



سیستم‌های اندازه‌گیری جریان بر اساس اختلاف فشار

با توجه به اهمیت دقت در اندازه‌گیری محصولات هیدروکربنی به دلیل ارزش فراوان اقتصادی آنها، وجود تنوع در فن‌آوری سیستم‌های اندازه‌گیری جریان و تفاوت بسیار زیاد دقت و قیمت آنها به ویژه در شرایط کنونی صنعت نفت، استفاده از سیستم‌هایی که قابلیت ساخت و توسعه در کشور دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به یکی از ارزان‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری سیالات که در عین سادگی می‌تواند دقت بالایی داشته باشد، پرداخته شده و با مقایسه نقاط قوت و ضعف آن، امکان استفاده از این روش در صنعت عظیم نفت که نیازمند داشتن انطباق کامل با استانداردهای بین‌المللی روز دنیاست، بررسی شده است.

واژگان کلیدی: اندازه‌گیری جریان، اختلاف فشار، دقت، خطا، اریفیس، ونچوری، شیپوره^۱

مقدمه

اندازه‌گیری در صنایع مرتبط با انرژی نظیر صنایع نفت و گاز به دلیل ارزش اقتصادی بسیار زیاد محصولات این صنایع، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای اندازه‌گیری تولیدات صنایع نفت و گاز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که عبارتند از روش سنجش محصولات جامد، روش ارتفاع مخازن و روش سنجش دینامیکی جریان سیال در داخل لوله. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری دینامیکی سیال درون خط لوله وجود دارد که در بسیاری از آنها از فن‌آوری‌های نو ظهور استفاده شده است. بدیهی است که استفاده از

ونچوری^۲ در سال ۱۷۹۷ از سیستم‌افت فشاری جهت اندازه‌گیری نرخ جریان استفاده کرد که نتایج آن منجر به توسعه سیستم اندازه‌گیری مدرن‌تر ونچوری توسط کلمنزرشل^۳ در سال ۱۸۸۶ گردید.

از سال‌های ۱۹۲۴ تا ۱۹۳۵ تحقیقات آزمایشگاهی زیادی توسط انجمن گاز آمریکا^۴ و انجمن مهندسين مکانیک آمریکا^۵ برای توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری اریفیس در زمینه ضرایب و استانداردهای نصب انجام شد تا اینکه در سال ۱۹۳۵، این دو انجمن به طور مشترک گزارشی با عنوان تاریخچه کالیبراسیون، نصب و عملکرد سیستم‌های

این گونه فن‌آوری‌ها با دقت زیاد و البته هزینه فراوانی همراه خواهد بود. یکی از رایج‌ترین و ابتدایی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان، ایجاد اختلاف فشار (استفاده از موانع خاص برای ایجاد افت فشار بر سر راه جریان) است که در صنعت به نام سیستم‌های افت فشاری شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها در بعضی موارد و در صورتی که به طور استاندارد طراحی و نصب شوند از دقت زیادی برخوردارند و طبیعتاً نیاز به استفاده از سیستم‌های جدید و پرهزینه نیست

۱- تاریخچه

نخستین بار فیزیکدان ایتالیایی، جووانی

هنگامی که سرعت شروع به کاهش می‌کند، متناسب با این کاهش، فشار شروع به افزایش می‌کند. فشار نهایی برای سیالات تراکم‌ناپذیر از روابط زیر به دست می‌آید [۲]:

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_i} = 1 - 0.24 \beta - 0.52 \beta^2 - 0.16 \beta^3 \quad (1)$$

$$\Delta P_i = P_i - P_2 = \frac{Q^2 \rho (1 - \beta^4)}{2 C_d^2 A_2^2} = \frac{Q^2 \rho (1 - \beta^4)}{2 C_d^2 A_2^2 B_2^2} \quad (2)$$

طرز کار سیستم‌های اندازه‌گیری اریفیزی بر اساس رابطه برنولی است که روابط بین انرژی استاتیکی و جنبشی داخل جریان یک سیال را توضیح می‌دهد. سیال عبوری از یک مانع، شتاب می‌گیرد و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد که این افزایش به واسطه کاهش انرژی پتانسیل سیال است. با توجه به قانون بقای انرژی، باید انرژی سیال قبل و بعد از مانع یکسان باشد:

$$P_1 + \frac{2}{1} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_1 + \frac{2}{1} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (3)$$

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) / \rho}{1 - (A_2 / A_1)^2}} \quad (5)$$

خط لوله، ظرفیت خط و نرخ جریان عبوری می‌توان از طیف وسیعی از موانع هندسی را برای ایجاد افت فشار در داخل لوله استفاده کرد. این موانع که در صنعت به عنوان اجزاء اولیه^۸ شناخته می‌شوند، هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند. همین معایب و مزایاست که شرایط کاربردشان را مشخص می‌کند [۲].

در شکل-۱ یک اریفیس نشان داده شده که نحوه عبور سیال و کاهش سطح مقطع عبور جریان در آن مشخص شده است.

۳- نحوه عملکرد

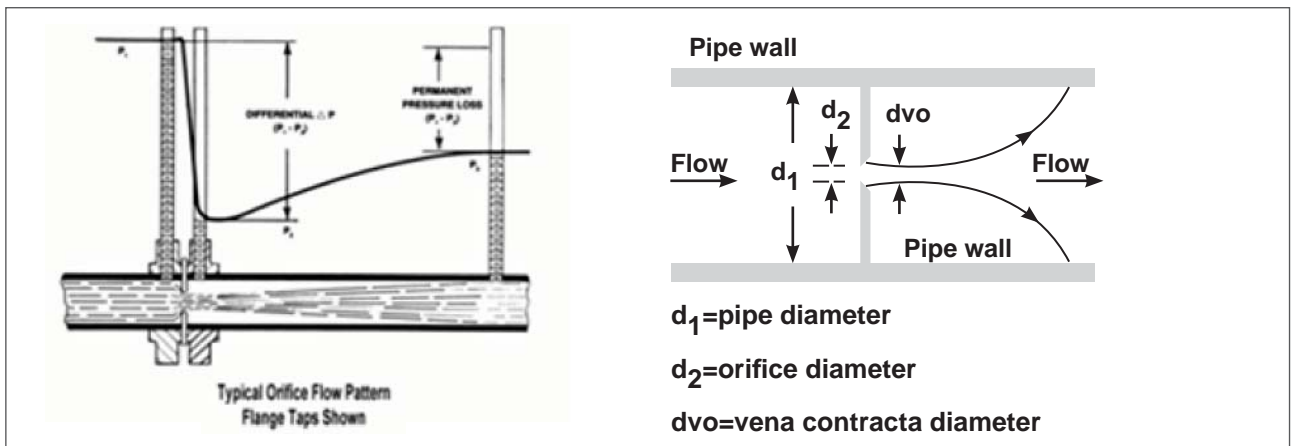
هنگامی که مانعی بر سر راه جریان قرار می‌گیرد، با نزدیک شدن به مانع فشار به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه به سوراخ اریفیزی برسد. وقتی جریان از صفحه عبور می‌کند فشار آن به طور ناگهانی افت کرده و این افت فشار تا ناحیه موسوم به (VC)^۹ ادامه پیدا می‌کند. پس از گذر از این ناحیه فشار جریان به تدریج افزایش می‌یابد و بعد از طی مسافتی در حدود ۵ تا ۸ برابر قطر لوله، فشارش به بالاترین مقدار در ناحیه پایین دست جریان خواهد رسید. کاهش فشار سیال در هنگام عبور از اریفیس به دلیل افزایش سرعت در این ناحیه است و

اندازه‌گیری اریفیزی منتشر کردند و در سال ۱۹۹۱، انجمن نفت آمریکا^{۱۰} طی فصل-۱۴ قسمت-۳، مقررات استانداردهای اندازه‌گیری مواد نفتی به روش اختلاف فشاری را به چاپ رساند [۱].

۲-اساس کار سیستم‌های اندازه‌گیری اختلاف فشاری^{۱۱}

این سیستم اندازه‌گیری بر اساس قانون برنولی طراحی شده است. قانون برنولی به زبان ساده عبارت است از اینکه مجموع افت فشار، افت سرعت و افت ارتفاع در یک نقطه برابر است با مجموع آنها در نقطه دیگر به علاوه افت‌های حاصل از اصطکاک بین آن دو نقطه. در این روش نرخ جریان عبوری از خط لوله توسط ایجاد افت فشار و استفاده از اختلاف فشار قبل و بعد از مانع، اندازه‌گیری می‌شود. آنچه از مشخصه اندازه‌گیری افت فشاری برمی‌آید اینست که اولاً رابطه افت فشار با جریان رابطه‌ای مجذوری است و دوم اینکه هم برای اندازه‌گیری جرمی و هم برای اندازه‌گیری حجمی باید چگالی جریان مشخص باشد [۱].

با توجه به نوع سیال، شرایط استفاده، قطر



Pipe wall
 Flow →
 d₁
 d₂
 dvo
 Pipe wall
 Flow →
 d₁=pipe diameter
 d₂=orifice diameter
 dvo=vena contracta diameter



اجزاء اولیه نام دارد، مقدار جریان عبوری از لوله اندازه گیری می شود. هر کدام از اجزای اولیه یادشده کاربرد خاصی داشته و در آن مورد نسبت به سایر موارد عملکرد بهتری دارد که در بخش طراحی و ساینز سیستم های اندازه گیری به تفصیل توضیح داده خواهد شد [۵۱].

۱-۵- اریفیس

از جمله اجزاء اولیه ایجاد اختلاف فشار که به نسبت سایر اجزاء اولیه کاربرد بیشتری دارد صفحه اریفیس است. اریفیس صفحه فلزی مدوری به ضخامت ۱/۸ تا ۱/۴ اینچ و گاهی در شرایط خاص ضخامت کمتر یا بیشتری است. در این صفحه حفره ای تعبیه شده که محل حفره و شکل و اندازه آن بستگی به کاربرد صفحه اریفیس دارد. مسئله بسیار مهم صاف بودن سطح صفحه و تیز بودن ۹۰ درجه لبه آنست که اگر هنگام عبور سیال در اثر برخورد مواد معلق در آن، تیزی لبه اریفیس از دست برود دقت اندازه گیری از بین خواهد رفت. هم چنین اگر ضخامت صفحه اریفیس نسبت به اختلاف فشار دو طرف آن صحیح انتخاب نشود باعث ایجاد انحنا یا فرورفتگی

برای β های کوچکتر از ۰/۲۵، مقدار β^2 به سمت صفر میل می کند و فرمول ۱۲- به فرمول ۱۳- تبدیل می شود:

$$Y = \sqrt{r^{2/k} \left(\frac{K}{K-1} \right) \left(\frac{1-r^{(k-1)/k}}{1-r} \right)} \quad (13)$$

Y = Expansion factor, dimensionless

$$r = P_2 / P_1$$

k = specific heat ratio (c_p/c_v), dimensionless

لذا نرخ جریان گاز عبوری به شکل فرمول ۱۴- درمی آید:

$$m = C A_2 \sqrt{2 \rho_1 \left(\frac{K}{K-1} \right) \left[\frac{(P_2/P_1)^{2k} - (P_2/P_1)^{k+1}}{(P_2/P_1)^{k+1}} \right] (P_2 - P_1)} \quad (14)$$

با استفاده از فرمول گاز ایده آل و ضریب انبساط فرمول اندازه گیری، نرخ جریان برای گاز واقعی عبارت است از:

$$m = C A_2 P_1 \sqrt{\frac{2M}{ZRT_1} \left(\frac{K}{K-1} \right) \left[\frac{(P_2/P_1)^{2k} - (P_2/P_1)^{k+1}}{(P_2/P_1)^{k+1}} \right]} \quad (15)$$

۵- اجزاء اولیه

همان طور که قبلاً ذکر شد در این روش با استفاده از ایجاد افت فشار توسط مانعی که

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{1-\beta^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \quad (6)$$

C_d ضریب تخلیه و بیانگر نسبت جریان واقعی به تخلیه تئوری می باشد. این ضریب به خاطر وجود افت های ناشی از اصطکاک و تأثیرات گرانشی^۱ و اغتشاشات جریان تعریف شده است. فرمول های زیادی برای ضریب تخلیه وجود دارد ولی استاندارد ISO فرمول ۷- را توصیه می کند:

$$C = 0.5961 + 0.0261 \beta^2 - 0.216 \beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7}$$

$$+ \left(0.0188 + 0.0063 \left(\frac{19000 \beta}{Re_D} \right)^{0.8} \right) \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \beta^{3.5} +$$

$$\left(0.043 + 0.08e^{-10\beta} - 0.123e^{-7\beta} \right) \left(1 - 0.11 \left(\frac{19000 \beta}{Re_D} \right)^{0.8} \right) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

$$- 0.031 \left(\frac{2L_2^1}{1-\beta} - 0.8 \left(\frac{2L_2^1}{1-\beta} \right)^{1.1} \right) \beta^{1.3} \quad (7)$$

$$C = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (8)$$

$$Q = C A_2 \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \quad (9)$$

$$\dot{m} = \rho Q = C A_2 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)} \quad (10)$$

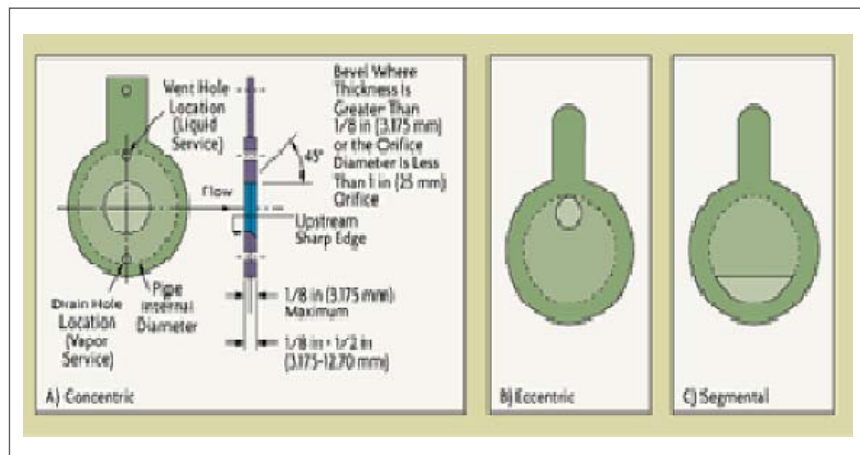
۴- گازها [۴]

فرمول ها و موارد یادشده مربوط به اندازه گیری مایعات بود. این روابط در اندازه گیری گازها به صورت زیر درمی آید [۴ و ۲]:

$$\dot{m} = \rho_1 Q = C Y A_2 \sqrt{2 \rho_1 (P_1 - P_2)} \quad (11)$$

Y ضریب انبساط است که برای مایعات برابر یک می باشد ولی برای گازها عبارت است از:

$$Y = \sqrt{r^{2/k} \left(\frac{K}{K-1} \right) \left(\frac{1-r^{(k-1)/k}}{1-r} \right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 r^{2k}} \right)} \quad (12)$$



آن خارج از مرکز است و برای مواد نفتی رسوب‌دار و سنگین به کار می‌رود.

- **اوریفیس قطاعی^۳:** که حفره آن خارج از مرکز و به شکل قطعه‌ای از دایره بوده و کاربرد آن برای مواد رسوب‌دار است.
- **اوریفیس کریر^۴:** فلنج دایره‌شکلی است که می‌توان انواع صفحه‌های اوریفیس با اندازه‌های مختلف را به وسیله چند پیچ در محیط روی آن نصب کرد.

۵-۲- لوله پیتوت^{۱۵}

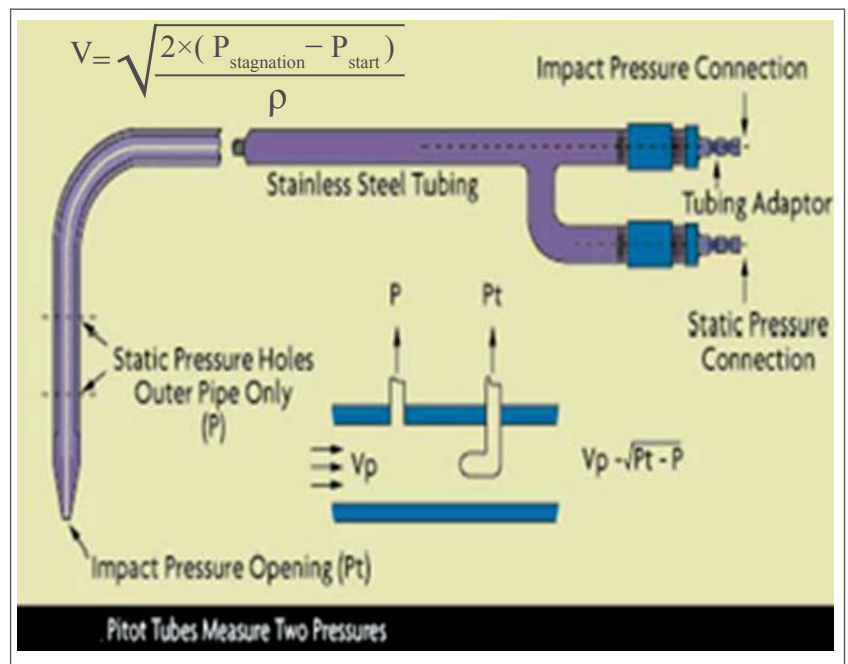
نوع دیگری از اجزاء اولیه، لوله پیتوت می‌باشد که نمایی از آن در شکل ۳- نشان داده شده است. این سیستم با استفاده از فشار استاتیک دیواره و فشار دینامیکی که در مرکز رژیم جریان ایجاد می‌شود، سرعت سیال را محاسبه می‌کند. ایراد لوله پیتوت اینست که با توجه به سهمی‌وار بودن پروفایل جریان، با اندازه‌گیری سرعت سیال در یک نقطه نمی‌توان شکل صحیح پروفایل آنرا به دست آورد و لذا دقت اندازه‌گیری نرخ جریان زیاد نخواهد بود. برای رفع این مشکل و افزایش دقت اندازه‌گیری

۵-۱-۱- انواع اوریفیس

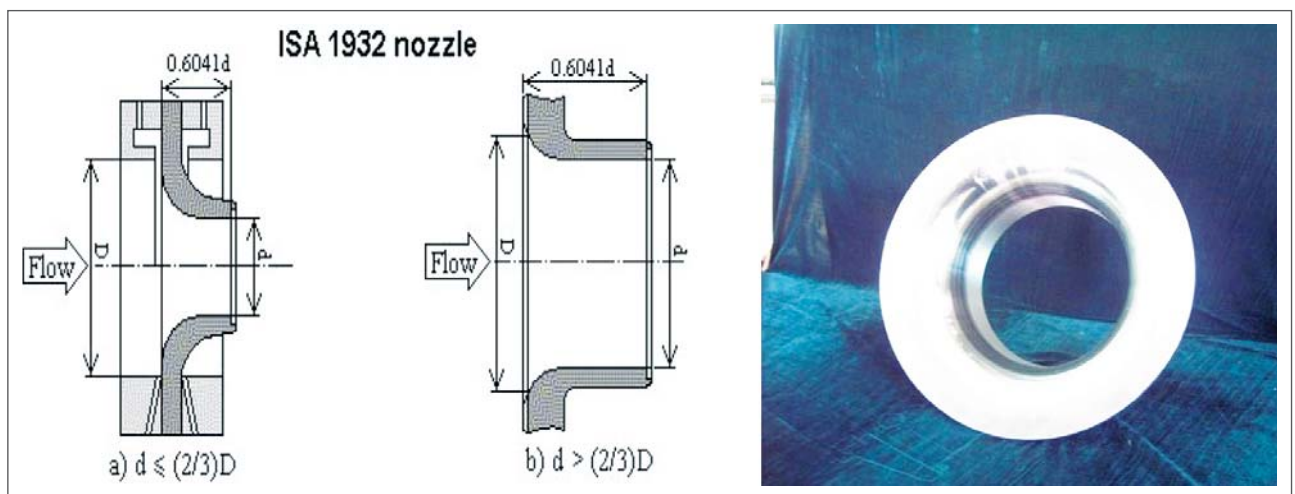
اوریفیس با توجه به کاربرد آن در موارد مختلف، از نظر شکل ظاهر و وضعیت حفره به چهار شکل ساخته می‌شود:

- **اوریفیس هم‌مرکز^{۱۱}:** که حفره آن کاملاً در وسط صفحه قرار گرفته و برای مواد نفتی سبک و بدون رسوب و گازها به کار می‌رود.
- **اوریفیس خارج از مرکز^{۱۲}:** که حفره

در صفحه اوریفیس و خراب شدن شکل صحیح الگو خواهد شد. در مواردی که به علت اختلاف فشار زیاد به ناچار ضخامت صفحه اوریفیس بیشتر انتخاب شود، برای کاهش سطح تماس دهانه با مایع در حال خروج، به وسیله ماشین تراش لبه اوریفیس را ۴۵ درجه تراشیده و به اصطلاح پخ می‌کنند تا ضخامت آن نصف شود.



شکل ۳ | المان اولیه لوله پیتوت



شکل ۴ | نازل ۱۹۳۲ - ISA



نازل ۱۹۳۲ - ISA و خروجی آن شبیه نازل شعاع بلند است. (شکل-۶)

۵-۴- ونچوری

یکی از معمول‌ترین اجزاء اولیه که در نوع اختلاف فشاری استفاده می‌شود ونچوری است که به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان زیاد آن، در جاهایی که محدوده جریان^{۱۹} زیاد و اختلاف فشار کم نیاز باشد استفاده می‌شود. ونچوری به دلیل طولانی بودن مسیر ایجاد اختلاف فشار و همچنین ممانعت از

است. نازل از نظر ابعادی و به ویژه در فشار، دما و سرعت‌های زیاد جریان، بسیار پایدارتر از اریفیس بوده و به همین دلیل در مواردی که سیال بخار داغ^{۱۷} باشد، استفاده می‌شود و برای جریان‌های حاوی ذرات مایع یا جامد و دوغابی پیشنهاد نمی‌شود. دقت نازل‌ها یک درصد محدوده جریان است.

نازل‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

■ نازل ۱۹۳۲ - ISA (شکل-۴)

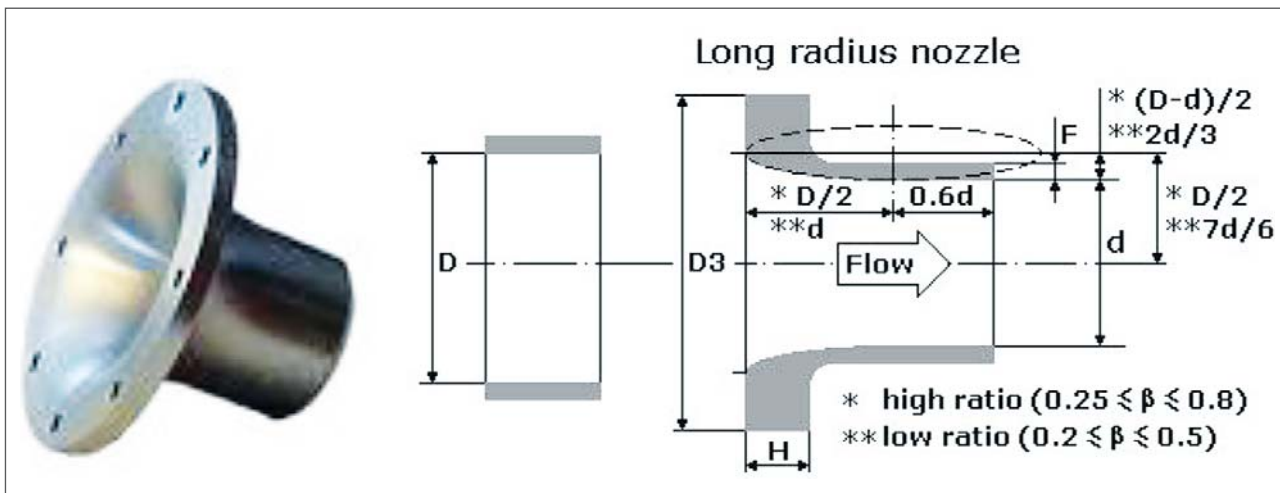
■ نازل شعاع بلند^{۱۸} (شکل-۵)

■ نازل ونچوری: ورودی این نازل شبیه به

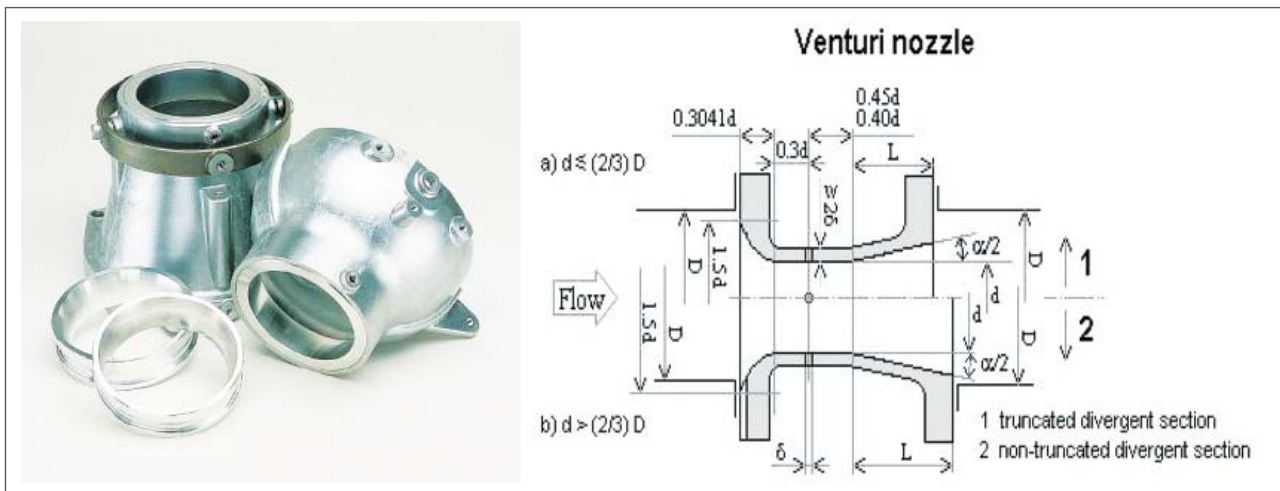
باید از لوله پیتوت چندگانه^{۱۶} استفاده کرد که هم‌زمان در چند نقطه، سرعت را اندازه‌گیری می‌کند و از حاصل ضرب سرعت در سطح مقطع، نرخ جریان محاسبه می‌شود [۲].

۵-۳- شیپوره (نازل)

از دیگر انواع اجزاء اولیه که بیشتر برای واردی مثل هوا و گاز و برای سرعت و دماهای بسیار بالا استفاده می‌شود نازل است که کمتر برای مایعات استفاده شده و نسبت به سایر اجزاء، ساده‌تر، ارزان‌تر و در دسترس‌تر



شکل ۵ | نازل شعاع بلند



شکل ۶ | نازل ونچوری

نتیجه‌گیری

وجود هزینه کم در مواردی که انواع دیگر سیستم‌های اندازه‌گیری قابل استفاده نبوده و یا بسیار پر هزینه بوده، نقش مهمی ایفا کرده و رقم دقیقی از میزان جریان در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهند. اگر این سیستم‌ها به صورت دقیق طراحی، انتخاب، نصب و راهبری شوند و عدم قطعیت‌های آنها به طور کامل شناسایی شده و خطاهای سیستمی آنها حذف گردد، می‌توانند مطابق استانداردهای بین‌المللی مبنای مبادلات مالی گاز خشک قرار گیرند. ضمن اینکه فصل-۱۴ استاندارد API و فصل-۳ استاندارد AGA مختص سیستم‌های افت فشاری بوده و تمام ملاحظات طراحی و نصب را مورد بحث قرار می‌دهد. در بسیاری از موارد از جمله اندازه‌گیری مایعات که مبنای مبادلات مالی نبوده و برای موارد اپراتوری و کنترل واحدها استفاده می‌شود، نیازی به پرداخت هزینه‌های گزاف طراحی، خرید و نصب سیستم‌های جدید نبوده و سیستم‌های اختلاف فشاری به راحتی پاسخ‌گوی نیازهای عملیاتی خواهند بود.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد سیستم‌های اندازه‌گیری اختلاف فشاری در موقعیت‌هایی که بر مبنای مبادلات مالی ۲۰ گاز خشک تک فازی قرار می‌گیرد قابل استفاده هستند. دقت این سیستم‌ها برای گاز در محدود ۱/۵ - ۰/۷۵ درصد و برای مایعات حدوداً ۳ درصد است. لازم به ذکر است دقت‌های یادشده در صورت طراحی و نصب اصولی حاصل خواهد شد. بسیاری از سیستم‌های نوظهور برای داشتن دقت مبادلاتی قابل قبول، نیازمند تجهیزات پرووینگ با هزینه فراوان هستند و در صورتی که عملیات پرووینگ به صورت منظم و دقیق انجام نشود دقتی بهتر از سیستم‌های اختلاف فشاری نخواهند داشت. این در صورتی است که اگر مراحل طراحی و نصب سیستم‌های اختلاف فشاری به طور صحیح انجام شود، کالیبراسیون این سیستم‌ها بسیار آسان بوده و تجهیزات آن به مراتب از قیمت پایین‌تری برخوردار هستند. سیستم‌های اندازه‌گیری اختلاف فشاری با

اعمال تلاطم در مسیر جریان سیال می‌تواند در اندازه‌گیری جریان بخار و گاز کاربرد بیشتری داشته باشد [۴ و ۲].

لوله ونچوری تا اندازه ۷۲ اینچ موجود بوده و با اختلاف فشار یکسان، ۵۰-۲۵ درصد بیشتر از صفحه اریفیس قادر به عبور سیال می‌باشد. هزینه اولیه لوله ونچوری زیاد است و اصولاً کاربرد آن در جریان‌های زیاد و فشار بالا است. دقت این نوع سیستم اندازه‌گیری بسیار متأثر از کالیبراسیون است. لوله ونچوری بر سه نوع است:

- Short-Form
- Universal
- Flow Nozzle

بر خلاف اریفیس که کاهش سطح مقطع در آن بسیار ناگهانی انجام می‌شود در ونچوری کاهش و افزایش فشار با ملایمت انجام می‌گردد. ونچوری معمولاً با محدوده جریان ۱:۱۰ استفاده می‌شود و در ۱۰ درصد نرخ جریان بیشینه هم می‌تواند دقت مناسبی داشته باشد.

پانویس‌ها

- | | | | |
|------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 1. nozzle | 6. API | 11. concentric orifice | 16. multiple opening pitot tube |
| 2. Giovanni B. Venturi | 7. differential pressure | 12. eccentric orifice | 17. super heat steam |
| 3. Clemones Herschel | 8. primary elements | 13. segment orifice | 18. long radius |
| 4. AGA | 9. Vena Contracta | 14. orifice carrier | 19. turn down ratio |
| 5. ASME | 10. viscosity | 15. pitot tube | 20. custody transfer |

منابع

- [1] Branch, J. C. (1995), Fundamentals of Orifice Meter Measurement
- [2] Barry, J. J., Sheikoleslami, M. Z., and Patel, B. R. (1992) Numerical simulation of flow through orifice meters, Gas Research Institute, GRI-92/0060.1.
- [3] Brennan, J. A., Sindt, C. E, Lewis, M. A., and Scott, J. L. (1991) Choosing flow conditioners and their location for orifice flow measurement.
- [4] Perry, Robert H. and Green, Don W. (1984). Perry's Chemical Engineers' Handbook (Sixth Edition ed.). McGraw Hill. ISBN 0-07-049479-7.
- [5] Chisholm, D., and Watson, G. C. (1966) The flow of steam/water mixtures through sharp-edged orifices