بسم الله الرحمن الرحیم

Razi University
Educational Use

مکانیک سیالات۲

اندازه‌گیری جریان سیال

میثم سعیدی-استادیار گروه مهندسی مکانیک

به منظور کنترل فرآیند در صنعت، دانستن مقدار موادی که به سیستم وارد و یا از آن خارج می‌شوند، ضروری است. در جائی که این مواد در حالت سیال انتقال یابند، اهمیت دبی آن در داخل لوله و یا کانال مهم می‌شود. لذا چندین نوع مختلف وسایل اندازه‌گیری دبی را که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، در اینجا به شکل زیر دسته‌بندی می‌کنیم:

۱ـ وسایل اندازه‌گیری که مستقیماً بر پایه اندازه‌گیری وزن و یا حجم بنا شده‌اند.

۲ـ وسایل اندازه‌گیری که برای هدهای متغیر بنا شده‌اند (Variable head meter).

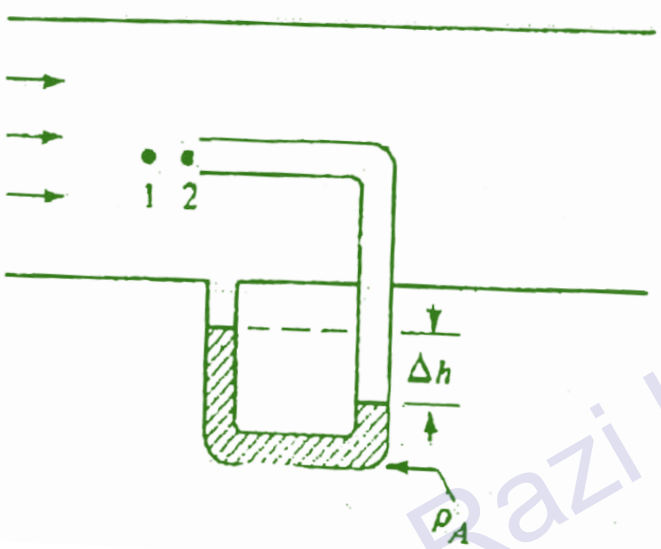
۳ـ وسایل اندازه‌گیری جریانی و سطحی (Current, Area meter)

۴ـ وسایل اندازه‌گیری رفت و برگشتی (Positive - Displacement)

۵ـ وسایل اندازه‌گیری مغناطیسی (Magnetic - meter)

Razi University
Educational Use

لوله پیتوت



اندازه‌گیری سرعت موضعی ـ لوله پیتوت

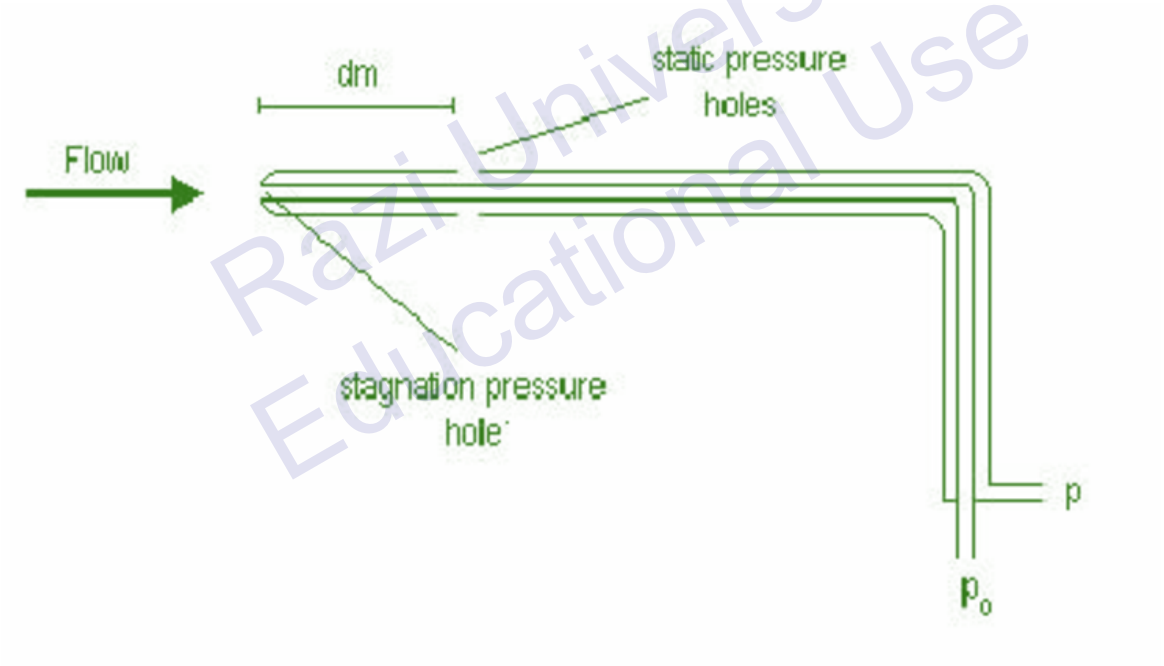
لوله پیتوت برای اندازه‌گیری سرعت موضعی در یک نقطه معین در جریان سیال و با استفاده از اختلاف فشار به کار می‌رود که در شکل زیر نشان داده شده است:

Razi University
Educational Use

با نوشتن معادله برنولی بین نقاط ۱ و ۲ می‌توان سرعت جریان را به دست آورد:

$$V_1 = C\sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}$$

C ضریب پیتوت نامیده می‌شود که برای از بین بردن عوامل خطا از آن استفاده می‌شود و مقدار آن برای لوله پیتوت استاندارد برابر ۱ است. لوله پیتوت را می‌توان برای اندازه‌گیری سرعت جریان در یک لوله با قطر بزرگ به کار برد و با تعیین سرعت حداکثر در مرکز لوله سرعت متوسط را به دست آورد.



Razi University Educational Use

مثال) به هنگام اندازه‌گیری سرعت سیال با استفاده از یک *Pitot-static tube*، اختلاف فشار اندازه‌گیری شده برابر cm ۱۰ است. سرعت سیال چند متر بر ثانیه است؟

$$V = \sqrt{\frac{۲(P_۲ - P_۱)}{\rho}}$$

چون اختلاف فشار بر حسب ارتفاع بیان شده است داریم:

$$V = \sqrt{۲g(z_۲ - z_۱)} = \sqrt{۲ \times ۹/۸۱ \times ۰/۱} = ۱/۴ m/s$$

Razi University
Educational Use

جریان‌سنجی بر اساس افت هد

فرآیند عمل این نوع وسیله اندازه‌گیری بر پایه معادله برنولی استوار است. انقباض در عبور جریان برای افزایش سرعت استفاده می‌شود که همراه با کاهش هد فشار بوده و در نتیجه افت فشار تابعی از دبی جریان سیال می‌باشد.

Head flow meter ها مرکب از دو بخش هستند:

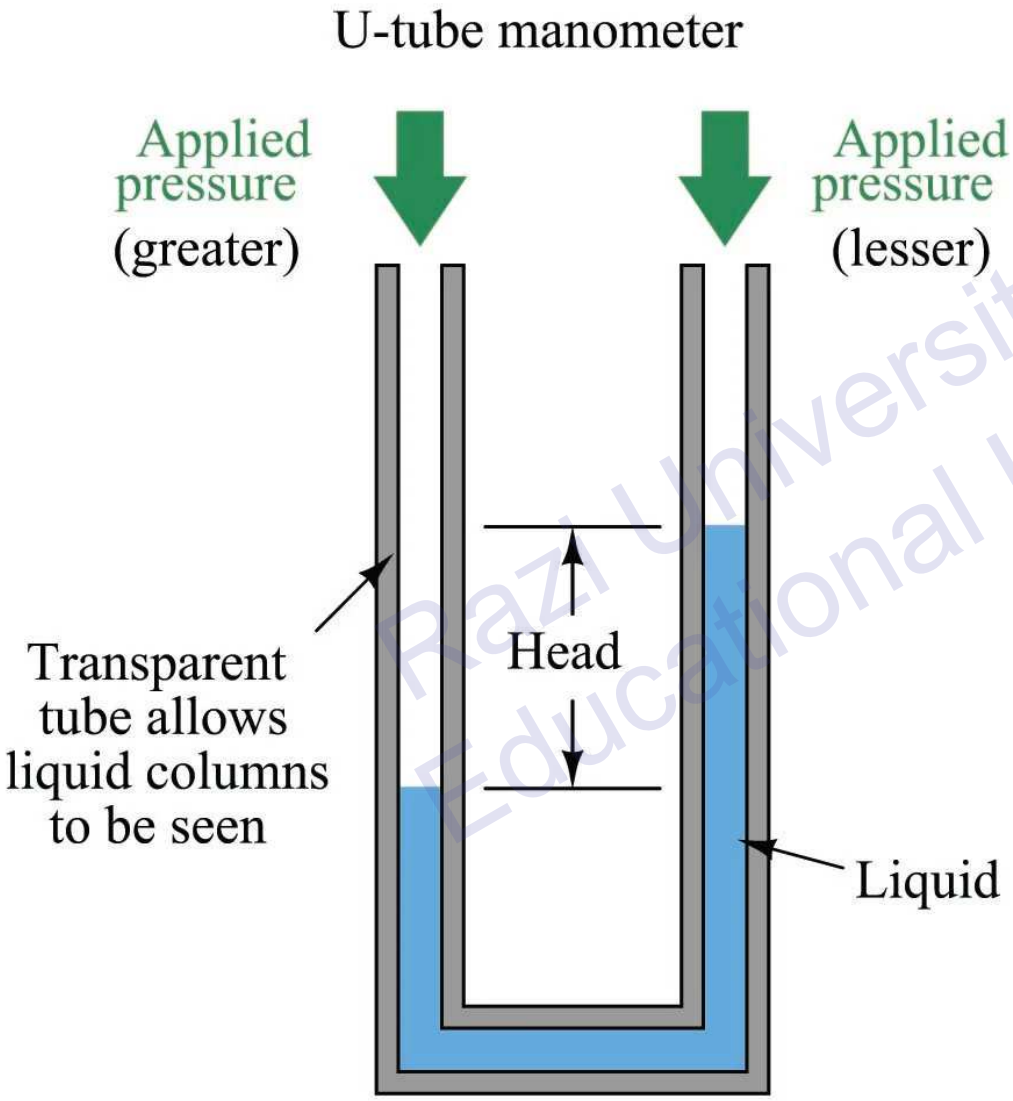
۱ـ المنت اولیه (Primary element)

۲ـ المنت ثانویه (Secondary element)

قسمت اول موجب کاهش هد فشاری می‌شود و قسمت دوم این افت فشار را اندازه‌گیری می‌نماید. مشهورترین نوع این نوع المنت‌ها برابر کانال‌های سربسته مانومترهای U - tube (لوله U شکل) می‌باشند.

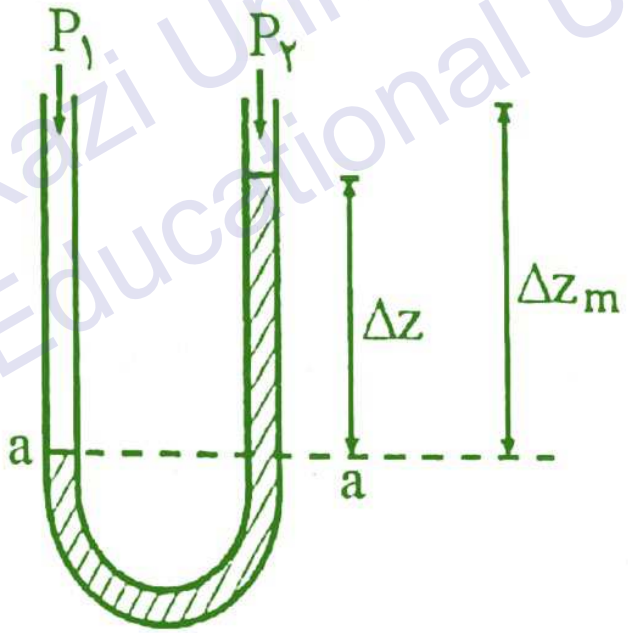
Razi University Educational Use

لوله U شکل



Razi University Educational Use

یک مانومتر ساده مطابق شکل شامل دو سیال با دانسیته‌های مختلف ρ_1، ρ_m است که جهت اندازه‌گیری اختلاف فشار $(P_1 - P_2)$ به کار گرفته می‌شود. برای بدست آوردن این مقدار اختلاف فشار، سطح a - a را در نظر می‌گیریم و روابط مورد استفاده را بر مبنای آن به کار می‌بریم. فشار برای هر دو قسمت بازو در سطح a - a بایستی یکسان باشد.



Razi University
Educational Use

سمت چپ بازو : $P_1 + \rho g \Delta z_m$

سمت راست بازو : $P_2 + \rho g(\Delta z_m - \Delta z) + \rho_m g \Delta z = P_1 + \rho g \Delta z_m$

برای مایعات : $P_1 - P_2 = (\rho_m - \rho) g \Delta z$

در صورتی که سیال گاز باشد، دانسیته آن (ρ) در مقابل ρ_m قابل صرفنظر کردن می‌باشد و داریم:

$$P_1 - P_2 = \rho_m g \Delta z$$

از طرفی داریم:

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

با ترکیب روابط فوق داریم:

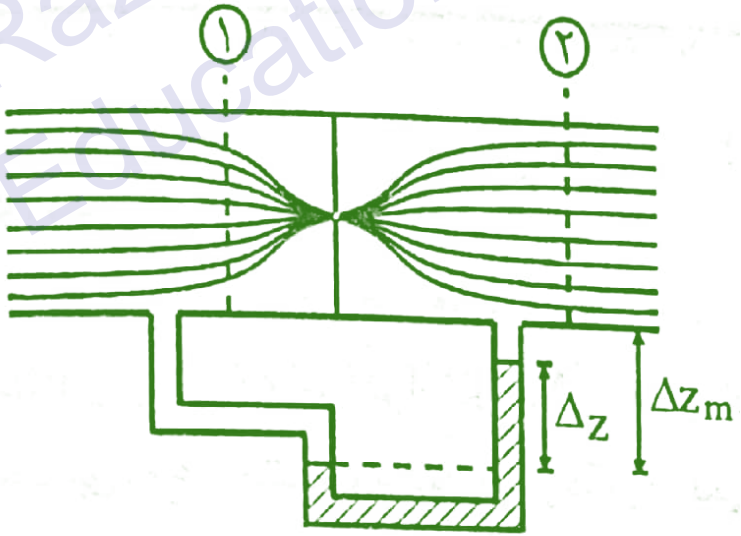
$$\Delta h = \frac{(\rho_m - \rho)\Delta z}{\rho}$$

Razi University Educational Use

اوریفیس

اریفیس روزنه‌ای است که در مسیر حرکت جریان سیال قرار داده می‌شود. معادله برنولی برای دو نقطه (۱) و (۲) عبارت است از:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = 0 \Rightarrow \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{u_2^2}{2}\left(1 - \frac{u_1^2}{u_2^2}\right)$$



Razi University
Educational Use

بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که در نقطهٔ (۱) بر روی جریان سیال هیچ‌گونه تأثیری از طرف Orifice plate گذاشته نمی‌شود و در این نقطه سیال دارای سرعت خطی متوسط u_1 و سطح مقطع S_1 می‌باشد، ولی در نقطه (۲) در داخل لوله سیال به ماکزیمم سرعت خطی متوسط خود u_2 می‌رسد و سطحی برابر S_2 (مینیمم سطح مقطع جریان سیال) را اشغال می‌نماید، که این نقطه را اصطلاحاً Vena - contracta گویند. محل این نقطه تابعی از نسبت قطر ریفیس به قطر لوله و همچنین دبی سیال می‌باشد. با نوشتن معادله برنولی در مقاطع (۱) و (۲) و جایگذاری یکی از سرعت‌ها بر حسب دیگری با استفاده از معادله پیوستگی و قرار دادن افت فشار از مانومتر، سرعت در یکی از مقاطع و به تبع آن دبی محاسبه می‌شود. بازیابی فشار درون یک صفحه اریفیس خیلی کم است، زیرا وجود eddyها که در پشت vena contracta بوجود می‌آید تلفات اصطکاکی زیادی را به همراه خواهد داشت که قابل بازیابی نمی‌باشد. لذا یکی از معایب این نوع وسایل اندازه‌گیری را می‌توان همین تلفات دانست. پس یکی از معایب بزرگ اریفیس‌ها عدم بازیابی مناسب فشار پس از ایجاد افت فشار (برای اندازه‌گیری دبی جریان)، می‌باشد.

از مزایای اریفیس‌ها می‌توان به ارزان بودن و نصب ساده آنها اشاره کرد. همچنین انعطاف پذیری نسبت قطر اریفیس به قطر لوله از مزایای دیگر آن است. این مسأله در شرایطی که تغییر شدت جریان زیاد باشد خیلی اهمیت دارد. در وسایل دیگر مانند وانتوری نسبت دو قطر قابل تغییر نمی‌باشد. اگر دبی تغییر کند، با عوض کردن و یا گشاد کردن سوراخ درون صفحه اریفیس این عمل قابل اجراء خواهد بود.

Razi University Educational Use

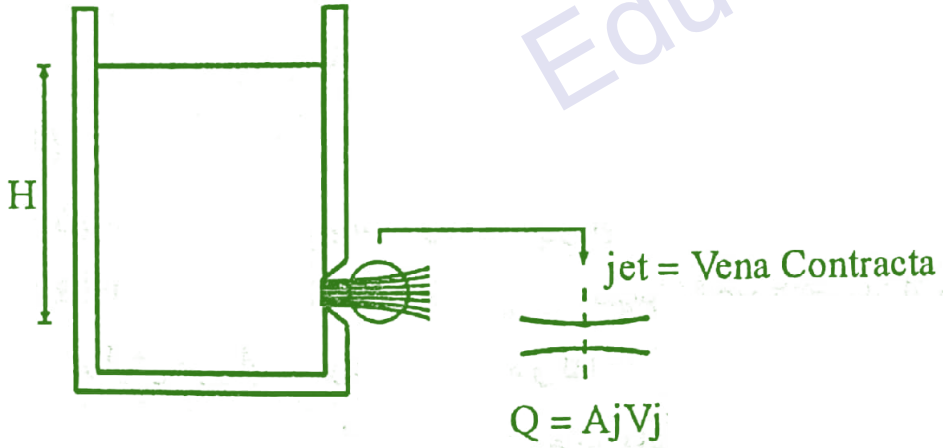
مخزنی را در نظر بگیرید که توسط یک اریفیس در انتهای ظرف در حال تخلیه است . در حین خروج مایع از مخزن و فواره شدن به خارج، سطح مقطع خروجی به حداقل مقداری می‌رسد که همانطوری که گفته شده Vena-Contract نامیده می‌شود. سرعت و سطح مقطع در این نقطه را با Vj و Aj نمایش می‌دهیم و همانطوری که می‌دانید دبی حجمی برابر حاصلضرب این دو مقدار است. لذا داریم:

ضریب سرعت $= C_V = \frac{Vj}{V_{Ideal}}$ ، سرعت تئوری بدون در نظر گرفتن تلفات $= V_{Ideal} = \sqrt{2gh}$

$$\text{ضریب انقباض} = C_C = \frac{Aj}{A_\circ} = \frac{\text{مساحت جت}}{\text{مساحت اریفیس}}$$

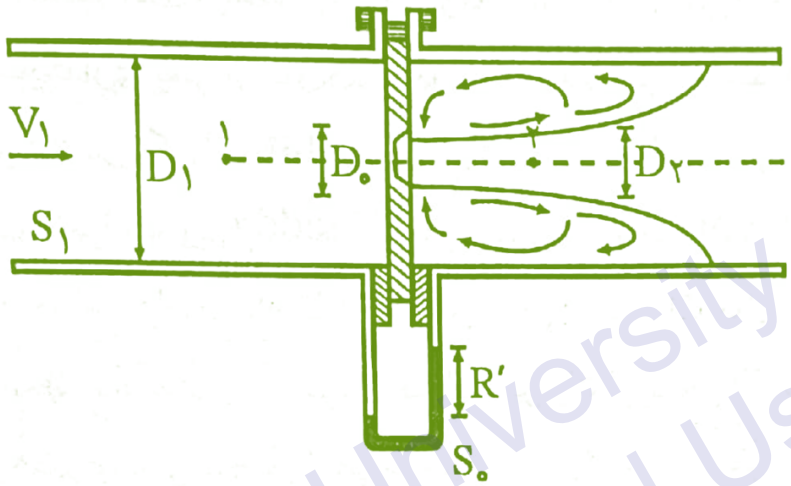
$$Q = AjVj = C_C C_V A_\circ \sqrt{2gh} = C_d A_\circ \sqrt{2gh}$$

C_d ضریب تخلیه اریفیس بوده و تابع نسبت قطر اریفیس به قطر لوله، عدد رینولدز و ضخامت صفحه اریفیس می‌باشد.



Razi University
Educational Use

اریفیس در یک لوله



از معادله برنولی بین نقاط ۱ و ۲ و معادله پیوستگی خواهیم داشت:

$$\frac{V_{1t}^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma}=\frac{V_{2t}^2}{2g}+\frac{P_2}{\gamma} \quad , \quad V_{1t}\frac{\pi D_1^2}{4}=V_{2t}C_C\frac{\pi D_0^2}{4}$$

$$\text{دبی واقعی} = Q_a = C_d A_0 \sqrt{\frac{2(P_1-p_2)/\pi}{1-C_C^2(D_0/D_1)^4}}$$

در روابط فوق C_c ضریب انقباض و C_d ضریب تخلیه می‌باشد.

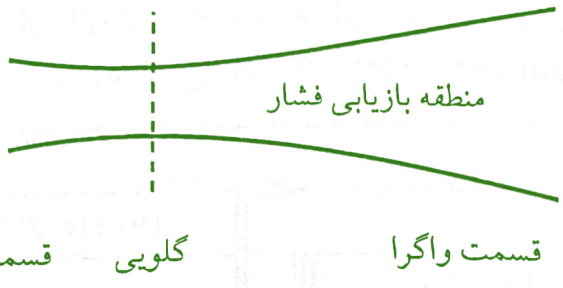
Rezi University
Educational Use

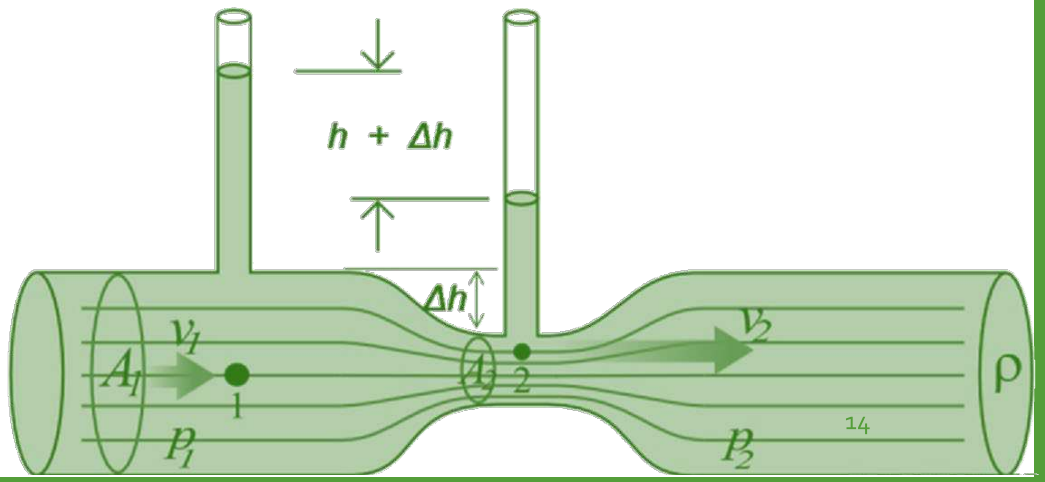
ونتوری

تئوری اریفیس در اینجا نیز صادق می‌باشد. و تنها فرق این دو در این است که سرعت جریان در بخش مخروطی upstream cone با کاهش فشار، افزایش می‌یابد. سپس با عبور جریان از بخش گلویی به علت این که تدریجاً زاویه مخروط افزایش می‌یابد، سرعت کم شده و لذا موجب افزایش فشار در این بخش خواهد شد و در نتیجه اکثر افت فشار بازیابی می‌شود.

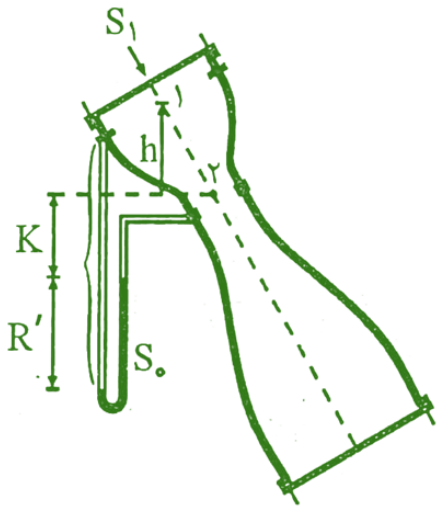
لازم به یادآوری است که چون زاویه در جهت پایین دست کوچک است، لذا eddy و Drag در این جهت کم می‌باشد. به هر صورت تلفات وانتوری به هنگام طراحی آنها تقریباً ده درصد اختلاف فشار $P_1 - P_2$ (تلفات فشار ورودی قسمت گلویی و خروجی) خواهد بود و در نتیجه حدود ۹۰ درصد اختلاف فشار در بخش پایین دست (خروجی جریان) مخروط بازیابی می‌شود. از مزایای مهم این نوع وسایل کاربرد آنها جهت اندازه‌گیری دبی مایعاتی است که دارای ذرات جامد معلق می‌باشند. روابط و شکل مربوط را در ادامه خواهید دید.

Razi University Educational Use





همانطوری که گفته شد وانتوری متر جهت اندازه‌گیری دبی جریان در لوله‌ها به کار می‌رود. روابط مربوط با توجه به شکل عبارتند از:



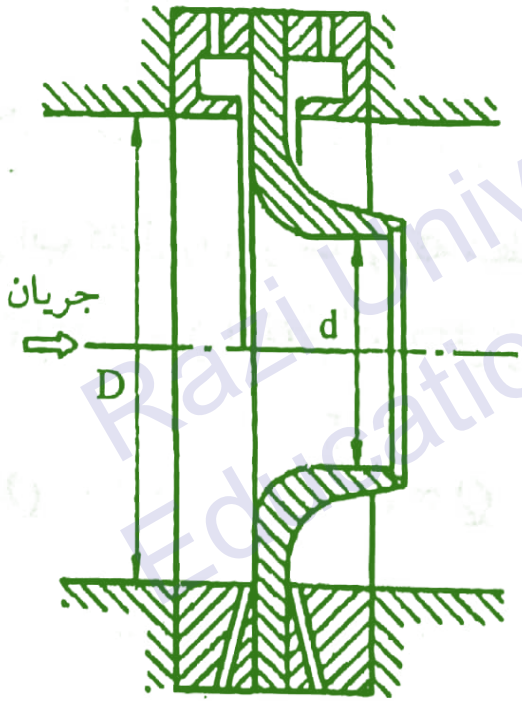
معادله برنولی بین نقاط ۲ و ۱: $\frac{V_{1t}^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma}+h=\frac{V_{2t}^2}{2g}+\frac{P_2}{\gamma}$ ، معادله پیوستگی: $\frac{V_1^2}{2g}=\frac{V_2^2}{2g}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4$

دبی واقعی $=Q_a=C_V A_2\sqrt{\frac{2g\left[h+(P_1-P_2)/\gamma\right]}{1-(D_2/D_1)^4}}$

Razi University Educational Use

نازل

در شکل زیر یک نازل نشان داده شده است.



Razi University
Educational Use

در جدول زیر افت هد خالص و هزینه سه وسیله ذکرشده مورد مقایسه قرار گرفته شده است:

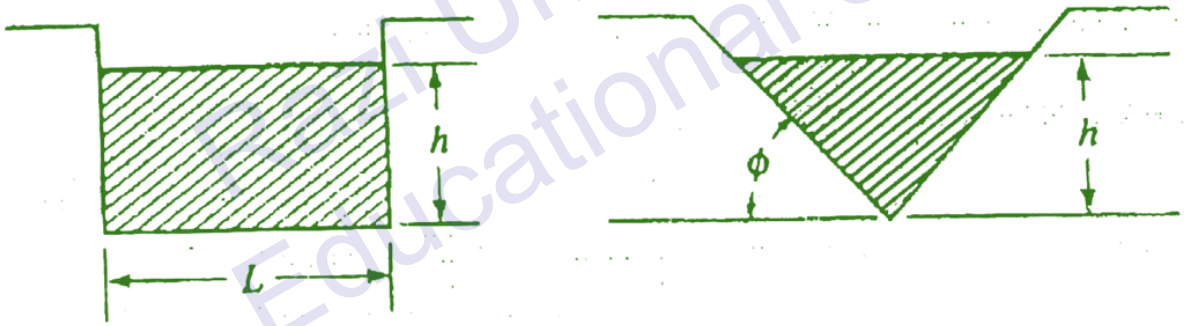
نام وسیله	افت هد خالص	هزینه
اریفیس	زیاد	کم
نازل ونتوری	متوسط	متوسط
	کم	زیاد

Razi University Educational Use

سرریزها

از سرریزها برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز استفاده می‌شود. سرریزها به شکل سدی هستند که مایع از روی آنها جریان پیدا می‌کند. جریان سیال از روی سرریز عبور می‌کند و ارتفاع h که هد سرریز نامیده می‌شود در فاصله $3h$ از بالادست جریان اندازه‌گیری می‌شود.

در شکل زیر دو نوع سرریز مستطیلی و مثلثی نشان داده شده است.



Sharif University
Educational Use

برای سرریز مستطیلی: $Q \propto h^{\frac{3}{2}}$

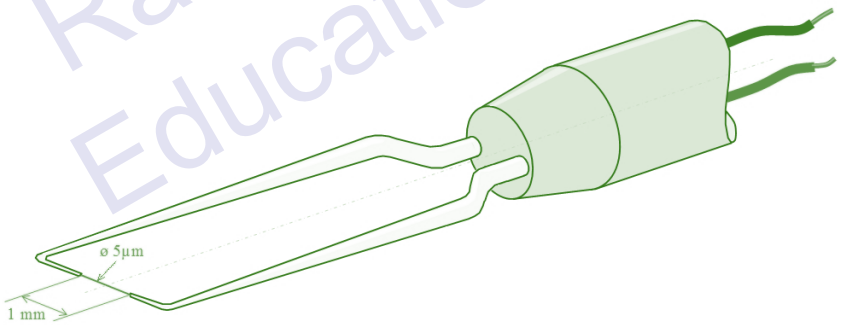
برای سرریز مثلثی: $Q \propto h^{\frac{5}{2}}$

هات وایر

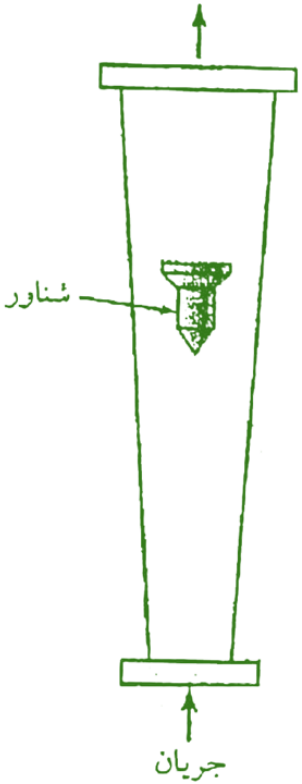
بادسنج سیم داغ

هرگاه یک سیم داغ در داخل جریان قرار گیرد دمای آن در اثر سرعت سیال تغییر پیدا می‌کند و این تغییر دما سبب تغییر مقاومت الکتریکی سیم می‌شود. بادسنج سیم داغ وسیله‌ای است که جریان را با استفاده از تغییر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری می‌نماید.

Razi University
Educational Use



روتامتر



روتامتر جریان‌سنج سطحی است که در آن افت فشار تقریباً ثابت است و مساحتی که سیال در آن جریان دارد بر حسب دبی تغییر می‌کند. این جریان از طریق درجه‌بندی مساحت قابل اندازه‌گیری است.

در شکل زیر یک روتامتر نشان داده شده است. جریان از مخروطی به سمت بالا حرکت می‌کند و یک شناور را معلق می‌کند. با افزایش دبی جریان ارتفاعی که شناور بالا می‌رود بیشتر می‌شود.

از روتامتر می‌توان برای اندازه‌گیری جریان مایعات و گازها استفاده کرد.

Razi University Educational Use

ضربه قوچ

هرگاه سرعت مایع داخل لوله به طور ناگهانی تغییر کند تغییر ناگهانی در فشار ایجاد می‌شود که به شکل یک موج فشاری در طول لوله حرکت می‌کند و باعث افزایش یا کاهش شدید فشار می‌شود که به این پدیده ضربه قوچ گفته می‌شود.

تغییر ناگهانی سرعت مایع در داخل لوله می‌تواند ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر موجود در مسیر جریان باشد.

یک لوله به طول L را در نظر می‌گیریم که یک طرف آن به یک مخزن بزرگ متصل است و در انتهای طرف دیگر آن شیر باز قرار دارد و جریان دائمی برقرار است. با بسته شدن ناگهانی شیر یک موج فشاری ایجاد می‌شود که با سرعت a به سمت شیر حرکت می‌کند. هرگاه t_c زمان بسته شدن شیر باشد داریم:

$t_c < \frac{2L}{a} \Rightarrow$ بسته شدن شیر سریع است.

$t_c > \frac{2L}{a} \Rightarrow$ بسته شدن شیر آهسته است.

Razi University Educational Use