

## اصول عملکرد فلومترها

برگردان: مهندس هومن فرج‌الهی

در این مقاله ویژگی‌های جریان سیالات<sup>۱</sup> و تفاوت اصول کاری فلومترها<sup>۲</sup> یا به عبارت دیگر جریان‌سنج‌های گوناگون تشریح شده است. به منظور ایجاد یک زمینه فنی مناسب در ذهن خواننده مبانی ریاضی مرتبط با موضوع نیز ارائه شده است. مباحث مطرح شده از اهمیت بسیاری برای درک سامانه‌های ابزار دقیق و موجود در فرآیندهای صنعتی برخوردارند. همچنین از این مباحث می‌توان به عنوان مبنایی برای پیاده‌سازی سامانه‌های حسگر هوشمند استفاده کرد. در بخش اول اهمیت اندازه‌گیری جریان و همچنین مبانی کارکردی روش‌های اندازه‌گیری جریان جرمی و حجمی بیان می‌شود. در انتها تحلیلی خلاصه از خطاهای اندازه‌گیری جریان و روش‌های جبران خطا و همچنین شرحی پیرامون جریان‌سنج‌های هوشمند ارائه خواهد شد.

دقت این اندازه‌گیری اثر بگذارند. معمولاً دقت جریان‌سنج‌ها بین ۰/۲ تا ۵ درصد کل بازه‌ی اندازه‌گیری<sup>۳</sup> (FSR) است.

تمام جریان‌سنج‌ها دارای اصول کاری مشابه نیستند و انتخاب بهترین وسیله کار مهندسی ساده‌ای نیست. جریان‌سنج‌ها را براساس اصول کار می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

- حجمی،
- جرمی،
- استنتاجی<sup>۴</sup>
- سرعتی

جریان‌سنج‌های حجمی و جرمی، جریان را به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کنند. انواع استنتاجی به طور غیرمستقیم عمل اندازه‌گیری را انجام می‌دهند و خود به دسته‌های فشار تفاضلی، سطح متغیر و هدف<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند. آن‌ها جریان سیال را براساس پدیده‌های فیزیکی دیگر اندازه‌گیری می‌نمایند. انتخاب بهترین جریان‌سنج کار ساده‌ای نیست. برای این کار

### واژه‌های کلیدی

اندازه‌گیری  
ابزار دقیق  
فلومتر

### اهمیت و کاربردهای اندازه‌گیری جریان سیالات

جریان سیال اهمیت بسیار زیادی در اندازه‌گیری‌های صنعتی دارد. زیرا مقدار آن بر متغیرهای دیگری مانند فشار، سطح، دما و غلظت شیمیایی اثرگذار است. اندازه‌گیری فشار به منظور کارکرد و عملیات درست سامانه و همچنین اطمینان از بهینه بودن کیفیت با توجه به هزینه، ضروری و لازم است [۱ و ۲]. اندازه‌گیری جریان کار ساده‌ای نیست. حتی اگر اثر خطاهای ناشی از نویز، لرزش و گرد و غبار را در نظر نگیریم، خطاهای ناشی از نصب می‌توانند بر

جدول ۱- انواع فلوئترها و ویژگی‌های اصلی آنها

نوع فلوئتر	روش کار	کمیت‌های قابل اندازه‌گیری	مزایا	معایب	نام وسیله‌ی اندازه‌گیری
فشار تفاضلی	افت فشار ناشی از مقاومت لوله	حجم (کاربرد گسترده، تقریباً تمام گازها و مایعات با گرانیروی پایین)	قیمت پایین، دامنه‌ی کاربرد گسترده، استواری و تنوع	وابستگی به مربع ریشه، اثرپذیری از تغییرات فشار و چگالی، افت فشار زیاد (به جز ساختار نازل)	اوریفیس، نازل، ونتوری، زانویی، cone-V، ونتوری، پیتوت، annubar
توربینی	وسيله‌ی دوار	حجم (سیالات روان‌ساز مانند روغن)	عدم نیاز به منبع تغذیه، امکان کار با دما و فشار بسیار بالا، قابل استفاده برای گاز	فقط برای سیالات با گرانی- روی پایین، وجود قطعات متحرک، حساس به لرزش و ناخالصی	رتور منفرد، رتور دوگانه، چرخ بره‌دار، ملخی، مماسی
سطح متغیر	تعادل دینامیک (ضربه، وزن و کشش)	حجم (مایعات و گازهایی با چگالی کافی)	قیمت پایین، عدم نیاز به منبع تغذیه، سادگی، گسترده‌ی	نصب عمودی، افت فشار ثابت (دقت کم در فشارهای پایین)، اثرپذیری از تغییرات فشار و چگالی	روتامتر- انواع مختلف بسته به طراحی شناور و المان اندازه‌گیر
مغناطیسی	القای الکترومغناطیسی	حجم (تقریباً تمام موارد تا زمانی که رسانایی بالاتر از حد آستانه باشد)	عدم وجود قطعه‌ی متحرک، غیرتهاجمی، عدم افت فشار، عدم وابستگی به شکل جریان، عدم تأثیرپذیری از تغییرات دما، چگالی، رسانایی و غلظت	فقط برای مایعات کاربرد دارد، رسانایی باید از حد مشخصی بیشتر باشد ( $0.05 \mu\text{cm/s}$ )	DC مغناطیسی، بدون الکتروود، دو سیمه نسبتاً کامل
نوسانی	اثر coand	حجم (جریان مایعات زیادی را می‌توان با آن اندازه‌گیری کرد به شرط آن‌که $R_N$ بالاتر از مقدار آستانه باشد)	عدم وجود قطعات متحرک، استواری، مناسب برای سیالات مختلف (گاز، مایع، بخار)، رابطه‌ی خطی بین اندازه‌گیری و شار سیال	برای سیالاتی با سرعت بیشتر از $R_N$ مناسب است، باید گرانیروی سیال بیشتر از مقدار آستانه باشد، عملیات پیچیده‌ای باید بر روی سیگنال انجام شود	فلویدیک ورتکس
هدف (target)	نیروی وارد بر یک جسم ثابت (هدف) از سوی سیال	حجم (سیالات تمیز، حداقل جابه‌جایی مورد نیاز است)	هزینه‌ی پایین، عملکرد خود در لوله‌های بزرگ	محدودیت $R_N$ ، سرعت سیال، ماده‌ی سازنده، دقت پایین، امکان کالیبراسیون تقریباً وجود ندارد	هدف
جابه‌جایی مثبت	اندازه‌گیری حجم سیال ثابت در هر چرخش	حجم (مایعات تمیز و غیر سوزنده)	دقت بالا، عدم نیاز به منبع تغذیه، عملیات دو طرفه، عدم محدودیت $R_N$	فقط برای مایعات، افت فشار زیاد، قطعات متحرک، حساسیت به ناخالصی و بار بیش از حد	دنده‌ی حلزونی، دیسک Nutating، پیستون oval، نوسان، دنده‌ی چرخشی
مافوق صوت	امواج صوتی یا ارتعاش	حجم (مایعات تمیز و برخی گازها)	عدم وجود قطعات متحرک، می‌تواند غیرتهاجمی باشد (مبدل‌ها بیرون لوله هستند)، عدم افت فشار، رابطه‌ی خطی بین اندازه‌گیری و شار سیال، تنظیم آنلاین	دقت بالا فقط برای مایعات، خطاهای ناشی از ته نشین شدن، خطای ناشی از حباب‌های گاز، اثرپذیری از صدا، سرعت، دما، غلظت و چگالی	دایر، زمان گذار، تکرار پالس

تعبیه‌ای (insertion)	اندازه‌گیری سرعت سیال در موقعیت‌های بحرانی (مانند محور لوله‌ها)	حجم (مایعات، گاز و بخار در لوله‌های بزرگ)	بستگی به نوع مبدل دارد زیرا می‌توان آن را تقریباً براساس اصول کاری تمام جریان‌سنج‌ها پیاده‌سازی کرد	فقط لوله‌های بزرگ، برای دقت نیازمند پردازش‌های بیشتر است. محدودیت RN (شار یا اغتشاش)، افت فشار زیاد	برای هر نوع مبدل یکی وجود دارد (بسته به اصول اندازه‌گیری)
همبستگی	همبستگی داده‌های اندازه‌گیری به دست آمده از نقاط مختلف	حجم (بسته به جریان‌سنجی که برای مقاصد همبستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد)	معمولاً به صورت غیر تهاجمی عمل می‌کند	بستگی به نوع جریان‌سنجی دارد که مورد استفاده قرار می‌گیرد	برای هر یک از روش‌های اندازه‌گیری از یک المان خاص استفاده می‌شود
کانال باز	صفحه‌ی سیال بالای یک سد یا ارتفاعی متغیر با محدودیت (parshall)	حجم (معمولاً اندازه‌گیری شار مایعات در سامانه‌های آبیاری، زهکشی یا کارهای آبی)	تنها راه‌حل برای اندازه‌گیری در کانال‌های باز (مانند سامانه‌های آبیاری، جریان رودخانه)	افت فشار، کاربردهای محدود	Weirs, کاربرد Parshall
Coriollis	حفظ گشتاور زاویه‌ای	جرم (اندازه‌گیری مایعات، گازهای با محدودیت، موارد شیمیایی خطرناک، چگالی)	اندازه‌گیری جرم با دقت بالا، عدم محدودیت RN، عدم اثرپذیری از فشار، دما و چگالی	دقت قابل قبول فقط برای مایعات، حساسیت متغیر، اندازه‌ی بزرگ	Coriollis, هیدرولیک, Wheatstone پل
حرارتی	ویژگی‌های حرارتی مواد	جرم (جابجایی گازها)	اندازه‌گیری درست جرم، استواری برای کارهای صنعتی و وسایل نقلیه، بازه اندازه‌گیری زیاد	فقط برای گازها، اندازه‌گیری غیرخطی جرم، سیگنال خروجی غیرخطی، حساسیت به حباب	سیم داغ, Anemometer



باید اطلاعات زیر موجود باشد:

- فرآیندی که می‌خواهید اندازه‌گیری را بر روی آن انجام دهید.
  - ویژگی‌های سیال مورد اندازه‌گیری، دما و فشار سامانه، بازه‌ی اندازه‌گیری، طول مستقیم لوله‌های بخش بالا است و پایین است جریان‌سنج، دقت مورد نیاز، افت فشار، تغییر بازه‌ی اندازه‌گیری، اثرات گران روی سیال
  - جزئیات فناوری بکار رفته در جریان‌سنج.
- به عنوان مثال در یک جا ممکن است دانستن افت فشار ناشی از سامانه ضروری باشد (به عنوان مثال اندازه‌گیری بخار فشار بالای یک دیگ بویلر) ولی در جای دیگر افت فشار قابل چشمپوشی باشد (به عنوان مثال اندازه‌گیری شار آب یک رودخانه باکانال‌های باز).
- در جدول ۱ خلاصه‌ای از اصول کاری، کاربردهای عمده، معایب و اشکال مختلف جریان‌سنج‌ها ذکر شده است. بدیهی است اگر قابلیت‌های هوشمند برای هر جریان‌سنج وجود داشته باشد (خودآزمونی، خودکالیبراسیون، تعیین خودکار بازه،

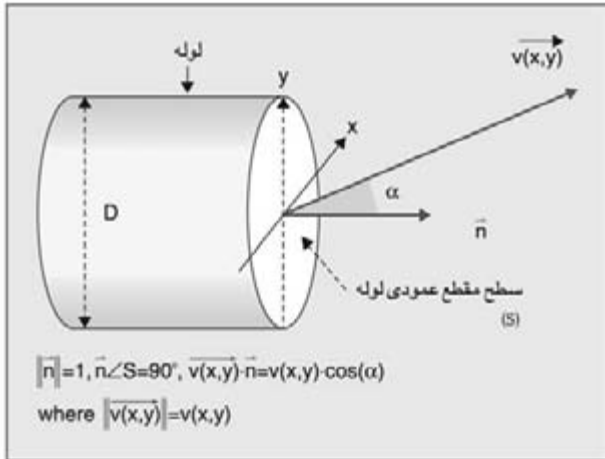
از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید:

$$Q_{VL} = \iint_S \overline{v(x,y)} \cdot \bar{n} \cdot dx \cdot dy \quad ۱.$$

که در آن **جه زنی** بردار سرعت سیال و  $\bar{n}$  بردار نرمال واحد عمود بر سطح است (برداری با بزرگی یک).  $dx$  و  $dy$  عناصر نامحدود سطح (همراستا با محورهای مختصات) هستند و عملگر بین بردارها، ضرب داخلی است. شکل ۱ را ببینید. در شرایط ایستا، هر دو بردار همراستا هستند ( $\alpha=0^\circ$ ) و رابطه‌ی ۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Q_{VL} = \iint_S v(x,y) \cdot dx \cdot dy \quad ۲.$$

که در آن  $v(x,y)$  بزرگی بردار سرعت است (شکل ۱ را ببینید).



شکل ۱- شکل لوله‌ای که در آن پارامترهای هندسی به منظور محاسبه‌ی جریان حجمی در سطح S (لوله) مشخص شده است. ما فقط با جریان در جهت  $\bar{n}$  کار داریم.

با استفاده از فرمول‌های استاندارد، می‌توان چهار پروفایل سرعت جریان حجمی را بررسی و تحلیل نمود. پروفایل سرعت سیال به عدد رینولدز ( $R_N$ ) بستگی دارد. عدد رینولدز متغیری بدون بعد است که براساس رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:



شناسایی خودکار، قابلیت تطبیق، ذخیره و کار با داده‌های تاریخی و غیره) می‌توان برای هر نوع جریان سنج، نسخه‌ی هوشمند آن را نیز ارایه کرد.

**اندازه‌گیری مستقیم جریان سیال: فلومترهای حجمی و جرمی**  
در کاربردهای صنعتی، اندازه‌گیری مستقیم جریان سیال کار متداولی است. با این وجود باید مشخص شود در فرآیند کنترل جریان، جرم مهم است یا حجم. حتی با در نظر گرفتن شرایط ایده‌آل، تغییرات چگالی سیال می‌تواند بر اندازه‌گیری حجمی اثرگذار باشد [۵].

#### اندازه‌گیری حجمی جریان سیال

جریان حجمی، حجم گاز یا مایعی را که از مقطع عمودی مجاری سیال (لوله) برحسب واحد زمان می‌گذرد اندازه‌گیری می‌نماید. برای سادگی ما فقط جریان مایعات را در نظر می‌گیریم. چرا که معمولاً تراکم و حساسیت به تغییرات دما و فشار برای مایعات در نظر گرفته نمی‌شود. با پذیرش خطای کمتر از ۵ درصد در صورتی‌که حداکثر سرعت جریان کمتر از ۳/۰ ماخ باشد می‌توان تمام مایعات را تراکم ناپذیر در نظر گرفت. عدد ماخ از تقسیم سرعت سیال بر سرعت صوت (سرعت صوت در سیال) به دست می‌آید. با افزایش ماخ، عواملی از قبیل تراکم، تغییرات دما و فشار نیز برای اندازه‌گیری دقیق جریان باید در نظر گرفته شوند. شار حجمی سیال ( $Q_{VL}$ ) در سطح عمود بر مسیر جریان S،

حالت ۱. پروفایل سرعت یکنواخت: در این حالت سرعت سیال در سطح S ثابت است و توسط پیکانی که از لوله با سطح مقطع S بیرون می‌آید نشان داده می‌شود (شکل ۲-الف). از آن جایی که سرعت در طول خط قطری S ثابت است، پروفایل سرعت مستطیلی است (شکل ۲-ب). در نتیجه مقدار شار حجمی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$Q_{VL} = V \cdot A = V \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \quad .4$$

در این عبارت V بزرگی سرعت، S سطح مقطع لوله و D قطر لوله است. براساس رابطه‌ی ۱، واحد  $Q_{VL}$  در SI، مترمکعب بر ثانیه است (همان طور که انتظار می‌رفت).

حالت ۲- سرعت سهموی: در این حالت، سرعت مایع در سطح S متغیر است و توسط پیکانی که از لوله بیرون می‌آید نشان داده می‌شود. سرعت در بخش درونی لوله بیشتر است و با نزدیک شدن به کناره‌های آن در طول خط قطری به سمت صفر میل می‌کند (شکل ۳). سرعت این نوع جریان، سهموی است. با استفاده از معادله‌ی منحنی سهمی به عبارت زیر می‌رسیم:

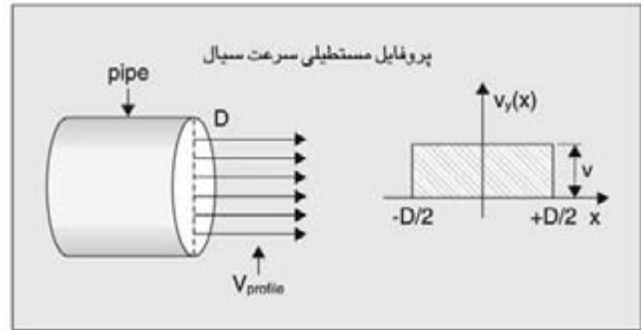
$$V_y(x) = (V_y)_{max} \cdot \left(1 - \frac{4}{D^2} \cdot x^2\right) \quad .5$$

با استفاده از تعریف شار حجمی از رابطه‌ی (۲) می‌توان بزرگی متوسط بردار سرعت و شار حجمی را از روابط زیر به دست آورد:

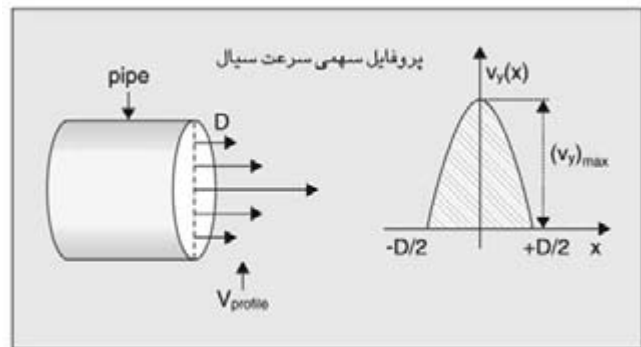
کاربرد اصلی	دیاگرام
سوئیچگیر و کنترل و دستگاه‌های شاخص، سامانه‌های کنترلی.	

$$Q_{VL} = \frac{(V)_{av}}{4} \cdot \pi \cdot D^2$$

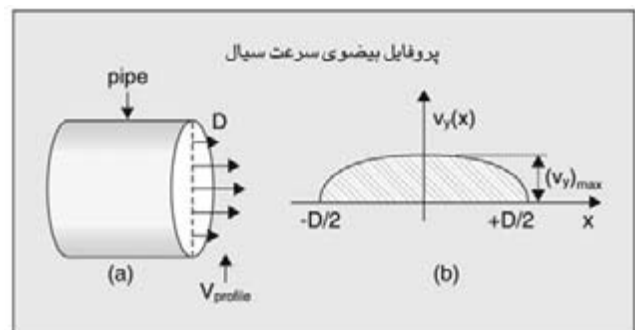
حالت ۳- سرعت بیضوی: در این حالت نیز سرعت مایع در سطح S متغیر و در بخش درونی لوله بیشتر است. با نزدیک شدن به کناره‌های آن در طول خط قطری به سمت صفر میل می‌کند. در



شکل ۲. پروفایل سرعت یکنواخت در سطح مقطع S مسیر جریان



شکل ۳. پروفایل سرعت سهموی در سطح مقطع S مسیر جریان



شکل ۴. سرعت بیضوی در سطح S مسیر جریان

$$R_N = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad .3$$

در این رابطه،  $\rho$  نشان‌دهنده‌ی چگالی سیال،  $v$  سرعت،  $D$  قطر لوله و  $\mu$  درجه‌ی گرانروی سیال است. معمولاً برای  $R_N$  کمتر از ۲۰۰۰، رژیم سرعت به صورت لایه‌ای (سرعت سهموی) و برای  $R_N$  بیشتر از ۴۰۰۰ رژیم سرعت متلاطم<sup>۷</sup> است (سرعت بیضوی). اگر  $R_N$  بین ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ باشد، حالت سرعت به صورت گذاری<sup>۸</sup> است.

$$(V)_{av} = \frac{\pi}{4} \cdot (V_y)_{max} \quad .8$$

$$Q_{VL} = (\pi/4)^2 \cdot D^2 \cdot (V_y)_{max}$$

به طور کلی می‌توان گفت ما در تمام حالت‌های فوق به نتیجه‌ی مشابهی رسیدیم؛ شار حجمی همیشه برابر است با ضرب سرعت متوسط در سطح عمودی مسیر سیال:

$$Q_{VL} = (V)_{av} \cdot A; (V)_{av} = \int_{x=-\frac{D}{2}}^{x=\frac{D}{2}} V_y(x) \cdot dx \quad .9$$

حالت ۴- پروفایل کلی سرعت: به طور کلی می‌توان از تقریب زیر برای سرعت استفاده کرد:

$$V_y(x) = (V_y)_{max} \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{R}\right)^n\right)^{\frac{1}{n}} \quad .10$$

که در آن  $R=D/2$  و  $n$  ضریبی است که به عدد رینولدز بستگی دارد:

$$n = 3/299 + 0.3257 \times \ln(R_N) \quad ; \quad R_N < 4 \times 10^5$$

$$n = 5/5365 + 5/498 \times (\ln(R_N))^5 \quad ; \quad R_N > 4 \times 10^5$$

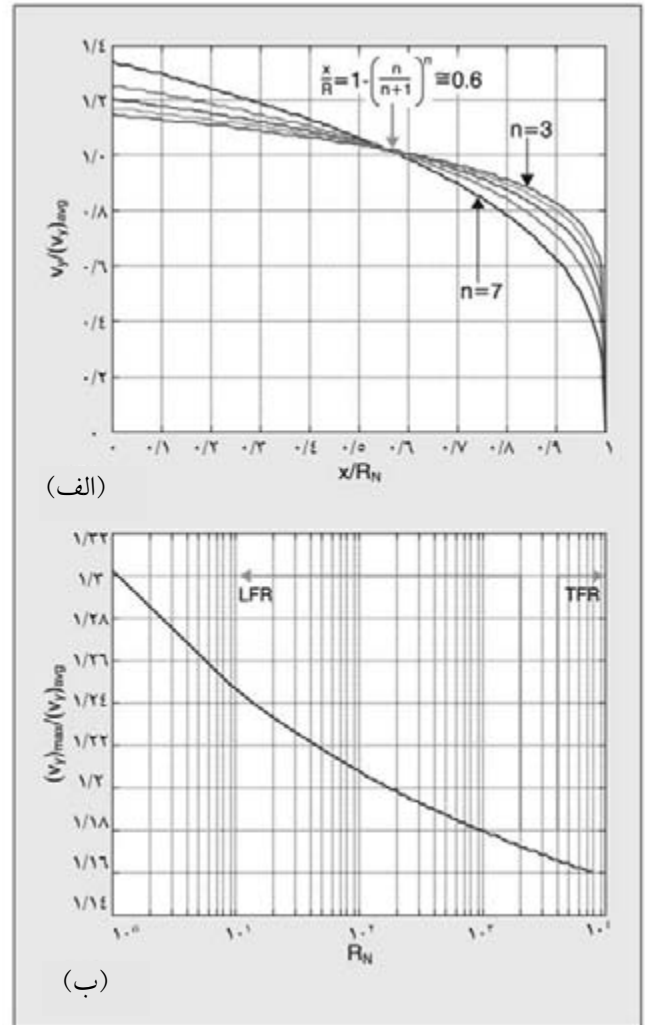
در این حالت میانگین بزرگی بردار سرعت و شار حجمی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$(V)_{av} = (V_y)_{max} \cdot \frac{n}{n+1} \quad .12$$

$$Q_{VL} = (V_y)_{max} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

از رابطه‌ی ۱۰ و ۱۲ می‌توان مقدار  $x$  را با شرط  $V_y(x) = (V_y)_{av}$  که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید، حساب کرد:

$$\frac{x}{R} = 1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^n \quad .13$$

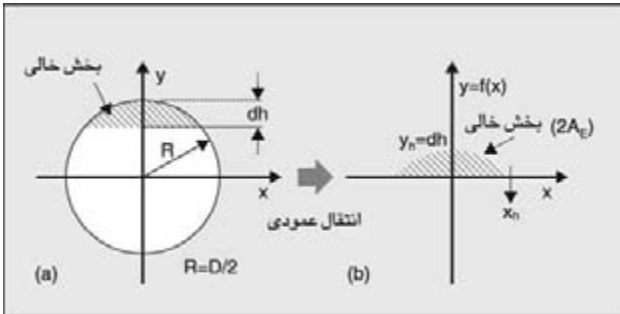


شکل ۵. الف- پروفایل کلی سرعت در طول خط مستقیم شعاعی در سطح مقطع مسیر سیال برای مقادیر صحیح  $n$  بین ۳ و ۷ ب- نسبت بین  $(V_y)_{max}$  و  $(V_y)_{av}$  به عنوان تابعی از عدد رینولدز

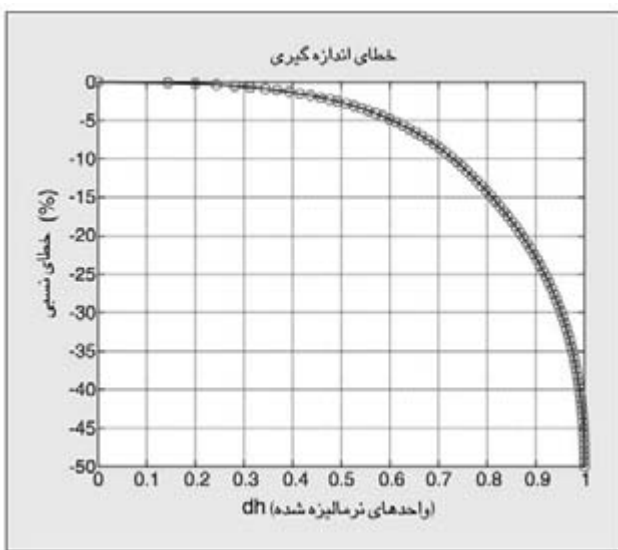
حالت بیضوی، تقریب نسبت حداکثر و میانگین شار کمتر است. شکل ۴ حالت سرعت بیضوی را توسط پیکان‌ها نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات سرعت در طول خط قطری لوله نشان داده شده است. با استفاده از معادله‌ی منحنی بیضی به عبارت زیر می‌رسیم:

دستگاه الکتریکی مرتبط	
گناه شامل مداراتی هم از نوع ذاتاً ایمن و هم غیر آن است	
EEx de [ib] IIC T6	[EEx ib] I

با استفاده از تعریف جریان حجمی از رابطه‌ی (۲) می‌توان بزرگی متوسط بردار سرعت و شار حجمی را با روابط زیر به دست آورد:



شکل ۶ الف- برش عرضی لوله که در آن متغیرهای هندسی مورد استفاده برای محاسبه‌ی خطای اندازه‌گیری مشخص شده‌اند ب- تبدیل عمودی بخش خالی لوله که متغیرهای آن مشخص شده است.



شکل ۷- خطای اندازه‌گیری (برحسب درصد) در لوله‌ای که ناقص پر شده است (dn- بزرگی نرمال شده‌ی بخش خالی)

در شکل ۵- الف حالت سرعت در سطح خط مستقیم شعاعی که در برش عمودی مسیر سیال وجود دارد نشان داده شده است. هر خط متناظر با ضریب  $n$  متفاوت و مقادیر متفاوت  $R_N(3)$  است. منحنی‌های متفاوت دارای واحدهای نرمال شده هستند و در تمام آن‌ها مقدار بزرگی متوسط بردار سرعت برابر یک است.

همان طور که انتظار می‌رفت، حداکثر سرعت سیال در محور لوله ( $x/R=0$ ) و حداقل سرعت در سطح داخلی لوله ( $x/R=1$ ) به دست می‌آید. با افزایش مقدار  $R_N$  یا افزایش مقدار  $n$  (در مثال ما  $n$  برابر ۷ است)، حالت سرعت سیال تقریباً بیضی یا حتی لگاریتمی است و نسبت  $(V_y)_{av}$  و  $(V_y)_{max}$  پایین‌تر است (شکل ۵- الف). از سوی دیگر با کاهش مقدار  $R_N$  یا  $n$  (در مثال ما  $n$  برابر ۳ است)، سرعت بیشتر سهمی می‌شود و نسبت بین  $(V_y)_{av}$  و  $(V_y)_{max}$  افزایش می‌یابد.

نکته‌ی مهم آن است که براساس رابطه‌ی ۳ وقتی که مقادیر سرعت سیال و قطر لوله با هم برابر هستند، کاهش نسبت جرم حجمی و گرانروی به معنای کاهش مقدار  $R_N$  است. برعکس این مسأله نیز صادق است.

نمودار شکل ۵- ب نشان‌دهنده‌ی نسبت  $(V_y)_{max}$  و  $(V_y)_{av}$  است. در این نمودار مقدار صحیح  $n$  بین ۳ تا ۷ تغییر می‌کند. در نتیجه مقادیر  $R_N$  برابر با  $0.4$ ،  $0.6$ ،  $0.8$ ،  $1.185$ ،  $1.3995$  و  $1.86096$  خواهد بود. همان طور که انتظار می‌رفت اگر  $R_N$  کمتر از ۲۰۰۰ باشد (حرکت شار ورقه‌ای، LFR) نسبت بین  $(V_y)_{max}$  و  $(V_y)_{av}$  بیشتر از زمانی است که  $R_N$  بیشتر از ۴۰۰۰ باشد (حرکت شار با اغتشاش، TFR).

#### خطای اندازه‌گیری در لوله‌هایی نیمه پر

به دلایل متفاوت ممکن است لوله به طور ناقص پر شده باشد، اگر فشار پمپ کمتر از حداقل آستانه باشد، اگر قطر لوله خیلی زیاد باشد و یا اگر خطای نصب وجود داشته باشد (مثلاً میزان طول لوله در بالا و پایین وسیله درست انتخاب نشده باشد). در این صورت ممکن است خطای اندازه‌گیری قابل توجه باشد. به منظور محاسبه‌ی خطای اندازه‌گیری تحت شرایط فوق، ما رابطه‌ی نظری بین بزرگی خطای اندازه‌گیری و میزان پر شدن ناقص لوله را به دست می‌آوریم (شکل ۶). با استفاده از شکل‌های ۶- الف و ۶- ب و محاسبات ریاضی در قسمت "محاسبه‌ی خطای اندازه‌گیری در لوله‌های نیمه‌پر به روابط زیر می‌رسیم:

$$F(x) = dh - R + \sqrt{R^2 - x^2} \quad (14)$$

$$x_h = R \sqrt{1 - \left(\frac{R - dh}{R}\right)^2}$$

$$y_h = dh$$

$$A_E = (dh - R) \cdot x_h + \frac{x_h}{2} \sqrt{R^2 - x_h^2} + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{dh}{R}\right)$$

$$\eta_E = 100 \cdot \frac{-2 \cdot A_E}{\pi \cdot R^2}$$

در این رابطه  $dh$  ارتفاع بخش خالی،  $f(y)$  تابع حرکت بخش خالی،  $R$  شعاع لوله،  $A_E$  نصف مساحت بخش خالی و خطای

به عنوان مثالی عملی، در شکل ۸ فلومتر الکترومغناطیسی ای نشان داده شده است که برای اندازه‌گیری شار در لوله‌ای که ناقص پر شده است استفاده می‌شود. اگر خطای ناشی از پر شدن ناقص جبران نشود، دقت اندازه‌گیری بسیار پایین خواهد بود. ولی اگر از فلومتر مغناطیسی که ارتفاع سیال را در داخل لوله اندازه‌گیری می‌کند استفاده کنیم، دقت حتی برای لوله‌ای که ناقص پر شده است بهبود خواهد یافت [۵]. این فلومترها سیگنالی خارجی متناسب با سرعت سیال تولید می‌کنند (با دامنه‌ی درحد چند میلی ولت). در شکل ۹ اصول کاری فلومتر الکترومغناطیسی نشان داده شده است.

میدان الکترومغناطیسی القایی خارجی که توسط سیم‌پیچ‌های خارجی و حرکت ذرات باردار سیال ایجاد شده است (تعداد این ذرات به رسانایی سیال بستگی دارد) سبب ایجاد میدان الکترومغناطیسی در داخل لوله می‌شود. میدان الکترومغناطیسی سبب ایجاد اختلاف ولتاژی بین پایانه‌های فلزی ۱ و ۲ می‌شود. مقدار ولتاژ برابر است با:

$$V_{12} = B \cdot D \cdot v \quad (15)$$

که در آن  $B$  بزرگی میدان الکترومغناطیسی القایی،  $D$  قطر داخلی لوله و  $v$  بزرگی سرعت سیال است. در حالت مطلوب میدان الکترومغناطیسی یکنواخت و عمود بر جهت حرکت سیال است. همچنین در حالت مطلوب رسانایی سیال نیز ثابت است که به معنای ثابت بودن دما و فشار داخل لوله است.

از آن جایی که ولتاژ اندازه‌گیری شده از رابطه‌ی ۱۵ با سرعت سیال تناسب دارد، فلومترهای الکترومغناطیسی حجمی هستند و سرعت سیال و نه جرم آن را اندازه‌گیری می‌کنند.

مزایای اصلی این فلومتر عبارتند از روش کاری غیرتهاجمی<sup>۹</sup>، دقت بالا (در حدود ۵/۰ درصد یا کمتر)، افت فشار قابل چشمپوشی، عدم وجود قطعات متحرک و عدم حساسیت به گران‌روی سیال یا مقیاس اندازه‌گیری خطی معایب آن عبارت هستند از قیمت بالا، حساسیت به تداخل الکترومغناطیسی، حساسیت به لرزش مکانیکی، حساسیت به ولتاژ ناشی از تعامل الکترولیتی بین پایانه‌ی فلزی و سیال و نیاز به مقدار رسانایی پایین. اگر مقدار رسانایی پایین نباشد نسبت سیگنال به نویز کاهش خواهد یافت.

محاسبه‌ی خطای اندازه‌گیری در لوله‌هایی که ناقص پر شده‌اند

با در نظر گرفتن شکل ۶-الف و استفاده از فرمول محیط به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

$$y = \sqrt{R^2 - X^2} \quad (y \geq 0 \text{ and } \Delta h \leq R)$$

سپس با تبدیل عمودی در راستای محور  $y$  می‌توان به فرمول محیط شکل ۶-ب رسید:

$$y = f(x) = dh - R + \sqrt{R^2 - X^2} \quad (y \geq 0 \text{ and } \leq R)$$

با استفاده از رابطه‌ی آخر می‌توان محل تلاقی محورهای

$$X_h = R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R - dh}{R}\right)^2}$$

$$y_h = dh$$

عمودی و افقی را به دست آورد:

$$A_E = \left\{ \int_0^{x_h} f(x) dx = \int_0^{x_h} (\Delta h - R + \sqrt{R^2 - x^2}) dx \right.$$

$$\left. (\Delta h - R)x_h + \frac{x_h}{2} \sqrt{R^2 - x_h^2} + \frac{R^2}{2} \arcsin\left(\frac{x_h}{R}\right) \right.$$

در نهایت مساحت مرتبط با خطای اندازه‌گیری (نصف مساحت خالی لوله) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\eta_E = 100 \cdot \frac{A - 2 \cdot A_E}{A} \% = 100 \cdot \frac{-2 \cdot A_E}{A} \%$$

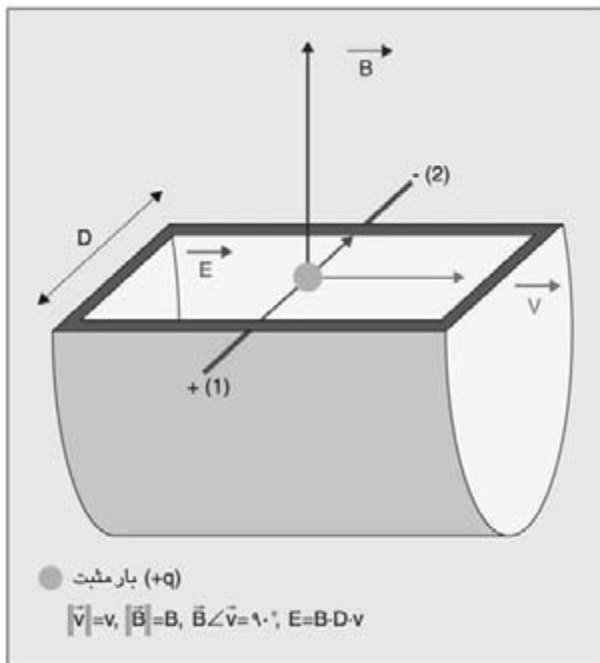
در نتیجه خطای نسبی ناشی از خالی بودن لوله عبارت است از:

اندازه‌گیری نسبی است. همان طور که انتظار می‌رود این خطا همیشه منفی است. زیرا مساحت بخش مفید سیال در لوله‌ای که ناقص پر شده است همواره کمتر از  $S$  است. شکل ۷ خطای اندازه‌گیری ناشی از پر شدن ناقص لوله را که در آن  $R/dh = dn$  بین صفر (پر شدن کامل) و یک (بخش خالی نصف لوله است) نشان می‌دهد.





شکل ۸- فلومتر الکترومغناطیسی در شرایطی که لوله کامل پر نشده است (شارمتر Rosemont مدل 8712C)



شکل ۹- نحوه کارکرد فلومتر الکترومغناطیسی

می‌کنند در حالی که گاهی چگالی مشخص نیست. چگالی به فشار و دما بستگی دارد و در بسیاری از کاربردها فقط اندازه‌گیری جریان جرمی اهمیت دارد. در شکل ۱۱ تغییرات کیفی چگالی به عنوان تابعی از دما و فشار برای جامدات (S)، مایعات (L) و گازها (G) نشان داده شده است.

انتخاب بین فلومتر حجمی و جرمی به نوع کاربرد ما بستگی دارد. اگر از فلومتر برای سیالی که انرژی می‌دهد (مانند بنزین) استفاده می‌کنیم، چون انرژی سیال به جرم آن بستگی دارد پس بهتر از فلومترهای جرمی استفاده کنیم. در مورد سیال‌هایی که انرژی می‌دهند حداقل باید جبران دما محاسبه شود. زیرا تغییرات

### اندازه‌گیری جریان جرمی

فلومترهای جرمی، جرم و نه وزن سیالی را که از مقطع مسیر سیال در واحد زمان عبور می‌کند، اندازه‌گیری می‌کنند. اگر فشار و دما ثابت باشند و سیال تراکم ناپذیر و با چگالی ثابت باشد، می‌توان از همان اصولی که برای اندازه‌گیری شار حجمی استفاده کردیم، بهره گرفت:

$$Q_{MS} = \iint_S \rho \cdot \overline{v(x,y)} \cdot \bar{n} \, dx \, dy ; \rho = \frac{M}{V} \quad 16$$

که در **قره زنی** آن نشان‌دهنده سرعت سیال در مقطع عرضی مسیر سیال،  $n$  بردار واحد یکتای نرمال برای مقطع عرضی و چگالی سیال یا جرم بر واحد حجم است. در شرایط عادی و ایستا، هر دو بردار هم راستا هستند ( $\alpha=0^\circ$ ) و رابطه‌ی ۱۱ را می‌توان برای محاسبه‌ی شار جرمی به کار برد:

17

$$Q_{MS} = \rho \cdot (V)_{av} \cdot A = \rho \cdot Q_{VL} \quad \text{being } (V)_{av} = \int_{x=-D/2}^{+D/2} V_y(x) \, dx$$

شکل ۱۰ فلومتری را نشان می‌دهد که براساس ویژگی کوریولیس<sup>۱۰</sup> کار می‌کند [۶]. در این دستگاه، جریان به صورت مستقیم و با استفاده از لوله‌ی مرتعشی اندازه‌گیری می‌شود که به آن شتاب‌های کوریولیس با جهت‌های متضاد اعمال می‌گردد. اندازه‌گیری به طور مستقیم به جرم سیال بستگی دارد و در نتیجه فارغ از خطای ناشی از تأثیر متغیرهای متعددی است که در فلومترهای تداخلی وجود دارد. مزایای اصلی این فلومترها عبارتند از کاربرد ساده برای سیال‌های گوناگون، اندازه‌گیری جرم و چگالی واقعی و امکان اندازه‌گیری جریان‌های دو فاز مهم‌ترین عیب این نوع فلومترها قیمت بالا و وجود قطعات متحرک در آن‌ها است.

### انتخاب فلومترهای حجمی و جرمی

وقتی چگالی معلوم باشد، فلومترهای جرمی و حجمی مقادیری را نشان می‌دهند که با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از مشکلات اصلی آن است که فلومترها سرعت یا  $Q$  را اندازه‌گیری

(تا حد ۰/۲ درصد جریان). یادآور می‌شویم که دقت به نرخ جریان و نه به حداکثر سرعت آن بستگی دارد. به عبارت دیگر حتی اگر سیال مورد نظر خیلی هم کم باشد (در حد چند قطره) باز هم دقت این فلومترها بالاست. این یکی از دلایل مهمی است که به خاطر آن شرکت‌های توزیع آب از این فلومترها استفاده می‌کنند. عیب این فلومترها عبارت است از این که محدود به مایعات شفاف هستند، دقت آن‌ها تحت تأثیر چسبندگی مایع است، قطعات متحرک دارند و افت فشار در آن‌ها بالاست.

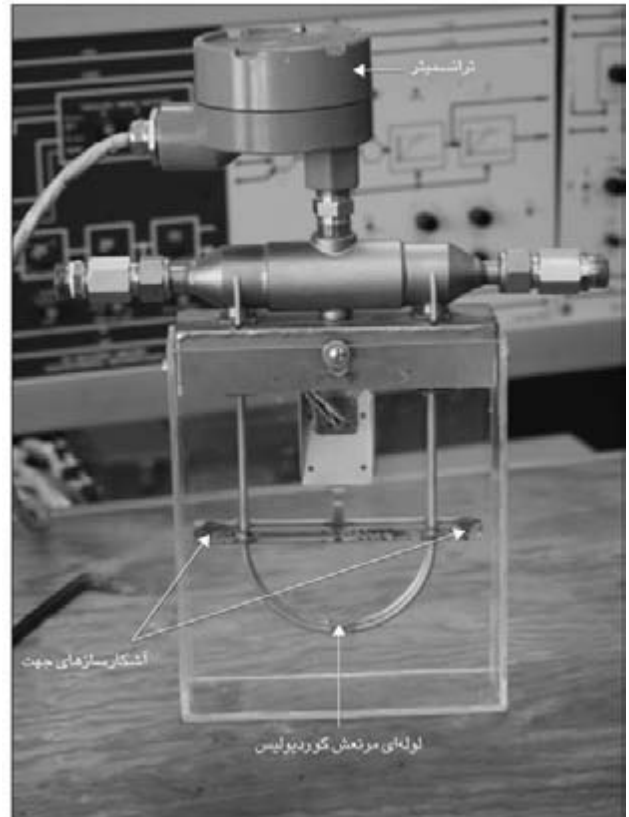
### فلومترهای هوشمند

عوامل زیادی دقت فلومتر را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از آن جمله می‌توان دما، فشار، گرانروی، ذرات حل نشده، سختی و مقاومت داخلی لوله، تراکم‌پذیری سیال، تغییرات سرعت سیال، چگالی سیال، اختلال ناشی از فلومتر (خطاهای طبیعی)، لرزش لوله و خطاهای نصب اشاره نمود. به دلیل وجود عوامل متعدد فوق، خطای فلومترهای قدیمی و سنتی معمولاً بالاست. با این که دقت فلومترها زیاد بالا نیست ولی تکرارپذیری آن‌ها خوب است. با استفاده از روش‌های تنظیم خودکار بی‌درنگ، پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده و سایر قابلیت‌هایی که معمولاً در حسگرهای هوشمند وجود دارد می‌توان ویژگی‌های اندازه‌گیری فلومترها را بهبود بخشید.

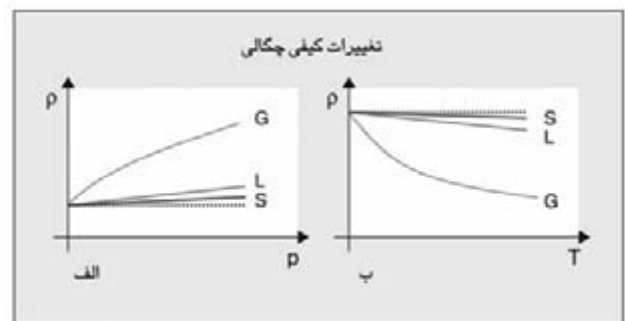
شکل ۱۳ نمایی ساده از یک فلومتر هوشمند را نشان می‌دهد که در کاربردهای صنعتی جدید و یا در ارتقای حلقه‌های ارتباطی صنعتی قدیمی استفاده می‌شود. با استفاده از واحد پردازشگر داده (DPU) به همراه مبدل‌های فشار و دما و همچنین یک فلومتر حجمی و جرمی که به صورت سری به هم متصل شده‌اند، می‌توان ضریب جبران‌سازی لازم را برای بهبود دقت و خطی بودن اندازه‌گیری در شرایط دمایی و فشاری مختلف به دست آورد. برای این کار از قابلیت تنظیم خودکار نیز استفاده می‌شود. در فلومترهای هوشمند می‌توان تعداد نقاط تنظیم را با توجه به تابع چگالی احتمال داده‌های اندازه‌گیری شده تغییر داد. با اتصال سری فلومتر جرمی و حجمی می‌توان چگالی سیال را از فرمول زیر اندازه‌گیری کرد:

۱۸.

$$\rho(T, P) = \frac{Q_{MS}}{Q_{VL}} \quad (T - \text{temperature } P - \text{Pressure})$$



شکل ۱۰- فلومتر جرمی که براساس اثر کوریولیس کار می‌کند (Micro Motion مدل D)



شکل ۱۱- تغییرات کیفی چگالی الف - برحسب تابعی از دما و ب - برحسب تابعی از فشار (S- جامدات، L- مایعات و G- گازها ۲ چگالی سیال)

چگالی به تغییرات دما بستگی دارد (به ویژه برای گازها).

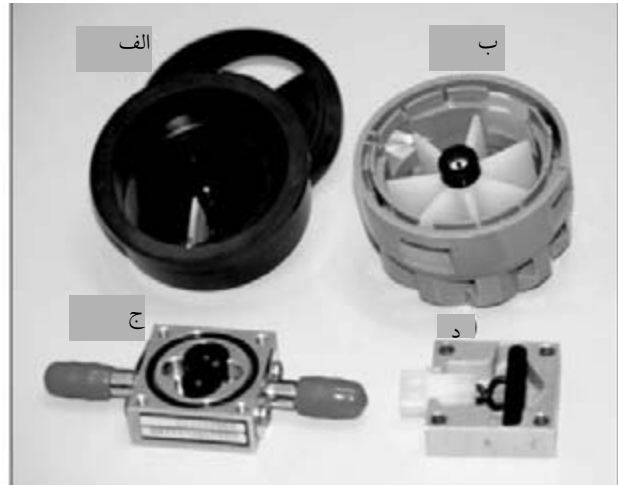
در مورد کاربردهای دیگر، فلومترهای حجمی بهتر هستند (مانند آب‌سنج‌ها). شکل ۱۲ سه فلومتر حجمی را نشان می‌دهد. اساس کار فلومترهای حجمی با جابه‌جایی مثبت عبارت است از محفظه‌های چرخانی که به یک میله متصل شده‌اند. تعداد دفعات چرخش میله رابطه‌ی مستقیم به حجم سیال دارد و نیازی به انرژی الکتریکی نیست. می‌توان از یک شمارشگر مکانیکی ساده برای اندازه‌گیری استفاده کرد. از آن جایی که محفظه می‌تواند بسیار کوچک باشد، دقت این فلومتر نیز می‌تواند بسیار زیاد شود

## مراجع:

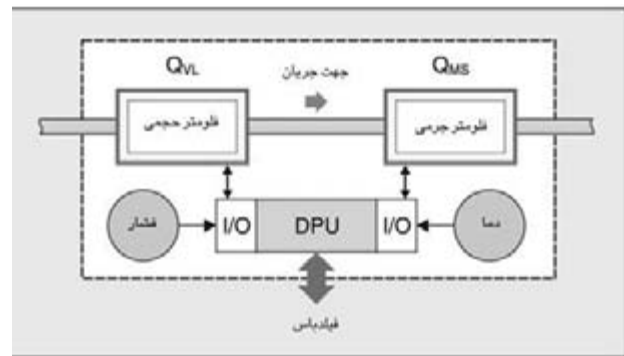
- [1] D.A. Czaplowski, R.B. Ilic, M. Zalalutdinov, W.L. Olbricht, A.T. Zehnder, H.G. Craighead, A.T. Michalske, "Micromechanical Flow Sensor for Microfluidic Applications", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.13, No.4, pp. 576-585, Aug. 2004.
- [2] The Engineering ToolBox, "Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications", (2008, Sep.1), Available <http://www.engineeringtoolbox.com>
- [3] Bailey-Fisher & Porter, "Guide to Flow Measurements", Goettingen, Germany, 1995.
- [4] D. W. Spitzer, "Industrial Flow Measurement", 3rd Edition, ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2005.
- [5] KROHNE International, "Electromagnetic Low Meter in Partially Filled Pipes for Water and Waste Water" Manual for Tidakflux - IFM 4110 PF, 2005.
- Micro Motion, "Remote Flow Transmitter "Manual for Model RFT9712", [6] 1991.
- [7] N. Man Gyun, J. L. Yoon and J. Hwang, "A Smart Software Sensor for Feedwater Flow measurement Monitoring", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.52, Issue 6, Part 2, pp. 3026-3034, Dec. 2005.
- [8] M. Viswanathan, "Microprocessor Based Flow Rate and Flow Volume Indicator Common for any Flow Sensor which gives Pulse Output", in Proc. IMTC 1998, Vol.2, pp. 1083-1088, May 1998
- [9] Y. Wu, J.P. Bobis, and R. Gehman, "The Design and Analysis of an Improved High Air Flow Meter with Analog/Digital Filters", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, pp. 791-796, Dec. 1992.
- [10] R.M. Carter and Y. Yong, "An Instrumentation System Using Combined Sensing Strategies for On-line Mass flow Rate Measurement and Particle Sizing", in Proc. IMTC 2005, Vol.54, No.4, pp. 1433-1437, May 2005.
- [11] P. J. Escamilla-Ambrosio, and N. Mort, "Multisensor Data Fusion Architecture Based on Adaptive Kalman Filters and Fuzzy Logic Performance Assessment", in Proc. of the Fifth International Conference on Information Fusion, 2002, pp. 1542-1549
- [12] J.M. Dias Pereira, O. Postolache, and P. Silva Girão, "PDF-based Progressive Polynomial Calibration Method for Smart Sensors Linearization", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement (accepted for publication, March 2009, Vol.58, Issue 3).

## پانوشت:

- 1- Flow
- 2- Flow-meter
- 3- Full Scale Range
- 4- Inferential
- 5- Target
- 6- Viscosity
- 7- Turbulent
- 8- Transitional
- 9- Non-invasive
- 10- coriollis



شکل ۱۲- الف یک پیستون نوسان کننده و شکل ۱۲- ب یک فلومتر توربینی است. آن‌ها معمولاً برای سنجش مصرف آب استفاده می‌شوند. شکل ۱۲- ج یک شارمتر دنده بیضی و در شکل ۱۲- د برخی بخش‌های مکانیکی این فلومتر نشان داده شده است.



شکل ۱۳- بلوک دیاگرام یک فلومتر هوشمند

از چگالی سیال برای اندازه‌گیری جریان سیال‌های فرار استفاده می‌کنیم. فلومترهای قدیمی از چنین قابلیت‌های برخوردار نبودند (چند تولیدکننده ادعا می‌کنند فلومترهای کوریولیس آن‌ها می‌تواند جریان جرمی، چگالی و حتی جریان‌های دو فاز را اندازه‌گیری کند).

## خلاصه

در این نوشته به بررسی اهمیت اندازه‌گیری دقیق جریان سیال در کاربردهای صنعتی و همچنین نیاز به افزایش دقت آن‌ها پرداختیم. ویژگی‌های جریان سیال و همچنین اثر این ویژگی‌ها بر سنجش جریان بررسی شد. از نمودارها، فرمول‌ها و شکل‌ها برای نشان دادن عوامل مهم در استفاده از فلومترهای جرمی، حجمی و هوشمند استفاده گردید.