه‌سازی زاویهٔ تابش ذرات چشمهٔ نوترونی ^{241}Am-Be تعبیه شده در ابزار تخلخل‌سنج نوترونی به منظور بالا بردن دقت در تعیین تخلخل سازند کلسیت

هادی درویش‌متولی و فائزه رحمانی

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

پست الکترونیکی: FRahmani@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱)

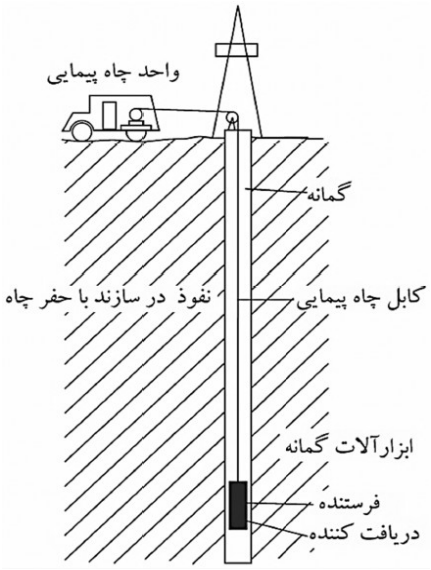
چکیده

امروزه ارزیابی ذخائر هیدروکربنی از اهمیت زیادی برخوردار هستند، بنابراین لازم است این منابع با دقت بیشتری مورد اکتشاف و ارزیابی قرار گیرند. یکی از این روش‌ها، چاه‌پیمایی است که با فرستادن یک ابزار اندازه‌گیری به درون گمانه به اندازه‌گیری یک یا چند مشخصهٔ سازند می‌پردازد. ابزارهای اندازه‌گیری در چاه‌پیمایی هسته‌ای شامل چشمه پرتوزا و آشکارساز هستند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی با کد مونت‌کارلوی MCNPX ۲٫۶، زاویهٔ بهینه تابش (نسبت به محور افقی مختصات) ذرات از چشمه نوترونی امرسیوم- بریلیم به درون سازند کلسیت به منظور دستیابی به بالاترین دقت ممکن برای تعیین تخلخل آبی سازند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که زاویهٔ گسیل ۲۰ درجه علاوه بر دقت بالا (تفکیک تخلخل ۳ درصد) به دلیل افزایش آمار شمارش در آشکارسازها بدون تغییر محسوس در عمق نفوذ، باعث افزایش سرعت ابزار در نمونه‌برداری خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: چاه‌پیمایی هسته‌ای، چشمه نوترونی، کد MCNPX ۲٫۶، زاویهٔ تابش، آشکارساز نوترون فوق حرارتی

۱. مقدمه

برای شناخت مواد زیرزمینی، روش‌های متفاوتی وجود دارد. در بسیاری از موارد می‌توان مواد را با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی شناسایی کرد. از آنجا که در برخی از موارد دسترسی مستقیم به مواد معدنی امکان‌پذیر نبوده و یا شناسایی آن مستلزم هزینه‌های زیادی است، برای بررسی این مواد از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر چاه‌پیمایی استفاده می‌شود. در این روش، سوند حاوی آشکارسازها، قسمت الکترونیک (تقویت‌کننده، منبع تغذیه HV و ...) و چشمهٔ پرتوزای مناسب، با استفاده از کابلی با قرقرهٔ سوار بر کامیون به داخل گمانه (چاه با قطر کم در حدود ۱۴ تا ۲۰ سانتی‌متر) فرستاده می‌شود. علائم آشکارسازی شده پس از تقویت، با استفاده از کابل به پانل سطحی مناسب رفته و به صورت تابعی از عمق ثبت و به اندازه‌گیری یک یا چند مشخصهٔ سازند (بستر اطراف چاه شامل



شکل ۱. طرح‌وارهٔ کلی روش چاه‌پیمایی [۱].

خاک و ...) پرداخته می‌شود (شکل ۱) [۱].

در بین ابزارهای موجود در علم چاه‌پیمایی، ابزار تخلخل‌سنج نوترونی یکی از ابزارهای زیرمجموعهٔ ابزارهای چاه‌پیمایی هسته‌ای است که برای تعیین میزان تخلخل سازند و ارتباط تخلخل با سیالات (از جمله هیدورکربن‌ها) استفاده می‌شود.

یک ابزار نمودارگیری نوترون شامل یک چشمهٔ نوترونی و یک یا چندین آشکارساز نوترونی است. نوترون‌ها از چشمه شامل یک هم‌سوساز به سمت سازند خارج شده و در سازند مجاور نفوذ می‌کند. اگر سنگ‌ها دارای هیدروژن کم و یا بدون هیدروژن باشند، انرژی نوترون‌ها طی برخورد با سازند به کندی کاهش می‌یابد، و اگر سازند حاوی هیدورژن باشد، به دلیل از دست رفتن بیشتر انرژی نوترون، شمارش نوترون حرارتی در ابزار نمودارگیری افزایش خواهد یافت. بنابراین نوترون حرارتی شاخصی برای تخلخل نفتی یا همان هیدورکربن‌ها خواهد بود.

در ایران، آقایان سهراب‌پور و پرورش در سال‌های قبل از ۲۰۰۴ میلادی تحقیقاتی در زمینهٔ ابزار تخلخل‌سنج نوترونی انجام دادند. محور تحقیقات انجام شده، طراحی و شبیه‌سازی سوند تخلخل‌سنج نوترونی و شبیه‌سازی آن با کد MCNP بوده است. ابزار مذکور شامل چشمه Am-Be و یک آشکارساز BF_3 در فاصلهٔ ۴۳ سانتی‌متری از چشمه است [۲].

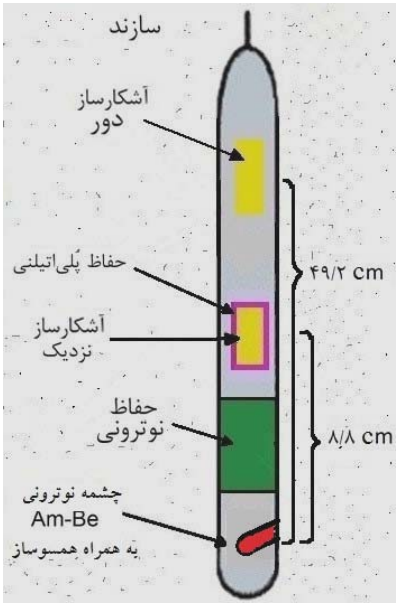
اولین ابزار نوترونی در سال ۱۹۵۰ بر پایهٔ چشمهٔ نوترونی و تک آشکارساز ساخته شده بود. در سال ۱۹۶۰ نیز ابزار SNP[1] برای ارزیابی تخلخل معرفی شد که اثرات چاه به دلیل مماس بودن ابزار با دیوارهٔ چاه تا حد زیادی کاهش یافت. در سال ۱۹۶۶ تیتمن و همکارانش ابزار SNP را طراحی کردند که از آشکارسازهای حساس به نوترون فوق‌حرارتی تشکیل شده بود تا در سازندهای با جاذب حرارتی بالا که ابزار نوترون حرارتی کارساز نیست، مورد استفاده قرار گیرد [۳]. در این پژوهش تخلخل سه سازند کلسیت، دولومیت و ماسه سنگ مورد بررسی قرار گرفت. ابزار مربوطه می‌تواند برای تا تخلخل ۴۰ درصد را برای سازندهای کلسیت و ماسه سنگ با عدم قطعیت ±۰٫۵ و تا تخلخل ۲۴ درصد را برای سازند دولومیت با عدم قطعیت ±۱ ارزیابی کند.

ابزار نوترونی رایج دیگری که در سال ۱۹۷۰ معرفی شد، ابزار CNL[2] بود که از یک چشمه نوترونی سریع و دو آشکارساز حساس به نوترون‌های حرارتی تشکیل می‌شد [۴]. آشکارسازها در فاصله تقریباً ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری در بالای چشمه قرار دارند. با وجود این که این ابزار نسبت به ابزار SNP در سازندهای دارای جاذب نوترون حرارتی، رفتار خوبی ندارد ولی عمق بررسی آن بیشتر است. در این مقاله تخلخل سه سازند کلسیت، دولومیت و ماسه سنگ مورد بررسی قرار گرفت که ابزار مربوطه به ترتیب تا تخلخل‌های ۱۸، ۱۱ و ۲۰ درصد سازندهای مذکور دارای عدم قطعیت ±۰٫۵ است و برای تخلخل‌های بالاتر دقت ابزار کمتر می‌شود.

در این مقاله به بررسی بهترین زاویهٔ خروج نوترون از چشمه و برخورد آن با سازند پرداخته شده است تا هم آمار شمارش مطلوب باشد به عبارتی سرعت پاسخگویی ابزار مناسب باشد و هم عمق قابل بررسی سازند توسط ابزار مناسب باشد. با توجه به مطالعاتی که انجام شده است، نظیر این پژوهش در مقالات خارجی و داخلی انجام نشده است.

۱. Sidewall Neutron Porosity

۲. Compensated Neutron Log



شکل ۲. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) هندسهٔ ابزار طراحی شده برای شناسایی تخلخل در سازند.

۲. روش کار

در طراحی اولیه این ابزار از پژوهش قبلی استفاده شده است [۵]. (شکل ۲). همان طور که دیده می‌شود، یک چشمهٔ نوترونی Am-Be در انتهای ابزار قرار داده شده است. نوترون پس از خروج از چشمه طی عبور از یک هم‌سوساز در یک نقطه به سازند برخورد می‌کند. با توجه به محیط اطراف گمانه و مواد تشکیل دهندهٔ سازند، نوترون پراکنده شده و سپس توسط دو آشکارساز نزدیک به چشمه (آشکارساز نزدیک) و دور از چشمه (آشکارساز دور) شمارش می‌شود.

از آنجا که استفاده از یک آشکارساز نوترونی می‌تواند تحت تأثیر شرایط محیطی سازند مانند دما و فشار و ... قرار گیرد، از دو آشکارساز در دو فاصلهٔ مختلف از چشمه استفاده می‌شود تا با بررسی پاسخ هر دو آشکارساز به صورت همزمان، اثرات محیطی متغیر حذف شوند.

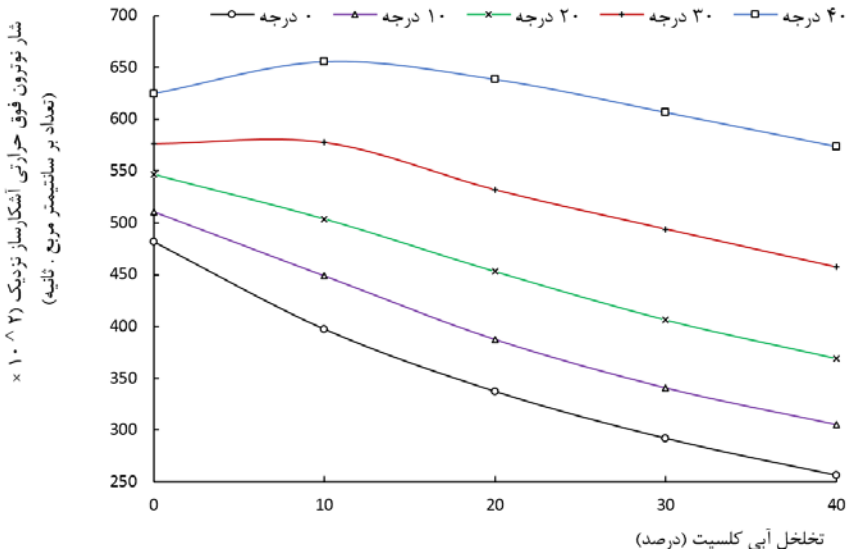
منظور از آشکارساز نوترونی آشکارساز نوترون فوق‌حرارتی است که از بین نوترون‌های اندرکنش‌یافته با مواد سازند که وارد ابزار اندازه‌گیری می‌شوند، فقط نوترون‌های فوق حرارتی (با انرژی بین ۱ تا ۱۰ eV) را شمارش می‌کند.

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی با کد مونت‌کارلوی MCNPX ۲/۶، زاویهٔ بهینهٔ نوترون (ورود نوترون از همسوساز به سازند) از چشمهٔ نوترونی امرسیوم- بریلیم (Am-Be) (با انرژی متوسط ۴٫۲ MeV و اکتیویتهٔ ۲۷ میلی‌کوری) به درون سازند کلسیت (با فرمول شیمیایی $CaCO_3$ و چگالی ۲٫۷۱ gr/cm^3) به منظور تعیین میزان تخلخل مایع موجود در سازند با استفاده از نسبت شمارش نوترون‌های فوق حرارتی ثبت شده در دو آشکارساز (نسبت آشکارساز نزدیک به دور) مورد بررسی قرار گرفته است.

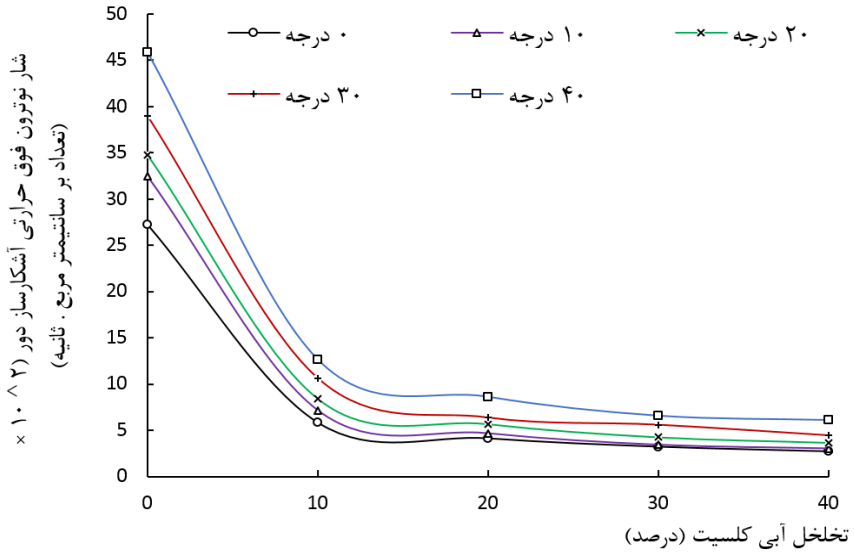
منظور از زاویهٔ بهینه، زاویه‌ای است که هم آمار شمارش مطلوبی در آشکارسازها ایجاد شود تا سرعت پاسخگویی ابزار مناسب باشد و هم عمق قابل بررسی سازند توسط ابزار مناسب باشد.

در ابزار طراحی شده از دو آشکارساز حساس به نوترون‌های فوق‌حرارتی (آشکارساز نزدیک به ابعاد ۷٫۶۲ × ۲٫۵۴ سانتی‌متر دارای حفاظ پلی‌اتیلنی به ضخامت ۴ میلی‌متر و آشکارساز دور به ابعاد ۱۲٫۷ × ۲٫۵۴ سانتی‌متر) که به ترتیب در فاصله‌های ۸٫۸ و ۴۹٫۲ سانتی‌متر از چشمهٔ نوترونی Am-Be قرار گرفته‌اند استفاده شده است. همچنین به منظور این که از ورود مستقیم ذرات ناشی از چشمه به آشکارسازها جلوگیری شود، حفاظ نوترونی (به صورت لایه‌ای و به ترتیب از پایین به بالا شامل ۲۰ میلی‌متر پلی‌اتیلن به عنوان کند کننده، ۱۵ میلی‌متر جاذب نوترونی بورون کاربید (B_4C) و ۷ میلی‌متر سُرب) بین چشمه و آشکارساز نزدیک در نظر گرفته شده است. از نسبت شمارش نوترون‌های فوق حرارتی ثبت شده در دو آشکارساز (نسبت شمارش نزدیک به دور) درصد تخلخل آبی سازند تعیین می‌شود.

با توجه به این که تعداد نوترون‌های سریع (با انرژی بالاتر از ۱۰ keV) رسیده به آشکارسازها قابل توجه است، لذا می‌توان با در نظر گرفتن لایه‌ای از جنس پلی‌اتیلن به عنوان کندکنندهٔ نوترون حول آشکارساز نزدیک در ابزار طراحی شده، انرژی نوترون‌های سریع را به محدودهٔ نوترون‌های فوق‌حرارتی انتقال داد تا توسط آشکارساز نزدیک که آشکارساز نوترون فوق



شکل ۳. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی آشکارساز نزدیک بر اساس تخلخل و زاویهٔ تابش نوترون به سازند کلسیت.



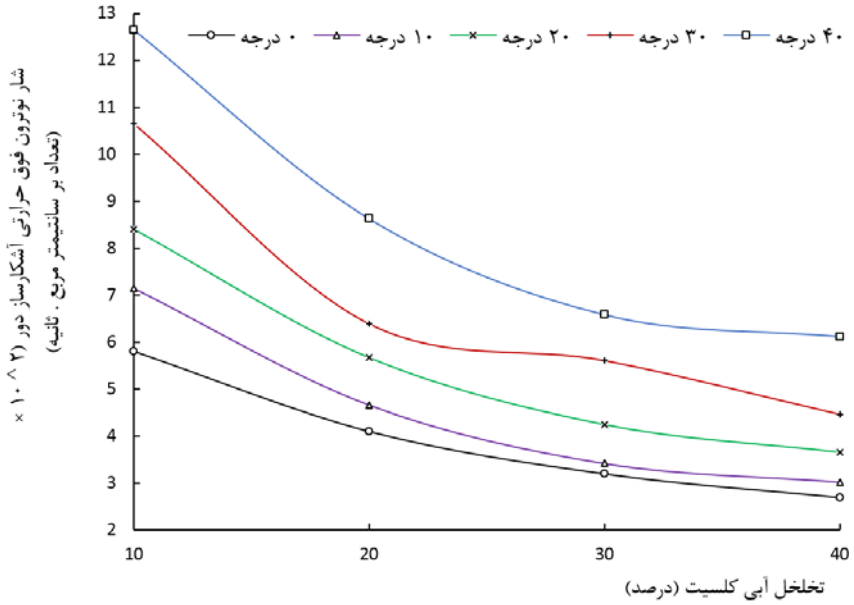
شکل ۴. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی آشکارساز دور بر اساس تخلخل و زاویهٔ تابش نوترون به سازند کلسیت.

حرارتی است با بازدهی بالاتری شمارش شود. نوترون‌ها مسیر طولانی‌تری را تا رسیدن به آشکارساز دور طی می‌کنند، لذا در سازند فوق حرارتی می‌شوند و نیازی به کندکنندهٔ حول آشکارساز دور برای تغییر انرژی از محدودهٔ سریع به فوق حرارتی ندارند.

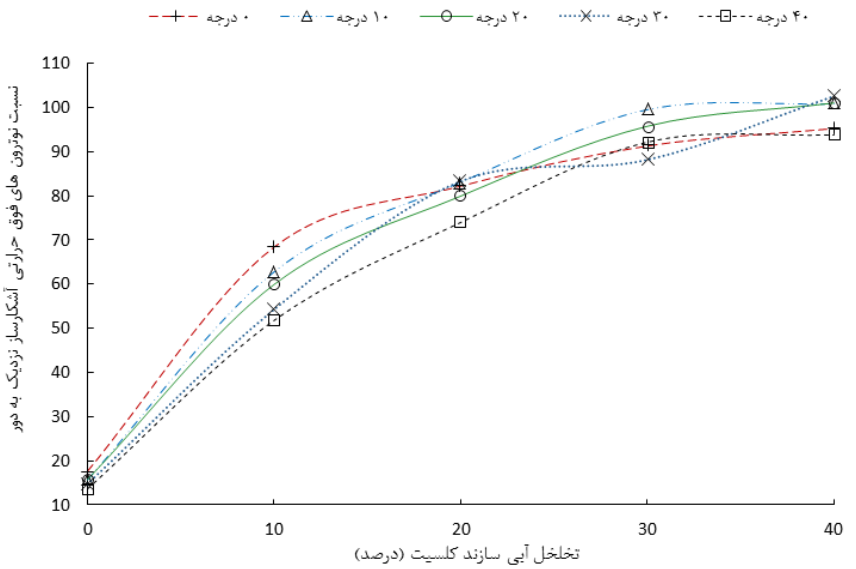
برای بهینه‌سازی ابزار طراحی شده به بررسی زاویهٔ تابش ورود نوترون به سازند کلسیت پرداخته شده است. سازند کلسیت به عنوان یکی از سازندهای متداول حاوی مواد هیدروکربنی انتخاب شده است.

شبیه‌سازی‌ها در زوایای ورود نوترون از ۰ تا ۴۰ درجه (با گام‌های ۱۰ درجه) در سازند کلسیت با تخلخل‌های متفاوت تا ۴۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده است.

از آنجا که آشکارساز دور در فاصلهٔ بیشتری از چشمه قرار

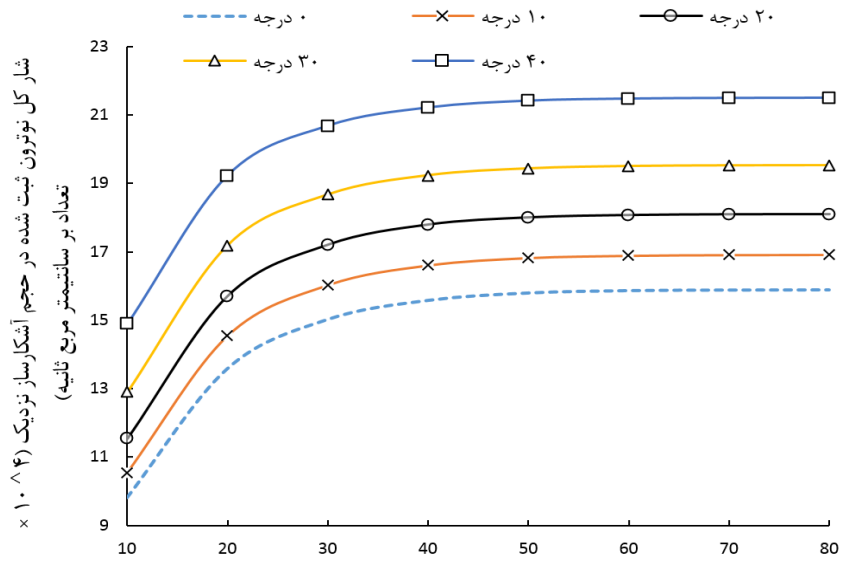


شکل ۵. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تغییرات شار نوترون فوق حرارتی آشکارساز دور بر اساس تخلخل (۱۰ تا ۴۰ درصد) و زاویهٔ تابش نوترون به سازند کلسیت.

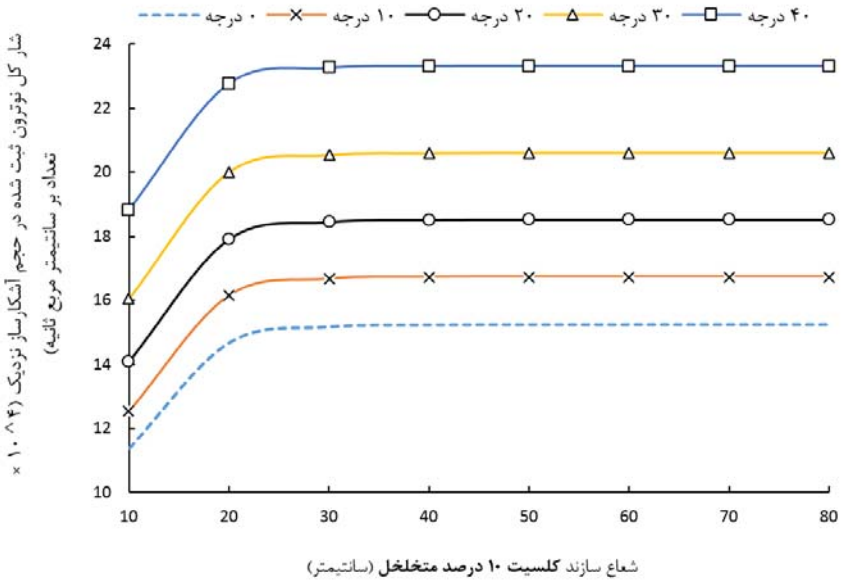


شکل ۶. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نسبت شار نوترون فوق حرارتی دو آشکارساز بر اساس تخلخل در زوایای صفر تا ۴۰ درجه گسیل نوترون به سازند کلسیت.

دارد لذا نوترون در سازند باید مسیر طولانی‌تری را طی کند تا در آشکارساز دور ثبت شود. همین مسیر طولانی سبب وقوع اندرکنش‌های بیشتر با هسته های عناصر تشکیل دهندهٔ سازند می‌شود. بنابراین در صورت وجود تخلخل در سازند، میزان کندشدگی نوترون افزایش و با توجه به توضیحات گفته شده، شار نوترون ثبت شده در آشکارساز دور برای وضعیت سازند بدون تخلخل در مقایسه با سازند متخلخل دچار تغییرات زیادی خواهد شد. از این رو بهتر است برای مقایسهٔ بهتر منحنی‌های مربوط به آشکارساز دور، شار نوترون فوق حرارتی در تخلخل‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.



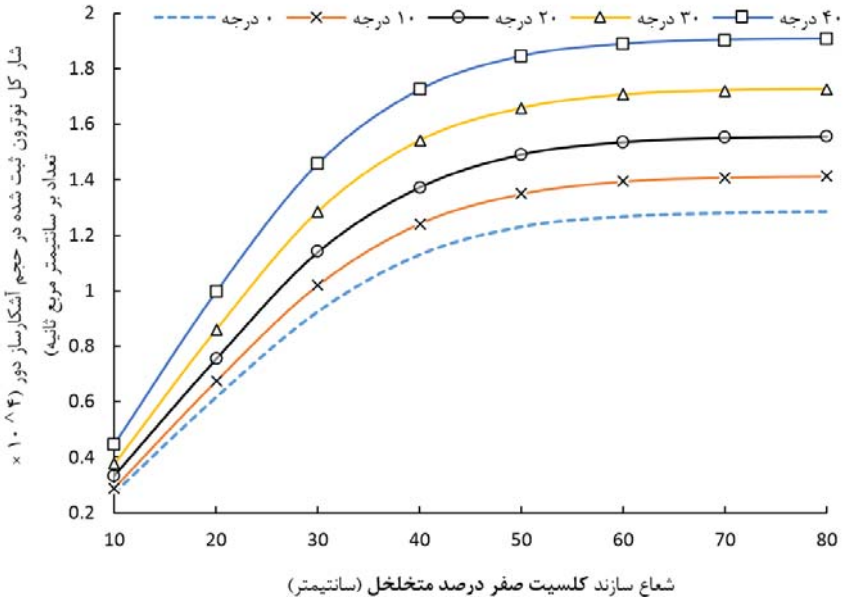
شکل ۷. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی در آشکارساز نزدیک به ازای تخلخل صفر درصد بر اساس زاویهٔ خروج نوترون از چشمه.



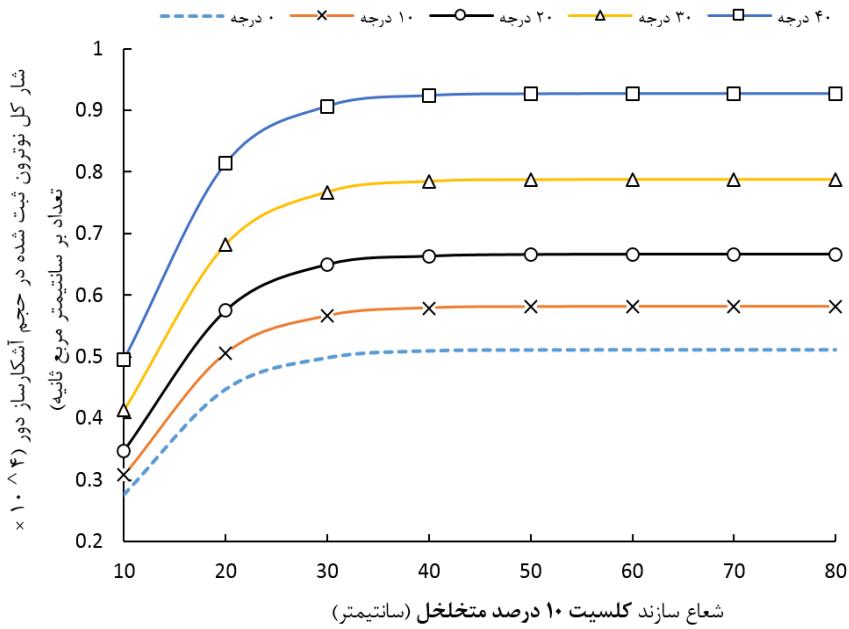
شکل ۸. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی در آشکارساز نزدیک به ازای تخلخل ۱۰ درصد بر اساس زاویهٔ خروج نوترون از چشمه.

با بررسی منحنی‌های حاصل شده از نتایج (شکل‌های ۳ و ۵)، می‌بینیم که وقتی نوترون با زاویهٔ ۲۰ درجه به سمت سازند کلسیت گسیل می‌شود، نوترون‌های فوق‌حرارتی ثبت شده در دو آشکارساز با افزایش تخلخل آبی سازند کلسیت سیر نزولی منظم‌تری نسبت به حالات دیگر دارد (خطی‌تر است).

نتایج مربوط به نسبت شمارش نوترون‌های فوق‌حرارتی در



شکل ۹. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی در آشکارساز دور به ازای تخلخل صفر درصد بر اساس زاویهٔ خروج نـوترون از چشمه.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) شار نوترون فوق حرارتی در آشکارساز دور به ازای تخلخل ۱۰ درصد بر اساس زاویهٔ خروج نـوترون از چشمه.

شکل ۶ آمده است.

همان طور که مشاهده می‌شود در زاویهٔ ۲۰ درجه نسبت بـه زوایای تابش دیگر، منحنی مربوط مربوط به نسبت شار نوترون فوق‌حرارتی آشکارساز نزدیک به دور دارای تفکیک‌پذیری بهتر است طوری که می‌توان با استفاده از ابزار مربوطه تا تخلخل ۴۰ درصد در سازند کلسیت تخلخل را بـا دقـت بهتـر از ۳ درصـد

تفکیک کرد. بنابراین برای اندازه‌گیری مبتنی بر نوترون فوق‌حرارتی در ابزارهای تخلخل‌سنج نوترونی زاویهٔ ۲۰ درجهٔ گسیل در نظر گرفته شد.

نکتهٔ بعدی که باید مورد ارزیابی قرارگیرد این است که با افزایش زاویه، عمق نفوذ نوترون در سازند کاهش نیابد به عبارتی به ازای بهبود آمار شمارش در آشکارسازها، عمق بررسی کاهش نیابد. به همین منظور در تخلخل‌های مختلف و نیز زوایای متفاوت میزان نفوذ نوترون در لایه‌های سازند در راستای شعاع مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۷ تا ۱۰ آمار شمارش نوترون فوق حرارتی را در آشکارساز نزدیک و دور برای دو تخلخل صفر و ۱۰ درصد نشان می‌دهند. دیده می‌شود که تغییر زاویه تابش عمق بررسی را تغییر محسوسی نمی‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج کلیه شبیه‌سازی‌ها با خطای نسبی کمتر از ۵ درصد گزارش شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

یکی از بهترین روش‌های تعیین تخلخل سازندهای زیرزمینی استفاده از ابزارهای تخلخل‌سنج نوترونی می‌باشد. ابزارهای تخلخل‌سنجی که براساس اندازه‌گیری نوترون‌های حرارتی کار می‌کند، در وضعیتی که گمانهٔ حفاری شده از سیال پر شده باشد کارایی لازم را ندارند و همچنین در برابر سازندهای متشکل از عناصری با سطح مقطع جذب نوترون حرارتی بالا مانند گادولونیوم و بور و ... دارای خطای زیادی هستند. ابزار تخلخل‌سنج نوترونی مبتنی بر اندازه‌گیری و شمارش نوترون فوق حرارتی برای وضعیت‌های مختلف فیزیکی گمانهٔ قابل استفاده و محدودیتی ندارد، همچنین با توجه به این که در این ابزار نوترون فوق حرارتی اندازه‌گیری می‌شود برای تعیین تخلخل سازندهای دارای جاذب نوترون حرارتی مشکلی نخواهد داشت. در این کار بهینه‌سازی زاویهٔ تابش ذرات چشمه به منظور تعیین تخلخل سازند کلسیت با قدرت تفکیک ۳ درصد انجام شد. بر اساس نتایج، زاویهٔ ۲۰ درجه مناسب‌ترین زاویهٔ گسیل ذرات از چشمه به سازند است. تغییر عمق بررسی در مقایسه با زاویهٔ صفر درجه (عمود بر محور مرکزی سازند) نامحسوس است، از این رو تغییر زاویه اثری بر عمق بررسی ندارد ولی انتخاب بهینهٔ آن می‌تواند آمار شمارش در آشکارسازها و به عبارتی سرعت نمونه برداری را ببهبود ببخشد.

مراجع

۱. فولدیاک، جی، «*کاربردهای صنعتی رادیوایزوتوپ‌ها*»، ترجمه و تدوین فائزه رحمانی و حسین خلفی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای (۱۳۹۲).

2. P Parvaresh and M Sohrabpour, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **260**, 2 (2004) 335.

3. J Tittman, H Sherman, W A Nagel, and R P Alger, *Journal of Petroleum Technology* **18**, 10 (1966) 1351.

4. R P Alger, S Locke, W A Nagel, and H Sherman, *Journal of Petroleum Technology* **24**, 9 (1979) 1073.

۵. هـ درویش‌متولّی، ف رحمانی و م ر زارع، «*طراحی ابزار تخلخل‌سنج نوترونی با استفاده از کُد مونت‌کارلوی MCNP*»، کنفرانس هسته‌ای ایران (۱۳۹۵).