

## امکان‌سنجی به کارگیری روش گاما دنسیتومتری در اندازه‌گیری ضریب کسر حفره جریان دوفازی در کانالی با مقطع مربعی

محمد نظیفی فرد<sup>۱\*</sup>، احمد رضائی مقدم<sup>۲</sup> و محمدرضا رسولی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران.

\* اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی، کدپستی: ۸۳۳۱۷۵۱۱۶۷

پست الکترونیکی: nazifi@kashanu.ac.ir

### چکیده

اندازه‌گیری دقیق ضریب کسر حفره در جریان دوفازی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای ترموهیدرولیکی در اندازه‌گیری و پیش‌بینی کمیت‌هایی همچون چگالی متوسط، افت فشار و تعیین الگوی جریان دو فازی است. در این تحقیق، اندازه‌گیری ضریب حفره براساس تضعیف تابش یک باریکه گاما در جریان دوفازی، درون کانالی با مقطع مربعی شکل، به روش آزمایشگاهی صورت گرفته است. با کمک یک چشمه سزیم-۱۳۷ و یک آشکارساز سوسوزن یدور سدیم، پرتوهای عبوری از کانال، برای ضرایب حفره مختلفی اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سنجه تک‌پرتوی گاما اطراف یک کانال امکان سنجش ضریب حفره را با دقت قابل قبولی فراهم می‌کند.

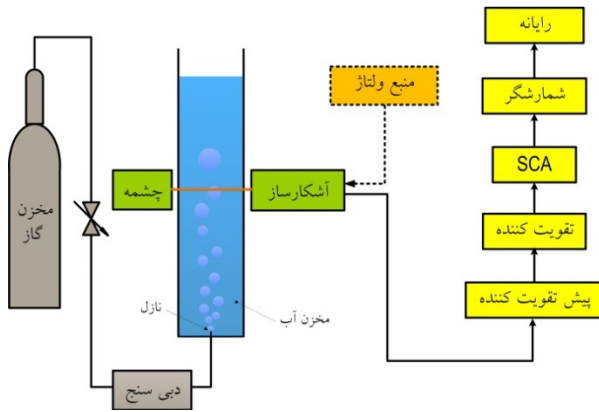
**کلیدواژگان:** گاما دنسیتومتری، چشمه سزیم-۱۳۷، آشکارسازی پرتوهای یونساز، جریان دوفازی، باریکه گاما.

### ۱. مقدمه

مختلف جریان دوفازی درون لوله یا کانال، وابسته به شرایط هندسی نظیر قطر و شیب لوله، سرعت نسبی و خواص فیزیکی فازهای گاز و مایع است. در روش تابش پرتوهای هسته‌ای از میزان تضعیف پرتوهای گاما، ایکس یا باریکه نوترونی برای تخمین چگالی متوسط سیال دوفاز استفاده می‌شود [۷]. همچنین، از روش‌های تصویربرداری با اشعه ایکس برای تعیین رژیم جریان دوفازی استفاده می‌شود. به‌طور کلی، ضریب کسر حفره می‌تواند از اندازه‌گیری‌های ضریب تضعیف خطی یک مخلوط همگن دو فازی حاصل شود که اختلاف کافی در چگالی دو جزء تشکیل‌دهنده آن وجود داشته باشد. در واقع، اساس روش بر مبنای تضعیف باریکه فوتونی، هنگام عبور از محیط و وابستگی ضریب تصحیح به محیط است. اصولاً هنگام

شناخت دقیق و بررسی کمی و کیفی رژیم‌های مختلف جریان‌های دوفازی، در اغلب فرایندهای صنعتی از جمله صنایع نفت و گاز و همچنین، صنایع نیروگاهی از قبیل نیروگاه‌های هسته‌ای، اهمیت ویژه‌ای دارد. تاکنون روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری پارامترهای مشخصه جریان دوفازی شامل ضریب کسر حفره<sup>۱</sup> به‌کار گرفته شده است. از آن جمله می‌توان به روش‌های تجربی-آزمایشگاهی یا روش‌های تحلیلی اشاره کرد [۵-۱]. از روش‌های تجربی می‌توان به انواع روش‌های پراکنش و تضعیف نوری، اولتراسونیک، الکترونیکی و روش تابش هسته‌ای اشاره کرد [۶]. به‌طور کلی، توزیع فازهای

1. Void coefficient



شکل ۱: شماتیک سیستم طراحی شده برای انجام آزمایشات

سامانه سنسجش پرتوی شامل چشمه رادیواکتیو، موازی کننده و آشکارساز پرتو است که طبق شماتیک نشان داده شده در شکل (۱)، در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. موازی کننده از ضخامت کافی از سرب انتخاب شده تا پرتوهای پراکنده شده را جذب کند. به منظور پرتو دهی، از چشمه سزیم  $^{137}\text{Cs}$  مستقر در واحد پرتو دهی دانشگاه کاشان استفاده شد. چشمه مورد استفاده، پرتوهای گاما با انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت تولید می کند که توسط یک موازی کننده سربی فن بیم موازی شده است. آشکارساز مورد استفاده در آزمایش سوسوزن یدور سدیم (با ناخالصی تالیوم) به همراه لامپ تکثیر کننده فوتونی (PMT) می باشد. جدول ۱ مشخصات سوسوزن بکار گرفته شده در آزمایش را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات سوسوزن NaI(Tl)

مشخصات سوسوزن NaI(Tl)	
چگالی	$3.67 \text{ g/cm}^3$
عدد اتمی	$81, \text{TI} = 53, \text{I} = 11\text{Na} =$
بهره نوری	۱۲٪ انرژی ذره فرودی
ضریب دمایی نوردهی	۰/۲ تا $2\% \text{ } ^\circ\text{C}$
طول موج تابش با بیشترین شدت	۴۲۰ nm
ضریب شکست	۱/۸۵ در ۴۲۰ nm
زمان واپاشی	۲۳۰ ns در دمای $25^\circ\text{C}$
قدرت تفکیک انرژی	۶/۵ درصد در انرژی ۶۶۲ KeV

عبور باریکه ای تک فام از یک موج الکترومغناطیسی از یک محیط، به دلیل انجام سه فرایند پدیده فوتوالکتریک، پدیده تولید زوج و پراکندگی کامپتون، تعدادی از فوتون های باریکه از باریکه جدا می شوند. تضعیف باریکه بر اساس رابطه تجربی (۱) قابل ارزیابی است.

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

که در آن،  $I_0$  شدت باریکه ورودی به محیط،  $I$  شدت باریکه خارج شده از محیط،  $\mu$  ضریب جذب خطی محیط و  $x$  ضخامت محیط است. ضریب جذب خطی محیط به دو عامل جنس و فاز محیط و همچنین، انرژی پرتو فرودی بستگی دارد. دلیل این وابستگی نیز به احتمال انجام سه فرایند ذکر شده به عوامل مذکور است.

مطالعات نشان داده است در میان انواع روش های تجربی ذکر شده، اندازه گیری ضریب حفره بر اساس تضعیف تابش یک باریکه گاما در جریان دوفازی، یکی از روش های با دقت و قابل قبول در میان روش های بررسی جریان دوفازی است [۶]. مطالعات تجربی مختلفی در رابطه با اندازه گیری ضریب حفره در جریان دوفازی درون یک لوله فولادی مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۱]. در مطالعه حاضر، یک کانال با مقطع مربعی شکل طراحی و پیاده سازی شد و الگوهای مختلف جریان با استفاده از یک مخزن گاز در کانال ایجاد گردد.

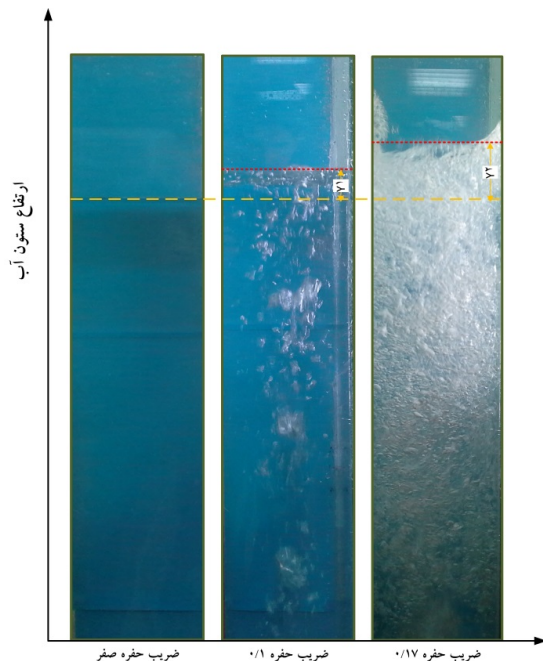
## ۲. روش انجام کار

### ۱.۲ طراحی و پیاده سازی سامانه آزمایشگاهی

سامانه آزمایشگاهی (شکل ۱) در تحقیق حاضر، از دو قسمت اصلی شامل قسمت تولید کننده جریان دوفازی و سامانه سنسجش پرتوی تشکیل شده است. جریان دوفازی در رژیم جریان حبابی، درون یک مخزن شیشه ای با سطح مقطع مربعی  $(20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm})$  توسط یک منبع گاز نیتروژن ایجاد شد. برای ایجاد ضرایب حفره مختلف درون مخزن آب، دبی گاز نیتروژن ورودی به مخزن تغییر داده شد. برای تعیین ضریب حفره از تغییرات ارتفاع سطح آب در مخزن استفاده شد (شکل ۲).

میزان خطا از روشی مشابه مطالعه ژئ بیالو و همکارانش تخمین زده شد [۷].

$$\text{ضریب کسر حفرة} = \frac{(\text{ارتفاع ستون سیال دوفاز}) - (\text{ارتفاع ستون آب})}{(\text{ارتفاع ستون آب})} \quad (۲)$$



شکل ۳: ضرایب حفرة متفاوت در رژیم جریان دوفازی حبابی

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. نتایج آزمایش برای پرتوهای عبوری

تعداد پالس‌های با ارتفاع مختلف توسط یک شمارشگر در حالت‌هایی که شاره درون محفظه در فازهای هوا، آب و مخلوط آب و هوا (حالت دو فازی) بوده است، شمارش شدند. آزمایش در حالت دوفازی برای سه جریان متفاوت گازی به انجام رسیده است. نمودار شکل (۴) نشان‌دهنده تعداد پالس‌های شمارش شده بر حسب ارتفاع پالس را برای فاز حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. برای حذف پالس‌های زمینه و دریافت تعداد خالص در هر حالت، یک تابع شامل یک تابع چندجمله‌ای توصیف‌کننده پس‌زمینه و یک تابع گاوسی توصیف‌کننده پالس حقیقی بر هریک از نمودارهای به‌دست آمده برازش گردید. پس از حذف پس‌زمینه، مساحت زیر منحنی گاوسی به‌عنوان تعداد خالص پالس برای محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است [۶ و ۷].

پالس تولیدی در آشکارساز، پس از تقویت اولیه و ثانویه، به یک تحلیل‌گر تک‌کاناله وارد شده و با تغییر ولتاژ سطح تیضگر در تحلیل‌گر تک‌کاناله، تعداد پالس‌های با ارتفاع مختلف، توسط یک شمارشگر به‌دست می‌آید. ارتفاع پالس‌های ثبت‌شده با انرژی به‌جاگذاشته‌شده توسط پرتو در آشکارساز متناسب است. به این ترتیب، می‌توان نمودار تعداد پالس‌ها بر حسب ولتاژ سطح تیضگر را رسم نمود که به‌نوعی نشان‌دهنده طیف ذرات آشکار شده خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، رژیم‌های مختلف جریانی و ضرایب کسر حفرة مختلف با اعمال دبی مختلفی از گاز دمیده‌شده درون کانال ایجاد شد. بدنه کانال در این مطالعه از جنس شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شد تا جریان داخل کانال قابل رؤیت باشد.



شکل ۲: سامانه سنجش پرتوی

#### ۲.۲. کالیبراسیون و تخمین دقت اندازه‌گیری

به‌منظور کالیبراسیون سیستم گاما‌دנסیتومتر، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این تحقیق، نتایج به‌دست‌آمده از دستگاه با ضریب به‌دست‌آمده از تغییرات ارتفاع سطح آب مقایسه شد. ضریب حفرة در جریان دوفازی از رابطه (۲) محاسبه شد.

خطای ناشی از اندازه‌گیری ضریب حفره به کمک ارتفاع سیال خطای حدود ۷ درصد تخمین زده می‌شود.

جدول ۲: رابطه میزان ضریب حفره و ضریب تضعیف گاما

۰/۱	۰/۱۷	۰/۳۸	ضریب حفره براساس رابطه ۲
۰/۹۲۸	۰/۹۱۳	۰/۹۱۰	ضریب تضعیف پرتو گاما

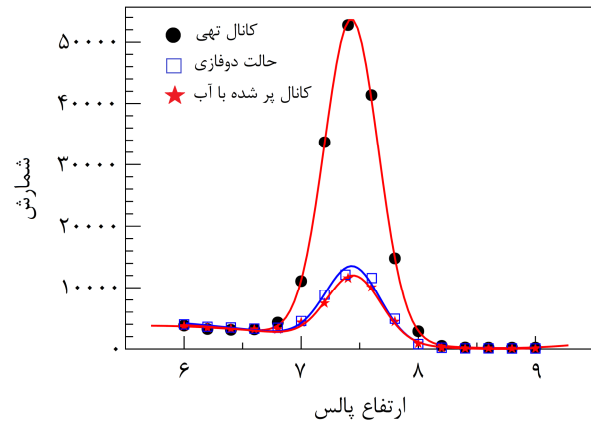
همان‌طور که در جدول شماره (۲) ارائه شده است، رابطه معناداری میان میزان ضریب تضعیف پرتو گاما و ضریب حفره وجود دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اندازه‌گیری ضریب حفره براساس تضعیف تابش یک باریکه گاما در جریان دوفازی، درون کانالی با مقطع مربعی شکل عمودی به روش آزمایشگاهی صورت گرفته است. با کمک یک چشمه سزیم-۱۳۷ و یک آشکارساز سوسوزن یدور سدیم، پرتوهای عبوری از کانال برای ضرایب حفره مختلفی اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از سنجه تک‌پرتوی گاما اطراف یک کانال با مقطع مربعی شکل، امکان سنجش ضریب حفره را با دقت قابل قبولی فراهم می‌کند.

#### ۵. سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان و همچنین دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان تشکر و قدردانی می‌کنند.



شکل ۴: تعداد پالس بر حسب ارتفاع پالس برای شرایط مختلف

ضریب تضعیف متوسط به کمک رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$\Psi = \frac{\mu^{-AW} - \mu^{-A}}{\mu^{-W} - \mu^{-A}} = \frac{\ln(I^{-AW}) - \ln(I^{-A})}{\ln(I^{-W}) - \ln(I^{-A})} \quad (3)$$

که در آن،  $\mu$  ضریب جذب خطی،  $I$  شدت پرتو گاما و اندیس‌های  $A$ ،  $W$  و  $AW$  به ترتیب، معرف فازهای هوا، آب و حالت دوفازی هوا و آب است. در جدول (۲) میزان ضریب تضعیف به دست آمده به روش گاما دنسیتومتری با مقدار ضریب حفره تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲) مقایسه شده است. خطای آماری اندازه‌گیری ضریب تضعیف برای نقاط مورد مطالعه، حدود ۳ درصد و خطای سیستماتیک آن‌ها که به صورت عمده، ناشی از پراکندگی پرتوهای گاما، قدرت تفکیک آشکارساز، زمان تفکیک آشکارساز و الکترونیک سیستم اندازه‌گیری است حدود ۵ درصد تخمین زده می‌شود.

#### ۶. مراجع

- [1] A. M. C. Chan and S. Banerjee, "Design Aspects of Gamma Densitometers for Void Fraction Measurements in Small Scale Two-Phase Flows", Nuclear Instruments and Methods, 190, 135 (1981).
- [2] Y. Jiang and K. S. Rezkallah, "An Experimental Study of the Suitability of Using a Gamma Densitometer for Void Fraction Measurements in Gas-Liquid Flow in a Small Diameter Tube", Meas. Sci. Technol., 4, 496 (1993).
- [3] I. C. Chu and C. H. Song, "Development and Performance Evaluation of 32-Channel Gamma Densitometer for the Measurement of Flow Pattern and Void Fraction in the Downcomer of MIDAS Test Facility", KAERI/TR- 2045/2002, KAERI (2002).
- [4] Thorn, R., G. A. Johansen, and B. T. Hjertaker. "Three-Phase Flow Measurement in the Petroleum Industry", Measurement Science and Technology 24.1 (2013): 012003.
- [5] Liu, Y., et al. "Experimental Study of Non-Uniform Inlet Conditions and Three-Dimensional Effects of Vertical Air-Water Two-Phase Flow in a Narrow Rectangular Duct." International Journal of Heat and Fluid Flow 39 (2013): 173-186.
- [6] Park, H., and C. Chung. "Design and application of a single-beam gamma densitometer for void fraction measurement in a small diameter stainless steel pipe in a critical flow condition." Nuclear Engineering and Technology 39.4 (2007): 349.
- [7] Zhi-biao, Li, Li Dong-hui, and Wu Ying-xiang. "Study on absorption coefficients of dual-energy  $\gamma$ -rays in determining phase fractions of multiphase flows." Journal of Zhejiang University Science A 6.12 (2005): 1416-1419.