

مقایسه نتایج تجربی و عددی یک دبی سنج گازی استاندارد با دقت بالا برای کاربردهای صنعتی

سید محمدحسین رضوی دهکردی^{۱*}، محمد حججی نجفآبادی^۲، فاطمه بیگی^۳

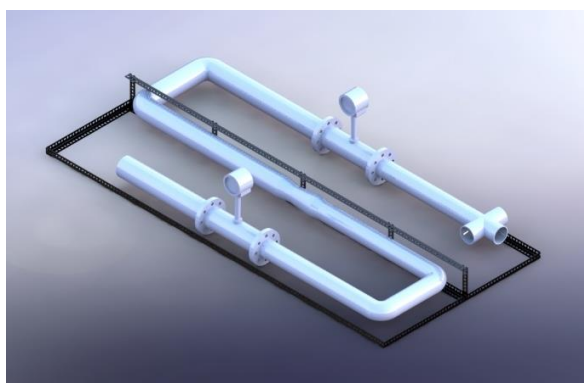
۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی نجفآباد، pmc.iaun.ac.ir@razavidehkordi

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی نجفآباد، pmc.iaun.ac.ir@Hojaji_m

۳- مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی نجفآباد، eng.fatemebeigi@gmail.com

کامل بررسی نشده است، که در این تحقیق به آن پرداخته می شود. در این پژوهش، یک دبی سنج گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شده است.

طراحی نازل به گونه ای انجام شده که ضمن حفظ دقت بالا، افت فشار سیستم به حداقل برسد و هزینه تولید کاهش یابد. همچنین، دستگاه مورد نظر با استفاده از آزمایش های عملی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی شده است. نتایج نشان دهنده دقت بالا و عملکرد پایدار دبی سنج در شرایط مختلف صنعتی است. این مقاله به معرفی جزئیات طراحی، آزمایش ها و تحلیل عملکرد دبی سنج پیشنهادی می پردازد و جایگاه آن را به عنوان یک راهکار مقرون به صرفه و کارآمد در اندازه گیری جریان گازهای تراکم پذیر بررسی می کند.



شکل ۱- طراحی کلی دبی سنج گازی همگرا-واگرا

۲- مرور کارهای مرتبط

دبی سنج های گازی نقشی کلیدی در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، پتروشیمی و هوافضا ایفا می کنند. استفاده از نازل های همگرا-واگرا به عنوان ابزاری برای اندازه گیری جریان گازهای تراکم پذیر، در سال های اخیر به دلیل دقت بالا و قابلیت اطمینان در شرایط متغیر صنعتی، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پارکر و جونز در سال ۲۰۲۲ بیشتر به دبی سنج های اولتراسونیک پرداخته اند و کمتر به دبی سنج های نازل همگرا-واگرا توجه کرده اند.^[5] در مطالعه براون در سال ۲۰۲۰، رفتار جریان در نازل های همگرا-واگرا با استفاده از شبیه سازی عددی تحلیل شده است.^[6] با این حال، این مطالعه بیشتر بر گازهای تکفازی متمرکز بوده و دقت تجربی آن محدود است. در تحقیق حاضر، این محدودیت ها برطرف شده و شرایط واقعی تری بررسی شده است. همچنین اسمیت و براون در سال ۲۰۲۳ بیشتر بر جریان های غیر تراکم پذیر تمرکز داشته اند، اما در این تحقیق رفتار جریان تراکم پذیر بررسی شده است.^[2]

چکیده

اندازه گیری دقیق جریان گاز در صنایع مختلف از جمله هوافضا، نفت و گاز، پتروشیمی و نیروگاه ها نقش مهمی در بهینه سازی فرآیندها و کاهش هزینه ها دارد. در این پژوهش، یک دبی سنج گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا طراحی و ساخته شده است که از اصل جریان چوک شده برای اندازه گیری جریان جرمی گاز بهره می گیرد. طراحی نازل به گونه ای انجام شده است که سرعت سیال در گلوگاه به ماخ ۱ برسد و جریان تنها به خواص ترمودینامیکی سیال و شرایط ورودی وابسته باشد. برای اطمینان از دقت و عملکرد دستگاه، فرآیندهای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایش های عملی انجام شد. نتایج نشان می دهد که دبی سنج پیشنهادی قادر است جریان گاز را با دقت بالا و خطای کمتر از $\pm 1\%$ اندازه گیری کند. علاوه بر این، طراحی مکانیکی نازل باعث کاهش افت فشار و افزایش طول عمر دستگاه شده است. این دبی سنج با توجه به هزینه تولید پایین و پایداری عملکرد در شرایط صنعتی، گزینه ای مناسب برای کاربردهای گازهای تراکم پذیر در صنایع مختلف به شمار می رود.

واژه های کلیدی: دبی سنج گازی- اندازه گیری جریان گاز- طراحی و ساخت دبی سنج همگرا-واگرا- کالیبراسیون دقیق- سیستم های اندازه گیری صنعتی

۱- مقدمه

اندازه گیری جریان گاز یکی از موضوعات حیاتی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، نفت و گاز، پتروشیمی، نیروگاه ها و صنایع فرآیندی است. این فرآیند نه تنها به بهینه سازی مصرف انرژی و افزایش بازدهی کمک می کند، بلکه ایمنی سیستم ها را نیز تضمین می کند. دبی سنج های گازی، ابزارهایی کلیدی برای این منظور هستند که بر اساس اصول و فناوری های متنوعی طراحی می شوند. با این حال، دقت پایین در شرایط تراکم پذیر، حساسیت به تغییرات فشار و دما، و هزینه بالای برخی تجهیزات، همچنان از چالش های اصلی در این حوزه به شمار می روند.^{[1][5][12]} یکی از روش های مؤثر در اندازه گیری جریان گازهای تراکم پذیر، استفاده از نازل های همگرا-واگرا است. این نوع دبی سنج ها بر پایه اصل جریان چوک شده عمل می کنند، به گونه ای که سرعت سیال در ناحیه گلوگاه به ماخ ۱ (سرعت صوت) می رسد. در این شرایط، جریان عبوری تنها به خواص ترمودینامیکی گاز و شرایط ورودی وابسته بوده و تأثیر فشار خروجی به حداقل می رسد. این ویژگی، دقت و پایداری بالایی را برای اندازه گیری جریان گاز در شرایط صنعتی فراهم می آورد.^[2] دبی سنج های نازل همگرا-واگرا در دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته اند. اسمیت و براون در سال ۲۰۲۳ دریافتند که دبی سنج های دارای نازل همگرا-واگرا در دبی های بالا دقت بیشتری دارند.^[2] با این حال، تأثیر دما و فشار بر عملکرد آن ها هنوز به طور

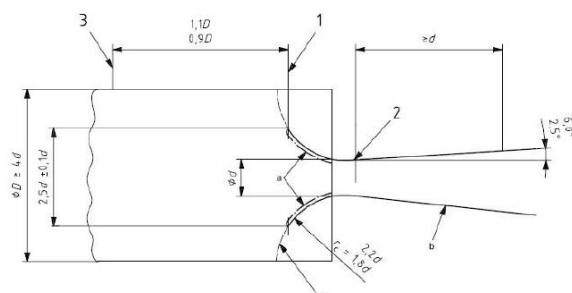
۴-۲- محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در طراحی دبی‌سنج‌های نازل

با وجود مزایای قابل توجه، دبی‌سنج‌های نازل همگرا-واگرا دارای چالش‌هایی نیز هستند. به عنوان مثال، ژانگ در سال ۲۰۱۹ به حساسیت این دبی‌سنج‌ها نسبت به شرایط محیطی مانند تغییرات دما و آلودگی گاز اشاره کرده‌اند.^[17] آن‌ها رویکردهایی برای کاهش این اثرات، از جمله استفاده از مواد مقاوم‌تر و پوشش‌های ضد خوردگی، پیشنهاد داده‌اند. با مرور مطالعات پیشین، شکاف‌هایی در تحقیقات مربوط به دبی‌سنج‌های نازل همگرا-واگرا شناسایی می‌شود:

کمبود مطالعات کاربردی برای گازهای ترکیبی یا شرایط متغیر صنعتی.

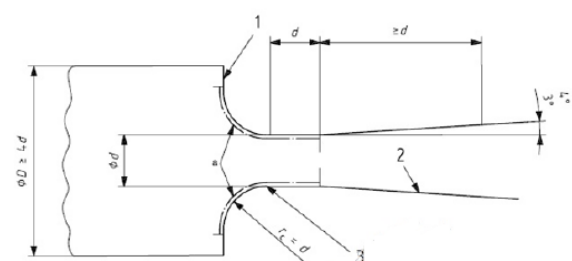
عدم وجود استانداردهای یکپارچه برای طراحی نازل و کالیبراسیون دبی‌سنج‌ها.

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که دبی‌سنج‌های گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا گزینه‌ای دقیق و پایدار برای اندازه‌گیری جریان گاز در شرایط تراکم‌پذیر هستند.^[7] با این حال، فرصت‌های زیادی برای بهبود طراحی و گسترش کاربردهای این فناوری وجود دارد. در این پژوهش، تلاش شده است تا با استفاده از طراحی بهینه نازل و ارزیابی عملکرد دستگاه تحت شرایط صنعتی، بخشی از این شکاف‌ها پر شود.



شکل ۲- نازل و نتوری با گلوگاه چنبره‌ای

همچنین می‌توانند به صورت نازل و نتوری با گلوگاه استوانه‌ای مطابق شکل ۳ طراحی شوند.



شکل ۳- نازل و نتوری با گلوگاه استوانه‌ای

این پژوهش به طراحی، ساخت و آزمایش یک دی‌سنج گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا اختصاص دارد. در این بخش، فرآیندهای گام‌به‌گام برای توسعه و ارزیابی دستگاه شرح داده می‌شوند، تا ضمن ارائه یک دیدگاه جامع، امکان بازتولید نتایج توسط دیگر پژوهشگران فراهم شود.

نازل همگرا-واگرا بر اساس اصل جریان چوکشده طراحی شده است، به گونه‌ای که سرعت سیال در گلوگاه به ماخ ۱ برسد. در این حالت، دبی جرمی گاز تنها به فشار و دمای ورودی و مشخصات نازل وابسته است.

(الف) بخش، همگرا:

این بخش وظیفه شتابدهی به گاز را دارد تا به گلوگاه برسد. طراحی آن بر اساس معادله ۱ که به معادله بیوستگی معروف است صورت گرفت:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1)$$

که A و V به ترتیب مساحت مقطع و سرعت سیال هستند. [9][13]

(ب) گلہ گاہ:

گلوگاه نازل کوچک‌ترین مقطع را دارد و سرعت سیال در این ناحیه به سرعت صوت می‌رسد. طراحی این بخش بر اساس رابطه چوک‌شدن جریان مطابق، ۲ انجام شد:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{1-\gamma}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (2)$$

که P_0 فشار کل، P^* فشار در گلوگاه و V نسبت گرمای ویژه گازها است.

(ج) بخش واگرا:

این بخش به بازیابی فشار و کنترل افت فشار کمک می‌کند. زاویه واگرایی به گونه‌ای طراحی شد که پدیده جدایش جریان به حداقل برسد (معمولاً بین ۶ تا ۱۲ درجه). [14]. [8]

۲-۲- کاربردهای صنعتی و دقت دبی‌سنج‌های مبتنی بر نازل
دبی‌سنج‌های نازل همگرا-واگرا به دلیل مقاومت مکانیکی بالا و سادگی طراحی، در صنایعی با شرایط سخت نظیر خطوط انتقال گاز طبیعی و نیروگاه‌های بخار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کیم در سال ۲۰۱۸ در مطالعه‌ای جامع، عملکرد این دبی‌سنج‌ها را در مقایسه با دبی‌سنج‌های توربینی و اولتراسونیک بررسی کرده و نشان داده‌اند که در شرایط تراکم‌پذیر و فشار بالا، دبی‌سنج‌های نازل عملکرد پایدارتر و دقیق‌تری دارند. [16]

۳-۲- شبیه‌سازی جریان در نازل‌های همگرا-واگرا

یکی از حوزه‌های مهم در تحقیقات مرتبط، شبیه‌سازی رفتار جریان گاز در نازل است. وانگ در سال ۲۰۲۰ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر طراحی نازل، مانند زاویه همگرایی و واگرایی، بر افت فشار و دقت اندازه‌گیری را مورد بررسی قرار داده‌اند.^[10] نتایج آن‌ها نشان داده است که بهینه‌سازی زاویه‌های نازل می‌تواند افت فشار را تا ۲۰٪ کاهش داده و پایداری جریان چوک‌شده را افزایش دهد.

سنسور دما برای جبران تغییرات دمای گاز.

(ج) سیستم اتصال: برای نصب دبی سنج در خط لوله استاندارد.

۳-۳-۲- فرآیند ساخت

ماشین کاری نازل با دستگاه CNC انجام شد.

مونتاژ دستگاه با استفاده از اتصالات فلنجی استاندارد انجام شد.

آزمایش نشت برای اطمینان از مقاومت نازل در برابر فشار بالا صورت گرفت.

۳-۴- آزمایش عملکرد دبی سنج

۳-۴-۱- شرایط آزمایش

شرایط آزمایش را به طور خلاصه در جدول ۲ مشاهده می کنید.

جدول ۲- شرایط آزمایش		
پارامتر	مقدار	واحد
دمای محیط	۲۵	درجه سانتی گراد
فشار گاز ورودی	۱-۱۰	بار
نوع گاز	هوا	-
تجهیزات اندازه گیری	سنسور دما و فشار	-

۳-۴-۲- ابزارهای اندازه گیری

الف) دبی سنج مرجع برای مقایسه نتایج.

ب) داده برداری از سنسورهای فشار و دما با سیستم کارت داده برداری A/F

۳-۴-۳- کالیبراسیون دبی سنج

دبی سنج با استاندارد ISO 5167 مقایسه و کالیبره شد. خطای اندازه گیری به صورت نسبی طبق فرمول ۴ محاسبه شد:

$$(4) \quad \text{خطای نسبی} = \frac{Q_{\text{مرجع}} - Q_{\text{اندازه گیری شده}}}{Q_{\text{مرجع}}}$$

۳-۵- تحلیل داده ها

نتایج شبیه سازی و آزمایش تجربی مقایسه گردید. این تحلیل شامل بررسی دقت دبی سنج، پایداری عملکرد در شرایط مختلف و میزان افت فشار کل دستگاه در مقایسه با دو دبی سنج دیگر موجود در مرکز انرژی و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد است.

در جدول ۳ گزیده ای از این تحلیل را مشاهده می کنید.

جدول ۳- مقایسه با دیگر دبی سنج ها			
ویژگی	دبی سنج طراحی شده	دبی سنج اولتراسونیک	دبی سنج جرمی حرارتی
دقت	$\pm 1.5\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
اندازه گیری			
حساسیت به شرایط محیطی	کم	متوسط	بالا
هزینه ساخت	کم	زیاد	متوسط
حداکثر دبی جرمی	$100 \text{ m}^3/\text{h}$	$200 \text{ m}^3/\text{h}$	$80 \text{ m}^3/\text{h}$

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی، آزمایش های تجربی و تحلیل عملکرد دبی سنج گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا ارائه و بررسی می شوند.

به دلیل مواجهه نازل با فشار و دمای بالا، از آلیاژهای مقاوم به خوردگی (مانند فولاد ضدزنگ و پلاستیک های مقاوم) استفاده شد. این مواد مقاومت مکانیکی و طول عمر دستگاه را تضمین می کنند.

۳-۱-۳- طراحی مکانیکی

طراحی مکانیکی نازل با نرم افزارهای اتوکد مانند سالیدورکس انجام شد و دقت در ماشین کاری گلوگاه برای حصول ابعاد دقیق (با تolerانس $\pm 0.1 \text{ mm}$ میلی متر) بسیار حائز اهمیت بود.

مشخصات دبی سنج طراحی شده در جدول ۱ شرح داده شده است.

جدول ۱- مشخصات دبی سنج طراحی شده		
مشخصه	مقدار	واحد
نوع نازل	همگرا-واگرا	-
قطر گلوگاه	۱۸	میلی متر
حداکثر دبی جرمی	۱۰۰	مترمکعب در ساعت
محدوده فشار کاری	۱-۱۰	بار
دقت اندازه گیری	$\pm 1.5\%$	-
جنس بدنه	ABS	-

۳-۲- شبیه سازی جریان سیال

شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی به منظور ارزیابی رفتار جریان و بهینه سازی طراحی نازل انجام شد. [4]

۳-۲-۱- تنظیمات شبیه سازی

الف) مدل جریان:

جریان تراکم پذیر در حالت پایا با معادلات ناویر-استوکس تحلیل شد. معادله حالت ایده آل مطابق فرمول ۳ برای گازها استفاده گردید: [15][11]

$$(3) \quad P = \rho RT$$

ب) مدل توربولانس:

مدل E-k برای پیش بینی رفتار آشسته جریان به کار رفت.

ج) شرایط مرزی:

ورودی: فشار کل بین ۱ تا ۱۰ بار و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد.

خروجی: فشار محیط (۱ بار).

دیواره ها: شرط بدون لغزش [4]

بر اساس استاندارد ISO 5167-1، روابط مربوط به افت فشار در نازل های همگرا-واگرا محاسبه شده اند. همچنین، مدل توربولانسی E-k بر اساس توصیه ها برای شبیه سازی جریان های تراکم پذیر انتخاب شد. [3]

۳-۲-۲- اهداف شبیه سازی

الف) محاسبه توزیع سرعت، فشار در طول نازل.

ب) بررسی افت فشار کل در نازل.

ج) تحلیل رفتار جریان در گلوگاه و جلوگیری از جدایش جریان در بخش واگرا.

۳-۳- ساخت دبی سنج

۳-۳-۱- اجزای دبی سنج

دبی سنج شامل بخش های زیر است:

الف) نازل همگرا-واگرا: طراحی و ماشین کاری شده با دقت بالا.

ب) سنسورها:

سنسور فشار مطلق برای ورودی و خروجی.

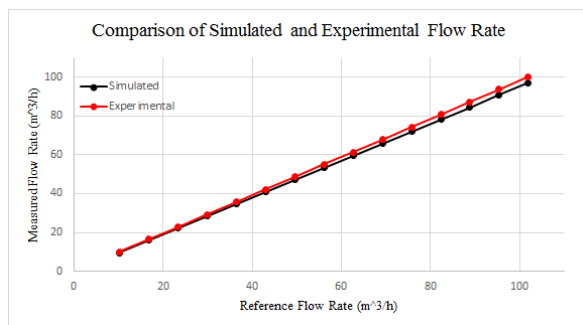
۴-۲-۲- تأثیر طراحی نازل بر بازده

شبیه‌سازی‌ها نشان داد که طراحی همگرا-واگرا با گلوگاه بهینه، بازده حرارتی و مکانیکی جریان را بهبود می‌بخشد و موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود.

۴-۳- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

۴-۳-۱- دبی جرمی

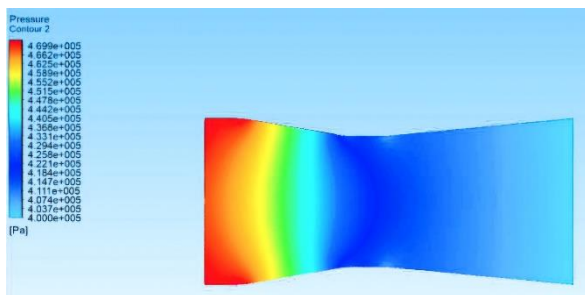
نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی تطابق خوبی نشان دادند. میانگین اختلاف بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی کمتر از ۳٫۵ درصد بود. شکل ۶، نمودار مقایسه‌ای نتایج شبیه‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد.



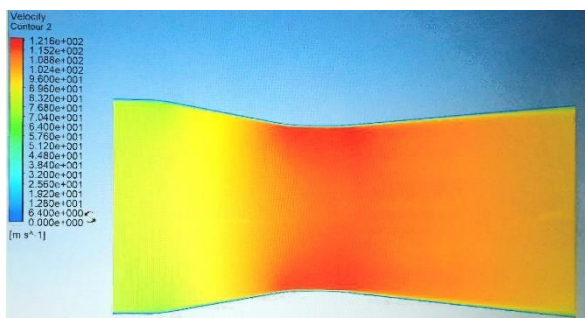
شکل ۶- نمودار مقایسه دبی جرمی شبیه‌سازی و تجربی

۴-۳-۲- توزیع فشار و سرعت

توزیع فشار و سرعت اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی، تطابق مناسبی داشت. اختلاف متوسط حدود ۵٪ بود که ناشی از تئوری‌های ساخت و شرایط محیطی است. در شکل ۷ توزیع فشار شبیه‌سازی شده ارائه شده است. همچنین در شکل ۸ می‌توان توزیع سرعت شبیه‌سازی شده را مشاهده نمود.



شکل ۷- توزیع فشار شبیه‌سازی شده



شکل ۸- توزیع سرعت شبیه‌سازی شده

۴-۴- تحلیل نتایج

داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و مدل‌سازی به‌صورت جدول، نمودارها و تحلیل‌های کمی ارائه شده و با استانداردهای معتبر مقایسه می‌شوند.

۴-۱- نتایج آزمایش‌های تجربی

۴-۱-۱- عملکرد دبی‌سنج در اندازه‌گیری دبی گاز

آزمایش‌های تجربی نشان دادند که دبی‌سنج طراحی شده قادر است جریان جرمی گاز را با دقت بالایی در محدوده دبی ۱۰ تا ۱۰۰ مترمکعب در ساعت اندازه‌گیری کند.

میانگین خطای نسبی دستگاه در کل دامنه جریان برابر با $\pm 1.5\%$ محاسبه شد. این دقت مطابق با استاندارد ISO 5167 است و نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول دبی‌سنج است.

۴-۱-۲- افت فشار در نازل

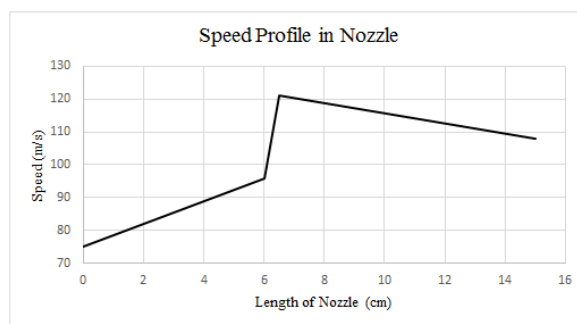
تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که افت فشار در نازل‌های همگرا-واگرا تأثیر زیادی بر راندمان سیستم دارد.^[6] این موضوع یکی از چالش‌های اصلی تحقیق حاضر است.

۴-۲- تحلیل نتایج آزمایش

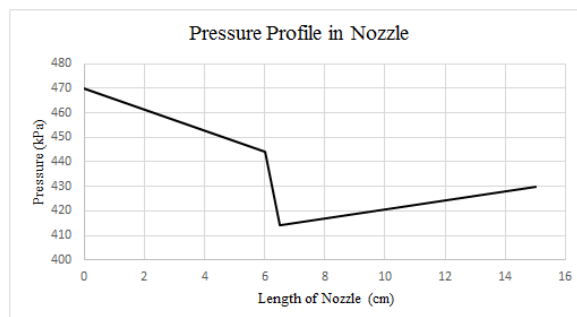
۴-۲-۱- توزیع سرعت و فشار

نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دبی‌سنج در اشکال ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. سرعت گاز در گلوگاه نازل به ماک ۱ می‌رسد و سپس در بخش واگرا کاهش می‌یابد. این تغییرات در شکل ۴ نشان داده شده است.

توزیع فشار در طول نازل، افت فشار ناگهانی در گلوگاه را تأیید می‌کند و شکل ۵ رفتار تراکم‌پذیر گاز را نشان می‌دهد. بیشترین افت فشار در گلوگاه نازل مشاهده شد که نشان‌دهنده چوک شدن جریان و رسیدن به سرعت صوت است.



شکل ۴- تغییرات سرعت در طول نازل



شکل ۵- تغییرات فشار در طول نازل.

۴-۲-۲- تحلیل توربولانس و جدایش جریان

در زاویه‌های واگرایی بزرگ‌تر از ۱۲ درجه، جدایش جریان مشاهده شد که منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. اما طراحی فعلی با زاویه ۸ درجه از این پدیده جلوگیری کرده است.

شرایط خاص ممکن است نیاز به بهینه‌سازی بیشتر در طراحی سیستم حسگرها وجود داشته باشد.

۴-۵- مقایسه هزینه

در جدول ۵ هزینه‌های ساخت دی‌سنج طراحی شده با دیگر دی‌سنجها موجود در مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد به صورت تقریبی مقایسه شده‌است.

جدول ۵- مقایسه هزینه‌های ساخت دی‌سنجها			
ویژگی	دی‌سنج طراحی شده	دی‌سنج اولتراسونیک	دی‌سنج جرمی حرارتی
هزینه مواد اولیه	۳۰۰ دلار	۸۰۰ دلار	۵۰۰ دلار
هزینه ساخت	۲۰۰ دلار	۷۰۰ دلار	۴۰۰ دلار
هزینه نگهداری سالانه	۵۰ دلار	۲۰۰ دلار	۱۵۰ دلار
کل هزینه	۵۵۰ دلار	۱۷۰۰ دلار	۱۰۵۰ دلار

همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، دی‌سنج طراحی شده از لحاظ اقتصادی از نمونه‌های مشابه موجود در بازار مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

۶- منابع

- [1] ISO 5167-1: Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices. 2023.
- [2] J. Smith and K. Brown, "Flow meter Design Using Converging-Diverging Nozzles," Journal of Fluid Dynamics, vol. 45, no. 2, pp. 123–134, 2023.
- [3] F. M. White, *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2018.
- [4] Fluent Inc., *ANSYS Fluent User Manual: CFD Simulation of Gas Flow*. 2023.
- [5] L. Parker and R. Jones, "Gas Flow Measurement in Industrial Applications," Industrial Flow Review, vol. 12, no. 3, pp. 45–62, 2022.
- [6] A. R. Brown, "Numerical and Experimental Analysis of Supersonic Nozzles," ASME Transactions, vol. 140, no. 5, pp. 678–691, 2020.
- [7] Shapiro, A. H. (1953). The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Volume 1. Wiley.
- [8] Anderson, J. D. (2010). Fundamentals of Aerodynamics (5th ed.). McGraw-Hill.
- [9] White, F. M. (2009). Fluid Mechanics (7th ed.). McGraw-Hill.
- [10] H. Wang, S. He, and S. Shen, "The motion of respiratory droplets produced by coughing," arXiv preprint arXiv:2010.12781, 2020
- [11] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach (8th ed.). McGraw-Hill.
- [12] Lal, P., & Bansal, R. K. (2010). Fluid Mechanics and Hydraulic Machines (6th ed.). Metropolitan Book Co.
- [13] Liepmann, H. W., & Roshko, A. (2001). Elements of Gasdynamics. Dover Publications.
- [14] Tritton, D. (1988). Physical Fluid Dynamics (2nd ed.). Oxford University Press.

۴-۴-۱- مزایای طراحی فعلی

الف) دقت بالا در اندازه‌گیری جریان گاز.

ب) کاهش افت فشار به دلیل طراحی بهینه نازل.

ج) پایداری در شرایط عملیاتی مختلف (فشار، دما، و نوع گاز).

۴-۴-۲- محدودیت‌ها و چالش‌ها

الف) حساسیت به تغییرات دمایی: نیاز به تصحیح دمایی برای دقت بالاتر.

ب) افت فشار در گلوگاه: اگرچه این افت فشار به عملکرد دستگاه کمک می‌کند، ممکن است در برخی کاربردها محدودیت ایجاد کند.

۴-۴-۳- پیشنهاد برای بهبود

الف) بررسی تأثیر گازهای دیگر با ویژگی‌های مختلف (مانند هیدروژن یا گازهای ترکیبی).

ب) بهینه‌سازی بیشتر طراحی بخش واگرا برای کاهش افت فشار.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، طراحی و ساخت یک دی‌سنج سنج‌گازی مبتنی بر نازل همگرا-واگرا به‌منظور اندازه‌گیری دی‌جرمی گازها در شرایط مختلف فشار و دما مورد بررسی قرار گرفت. این دی‌سنج به‌طور ویژه برای محیط‌های صنعتی که نیاز به دقت بالا و پایداری طولانی‌مدت دارند، طراحی شده است. در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به‌طور خلاصه آورده شده است:

۵-۱- دقت بالا در اندازه‌گیری دی‌گاز

نتایج آزمایش‌های تجربی نشان دادند که دی‌سنج طراحی شده قادر است دی‌جرمی گاز را با دقتی در حدود $\pm 1.5\%$ در دامنه جریان ۱۰ تا ۱۰۰ مترمکعب در ساعت اندازه‌گیری کند. این دقت در مقایسه با استانداردهای جهانی مانند ISO 5167 کاملاً قابل قبول است.

۵-۲- عملکرد بهینه نازل همگرا-واگرا

طراحی نازل همگرا-واگرا با گلوگاه بهینه، عملکرد بهتری را در زمینه کاهش افت فشار و کنترل جریان گاز نشان داد. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها نشان دادند که این طراحی، افت فشار را در حد معقولی حفظ کرده و از پدیده جدایش جریان در بخش واگرا جلوگیری می‌کند.

۵-۳- پایداری در شرایط عملیاتی مختلف

دی‌سنج طراحی شده در شرایط مختلف فشار و دما (۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ تا ۱۰ بار) عملکرد پایدار و دقیقی از خود نشان داد. این ویژگی، دی‌سنج را به یک ابزار مفید برای استفاده در محیط‌های صنعتی با شرایط متغیر تبدیل می‌کند. با این حال جدول شماره ۴ تفاوت شرایط آزمایشگاهی و عملیاتی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقایسه شرایط آزمایشگاهی و صنعتی			
پارامتر	شرایط صنعتی	شرایط آزمایشگاهی	تفاوت
فشار ورودی (kPa)	۷۰۰-۲۰۰	۵۰۰	± 200
نوع گاز	هیدروژن، نیتروژن، هوا	هوا	-
دما (°C)	۴۵-۱۵	۲۵	± 20
رطوبت نسبی (%)	۵۰-۱۰	۰	متغیر

۵-۴- چالش‌ها و محدودیت‌ها

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تأثیر تغییرات دما بر دقت اندازه‌گیری بود. اگرچه این تأثیر با استفاده از تصحیحات دمایی قابل جبران است، اما در برخی

- [15] Zucrow, M. J., & Hoffman, J. D. (1976). Gas Dynamics. Volume 1: One-Dimensional Flow. John Wiley & Sons.
- [16] S. H. Lee, M. Lahooti, and D. Kim, "Aerodynamic characteristics of unsteady gap flow in a bristled wing," Physics of Fluids, vol. 30, no. 7, p. 071901, 2018.
- [17] T. Liu, Y. Zhang, K. Li, Y. Wang, and J. Li, "Aerodynamic Optimization of a Centrifugal Fan Using Response Surface Methodology," Open Journal of Fluid Dynamics, vol. 9, no. 1, pp. 92-105, 2019.