



Experimental Investigation and CFD Simulation of Vortex Flow Meter Performance in Gas-Solid Two-Phase Flow

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Farahzadi H.¹ MSc,
Hashemabadi S.H.^{*1} PhD,
Shirvani M.¹ PhD

How to cite this article

Farahzadi H, Hashemabadi S.H, Shirvani M. Experimental Investigation and CFD Simulation of Vortex Flow Meter Performance in Gas-Solid Two-Phase Flow. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2263-2274.

ABSTRACT

Using a vortex flowmeter is affordable, in addition, simple installation, high reliability, and high accuracy are some advantages of the vortex flowmeter. Vortex flowmeter works based on the vortex shedding principle, hence, the presence of particles in gas-solid flows may results in modulation in the turbulence intensity of the carrier phase and manipulate vortex shedding generated by a bluff body. In this study, the performance of the vortex flowmeter in the presence of particles with different sizes, density, solid volume fraction, and solid mass loading was studied with CFD simulation. The results indicated that the volume fraction and particle diameter are two significant parameters that affect vortex frequency. The vortex frequency is proportional to the velocity of gas flow and volume flow rate is calculated by $Q = VA$ where V is average velocity in a pipe section with the area of A . Notwithstanding the neutral effect of microparticles on vortex frequency, moderate particles lessen the vortex frequency approximately by 20%. To coincide with the increase of solid volume fraction, the vortex frequency will descend, and in the high level of solid volume fraction, the vortex pattern goes to reach the instability. Since the size and volume fraction of the particles affects the frequency and consequently velocity, the gas flow rate measured by the vortex flowmeter is influenced by the presence of the particles. The numerical results have been validated with experimental data. The maximum relative error between the numerical simulation and the corresponding experimental data is 0.46% and 6.72 % for single-phase and gas-solid two-phase flows, respectively.

Keywords Vortex Flowmeter; Gas-Solid Two-Phase Flow; Vortex Shedding Frequency; CFD Simulation

¹School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: University of Science and Technology of Iran, University Street, Hengam Street, Resalat Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1311416846.

Phone: +98 (21) 77240376

Fax: -

hashemabadi@iust.ac.ir

Article History

Received: August 13, 2019

Accepted: June 27, 2020

ePublished: September 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Review on vortex flowmeter-Designer perspective [2] The influence of shedder shape on the performance of the electrostatic vortex flowmeter [3] On the linearity, turndown ratio and shape of the bluff body for vortex flowmeter [4] Performance of vortex shedding from a circular cylinder with a slit normal to the stream [5] Vortex shedding behind modified circular cylinders [6] Response of a dual triangulate bluff body vortex flowmeter to oscillatory flow [7] Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body [8] A new approach to detection of vortices using ultrasound [9] Performance evaluation of piezoelectric and differential pressure sensor for vortex flowmeters [10] On predicting particle-laden turbulent flows [11] Study of the effect of particles on the kinetic parameters of a turbulent two-phase flow [12] Particle response and turbulent modification in isotropic turbulence [13] Particle-gas turbulence interactions in a kinetic theory approach to granular flows [14] Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach [15] CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders [16] Numerical simulation and validation of dilute turbulent gas-particle flow with inelastic collisions and turbulence modulation [17] A study of mass flow rate measurement based on the vortex shedding principle [18] LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe [19] On the physical mechanisms of two-phase coupling in particle-laden isotropic turbulence

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی CFD عملکرد جریان سنج گردابه‌ای در حضور جریان دوفازی گاز-ذره

حمزه فرحزادی MSc

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سیدحسن هاشم‌آبادی PhD

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

منصور شیروانی PhD

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

استفاده از جریان سنج گردابه‌ای از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و از لحاظ فنی به دلیل نصب آسان، قابلیت اطمینان و دقت بالا توجیه‌پذیر است. مکانیزم اندازه‌گیری در این نوع جریان سنج‌ها، اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های ایجادشده در پشت بدنه مانع است؛ بنابراین در صورت حضور ناخواسته ذرات و تغییر مشخصه‌های گردابه‌ها، خطای اندازه‌گیری می‌تواند زیاد شود. در این تحقیق اثر پارامترهای تاثیرگذار در جریان دوفازی گاز- ذره مانند قطر ذرات، چگالی ذرات، کسر حجمی و میزان بارگذاری جرمی ذرات روی عملکرد جریان سنج گردابه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که کسر حجمی و قطر ذرات مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار روی عملکرد جریان سنج گردابه‌ای هستند و فرکانس گردابه را تغییر می‌دهند. فرکانس گردابه در جریان سنج گردابه‌ای رابطه مستقیم با متوسط سرعت سیال دارد. همچنین طبق رابطه $Q=VA$ متوسط سرعت سیال در یک سطح مقطع ثابت A متناسب با دبی حجمی سیال (Q) است. میکروذرات با توجه به اینکه از گردابه اولیه خود خارج نمی‌شوند فرکانس گردابه را تغییر نمی‌دهند، در حالی که ذرات درشت می‌توانند تا ۲۰٪ این فرکانس را کاهش دهند. زمانی که کسر حجمی زیاد می‌شود فرکانس گردابه‌ها کاهش پیدا می‌کند و در کسرهای حجمی بالا، نوسانات تشکیل شده در پشت بدنه مانع ناپایدار می‌شوند؛ بنابراین از آنجا که اندازه و کسر حجمی ذرات روی فرکانس گردابه و سرعت سیال اثر می‌گذارند، دبی حجمی اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج گردابه‌ای تحت تاثیر حضور ذرات قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. حداکثر خطا برای جریان‌های تک‌فازی ۴۶٪ و برای جریان‌های دوفازی گاز-ذره ۶/۷۲٪ مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: جریان سنج گردابه‌ای، جریان دوفازی گاز- ذره، فرکانس گردابه در پشت بدنه مانع، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

*نویسنده مسئول: hashemabadi@iust.ac.ir

مقدمه

انتقال ذرات جامد توسط فاز گاز در بسیاری از فرآیندهای صنعتی به طور معمول اتفاق می‌افتد. در برخی از این فرآیندها مانند انتقال دانه‌های گندم، ذرات سیمان، شکر، نمک و ذرات پلاستیک، هدف انتقال فاز جامد توسط فاز گازی است و در برخی دیگر از این فرآیندها هدف انتقال فاز گاز است و ذرات به طور ناخواسته در جریان گازی وارد شده‌اند، مانند حضور پودر سیاه در جریان انتقال گاز طبیعی. در این نوع فرآیندها، حضور ناخواسته ذرات سبب

تغییر مشخصه‌های جریان می‌شود و برهمکنش بین ذرات و اغتشاشات موجود در جریان معمولاً نقش مهمی در تعیین عملکرد تجهیزات مورد استفاده دارد. یکی از تجهیزاتی که حضور ناخواسته ذرات در جریان گازی می‌تواند روی آن تاثیر بگذارد، تجهیزات اندازه‌گیری است. در صنعت تجهیزات مختلفی برای اندازه‌گیری وجود دارد که بسته به نوع صنعت و اهداف اندازه‌گیری، یک و یا چند نوع دستگاه در فرآیندها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ونوگوپال و همکاران^[1] جریان سنج‌ها را به دو نوع جریان سنج‌های سنتی و جریان سنج‌های با تکنولوژی نوین تقسیم نموده‌اند. جریان سنج‌های سنتی مانند اوریفیس‌ها، لوله‌های پیتوت و ونتوری عموماً تجهیزاتی هستند که با استفاده از اختلاف فشار به اندازه‌گیری جریان می‌پردازند. جریان سنج‌های نوین مانند جریان سنج‌های کوریولیس مغناطیسی، اولتراسونیک، گردابه‌ای و حرارتی در مقایسه با جریان سنج‌های سنتی دارای دقت بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و هزینه‌های نگهداری کمتری هستند. عدم حساسیت به شکل پروفایل سرعت، حرکات چرخشی جریان، خواص فیزیکی سیال از جمله ویسکوزیته و همچنین دقت بالا، هزینه‌های پایین سرمایه‌گذاری و نگهداری، گستردگی دمای عملیاتی اندازه‌گیری و دسترسی به جریان سنج در تمام سایزهای صنعتی و آزمایشگاهی از مزایای جریان سنج گردابه‌ای نسبت به سایر جریان سنج‌ها است^[1]. در جریان سنج گردابه‌ای از یک پدیده فیزیکی به نام پدیده ون کارمن (Von Karman) که در حرکت سیال رخ می‌دهد استفاده می‌شود. هنگامی که مانعی در مسیر جریان سیال قرار بگیرد، گردابه‌هایی در پایین دست مانع به وجود می‌آیند که سبب نوسانی شدن مسیر جریان می‌گردند. بر این اساس جریان در پایین دست مانع دچار اغتشاش می‌شود که شکل اغتشاش به سرعت و خصوصیات مانع بستگی دارد. موج‌زدن پرچم در اثر وزش باد، یک مثال مشهود مناسب برای این پدیده است. در حقیقت میله پرچم مانعی در مسیر جریان باد است و هر چند گردابه‌ها مشاهده نمی‌شوند، ولی اثر آنها که نوسانی شدن مسیر باد است، در موج‌زدن پرچم مشاهده می‌شود. برای اینکه جریان سنج گردابه‌ای بتواند عملکرد مناسبی داشته باشد، باید عدد رینولدز جریان به اندازه کافی بالا باشد تا سیال هنگام عبور از مانع از سطح مانع جدا شود و گردابه ایجاد شود و حساسیت حسگرها نیز به اندازه کافی بالا باشد تا این گردابه‌های ایجادشده را بتوانند شناسایی و اندازه‌گیری نمایند. بنابراین می‌توان گفت در توسعه جریان سنج‌های گردابه‌ای دو چالش مهم وجود دارد؛ اول استفاده از مانع مناسب به طوری که بتواند در بازه بیشتری از سرعت سیال سبب جدایش سیال و ایجاد گردابه شود و دوم استفاده از حسگرهایی که بتوانند کوچک‌ترین گردابه‌های ایجادشده را شناسایی و فرکانس آن را اندازه‌گیری نماید.

واحد و اسپرستون^[2] به صورت تجربی روی ۶ نوع مانع با اشکال مختلف کار کردند و نشان دادند که مانع با شکل T کیفیت سیگنال خوب و عملکرد مناسب دارد. ونوگوپال و همکاران^[3]

به‌صورت بنیادی روی تاثیر لوله بر مشخصات گردابه ایجادشده بعد از مانع تمرکز نمودند. آنها رابطه بین عدد بی‌بعد استروهل ($Strouhal\ No$) و عدد رینولدز را در رژیم‌های مختلف جریان مانند جریان آرام، مغشوش و جریان گذار مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مانع با مقطع دوزنقه‌ای مناسب‌ترین نوع مانع برای رژیم جریان آرام ناپایا است. یک سیلندر استوانه‌ای با قطر ۴ سانتی‌متر به‌عنوان مانع توسط پینگ و همکاران^[4] مورد استفاده قرار گرفت. آنها شیارهایی با پهنای متفاوت روی سطح مقطع دایره‌ای این سیلندر ایجاد کردند و نشان دادند در صورتی که نسبت پهنای شیار به قطر سیلندر بین ۱/۸ تا ۱۵/۸ باشد، مانع بهترین عملکرد را دارد. *اولسن و راجاگوپال*^[5] از استوانه به‌عنوان مانع در جریان‌سنج گردابه‌ای استفاده نمودند و با اصلاح این استوانه و ایجاد شکاف‌های خطی و مقعر در نقاط مختلف مانع، به بررسی اثر این اصلاحات پرداختند. آنها نشان دادند که اصلاح مانع موجب تغییر عدد استروهل و مقدار ضریب درگ می‌شود. افزایش ضریب درگ با اصلاح استوانه منجر به تولید گردابه‌هایی قوی‌تر و پایدارتر می‌شود که این موضوع سبب افزایش دقت اندازه‌گیری می‌شود. پینگ و فنگ^[6] از دو مانع مثلثی پشت سرهم در جریان‌سنج گردابه‌ای استفاده کردند و مشاهده نمودند که پایداری گردابه‌ها در صورت استفاده از دو مانع پشت سرهم نسبت به حالتی که فقط از یک مانع استفاده شود، بهبود می‌یابد. همچنین پینگ و همکاران^[7] نشان دادند که نوسانات فشار در نقطه جدایی مانع دوم برای سنسور اندازه‌گیر گردابه مناسب‌تر است و شرایط بهینه برای استفاده از دو مانع بدین صورت است که فاصله بین دو مانع باید بین ۴/۶ تا ۵ برابر پهنای دو مانع باشد و نسبت پهنای دو مانع به قطر لوله ۲۶/۸ باشد. بعد از انتخاب مانع مناسب، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از جریان‌سنج گردابه‌ای، اندازه‌گیری و تشخیص فرکانس گردابه‌ها است. محققین زیادی در سال‌های اخیر روی این موضوع کار کردند و سنسورهای مختلفی را برای شناسایی گردابه‌ها مورد بررسی قرار دادند که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنسورهای التراسونیک، سنسورهای فشاری، سنسورهای خازنی و غیره اشاره نمود. *موزیچ و همکاران*^[8] از دو جفت مبدل التراسونیک برای شناسایی گردابه‌ها استفاده کردند. مزیتی که روش آنها در برابر روش‌های رایج و سنتی داشت عبارت بود از کاهش و یا حذف نویز، کاهش عدم قطعیت اندازه‌گیری و افزایش حساسیت سنسورها (که این امر سبب می‌شد تا امکان استفاده از مانع کوچک‌تر فراهم شود و در نتیجه آفت فشار سیال در جریان‌سنج کاهش یابد). مقایسه بین عملکرد سنسور پیزوالکتریک و سنسور اختلاف فشار که دو نوع از رایج‌ترین سنسورهای مورد استفاده در جریان‌سنج‌های گردابه‌ای هستند توسط *ونوگوپال و همکاران*^[9] انجام شد. آنها دریافتند که سنسورهای اختلاف فشار به جریان‌های چرخشی حساس هستند و استفاده از این سنسورها در جریان آشفته توصیه نمی‌شود. همچنین آنها مشاهده کردند که در صورت استفاده از سنسورهای

اختلاف فشاری، ضریب سیال منبع نویز است که با افزایش سرعت جریان، افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک، ارتعاشات لوله به‌عنوان منبع نویز عمل می‌کند و این منبع در سرعت‌های پایین و به خاطر ضعیف‌بودن شدت گردابه خود را بیشتر نشان می‌دهد^[9]. با توجه به مطالب بیان‌شده مشخص است که چالش برخی از محققین در سال‌های اخیر توسعه جریان‌سنج‌های گردابه‌ای برای اندازه‌گیری دقیق جریان تک‌فازی گاز، مایع و یا بخار است. اما همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، در برخی از جریان‌های تک‌فازی گازی به‌طور ناخواسته ذرات جامد نیز حضور دارند که اگر حضور این ذرات سبب تغییر مشخصه‌های جریان شود، عملاً دقت اندازه‌گیری جریان‌سنج‌های گردابه‌ای کاهش می‌یابد. برای بررسی این موضوع لازم است تا ابتدا مشخص شود که حضور ذرات در چه شرایطی سبب تغییر مشخصه‌های جریان به خصوص مشخصه‌های گردابه‌های موجود در جریان می‌شود. *اگوباشی*^[10]، براساس نوع برهمکنش بین ذرات و اغتشاشات در جریان دوفازی گاز- ذره و با استفاده از پارامترهای بی‌بعد، جریان دوفازی گاز- ذره را دسته‌بندی نمود. براساس این دسته‌بندی زمانی که کسر حجمی فاز پراکنده (فاز ذرات) کمتر از ۱۰^{-۳} باشد، اثر ذرات روی اغتشاش جریان قابل صرف‌نظر کردن است و در اصطلاح برهمکنش بین ذرات و اغتشاش اتصال یک‌طرفه دارد. در این حالت فقط اغتشاشات و گردابه‌های جریان مسیر حرکت ذرات را مشخص می‌کنند. طبق این دسته‌بندی، وقتی کسر حجمی فاز پراکنده بین ۱۰^{-۳} تا ۱۰^{-۲} است، انتقال مومنتوم از ذرات به اندازه کافی برای تغییر ساختار اغتشاش بزرگ است؛ بنابراین در این نوع رژیم جریان، علاوه بر اینکه اغتشاشات روی ذرات اثر می‌گذارند، ذرات نیز می‌توانند ساختار اغتشاشات را تحت تاثیر قرار دهند که به این نوع برهمکنش، اتصال دوطرفه گفته می‌شود. همچنین در منابع به این نوع رژیم، جریان رقیق از ذره نیز گفته می‌شود. زمانی که کسر حجمی ذرات در جریان افزایش یابد (بیشتر از ۱۰^{-۲})، جریان به‌عنوان جریان غلیظ از ذره شناخته می‌شود که در آن علاوه بر اتصال دوطرفه بین اغتشاش و ذرات، برخورد‌های بین ذرات با یکدیگر هم سبب تغییر مشخصه‌های جریان می‌شود که در اصطلاح به این نوع برهمکنش اتصال چهارطرفه گفته می‌شود. در فرآیندهای صنعتی عموماً وقتی ذرات جامد به‌طور ناخواسته در فاز گازی حضور دارند، رژیم جریان رقیق از ذره است و اتصال دوطرفه بر جریان دوفازی گاز- ذره حاکم است. *بابود و همکاران*^[11]، نشان دادند که در جریان دوفازی گاز- ذره اندازه ذرات و میزان بارگذاری جرمی ذرات مهم‌ترین پارامترهای هستند که روی جریان تاثیر می‌گذارند. آنها مشاهده کردند که ذرات جامد روی ساختار اغتشاش فاز گاز و گردابه‌ها تاثیر می‌گذارند. ذرات کوچک‌تر سبب افزایش اغتشاش می‌شوند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر به‌دلیل اینکه به‌طور موثرتری انسجام گردابه‌ها را می‌شکنند، اغتشاش را در جریان کاهش می‌دهند^[11]. با افزایش میزان بارگذاری جرمی ذرات

$$\tau_s = \phi_s \mu_s (\nabla V + \nabla V^T) + \phi_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot V \quad (7)$$

با توجه به اینکه اثر تراکم‌پذیری فاز گاز قابل صرف‌نظر کردن است، ویسکوزیته توده‌ای فاز گاز برابر صفر است. ویسکوزیته توده‌ای و ویسکوزیته برشی فاز جامد ناشی از تبادل مومنتوم ذرات به واسطه حرکت انتقالی ذرات و برخورد ذرات است. برای جریان‌های رقیق از ذره، ویسکوزیته توده‌ای برابر صفر است و ویسکوزیته برشی فقط به واسطه حرکت انتقالی ذرات به وجود می‌آید. معادله مربوط به ویسکوزیته برشی به‌صورت زیر است [14]:

$$\mu_s = \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\theta\pi}}{96(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \phi_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (8)$$

ضریب بازگردانی ذرات نشان‌دهنده میزان انرژی جنبشی از دست‌رفته ذره در طی برخورد با ذره دیگر و یا برخورد با دیواره است و مقدار آن معمولاً بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود [15]. وقتی غلظت ذرات در جریان زیاد می‌شود، احتمال برخورد بین ذرات توسط تابع توزیع شعاعی اصلاح می‌شود. در جریان‌های رقیق مقدار این تابع برابر یک در نظر گرفته می‌شود و هرچه مقدار غلظت ذرات افزایش می‌یابد مقدار این ضریب تصحیح نیز زیادتر می‌شود. دمای دانه‌ای متناسب با انرژی جنبشی حرکات تصادفی ذرات (نوسانات سرعت ذرات) است. با استفاده از نظریه جنبشی مولکولی گازها، معادله دیفرانسیل پاره‌ای دمای دانه‌ای فاز جامد به فرم زیر به‌دست می‌آید [14]:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\phi_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\phi_s \rho_s V \theta) \right] = (-P_s I + \tau_s) : \nabla V + \nabla \cdot (k_\theta \nabla \theta) - \gamma_s \quad (9)$$

اتلاف انرژی برخورد نشان‌دهنده نرخ اتلاف انرژی ذره در برخورد با ذرات دیگر است و در جریان‌های رقیق از ذره به سمت صفر میل می‌کند. ضریب نفوذ انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$k_\theta = \left\{ \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\theta\pi}}{384(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \phi_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2\rho_s \phi_s^2 d_p g_{0,ss} (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \right\} \quad (10)$$

در معادلات (۵) و (۹) ترم مربوط به فشار فاز جامد برابر است با [14]:

$$P_s = \phi_s \rho_s \theta + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \phi_s^2 g_{0,ss} \theta \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) جمله اول مربوط به انرژی جنبشی ذرات است و جمله دوم فشار ایجادشده ناشی از برخورد ذرات با یکدیگر را نشان می‌دهد. در جریان رقیق گاز- ذره می‌توان از جمله دوم معادله بالا صرف‌نظر نمود.

معادلات مومنتوم دو فاز گاز و جامد به‌وسیله نیروی درگ با یکدیگر مرتبط می‌شوند. مهم‌ترین نیرویی که در اتصال دوطرفه، جریان فاز گاز را به جریان فاز جامد مرتبط می‌کند، نیروی درگ است. این نیرو نشان‌دهنده متوسط تبادل مومنتوم بین دوفاز است و برای جریان رقیق دوفازی گاز- ذره به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود [16]:

$$F_{drag} = \beta_0 (V - U) \quad (12)$$

انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد و تقریباً وقتی میزان بارگذاری جرمی ذرات به سمت یک میل می‌کند، انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی نسبت به جریان بدون ذره، نصف می‌شود [12].

از آنجا که حضور ذرات می‌تواند سبب اصلاح ساختار گردابه‌های ایجادشده توسط جریان‌سنج گردابه‌ای شود، در این مقاله به بررسی اثر حضور ذرات در جریان دوفازی گاز- ذره بر عملکرد جریان‌سنج گردابه‌ای پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شود و اثر پارامترهای مختلف مانند قطر ذرات، چگالی ذرات، کسر حجمی ذرات و میزان بارگذاری جرمی ذرات روی عملکرد جریان‌سنج گردابه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان دوفازی گاز- ذره

دو دیدگاه کلی برای شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز- ذره در میان محققین مرسوم است؛ یکی روش اولرین- اولرین و دیگری روش اولرین- لاگرانژی. اگر جریان دوفازی گاز- ذره دارای ذرات مختلفی با سایزهای متفاوتی باشد و یا هدف از شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز- ذره یافتن اطلاعات جزئی و دقیق ذرات باشد، روش اولرین- لاگرانژی اولین و مناسب‌ترین انتخاب است. اما با توجه به اینکه استفاده از این روش هزینه‌های محاسباتی و زمانی زیادی دارد و در اغلب کاربردهای مهندسی نیاز به اطلاعات دقیق و جزئی ذرات نیست، روش اولرین- اولرین رایج‌ترین روش در شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز- ذره در میان محققین است [13]. در روش اولرین- اولرین هر دو فاز گاز و جامد مانند سیال پیوسته‌ای هستند که درون یکدیگر نفوذ کرده‌اند و رفتار آنها با معادلات مجزای بقای جرم (معادلات ۱ و ۲ که معادلات پیوستگی نیز نامیده می‌شوند) و معادلات بقای مومنتوم (معادلات ۴ و ۵) به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_g \rho_g) + \nabla \cdot (\phi_g \rho_g U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_s \rho_s) + \nabla \cdot (\phi_s \rho_s V) = 0 \quad (2)$$

$$\phi_g + \phi_s = 1 \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_g \rho_g U) + \nabla \cdot (\phi_g \rho_g U U) = -\phi_g \nabla P + \nabla \cdot \tau_g + \phi_g \rho_g g + F_{drag} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_s \rho_s V) + \nabla \cdot (\phi_s \rho_s V V) = -\phi_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \tau_s + \phi_s \rho_s g - F_{drag}$$

در روابط (۱) و (۲) فرض‌شده که انتقال جرم از فاز گاز به جامد و بالعکس وجود ندارد. تنش‌های تنش فاز گاز و جامد وابسته به گردایان اجزا سرعت فاز گاز و جامد است و به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\tau_g = -\frac{2}{3} \phi_g (\rho_g k_g + \mu_{t,g} \nabla \cdot U) I + \phi_g \mu_{t,g} (\nabla U + \nabla U^T) \quad (6)$$

جرمی کافیسیت تا متوسط اُفت فشار بدنه مانع (از آنجا که فشار در پایین‌دست مانع به واسطه شکل‌گیری گردابه‌ها نوسانی است، متوسط اُفت فشار در نظر گرفته می‌شود) و فرکانس گردابه‌ها توسط جریان سنج اندازه‌گیری شوند. متوسط اُفت فشار توسط رابطه زیر به متوسط سرعت سیال مرتبط می‌شود^[17]:

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{2} C_p \rho U_m^2 \quad (17)$$

با فرض ثابت بودن ضریب فشار در محدوده اعداد رینولدز بالا (جریان متلاطم)، از تقسیم رابطه (۱۷) بر رابطه (۱۶) خواهیم داشت^[17]:

$$\frac{\overline{\Delta P}}{f} = \frac{C_p d}{2 St} (\rho U_m) \rightarrow Q_m = (\rho A U_m) = \left(\frac{2 A St}{C_p d} \right) \frac{\overline{\Delta P}}{f} \quad (18)$$

با توجه به ثابت بودن ضریب فشار و عدد استروهل، رابطه داخل پرانتز یک عدد ثابت است که به مشخصات هندسی جریان سنج و لوله وابسته است؛ بنابراین می‌توان با اندازه‌گیری فشار در بالادست و پایین‌دست بدنه مانع مستقیماً دبی جرمی جریان را اندازه‌گیری نمود. خطای این روش در حدود ۱٪ است^[14]:

روش حل عددی و شرایط مرزی

برای حل معادلات حاکم بر جریان دوفازی گاز- ذره، روش عددی حجم محدود و الگوریتم SIMPLE به‌کار گرفته شده است. به‌منظور کاهش ناپایداری عددی معادلات حاکم گسسته‌شده، از روش شبکه جابجاشده استفاده شد به‌طوری که پارامترهای اسکالر مانند فشار، کسر حجمی و دیگر پارامترهای اسکالر در مرکز هر حجم کنترل محاسبه و اجزاء سرعت روی سطح هر حجم کنترل محاسبه و ذخیره شده است. گسسته‌سازی معادلات مومنتوم با طرح Upwind درجه دوم انجام‌شده و برای گسسته‌سازی ترم مربوط به حالت غیردائم (وابسته به زمان) پارامترها از روش حل ضمنی درجه دوم استفاده شده است. در این تحقیق، دامنه محاسباتی یک لوله ۳ بعدی با طول ۵/۰ متر و قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر است که یک مانع مثلی درون آن قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی CFD مسئله از شبکه چهارضلعی نامنظم استفاده شده است. از شرط مرزی ورودی سرعت برای محاسبه پروفایل سرعت هر دو فاز گاز و جامد در ورودی لوله استفاده شده است و در ورودی لوله سرعت هر دو فاز گاز و جامد برابر در نظر گرفته شده است. روی دیواره لوله و دیواره مانع درون لوله از شرط مرزی عدم لغزش برای فاز گاز و شرط مرزی ضریب آئینه‌ای برای فاز جامد استفاده شده است. مقدار این ضریب نشان‌دهنده اصطکاک بین ذرات و دیواره است. مقدار این ضریب می‌تواند بین صفر تا یک متغیر باشد. مقدار صفر بدین معنی است که اصطکاک بین ذرات و دیواره بسیار ناچیز است و ذرات پس از برخورد به دیواره از آن جدا شده و به مسیر خود ادامه می‌دهند. زمانی که مقدار این ضریب به سمت ۱ میل کند بدین معنی است که اصطکاک بین ذرات و دیواره در حالت بیشینه قرار دارد و ذرات پس از برخورد با دیواره به آن می‌چسبند. در این تحقیق مقدار این ضریب براساس پیشنهاد بناویدیس و وچم^[16] برابر ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است. در خروجی لوله برای هر دو فاز گاز و جامد، شرط مرزی

$$\beta_0 = \frac{3}{4} C_D \frac{\phi_s \phi_g \rho_g |U-V|}{d_p} \phi_g^{-2.65} \quad (13)$$

$$(14)$$

$$C_D = \frac{24}{\phi_g Re_p} \left[1 + 0.15 (\phi_g Re_p)^{0.687} \right], \quad Re_p = \frac{\rho_g |U-V| d_p}{\mu_g}$$

در معادله (۶) ویسکوزیته برشی فاز گاز ($\mu_{t,g}$) از مجموع ویسکوزیته برشی سیال و ویسکوزیته اغتشاشات جریان (متوسط‌گیری معادلات ناویر- استوکس سبب ظاهر شدن تنسور تنش‌های رینولدز می‌شوند که این تنسورها رابطه مستقیم با ویسکوزیته اغتشاشات دارند) تشکیل شده است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\mu_{t,g} = \rho_g C_\mu \frac{k_g^2}{\varepsilon_g} \quad (15)$$

برای محاسبه تنش‌های رینولدز و یا ویسکوزیته اغتشاشات لازم است تا انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلاف انرژی اغتشاش محاسبه شود. برای محاسبه این دو پارامتر، مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که به مدل‌های اغتشاش معروف هستند. بسته به انتخاب مدل اغتشاش تا هفت معادله دیفرانسیل پاره‌ای می‌تواند به معادلات حاکم بر جریان دوفازی گاز- ذره اضافه شود. یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های اغتشاش، مدل اغتشاش دو پارامتری k-ε است که دو معادله انتقال اضافی را برای بیان رفتار جریان مغشوش به مجموعه معادلات حاکم اضافه می‌کند. مدل اغتشاش دو پارامتری k-ε دارای سه ویرایش مختلف است که عبارتند از مدل استاندارد k-ε، Realizable k-ε و RNG k-ε. برای توسعه مدل RNG k-ε از تئوری گروه برای نرمال کردن معادلات ناویر-استوکس استفاده شده است. این مدل تأثیر پیچش در جریان را در خود جای داده و بنابراین برای جریان‌های پیچشی دقت خوبی دارد. این مدل توانایی پیش‌بینی جریان‌های با رینولدز پایین را نیز دارد و همین‌طور می‌تواند در رفتار جریان در کنار دیواره را به خوبی پیش‌بینی نماید؛ بنابراین این مدل نسبت به مدل استاندارد k-ε دقت بیشتری دارد و طیف وسیع‌تری از جریان‌ها را پوشش می‌دهد. در این تحقیق برای مدل کردن جریان مغشوش، مدل RNG k-ε در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم بر جریان سنج گردابه‌ای

در قرن پانزدهم میلادی، نقاش و مخترع معروف لئوناردو داوینچی یک توصیف و طرح دقیق از گردابه‌های ایجادشده در پشت یک جسم استوانه‌ای ترسیم نمود. بعدها در سال ۱۸۷۸ استروهل بر مبنای مشاهداتی که داشت رابطه‌ای برای فرکانس گردابه‌ها ارائه نمود. این رابطه بعدها به‌صورت بی‌بعد به شکل زیر نشان داده شد:

$$St = \frac{f d}{U_m} \rightarrow U_m = \left(\frac{d}{St} \right) f \quad (16)$$

معادله (۱۶) نشان می‌دهد که در صورت ثابت بودن عدد استروهل، رابطه بین متوسط سرعت سیال و فرکانس گردابه یک رابطه خطی است. زنگ و همکاران^[17]، نشان دادند که در صورت استفاده از دو سنسور فشار در بالادست و پایین‌دست بدنه مانع، می‌توان به‌طور مستقیم دبی جرمی جریان را اندازه‌گیری نمود. برای محاسبه دبی

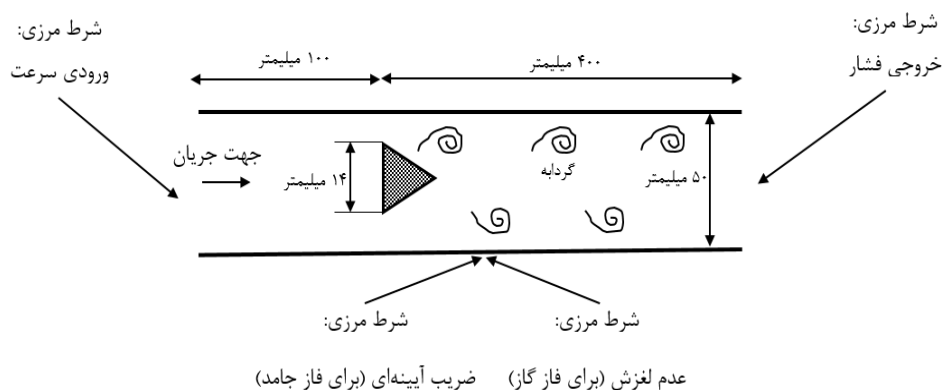
پره‌ها، ذرات جامد را وارد جریان گازی می‌نماید. شیر دوار به وسیله یک موتور درایور دیجیتال DC کنترل می‌شود و سرعت ورود ذرات به جریان از طریق این کنترلر تنظیم می‌شود. در شکل ۳ محفظه نگهدارنده ذرات، بخش توزیع‌کننده ذرات و موتور درایور دیجیتال DC نشان داده شده است.

جریان دوفازی گاز- ذره پس از طی مسیر حدود ۱/۵ متر درون یک لوله با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر وارد بخش تست می‌شود. در بخش تست یک مانع مثلی در مرکز لوله و عمود بر جهت جریان نصب‌شده که نسبت پهنای بدنه مانع به قطر لوله ۲۸/۰ است. شکل ۴ نمایی از بدنه مانع را نشان می‌دهد. جریان دوفازی گاز- ذره پس از برخورد با مانع و طی مسافت حدود ۱ متر به بخش انتهایی لوله می‌رسد. در بخش انتهایی لوله یک فیلتر کارتریجی تعبیه‌شده که با عبور جریان دوفازی گاز- ذره از آن، ذرات جامد جدا می‌شوند.

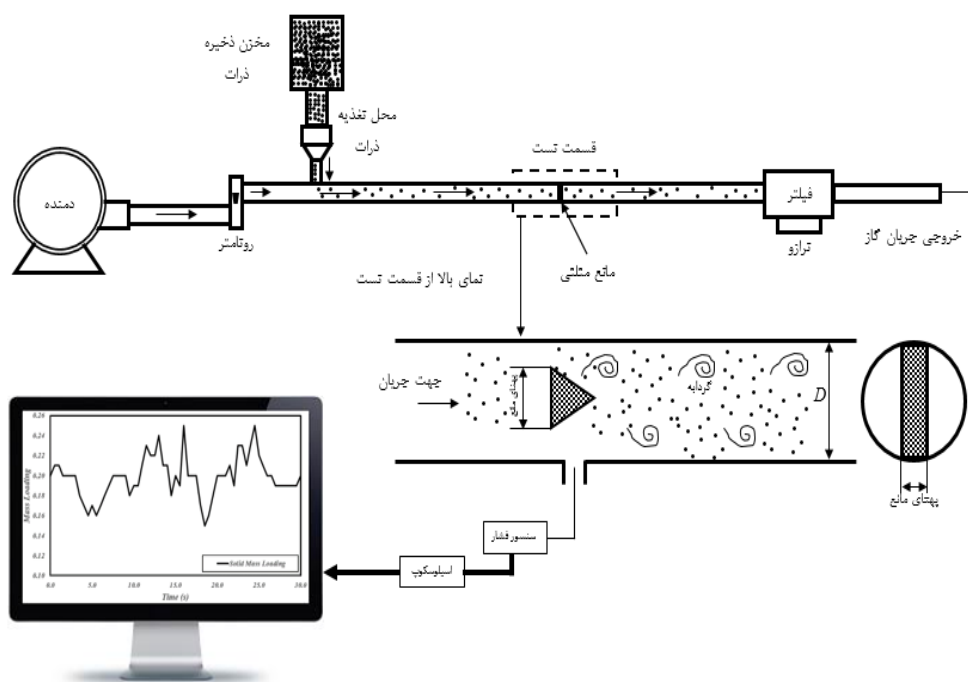
خروجی فشار با مقدار فشار اساتیک برابر صفر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ شماتیکی از جریان سنج گردابه‌ای به همراه هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی CFD نشان داده شده است.

سامانه آزمایشگاهی

شکل ۲ شماتیکی از سامانه آزمایشگاهی ساخته‌شده برای استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. جریان هوا از طریق یک مکند/ دمنده ساید چنل وارد لوله می‌شود. دبی هوای واردشده به وسیله یک روتامتر اندازه‌گیری می‌شود. جریان هوا پس از ورود به لوله با جریانی از ذرات که توسط یک توزیع‌کننده ذرات وارد لوله می‌شوند، مخلوط می‌شود و جریان دوفازی گاز- ذره به سمت بخش تست حرکت می‌کند. ذرات جامد در بخش نگهدارنده که یک محفظه قیفی‌شکل است، نگهداری می‌شوند و از طریق یک کانال و با استفاده از نیروی جاذبه وارد بخش توزیع‌کننده می‌شوند. توزیع‌کننده متشکل از یک شیر دوار است که با حرکت چرخشی



شکل ۱) شماتیکی از جریان سنج گردابه‌ای به همراه هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی CFD



شکل ۲) شماتیکی از سامانه آزمایشگاهی ساخته‌شده

از جنس ولتاژ است که باید از طریق یک سیستم آشکارکننده خوانده شود. برای خواندن اطلاعات خروجی این سنسور از یک دستگاه اسیلوسکوپ که مستقیماً می‌تواند ولتاژ را نشان دهد استفاده شده است. این اسیلوسکوپ علاوه بر اینکه می‌تواند داده‌های خروجی سنسور فشار را نمایش دهد، قابلیت ذخیره اطلاعات در اکسل را نیز دارد. برای یافتن فرکانس گردابه‌ها از داده‌های ذخیره‌شده در اسیلوسکوپ، لازم است تا از تبدیل فوریه استفاده شود. برای استفاده از تبدیل سریع فوریه و محاسبه فرکانس نوسانات، در نرم‌افزار متلب و با استفاده از دستور FFT کدنویسی صورت گرفته است. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ذره مورد استفاده در آزمایش‌ها و مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در مجموعه آزمایشگاهی ارایه شده است.

جدول ۱) مشخصات ذره مورد استفاده در آزمایش‌ها

نام ذره	ذره ۴۰ میکرون
جنس ذره	سیلیس
شکل ظاهری ذره	کروی
متوسط قطر ذره (میکرون)	۴۰/۷
چگالی ذره (kg/m ³)	۲۲۰۰

جدول ۲) مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در سامانه آزمایشگاهی

نام دستگاه	نام برند	مدل	بازه اندازه‌گیری	دقت اندازه‌گیری
روتامتر	آی.جی.آی	۲۵۰ متر مکعب بر ساعت	۰ تا ۲۵۰ متر مکعب بر ساعت	±۵ متر مکعب بر ساعت
سنسور فشار	هانیول	سری ۲۴ پی.سی	±۵ پی.اس.آی	±۵/۲۵ %
موتور درایور DC دیجیتال	ان.ای	ان.اس.سی ۱۱۰	۷ تا ۲۲۰ دور بر دقیقه	±۱۵ % دور بر دقیقه
اسیلوسکوپ	جی.پی.اس	جی.پی.اس بی ۱۰۷۲	۷۰ مگاهرتز	-
ترازو	یونیک	یو.ان- ۶۷۱۰	۱ تا ۵۰۰ گرم	±۱ گرم

تفسیر و تحلیل نتایج

قبل از بررسی تاثیر جریان دوفازی گاز- ذره بر روی عملکرد جریان سنج گردابه‌ای، ابتدا لازم است تا توانایی حل جریان دوفازی گاز- ذره توسط معادلات انتخاب‌شده مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور لازم است تا علاوه بر اطمینان از استقلال شبکه، نتایج به‌دست‌آمده از معادلات نیز با داده‌های تجربی مقایسه شود. برای آزمون استقلال شبکه‌بندی از سه اندازه شبکه با سایز ۲۱۰،۰۰۰ سل یا حجم کنترل (وضوح پایین)، ۲۶۰،۰۰۰ سل (وضوح متوسط) و ۳۳۰،۰۰۰ سل (وضوح بالا) استفاده شده است. نمودار ۱ توالی زمانی نوسانات فشار در پشت بدنه مانع را برای هر سه نوع اندازه شبکه نشان می‌دهد. وقتی که از شبکه با وضوح متوسط استفاده می‌شود، نتایج محاسبات مستقل از اندازه شبکه است و عملاً با ریزترکردن اندازه شبکه تغییر چندانی در نتایج به‌دست نمی‌آید؛



شکل ۳) نمایی از بخش نگهداری، بخش توزیع ذرات جامد و موتور درایور دیجیتال DC در سامانه آزمایشگاهی ساخته‌شده



شکل ۴) نمایی از بدنه مانع نصب‌شده در سامانه آزمایشگاهی

ذرات مورد استفاده در آزمایش‌ها، ذرات سیلیس با قطر متوسط ۴۰ میکرون هستند. نسبت جرم ذرات به جرم جریان دوفازی گاز- ذره، میزان بارگذاری جرمی ذرات نامیده می‌شود و توسط رابطه زیر به‌دست می‌آید:

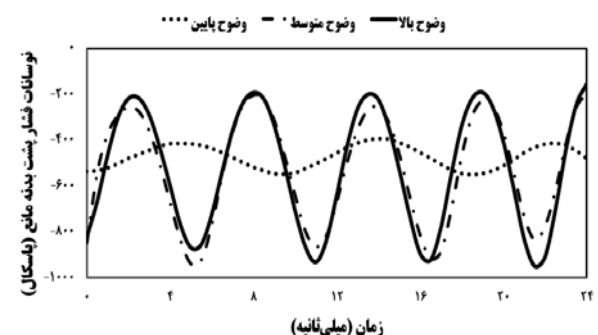
$$ML = \frac{\rho_s}{\rho_g} \phi \quad (19)$$

برای محاسبه میزان بارگذاری جرمی ذرات در جریان دوفازی گاز- ذره لازم است تا میزان دبی جرمی ذرات و میزان دبی جرمی گاز مشخص باشد. برای اندازه‌گیری دبی جرمی فاز جامد در انتهای هر آزمایش وزن ذرات جمع‌آوری‌شده در فیلتر توسط یک ترازو اندازه‌گیری می‌شود و براساس زمان آزمایش، دبی جرمی ذرات محاسبه و با توجه به دبی فاز گاز که توسط یک روتامتر اندازه‌گیری می‌شود، میزان بارگذاری جرمی ذرات در هر آزمایش تعیین می‌شود.

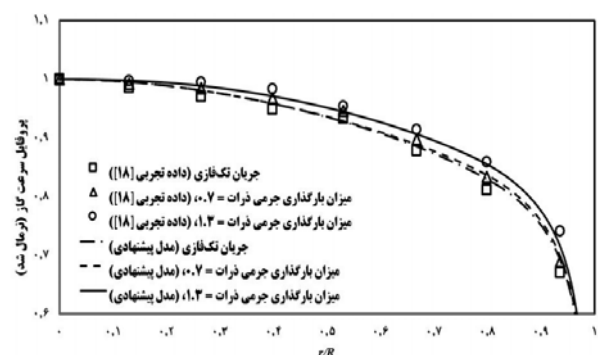
برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های ایجادشده در پشت بدنه مانع از سنسور فشار هانیول مدل PCEFB6D۲۴ استفاده شده است. این سنسور در فاصله ۱۰ میلی‌متری از بدنه مانع قرار گرفته است و زمان پاسخ آن به تغییرات فشار کمتر از ۱ میلی‌ثانیه است (لازم به ذکر است براساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های CFD جریان دوفازی گاز- ذره، زمان شکل‌گیری هر گردابه برای این هندسه مانع بین ۳ تا ۱۰ میلی‌ثانیه (بسته به سرعت جریان و میزان بارگذاری جرمی ذرات) است که این سنسور به خوبی می‌تواند نوسانات فشار را اندازه‌گیری نماید). خروجی این سنسور

بنابراین در این تحقیق از شبکه با وضوح متوسط (۲۶۰,۰۰۰ سل) برای انجام محاسبات استفاده شده است.

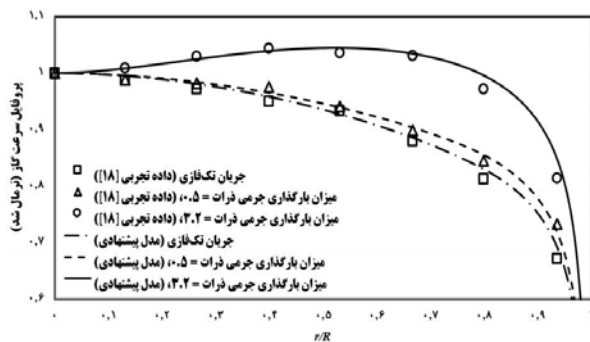
برای اطمینان از توانایی معادلات انتخاب شده در حل جریان های دوفازی گاز- ذره، یک لوله عمودی ساده با قطر ۳/۵ میلی متر، طول ۵۱۱۰ میلی متر و با استفاده از معادلات ارایه شده در بخش معادلات حاکم بر جریان دوفازی گاز- ذره و شرایط مرزی و روش حل بیان شده در بخش روش حل عددی و شرایط مرزی، شبیه سازی شده است و نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی ارایه شده توسط سوچی و همکاران [18]، مقایسه شده است. در نمودارهای ۲ و ۳ نتایج به دست آمده از شبیه سازی با داده های تجربی ارایه شده توسط سوچی و همکاران [18] به ترتیب برای ذرات با قطر ۵۰۰ میکرون (چگالی 1020 kg/m^3) و میزان بارگذاری جرمی ذرات صفر (جریان تکفازی)، $1/3$ و $7/10$ و ذرات با قطر ۲۰۰ میکرون (چگالی 1020 kg/m^3) و میزان بارگذاری جرمی ذرات صفر (تکفازی)، $5/10$ و $3/2$ مقایسه شده است. پروفایل سرعت نشان داده شده در نمودارهای ۲ و ۳ براساس سرعت در مرکز لوله نرمال شده است و همان طور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده از شبیه سازی مدل پیشنهادی با داده های تجربی مطابقت خوبی دارد و حداکثر خطای نسبی اندازه گیری شده $3/96\%$ است؛ بنابراین می توان با اطمینان از توانایی مدل انتخابی در حل جریان های دوفازی گاز- ذره، از این مدل در شبیه سازی جریان دوفازی گاز- ذره درون یک جریان سنج گردابه ای استفاده نمود.



نمودار ۱) توالی زمانی نوسانات فشار (فرکانس گردابه) در پشت بدنه مانع برای اندازه های مختلف از شبکه بندی



نمودار ۲) مقایسه پروفایل سرعت فاز گاز براساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی و داده های تجربی گزارش شده توسط سوچی و همکاران [18] (قطر ذرات ۵۰۰ میکرون)



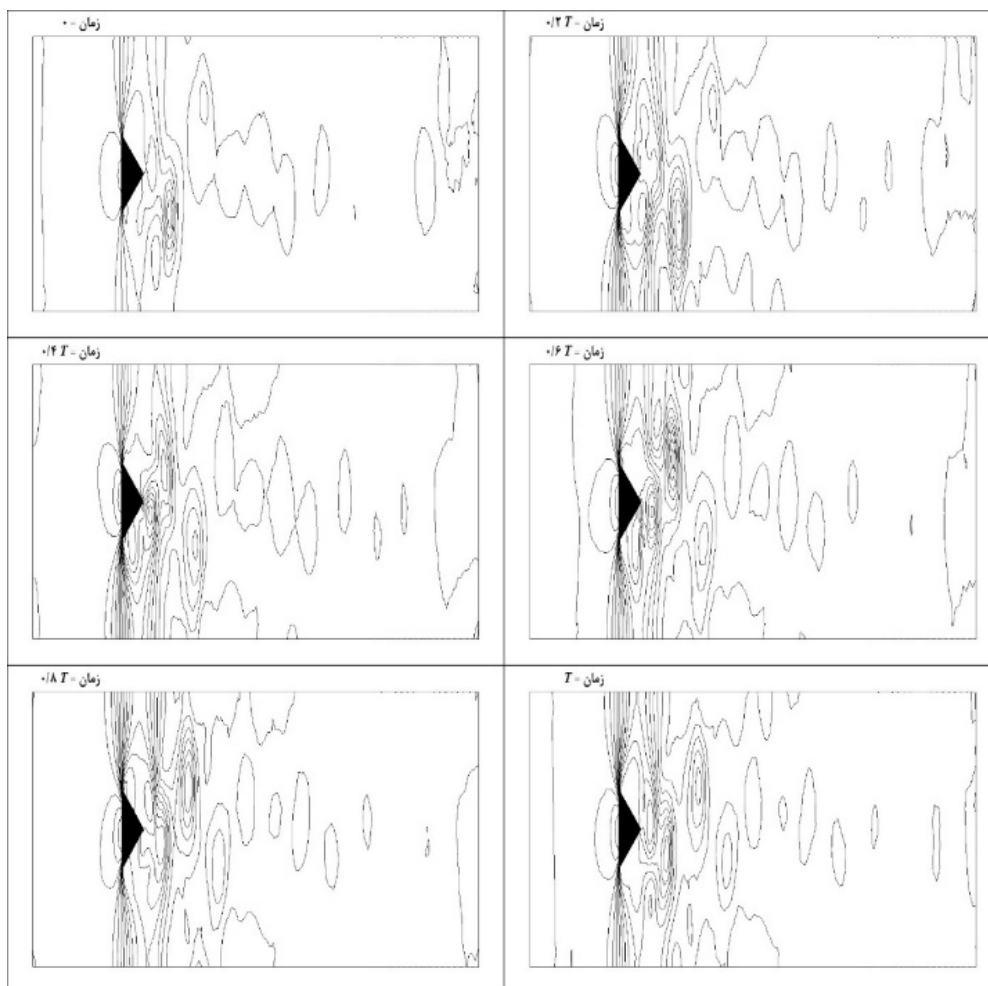
نمودار ۳) مقایسه پروفایل سرعت فاز گاز براساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی و داده های تجربی گزارش شده توسط سوچی و همکاران [18] (قطر ذرات ۲۰۰ میکرون)

شکل ۵ تصاویر لحظه ای (Snapshot) از نقاط هم فشار در پشت بدنه مانع در طول شکل گیری یک گردابه کامل، جد شدن آن و شکل گیری گردابه بعدی را نشان می دهد. در این شکل سرعت جریان دوفازی گاز- ذره 20 m/s و میزان بارگذاری جرمی ذرات $1/10$ است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود عبور سیال از بدنه مانع سبب ایجاد یک ناحیه کم فشار در پشت بدنه مانع می شود. این ناحیه کم فشار منجر به برگشت سیال و ایجاد حرکت چرخشی می شود که در نتیجه توالی حرکت چرخشی در دو سمت پشت بدنه مانع، گردابه های منظم ایجاد می شوند. برای مشاهده نوسانات فشار ناشی از ایجاد گردابه ها در پشت بدنه مانع لازم است تا مقدار فشار در لحظات مختلف و در فاصله مشخص از پشت بدنه مانع اندازه گیری و ثبت شود. در نمودار ۴ سری زمانی میدان فشار محاسبه شده در پشت بدنه مانع برای سه سرعت متفاوت از سیال نشان داده شده است. نوسانات فشار در فاصله $1/10$ متری از بدنه مانع و در مقاطع زمانی $5/10$ میلی ثانیه از نتایج شبیه سازی استخراج شده اند. وقتی سرعت سیال در ورودی تغییر می کند، فرکانس و شدت نوسانات فشار نیز تغییر می کند، اما شکل میدان عوض نمی شود.

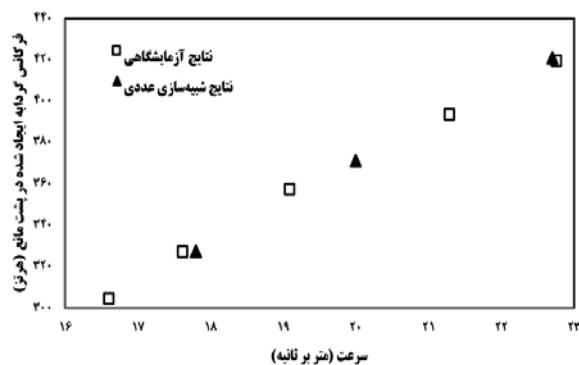
در نمودار ۵ رابطه بین سرعت جریان و فرکانس گردابه در پشت بدنه مانع نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود، رابطه بین سرعت و فرکانس یک رابطه خطی است (به معادله شماره ۱۶) مراجعه شود) که شیب آن به عنوان ضریب جریان سنج شناخته می شود و این ضریب وابسته به هندسه مانع است. همچنین همان طور که در نمودار ۵ مشاهده می شود، داده های آزمایشگاهی توافق خوبی با نتایج شبیه سازی ها دارند و حداکثر خطای اندازه گیری شده بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی 46% است. در نمودار ۶ سری زمانی افت فشار در دو طرف بدنه مانع برای جریان دوفازی گاز- ذره با سرعت $12/5 \text{ m/s}$ ، کسر حجمی $14/1000$ ، قطر ذرات 40 میکرون و چگالی 2200 kg/m^3 نشان داده شده است. در این نمودار داده های آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی عددی مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود هر دو نتایج همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. به دلیل حضور نویز در سامانه آزمایشگاهی نوسانات کوچکی در نتایج آزمایشگاهی

۲۵۰/۲ هرتز و برای نتایج شبیه‌سازی ۲۵۰ هرتز است. در نمودار ۷ فرکانس گردابه به‌دست‌آمده از سامانه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در جریان دوفازی گاز- ذره با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. حداکثر خطای اندازه‌گیری شده در حدود ۶/۷۲٪ است.

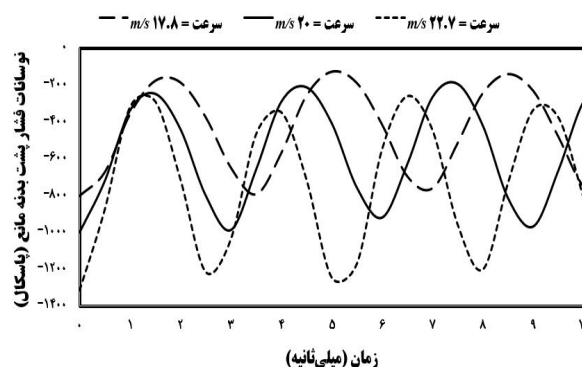
دیده می‌شود که این نوسانات تأثیری روی فرکانس گردابه ندارند و به‌دلیل ماهیتشان، فرکانس غالب را تغییر نمی‌دهند. نتایج به‌دست‌آمده از تبدیل فوریه این نمودار (داده‌های نشان داده شده در نمودار ۶ مربوط به بخشی از زمان آزمایش است و برای تبدیل فوریه از کل داده‌های به‌دست‌آمده در آزمایش استفاده شده است) نشان می‌دهد که فرکانس گردابه برای نتایج آزمایشگاهی



شکل ۵) تاریخچه زمانی نقاط هم‌فشار در پشت بدنه مانع در سرعت جریان دوفازی گاز ذره برابر ۲۰ m/s و میزان بارگذاری جرمی ۰/۱ (نتایج حاصل از شبیه‌سازی)



نمودار ۵) رابطه بین سرعت جریان و فرکانس گردابه در پشت بدنه مانع در جریان گازی عاری از ذره (مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی)

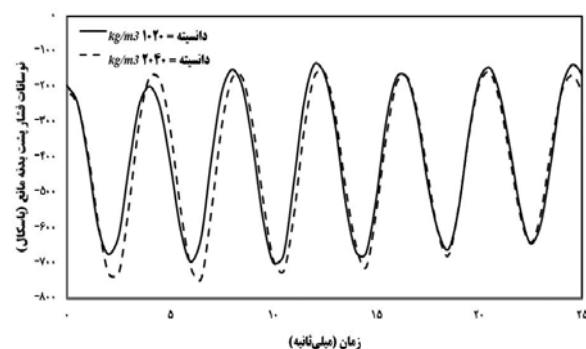


نمودار ۴) نوسانات فشار در پشت بدنه مانع در سرعت‌های مختلف از جریان تک‌فازی (نتایج شبیه‌سازی عددی)

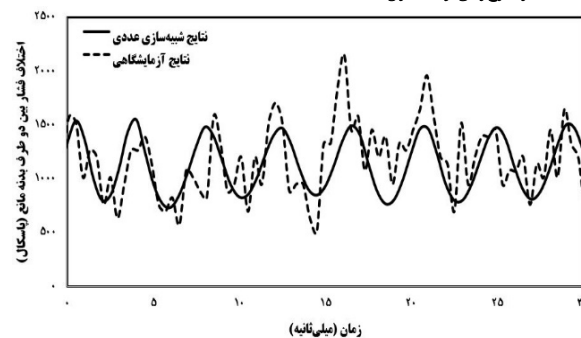
بیشتر شود و یا کسر حجمی ذرات افزایش یابد، فرکانس گردابه‌ها کاهش بیشتری می‌یابند.

همان‌طور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود، ذرات کمتر از ۵ میکرون بر خلاف ذرات بزرگ‌تر، فرکانس گردابه را نسبت به حالت بدون ذره تغییر چندانی نمی‌دهند. نمودار ۱۱ رفتار این ذرات را برای کسرهای حجمی از بازه $10^{-6} \times 1/2$ تا $10^{-4} \times 9$ نشان می‌دهد. علت این عدم تغییر در فرکانس گردابه در حضور ذرات را می‌توان به ماهیت این ذرات نسبت داد. این ذرات را می‌توان در اصطلاح میکروذرات نامید که عدد استوکس (عدد استوکس نسبت زمان پاسخ ذرات به کوچک‌ترین مقیاس زمانی جریان است) آنها بسیار کمتر از یک است. این ذرات همان‌طور که فرانت و آگواشی [19] نشان دادند، به‌عنوان یک ردیاب در جریان عمل می‌کنند و با توجه به اینکه نمی‌توانند از ساختار گردابه‌ای که در آن هستند خارج شوند، مسیر حرکت آنها همان مسیر حرکت گردابه‌ها است و در نتیجه فرکانس آنها همان فرکانس گردابه در جریان عاری از ذرات است.

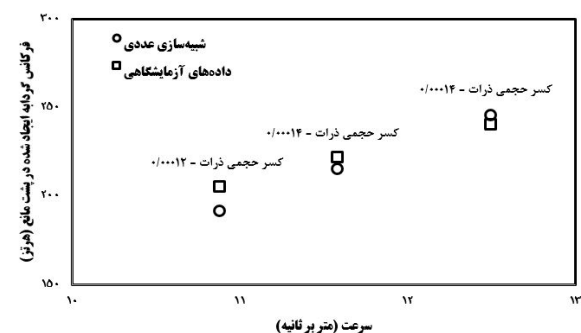
نمودارهای ۱۲ و ۱۳ اثر حضور ذرات با قطر ۳ و ۱۰ میکرون زمانی که کسر حجمی ذرات به سمت 10^{-3} میل کند را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، زمانی که کسر حجمی ذرات زیاد شود جریان غلیظ از ذره می‌شود و علاوه بر اینکه اغتشاشات و ذرات با یکدیگر برهمکنش دارند، ذرات نیز با یکدیگر برهمکنش دارند. ذرات بسیار ریز روی نوسانات حتی در کسرهای حجمی بالا هم تأثیرگذار نیستند در حالی که وقتی قطر ذرات کمی زیاد می‌شود، اغتشاشات به شدت تحت تأثیر ذرات قرار می‌گیرند و حتی نوسانات به حالت ناپایدار در می‌آیند. پیش‌تر توضیح داده شد که میکروذرات توانایی خروج از گردابه‌ای که از ابتدا در آن هستند را ندارند، بنابراین روشن است که این ذرات نمی‌توانند گردابه‌ها را ناپایدار کنند و نمودار ۱۲ نیز تأییدکننده این موضوع است. اما ذرات بزرگ می‌توانند از یک گردابه به گردابه دیگر روند و انرژی را با خود منتقل کنند و همان‌طور که در نمودار ۱۳ دیده می‌شود، این ذرات در کسرهای حجمی بالا نوسانات ایجاد شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باعث می‌شوند تا گردابه‌های منظمی پشت بدنه مانع شکل نگیرند.



نمودار ۸ اثر چگالی ذرات روی فرکانس گردابه ایجاد شده در پشت بدنه مانع (سرعت ۲۰ m/s، قطر ذرات ۵۰ میکرون و کسر حجمی 10^{-3})

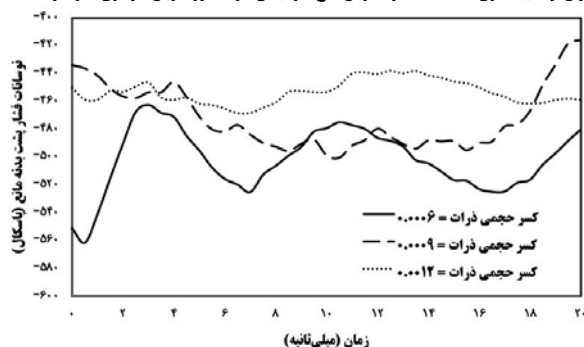


نمودار ۶ مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی در اندازه‌گیری افت فشار بین دو طرف بدنه مانع در جریان دوفازی گاز-ذره (سرعت ۱۲/۵ m/s، قطر ذرات ۴۰ میکرون، کسر حجمی 10^{-4} و چگالی 2200 kg/m^3)



نمودار ۷ مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی در اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌ها در جریان دوفازی گاز-ذره (قطر ذرات ۴۰ میکرون و چگالی ذرات 2200 kg/m^3)

براساس نتایج نشان داده‌شده در نمودارهای ۵ تا ۷ می‌توان مشاهده نمود که داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از جریان‌سنج گردابه‌ای و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی این نوع جریان‌سنج چه برای جریان تک‌فازی گازی بدون ذره و چه جریان رقیق دوفازی گاز-ذره با یکدیگر مطابقت خوبی دارند و می‌توان به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها اعتماد نمود. نمودار ۸ سری زمانی فشار در پشت بدنه مانع برای ذرات ۵۰ میکرون، با کسر حجمی یکسان (کسر حجمی 10^{-3}) و چگالی متفاوت را نشان می‌دهد. افزایش چگالی ذرات تأثیری روی فرکانس گردابه‌ها ندارد. نمودار ۹ سری زمانی فشار در پشت بدنه مانع را برای میزان بارگذاری جرمی ۰/۲۵، قطر ذرات ۵۰ میکرون و با کسر حجمی متفاوت (با توجه به ثابت‌بودن میزان بارگذاری جرمی، تغییر چگالی ذرات سبب تغییر در کسر حجمی ذرات می‌شود) را نشان می‌دهد. تغییر کسر حجمی سبب تغییر دامنه نوسانات فشار می‌شود؛ بنابراین با توجه به نمودارهای ۸ و ۹ می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس گردابه‌های ایجاد شده در پشت بدنه مانع تابعی از کسر حجمی ذرات است. در نمودار ۱۰ تأثیر قطر ذرات در کسرهای حجمی متفاوت روی فرکانس گردابه تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع نشان داده شده است. علاوه بر کسر حجمی ذرات، قطر ذرات نیز روی فرکانس گردابه‌های ایجاد شده تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین حضور ذرات در جریان گاز سبب تغییر فرکانس گردابه می‌شود و هرچه قطر ذرات



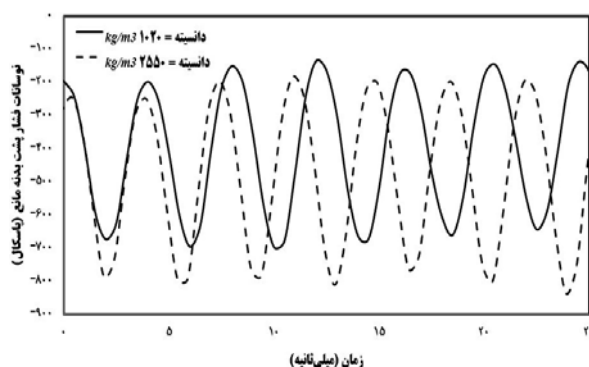
نمودار ۱۳) فرکانس گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع در کسرهای حجمی زیاد از ذرات و در حضور ذرات با اندازه متوسط (سرعت 2.0 m/s ، قطر ذرات $10 \text{ }\mu\text{m}$ و چگالی 1020 kg/m^3)

نتیجه‌گیری

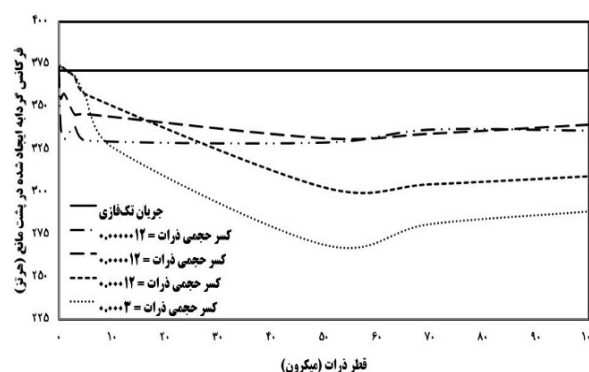
در این تحقیق عملکرد جریان‌سنج گردابه‌ای در حضور جریان دوفازی گاز- ذره بررسی شد. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی CFD جریان دوفازی گاز- ذره با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و نشان داده شد که مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی رفتار جریان دوفازی گاز- ذره درون جریان‌سنج گردابه‌ای است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی CFD جریان دوفازی گاز- ذره درون جریان‌سنج گردابه‌ای نشان داد که حضور ذرات روی عملکرد جریان‌سنج گردابه‌ای تأثیر می‌گذارد. قطر ذرات و کسر حجمی ذرات دو پارامتر مهم تأثیرگذار هستند. در جریان‌های دوفازی رقیق گاز- ذره، میکروذرات تغییر چندانی روی فرکانس گردابه‌ها ایجاد نمی‌کنند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر با توجه به اینکه از گردابه‌ای به گردابه دیگر می‌روند، انرژی را با خود از گردابه خارج می‌کنند و سبب کاهش فرکانس گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع می‌شوند. در کسرهای حجمی خیلی بالا و زمانی که جریان از حالت رقیق خارج شده و به سمت حالت غلیظ از ذره می‌رود، باز هم میکروذرات با توجه به اینکه نمی‌توانند از گردابه اولیه خود خارج شوند، فقط فرکانس گردابه در پشت بدنه مانع را تغییر می‌دهند در حالی که ذرات درشت سبب می‌شوند گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع ناپایدار شوند و گردابه‌ها به‌صورت منظم و متوالی در پشت بدنه مانع تشکیل نشوند؛ بنابراین با توجه به اینکه قطر ذرات و کسر حجمی ذرات روی فرکانس گردابه‌ها تأثیر می‌گذارند و از آنجا که فرکانس گردابه در جریان‌سنج گردابه‌ای رابطه مستقیم با متوسط سرعت سیال دارد، حضور ذرات به سبب تأثیری که روی فرکانس گردابه و بالتبع آن سرعت جریان می‌گذارد، موجب ایجاد خطا در اندازه‌گیری جریان‌سنج گردابه‌ای می‌شود.

تشکر و قدردانی: از زحمات بی‌دریغ اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر هاشم‌آبادی و جناب آقای دکتر شیروانی صمیمانه تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

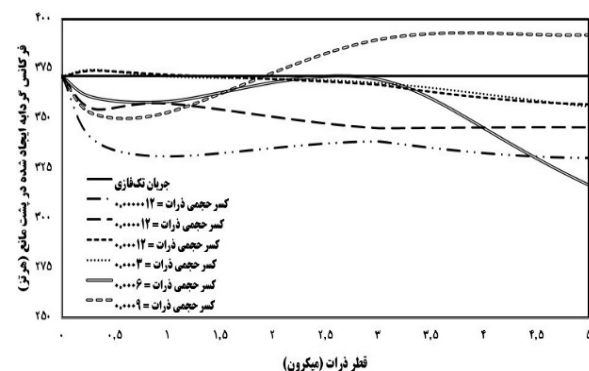
تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان مقاله است.



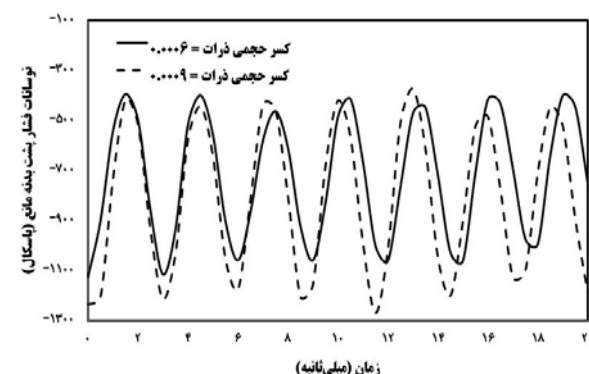
نمودار ۹) تأثیر کسر حجمی ذرات روی فرکانس گردابه ایجادشده در پشت بدنه مانع (سرعت 2.0 m/s ، قطر ذرات $50 \text{ }\mu\text{m}$ و میزان بارگذاری جرمی ذرات 25%)



نمودار ۱۰) فرکانس گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع در مقادیر مختلف از کسر حجمی و قطر ذرات (سرعت 2.0 m/s و چگالی 1020 kg/m^3)



نمودار ۱۱) اثر میکروذرات روی فرکانس گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع در مقادیر مختلف کسر حجمی ذرات (سرعت 2.0 m/s و چگالی 1020 kg/m^3)



نمودار ۱۲) فرکانس گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت بدنه مانع در کسرهای حجمی زیاد از ذرات و در حضور میکروذرات (سرعت 2.0 m/s ، قطر ذرات $3 \text{ }\mu\text{m}$ و چگالی 1020 kg/m^3)

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافع با سازمان‌ها و اشخاص دیگر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: حمزه فرحزادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ سیدحسن هاشم آبادی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ منصور شیروانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪).

منابع مالی: هزینه‌ها از طرف دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز تامین شده است.

منابع

- 1- Venugopal A, Agrawal A, Prabhu SV. Review on vortex flowmeter-Designer perspective. *Sensors and Actuators A*. 2011;70:8-23.
- 2- El-Wahed AK, Sproston JL. The influence of shedder shape on the performance of the electrostatic vortex flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1991;2(3):169-179.
- 3- Venugopal A, Agrawal A, Prabhu SV. On the linearity, turndown ratio and shape of the bluff body for vortex flowmeter. *Measurement*. 2019;137:477-483.
- 4- Peng BH, Miao JJ, Bao F, Weng LD, Chao CC, Hsu CC. Performance of vortex shedding from a circular cylinder with a slit normal to the stream. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2012;25:54-62.
- 5- Olsen JF, Rajagopalan S. Vortex shedding behind modified circular cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2000;86(1):56-63.
- 6- Peng J, Fang M. Response of a dual triangulate bluff body vortex flowmeter to oscillatory flow. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013;35:16-27.
- 7- Peng J, Fu X, Chen Y. Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body. *Sensors and Actuators A*. 2004;115:53-59.
- 8- Musić M, Ahić-Džokić M, Džemić Z. A new approach to detection of vortices using ultrasound. *Flow measurement and Instrumentation*. 2015;42:40-46.
- 9- Venugopal A, Agrawal A, Prabhu SV. Performance evaluation of piezoelectric and differential pressure sensor for vortex flowmeters. *Measurement*. 2014;50:10-18.
- 10- Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. *Applied Scientific Research*. 1994; 52:309-329.
- 11- Bayouhd M, Touati H, N'Ticha HB. Study of the effect of particles on the kinetic parameters of a turbulent two-phase flow. *Energy Procedia*. 2019;162:201-210.
- 12- Squires KD, Eaton JK. Particle response and turbulent modification in isotropic turbulence. *Physics of Fluids A*. 1990;2(7):1191-11203.
- 13- Zhang Y, Reese JM. Particle-gas turbulence interactions in a kinetic theory approach to granular flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001;27(11):1945-1964.
- 14- Gidaspow D, Bezburuah R, Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach. 7th Fluidization Conference, 3-8 May 1992, Gold Coast, Australia. Chicago: Department of Chemical Engineerin; 1992.
- 15- Miao Z, Kuang S, Zughbi H, Yu A. CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders. *Powder Technology*. 2019;349(1):70-83.
- 16- Benavides A, Wachem BV. Numerical simulation and validation of dilute turbulent gas-particle flow with inelastic collisions and turbulence modulation. *Powder Technology*. 2008;182(2):294-306.
- 17- Zhang H, Huang Y, Sun Z. A study of mass flow rate measurement based on the vortex shedding principle. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2006;17(1):29-38.
- 18- Tsuji Y, Morilawa Y, Shiomi H. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *Journal of Fluid Mechanic*. 1984;139:417-434.
- 19- Ferrante A, Elghobashi S. On the physical mechanisms of two-phase coupling in particle-laden isotropic turbulence. *Physics of Fluids*. 2003;15(2):315-329.

فهرست علائم

A	سطح مقطع لوله (m^2)
C_D	ضریب درگ (-)
C_P	ضریب فشار (-)
C_μ	ثابت معادله (-)
d	پهنای بدنه مانع (m)
d_p	قطر ذرات (m)
e_{ss}	ضریب بازگردانی ناشی از برخورد ذرات با یکدیگر و یا برخورد ذرات با دیواره (-)
f	فرکانس گردابه (Hz)
F_{drag}	نیروی درگ (N)
g	شتاب گرانشی (m/s^2)
$g_{0,ss}$	تابع توزیع شعاعی (-)
I	تنسور واحد (-)
k	انرژی جنبشی اغتشاش (m^2/s^2)
k_θ	ضریب نفوذ انرژی (Pa.s)
ML	میزان بارگذاری جرمی ذرات (-)
P	فشار سیال دوفازی گاز-جامد (Pa.s)
P_s	فشار فاز جامد (Pa)
Q_m	دبی جرمی سیال (kg/s)
r	فاصله شعاعی از مرکز لوله (m)
R	شعاع لوله (m)
Re_p	عدد رینولدز ذرات (-)
St	عدد استروهل (-)
T	دوره زمانی یک نوسان کامل
U	سرعت متوسط فاز گاز (m/s)
U_m	متوسط سرعت سیال (m/s)
V	سرعت متوسط فاز جامد (m/s)

علائم یونانی

β_0	ضریب انتقال مومنوم ($kg/m^3/s$)
γ_s	اتلاف انرژی برخوردی ($kg/m^3/s^3$)
ϵ	نرخ اتلاف انرژی اغتشاش (m^2/s^3)
Θ	دمای دانه‌ای (m^2/s^2)
λ	ویسکوزیته توده (Pa.s)
$\overline{\Delta P}$	متوسط افت فشار در دو طرف بدنه مانع (Pa)
μ	ویسکوزیته برشی (Pa.s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
τ	تنسور تنش-کرنش (N/m^2)
ϕ	کسر حجمی (-)

زیرنویس‌ها

g	فاز گاز
S	فاز جامد