

## تعیین کسر فازی مولفه‌های جریان چندفازی در لوله‌های انتقال نفت و گاز با استفاده از چینش پس پراکنش پرتوهای گاما

علی طاهری<sup>\*</sup>، محمدتقان ساسانپور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای تهران

### چکیده

موقعیت‌های فراوانی در صنعت نفت و گاز به وجود می‌آید که در آنها نیاز داریم تا کسر فازی مولفه‌های جریان چندفازی را در لوله‌های مختلف اندازه‌گیری کنیم. یکی از روش‌های پرکاربرد برای این منظور در حال حاضر استفاده از پرتوهای گاما است. دستگاه‌های معمول هم بیشتر از روش عبوری استفاده می‌کنند؛ بدین صورت که میزان تضعیف پرتوهای گاما در اثر عبور از ماده را اندازه‌گیری کرده و درصد مواد آن را محاسبه می‌کنند. اما بعضی شرایط از جمله در سکوها نفتی، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و یا حتی در بخش توزیع ممکن است شرایط دسترسی به دو طرف لوله وجود نداشته باشد و در این حالت می‌توان از پرتوهای گامای پس پراکنده برای اندازه‌گیری استفاده کرد. در این مقاله معادلات ریاضی برای محاسبه شدت پرتوهای گامای پس پراکنده از دو ماده در کنار هم به دست آورده خواهد شد. با استفاده از این معادلات می‌توان درصد دو ماده را بدون نیاز به دسترسی به دو طرف آنها تخمین زد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۰/۱۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۱۲/۱۱

### واژگان کلیدی:

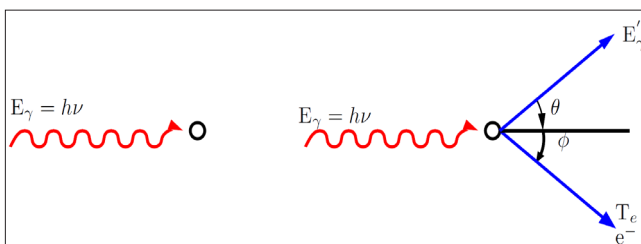
پراکندگی کامپتون، پس پراکنش، مدل‌سازی ریاضی، پرتو گاما، کسر فازی

### مقدمه

صنعتی و در برخی سنجش‌گرها متداول است اما تا به حال به منظور تعیین درصد مواد عبوری از یک لوله مورد استفاده قرار نگرفته است. در این مقاله قصد داریم تا تعیین کسر فازی در یک رژیم دو فازی طبقه‌ای با استفاده از پرتوهای گاما در چینش پس پراکنش را به صورت ریاضی مدل‌سازی کنیم. این مدل‌سازی ریاضی می‌تواند در طراحی سیستم‌های تعیین کسر فازی بسیار موثر و کاربردی باشد.

### ۱- مواد و روش‌ها

در چینش پس پراکنش پرتوهای گاما، برهم‌کنش غالب، پراکندگی کامپتون است. در نتیجه لازم است تا قبل از شروع مدل‌سازی، مختصری راجع به این برهم‌کنش توضیح داده شود. اثر کامپتون، پراکندگی نامتقارن<sup>۱</sup> پرتوهای گاما از تک‌الکترون‌های اتمی است. در این پراکندگی یک برخورد غیرالاستیک بین فوتون گاما و الکترون اتمی اتفاق می‌افتد که در نتیجه‌ی آن، الکترون تحت زاویه  $\theta$  نسبت به مسیر فرودی خود پراکنده شده و بخشی از انرژی خود را به الکترون مذکور منتقل می‌کند. اثر کامپتون به صورت



۱ | پراکندگی یک یفتون گاما با انرژی  $E_r$  از یک الکترون اتمی

امروزه تجهیزات هسته‌ای کاربردهای فراوانی در حوزه‌های مختلف صنعتی و پزشکی پیدا کرده‌اند [۱-۵]. این تجهیزات به دو دسته کلی سیستم‌های سنجش‌گر و تصویربرداری تقسیم می‌شوند. از جمله سیستم‌های سنجش‌گر هسته‌ای می‌توان به سیستم‌های چگالی‌سنجی، سطح‌سنجی و غیره اشاره کرد. یکی از کاربردهای متداول سنجش‌گرهای هسته‌ای، تعیین کسر فازی مولفه‌های جریان به ازای رژیم‌های مختلف درون لوله‌های نفت و گاز می‌باشد [۶]. اکثر سیستم‌های تعیین کسر فازی مبتنی بر فناوری هسته‌ای از چینش عبوری پرتوهای گاما بهره می‌برند، بدین صورت که چشمه گاما در یک سو و آشکارساز پرتو در سوی دیگر لوله حاوی جریان قرار می‌گیرد. نهایتاً با استفاده از محاسبه میزان تضعیف شدت پرتو و معادلات ریاضی مربوطه، کسر فازی مولفه‌های جریان قابل اندازه‌گیری خواهد بود [۷]. اما در بسیاری از شرایط هم امکان قرار دادن نمونه بین چشمه و آشکارساز وجود ندارد؛ به عنوان مثال زمانی که می‌خواهیم در یک سکوی نفتی که معمولاً از نظر نوع طراحی و شرایط قرار گرفتن لوله‌ها با محدودیت مکانی مواجه است، کسر فازی را در یک لوله با امکان دسترسی به یک طرف آن اندازه‌گیری کنیم. با توجه به اینکه سکوی نفتی درون دریا قرار گرفته است، امکان نصب سنجه‌های عبوری در فواصل دورتر که محدودیت مکانی وجود ندارد هم با مشکلات مختلفی از جمله نیاز به تجهیزات و نفرات متخصص به منظور کار در زیر آب وجود خواهد داشت. در این حالت استفاده از چینش‌های عبوری امکان‌پذیر نبوده و می‌توان از چینش پس پراکنش پرتوهای گاما استفاده کرد. استفاده از چینش پس پراکنش در تصویربرداری

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (atahery@aeoi.org.ir)

نسبت به بردار نرمال صفحه باید کوچک باشند. دلیل این مسئله این است که تنها در شرایطی که زوایای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  نزدیک به یکدیگر و تقریباً برابر با  $90^\circ$  درجه هستند، این امکان وجود دارد تا تمامی المان‌های دیفرانسیلی در نظر گرفته شده در طول جاذب بتوانند باعث پس پراکندگی پرتوهای گاما به سمت دهانه آشکارساز شوند.

## ۲- نتایج

تضعیف شدت پرتوهای گاما در اثر عبور از ماده‌ای به ضخامت  $x$  برابر است با:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (3)$$

این رابطه در شرایطی برقرار است که پرتوهای گاما کاملاً عمود به سطح برخورد کرده و همچنین فاکتور جبران‌سازی<sup>۲</sup> هم نداشته باشیم.

حال اگر فرض کنیم که تابش اولیه با زاویه  $\theta_1$  به جسم برخورد کند، در این حالت کسری از این فوتون‌ها که تحت زاویه  $\theta_2$  پراکنده می‌شوند برابر خواهد بود با:

$$R(x) = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \mu_{c1} I_0 \exp[-(\mu_1 / \sin\theta_1)x] dx \quad (4)$$

در این رابطه  $\frac{\Delta\Omega}{4\pi}$  عبارت است از زاویه فضایی آشکارساز،  $\mu_{c1}$  هم برابر است با ضریب پراکندگی کامپتون پرتوی فرودی،  $\mu_1$  ضریب جذب فوتون‌های فرودی و  $x/\sin\theta_1$  هم طول مسیر طی شده توسط پرتو فرودی تا محل پراکندگی.

البته باید توجه داشته باشیم که پرتو پراکنده شده با انرژی جدید (رابطه-۱) لازم است مسیری برابر با  $x/\sin\theta_2$  را طی کند تا از ماده خارج شود. در نتیجه شدت نهایی پرتوهای پراکنده شده از ضخامت  $dx$  در عمق  $x$  برابر خواهد بود با:

$$R(x) = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \mu_{c1} I_0 \exp[-(\mu_1 / \sin\theta_1 + \mu_2 / \sin\theta_2)x] dx \quad (5)$$

در رابطه-۵ به دلیل ضخامت لوله، زاویه فضایی خود تابعی از فاصله خواهد بود (رابطه-۶). البته همانطور که قبلاً هم عنوان شد این رابطه در شرایطی صحیح است که زوایای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  نزدیک به یکدیگر و تقریباً برابر با  $90^\circ$  درجه باشند.

$$\frac{\Delta\Omega}{4\pi} = \frac{\pi r_D^2}{4\pi (x+d)^2} \quad (6)$$

در این رابطه  $r_D$  شعاع آشکارساز استوانه‌ای است.

شماتیک در شکل-۱ نشان داده شده است.

انرژی فوتون پراکنده و سطح مقطع پراکندگی در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\epsilon = (E_\gamma / mc^2)$ .

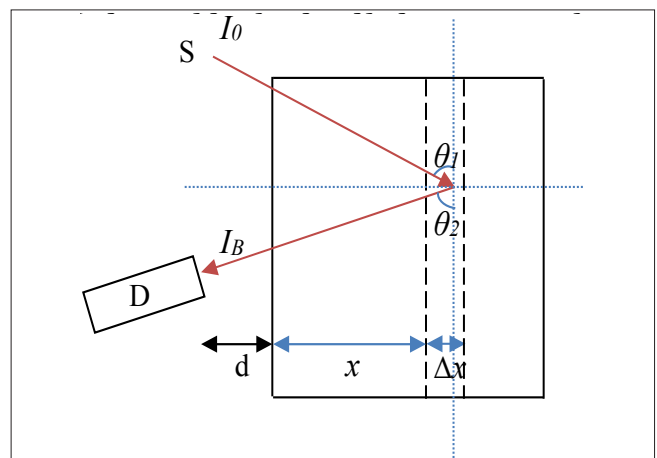
$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \epsilon(1 - \cos\theta)]^2} (1 + \cos^2\theta + \frac{\epsilon^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)}) \quad (2)$$

که در این رابطه  $r_e$  شعاع کلاسیک الکترون است.

به‌منظور مطالعه تعیین کسر فازی با استفاده از پراکندگی کامپتون و درک چگونگی آن، یک مدل ریاضی پس‌پراکنش را که به ما کمک می‌کند تا شدت فوتون‌های پس‌پراکنده را تخمین بزنیم، توسعه خواهیم داد. این شدت پس‌پراکنده شده، حاوی اطلاعاتی است که به ما کمک خواهد کرد تا بتوانیم درصد لایه‌های مختلف را تخمین بزنیم.

شکل-۲ نمای شماتیکی از پس‌پراکنش فوتون‌های گاما از لایه‌ای به ضخامت  $\Delta x$  در عمق  $x$  از یک ماده را نشان می‌دهد. در این حالت پرتوهای گاما با زاویه  $\theta_1$  به ماده برخورد کرده و با زاویه  $\theta_2$  از آن پس‌پراکنده می‌شوند.

برای به‌دست آوردن معادله شدت پرتوهای پس‌پراکنده، ابتدا فرض می‌کنیم که یک لایه ماده داشته باشیم و در مرحله دوم یک لایه دیگر به لایه اول اضافه خواهد شد. نحوه به‌دست آوردن معادلات مربوطه در بخش نتایج توضیح داده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که در این حالت زوایای برخورد و پراکندگی پرتوهای گاما



شکل ۲ | نمودار شماتیک پراکندگی پرتوهای گاما با شدت اولیه  $I_0$  در عمق  $x$  از یک ماده، شدت پرتوهای پراکنده برابر با  $I_B$  است،  $D$ : آشکارساز و  $S$ : چشمه پرتوزا

از ضرب رابطه‌های ۵ و ۶ خواهیم داشت:

$$dI_b = \frac{\mu_{c1} I_0 r_D^2}{4(x+d)^2} \exp[-(\mu_1 / \sin\theta_1 + \mu_2 / \sin\theta_2)x] dx \quad (7-1)$$

و در نتیجه داریم:

$$I_b = \frac{\mu_{c1} I_0 r_D^2}{4} \int_0^{\text{Pipethickness}} \left( \frac{\exp[-(\mu_1 / \sin\theta_1 + \mu_2 / \sin\theta_2)x]}{(x+d)^2} \right) dx \quad (7-2)$$

حال فرض کنید که لایه دومی هم در کنار لایه نشان داده شده در شکل-۲ وجود داشته باشد که در این صورت میزان پراکندگی از این لایه هم برابر خواهد بود با:

$$I'_b = \frac{\mu'_{c1} I_0 r_D^2}{4} \exp[-(\mu_1 / \sin\theta_1 + \mu_2 / \sin\theta_2)d'] \times \int_0^{\text{Pipethickness}-d'} \left( \frac{\exp[-(\mu'_1 / \sin\theta_1 + \mu'_2 / \sin\theta_2)x]}{(x+d+d')^2} \right) dx \quad (8)$$

در این رابطه  $\mu'_{c1}$  هم برابر است با ضریب پراکندگی کامپتون پرتوی فرودی برای لایه دوم،  $\mu'_1$  و  $\mu'_2$  به ترتیب عبارتند از ضرایب جذب فوتون‌های فرودی و برگشتی برای لایه دوم و  $x' / \sin\theta_1$  و  $x' / \sin\theta_2$  هم طول مسیره‌های رفت و برگشت تا محل پراکندگی برای لایه دوم می‌باشند. همچنین در این رابطه عبارت است از ضخامت لایه اول. زمانی که لایه دوم اضافه می‌شود، شدت پرتوها برای رسیدن به این لایه دوبار در زمان رفت و برگشت در لایه اول تضعیف می‌شود.

برای حل انتگرال‌های مذکور بایستی جمله‌نمایی به صورت زیر تا حداقل ۴ جمله بسط داده شود:

$$e^{ax} = 1 + ax + \frac{(ax)^2}{2!} + \frac{(ax)^3}{3!} + \frac{(ax)^4}{4!} + \dots \quad (9)$$

نهایتاً مجموع شدت پراکندگی از دو لایه برابر خواهد بود با:

$$I_{tb} = I_b + I'_b \quad (10)$$

برای اندازه‌گیری درصد هر کدام از لایه‌ها کافی است تا شدت پس‌پراکنش کل در معادله-۱۰ برای دو انرژی مختلف از پرتوهای گاما در آزمایشگاه اندازه‌گیری شود و یک دستگاه دو معادله با دو مجهول (درصد دو لایه) تشکیل گردد. البته با توجه به شکل معادلات به نظر می‌رسد که در این حالت معادلات بیش از یک جواب داشته باشند که در این حالت لازم است تا یک حد بر روی درصد مجموع لایه در نظر گرفته شود که این حد همان قطر لوله خواهد بود. در صورت در نظر گرفتن این حد، معادله-۱۰ با استفاده از یک تک‌انرژی هم قابل حل خواهد بود. با افزایش تعداد انرژی پرتوهای گاما این دستگاه معادلات برای سیستم‌های سه فازی هم قابل بسط می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

تعداد فوتون‌های پس‌پراکنده شده از یک ماده بستگی به احتمال پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک دارد. بر همین اساس و با استفاده از روابط ریاضی موجود، معادلات مربوطه به محاسبه شدت پس‌پراکنش پرتوهای گاما از دو ماده کنار هم به دست آورده شد. این معادلات در طراحی سیستم‌های نوین اندازه‌گیری درصد کسر فازی مواد با استفاده از روش پس‌پراکنش پرتوهای گاما بسیار مفید خواهند بود. چنین سیستم‌هایی می‌توانند در شرایطی که امکان دسترسی به دو طرف یک ماده وجود ندارد، به کار برده شوند. ■

### پانویس‌ها

#### 1. Incoherent scattering

۲. فاکتور بیلداپ: فاکتوری جهت جبران افزایش شمارش‌های ثبت شده در آشکارساز به

خاطر رسیدن پرتوهای پراکنده شده از جسم می‌باشد. افزایش میزان شمارش باید به کمک این ضریب در معادله‌نمایی تضعیف پرتوهای گاما جبران شود.

### منابع

- [1] L. N. G. Gómez, Image formation in a  $\gamma$ -ray Compton backscattering device, master thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [2] G. Harding, B. Schreiber. Coherent X-ray scatter imaging and its applications in biomedical science and industry. Rad. Phys. Chem (1999) 229:245.
- [3] Martens, G., Bomsdorf, H., Harding, G., Kanzenbach, J., Linde, R., 1993. Coherent x-ray scatter imaging for foodstuff contamination detection. SPIE 2092, 387398-.
- [4] Strecker, H., Harding, G., Bomsdorf, H., Kanzenbach, J., Linde, R., Martens, G. Detection of explosives in airport baggage using coherent

x-ray scatter. SPIE 2092, 399410-.

- [5] J. Gerl, F. Ameil, I. Kojouharov and A. Surowiec, High-resolution gamma backscatter imaging for technical applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 525 (2004), 328-331.
- [6] E.M. Hussein, Handbook on Radiation Probing, Gauging, Imaging and Analysis: Volume II, springer, 2003.
- [7] Ibrahim M. M. Babelli, Development of Multiphase Meter Using Gamma Densitometer Concept, proceedings. of International. Nuclear conference, Kuala Lumpur, pp. 3711997, 389-.