

اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی آب با استفاده از ابزار طراحی شده چگالی‌سنج گاما

امیرمحمد بیگزاده^۱، محمدرضا رشیدیان وزیری^{۲*}، حسین آفریده^۳ و غلامرضا اطاعتی^۳

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲. پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۳. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴)

چکیده

امروزه ابزارهای هسته‌ای کاربرد فراوانی در زمینه‌های مختلف علمی و صنعتی دارند. تابش‌های مختلف هسته‌ای (آلفا، بتا و گاما) را می‌توان در ساخت این ابزارها مورد استفاده قرار داد. چگالی‌سنج‌های هسته‌ای با استفاده از پرتوهای گاما، به دلیل غیرمخرب بودن و عدم نیاز به تماس با مواد تحت آزمون، امروزه برای پایش فرایندها مورد توجه صنایع مختلف، نظیر صنایع نفت و پتروشیمی هستند. در این کار طراحی و ساخت یک چگالی‌سنج گاما و اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی جرمی آب از طریق آن گزارش شده است. نتایج بیانگر دقت خوب ابزار ساخته شده برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی آب است.

واژه‌های کلیدی: چگالی‌سنج هسته‌ای، پایش غیرتماسی، رادیوایزوتوپ، وابستگی دمایی

۱. مقدمه

تماس مستقیم با مواد تحت آزمون نیست و از این همین رو می‌توان آنها را برای پایش فرایندهایی دشوار، نظیر مشخصه‌یابی موادی با دمای بسیار بالا و یا مواد سمی و خطرناک و محصولات بسته‌بندی شده‌ای که امکان باز کردن حفاظ پیرامون آنها نیست، استفاده کرد [۳ و ۴]. علاوه بر این، تابش‌های بتا، گاما و پرتوی ایکسی که اغلب در این ابزارها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به ماده آسیب وارد نکرده و تغییر خواص فیزیکی یا تغییر شکل ظاهری آنها را در پی ندارند. به دلیل همین مزایای

ابزارهای هسته‌ای به دلیل مزیت‌های اقتصادی فراوان، به صورت گسترده‌ای توسط صنایع مختلف برای سنجش کیفیت محصول، فرایندهای بهینه‌سازی، ذخیره انرژی، تابش‌دهی مواد، پایش فرایندهای فیزیکی و نیز سایر کاربردها مورد استفاده هستند [۱ و ۲]. نخستین بار استفاده صنعتی از این ابزارها بیش از پنجاه سال پیش گزارش شده و از آن پس استفاده از آنها به شکلی وسیع گسترش یافته است [۱]. در این ابزارها نیازی به

بی‌شمار، چشمه‌های رادیوایزوتوپی و ابزارهای هسته‌ای در رقابت با سایر ابزارهای جایگزین، موقعیت کاربردی خود را در زمینه‌های صنعتی و علمی کماکان حفظ کرده‌اند [۵].

ابزارهای اندازه‌گیری هسته‌ای اغلب به صورت خودکار عمل کرده و به شکل قابل حمل و یا ساکن و نصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمامی این ابزارها شامل یک چشمه هستند که به عنوان منبع تابشی عمل می‌کند. همچنین حداقل یک آشکارساز در آنها وجود دارد که شدت پرتوی تابشی را بعد از برهم‌کنش با ماده اندازه‌گیری می‌کند. بسته به این که چه اتفاقی برای تابش پیش از رسیدن به آشکارساز رخ می‌دهد، سه نوع مختلف از ابزارهای اندازه‌گیری هسته‌ای را می‌توان دسته‌بندی کرد: ابزارهای عبوری، پس‌پراکندگی و واکنشی [۳ و ۶]. در نمونه‌های نوع واکنشی، چشمه‌های نوترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند که قادر به فعال‌سازی ماده و القای خاصیت رادیواکتیویته در آن هستند و ۷. این دسته از ابزارها تنها به شرایطی که رادیواکتیو شدن ماده اهمیتی نداشته نباشد، کاربرد دارند. به عنوان مثال، یکی از کاربردهای روش فعال‌سازی نوترونی، کشف مین‌های به جا مانده از دوران جنگ و مدفون شده در زیر خاک و رسوبات گل و لای است [۹ و ۱۰].

ابزارهای عبوری و پس‌پراکندگی (همچنان که از نام آنها مشخص است) به ترتیب تابش‌های عبوری و پس‌پراکنده شده را آشکارسازی می‌کنند. به دلیل ذات پیچیده پرتوهای پس‌پراکنده و دشوار بودن آشکارسازی آنها، ابزارهای عبوری اغلب در اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزارهای هسته‌ای عبوری را می‌توان برای کنترل فرایند و بررسی کمیت‌های مختلف در طول ساخت قطعات و ابزارآلات استفاده کرد. به عنوان مثال، ابزارهای هسته‌ای را می‌توان برای اندازه‌گیری چگالی [۱۱]، سطح‌سنجی مایعات [۴]، اندازه‌گیری ضخامت [۱۲]، اندازه‌گیری درسطح و عمقی میزان رطوبت و چگالی خاک [۱۳] مورد استفاده قرار داد.

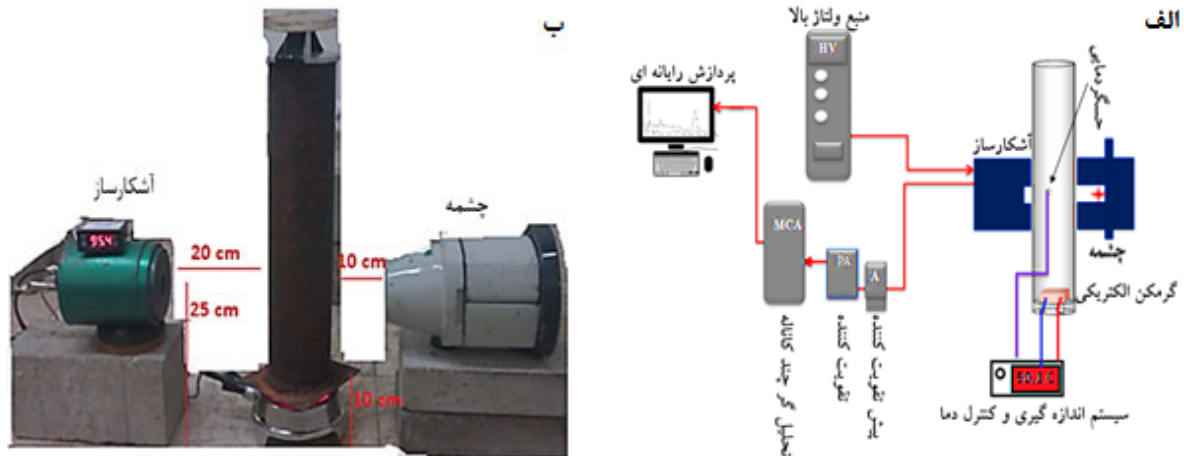
چگالی یکی از ویژگی‌های مهم مورد استفاده برای ارائه اطلاعات در مورد ترکیب، نسبت محتوا، شار جرمی و محتوای کالری سیالات است [۱۴]. آب یکی از سیالاتی است که در

تمام جهان وجود دارد و کاربرد گسترده‌ای در مصارف علمی و صنعتی دارد. خواص فیزیکی آب به عنوان مرجع، در بسیاری از شاخه‌های علوم به ویژه در اقیانوس‌شناسی و علم شیمی به کار برده می‌شود. چگالی آن به عنوان مرجع برای تعیین چگالی و حجم مواد ناشناخته بسیار مورد استفاده واقع می‌شود [۱۵]. در این مقاله، طراحی و ساخت یک چگالی‌سنج پرتوی گاما برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی سیال آب مورد بررسی قرار گرفته است. در ابزار طراحی شده، با استفاده از منبع تابش گاما و آشکارساز یدورسدیم، وابستگی دمایی چگالی آب در لوله پلی‌اتیلنی با قابلیت کنترل دمایی بالا، اندازه‌گیری شده است.

۲. طراحی، ساخت و توصیف روش کار چگالی‌سنج

در ابزارهای اندازه‌گیری مبتنی بر عبور تابش هسته‌ای از میان ماده، چشمه تابشی و آشکارساز در دو سوی مختلف ماده قرار می‌گیرند. اگر پرتوی از ضخامت معینی از ماده عبور کند، با تحلیل پاسخ دریافتی از آشکارساز می‌توان چگالی ماده را اندازه گرفت و ابزار ساخته شده یک چگالی‌سنج هسته‌ای خواهد بود [۱۶]. طرح‌واره چیدمان چگالی‌سنج هسته‌ای و نمایی از چیدمان تجربی ساخته شده بر اساس آن برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی سیالات، به ترتیب در شکل‌های ۱ (الف) و (ب)، نشان داده شده‌اند.

تابش‌های هسته‌ای مختلف، مانند آلفا، بتا و گاما می‌توانند در ساخت ابزارهای اندازه‌گیری هسته‌ای مورد استفاده قرار بگیرند. در این میان، تابش گاما با انرژی بالاتر و طول‌موج کوتاه‌تر توان نفوذ بیشتری در ماده داشته و به همین دلیل کاربرد گسترده‌تری در ساخت آنها دارد. ایزوتوپ‌های رادیواکتیو کبالت-۶۰ و سزیوم-۱۳۷ مهم‌ترین منابع تابش گاما هستند. سزیوم-۱۳۷ انرژی پائین‌تر و در نتیجه طول نفوذ کمتری دارد، اما نگهداری، حفاظ‌سازی و نصب آن ساده‌تر است. به همین دلیل این منبع تابشی پرتوهای گاما به عنوان بهترین گزینه در ساخت چگالی‌سنج‌های ارزان قیمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این کار نیز یک چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ با فعالیت ۱۵۰ میلی‌کوری در یک سوی لوله حاوی سیال آب و یک آشکارساز



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چگالی سنج هسته‌ای طراحی شده برای اندازه‌گیری وابستگی دمایی چگالی آب.

روش کار چگالی‌سنج‌های هسته‌ای با در نظر گرفتن رابطه شناخته شده بیر-لامبرت قابل درک است. مطابق با این رابطه، زمانی که یک باریکه تابشی با شدت اولیه I_0 از داخل ماده‌ای با چگالی ρ و ضخامت t عبور می‌کند، شدت باریکه خروجی I به صورت نمایی و مطابق با رابطه زیر کاهش می‌یابد:

$$I = I_0 e^{-\mu t} = I_0 e^{-\mu_m \rho(T) t}, \quad (1)$$

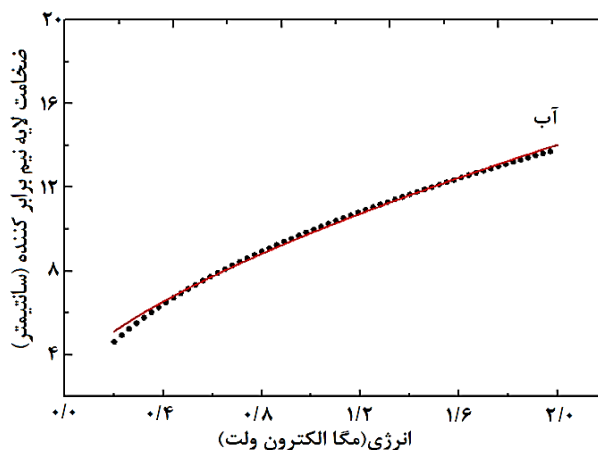
که در آن μ و μ_m به ترتیب ضرایب تضعیف خطی و جرمی ماده هستند. رابطه (۱) به صراحت نشان دهنده آن است که در ماده‌ای با ضخامت ثابت، تغییراتی که در چگالی ماده به هر طریقی ایجاد شده باشد، به عنوان مثال با تغییرات دمایی، منجر به تغییر شدت سیگنال ثبت شده توسط آشکارساز خواهد شد. با اندازه‌گیری شدت توسط آشکارساز در دماهای مختلف T ، وابستگی دمایی چگالی با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\rho(T) = \frac{-1}{\mu_m t} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad (2)$$

یکی از مفاهیم سودمند در طراحی گنج‌های هسته‌ای تعریف لایه نیم‌کننده است (HVL) که به صورت ضخامت از ماده تعریف می‌شود که زمانی که در مسیر عبور تابش قرار گیرد، شار تابش فرودی را به نصف مقدار اولیه آن کاهش خواهد داد [۱۷ و ۱۸]:

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu}, \quad (3)$$

یدور سدیم یک اینچی نیز در سوی دیگر آن مورد استفاده واقع شده است. در آشکارسازهای سوسوزن و اتافک‌های یونیزان که استفاده بیشتری در ساخت ابزارهای اندازه‌گیری هسته‌ای دارند، یک پالس ولتاژ پائین شکل می‌گیرد که برای آشکارسازی و اندازه‌گیری باید تقویت شود. منبع تغذیه ولتاژ بالا (HV)، پیش تقویت کننده (PA)، تقویت کننده (A) و تحلیلگر چند کاناله (MCA) اجزای الکتریکی لازم برای تقویت و شمارش پالس‌های الکتریکی هستند [۱۷ و ۱۸]. رایانه نیز داده‌ها را برای تحلیل‌های بعدی ثبت و ذخیره می‌کند. برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما در داخل لوله، دماسنج دیجیتال SAMWON مدل SU-۱۰۵ با دقت اندازه‌گیری ۰٫۱ درجه سلسیوس، هم ارتفاع با محور حفاظ چشمه و نگهدارنده آشکارساز، در محلی قرار داده شد که حداقل تداخل را در مسیر پرتوی گامای عبوری ایجاد کند. برای ثابت نگه داشتن دما از دستگاه کنترل دما استفاده شد که پس از افزایش ۵ درجه سانتی‌گراد، دما را به مدت مورد نظر در آن نقطه دمایی ثابت نگه می‌دارد تا شمارش انجام شود. با استفاده از کنترل کننده دمایی و قطع و وصل متناوب جریان منبع گرمایی، سعی بر آن بوده است که تعادل گرمایی در سیال درون لوله ایجاد شده و حتی الامکان از شکل‌گیری گرادیان دمایی در طول لوله اجتناب به عمل آید. لوله مورد استفاده از جنس پلی‌اتیلن با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت بدنه دو میلی‌متر بوده است.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بزرگی HVL آب بر حسب انرژی تابش گامای فرودی بر سطح آن.

جدول ۱. رابطه توانی برازش شده روی مقادیر HVL آب، همراه با مقدار میانگین ضریب تعیین R^2 که دقت برازش را تعیین می‌کند. مقدار R^2 نزدیک به یک نشان می‌دهد که رابطه توانی به خوبی مقادیر HVL آب را در بازه انرژی ۰٫۲ تا ۲ مگاالکترون ولت توصیف می‌کند.

نام سیال	معادله	R^2
آب	$HVL = 9,939 E^{0,4759}$	۰٫۹۹۷۳

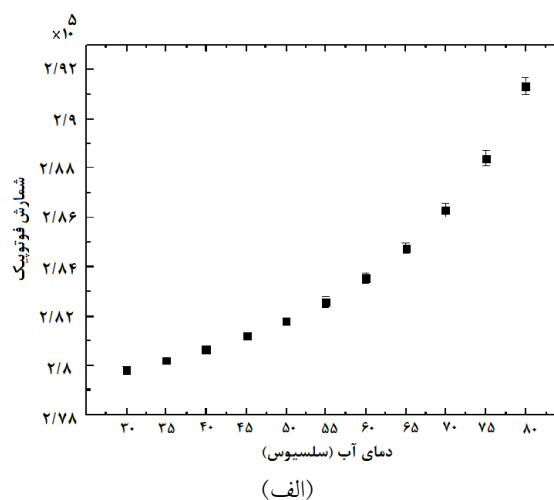
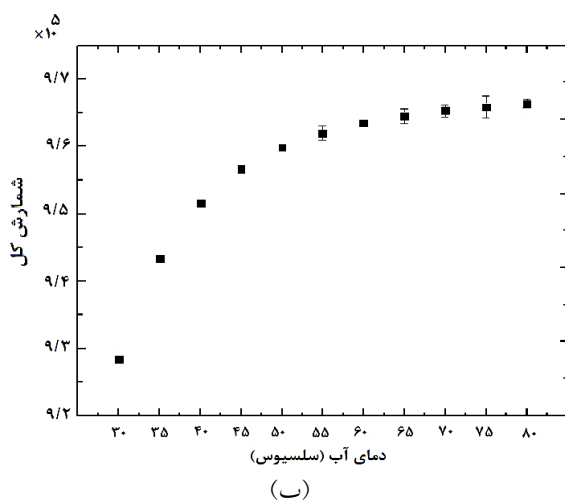
(۱۳۷)، n تعداد HVLهای ماده بین چشمه و آشکارساز، m شدت تابش کمینه مورد نیاز برای آشکارساز و d فاصله بین چشمه و آشکارساز بر حسب متر است. m حساسیت آشکارساز را تعیین می‌کند. برای شمارنده‌های گایگر-مولر حساسیت مبنا بین ۰٫۱ تا ۰٫۵ میلی‌رونتگن بر ساعت است. آشکارسازهای سوسوزن و اتاقک‌های یونساز نیز می‌توانند سطح تابشی کمتر از تابش زمینه را تا حدود ۰٫۰۴ میلی‌رونتگن بر ساعت آشکارسازی کنند [۱۹]. برای چشمه تابشی گامای سزیوم-۱۳۷ با انرژی ۰٫۶۶۲ مگاالکترون ولت، رابطه HVL در جدول ۱ مقدار ۸٫۱۷ سانتی‌متر را بر جای می‌نهد که بسیار نزدیک به مقدار ۸٫۰۴ محاسبه شده در کاری دیگر بوده [۲۴] و دقت رابطه به دست آمده را تأیید می‌کند. با استفاده از رابطه (۴)، مقدار m برابر با ۰٫۰۴ میلی‌رونتگن بر ساعت برای آشکارساز سوسوزن موجود و نیز استفاده از داده‌های هندسی چیدمان تجربی، حداقل میزان فعالیت مورد نیاز چشمه گامای سزیوم-۱۳۷ مورد نیاز برای ساخت چگالی‌سنج هسته‌ای حدود ۳٫۱ میکروکوری به دست می‌آید. بنابراین استفاده از چشمه سزیوم-۱۳۷ با فعالیت برابر با ۱۵۰ میلی‌کوری در این کار، ضمن

مقدار HVL برای ماده آب با استفاده از برنامه شناخته شده XCOM حساب شده [۱۹] و به صورت تابعی از انرژی در شکل ۲ نشان داده شده است. XCOM و نسخه جدیدتر آن WinXcom [۲۲] به طور معمول برای محاسبه ضریب تضعیف مواد مختلف تحت تابش‌های ایکس و گاما کاربرد دارند [۲۳]. بررسی‌ها بیانگر آن بود که استفاده از رابطه توانی به شکل $y=ax^b$ بهترین برازش را روی داده‌ها بر جای می‌نهد. منحنی برازش شده بر روی داده‌های HVL، به دست آمده با استفاده از رابطه توانی، در شکل ۲ نشان داده شده و رابطه آن به همراه مقدار میانگین ضریب تعیین R^2 در جدول ۱ آورده شده است.

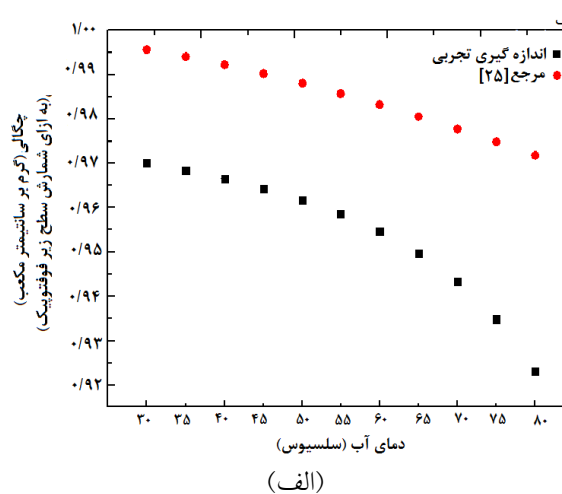
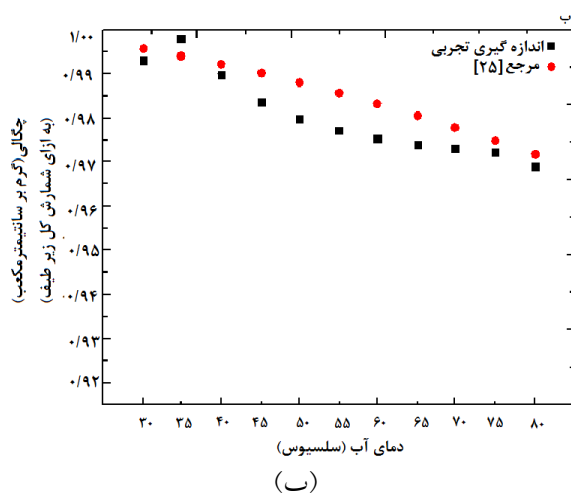
رابطه توانی به دست آمده را می‌توان برای طراحی گنج‌های هسته‌ای که بازه انرژی چشمه یونیزان آنها بین ۰٫۲ تا ۲ مگاالکترون ولت باشد به کار گرفت. در حقیقت، فعالیت بهینه چشمه مورد نیاز برای ساخت گنج هسته‌ای، A (بر حسب میلی‌کوری)، را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۹]:

$$A = k^2 n m d^2, \quad (4)$$

که در آن k ثابت تناسب (برابر با ۳٫۲ برای چشمه سزیوم-



شکل ۳. شمارش (الف) سطح زیر فوتوقله و (ب) سطح زیر کل طیف به ازای تغییرات دمایی آب.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) وابستگی دمایی چگالی آب، (الف) شمارش سطح زیر فوتوقله (ب) شمارش کل سطح زیر طیف.

حالت‌های شمارش سطح زیر فوتوقله و سطح زیر کل طیف به ترتیب در شکل‌های ۳ (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند. وابستگی دمایی چگالی آب با استفاده از رابطه (۲)، برای هر دو حالت محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار ضخامت t برابر با 10 سانتی‌متر و مقدار ضریب تضعیف جرمی ماده $4m$ برای انرژی تابش گامای منبع سزیوم (برابر با 0.662 مگاالکترون‌ولت) $0.08562 \text{ cm}^2/\text{g}$ در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب تضعیف جرمی ماده آب در انرژی منبع سزیوم، با استفاده از برنامه XCOM محاسبه شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، وابستگی دمایی چگالی آب در دماهای متناظر با

برخورداری از حداقل فعالیت مورد نیاز، نسبت علامت به نوفه را نیز در اندازه‌گیری‌ها به شدت افزایش خواهد داد.

۳. نتایج

توسط چیدمان تجربی، شدت باریکه رسیده به آشکارساز در دماهای 30 تا 80 درجه سانتی‌گراد، با گام‌های پنج درجه سانتی‌گراد، ثبت و در رایانه ذخیره‌سازی شدند. در این مطالعه از دستگاه 1024 کاناله برای داده نگاری استفاده شده و تغییرات شمارش بر حسب تغییرات دما، برای دو حالت شمارش سطح زیر فوتوقله و برای شمارش سطح زیر کل طیف انجام شد. نتایج برای

شمارش می شود افزایش یافته و دقت اندازه گیری بیشتر می شود.

۴. نتیجه گیری

استفاده از تابش های رادیواکتیو برای اندازه گیری کمیت های فیزیکی مختلف روز به روز در حال افزایش است. این اندازه گیری ها می تواند گستره وسیعی نظیر اندازه گیری ضخامت، رطوبت، خوردگی، چگالی و ... را در برداشته باشد. چشمه های رادیواکتیو مختلف را می توان به عنوان ابزارهای سنجش غیرمخرب و غیرتماسی در قالب گیج های هسته ای در کاربردهای علمی و صنعتی مورد استفاده قرار داد. در این کار از تابش هسته ای گاما برای اندازه گیری وابستگی دمایی چگالی آب استفاده شده است. استفاده از مایع آب، به دلیل سهولت استفاده، تنها برای اطمینان از صحت و دقت اندازه گیری ابزار طراحی شده بوده است. در آینده می توان ابزار طراحی شده را برای اندازه گیری وابستگی دمایی چگالی مایعات مختلف، نظیر مایعات خورنده، اسیدی، سمی، شیمیایی و ... نیز مورد استفاده قرار داد.

استفاده از منبع [۲۵] نیز استخراج شده و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. نزدیکی نقاط تجربی به دست آمده از روش شمارش سطح زیر کل طیف با نقاط داده استخراج شده از منبع [۲۵]، بیانگر صحت مطلوب اندازه گیری های انجام شده در این کار است. اختلاف جزئی قابل مشاهده در شکل ۴ (ب) با نتایج مرجع به سبب روش های متفاوت اندازه گیری و نیز وجود نوفه های اثرگذار بر روی دستگاه از قبیل نوفه های الکتریکی و نوفه حاصل از اثر تابشی منبع گرمایی بر روی آشکارساز سوسوزن است. به منظور برآورد کمی میزان خطا، خطای نسبی میانگین میان دو دسته داده محاسبه شده است. میزان خطا در اندازه گیری های مبتنی بر شمارش سطح زیر فوتوپیک برابر با ۵ درصد و در اندازه گیری های سطح زیر کل طیف برابر با ۰/۸ درصد بوده است.

نتایج به دست آمده نشان دهنده مزیت استفاده از روش شمارش سطح زیر کل طیف برای اندازه گیری وابستگی دمایی چگالی آب است. وجود این مزیت به سبب آن است که با شمارش سطح زیر کل طیف بزرگی علامت به نوفه نسبت به حالتی که فقط بخشی از سطح زیر طیف (ناحیه فوتوقله)

مراجع

- Jamieson, E J Waller, F J LeMay, H Ing, E T H Clifford, and E B Selkirk, *J. Radioan. Nucl. CH.* 235 (1998) 53.
۱۰. ح. سهامی، ی رادان محمد، و د مجیدی، *مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین* ۳، ۱ (۱۳۹۱) ۸۱
11. H A Beigzadeh, H Afarideh, E A Amirabadi, Z Soltani, and G R Etaati, *International Journal of Innovation and Applied Studies* 4, 2 (2013) 408.
12. W E Shoupp, L M Tichvinsky, "Thickness Gauge for Rolling Mills", U.S. Patent 2 (1941) 264.
13. H A Froehlich, "Soil Compaction From Logging Equipment: Effects on Growth of Young Ponderosa Pine". Forest Service, US Department of Agriculture (1979).
14. A M Beigzadeh, M R R Vaziri, Z Soltani, and H Afarideh, *Measurement* 138 (2019) 157.
15. M Tanaka, G Girard, R Davis, A Peuto, and N Bignell, *Metrologia* 38, 4 (2001) 301.
۱۶. م بیگزاده، غ اطاعتی، ح آفریده، و اسدی امیرآبادی، «طراحی سیستم چگالی سنج هسته ای برای کنترل سیالات در صنایع نفتی» دومین همایش بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و گاز (۱۳۹۰).
1. I A E A (IAEA); "Technical Data on Nucleonic Gauges", IAEA-TECDOC-1459 (2005) 1.
2. W Boyes, "Instrumentation Reference Book"; Butterworth-Heinemann (2009).
3. I A E A (IAEA); "Manual on Nuclear Gauges", IAEA-PRSM-3 (1996) 1.
4. M Falahati, M R Vaziri, A M Beigzadeh, and H Afarideh, *J. Instrum.* 13, 02 (2018) 02028.
5. P K Bhatnagar and A Nagaratnam, *Defence. Sci. J.* 37 (1987) 339.
6. M B Holstad, "Gamma-Ray Scatter Methods Applied to Industrial Measurement Systems", Ph. D. Thesis, University of Bergen (2004).
۷. س ه میری حکیم آباد، ر کوهی فایق، و م ه هادی زاده یزدی، *مجله پژوهش فیزیک ایران* ۴، ۳ (۱۳۷۹) ۱۵۱.
7. M S Hakim Abad, R Kohi Faygh, and H M Hadi, *Iranian J. Phys. Res.* 2, 3 (2000) 151.
۸. ر ایزدی نجف آبادی، ر کوهی فائق، و ح آفریده، *مجله پژوهش فیزیک ایران* ۴، ۱ (۱۳۸۲) ۱۳.
8. R Izadi-Najafabadi, R Koochi-Fayegh, H Afarideh, *Iranian J. Phys. Res.* 4, 1 (2003) 13.
9. S T Cousins, T A Jones, J R Brisson, J E McFee, T J

- Stand. (1987).
22. L Gerward, N Guilbert, K B Jensen, and H Levring, *Radiat. Phys. Chem.* **60**, 1-2 (2001) 23.
23. A M El-Khayatt, A M Ali, and V P Singh, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **735** (2014) 207.
24. R Biswas, H Sahadath, A S Mollah, and M F Huq, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* **9**, 1 (2016) 26.
25. D W Rankin, “*CRC Handbook of Chemistry and Physics*”, Edited by David R. Lide, CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton (2009).
17. G F Knoll, “*Radiation Detection and Measurement*”, John Wiley & Sons (2010).
18. N Tsoulfanidis, “*Measurement and Detection of Radiation*”, CRC press (2010).
19. R Loxton, P Pope, “*Instrumentation: A Reader: A Reader*”, Springer Science & Business Media (2012).
20. B G Liptak, “*Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*”, CRC press (2003).
21. M J Berger and J H Hubbell, “*XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer*”, Natl. Bureau.