

# مکانیک سیالات ۲



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی مکانیک

بخش سوم از مباحث فصل ششم:  
جریان های داخلی – اندازه گیری دبی و سرعت جریان

کلاس درس دکتر نوروزی  
خرداد ۹۹

## اندازه گیری دبی و سرعت جریان

اندازه گیری دبی و سرعت جریان یکی از مهمترین مباحث کاربردی در مکانیک سیالات است که دارای کاربردهای متنوع در امور صنعتی، پزشکی، تجاری، هواشناسی، نظامی و ... است. تاکنون انواع مختلفی از این آلات دقیق تولید شده که هر یک بر اساس اثر جریان بر یک عامل فیزیکی دیگر، نظیر تغییر فشار، ایجاد نیرو، تنش و گشتاور بر اجسام، تغییر در سرعت امواج اولتراسونیک و یا ایجاد تغییر در فرکانس پرتو لیزر و ... عمل می کنند.



## دبی سنجهای هد متغیر (Variable Head Meter)

این دبی سنجها بر مبنای تغییر هد (فشار) جریان عمل می کنند و با اندازه گیری اختلاف فشار ایجاد شده در آنها دبی اندازه گیری می شود. در شکل نوع لوله ونتوری این وسیله اندازه گیری نشان داده شده است. مطابق شکل اسلاید بعد، این دبی سنج، یک شیپوره همگرا-واگرا است که این هندسه سبب ایجاد تغییر فشار ورودی آن نسبت به گلوگاه ونتوری می شود. چنانچه یک جریان غیرویسکوز غیرچرخشی (جریان ایده آل) در این ونتوری برقرار باشد، معادله برنولی بر این جریان حاکم خواهد بود. این معادله برای بین دو نقطه ورودی (۱) و گلوگاه ونتوری (۲) بصورت زیر است:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$$

توجه داشته باشید که دبی جریان ثابت است پس:

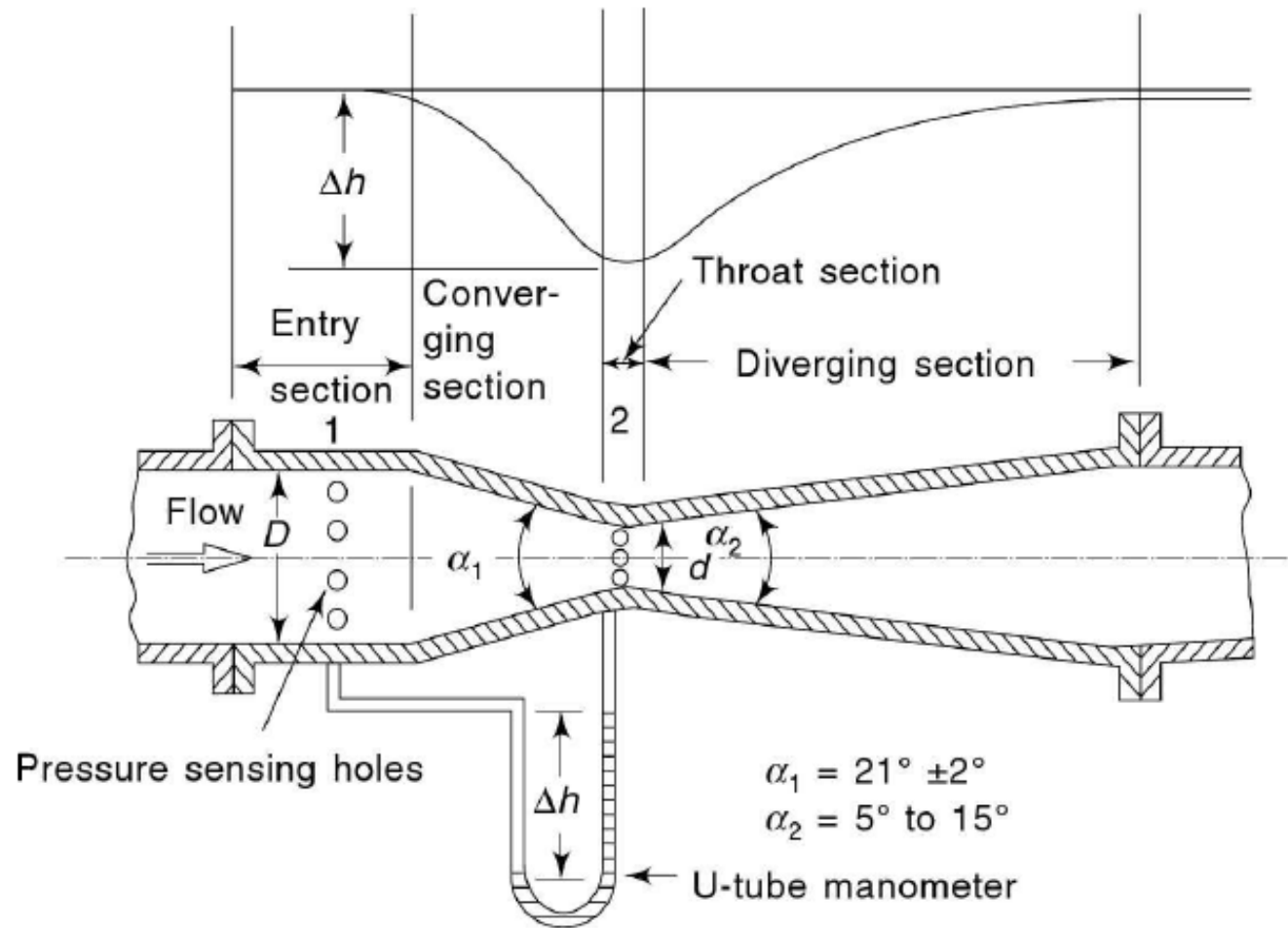
$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \longrightarrow V_1 = Q / A_1 \text{ \& } V_2 = Q / A_2 \quad (2)$$

همچنین اختلاف ارتفاع در مایع مانومتر نصب شده بین ورودی و گلوگاه از رابطه زیر بدست می آید:

$$h = \frac{p_1 - p_2}{(\rho_M - \rho)g} \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $\rho_M$  چگالی مایع داخل مانومتر است.

## ونتوری



(a) Venturi meter

دبی محاسبه شده از رابطه (۱)، دبی جریان ایده آل یک ونتوری است که در آن هیچ اصطکاک و تلفات هد وجود ندارد و تغییر فشار نیز صرفاً از طریق تغییر سرعت ایجاد شده است:

$$Q_{ideal} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \left[ \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (۴)$$

پس:

$$Q_{ideal} = \frac{A_1 A_2}{A_1 \sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \left[ \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \right]^{1/2} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \left[ \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (۵)$$

چنانچه  $\beta$  نسبت قطرهای (نسبت انسداد) باشد ( $\beta = d_2 / d_1$ ) و مساحت ناحیه گلوگاه را بنامیم  $A_t$ ، داریم:

$$Q_{ideal} = A_t \left[ \frac{2(p_1 - p_2) / \rho}{1 - \beta^4} \right]^{1/2} \quad (۶)$$

جریانهای لزج دارای تلفات هستند و لذا در عمل دبی از مقدار محاسبه شده از رابطه (۶) کمتر است. برای این جریانها، ضریب تجربی بی بعدی به نام ضریب تخلیه (Discharge Coefficient) تعریف می شود که این ضریب در عمل از یک کمتر است:

$$C_d = \frac{Q_{actual}}{Q_{ideal}} \quad (۷)$$

همانطور که گفته شد، ضریب تخلیه یک ضریب تجربی است که معمولاً دیاگرامها و اطلاعات آن توسط سازنده ارائه می شود و در عمل تابعی از عدد رینولدز و نسبت انسداد است:

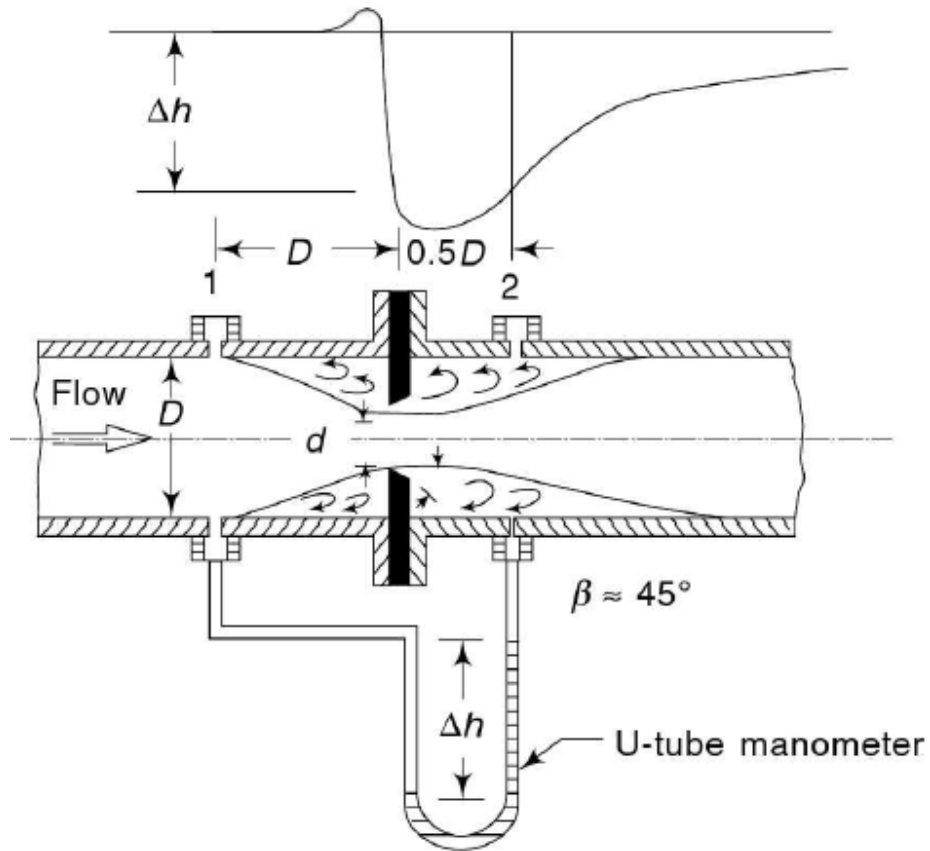
$$C_d = f(Re, \beta) \quad (۸)$$

در نهایت از روابط (۶) و (۷) برای دبی جریان واقعی لزج داریم:

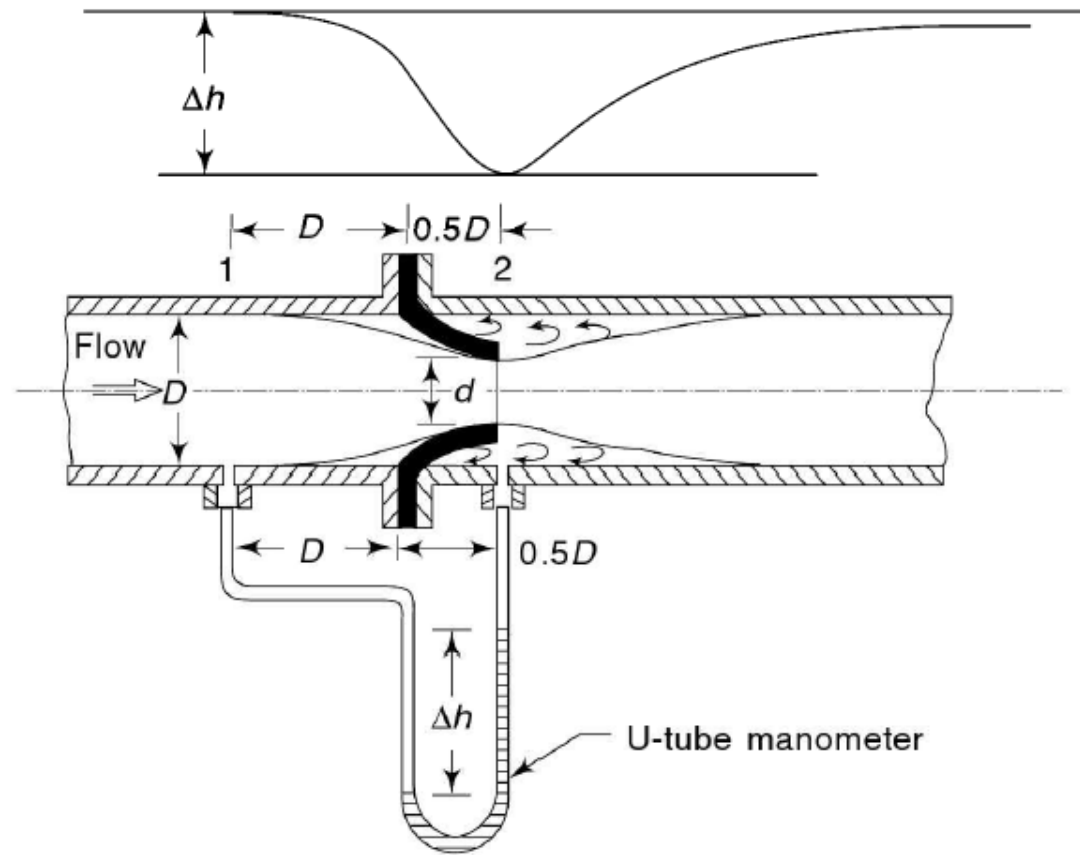
$$Q_{actual} = C_d A_t \left[ \frac{2(p_1 - p_2) / \rho}{1 - \beta^4} \right]^{1/2} \quad (۹)$$

ابزارهای اندازه گیری دیگری مشابه ونتوری وجود دارند که معروفترین آنها اوریفیس و نازل هستند. شکل این ابزارها در اسلایدهای بعدی نشان داده شده است. در این وسایل نیز شکل هندسی سبب ایجاد اختلاف فشار بین ورودی و گلوگاه می شود. دبی این تجهیزات نیز از رابطه (۹) محاسبه می شود. در میان این تجهیزات، ونتوری دارای قیمت بالاتری است و پس از آن به ترتیب نازل و اوریفیس دارای هزینه کمتری هستند. اما تلفات هد ونتوری از سایر تجهیزات کمتر و در عمل دارای دقت بالاتری است و پس از آن نازل و اوریفیس به ترتیب دارای تلفات بیشتر (دقت پایین تر) هستند. مهمترین مزیت نازل و اوریفیس نسبت به ونتوری کم بودن فضای اشغال شده بوسیله آنها است. نازلها معمولاً از لوله های کوچک تا سایز متوسط مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از اوریفیس منجر به افزایش میزان سایش و خوردگی در سیستم لوله کشی می شود و این تجهیز نسبت به وجود آلودگی و ناخالصی در جریان بسیار حساس است. طرح ترکیبی دیگری بنام ونتوری-نازل وجود دارد که ضریب تخلیه آن در محدوده مشخصی از عدد رینولدز تنها تابعی از نسبت انسداد است.

## نازل و اوریفیس



(b) Orifice meter



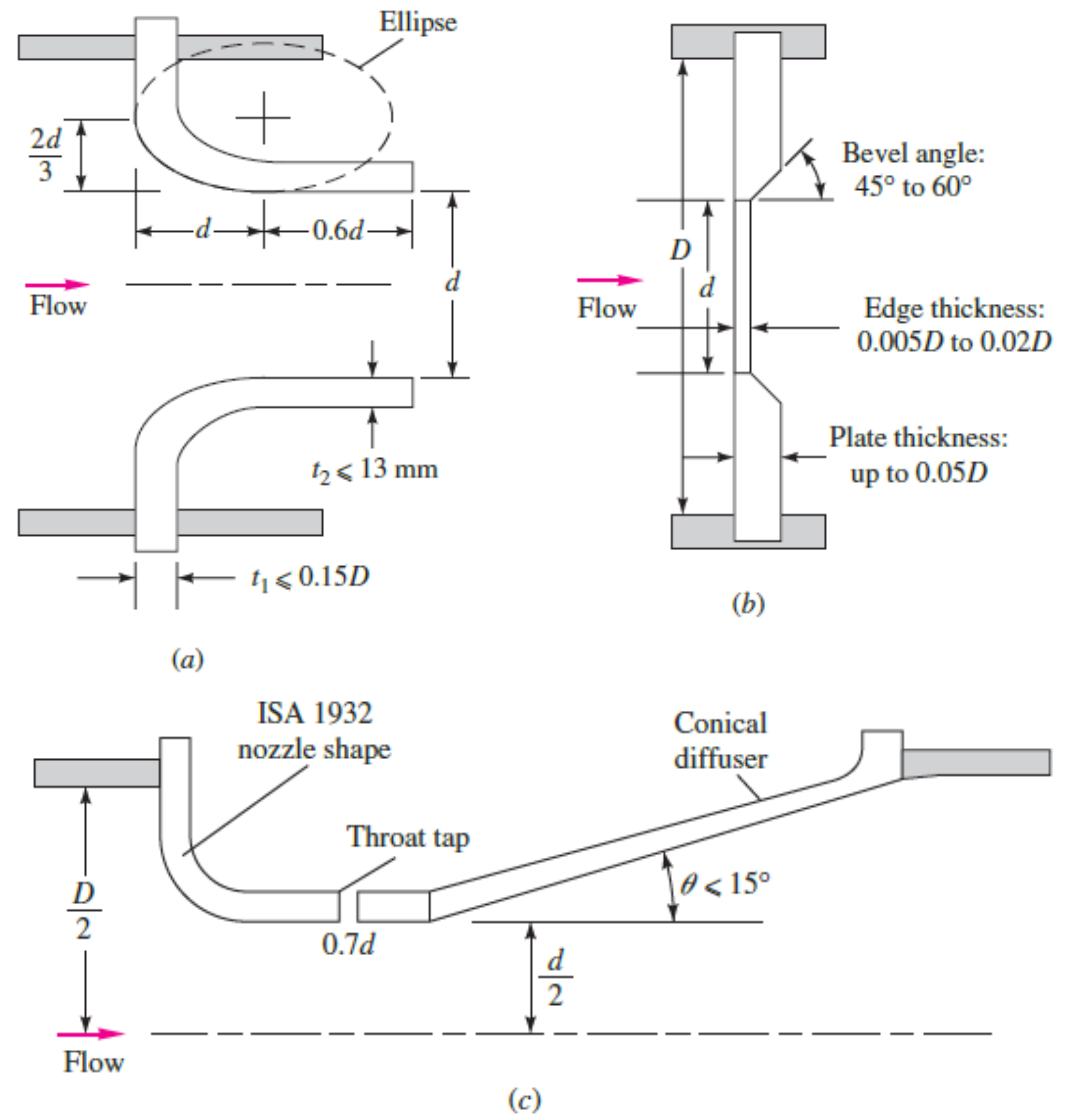
(c) Nozzle meter



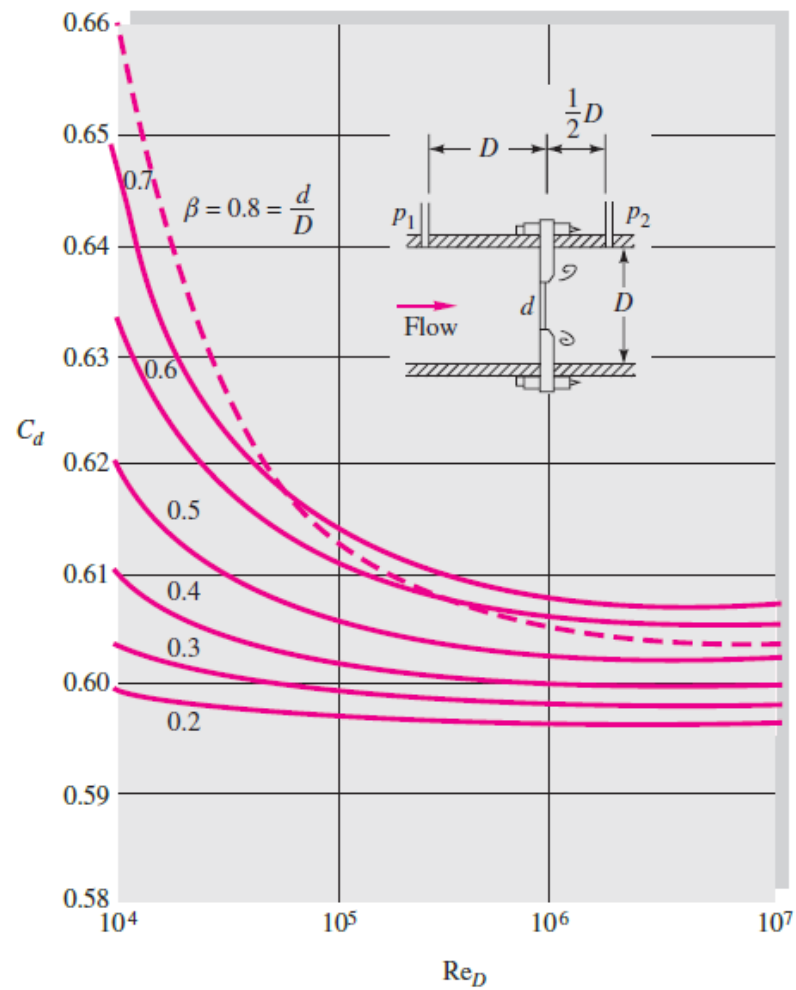


Type of meter	Net head loss	Cost
Orifice	Large	Small
Nozzle	Medium	Medium
Venturi	Small	Large

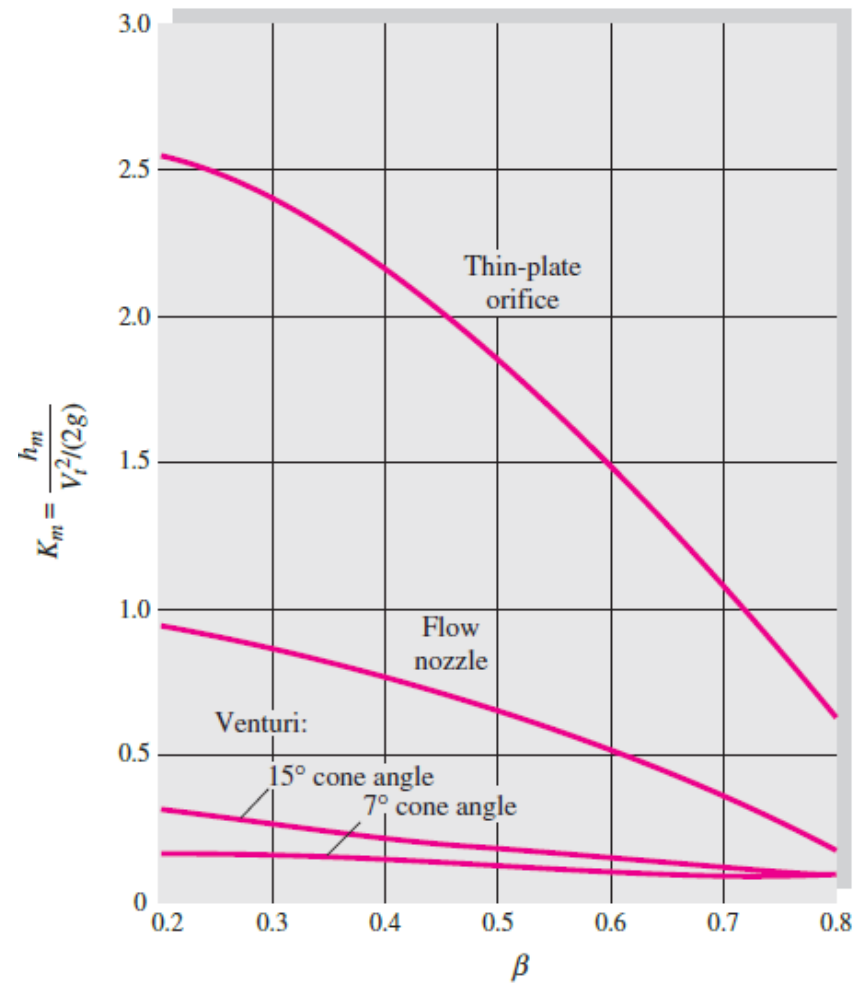
Fig. 6.40 Standard shapes for the three primary Bernoulli obstruction-type meters: (a) long-radius nozzle; (b) thin-plate orifice; (c) venturi nozzle. (Based on data from the International Organization for Standardization.)



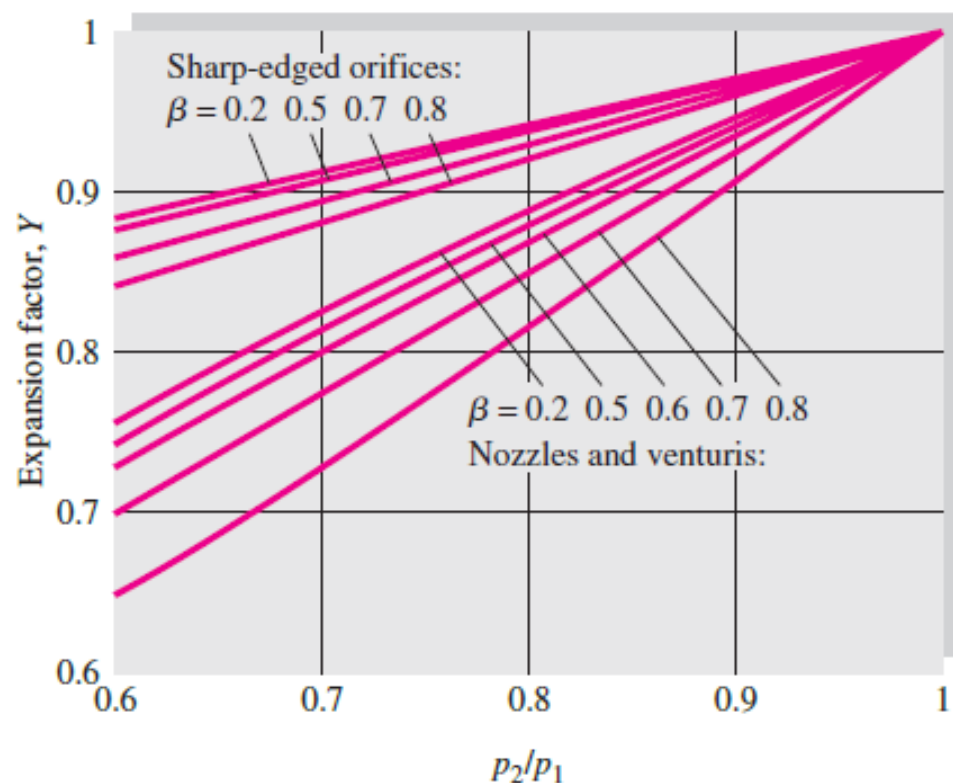




**Fig. 6.41** Discharge coefficient for a thin-plate orifice with  $D: \frac{1}{2}D$



**Fig. 6.44** Nonrecoverable head loss in Bernoulli obstruction meters.



**Fig. 6.45** Compressible flow expansion factor  $Y$  for flowmeters.

در جریان گازهای دارای فشار بالا که معمولاً بوسیله کمپرسورها ایجاد می شوند، دبی جرمی دارای اهمیت است. از دبی سنجهای هد متغیر (ونتوری، نازل و اوریفیس) برای اندازه گیری دبی جرمی جریان تراکم پذیر گازها نیز استفاده می شود. اگر در جریان یک گاز نسبت  $p_1 / p_2$  در حدود یک نباشد، نیاز به اصلاح رابطه دبی بر اساس اثرات تراکم پذیری است:

$$\dot{m} = C_d Y A_t \left[ \frac{2\rho_1 (p_1 - p_2)}{1 - \beta^4} \right]^{1/2} \quad (10)$$

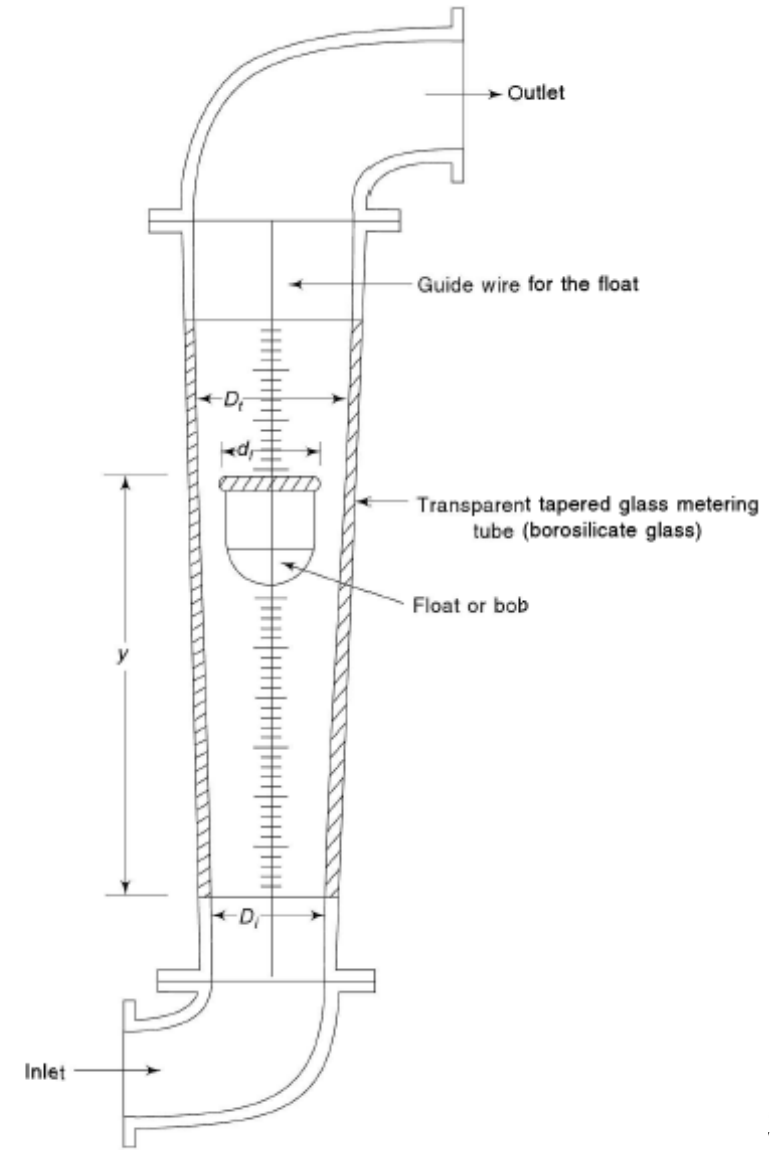
که در رابطه فوق،  $\rho_1$  چگالی گاز در ورودی تجهیز اندازه گیری دبی است. همچنین در این رابطه،  $Y$  فاکتور انبساط نامیده می شود و تابعی از نسبت فشار، نسبت انسداد ( $\beta$ ) و نوع وسیله اندازه گیری دبی است.

## دبی سنجهای سطح متغیر (Variable Area Meter)

در دبی سنجهای هد متغیر، سائز ناحیه انسداد ثابت بوده و تغییر دبی منجر به تغییر فشار در آنها می شود. اما در دبی سنجهای سطح متغیر، مساحت ناحیه انسداد متغیر است و تغییر فشار در آنها شدید نیست. معروفترین دبی سنج سطح متغیر روتامتر (Rotameter) است که شکل آن در اسلاید بعدی نشان داده شده است. این دبی سنج بصورت قائم نسبت به زمین نصب می شود و در آن یک جسم متحرک وجود دارد که چگالی آن از چگالی سیال بیشتر است. در نتیجه جسم تمایل به سقوط دارد اما وجود نیروی درگ حاصل از جریان سبب غلبه بر نیروی وزن ظاهری (اختلاف وزن جسم و نیروی ارشمیدس) و در نتیجه بالا آمدن جسم متحرک می شود. به دلیل شکل واگرای مسیر جریان روتامتر، با بالا آمدن جسم متحرک، مجرای گلوگاه بین جسم و دیواره مجرا گشادتر شده و به این ترتیب سرعت جریان در گلوگاه و در نتیجه درگ کاهش می یابد و لذا در یک ارتفاع مشخص نیروی درگ با وزن ظاهری به تعادل می رسد و جسم بصورت معلق و ثابت در می آید. هرچه ارتفاع قرار گیری جسم بالاتر باشد یعنی دبی جریان بیشتر است. دیواره روتامتر از پلاستیک شفاف ساخته می شود و بنابراین جسم متحرک داخل آن قابل رویت است. دیواره روتامتر به نحوی مدرج شده که با قرار گیری جسم متحرک در هر ارتفاع، عدد دبی مربوطه خوانده می شود.

مهمترین مزیت روتامتر خواندن مستقیم دبی از دیواره مدرج آن است. از این وسیله در محدوده دبی  $0.1$  میلی لیتر بر دقیقه تا چند صد لیتر بر دقیقه استفاده می شود. نوع استاندارد این دبی سنج دارای دقت  $1\%$  از دبی ماکزیمم است. در انواع ارزان قیمت تجاری، دقت اندازه گیری در حدود  $5\%$  است. مهمترین ایراد این وسیله آن است که تنها بصورت قائم نصب می شود و برای اندازه گیری دبی جریانهای غیردائم مناسب نیست.

## روتامتر



A rotameter

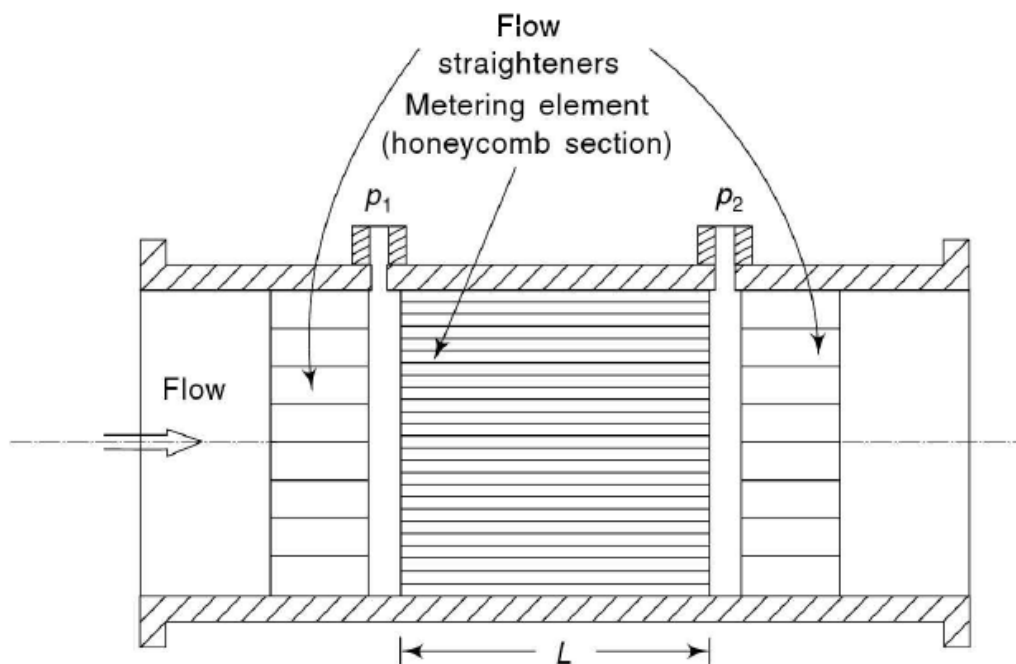
## فلومتر المان دارای مقاومت خطی

### (Linear Resistance Element Flow Meter)

این نوع دبی سنج دسته ای از مجاری موئین با آرایش لانه زنبوری است که به لوله حاوی جریان اصلی متصل می شود. به دلیل قطر کم مجاری موئین، جریان در آنها آرام بوده و لذا دبی جریان در هر لوله از رابطه زیر قابل تعیین است:

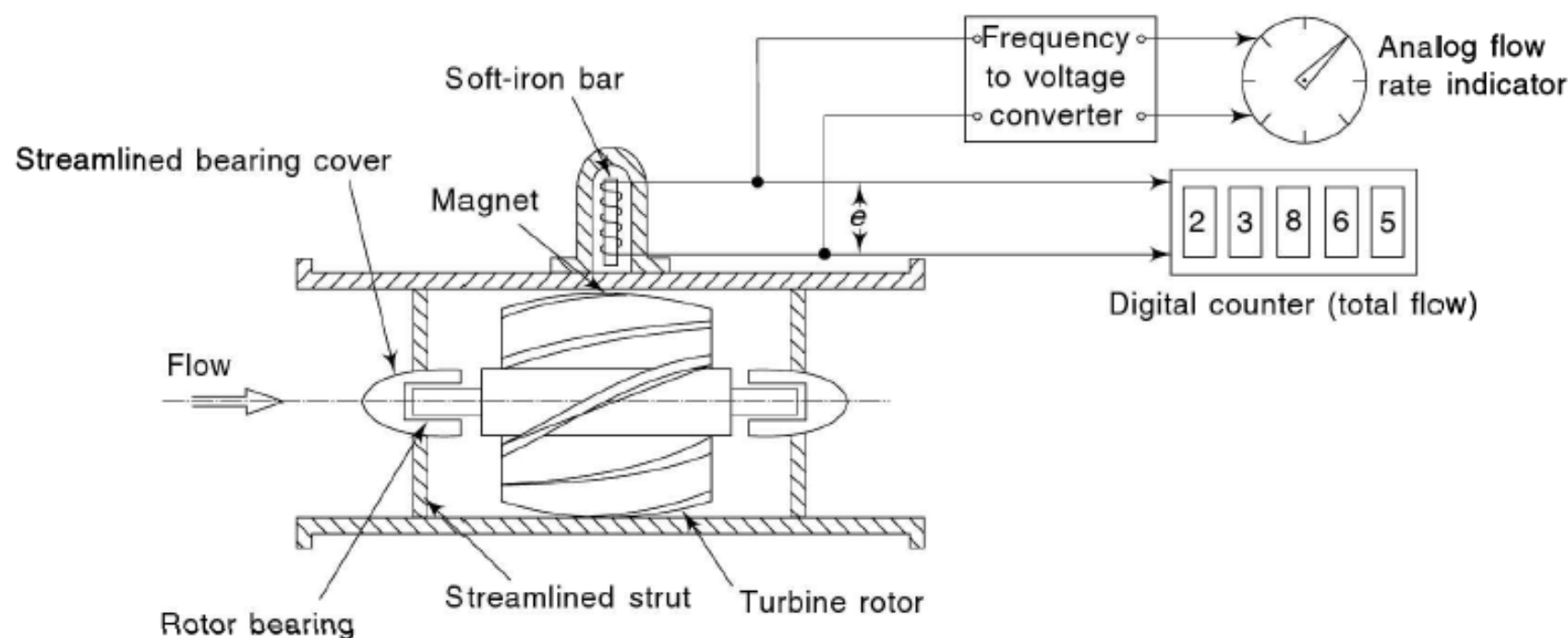
$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} (p_1 - p_2) \quad (11)$$

در رابطه فوق،  $Q$  دبی هر لوله موئین،  $D$  قطر لوله موئین و  $L$  طول آنها است. به دلیل رابطه خطی بین دبی و اختلاف فشار در جریان آرام، این دبی سنج به نام "فلومتر المان دارای مقاومت خطی" خوانده می شود. از مزایای این دبی سنج می توان به دقت مناسب آن برای تعیین متوسط دبی جریانهای نوسانی اشاره کرد که این موضوع ناشی از اثر دمپینگ بالای آن است. از معایب این دبی سنج می توان به قیمت نسبتاً زیاد، افت فشار بالا و نیز احتمال گرفتگی لوله های موئین در اثر رسوب و یا وجود آلودگی در جریان اشاره نمود.

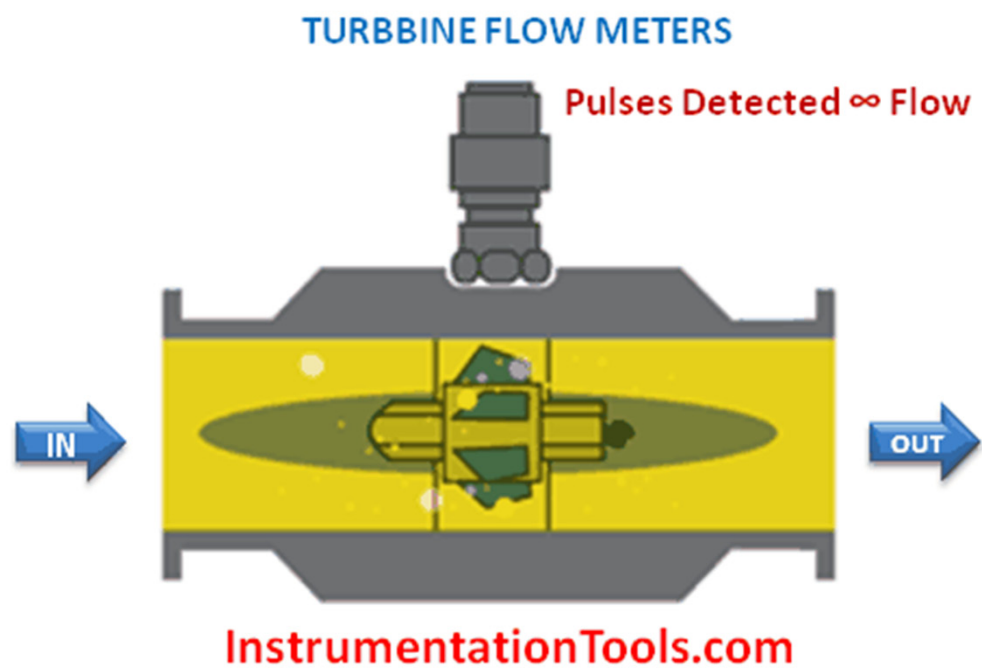


## فلومتر توربینی

این فلومتر دارای یک توربین است که با ایجاد جریان، توربین به گردش در می آید. در این تجهیز، دبی با سرعت دوران توربین متناسب است و لذا با یافتن سرعت دورانی، مقدار دبی محاسبه می شود. مطابق شکل، برای تعیین سرعت دورانی، معمولا یک آهنربای دائم بر روی روتور نصب می شود. همچنین یک سیم پیچ و هسته در بالای بدنه توربین قرار دارد. با چرخش توربین، هربار که آهنربا از کنار سیم پیچ عبور می کند، در آن جریانی ایجاد می کند و به این ترتیب مقدار سرعت دوران قابل اندازه گیری است. از مهمترین مزایای این فلومتر داشتن خروجی الکتریکی برای دبی جریان است.



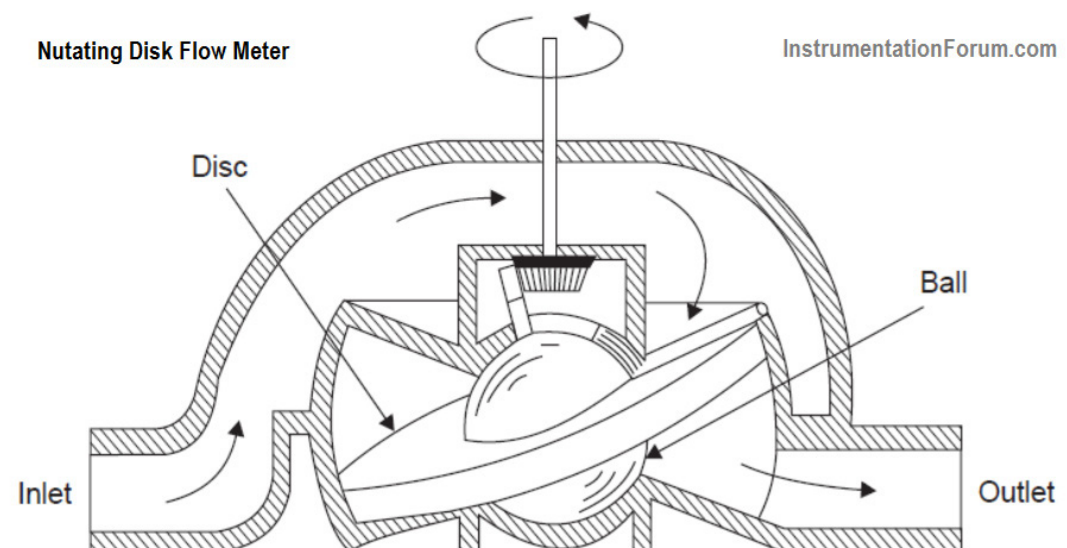
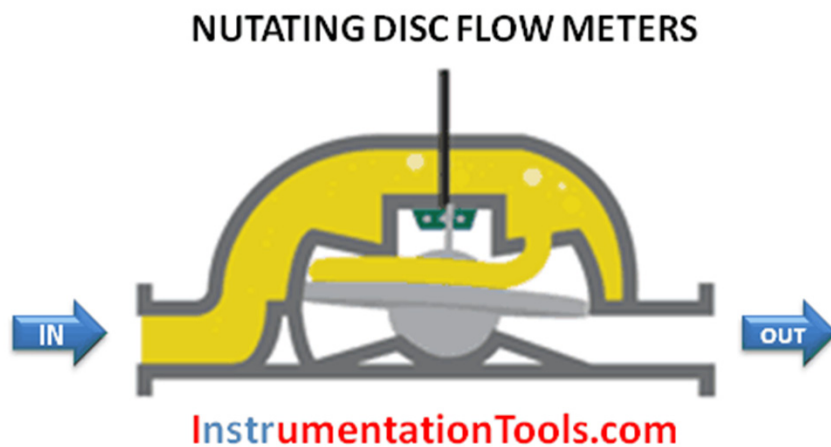
## فلومتر توربینی





## فلومتر دیسکی (Nutating Disc Flow Meter)

این دبی سنج یک فلومتر جابجایی مثبت است که به دلیل ساختمان خاص خود، در هر بار گردش یک دیسک، حجم مشخصی از سیال را جابجا می کند. بنابراین، با اندازه گیری سرعت چرخش دیسک، دبی اندازه گیری می شود. این نوع دبی سنج دارای طراحی مبتکرانه ای بوده و در سیستم های انتقال آب و سوخت مورد استفاده قرار می گیرد.



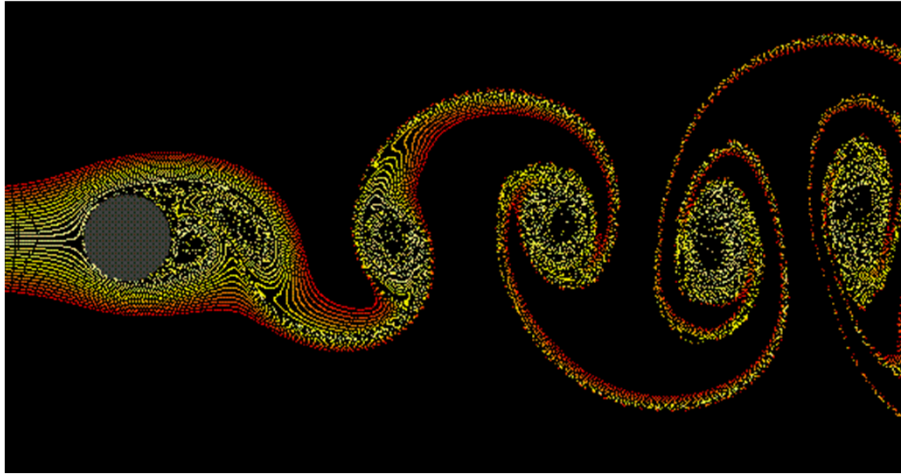
## فلومتر گردابه ای (Vortex Flow Meter)

همانگونه که پیشتر گفته شد، در جریان حول اجسام به ازای اعداد رینولدز به اندازه کافی بزرگ، پدیده شدینگ رخ می دهد. در این پدیده، گردابه ها بصورت تناوبی پشت جسم ایجاد شده و همراه با جریان اصلی منتقل می شوند. فرکانس نوسانات مربوط به تولید گردابه ها با عدد رینولدز (سرعت متوسط جریان در بالادست) متناسب است. وجود جریان نوسانی سبب ایجاد نیروهای لیفت و درگ نوسانی حول جسم می شود که فرکانس نوسانات این نیروها همان فرکانس نوسانات تولید گردابه ها است. در فلوترگردابه ای یک جسم (مانع کوچک) داخل مسیر جریان قرار داده می شود تا پدیده شدینگ حول آن اتفاق بیفتد. اندازه گیری فرکانس معمولا از طریق اندازه گیری نوسانات فشار سنسورهای پیزوالکتریک و یا اندازه گیری زمان تاخیر در ارسال و دریافت امواج اولتراسونیک (هر دو در پایین دست جریان) انجام می شود هرچند که امکان اندازه گیری آن از طریق سنجش نوسانات نیروهای لیفت و درگ حول جسم مانع نیز وجود دارد. به این ترتیب با اندازه گیری فرکانس، متوسط سرعت در بالادست و دبی جریان اندازه گیری می شود:

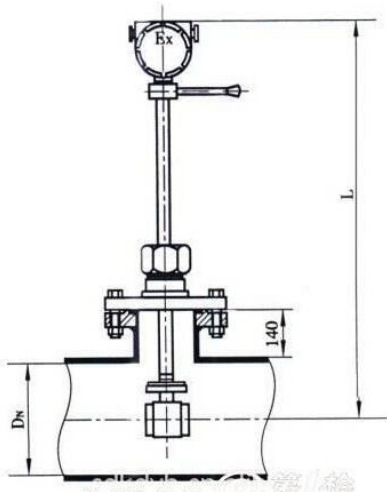
$$Q = \frac{f}{K} \quad (12)$$

که در رابطه فوق  $f$  فرکانس نوسانات و  $K$  یک ثابت تجربی است که تابعی از شکل جسم (مانع کوچک) درون فلومتر و عدد رینولدز است. از این فلومتر معمولا در اعداد رینولدز  $2 \times 10^4$  تا  $7 \times 10^6$  استفاده می شود.

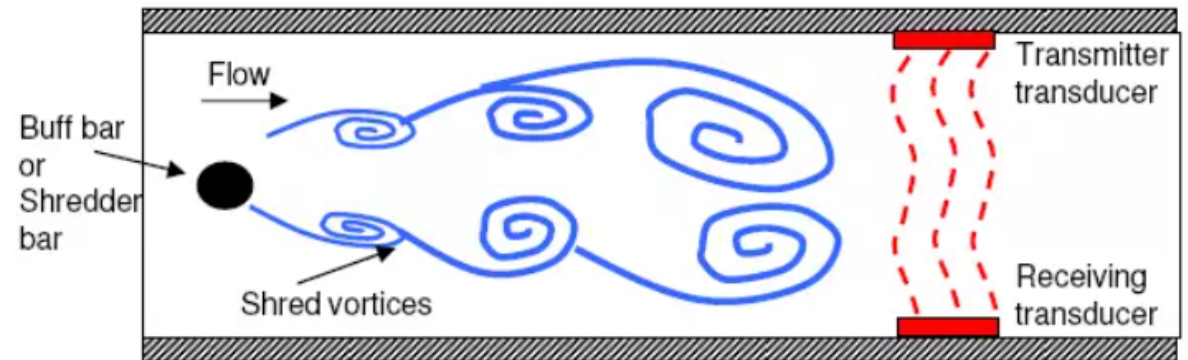
## فلومتر گردابه ای



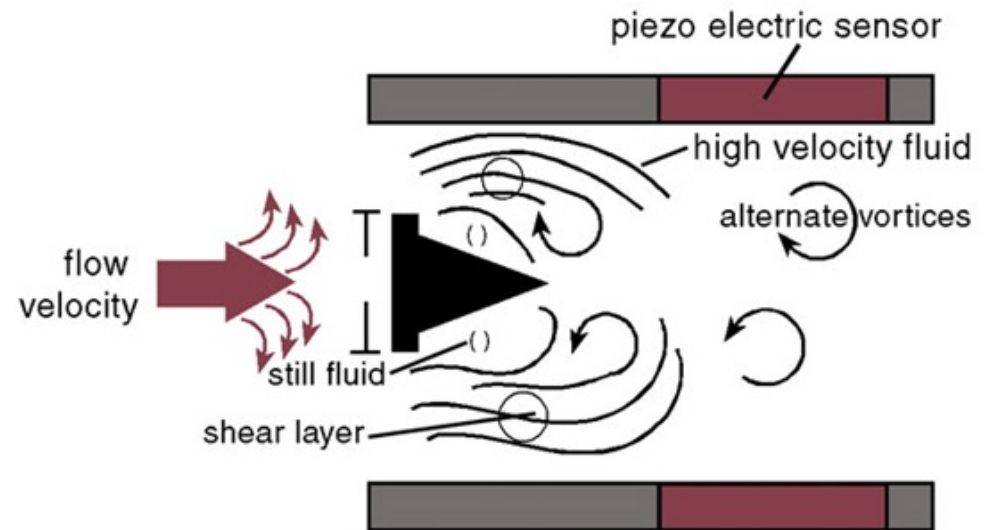
KACISE



اندازه گیری فرکانس نوسانات  
از طریق امواج اولتراسونیک



اندازه گیری فرکانس نوسانات  
از طریق پیزومتر



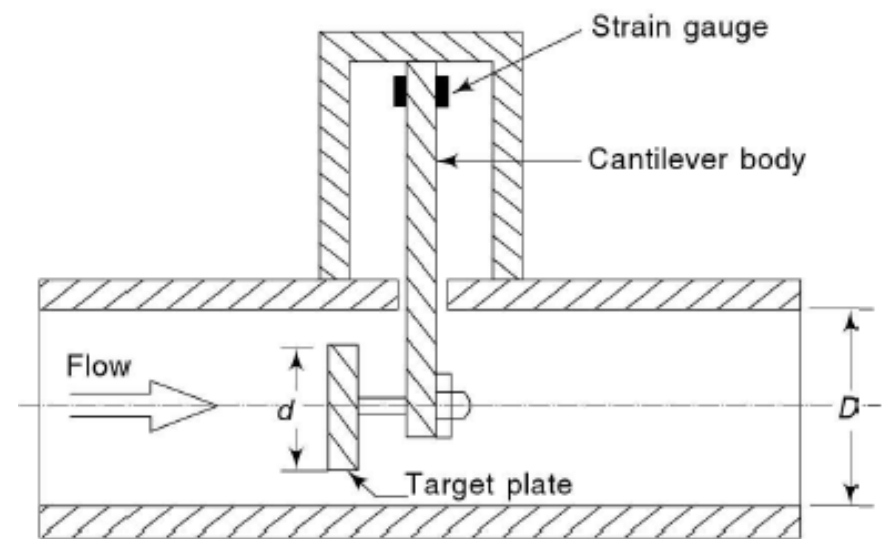
## فلومتر تارگت (Target Flow Meter)

همانگونه که پیشتر گفته شد، جریان سیال سبب ایجاد نیروی درگ بر اجسام می شود و این نیرو در عمل با توان اول تا دوم سرعت جریان متناسب است (توجه: فراموش نکنید که در حالت کلی ضریب درگ هم تابع عدد رینولدز (سرعت جریان) است. چنانچه در محدوده خاصی از عدد رینولدز، ضریب درگ مستقل از رینولدز (ثابت) باشد، نیروی درگ با توان دوم سرعت متناسب خواهد بود):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A U^2 C_D \quad \& \quad C_D = C_D(Re) \quad (۱۳)$$

مطابق شکل اسلاید بعد، این فلومتر بر اساس نیروی درگ وارد بر یک جسم مانع که در مسیر جریان قرار گرفته عمل می کند. اثر این نیرو توسط کرنش سنجی که به پایه جسم متصل است، اندازه گیری می شود و لذا از طریق مقدار این نیرو و مشخصات هیدرودینامیکی جسم مانع، سرعت متوسط جریان و دبی سنجیده می شود. این دبی سنج پاسخ دینامیک خوبی دارد و معمولاً خطای آن کمتر از ۰/۵ درصد است. چنانچه این فلومتر بصورت قائم نصب شود، به دلیل اثرات وزن، دچار خطا می شود که با تنظیم نقطه صفر، این خطا قابل برطرف شدن است. نوع دارای هندسه متقارن آن برای جسم مانع می تواند برای اندازه گیری جریان از هر دو طرف مورد استفاده قرار گیرد (در این حالت دیگر مسیر ورود و خروج مشخص اهمیت ندارد). معمولاً از این فلومتر در مواردی که روشهای مرسوم اندازه گیری فشار میسر نیست، استفاده می شود مانند جریان لزج داغ آسفالت، قیر، روغنهای و دوغابها و نظایر آن.

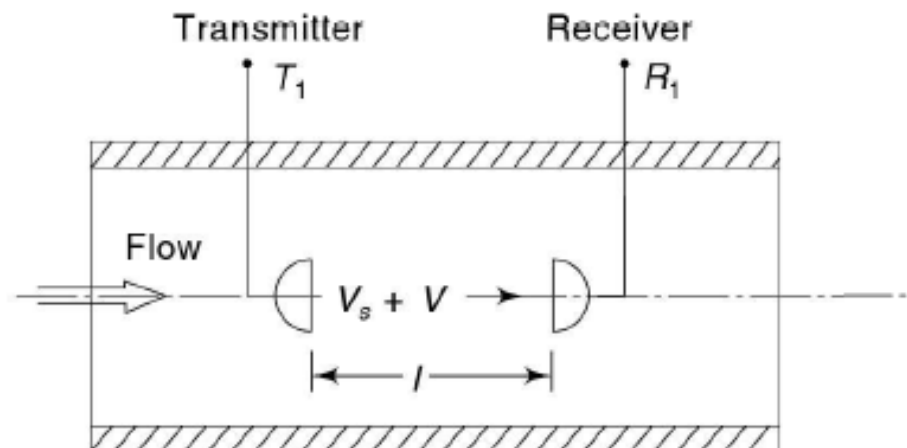
## فلومتر تارگت



## فلومتر اولتراسونیک

فلومترهای اولتراسونیک معمولاً بر اساس تغییرات سرعت انتشار پالسهای اولتراسونیک در اثر جریان سیال عمل می کنند. فرکانس پالسهای منتشر شده معمولاً در محدوده ۱۰ مگاهرتز است که بسیار بالاتر از فرکانسهای قابل شنیدن توسط انسان است (حداکثر ۲۰ کیلوهرتز). در شکل، ارسال و دریافت این امواج بصورت شماتیک نشان داده شده است. در حالتی که جریان برقرار نیست، فاصله زمان بین دریافت و ارسال امواج ( $t_0$ ) برابر است با:

$$t_0 = \frac{l}{V_s} \quad (۱۴)$$



Travel time difference method (single transmitter–receiver system)



در رابطه (۱۴)،  $l$  فاصله بین فرستنده و گیرنده و  $V_s$  سرعت صوت در محیط سیال است. چنانچه جریان سیالی با سرعت  $V$  در جهت انتشار امواج صوتی در لوله برقرار شود، برای فاصله زمان بین دریافت و ارسال امواج ( $t$ ) داریم:

$$t = \frac{l}{V_s + V} = \frac{l(V_s - V)}{V_s^2 - V^2} \quad (15)$$

چنانچه  $V_s \gg V$  باشد، در اینصورت داریم:

$$t = \frac{l(V_s - V)}{V_s^2 - V^2} \approx \frac{l(V_s - V)}{V_s^2} = \frac{l}{V_s} \left( 1 - \frac{V}{V_s} \right) = t_0 \left( 1 - \frac{V}{V_s} \right) \quad (16)$$

لذا اندازه گیری ختلاف بین  $t$  و  $t_0$  می تواند به محاسبه سرعت جریان و دبی آن منجر شود:

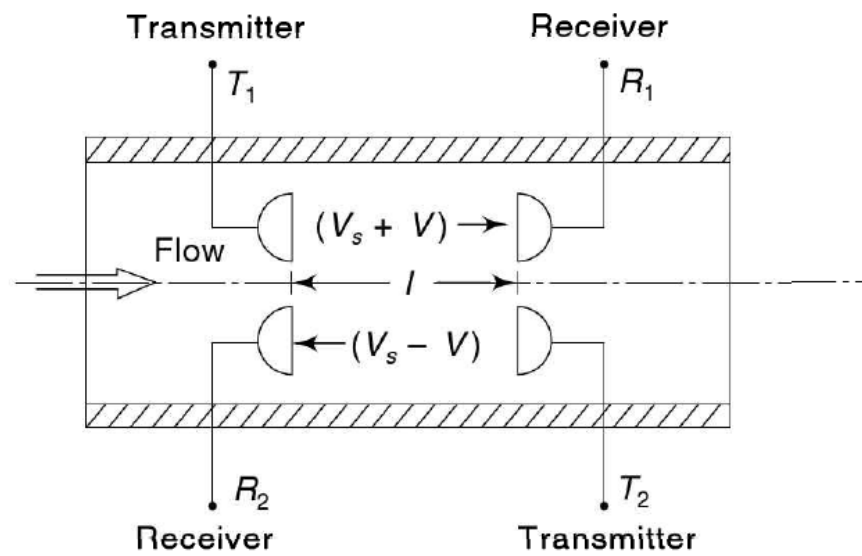
$$\Delta t = t - t_0 = t_0 (V / V_s) \quad (17)$$

ممکن است که در بعضی کاربردها، قطع جریان میسر نباشد و لذا اندازه گیری  $t_0$  با مشکل روبرو شود. در این موارد از یک مجموعه دیگر فرستنده و گیرنده که در خلاف جهت جریان نصب شده، استفاده می شود. چنانچه فواصل زمانی بین دریافت و ارسال به ترتیب در جهت و خلاف جهت جریان برابر با  $t_1$  و  $t_2$  باشد، با فرض  $V_s \gg V$  داریم:

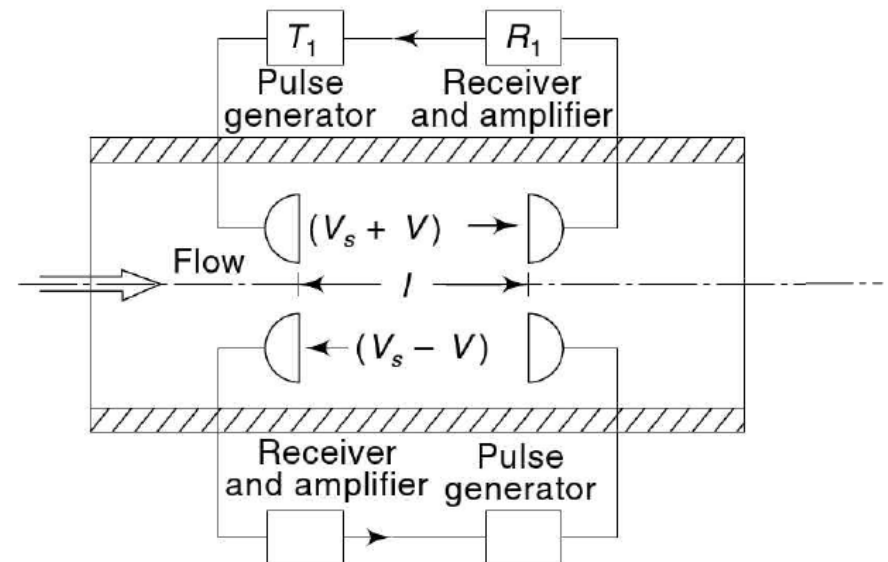
$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{V_s - V} - \frac{l}{V_s + V} = \frac{2Vl}{V_s^2 - V^2} \approx \frac{2Vl}{V_s^2} \quad (18)$$

از آنجا که  $V_s$  (سرعت صوت) تابع دما و فشار است اندازه گیری دقیق آن در عمل مقداری دشوار است. در این موارد معمولاً از آرایش حلقه نوسانی برای اندازه گیری استفاده می شود تا اثر سرعت صوت در نتیجه محاسبات حذف شود. در این حالت، اختلاف فرکانسهای ارسال پالسها در جهت و خلاف جهت جریان با سرعت جریان متناسب است (در این مورد کتب مرجع اندازه گیری را مطالعه کنید).

## ارسال و دریافت امواج در فلومتر اولتراسونیک



Travel time difference method (twin transmitter-receiver system)



Oscillating loop method

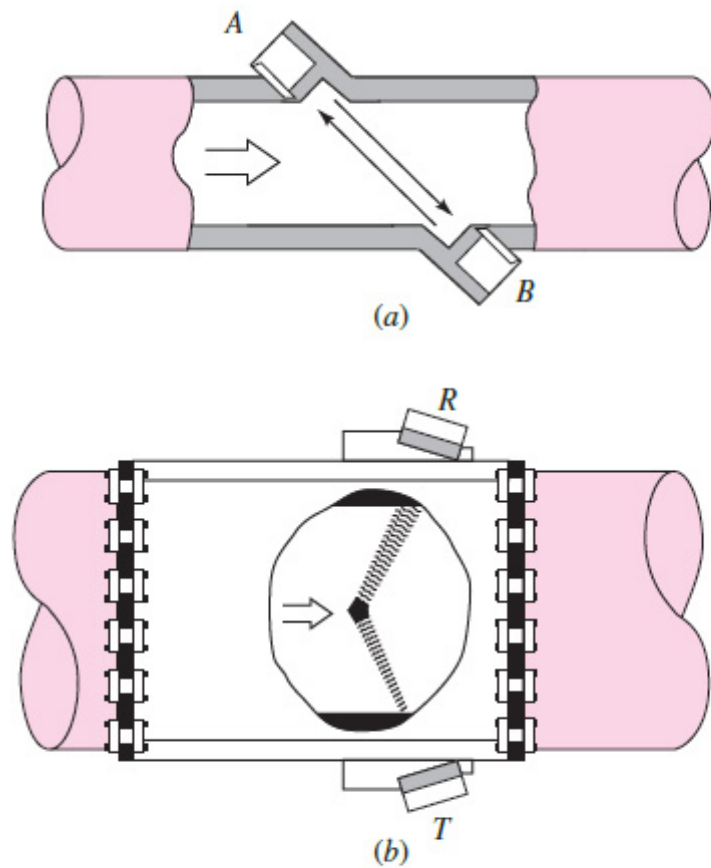


Fig. 6.35 Ultrasonic flowmeters: (a) pulse type; (b) doppler-shift type (from Ref. 41); (c) a portable noninvasive installation (Courtesy of Thermo Polysonics, Houston, TX.)

## فلومتر الکترومغناطیس (Electromagnetic Flow Meter)

از فلومترهای الکترومغناطیس برای اندازه گیری دبی مایعاتی که رسانای الکتریسیته هستند، استفاده می شود. این فلومترها بر اساس قانون فارادی اندازه گیری دبی را انجام می دهند. براساس این قانون، اختلاف ولتاژ القایی در یک جسم رسانای الکتریسیته که در راستای عمود بر جهت میدان مغناطیسی در حال حرکت است، از رابطه زیر بدست می آید:

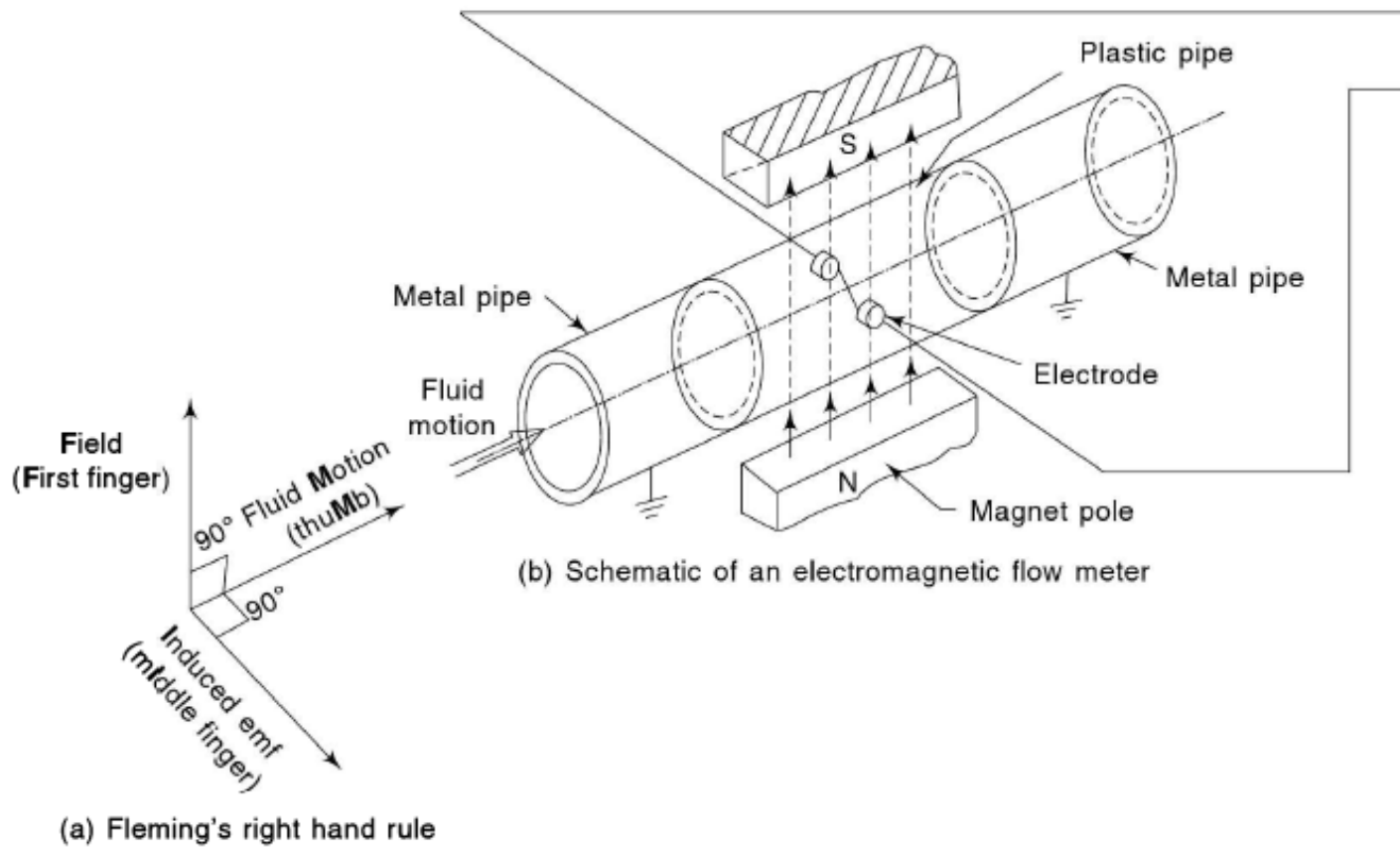
$$E_0 = BlU \times 10^{-8} \text{ (Volts)} \quad (19)$$

که در رابطه فوق،  $B$  چگالی شار مغناطیسی ( $V.s/cm^2$ )،  $l$  طول جسم رسانا (cm) و  $U$  سرعت (cm/s) آن است. در شکل اسلاید بعدی، ساختار فلومتر الکترومغناطیس نشان داده شده است. در مقطع اندازه گیری باید جنس لوله از مواد رسانای الکتریکی نظیر پلاستیک ها باشد. در اینجا مسیر جریان الکتریکی عبوری از لوله برابر قطر لوله است ( $l = D$ ) و لذا از رابطه دبی جریان داریم:  $Q = UA = U\pi D^2 / 4$

$$E_0 = \frac{4B}{\pi D} Q \times 10^{-8} \text{ (Volts)} \quad (20)$$

معمولا ولتاژ القایی بسیار ضعیف بوده و نیاز به تقویت دارد. مثلاً برای جریان آبی که سرعت آن در حدود 1 m/s است، مقدار ولتاژ ایجاد شده در حدود 1 mV است. این فلومتر بر جریان سیال تاثیری ندارد و لذا برای اندازه گیری دبی جریانهایی که حاوی ذرات جامد هستند، بسیار مفید است. همچنین عملکرد این دبی سنس در محدوده بزرگی از سرعت جریان خطی است که یک مزیت عمده برای آن محسوب می شود. این تجهیز برای اندازه گیری دبی اسیدها (که خوردگی بالایی دارند) الکترولیتها، خمیر کاغذ، دوغاب سیمان، شوینده ها و سیالات چرب و چسبنده رسانای الکتریسیته مفید است. شایان ذکر است که این فلومتر نسبتاً گران بوده و برای سیالاتی که هدایت الکتریکی آنها کمتر از  $1 \mu S/cm$  است، کاربرد ندارد.

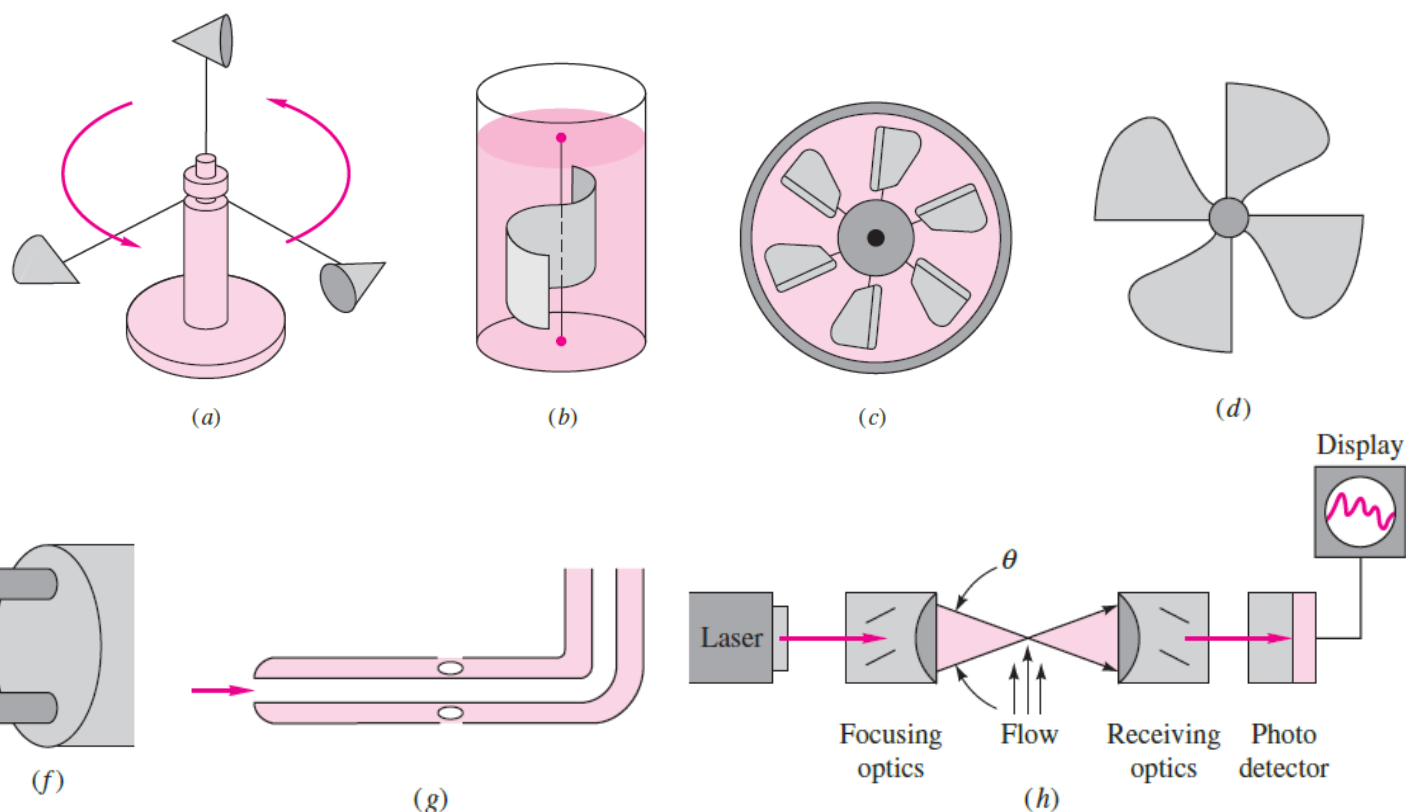
## فلومتر الکترومغناطیس



## اندازه گیری سرعت جریانها

در بعضی کاربردهای مهندسی علاقه مند به دانستن سرعت جریان (موضعی-لحظه ای و یا متوسط زمانی و مکانی) هستیم. اندازه گیری سرعت با استفاده از روشهای متعددی صورت می گیرد که عمده آنها در شکل زیر نشان داده شده اند:

**Fig. 6.29** Eight common velocity meters: (a) three-cup anemometer; (b) Savonius rotor; (c) turbine mounted in a duct; (d) free-propeller meter; (e) hot-wire anemometer; (f) hot-film anemometer; (g) pitot-static tube; (h) laser-doppler anemometer.



**سرعت سنجهای پورتابل:** از سرعت سنجهای پورتابل برای اندازه گیری سرعت جریان هوا بویژه در تهویه مطبوع استفاده می شود. روش رایج، اندازه گیری سرعت موضعی چند نقطه در دریچه های خروجی کانالهای تهویه است که با متوسط گیری از مقادیر ثبت شده می توان به تخمینی از سرعت متوسط و در نهایت دبی جریان کانال مربوطه رسید. همچنین در واحدهای QC کارخانجات سازنده تجهیزات تهویه، از این روش برای تست تقریبی دبی دستگاه های دارای دمنده هوا نظیر هواسازها، ایرواشرها و ... استفاده می شود.



باد سنج (اندازه گیری سرعت و جهت باد)



سرعت سنج - پروانه ای



سرعت سنج - سیم داغ



**لوله پیتوت:** لوله پیتوت یکی از مهمترین وسایل جهت اندازه گیری سرعت موضعی جریان هوا است. این وسیله دارای کاربردهای متعدد صنعتی و نیز تحقیقاتی است. برای نمونه سرعت سنج بسیاری از هواپیماها یک لوله پیتوت است. این لوله به شکل L بوده که دارای دو مجرای مستقل است. مجرای اول به نوک لوله پیتوت وصل می شود و مسیر مجرای دوم کاملاً مستقل از مجرای اول بوده و به سوراخهای در مجاورت بخش اندازه گیری لوله منتهی می شود. لوله پیتوت همواره به نحوی متصل می شود که سر آن (انتهای مجرای اول) در مقابل جریان باشد، بنابراین **سر لوله پیتوت یک نقطه سکون** بوده (Stagnation Point) و **سرعت جریان در این نقطه به صفر می رسد**. فشار در این نقطه به فشار کل یا فشار سکون معروف ( $p_s$ ) است و مطابق رابطه برنولی از فرمول زیر تبعیت می کند.

$$p_1 = p_s = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (21)$$

مطابق شکل، در مسیر دوم که به سوراخهای جانبی متصل است، فشار برابر فشار جریان است. بنابراین با اندازه گیری اختلاف فشار مسیر اول و مسیر دوم می توان به فشار دینامیکی (فشار سرعتی) دست یافت و بر اساس آن سرعت جریان را معلوم کرد:

$$p_1 - p_2 = p_s - p = \frac{1}{2} \rho V^2 \longrightarrow V = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (22)$$

