

# شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کسر حباب جریان دوفازی با استفاده از تلفیق تکنیک گاما و آشکارساز صفحه تخت

مجتبی عسکری، امیرمحمد بیگ‌زاده، و محسن شریف‌زاده\*

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

mssharifzadeh@aeoi.org.ir

## 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 زمین‌گرمایشی 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 مونت کارلو 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.

کلیدواژه: اندازه‌گیری، کسر حباب، جریان دوفازی، تکنیک گاما، آشکارساز صفحه تخت، شبیه‌سازی مونت کارلو.

## Simulation and two-phase void fraction measurement utilizing gamma technique in conjunction with flat panel detector

### Abstract:

The presence of bubbles is evident in most two-phase gas-liquid flows. The measurement of void fraction in various industries, such as nuclear, chemical and petrochemical, provides valuable insight into the distribution of phases in a multiphase system. This understanding can lead to the improvements in the design, operation and maintenance of industrial processes in sectors like oil and gas, petrochemicals, chemical reactors, heat exchangers, and geothermal power plants. In many cases, bubbles are evenly distributed in the liquid, creating uncertainty in measurements. To address this issue, this research utilized a wide gamma beam in conjunction with a flat panel detector to minimize systematic errors caused by fluctuations in bubble placement along the path of the gamma ray passing through the flow tube. Next, in the Monte Carlo simulation environment, the numerical density of the bubble is calculated in a fixed volume. Using the calibration chart, the fraction of the bubble is determined in terms of

the numerical density for various bubble radius values. After validating the code by comparing the results of the spectrum produced from the code with the spectrum of a reference sample from an X-ray tube, the graph displaying numerical density changes in terms of bubble fraction at different radii demonstrates the method's ability to distinguish varying amounts of bubble fraction for different radii.

Keywords: Measurement, Void fraction, Two-phase flow, Gamma technique, Flat panel detector, Monte Carlo simulation.

## ۱- مقدمه

اندازه‌گیری کسر حباب در صنایع مختلف مانند هسته ای، 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 گرمایی 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 دو فازی رایج هستند شود.

در تحقیقی توسط بمباک و همکارانش در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت نشان داده شد که اندازه‌گیری کسر حباب در لوب‌های راکتور هسته ای برای ایمنی و کارایی در تولید انرژی هسته ای بسیار مهم است [۱]. کسر حباب به نسبت حجم فضای خالی (مانند گاز یا بخار) به حجم کل در یک جریان دو فازی اشاره دارد که به ویژه در راکتورهای هسته‌ای که خنک‌کننده مایع در کنار فاز گاز/بخار به صورت 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 [۲]، و شار حرارتی بحرانی و کند کنندگی نوترون [۳] تأثیر می‌گذارند که همگی برای حفظ عملکرد ایمن و پایدار راکتور حیاتی هستند [۴].

در تحقیقی توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از آرایه‌ای از حسگرهای ظرفیت الکتریکی کسر خلأ در دوفازی آب-گاز اندازه‌گیری شد [۵]. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۲۱ العمودی و همکارانش با ترکیب تکنیک 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 [۶]. در تحقیقی که توسط بیگزاده و همکاران در سال ۱۳۹۱ صورت پذیرفت مقدار کسر حباب در سیال دو فازی با استفاده از چگالی سنج 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 به صورت افزایشی به میزان حباب ایجاد شده در لوله نسبت داده شد [۷].

در دسته دیگری از تحقیقات با استفاده از تلفیق تکنیک گاما و هوش مصنوعی پارامتر مهم کسر حباب مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. بوربور و همکاران در سال ۲۰۲۳ یک چگالی‌سنج هوشمند با امکان نمونه‌گیری و در ادامه اندازه‌گیری کسر حباب با استفاده از تلفیق گامای دوباریکه و شبکه عصبی را پیشنهاد دادند [۸]. در تحقیقی دیگر، فولادی‌نیا و همکاران در سال ۲۰۲۳ نیز از تلفیق شبکه عصبی مصنوعی و تکنی‌های گاما و ظرفیت الکتریکی برای اندازه‌گیری کسر خلأ درون جریان سه‌فازی بهره‌برداری کردند [۹].

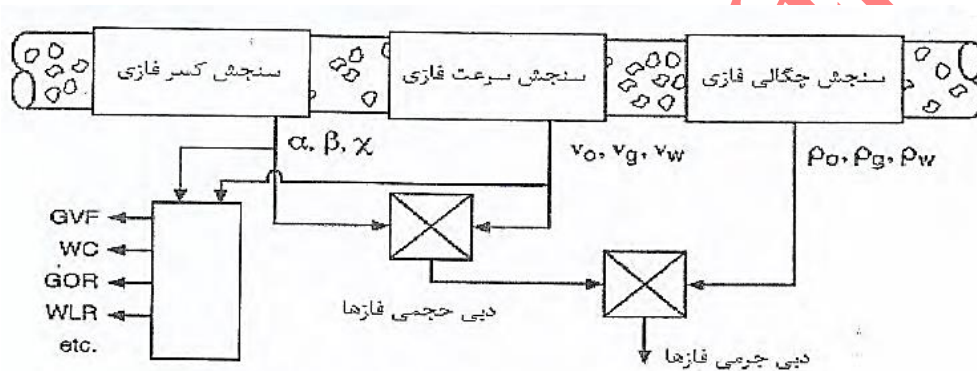
در این کار تحقیقاتی هدف اندازه‌گیری کسر حباب با استفاده از تکنیک تضعیف گاما در تلفیق با بکارگیری آشکارساز صفحه تخت است. آنچه این مطالعه را متمایز از کارهای پیشین می‌کند استفاده از فرایند تصویربرداری به جای خوانش شدت گامای عبوری از لوله حاوی سیال دوفازی است که این امکان را می‌دهد با دقت بهتر و به‌ازای گستره وسیعی از کسر حباب اندازه‌گیری کسرفازی مولفه‌های جریان دوفازی گاز-مایع صورت پذیرد.

## ۲- بیان مسئله

برای اندازه‌گیری دبی جریان دوفازی از روش استنتاجی استفاده می‌شود. در مورد سنجشگرهای تجاری شده این روش بر مبنای اندازه‌گیری کسرفازی مولفه‌های جریان و سرعت به‌صورت همزمان و با استفاده از فرمولاسیون زیر است:

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

$M$  دبی جرمی،  $A$  سطح مقطع لوله،  $\rho_i$  چگالی،  $\alpha_i$  کسرفازی، و  $v_i$  سرعت مولفه  $i$  م هستند. اساس عملکردی این روش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک روش استنتاجی در اندازه‌گیری جریان چندفازی.

همانگونه که در شکل بالا مشهود است یکی از واحدهای مهم بخش اندازه‌گیری کسرفازی است. در این سامانه و با استفاده از قانون تضعیف نمایی بیر-لمبرت شدت پرتوهای گاما عبوری از محتویات درون لوله با استفاده از معادله زیر ثبت می‌شود [۱۰]:

$$I = I_0 B \exp\left(-d \sum_{i=1}^2 \alpha_i \mu_i\right) \quad (2)$$

که  $I$  و  $I_0$  به ترتیب شدت خوانش به ازای شرایط پر شدگی مخزن توسط هر کدام از مولفه‌های جریان،  $B$  ضریب انباشت ناشی از مشارکت پرتوهای پراکنده در خوانش نهایی،  $d$  قطر داخلی لوله، و  $\alpha_i$  و  $\mu_i$  به ترتیب کسرفازی و ضریب تضعیف خطی مولفه  $i$  م می‌باشند. در شرایطی که به‌واسطه کاربرد باریکه‌ساز قلمی<sup>۱</sup> 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 بکارگیری یک باریکه‌ساز پهن<sup>۲</sup> اطراف چشمه رادیواکتیو قابل نصب درون لوله با یک پروب و نزدیک دیواره و آشکارساز صفحه تخت<sup>۳</sup> بیرون از لوله و مقابل آن به‌منظور

<sup>۱</sup>Pencil-beam Collimator

<sup>۲</sup>Fan-beam Collimator

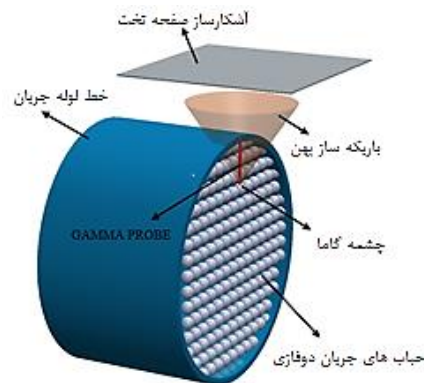
<sup>۳</sup>Flat Panel Detector

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 به ازای اندازه‌های مختلف حباب‌هایی که به‌طور همگن درون لوله توزیع شده اند می‌توان کسر فازی حباب<sup>۴</sup> را محاسبه و گزارش کرد.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳.۱ تنظیمات فرایندی

چیدمان چشمه و آشکارساز در سیستم ارائه شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



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

همانگونه که از شکل پیداست ابتدا با کمک یک پروب چشمه رادیواکتیو درون لوله و در فاصله اندکی از دیواره قرار داده می‌شود. در ادامه آشکارساز صفحه تخت بیرون از لوله و نزدیک دیواره به‌گونه‌ای قرار داده می‌شود که موقعیت مکانی چشمه در مرکز آن و متقارن باشد. 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 گستره‌ای بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر 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 به عنوان یکی از زمینه‌های مورد توجه جهت محاسبه کسر حباب درون جریان دوفازی خروجی از سیستم‌های جداساز جریان سه فازی بکارگیری شود. 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 بکارگیری بر روی خط لوله حاوی فاز عمده مایع است که به سبب عدم توانایی جداساز در حذف ۱۰۰ درصدی فاز گازی از آن دارای مقادیر اندک حباب‌های گازی است که در فشار و دمای بالا به صورت توزیعی همگن با سیال مایع در جریان است.

#### ۳.۲ شبیه‌سازی مونت کارلو

فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو در محیط نرم‌افزار محاسباتی MCNPX 2.7.0<sup>۵</sup> 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

Gas Void Fraction<sup>f</sup>

<sup>5</sup> Monte Carlo N-Particle X-version

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.

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

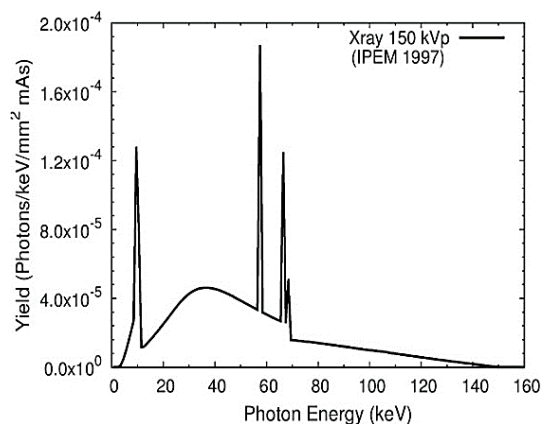
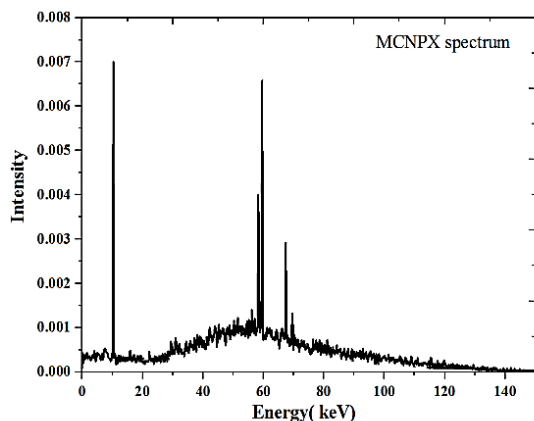
کسر حباب (۰.۵)					
۱۰	۷	...	۴	۱	
۱/۷۴	۱/۹۶	...	۲/۳۶	۳/۷۴	۰/۵
۳/۴۷	۳/۹۱	...	۴/۷۱	۷/۴۸	۰/۱۰
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۵/۲۱	۵/۸۷	...	۷/۰۷	۱۱/۲۲	۰/۱۵
۶/۹۴	۷/۸۲	...	۹/۴۳	۱۴/۹۶	۰/۲۰

به‌منظور تفکیک حباب از مایع از چشمه گامای کبالت-۶۰ با انرژی میانگین گسیلی ۱/۲۵ مگا الکترون‌ولت استفاده شد. انتخاب این چشمه از نقطه‌نظر سطح مقطع مناسب ایجاد تمایز در برهمکنش با دو مولفه هوا و مایع (کنتراست)، توانایی عبور از ضخامت لوله و رسیدن سهم بسزایی 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 ۰/۵ میلی‌متر با پیکسل‌هایی با ابعاد ۰/۱۴۶ در ۰/۱۴۶ میلی‌متر پوشانده شده بود. با انجام کلیه ملاحظات ابعادی و هندسی، فرایند شبیه‌سازی برای هر فایل ورودی و با ثبت خروجی مربوط به تالی TMESH در بازه زمانی ۲۱۶۰ دقیقه انجام شد.

#### ۴. نتایج

##### ۴.۱ نتایج اعتبارسنجی

در ابتدا و به‌منظور اعتبارسنجی کد مونت‌کارلو طیف انرژی گسیلی توسط یک تیوب ایکس استاندارد تولید و با نمونه مرجع مقایسه گردید. مرجع مورد استفاده در این بخش گزارش شماره ۷۸ مربوط به <sup>6</sup>IPEM است که حاوی طیف اشعه ایکس برخی دستگاه‌های ماموگرافی و رادیولوژی است [۱۲]. در این بخش یک تیوب اشعه ایکس با ولتاژ ۱۵۰ کیلوولت و آند تنگستن شبیه‌سازی و با داده مرجع مقایسه گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است.

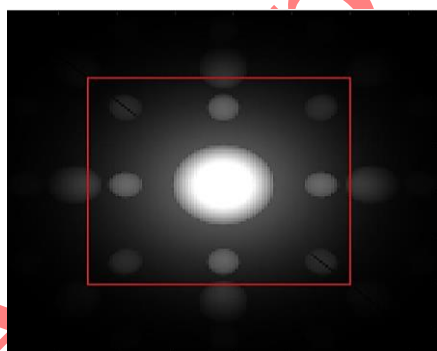


شکل ۳. مقایسه طیف اشعه ایکس ناشی از شبیه‌سازی MCNP و گزارش شماره ۷۸ مربوط به IPEM در ولتاژ کاری ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت.

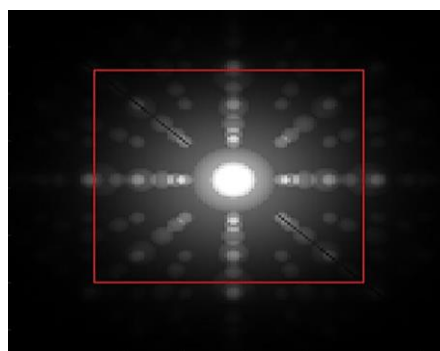
نتایج شبیه‌سازی توافق خوبی با داده طیف مرجع به‌خصوص در انرژی‌های مشخصه و روند تغییرات دارند که نشان می‌دهد شبیه‌سازی از اعتبار لازم برای ادامه روند تحقیق را دارد.

#### ۴.۲ نتایج شبیه‌سازی

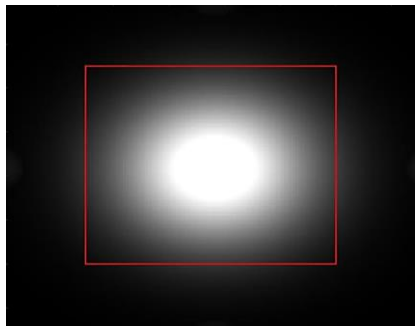
در این بخش فرایند شبیه‌سازی به‌ازای ۱۶۰ چیدمان مختلف حباب درون فاز حامل مایع به‌ازای مقادیر مختلف شعاع و چگالی عددی حباب انجام و تراپرد پرتوهای گاما درون جریان دوفازی و ثبت تصاویر بر روی آشکارساز صفحه تخت صورت پذیرفت. در شکل ۴ برخی از تصاویر اخذ شده از دریچه شاتر چشمه برای مقادیر مختلف شعاع و چگالی حباب نشان داده شده است.



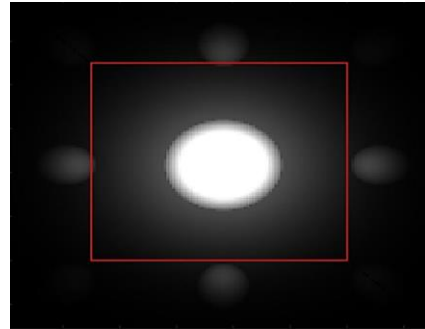
(ب)



(الف)



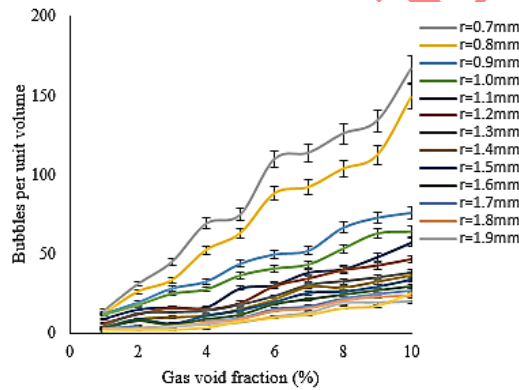
(د)



(ج)

شکل ۴. تصاویر دوبعدی اخذشده به‌ازای کسر حباب ۲٪ و مقادیر مختلف شعاعی حباب شامل الف) ۰/۵ میلی‌متر، ب) ۱/۰ میلی‌متر، ج) ۱/۵ میلی‌متر، و د) ۲/۰ میلی‌متر.

در نهایت و پس از اتمام فرایند شبیه‌سازی، نتایج تغییرات چگالی عددی حباب برحسب کسر حباب به‌ازای مقادیر مختلف شعاع حباب در شکل ۵ نشان داده شد.



شکل ۵. تغییرات چگالی عددی حباب برحسب کسر حباب به‌ازای مقادیر مختلف شعاع حباب.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد با استفاده از کد محاسباتی MCNP امکان ترابرد پرتوهای گامای گسیلی از درون لوله به‌منظور 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 شبیه‌سازی حکایت دارد. در ادامه و با طرح ایده تصویربرداری مذکور در قالب فایل‌های ورودی کد تصاویر مختلف از سیال مایع حاوی حباب مطابق با شکل ۴ نشان می‌دهد امکان تفکیک این تصاویر برحسب چگالی عددی و شعاع حباب‌ها وجود دارد.

با ترسیم نمودار تغییرات چگالی عددی برحسب کسر حباب در شعاع‌های مختلف مطابق با نمودار شکل ۵ می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که توانایی تفکیک مقادیر مختلف کسر حباب با کاهش شعاع حباب افزایش می‌یابد. همچنین، به‌ازای مقدار ثابت از کسر حباب، اختلاف مقادیر چگالی عددی متوالی با افزایش شعاع روندی نزولی را نشان می‌دهد که گویای تفکیک‌پذیری کمتر در این شرایط است. هرچه کسر حباب بیشتر باشد توان سیستم تصویربرداری پیشنهادی در تفکیک مقادیر مختلف و متوالی شعاع حباب بهبود می‌یابد.

آنچه به عنوان نتیجه پایانی این کار تحقیقاتی مطرح است توانایی روش مذکور در اندازه‌گیری کسر حباب در جریان دوفازی بخصوص گاز تر عبوری از خطوط لوله اصلی تولید در میادین بالادستی گازی است که در قیاس با روش‌های مرسوم نظیر تکنیک مبتنی بر چگالی سنجی گاما با استفاده از باریکه عبوری دارای توان تفکیک بالاتری است به گونه‌ای که مقادیر درصدی پایین ۱٪، ۳٪ و ۵٪ را قابل تفکیک می‌سازد در حالی که روش مرسوم یادشده فاقد این توانایی و در محدوده دقت‌های  $\pm 10\%$  است.

مراجع

- [1] Bombač, Andrej, Zlatko Rek, and Janez Levec. "Void fraction distribution in a bisectonal bubble column reactor." *AIChE Journal* 65.4 (2019): 1186-1197.
- [2] Al Falahi, Fadha, Gary Mueller, and Muthanna Al-Dahhan. "Pebble bed nuclear reactor structure study: A comparison of the experimental and calculated void fraction distribution." *Progress in Nuclear Energy* 106 (2018): 153-161.
- [3] Kim, Myong-Seop, et al. "Measurement of void fraction in hydrogen moderator used for moderator cell of Hanaro cold neutron source." *Session IV* (2007): 15.
- [4] Kok, H. V., and T. H. J. J. Van der Hagen. "Design of a simulated void-reactivity feedback in a boiling water reactor loop." *Nuclear technology* 128.1 (1999): 1-11.
- [5] Wang, Xiaoxin, et al. "Sectional void fraction measurement of gas-water two-phase flow by using a capacitive array sensor." *Flow Measurement and Instrumentation* 74 (2020): 101788.
- [6] Alamoudi, Mohammed, et al. "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 (2021): 1198.
- [7] بیگ زاده، امیرمحمد، اطاعتی، غلامرضا، آفریده، حسین، اسدی امیرآبادی، اسکندر، و بیات، اسمعیل. (۱۳۹۱). تعیین کسر حباب در سیال دو فازی با استفاده از چگالی سنج گاما. کنفرانس هسته ای ایران. SID. <https://sid.ir/paper/824706/fa>
- [8] Boorboor, S., S. A. H. Fegghi, and H. Jafari. "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 (2023): 112444.
- [9] Fouladinia, Farhad, et al. "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* (2024): 1-27.
- [10] Swinehart, Donald F. "The beer-lambert law." *Journal of chemical education* 39, no. 7 (1962): 333.
- [11] Pelowitz, Denise B. "MCNPX™ user's manual, version 2.7. 0. la-cp-11-00438." Los Alamos National Laboratory (2011).
- [12] Martin, C. J., et al. "IPEM topical report: personal dose monitoring requirements in healthcare." *Physics in Medicine & Biology* 64.3 (2019): 035008.