



فاصله‌سنجی پس‌پراکنشی صفحه‌های فولادی با چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co

محمد تقان ساسانپور^{*}، محسن شریف‌زاده، علی طاهری، مجتبی عسکری

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: msasanpour@aeoi.org.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۳۰

چکیده

فاصله‌سنجی به روش پس‌پراکنش کامپتون روشی نوین برای اندازه‌گیری فاصله بین صفحات فلزی است که می‌تواند کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله صنعت نفت و گاز و پتروشیمی داشته باشد. در این مقاله به‌منظور فاصله‌سنجی از ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۲، ۶ و ۱۰ mm به‌عنوان ضخامت‌های کم، متوسط و زیاد استفاده شد. همچنین با هدف نشان دادن تأثیر انرژی چشمه بر فاصله‌سنجی، دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co استفاده شده‌اند. نتایج نشان داد که فاصله‌سنجی به انرژی چشمه گاما وابسته است و برای دقت اندازه‌گیری یکسان، چشمه گاما با انرژی بالاتر قابلیت بیشتری برای اندازه‌گیری فاصله بین دو صفحه فولادی دارد. افزایش انرژی چشمه، دقت اندازه‌گیری را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر انرژی چشمه گاما، فاصله‌سنجی به ضخامت دو صفحه و ترتیب قرارگیری صفحه ضخیم‌تر نسبت به صفحه نازک‌تر نیز بستگی دارد. همچنین با افزایش فاصله بین دو صفحه فلزی، دقت اندازه‌گیری نیز کاهش می‌یابد. به همین دلیل بیشینه فاصله‌سنجی بین دو صفحه، با در نظر گرفتن دقت اندازه‌گیری، به مقدار ۱ cm در نظر گرفته شده است.

کلیدواژه‌ها: فاصله‌سنجی، پس‌پراکنش کامپتون، چشمه ^{137}Cs ، چشمه ^{60}Co ، فولاد

Distance measuring of steel plates by ^{137}Cs and ^{60}Co sources

M.T. Sasanpour^{*}, M. Sharifzadeh, A. Taheri, M. Askari

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 1339-14155, Tehran - Iran

Technical Paper

Received 12.4.2020, Accepted 20.9.2020

Abstract

Distance measuring between two metal plates by γ -ray backscattering is a new method that is applicable for different industries, especially the oil, gas, and petrochemical industry. In the present work, 2, 6, and 10 mm thick steel plates were used as thin, medium, and thick plates to perform the experiments. Also, two sources of ^{137}Cs and ^{60}Co have been used to show the effect of source energy on the accuracy of the measurements. The results showed that the distance measurement depends on the Gamma-ray energy, and for the same measurement accuracy, the Gamma source with higher energy would be more applicable for measuring the distance between two steel plates. Moreover, it was found that increasing the γ -ray energy will increase the accuracy of the measurement. In addition to the energy of the gamma source, the distance measurement depends on the thickness of the two plates, the arrangement of the thicker plate comparing to the thinner ones, and the distance between them. Finally, increasing the distance between the plates leads to reducing the measurement accuracy, which was calculated to be one centimeter.

Keywords: Distance measuring, Compton backscattering, ^{137}Cs , ^{60}Co , Steel plates



۱. مقدمه

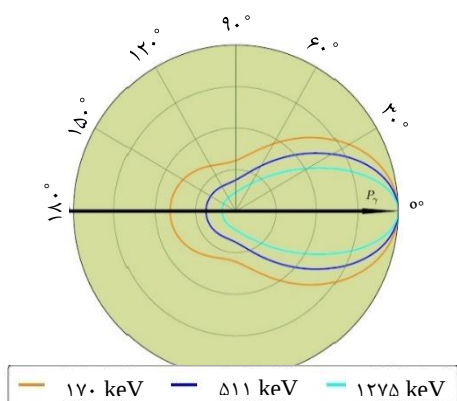
تولید فوتون‌های ثانویه، مانند چشمه تولید فوتون در سرتاسر جسم عمل خواهند کرد. یعنی عملاً با ورود یک پرتو تک‌انرژی با انرژی بزرگ‌تر یا مساوی 1.02 MeV ، امکان حضور سه نوع پرتو عبوری، کامپتون و تولید زوج را خواهیم داشت.

در این پژوهش از چشمه ^{137}Cs با انرژی 662 keV و چشمه ^{60}Co با انرژی 1.25 MeV (متوسط انرژی پرتو با دو قله انرژی 1.17 MeV و 1.33 MeV) استفاده شده است. چشمه ^{137}Cs تولید زوج الکترون-پوزیترون نمی‌کند. پس برای یک پرتو ورودی، یک پرتو کامپتون و یک پرتو عبوری در خروجی خواهیم داشت. با این حال ^{60}Co امکان تولید زوج الکترون-پوزیترون را دارد. انرژی متوسط این چشمه به انرژی آستانه تولید زوج الکترون-پوزیترون (1.02 MeV) نزدیک است. اما سطح مقطع برهم‌کنش تولید زوج در آهن (برای 1.5 MeV مقدار $3.32 \times 10^{-2} \text{ b}$) به مراتب کم‌تر از سطح مقطع برهم‌کنش کامپتون (برای 1.5 MeV مقدار 4.47 b) است [۱۲]. بنابراین می‌توان از احتمال برهم‌کنش تولید زوج برای چشمه ^{60}Co در برابر احتمال برهم‌کنش کامپتون آن چشم‌پوشی کرد.

عامل دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، رفتار پرتو برهم‌کنش‌کننده با ماده است که منجر به ایجاد پرتوهای کامپتون می‌شود. رابطه ۱ انرژی فوتون حاصل از برهم‌کنش بین الکترون و فوتون را نشان می‌دهد:

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{m_{oe}c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

در رابطه فوق E_i انرژی فوتون ورودی، E_f انرژی فوتون خروجی، m_{oe} جرم در حال سکون الکترون، c سرعت نور و θ زاویه فوتون خروجی نسبت به راستای فوتون ورودی قبل از برخورد به الکترون می‌باشد ($m_{oe}c^2 = 511 \text{ keV}$). شکل ۱ توزیع پرتوهای حاصل از پراکنش کامپتون را برای انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱. توزیع زاویه‌ای پرتوهای کامپتون برای پرتوهای گامای ورودی با انرژی‌های مختلف [۱۳].

از چالش‌های بزرگ تست‌های غیرمخرب، دریافت اطلاعات لازم از سیستمی است که دسترسی به درون آن به دلیل مسایل فنی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی تجهیزات دو جداره کاربرد فراوانی دارند [۱، ۲]. این جداره‌ها معمولاً از جنس فلز هستند. روش‌های متفاوتی برای دستیابی به اطلاعات درونی اجسام وجود دارد که هر یک مزایا و معایبی دارند. از روش جریان گردابی برای بررسی زیر سطحی فولاد تا 1 mm [۳، ۴] و از روش مغناطیسی نیز برای حداکثر 4 mm [۴] می‌توان استفاده کرد. بنابراین مسأله فاصله‌سنجی بین دو صفحه فلزی نیز برای روش جریان گردابی و مغناطیسی در همین محدوده و حتی کم‌تر خواهد بود. اگرچه برای ضخامت دلخواه می‌توان از روش فراصوت [۳، ۴] استفاده کرد، اما مشکل اصلی این روش در منقطع بودن محیط است. یعنی اگر محیط اول فولاد، محیط دوم هوا یا خلأ و محیط سوم دوباره فولاد باشد، قدرت تشخیص محیط سوم برای روش فراصوت برای برخی امواج (طولی و عرضی) غیرممکن و برای برخی امواج (پیچشی) [۵] بسیار پیچیده و مشکل می‌شود. بنابراین فاصله‌سنجی به روش فراصوت بسیار دشوار و پیچیده است. روش پیشنهادی پژوهش حاضر، استفاده از روش پس‌پراکنش کامپتون است.

پدیده کامپتون، به برهم‌کنش غیرکشسان بین ذره مادی (مانند الکترون) با موج الکترومغناطیسی (فوتون) گفته می‌شود [۶]. این پدیده کاربرد زیادی در تولید لیزر با انرژی بالا [۷]، توموگرافی [۸]، شناسایی مواد [۹]، ضخامت‌سنجی [۱۰]، رفتار تک‌فازی و چندفازی سیالات در درون لوله‌ها [۱۱] و غیره پیدا کرده است.

در این پژوهش به تعیین فاصله بین صفحه‌های فولادی پرداخته شده است. این روش تاکنون در هیچ پژوهشی مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. مزایا و معایب این روش از نظر محدودیت توانایی فاصله‌سنجی در رابطه با ضخامت صفحه‌ها، تأثیر ترتیب چیدمان صفحه‌های نازک و ضخیم نسبت به هم و نیز تأثیر انرژی چشمه، مبنای بحث و بررسی این مقاله است.

۲. تئوری کار

اساساً وقتی پرتوی وارد جسمی می‌شود، مقداری از آن بدون برهم‌کنش از جسم عبور می‌کند. بنابراین چنین پرتوی همان فوتون‌های اولیه وارد شده به جسم را دارا هستند که در هنگام عبور از جسم برهم‌کنشی با آن انجام نمی‌دهند. قسمتی از پرتو نیز در حین عبور از جسم برهم‌کنش‌های فوتوالکتریک، کامپتون و یا تولید زوج انجام می‌دهند. پدیده فوتوالکتریک به علت حذف فوتون‌های اولیه، عملاً فقط سبب جذب فوتون‌ها در جسم می‌شوند. اما پدیده‌های کامپتون و تولید زوج به علت



می‌شوند و نیمی از این پرتو نیز با انرژی متوسط E_1 با شدت I_{B1} رو به عقب پراکنده خواهند شد. بنابراین داریم:

$$I_o = I_1 + I_{F1} + I_{B1} \quad (2)$$

که در آن

$$I_{F1} = \int_0^{T_1} \mu_{c_0} dx I_o e^{-\mu_o x} e^{-\mu_1 x} \frac{\gamma \pi}{4\pi} \quad (3)$$

$$I_1 = I_o e^{-\mu_o T_1} \quad (4)$$

$$I_{B1} = \int_0^{T_1} \mu_{c_0} dx I_o e^{-\mu_o x} e^{-\mu_1 x} \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \quad (5)$$

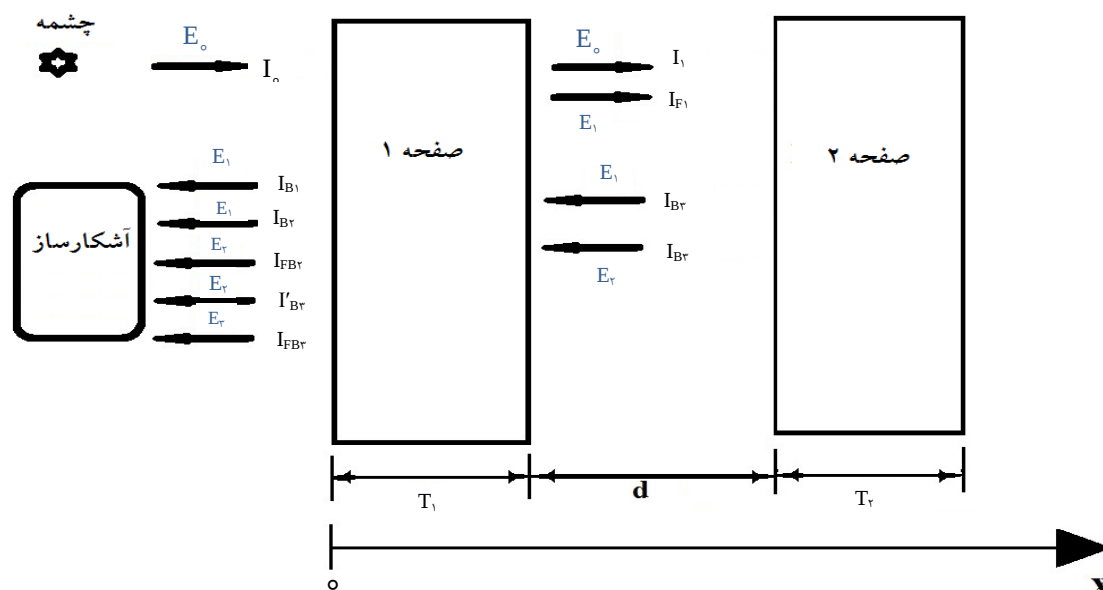
است. در روابط فوق μ_o و μ_{c_0} به ترتیب ضریب تضعیف خطی کل و ضریب تضعیف خطی کامپتونی پرتو وارد شده با انرژی E_o و μ_1 ضریب تضعیف خطی کل پرتو پراکنده شده با انرژی E_1 در صفحه ۱ است. در رابطه ۳ پرتو پراکنش کامپتونی رو به جلو به طرف صفحه ۲ خواهد رفت و پرتو پراکنش کامپتونی رو به عقب نیز تحت زاویه فضایی $\Delta \Omega$ طبق رابطه ۵ وارد آشکارساز می‌شود [۱۳]. بنابراین خواهیم داشت:

$$I_{F1} = \frac{\mu_{c_0}}{\gamma(\mu_o + \mu_1)} I_o (1 - e^{-(\mu_o + \mu_1)T_1}) \quad (6)$$

$$I_{B1} = \frac{\mu_{c_0}}{\mu_o + \mu_1} I_o (1 - e^{-(\mu_o + \mu_1)T_1}) \cdot \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \quad (7)$$

مطابق شکل ۱، هرچه انرژی فوتون فرودی بیشتر باشد احتمال تولید فوتون رو به جلو در اثر برهم‌کنش کامپتون بیشتر خواهد بود. اما با کاهش انرژی فوتون فرودی، تقارن بین توزیع زاویه‌ای پراکنش رو به جلو با توزیع زاویه‌ای پراکنش رو به عقب ایجاد شده و به هم نزدیک می‌شوند. علاوه بر این، طبق شکل ۱، پرتوهای بازپراکنش شده فوتون‌های با کم‌ترین انرژی در بازه انرژی فوتون‌های پراکنش شده‌اند. در این پژوهش با وجود این‌که هر دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs فوتون‌های با انرژی بالایی را گسیل می‌کنند، اما برای سادگی در تحلیل تئوری، پرتوهای پراکنش شده با توزیع یکنواخت کروی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین فوتون‌های رو به جلو یا رو به عقب هر یک دارای توزیع نیم‌کروی خواهند بود؛ یعنی در دو جهت رو به جلو و رو به عقب شدت پرتوهای یکسانی (با جهت انتشار مخالف) وجود خواهد داشت.

با ساده‌سازی‌های انجام شده، شدت پرتوها به صورت شکل ۲ خواهند بود. پرتو I_o با انرژی E_o از سمت چپ وارد صفحه ۱ می‌شود. قسمتی از این پرتو بدون انجام برهم‌کنشی از صفحه ۱ با شدت I_1 عبور می‌کند. اگر ضریب تضعیف خطی صفحه ۱ برای انرژی E_o برابر μ_o باشد شدت این پرتو به صورت $I_1 = I_o e^{-\mu_o T_1}$ خواهد بود. برای قسمتی از پرتو ورودی، برهم‌کنش کامپتون رخ خواهد داد. بنابر آن‌چه بیان شد، نیمی از این پرتو با انرژی متوسط E_1 با شدت I_{F1} رو به جلو پراکنده



شکل ۲. پرتو گسیل شده به دو صفحه فولادی، شدت پرتوها و انرژی پرتوها وقتی از این دو صفحه فولادی عبور یا پس‌پراکنش رو به جلو و رو به عقب رخ می‌دهد. در شکل بالا شدت پرتوهای رسیده به آشکارساز که با انرژی‌های متفاوتی می‌رسند نیز نشان داده شده است.



تحت زاویه $\Delta\Omega'$ وارد آشکارساز می‌شوند و پرتوهای پراکنش کامپتونی نیز تحت زاویه $\Delta\Omega$ وارد آشکارساز خواهند شد.

$$I'_{B\gamma} = I_{B\gamma} e^{-\mu_1 T_1} \quad (12)$$

$$I_{FB\gamma} = \int_0^{T_1} \mu_{c1} dx \left[I_{B\gamma} \right]_{\Delta\Omega'=\gamma\pi} \cdot e^{-\mu_1 x} e^{-\mu_\gamma x} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \quad (13)$$

$$I'_{B\gamma} = I_{B\gamma} e^{-\mu_\gamma T_1} \quad (14)$$

$$I_{FB\gamma} = \int_0^{T_1} \mu_{c\gamma} dx \left[I_{B\gamma} \right]_{\Delta\Omega'=\gamma\pi} e^{-\mu_\gamma x} e^{-\mu_\gamma x} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \quad (15)$$

در رابطه ۱۲ چون پرتو $I_{B\gamma}$ تضعیف شده و تغییر انرژی برای آن وجود ندارد، پس ضریب تضعیف خطی آن برابر ضریب تضعیف خطی انرژی E_1 یعنی μ_1 خواهد بود. اما در رابطه ۱۳ فوتون ورودی با انرژی E_1 وارد شده و با انرژی E_2 به‌صورت پراکنش کامپتونی رو به جلو وارد آشکارساز می‌شود. در رابطه ۱۴ نیز به‌علت تضعیف پرتو $I_{B\gamma}$ انرژی پرتو همان E_2 خواهد بود. رابطه ۱۵ برای پرتو پراکنش کامپتونی رو به جلو است که در آن انرژی E_2 پرتو ورودی با ضریب تضعیف خطی μ_2 به انرژی E_3 با ضریب تضعیف خطی μ_3 تغییر می‌یابد. بنابراین خواهیم داشت:

$$I'_{B\gamma} = \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_1 T_1} \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_\gamma)}) \cdot e^{-\mu_1 T_1} \quad (16)$$

$$I_{FB\gamma} = \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_\gamma} \cdot \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_1 T_1} \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_\gamma)}) \cdot (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)T_1}) \quad (17)$$

$$I'_{B\gamma} = \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_\gamma} \cdot \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \cdot I_0 \cdot (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot (e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d + T_\gamma)}) \cdot e^{-\mu_1 T_1} \quad (18)$$

$$I_{FB\gamma} = \frac{\mu_{c2}}{\mu_\gamma + \mu_\gamma} \cdot \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_\gamma} \cdot \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \cdot I_0 \cdot (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot (e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d + T_\gamma)}) \cdot (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)T_1}) \quad (19)$$

بنابراین کل پرتو رسیده به آشکارساز برابر است با:

پرتوهای I_1 و I_{F1} وارد صفحه ۲ می‌شوند. هر یک از این پرتوها به سه پرتو دیگر یعنی پرتو تضعیف شده، پراکنش شده کامپتونی رو به جلو و پراکنش شده کامپتونی رو به عقب تبدیل خواهند شد. با توجه به این‌که پرتوهای تضعیف شده و پراکنش شده کامپتونی رو به جلو از دسترس خارج می‌شوند، لذا تنها پرتوهای برگشتی I_{B2} (با انرژی E_1) و I_{B3} (با انرژی E_2)، که به‌ترتیب مربوط به پرتوهای ورودی I_1 و I_{F1} هستند، را خواهیم داشت.

$$I_{B2} = \int_{T_1+d}^{T_1+d+T_\gamma} \mu_{c0} dx I_1 e^{-\mu_1 x} e^{-\mu_1 x} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \quad (8)$$

$$I_{B2} = \int_{T_1+d}^{T_1+d+T_\gamma} \mu_{c1} dx I_{F1} e^{-\mu_1 x} e^{-\mu_1 x} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \quad (9)$$

در رابطه ۸ با توجه به عدم تغییر انرژی پرتو تضعیف شده توسط صفحه ۱ پراکنش مشابه صفحه ۱ خواهد بود، تنها با این تفاوت که پرتو ورودی با شدت I_1 خواهد بود. از طرفی با توجه به دور بودن صفحه ۲ از آشکارساز، عملاً زاویه فضایی محل برهم‌کنش مقدار $\Delta\Omega'$ خواهد بود. در رابطه ۹ نیز به‌علت تغییر انرژی پرتو I_{F1} وارد شده به صفحه ۲، ضرایب تضعیف خطی μ_1 ، μ_{c1} و μ_2 به‌ترتیب مربوط به تضعیف کل، پراکنش کامپتون برای انرژی E_1 و تضعیف کل برای E_2 خواهند بود. بنابراین خواهیم داشت:

$$I_{B2} = \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_1 T_1} \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_\gamma)}) \quad (10)$$

$$I_{B2} = \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_\gamma} \cdot \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \cdot I_0 \cdot (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot (e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_1 + \mu_\gamma)(T_1 + d + T_\gamma)}) \quad (11)$$

که رابطه ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب از روابط ۸ و ۹ به‌دست آمده‌اند. این دو پرتو دوباره وارد صفحه ۱ می‌شوند. در این حالت پرتوهای بازگشتی از صفحه ۱ وارد آشکارساز نخواهند شد و در نتیجه از آن‌ها چشم‌پوشی می‌شود. پس I'_{B2} و I'_{B3} به‌ترتیب پرتوهای تضعیف شده و پرتوهای I_{B2} و I_{B3} ، و نیز به‌ترتیب پرتوهای پراکنش کامپتون رو به جلوی پرتوهای I_{B2} و I_{B3} خواهند بود. همه این پرتوها به آشکارساز می‌رسند، با این تفاوت که پرتوهای تضعیف شده به‌علت اثر تضعیف پرتوی

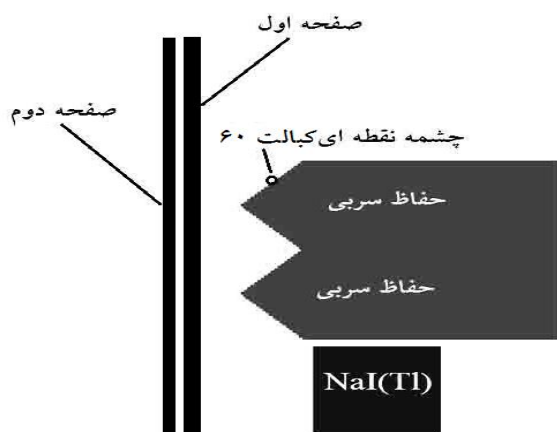


۳. مواد و روش انجام آزمایش

چیدمان اندازه‌گیری فاصله با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتو گاما در شکل ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش از دو حفاظ سربی به ضخامت ۵ cm، آشکارساز سوسوزن یدورسیدیم $2 \times 2 \text{ cm}$ استوانه‌ای Eberline و تحلیل‌گر چندکاناله Novin Teyf استفاده شده است. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش، صفحه‌های فولادی به ضخامت‌های ۲، ۶، و ۱۰ mm با مساحت $14 \times 20 \text{ cm}^2$ می‌باشند. صفحه به ضخامت ۱۰ mm نزدیک به ضخامت اشباع فولاد (۱۳ mm) برای چشمه ^{137}Cs است [۱۴]. این ضخامت به دو دلیل انتخاب شده است. دلیل اول این‌که منحنی ضخامت اشباع هر فلزی (منحنی شمارش شدت پرتو پس‌پراکنده شده برحسب ضخامت) از سه قسمت نسبتاً خطی، خمیده (انتقالی) و منحنی حادی متمایل به خط افقی ضخامت ثابت تشکیل می‌شود [۱۵]. ضخامت ۱۰ mm در انتهای ناحیه خطی و نزدیک به ناحیه خمیده قرار گرفته است. دلیل دوم این‌که ضخامت صفحه بعدی نیز در رابطه با محدودیت ضخامت اشباع باید در نظر گرفته می‌شد.

همان‌طور که به‌صورت طرح‌واره در شکل ۳ نشان داده شده است، پرتو گاما از چشمه ^{60}Co با اکتیویته $30 \mu\text{Ci}$ یا ^{137}Cs با اکتیویته $35 \mu\text{Ci}$ به دو صفحه موازی برخورد کرده و پرتوهای حاصل از پس‌پراکنش کامپتون به آشکارساز برمی‌گردند.

حفاظ سربی نشان داده شده در شکل ۳ مانع از ورود پرتوهای چشمه به آشکارساز می‌شوند. پرتوهای رسیده به آشکارساز پس از تبدیل شدن به پالس الکترونیکی توسط PMT جهت تقویت، شمارش و طیف‌نگاری به دستگاه MCA وارد می‌شود. زمان شمارش طیف برابر ۵۰ s در نظر گرفته شده است. نحوه چیدمان تجهیزات در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. چیدمان آزمایش.

$$I_{Btot} = I_{B1} + I'_{B2} + I_{FB2} + I'_{B3} + I_{FB3} \quad (20)$$

$$I_{Btot} = \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} I_0 (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} + \frac{\mu_{c0}}{\mu_0 + \mu_1} I_0 e^{-\mu_1 T_1} \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_2)}) \cdot e^{-\mu_2 T_2} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} + \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{\mu_{c0}}{2(\mu_0 + \mu_1)} \cdot I_0 e^{-\mu_1 T_1} \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_2)}) \cdot (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)T_2}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} + \frac{\mu_{c1}}{\mu_1 + \mu_2} \cdot \frac{\mu_{c0}}{2(\mu_0 + \mu_1)} \cdot I_0 (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_2)}) \cdot e^{-\mu_2 T_2} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} + \frac{\mu_{c2}}{\mu_2 + \mu_3} \cdot \frac{\mu_{c1}}{2(\mu_1 + \mu_2)} \cdot \frac{\mu_{c0}}{2(\mu_0 + \mu_1)} \cdot I_0 (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot (e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d)} - e^{-(\mu_0 + \mu_1)(T_1 + d + T_2)}) \cdot (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)T_2}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi}$$

(21)

در روابط فوق انرژی فوتون‌ها پس از هر بار برخورد فوتون با الکترون، به‌صورت متوسط انرژی برای یک‌بار برخورد در نظر گرفته شده است. پس با توجه به رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$\langle E_f \rangle = \frac{1}{\theta_b - \theta_a} \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{E_i d\theta}{1 + \frac{E_i}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (22)$$

با توجه به این‌که حل چنین تابعی به روش تحلیلی ممکن نیست، بنابراین برای چشمه‌های ^{60}Co و ^{137}Cs آن را به‌صورت عددی حل می‌کنیم. برای این کار از انتگرال‌گیری عددی به روش مستطیلی در نرم‌افزار متلب با خطای مطلق 0.0022 برای ^{137}Cs و 0.0034 برای ^{60}Co استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \text{Cs } ^{137}: E_0 &= 662 \text{ keV}, E_1 = 349 \text{ keV}, E_2 = 227 \text{ keV}, E_3 = 165 \text{ keV} \\ \text{Co } ^{60}: E_0 &= 1250 \text{ keV}, E_1 = 515 \text{ keV}, E_2 = 297 \text{ keV}, E_3 = 202 \text{ keV} \end{aligned}$$

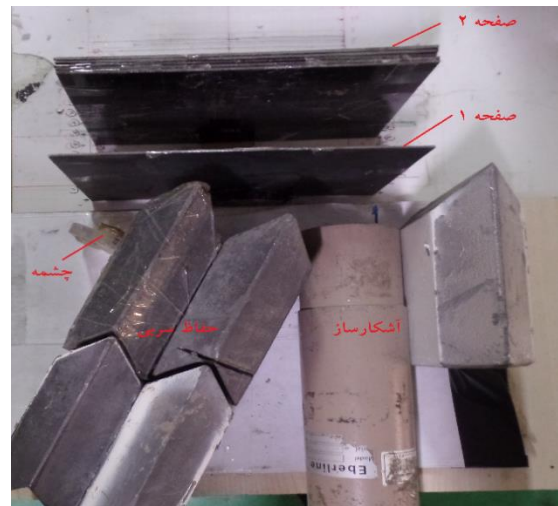
با توجه به این روابط:

- جمله‌های مؤثر در روابط فوق، جمله اول یعنی پس‌پراکنش صفحه ۱ و پس از آن جمله دوم، یعنی پرتو (تضعیف شده) عبوری از صفحه ۱ حاصل از پس‌پراکنش صفحه ۲ هستند.
- جمله دوم به دو دلیل از جمله اول کوچک‌تر است: به‌علت تضعیف زیاد پرتو چشمه و کوچک بودن زاویه فضایی $\Delta\Omega'$ نسبت به زاویه فضایی $\Delta\Omega$.
- تأثیر فاصله d بین دو صفحه کاملاً در جملات دوم به بعد مشخص است.



ضخامت یکسان، برتری چشمه ^{60}Co به ^{137}Cs مشخص می‌شود. در شکل ۶ تمام نقاط یک منحنی در راستای عمودی آن‌قدر جابه‌جا شدند تا نقاط ابتدایی دو منحنی با شرایط یکسان ولی با چشمه‌های متفاوت بر هم منطبق شوند. در این شکل شیب منحنی مربوط به چشمه ^{60}Co نیزتر از چشمه ^{137}Cs است؛ به‌طوری‌که با افزایش ضخامت صفحه ۲ این شیب بهتر می‌شود. پس می‌توان پیش‌بینی کرد که در شرایط یکسان، چشمه ^{60}Co دقت اندازه‌گیری بهتری نسبت به چشمه ^{137}Cs داشته باشد.

این رفتار بر اساس رابطه ۲۱ نیز قابل پیش‌بینی است. اگر تمام شرایط از نظر ضخامت دو صفحه ۱ و ۲ برای چشمه یکسان باشد، با کاهش ضریب تضعیف خطی در رابطه ۲۰ جملات نمایی وابسته به μ افزایش بیش‌تری نسبت به کاهش جملات کسری (وابسته به μ) دارند. یعنی اثر انرژی چشمه پرتو نیز بر این منحنی به‌علت افزایش شیب منحنی چشمه پرتو با انرژی بیش‌تر منجر به دقت اندازه‌گیری خواهد شد.



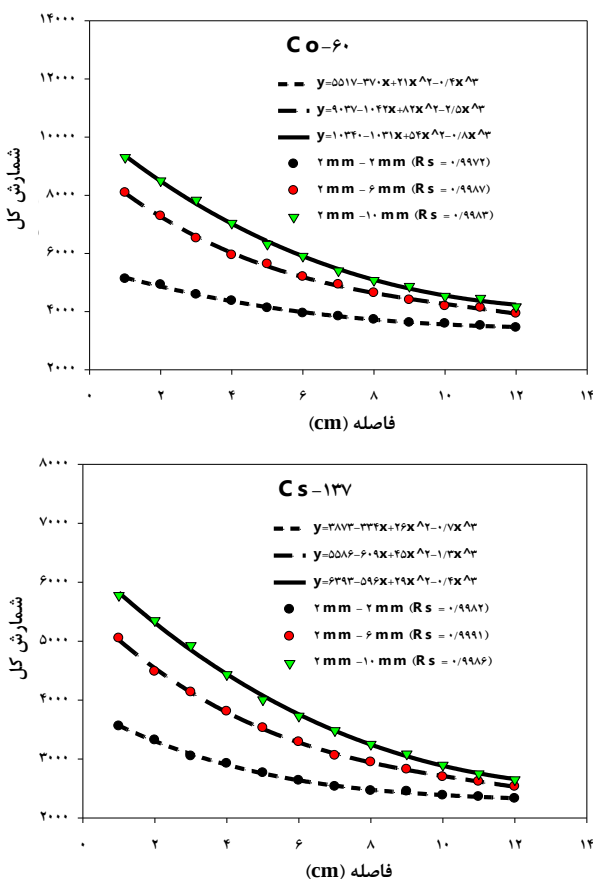
شکل ۴. چگونگی قرارگیری تجهیزات و صفحه‌های تحت آزمون.

از آن‌جا که شمارش کل پرتوهای کامپتون در آشکارساز ملاک بررسی بوده است، لازم است پرتوهای مزاحم رسیده به آشکارساز حذف شوند. بنابراین پرتوهای زمینه و پرتوهای گذرنده از حفاظ سربی در حالتی که صفحه فولادی وجود نداشت به مدت ۵۰ s شمارش شدند. مقدار شمارش برای چشمه ^{60}Co برابر ۹۵۸۱ و برای ^{137}Cs برابر ۳۱۳۵ به‌دست آمد. در سیستم‌های فاصله‌سنجی دقت اندازه‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دقت اندازه‌گیری فاصله بستگی به جنس، ضخامت و فاصله صفحه‌ها از هم دارد. در این پژوهش با هدف تعیین دقت اندازه‌گیری فاصله کمینه تشخیص فاصله ۱ cm دو صفحه از هم، به ازای هر فاصله مشخص از دو صفحه، شمارش در بازه زمانی ۵۰ s، ۱۵ بار تکرار شده است. با توجه به رفتار آماری پرتو، مقدار شمارش کل برای هر بار شمارش با دفعات قبل متفاوت خواهد بود. از آن‌جا که معمولاً رفتار آماری این داده‌ها، چه برای پرتو ایکس و چه پرتو گاما، به‌صورت منحنی گاوسی است [۱۶، ۱۷]، بنابراین برای هر سری از داده‌ها یک منحنی گاوسی برازش شد. برای بررسی امکان تشخیص این منحنی‌ها از یک‌دیگر، از قانون تفکیک‌پذیری رایلی استفاده شده است [۱۸].

۴. نتایج آزمایش

۴.۱ منحنی فاصله‌سنجی برای حالتی که ضخامت صفحه ۱ کوچک‌تر از ضخامت صفحه ۲ یا برابر با آن است
نتایج برای حالتی که ضخامت صفحه ۱، ۲ mm و ضخامت صفحه ۲، ۶ و ۱۰ mm انتخاب شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که رفتار منحنی‌های شمارش برحسب فاصله بین دو صفحه فولادی برای هر دو چشمه تقریباً یکسان است. اما با مقایسه منحنی‌های مربوط به

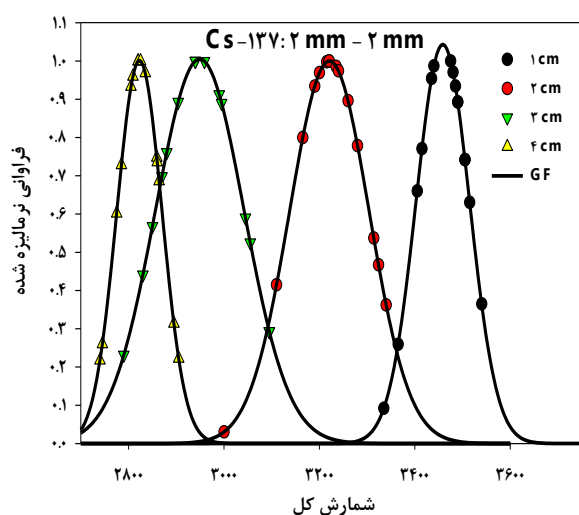
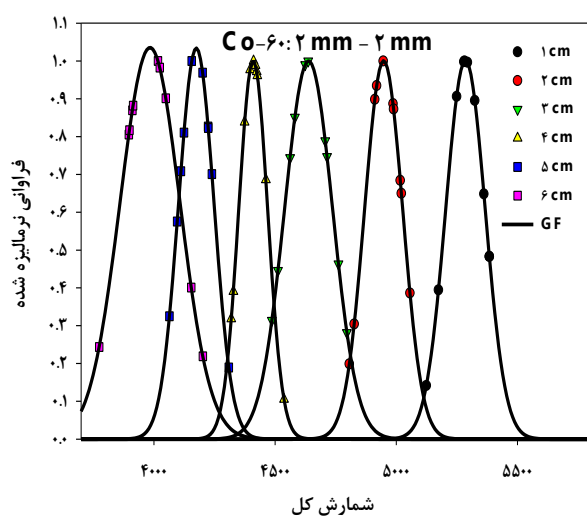


شکل ۵. اثر میزان شمارش کل در آشکارساز برای دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co نسبت به فاصله بین صفحه ۱ با ضخامت ۲ mm و صفحه ۲ با ضخامت‌های ۲، ۶ و ۱۰ mm (منحنی‌های چندجمله‌ای درجه ۳ بر این نقاط منطبق شده‌اند. رابطه بین میزان شمارش برحسب فاصله با R_{sq} نیز داده شده است).

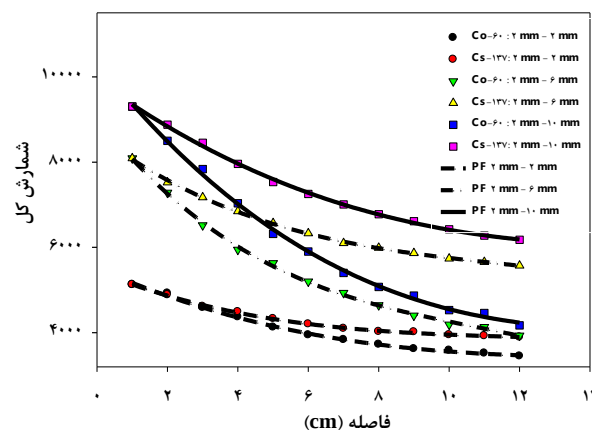


صفحه ۱ تضعیف شده و مقدار بیش‌تری به آشکارساز خواهند رسید.

این رفتار در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود. در این حالت ضخامت صفحه ۲ به ۶ mm تغییر می‌یابد. دقت فاصله‌سنجی برای چشمه ^{137}Cs ، ۷ cm و برای چشمه ^{60}Co ۸ cm است. این شکل نشان می‌دهد اختلاف دقت اندازه‌گیری مشابه شکل ۷ است. اما اختلاف دقیقاً مشابه شکل ۷ نشده است. نظر نویسندگان این مقاله بر این است که این اختلاف بیش‌تر به دلیل وابستگی انرژی حاصل شده و در نتیجه باید تقریباً ثابت بماند. اختلاف به‌وجود آمده نیز به دلیل انجام آزمایش بوده و خطای اندازه‌گیری باعث این اختلاف است؛ چرا که این اختلاف برای صفحه ۲ با ضخامت ۱۰ mm نیز دوباره تکرار می‌شود.



شکل ۷. دقت اندازه‌گیری برای دو چشمه ^{137}Cs و کبالت وقتی ضخامت صفحه ۱ و ۲ هر دو برابر ۲ mm است (GF منحنی گاوسی منطبق شده بر این نقاط با $\text{Rs} > 0.98$ می‌باشد).



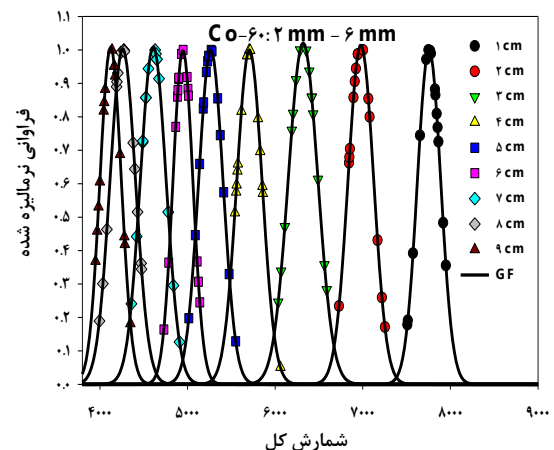
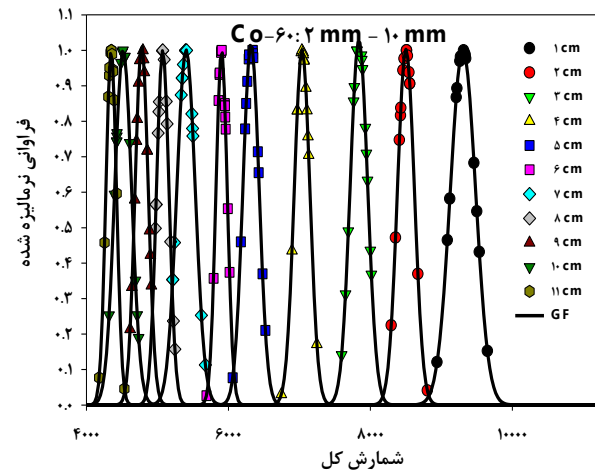
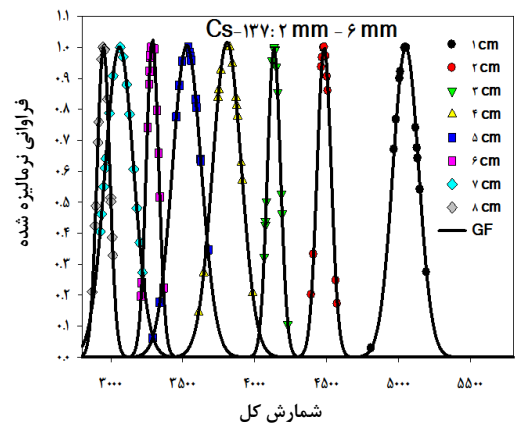
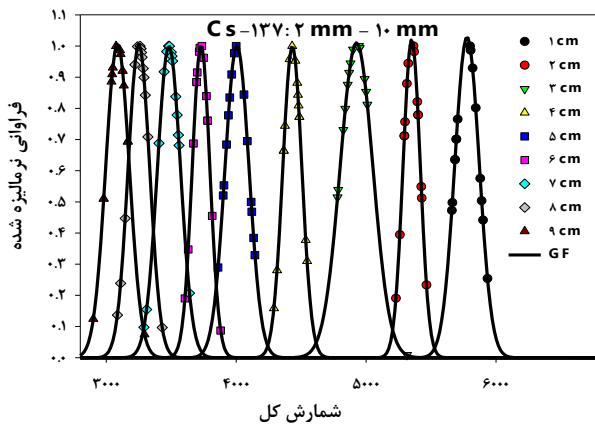
شکل ۶. مقایسه منحنی شمارش فاصله در شرایط یکسان برای دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co . در این شکل برای مقایسه بهتر شیب منحنی دو چشمه، نقاط مربوط به چشمه ^{137}Cs به اندازه اختلاف مقدار حداکثری شمارش کل مربوط به چشمه ^{137}Cs و شمارش کل مربوط به چشمه ^{60}Co در راستای محور شمارش افزایش داده شده‌اند. PF بیانگر منحنی درجه ۳ منطبق شده بر نقاط می‌باشد.

۲.۴ تأثیر ضخامت صفحه ۱ و ۲ بر فاصله‌سنجی آن‌ها

در حالت اول، ضخامت صفحه ۱ کم‌ترین مقدار (برابر ۲ mm) و ثابت در نظر گرفته شده است. ولی ضخامت صفحه ۲ برابر ۲، ۶ و ۱۰ mm لحاظ شده‌اند. شکل ۵ منحنی فاصله‌سنجی دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co را نشان می‌دهد.

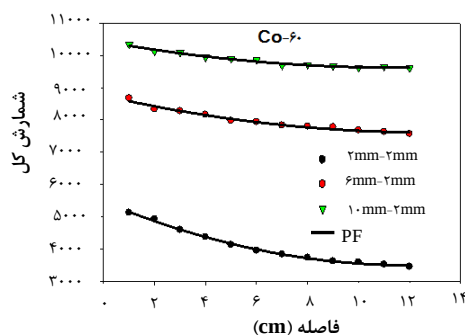
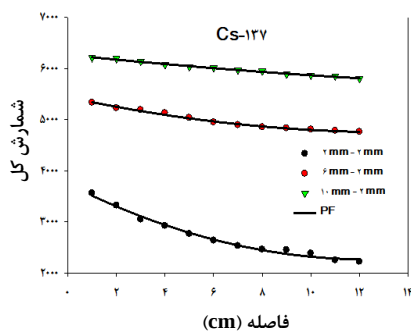
شکل ۷ منحنی‌های دقت اندازه‌گیری فاصله (با دقت ۱ cm) برای صفحه‌های ۱ و ۲ با ضخامت یکسان ۲ mm را نشان می‌دهد. برای چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co فاصله‌سنجی به ترتیب برابر ۳ cm و ۵ cm است. همان‌طور که بیان شد، در رابطه ۲۱ اگر ضخامت‌های دو صفحه یکسان باشند، عامل مؤثری برای تعیین ضرایب تضعیف خطی جسم خواهند بود. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، ضرایب جملات که به صورت نسبت کسری ضرایب تضعیف ظاهر می‌شوند، برای جملات بالاتر از جمله دوم کاهش می‌یابند چون از هر جمله به جمله بعدی با افزایش تعداد جملات کسری ضرایب مواجه خواهیم شد. علاوه بر آن تعداد جملات نمایی (جملات نمایی که در هم ضرب می‌شوند) نیز از جمله دوم به بعد افزایش یافته و به علت این که مقداری کمتر از یک دارند، در اثر ضرب شدن در هم سریعاً تضعیف شده و اثر کم‌تری بر محاسبه I_{tot} خواهند داشت. بنابراین با توجه به کوچک‌تر بودن ضرایب تضعیف خطی چشمه ^{60}Co به چشمه ^{137}Cs و تأثیر توان توابع نمایی $(e^{-\mu_1 T_1})$ و $(e^{-(\mu_1 + \mu_2) T_1 + d})$ و $(e^{-(\mu_1 + \mu_2) T_1})$ و $(e^{-\mu_1 T_1})$ افزایش شدت پرتو چشمه ^{60}Co نسبت به چشمه ^{137}Cs به آشکارساز را خواهیم داشت. به بیان دیگر، برای چشمه ^{60}Co تضعیف فوتون‌های گذرنده از صفحه ۱ کم‌تر خواهد بود. هم‌چنین پرتوهای برگشتی کم‌تری از صفحه ۲ نیز در هنگام عبور از





شکل ۹. تأثیر ضخامت صفحه ۲ در هنگام ثابت بودن ضخامت صفحه ۱ برای دو چشمه سزیم و کوبالت (GF منحنی گاوسی منطبق شده بر این نقاط با $Rsq > 0.98$ می‌باشد).

شکل ۸. دقت اندازه‌گیری برای دو چشمه ^{137}Cs و کوبالت وقتی ضخامت صفحه ۱ و ۲ هر دو برابر ۲ mm است (GF منحنی گاوسی منطبق شده بر این نقاط با $Rsq > 0.98$ می‌باشد).



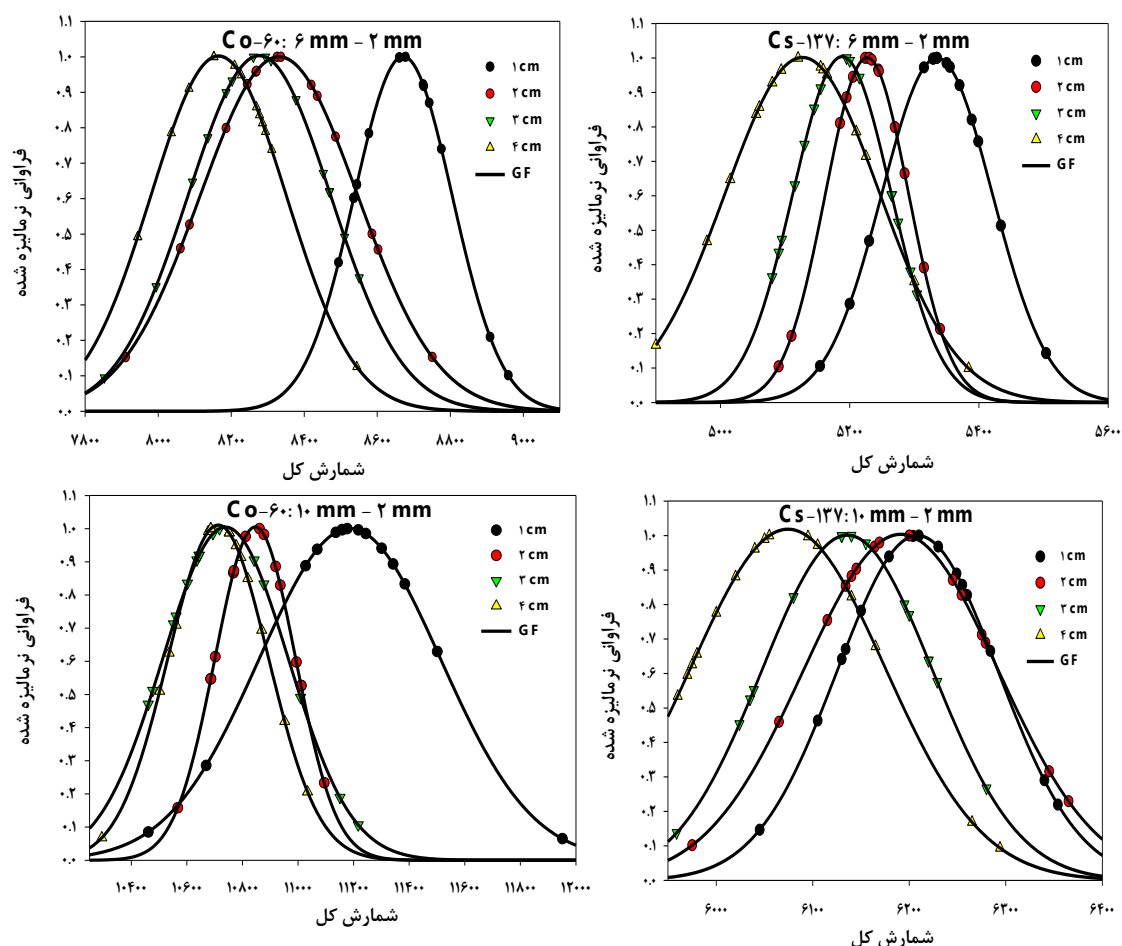
شکل ۱۰. فاصله‌سنجی برای حالتی که ضخامت صفحه ۱ برابر یا بیش‌تر از صفحه ۲ است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که دقت اندازه‌گیری برای چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co به ترتیب ۸ cm و ۱۰ cm است که همان اختلاف ۲ سانتی‌متری است.

شکل ۱۰ در مقایسه با شکل ۵، میزان شمارش حداکثری نسبتاً یکسانی را برای هر یک از چشمه‌ها نشان می‌دهد. با این حال با دقت در منحنی تغییرات شکل ۸ مشاهده می‌شود که شیب منحنی‌ها در مقایسه با شیب منحنی‌های شکل ۵ خیلی کم است. این رفتار با تعیین منحنی‌های دقت اندازه‌گیری فاصله مربوط به شکل ۸ واضح‌تر خواهد بود. این رفتار برای ضخامت‌های ۶ و ۱۰ mm در شکل ۹ نشان داده شده است.

در این مرحله حالتی در نظر گرفته شده است که در آن ضخامت صفحه ۱ بیش‌تر از ضخامت صفحه ۲ باشد. برای این کار جای دو صفحه عوض شده است؛ به عبارتی صفحه ۱ ضخامت‌های ۲، ۶ و ۱۰ mm را داشته باشد، ولی ضخامت صفحه ۲، ۲ mm باشد. در این حالت منحنی‌های فاصله‌سنجی به صورت شکل ۱۱ خواهند شد.





شکل ۱۱. دقت اندازه‌گیری ^{60}Co و ^{137}Cs برای صفحه ۲ با ضخامت ثابت ۲ mm و صفحه ۱ با ضخامت‌های ۶ و ۱۰ mm.

از طرفی:

$$\Delta\Omega > \Delta\Omega'; e^{-(\mu_0 + \mu_1)(\gamma T_1 + d)} \ll 1 \quad (24)$$

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که جمله اول خیلی بزرگ‌تر از جمله دوم است. به عبارتی عملاً جمله I'_{B_1} حذف شده و تنها $I_{B_{tot}}$ وابسته به جمله I_{B_1} خواهد بود. بنابراین می‌توان گفت در چنین وضعیتی فاصله‌سنجی معنایی ندارد.

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس تئوری فاصله‌سنجی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که هرچه چشمه پرتو انرژی بیشتری داشته باشد، امکان فاصله‌سنجی برای فواصل بیش‌تر دو صفحه فولادی بهتر خواهد بود. همچنین دقت فاصله‌سنجی دو صفحه فولادی ثابت نیست و به عوامل مختلفی مانند ضخامت دو صفحه و نحوه قرارگیری صفحه ضخیم‌تر در جلو یا پشت صفحه نازک‌تر بستگی دارد. علاوه بر آن حداکثر فاصله اندازه‌گیری شده صفحه ۱ با نازک‌ترین ضخامت (۲ mm) و صفحه ۲ با ضخیم‌ترین ضخامت (۱۰ mm) با دقت

بر اساس شکل ۱۱، برای هر دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs در حالتی که ضخامت صفحه ۱ برابر ۶ mm یا ۱۰ mm و ضخامت صفحه ۲ برابر ۲ mm باشد، امکان فاصله‌سنجی وجود ندارد. در صورتی که طبق شکل ۷، وقتی ضخامت هر دو صفحه برابر ۲ mm است، دقت اندازه‌گیری بهبود می‌یابد و این بدان معناست که با جابه‌جایی دو صفحه ۱ و ۲، امکان فاصله‌سنجی برای روش پس‌پراکندگی کامپتون از بین خواهد رفت.

تأثیر ضخامت بیش‌تر صفحه ۱ بر فاصله‌سنجی طبق رابطه ۲۱ قابل توجیه است (برای درک بهتر، دو جمله اول این رابطه را در نظر می‌گیریم). در حالتی که ضخامت T_1 بیش‌تر از ضخامت T_2 است خواهیم داشت:

$$I_{B_{tot}} \approx \frac{\mu_{c_0}}{\mu_0 + \mu_1} I_0 (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} + \frac{\mu_{c_0}}{\mu_0 + \mu_1} I_0 \cdot e^{-(\mu_0 + \mu_1)(\gamma T_1 + d)} \cdot (1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_2}) \cdot \frac{\Delta\Omega'}{4\pi} \quad (22)$$

بنابراین:

$$(\mu_0 + \mu_1)T_1 > (\mu_0 + \mu_1)T_2 \Rightarrow 1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_1} > 1 - e^{-(\mu_0 + \mu_1)T_2} \quad (23)$$



6. A.H. Compton, A quantum theory of the scattering of x-rays by light elements, *J. the Physical Review*, **21**(5), (1923) 483-502.
7. Hiroyuki Toyokawa, et al, High-energy photon radiography system using laser-Compton scattering for inspection of bulk materials, *J. Review of Scientific Instruments*, **73** (9), (2002).
8. Y. Calderon, Design, PhD thesis, *Universidad Autonoma de Barcelona*, (2014).
9. S. Mohammadi, Compton scattering as a probe for materials investigation, *Iranian Journal of Physics Research*, **9** (2), 31-35 (2009).
10. B.S. Moon, et al, A design of the thickness gauge using the Compton gamma-ray backscattering, *J. Korean Nuclear Society*, **32** (5), 457-464 (2000).
11. S.A. Tjugum, G.A. Johansen, M.B. Holstad, The use of gamma radiation in fluid flow measurements, *J. Radiation Physics and Chemistry*, **61**, 797-798 (2001).
12. J.H. Hubbell, Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV. (*Nat. Stand. Ref. Data. Ser., Nat. Bur. Stand. (U.S.)*, 29, Washington, D.C. 20234, 1969).
13. L.N. Gonzalez Gomez, MS Thesis, *Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Departamento de Fisica Bogota, D.C.*, (2013).
14. S. Ashrafi, D. Alizadeh, O. Jahanbakhsh, Determination of saturation depth in Compton scattering using Artificial Neural Network, *Iranian Journal of Physics Research*, **18**(2), 195-205, September 2018) (In Persian).
15. Gurvinderjit Singh, Bhajan Singh, B.S. Sandhu, Advanced Materials and Radiation Physics (*AMRP-2015*), pp. 020051-1 – 20051-4 (2015).
16. M.T. Sasanpour, A. Taheri, Determination of Probabilistic Distribution Function of Background and Defect Optical Densities for X-Ray Radiography Images of a Steel Plate, *J. Nondestruct. Eval.* **35**, 61 (2016).
17. M.T. Sasanpour, et al, Mathematical behavior of optical density of γ -Ray radiography images of steel pipes, was accepted Oct 19, 2018 in Russian journal of Nondestructive Testing and will be published in 2019.
18. J.L. Prince, J.M. Links, *Medical Imaging Signals and Systems*. (Copyright 2015, 2006 by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, 1 Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458).

فاصله‌سنجی یکسان (۱ cm)، برای چشمه ^{137}Cs ۸ cm و برای چشمه ^{60}Co ۱۰ cm است.

هم‌چنین تعیین فاصله بین دو صفحه برای چشمه مشخص هنگامی میسر است که در آن، ضخامت صفحه ۲ بیش‌تر از ضخامت صفحه ۱ باشد.

از آن‌جا که تئوری فاصله‌سنجی بسیار پیچیده است، در این پژوهش پیش‌فرض‌های زیادی برای ساده‌سازی محاسبات ریاضی در نظر گرفته شدند. اما با این وجود، توجیه رفتار فاصله‌سنجی با این تئوری توانمند بوده است.

در نهایت با توجه به موارد بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که روش پس‌پراکنش گاما را می‌توان برای تعیین فاصله بین دو صفحه با در نظر گرفتن عواملی چون ضخامت اشباع فولاد و رعایت ترتیب قرارگیری چشمه- ضخامت کم‌تر فولاد- ضخامت بیش‌تر فولاد، در صنعت به کار برد.

مراجع

1. A. Juengert, et al, Monitoring of CMC-Jacketed Pipes for High-Temperature Applications, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 5: High-Pressure Technology; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis Division (NDPD); Rudy Scavuzzo Student Paper Symposium and 26th Annual Student Paper Competition, Prague, Czech Republic. July 15-20, V005T09A010 (2018). ASME. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-85023>.
2. J. Garvin, Understand the thermal design of jacketed vessels, *Chemical Engineering Progress*, **95**(6), 61-68, (October 1999).
3. Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel, Training Course Series No. 9 (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999) 297 (1999).
4. Non-Destructive Testing (NDT)-Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods, (Document: AA050 • Issue 2 • November 2015) 59 (2015).
5. A. Karpelson, Ultrasonic Measurement of Air Gap Between Metal Walls Using Bending Waves, *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)* (2007). <https://www.ndt.net/article/v12n09/karpelson.pdf>.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

محمد تقان ساسانپور، محسن شریف‌زاده، علی طاهری، مجتبی عسکری (۱۴۰۰)، فاصله‌سنجی پس‌پراکنشی صفحه‌های فولادی با چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co ، ۹۵، ۱۰۷-۱۱۶

DOI: 10.24200/nst.2021.1191

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1191.html

