

اندازه‌گیری کسر فازی در مخلوط آب-گازوئیل با استفاده از چگالی سنج گاما در تلفیق با دو مکانیزم همگن‌سازی متفاوت استاتیک و دینامیک

محسن شریف‌زاده*، حسین خلفی^۱، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای • سید حسن هاشم‌آبادی^۲، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

از اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی تا کنون اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی از موضوعات بسیار مهم در صنایع نفت و گاز بوده است. اندازه‌گیری جریان دوفازی آب-نفت اغلب در جریان‌سنج‌هایی با مکانیزم تفکیک سه‌فازی آب-نفت-گاز به دوفازی آب-نفت و تک‌فازی گاز اهمیت خود را نشان می‌دهد. در این پژوهش روش گامای عبوری جهت اندازه‌گیری درصد حجمی جریان دوفازی مذکور استفاده شد. استراتژی جانبی مورد استفاده جهت حذف مشکل وابستگی نتایج به رژیم جریان، استفاده از سیستمی همگن‌ساز جهت آماده‌سازی جریان قبل از اندازه‌گیری است. بنابراین لوپ طراحی و ساخته شده TP-FHL به‌عنوان لوپ همگن‌ساز جریان دوفازی مطرح و عملکرد آن به کمک شمارش گامای عبوری چشمه‌ی رادیواکتیو Cs-۱۳۷ اعتبارسنجی شد. سپس جهت افزایش بهبود کیفیت همگن‌سازی، سیستم معادل استاتیکی جریان چندفازی SEMPF با استفاده از محیط شبیه‌ساز مونت کارلو MCNP تأیید شد که از نوآوری‌های این پژوهش به حساب می‌آید. در انتها با تغذیه‌ی درصدهای حجمی مختلف جریان دوفازی آب-گازوئیل به لوپ و تزریق "به معادل استاتیکی، امکان مقایسه‌ی عملکرد این دو سیستم جهت آماده‌سازی بستری همگن و اندازه‌گیری کسر فازی مؤلفه‌های جریان دوفازی با سنجه‌ی گامای مذکور فراهم آمد. نتایج نشان‌دهنده‌ی قابلیت زیاد معادل استاتیکی در آماده‌سازی شرایط همگن جهت انجام آزمایش‌های مورد نظر است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۳/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۵/۱۲

واژگان کلیدی:

جریان دوفازی، جریان دوفازی همگن، جریان دوفازی آب-نفت، لوپ همگن‌ساز، معادل استاتیکی جریان چندفازی، روش تضعیف گامای عبوری

مقدمه

مراحل آزمایش و کالیبراسیون هر جریان‌سنج بر اساس شرایط استاندارد است. با توجه به متغیرهای مؤثر در هر اندازه‌گیری باید شرایطی مشابه با شرایط میدین واقعی بر اساس متغیرهای مربوطه شبیه‌سازی گردد. اما کالیبراسیون سامانه‌ی پیشنهادی این پژوهش در شرایط ساده‌تری امکان‌پذیر است و به راحتی امکان اندازه‌گیری صحیحی را فراهم می‌آورد.

در این پژوهش جهت ایجاد شرایط مشابه میدان، در مراحل کالیبراسیون، لوپ همگن‌ساز و معادل استاتیکی کافی است و در واقع آماده‌سازی درصدهای حجمی مختلف از مخلوط‌های دوفازی آب-نفت در یک رژیم جریانی همگن فراهم است. سپس با قرارگیری سنجه‌ی گاما روی لوله قابلیت سنجه‌ی مورد نظر جهت اندازه‌گیری درصد حجمی مؤلفه‌های جریان بررسی خواهد شد. از آنجا که هدف این کار تنها بررسی توانایی تفکیک درصدهای مختلف مؤلفه‌های جریان است. به خوبی می‌توان از برقراری شرایط مناسب در این لوپ‌های آزمایشگاهی استفاده کرد.

۱- بیان مسأله‌ی اندازه‌گیری

در این پژوهش، اندازه‌گیری نرخ جریان چندفازی با استفاده از

جریان چندفازی به عنوان جریان همزمانی از فازهای جامد، مایع و گاز است که از یک خط لوله می‌گذرد پدیده‌ای متداول در صنایع مختلف نظیر رآکتورهای شیمیایی و نیروگاه‌های قدرت است که به صورت ویژه در صنایع نفت و گاز اهمیت فراوانی دارد. در خطوط لوله‌ی جریانی چاه‌های نفت و گاز سیالات تولیدی که اغلب شامل گازهای هیدروکربنی، مایعات هیدروکربنی، آب و جامدات هستند جریان دارند [۱]. استفاده از فن‌آوری سنجه‌های چندفازی، در استخراج از میدین نفتی و گازی حاشیه‌ی ساحل بسیار حائز اهمیت است که علاوه بر افزایش سرعت بازگشت سرمایه، باعث کاهش هزینه‌ی مصرفی کل نیز می‌شود [۲].

اگرچه در سال‌های اخیر راه‌حل‌های متعددی جهت دستیابی به یک جریان سنج‌ایده‌آل ارائه شده، اما تا کنون هیچ نمونه‌ی تجاری ساخته نشده که خصوصیات ایده‌آلی نظیر دقت زیاد، استقلال از اثرات تداخل و برخورداری از داده‌های قابل اطمینان را پوشش دهد و به عبارتی وابستگی به رژیم جریان نداشته و قابل استفاده در محدوده‌ی وسیعی از نسبت‌های متنوع مؤلفه‌های سیال باشد [۳]. آنچه بسیار حائز اهمیت است انجام

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mssharifzadeh@aeoi.org.ir)

همگن‌ساز استفاده می‌شود که تمامی رژیم‌های قابل‌تحقق به‌جز رژیم همگن حذف گردد و در فرآیند اندازه‌گیری درصد حجمی، از شمارش گامای عبوری از جریان چندفازی استفاده شود. در واقع همگن‌سازی جریان قبل از اندازه‌گیری، یک استراتژی هوشمندانه جهت توزیع یکنواخت چگالی مخلوط در کل سطح مقطع لوله است که منجر به کاهش تعداد و ساده‌سازی روش‌های مورد نیاز در اندازه‌گیری کسر فازی می‌شود. با استفاده از این مکانیزم نه تنها با حذف لغزش بین فازها در خط لوله‌ی جریان سرعت مؤلفه‌های جریان برابر می‌شود، بلکه با حذف تمامی رژیم‌های جریانی به‌جز رژیم همگن، اندازه‌گیری، مستقل از رژیم جریان عبوری خواهد بود و تنها با استفاده از یک چشمه و آشکارساز (به‌جای آرایه‌ای از آشکارسازها) مشابه روش نخست را شاهد خواهیم بود [۱۱-۸]. توضیح اینکه هسته‌های رادیواکتیو در گذر زمان واپاشی می‌کنند که این فرآیند منجر به گسیل برخی ذرات زیراتمی به بیرون می‌شود که از جمله این ذرات، فوتون‌های گاما هستند. شدت پرتو گاما در عبور از مخلوطی چندفازی و همگن تضعیف می‌شود که این فرآیند از قانون تضعیف نمایی^۳ تبعیت می‌کند:

$$I_{mix} = I_0 B \exp\left(-d \left(\sum \alpha_i \mu_i\right) / 100\right) \quad (2)$$

ضرایب تضعیف خطی مؤلفه‌های جریان طی فرایند کالیبراسیون در حالتی که کل لوله از هر فاز به تنهایی پر شده باشد، توسط معادله‌ی ۲- اندازه‌گیری خواهد شد. یک کولیماسیون قلمی مناسب توسط حفاظ‌های سربی حول چشمه و آشکارساز سبب می‌شود تا فقط فوتون‌های عبوری وارد آشکارساز شوند و در نتیجه عامل هندسی B برابر یک شود. پس از تقلیل معادله‌ی ۲- به حالت دوفازی نفت-آب و با برقراری شرایط هندسی مناسب جهت حذف عامل هندسی، با فرض اینکه مقطع لوله صرفاً توسط این دو مؤلفه پر شده باشند، مقادیر کسر حجمی به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \alpha_{oil} = \frac{\ln(I_{water}/I_{mix})}{\ln(I_{water}/I_{oil})} * 100 \\ \alpha_{water} = 100 - \alpha_{oil} \end{cases} \quad (3)$$

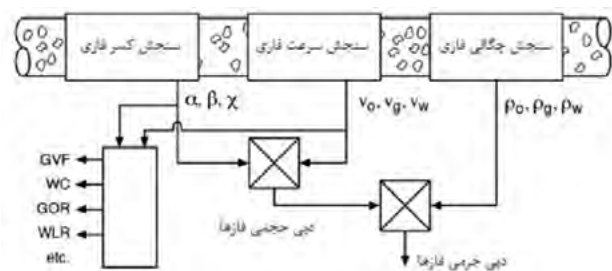
از آنجا که در مرحله‌ی کالیبراسیون امکان داشتن مخزنی پر از پودر به سبب مشکل انسداد لوپ غیرممکن است، در نتیجه کالیبراسیون به‌جای ۱۰۰٪ حجمی پودر با حداکثر کسر حجمی مجاز انجام می‌گیرد که منجر به استفاده از شکل توسعه‌یافته‌ای از معادله‌ی ۳- جهت محاسبه‌ی مقادیر کسر حجمی فازها خواهد بود:

یک روش استنتاجی شکل-۱ به اندازه‌گیری همزمان مؤلفه‌های سرعت، درصدهایی از سطح مقطع لوله از هر فاز و نیز چگالی تک‌تک فازها تبدیل می‌شود. نرخ حجمی این جریان سه‌فازی به‌صورت زیر قابل‌محاسبه است:

$$Q = A(\alpha_{gas}V_{gas} + \alpha_{water}V_{water} + \alpha_{oil}V_{oil})/100 \quad (1)$$

با توجه به اینکه همواره مجموع مقادیر درصد مقطعی مؤلفه‌ها (یعنی کسری از مساحت سطح مقطع خط لوله که هر فاز اشغال کرده است) ۱۰۰ درصد است. بنابراین تنها نیاز به اندازه‌گیری دو مؤلفه برحسب درصد مقطع خط لوله‌ی عبور جریان (معمولاً درصدهای گاز و آب) خواهد بود. تحلیل جریان‌های دوفازی، مشابه مباحث بالاست؛ با این تفاوت که در اینجا تنها باید یک مؤلفه درصد مقطع اندازه‌گیری شود.

جهت رفع مشکل وابستگی اندازه‌گیری کسر فازی به رژیم جریان عبوری در استفاده از روش گامای عبوری، از یک



۱ | راه‌حل استنتاجی برای مسأله‌ی اندازه‌گیری جریان سه‌فازی [۷]



۲ | نماهایی از لوپ (A) مخزن آماده‌سازی سوسپانسیون/امولسیون، (B) مخزن همگن‌سازی، (C) آشکارساز سوسوزن، (D) حفاظ سربی چشمه‌ی رادیواکتیو گاما، (E) الکتروموتورها، (F) بورد الکترونیکی کنترل دستگاه. با تضمین حضور یک مخلوط دوفازی همگن امکان اندازه‌گیری کسر حجمی فازها با استفاده از روش گامای عبوری فراهم می‌شود.

مخلوط بین این مخزن و یک مخزن ۴ اینچی همگن سازی، امکان دستیابی به مخلوطی دوفازی و کاملاً همگن در هر دو جهت شعاعی و محوری فراهم می‌گردد.

در اندازه‌گیری کسر حجمی مؤلفه‌های مخلوط دوفازی با فازهای غیرقابل انحلال در یکدیگر، با استفاده از روش گامای عبوری با باریکه‌ی قلمی، تنها در شرایطی که توزیع همگن یک مخلوط در کل سطح مقطع لوله فراهم شده باشد، مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر از قبل آماده‌سازی شده در صدها هم‌خوانی خواهند داشت؛ بنابراین در این تحقیق جهت اعتبارسنجی عملکرد همگن‌سازی لوب، مقادیر مشخصی از کسر حجمی مخلوط دوفازی پودر سنگ آهن-آب آماده و به لوب تغذیه شده در ادامه با شمارش گامای عبوری و با استفاده از معادله‌ی ۴- مقادیر مدنظر اندازه‌گیری می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از اندازه‌گیری با درصدهای از قبل آماده شده، صحت عملکرد همگن‌سازی بررسی گردید. در اینجا از تضعیف باریکه‌ی گامای چشمه‌ی Cs-۱۳۷ با اکتیویته ۲۳ میلی کوری استفاده شد. این چشمه‌ی رادیواکتیو به‌عنوان یک منبع واپاشی فوتون‌های گاما با انرژی 662keV در محدوده‌ای از انرژی عمل می‌کند که سطح مقطع غالب برهم‌کنش، از نوع پراکندگی کامپتون است. از آنجا که پراکندگی کامپتون فوتون‌ها از ماده به‌شدت به چگالی وابسته است در نتیجه با استفاده از این چشمه‌ی رادیواکتیو قادر خواهیم بود مؤلفه‌های جریان دوفازی با اختلاف چگالی زیاد بین فازها (پودر سنگ آهن-آب) را به‌خوبی از یکدیگر تفکیک کنیم. در ادامه از آشکارساز سوسوزن ۲ اینچی از نوع EPIC NaI (TI) متصل به تیوب تکثیرکننده CR-169 Hamamatsu جهت جمع‌آوری گاماها عبوری از ماده استفاده گردید. با استفاده از آمپلی فایر از جنس ORTEC 570، آنالیزور تک کاناله‌ی SCA 550A و در انتها شمارنده‌ی Timer/counter 536 گاماها جمع‌آوری شده توسط آشکارساز مذکور به آهنگ شمارش تبدیل و ثبت گردید. در شکل ۴- شماتیکی از سیستم شمارشی مذکور نشان داده شده است.

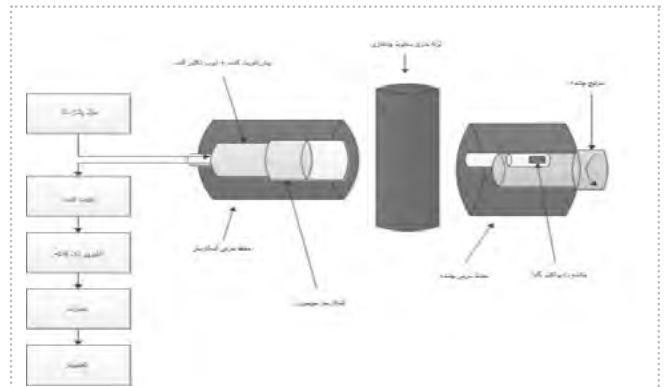
۳- سیستم همگن‌سازی استاتیک SEMPF^o

همان‌گونه که در شکل ۵- نشان داده شده مکانیزم استاتیک ارائه شده در این تحقیق امکان چینی درصدهای مقطعی مشخص از مؤلفه‌های جریان چندفازی به‌صورت همگن در کل سطح مقطع خط لوله‌ی جریان را فراهم می‌آورد. از قابلیت‌های مضاعف و حائز اهمیت این سیستم در قیاس با سیستم دینامیکی فوق، امکان ایجاد محیط همگن دوفازی برای مخلوط‌های گاز-مایع و نیز محیط همگن سه‌فازی برای مخلوط‌های گاز-مایع-مایع است؛ نظیر سیستم هوا-نفت-آب جهت انجام آزمایش‌هایی

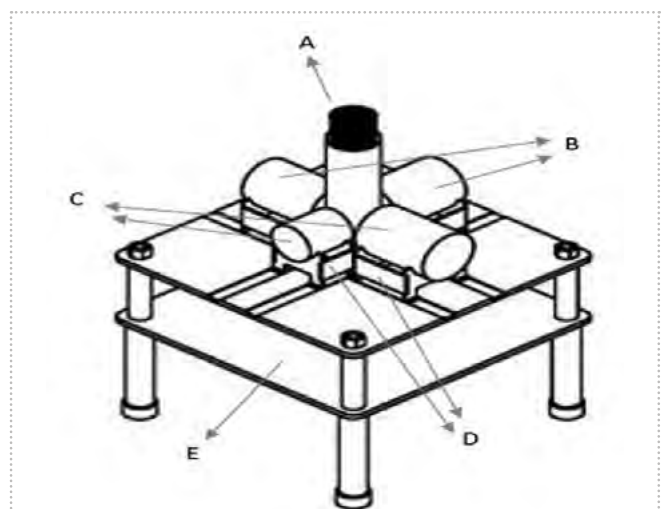
$$\begin{cases} \alpha_{\text{powder}} = t \times \frac{\ln(I_{\text{mix}}/I_{\text{water}})}{\ln(I_t/I_{\text{water}})} \\ \alpha_{\text{water}} = 100 - \alpha_{\text{powder}} \end{cases} \quad (4)$$

۲- سیستم همگن‌سازی دینامیک TPFHL^o

همان‌گونه که در شکل ۲- نشان داده شده سیستم همگن‌سازی مورد استفاده در این تحقیق امکان ایجاد حداکثر اغتشاش لازم جهت حصول مخلوط دوفازی همگن را پیش‌روی باریکه‌ی گامای عبوری فراهم می‌سازد. با استفاده از دو ورودی جداگانه، مؤلفه‌های جریان دوفازی ابتدا در مخزن ۱۰ اینچی آماده‌سازی می‌شوند و طی فرآیند اختلاط به شکل یک مخلوط جدا از کف (برای حالتی که فاز پخش شده تمایل به ته‌نشینی دارد) یا یک مخلوط جدا از سطح (برای حالتی که فاز پخش شده تمایل به تعلیق دارد) تبدیل خواهند شد. در ادامه و با گردش



شماتیک سیستم شمارش مورد استفاده جهت تبدیل فوتون‌های گامای عبوری از ماده به آهنگ شمارش نهایی



سیستم معادل استاتیکی جریان چندفازی SEMPF؛ مجموعه‌ی آنها (A) و لوله‌ی پلیسی‌گلس، (B) حفاظ‌های سربی آشکارسازهای سوسوزن، (C) حفاظ‌های سربی چشمه‌های رادیواکتیو، (D) پایه‌های متحرک حفاظ‌های سربی و (E) نگهدارنده‌ی سیستم

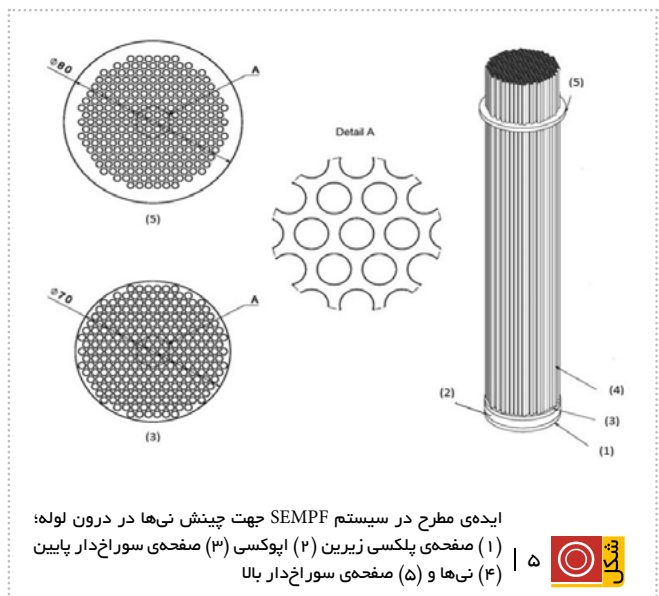


قلمی از پرتوهای گاما از لوله و محتوای جریانی آن عبور داده می‌شود و آنچه به‌عنوان داده‌ی نهایی ثبت می‌شود در واقع میانگینی از شمارش‌های مربوط به زوایای مختلف قرارگیری لوله‌ی جلوی باریکه‌ی گاما و در نتیجه شمارش مربوط به یک توزیع همگن ایده‌آل از درصد مقطعی مورد نظر تمامی مؤلفه‌های جریان دوفازی خواهد بود.

همان‌گونه که در شکل ۶- نشان داده شده تعداد ۲۵۳ عدد نی آشامیدنی از جنس پلی‌پروپیلن با استفاده از یک آرایش شش‌ضلعی در درون لوله‌ی پلکسی‌گلسی با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۷ و ۸ سانتی‌متر تعبیه شده است. درصد مقطعی اشغال شده توسط هر نی برابر با ۱۰۵۷/۰٪ و درصد مقطعی اشغال شده توسط فضای بینایی نی‌ها در درون لوله که همواره در آزمایش‌ها توسط فاز حامل پر خواهد شد برابر با ۷۳/۲۵۷۷٪ به‌دست آمد.

جهت بررسی صحت عملکرد این سیستم با استفاده از شبیه‌ساز مونت کارلو، تراپرد پرتوهای گامای عبوری از مخلوط دوفازی همگن آب-هوا به‌ازای درصدهای مقطعی مختلف و در دو الگوی متفاوت ارائه شده؛ یکی توسط معادل استاتیکی و دیگری توسط مکانیزم پیش‌فرض موجود در کد مونت کارلو MCNP با هم مقایسه گردید. درصدهای مقطعی شبیه‌سازی شده فاز پخش شده در شبیه‌سازی‌ها شامل ۵/۰۷٪، ۱۰/۱۵٪، ۱۵/۲۲٪، ۲۰/۲۹٪ و ۲۶/۷۴٪ است. در شکل ۷- الگوی مورد استفاده در تزریق مؤلفه‌های جریان در معادل استاتیکی به‌ازای درصدهای مقطعی فوق نشان داده شده است. مکانیزم پیش‌فرض مورد استفاده در کد نیز بر پایه‌ی تعریف اولیه‌ی یک ماده‌ی مخلوط متشکل از مؤلفه‌های جریان و متناسب با درصد وزنی هر کدام از این

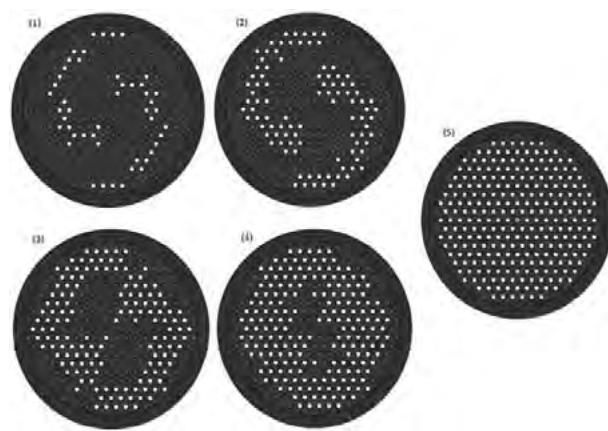
در حوزه‌ی اندازه‌گیری کسر فازی جریان‌های متداول در صنایع نفت و گاز که به‌عنوان بخشی از اهداف عملیاتی آینده خواهد بود. اساس کار در این سیستم بدین صورت است که با تعبیه‌ی تعداد زیادی نی درون لوله امکان ایجاد مقادیر مختلف درصد مقطعی مخلوط‌های چندفازی مهیا می‌گردد و با استفاده از تزریق فازهای مختلف جریان در نی‌ها و اختصاص فضای بینایی آنها در لوله، جریان شبیه‌سازی می‌شود. از آنجا که نوآوری روش مورد استفاده رسیدن به مخلوطی همگن است در ابتدا با چینی بهینه از مؤلفه‌های جریان، توزیعی متقارن در جهت شعاعی به‌دست می‌آید. برای شبیه‌سازی تقارن محوری جریان از چرخش کل مجموعه لوله و نی‌ها حول لوله در فضای بینایی سنجی گامای حول لوله استفاده شد. همواره باریکه‌ای



شکل ۵

۱ | مقادیر درصد حجمی آماده شده‌ی پودر سنگ آهن-آب (PPVF)، مقادیر شمارش میانگین گامای عبوری (ACR) به‌همراه انحراف معیار آنها، مقادیر شمارش اصلاح شده‌ی (CCR) و مقادیر درصدهای حجمی محاسبه شده‌ی نهایی (CPVF) [۱۲]

CPVF(%)	CCR (counts/sec)	ACR (counts/sec)	PPVF (%)
۱/۲±۰	۶۳±۴۳۶۰	۸۵±۵۸۹۳	۰
۲/۲±۵/۴	۱۲۲±۳۸۰۷	۱۶۵±۵۱۴۵	۵
۲/۷±۰/۱/۶	۱۱۶±۳۳۴۹	۱۵۷±۴۵۲۶	۱۰
۳/۱±۵/۴	۱۰۵±۲۹۷۰	۱۴۲±۴۰۱۳	۱۵
۳/۶±۰/۲/۵	۱۰۱±۲۶۱۶	۱۳۷±۳۵۳۵	۲۰
۴/۰±۵۲/۴	۹۳±۲۳۱۶	۱۲۵±۳۱۳۰	۲۵
۴/۲±۰/۳	۷۸±۲۰۶۶	۱۰۶±۲۷۹۲	۳۰



۶ | الگوی تزریق مؤلفه‌های جریان دوفازی جهت مهیاسازی درصدهای مقطعی مختلف (۱) ۵/۰۷٪ (۲) ۱۰/۱۵٪ (۳) ۱۵/۲۲٪ (۴) ۲۰/۲۹٪ (۵) ۲۶/۷۴٪ فاز پخش شده در معادل استاتیکی SEMPF

شکل ۶

خطای آماری $\pm 0.1\%$ و به ازای ۱۰۸ تاریخچه‌ی ذرات اجرا شد. همان‌گونه که در جدول-۲ مشاهده می‌شود مطابقت خوب و قابل قبولی بین نتایج مربوط به درصد‌های مقطعی محاسبه شده توسط معادل استاتیکی SEMPF و کد MCNP وجود دارد. عدم تطابق به ازای درصد مقطعی 5.07% هوا برابر با 0.04% است که با افزایش درصد مقطعی هوا به 15.22% به مقدار 0.13% افزایش یافته و در ادامه نیز با افزایش هرچه بیشتر درصد مقطعی، این افزایش پابرجاست؛ تا اینکه به ازای 26.74% هوا به مقدار بیشینه 0.26% می‌رسد. در نهایت هم‌خوانی قابل قبولی بین نتایج جداول-۱ و ۲ استدلالی بر درستی ایده‌ی مطرح شده در ایجاد یک مخلوط دوفازی همگن توسط چینش‌های خاص نی‌ها و چرخش لوله، در معادل استاتیکی مورد اشاره است.

۵- اندازه‌گیری تجربی درصد‌های حجمی دوفازی آب-گازوئیل

پس از آنکه لوپ همگن ساز و معادل استاتیکی طراحی شده اعتبارسنجی شد، زمان اندازه‌گیری درصد‌های حجمی دوفازی آب-گازوئیل جهت مقایسه‌ی تأثیر کیفیت همگن‌سازی هر یک بر دقت اندازه‌گیری است. در این مرحله از چشمه‌ی Am-241 با اکتیویته ۱۲۵ میلی کوری استفاده شد. این چشمه‌ی رادیواکتیو فوتون‌هایی با انرژی keV5/59 گسیل می‌کند. در این محدوده‌ی انرژی‌های کم، سطح مقطع غالب برهم‌کنش از نوع جذب فوتوالکتریک است. از آنجا که جذب فوتوالکتریک فوتون‌ها در ماده به شدت به عدد اتمی مؤثر ماده وابسته است با استفاده از این چشمه‌ی رادیواکتیو قادر خواهیم بود مؤلفه‌های جریان دوفازی با اختلاف چگالی کم بین فازها و البته با اختلاف زیاد در عدد اتمی را به خوبی از یکدیگر تفکیک کنیم. در ادامه

مؤلفه‌ها و سپس توزیع آن در کل مقطع لوله استوار است. در اینجا نیز چشمه‌ی رادیواکتیو، ماژول‌های الکترونیکی شمارش، ابعاد حفاظ سربی چشمه و آشکارساز کاملاً مشابه با موارد استفاده شده در اعتبارسنجی لوپ همگن ساز به کار رفته‌اند.

۴- نتایج اعتبارسنجی

۴-۱- سیستم دینامیک

پس از انجام تمامی تنظیمات اولیه‌ی فوق مقادیر مختلف درصد حجمی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ پودر سنگ آهن در مخلوط دوفازی پودر-آب آماده، به لوپ همگن ساز تغذیه شد و فرآیند شمارش گامای عبوری به ازای هر درصد پودر به مدت ۵ دقیقه و تعداد ده بار انجام گرفت. شمارش میانگین گامای عبوری با اعمال ضریب 0.74 جهت حذف نویز مربوط به کسر شار ورودی به آشکارساز از محیط پیرامونی آن و سپس قرار دادن در معادله‌ی ۴- منجر به محاسبه‌ی مقادیر درصد حجمی با استفاده از روش گاما خواهد شد. مقادیر حاصل از این اندازه‌گیری در جدول-۱ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که پیداست نتایج مربوط به محاسبه‌ی درصد حجمی مخلوط دوفازی پودر-آب در محدوده‌ی خطای حداکثر $\pm 0.4/2\%$ مطابقت و هم‌خوانی قابل قبولی با مقادیر از پیش آماده‌سازی شده برخوردار است که تأییدی بر صحت عملکرد همگن‌سازی لوپ و در ادامه‌ی سنجه‌ی گاماست.

۴-۲- سیستم استاتیک

در جدول-۲ نتایج مربوط به شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد MCNP به ازای درصد‌های مقطعی مختلف هوا در دوفازی آب-هوا برای الگوهای معادل استاتیکی و نیز مکانیزم همگن‌سازی پیش‌فرض موجود در کد ارائه شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MCNP و با بیشینه‌ی

۲ | مقادیر درصد مقطعی آماده شده‌ی هوا (APCF)، آهنگ شمارش میانگین (ACR) زوایای مختلف در معادل استاتیک، آهنگ شمارش (CR) در مکانیزم همگن‌سازی کد و درصد مقطعی محاسبه شده‌ی هوا (ACCR)

SEMPF		MCNP		APCF(%)
ACR(counts/sec)	ACCF(%)	CR(counts/sec)	ACCF(%)	
۱۶۶۹±۲	۰	۱۶۹۱±۲	۰	۰
۱۷۰۶±۲	۴/۸۸±۰/۰۹	۱۷۴۰±۲	۴/۹۲±۰/۰۷	۵/۰۷
۱۷۴۵±۲	۹/۸۳±۰/۰۵	۱۷۹۱±۲	۹/۹۰±۰/۰۴	۱۰/۱۵
۱۷۸۳±۲	۱۴/۶۱±۰/۰۴	۱۸۴۲±۲	۱۴/۷۴±۰/۰۳	۱۵/۲۲
۱۸۲۲±۲	۱۹/۴۴±۰/۰۳	۱۸۹۵±۲	۱۹/۶۳±۰/۰۲	۲۰/۲۹
۱۸۷۳±۲	۲۵/۵۳±۰/۰۲	۱۹۶۴±۲	۲۵/۷۹±۰/۰۲	۲۶/۷۴
۲۶۲۶±۲	۱۰۰/۰۰±۰/۰۱	۳۰۲۱±۲	۱۰۰/۰۰±۰/۰۱	۱۰۰

چگالی دو فاز نسبت به حالت پودر-آب از ۳/۲۲ به حدود ۰/۱۵ با وجود داشتن گرانشی از مرتبه‌ی بزرگی ۲/۶ برابر، حداقل دور همزن نسبت به وضعیت پودر-آب برابر ۰/۲۸ خواهد شد با که تأییدی بر توانایی لوپ در همگن‌سازی کامل دوفازی نفت-آب در صورت تأیید صحت عملکرد آن برای مخلوط دوفازی پودر-آب جهت اندازه‌گیری درصد حجمی با استفاده از سنجه‌ی گاماست. در ادامه با بهره‌گیری از الگوریتم مونت کارلوی موجود، ابعاد بهینه‌ی مورد استفاده‌ی حفاظ‌های سربی چشمه کم‌انرژی Am-۲۴۱ و آشکارساز به‌دست آمد. بر این اساس استفاده از حفاظ سربی با شعاع یک سانتی‌متر برای چشمه جهت کاهش دز جذبی پرسنل به آستانه‌ی دز مجاز توصیه می‌شود. در مورد این چشمه‌ی کم‌انرژی با توجه به جذب تقریباً کامل این پرتوها در حفاظ، نوین ناشی از ورود پرتوهای گامای عبوری از لبه‌های سربی به درون آشکارساز قابل‌انگماض است [۱۳].

۵-۱- نتایج اندازه‌گیری توسط سیستم دینامیک

پس از تأیید صحت عملکرد لوپ همگن‌ساز و تلفیق موفق آن با سنجه‌ی گاما در اندازه‌گیری درصد حجمی مخلوط دوفازی پودر-آب با اختلاف زیاد بین چگالی مؤلفه‌ها، از این مجموعه جهت اندازه‌گیری درصد حجمی دوفازی گازوئیل-آب بهره‌برداری شده است. همان‌طور که در معادله‌ی ۸- نشان داده شد لوپ فوق می‌تواند توزیع همگنی از دوفازی نفت-آب را در مخزن همگن‌ساز و پیش‌روی گامای عبوری فراهم کند. در اینجا و به دلیل سهولت در تهیه‌ی گازوئیل نسبت به نفت، از این ماده جهت مهیا کردن مقادیر مختلف درصد حجمی آب در مخلوط دوفازی آب-گازوئیل استفاده شد. مقادیر این درصدها از ۵ تا ۵۰ درصد به لوپ همگن‌ساز تغذیه شد. در مرحله‌ی کالیبراسیون در حالی که لوپ یکبار کاملاً توسط آب و بار دیگر کاملاً با گازوئیل پر شده بود فرآیند شمارش انجام شد. تمامی شمارش‌ها در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه و به تعداد ۱۰ مرتبه انجام و مقادیر میانگین آهنگ شمارش ثبت گردید. در انتها نیز مقادیر درصدهای حجمی دوفازی محاسبه و نتایج به‌همراه انحراف معیار متناظر در جدول ۳ ثبت شد.

همان‌گونه که از نتایج این جدول مشخص است مطابقت خوب و قابل‌قبولی بین نتایج مربوط به درصدهای حجمی محاسبه شده‌ی دوفازی آب-گازوئیل وجود دارد. عدم مطابقت به‌ازای درصد مقطعی ۱۰٪ آب برابر با ۳/۱۰٪ است که با افزایش این درصد مقطعی به ۲۰٪ آب برابر با ۴/۷۰٪ می‌شود. با افزایش هرچه بیشتر درصد مقطعی آب، میزان عدم انطباق نیز افزایش خواهد یافت. استفاده از تلفیق این سیستم با سنجه‌ی گاما

آشکارساز سوسوزن و مجموعه ماژول‌های الکترونیکی شمارشی مشابه با موارد استفاده شده در فرآیند اعتبارسنجی به کار رفت. از آنجا که مکانیزم همگن‌سازی در معادل استاتیکی بر اساس تزریق مؤلفه‌های جریان در نی‌ها و لوله استوار است. کاملاً مستقل از جنس فازهای موجود بوده و با یک بار اعتبارسنجی در سایر موارد نیز به‌خوبی عمل خواهد کرد. اما چون در لوپ همگن‌ساز توانایی همگن‌سازی کاملاً به جنس فازها بستگی دارد و برای مخلوط دوفازی خاص پودر سنگ آهن-آب تأیید شده، باید قبل از شروع کار با استفاده از معادله‌ی ۵ قابلیت آن در کار با مخلوط جدید بررسی گردد. در این کار تحقیقاتی در مورد مخلوط دوفازی گازوئیل-آب به دلیل کاهش اختلاف

۳ | مقادیر درصد حجمی آماده شده آب (PWVF)، آهنگ شمارش میانگین (ACR) و درصد حجمی محاسبه شده آب (CWVF) برای چشمه‌ی Am-۲۴۱ در تلفیق با لوپ همگن‌ساز TPFHL

CWVF(%)	ACR(counts/sec)	PWVF(%)
۰	۴۰±۱۵۷۲	۰
۰/۲۵±۱۳/۱۰	۳۹±۱۵۵۹	۱۰
۰/۱۵±۲۴/۷۰	۳۹±۱۵۴۸	۲۰
۰/۱۱±۳۶/۴۰	۳۹±۱۵۳۶	۳۰
۰/۰۹±۴۷/۳۶	۳۹±۱۵۲۵	۴۰
۰/۰۸±۵۷/۹۹	۳۹±۱۵۱۵	۵۰
۰/۰۶±۱۰۰	۳۸±۱۴۷۴	۱۰۰

۴ | مقادیر درصد حجمی آماده شده آب (PWVF)، آهنگ شمارش میانگین (ACR) و درصد حجمی محاسبه شده آب (CWVF) برای چشمه‌ی Am-۲۴۱ در تلفیق با معادل استاتیک SEMPF

CWVF(%)	ACR(counts/sec)	PWVF(%)
۰	۴۸±۲۲۸۰	۰
۰/۰۴±۴/۴۹	۴۷±۲۲۴۱	۵/۰۷
۰/۰۲±۸/۹۵	۴۷±۲۲۰۳	۱۰/۱۵
۰/۰۱±۱۳/۳۶	۴۷±۲۱۶۶	۱۵/۲۲
۰/۰۱۱۷/۷۲	۴۶±۲۱۳۰	۲۰/۲۹
۰/۰۱±۲۳/۱۶	۴۶±۲۰۸۶	۲۶/۷۴
۰/۰۰±۱۰۰	۳۹±۱۵۵۳	۱۰۰

موجود در کد MCNP به عنوان مرجعی استاندارد نشان از مطابقتی خوب و قابل قبول دارد که بر صحت عملکردی ایده‌ی مطرح در تزریق مؤلفه‌های جریان به درون نی‌های مورد نظر و چرخش این مجموعه جهت ایجاد محیطی همگن در مقابل پرتوهای گامای عبوری تأکید دارد. به سبب تضعیف ناشی از حضور دائمی ضخامتی تقریباً یکسان از نی‌ها در مسیر پرتوهای گامای عبوری از لوله، کاملاً انتظار می‌رود که همواره مقادیر شمارشی توسط معادل استاتیکی کمتر از شمارش ناشی از مکانیزم همگن‌ساز خاص کد مونت کارلو، آن هم به‌ازای درصد مقطعی یکسانی از هوا در مخلوط دوفازی آب-هوا باشد. از سوی دیگر با افزایش هرچه بیشتر درصد مقطعی هوا در مخلوط دوفازی مذکور، سهم برهم‌کنش‌های فوتونی با آب و پلی‌پروپیلن کاهش می‌یابد که منجر به کاهش قدرت تفکیک‌پذیری بین این دو ماده شده و در ادامه باعث خواهد شد عدم تطابق نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد مقطعی برای معادل استاتیکی و کد افزایش یابد. در واقع حضور نی‌ها به‌عنوان عاملی که سبب تمایز در شمارش‌های مربوط به معادل استاتیکی با مکانیزم همگن‌ساز خاص کد مونت کارلو شده، بیشتر احساس شده و به‌عنوان یک خطای سیستماتیک منجر به کاهش تطابق در نتایج اندازه‌گیری توسط دو سیستم مورد نظر خواهد شد. همان‌گونه که از مقایسه‌ی نتایج جداول ۳ و ۴ مشهود است تلفیق سیستم معادل استاتیکی با سنجه‌ی گاما نسبت به حالت پیشین لوپ همگن‌ساز، جهت تعیین کسر فازی مؤلفه‌های جریان دوفازی آب-گازوئیل نه‌تنها قابلیت کاربرد در گستره وسیع‌تری از مقادیر درصدی آب را دارد بلکه در مورد معادل استاتیکی منجر به بروز خطای کمتری در عدم تطابق نتایج اندازه‌گیری نسبت به مقادیر از قبل آماده‌سازی شده خواهد شد. به‌صورت بالفعل این امکان وجود خواهد داشت که علاوه بر رژیم همگن، رژیم‌های مختلف جریان‌ی نظیر رژیم‌های حلقوی، اسلاگی و لایه‌ای را برای مخلوط‌های دو، سه و حتی چندفازی بر اساس نحوه‌ی پرکردن تعداد نی‌های مورد نیاز از یک مؤلفه‌ی خاص جریان، با تعداد مؤلفه‌های بیشتر فراهم کرد.

داده‌های جدول ۳- مربوط به وقتی است که لوپ TPFHL مسئول همگن‌سازی جریان دوفازی آب-گازوئیل است. با وجود همگن‌سازی مطلوب این جریان دوفازی، انتظار می‌رود نسبت به همگن‌سازی کامل، تجمع فاز چگال‌تر آبی در حوالی محور مرکزی مخزن بیشتر از گازوئیل باشد که متعاقباً به دلیل وابستگی مستقیم ضریب تضعیف گاما به چگالی، سهم تضعیف باریکه‌ی قلمی و نازک گامای عبوری از مخلوط بیشتر و در نتیجه مقادیر شمارشی I_{mix} کوچک‌تر از حالت ایده‌آل می‌گردد. با توجه به اینکه از معادله‌ی ۳- جهت محاسبه درصد حجمی مؤلفه‌های

جهت تعیین کسر فازی مؤلفه‌های جریان، دوفازی نفت-آب در لوله‌های جریان، در محدوده‌های درصدی، آب کمتر از ۲۰٪ قابل قبول است.

۲-۵- نتایج اندازه‌گیری توسط سیستم استاتیک

پس از تأیید صحت عملکرد ایده‌ی مطرح در سیستم معادل استاتیکی جهت فراهم کردن مخلوط همگن هوا-آب جلوی باریکه‌ی گامای عبوری، طبق با الگوی شکل ۷- مقادیر درصدی مقطعی آب ۵/۰۷٪، ۱۰/۱۵٪، ۱۵/۲۲٪، ۲۰/۲۹٪ و ۲۶/۷۴٪ در مخلوط دوفازی آب-گازوئیل مهیا گردید. در مرحله‌ی کالیبراسیون که فضای بینایی و همچنین درون تمام نی‌ها هر بار با یکی از فازهای آب و گازوئیل به‌طور کامل پر شده، شمارش گامای عبوری از مخلوط صورت گرفت. این بار نیز تمامی شمارش‌ها در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه و به تعداد ۱۰ مرتبه انجام و مقادیر میانگین آهنگ شمارش ثبت شد. در انتها درصدی مقطعی دوفازی محاسبه و نتایج به‌همراه انحراف معیار متناظر در جدول ۴- ثبت گردید.

نتایج جدول ۴- گویای مطابقت خوب و قابل قبولی بین نتایج مربوط به درصدی حجمی محاسبه شده‌ی مخلوط دوفازی آب-گازوئیل است. عدم مطابقت به‌ازای درصد مقطعی ۵/۰۷٪ آب برابر با ۰/۵۸٪ است که با افزایش این درصد مقطعی به ۱۵/۲۲٪ آب برابر با ۱/۸۶٪ می‌شود. با افزایش هرچه بیشتر درصد مقطعی آب، میزان عدم انطباق نیز افزایش خواهد یافت تا اینکه به‌ازای درصد مقطعی ۲۶/۷۴٪ آب عدم انطباق به مقدار ۳/۵۸٪ میل خواهد کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

طبق داده‌های ثبت شده در جدول ۱-، درصدی حجمی محاسباتی برای هر کدام از ترکیبات دوفازی پودر-آب در محدوده‌ی خطای حداکثر ۴/۲٪ با مقادیر از قبل آماده‌سازی شده مطابقت و هم‌خوانی قابل قبولی دارند که نشان از عملکرد همگن‌سازی مناسب و قابل قبول لوپ در مورد مخلوط مورد نظر دارد. خطای نسبی مشاهده شده در مورد درصدی کمتر پودر ناشی از این واقعیت است که برای تحویل مخلوطی همگن در این شرایط ذاتاً شانس کمتری وجود دارد که این خود منجر به بروز خطای بیشتر به سبب عدم قرارگیری نماینده‌ی صحیحی از مخلوط موجود در کل مقطع لوله در مسیر باریکه‌ی قلمی گامای عبوری است. لوپ همگن‌ساز حضور مخلوط همگنی از دوفازی را پیش روی باریکه‌ی گامای عبوری تضمین می‌کند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی موجود در جدول ۲- مربوط به الگوهای مطرح شده در معادل استاتیکی و نیز مکانیزم همگن‌سازی پیش‌فرض

با انحراف منفی نسبت به حالت ایده آل می شود.

علائم اختصاری:

B عامل هندسی:

Q نرخ حجمی:

d قطر لوله:

A سطح مقطع لوله:

μ_i ضریب تضعیف خطی گامای مؤلفه ی i:

a_i کسر فازی مؤلفه ی i:

I_{water} آهنگ شمارش گامای عبوری از آب

v_i سرعت مؤلفه ی i:

I_{oil} آهنگ شمارش گامای عبوری از نفت:

I_{mix} آهنگ شمارش گامای عبوری از مخلوط:

t بیشینه درصد حجمی مجاز پودر:

I_0 آهنگ شمارش گامای عبوری از لوله ی خالی:

I_t آهنگ شمارش گامای عبوری از بیشینه درصد حجمی مجاز پودر:

مخلوط دوفازی مذکور استفاده شده، مقادیر شمارش های کالیبراسیونی که به ازای سیالات تک فازی آب و گازوئیل به دست آمده اند کاملاً مستقل از کیفیت همگن سازی سیستم مورد استفاده هستند. بنابراین حصول مقادیر محاسباتی درصد حجمی بزرگ تر و با انحراف مثبت نسبت به حالت ایده آل کاملاً قابل انتظار است. اما در مورد داده های جدول ۴ با توجه به استفاده از مکانیزم جایگزین سیستم همزنی (که در نتیجه ی تلفیق تزریق مؤلفه های جریان مطابق با الگوهای نشان داده شده در شکل ۷- با گردش مجموعه ی لوله و نی ها در فضای بینایی چگالی سنج گاما، منتج به حصول مخلوطی با درجه ای مطلوب از همگنی خواهد شد) نه تنها مشکل وابستگی توزیع مؤلفه های جریان به چگالی فازها حذف خواهد شد بلکه به دلیل محدودیت کاهش بسیار زیاد مساحت درونی نی ها، در قیاس با حالت ایده آل و متعاقباً مقادیر شمارشی I_{mix} بزرگ تر از حالت ایده آل، توزیعی دورتر از مرکز لوله انتظار می رود که خود سبب حصول مقادیر محاسباتی درصد حجمی آب کوچک تر و

پانویس ها

1. hkhalafi@aeoi.org.ir
2. hashemabadi@iust.ac.ir

3. Beer-Lambert
4. Two-Phase Flow Homogenizer Loop

5. Static-Equivalent Multi-Phase Flow

منابع

- [1] Corneliussen, S., et al., "Handbook of multiphase flow metering", rev. 2., Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (www.nfogm.no)/Tekna., 2005.
- [2] Hill, T. J., "Gas-liquid flow challenges in oil and gas production", 1997.
- [3] Thorn, R., Johansen, G. A., and Hammer, E. A., "Recent developments in three-phase flow measurement", Meas. Sci. Technol. 8 691-701, 1997.
- [4] <http://cmr.no/facilities/cmr-multiphase-flow-loop>.
- [5] <http://www.prolabnl.com/test-facilities>.
- [6] <http://mff.swri.org>.
- [7] Thorn, R., Johansen, G. A., and Hjertaker, B. T., "Three-phase flow measurement in the petroleum industry", Meas. Sci. Technol. 24 1-17, 2012.
- [8] Hewitt G F, Harrison P S, Parry S J and Shires G L 1995 Development and testing of the 'mixmeter' multiphase flow meter Proc. 13th North Sea Flow Measurement Workshop(Lillehammer, Norway).
- [9] Al-Khamis M N, Al-Bassam A F, Bakhteyar Z and Attab M N 2008 Evaluation of phasewatcher multiphase flow meter (MPFM) in sour environments Proc. Offshore Technology Conf. (Houston, USA, April 2008) OTC 19152.
- [10] Foss'a Ø, Stobie G and Wee A 2009 Successful implementation and use of multiphase meters Proc. 27th Int. North Sea Flow Measurement Workshop (Tønsberg, Norway, October 2011).
- [11] Mehdizadeh P, Farchy D and Suarez J 2009 Multiphase meter production well testing applied to low GOR mature fields Proc. SPE Production and Operations Symp. (Oklahoma, USA, April 2009) SPE 120578.
- [12]- Sharifzadeh, M., Khalafi, H., Afarideh, H., &Noori, E., "Two-phase flow component fraction measurement using gamma-ray attenuation technique in conjunction with a newly designed and constructed laboratory scale test facility", Nuclear Science and Techniques, 2017.
- [13]- Sharifzadeh, M., Khalafi, H., Afarideh, H., &Gholipour, R., "Determination of oil-water volume fraction by using a pencil-beam collimated gamma-ray emitting source in a homogenized flow regime condition.", Flow Measurement and Instrumentation, 2016.