

پیشگفتار

گزارش تدوین شده تحت عنوان مبانی اندازه گیری جریان سیالات با روشهای مختلف بعنوان اولین گزارش جامع مطالعاتی در این زمینه جهت صنایع آب و فاضلاب و نفت و پتروشیمی و بمناسبت نمایشگاه صنایع آب و فاضلاب دیمه سال ۱۳۹۳ انتشار یافت.

گزارش حاضر ضمن معرفی مبانی نظری و تئوری کارکرد دستگاه های اندازه گیری دبی در صنایع مختلف و آزمایشگاه ها شرح تفصیلی از کارکرد عملی و کاربردی دستگاه ها نیز ارائه گردیده است. نکات مربوط به مشخصات فنی و مهندسی دستگاه ها در این گزارش مورد توجه و به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. انتظار می رود انتشار این گزارش در ارتقای سطح علمی و فنی کارشناسان حوزه اندازه گیری و ابزار دقیق در صنایع گوناگون موثر واقع شود.

شرکت فراسنج ابزار بعنوان تنها تولید کننده دستگاه های اولتراسونیک در کشور و نیز دومین تولید کننده فلومترهای الکترومغناطیسی است. فناوری حاصله در شرکت فراسنج ابزار که حاصل تلاش دو دهه کادر علمی دانشگاهی و مهندسين زبده کشور است به تکامل دستگاه های تولیدی از نظر قابلیت اطمینان و دقت منجر گردیده است. این روند همچنان در قالب فعالیتهای تحقیق و توسعه شرکت در حال انجام است.

هم اکنون بیش از ۳۰۰۰ دستگاه تولیدی شرکت فراسنج ابزار در شرکتهای آب و فاضلاب کشور، آب منطقه ای، واحدهای پتروشیمی، نیروگاه ها و کارخانجات در حال بهره برداری است که در مجموع بهره برداران از کارکرد دستگاه ها، رضایتمندی خود را اعلام نموده اند.

گزارش تدوین شده نیز حاصل فعالیتهای علمی بخش تحقیقات شرکت است که در این رابطه از آقایان مهندس کشاورز، مهندس حیدری و مهندس عیسایی و سرکار خانم موسوی که در تولید، جمع آوری و تدوین مشارکت داشته اند تشکر و قدردانی می گردد. انتظار داریم کارشناسان محترم نظرات اصلاحی خود را جهت تکمیل در چاپ های بعدی به این شرکت ارسال فرمایند.

شرکت فراسنج ابزار

علیرضا آرایبی

فهرست

صفحه	عنوان
	مقدمه
۱	۱- مبانی.....
۲	۱-۱- پیشگفتار.....
۲	۲-۱- مبانی جریان سیالات.....
۵	۳-۱- ترمودینامیک سیال و گازها.....
۹	۴-۱- قوانین و معادلات سیالات.....
۱۴	۵-۱- مبانی و روشهای جریان سنجی سیالات.....
۴۲	۶-۱- مبانی و روشهای سطح سنجی (ارتفاع سنجی).....
۴۶	۷-۱- مبانی و روشهای ضخامت سنجی اولتراسونیک.....
۴۸	۸-۱- مبانی و روشهای فشار سنجی.....
۵۱	۲- اندازه گیری به روش فراصوتی (اولتراسونیک).....
۵۲	۱-۲- مبانی اندازه گیری به کمک امواج فراصوتی.....
۵۹	۲-۲- اندازه گیری جریان مایع به کمک امواج فراصوتی.....
۶۳	۳-۲- اندازه گیری جریان گاز به کمک امواج فراصوتی.....
۶۸	۴-۲- مبانی نظری عملکرد اندازگیرهای فراصوتی.....
۷۵	۳- انواع اندازه گیرهای متداول.....
۷۶	۳-۱- دسته بندی جریان سنج ها (فلومترها).....
۹۵	۴- نصب و نگهداری تجهیزات اندازه گیری.....
۹۶	۴-۱- موقعیت نصب و مکان یابی فلومترها.....
۱۲۳	۵- تولیدات شرکت فراسنج ابزار.....
۱۲۴	۵-۱- فلومترهای اولتراسونیک.....
۱۲۸	۵-۲- فلومترهای مغناطیسی.....
۱۳۰	۵-۳- دیتالاگر فشار.....
۱۳۱	۵-۴- سیستم انتقال اطلاعات.....
۱۳۴	۵-۵- ارتفاع سنج.....
۱۳۷	۵-۶- سیستم تله متری تحت وب.....
۱۳۸	۵-۷- پنل خورشیدی.....

فصل ۱

مبانی

مطالب این فصل:

- آشنایی با مبانی و قوانین حاکم بر سیالات
- مبانی و روش های جریان سنجی گازها
- مبانی و روش های سطح سنجی (ارتفاع سنجی)
- مبانی و روش های ضخامت سنجی
- مبانی و روش های فشار سنجی

در این فصل سیال را تعریف و ویژگیهای آن را بررسی می کنیم. عملکرد، قوانین و معادلات حاکم بر آنها را توضیح می دهیم. به مبانی و روش های جریان سنجی مایعات و گازها می پردازیم و در نهایت مبانی و روش های سطح سنجی، ضخامت سنجی و فشارسنجی را مطالعه می کنیم.

۱-۱- پیشگفتار

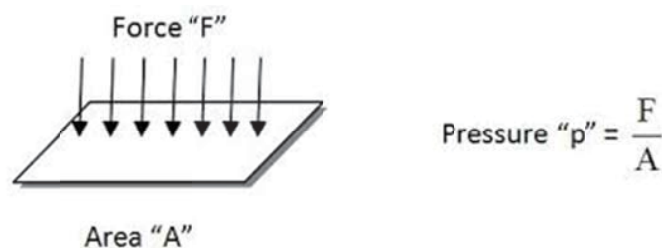
سیال شکلی از ماده است که تنش برشی را تحمل نمی کند و تحت اثر نیروی برشی، هرچند کوچک، به حرکت در می آید به زبان دیگر، سیال ماده ای است که تحت اثر نیروی برشی، دارای خاصیت ارتجاعی نیست. سیال در طبیعت ممکن است به صورت مایع یا گاز باشد. از لحاظ خواص ملکولی، تفاوت هایی بین حالت های ماده جامد، مایع و گازی وجود دارد. مثلاً فاصله ملکول ها در اجسام جامد خیلی کم است و به همین علت، نیروی بین ملکول های اجسام جامد بسیار بزرگ است. در مایعات، فاصله ی بین ملکول ها بیشتر از جامدات و در گازها بسیار بیشتر از جامدات است. همچنین می توان به تفاوت آزادی حرکت ملکول ها در جامدات، مایعات و گازها اشاره نمود. ملکول های جامدات، دارای آزادی حرکت نیستند و به همین دلیل اجسام جامد دارای شکلی مشخص هستند. در مایعات، ملکول ها به طور نسبی آزادی حرکت دارند و این امر باعث می شود که مایع، شکل ظرفی را که در آن قرار گرفته است به خود بگیرد. در گازها، ملکول ها کاملاً آزادی حرکت دارند و به این دلیل در تمام حجم ظرفی که در آن قرار می گیرند پراکنده می شوند و به عبارتی دیگر، تمام ظرف را پر می کنند. برای مطالعه حرکت سیال، وضعیت، حالات و حرکت ملکول های آن در نظر نمی گیرند، بلکه عدم وجود محفظه های خالی در سیال پیوسته را بررسی می نمایند. بنابراین، لازم است که تفاوت بین جامدات و سیالات، بدون در نظر گرفتن خواص ملکولی بیان شود. اکثر جامدات، اگر تحت نیروهای فشاری، کششی و یا برشی قرار گیرند، ابتدا دچار تغییر شکل موقتی می شوند و اگر این نیروها از حد معینی تجاوز کنند، تغییر شکل دائمی در جسم جامد ایجاد خواهد شد. این خاصیت اجسام جامد را که ابتدا تغییر شکل موقتی می دهند، خاصیت ارتجاعی یا الاستیک می گویند. سیالات، تحت نیروهای فشاری و کششی دارای خاصیت ارتجاعی می باشند، اما به هیچ وجه تحت نیروی برشی دارای این خاصیت نیستند. به عبارتی دیگر، اگر کوچکترین نیروی برشی به سیالی وارد شود، سیال به حرکت در می آید یعنی تغییر شکل دائمی می یابد.

۲-۱- مبانی جریان سیالات

در این قسمت برخی از ویژگی های مهم سیالات را معرفی می کنیم. جریان سیالات به همراه این ویژگی ها شناخته می شود.

۱-۲-۱- فشار

فشار، نیروی وارد بر سطح است که با علامت اختصاری P نشان می دهند. اگر مولفه ی عمود بر سطح (نیروی) را که به یک سطح وارد می شود، به مساحت سطح تقسیم کنیم، میانگین فشار روی سطح به دست می آید.



شکل ۱-۱. فشار روی سطح

طبق تعاریف بالا، واحد فشار در سیستم بین‌المللی واحدها (SI)، نیوتون بر متر مربع است که پاسکال نامیده می‌شود. هر 10^5 پاسکال را یک بار می‌گویند. اگر فشار نسبت به فشار جو اندازه‌گیری شود، آن را فشار نسبی و اگر نسبت به خلا کامل اندازه‌گیری گردد، آن را فشار مطلق می‌نامند. رابطه‌ی آن‌ها با هم به صورت زیر است:

$$\text{فشار جو} + \text{فشار نسبی} = \text{فشار مطلق}$$

فشار جو در سطح دریا، معادل $101/3$ کیلوپاسکال است که "یک جو" یا "یک اتمسفر" نامیده می‌شود. این میزان فشار معادل $1/013$ برابر یک بار است.

۱-۲-۲- چگالی و یا جرم مخصوص

جرم مخصوص عبارتست از مقدار جرم در واحد حجم، یعنی:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

که در آن، ρ جرم مخصوص و V نشان‌دهنده‌ی حجم است. اگر جرم یک جسم به صورتی یکنواخت در حجم آن پخش نباشد، جرم مخصوص آن در تمام نقاط یکسان نبوده و در هر نقطه، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta M}{\delta V} = \frac{dM}{dV}$$

(با اینکه δV مقدار بسیار کوچکی است اما از فاصله متوسط بین مولکولهای جسم بزرگتر است.)

وزن مخصوص به صورت وزن تقسیم بر حجم تعریف می‌شود. یعنی:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

وزن مخصوص در هر نقطه‌ی داخل سیال نیز می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\gamma = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\delta V} = \frac{dW}{dV}$$

با توجه به تعاریف جرم و وزن مخصوص و همچنین با استفاده از رابطه‌ی $W = Mg$ ، نتیجه می‌شود که:

$$\gamma = \rho g$$

حجم مخصوص عبارتست از حجم بر واحد جرم، یعنی عکس جرم مخصوص:

$$v = \frac{V}{M} = 1/\rho$$

چگالی نسبی یا جرم مخصوص نسبی برای مایعات، عبارت از نسبت جرم مخصوص آن مایع به جرم مخصوص آب مقطر در دمای 4 درجه سانتی‌گراد است، البته این نسبت یعنی چگالی نسبی معادل نسبت وزن مخصوص مایع به وزن مخصوص آب مقطر در 4 درجه سانتی‌گراد نیز است:

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{آب مقطر } 4 \text{ درجه}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{آب مقطر } 4 \text{ درجه}}}$$

چگالی نسبی گازها را نسبت به هوا می‌سنجند، این تعریف برای گازها به صورت زیر است:

$$S = \frac{\text{جرم مخصوص گاز در } 15C}{\text{جرم مخصوص هوادر } 15C}$$

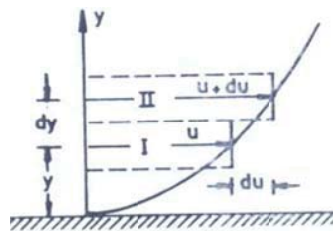
جرم و وزن مخصوص سیالات با افزایش دما، کم می‌شوند (جرم در یک حجم مشخص و ثابت کم می‌شود). میزان این تغییر در مایعات کوچک بوده و به همین دلیل اگر تغییر دما زیاد نباشد، از آن صرف‌نظر می‌گردد. جرم و

وزن مخصوص با افزایش فشار، زیاد می شود، اما میزان این تغییر در مایعات ناچیز بوده و در بیشتر موارد قابل چشم پوشی است.

۱-۲-۳- گرانروی (لزجت)

گرانروی (لزجت) سیالات، باعث می شود که آنها در مقابل حرکت، از خود مقاومت نشان دهند. این خاصیت هنگامی که سیال در جریان است خودنمایی می نماید و باعث چسبندگی ذرات سیال به جدارهای سخت مسیر جریان می شود. علت وجود این خاصیت در سیالات، نیروی موجود بین ملکولها و همچنین حرکت اتفاقی و پراکنده آنها است. انتقال ملکولها از یک لایه به لایه دیگر، باعث تغییر سرعت و در نتیجه تغییر مومنتوم یا تکانه (حاصل ضرب جرم در سرعت) در آنها می شود.

انتقال تکانه (مومنتوم) از یک لایه به لایه دیگر، باعث پیدایش نیرویی مقاوم در برابر حرکت سیال خواهد شد. همچنین نیروی بین ملکولها باعث مقاومت در مقابل حرکت ملکولهای مجاور با سرعتهای متفاوت، می گردد. بر اساس شکل زیر، حاصل تقسیم این نیروهای مقاوم بر واحد سطح (عمود بر محور y)، همان تنش برشی است که در هر نقطه‌ی سیال در حال حرکت، وجود دارد. مقدار تنش برشی حاصل ضرب ضریب گرانروی و گرادیان سرعت $\frac{du}{dy}$ است که به قانون گرانروی نیوتون معروف گردیده است.



شکل ۱-۲. جریان سیال بر روی یک صفحه ثابت

گرانروی گازها بیشتر به دلیل حرکت پراکنده‌ی ملکولها است و چون این حرکت با افزایش دما شدت می یابد، گرانروی گازها نیز با افزایش دما زیاد می شود. گرانروی در مایعات بیشتر به دلیل نیروی موجود بین ملکولها است، و چون این نیرو با افزایش دما کم می شود، می توان نتیجه گرفت که گرانروی مایعات با ازدیاد دما کاهش می یابد.

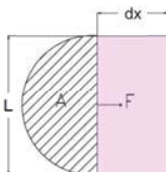
۱-۲-۴- ضریب قابلیت ارتجاع

قابلیت تراکم مایعات در مقایسه با گازها فوق العاده کم است، به طوری که مایعات را می توان در بیشتر مسائل مهندسی که در آنها تغییر فشار به طور ناگهانی اتفاق نمی افتد، غیر قابل تراکم فرض کرد. اگرچه قابلیت تراکم گازها زیاد است، اما حرکت آنها را در شرایطی بخصوص، می توان حرکت غیر قابل تراکم در نظر گرفت. مثلاً برای جریان گازها در اطراف یک جسم جامد، هرگاه نسبت حداکثر سرعت گاز به سرعت صوت در گاز، که عدد ماخ نامیده می شود، کوچکتر از 0.3 باشد، می توان از قابلیت تراکم گاز صرف نظر کرد. سرعت صوت در هر گاز از رابطه‌ی $C = \sqrt{\gamma RT}$ قابل محاسبه است که در رابطه‌ی فوق γ نسبت $\frac{C_p}{C_v}$ و C_p و C_v به ترتیب ظرفیت گرمایی در فشار و حجم ثابت است (گاز مذکور، R برابر نسبت ثابت جهانی گازها (\bar{R}) به جرم مولی گاز ($\frac{R}{M_g}$))، و T دمای گاز بر حسب درجه‌ی کلوین است.

۱-۲-۵- نیروی کشش سطح

اگر یکی از ملکول‌های مایع در داخل حجمی از آن در نظر گرفته شود، ملکول‌های اطراف، از تمام جهات آن را با نیروهایی به سوی خود می‌کشند. حال اگر این ملکول در سطح مایع قرار داشته باشد، نیرویی که از طرف پایین به آن وارد می‌شود بزرگتر از نیرویی است که از طرف بالا عمل می‌کند. به این ترتیب، تمامی ملکول‌ها در سطح مایع، ضمن آن که یکدیگر را با نیروی بین ملکولی نگهداشته اند، به طرف مایع کشیده می‌شوند. اثر ملکول‌های سطحی روی یکدیگر به نحوی است که می‌توان سطح مایع را به یک صفحه‌ی لاستیکی تشبیه کرد که از اطراف کشیده شده باشد. کشش سطحی باعث می‌شود که یک قطره کوچک مایع شکلی به خود بگیرد که دارای کوچک‌ترین سطح باشد. (کروی) نیروی کشش سطحی به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن F نیروی عمودی بر خط L است که ملکول‌ها را در امتداد خط L نگه داشته است.

$$\sigma = \frac{F}{L}$$



۱-۲-۶- فشار بخار

چون ملکول‌های یک مایع نسبتاً دارای آزادی حرکت هستند و ممکن است که انرژی جنبشی برخی از آن‌ها که در سطح مایع قرار دارند، به اندازه ای باشد که اثر نیروی بین ملکولی را خنثی نمایند و سبب گریز آن‌ها به فضای بالای مایع شوند. البته برخی از ملکول‌ها می‌گریزند، دوباره به مایع بازگشته و این عمل دائماً تکرار می‌شود. اگر دهانه‌ی ظرف حاوی مایع را مسدود کنیم، پس از مدتی حالت تعادل ایجاد خواهد شد، به طوری که تعداد ملکول‌های مایع در فضای بالای آن، تقریباً ثابت خواهد ماند. فشاری که به وسیله‌ی ملکول‌ها در فضای بالای مایع ایجاد می‌شود فشار بخار است.

چون فعالیت ملکول‌ها، با افزایش دما شدت می‌یابد ولی نیروی بین ملکولی کاهش می‌یابد، باید انتظار داشت که فشار بخار با افزایش دما زیاد شود. اگر فشار مایعی برابر با فشار بخار آن شود، آن مایع به جوش می‌آید. فشار مایع در حال حرکت در یک سیستم، ممکن است که تحت شرایطی، در یک قسمت از سیستم کم گردد و برابر با فشار بخار آن شود. بنابراین، مقداری از مایع در آن قسمت به بخار تبدیل می‌شود. این پدیده خللازایی است. حباب‌های حاصل از خللازایی، حرکت می‌نمایند و به قسمتی از سیستم می‌روند که فشار آن بزرگتر از فشار بخار مایع است. در این محل، حباب‌ها به قطرات مایع تبدیل می‌گردد با نیرویی زیاد به جدار سیستم برخورد می‌کنند که این امر ممکن است باعث بروز خسارات جدی در سیستم شود. مثلاً عمل خللازایی در پمپ‌ها و توربین‌ها می‌تواند باعث خوردگی و تغییر شکل پره‌ها شود.

۱-۳-۱- ترمودینامیک سیالات و گازها

قوانین مکانیک را می‌توان بطور آماری در دو سطح مختلف به مجموعه‌ای از اتم‌ها اعمال کرد در سطحی که نظریه جنبشی گازها نامیده می‌شود. در ترمودینامیک فقط با متغیرهای ماکروسکوپی، مانند فشار و دما و حجم

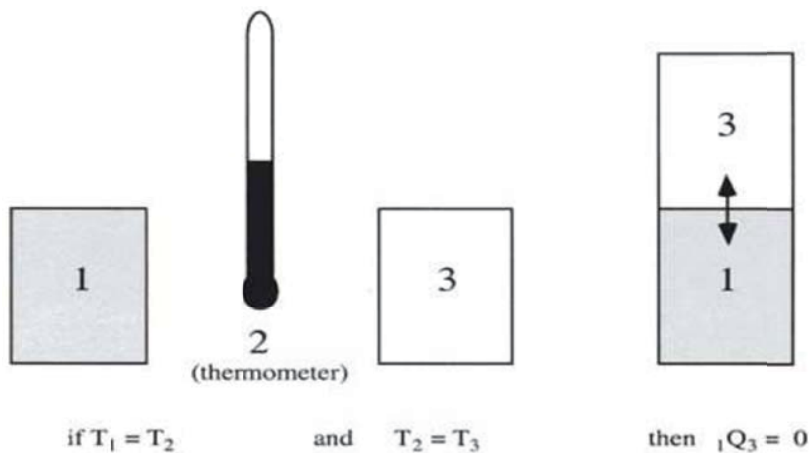
سروکار داریم. قوانین اصلی ترمودینامیک بر حسب چنین کمیت‌هایی بیان می‌شوند. ابتدا درباره این امر که ماده از اتم‌ها ساخته شده است صحبتی نمی‌شود. لیکن مکانیک آماری، که با همان حیطه‌ای از علم سر و کار دارد و ترمودینامیک از آن بحث می‌کند، وجود اتم‌ها را از پیش مفروض می‌داند. قوانین اصلی مکانیک آماری حامی قوانین مکانیک هستند که در حدود اتم‌های تشکیل دهنده سیستم بکار می‌روند.

نظریه جنبشی توسط رابرت بویل (۱۶۹۱-۱۶۲۷) دانیل بونولی (۱۷۰۰ - ۱۷۸۲)، جیمز ژول (۱۸۱۸ - ۱۸۸۹)، کرونیگ (۱۸۲۲ - ۱۸۷۴)، رودولف کلاوسیوس (۱۸۲۲ - ۱۸۸۸) و کلرک ماکسول (۱۸۳۱ - ۱۸۷۹) و عده‌ای دیگر تکوین یافته است. در اینجا نظریه جنبشی را فقط در مورد گازها بکار می‌بریم، زیرا برهم کنش بین اتم‌ها، در گازها به مراتب متغیرتر از مایعات است. این امر مشکلات ریاضی را خیلی آسانتر می‌کند.

در سطح دیگر می‌توان قوانین مکانیک را بطور آماری و با استفاده از روشهایی که صورتی‌تر و انتزاعی‌تر از روش‌های نظریه جنبشی هستند بکار برد. این رهیافت که توسط جی ویلارد گیس و لودویگ بولتز مانپ (۱۹۰۶-۱۸۴۴) و دیگران تکامل یافته است، مکانیک آماری نامیده می‌شود که نظریه جنبشی را به عنوان یکی از شاخه‌های فرعی در بر می‌گیرد. با استفاده از این روش‌ها می‌توان قوانین ترمودینامیک را به دست آورد. بدین ترتیب معلوم می‌شود که ترمودینامیک شاخه‌ای از علم مکانیک است.

قانون صفرم ترمودینامیک

قانون صفرم ترمودینامیک بیان می‌کند که اگر دو سیستم با سیستم سومی در حال تعادل گرمایی باشند، با یکدیگر در حال تعادلند.



شکل ۱-۳. بیان قانون صفرم ترمودینامیک

قانون اول ترمودینامیک

قانون اول ترمودینامیک به عنوان قانون بقای کار و انرژی نیز شناخته می‌شود و حالت تعادل ماکروسکوپی یک سیستم با کمیتی به نام انرژی درونی (U) را بیان می‌کند. انرژی درونی دارای خاصیتی است که برای یک سیستم منزوی (ایزوله) داریم:

$$U = \text{مقداری ثابت}$$

اگر به سیستم، اجازه‌ی برهم‌کنش با محیط داده شود، سیستم از حالت ماکروسکوپی اولیه‌ی خود به حالت ماکروسکوپی دیگری منتقل می‌شود که تغییر انرژی درونی را برای این تحول (فرآیند) می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\Delta U = Q - W$$

که در این فرمول W ، کار ماکروسکوپی انجام شده توسط سیستم در برابر نیروی خارجی و Q مقدار گرمای جذب شده توسط سیستم در طی این فرآیند است.

قانون دوم ترمودینامیک

قانون اول ترمودینامیک تنها بیانی از تئوری کار و انرژی یا قانون بقای انرژی است. یک آونگ ساده یا یک آونگ ایده آل برای همیشه به نوسان ادامه می‌دهد. فیلمی از یک آونگ که به جلو و عقب نوسان می‌کند را در نظر بگیرید. اگر ما فیلم را برعکس نشان دهیم، نخواهیم توانست آن را از حالت عادی تشخیص بدهیم. اما برداری (نشانگری) برای زمان وجود دارد. دامنه‌ی نوسان آونگ به تدریج کوچکتر می‌شود. اگر تویی را از ارتفاع خاصی رها کنید، در هر بار برخورد توپ با زمین، کمتر از دفعه‌ی قبل بالا خواهد آمد. فیلمی از این توپ در دنیای واقعی، هنگام پخش برعکس، متفاوت دیده خواهد شد. قطعات یخ در داخل فنجان چای ذوب می‌شوند در حالی که چای سردتر می‌شود.

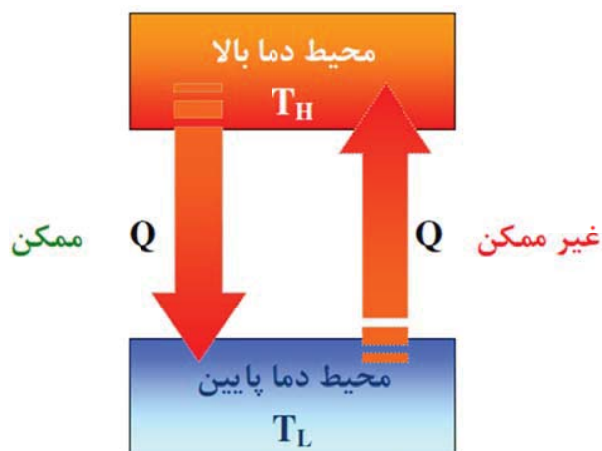
هیچ تناقضی با قانون اول ترمودینامیک نخواهد داشت اگر ما ببینیم که در داخل یک فنجان چای قطعات یخ تشکیل شده و چای گرم‌تر شود. این با قانون بقای انرژی سازگار است اما «ما هیچ‌گاه چنین چیزی را نمی‌بینیم». قانون دوم ترمودینامیک توضیح می‌دهد که چرا چنین چیزی اتفاق نمی‌افتد.

بیان ریاضی قانون دوم ترمودینامیک به صورت زیر است:

$$\sum (Q)_{cyc} + \sum (W)_{cyc} = 0$$

در این قانون سه شاخص را باید مورد توجه قرار داد که عبارتند از:

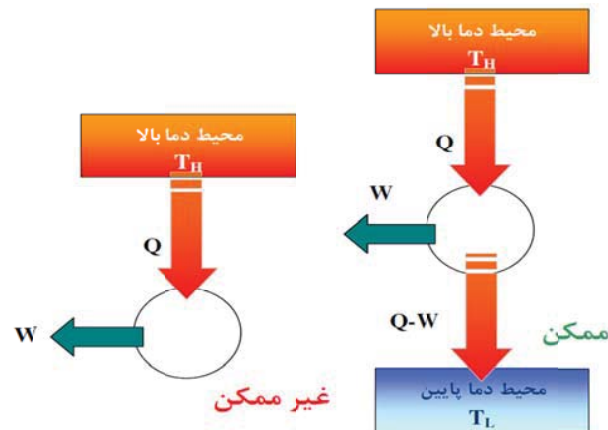
۱. سیستم باید یک چرخه‌ی کامل را طی کند که خواص سیال را به حالت اولیه‌ی خود برگرداند.
۲. کار خالص و انتقال گرمای خالص مورد نظر هستند.
۳. این قانون برای سیستم بسته کاربرد دارد.



شکل ۱-۴. بیان نمادین قانون دوم ترمودینامیک

بیان کلوین-پلانک

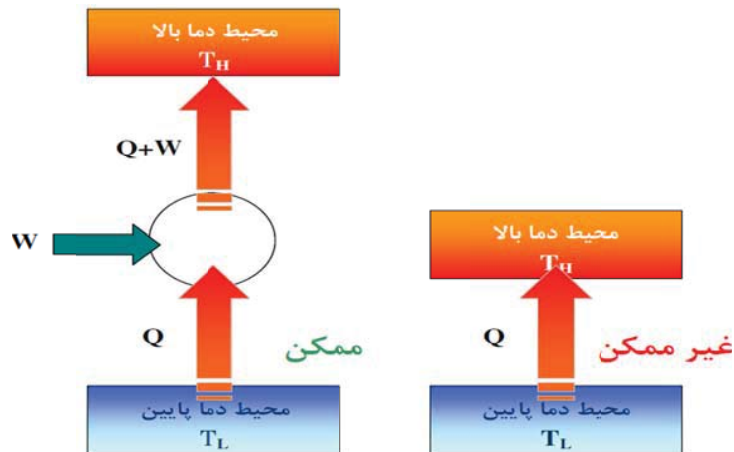
ساخت یک موتور گرمایی سیکلی (چرخه‌ای) که جز جذب گرما از منبع و انجام کار مساوی با گرمای جذب شده تاثیر دیگری بر محیط نداشته باشد، غیرممکن است. یا می‌توان گفت که ساخت ماشین گرمایی با بازدهی ۱۰۰ درصد غیرممکن است.



شکل ۱-۵. بیان کلوین-پلانک قانون دوم ترمودینامیک به صورت نمادین

بیان کلازیوس

ساخت یک موتور چرخه‌ای (سیکلی) که تاثیری جز انتقال مداوم گرما از دمای سرد به دمای گرم نداشته باشد، غیرممکن است.



شکل ۱-۶. بیان کلازیوس قانون دوم ترمودینامیک به صورت نمادین

ارتباط این دو بیان

این دو بیان، قانون دوم ترمودینامیک معادل (هم ارز) هستند. اگر بتوان یکی از آنها را نقض کرد، دیگری نیز نقض می‌شود.

قانون سوم ترمودینامیک

قانون سوم ترمودینامیک می گوید هنگامی که انرژی یک سیستم به حداقل مقدار خود میل می کند، آنتروپی سیستم به مقدار قابل چشم پوشی می رسد.

یا به طور نمادین، هنگامی که

$$U \rightarrow (U_0)_{\min} \Rightarrow S \rightarrow 0$$

از رابطه‌ی بین انرژی درونی و دما، رابطه‌ی بالا را می توان به صورت زیر نوشت:

$$T \rightarrow 0 \Rightarrow S \rightarrow 0$$

اما در بکارگیری این قانون باید توجه داشت که در این دما سیستم در حال تعادل است یا نه. زیرا با پایین آمدن دما، سرعت رسیدن به تعادل خیلی زیاد می شود. طبق این قانون مقدار انتگرال $\frac{\delta Q}{T}$ روی مسیر برگشت پذیر به مسیر بستگی ندارد یعنی مقدار آن، خاصیت سیستم است و تغییرات آن به مسیر بستگی ندارد و آن را با S نشان می دهیم و آنتروپی نامیده می شود و داریم:

$$ds = \frac{\delta Q}{T} \rightarrow \Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

توزیع سرعتهای مولکولی در مایعات تا حدودی شبیه توزیع در گازها است، اما بعضی از مولکولهای مایع (آنهايي که سریعترند) می توانند در دماهایی کاملاً پایینتر از نقطه جوش عادی از سطح مایع بگریزند. (یعنی تبخیر شوند). فقط این مولکولها هستند که می توانند بر جاذبه مولکولهای سطح فائق آیند و در اثر تبخیر فرار کنند. بنابراین انرژی جنبشی میانگین مولکولهای باقیمانده نیز کاهش می یابد در نتیجه دمای مایع پایین می آید. این امر روشن می کند که چرا تبخیر فرایند سرمایشی است.

۱-۴- قوانین و معادلات سیالات

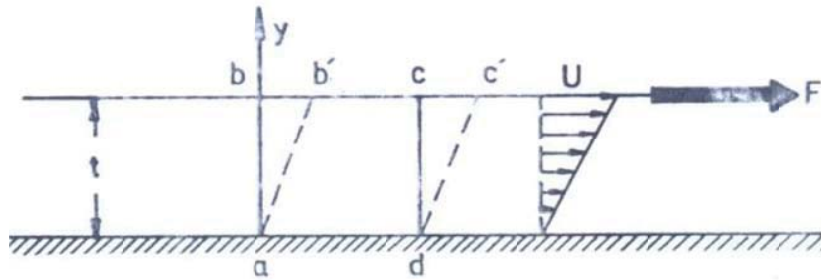
در ادامه به برخی از قوانین و اصول مهم حاکم بر سیالات می پردازیم.

۱-۴-۱- قانون گرانروی نیوتون

برای توضیح این قانون از مثال زیر شروع می کنیم. فرض کنید که سیالی بین دو صفحه موازی با فاصله کوچک t قرار دارد. اگر نیروی F بر صفحه بالایی و در امتداد آن وارد شود، در حالی که صفحه‌ی پایین بی حرکت بماند، مقدار تنش برشی که در سیال بین دو صفحه ایجاد می شود، عبارت خواهد بود از F/A ، که A سطح صفحه بالایی است. حرکت صفحه‌ی بالایی، سبب می شود که سیال چسبیده به این صفحه، با همان سرعت صفحه یعنی U به حرکت در آید، حال آن که سرعت سیال چسبیده به صفحه ثابت پایین، برابر با صفر خواهد بود. برای فاصله‌های کوچک t ، سرعت حرکت سیال از صفر روی صفحه پایین تا مقدار U روی صفحه بالا، به طور خطی تغییر می کند. آزمایش نشان می دهد که مقدار نیروی لازم برای به حرکت در آوردن صفحه بالا با سرعت ثابت U عبارتست از:

$$F = \mu AU/t$$

که در آن μ ضریبی است به نام ضریب گرانروی که مقدار آن به نوع سیال بستگی دارد.



شکل ۱-۷. سیال بین دو صفحه موازی

اگر المان $abcd$ از سیال در نظر گرفته شود، حرکت صفحه‌ی بالا سبب می‌شود که در فاصله زمانی کوتاه، سیال از نقطه‌ی b به نقطه‌ی b' و از نقطه‌ی c به نقطه‌ی c' انتقال می‌یابد. مقدار U/t در حقیقت سرعت زاویه‌ای خط ab و یا dc بوده که در تمام نقاط سیال ثابت است. اگر سرعت سیال به طور خطی نباشد، این سرعت زاویه‌ای در تمام نقاط سیال ثابت نبوده و در هر نقطه به صورت du/dy نوشته می‌شود. در این حالت، رابطه‌ی تنش برشی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau = F/A = \mu \frac{du}{dy}$$

که قانون لزجت نیوتون نام دارد. سیالاتی را که از این قانون تبعیت می‌کنند و ضریب لزجت آن‌ها در حرارت یکنواخت ثابت بوده و بستگی به مقدار تنش برشی نداشته باشند سیال نیوتونی می‌گویند. سیالاتی که با کوچکترین تنش برشی به حرکت در می‌آیند ولی رابطه‌ی بین τ و $\frac{du}{dy}$ در آن‌ها خطی نباشند، سیال غیرنیوتونی نامیده می‌شوند. اگرچه در طبیعت سیال بدون خاصیت لزجت یافت نمی‌شود، اما در حرکت سیالات مثال‌هایی وجود دارند که اثر لزجت در آن‌ها بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. سیالی را که از لزجت آن‌ها صرف نظر می‌شود اگر غیرقابل تراکم باشد، سیال ایده آل می‌نامند.

۱-۴-۲- معادله تکانه (ناویر-استوکس)

ابتدای امر لازم است که با مفاهیمی همچون حجم نمونه (حجم کنترل) و سامانه (سیستم) آشنا شویم. حجم نمونه بخشی از فضا است که مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. این فضا می‌تواند حقیقی یا مجازی باشد. همچنین مرز این فضا با محیط اطراف را سطح کنترل می‌نامند. در مکانیک، تکانه (مومنتوم) یا تکانه خطی یک ذره‌ی مادی به صورت حاصل ضرب بردار سرعت در جرم آن (mV) تعریف می‌شود. بنابراین مشخصه‌ی تکانه یک کمیت برداری است. هرگاه قدر مطلق یا جهت سرعت ذره تغییر کند، تکانه آن نیز تغییر می‌کند و برای این که تغییری در مقدار سرعت و یا مسیر ذره رخ دهد، لازم است تا نیرویی به آن وارد شود که این نیرو بر طبق قانون دوم نیوتون برابر با آهنگ تغییر تکانه ذره نسبت به زمان است:

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}(mV)$$

رابطه بالا را می‌توان برای ذرات سیال در حال حرکت هم استفاده نمود. اگر ذره‌ای از سیال با جرم dm و سرعت V در داخل یک سیستم در نظر گرفته شود، تکانه آن برابر با Vdm و مجموع مومنتوم سیستم برابر با $\int V dm$ خواهد بود که در آن، m جرم سیستم است. برای این سیستم، قانون دوم نیوتون در هر زمان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum F = \frac{d}{dt} \int V dm$$

که در آن، V سرعت نسبت به زمین است. معادله بالا، معادله تکانه خطی برای سیستم است که معنی آن عبارتست از:

سرعت تغییر مومنتوم کل سیستم در زمان t = مجموع نیروهای وارد به سیستم در زمان t
اگر شدت جریان را Φ بنامیم، سرعت تغییر شدت جریان مطابق رابطه‌ی زیر تغییر می‌کند ($A1$ مقطع ورودی و $A2$ مقطع خروجی است):

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \int \Phi \rho dV + \int_{A1} \Phi \rho V \cdot dA + \int_{A2} \Phi \rho V \cdot dA$$

حال اگر در رابطه‌ی بالا، مشخصه Φ را مومنتوم کل سیستم انتخاب کنیم، بر طبق تعریف $\Phi = \frac{vm}{m} = V$ (تکانه)

کل (Φ) بر واحد جرم است) داریم:

$$\frac{d}{dt} \int V dm = \frac{\partial}{\partial t} \int V \rho dA + \int_S V \rho V \cdot dA$$

چون سامانه (سیستم) و حجم نمونه در زمان t یکسان است، بنابراین $\sum F$ نیروی وارد به سامانه در زمان t ، برابر با نیروی وارد به حجم نمونه در زمان t است و در نتیجه معادله‌ی تکانه خطی برای یک حجم نمونه به صورت زیر نوشته می‌شود:

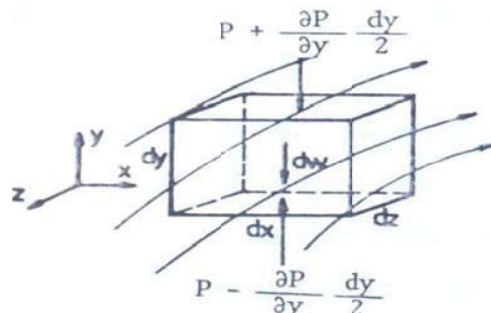
$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int V \rho dA + \int_S V \rho V \cdot dA$$

یعنی، در هر زمان t :

شدت جریان تکانه از سطح کنترل + آهنگ تغییر تکانه سیال در داخل حجم نمونه = مجموع نیروهای وارد به حجم نمونه
برای بدست آوردن شکل دیفرانسیلی این معادلات می‌توان قانون دوم نیوتون را برای المان کوچکی از سیال به شکل مکعب مستطیل با ابعاد dx, dy, dz نوشت. قانون دوم نیوتون برای این المان در جهت بردار شتاب عبارتست از:

$$dF_T + dF_P + dF_B = dm a$$

که در آن dF_T مولفه‌ی نیروی سطحی به دلیل تنش برشی، dF_P مولفه‌ی نیروی سطحی به دلیل فشار و dF_B مولفه‌ی نیروی جسمی وارد به المان، dm جرم المان سیال و a نیز بردار شتاب است. هر گاه نیروی سطحی به دلیل تنش برشی وجود نداشته باشد، معادله‌ی بالا را معادله اولر می‌نامند.



شکل ۸-۱. نیروهای وارد بر یک المان

پس معادله اولر در جهت y به صورت زیر در خواهد آمد:

$$[dF_p]_y = \left(P - \frac{\partial P}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz - \left(P + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz = -\frac{\partial P}{\partial y} dx dy dz$$

همچنین، مولفه‌ی شتاب در جهت y در هر نقطه از حوزه جریان، مشخص می‌شود. بنابراین:

$$\frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - g = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

چون مولفه‌ی نیروی جسمی یا وزن المان در جهت‌های x و z برای مختصات نشان داده شده در شکل برابر با صفر

است، معادلات اولر در این دو جهت به ترتیب زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= a_x = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} &= a_z = u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \end{aligned}$$

معادلات اولر را می‌توان معادلات حرکت برای جریان‌های لزج دانست. معادله ناویر-استوکس در کلی‌ترین حالت

به شکل زیر است:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + F$$

سه معادله‌ی ناویر-استوکس در جهت‌های سه گانه عبارتست از:

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) &= \frac{-\partial P}{\partial x} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + F_x \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) &= \frac{-\partial P}{\partial y} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + F_y \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) &= \frac{-\partial P}{\partial z} + \frac{\partial T_z}{\partial z} + F_z \end{aligned}$$

۱-۴-۳- معادله برنولی

دانیل برنولی (۱۷۰۰-۱۷۸۲م) دانشمندی انگلیسی بود که معادله‌ای درباره‌ی شاره‌ها به دست آورد. برنولی ثابت

کرد که مقدار عبارت $P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh$ در طول مسیر یک سیال (در صورت ناچیز بودن اصطکاک) مقداری

ثابت است که در این رابطه P, v, h, ρ به ترتیب چگالی سیال، ارتفاع سیال، سرعت سیال و فشار سیال است. البته

این معادله در مورد شاره‌ی تراکم ناپذیر و غیرلزج صدق می‌کند. این رابطه از قانون بقای انرژی (قانون اول

ترمودینامیک) به دست می‌آید. پس برای مقایسه بین دو مقطع جریان از رابطه‌ی زیر می‌توان استفاده کرد:

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_1 = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_2$$

شرایط لازم برای نوشتن معادله برنولی عبارتند از:

- ❖ جریان تراکم ناپذیر باشد. معمولاً برای سرعت‌های کم نوشته می‌شود.
- ❖ جریان باید غیرلزج باشد (از اصطکاک بتوان صرف نظر نمود).
- ❖ معادله برنولی روی خط جریان نوشته می‌شود. جریان باید غیر چرخشی باشد.
- ❖ جریان باید حالت پایا داشته باشد.

ذکر چند نکته برای نوشتن معادله‌ی برنولی ضروری است:

✓ معادله‌ی برنولی تنها در صورتی قابل استفاده است که نیروهای وارد بر سیال نیروی وزن و فشار باشند.

- ✓ در ناحیه ای که کار یا گرما در سیال صورت می گیرد قابل استفاده نیست.
- ✓ ثابت معادله‌ی برنولی (ترم سمت راست) از یک خط جریان به خط جریان دیگر تغییر می کند ولی زمانی که جریان غیر چرخشی باشد این ثابت برای تمام خطوط جریان ثابت است.
- ✓ در لوله‌ها معادله‌ی برنولی نوشته نمی شود و باید معادله انرژی نوشته شود.
- ✓ معادله‌ی برنولی درون لایه‌ی مرزی نوشته نمی شود.

۱-۴-۴- عدد رینولدز

رینولدز با آزمایش‌های خود، و با بررسی نیروهایی که به سیال وارد می‌شوند، توانست سیال آرام و مغشوش را مشخص نمایند. او یک عدد بدون بعد را به نام «عدد رینولدز» برای مشخص کردن نوع سیال به دست آورد. استدلال رینولدز این بود که مخلوط شدن کامل یک سیال و در نتیجه جریان مغشوش، موقعی ایجاد می‌شود که نیروهای اینرسی سیال غالب باشند. نیروهای اینرسی سعی بر حفظ سرعت و اندازه‌ی حرکت سیال دارند، به عبارت دیگر، جریان آرام زمانی امکان پذیر است که نیروهای گرانشی بر سیال نفوذ کنند و یک نظم مشخصی بر ذرات سیال حاکم باشند، این بدان سبب است که تأثیر نیروهای گرانشی سعی بر کم کردن حرکت سیال دارد. بنابراین، عدد رینولدز، متناسب با نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای گرانشی است. مقدار نیروی اینرسی در قانون دوم حرکت نیوتون معلوم است، یعنی نیرویی که برابر با حاصل ضرب جرم سیال در شتاب آن است یا به عبارتی حاصل ضرب چگالی و شتاب و حجم سیال است.

نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانشی، عدد رینولدز (Re) است:

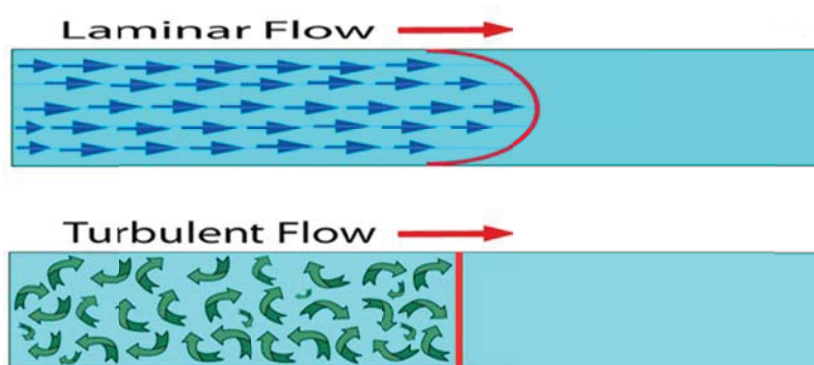
$$Re = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی گرانشی}} = \frac{F_{\text{اینرسی}}}{F_{\text{گرانشی}}} = \frac{\text{مشخصه بعد} \times \text{سرعت سیال} \times \text{چگالی سیال}}{\text{گرانشی سیال}} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

زمانی که سیال از یک لوله یا کانال می‌گذرد، قطر لوله مشخصه بعد آن است. به طور وضوح در جریان‌هایی که نیروهای اصطکاک بر سیال غالب هستند، اثر این عدد را می‌توان بیان کرد. در چگالی کم، سرعت یا مشخصه طول و گرانشی زیاد، عدد رینولدز کم خواهد بود و جریان طبیعتاً آرام (لایه‌ای)^۱ است. در جریان‌هایی که نیروهای اینرسی غالب باشد، (چگالی زیاد یا مشخصه طول و گرانشی کم) عدد رینولدز بزرگ است، از این رو جریان مغشوش^۲ خواهد بود. عدد رینولدز بحرانی، مقداری است که در زمان تغییر جریان از آرام به مغشوش در یک حالت فیزیکی به دست می‌آید. معمولاً این عدد را برای یک محدوده، داده می‌شود. در واقع نقطه‌ی مشخصی برای این تغییرات وجود ندارد، بلکه یک حالت گذار برای تبدیل یک نوع جریان به نوع دیگر است.

برای یک لوله یا کانال، عدد رینولدز حالت گذار بین ۲۰۰۰ و ۳۵۰۰ است ($2000 < Re < 3500$). وقتی که عدد رینولدز بین این محدوده باشد، سیال در ناحیه گذار قرار دارد. چیزهایی نظیر زبری سطح و خم لوله، سبب شتاب جریان از حالت گذار به مغشوش می‌شود.

^۱ Laminar

^۲ Turbulent



شکل ۱-۹. جریان آرام و معشوش

۱-۵-۰ مبانی و روش‌های جریان‌سنجی سیالات

روش‌های اندازه‌گیری جریان سیالات مبتنی بر دو نوع اندازه‌گیری به صورت زیر می‌باشد:

- اندازه‌گیری نرخ شارش جرم و یا حجم

مرسوم‌ترین روش سنجش دبی در صنعت، اندازه‌گیری حجم و یا جرم سیالی است که در سطح مقطع مورد نظری از لوله در واحد زمان شارش می‌یابد. ابزارهای متنوعی برای این نوع اندازه‌گیری متناسب با شرایطی از جمله اینکه سیال مایع باشد و یا گاز و همچنین دما، فشار، لزجت، رسانایی و تمیزی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- اندازه‌گیری سرعت

در بسیاری از کاربردها، به ویژه در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی، سرعت واقعی جریان موضعی بیشتر از نرخ دبی کل مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های سرعت‌سنجی به دو دسته تقسیم می‌شوند. در دسته اول سرعت شارش در یک نقطه خاص اندازه‌گیری می‌شود و در دسته دوم اطلاعات مربوط به سرعت در یک پلان دوبعدی و یا یک حجم سه بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با وجود اینکه اندازه‌گیری نقطه‌ای اطلاعات دقیقی را از سرعت یک نقطه در طول زمان ارائه می‌دهد، اما اگر شارش سیال یکنواخت باشد و یا حالت تکرار پذیر و یا نوسانی داشته باشد، روش نقطه‌ای نمی‌تواند برای ساخت یک نقشه دوبعدی با روش نقطه به نقطه به کار رود.

دبی‌سنج‌ها (فلومترها) را می‌توان بر اساس مبانی عملکردی آن‌ها طبقه‌بندی نمود، لذا دسته‌بندی کلی دبی‌سنج‌ها می‌تواند به صورت زیر باشد:

۱. دبی‌سنج‌های فشاری (Head Meters)
۲. دبی‌سنج‌های سرعتی (Velocity Meters)
۳. دبی‌سنج‌های جرمی (Mass Meters)
۴. دبی‌سنج‌های جابجایی مثبت (Positive Displacement Meters)
۵. دبی‌سنج‌های اپتیکی (Optical Flowmeter)

یکی دیگر از دسته بندی‌های رایج دبی سنج‌ها به صورت زیر است:

- دبی سنج‌های اختلاف فشاری
- دبی سنج‌های مکانیکی
- دبی سنج‌های الکترونیکی
- دبی سنج‌های جرمی
- دبی سنج‌های اپتیکی

در این جا مروری بر انواع دبی سنج‌ها، نحوه عملکرد آن‌ها و انواع مختلف دبی سنج‌ها می‌شود که عبارتند از:

۱-۵-۱- دبی سنج اختلاف فشاری یا انسدادی^۱

رایج‌ترین نوع وسایل اندازه‌گیری جریان در صنعت، هدمترها یا دبی‌سنج‌های اختلاف فشاری (Differential flow meter) هستند و به طور غیر مستقیم، دبی سیال را به کمک افت فشار ایجاد شده در سیال توسط یک مانع مرتبط با نوع هدمتر مورد استفاده و قطر لوله محاسبه و در نهایت افت فشار به دبی حجمی تبدیل می‌کنند. از معادله پیوستگی با فرض ثابت بودن دانسیته سیال (سیال تراکم ناپذیر) خواهیم داشت:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

این معادله یکی از مهم‌ترین روابط در مکانیک سیالات است و بیانگر آن است که کاهش قطر لوله سیالات پایا و یکنواخت، به افزایش سرعت سیال منجر می‌شود. علاوه بر این، در تبدیل انرژی به کمک معادله برنولی مشاهده خواهد شد که هد فشار کل در طول جریان ثابت می‌ماند.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + hg = H = \text{constant}$$

اولین جمله این معادله هد پتانسیل نامیده می‌شود و جمله دوم معروف به هد سرعت یا انرژی جنبشی است. به دلیل ثابت بودن مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی، واضح است که افزایش سرعت همراه با کاهش انرژی پتانسیل است.

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = C$$

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \rightarrow V_1 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right) V_2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]$$

$$Q = A_2 V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}$$

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, C_d = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{ideal}}} \rightarrow Q_{\text{actual}} = C_d K\sqrt{\Delta P}$$

در معادله‌ی بالا K ضریب وسیله انسداد جریان است و ضریب C_d به نوع جریان (متلاطم یا آرام)، وسیله‌ی انسداد و عدد رینولدز بستگی دارد.

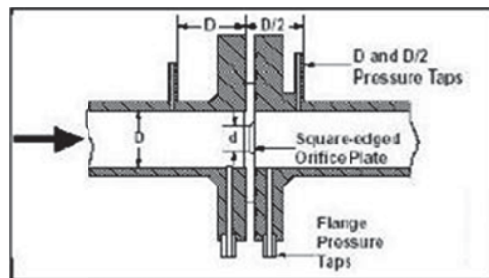
اساس تمامی هدمترها مبتنی بر این رابطه‌ی بین سرعت و فشار است، یعنی با اندازه‌گیری اختلاف فشار در دو نقطه می‌توان دبی حجمی را محاسبه کرد. در این طیف از تجهیزات اندازه‌گیری دبی به دلیل اصطکاک جداره‌ی

¹ Head meter (Obstruction flowmeter)

لوله، همیشه دبی واقعی کمتر از دبی تئوری است. مدل های متداول این دسته دبی سنج ها در زیر شرح داده شده است:

۱-۱-۵-۱ اریفیس^۱

اریفیس محبوب ترین و متداول ترین وسیله اندازه گیری جریان است. اساس کار آن بدین گونه است که اختلاف فشاری که در طول این وسیله توسط یک صفحه واقع در خط فرآیند ایجاد شده است اندازه گیری می شود تا دبی جریان تعیین شود.

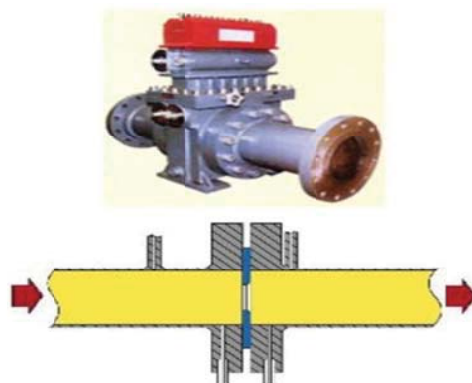


شکل ۱-۱۰. اریفیس

سه نوع متداول از این نوع دبی سنج ها وجود دارد که عبارتند از: هم مرکز، مختلف المکز و قطعه ای یا سگمنتال. اریفیس پلنت هم مرکز ساده ترین و ارزاترین فلومتر است.

اریفیس پلنت مشابه عملکرد وسایل ابتدایی، به منظور تولید افت فشار، جریان سیال را در طول مسیر خودش به هم می فشرد؛ نتیجه آن که فشار سیال در ابتدای جریان بیشتر از فشار جریان در انتهای جریان است. افت فشار ایجاد شده متناسب با مجذور سرعت سیال است.

مزیت اصلی این وسیله نداشتن قطعات متحرک و قیمت پایین است. (خصوصاً آن که با اندازه لوله افزایش نمی یابد و به خوبی جریان سیال را اندازه گیری می کنند.) دقت اندازه گیری این وسیله به چگونگی نصب، نسبت سطح لوله و خواص سیال بستگی دارد و باید در لوله های مستقیم نصب شود.

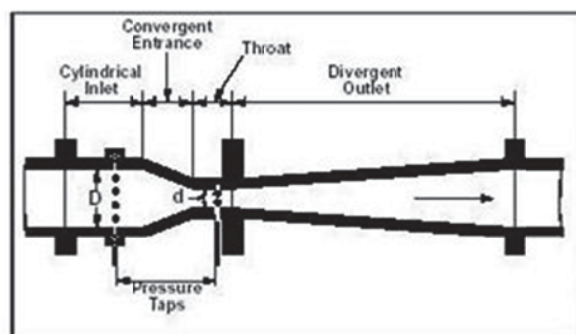


شکل ۱-۱۱. اریفیس

¹ Orifice Plate

۲- ونتوری^۱

دبی سنج ونتوری شامل یک قسمت ورودی مخروطی شکل همگراست که در طول آن سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد. قسمت واگرای ونتوری، فشار سیال را به حالت اولیه برمی‌گرداند. از افت فشار ایجاد شده در قسمت همگرای دبی سنج می‌توان دبی جریان را به دست آورد. گلوگاه استوانه‌ای ونتوری مکان اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شده در واحد سطح است.

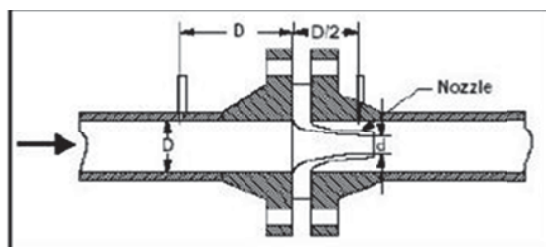


شکل ۱-۱۲. ونتوری

ونتوری تیوب‌ها در موردی که نیازه افت فشار کم و دقت بالای اندازه‌گیری است استفاده می‌شوند و عمدتاً در لوله‌های قطور، شبیه مواردی که در صنایع آب وفاضلاب یافت می‌شود به کار می‌روند. زیرا شیب ملایم آن به جامدات معلق در مایع اجازه حرکت می‌دهد. لذا برای اندازه‌گیری پساب و دوغاب (یابه عبارتی مایعات ویسکوز یا حاوی مقدار زیادی از جامدات چسبناک) مناسب هستند. عیب اصلی آن قیمت زیاد آن است و دقت آن نسبت به اریفیس کمتر است مگر آنکه به نحو مناسبی کالیبره شده باشد.

۳- شیبوره (نازل) جریان^۲

شیبوره (نازل)‌های جریان گاه ممکن است به عنوان ونتوری تیوب تغییر یافته نیز تلقی شوند. این صحبت تا حدود زیادی درست است چون به جرات می‌توان گفت که این دبی سنج‌ها تمامی مزایای ونتوری را دارا هستند. دهنه‌ی شیبوره (نازل) یک مانع بیضوی شکل در برابر جریان است و خروجی آن هیچ سطحی برای بازیافت فشار ندارد. درگاه‌های فشار در فاصله‌ای حدود نصف قطر لوله را در خروجی و در فاصله‌ای به اندازه تمام قطر را در ورودی لوله گرفته‌اند. با علم به نصب سخت‌تر این دبی سنج در مقایسه با ونتوری، شیبوره جریان برای سنجش دبی جریان‌های سرعت بالا به کار می‌رود. (عدد رینولدز بالای ۵۰۰۰۰)

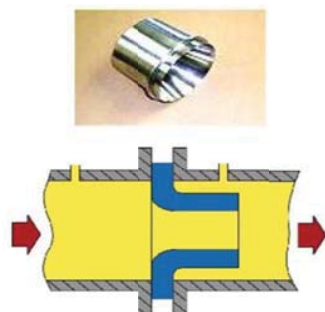


شکل ۱-۱۳. نازل جریان

^۱ Venturi Tube

^۲ Flow nozzle

افت فشارشیپوره جریان ، بین افت فشارهای ونتوری تیوب و اریفیس پلیت است. (۳۰ الی ۹۵ درصد)



شکل ۱-۱۴. نازل جریان

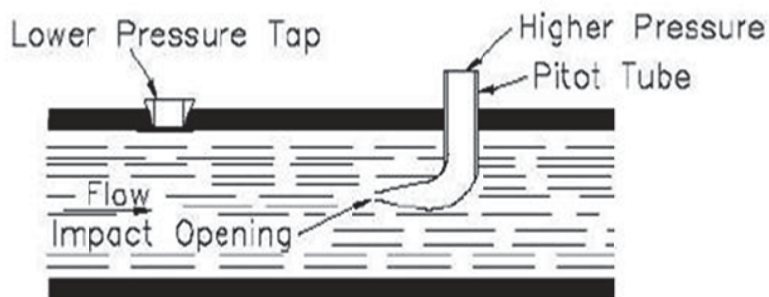
۴-لوله پیتوت^۱

لوله‌های پیتوت (پیتوت تیوب) وسیله ای جهت اندازه گیری سرعت جریان در محل است که سرعت نقطه ای را محاسبه می کند. پیتوت تیوب‌ها شامل دو لوله هستند که یکی به نام استاتیک تیوب در راستای جریان است. دو پایه تیوب‌ها توسط پایه های یک مانیتور (یا یک وسیله معادل جهت اندازه گیری اختلاف فشار) به یکدیگر متصل شده‌اند. استاتیک تیوب به دلیل آن که هیچ گونه مولفه سرعتی عمود بر سطح مقطع آن وجود ندارد، فشار استاتیکی را اندازه گیری می کند برحسب هد می توان گفت تیوب دیگ، هد فشاراستاتیکی به اضافه هدمرعت را اندازه گیری می کند.

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

کاربرد پیتوت تیوب‌ها در صنایع محدود است زیرا به راحتی توسط یک ماده خارجی مسدود می‌شوند و دقت آن‌ها به پروفایل سرعت که اندازه گیری آن مشکل است بستگی دارد. مزایای این فلومترها در کنار ارزانی، عبارتست از:

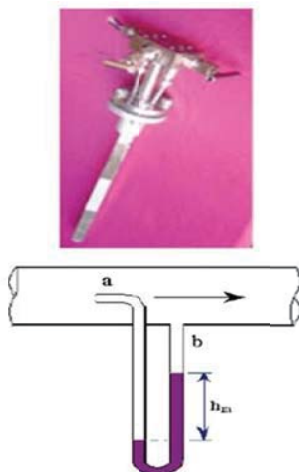
- ✓ مقاومت کم در برابر جریان
- ✓ قابل نصب بر روی لوله های قطر مختلف



شکل ۱-۱۵. لوله پیتوت

¹ Pitot Tube

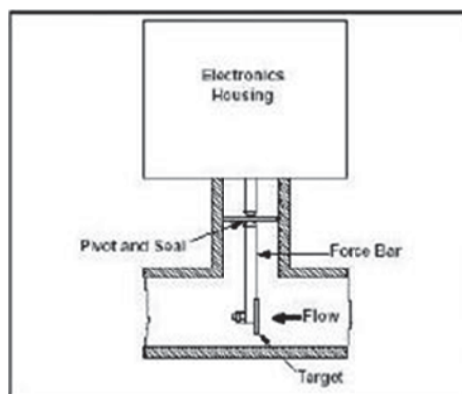
کاربرد عمده آنها اندازه گیری سرعت جریان هوای کم سرعت در سیستم‌های تهویه است و بیشتر برای اندازه گیری دبی گازها به کار می‌روند.



شکل ۱-۱۶. لوله پیتوت

۵- تارگت متر^۱

این وسیله شامل یک دیسک یا تارگت است که در مرکز لوله قرار دارد. سطح دیسک با یک زاویه مناسب نسبت به جریان قرار می‌گیرد. سنجش دبی جریان به طور مستقیم توسط نیرویی که سیال به دیسک وارد می‌کند انجام می‌شود.



شکل ۱-۱۷. تارگت متر

برای تعیین اندازه بهینه دیسک و کالیبره نمودن آن به منظور کارکرد مناسب، اطلاعات زیادی مورد نیاز است. این نوع دبی سنج برای پساب‌ها و سیالات خورنده مناسب است و در ضمن به هیچ‌گونه اتصالات خارجی اعم از آب بندها احتیاجی ندارد.

¹ Target meter

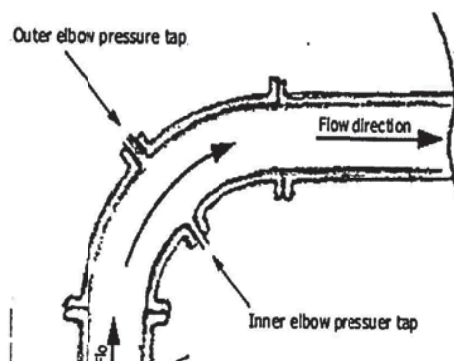


شکل ۱-۱۸. تارگت متر

برای استفاده از این نوع دبی سنج باید نکاتی را در نظر داشت، من جمله اینکه از استفاده از سیالات خورنده به دلیل احتمال آسیب دیدن تارگت باید خودداری کرد. استفاده از سیالاتی که روی تارگت را می پوشانند به علت سنگین کردن تارگت می تواند روی عملکرد آن تاثیر منفی بگذارند. از تارگت مترها نباید در دبی سنجی دوغاب ها و سیالات با لزجت بالا استفاده کرد. کالیبره کردن این دبی سنج اهمیت زیادی دارد و اثرات فیزیکی و اثرات مربوط به فشار و چرخش دبی سنج می توانند تنظیمات صفر آن را تحت تاثیر قرار دهند و به همین دلیل توصیه می شود که صفر این دستگاه به صورت دوره ای تنظیم مجدد شود

۶-زانویی متر^۱

در این فلومتر، اندازه گیری اختلاف فشار به نیروی گریز از مرکز سیال جاری در زانویی وابسته است و از این رو گاز به دلیل چگالی پایین برای این دبی سنجها مناسب نیست و همچنین باید توجه داشت که انحنای کم در زانویی، اختلاف فشار بزرگتری را نسبت به انحنای طولانی ایجاد می کند. این دبی سنج به کمک یک زانویی ۴۵ درجه درون جریان سیال کار می کنند. خروجی فشار بالا از بیرون زانویی گرفته می شود و خروجی فشار پایین از داخل زانویی که اختلاف فشاری متناسب با دبی جریان ایجاد می کند.



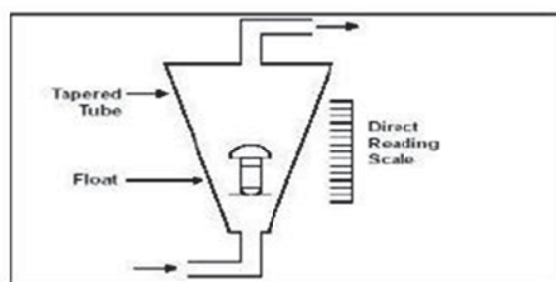
شکل ۱-۱۹. زانویی متر

¹ Elbow Tap Meter

دقت آن در بهترین حالت درمقایسه با انواع دیگر فلومترهای اختلاف فشاری کمتر است. دقت این دستگاه در بهترین حالت برابر با $\pm 5\%$ درصداست.

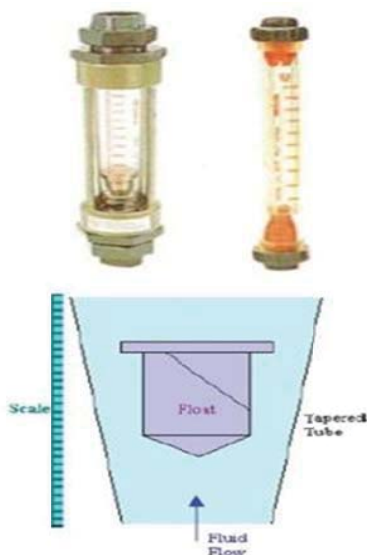
۷- روتامتر

روتامترها (یا دبی سنج های سطح متغیر) متداول ترین دبی سنج از نوع مقطع متغیر هستند که عمدتاً از یک لوله شیشه‌ای به شکل مخروط ناقص که قطر آن با شیب ملایم کم می شود، ساخته شده اند و به طور عمودی نصب شده و جریان به آن وارد می شود.



شکل ۱-۲۰. روتامتر

جسم شناوری با چگالی بیشتر از سیال، که به اندازه‌ی پایه لوله شیشه‌ای است درون آن قرار گرفته و متناسب با مقدار جریان به سمت بالا حرکت می کند. به دلیل آن که قطر لوله در بالا نسبت به پایین آن بزرگ تر است، جسم شناور در نقطه‌ای از لوله شیشه‌ای نسبت به کف آن قرار می گیرد که اختلاف فشار بین سطوح بالایی و پایینی با وزن جسم شناور به تعادل برسد و نیروی اصطکاک و شناوری با نیروی وزن برابر شود. در اکثر کارکرد های روتامتر، دبی مستقیماً از درجه بندی‌هایی که روی لوله شیشه‌ای نوشته شده است خوانده می شود.



شکل ۱-۲۱. روتامتر

در برخی موارد، یک سنسور بصورت اتوماتیک ارتفاع جسم شناور را اندازه می گیرد. این گونه روتامترها اغلب از فولاد یا دیگر مواد مقاوم در برابر سیالات فشار بالا ساخته می شوند. روتامترها در ابعاد گسترده ای از ۰.۲۵ اینچ گرفته تا سایز ۶ اینچ ساخته می شوند و نسبت به اریفیس دامنه گسترده تری از جریان را با دقت ۱-۵ درصد خطا اندازه گیری می کنند. حداکثر فشار عملکرد آن‌ها موقعی که از شیشه ساخته شده باشند، برابر با ۳۰۰ psi است.

دبی سنج های مقطع متغیر می توانند دبی مایعات و گازهایی نظیر آب، هوا و مواد شیمیایی را اندازه بگیرند، البته باید این نکته را مد نظر قرار داد که استفاده از آنها در سیالات کثیف و یا سیالات کدر که نور را عبور نمی دهند می تواند در کارکرد دبی سنج اختلال ایجاد کند و یا امکان دید شناور را متوقف کند که هر دوی این موارد می تواند مانع کارکرد صحیح دبی سنج شوند.

دبی سنج های مقطع متغیر می توانند در مورد مایعات نسبتاً تمیز که لوله های اندازه گیری و یا شناور را نمی پوشانند به کار گرفته شوند. برای نشانه گذاری موضعی، سیال باید به اندازه کافی تمیز و شفاف باشد که شناور قابل دیدن باشد.

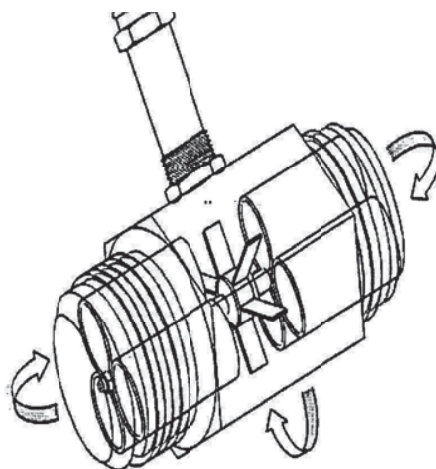
۱-۵-۲- دبی سنج های سرعتی

۱-توربین متر

دقت این دستگاه حدود یک درصد است و با شمارش تعداد دور پروانه در واحد زمان دبی مشخص می شود. یک دبی سنج توربینی مطابق شکل ۱-۲۲ از یک روتور چند تیغه که توسط یاتاقانی نگه داشته شده است تشکیل شده است و در مقطع لوله عمود بر جریان قرار گرفته است. سیال روتور را متناسب با سرعت سیال می راند و متعاقب آن دبی حجمی جریان به دست می آید.

یک سیم پیچ یا کویل، هنگامی که تیغه خطوط مغناطیسی سیم پیچ را قطع می کند ولتاژ متناوبی تولید می کند. هر پالس ولتاژ تولیدی بیانگر حجم مایع عبوری است. این دبی سنج به دلیل آن که روتور آن معمولاً از فولاد ضد زنگ ساخته شده با بسیاری از سیالات سازگار است. با این حال لازم است یاتاقانی که روتور را برای گردش در سرعت های بالا نگه می دارد، تمیز کاری شود. دبی سنج های توربینی عمدتاً در خطوط لوله هایی کمتر از نیم اینچ گرفته تا لوله هایی با قطر ۱۲ اینچ به کار می روند. از جمله مهم ترین محاسن این تجهیزات سرعت بالای پاسخ آن‌ها است و دقت خوبی دارند. از مشخصه های دیگر این دبی سنج، تکرارپذیری، قابلیت محدودیت پذیری عالی و دقت بالای آن‌ها است و معمولاً برای اندازه گیری مایعات و گازهای تمیز به کار می روند و برای سیالات ویسکوز و چرخشی مناسب نیستند. این وسیله باید برای هر اندازه گیری کالیبره شود و مشابه دبی سنج های اختلاف فشاری، افت فشار زیادی ایجاد می کنند که قابل بازیافت نیست. همچنین این فلومتر قطعات متحرک زیادی دارد که باعث فرسودگی می شوند. انجمن گاز آمریکا استاندارد برای کار با این دبی سنج‌ها با شماره مدرک AGA_7 منتشر کرده است.

انجمن پتروشیمی آمریکا نیز در این خصوص فعالیتهای گسترده ای را انجام داده است که شرح آن از حوزه این کتاب خارج است.



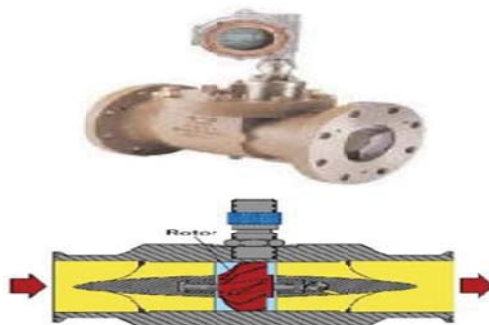
شکل ۱-۲۲. فلومتر توربینی

مزایای فلومترهای توربینی:

- سایزهای بزرگ، خاصیت تکرارپذیری خوبی دارند و با کالیبراسیون ادواری بسیار دقیق عمل کنند.
- سیگنال جریان خروجی برای گستره وسیعی از محدوده جریان (حداقل ۱:۱۵ برای فلومترهای بزرگ)، مستقیماً متناسب با سلسله سیگنال‌ها است.
- افت هد پایین تا متوسط بوده و با افزایش سایز کاهش می‌یابد.
- سایز فلومتر با قطر لوله‌ای که روی آن نصب می‌شود، یکسان است.
- با گیر کردن فلومتر جریان محدود می‌شود اما متوقف نمی‌گردد.
- هیچ گونه منبع الکتریکی خارجی مورد نیاز نیست.

معایب فلومترهای توربینی:

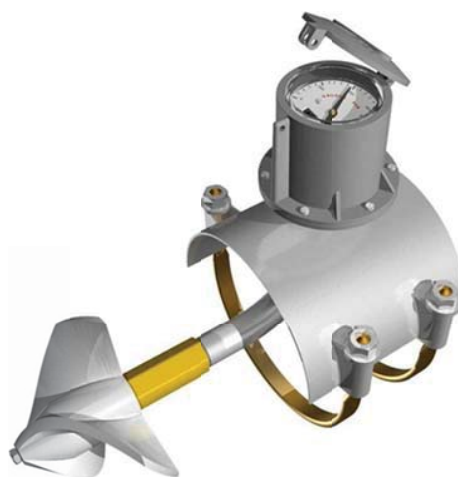
- مهم‌ترین ایراد این فلومترها جهت حفظ دقت فلومتر، نیازمند نگهداری سیستماتیک مکانیکی و روغن کاری است. ایرادات دیگر به شرح زیر است:
- خوردگی، فرسایش و رسوب گذاری سطوح داخل فلومتر به تدریج بر کالیبراسیون تاثیر منفی می‌گذارد و کالیبراسیون مجدد ادواری را جهت حفظ دقت بالا ضروری می‌سازد. مایعات خورنده، مایعات دارای توان روان کنندگی پایین (خشک) و مایعات دارای نسبت بالای ذرات جامد معلق مشکلاتی برای بلرینگ‌ها به وجود می‌آورند.
- ضربه کالیبراسیون به تغییرات لزجت مایع در حال جریان، حساس است.
- نسبت به آشفستگی و گردابی شدن جریان حساس است.
- اصطکاک بلرینگ‌ها به خصوص در فلومترهای کوچک بر عملکرد فلومترها تاثیر منفی می‌گذارد.
- دقت مخصوصاً در جریانهای پایین گذر به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۲۳. فلومتر توربینی

۲- فلومتر پروانه ای

طرز کار فلومترهای پروانه‌ای و تکنولوژی به کار رفته در آنها بسیار شبیه به فلومترهای توربینی است، تفاوت اصلی این دو مربوط به قطعه چرخان و نحوه‌ی قرار گیری آن در مسیر جریان سیال است. یک پروانه ای معمولاً از یک پلاستیک تزریقی ضخیم ساخته شده و به یک بلبرینگ متصل شده است و به صورت مستقیم در مواجهه با جریان قرار می‌گیرد، اما توربین ها نازک تر بوده و معمولاً از هر دو وجه خود با دو بلبرینگ سبک وزن در ارتباط هستند. فلومترهای پروانه ای از انرژی مکانیکی جریان برای چرخاندن روتور در داخل جریان سیال استفاده می‌کنند. تیغه های روی روتور به گونه‌ای روی آن نصب شده اند که انرژی جریان سیال را به انرژی چرخشی تبدیل کنند. محور روتور با بلبرینگ ها می‌چرخد و وقتی سیال با سرعت بیشتری جریان می‌یابد به تناسب آن روتور نیز با سرعت بیشتری می‌چرخد.



شکل ۱-۲۴. فلومتر پروانه ای

چرخش محور می‌تواند به صورت مکانیکی اندازه‌گیری و یا با آشکار سازی مغناطیسی پالس‌هایی که توسط قطعات فلزی متصل به آنها ارسال می‌شود، مطالعه شود. سنسورهای یک فلومتر پروانه‌ای به منظور جلوگیری از آسیب‌های احتمالی که ممکن است در اثر مرطوب شدن سنسور به وجود آید، در خارج از جریان سیال قرار داده می‌شوند.