

پیش‌بینی کسر حجمی هوا مستقل از تغییرات رژیم سیال توسط دبی سنج هسته‌ای با استفاده از شبکه‌ی عصبی و ویژگی‌های استخراج‌شده از طیف ارتفاع پالس

INC29-1046

اعرابی جشوقانی، پیمان*^(۱) - فقهی، سید امیرحسین^(۲) - رضایی، خدیجه^(۱) - جعفری، آزاده^(۳) - عاملی، فروغ^(۴)

۱. دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای - کاربرد پرتوها

۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۳. دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی مکانیک

۴. دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده:

صیانت از دارایی‌های عمومی در مبادلات نفتی با توجه ارزش بالا، مشروط به اندازه‌گیری دقیق مقدار آن‌هاست. در این پژوهش، به کمک شبکه‌ی عصبی مقدار کسر حجمی هوا، مستقل از تغییرات رژیم سیال در یک حلقه‌ی جریان دوفازی در محیط آزمایشگاه پیش‌بینی گردید. یک آشکارساز یدور سدیم جهت ثبت طیف ارتفاع پالس حاصل از چشمه‌ی سزیم-۱۳۷ مورد استفاده قرار گرفت و دو شبکه‌ی عصبی مستقل، با ویژگی‌های استخراج‌شده به صورت رایج و با استفاده از تبدیل موجک، از طیف ارتفاع پالس آموزش داده شد. در نهایت، کسر حجمی هوا در شبکه‌ی آموزش داده‌شده، با استفاده از ویژگی‌های مستخرج از تبدیل موجک با دقت بالا و میانگین خطای کمتر از ۰/۰۰۹ پیش‌بینی گردید.

کلیدواژه‌ها: تبدیل موجک، شبکه عصبی مصنوعی، جریان دوفازی، کسر حجمی هوا

Void Fraction Prediction Independent of Flow Regime Changes Using Neural Network and Extracted Features from Pulse Height Distribution

Aarabi Jeshvaghani, Peyman¹; Fegghi, Seyed Amirhossein²; Ameli, Frough³; Jafari, Azade⁴; Rezaee, Khadijeh¹

¹ University of Isfahan, Faculty of Physics, Radiation Application Department

² University of Shahid Beheshti, Radiation Application Department

³ Iran University of Science and Technology, Faculty of Chemical Engineering

⁴ School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran

Abstract:

Protection of public assets in oil exchanges, due to their high value, is subject to accurate measurement of their amount. In this research, with the help of neural network, the void fraction was predicted independent of flow regime changes in a two-phase flow loop in the laboratory environment. A sodium iodide detector was used to record the pulse height distribution obtained from the cesium-137 source. Two independent neural networks were trained using commonly extracted features and wavelet transform from the pulse height distribution. Finally, the void fraction in the trained network was predicted using the features extracted from the wavelet transform with high accuracy and the mean absolute error less than 0.009.

Keywords: Wavelet, Artificial neural network, Two-phase flow, Void fraction

۱. مقدمه:

مسئله‌ی اندازه‌گیری ترکیب چندفازی نفت-آب-گاز از اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی از جمله مهم‌ترین مسائل در صنعت نفت بوده است [۱]. در سال ۱۹۹۳ بایشاپ^۱ و جیمز^۲ [۲] از شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین رژیم و تخمین درصد حجمی در سیالات چندفازی استفاده کردند. در سال ۱۹۹۹ ابرو^۳ و ژوهانسن^۴ [۳] نوع رژیم و کسر حجمی گاز را در سیال دوفازی مایع-گاز با استفاده از سیستم چند پرتویی چشمه‌ی Am-241 و طیف به‌دست‌آمده از چند آشکار ساز، تعیین کردند. به‌منظور تعیین کسر حجمی گاز مستقل از رژیم سیال عبوری، از سیستم چند پرتویی به‌جای یک پرتویی استفاده شد. آن‌ها داده‌های موردنیاز را با شبیه‌سازی رژیم‌های مختلف همگن، حلقوی و صفحه‌ای در کسر حجمی‌های مختلف در نرم‌افزار EGS4 مونت‌کارلو به دست آوردند. در سال ۲۰۰۲ تی جاگام^۵ و همکارانش [۴]، با استفاده از یک چشمه‌ی آمر سیوم و پیک مربوط به انرژی ۶۰ کیلوولت آن و چینش جدید دو آشکار ساز عبوری و یک آشکار ساز پراکندگی در زاویه‌ی ۹۰ درجه، نوع رژیم و کسر فضای خالی در رژیم سه فازی را مستقل از شوری آب تعیین کردند.

ما^۶ و همکارانش [۵]، با استفاده از ونتوری و روش تضعیف گاما اقدام به دبی سنجی جریان سه‌فازی هوا-آب-نفت کردند. در این پژوهش از یک اتصال T شکل برای تبدیل جریان از حالت افقی به عمودی استفاده‌شده که وظیفه همگن کردن جریان سه فازی را دارد. با در نظر گرفتن ضریب لغزش بین فاز آب و نفت در رژیم مشخص لایه‌ای، موفق به پیش‌بینی دبی هر یک از فازها شدند. میزان خطای نسبی برای دبی گاز برابر با $\pm 8\%$ ، برای دبی آب $\pm 15\%$ و برای دبی نفت $\pm 20\%$ گزارش شده است. ژانگ^۷ و همکارانش [۶]، برای اولین بار ایده‌ی استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق را مطرح کردند. در این پژوهش تأکید بر طراحی شبکه عصبی کانولوشن^۸ یک‌بعدی (1D) است. برای آموزش شبکه‌ی عصبی از داده‌های اختلاف فشار به‌دست‌آمده در نواحی قبل و بعد از گلوپی، استفاده‌شده است. در جریان دوفازی گاز-مایع، شبکه عصبی پیشنهادی دبی آب را با خطای $\pm 10\%$ و دبی گاز را با خطای $\pm 20\%$ پیش‌بینی کرد.

هدف پژوهش حاضر، تعیین کسر حجمی هوا در حلقه جریان دوفازی مستقل از تغییرات رژیم سیال با استفاده از تکنیک تضعیف پرتوهای گاما است. دو شبکه‌ی عصبی مصنوعی مستقل برای پیش‌بینی کسر حجمی، مورد استفاده قرار گرفت. شبکه‌ی اول توسط ویژگی‌های رایج طیف ارتفاع پالس و شبکه‌ی دوم توسط ویژگی‌های استخراج شده از الگوریتم تبدیل موجک مورد آموزش قرار گرفتند. سپس داده‌هایی برای تست دو شبکه‌ی عصبی، به آن اعمال گردید و مشخص شد که خروجی شبکه‌ی عصبی آموزش‌دیده، با ویژگی‌های استخراج‌شده توسط تبدیل موجک دارای دقت بالاتری است.

۲. روش کار:

¹ Bishop

² James

³ Abro

⁴ Johansen

⁵ Tjugum

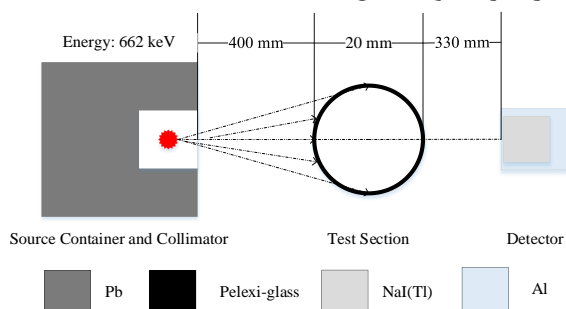
⁶ Ma

⁷ Zhang

⁸ Convolution

سیستم آزمایشگاهی شامل دو بخش اصلی بوده که اولین بخش، یک حلقه جریان دوفازی دینامیک گاز-مایع برای ایجاد رژیم‌های مختلفی نظیر حبابی، لخته‌ای، توپی، حلقوی و پراکنده است. در این بخش، یک لوله‌ی پلکسی گلس ۱ با قطر داخلی ۲ سانتی‌متر به‌عنوان قسمت تست در حالت افقی در نظر گرفته‌شده؛ بنابراین، انواع رژیم‌های ایجادشده در داخل لوله را می‌توان دید. دبی آب در این حلقه بین ۱۰۰-۱۰ لیتر بر دقیقه با استفاده از یک شیر کنترلی قابل‌تغییر و نیز، دبی هوا در بازه‌ی ۱۰۰-۱۰ لیتر بر دقیقه در یک مسیر ۰/۵ اینچی و در بازه‌ی ۱۰۰-۱۰ لیتر بر دقیقه در یک مسیر ۱ اینچی قابل‌تغییر است.

بخش پرتویی، قسمتی دیگری از سیستم آزمایشگاهی است. سیستم اندازه‌گیری هسته‌ای شامل یک چشمه‌ی پرتوزای گاما سزیم-۱۳۷ ۶/۵ میلی‌کوری و یک آشکارساز یدور سدیم ۳ اینچ (آشکارساز با قطر و ارتفاع ۳ اینچ) که معمولاً در دبی‌سنجی چندفازی و چگالی‌سنجی رایج هستند، می‌باشد [۷]. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از نحوه‌ی قرارگیری آشکارساز و چشمه، در اطراف لوله نشان داده‌شده است.



شکل ۱. نمایی از قرارگیری چشمه و آشکارساز در اطراف قسمت تست.

۲.۱. تبدیل موجک:

تبدیل موجک به‌عنوان یک ابزار ریاضی در شاخه‌های مختلف مهندسی کاربرد متفاوت دارد و این، ابزار قابلیت‌های منحصربه‌فرد تعقیب تغییرات یک سیگنال را در طیف زمانی - مقیاسی (زمانی - فرکانسی) وسیع به‌طور هم‌زمان دارد. از تبدیل موجک در کارهایی نظیر یافتن نقاط ناپیوسته در سیگنال، نویز برداری از سیگنال، فشرده‌سازی سیگنال و استخراج مشخصه استفاده می‌شود.

طیف حاصل از آشکارساز یدور سدیم در دبی‌های مختلف آب و هوا دارای نویز^۲ بوده و هموار نمی‌باشد. به‌منظور هموارسازی طیف و استخراج مشخصه، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، ابتدا شمارش‌های زمینه از طیف اصلی کسر شده و با استفاده توابع معروف تبدیل موجک؛ نظیر هار^۳، دابچیز^۴، سیملت^۵ و کوپفلت^۶ عمل نویز کاهی در چهار سطح بر روی طیف انجام می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، با استفاده از تبدیل موجک گسسته، طیف به دو بخش کلیات^۷ (فرکانس پائین) و جزئیات^۸ (فرکانس بالا) تقسیم می‌گردد. در شکل ۲، چهار سطح کاهش نویز بر روی طیف ارتفاع پالس با استفاده از تابع کوپفلت نشان داده‌شده است.

^۱ Plexiglass

^۲ Jitter

^۳ Haar

^۴ Diubechies

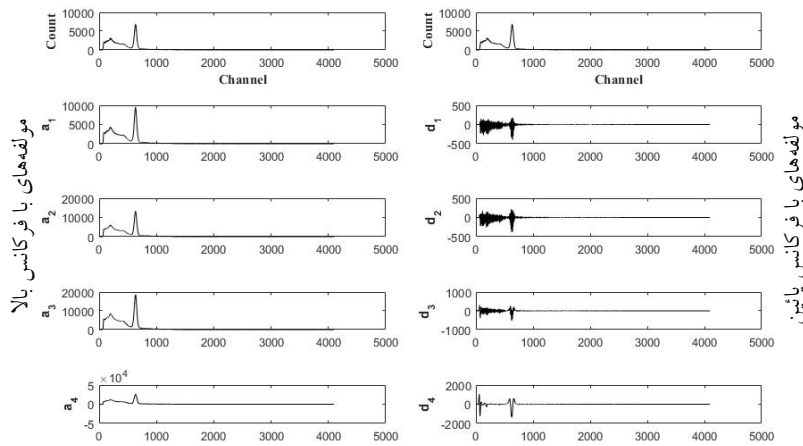
^۵ Symlet

^۶ Coiflet

^۷ Approximation

^۸ Detail

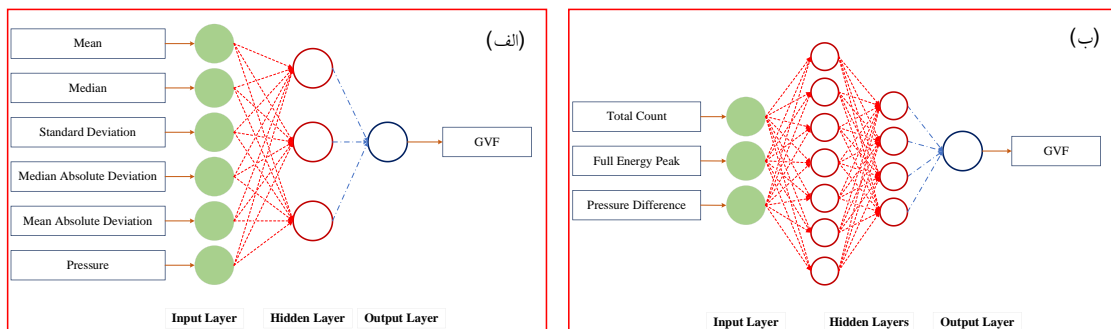
۷ اسفندماه ۱۴۰۱



شکل ۲. تجزیه طیف ارتفاع پالس به قسمت‌های با فرکانس بالا و پائین با استفاده از تابع کوئیفلت.

۲.۲. شبکه‌ی عصبی مصنوعی:

شبکه‌ی عصبی مصنوعی ابزار قدرتمندی است که در زمینه‌های مختلف؛ از جمله دبی‌سنجی در جریان‌های چندفازی با استفاده از پرتوهای گاما نیز، مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. در این پژوهش، دو شبکه‌ی عصبی MLP جداگانه برای تعیین کسر حجمی هوا، به ترتیب با سه و هفت ورودی پیشنهاد شده است. در شبکه‌ی مصنوعی اول از روش‌های معمول استخراج مشخصه از طیف ارتفاع پالس؛ نظیر شمارش کل و شمارش قله‌ی تمام انرژی به همراه اختلاف فشار در مسیر جریان استفاده شده است. برای شبکه‌ی دوم، روش نوین استخراج مشخصه توسط تبدیل موجک، که می‌توان آن را نقطه‌ی قوت این پژوهش دانست، مورد استفاده واقع شده است. بعد از گسستن طیف ارتفاع پالس به اجزای فرکانس بالا و فرکانس پائین، مشخصه‌های آماری؛ نظیر میانگین^۱، میانه^۲، انحراف معیار^۳، میانه مطلق انحراف^۴ و میانگین مطلق انحراف^۵ در کنار اختلاف فشار، برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهترین ساختار برای شبکه‌ی عصبی با توجه به ورودی‌ها و لایه‌های پنهان، مطابق شکل (۳) به دست آمده است. در شبکه‌های عصبی مورد استفاده، از داده‌های به دست آمده در حلقه‌ی جریان دوفازی دینامیک، حدود ۷۰٪ داده‌ها در فرآیند آموزش و در حدود ۳۰٪ داده‌ها در فرآیند تست استفاده شده است.



شکل ۳. ساختار شبکه‌های عصبی پیشنهادی (الف) استخراج مشخصه‌ی معمولی (ب) استخراج مشخصه با استفاده از تبدیل موجک.

- 1 Mean
- 2 Median
- 3 Standard deviation
- 4 Median absolute deviation
- 5 Mean absolute deviation

۳. نتایج:

مقدار کسر حجمی هوا در شرایط تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو شبکه عصبی مستقل با ورودی‌های متفاوت در منحنی‌های رگرسیون^۱ شکل ۴ و شکل ۵ به نمایش درآمدند. همان‌گونه که در منحنی‌های رگرسیون مشخص است، داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی و داده‌های حاصل از حلقه‌ی جریان دوفازی، دارای مقادیر نزدیک به هم بوده ولی دقت مقادیر به دست آمده برای حالتی که شبکه با مشخصه‌های آماری آموزش دیده، دارای مقادیر دقیق‌تری است.

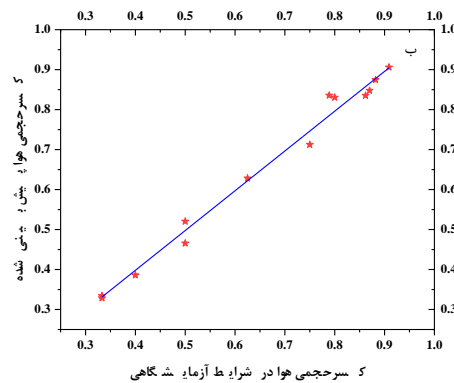
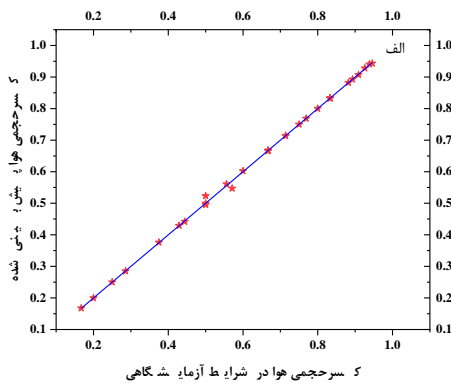
برای ارزیابی عملکرد شبکه در مراحل آموزش و تست، خطای نسبی متوسط (MRE)، خطای ریشه مربع میانگین (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ محاسبه شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_o(i) - Y_o(i)| \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_o(i) - Y_o(i))^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

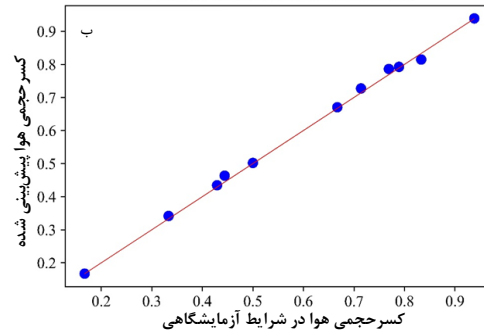
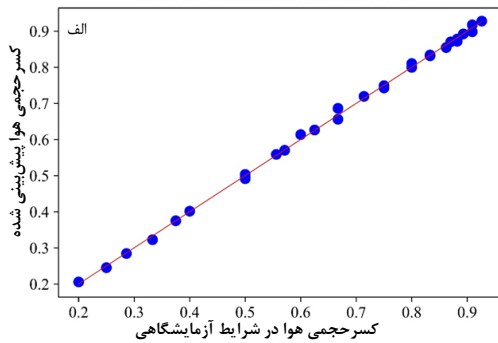
$$MRE(\%) = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_o(i) - Y_o(i)}{T_o(i)} \right| \quad (3)$$

به طوری که N تعداد داده‌های مورد استفاده برای آموزش و تست، $T_o(i)$ و $Y_o(i)$ مقادیر کسر حجمی تجربی و پیش‌بینی شده است. مقادیر خطای به دست آمده برای بهترین شبکه آموزش داده شده در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به مقادیر خطاهای محاسبه شده، کسر حجمی در هر دو شبکه با حداقل مقدار خطا، پیش‌بینی شده و دقت بالاتر مقادیر پیش‌بینی شده، توسط شبکه آموزش داده شده با داده‌های آماری، نشان از افزایش بهره‌وری شبکه عصبی است.



شکل ۴. الف) منحنی رگرسیون برای داده‌های آموزش با استخراج مشخصه‌ی رایج (ب) منحنی رگرسیون برای داده‌های تست با استخراج مشخصه‌ی رایج.

¹ Regression



شکل ۵. الف) منحنی رگرسیون برای داده‌های آموزش با مشخصه‌ی استخراج‌شده توسط تبدیل موجک (ب) منحنی رگرسیون برای داده‌های تست با مشخصه‌ی استخراج‌شده توسط تبدیل موجک.
جدول ۱. مقادیر خطای محاسبه‌شده برای شبکه‌های عصبی.

| درصد میانگین خطای نسبی | | ریشه میانگین مربعات خطا | | میانگین خطایی مطلق | | نوع شبکه عصبی | ویژگی استخراج‌شده |
|------------------------|------|-------------------------|-------|--------------------|-------|---------------|--------------------|
| آموزش | تست | آموزش | تست | آموزش | تست | | |
| ۰/۹۲ | ۱/۴۷ | ۰/۰۰۶۳ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۸ | MLP | تبدیل موجک |
| ۰/۴۷۸ | ۲/۹۳ | ۰/۰۰۶۹ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۹ | MLP | بدون استخراج مشخصه |

۴. بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه یک سیستم ساده، غیر مخرب و بهینه‌شده برای آنالیز و دبی‌سنجی جریان‌های چندفازی مستقل از تغییرات رژیم، پیشنهاد شد. طیف ارتفاع پالس حاصل از چشمه‌ی سزیم، در اثر تغییرات دبی سیال آب و گاز در حلقه‌ی جریان دوفازی توسط آشکارساز یدور سدیم ثبت گردید. مشخصه‌های موجود در طیف با دو روش رایج و با استفاده از روش جدید و کاربردی تبدیل موجک استخراج و به‌عنوان ورودی در دو شبکه‌ی عصبی مستقل مورد استفاده قرار گرفت. کسر حجمی هوا در دو شبکه با حداقل مقدار خطا پیش‌بینی شد؛ اما با استفاده از روش هوشمند استخراج مشخصه با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک، مقدار کسر حجمی با میانگین خطای مطلق کمتر از ۰/۰۰۹ پیش‌بینی شد. استفاده از سیستم ساده، بدون نیاز به کالیبراسیون مجدد در کنار شبکه عصبی و استخراج مشخصه‌ی هوشمند نشان از توانمندی در پایش دقیق جریان‌های چندفازی در فرآیند استخراج و مبادلات نفتی است.

۵. مراجع:

- [1] M. S. A. Abouelwafa and E. J. M. Kendall, "The measurement of component ratios in multiphase systems using alpha -ray attenuation," *J. Phys. E.*, vol. 13, no. 3, p. 341, 1980.

- [2] C. M. Bishop and G. D. James, "Analysis of multiphase flows using dual-energy gamma densitometry and neural networks," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 327, no. 2–3, pp. 580–593, 1993.
- [3] E. Åbro and G. A. Johansen, "Void Fraction and Flow Regime Determination by Low-Energy Multi-Beam Gamma-Ray Densitometry," *1st World Congress on Industrial Process Tomography*. pp. 339–343, 1999.
- [4] S. A. Tjugum, J. Frieling, and G. A. Johansen, "A compact low energy multibeam gamma-ray densitometer for pipe-flow measurements," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 197, no. 3–4, pp. 301–309, 2002, doi: 10.1016/S0168-583X(02)01481-7.
- [5] Y. Ma *et al.*, "A flow rate measurement method for horizontal oil-gas-water three-phase flows based on Venturi meter, blind tee, and gamma-ray attenuation," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 80, no. December 2020, p. 101965, 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101965.
- [6] H. Zhang, Y. Yang, M. Yang, L. Min, Y. Li, and X. Zheng, "A Novel CNN Modeling Algorithm for the Instantaneous Flow Rate Measurement of Gas-liquid Multiphase Flow," *PervasiveHealth Pervasive Comput. Technol. Healthc.*, pp. 182–187, 2020, doi: 10.1145/3383972.3384001.
- [7] P. Aarabi Jeshvaghani, M. Khorsandi, and S. A. H. Fegghi, "Flow-rate prediction independent of the regime in a dynamic two-phase flow system using a simple pulse height spectrum of a detector and Artificial Neural Networks," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 1017, p. 165794, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165794>.
- [8] E. Nazemi, S. A. H. Fegghi, and G. H. Roshani, "Void fraction prediction in two-phase flows independent of the liquid phase density changes," *Radiat. Meas.*, vol. 68, pp. 49–54, 2014, doi: 10.1016/j.radmeas.2014.07.005.