

Simulation and Two-phase Void Fraction Measurement Utilizing Gamma Technique in Conjunction with Flat Panel Detector

Mojtaba Askari, AmirMohammad Beigzadeh and Mohsen Sharifzadeh*

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

mssharifzadeh@aeoi.org.ir

DOI: 10.22078/pr.2024.5292.3347

Received: June 29, 2024

Accepted: November 10, 2024

Introduction

Void fraction measurement in various industries such as nuclear, chemical and petrochemical will give a useful understanding of the distribution of phases in a multiphase system. In research conducted by Bombak and his colleagues in 2019, it was shown that measuring the void fraction in nuclear reactor loops is very important for safety and efficiency in nuclear energy production [1]. In research by Wang et al. in 2020, using an array of electrical capacitance sensors, the void fraction in the water-gas phase was measured [2]. In another research in 2021, Al-Amoudi and his colleagues were able to measure the thickness of the sediment attached to the pipe wall in the presence of gas-liquid two-phase flow for different regimes and various amounts of void fraction by combining the gamma ray attenuation technique and artificial intelligence [3].

In this research work, the aim is to measure the void fraction using the gamma attenuation technique combined with the use of a flat panel detector. What makes this study different from the previous works is the use of the imaging process instead of reading the gamma intensity passing through the tube containing the two-phase fluid, which makes it possible to measure the void fraction with better accuracy and for a wide range.

The Problem

In this research work, in order to solve the problem of gamma-ray transport in matter, a creative idea was proposed, which is to use a wide beam around the

radioactive source that can be installed inside the tube with a probe near the wall and a flat plate detector outside the tube and opposed it for two-dimensional imaging. Furthermore, by counting the number of bubbles located in a certain volume of fluid and using the calibration graphs of the phase fraction versus the bubble numerical density, the phase fraction can be calculated for the different sizes of the bubbles that are homogeneously distributed in the tube.

Materials and Methods

The arrangement of source and detector in the system presented in this research is shown in Fig. 1.

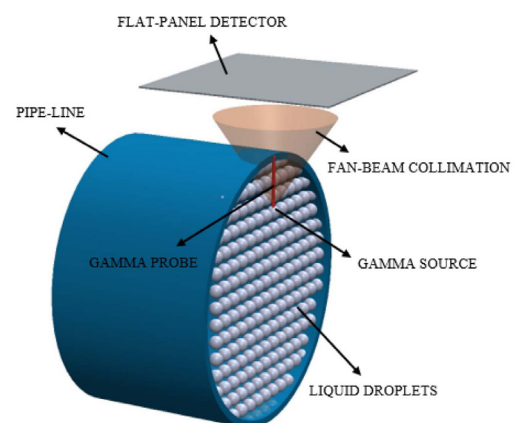


Fig. 1 Conceptual design of void fraction measurement module.

In this research, the bubble size ranges from 0.5 to 2 mm and its phase fraction covers the range from 1 to 10%. In order to separate the bubble from the liquid, a cobalt-60 gamma source with an average emission energy of 1.25 MeV was used. The used flat panel detector with dimensions of 10 x 10 x 0.5 mm was covered with pixels with dimensions of 0.146 x 0.146 mm. By doing all dimensional and geometrical considerations, the simulation process was done for each input file and by recording the output related to tally TMESH in a time period of 2160 minutes in MCNP code environment.

Results and Discussion

The validation results of the Monte Carlo code for the emission energy spectrum by a standard X-tube in IPEM Report No. 78 with a voltage of 150 kV and a tungsten anode are shown in Fig. 2.

The simulation process was performed for 160 different bubble arrangements in the liquid phase for different values of bubble radius and numerical density, and the images were recorded on the flat panel detector. Fig.

3 shows some images taken from the fountain shutter valve for different radius and bubble density values.

Finally, after the completion of the simulation process, the results of changes in bubble numerical density in terms of void fraction for different values of bubble radius were shown in Fig. 4.

Based on the studies which have been carried out, it is demonstrated that by considering the error bars, a satisfactory differentiation is achieved between the profiles depicting the variations in droplet count per unit volume for different radii. Notably, this resolution exhibits an upward trend as the radius decreases, implying enhanced measurement precision for smaller air bubbles within the liquid carrier.

The graph consistently exhibits an upward trend, indicating that there is a proportional increase in the number of bubbles per unit volume with an increase in the gas void fraction.

As anticipated, it is observed that for a constant void fraction, reducing the droplet radius leads to an increase in the number of droplets per unit volume. This trend suggests greater compressibility of the bubbles.

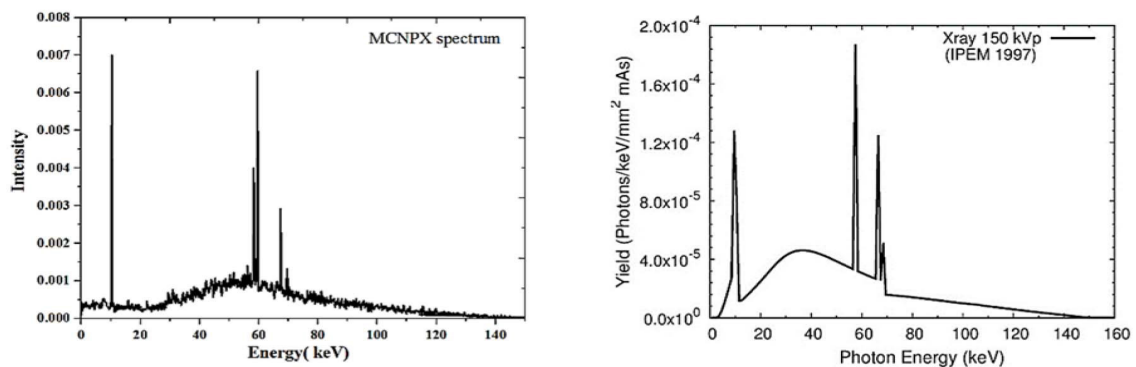


Fig. 2 Comparison of x-ray spectrum obtained through MCNP simulation and IPEM report number 78 at a working voltage of 150 keV [4].

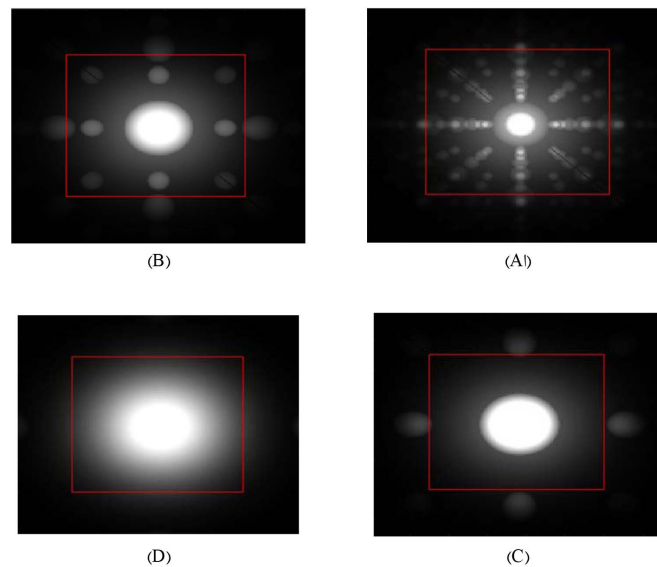


Fig. 3 Two-dimensional images obtained for 2% bubble fraction and different bubble radial values including a) 0.5 mm, b) 1.0 mm, c) 1.5 mm, and d) 0.2 mm.

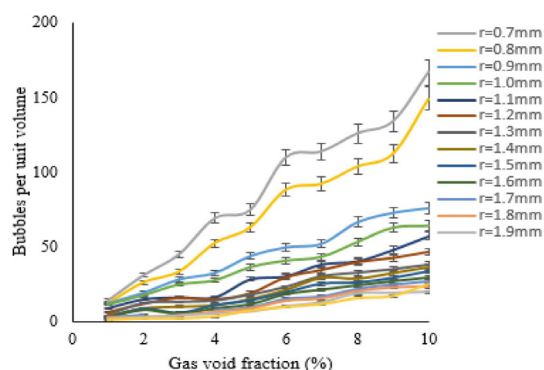


Fig. 4 Variation of droplets per unit volume with liquid volume fraction for different droplet radii.

Conclusions

By plotting the changes in droplets per unit volume with liquid volume fraction for different droplet radii as shown in Figure 4, it can be concluded that the ability to distinguish different bubble fraction values increases with decreasing bubble radius. Also, for a constant bubble fraction, the difference in consecutive number density values shows a decreasing trend with increasing radius, which indicates lower resolution in this situation. The higher the bubble fraction, the better the ability of the proposed imaging system to distin-

guish different and consecutive bubble radius values.

References

1. Bombač, A., Rek, Z., & Levec, J. (2019). Void fraction distribution in a bisectonal bubble column reactor. *AIChE Journal*, 65(4), 1186-1197. doi.org/10.1002/aic.16534
2. Wang, X., Chen, Y., Wang, B., Tang, K., & Hu, H. (2020). Sectional void fraction measurement of gas-water two-phase flow by using a capacitive array sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101788. doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101788
3. Alamoudi, M., Sattari, M. A., Balubaid, M., Eftekhari-Zadeh, E., Nazemi, E., Taylan, O., & Kalmoun, E. M. (2021). Application of gamma attenuation technique and artificial intelligence to detect scale thickness in pipelines in which two-phase flows with different flow regimes and void fractions exist. *Symmetry*, 13(7), 1198. doi.org/10.3390/sym13071198
4. Martin, C. J., Temperton, D. H., Jupp, T., & Hughes, A. (2019). IPEM topical report: personal dose monitoring requirements in healthcare. *Physics in Medicine & Biology*, 64(3), 035008. doi.org/10.1088/1361-6560/aafa3f.

شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کسر حباب جریان دوفازی با استفاده از تلفیق فن آوری گاما و آشکارساز صفحه تخت

مجتبی عسکری، امیرمحمد بیگزاده، و محسن شریف‌زاده*

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

چکیده

حضور حباب در عمده جریان‌های دوفازی گاز-مایع خودنمایی می‌کند. اندازه‌گیری کسر حباب در صنایع مختلف مانند هسته‌ای، شیمیایی و پتروشیمی درک مفیدی از توزیع فازها در یک سیستم چندفازی خواهد داد. اندازه‌گیری کسر حباب می‌تواند منجر به بهبود طراحی، بهره‌برداری و نگهداری فرآیندهای صنعتی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، راکتورهای شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، نیروگاه‌های زمین گرمایشی و غیره شود. در موارد زیادی حباب‌ها به‌صورت همگن در سیال مایع پخش می‌شوند که اندازه‌گیری کسر حباب را با خطای بالایی همراه می‌کند. در این کار تحقیقاتی برای اجتناب از خطای سیستماتیک نوسان در قرارگیری کسر یکسانی از حباب در مسیر پرتو گامای عبوری از لوله جریان از یک باریکه پهن گاما در تلفیق با یک آشکارساز صفحه تخت استفاده گردید. در ادامه در محیط شبیه‌سازی مونت‌کارلو با استفاده از محاسبه چگالی عددی حباب در حجمی ثابت و بهره‌گیری از نمودار کالیبراسیون، کسر حباب برحسب چگالی عددی به‌ازای مقادیر مختلف شعاع حباب مقدار کسر حباب محاسبه گردید. پس از اعتبارسنجی کد با استفاده از مقایسه نتایج طیف تولیدی از کد با طیف نمونه مرجع یک تیوب اشعه ایکس، نمودار تغییرات چگالی عددی برحسب کسر حباب در شعاع‌های مختلف گویای توانایی روش ارائه‌شده در این کار تحقیقاتی برای تفکیک مقادیر مختلف کسر حباب به‌ازای شعاع‌های مختلف می‌باشد.

کلمات کلیدی: اندازه‌گیری، کسر حباب، جریان دوفازی، فن آوری گاما، آشکارساز صفحه تخت

مقدمه

طراحی، بهره‌برداری و نگهداری فرآیندهای صنعتی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، راکتورهای شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، نیروگاه‌های زمین گرمایشی و غیره شود. علاوه بر این، تحقیقات و پیشرفت‌ها در این زمینه می‌تواند به افزایش ایمنی، بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌ها در صنایعی که جریان‌های دوفازی رایج هستند، شود.

اندازه‌گیری کسر حباب در صنایع مختلف مانند هسته‌ای، شیمیایی و پتروشیمی درک مفیدی از توزیع فازها در یک سیستم چندفازی خواهد داد. اندازه‌گیری کسر حباب می‌تواند منجر به بهبود

*مسئول مکاتبات

Address: mssharifzadeh@aeoi.org.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2024.5292.3347)

را پیشنهاد دادند [۸]. در تحقیقی دیگر، فولادی‌نیا و همکاران نیز از تلفیق شبکه عصبی مصنوعی و تکنی‌های گاما و ظرفیت الکتریکی برای اندازه‌گیری کسر خلاء درون جریان سه‌فازی بهره‌برداری کردند [۹]. در این کار تحقیقاتی هدف اندازه‌گیری کسر حباب با استفاده از فن‌آوری تضعیف گاما در تلفیق با به‌کارگیری آشکارساز صفحه تخت است. آنچه این مطالعه را متمایز از کارهای پیشین می‌کند استفاده از فرآیند تصویربرداری به‌جای خوانش شدت گامای عبوری از لوله حاوی سیال دوفازی است که این امکان را می‌دهد با دقت بهتر و به‌ازای گستره وسیعی از کسر حباب اندازه‌گیری کسرفازی مؤلفه‌های جریان دوفازی گاز-مایع صورت پذیرد.

بیان مسئله

برای اندازه‌گیری دبی جریان دوفازی از روش استنتاجی استفاده می‌شود. در مورد سنجش‌گرهای تجاری‌شده این روش بر مبنای اندازه‌گیری کسر فازی مؤلفه‌های جریان و سرعت به‌صورت هم‌زمان و با استفاده از فرمولاسیون زیر است:

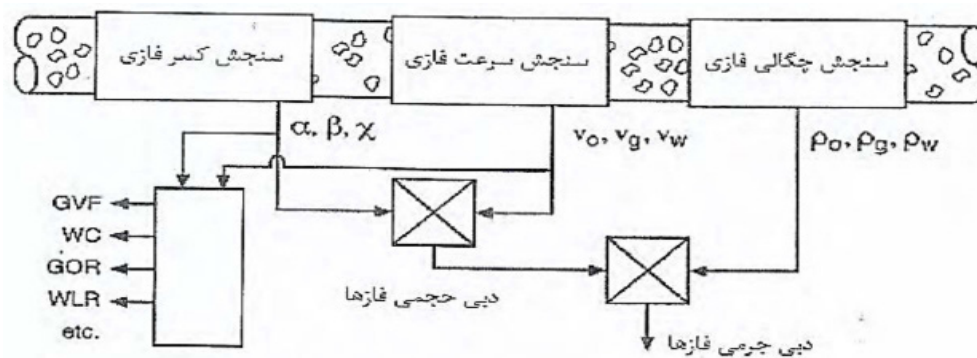
$$M = \sum_{i=1}^2 \rho_i \alpha_i v_i \quad (1)$$

M دبی جرمی، A سطح مقطع لوله، ρ_i چگالی، α_i کسر فازی، و v_i سرعت مؤلفه i هستند. اساس عملکردی این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل بالا مشهود است یکی از واحدهای مهم بخش اندازه‌گیری کسر فازی است. در این سامانه و با استفاده از قانون تضعیف نمایی بیر-لمبرت شدت پرتوهای گاما عبوری از محتویات درون لوله با استفاده از رابطه زیر ثبت می‌شود [۱۰]:

$$I = I_0 \exp(-d \sum \alpha_i \mu_i) \quad (2)$$

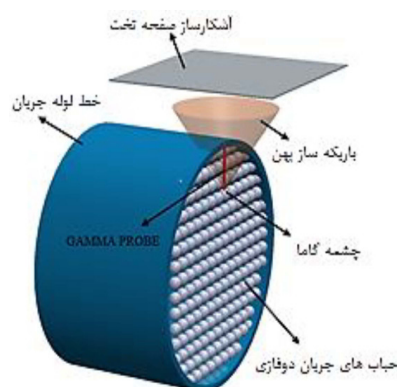
که I و I_0 به‌ترتیب شدت خوانش به‌ازای شرایط پر شدگی مخزن توسط هر کدام از مؤلفه‌های جریان، ضریب انباشت ناشی از مشارکت پرتوهای پراکنده در خوانش نهایی، d قطر داخلی لوله، و α_i و μ_i به‌ترتیب کسر فازی و ضریب تضعیف خطی مؤلفه i می‌باشند.

در تحقیقی توسط بمباک و همکارانش صورت گرفت نشان داده شد که اندازه‌گیری کسر حباب در مدارهای بسته جریان راکتور هسته‌ای برای ایمنی و کارایی در تولید انرژی هسته‌ای بسیار مهم است [۱۱]. کسر حباب به نسبت حجم فضای خالی (مانند گاز یا بخار) به حجم کل در یک جریان دو فازی اشاره دارد که به‌ویژه در راکتورهای هسته‌ای که خنک‌کننده مایع در کنار فاز گاز/بخار به‌صورت هم‌زمان وجود دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اندازه‌گیری دقیق کسر حباب به مهندسان و اپراتورها کمک می‌کند تا توزیع فازها را در هسته راکتور و حلقه اولیه درک کنند. در راکتورهای هسته‌ای، کسرهای حباب بر پارامترهایی مانند راندمان انتقال حرارت [۱۲]، شار حرارتی بحرانی و کند کنندگی نوترون [۱۳] تأثیر می‌گذارند که همگی برای حفظ عملکرد ایمن و پایدار راکتور حیاتی هستند [۱۴]. در تحقیقی توسط وانگ و همکاران با استفاده از آرایه‌ای از حسگرهای ظرفیت الکتریکی کسر خلأ در دوفازی آب-گاز اندازه‌گیری شد [۱۵]. در تحقیقی دیگر العمودی و همکارانش با ترکیب فن‌آوری تضعیف پرتو گاما و هوش مصنوعی توانستند ضخامت رسوب چسبیده به جداره لوله را در حضور جریان دوفازی گاز-مایع به‌ازای رژیم‌های مختلف و مقادیر متنوعی از کسر حباب اندازه‌گیری کنند [۱۶]. در تحقیقی که توسط بیگزاده و همکاران صورت پذیرفت مقدار کسر حباب در سیال دو فازی با استفاده از چگالی‌سنج گاما اندازه‌گیری شد. در این کار تعداد حباب‌های ایجاد شده درون لوله فلزی حاوی سیال جوشان تخمین زده شد و در یک سطح مقطع خاص تغییرات شمارش گاما به‌صورت افزایشی به میزان حباب ایجاد شده در لوله نسبت داده شد [۱۷]. در دسته دیگری از تحقیقات با استفاده از تلفیق فن‌آوری گاما و هوش مصنوعی پارامتر مهم کسر حباب مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. بوربور و همکاران یک چگالی‌سنج هوشمند با امکان نمونه‌گیری و در ادامه اندازه‌گیری کسر حباب با استفاده از تلفیق گامای دوباریکه و شبکه عصبی



شکل ۱ طرح‌واره روش استنتاجی در اندازه‌گیری جریان چندفازی.

تخت بیرون از لوله و نزدیک دیواره به‌گونه‌ای قرار داده می‌شود که موقعیت مکانی چشمه در مرکز آن و متقارن باشد.



شکل ۲ چیدمان چشمه و آشکارساز صفحه تخت به‌منظور اندازه‌گیری کسر حباب در جریان دوفازی.

اکنون با طراحی یک باریکه‌ساز مناسب، مخروطی از فوتون گامای گسیلی امکان عبور از لوله و ثبت تصاویر حباب درون جریان دوفازی گاز-مایع را بر روی آشکارساز خواهد داشت. در این تحقیق اندازه حباب گسترده‌ای بین ۰/۵ تا ۲ mm و کسر فازی آن محدوده ۱ تا ۱۰٪ را پوشش می‌دهد. در واقع آنچه در این کار تحقیقاتی معرفی شده است این قابلیت را دارد تا به‌عنوان یکی از زمینه‌های مورد توجه جهت محاسبه کسر حباب درون جریان دوفازی خروجی از سیستم‌های جداساز جریان سه فازی به‌کارگیری شود.

در شرایطی که به‌واسطه کاربرد باریکه‌ساز قلمی^۱ صرفاً پرتوهای عبوری شمارش شوند می‌توان ضریب انباشت را برابر با واحد در نظر گرفت. اگرچه این یک مزیت محسوب می‌شود اما در مورد جریان دوفازی حبابی به‌دلیل قرارگیری تعداد متغیر حباب در مسیر باریکه گامای عبوری از لوله عدم دقت بالایی در اندازه‌گیری کسر حباب به‌وجود می‌آید. در این کار تحقیقاتی به‌منظور رفع این مشکل یک ایده خلاقانه مطرح شد که به‌کارگیری یک باریکه‌ساز پهن^۲ اطراف چشمه رادیواکتیو قابل نصب درون لوله با یک میله^۳ و نزدیک دیواره آشکارساز صفحه تخت^۴ بیرون از لوله و مقابل آن به‌منظور تصویربرداری دوبعدی از جریان دوفازی است. در ادامه و با شمارش تعداد حباب واقع در حجمی معین از سیال و استفاده از نمودارهای کالیبراسیون تغییرات کسر فازی به چگالی عددی حباب به‌ازای اندازه‌های مختلف حباب‌هایی که به‌طور همگن درون لوله توزیع شده اند می‌توان کسر فازی حباب^۵ را محاسبه و گزارش کرد.

مواد و روش‌ها

تنظیمات فرآیندی

چیدمان چشمه و آشکارساز در سیستم ارائه‌شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست ابتدا با کمک یک میله چشمه رادیواکتیو درون لوله و در فاصله اندکی از دیواره قرار داده می‌شود. در ادامه آشکارساز صفحه

1. Pencil-Beam Collimator
2. Fan-Beam Collimator
3. Probe
4. Flat Panel Detector
5. Gas Void Fraction

استفاده شد. انتخاب این چشمه از نقطه نظر سطح مقطع مناسب ایجاد تمایز در برهم‌کنش با دو مولفه هوا و مایع (کنتراست)، توانایی عبور از ضخامت لوله و رسیدن سهم به‌سزایی از فوتون‌ها به آشکارساز (حساسیت)، و نیز امکان تولید در داخل کشور بسیار حائز اهمیت است. آشکارساز صفحه تخت مورد استفاده با ابعاد ۱۰ در ۱۰ در mm ۰/۵ با پیکسل‌هایی با ابعاد ۰/۱۴۶ در ۰/۱۴۶ mm پوشانده شده بود. با انجام کلیه ملاحظات ابعادی و هندسی، فرآیند شبیه‌سازی برای هر فایل ورودی و با ثبت خروجی مربوط به خروجی TMesh در بازه زمانی ۲۱۶۰ min انجام شد.

نتایج

نتایج اعتبارسنجی

در ابتدا و به‌منظور اعتبارسنجی کد مونت‌کارلو طیف انرژی گسیلی توسط یک مولد ایکس استاندارد تولید و با نمونه مرجع مقایسه گردید. مرجع مورد استفاده در این بخش گزارش شماره ۷۸ مربوط به IPEM^۲ است که حاوی طیف اشعه ایکس برخی دستگاه‌های ماموگرافی و رادیولوژی است [۱۲]. در این بخش یک تیوب اشعه ایکس با ولتاژ ۱۵۰ kV و آند تنگستن شبیه‌سازی و با نتایج مرجع مقایسه گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشخص است، خروجی این سیستم‌ها دو جریان مایع و گاز است که توسط جریان‌سنج‌های تک فازی مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و در ادامه با هم یکی شده و مجدد به صورت جریان سه فازی وارد خط لوله اصلی جریان خواهند شد. آنچه اهمیت سیستم پیشنهادی را برجسته می‌کند به‌کارگیری برروی خط لوله حاوی فاز عمده مایع است که به سبب عدم توانایی جداسازی در حذف ۱۰۰٪ فاز گازی از آن دارای مقادیر اندک حباب‌های گازی است که در فشار و دمای بالا به‌صورت توزیعی همگن با سیال مایع در جریان است.

شبیه‌سازی مونت‌کارلو

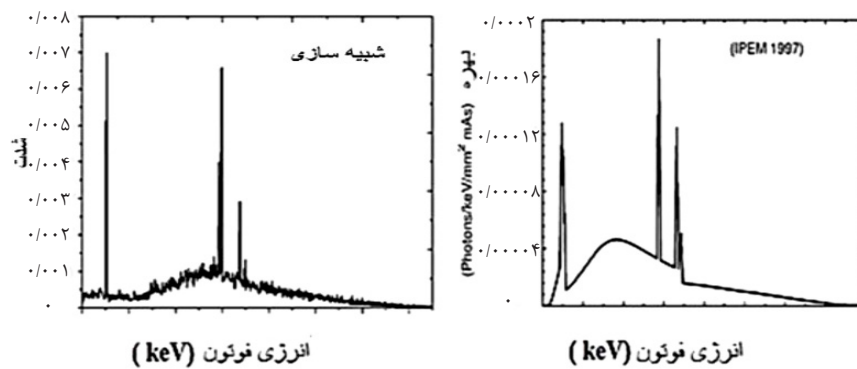
فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو در محیط نرم‌افزار محاسباتی^۱ MCNPX 2.7.0 صورت پذیرفت [۱۱]. به‌ازای هر اندازه مشخص از حباب، فایل‌های ورودی مربوط به توزیع همگن با گستره‌ای از مقادیر کسر فازی ایجاد و اجرا شدند. از دستور Lattice برای تولید سلول‌های یکسان متشکل از حباب هوا و مایع پیرامونی آن با کسر فازی مشخص استفاده گردید. ابعاد سلول‌های مکعبی پیرامون حباب‌های یکسان به‌ازای مقادیر مختلف کسر فازی و اندازه حباب در جدول ۱ گردآوری شده‌اند. به‌منظور تفکیک حباب از مایع از چشمه گامای کبالت-۶۰ با انرژی میانگین گسیلی ۱/۲۵ MeV

جدول ۱ ابعاد سلول مکعبی پیرامون هر حباب در اندازه مشخص و به‌ازای مقادیر مختلف کسر فازی

کسر حباب (٪)					
۱۰	۷	...	۴	۱	
۱/۷۴	۱/۹۶	...	۲/۳۶	۳/۷۴	۰/۵
۳/۴۷	۳/۹۱	...	۴/۷۱	۷/۴۸	۰/۱۰
...	...	...	...	...	
۵/۲۱	۵/۸۷	...	۷/۰۷	۱۱/۲۲	۰/۱۵
۶/۹۴	۷/۸۲	...	۹/۴۳	۱۴/۹۶	۰/۲۰

1. Monte Carlo N-Particle X-Version

2. Institute of Physics and Engineering in Medicine



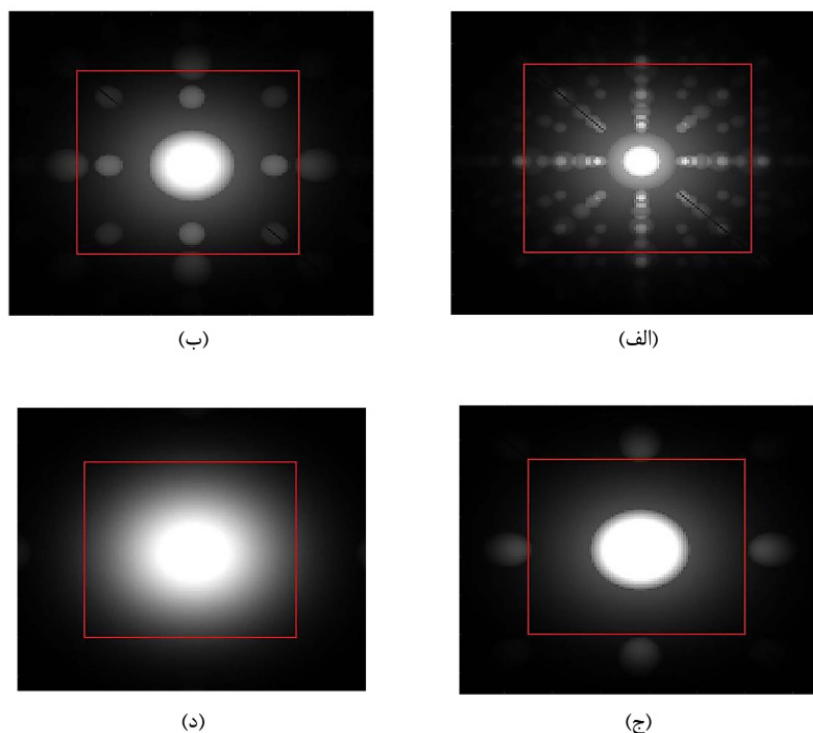
شکل ۳ مقایسه طیف اشعه ایکس ناشی از شبیه‌سازی MCNP (سمت چپ) و گزارش شماره ۷۸ مربوط به IPEM در ولتاژ کاری ۱۵۰ kV (سمت راست)

پرتوهای گاما درون جریان دوفازی و ثبت تصاویر بر روی آشکارساز صفحه تخت صورت پذیرفت. در شکل ۴ برخی از تصاویر اخذ شده از دریچه شاتر چشمه برای مقادیر مختلف شعاع و چگالی حباب نشان داده شده است. در نهایت و پس از اتمام فرآیند شبیه‌سازی، نتایج تغییرات چگالی عددی حباب برحسب کسر حباب به‌ازای مقادیر مختلف شعاع حباب در شکل ۵ نشان داده شد.

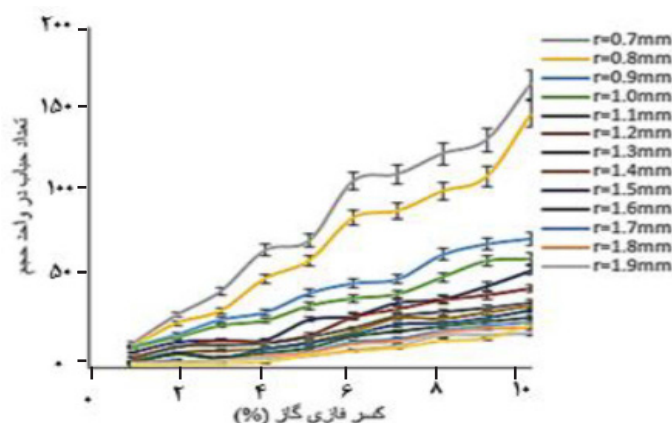
نتایج شبیه‌سازی توافق خوبی با داده طیف مرجع به‌خصوص در انرژی‌های مشخصه و روند تغییرات دارند که نشان می‌دهد شبیه‌سازی از اعتبار لازم برای ادامه روند تحقیق را دارد.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش فرآیند شبیه‌سازی به‌ازای ۱۶۰ چیدمان مختلف حباب درون فاز حامل مایع به‌ازای مقادیر مختلف شعاع و چگالی عددی حباب انجام و ترابرد



شکل ۴ تصاویر دوبعدی اخذ شده به‌ازای کسر حباب ۰/۲ و مقادیر مختلف شعاعی حباب شامل الف) ۰/۵ mm، ب) ۱/۰ mm، ج) ۱/۵ mm و د) ۲/۰ mm



شکل ۵ تغییرات چگالی عددی حباب بر حسب کسر حباب به ازای مقادیر مختلف شعاع حباب

نتیجه گیری

تفکیک مقادیر مختلف کسر حباب با کاهش شعاع حباب افزایش می یابد. همچنین، به ازای مقدار ثابت از کسر حباب، اختلاف مقادیر چگالی عددی متوالی با افزایش شعاع روندی نزولی را نشان می دهد که گویای تفکیک پذیری کمتر در این شرایط است. هرچه کسر حباب بیشتر باشد توان سیستم تصویربرداری پیشنهادی در تفکیک مقادیر مختلف و متوالی شعاع حباب بهبود می یابد. آنچه به عنوان نتیجه پایانی این کار تحقیقاتی مطرح است توانایی روش مذکور در اندازه گیری کسر حباب در جریان دوفازی به خصوص گاز تر عبوری از خطوط لوله اصلی تولید در میدین بالادستی گازی است که در قیاس با روش های مرسوم نظیر فن آوری مبتنی بر چگالی سنجی گاما با استفاده از باریکه عبوری دارای توان تفکیک بالاتری است به گونه ای که مقادیر درصدی پایین ۱٪، ۳٪ و ۵٪ را قابل تفکیک می سازد در حالی که روش مرسوم یادشده فاقد این توانایی و در محدوده دقت های ۱۰٪ $\pm$ است.

در این تحقیق سعی شد با استفاده از کد محاسباتی MCNP امکان ترابرد پرتوهای گامای گسیلی از درون لوله به منظور بررسی قابلیت تصویربرداری از توزیع چگالی حباب در ابعاد مختلف درون سیال مایع عبوری بررسی شود. آنچه در ابتدا و به منظور اعتبارسنجی کد صورت گرفت مقایسه نتایج طیف تولیدی از کد با طیف نمونه مرجع یک تیوب اشعه ایکس بود که از توافق معنادار بین این دو و در نتیجه اعتبار شبیه سازی حکایت دارد. در ادامه و با طرح ایده تصویربرداری مذکور در قالب فایل های ورودی کد تصاویر مختلف از سیال مایع حاوی حباب مطابق با شکل ۴ نشان می دهد امکان تفکیک این تصاویر بر حسب چگالی عددی و شعاع حباب ها وجود دارد. با ترسیم نمودار تغییرات چگالی عددی بر حسب کسر حباب در شعاع های مختلف مطابق با نمودار شکل ۵ می توان این گونه نتیجه گیری کرد که توانایی

مراجع

- [1]. Bombač, A., Rek, Z., & Levec, J. (2019). Void fraction distribution in a bisectional bubble column reactor. *AIChE Journal*, 65(4), 1186-1197. doi.org/10.1002/aic.16534.
- [2]. Al Falahi, F., Mueller, G., & Al-Dahhan, M. (2018). Pebble bed nuclear reactor structure study: A comparison of the experimental and calculated void fraction distribution. *Progress in Nuclear Energy*, 106, 153-161. doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.03.006.
- [3]. Kim, M. S., Choi, J., KIM, Y. C., HWANG, D. G., HONG, S. B., & LEE, K. H. (2007). Measurement of void fraction in hydrogen moderator used for moderator cell of Hanaro cold neutron source. Session IV, 15..

- [4]. Kok, H. V., & Van der Hagen, T. H. J. J. (1999). Design of a simulated void-reactivity feedback in a boiling water reactor loop. *Nuclear technology*, 128(1), 1-11. doi.org/10.13182/NT99-A3009.
- [5]. Wang, X., Chen, Y., Wang, B., Tang, K., & Hu, H. (2020). Sectional void fraction measurement of gas-water two-phase flow by using a capacitive array sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101788. doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101788.
- [6]. Alamoudi, M., Sattari, M. A., Balubaid, M., Eftekhari-Zadeh, E., Nazemi, E., Taylan, O., & Kalmoun, E. M. (2021). Application of gamma attenuation technique and artificial intelligence to detect scale thickness in pipelines in which two-phase flows with different flow regimes and void fractions exist. *Symmetry*, 13(7), 1198. doi.org/10.3390/sym13071198.
- [۷]. بیگ زاده، امیرمحمد، اطاعتی، غلامرضا، آفریده، حسین، اسدی امیرآبادی، اسکندر، و بیات، اسمعیل. (۱۳۹۱). تعیین کسر حباب در سیال دو فاز با استفاده از چگالی سنج گاما. کنفرانس هسته‌ای ایران. SID. <https://sid.ir/paper/824706/fa>
- [8]. Boorboor, S., Fegghi, S. A. H., & Jafari, H. (2023). Design and construction of an LSTM-powered high sampling rate dual-beam gamma densitometer for real-time measurement of the two-phase flow void fraction. *Nuclear Engineering and Design*, 411, 112444. doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112444.
- [9]. Fouladinia, F., Alizadeh, S. M., Gorelkina, E. I., Hameed Shah, U., Nazemi, E., Guerrero, J. W. G., Roshani, G.H. & Imran, A. (2024). A novel metering system consists of capacitance-based sensor, gamma-ray sensor and ANN for measuring volume fractions of three-phase homogeneous flows. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1-27. doi.org/10.1080/10589759.2024.2375575.
- [10]. Swinehart, D. F. (1962). The beer-lambert law. *Journal of chemical education*, 39(7), 333. doi.org/10.1021/ed039p333.
- [11]. Pelowitz, D. B. (2011). MCNPX™ user's manual, version 2.7. 0. la-cp-11-00438. Los Alamos National Laboratory.
- [12]. Martin, C. J., Temperton, D. H., Jupp, T., & Hughes, A. (2019). IPEM topical report: personal dose monitoring requirements in healthcare. *Physics in Medicine & Biology*, 64(3), 035008.