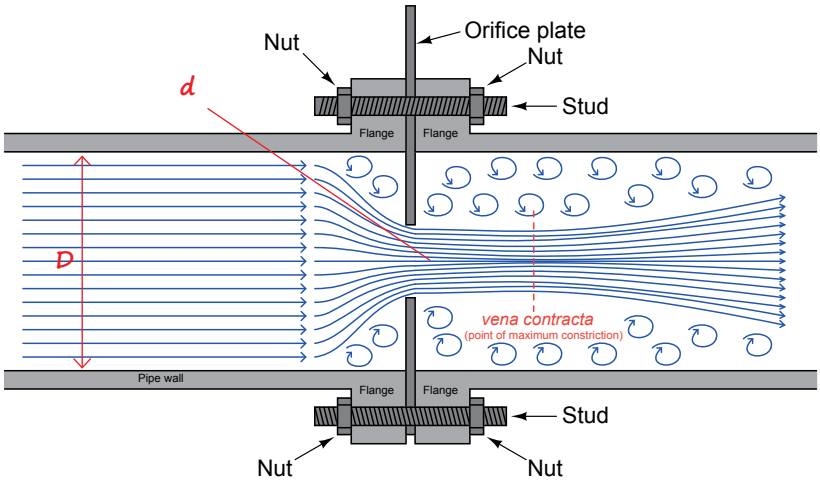
اویل ایندستری
Oilindustry.ir
CLICK HERE

تجهیزات اندازه‌گیری جریان سیال

قسمت دوم

تحقیق و نگارش: مهندس علی صفارشمشیرگر
مهندس یونس فلاح

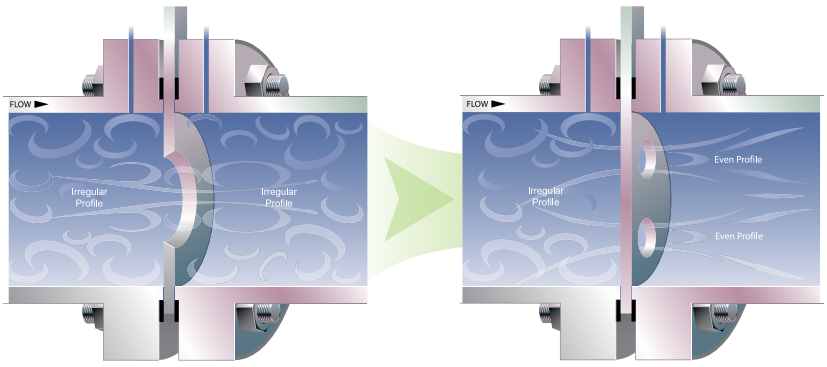
اندازه‌گیری جریان سیال از عصر باستان در زندگی بشر کاربرد داشته است. نزدیک به ۷۰۰۰ سال پیش، سومری ها در بین‌النهرین (Mesopotamia) از اندازه‌گیری جریان سیال برای کنترل آب شهرهای کیش و اور که توسط دجله و فرات تامین می‌شد استفاده می‌کردند. آن‌ها با قراردادن مانعی عمودی در آب و کنترل سطح بالارفت و پایین رفت آب در آن، میزان دبی آب قنات‌هایی که به سمت شهر جاری می‌شد را تخمین میزدند. پس از آن درک انسان از رفتارهای مایعات و گازها بر اساس نظریات دانشمندان یونان قدیم، ارشمیدس و ارسطو شکل گرفت. بر اساس قانون ارشمیدس هر سیالی به جسمی که در آن قرار گرفته نیروی شناوری وارد می‌کند. اندازه نیرو برابر وزن سیال جابجا شده است. در سال ۱۶۸۷ قوانین نیوتون، پایه محاسبات فلومترهای جرمی تکانه زاویه‌ای (Angular Momentum) را بنا نهاد. در سال ۱۷۴۲ ریاضیدان فرانسوی ژان لو رون دالامبر (Rond d'Alembert) ثابت نمود که قانون سوم حرکت نیوتون علاوه بر اجسام ساکن برای اجسام متحرک نیز صادق است. در سال ۱۷۸۳ فیزیکدان سوئیسی، دانیل برنولی (Daniel Bernoulli) کتاب هیدرودینامیک خود را منتشر کرد. در این کتاب او مفهوم نگهداشت انرژی (Energy Conservation) برای دبی سیالات را بیان نمود. برنولی تعیین کرد که افزایش سرعت دبی یک سیال جاری، با انرژی جنبشی آن نسبت مستقیم و با انرژی استاتیک آن نسبت عکس دارد. بنابراین اگر در دبی سیال محدودیتی ایجاد شود، سرعت سیال افزایش پیدا می‌کند و همچنین سبب کاهش فشار استاتیک سیال در جریان خواهد شد. بعدها بر اساس این یافته فلومترهای اختلاف فشاری (Differential Pressure) ونتوری و اریفیس توسعه داده شدند. در سال ۱۸۳۱ مایکل فاراده قانون القاء الکترومغناطیسی را ثبت کرد. این کشف بزرگ پایه و اساس توسعه فلومترهای مغناطیسی در سال ۱۹۵۲ شد. در سال ۱۸۴۲ فیزیکدان استرالیایی کریستین داپلر (Christian Doppler) کشف کرد که اگر یک منبع صدا به سمت دریافت کننده در حرکت باشد، فرکانس برای دریافت کننده بیشتر خواهد شد. همچنین اگر منبع صدا و دریافت کننده در جهت عکس یکدیگر حرکت کنند، طول موج صدا بزرگتر خواهد شد. یک سال بعد مهندس عمران فرانسوی گاسپارد کوریولیس (Gaspard Coriolis) کشف کرد که به دلیل چرخش زمین، تمامی اجسامی که بر روی سطح آن حرکت می‌کنند تمایل به انحراف از مسیر دارند. تا سال ۱۹۷۰ باور کلی بر این بود که تغییر حالت جریان از حالت آرام (Laminent) به متلاطم (Turbulent) به صورت تدریجی انجام می‌شود. اما با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از مدل‌سازی آشفتگی سیال با سوپرکامپیوترها، مشخص شد که آشفتگی به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. از آنجایی که به طور معمول میان کشف یک قانون تا اختراع یک تکنولوژی سال‌های زیادی فاصله وجود داشته است، پس از گذشت یک قرن از کشفیات داپلر و کوریولیس ، فلومتر اولتراسونیک داپلری و فلومتر کوریولیس ساخته شدند. به طور کلی می‌توان گفت که اکثر پیشرفت‌ها در فلومترهای امروزی در ۳۰ سال گذشته اتفاق افتاده‌اند. در قسمت اول این مقاله، توضیحاتی در خصوص اصول محاسباتی فلومترها و مبانی انتخاب فلومتر مناسب ارائه شد. همچنین در مورد عملکرد فلومترهای سرعتی توربین، ورتکس و اولتراسونیک و فلومتر جرمی کریولیس توضیحاتی ارائه شد. در این قسمت نیز اندازه‌گیری بر مبنای اختلاف‌فشار که از متداولترین روش‌های اندازه‌گیری جریان سیال به شمار می‌رود بررسی می‌شود. همچنین عملکرد فلومترهای اختلاف فشاری ونتوری، نازل دبی، لوله دبی و صفحه اریفیس تشریح خواهد شد.



شکل ۱: مکانیزم اثر بر جریان به‌وسیله صفحه اریفیس

۱ صفحه اریفیس

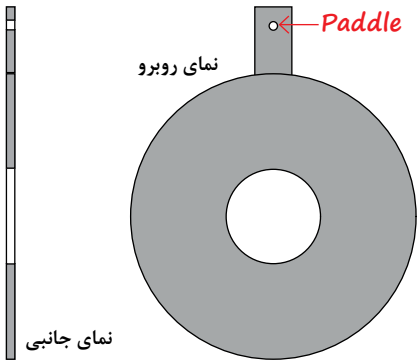
متداول‌ترین نوع از فلومترهای اختلاف فشاری، صفحه اریفیس (Orifice Plate) است. در این روش صفحه اریفیس که دارای یک یا چند روزنه عبوری است در مسیر جریان سیال قرار گرفته و سبب ایجاد محدودیت در عبور جریان می‌شود تا اختلاف فشار ایجاد شده، شرایط را برای محاسبات از طریق تئوری برنولی محیا کند. هزینه کم تولید این فلومتر و هزینه‌های نگهداری کم و سهولت در نصب در کنار دقت بسیار مناسب این فلومتر آنرا به یکی از متداولترین انواع فلومترهای Head-Type تبدیل کرده است. اندازه صفحه اریفیس به طور معمول به قطر لوله و دما و سرعت سیال عبوری بستگی دارد. به‌طور مثال برای لوله با قطر ۲ تا ۶ اینچ این صفحه با ضخامت ۰/۱۳ اینچ انتخاب می‌شود. همچنین در صورتی که دمای سیال عبوری از یک لوله با قطر ۱۰ اینچ، ۳۱۶ درجه سانتیگراد باشد، ضخامت صفحه اریفیس باید از ۰/۲۵ اینچ به بالا باشد. ویسکوزیته سیال که در عدد رینولدز منعکس می‌شود، تاثیر بسیار زیادی در اندازه گیری توسط صفحه اریفیس دارد(مخصوصاً در مقادیر پایین عدد رینولدز). زیرا تغییر شکل ایجاد شده در شکل جریان در نقطه Vena Contracta شکل ۱، اثر اینرسی است و کم شدن نسبت اینرسی به نیروهای اصطکاک (کم شدن عدد رینولدز) و تغییر متعاقب در مشخصه جریان، سبب کم‌شدن انقباض سیال در روزنه و افزایش ضریب جریان می‌شود. صفحه اریفیس بر اساس شکل، محل و تعداد روزنه‌های آن به سه نوع هم‌مرکز (Concentric)، غیرهم‌مرکز (Eccentric) و نیم‌بر (Segmental) تقسیم بندی می‌شوند. نوع هم مرکز برای استفاده در شرایط نصب عمودی مناسب است و دو نوع دیگر در برای نصب در شرایط افقی پیشنهاد می‌شوند. شکل های ۳ تا ۵ انواع مختلف صفحه اریفیس متداول را نشان می‌دهد. در نمونه‌های ارتقاء یافته این صفحه دارای ۴ روزنه می‌باشد که توسط شرکت Rosemount که هم‌اکنون از زیرمجموعه‌های شرکت Emerson محسوب می‌شود، توسعه داده شده است. با این طراحی ارتقاء یافته، طول لازم برای خط لوله مستقیم قبل و بعد از فلومتربه طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. شکل ۲ مقایسه مدل ارتقاء یافته Rosemount با نمونه معمولی این فلومتر است.



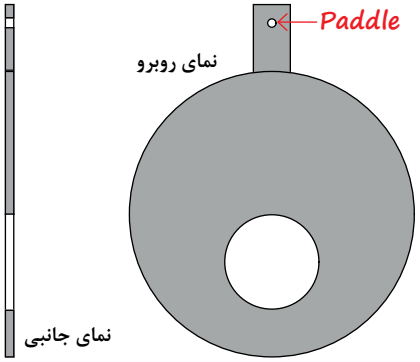
تاثیر صفحه اریفیس ارتقاء یافته Rosemount بر جریان

تاثیر صفحه اریفیس هم مرکز، بر جریان

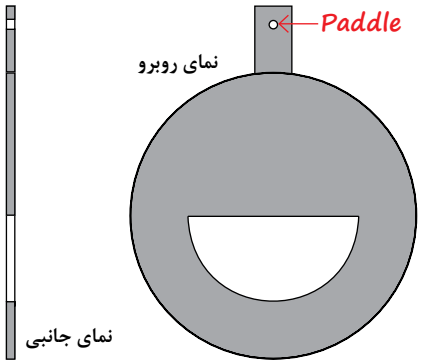
شکل ۲: طراحی ارتقاء یافته (Conditioning) شرکت Rosemount



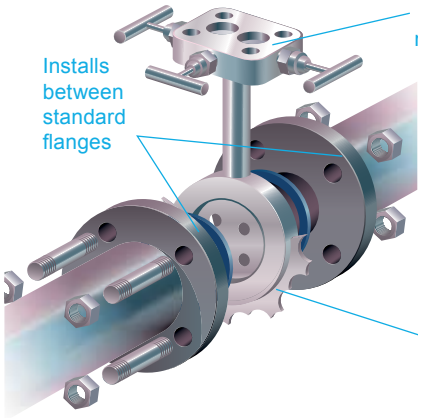
شکل ۳: صفحه اریفیس هم مرکز



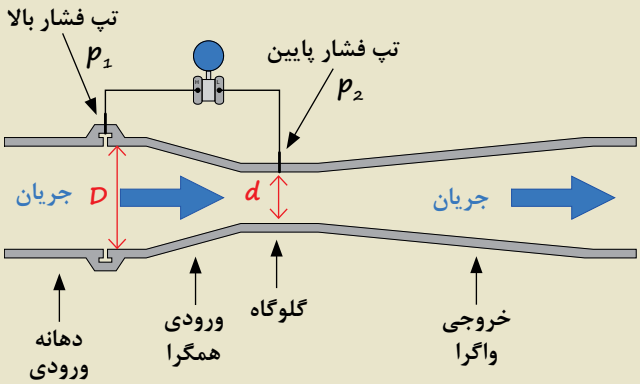
شکل ۴: صفحه اریفیس غیر هم مرکز



شکل ۵: صفحه اریفیس نیم‌بر



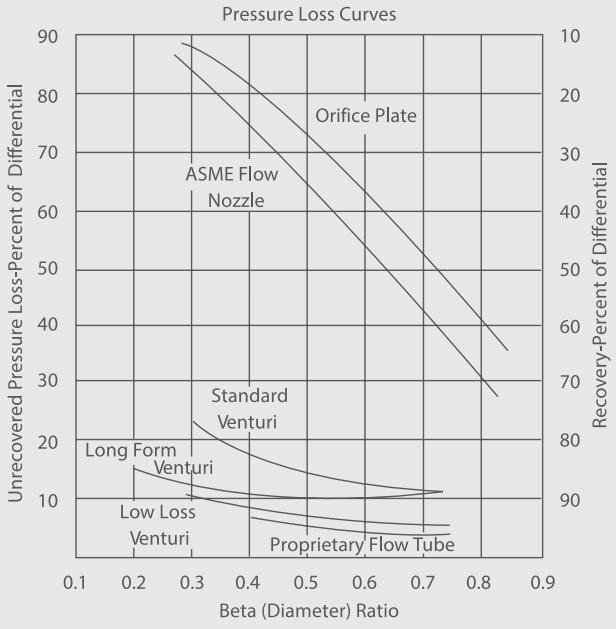
شکل ۶: طراحی ارتقاء یافته Conditioning



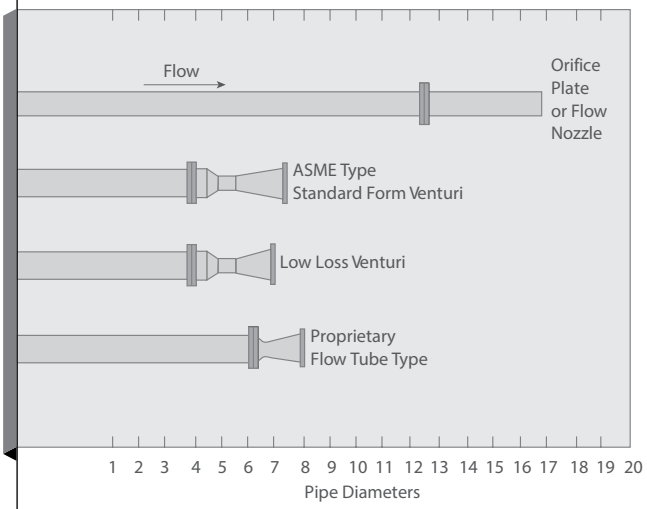
شکل ۷: ساختار داخلی لوله ونتوری و محل قرارگیری سنسورهای فشار

۲ فلومتر ونتوری

در سال ۱۸۸۷ اولین فلومتر ونتوری (Venturi Tube) توسط Clemens Harschel بر پایه تئوری برنولی طراحی شد که به آن فلومتر کلاسیک گفته می‌شود. این فلومتر اختلاف‌فشاری دارای یک قسمت ورودی مخروطی شکل همگرا است که در طول آن سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد. قسمت واگرای ونتوری فشار سیال را به حالت اولیه بر می‌گرداند. از افت فشار ایجاد شده در قسمت همگرای فلومتر می‌توان فلو جریان را بدست آورد. گلوگاه استوانه‌ای ونتوری مکان اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شده در واحد سطح است که اغلب از جنس برونز یا فولاد زد زنگ ساخته می‌شود. در مرحله اول فشار سیال ورودی به فلومتر به‌وسیله تپ فشار بالا اندازه‌گیری می‌شود و پس از آن فشار استاتیک در گلوگاه توسط تپ فشار پایین سنجش می‌شود. مشخصات کلی و محاسبات فلومتر ونتوری همانند صفحه اریفیس است. با این تفاوت که در لوله‌ونتوری تماس پیوسته بین سیال جاری با سطح داخلی فلومتر وجود دارد. از اینرو سیقلی بودن سطح داخلی بر ضریب عبور جریان Coefficient فلومتر تاثیر دارد، اگرچه این تاثیر بسیار جزئی کمتر از ۱ درصد می‌باشد. فلومتر ونتوری در مدل‌های کلاسیک هزینه‌های اولیه زیادی داشت. بنابراین برای دبی‌های زیاد مناسب‌تر بود. اما با این وجود در طولانی



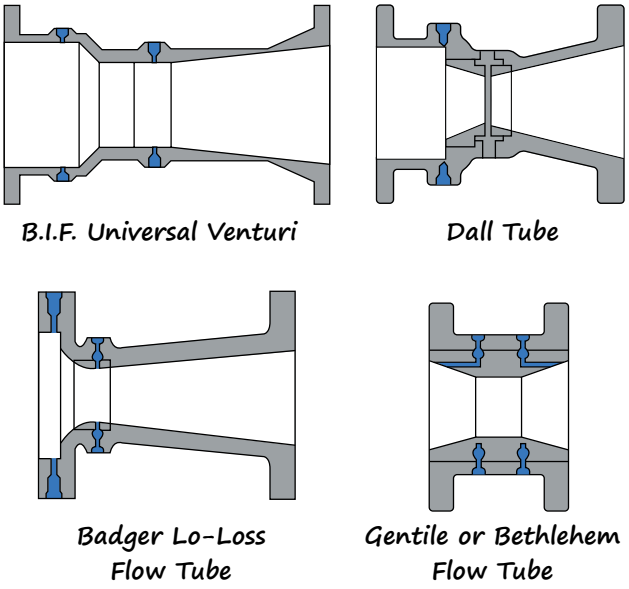
شکل ۸: منحنی‌های افت فشار



شکل ۹: مقایسه طول لوله مستقیم مورد نیاز در بالادست برای انواع فلومترهای اختلاف‌فشاری در شرایط وجود یک زانویی در بالادست و ضریب بتا ۰/۷

مدت به دلیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتر و بازدهی خوب این تجهیز، برایند هزینه‌ها مقرون به صرفه بود. مدل طراحی شده توسط هارشل دارای ورودی با زاویه کم و خروجی بسیار طولانی بود با ضریب عبور جریان ۰/۹۸۴ و خطای ۰/۷۵ درصد بود. ضریب عبور جریان از لوله ونتوری در مقایسه با صفحه اریفیس حدود ۶۰ درصد بیشتر می‌باشد. بنابراین بازیابی فشار توسط لوله ونتوری بسیار بهتر از صفحه اریفیس انجام می‌شود. اما این عدد در مقادیر کم عدد رینولدز بسیار متفاوت خواهد بود. مدل ارتقاء یافته ونتوری در دهه ۱۹۵۰ تحت عنوان نسل دوم یا ونتوری کوتاه Short Form طراحی و ساخته شد، که در آن طول خروجی لوله ونتوری کمتر شده و زاویه ورودی نیز بیشتر شده است، که حاصل آن وزن کمتر تجهیز و هزینه‌های نصب کمتر است. شکل ۱۰ ساختار ونتوری کوتاه را نشان می‌دهد. فلومتر ونتوری کوتاه دارای ضریب عبور جریان ۰/۹۸۵ و خطای ۱/۵ درصد است. فلومترهای ونتوری، در مواردی که نیاز به افت فشار کم و دقت بالای اندازه‌گیری است استفاده می‌شوند. همچنین در لوله های قطور، شبیه مواردی که درصنایع آب وفاضلاب یافت می‌شود به کار می‌روند. زیرا شیب ملایم آن به جامدات معلق در مایع اجازه حرکت می‌دهد. لذا برای اندازه‌گیری پساب‌ها و دوغاب‌ها (یا به عبارتی مایعات ویسکوز یا حاوی مقدار زیادی از جامدات چسبناک) به دلیل نداشتن هیچ گونه حفره در سطح داخلی مناسب هستند. گستره اندازه‌گیری کوچک، ایجاد افت فشار در لوله‌های با مقطع کم، نیاز به فضای زیاد برای نصب(به‌ویژه مدل کلاسیک) و احتمال مسدود شدن در شرایط وجود هیدرات‌ها در خط از جمله معایب این نوع فلومتر به شمار می‌روند. نمودار یک میزان افت فشاری که انواع مختلف فلومتر ونتوری در مقایسه با صفحه اریفیس ایجاد می کند را نشان می‌دهد. ونتوری به اثر مشخصه سرعت(تاثیرات سرعت عرضی) حساس نیست بنابراین به طول لوله مستقیم کمتری قبل و بعد از فلومتر به نسبت دیگر فلومترهای اختلاف‌فشاری برای تثبیت جریان نیاز دارد. همچنین تنها محدودیتی که در پایپینگ پایین‌دست ایجاد می کند، مجاز نبودن نصب شیر در فاصله نزدیک‌تر از دو برابر قطر لوله است. مقدار تقریبی دبی جرمی با در نظر گرفتن ضریب تخلیه ۰/۹۹۵ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

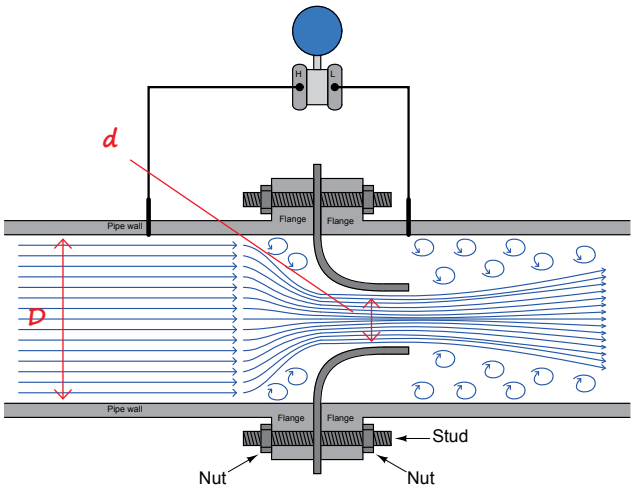
$$W = 353 d^2 \sqrt{\frac{h\rho}{1-\beta^4}} \qquad \text{رابطه ۱}$$



شکل ۱۰: طراحی‌های خاص ونتوری

۳ لوله جریان

نمونه کلاسیک فلومتر ونتوری Harschel بعدها به صورت گسترده‌ای تحت عنوان لوله جریان (Flow Tube) توسعه یافت. تا از این طریق ضمن ارتقاء دقت اندازه گیری، محدودیت‌هایی از قبیل طول لوله مستقیم مورد نیاز بالادست و پایین دست، کاهش یابد. اما همه مدل‌های توسعه یافته از روش اصلی ونتوری مبتنی بر ایجاد اختلاف فشار به‌وسیله عبور دادن سیال از یک مقطع کوچکتر از مقطع لوله پیروی می کنند و تنها درساختار داخلی، محل قرارگیری تپ‌های فشار، مقدار اختلاف‌فشار تولیدی و میزان افت فشار غیر قابل بازیابی تفاوت‌هایی با فلومتر ونتوری کلاسیک دارند. لوله‌های جریان عمدتاً طول کمتری به نسبت لوله ونتوری دارند. همچنین این طراحی‌ها بازیابی فشار بهتری به نسبت ونتوری انجام می‌دهند و در واقع افت فشار بازگشت‌ناپذیر کمتری دارند. چند نمونه از این طراحی‌های خاص ونتوری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به طور مثال مدل یونیورسال این فلومتر دارای دو نقطه Vena Contracta است که بر این اساس حساسیت کمتری به پایپینگ بالادست خواهد داشت و از دقت بیشتری نیز برخوردار است. لوله‌های جریان از ۴ تا ۴۸ اینچ طراحی و ساخته شده‌اند، اما در اندازه‌های بزرگ مناسب‌تر هستند.



شکل ۱۱: ساختار فلومتر نازل دبی و مکانیزم اثر آن بر جریان سیال

۴ نازل جریان

نوع دیگری از فلومترهای اختلاف‌فشاری که بر پایه لوله ونتوری طراحی شده، نازل جریان (Flow Nozzle) است. این فلومتر طراحی شده تا ویژگی سهولت در نصب را مانند صفحه اریفیس داشته باشد و بتوان آنرا توسط فلنج و اتصالات در مقطعی از لوله نصب نمود، در حالی که دقت اندازه گیری بیشتری به نسبت اریفیس داشته باشد و همچنین افت فشار برگشت ناپذیر آن نیز کمتر باشد. دو نوع از این فلومتر ساخته شده است. مدل ISA 1932 توسط انجمن استانداردسازی بین‌الملل که بعدها به ISO تغییر نام داد، طراحی شد. در طراحی این فلومتر که یک نمونه اروپایی است، ورودی قسمت ایجاد کننده اختلاف‌فشار (مقطع d در شکل) همانند لوله ونتوری وجود دارد، اما قسمت واگرای خروجی حذف شده است. اما نوع دیگری که مدل توسعه یافته ISA 1932 است، قسمت واگرای ونتوری را نیز به همراه دارد و به آن Long Radius Nozzle گفته می‌شود. کاربرد این فلومتر در سیال‌هایی با سرعت، دما و آشفتگی زیاد (عدد رینولدز بیش از ۵۰۰۰) است. شکل ۱۱ ساختار فلومتر نازل جریان و مکانیزم اثر آن بر جریان سیال عبوری را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ضریب تخلیه ۰/۹۹۳ می توان دبی جرمی تقریبی را از رابطه زیر بدست آورد:

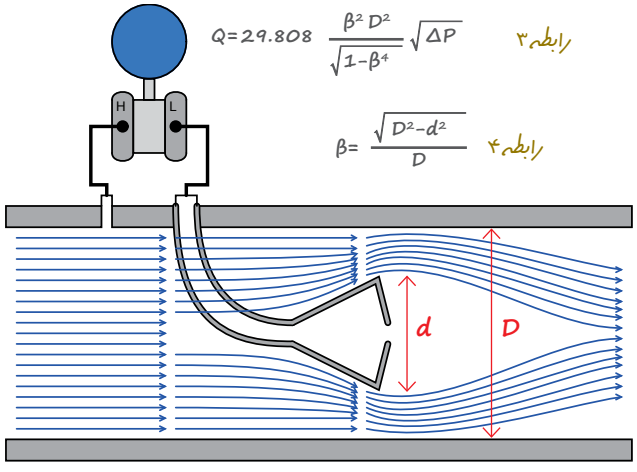
$$W = 358 d^2 \sqrt{\frac{h\rho}{1-\beta^4}} \qquad \text{رابطه ۲}$$

۵ مخروط ونتوری

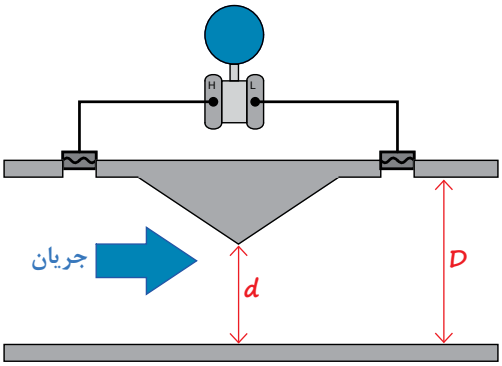
نوع دیگری از فلومترهای اختلاف‌فشاری که بر پایه لوله ونتوری طراحی شده، V-Cone، یا مخروط ونتوری نام دارد. محدود کردن جریان در این فلومتر به صورت عکس فلومتر ونتوری انجام می‌شود. به نحوی که در لوله ونتوری سطح مقطع جریان از محیط لوله به سمت مرکز محدود می‌شود و مقطع عبوری جریان محدود شده در وسط قرار دارد. اما در مخروط V، این محدودیت توسط مخروط تو خالی در مرکز ایجاد شده و جریان از طرفین آن عبور می کند. اما مکانیزم اثر آن‌ها بر جریان عبوری یکسان خواهد بود. شکل ۱۵ نمونه‌ای از مخروط V که برای نمایش برش خورده است را نشان می‌دهد. این فلومتر جهت اندازه‌گیری مایعات، گازها و بخار قابل استفاده می‌باشد و برای لوله‌های ۰/۵ تا ۷۲ اینچ موجود و قابل نصب است. نمونه طراحی ارتقاء یافته V-Cone فلومتری به نام Wafer-Cone نیز برای لوله‌های ۰/۵ تا ۶ اینچ ساخته شده است. دبی جرمی و ضریب بتا از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$Q = 29.808 \frac{\beta^2 D^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\Delta P} \qquad \text{رابطه ۳}$$

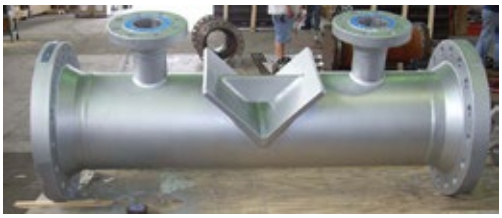
$$\beta = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D} \qquad \text{رابطه ۴}$$



شکل ۱۲: ساختار فلومتر V شکل و مکانیزم اثر آن بر جریان سیال



شکل ۱۳: فلومتر قطعه گوه و محل قرارگیری سنسورهای جریان



شکل ۱۴: نمای بیرونی فلومتر قطعه گوه

۶ قطعه گوه

نوع دیگری از فلومترهای اختلاف‌فشاری که بر پایه لوله ونتوری طراحی شده، قطعه گوه Segmental Wedge است که در آن، برای محدود کردن مقطع جریان به جهت ایجاد افت فشار، از یک تیغه مثلث شکل استفاده می‌شود. این نوع از فلومترها معمولاً جهت اندازه‌گیری دبی دوغاب‌ها و سیالات ویسکوز با عدد رینولدز بالای ۵۰۰ استفاده می‌شود. برای لوله‌های ۰/۵ تا ۲۴ اینچ موجود و قابل نصب است. مکانیزم اثر این فلومتر بر جریان به صفحه اریفیس قطعه‌ای شباهت دارد، با این تفاوت که در قطعه گوه، افت جریان بر روی ضلع گوه به تدریج انجام می‌شود. قطعه گوه برای سیال‌های تمیز با گوشه‌های تیز و جهت دوغاب‌ها و سیالات ویسکوز با انحنای بیشتر به کار برده می‌شود.

ادامه دارد

منابع

1: Instrument Engineers' Handbook - Process Measurement and Analysis, Bela G. Liptak, Third edition, ISA 2002

2: Guideline on Flare and Vent Measurement/ prepared for GGFR and World Bank, Clearstone Engineering Ltd.

3: Lessons In Industrial Instrumentation, Tony R. Kuphaldt, Version 0.2, September 2008

4: www.omega.com

5: www.emersonprocess.com

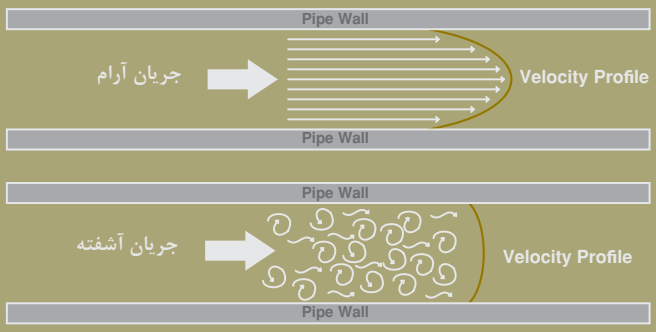
6: www.abb.com

7: Improve Material Balance by Using Proper Flowmeter Corrections, Peramanu, S.; Wah, J. C., Canadian Natural Resources Ltd., Calgary, Canada, 2011, Hydrocarbon Processing.

» عدد رینولدز

مفهوم عدد رینولدز (Reynolds Number) ابتدا در سال ۱۸۵۱ توسط ریاضی‌دان و فیزیک‌دان ایرلندی جورج گابریل استورکس (George Gabriel Stokes) مطرح شد. اما در سال ۱۸۸۳ توسط دانشمند دینامیک سیالات، ازبورن رینولدز (Osborne Reynolds) عمومیت پیدا کرد. عدد رینولدز کمیتی بی‌بعد است که در مکانیک سیالات به صورت نسبت نیروع اینرسی به ویسکوزیته تعریف می‌شود. این عدد نشان‌دهنده ماهیت جریانی است که تحت دو عنوان آرام (Laminar) و آشفته (Turbulent) بیان می‌شود. اگر عدد رینولدز کوچکتر از مقدار مشخصی باشد، جریان آرام و بالاتر از آن جریان آشفته نام خواهد گرفت. عدد رینولدز در یک لوله با قطر d که سیالی با سرعت متوسط V و ویسکوزیته دینامیکی μ و دانسیته ρ در آن جریان دارد عبارتست از:

$$R_e = \frac{\rho.V.d}{\mu}$$ رابطه ۵



میزان کارایی فلومترها به شرایط سیال عبوری و در واقع عدد رینولدز بستگی دارد.

» محاسبات فلومترهای اختلاف‌فشاری

اصول محاسبات فلومترهای اختلاف‌فشاری بر قانون برنولی بنا شده است.

$$-\Delta P \propto V^2$$

افت فشاری که در فلومتر ایجاد می‌شود، متناسب است با مجزور جریان سیال. رابطه ۲ از این قانون نتیجه‌گیری شده است. فاکتورهای این رابطه در شکل‌های ۱ و ۷ نشان داده شده‌اند. این رابطه برای محاسبات فلومتر ونتوری، صفحه اریفیس و نازل جریان صادق است.

$$Q_{Act.\ Vol.} = C_d\, E_u\, Y \left[\frac{\pi d^2}{4}\right] \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho}}$$ رابطه ۶

در این رابطه:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$E_u = \frac{1}{1-\beta} \qquad \beta = \frac{d}{D}$$

E_u = ضریب سرعت

C_d = ضریب تخلیه

ρ = چگالی در موقعیت ۱

d = قطر گلوگاه

D = قطر لوله

Y = ضریب انبساط گاز

دبی جرمی نیز توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W = Q \cdot \rho$$