



طراحی و ساخت لوپ جریان دوفازی همگن به منظور اندازه‌گیری درصد‌های حجمی در مخلوط‌های جامد-مایع و نیز مایع-مایع با تکنیک تضعیف باریکه‌ی گاما

محسن شریف‌زاده^{۱*}، حسین خلفی^۲، حسین آفریده^۳، رضا قلی‌پور^۱

۱. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

۳. دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، تهران - ایران

چکیده: مسئله‌ی اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی، یکی از موضوع‌های بسیار مهم در صنایع نفت و گاز، از اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی بوده است. جریان دوفازی آب-نفت در عمده‌ی مواقع و به خصوص در جریان‌سنج‌هایی که براساس تکنیک سَفَازِی آب-نفت-گاز به دوفازی آب-نفت و تک‌فازی گاز عمل می‌کنند، وجود دارد. در این‌جا، ابتدا لوپ طراحی و ساخته شده‌ی TPFHL به صورت یک لوپ همگن ساز جامد-مایع و نیز مایع-مایع، معرفی، و سپس به کمک شمارش گامای عبوری چشمه‌ی پرتوزای ^{137}Cs اعتبارسنجی شد. نتایج قابل‌قبولی که در مقایسه با داده‌های مرجع به دست آمد، توانایی عملکرد لوپ فوق در کنار چگالی‌سنج گاما را در اندازه‌گیری درصد‌های حجمی طیف گسترده‌ای از مخلوط‌های دوفازی تأیید می‌کند. در ادامه، امکان بهره‌گیری از لوپ فوق در محاسبه‌ی درصد‌های حجمی دوفازی آب-نفت، با استفاده از چشمه‌ی پرتوزای ^{241}Am شبیه‌سازی و بررسی شد که با نتایج انتشار یافته در سایر مقالات معتبر علمی سازگاری خوبی دارد.

کلیدواژه‌ها: جریان دوفازی، جریان دوفازی همگن، جریان دوفازی آب-نفت، لوپ TPFHL، تکنیک گامای عبوری

Design and Construction of a Two-Phase Flow Homogenizer Loop for Volume Fraction Measurement in Solid-Liquid as Well as Liquid-Liquid Mixtures by γ -Ray Attenuation Technique

M. Sharifzadeh^{*1,3}, H. Khalafi², H. Afarideh³, R. Gholipour¹

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran-Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

3. Department of Energy Engineering and Physics, AmirKabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran - Iran

Abstract: Multiphase flow metering, has been one of the most important issues in oil/gas industry, since the early 80s. Oil-water two-phase flow, shows off specially in flow meters that work based on separation of oil-water-gas three-phase flow into liquid (oil-water), and gas streams just before measurement. Here, at first, two-phase flow homogenizer loop (TPFHL) as a solid-liquid as well as liquid-liquid homogenizer loop, is introduced, and then its performance accuracy is verified by counting the transmitted gamma-rays of a ^{137}Cs radioactive source. The acceptable results, compared to the reference data, endorse the capability of the introduced loop in conjunction with the gamma densitometer for volume fraction measurement in a wide range of two-phase mixtures. Moreover, the instrumentation usage for oil-water component fraction measurement was simulated, using an ^{241}Am gamma source which showed a good agreement with the authentically published results.

Keywords: Two-Phase Flow, Homogenized Two-Phase Flow, Oil-Water Two-Phase Flow, TPFHL, γ -Ray Transmission Technique

*email: mohsenphd@chmail.ir



۱. مقدمه

سیالات چندفازی را به عنوان جریان هم‌زمانی از فازهای جامد، مایع و گاز که از یک لوله می‌گذرد تعریف می‌کنند. جریان چندفازی یک پدیده‌ی متداول در صنایع مختلف نظیر رآکتورهای شیمیایی و نیروگاه‌های قدرت است. به صورت ویژه، سیالات چندفازی در صنایع نفت و گاز دارای اهمیت فراوانی هستند. در چاه‌های نفت و گاز و خطوط جریان آنها، اغلب جریانی از موادی را داریم که از مخازن برداشت می‌شوند و می‌توانند شامل گازهای هیدروکربنی (CO_2) و مقادری H_2S ، مایعات هیدروکربنی (نفت و میعانات نفتی)، آب و جامدات (شن و ماسه) باشند [۱].

حضور جریان چند فازی در صنعت نفت و به ویژه در اکتشاف محصولات هیدروکربنی در هر دو موقعیت میدان‌های نزدیک به ساحل و دور از ساحل کاملاً مشهود است. مشاهده شده است که استفاده از فن آوری سنج‌های چند فازی، یک عامل حیاتی در زمینه‌ی استخراج از میدان‌های نفتی و گازی حاشیه‌ی ساحل است و علاوه بر افزایش سرعت بازگشت سرمایه، باعث کاستن از هزینه‌ی مصرفی کل می‌شود [۲]. با وجود راه‌حل‌های بسیار زیادی که در سال‌های اخیر به منظور دستیابی به یک جریان‌سنج ایده‌آل ارائه شده است، اما هیچ نمونه‌ی تجاری‌شده‌ای تاکنون ساخته نشده است که تمام ویژگی‌های ایده‌آل نظیر دقت بالا، عدم تداخل، داده‌های قابل اطمینان و عدم وابستگی به رژیم جریان و در نهایت قابلیت استفاده در تمام محدوده‌ی درصدی مؤلفه‌ها را در خود جای دهد [۳].

قبل از اینکه یک جریان‌سنج برای اندازه‌گیری در شرایط خاص مربوط به میدان نفتی و یا گازی استفاده شود، لازم است مراحل تست و کالیبراسیون آن در شرایط مشابه و البته در یک تأسیسات استاندارد طی شود. سپس با حاکم کردن شرایط مشابه میدان‌های واقعی در چنین تأسیساتی، نظیر رژیم‌های مختلف جریان، فشار، دما، هندسه‌ی لوله، امکان قرارگیری سنج‌های اندازه‌گیری جریان در محل مناسب، به منظور اندازه‌گیری درصد حجمی، سرعت و در نهایت دبی حجمی و جرمی جریان چندفازی فراهم خواهد شد. لوپ‌های کالیبراسیون مختلفی در خارج از کشور وجود دارند که از آن جمله می‌توان

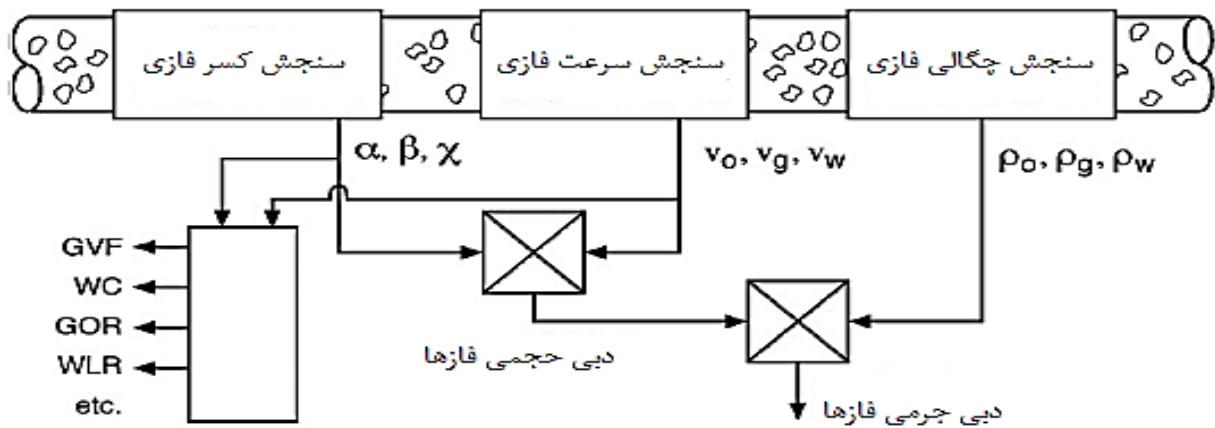
به لوپ بسته‌ی جریان سه‌فازی موجود در مرکز پژوهشی Christian Michelsen در کشور نروژ [۴]، مجموعه‌های دوگانه‌ی لوپ‌های جریان پرفشار و کم‌فشار در آزمایشگاه ملی Pro-lab انگلستان [۵]، و همچنین لوپ جریان چندفازی واقع در مؤسسه‌ی پژوهشی Southwest در کشور آمریکا [۶] اشاره کرد. برای نمونه، لوپ بسته‌ی سه‌فازی در مرکز پژوهشی Michelsen جریان سه‌فازی شامل گاز نیتروژن، گازوئیل و آب شور را به گردش درمی‌آورد. این لوپ دارای دو بخش مجزا با قطر لوله‌های ۱۵/۲۴ و ۷/۶۲ cm (۶ و ۳ in)، یک تانک جداساز 32 m^3 ، پمپ‌های سانتریفیوژ و ابزار دقیق متنوعی در اندازه‌گیری درصد فازها، سرعت، فشار و دما هستند.

مطالعات اولیه به منظور طراحی و ساخت سنج‌های اندازه‌گیری هسته‌ای، از جمله جریان‌سنج‌های چندفازی، مدتی است که در پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوهای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، آغاز شده است. با این حال فقدان لوپ‌های تست و کالیبراسیون این دستگاه‌ها، پژوهشگران را بر آن داشته است تا به طراحی و ساخت لوپ همگن‌ساز دوفازی با هدف کاربرد در اندازه‌گیری درصد حجمی گستره‌ی وسیعی از مخلوط‌های دوفازی جامد-مایع و مایع-مایع طراحی اقدام کنند.

۲. بیان مسئله‌ی اندازه‌گیری

آهنگ‌های جریان جرمی و حجمی تک‌تک مؤلفه‌ها در جریان سه‌فازی نفت، آب، و گاز، از کمیت‌های مهم مورد اندازه‌گیری در مقیاس تجاری‌اند. تاکنون، تکنیکی که قادر باشد برای یک جریان چندفازی جداسازی نشده، آهنگ جریان را مستقیماً به دست آورد، به وجود نیامده است. در نتیجه، نیاز است که از روش استنتاجی به این منظور کمک گرفته شود. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، مسئله‌ی اندازه‌گیری جریان سه‌فازی، به اندازه‌گیری هم‌زمان مؤلفه‌های سرعت تک‌تک فازها در کنار درصدهای مقطعی و نیز چگالی آنها تبدیل می‌شود. آهنگ جریان حجمی جریان سه‌فازی به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

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



شکل ۱. راه‌حل استنتاجی برای مسئله‌ی اندازه‌گیری جریان سه‌فازی [۷].

۲. تضعیف پرتو گامای عبوری از ماده

شدت پرتو گاما در عبور از مخلوطی سه‌فازی و همگن، در نتیجه‌ی برهم‌کنش‌های فوتوالکتریک، کامپتون و یا تولید جفت، تضعیف می‌شود که این فرایند از قانون تضعیف نمایی Beer-Lambert پیروی می‌کند:

$$I_{mix} = I_0 B \exp(-d \{ \alpha_{gas} \mu_{gas} + \alpha_{water} \mu_{water} + [100 - (\alpha_{gas} + \alpha_{water})] \mu_{oil} \} / 100) \quad (2)$$

ضرایب تضعیف خطی مؤلفه‌های گاز، آب و نفت، طی فرایند کالیبراسیون و در حالتی که کل لوله از هر کدام از فازهای مربوط پُر شده باشند، با معادله‌ی (۲) اندازه‌گیری خواهند شد. یک موازی‌ساز باریک مناسب به همراه حفاظ‌های سریبی اطراف چشمه و آشکارساز سبب می‌شود تا فقط فوتون‌های عبوری وارد آشکارساز شوند و در نتیجه ضریب تجمعی برابر با ۱ منجر به ساده شدن محاسبات، و به دنبال آن حذف خطای هندسی شود. در شرایطی که صرفاً یک دوفازی نفت - آب، کل سطح مقطع لوله را پُر کرده باشد، و به ازای برقراری شرایط هندسی مناسب برای حذف ضریب تجمعی، معادله‌ی تضعیف (۲) به شکل معادله‌ی (۳) تبدیل می‌شود:

$$I_{mix} = I_0 \exp(-d \{ \alpha_{oil} \mu_{oil} + \alpha_{water} \mu_{water} \} / 100) \quad (3)$$

با توجه به این که همواره $\alpha_{gas} + \alpha_{water} + \alpha_{oil} = 100$ است، لازم است تنها دو مؤلفه‌ی درصد مقطعی (معمولاً درصد‌های گاز و آب) اندازه‌گیری شوند. در مورد مسئله‌ی جریان‌های دوفازی، وضعیت مشابه آن‌چه در بالا به آن پرداخته شد وجود خواهد داشت، با این تفاوت که در این‌جا تنها لازم است یک مؤلفه‌ی درصد مقطعی اندازه‌گیری شود.

یکی از استراتژی‌های مفیدی که با کاستن از تعداد تکنیک‌های مورد نیاز در اندازه‌گیری درصد مقطعی مؤلفه‌های جریان چندفازی، منجر به ساده‌سازی و در عین حال کاهش خطای سیستم می‌شود، همگن‌سازی جریان چندفازی پیش از انجام اندازه‌گیری خواهد بود. با بهره‌گیری از سازوکار همگن‌ساز، چگالی مخلوط در تمام سطح مقطع لوله‌ی جریان یکسان می‌شود و در نتیجه تنها با استفاده از اندازه‌گیری تضعیف گامای یک باریکه‌ی عبوری از مخلوط به جای چند باریکه که کل سطح مقطع لوله را جاروب کنند، می‌توان مقادیر درصد مقطعی تک‌تک مؤلفه‌های جریان چندفازی را مستقل از رژیم عبوری جریان به دست آورد. از جمله کارهایی که در این حوزه انجام گرفته است می‌توان به پژوهش Hewitt و همکاران اشاره کرد [۸]، که در آن از یک مخلوط‌کننده‌ای دوسلولی به صورت برخط، و برای همگن‌سازی جریان دوفازی گاز - مایع، به صورت پیش شرطی به منظور اندازه‌گیری درصد‌های مقطعی استفاده شده است. در دسته‌ی دیگری از کارهای انجام شده، بر روی همگن‌سازی جریان چندفازی با استفاده از نصب اتصال سه‌راهی کور و تغییر مسیر حرکت جریان به سمت بالا، به منظور ایجاد یک همگن‌سازی مطلوب به جای نصب مخلوط‌کننده‌ها در خطوط لوله استفاده شده است [۹-۱۱].



شکل ۲. (الف) تصویر مربوط به نمای جلوی لوپ TPFHL، (ب) تصویر مربوط به نمای پشتی لوپ TPFHL.

۱.۳ محاسبات مکانیکی و طراحی لوپ

۱.۱.۳ مخزن و همزن همگن ساز

در این بخش و با هدف تبدیل سوسپانسیون تحویلی از مخزن آماده سازی به یک مخلوط همگن به منظور قرار گرفتن در مسیر باریکه ی گامای عبوری، محاسبات دقیق پارامترهایی چون نوع و تعداد پره ها، فاصله ی متوالی پره ها، فاصله ی پره ی انتهایی از کف مخزن، فاصله ی تیغه ی پره تا دیواره ی داخلی، جهت و سرعت چرخش همزن، ابعاد و هندسه ی کف مخزن، نوع، تعداد و ابعاد تیغه های نصب شده در دیواره ی مخزن^(۱) و محل ورودی و خروجی انجام شد. فاز مطالعاتی به منظور طراحی نهایی، با کمک موارد گزارش شده ی استاندارد موجود در راهنمای مخلوط سازی صنعتی آغاز شد [۱۲]. روند کار به این صورت مقرر شد که به منظور بالا کشیدن هر چه بیش تر پودر جامد در

از طرفی با توجه به این که همواره $\alpha_{oil} + \alpha_{water} = 100$ است، با اندکی محاسبات، مقادیر درصد های حجمی به دست می آیند:

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

در تلاش به منظور رسیدن به معادله ای مشابه (۴) برای دوفازی جامد - مایع، ابتدا درصد های جرمی مورد نیاز برای تست برحسب درصد های حجمی متناظرشان با اندک محاسبات ریاضی به دست آمد:

$$\beta_{powder} = \frac{\rho_{powder} \alpha_{powder}}{\rho_{powder} \alpha_{powder} + \rho_{water} (100 - \alpha_{powder})} \quad (5)$$

از آن جا که در مرحله ی کالیبراسیون، امکان داشتن مخزن پُر از پودر به سبب مشکل انسداد لوپ غیر ممکن است، در نتیجه کالیبراسیون به جای ۱۰۰٪ حجمی پودر، با حداکثر درصد حجمی مجاز انجام گرفت. در ادامه، شکل توسعه یافته ی معادله (۴) را خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \alpha_{powder} = t \times \frac{\ln(I_{mix} / I_{water})}{\ln(I_t / I_{water})} \\ \alpha_{water} = 100 - \alpha_{powder} \end{cases} \quad (6)$$

۳. لوپ TPFHL

یکی از راهبردهای بسیار مفید در ساده سازی فرایند اندازه گیری جریان های چندفازی، همگن سازی جریان، بهره گیری از یک چگالی سنج گاما و نیز یک آشکارساز به جای آرایه ای از آشکارسازها برای اندازه گیری درصد حجمی مؤلفه ها، مستقل از رژیم عبوری جریان است. لوپ TPFHL تلاشی است در جهت رسیدن به این مطلوب، که در پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای در یک بازه ی زمانی یک و نیم ساله به مرحله ی ساخت رسید. شکل ۲ نماهایی از لوپ ساخته شده ی نهایی را نشان می دهد.



$$N_{js} = S \times v_1^{1/3} \times \left[\frac{g_c \times (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right]^{1/3} \times X^{1/3} \times d_p^{1/2} \times D^{-1/80} \quad (7)$$

در این جا v_1 گرانروی جنبشی مایع برحسب $\frac{m^2}{sec}$ ، g_c ثابت گرانش برابر با $9.81 \frac{m}{s^2}$ و ρ_l و ρ_s به ترتیب چگالی فاز جامد و مایع برحسب $\frac{kg}{m^3}$ ، X نسبت وزنی پودر به مایع، d_p قطر بزرگ‌ترین ذره جامد برحسب متر (ابعاد مش‌های غربال)، D قطر پره‌ی هم‌زن برحسب m ، و در نهایت S ثابت بدون بُعد معادله است که به ازای پره‌های 45°PBT با مقادیر $\frac{1}{3}$ و $\frac{C}{T} = \frac{1}{4}$ مساوی با ۴/۴ است. برای پودر سنگ آهن مورد استفاده در این پژوهش، اندازه‌ی دانه‌ها حداکثر ۰/۱mm و چگالی ۴/۲۲ g/cm^۳ در نظر گرفته شد. گرانروی جنبشی مایع از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

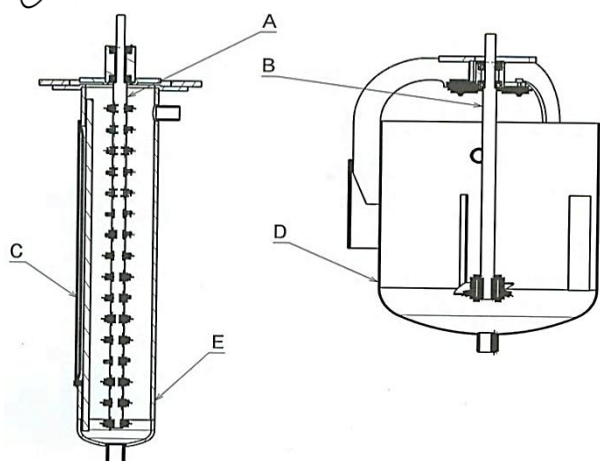
$$v_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1} \quad (8)$$

به ازای حداکثر درصد حجمی پودر ۳۰٪ و گرانروی مطلق P ۰/۰۰۱ برای آب، مقدار گرانروی جنبشی برابر با ۰/۰۰۰۰۰۱ m^۲/s به دست آمد. در انتها، با در نظر گرفتن ضریب تبدیل ۱/۷۱ و استفاده از معادله‌ی (۷)، حداقل سرعت دورانی به منظور رسیدن به مخلوط همگن پودر سنگ آهن - آب برابر با ۲۶/۸ rps به دست آمد. توان مصرفی الکتروموتور در این شرایط عبارت خواهد بود با:

$$P = \frac{N_p \times \rho_{mix} \times N_{us}^r \times D^3}{g_c} \times \eta \times \xi \quad (9)$$

به ازای شرایط کاملاً مغشوش (عدد رینولدز بالاتر از ۱۰۰۰۰)، عدد توان مساوی با ۲۵/۲۸ است (این عدد به نوع و مشخصات هندسی پره‌ها و تعداد آنها بستگی دارد). به ازای بازدهی ۵۰٪ و هم‌چنین درصد اتلافی ۳۳٪ در نتیجه‌ی اصطکاک، حداقل توان لازم نهایی الکتروموتور برای هم‌زن همگن‌ساز برابر با ۲۳/۳ W (یا معادل آن ۰/۰۳۲ hp) خواهد شد.

مخزن همگن‌ساز، از کف مقعر استفاده شود. ارتفاع این مخزن ۶۰ cm در نظر گرفته شد تا کمینه فضای لازم برای قرارگیری چگالی‌سنج با وجود نیاز به کم‌ترین تعداد پره‌های هم‌زنی فراهم شود. قطر این لوله‌ی استوانه‌ای برابر با T=۱۰/۳۲cm انتخاب شد تا امکان ارزیابی عملکرد چگالی‌سنج و یا سنج‌های دیگری که قرار است در آینده با لوپ ساخته شده‌ی نهایی تست و کالیبره شوند، بر روی یکی از قطرهای رایج در خطوط لوله‌ی جریان واقعی برقرار شود. پره‌های هم‌زنی توربینی متشکل از ۴ تیغه‌ی صاف مربعی در زاویه‌ی ۴۵° با افق با نام تجاری 45°PBT، بهترین گزینه برای داشتن بازدهی عملکردی نسبتاً بالا انتخاب شد. این نوع پره علاوه بر ایجاد تنش برشی لازم برای ایجاد بیشینه اختلاط در مخلوط، با ایجاد جریان محوری مناسب به منظور بالا کشیدن (یا پایین کشیدن) فاز پخش شده‌ی متمایل به ته‌نشینی (تعلیق)، شرایط را برای تولید یک مخلوط دوفازی همگن در این مخزن فراهم می‌کند. مطابق با این استاندارد، قطر این پره‌ها مساوی با فاصله‌ی دو پره‌ی متوالی نصب شده بر روی محور هم‌زن و برابر با $D=S=\frac{T}{3}=3/44$ cm نظر گرفته شد. پهنای هر تیغه برابر با $w=1$ cm، ضخامت آن $t=0/20$ cm و تعداد پره‌های لازم روی محور هم‌زن استیل با قطر ۱ cm برابر با ۱۶ عدد در نظر گرفته شد که فاصله‌ی آخرین پره از کف مخزن برابر با $C=\frac{T}{4}=2/58$ cm است. با وجود چنین فاصله‌ای، حداکثر تنش برشی ناشی از جریان شعاعی، در عین داشتن بیشینه سرعت اغتشاش ناشی از جریان محوری، قابل دستیابی است و به ایجاد شرایط جدا از کف^(۲) برای فاز پخش شده کمک خواهد کرد. دیواره‌های داخل مخزن با ۴ تیغه‌ی عمودی صاف با پهنای $B=\frac{T}{10}=1/03$ cm و فاصله‌ی خالی تا دیواره‌ی با $b=\frac{1/5 \times T}{100}=0/15$ cm در چینی متقارن و با اختلاف زاویه‌ی ۹۰° پوشانده شد که در تبدیل جریان گردابی مخلوط دوفازی به یک جریان محوری به منظور ایجاد بیشینه اغتشاش، بسیار مفید و مؤثر خواهد بود. حداقل سرعت دورانی جهت رسیدن به یک سوسپانسیون کامل به کمک فرمول ارائه شده توسط Zwietering به دست آمد که با یک ضریب تبدیل، حداقل سرعت دورانی لازم برای ایجاد مخلوط همگن قابل محاسبه است:



شکل ۳. طرح مخزن همگن ساز (سمت چپ) و مخزن آماده سازی سوسپانسیون (سمت راست). (A) شازده پرهی همزنی 45°PBT، (B) یک پرهی همزنی 30°PBT، (C) پنجره‌ی پلکسی گلاس تعبیه شده در لوله‌ی همگن ساز، (D) مخزن آماده سازی سوسپانسیون و (E) مخزن همگن ساز.

۳.۱.۳ نکته دارنده

استفاده از پروفیل آهنی برای ثابت نگه داشتن مخازن و الکتروموتورهای مربوطه شان در کنار نصب الکتروپمپ و در نهایت ایجاد بستری مناسب به منظور قرارگیری چگالی سنج حول مخزن همگن ساز از نکات مهم در نظر گرفته شده در این بخش است.

۴.۱.۳ لوله کشی، الکتروپمپ و شیرهای کنترل و تخلیه

به منظور ایجاد یک چرخه‌ی بسته بین مخازن، خروجی از کف مخزن سوسپانسیون به ورودی الکتروپمپ، و خروجی الکتروپمپ به ورودی از کف مخزن همگن ساز با لوله‌های فولادی متصل شدند. امکان درگیر شدن تمامی ۱۶ پره در فرایند همگن سازی مخلوط از مزایای این اتصال و پُر شدن مخزن همگن ساز از کف وجود دارد. خروجی بالای مخزن همگن ساز به ورودی بالای مخزن سوسپانسیون متصل شد. تعبیه‌ی یک شیر کنترل قبل از ورود مخلوط به مخزن همگن ساز سبب شد تا پس از گذشت چند دقیقه از گردش دوفازی در لوپ، با بستن آن (که البته باید پس از خاموش سازی الکتروپمپ صورت گیرد) یک مخلوط همگن در مخزن همگن ساز برای انجام آزمایش چگالی سنجی در اختیار باشد. یک شیر کنترل نیز در خروجی مخزن سوسپانسیون به منظور تنظیم دبی جریانی که به گردش درمی آید تعبیه شد. در خروجی الکتروپمپ نیز یک عدد

۲.۱.۳ مخزن و همزن آماده سازی سوسپانسیون

در طراحی این بخش نیز کلیه‌ی پارامترهای مهم مورد اشاره برای مخزن و همزن همگن ساز با استدلالی شبیه آن چه در بخش همگن ساز مطرح شد، در نظر گرفته شد. با این تفاوت که این بار هدف، رساندن دوفازی تحویلی به یک سوسپانسیون جدا از کف مخزن است. حجم مخزن مورد استفاده در این بخش برای جلوگیری از مکش هوا^(۳) به درون لوپ در نتیجه‌ی جریان گردابی ناشی از چرخش همزن در یک برآورد محتاطانه، ۴ برابر حجم مخزن همگن ساز در نظر گرفته شد. تعبیه‌ی ۳ ورودی مجزا از جمله نکاتی است که برای این مخزن صورت گرفت. یک ورودی قیف مانند به کمک دریچه‌ی قابل تنظیم، امکان اضافه کردن مرحله به مرحله‌ی پودر را به مخزن و نزدیک محور همزنی که دارای بیشینه اغتشاش است فراهم می کند. ورودی دوم برای افزودن فاز مایع اولیه به لوپ است، و سومین ورودی نیز با لوله کشی به خروجی مخزن همگن ساز برای برقراری یک لوپ بسته متصل شد. قطر و ارتفاع این مخزن استوانه‌ای برابر با ۳۰ cm انتخاب شد. پره‌های همزنی توربینی متشکل از ۴ تیغه‌ی صاف مربعی در زاویه‌ی ۳۰° با افق با نام تجاری 30°PBT به منظور ایجاد سهم عمده‌ی جریان رو به پایین برای داشتن یک سوسپانسیون جدا از کف استفاده شد. به دلیل این که نسبت طول دوغاب به قطر این مخزن همواره کوچک تر از واحد است تنها از یک پره روی محور همزن استفاده شد. قطر این پره برابر با $D = \frac{T}{3} = 10 \text{ cm}$ و فاصله آن تا کف مخزن $C = \frac{T}{8} = 3.75 \text{ cm}$ در نظر گرفته شد. پهنای هر تیغه برابر با $w = \frac{T}{2.5} = 4 \text{ cm}$ ضخامت آن $t = 0.2 \text{ cm}$ در نظر گرفته شد که منجر به داشتن مقدار $S = 7/2$ می شود. دیواره‌های داخل مخزن با ۴ تیغه‌ی عمودی صاف با پهنای $B = \frac{T}{10} = 3 \text{ cm}$ و فاصله‌ی خالی تا دیواره $b = \frac{1.5 \times T}{100} = 0.45 \text{ cm}$ در چینی متقارن و با اختلاف زاویه‌ی ۹۰° پوشانده شد. در استدلالی مشابه مخزن همگن ساز، در نهایت حداقل سرعت دورانی برابر با ۲۵/۶۷ rps، و حداقل توان الکتروموتور برابر با ۰/۰۰۲ hp به دست آمد. در شکل ۳، طرح مخازن سوسپانسیون و همگن ساز به همراه همزن‌های مربوط نشان داده شده است.



زیر این مخزن، و نیز مخزن همگن ساز و در حالی که شیر تخلیه بسته است، با روشن کردن الکتروپمپ، امکان به چرخش در آمدن آن فراهم می‌شود. سپس الکتروموتورهای مربوط به همزن‌ها به کار می‌افتند تا پس از چند دور گردش مایع، وجود یک مایع کاملاً یک دست و عاری از هر نوع حباب از دیواره‌ی شفاف پلکسی مخزن همگن ساز تأیید شود. پس از این و در حالتی که فاز دوم در قسمت قیف مانند متصل به مخزن سوسپانسیون ریخته شده است، با باز کردن اندک پنجره‌ی این قیف، مقدار کمی از فاز دوم اجازه یافت تا به فاز حامل اولیه افزوده شود. پس از گذر زمانی نسبتاً کوتاه، یک ترکیب دوفازی همگن از دیواره‌ی شفاف پلکسی قابل مشاهده است. این کار باید به فواصل زمانی مشخص تا جایی ادامه یابد که کل فاز دوم به فاز اولیه اضافه شده باشد. تضمین حضور یک دوفازی کاملاً همگن که کل مقطع لوله در مخزن همگن ساز را پر کرده باشد، کارکرد اصلی این لوپ است. چگالی سنج گاما در محل مناسبی که توسط نگه‌دارنده ایجاد شده است حول مخزن همگن ساز به گونه‌ای قفل می‌شود که باریکه‌ی گاما از دیواره‌های پلکسی گلاس با ضخامت ۱ cm، جای‌گزین جداری آهنی دیواره در دو طرف، عبور کند. مزیت عمده‌ی این کار، کاهش چشمگیر تضعیف پرتوهای گاما (به خصوص گاماها‌ی کم انرژی) توسط دیواره‌های لوله و نیز فراهم ساختن امکان مشاهده‌ی عینی دوفازی موجود در لوله به منظور تأیید چشمی همگن بودن مخلوط است. چگالی سنج امکان حرکت بر روی لوله در امتداد محوری و شعاعی را خواهد داشت.

۳.۳ اعتبارسنجی عملکرد لوپ

پیش از استفاده از لوپ فوق به منظور اندازه‌گیری درصد‌های حجمی دوفازی، لازم است صحت عملکرد کلی آن، و به خصوص سازگار همگن‌سازی‌اش در یک تست استاندارد بررسی و تأیید شود. اگرچه با وجود دیواره‌های شفاف لوله در بخش همگن‌سازی، امکان بررسی کیفی این موضوع فراهم است، اما نیاز به یک سازوکار اعتبارسنجی کمی و استاندارد، کاملاً محسوس است. از آن‌جا که صحت عملکرد چگالی سنج پیش از این پژوهش و در مورد سیالات تک‌فازی و یا دوفازی‌های حل‌شونده در یک‌دیگر ثابت شده است، با مقایسه‌ی نتایج

شیر تخلیه به منظور تخلیه و پاک‌سازی لوپ پس از پایان آزمایش نصب شد. پس از بررسی الکتروپمپ‌های صنعتی در گزارش‌های استاندارد موجود در کتب مرجع [۱۳ و ۱۴] و در نهایت با در نظر گرفتن هزینه، پمپ دنده‌ای با توانایی پمپاژ ۵۰ L/min، گزینه‌ی مناسب انتخابی شد.

۵.۱.۳ بُرد کنترل الکترونیکی دستگاه

در انتها، یک بُرد الکترونیکی برای کنترل لوپ طراحی و ساخته شد. از ویژگی‌های بارز این بُرد، امکان روشن/خاموش کردن الکتروموتورهای همزن‌ها به علاوه‌ی الکتروپمپ در کنار کنترل چرخش آن‌ها است. خاموش‌سازی خودکار برق دستگاه پس از قطع و وصل برق آزمایشگاه، کسب اجازه از کاربر پس از اتصال مجدد برق آزمایشگاه، و کنترل دستگاه به صورت بی‌سیم به منظور کاهش دز رسیده به کاربر در حین تنظیم دستگاه، از ویژگی‌های بارز این واحد هستند. انتخاب الکتروموتورهای با توان ۱ hp در کنار استفاده از مبدل‌هایی که سرعت‌های چرخش همزنی را تا مقدار بیشینه ۱۲۰۰ rpm ایجاد می‌کنند، لوپ ساخته شده را برای گستره‌ی وسیعی از مواد دوفازی جامد-مایع و نیز مایع-مایع قابل کاربرد می‌کند. در مورد دوفازی نفت-آب، به دلیل کاهش اختلاف چگالی دوفاز نسبت به حالت پودر-آب از ۰/۸۵ g/cm^۳ به حدود ۰/۱۵ g/cm^۳ (چگالی نفت برابر با ۰/۸۵ g/cm^۳ در نظر گرفته شد)، با وجود داشتن گران‌روی جنبشی از مرتبه‌ی بزرگی ۲/۶ برابر، حداقل چرخش همزن نسبت به وضعیت پودر-آب برابر خواهد شد با:

$$\frac{N_{js}(\text{oil} - \text{water})}{N_{js}(\text{powder} - \text{water})} = \left(\frac{2}{1}\right)^{0.1} \times \left(\frac{0.15}{3.22}\right)^{0.45} = 0.28 \quad (10)$$

که تأییدی بر توانایی لوپ در همگن‌سازی کامل دوفازی نفت-آب برای اندازه‌گیری درصد حجمی توسط یک سنج‌هی گاما است.

۲.۳ راه‌اندازی لوپ

ابتدا فاز مایع حامل، از ورودی تعبیه شده در بالا، به مخزن آماده‌سازی سوسپانسیون وارد، و سپس با باز کردن شیر فلکه‌ی



۴. نتایج

۴.۱ نتایج اعتبارسنجی لوپ

نتایج مربوط به شمارش‌های عبوری گاما از لوله‌ی بخش همگن‌ساز لوپ TPFHL به ازای درصد‌های حجمی مختلف پودر سنگ آهن شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ پودر آماده، و در ارتفاع‌های مختلف، برای حالت عبوری باریکه‌ی گاما از کنار محور، اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از اندازه‌گیری، یکی از درصد‌های حجمی بالا به مخزن آماده‌سازی سوسپانسیون خورنده شد. تمامی شمارش‌ها در بازه‌های زمانی ۵ min و به تعداد ۱۰ بار انجام گرفت و میانگین آهنگ‌های شمارش به دست آمده به صورت شمارش مرتبط با درصد حجمی مورد نظر ثبت، و در معادله‌ی (۶) برای انجام محاسبات استفاده شد.

با استفاده از داده‌های جدول ۱ و نیز معادله‌ی (۶)، که برای دوفازی پودر-آب قابل بازنویسی شده است، مقادیر درصد حجمی پودر محاسبه، و در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۴، نمودار تغییرات درصد‌های حجمی اندازه‌گیری شده‌ی پودر نسبت به مقادیر از پیش آماده‌سازی در آزمایشگاه، به ازای ارتفاع‌های مختلف قرارگیری سنج‌های گاما حول مخزن همگن‌ساز نشان داده شده است. همان‌گونه که مشهود است، هم‌خوانی قابل قبولی بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد حجمی به ازای ارتفاع‌های مختلف وجود دارد که تأییدی بر عملکرد سیستم همگن‌ساز در تحویل یک دوفازی با درجه‌ی همگنی یکسان در امتداد ارتفاع این مخزن است. با توجه به توافق قابل قبول بین نتایج اندازه‌گیری و مقادیر از پیش آماده‌سازی شده‌ی درصد‌های حجمی که با بیشینه عدم تطابق ۳٪ به ازای ۵٪ حجمی پودر قابل مشاهده است، می‌توان بر صحت عملکرد همگن‌سازی لوپ مورد اشاره تأکید کرد. همان‌گونه که از نمودار مشخص است، به ازای درصد‌های پایین، بر خطای سیستم در همگن‌سازی افزوده می‌شود که به سبب پایین بودن درصد پودر و عدم امکان قرارگیری، نماینده‌ی صحیحی از این درصد‌ها پیش روی باریکه‌ی عبوری است.

اندازه‌گیری درصد‌های حجمی مخلوط‌های نامحلول در یک‌دیگر، با درصد‌های آماده‌سازی شده (به طور خاص در مورد پودر سنگ آهن-آب در این پژوهش)، که صرفاً با وجود یک محیط کاملاً همگن دارای مقادیری برابر و در محدوده‌ی خطای قابل قبول ($\pm 5\%$) قرار خواهند شد، می‌توان به صورت کمی و البته استاندارد، عملکرد همگن‌سازی لوپ را بررسی و تأیید کرد. در این‌جا از تضعیف باریکه‌ی گامای چشمه ^{137}Cs با پرتوژایی 370 MBq (10 mCi) استفاده شد. در گام نخست، درصد حجمی مشخصی از پودر به صورت مخلوط دوفازی جامد-مایع شامل پودر سنگ آهن (با غنای ۶۷٪) با آب ایجاد، و به لوپ خورنده شد. پس از گذشت زمان متوسطی در حدود ۵ min، همگن‌سازی دوفازی به صورت کیفی و به کمک پنجره‌های شفاف لوله (دیواره‌های پلکسی گلاس) تأیید شد، سپس مجموعه‌ی چگالی سنج گاما شامل چشمه‌ی پرتوزا و آشکارساز سوسوزن بر روی لوله‌ی مخزن همگن‌ساز و در محل مناسب تعبیه شده در نگه‌دارنده (در ارتفاع ۲۰ cm از پایین لوله مخزن) قرار داده شد. باریکه‌ی نازک ایجاد شده از میان موازی‌سازهای سربی، از کنار محور همزن و نیز دیواره‌ی شفاف پلکسی عبور داده، و شمارش‌ها برای یک بازه‌ی زمانی ۵ min انجام شد. در ادامه، با گام‌های ۵ cm در امتداد محور لوله‌ی استوانه‌ای چگالی‌سنج جابه‌جا، و در مکان‌های مذکور قرار داده، و شمارش‌های مشابه انجام شد. آهنگ شمارش ثبت شده‌ی نهایی برابر با حاصل تقسیم شمارش بر مدت زمان شمارش برحسب ثانیه است. با حصول اطمینان از عملکرد لوپ همگن‌ساز، به این مطلب پرداخته شده که در یک محیط شبیه‌ساز MCNP، با چه دقتی (قاعدتاً بهترین دقتی خواهد بود که می‌توان امیدوار بود در آینده و با داده‌گیری تجربی به آن دست یافت) می‌توان اندازه‌گیری درصد‌های حجمی را برای دوفازی آب-نفت در اختیار داشت. داده‌گیری تجربی مربوط به این کار نیازمند شبیه‌سازی به منظور طراحی و ساخت یک موازی‌ساز با ابعاد مناسب از نظر قطر و عمق سوراخ دارد که نه تنها تاکنون به آن پرداخته نشده، بلکه خود به صورت پژوهشی مستقل شایسته‌ی پرداختن است.

**جدول ۱.** آهنگ شمارش گامای عبوری ^{137}Cs از لوله‌ی حاوی جریان دوفازی آب-پودر سنگ آهن (با غنای ۶۷٪)

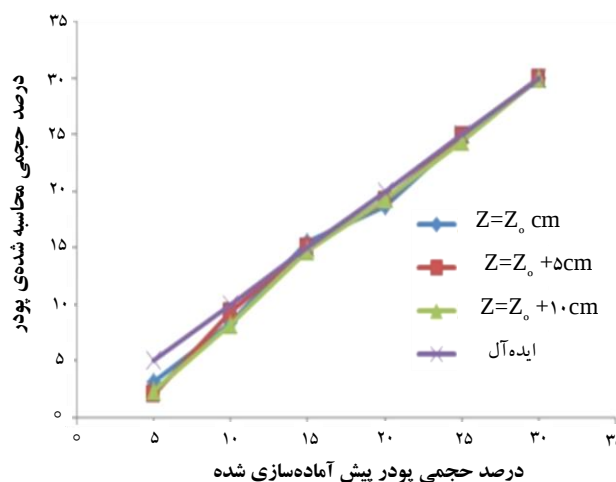
	۳۰٪ حجمی پودر	۲۵٪ حجمی پودر	۲۰٪ حجمی پودر	۱۵٪ حجمی پودر	۱۰٪ حجمی پودر	۵٪ حجمی پودر
	I	I	I	I	I	I
$Z=Z_0$	4443 ± 87	4838 ± 95	5357 ± 107	5636 ± 109	6348 ± 108	6911 ± 114
$Z=Z_0 + 5$	4575 ± 88	4954 ± 91	5413 ± 96	5768 ± 110	6295 ± 113	7056 ± 120
$Z=Z_0 + 10$	4418 ± 100	4850 ± 100	5284 ± 100	5694 ± 100	6342 ± 100	6997 ± 100
$I_{\text{water}} = 7283 \pm 108$						

جدول ۲. درصد حجمی محاسباتی پودر در لوله‌ی حاوی جریان دوفازی آب-پودر سنگ آهن (با غنای ۶۷٪)

	۳۰٪ حجمی پودر	۲۵٪ حجمی پودر	۲۰٪ حجمی پودر	۱۵٪ حجمی پودر	۱۰٪ حجمی پودر	۵٪ حجمی پودر
	α_{powder}	α_{powder}	α_{powder}	α_{powder}	α_{powder}	α_{powder}
$Z=Z_0$	30 ± 4.2	24.8 ± 3.8	18.6 ± 3.4	15.6 ± 3.2	8.3 ± 2.5	3.2 ± 2.1
$Z=Z_0 + 5$	30 ± 4.4	24.9 ± 4.0	19.1 ± 3.5	15.0 ± 3.3	9.4 ± 2.8	2.0 ± 2.2
$Z=Z_0 + 10$	30 ± 4.5	24.6 ± 4.0	19.3 ± 3.5	14.8 ± 3.1	8.3 ± 2.5	2.4 ± 1.9

حجمی از ۱۰۰٪ تا ۵٪ از نفت با گام‌های ۵٪، این بار در دوفازی آب-نفت در محیط شبیه‌ساز نرم‌افزار مونت کارلو MCNP که برای ترابرد پرتوهای گاما در ماده بسیار کاربرد دارد انجام شد. آهنگ‌های شمارش گامای عبوری برای چشمه‌ی پرتوزایی ^{241}Am با پرتوزایی ۴/۶ GBq (۱۲۵ mCi) در بازه‌ی زمانی ۱۰ min، برای تمام این درصدها و نیز در مرحله‌ی کالیبراسیون برای حالتی که کل لوله پُر از آب و نیز پُر از نفت بود، به ازای شرایطی که پرتو گاما از کنار شفت عبور می‌کرد، محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

با استفاده از داده‌های جدول ۳ و نیز معادله‌ی (۷)، مقادیر درصد حجمی آب محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. در شکل ۵، نمودار تغییر درصدهای حجمی اندازه‌گیری شده آب نسبت به مقادیر از پیش آماده‌سازی شده، در محیط شبیه‌ساز MCNP، برای مخلوط دوفازی آب-نفت نشان داده شده است. هم‌خوانی قابل قبول بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد حجمی آب و مقادیر از پیش آماده‌سازی شده این درصدها، شاهده‌ی بر توانایی استفاده از تکنیک تضعیف گامای عبوری چشمه کم‌انرژی ^{241}Am در اندازه‌گیری درصد حجمی مؤلفه‌های دوفازی مورد نظر است.

**شکل ۴.** تغییر درصدهای حجمی اندازه‌گیری شده‌ی پودر نسبت به مقادیر از پیش آماده‌سازی شده در آزمایشگاه، به ازای ارتفاع‌های مختلف قرارگیری سنج‌های گاما حول مخزن همگن‌ساز مخلوط دوفازی پودر-آب.

۲.۴ نتایج اندازه‌گیری درصدهای حجمی دوفازی آب-نفت

پس از آن که لوپ طراحی شده اعتبارسنجی شد، اکنون زمان اندازه‌گیری درصدهای حجمی دوفازی آب-نفت است. در این مرحله، و از آن‌جا که نیاز به استفاده از چشمه‌ی ^{241}Am با پرتوزایی حداقل ۴/۶ GBq (۱۲۵ mCi) توزیع شده در سطحی دایروی با شعاع ۴ mm است تا بتوان باریکه‌ی موازی‌سازی شده با پرتوزایی مناسبی را از آن گرفت، و هنوز چنین چشمه‌ای و در نتیجه موازی‌سازی که برای آن به طور مناسب طراحی و ساخته شده باشد در اختیار نبود، پس ناگزیر محاسبات با درصدهای

جدول ۳. آهنگ شمارش گامای عبوری ^{241}Am از لوله‌ی حاوی جریان دوفازی آب-نفت

	۵٪ حجمی آب	۱۰٪ حجمی آب	۱۵٪ حجمی آب	۲۰٪ حجمی آب	۲۵٪ حجمی آب	۳۰٪ حجمی آب	۴۰٪ حجمی آب	۵۰٪ حجمی آب
$Z=Z_o$	I_{mix} 5213 ± 72	I_{mix} 5139 ± 72	I_{mix} 5093 ± 71	I_{mix} 5028 ± 71	I_{mix} 5010 ± 71	I_{mix} 4985 ± 71	I_{mix} 4917 ± 70	I_{mix} 4806 ± 69
	$I_{water}=4334 \pm 66$				$I_{oil}=5287 \pm 73$			

جدول ۴. درصد حجمی محاسباتی آب در لوله‌ی حاوی جریان دوفازی آب-نفت

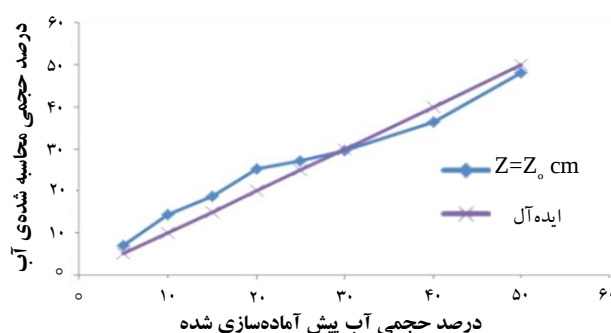
	۵٪ حجمی آب	۱۰٪ حجمی آب	۱۵٪ حجمی آب	۲۰٪ حجمی آب	۲۵٪ حجمی آب	۳۰٪ حجمی آب	۴۰٪ حجمی آب	۵۰٪ حجمی آب
$Z=Z_o$	α_{water} 7.1 ± 0.2	α_{water} 14.3 ± 0.4	α_{water} 18.8 ± 0.4	α_{water} 25.3 ± 0.5	α_{water} 27.1 ± 0.2	α_{water} 29.6 ± 0.4	α_{water} 36.5 ± 0.3	α_{water} 48.1 ± 0.4

آب-پودر آهن، به ازای ۳ موقعیت مختلف در امتداد محور همزن همگن ساز، به خوبی و در محدوده‌ی خطای ناشی از آمار شمارش، با یکدیگر همخوانی دارند که به خوبی نشان از عملکرد مخلوط سازی یکسان لوپ در امتداد محور استوانه است. از طرف دیگر، این درصدهای محاسباتی با مقادیر واقعی و از پیش آماده، به طور مناسبی در محدوده‌ی خطای استاندارد $\pm 5\%$ همخوانی دارد که این نیز خود نشان دهنده‌ی همگن سازی قابل قبول ترکیب‌های دوفازی آماده شده مطابق با مقادیر اولیه‌ی آنها است.

با توجه به این که لوپ طراحی شده اعتبارسنجی شده، و نتیجه‌ی قابل قبولی را نشان داده است، داده‌های حاصل از این پژوهش نشان از اندازه گیری صحیح و قابل قبول درصدهای حجمی نفت در مخلوط دوفازی همگن شده آب-نفت، در محدوده‌ی خطای مجاز آماری دارند. با وجود خطای ناشی از آمار شمارش که سبب شده داده‌های شبیه سازی با واقعیت اختلاف اندکی داشته باشند، مشاهده می شود که نتایج به دست آمده در شبیه سازی، حکایت از بیشینه دقت قابل حصول خوبی است که در واقعیت برای داده گیری‌های تجربی در آینده، در قیاس با خطای پیشنهادی در مراجع استاندارد ($\pm 5\%$) وجود خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای که با کادر علمی مجرب در کنار امکانات آزمایشگاهی و کارگاهی بسیار مناسب، شرایط را برای انجام و به مقصود رسیدن این پژوهش فراهم کرد.



شکل ۵. تغییر درصدهای حجمی اندازه گیری شده‌ی آب نسبت به مقادیر از پیش آماده سازی شده، در محیط شبیه ساز MCNP، برای مخلوط دوفازی آب-نفت.

۵. بحث و نتیجه گیری

همان گونه که از معادلات (۷ و ۸) قابل استنباط است، حداقل سرعت لازم برای همگن سازی مخلوط دوفازی، به پارامترهای درصد حجمی پودر (فاز پراکنده)، گرانروی مطلق مایع (فاز حامل)، چگالی مایع، بیشینه اندازه‌ی دانه‌های پودر، و مشخصات هندسی پره‌های همزنی بستگی دارد. از طرفی هرچه میزان سرعت پایین تری برای دست یابی به همگن سازی مخلوط نیاز باشد، به معنای سهولت بیش تر در همگن سازی خواهد بود. با توجه به حداکثر سرعت همزن‌ها که برابر با ۱۲۰۰ rpm (۲۰ rps) است، و نیز مقادیر به کار گرفته شده‌ی پارامترهای فوق در مورد خاص پودر سنگ آهن-آب در این پژوهش، با استفاده از همزن‌های فوق، می توان به آسانی امکان همگن سازی و نیز میزان سادگی در این کار نسبت به وضعیت پودر سنگ آهن-آب را به ازای تغییر در پارامترهای مذکور بررسی کرد.

داده‌های ثبت شده در این پژوهش نشان می دهند که درصدهای حجمی محاسباتی برای هر کدام از ترکیبات دوفازی



پی‌نوشت‌ها

1. Baffle
2. Off-Bottom
3. Cavitation

مراجع

- [1] S. Corneliussen, J.P. Couput, E. Dahl, E. Dykesteen, K.E. Frøysa, E. Malde, H. Moestue, P.O. Moksnes, L. Acheers, H. Tunheim, Handbook of multiphase flow metering. Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM), Revision 2 (2005).
- [2] T.J. Hill, Gas-liquid flow challenges in oil and gas production, In ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, BC. (1997).
- [3] R. Thorn, G.A. Johansen, E.A. Hammer, Recent Developments in three-phase flow measurement, *Meas. Sci. Technol.* **8** (7) (1997) 691-701.
- [4] <http://cmr.no/facilities/cmr-multiphase-flow-loop>.
- [5] <http://www.prolabnl.com/test-facilities>.
- [6] <http://mff.swri.org>.
- [7] R. Thorn, G.A. Johansen, B.T. Hjertaker, Three-phase flow measurement in the petroleum industry, *Meas. Sci. Technol.* **24** (1) (2012) 1-17.
- [8] G.F. Hewitt, P.S. Harrison, S.J. Parry, G.L. Shires, Development and testing of the 'mixmeter' multiphase flow meter, Proc. 13th North Sea Flow Measurement Workshop (Lillehammer, Norway) (1995).
- [9] M.N. Al-Khamis, A.F. Al-Bassam, Z. Bakhteyar, M.N. Attab, Evaluation of phasewatcher multiphase flow meter (MPFM) in sour environments, Proc. Offshore Technology Conf. (Houston, USA) (2008).
- [10] Ø. Fossø, G. Stobie, A. Wee, Successful implementation and use of multiphase meters Proc. 27th Int. North Sea Flow Measurement Workshop (Tønsberg, Norway) (2011).

فهرست نشانه‌ها

- α_{gas} درصد حجمی گاز
 α_{water} درصد حجمی آب
 α_{oil} درصد حجمی نفت
 v_{gas} سرعت گاز
 v_{water} سرعت آب
 v_{oil} سرعت نفت
 A سطح مقطع لوله‌ی جریان
 Q دبی حجمی سه‌فازی
 μ_{gas} ضریب تضعیف خطی گاز
 μ_{water} ضریب تضعیف خطی آب
 μ_{oil} ضریب تضعیف خطی نفت
 I_o آهنگ شمارش لوله‌ی خالی
 I_{mix} آهنگ شمارش لوله‌ی حاوی سیال
 d طول تضعیف گاما در لوله
 B فاکتور هندسی
 I_{water} آهنگ شمارش لوله‌ی حاوی آب
 I_{oil} آهنگ شمارش لوله‌ی حاوی نفت
 β_{powder} درصد جرمی پودر
 α_{powder} درصد حجمی پودر
 ρ_{powder} چگالی پودر
 P_{water} چگالی آب
 I_t آهنگ شمارش لوله‌ی حاوی بیشینه درصد حجمی پودر
 t بیشینه درصد حجمی پودر
 N_{js} حداقل سرعت دورانی رسیدن به یک سوسپانسیون کامل
 N_{us} حداقل سرعت دورانی رسیدن به یک سوسپانسیون همگن
 d_p قطر بزرگ‌ترین ذره‌ی جامد
 g_c ثابت گرانش
 ρ_s چگالی ذرات جامد
 ρ_l چگالی مایع
 v_{slurry} گرانروی جنبشی دوغاب
 μ_{slurry} گرانروی مطلق دوغاب
 ρ_{slurry} چگالی دوغاب
 μ_{liquid} گرانروی مطلق فاز مایع
 N_p عدد توان همزن
 η عکس بازدهی الکتروموتور
 ξ عکس درصد اتلافی توان الکتروموتور
 P توان الکتروموتور
 X درصد جرمی جامد در مایع



- [11] P. Mehdizadeh, D. Farchy, J. Suarez, Multiphase meter production well testing applied to low GOR mature fields, Proc. SPE Production and Operations Symp. (Oklahoma, USA) (2009).
- [12] E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta, Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice, John Wiley & Sons, (2004).
- [13] I.J. Karassik, J.P. Messina, P. Cooper, C.C. Heald, Pump Handbook, McGraw-Hill, (2001).
- [14] A.C. Wightley, Slurry Pumping Manual, a Technical Application Guide for Users of Centrifugal Slurry Pumps and Slurry Pumping Systems, First Edition, Warman International LTD, (2002).