Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Numerical Modeling of Black Powder Contamination Effects on Turbine Gas Meter Accuracy

Mahdi Esmaeili [a], Mohammad Reaza Sardashti Birjandi [a,*], Farhad Shahraki [a], Hamed Khosravi Bizhaem [b]

[a] *Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran*
[b] *Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran*

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
Turbine gas meter;
Black powder;
Two-phsae flow;
Critical mass loading;

ABSTRACT

Black powder, as one of the most critical solid contaminants in natural gas transmission and distribution pipelines, can significantly affect the accuracy of metering equipment. In this study, the influence of black powder particles on the performance of a 2-inch turbine gas meter was investigated through numerical modeling of gas–particle two-phase flow. Simulations were conducted for three types of gas measurement and pressure reduction stations (CGS, TBS, and HM) under summer and winter conditions, and the developed model was validated against laboratory data. The results indicate that, within the typical mass loading range observed in transmission pipelines (10^{-7} to 10^{-5}), the presence of black powder has a negligible impact on meter accuracy. However, the sensitivity analysis revealed that at mass loading values above approximately m ≈ 1.25, the velocity profile deviates by more than 5%, leading to a noticeable deterioration in meter performance. These findings provide practical guidance on setting contamination limits as well as planning maintenance and monitoring strategies for turbine gas meters.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: m.r_sardashti@eng.usb.ac.ir

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

مدلسازی عددی تأثیر آلودگی پودر سیاه بر دقت کنتور توربینی گاز

مهدی اسماعیلی[۱]، محمدرضا سردشتی بیرجندی[۱،*]، فرهاد شهرکی[۱]، حامد خسروی بیژائم[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:
بازنگری مقاله:
پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:
کنتور توربینی گاز،
پودر سیاه،
جریان دوفازی،
بار جرمی بحرانی،

چکیده

پودر سیاه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های جامد در خطوط انتقال و توزیع گاز طبیعی می‌تواند دقت تجهیزات اندازه‌گیری را تحت‌تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، تأثیر ذرات پودر سیاه بر عملکرد یک کنتور توربینی ۲ اینچی با استفاده از مدلسازی عددی جریان دوفازی گاز-ذره مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها برای سه نوع ایستگاه اندازه‌گیری و تقلیل فشار گاز (CGS، TBS و HM) و در دو فصل تابستان و زمستان اجرا شد و مدل توسعه‌یافته با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان می‌دهد که در بازه بار جرمی متداول در خطوط انتقال ($۱۰^{-۷}$ تا $۱۰^{-۵}$)، حضور پودر سیاه تأثیر قابل‌توجهی بر دقت کنتور ندارد. با این حال، تحلیل حساسیت مشخص کرد که برای مقادیر بار جرمی بالاتر از حدود $m\approx1.25$، پروفیل سرعت بیش از ۵٪ تغییر می‌کند و عملکرد کنتور به‌طور محسوس مختل می‌گردد. این یافته می‌تواند در تعیین حدود مجاز آلودگی و برنامه‌ریزی نگهداری و پایش کنتورهای گاز مورد استفاده قرار گیرد.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه

در شبکه‌های انتقال و توزیع گاز طبیعی، آلودگی‌های جامد همواره یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری پایدار و دقیق تجهیزات اندازه‌گیری به شمار می‌آیند. در میان این آلودگی‌ها، پودر سیاه به عنوان ترکیبی از اکسیدها و سولفیدهای فلزی و ذرات غیرآهنی، اهمیت ویژه‌ای دارد. منشأ اصلی این ذرات فرآیندهای خوردگی داخلی خطوط لوله، واکنش‌های شیمیایی ناشی از وجود H_2S و CO_2، و نیز سایش مکانیکی تجهیزات است. حضور این ذرات نه‌تنها موجب افزایش افت فشار و فرسایش در خطوط انتقال می‌شود، بلکه عملکرد تجهیزات اندازه‌گیری، به ویژه کنتورهای توربینی، را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد[۱, ۲].

مطالعات متعدد نشان می‌دهند که تجمع پودر سیاه در مسیر عبور جریان، پروفیل سرعت را تغییر داده، راندمان هیدرولیکی پره‌ها را کاهش داده و خطای اندازه‌گیری کنتورها را افزایش می‌دهد. کنتورهای توربینی به دلیل ماهیت مکانیکی و حساسیت پره‌ها به تغییرات هندسی ناشی از رسوب یا سایش، بیش از سایر انواع کنتور مستعد انحراف عملکرد هستند. این پیامدها در شرایطی که بار جرمی ذرات بالاست یا کیفیت فیلتراسیون کاهش یافته باشد، شدت بیشتری پیدا می‌کند[۳].

بررسی‌های میدانی در ایستگاه‌های مختلف گاز نشان می‌دهند که وجود پودر سیاه علاوه بر ایجاد افت فشار و کاهش عمر تجهیزات، سبب بروز خطاهای انباشته در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.r_sardashti@eng.usb.ac.ir
۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

اندازه‌گیری جریان نیز می‌شود. گزارش‌های عملیاتی کشورهای مختلف بیانگر آن است که خطاهای ناشی از پودر سیاه معمولاً در بلندمدت و تحت شرایط بهره‌برداری متغیر (مانند تغییر فصل یا نوع ایستگاه) آشکار می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که کالیبراسیون‌های دوره‌ای قادر به شناسایی به‌موقع آن نیستند[۳, ۴].

به‌منظور کنترل و کاهش اثرات منفی پودر سیاه، راهکارهایی همچون بهبود فناوری فیلتراسیون، استفاده از جداکننده‌های گریز از مرکز (سیکلون/ سانتریفیوژ)، پاکسازی دوره‌ای لوله‌ها[1]، و افزودن مواد شیمیایی ضدخوردگی، و نیز پایش مستمر کیفیت گاز پیشنهاد و اجرا شده است[۲, ۵]. با این حال، این روش‌ها هزینه‌بر بوده و در بسیاری موارد تنها نقش پیشگیرانه داشته و قادر به حذف کامل پدیده یا پیش‌بینی اثرات تجمعی آن بر عملکرد کنتورها نیستند.

با توجه به پیچیدگی پدیده پودر سیاه و دشواری انجام آزمایش‌های میدانی در شرایط بهره‌برداری واقعی، استفاده از مدلسازی عددی به‌عنوان ابزاری نوین و کارآمد برای تحلیل این‌گونه مسائل و دیگر چالش‌های صنعتی اهمیت ویژه‌ای یافته است[۶-۹]. این رویکرد امکان بررسی شرایط متنوع (مثل نوع ایستگاه، فصل، فشار و دبی) را فراهم می‌کند، بدون آن که نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایش میدانی سنگین و پرهزینه باشد. با وجود پژوهش‌های پیشین در زمینه رسوب ذرات[۱۰, ۱۱] و اثرات آن بر افت فشار[۱۲] و خوردگی تجهیزات[۱۳-۱۵] یا روش‌های حذف پودر سیاه[۱۶]، همچنان یک شکاف پژوهشی قابل توجه در تحلیل عددی اثر قطر و بار جرمی ذرات بر عملکرد کنتورهای توربینی در شرایط عملیاتی مختلف وجود دارد.

از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی عددی اثر بار جرمی پودر سیاه بر عملکرد کنتور توربینی گاز ۲ اینچ در سه نوع ایستگاه تقلیل فشار گاز و دو فصل تابستان و زمستان انجام شده است. افزون بر تحلیل تأثیر شرایط بهره‌برداری بر دقت اندازه‌گیری، تلاش شده است تا مقدار بار جرمی بحرانی شناسایی شود؛ مقداری که در صورت عبور از آن، انحراف نتایج اندازه‌گیری به‌صورت محسوس آغاز می‌شود. دستیابی به این آستانه می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی راهبردهای نگهداری و تضمین صحت اندازه‌گیری در ایستگاه‌های گاز ایفا کند.

۲-مدلسازی دوفازی گاز-ذره در کنتور توربینی

در این پژوهش، یک کنتور توربینی گاز با قطر ۲ اینچ (ساخت شرکت وِمتک[2]) به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. هدف، بررسی رفتار جریان دوفازی گاز-ذره در شرایط عملیاتی متفاوت بود که بر اساس داده‌های گزارش‌شده توسط آزادی و همکاران[3][۱۷]، سه نوع ایستگاه متداول شامل ایستگاه تقلیل فشار شهری (CGS)[4]، ایستگاه تقلیل فشار صنعتی (TBS)[5] و تنظیم‌کننده خانگی (HM)[6] مدنظر قرار گرفتند. به‌منظور لحاظ‌کردن اثر تغییرات اقلیمی، شرایط بهره‌برداری در دو فصل تابستان و زمستان به‌طور جداگانه تحلیل شد (جدول ۱). این چارچوب مطالعاتی امکان ارزیابی جامع اثر حضور و توزیع ذرات پودر سیاه بر عملکرد هیدرودینامیکی و دقت اندازه‌گیری کنتور توربینی را در سناریوهای متنوع بهره‌برداری فراهم ساخت.

جدول ۱- غلظت و توزیع اندازه ذرات در ایستگاه‌های مختلف نمونه برداری برای فصول تابستان و زمستان.

فصل	ایستگاه	غلظت (mg/Nm^3)	چگالی فاز جامد (kg/m^3)	اندازه ذرات (μm)
تابستان	CGS	۴/۷	۱۹۵۵	۱-۶۴۵
	TBS-avg	۰/۸	۱۷۰۸	۱-۶۲۶
	HM-avg	۰/۱۵		۱-۴۶۱
زمستان	CGS	۲۲/۰۹	۱۹۵۵	۱-۴۹۶
	TBS-avg	۲/۸	۱۷۰۸	۱-۲۵۴
	HM-avg	۰/۳۷		۱-۲۴۶

برای مدلسازی کنتور توربینی، معادله تعادل گشتاور بر اساس پژوهش رحمتی و همکاران[7] [۱۸] به‌کار گرفته شد و جریان دوفازی گاز-ذره با رویکرد اویلری-لاگرانژی مبتنی بر مدل فاز گسسته (DPM)[8] شبیه‌سازی گردید. در روش اویلری-لاگرانژی، فاز گازی به‌صورت پیوسته حل شد و مسیر حرکت ذرات پودر سیاه به‌صورت مجزا رهگیری گردید.

[1] Pigging
[2] Vemmtec
[3] Azadi et al.
[4] City Gate Station
[5] Town Border Station
[6] Home Regulator
[7] Rahmati et al.
[8] Discrete Phase Model

UNCORRECTED PROOF

جدول ۲- پارامترهای تابع رزین-راملر برای توزیع ذرات.

فصل	ایستگاه	حداقل قطر (µm)	حداکثر قطر (µm)	قطر متوسط (µm)	پارامتر توزیع	تعداد قطر ذرات
تابستان	CGS	۱	۶۴۵	۲۴۹	۳	۱۰
	TBS-avg		۶۲۶	۲۵۳		
	HM-avg		۴۶۱	۱۸۱		
زمستان	CGS		۴۹۶	۱۸۳		
	TBS-avg		۲۵۴	۹۱		
	HM-avg		۲۴۶	۷۴		

با توجه به اثر متقابل ذرات بر میدان جریان، برهم‌کنش دوطرفه[1] اعمال شد. به‌منظور بازنمایی توزیع اندازه ذرات، از تابع توزیع رزین-راملر[2] (رابطه ۱) استفاده گردید که قابلیت توصیف دقیق‌تر پراکندگی اندازه ذرات را فراهم می‌کرد (جدول ۲). این انتخاب‌ها امکان تحلیل واقع بینانه‌تر اثرات بار جرمی و مشخصات آماری ذرات بر عملکرد کنتور توربینی را فراهم نمودند.

$$Y_d = e^{-(d_p/\bar{d}_p)^n} \quad (۱)$$

که d_p قطر پودر سیاه، $\bar{d}_p$ قطر متوسط، n پارامتر توزیع و Y_d کسر جرمی با قطر بزرگ‌تر از d است.

۲-۱-معادلات حاکم بر شبیه‌سازی

معادلات حاکم بر جریان گاز با استفاده از معادلات ناویر-استوکس[3] برای جریان پایا، آشفته و غیرقابل‌تراکم حل شدند (عدد ماخ کمتر از ۰/۱۵). آشفتگی با مدل RNG k– ε شبیه‌سازی شد که دقت مناسبی در پیش‌بینی جریان‌های داخلی و توربوماشین دارد. خلاصه معادلات حاکم در جدول ۳ ارائه شده است.

مدل فاز گسسته برای شبیه‌سازی تزریق و ردیابی ذرات جامد در دامنه محاسباتی به‌کار گرفته شد. موازنه نیروهای وارد بر ذرات (رابطه ۸) شامل نیروی درگ (رابطه ۹)، نیروی گرانشی و نیروهای مرتبط با چارچوب مرجع چرخان (MRF)[4] (روابط ۱۰ و ۱۱) بود که به‌عنوان نیروهای غالب اعمال شدند. سایر نیروها با توجه به ویژگی‌های خاص ذرات و جریان، قابل صرف‌نظر کردن فرض شدند. برهم‌کنش ذره-ذره نیز ناچیز در نظر گرفته شد[۱۰].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D\left(\vec{u}-\vec{u}_p\right) + \frac{\vec{g}\left(\rho_p-\rho\right)}{\rho_p} + \vec{F}_{MRF} \quad (۸)$$

$$F_D = \frac{3}{4}\frac{\mu C_D \,\mathrm{Re}_p}{d_p^2} \quad (۹)$$

$$F_{MRF,y} = \left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2 y + 2\Omega\left(u_{p,z} - \frac{\rho}{\rho_p}u_z\right) \quad (۱۰)$$

$$F_{MRF,z} = \left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2 z + 2\Omega\left(u_{p,y} - \frac{\rho}{\rho_p}u_y\right) \quad (۱۱)$$

به‌منظور لحاظ کردن شکل ذرات، پودر سیاه به‌صورت ذرات چندوجهی با کرویت[5] تقریبی ۰/۸ مدلسازی شد[۱۰, ۱۱]. ضریب درگ برای ذرات غیرکروی با استفاده از همبستگی هایدر و لونزویل[۶][۲۱] (روابط ۱۲) محاسبه گردید. در این روابط Re_p عدد رینولدز معادل برای یک ذره کروی در نظر گرفته شده است. ضرایب b_1، b_2، b_3 و b_4 به‌صورت توابعی از کرویت ذره تعریف می‌شوند که خود به‌عنوان نسبت سطح یک کره با همان حجم ذره به سطح واقعی ذره تعیین می‌شود.

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1+b_1\mathrm{Re}_p^{b_2}\right) + \frac{b_3\,\mathrm{Re}_p}{b_4+\mathrm{Re}_p} \quad (۱۲\text{-الف})$$

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho d_p\left|\vec{u}-\vec{u}_p\right|}{\mu} \quad (۱۲\text{-ب})$$

$$b_1 = \exp\left(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2\right)$$
$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi$$
$$b_3 = \exp\left(\begin{matrix}4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 \\ -10.2599\phi^3\end{matrix}\right) \quad (۱۲\text{-ج})$$
$$b_4 = \exp\left(\begin{matrix}1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 \\ +15.8855\phi^3\end{matrix}\right)$$

برای شبیه‌سازی دقیق‌تر، کوپل دوطرفه هم برای میدان جریان میانگین و هم برای میدان آشفتگی اعمال گردید. اثرات آشفتگی با مدل حرکت تصادفی (RWM)[7] شبیه‌سازی شد (رابطه ۱۳).

[1] Two-way coupling
[2] Rosin–Rammler
[3] Navier–Stokes
[4] Moving Reference Frame
[5] Sphericity
[6] Haider and Levenspiel
[7] Random Walk Model

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

UNCORRECTED PROOF

جدول ۳- معادلات حاکم بر جریان گاز[۱۸-۲۰].

قوانین حاکم		معادلات	
ناحیه استاتور	پیوستگی	$\nabla \cdot \vec{u} = 0$	(۲)
	مومنتوم	$\rho\nabla\cdot(\vec{u}\vec{u}) = -\nabla P - \nabla\cdot(\tau+\tau^t)$	(۳)
ناحیه روتور	پیوستگی	$\nabla\cdot(\vec{u}-(r\times\omega))=0$	(۴)
	مومنتوم	$\rho\nabla\cdot(\vec{u}(\vec{u}-(r\times\omega)))+\rho(\omega\times\vec{u}) = -\nabla P - \nabla\cdot(\tau+\tau^t)$	(۵)
معادله آشفتگی RNG k-ε		$\rho\frac{Dk}{Dt} = \nabla\cdot\left[\mu-\frac{\mu^t}{\sigma_k}\nabla k\right]+G_k-\rho\varepsilon$	(۶)
		$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt} = \nabla\cdot\left[\mu-\frac{\mu^t}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon\right]+\frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon)$	(۷)
ثابت‌های تجربی مدل آشفتگی		$C_{1\varepsilon}$=1.42 $C_{2\varepsilon}$=1.68 C_μ=0.0845 σ_k=0.7194 σ_ε=0.7194	

$$u = \bar{u} + u' \qquad (۱۳)$$

که ū سرعت میانگین حل شده توسط مدل آشفتگی و ú نوسان تصادفی ناشی از آشفتگی است. طول عمر گردابه‌ها از مقیاس زمانی انتگرالی محاسبه شد و زمان‌های برهم‌کنش ذره-گردابه بر اساس زمان آرامش، سرعت لغزش و اندازه گردابه تعیین گردید. سرعت‌های نوسانی از یک توزیع نرمال نمونه‌برداری شدند (رابطه ۱۴).

$$u' = \zeta\sqrt{\overline{u'^2}} = \zeta\sqrt{\frac{2k}{\varepsilon}} \qquad (۱۴)$$

در رابطه ۱۴، ζ به‌عنوان متغیر تصادفی با توزیع نرمال تعریف شده است.

۳-شبیه‌سازی CFD

۳-۱-ترسیم هندسه و شبکه بندی

به‌منظور شبیه‌سازی کنتور توربینی گاز، هندسه یکسوکننده[1] و کارتریج با نرم‌افزار سالیدورک[2] ترسیم شد و هندسه روتور به دلیل اهمیت بالای این قطعه از طریق اسکن سه‌بعدی بصورت ابر نقاط بازسازی و سپس در نرم افزار کتیا[3] به هندسه روتور تبدیل گردید. سپس تمامی بخش‌ها با نرم‌افزار انسیس[4] شبکه‌بندی شدند و دامنه شبیه‌سازی بر اساس خط کالیبراسیون شرکت توس‌وِمتک ایجاد شد (شکل ۱-الف). این خط کالیبراسیون بصورت حلقه باز عمل می‌کند؛ هوا توسط بلوئر مکش شده و پس از عبور از کنتورهای تحت آزمون و مرجع (کنتورهای روتاری) با عدم قطعیت (k=2) ۰/۲ درصد اندازه‌گیری می‌شود.

ساختار کلی هندسه شامل پنج بخش اصلی است: لوله ابتدایی، یکسوکننده، روتور، کارتریج و لوله انتهایی (شکل ۱-ب). با توجه به پیچیدگی هندسه یکسوکننده، روتور و کارتریج، از شبکه‌بندی بی‌سازمان برای این نواحی استفاده شد.

۳-۲-سیال شبیه‌سازی و شرایط مرزی

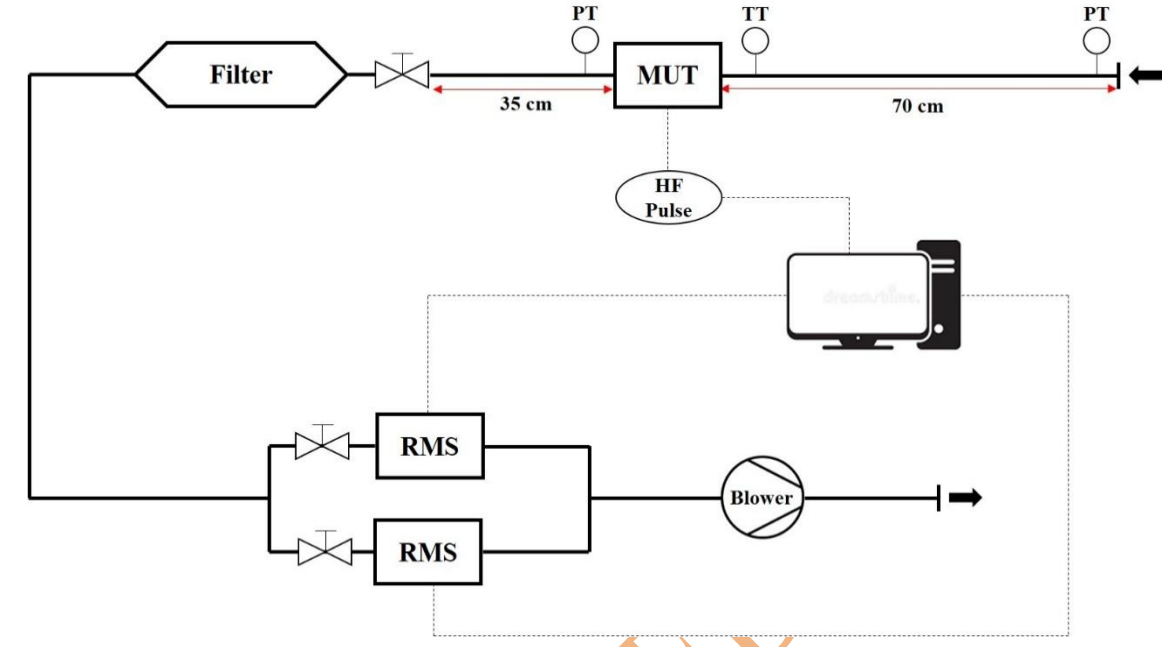
در بخش اعتبارسنجی نتایج، سیال شبیه‌سازی هوا در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی اثر پودر سیاه بر عملکرد کنتور توربینی و شبیه‌سازی نزدیک‌تر به شرایط عملیاتی، از گاز طبیعی مطابق با استاندارد IGS-M-CH-033[۲۲] استفاده شد. خواص ترموفیزیکی فاز گاز، شامل چگالی و ویسکوزیته، در فشار اتمسفریک و دمای ۲۵ °C با استفاده از روابط ترمودینامیکی ارائه‌شده در جدول ۴ محاسبه شدند.

شرایط مرزی در ورودی دامنه، سرعت‌های ثابت بر اساس دبی‌های جرمی آزمایشگاهی، همراه با شدت آشفتگی متناظر برای هر دو فاز پیوسته و گسسته اعمال شدند. تزریق ذرات (برای توزیع ذرات تابع توزیع رزین- رامل استفاده شده است) به‌گونه‌ای انجام گرفت که با نرخ جریان جرمی مشخص‌شده تطابق داشته باشد. در خروجی، فشار اتمسفریک اعمال شد و ذرات پس از خروج از دامنه حذف گردیدند. نواحی ثابت و چرخان از طریق مرزهای

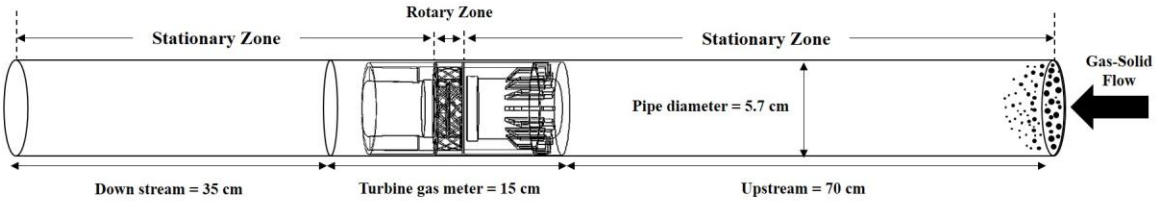
[1] Straightening vane
[2] SOLIDWORKS
[3] CATIA
[4] ANSYS

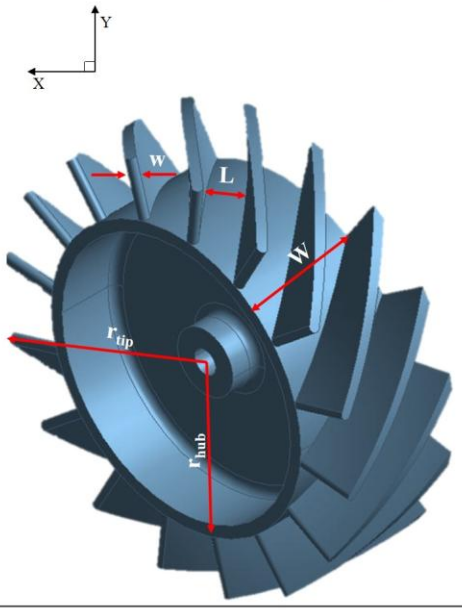
UNCORRECTED PROOF

غیرهم‌پوشان به یکدیگر متصل شدند. شرط بدون‌لغزش برای تمام دیواره‌ها در نظر گرفته شد و برای بهبود دقت مدلسازی آشفتگی نزدیک دیواره، مدل بهبودیافته‌ی ناحیه‌ی نزدیک دیواره به‌کار گرفته شد. برهم‌کنش ذره-دیواره به صورت بازتابی مدل شد.



(الف)





r_{hub}	r_{tip}	W	w	L
1.80 cm	2.50 cm	1.51 cm	0.17 cm	0.71 cm

(ب)

شکل ۱- الف) شماتیک خط کالیبراسیون شرکت توس وِمتک، ب) دامنه شبیه‌سازی و مشخصات هندسی روتور

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

جدول ۴- روابط ترموفیزکی و خواص فاز گاز[۲۳-۲۶].

نوع سیال	روابط	M_w (kg/kmol)	مقدار
هوا	$\rho_{air}=\frac{pM_{w,air}}{RT}$ (۱۵)	۲۸/۹۷۰	۱/۱۸۴ kg/m^3
	$\mu=\mu_{ref}\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{3/2}\frac{T_{ref}+C}{T+C}$ $\mu_{ref}=1.716\times10^{-5}$ Pa.s $T_{ref}=273.15K$ $C=110.4K$ (۱۶)		۱/۸۳۷ Pa.s
گاز طبیعی	$\rho_{NG}=\frac{PM_{w,NG}}{ZRT}$ (۱۷) $Z=1+B\rho_m-\rho_r\sum_{n=13}^{18}C_n^*+\sum_{n=13}^{18}C_n^*\left(b_n-c_nk_n\rho_r^{k_n}\right)\rho_r^{b_n}\exp\left(-c_n\rho_r^{k_n}\right)$ (۱۸)	۱۸/۲۸۷	۰/۷۴۹ kg/m^3
	$\mu_{NG}=10^{-7}K\exp\left(X\left(\frac{\rho_{NG}}{1000}\right)^Y\right)$ (۱۹-الف) $K=\frac{(9.379+0.01607M_{w,NG})(1.8T)^{1.5}}{209.2+19.26M_{w,NG}+1.8T}$ (۱۹-ب) $X=3.448+\frac{986.4}{1.8T}+0.01009M_{w,NG}$ (۱۹-ج) $Y=2.447+0.2224X$ (۱۹-د)		۱/۰۹۵ Pa.s

۳-۳-متدولوژی و جزئیات شبیه‌سازی

سرعت روتور برای هر دبی ورودی از طریق اعمال تکراری موازنه گشتاور و با استفاده از کد UDF محاسبه شد. همگرایی زمانی محقق گردید که گشتاور باقیمانده به کمتر از 10^{-6} N.m رسید. شبیه‌سازی چندفازی در سه مرحله انجام شد:

۱) ابتدا یک حل پایدار تک‌فازی برای ایجاد میدان جریان پایدار بدست آمد.

۲) سپس شبیه‌سازی گذرای دوفازی ادامه یافت تا ذرات تزریق‌شده ابتدایی از دامنه خارج شوند.

۳) در نهایت حل به حالت پایدار بازگردانده شد تا پاسخ پایدار روتور ثبت گردد.

معادلات حاکم با استفاده از الگوریتم کوپل‌شده مبتنی بر فشار برای جریان تراکم‌ناپذیر حل شدند. کوپل سرعت-فشار با بهره‌گیری از روش سیمپل[1] انجام گرفت و گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، k و ε به‌صورت مرتبه دوم انجام شد. جهت تضمین پایداری حل، ضرایب تخفیف برابر ۰/۱ برای مومنتوم و کمیت‌های آشفتگی در نظر گرفته شد. همگرایی زمانی تأیید شد که باقی‌مانده‌های کلیه معادلات به کمتر از 10^{-4} رسید.

۴-تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱-اعتبارسنجی شبیه‌سازی

به‌منظور اطمینان از دقت و پایداری نتایج عددی، مطالعه استقلال مش بر روی مدل‌هایی با ۱/۲۰، ۱/۴۳، ۱/۸۳ و ۲/۰۶ میلیون المان انجام شد. در هر حالت، سرعت زاویه‌ای روتور محاسبه و تغییرات آن نسبت به حالت مرجع (سرعت زاویه‌ای در دبی ۷۴/۳ m^3/h) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که افزایش تعداد المان‌ها از ۱/۴۳ تا ۲/۰۶ میلیون تأثیر معناداری بر پاسخ عددی ندارد و خطای نسبی در این بازه در محدوده قابل‌قبول شبیه‌سازی‌های صنعتی باقی می‌ماند. بر این اساس، مدل با ۱/۴۳ میلیون المان به‌عنوان پیکربندی بهینه انتخاب و در ادامه شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

جهت اعتبارسنجی مدل عددی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در آزمایشگاه کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری گاز توس‌وِمتک (ساوه، ایران) اجرا شد. این آزمون‌ها در شش

[1] SIMPLE

UNCORRECTED PROOF

دبی متفاوت ($12\ m^3/h$ تا $92/30\ m^3/h$) اجرا گردیدند و برای افزایش دقت و اطمینان از تکرارپذیری، هر نقطه آزمایشی سه مرتبه اندازه‌گیری شد. در جدول ۵ نتایج سرعت زاویه‌ای (ω) شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و گزارش شده است. خطای نسبی (E)، خطای میانگین وزنی (WME[1]) و میانگین درصد قدر مطلق خطا (MAPE[2]) به ترتیب بر حسب روابط ۲۰-۲۲ محاسبه شده‌اند.

$$E\,(\%) = \frac{\omega_{CFD} - \omega_{\exp}}{\omega_{\exp}} \times 100 \qquad (۲۰)$$

$$WME = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i E_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \qquad \begin{matrix} x_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} & Q_i \le 0.7Q_{\max} \\ x_i = 1.4 - \frac{Q_i}{Q_{\max}} & Q_i > 0.7Q_{\max} \end{matrix} \qquad (۲۱)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|E_i| \qquad (۲۲)$$

جدول ۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی CFD و داده‌های آزمایشگاهی.

دبی (m^3/h)	سرعت زاویه‌ای (ω) (rad/s)		خطای نسبی (٪)
	تجربی	شبیه‌سازی	
۹۲/۳۰	۱۴۷۹/۵۹۱	۱۴۸۰/۸۱۲	۰/۰۸۲
۷۴/۳۰	۱۱۸۶/۷۳۴	۱۱۸۶/۷۱۴	-۰/۰۰۲
۵۰	۸۱۷/۰۵۴	۷۹۷/۵۰۲	-۲/۳۹۳
۳۹/۸۰	۶۵۱/۷۸۳	۶۴۱/۰۲۵	-۱/۶۵۱
۲۴/۴۰	۴۰۱/۳۵۸	۳۹۴/۳۱۹	-۱/۷۵۴
۱۲/۰۶	۱۹۹/۱۷۸	۱۹۶/۱۳۰	-۱/۵۳۰
WME	-۱/۰۸۴		
MAPE	۱/۲۰۸		

مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی به کار رفته دقت مناسبی دارد. مقدار میانگین وزنی خطا برابر با ٪۱/۰۸۵- و میانگین قدر مطلق خطا معادل ٪۱/۲۰۸ بدست آمده که بیانگر انطباق مطلوب نتایج عددی و تجربی است. بررسی خطای نسبی در دبی‌های مختلف نشان داد که بیشترین اختلاف در دبی‌های پایین رخ داد؛ با این حال، با افزایش دبی و تثبیت جریان در ناحیه آشفته، میزان خطا به شکل محسوسی کاهش پیدا کرد. به ویژه در دبی‌های بالاتر از $70\ m^3/h$، مدل عددی توانست نتایج را با دقت بسیار بالا بازتولید کند. در مجموع، این میزان خطا صحت مدل عددی توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی جریان گاز درون کنتور توربینی را تأیید می‌کند.

۴-۲-تاثیر پودر سیاه بر دقت کنتور

در جدول ۶، نتایج شبیه‌سازی مربوط به ایستگاه‌های CGS، TBS و HM در دو فصل تابستان و زمستان ارائه شده است. بار جرمی (m) به‌عنوان نسبت جرم ذرات جامد به جرم فاز گاز تعریف و بر اساس رابطه ۲۳ محاسبه گردید.

$$m = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g} = \frac{\alpha_p}{(1-\alpha_p)}\frac{\rho_p}{\rho_g} \qquad (۲۳)$$

جدول ۶- تاثیر حضور پودر سیاه بر دقت کنتور در فصل تابستان و زمستان برای ایستگاه‌ها متفاوت (دبی حجمی m^3/h ۷۴/۳۰، فشار اتمسفریک و دمای ۲۵ °C).

فصل	ایستگاه	اندازه ذرات (µm)	بار جرمی	سرعت زاویه‌ای (rad/s)
بدون پودر سیاه			صفر	۱۱۸۴/۲۱۳
تابستان	CGS	۱-۶۴۵	$۶/۲۸\times۱۰^{-۶}$	۱۱۸۴/۲۰۷
	TBS-avg	۱-۶۲۶	$۱/۰۷\times۱۰^{-۶}$	۱۱۸۴/۲۳۲
	HM-avg	۱-۴۶۱	۲×۱۰^{-۷}	۱۱۸۴/۱۹۰
زمستان	CGS	۱-۴۹۶	$۲/۹۵\times۱۰^{-۵}$	۱۱۸۴/۱۵۹
	TBS-avg	۱-۲۵۴	$۳/۷۴\times۱۰^{-۶}$	۱۱۸۴/۲۲۰
	HM-avg	۱-۲۴۶	$۴/۹۴\times۱۰^{-۷}$	۱۱۸۴/۲۲۴

براساس داده‌های جدول ۶، تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور در بازه بار جرمی 10^{-7} تا 10^{-5} ناچیز است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که کنتور در این محدوده از دقت بالایی برخوردار بوده و عملکرد آن به‌طور محسوسی تحت تأثیر بار جرمی و اندازه ذرات پودر سیاه قرار نمی‌گیرد.

برای تحلیل دقیق‌تر اثر بار جرمی و اندازه ذرات، سه سناریوی کلیدی انتخاب و پارامترهای هیدرودینامیکی با حالت بدون پودر سیاه مقایسه شدند:

۱) حالت بار جرمی کم + ذرات کوچک (تأثیر مثبت احتمالی روی سرعت زاویه‌ای): فصل زمستان و ایستگاه HM

[1] Weighted Mean Error

[2] Mean Absolute Percentage Error

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

UNCORRECTED PROOF

۲) حالت بار جرمی متوسط + ذرات متوسط (محدوده تعادلی یا مرزی): فصل تابستان و ایستگاه CGS

۳) حالت بار جرمی زیاد + ذرات بزرگ (کاهنده‌ی سرعت زاویه‌ای): فصل زمستان و ایستگاه CGS

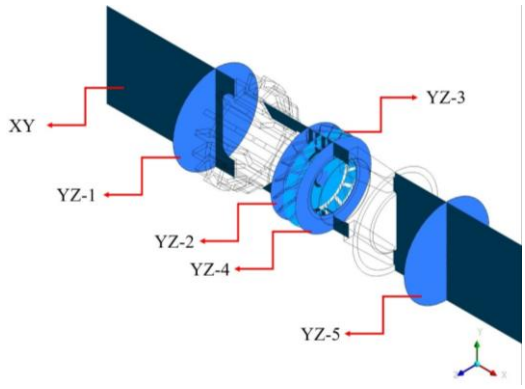
در جدول ۷ مقدار متوسط جرمی پارامترهای هیدرودینامکی جریان (سرعت متوسط ($\bar{U}$)، متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی ($\bar{k}$)، متوسط شدت آشفتگی ($\bar{I}$) و متوسط نرخ تلفات اغتشاشی ($\bar{\varepsilon}$)) در حالت بدون پودر سیاه و همراه با پودر سیاه مقایسه شده است.

جدول ۷- مقایسه متوسط جرمی پارامترهای هیدرودینامیکی در شرایط با و بدون پودر سیاه (دبی حجمی m^3/h ۷۴/۳۰، فشار اتمسفریک و دمای °C ۲۵).

ستاریو	فشار کل (Pa)	ناحیه روتور			
		$\bar{U}$ (m/s)	$\bar{k}$ (m^2/s^2)	$\bar{I}$ (%)	$\bar{\varepsilon}$ (m^2/s^3)
۰	۳۸۰	۱۷/۶۲	۱۱/۵۱	۲۵۱/۵۲	۵۰۲۶۹
۱	۳۷۹	۱۷/۶۳	۱۱/۵۲	۲۵۱/۵۳	۵۰۲۷۲
۲	۳۷۸	۱۷/۶۱	۱۱/۵۱	۲۵۱/۵۳	۵۰۲۶۷
۳	۳۸۰	۱۷/۶۲	۱۱/۵۰	۲۵۱/۴۲	۵۰۲۵۳

نتایج بدست آمده بیانگر آن است که در سناریوی ۱ (بار جرمی کم + ذرات ریز) فشار کل اندکی کاهش یافت، ولی سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی کمی افزایش پیدا کردند که بیانگر افزایش جزئی انتقال انرژی و تلاطم است. در سناریوی ۲ (بار جرمی متوسط)، بیشترین افت فشار مشاهده شد و سایر پارامترها تقریباً ثابت ماندند که نشان‌دهنده شرایط گذار است. در سناریوی ۳ (بار جرمی زیاد + ذرات درشت) شدت آشفتگی و پارامترهای k و ε به‌طور محسوسی کاهش یافتند که بیانگر تضعیف تلاطم و کاهش توان انتقال مومنتوم از جریان به پره‌های روتور است. بنابراین، با وجود اینکه تغییرات عددی کوچک‌اند، روندها روشن هستند: ذرات سبک موجب افزایش ناچیز تلاطم و انرژی در روتور می‌شوند (تقویت عملکرد در نتیجه بوجود آمدن خطای مثبت)، در حالیکه ذرات سنگین تلاطم را تضعیف و عملکرد روتور را مختل می‌کنند (ایجاد خطای منفی).

پارامترهای هیدرودینامیکی و توزیع ذرات در دامنه شبیه‌سازی کنتور (شکل ۲) در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجا که تغییرات کانتورها در سناریوها ناچیز بود، نتایج صرفاً برای سناریوی ۳ (فصل زمستان و ایستگاه CGS که بار جرمی بیشتری دارد) ترسیم و گزارش شده است.



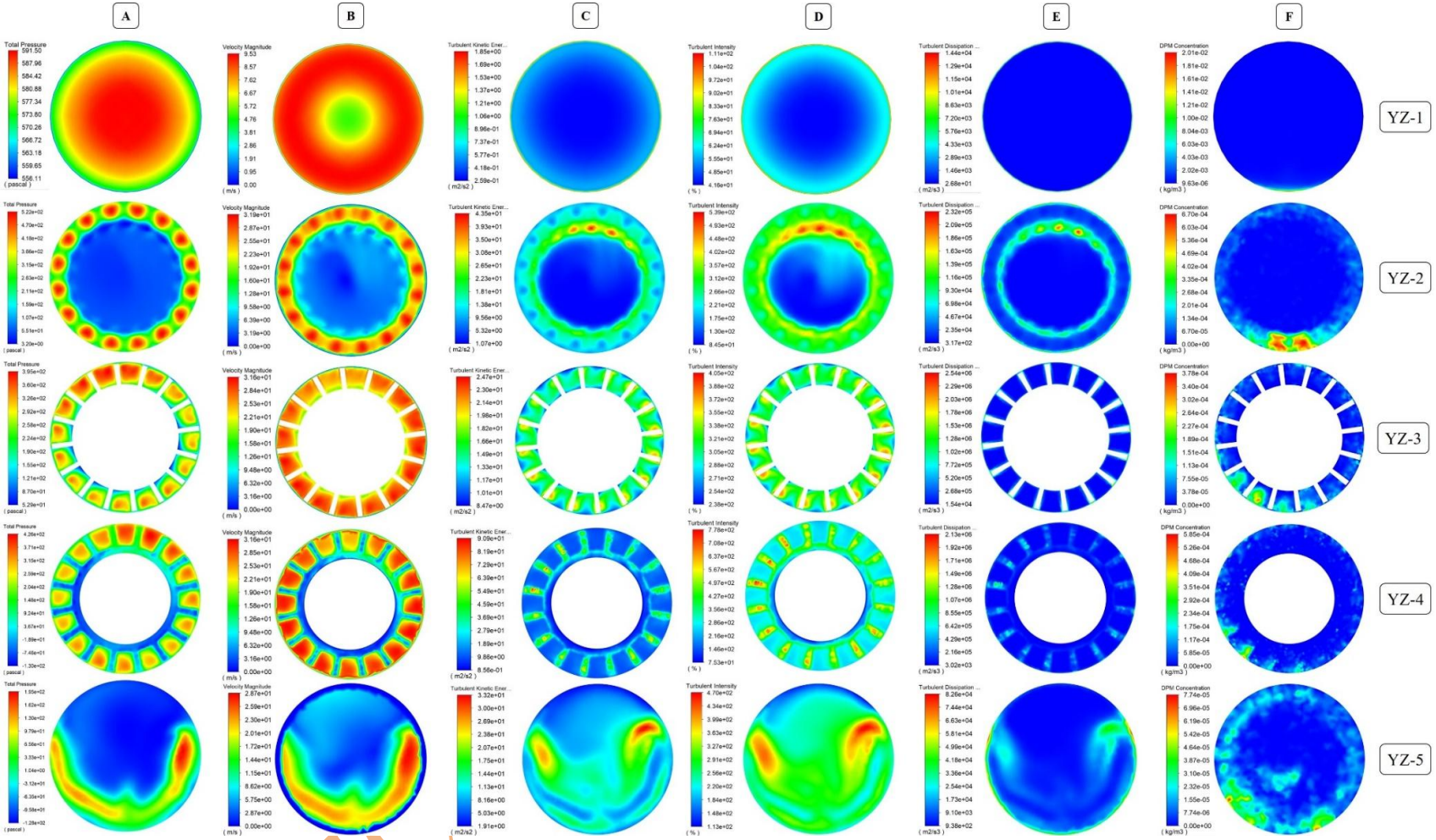
شکل ۲- نواحی مورد تحلیل در دامنه شبیه‌سازی کنتور

با توجه به شکل ۴، نتایج نشان می‌دهد که فشار در امتداد کنتور به‌صورت یکنواخت کاهش یافته و رفتار آن بیانگر انتقال انرژی جنبشی جریان به روتور است، در حالی که عدم تقارن موضعی فشار و سرعت در ناحیه پره‌ها ناشی از حضور ذرات سنگین و ناپایداری جریان در بار جرمی بالا است. بیشترین مقادیر k، I و ε در مجاورت پره‌ها مشاهده شده و کاهش آن‌ها در خروجی نشان‌دهنده تضعیف آشفتگی و پایدارتر شدن جریان است؛ همچنین نتایج توزیع ذرات نشان می‌دهد که انحراف ذرات سنگین از مسیر اصلی، موجب کاهش نفوذ مؤثر به پره‌ها و افت سرعت زاویه‌ای روتور می‌شود.

۴-۳-بار جرمی بحرانی

برای تعیین بار جرمی بحرانی، از یک لوله ساده با قطر ۲ اینچ و طول ۱۰ برابر قطر لوله استفاده شد تا شرایط هیدرودینامیکی مشابه کنتور فراهم شده و در عین حال، اثرات هندسی پره‌ها حذف گردد؛ بدین ترتیب، تغییرات توزیع سرعت صرفاً به حضور ذرات نسبت داده می‌شود. انتخاب قطر ذره ۵۰۰ میکرون به‌عنوان یک حالت بحرانی و محافظه‌کارانه انجام شد، زیرا این ذرات به‌دلیل اینرسی بالاتر، بیشترین پتانسیل را برای برهم‌زدن پروفایل سرعت و آشکارسازی آستانه اختلال جریان دارند. در این تحلیل، سه معیار کمی برای ارزیابی تغییرات پروفیل سرعت نسبت به حالت مرجع (m=0) به کار گرفته شد.

UNCORRECTED PROOF



شکل ۳- کانتور، A) فشار کل، B) سرعت، C) انرژی جنبشی آشفتگی، D) شدت آشفتگی، E) اتلاف انرژی بواسطه آشفتگی، و F) توزیع ذرات جامد در دامنه شبیه‌سازی کنتور، YZ-1 ورودی کنتور، YZ-2 ورودی روتور، YZ-3 میانه روتور، YZ-4 خروجی روتور، و YZ-5 خروجی کنتور.

UNC

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

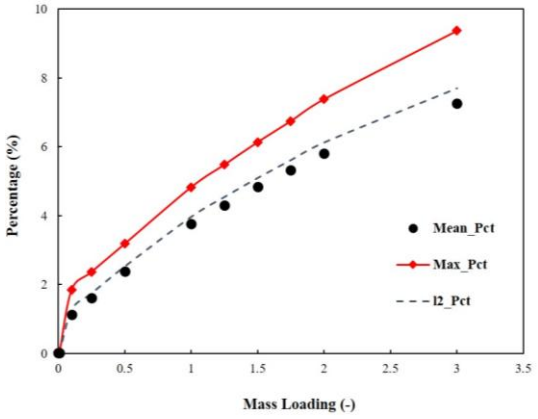
معیار اول، میانگین درصد تغییر (mean_pct)، بیانگر میانگین انحراف نسبی سرعت در نقاط مختلف مقطع لوله نسبت به حالت بدون ذرات بوده و تصویری کلی از شدت تغییرات ارائه می‌دهد (رابطه ۲۴). معیار دوم، حداکثر درصد تغییر مطلق (max_pct)، بیشترین انحراف موضعی را مشخص کرده و نواحی با بیشترین تغییر سرعت را آشکار می‌سازد (رابطه ۲۵). معیار سوم، ریشه میانگین مربع درصد تغییرات (l2_pct)، ترکیبی از بزرگی و توزیع تغییرات را به صورت انرژی خطا ارائه داده و نسبت به تغییرات پراکنده در سراسر پروفیل حساس است (رابطه ۲۶). بدین ترتیب، هر یک از این معیارها جنبه متفاوتی از اثر بار جرمی ذرات بر توزیع سرعت را اندازه‌گیری نموده و استفاده همزمان از آنها امکان تحلیل چندبعدی و جامع رفتار جریان را فراهم می‌آورد.

$$\text{mean_pct} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{u_i - u_{0,i}}{u_{0,i}}\right| \times 100 \qquad (۲۴)$$

$$\text{max_pct} = \max\left(\left|\frac{u_i - u_{0,i}}{u_{0,i}}\right| \times 100\right) \qquad (۲۵)$$

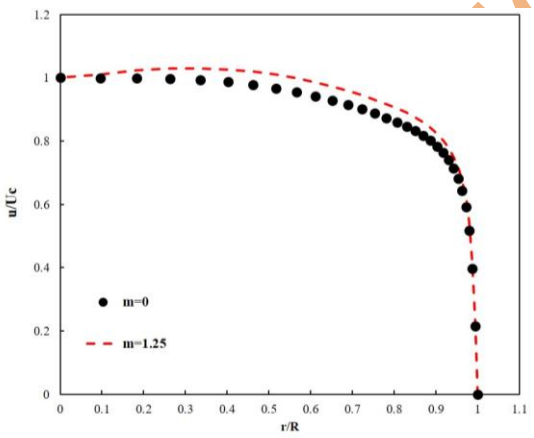
$$\text{l2_pct} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{u_i - u_{0,i}}{u_{0,i}}\right)^2} \times 100 \qquad (۲۶)$$

که u_i سرعت محوری در نقطه i با حضور ذرات، $u_{0,i}$ سرعت متناظر در حالت بدون ذرات و N تعداد نقاط نمونه برداری در مقطع لوله است. شکل ۴، نمودار تغییرات سه معیار مذکور را در تابع بار جرمی نشان می‌دهد.



شکل ۴- معیارهای میانگین، حداکثر و ریشه‌میانگین‌مربع درصد تغییرات سرعت تابع بار جرمی پودر سیاه.

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش m، هر سه معیار روندی افزایشی دارند اما میزان حساسیت و نرخ رشد آنها متفاوت است. معیار mean_pct تغییرات تدریجی و ملایمی را ثبت کرد و از m≈1 به بعد افزایش شتاب‌داری نشان داد که بیانگر اثر تجمعی ذرات بر کل میدان سرعت است. معیار max_pct در بارهای جرمی پایین تغییر اندکی داشت ولی از m≈1.25 جهشی محسوس را تجربه کرد که احتمالاً ناشی از شکل‌گیری نواحی موضعی با اختلال شدید در سرعت است. معیار l2_pct نیز رفتاری بینابینی داشت و در بازه m≈1.25–1.5 افزایش قابل‌توجهی نشان داد که بیانگر تغییر همزمان در شدت و گستره تغییرات سرعت است. با مقایسه سه معیار و در نظر گرفتن آستانه تغییر ۵٪ (آستانه ۵٪ به‌عنوان حداقل تغییر معنادار انتخاب شده است، زیرا مقادیر کمتر از آن در بازه نوسانات طبیعی جریان و عدم‌قطعیت‌های عددی قرار داشته و بیانگر اختلال پایدار و قابل‌تشخیص در توزیع سرعت نیستند)، نتیجه‌گیری شد که بار جرمی بحرانی برای بروز تغییر محسوس و پایدار در عملکرد کنتور حدود m≈1.25 (کسرحجمی ۵×۱۰^{-۴}) است؛ زیرا از این نقطه به بعد هر سه شاخص به‌طور هم‌زمان از آستانه عبور کرده و تغییرات قابل‌توجهی را نشان می‌دهند. توزیع سرعت در بار جرمی بحرانی و شرایط تک‌فاز در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت در بارجرمی بحرانی و شرایط تک فاز.

توزیع سرعت نشان‌داده‌شده در شکل ۵ بیانگر آن است که در بار جرمی بحرانی، پروفیل سرعت در نواحی نزدیک به دیواره هم‌راستایی قابل‌قبولی با حالت تک‌فاز دارد، در حالی که انحراف اصلی نسبت به شرایط تک‌فاز در نواحی میانی مقطع مشاهده می‌شود. این انحراف به‌صورت تغییر شکل

UNCORRECTED PROOF

ملایم پروفیل و کاهش یکنواختی میدان سرعت نسبت به حالت تک‌فاز ایده‌آل ظاهر می‌گردد.

عدم تغییر معنادار رفتار لایه مرزی را می‌توان به این موضوع نسبت داد که علی‌رغم افزایش بار جرمی و اینرسی ذرات درشت، غلظت مؤثر و انتقال مومنتوم ذره–دیواره در نزدیکی دیواره هنوز به سطحی نرسیده است که مکانیزم‌های غالب لایه مرزی را تحت تأثیر قرار دهد؛ ازاین‌رو، تنش‌های ویسکوز همچنان رفتار جریان را مشابه حالت تک‌فاز کنترل می‌کنند.

در مقابل، تغییر پروفیل سرعت در نواحی میانی مقطع ناشی از تجمع ترجیحی ذرات در این ناحیه و برهم‌کنش قوی‌تر ذره–سیال است، به‌گونه‌ای که افزایش اینرسی و بار جرمی ذرات منجر به بازتوزیع مومنتوم و تضعیف یکنواختی میدان سرعت در هسته جریان می‌شود، بدون آنکه این اثر مستقیماً به ناحیه نزدیک دیواره گسترش یابد.

۵-جمع‌بندی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط بهره‌برداری واقعی و در بازه بار جرمی متداول (10^{-7} تا 10^{-5})، تأثیر پودر سیاه بر دقت کنتور توربینی ناچیز بوده و تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور و پارامترهای هیدرودینامیکی محدود باقی می‌مانند. این یافته بیانگر آن است که در بازه‌های بار جرمی متداول در خطوط انتقال گاز، حضور آنی ذرات پودر سیاه مکانیزم غالب ایجاد خطای اندازه‌گیری نیست. با این حال، نتایج حاضر امکان استنباط اثرات وابسته به زمان پودر سیاه را فراهم می‌آورد؛ به گونه ای که در شرایط بارهای بالاتر، تغییر در الگوی جریان، کاهش نفوذ مؤثر ذرات به ناحیه پره‌ها و بروز عدم تقارن‌های هیدرودینامیکی مشاهده می‌شود. این رفتار می‌تواند در بازه‌های زمانی طولانی، زمینه‌ساز بروز پدیده‌هایی نظیر رسوب‌گذاری تدریجی و خوردگی اجزای داخلی کنتور باشد؛ پدیده‌هایی که در این مطالعه به‌طور مستقیم بررسی نشده‌اند. بر این اساس، پژوهش‌های آینده باید به بررسی کمی اثرات بلندمدت پودر سیاه بر تغییرات هندسی، فرسایشی و عملکردی پره‌ها و روتور کنتور اختصاص یابد علاوه بر این، شناسایی بار جرمی بحرانی ($m\approx1.25$) به‌عنوان نقطه آغاز بروز اختلال محسوس در الگوی جریان، می‌تواند مبنایی عملی برای تعریف آستانه‌های پایش و برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه در ایستگاه‌های انتقال و توزیع گاز فراهم آورد.

تشکر و قدردانی

از شرکت گاز استان خراسان جنوبی بابت حمایت پژوهش و از آزمایشگاه توس‌وِمتک برای ارائه امکانات و داده‌های کالیبراسیون صمیمانه تشکر می‌نماییم.

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

مراجع

[1] SHERIK, Abdelmounom. "Study examines sources, makeup in dry gas systems." Oil & gas journal 106, no. 30 (2008).

[2] Tsochatzidis, Nikolaos A. "Study addresses black powder's effects on metering equipment." Oil & gas journal 106, no. 12 (2008).

[3] Pack, D. J., A. B. Chesnoy, and J. Bosio. "Gas flow measurement & the impact of contaminants in the gas stream." In 16th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO. 2013.

[4] Zhang, Yiming, and John Wang. "Review of metering and gas measurements in high-volume shale gas wells." Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 12, no. 6 (2022): 1561-1594.

[5] Khan, Tariq S., and Mohamed S. Al-Shehhi. "Review of black powder in gas pipelines–An industrial perspective." Journal of Natural Gas Science and Engineering 25 (2015): 66-76.

[6] Najafzadeh, Mohammad Hosein, Mohammad Reza Sardashti Birjandi, Farhad Shahraki, and Somayeh Mansouri. "Energy recovery from the rotary kiln of white cement Neyriz." Journal of Modeling in Engineering 21, no. 73 (2000): 201-228, In Persian.

[7] Ghiyami, Taha, Farhad Shahraki, Jafar Sadeghi, and Mehdi Bayat. "Dynamic optimization of acetylene hydrogenation reactors with considering catalyst deactivation." Journal of Modeling in Engineering 20, no. 69 (2022): 71-80, In Persian.

[8] f Karimiyan, Fatemeh, Mohammad Reza Sardashti Birjandi, and Farhad Shahraki. "Coupled simulation of convection section and the fluid flow in the furnace tubes H-151 of Distillation Unit of Esfahan Refinery by CFD." Journal of Modeling in Engineering 20, no. 68 (2022): 189-205, In Persian.

[9] Neyshaburi, Mona Mohammadi, Abdolamir Bak Khoshnevis, and Mahdi Deymi-Dashtebayaz. "Optimizing turbine meter performance through geometrical parameter analysis: A simulation-based approach using TOPSIS." Flow Measurement and Instrumentation 99 (2024): 102678, In Persian.

[10] Kharoua, Nabil, Mohamed Alshehhi, Lyes Khezzar, and Abdelkader Filali. "CFD prediction of Black Powder particles' deposition in vertical and horizontal gas pipelines." Journal of Petroleum Science and Engineering 149 (2017): 822-833.

[11] Seyfi, Shadab, Behruz Mirzayi, and Hadi Seyyedbagheri. "CFD modeling of black powder particles deposition in 3D 90-degree bend of natural gas pipelines." Journal of Natural Gas Science and Engineering 78 (2020): 103330.

[12] Kharoua, Nabil, Mohamed AlShehhi, and Lyes Khezzar. "Prediction of Black Powder distribution in junctions using the Discrete Phase Model." Powder Technology 286 (2015): 202-211.

[13] Pereira, Gabriel Chucri, Francisco José de Souza, and Diego Alves de Moro Martins. "Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows." Powder Technology 261 (2014): 105-117.

[14] Karimi, Soroor, Siamack A. Shirazi, and Brenton S. McLaury. "Predicting fine particle erosion utilizing computational fluid dynamics." Wear 376 (2017): 1130-1137.

[15] Zheng, Sijia, Min Luo, Kefang Xu, Xun Li, Qin Bie, Ying Liu, Hong Yang, and Zhen Liu. "Case study: Erosion of an axial flow regulating valve in a solid-gas pipe flow." Wear 434 (2019): 202952.

[16] Zhang, Hang, Qianyue Zheng, Dongliang Yu, Na Lu, and Shimin Zhang. "Numerical simulation of black powder removal process in natural gas pipeline based on jetting pig." Journal of Natural Gas Science and Engineering 58 (2018): 15-25.

[17] Azadi, Mehdi, Ali Mohebbi, Saeid Soltaninejad, and Fabrizio Scala. "A case study on suspended particles in a natural gas urban transmission and distribution network." Fuel processing technology 93, no. 1 (2012): 65-72.

[18] Rahmati, Behzad, Seyed Hassan Hashemabadi, and Arash Khalaf Rezaei. "Prediction of turbine gas Meter error in high-pressure by CFD techniques: A novel approach to reduce high-pressure calibration (HPC) costs." Flow Measurement and Instrumentation 96 (2024): 102559.

[19] Bird, R. Byron. "Transport phenomena." Applied Mechanics Reviews 55, no. 1 (2002): R1-R4.

[20] Hariri, S., S. H. Hashemabadi, S. Noroozi, and A. Rostami. "Analysis of operational parameters, distorted flow and damaged blade effects on accuracy of industrial crude oil turbine flow meter by CFD techniques." Journal of Petroleum Science and Engineering 127 (2015): 318-328.

UNCORRECTED PROOF

[21] Haider, A., and O. Levenspiel. "Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles." Powder technology 58, no. 1 (1989): 63-70.
[22] IGS-M-CH-033(1), "Specification for Iranian Natural Gas Quality", 2014.
[23] Sutherland, William. "LII. The viscosity of gases and molecular force." The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 36, no. 223 (1893): 507-531.
[24] Lee, Anthony L., Mario H. Gonzalez, and Bertram E. Eakin. "The viscosity of natural gases." Journal of petroleum technology 18, no. 08 (1966): 997-1000.
[25] Starling, Kenneth E., and Jeffrey L. Savidge. "Compressibility factors of natural gas and other related hydrocarbon gases." American Gas Association, Operating Section, 1992.
[26] Yang, Shenglai. "Natural gas physical properties under high pressure." In Fundamentals of Petrophysics, pp. 27-74. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

UNCORRECTED PROOF