



مطالعه جریان گاز UF6 با استفاده از اریفیس و شیرسوزنی تحت شرایط خلاء متوسط و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن

ضحی وطنی*^۱، سیدجابر صفدری^۲، حسین ابوالقاسمی^۱، رضا عروج^۱

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۵۳۶-۱۳۶۵، تهران - ایران

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

چکیده: در تأسیسات هسته‌ای معمولاً عملیات غنی‌سازی تحت شرایط خلاء بالا و متوسط انجام می‌شود. اندازه‌گیری دبی گاز UF6 به صورت خوراک یا محصولات غنی شده و تهی شده یکی از پارامترهای مهم و اساسی در هنگام راه‌اندازی و تولید می‌باشد. در این تأسیسات از اریفیس برای اندازه‌گیری دبی جرمی گاز UF6 در محدوده ۸۰-۱۰ gr/hr استفاده می‌شود. به سبب پایین بودن محدوده فشار و دبی، اندازه‌گیری دبی از حساسیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مطالعه چگونگی اندازه‌گیری دبی جریان در لوله‌ها و عوامل مؤثر بر آن به وسیله اریفیس و شیرسوزنی مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد دبی‌های مختلف جریان گاز از اریفیس‌هایی با قطرهای مختلف و تغییر فشار ورودی استفاده می‌شود. در بررسی‌های انجام شده مشاهده شده است که برای یک اریفیس با قطر روزنه مشخص، افزایش فشار ورودی باعث افزایش دبی جریان شده و برای یک دبی ثابت افزایش فشار ورودی منجر به کاهش قطر روزنه اریفیس می‌شود. افزایش اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست اریفیس، باعث افزایش دبی جریان تا یک حد معین می‌شود. از آنجایی که در کلیه تست‌های شیرسوزنی، نسبت فشار خروجی به فشار ورودی کمتر از مقدار ۰/۵۹۲۶ بوده، لذا خطی شدن منحنی تغییرات دبی جرمی برحسب فشار ورودی در یک سطح مقطع ثابت می‌تواند بعنوان تأییدی بر تبعیت داده‌های آزمایشگاهی موجود از رابطه جریان شوک به شمار آید. همچنین بررسی تغییرات دبی جرمی در حالت‌های مختلف شیر نشان می‌دهد که با باز شدن شیر، تغییرات دبی با افزایش فشار ورودی و افزایش اختلاف فشار، شدت بیشتری پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: جریان گاز، اریفیس، شیرسوزنی، شرایط خلاء متوسط، آهنگ جریان، افت فشار، جریان سنج‌ها

Study on UF6 Gas Flow by Using Orifice and Needle Valve Under Medium Vacuum Condition and Investigation of Effective Parameters on It

Z. Vatani*¹, J. Safdari², H. Abolghasemi¹, R. Orouj¹

1- Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University Tehran, P.O. Box: 11365- 4536, Tehran - Iran

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

Abstract: In nuclear facility, the enrichment operation usually is carried out under the medium and high vacuum conditions. Measurement of UF6 gas flow rate in the form of feed or product and tail is one of the principal parameters in operation and production. In this facility, several orifices were used to measure UF6 gas flow rate in the range of 10-80 gr/hr. Due to low pressure and mass flow range, measurement of flow rate should be made accurately. In this research, the method of flow rate measurement in tubes by using orifice and needle valve, and also effective parameters on it, has been studied. For the study of the gas flow rates, several orifices with different diameters were used. We observed that for a defined orifice diameter, an increase in the input pressure causes an increase in the flow rate and at a constant flow rate an increase in the input pressure causes a decrease in the orifice diameter. As the pressure difference between the upside and downside of the orifice increases, the flow rate will rise up to a certain limit. Since in all experiments of the needle valve, the ratio of outlet to the inlet pressure is less than 0.5926, the linearity of the mass flow change versus the inlet pressure at a constant cross sectional area shown to be consistent with the choked current equation. Also, the investigation of mass flow rates, when the valve is open, indicates that variations of the mass flow rate will increase against the inlet pressure and the pressure difference, intensively.

Keywords: Gas Flow, Orifice, Needle Valve, Medium Vacuum Condition, Flow Rate, Pressure Drop, Flowmeters

*email: zohal444@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۹/۶/۸۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸/۱۰/۸۶



۱- مقدمه

سرعت و فشار می‌باشد. از پرکاربردترین دبی‌سنج‌های اختلاف فشاری در صنعت، اریفیس متر است. اساس کار این وسایل بر تغییر سرعت و یا تغییر جهت سیال عبوری از مجرا و نهایتاً ایجاد یک اختلاف فشار قابل ملاحظه در جریان سیال استوار است. مزیت اصلی استفاده از اریفیس، پایداری ذاتی آن در یک پریود طولانی از زمان است که مشخصات آن منحصرأ به شکل هندسی آن وابسته است. اریفیس متر به علت نداشتن قطعات متحرک، قیمت پایین و راحتی ساخت (به ویژه آن که قطر آن با اندازه لوله افزایش نمی‌یابد) بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این وسیله برای اندازه‌گیری دبی سیال‌های تمیز، از دقت بالایی برخوردار است و معمولاً در لوله‌های مستقیم نصب می‌شود و دقت آن به چگونگی طراحی و نصب در لوله و خواص سیال بستگی دارد. بطور کلی اریفیس در مقایسه با دیگر دبی‌سنج‌های اختلاف فشاری، از شکل ساده‌تری برخوردار است [۳ و ۴]. یکی دیگر از تجهیزات که به منظور کنترل و تنظیم جریان با دبی بسیار پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد، شیرهای سوزنی^(۱) هستند. شیرهای مذکور شامل یک میله استوانه‌ای شیاردار با قطری بسیار کوچک (در حدود چند میلی‌متر) است، بطوریکه سطح مقطع شیار مذکور تابعی از ارتفاع میله استوانه‌ای بوده و با تغییر موقعیت مکانی میله، سطح مقطع حاصل و طبیعتاً میزان دبی عبوری از آن تغییر می‌کند. با توجه به اینکه سطح مقطع مذکور حتی در حالت کاملاً باز بسیار کوچک است؛ شیرهای سوزنی دارای افت فشار قابل توجهی می‌باشند [۳ و ۴].

۲- بررسی رژیم جریان گاز در اریفیس و شیرسوزنی

برای مطالعه جریان گاز در سیستم‌های تحت خلاء و اندازه‌گیری مقدار آن اطلاع از رژیم جریان و آشنایی با مفاهیمی نظیر Throughput (ظرفیت پذیرش) ضروری است. در این مطالعه سعی بر آن است تا تعریف مختصری از این مفاهیم ارائه گردد. رژیم جریان سیالات تراکم‌ناپذیر به وسیله عدد بی‌بعد رینولدز تعیین می‌شود [۵ و ۶]:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{4m(kg/s)}{\pi \mu D} \quad (3)$$

در سالهای اخیر مطالعه و تحقیق در زمینه اندازه‌گیری دقیق شدت جریان یکی از موضوع‌های مهم در بسیاری از صنایع از جمله صنایع هسته‌ای و پالایشگاه‌ها می‌باشد؛ اندازه‌گیری غیردقیق منجر به خسارت به تجهیزات شده و با اندازه‌گیری دقیق می‌توان مقدار توزیع سیال و سود و زیان تولید را حساب کرد. انتخاب دبی‌سنج مناسب مستلزم شناخت شرایط عملیاتی فرایندها و نیازمندیهای عملکرد تجهیزات است. شرایط عملیاتی فرایندها شامل مواردی همچون تخمین دبی حداکثر و حداقل فرایند، دما و فشار عملکرد و خواص فیزیکی اعم از ویسکوزیته، چگالی، فرسایش و خوردگی است. از معیارهای دیگر انتخاب دبی‌سنج‌ها در فرایند توجه به مزایا و معایب آنهاست؛ مزایا و معایب دبی‌سنج‌ها به عواملی همچون: دقت، قابل اعتماد بودن، هزینه خرید، سهولت استعمال، قابلیت اندازه‌گیری دبی، تکرارپذیری، محدودیت پذیری، افت فشار و وجود اندازه‌های مختلف بستگی دارد [۱ و ۲].

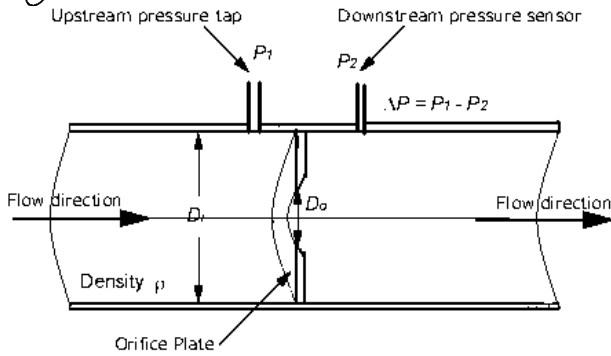
دبی‌سنج‌های اختلاف فشاری از رایج‌ترین نوع وسایل اندازه‌گیری جریان در صنعت هستند و بطور غیرمستقیم دبی جریان سیال را به کمک افت فشار ایجاد شده در سیال، به وسیله یک مانع بر سر راه جریان، سپس اندازه‌گیری این افت فشار بدست می‌آورند.

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

این معادله بیانگر آن است که کاهش قطر لوله، منجر به افزایش سرعت سیال می‌شود همچنین در تبدیل انرژی به کمک معادله برنولی برای یک لوله افقی مشاهده خواهد شد که فشار کل (H) باید در طول جریان ثابت بماند [۳].

$$\left[\frac{P_1}{\rho_1} \right] + \left[\frac{V_1^2}{2} \right] = \left[\frac{P_2}{\rho_2} \right] + \left[\frac{V_2^2}{2} \right] = H = \text{const} \quad (2)$$

بدلیل ثابت ماندن مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل واضح است که افزایش سرعت همراه با کاهش انرژی پتانسیل است. اساس دبی‌سنج‌های اختلاف فشاری مبتنی بر این رابطه بین



شکل ۱- نمایی از یک اریفیس هنگام عبور جریان سیال.

$$Q_L = AP_1 C' \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{KT}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

for $1 > \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (۱۰)

افزایش Throughput تا وقتی ادامه خواهد داشت که نسبت فشار پایین دست (P_2) به فشار بالا دست (P_1) از مقدار بحرانی $\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ بیشتر باشد. چنانچه فشار P_2 به مقدار بحرانی برسد، میزان فلوی عبوری تنها تابعی از فشار بالادست خواهد بود، چنانچه این فشار ثابت نگه داشته شود ماکزیموم فلوی عبوری اریفیس از رابطه (۱۱) بدست می آید. به این مقدار ماکزیموم، جریان شوک^(۴) گفته می شود. اگر فشار جریان پایین دست (P_2) کاهش یابد، به علت حرکت گاز با سرعت صوت در اریفیس، جریان گاز افزایش نمی یابد و در این ناحیه دیگر P_2 نمی تواند جریان را تحت تأثیر قرار دهد. جریان در این شرایط بصورت زیر بیان می شود.

$$Q_L = AP_1 C' \left(\frac{KT}{m} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

for $\left(\frac{P_2}{P_1} \right) < \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (۱۱)

ضریب C' در این معادلات برای در نظر گرفتن پدیده انقباض^(۵) جریان در اریفیس است. در این پدیده، بخاطر کوچک بودن سطح مقطع عبور سیال بعد از اریفیس از سطح مقطع آن و برای گریز از پیچیدگی های تبدیل انرژی فشاری به انرژی جنبشی در این منطقه (به ویژه برای گازها) و مشخص نبودن سطح مقطع واقعی جریان بعد از اریفیس، معادلات بر اساس سطح مقطع اریفیس نوشته شده و ضریب فوق در فرمول های بدست آمده

مطالعه دقیق تر جریان و رفتار گاز در سیستم های خلاء، مستلزم تعیین عدد بدون بعد دیگری به نام نودسن^(۲) می باشد. عدد نودسن حاصل تقسیم مسیر پویس آزاد^(۳) مولکول های گاز به بعد هندسی سیستم (مثلاً قطر در لوله ها) است.

$$Kn = \lambda/d \quad (۴)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_0^2 n} \quad (۵)$$

چنانچه مسیر پویس آزاد مولکول های گاز کوچکتر از قطر لوله باشد ($Kn < 0.01$) گاز ویسکوز و جریان پیوسته نامیده می شوند. رژیم جریان در یک گاز ویسکوز اگر $Re > 2200$ باشد اغتشاشی، اگر $Re < 1200$ باشد ویسکوز لامینار نامیده می شود و اگر $Kn > 1$ و $Re < 1200$ باشد، جریان مولکولار است. همچنین در بررسی مقدار جریان گاز، Throughput مقدار گاز عبوری از صفحه در یک زمان مشخص می باشد [۴ و ۵].

$$Q_L \left(\frac{pa.m^3}{s} \right) = \frac{d}{dt} (PV) \quad (۶)$$

طبق قانون گازهای ایده آل داریم:

$$PV = nRT \quad (۷)$$

با مشتق گیری از معادله (۶) نسبت به زمان به معادله (۹) می رسیم.

$$\frac{d(PV)}{d(t)} = \frac{d(nRT)}{d(t)} = d \left(\frac{RT}{M} m \right) / d(t), \quad \dot{m} = \frac{d(m)}{d(t)} \quad (۸)$$

$$\dot{m} \text{ (kg/s)} = \frac{Q_L \cdot M}{RT} \quad (۹)$$

معادله (۹) رابطه Throughput را با جریان جرمی نشان می دهد. با توجه به شکل ۱، اریفیس را می توان یک لوله با قطر کمتر از مجرای اصلی جریان و طول صفر فرض کرد. اگر فشار بالادست یک اریفیس در مقدار P_1 ثابت نگه داشته شود، میزان فلوی عبوری در هر لحظه برای گاز ویسکوز ($Kn < 0.01$) از رابطه (۱۰) تعیین می شود این رابطه از حل معادلات انرژی، حالت گاز ایده آل و پیوستگی برای جریان ایزوتروپیک، بدست می آید [۵] تا [۸].



با تعریف دو پارامتر α و β می‌توان سطح و محیط شیارهای موجود در شیر را حساب کرد:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{r}{L} \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{(\alpha - 1)^2 \cos^2 \theta' - (\alpha^2 - 2\alpha) + (\alpha - 1) \cos \theta'} \quad (16)$$

$$r' = \beta \cdot r \quad , \quad \theta = \sin^{-1}(\beta \sin \theta') \quad (17)$$

$$S = r^2 \theta - r(r-h) \sin \theta \quad (18)$$

$$P = 2r' + \widehat{AB} = 2\beta r + 2r\theta \quad (19)$$

در معادلات (۱۸) و (۱۹)، S و P به ترتیب سطح و محیط شیار موجود می‌باشند. با توجه به اینکه روابط ارائه شده در مورد اریفیس‌ها برای مقاطع دایره‌ای شکل صادق‌اند، استفاده در شیرهای سوزنی، قطر هیدرولیکی از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$d_h = \frac{4S}{P} \quad (20)$$

سطح مقطع شیرسوزنی با استفاده از قطر هیدرولیک، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A = 4 \left(\frac{\pi}{4} d_h^2 \right) \quad (21)$$

۴- چگونگی طراحی سطح مقطع اریفیس

اریفیس یک صفحه نازک و هم‌مرکز با لوله است که لبه‌های آن ممکن است در طرف بالادست و پایین‌دست جریان شیبدار باشد؛ چنانچه سیال موردنظر مایع باشد معمولاً لبه بالادست و چنانچه گاز باشد لبه پایین‌دست جریان را شیبدار می‌کند. وجود لبه‌های تیز باعث کم شدن پدیده انقباض جریان و پدیده کاویتاسیون، همچنین بالا رفتن دقت اندازه‌گیری می‌شود. مشخصات مورد نظر برای ساخت اریفیس از استاندارد ASME و هند بوک Liptak استخراج شده‌اند [۱ و ۴]. ضخامت اریفیس مورد نظر بسته به اندازه لوله و سرعت جریان متغیر است و معمولاً بین ۳ تا ۱۲ میلی‌متر تغییر می‌کند. محاسبات مربوط به قطر اریفیس جهت کنترل دبی و کاهش فشار در دمای ثابت (۲۵°C) برای گاز UF_6 با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) و (۱۱) مطابق جدول ۲ خواهد بود [۹].

دخیل شده است. در مورد شیرهای سوزنی نیز روابط اریفیس برای محاسبه دبی جریان عبوری از شیر صادق است. مقدار γ و نسبت فشار بحرانی برای گاز UF_6 در جدول ۱ آورده شده است.

۳- طراحی سطح مقطع شیر سوزنی

شیرهای سوزنی متشکل از یک میله استوانه‌ای به شعاع r و ارتفاع کلی L می‌باشند، بطوریکه چهار شیار مطابق شکل ۲ هر یک به عمق h بر روی آن تعبیه شده است. پارامتر h تابعی از ارتفاع سوزن بوده و در محدوده $0 \leq h \leq r$ تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که در قسمت انتهایی سوزن، چهار شیار مذکور دارای رأس مشترکی هستند. همچنین ارتفاع مورد نظر از سوزن مورد استفاده بوده و در محدوده $0 \leq I \leq L$ تغییر می‌کند. برای انجام دادن آزمایشهای مربوطه از یک شیرسوزنی به طول 30mm و به قطر 5mm استفاده می‌شود. این شیر دارای چهار شیار با شیب $\gamma = 4.763^\circ$ است بطوریکه زاویه شیارهای مذکور $2\theta = 45^\circ$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در حالت شیر کاملاً باز از طول کلی 30mm سوزن مذکور 10mm داخل سیل^(۶) قرار گرفته، لذا تنها 20mm ابتدایی آن قابل استفاده است.

با توجه به شکل ۲ روابط مربوط به طراحی شیرسوزنی به صورت زیر می‌باشند:

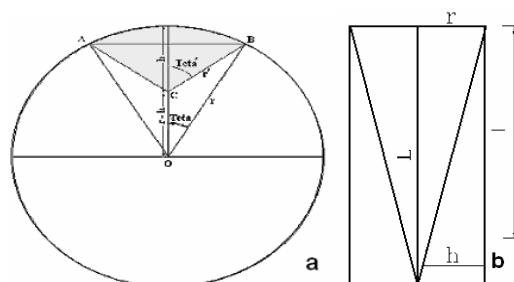
$$\theta' = \frac{\pi}{8} \quad (12)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{r}{L} \quad (13)$$

$$h = I \tan \gamma \quad (14)$$

جدول ۱- پارامترهای جریان ویسکوز.

Gas Type	$\gamma = \frac{Cp}{Cv}$	$Wc = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$
UF_6	1.063	0.5925

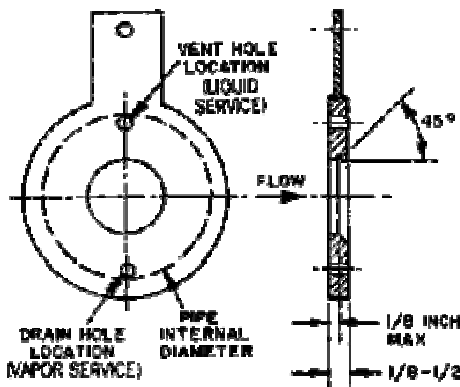


شکل ۲- (a) نمای شماتیک یکی از شیارهای موجود در شیرسوزنی و تعریف پارامترهای موردنیاز. (b) نمای شماتیک میله مخروطی موجود در شیرسوزنی و تعریف پارامترهای موردنیاز.

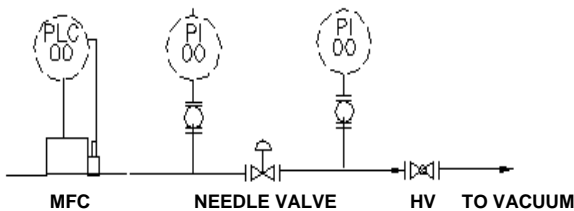


دبی سنج کنترلی تنظیم شده و تست‌های مذکور از حالت شیر کاملاً باز^(۷) شروع شده و به تدریج با بستن شیر ادامه یافته‌اند. در این روش تجهیزات مطابق شکل ۴ بر روی مسیر جریان بسته شده‌اند.

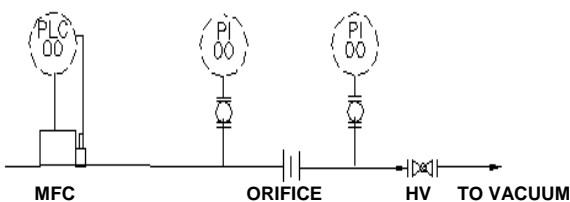
در مرحله دوم آزمایشها، از یک اریفیس با قطر روزنه ۱/۹ میلی‌متر تحت شرایط خلاء استفاده شده است. در این روش پس از نصب تجهیزات مطابق با شکل ۵، آزمایش اریفیس با استفاده از دبی سنج کنترلی انجام می‌گیرد. بطور کلی بررسی‌های انجام شده بر روی اریفیس شامل بررسی تغییرات افت فشار حاصل از اریفیس در اثر تغییر دبی گاز هگزا فلورید اورانیوم و بررسی تأثیر فشار ورودی بر میزان افت فشار حاصل از اریفیس می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است قبل و بعد از اریفیس و شیرسوزنی از دو فشارسنج استفاده شده است.



شکل ۳- مشخصات طراحی اریفیس.



شکل ۴- انجام آزمایش‌های شیرسوزنی با استفاده از دبی سنج حرارتی.



شکل ۵- انجام آزمایش‌های اریفیس با استفاده از دبی سنج حرارتی.

جدول ۲- اثر فشار بالادست و فشار پایین دست اریفیس بر قطر روزنه برای گاز UF₆.

T (K)	P ₂ (mbar)	P ₁ (mbar)	Orifice flow	Chock flow	d _{ORIFICE} (mm)	Mass Flow (gr/hr)
298	3	4	✓	-	1.5	4.4
298	3	5	✓	-	1.5	6.15
298	3	7	-	✓	1.5	8.7
298	P ₂ <29.6	50	-	✓	1.7	80
298	3	3.5	✓	-	1.9	17
298	3	10	-	✓	1.9	64
298	P ₂ <29.6	50	-	✓	1.9	320
298	3	50	-	✓	2	15.5
298	P ₂ <5.28	10	-	✓	3.8	80
298	3	4	✓	-	6.4	80
343	3	3.5	✓	-	2	5.185

به طوری که در جدول ۲ مشخص است، افزایش اختلاف فشار بالادست و پایین دست اریفیس، باعث افزایش دبی جریان می‌شود و در یک دبی ثابت، قطر روزنه اریفیس کاهش می‌یابد؛ افزایش دما نیز باعث کاهش سرعت جریان جرمی می‌شود؛ بنابراین اریفیس با قطر روزنه ۱/۹ میلی‌متر توان عبور دبی در محدوده ۱۷ تا ۳۲۰ (گرم در هر ساعت) را دارد. مشخصات طراحی اریفیس مطابق شکل ۳ است.

۵- روش آزمایش

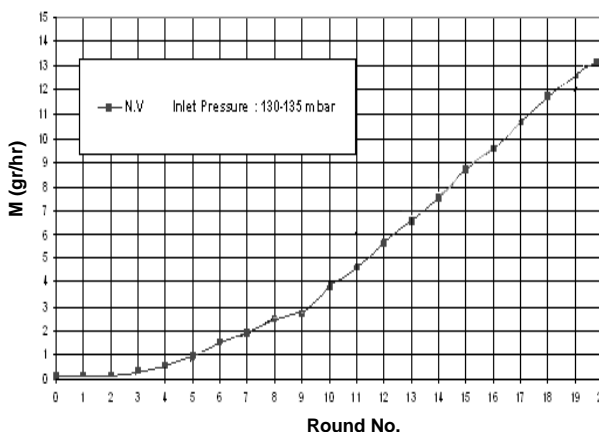
بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده، تا به حال روی موضوع مورد نظر در کشور کاری انجام نشده است. از طرفی با توجه به ماهیت دوگانه صنایع تحت خلاء که بیشتر کاربرد هسته‌ای دارند، دسترسی به منابع و مراجع در این زمینه بسیار مشکل است. در این مطالعه ابتدا اریفیس و شیرسوزنی با مشخصات طراحی شده ساخته می‌شوند، سپس آزمایشهای مربوط به اندازه‌گیری جریان عبوری بصورت زیر انجام می‌گیرند. برای انجام آزمایشها در مرحله اول، از یک شیرسوزنی (N.V) به قطر ۵ میلی‌متر استفاده شده است. اساس محاسبات لازم به منظور طراحی یک شیرسوزنی با قطر ۵ میلی‌متر بر روابط حاکم بر جریان در اریفیس‌ها استوار بوده و بگونه‌ای انجام شده‌اند که شیرهای مذکور توانایی عبور دادن جریان در فشار ورودی ۳ میلی‌بار را (خلاء متوسط) داشته باشند. مقدار دبی گاز هگزا فلورید اورانیوم از شیرسوزنی در دبی‌های مختلف به وسیله یک



۶- بحث و نتیجه گیری

شکل ۶ دبی عبوری از شیرهای سوزنی موجود در دوره‌های مختلف (باز) و فشار ورودی ۱۳۰ میلی‌بار را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که آزمایشها در این حالت، از شیر کاملاً بسته شروع و بتدریج با باز شدن شیر ادامه می‌یابند.

مطابق شکل ۶، در دور ۲۰ و فشار ورودی ۱۳۵-۱۳۰ میلی‌بار شیر توان عبور ۱۳/۲ گرم بر ساعت را دارد. در صورتی که در دور ۱۰ شیر تنها ۴ گرم بر ساعت را از خود عبور می‌دهد. بنابراین با باز شدن شیر میزان دبی عبوری از آن افزایش می‌یابد. شکل ۷ تغییرات دبی جرمی برحسب فشار ورودی را نشان می‌دهد. مقدار Full Open-x نشان‌دهنده وضعیت شیر است بطوریکه در حالت کاملاً باز مقدار x صفر بوده و در باقی موارد x تعداد دوره‌های بسته شیر می‌باشد.

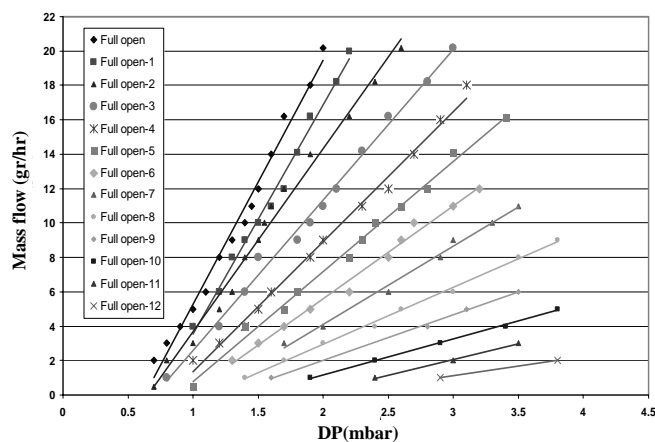


شکل ۶- میزان دبی عبوری از شیرهای سوزنی ۵mm در دوره‌های مختلف شیر.

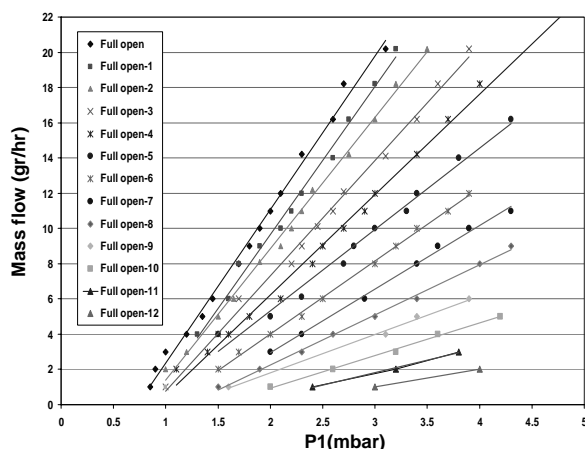
زمانی که شیر بطور کامل باز است با تغییر فشار ورودی از ۰/۸ تا ۲/۹ میلی‌بار، دبی جریان از ۱ تا ۲۰ گرم بر ساعت تغییر می‌کند. با یک دور بسته شدن شیر دبی ۲۰ گرم در ساعت در فشارهای ورودی ۳ میلی‌بار حاصل می‌شود و با بستن ۱۰ دور از شیر در فشار ۴/۳ میلی‌بار، تنها ۵ گرم بر ساعت از شیر عبور می‌کند. بنابراین با افزایش فشار و باز کردن شیر میزان دبی عبوری از شیر افزایش می‌یابد. تحت شرایط خلاء، به علت پایین بودن فشار در محدوده خلاء، میزان دبی عبوری کم است، بنابراین برای عبور این میزان دبی پایین در فشارهای ورودی خلاء تا آنجا که ممکن است باید سعی شود از بوجود آمدن پدیده شوک در شیر جلوگیری شود. به این جهت سعی شده است تا آزمایش در فشارهای ورودی پایین انجام شود. چنانچه نمودار تغییرات دبی جرمی در وضعیت‌های مختلف شیر برحسب ΔP رسم گردد، در این حالت نیز منحنی‌های بدست آمده مشابه موارد قبل با دقت بسیار خوبی خطی خواهند بود.

علت خطی بودن شکل ۸ ارتباط مستقیم مقدار دبی با افت فشار ایجاد شده در حالت‌های مختلف شیر می‌باشد. اگر دو طرف معادلات (۱۰) و (۱۱) را بر $P_1 - P_2$ تقسیم کنیم مقدار کانداکتانس، که به عنوان یکی از مشخصات مجرای عبور جریان شناخته می‌شود، بدست می‌آید. کانداکتانس از رابطه زیر بدست می‌آید:

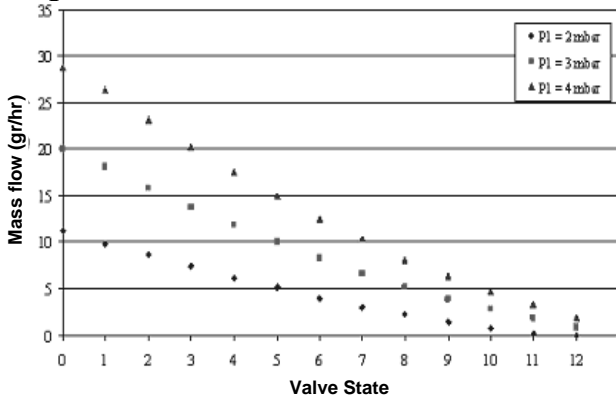
$$C(m^3/s) = \frac{Q_L}{P_1 - P_2} \quad (22)$$



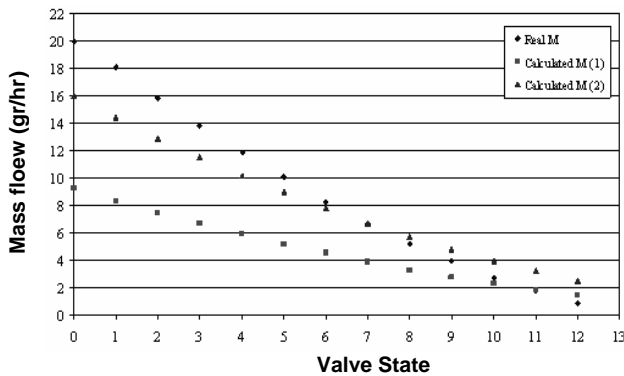
شکل ۸- تغییرات دبی عبوری برحسب اختلاف فشار در حالت‌های مختلف شیر.



شکل ۷- تغییرات دبی عبوری برحسب فشار ورودی در حالت‌های مختلف شیر.



شکل ۹- دبی واقعی عبوری از شیرسوزنی برای حالت‌های مختلف شیر و فشارهای ورودی 2-4 mbar



شکل ۱۰- مقایسه میان مقادیر حاصل از محاسبات طراحی و مقادیر واقعی با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) در وضعیت‌های مختلف شیر.

با افزایش فشار، حالت شوک (خفه‌شدگی) در سیستم بوجود می‌آید و در این حالت جریان تنها تابعی از فشار بالادست خواهد بود. اختلاف بوجود آمده در نتایج تجربی و نتایج حاصل از معادلات، مربوط به خطاهای آزمایشگاهی در خواندن دبی و فشار و خطا در تعیین C' می‌باشد. با بسته شدن شیر، فشار کاهش می‌یابد. جریان از حالت شوک خارج شده و دبی جریان از معادله (۱۰) پیروی می‌کند. همچنین مقدار $\frac{P_2}{P_1}$ تعیین‌کننده حالت شوک و بدون شوک جریان می‌باشد. برای سرعت پمپاژ ثابت و یک گاز مشخص با افزایش فشار، جریان به حالت شوک معادله (۱۱) نزدیکتر شده و با کاهش فشار از ناحیه شوک خارج و به فشار بالادست و پایین دست وابسته می‌شود. شکل ۱۱ تغییرات دبی برحسب تغییرات آمپراژ حاصل از اریفیس در فشار ورودی ۳mbar و ۴mbar را نشان می‌دهد. با تغییر میزان دبی عبوری در محدوده ۱۶gr/hr-۰، آمپراژ حاصل از اریفیس از ۴mA تا ۶mA تغییر می‌کند. از آنجایی که محدوده جریان ۲۰mA-۴mA معادل افت فشاری در حدود ۶۳pa-۰ می‌باشد، لذا می‌توان رابطه‌ای مانند معادله (۲۴) بین دو پارامتر مذکور در نظر گرفت.

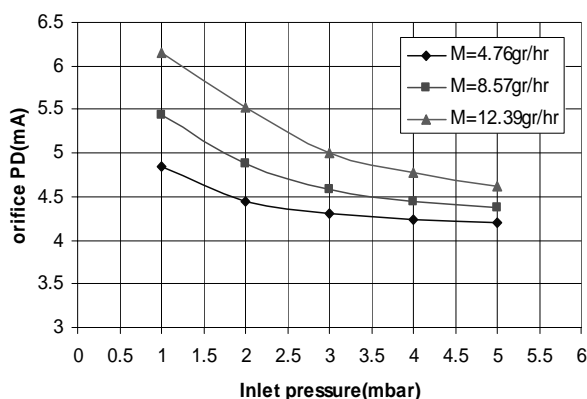
همچنین با توجه به رابطه $m'(Kg/s) = \frac{Q_L M_w}{RT}$ داریم:

$$m'(kg/s) = \frac{CM_w(P_1 - P_2)}{RT} \quad (23)$$

معادله (۲۳) خطی بودن دبی و اختلاف فشار را نشان می‌دهد. زمانی که اختلاف فشار جریان عبوری از شیر بیشتر می‌شود، نیروی محرکه جهت به حرکت در آوردن سیال بیشتر شده و دبی بیشتری از شیر عبور می‌کند، بالا بردن اختلاف فشار بالادست و پایین دست شیر از یک مقدار مشخص، باعث بوجود آمدن شوک و خفه شدن جریان می‌شود. اگرچه بررسی تغییرات دبی جرمی در هر دو شکل ۷ و ۸ ارائه شده نشان از خطی بودن نمودار حاصل دارد، لیکن از آنجا که در کلیه آزمایش‌های انجام شده نسبت $\frac{P_2}{P_1}$ کمتر از مقدار ۰/۵۹۲۶ می‌باشد، لذا خطی بودن نمودار تغییرات دبی جرمی برحسب فشار ورودی در یک وضعیت ثابت شیر (سطح مقطع ثابت) را می‌توان بعنوان تأییدی بر تبعیت داده‌های موجود از رابطه (۱۱) (Choked Flow) به شمار آورد. همچنین می‌توان دبی واقعی عبوری از شیرسوزنی را در یک فشار ورودی معین و در وضعیت‌های مختلف شیر بدست آورده و با مقادیر حاصل از محاسبات طراحی در هر دو حالت با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) مقایسه کرد. شکل ۹ دبی واقعی عبوری از شیرسوزنی را در فشارهای ورودی معین و شکل ۱۰ مقایسه میان مقادیر حاصل از محاسبات طراحی و مقادیر واقعی را برحسب وضعیت‌های مختلف شیر نشان می‌دهد.

شکل ۹ نشان می‌دهد که در حالتی که شیر کاملاً باز است میزان دبی ماکزیموم عبوری از شیر با بالا رفتن فشار ورودی از ۲ میلی‌بار به ۴ میلی‌بار و از ۱۲ گرم بر ساعت به ۲۹ گرم بر ساعت تغییر می‌کند همچنین در فشار ورودی ۳ میلی‌بار جریان عبوری از شیر به مقدار ماکزیموم ۲۰ (gr/hr) می‌رسد که با بسته شدن شیر، این دبی کاهش می‌یابد.

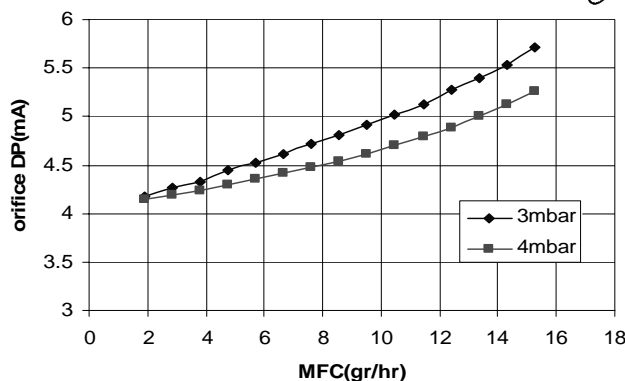
شکل ۱۰ مقایسه نتایج حاصل از محاسبات تئوری و مقادیر واقعی را در وضعیت‌های مختلف شیر نشان می‌دهد. در حالتی که شیر کاملاً باز است دبی اندازه‌گیری شده به وسیله دبی‌سنج مقدار ۲۰ گرم بر ساعت را نشان می‌دهد. در حالیکه مقدار دبی از معادله (۱۱)، ۱۶ گرم بر ساعت و از معادله (۱۰)، ۹/۲ گرم بر ساعت است. بنابراین در حالتی که شیر کاملاً باز است، مقدار دبی حالت تجربی به دبی حالت تئوری بدست آمده از معادله (۱۱) نزدیک می‌شود. زیرا در این حالت با باز شدن شیر فشار افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات آمپراژ حاصل از اریفیس برحسب فشار ورودی در دبی‌های مختلف.

بالایی برخوردار است. استفاده از شیرسوزنی و اریفیس به منظور کنترل و تنظیم جریان با دبی بسیار پایین در این تأسیسات بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. شیرسوزنی قادر است با تغییر سطح مقطع عبور جریان، میزان دبی جریان را تغییر دهد، اریفیس نیز با ایجاد مانع در مسیر جریان می‌تواند دبی عبوری لوله و فشار بعد از اریفیس را که معمولاً فشار مورد نیاز در زنجیره‌هاست تنظیم کند. مزیت اصلی استفاده از این دبی‌سنجها، عملکرد آسان و قابل پیش‌بینی آنها تحت شرایط عملکردی مختلف و پایداری ذاتی در یک پررود طولانی از زمان می‌باشد. بطور کلی از آزمایشهای انجام شده نتایج زیر بدست آمده است:

- با تغییر فشار ورودی و باز و بسته کردن شیرسوزنی می‌توان میزان دبی عبوری از شیر را تنظیم کرد. در حالی که شیر کاملاً باز است میزان دبی عبوری از شیر با بالا رفتن فشار ورودی به یک حد ماکزیموم می‌رسد که با بسته شدن شیر این میزان دبی کاهش می‌یابد.
- برای یک اریفیس با قطر روزنه ثابت، افزایش فشار ورودی باعث افزایش دبی جریان شده و در یک فشار ورودی ثابت، استفاده از یک اریفیس با قطر روزنه بزرگتر منجر به عبور جریان با دبی بالاتر می‌شود. میزان تغییر آمپراژ ناشی از اریفیس (افت فشار) برحسب فشار ورودی، با افزایش دبی شدت بیشتری می‌یابد. گرچه در یک دبی مشخص، افزایش فشار ورودی از یک مقدار حدی، دیگر تأثیر محسوسی بر آمپراژ حاصل ندارد.



شکل ۱۱- تغییرات دبی برحسب آمپراژ حاصل از اریفیس در فشارهای ورودی ۳ mbar و ۴mbar.

$$\Delta P (pa) = \frac{63 - 0}{20 - 4} [I (mA) - 4] \quad (24)$$

در فشارهای ۳ و ۴ میلی‌بار میزان افت فشار بوجود آمده در اریفیس برای دبی‌های ۱/۹، ۲/۹، ۳/۸، ۴/۸، ۵/۸، ۶/۸، ۷/۸، ۸/۸، ۹/۸، ۱۰/۸، ۱۱/۸، ۱۲/۸، ۱۳/۸، ۱۴/۸، ۱۵/۸ اندازه‌گیری شده است که شکل ۱۱ نشان می‌دهد این میزان افت فشار^(۸) ناشی از عبور جریان در محدوده ۱/۹ تا ۱۵/۴ گرم بر ساعت در فشار ۳ میلی‌بار بیشتر از میزان افت فشار ناشی از عبور دبی در فشار ۴ میلی‌بار است. شکل ۱۲ تغییرات آمپراژ حاصل از اریفیس را برحسب فشار ورودی در دبی‌های ۴/۷۶ (gr/hr) و ۸/۵۷ (gr/hr) و ۱۲/۳۹ (gr/hr) نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۲ در دبی ۴/۷۶ گرم بر ساعت با افزایش فشار ورودی از ۱ به ۵ میلی‌بار میزان افت فشار ایجاد شده برحسب آمپراژ از ۴/۸ به ۴/۳ کاهش می‌یابد در حالی که در دبی‌های ۸/۵۷ و ۱۲/۳۹ گرم بر ساعت، با افزایش فشار ورودی از ۱ به ۵ میلی‌بار مقدار افت فشار ایجاد شده در اریفیس با شیب تندتری کاهش می‌یابد.

۷- نتایج نهایی

اطلاعات جامعی از جریان گاز عبوری از اریفیس و شیرسوزنی تحت شرایط خلاء بدست آمده است، برای هر دو وسیله رفتار جریان گاز و مقدار دبی عبوری با دقت خوبی قابل پیش‌بینی است، به سبب پایین بودن محدوده فشار و دبی، اندازه‌گیری دبی در تأسیسات هسته‌ای از حساسیت بسیار

**References:**

1. ASME MFC-3M, "Measurement of fluid flow in pipe using orifice, nozzle, and venturi," American Society of Mechanical Engineers Standard (1989).
2. R.C. Baker, "Low measurement handbook," Cambridge University Pres, London (1987).
3. J.M. Lafferty, "Foundations of vacuum science and technology," New York, Wiley, 141-173 (1998).
4. B.G. Liptak, "Flow measurement handbook," (1982-1993).
5. J.F. O'Hanlon, "A user's guide to vacuum technology," 3rd (2003).
6. R.W. Miller, "Flow measurement engineering handbook," Secend ed, Mc-Graw-Hill, New Yourk, Vol. 11, 27-40 (1989)
7. W. Jitschin, M. Ronzheimer, S. Khodabakhshi, "Gas flow measurement by means of orifices and venturi tubes," Vacuum, Vol. 53, 181-185, (1999).
8. W. Jitschin, "Gas flow measurement by the thin orifice and the classical venturi tube," Vacuum, Vol. 76, 89-100 (2004).
9. D.J. Tritton, "Physical fluid dynamics," UK, Oxford University Press (1988).

۸- علائم و نشانه‌هاجرم یک مولکول از سیال: $m_0(kg)$ مسیر پویش آزاد مولکولی: $\lambda(m) = \frac{1}{\sqrt{2}n d_0^2}$ مقدار گاز عبوری: $Q_L(\frac{pa.m^3}{s})$ قطر لوله: $D(m)$ ویسکوزیته سیال: $\mu(kg/m.s)$ چگالی سیال: $\rho(kg/m^3)$ نسبت گرمایی ویژه سیال: $\gamma = (\frac{C_p}{C_v})$ جرم مولکولی: $M_w(g)$ نسبت فشار بحرانی: $W_c = (\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ عدد نودسن: $kn = \lambda/d$ عدد رینولدز: $Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{4\dot{m}(kg/s)}{\pi \mu D}$ عدد آوگادرو: $N_0 = 6.02 \times 10^{23}$ ثابت بولتزمن: $K(j/k) = 1.3804 \times 10^{-23}$ قطر اریفیس متر: $d(m)$ قطر یک مولکول از گاز مورد نظر: $d_0(m)$ دمای سیال: $T(K)$ فشار سیال در بالادست اریفیس: $P_1(mbar)$ فشار سیال در پایین دست اریفیس: $P_2(mbar)$ سرعت جریان: $u(m/s)$ دبی جرمی یا مولی: $\dot{m}(kg/s) \text{ or } (kgmol/s)$ زمان: $t(s)$ حجم سیال: $V(m^3)$ ظرفیت گرمایی ویژه: $c_p(j/mol.K)$ دبی سنج کنترل: MFC ثابت گازها: $R(\frac{pa.m^3}{kmol.K}) = 8314$ کانداکتانس جریان: $C(m^3/s)$ **پی‌نوشت‌ها:**

۱- Needle Valves

۲- Knudsen

۳- Mean Free Path

۴- Chock Flow

۵- Vena Contracta

۶- Sealing

۷- Full Open

۸- Pressure Drop