فصل ۲

اندازه گیری به روش فراصوتی

مطالب این فصل:

- **مبانی اندازه گیری به کمک امواج فراصوتی**
- **اندازه گیری جریان مایع به کمک امواج فراصوتی**
- **اندازه گیری جریان گاز به کمک امواج فراصوتی**
- **مبانی نظری عملکرد اندازه گیر های فراصوتی**

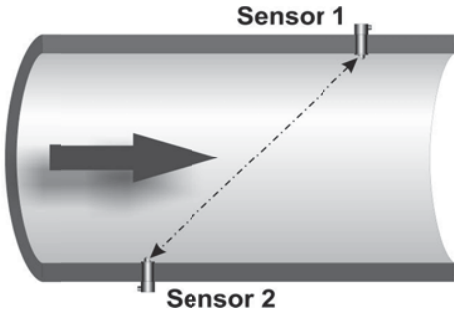
در این فصل به نحوه اندازه‌گیری دبی سیالات با کمک امواج فراصوتی می پردازیم و اصول و روش‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری جریان‌های مایع و گاز با کمک امواج فراصوتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت مبانی نظری عملکرد اندازه‌گیرهای فراصوتی مورد واکاوی قرار می‌گیرد. در مبانی نظری، اندازه‌گیری کمی بیشتر بررسی می‌شود و اندازه‌گیری فراصوتی ارتفاع و ضخامت نیز باید به خوبی توضیح داده شود.

۲-۱-مبانی اندازه‌گیری به کمک امواج فراصوتی

در روش اندازه‌گیری به کمک امواج فراصوتی، از این امواج برای اندازه‌گیری سرعت و دبی سیالات، ارتفاع مخازن و ضخامت مواد استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری ارتفاع سیال در یک مخزن، ابتدا مولد موج صوتی در بالای مخزن نصب می شود. امواج صوتی منتشره پس از ارسال به سوی سیال، به سطح سیال برخورد می‌نماید و بخشی از آن برمی‌گردد و با محاسبه زمان رفت و برگشت می‌توان به ارتفاع سیال دست یافت. در ضخامت‌سنجی نیز اساس کار مشابه ارتفاع سنجی است ولی کار پیچیدگی بیشتری دارد. برای سرعت سنجی و دبی سنجی سیالات، پالس‌های صوتی مبدل پیزوالکتریک از سیال متحرک با سرعت صوت عبورکرده و سپس سرعت سیال با روش‌هایی همچون Transit Time یا داپلر، اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۱-۱-روش Transit Time

روش فراصوتی زمان گذر معمولا در اندازه‌گیری دبی در لوله‌های انتقال مایعات و گازها به کار می‌رود و همچنین این روش مناسب کاربرد درکانال‌های باز است. اکثر فلومترهای ازنوع سنسور نصب شده با گیره (clamp on) با استفاده از این روش اندازه‌گیری می‌کنند. روش زمان گذر در واقع یکی از مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری فراصوتی است. در این روش دو سنسور روبروی یکدیگر (معمولا با زاویه ۳۰ یا ۴۵ درجه نسبت به دیواره لوله دوطرف کانال) نصب می‌شوند.



شکل ۲-۱. **روش زمان ترانزیت**

یک موج فراصوتی در یک لحظه از یکی از سنسورها به سمت سنسور دیگر ارسال می‌گردد که این موج اولتراسونیک پس از طی فاصله بین دوسنسوردر لحظه ای مشخص توسط سنسور روبرویی دریافت می‌گردد.

$$\mathbf{T = t_1}$$

حال سنسور دریافت کننده یک موج اولتراسونیک دیگر را به سمت سنسور روبرویی (که قبلا ارسال‌کننده بود) می‌فرستد که این موج پس ازطی مسافت مساوی بادفعه قبل ولی این بار در مدت زمان متفاوتی به سنسور روبرویی خود می‌رسد.

$$\mathbf{T = t_2}$$

علت این تفاوت زمانی چیست؟ می‌دانیم موج فراصوتی نیاز به محیط مادی دارد از طرفی با توجه به زاویه‌ی بین دو سنسور در صفحه افقی یک‌بار موج ارسالی موافق با جهت جریان می‌رود ولی دربرگشت در خلاف جهت جریان بر می‌گردد. در واقع تصور کنید شناگری یک‌بار درجهت جریان یک فاصله ثابت را شنا می‌کند و بار دیگر در خلاف جهت جریان آب همان فاصله را شنا می‌کند، بدیهی است که در دو زمان متفاوت بسته به سرعت جریان

آب این مسیر را طی میکند. در حالت نخست صوت با سرعت صوت در سیال به علاوه سرعت سیال مسیر را طی می‌کند و در حالت دوم صوت با سرعت صوت در سیال منهای سرعت سیال مسیر را طی می‌کند.

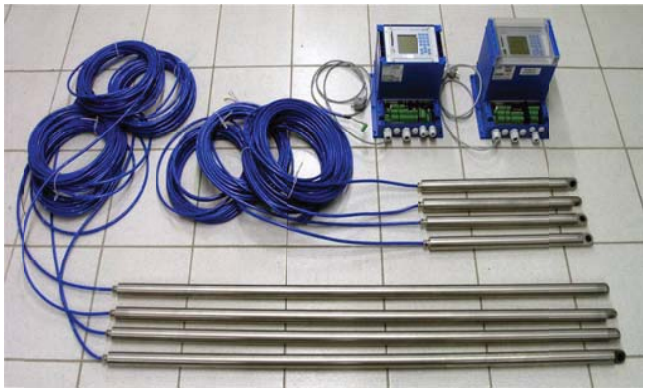
$$t_1 = \frac{L}{C+V} \quad \text{و} \quad t_2 = \frac{L}{C-V}$$

سرعت میانگین از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$V_m = \frac{C^2}{2.L.\cos\alpha}.\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right)$$

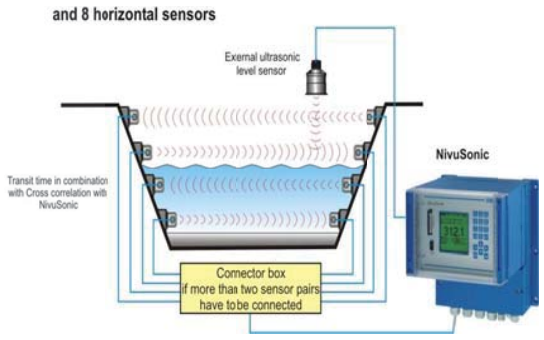
که: C = سرعت صوت و t_1=زمان از A به B و t_2=زمان از B به A

در مدلهای جدیدتر فلومترهای زمان گذر ، به منظور حصول دقت بالاتر برای تحلیل فرکانس‌های دریافتی به جای استفاده از edge time از روش همبستگی و تصحیح فرکانسی استفاده می‌گردد.



شکل ۲-۲. **سنسورهای میله ای مناسب نصب در کانالهای مستطیلی**

در حالی‌که روش ترانزیت زمانی در اکثر سیالات و حتی لوله‌های تحت فشار به خوبی کار می‌کند، ضروری است که سیال یک فازی باشد و تداخل ذرات گاز و یا جامدات اگر از یک مقدار مجاز بیشتر باشد موجب پراکندگی امواج صوتی بین مبدل‌ها می گردد.

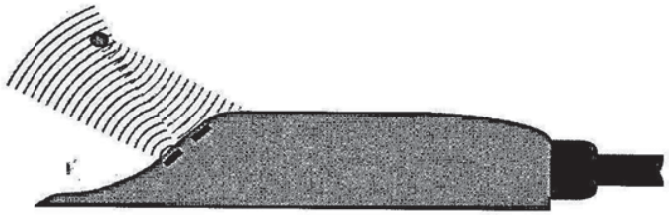


شکل ۲-۳. **نمایی ازاندازه گیری سرعت به روش زمان گذر دریک کانال**

محدوده اندازه گیری سرعت آن از ۱۵ سانتی‌متر بر ثانیه تا ۱۵ متر بر ثانیه و با دقت ۲-۱ درصد است. البته این دقت برای یک جفت سنسور است. در صورتی‌که دقت‌های بالا مدنظر باشد با افزایش یک جفت سنسور به دو جفت این دقت دو برابر (کمتر از یک درصد) می‌شود.

۲-۱-۲-روش داپلر

روش دیگر اندازه‌گیری در دبی سنج های فراصوتی ،استفاده ازاثرداپلر است .این روش قدیمی‌ترین روش اندازه‌گیری دبی ازطریق امواج فراصوتی است. برای درک بیشتر روش داپلر فرض کنید که جایی آرام نشسته‌اید که ناگهان آرامش شما با صدای آژیر آمبولانسی که دارد نزدیک می شود به هم می‌خورد. هم‌چنان‌که آمبولانس نزدیکتر می شود صدای آژیر آن زیرتر می شود (بسامد یا فرکانس آن بالاتر می رود) تا جایی که جلوی شما می‌رسد. سپس در حالی که آمبولانس دور می‌شود صدای آژیر آن بم تر به گوش می رسد. (بسامد آن پایین می آید). با این حال شما می‌دانیدکه میزان صدای آژیرآمبولانس درتمام این مدت ثابت بوده است.پس چه اتفاقی افتاده است؟ مسئله تخیل شما نیست. اثر داپلر برای اولین بار به صورت علمی بوسیله کریستین داپلر در سال ۱۸۴۲ توصیف شد و چندسال بعد درتجربیاتی که برروی قطارهای در حال حرکت انجام شد به اثبات رسید. این اثرتفاوت ادراک شده‌ای را توصیف می‌کند که میان فرکانسی که در آن یک موج منبعش را ترک می‌کندو فرکانسی که درآن به ناظر می‌رسد،در اثر حرکت ناظر یا موج به وجود می‌آید. فرکانس یا دانگ، مقیاسی است که بر مبنای فاصله میان ستیغ یک موج با ستیغ موج بعدی تعریف می شود. هر چه این فاصله نزدیک‌تر باشد فرکانس بالاتر است. اگر منبع موج به سوی ناظر در حرکت باشد یا برعکس، ناظر به سوی منبع حرکت کند فاصله میان ستیغ موج‌ها در رابطه با ناظر کوچک وکوچک‌تر می‌شود، چرا که هر ستیغ موج پیش از رسیدن به گوش ناظر بایدفاصله کمتری را بپیماید. برعکس اگر منبع و ناظر از یکدیگر دور شوند، هر ستیغ موج پیشرونده باید فاصله بیشتری را بپیماید تا به گوش ناظر برسند. به این ترتیب در مورد آژیر آمبولانسی که در حال نزدیک شدن به شماست ابتدا دانگ یا بسامد صدا بالا می رود و سپس در هنگام دور شدن آمبولانس بسامد صدا پایین می آید. اثر داپلر بر این واقعیت تاکید دارد که تجربه بسیاری از پدیده ها به نقطه ارجاع فرد بستگی دارد. صدای آژیر درارجاع به شما دچار بالا و پایین رفتن بسامد می شود.اما برای راننده آمبولانس، فرکانس صدا ثابت باقی می‌ماند. در مقابل اگرشما روی میزتان آژیری داشتید به طرز مشابهی دانگ صدای آن برای راننده بالا و پایین می‌رفت. از این روش برای اندازه‌گیری سرعت جریان نیز می‌توان استفاده‌کرد. برای توضیح هر چه ساده تر فرض کنید ابتدا یک موج اولتراسونیک با فرکانسی مشخص به سمت جریان ارسال می گردد. این موج در برخورد با ذرات داخل آب یا حباب‌های هوا با فرکانسی متفاوت برگشت داده می شود. سپس دیتالاگر پس از محاسبات ریاضی قانون داپلر روی این فرکانس‌ها تشخیص می دهد که سرعت ذره درداخل آب چقدراست. بدیهی است که سرعت ذره تابع سرعت جریان می باشد.

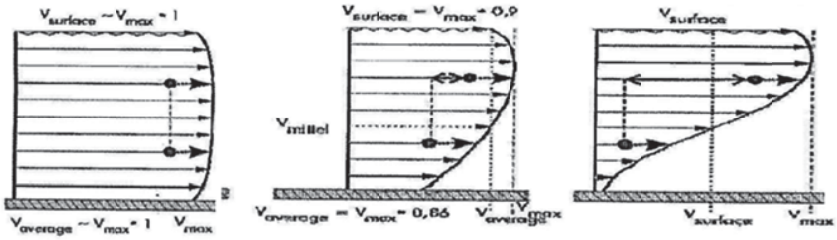


شکل ۲-۴. **اثر داپلر**

وسایل اندازه‌گیری جریان در این روش از دو نوع المنت مبدل استفاده می‌کنند که در یک طرف لوله قرار گرفته اند. یک موج مافوق صوت با فرکانس ثابت توسط یکی از المنت‌ها به سیال ارسال می‌شود و سپس جامدات وحباب‌های درون سیال،موج صوتی رابه المنت مقصدمنعکس می‌کنند. طبق قانون دوپلردر صورت وجود یک حرکت نسبی بین المنت ارسال‌کننده و دریافت‌کننده موج ، فرکانس یا طول‌موج با یک تغییرمکانی همراه است. در دبی‌سنج داپلر، حرکت نسبی اجسام معلق در سیالات، تمایل به فشردن موج صوتی به طول موج‌های کوتاه‌تر(فرکانس بالاتر) دارند. فرکانس دریافتی درالمنت مقصد با فرکانس ارسال شده مقایسه الکتریکی می‌شود تا اختلاف فرکانسی را که مستقیما متناسب با سرعت سیال در لوله است، محاسبه نماید. درمقایسه باروش ترانزیت زمانی، عملکرد صحیح این روش اندازه‌گیری مستلزم وجود گازها یا جامدات معلق در جریان است.

اما سئوال زیر در مورد روش‌های داپلر معمولی مطرح است:

امواج فراصوتی در روش‌های داپلر به محض برخورد به اولین ذره برگشت داده می شوند، می‌دانیم که سرعت محاسبه شده هر ذره از طریق عواملی به سرعت متوسط تبدیل می شود. پروفایل سرعت در یک کانال به شکل‌های زیر ممکن است باشد:



شکل ۲-۵. **پروفایل های ممکن سرعت در کانال ها**

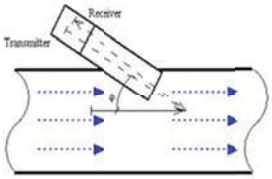
حال سئوال اینجاست که آیا دستگاه تشخیص می‌دهد که فرکانس برگشتی از چه عمقی برگشته است؟ ازطرف دیگر با استفاده ازفرمول‌های هیدرولیکی می‌دانیم که سرعت متوسط بسته به پروفایل‌های مختلف متفاوت است.

می‌توان گفت تمامی روش‌های داپلری موجود دردنیا امکان اندازه‌گیری دبی با در نظرگرفتن تمامی معیارهای فوق الذکر را ندارند. برای حل این مسئله باید دو راهکار در نظر گرفت:

۱-استفاده از پالس داپلر به جای فرکانس

در این روش محاسبات روی پالس‌های ارسالی و دریافتی انجام می‌گردد. فاصله‌ی زمانی ارسال ودریافت پالس‌های مختلف امکان بررسی موقعیت ذره در حال حرکت در جریان را فراهم می‌آورد. محدوده‌ی اندازه‌گیری

این سنسورها از ۶۰۰ سانتی‌متر برثانیه تا ۶۰۰ متربرثانیه است(یعنی آب برگشتی را هم می‌تواند محاسبه کند) و دقت آن حدود یک درصد است. در مورد این سنسورها وتمایز آن با داپلر معمولی به عنوان مثال، فقط در یکی از نمونه‌های پالس داپلر، بافرکانس اندازه‌گیری یک مگاهرتز، در هر ثانیه۱۰۰۰ بار ابزاردقیق موردنظر پالس‌های داپلری را بررسی و با دقت بسیارخوبی میزان جریان را محاسبه کردکه در نوع خود بسیار قابل توجه می‌نمود.



شکل ۲-۶. **استفاده از پالس داپلر به جای فرکانس**

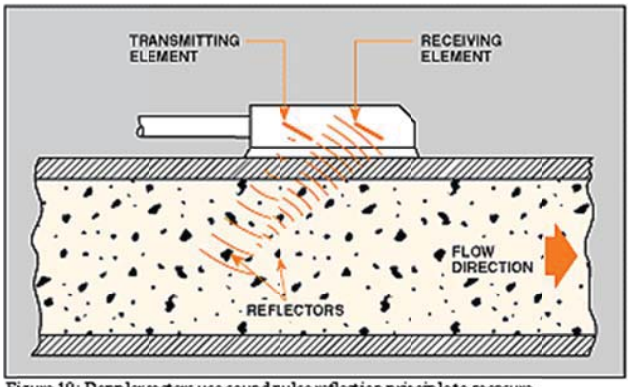


Figure 10: Doppler meters use sound pulse reflection principle to measure liquid flow rates, Solids or bubbles in suspension in the liquid reflect the sound back to the receiving transducer element.

شکل ۲-۷. **استفاده از پالس داپلر به جای فرکانس**

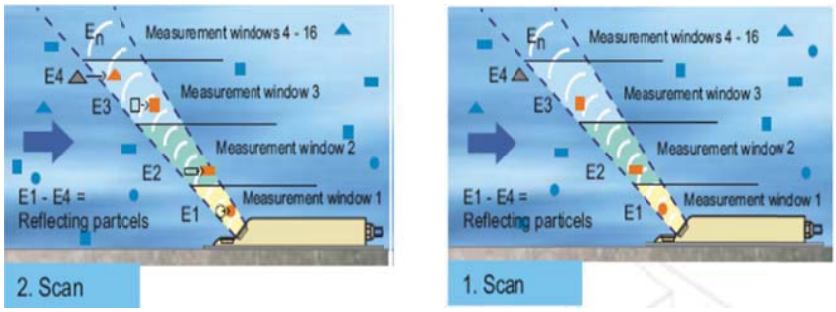
۲-استفاده از روش تصویر برداری از جریان

در روش دیگردرفاصله‌ی زمانی ثابت دو عکس از کل جریان گرفته می‌شود. با این روش موقعیت تمامی ذرات در عکس دوم نسبت به عکس اول تغییرخواهد داشت.این روش امکان اندازه گیری پروفایل جریان را فراهم می‌آورد که این روش در قسمت بعدی بصورت کامل تشریح می‌گردد.

۲-۱-۳-روش Cross Correlation یا اسکن سه بعدی

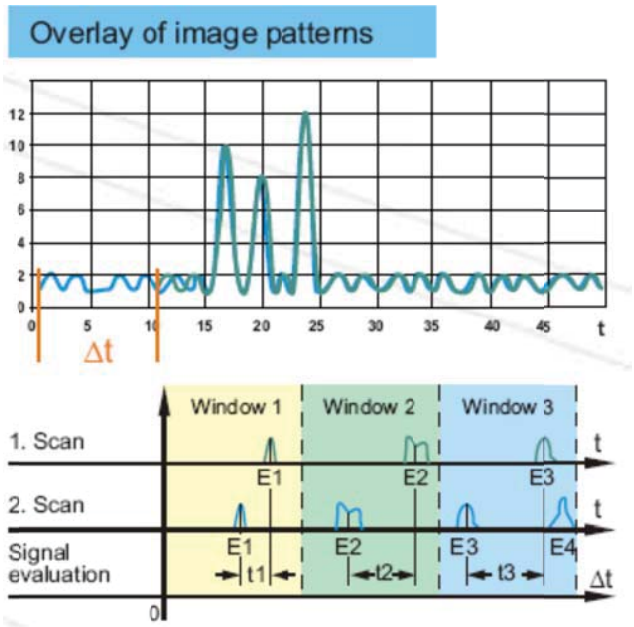
در واقع یک نوع عکس‌برداری از کل مقطع جریان است. برای توضیح نحوه عملکرد این روش می‌توان گفت که در دو لحظه متفاوت دو عکس از جریان و ذرات درون آن گرفته می‌شود. بدیهی است که ذرات متناسب با سرعت جریان در فاصله زمانی دو تصویربرداری تغییر مکانی مشخصی داده اند که از آن می‌توان برای اندازه گیری سرعت جریان استفاده می‌شود.

در روش داپلری توضیح داده شدکه روش‌های داپلری امکان اندازه گیری پروفایل جریان را ندارند اما در این روش کاربر به صورت همزمان می‌توان پروفایل عمودی جریان را حداکثر در ۱۶ لایه بندی مشاهده کند.



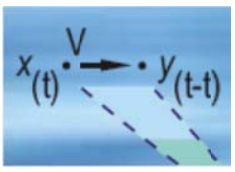
شکل ۲-۸. **روش اسکن سه بعدی**

دو تصویر در دو لحظه از کل مقطع جریان گرفته می‌شود.



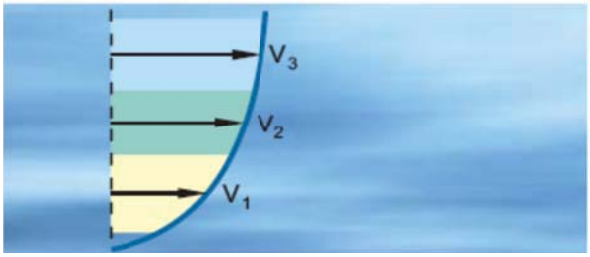
شکل ۲-۹. **پردازش نتایج حاصل از اسکن سه بعدی**

تصاویر اولتراسونیکی با دقت زیاد وبا سرعت پردازش و بررسی می گردد.



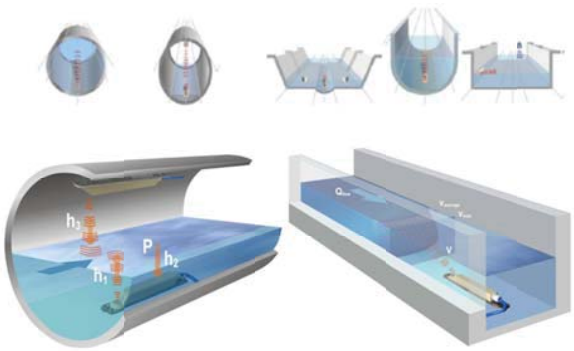
$$\varphi_{fg}(\tau) = \lim_{t \to \infty} {}^{1}/_{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t).g(t+\tau)dt$$

در نهایت توسط فرمول بالا، سرعت متوسط را هم می‌توان محاسبه کرد. پروفایل سرعت جریان اندازه‌گیری می‌شود.



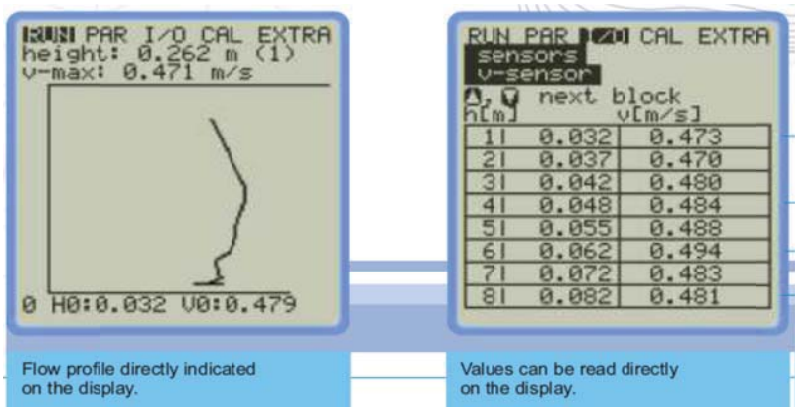
شکل ۲-۱۰. **محاسبه سرعت متوسط و پروفایل سرعت**

تمامی این عملیات درهر ثانیه به تعداد ۲۰۰۰ بار انجام می‌شود. به این علت، روش اندازه‌گیری بالعکس سه بعدی دقت بسیار بالایی دارد. به عبارت دیگر نه تنها پروفایل کامل سرعت در کانال اندازه‌گیری می‌شود بلکه هر تغییراتی در پروفایل سرعت ثبت می‌گردد. محدوده اندازه‌گیری سرعت از ۱ متر بر ثانیه تا ۶ متربرثانیه و داده مورد نظر با خطای کمتر از ۱ درصد بدست می‌آید.



شکل ۲-۱۱. **محاسبه پروفایل سرعت در کانال باز**

این روش با دقت بالایی که دارد نسبت به پارشال فلوم مقرون به صرفه تر است و می‌تواند در کانال‌های رو باز (با اشکال و ابعاد مختلف)، روی لوله‌های تحت فشار ودرکانال‌های با محدوده بالای رسوب ونیز کانال‌های فاضلاب نیز نصب شود. مشکل این روش اندازه گیری، انحصاری بودن تکنولوژی آن است که فقط در اختیار شرکت‌های محدودی در دنیاست.



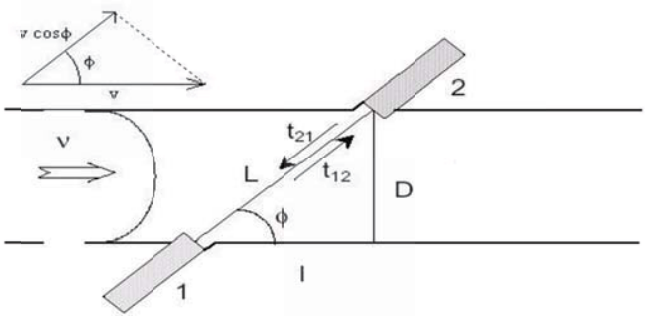
شکل ۲-۱۲. **نمایش مستقیم پروفایل سرعت بر صفحه نمایش**

شکل ۲-۱۳. **نصب سنسور در کف لوله**

اگرچه اندازه‌گیری به روش اولتراسونیک، دارای مزایای زیادی اعم ازعدم حساسیت به وجود موانع در لوله و کم بودن هزینه سنسور دارند، ولی عملکرد آن‌ها به شدت وابسته به شرایط جریان است. به عبارتی، دقت آن‌ها به نوع سیال بستگی دارد و همچنین رسوب در لوله، باعث کاهش دقت اندازه‌گیری آن‌ها می‌شود.

۲-۲-اندازه‌گیری جریان مایع با کمک امواج فراصوتی

با استفاده از فلومتر فراصوتی می‌توان زمان طی شدن صوت بین دو سنسور را اندازه‌گیری کرد. در حالی که محل قرارگیری سنسورها به صورت‌های مختلف باشد، پالسی از موج اولتراسونیک با استفاده از فرکانسی که از قبل تعیین شده از یک طرف به طرف دیگر انتقال می‌یابد. اختلاف فرکانس متناسب با میانگین سرعت سیال است.



شکل ۲-۱۴. **نحوه‌ی محاسبه‌ی میانگین سرعت سیال**

زمان انتقال پالس پایین دست از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$t_{۱۲} = {}^{L}/_{(C + V\cos\emptyset)} \qquad (۱)$$

که در رابطه بالا، $t_{۱۲}$ زمان انتقال پالس سنسور پایین دست، L فاصله‌ی بین دو سنسور و C سرعت صوت است.
زمان انتقال پالس بالادست از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{۲۱} = {}^{L}/_{(C - V\cos\emptyset)} \qquad (۲)$$

که در رابطه بالا، $t_{۲۱}$ زمان انتقال پالس سنسور بالا دست است. از دو رابطه‌ی ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت:

$$V = \left[({}^{L}/_{۲\cos\emptyset}) \times (t_{۲۱} - t_{۱۲})\right]/_{t_{۲۱}.\,t_{۱۲}}$$

همان‌طور که در رابطه‌ی بالا مشاهده می‌شود، سرعت سیال مستقل از سرعت صوت است. برای محاسبه‌ی میانگین سرعت محوری سیال، باید پروفایل سرعت لحاظ گردد. یکی از راه‌های انجام این اصلاح برای مشخصه جریان، به کار بردن عدد رینولدز در اندازه‌گیری سرعت جریان است. در نهایت با استفاده از فرمول زیر محاسبه‌ی دبی عبوری از لوله حامل جریان انجام می‌شود:

$$Q = A \times \bar{V}$$

از فرمول بالا نتیجه می‌شود که اندازه‌ی دبی عبوری مستقل از فشار، دما و یا پارامترهای دیگر است. این یک مشخصه‌ی بسیارمهم جریان‌سنج‌های اولتراسونیک است. در نتیجه اگر سیال تغییرکند، نیازی به تنظیم مجدد دستگاه نیست. بنابراین یک فلومتر اولتراسونیک علاوه بر اندازه‌گیری دقیق، مستقل از هر نوع پارامتری است.
با توجه به توضیح ارائه شده در خصوص جریانات آرام و آشفته به وضعیت پروفایل سرعت در هریک از حالات جریان می‌پردازیم:

لوله های بامقطع ثابت

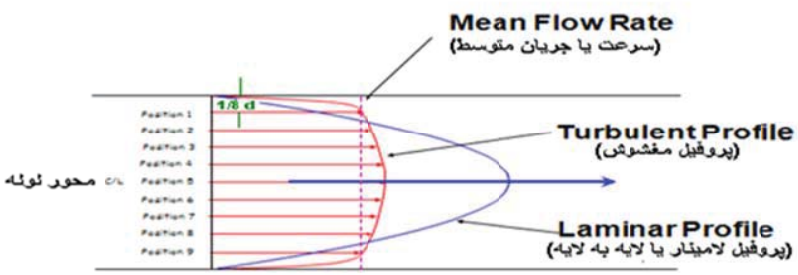
پروفایل سرعت در لوله‌های با مقطع ثابت به صورت زیر است که در آن، پروفایل سرعت را در جریان آرام[۱]، جریان مغشوش[۲] و پروفایل سرعت میانگین[۳] نشان می دهد.

---

[۱] Laminar flow

[۲] Turbulent flow

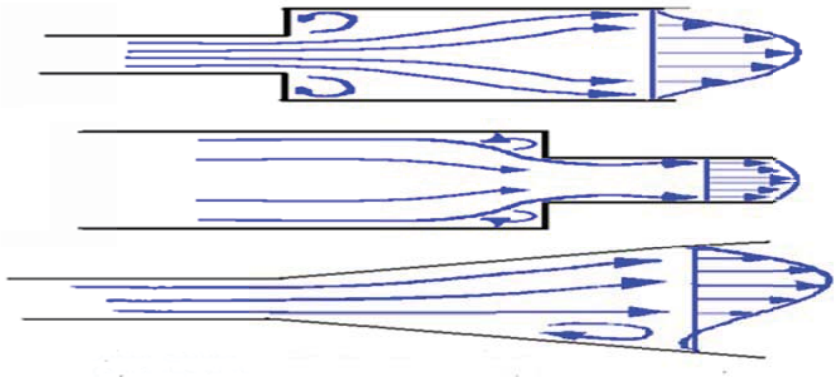
[۳] Mean flow rate



شکل ۲-۱۵. **پروفایل سرعت در جریان‌های مختلف**

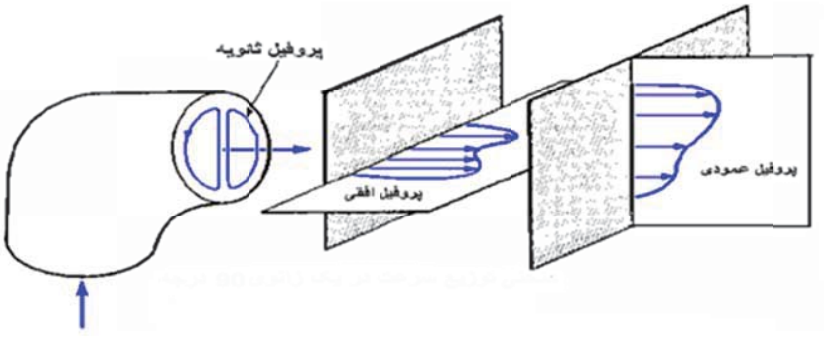
مقاطع متغیر

پروفایل سرعت در مقاطع متغیر به صورت زیر آمده است. همان‌طور که در شکل‌های زیر مشخص است، جریان گردابه‌ای در لوله‌ها تشکیل شده است.



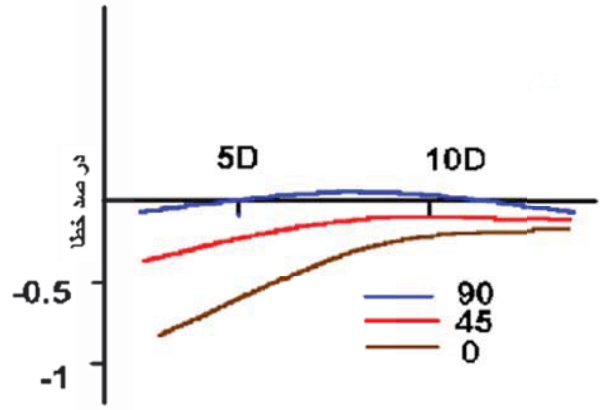
شکل ۲-۱۶. **پروفایل سرعت در مقاطع متغیر**

توزیع سرعت در زانوی ۹۰ درجه



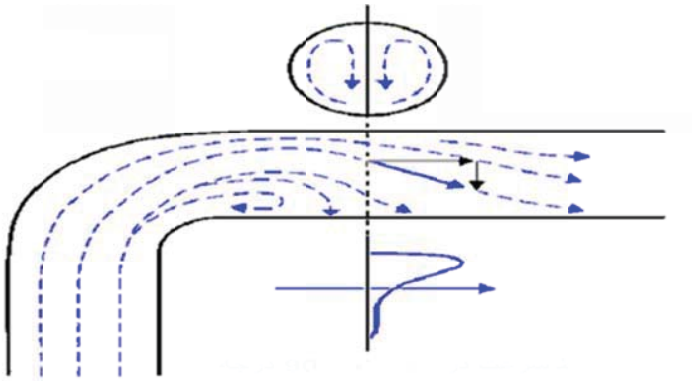
شکل ۲-۱۷. **پروفایل سرعت در زانوی ۹۰ درجه**

خطای حاصل از یک زانوی ۹۰ درجه تا ۱۰ برابر قطر لوله در پایین دست به صورت زیر تغییر می‌کند:

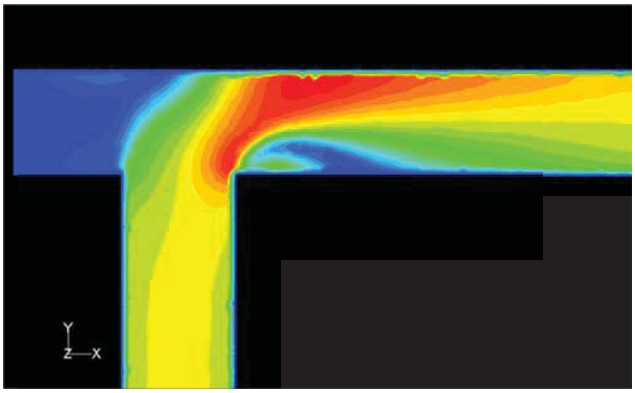


شکل ۲-۱۸. **خطای حاصل از یک زانو در فواصل ۵ و ۱۰ قطر فاصله از زانو**

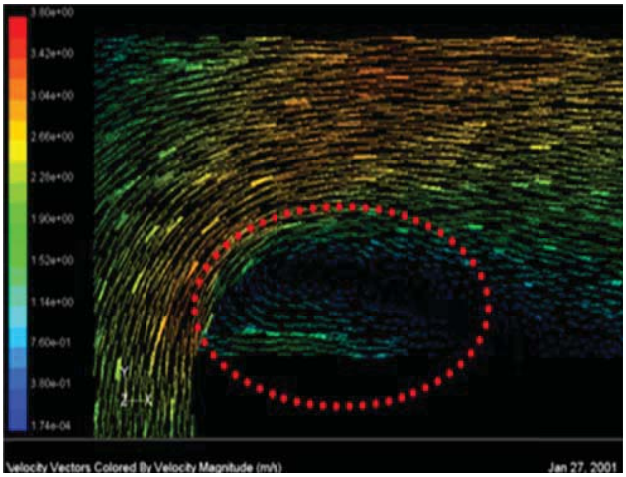
مقطع خطوط سرعت در یک زانویی ۹۰ درجه شکل ۲-۷۷ مشاهده می شود که در آن پروفایل قبل ازخط نقطه چین به وضوح، پدیده جدایی (Separation)و وجود جریان گردابی را نشان می‌دهد:



شکل ۲-۱۹. **خطوط سرعت در یک زانویی ۹۰ درجه**

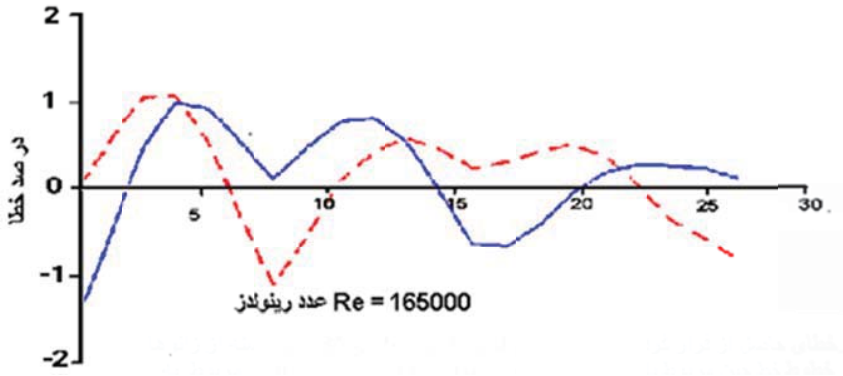


شکل ۲-۲۰. **توزیع سرعت در یک سه راهی (بصورت عکس برداری شده)**



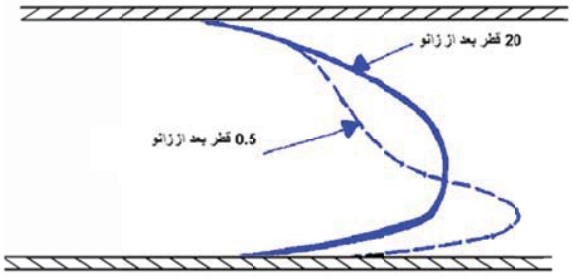
شکل ۲-۲۱. **توزیع سرعت در یک سه راهی (بصورت عکس برداری شده)**

با توجه به امکان نصب الکترودها درموقعیت‌های مختلف، خطای حاصل از دو زانوی متصل به یکدیگر(Off Set Bends) به صورت زیر است که در آن خطوط نقطه‌چین مربوط به قرار گرفتن الکترودها در صفحه‌ی افقی و خطوط توپر مربوط به قرار گرفتن در صفحه‌ی عمودی است.



شکل ۲-۲۲. **خطای حاصل از اتصال دو زانویی به یکدیگر**

همچنین پروفایل سرعت در فاصله‌ی ۰/۵ و ۲۰ برابر قطر لوله در پایین دست در یک زانویی ۹۰ درجه به صورت زیر است.



شکل ۲-۲۳. **پروفایل سرعت در زانویی ۹۰ درجه در فاصله ۰.۵ و ۲۰ برابر قطر لوله**

همان‌طور که در تصاویر فوق دیده می‌شود، تاثیر وزن مایع در لوله های افقی کاملاً درمنحنی سرعت مشهود است. شایان ذکر است که جدایی مایع از جداره لوله یا پدیده Separation در هیچ یک از انواع فلومترها مجاز نیست.

۲-۳-اندازه‌گیری جریان گاز با کمک امواج فراصوتی

جریان سنج گازی فراصوتی[1]عموما بر اساس قانون اندازه گیری اختلاف زمان رفت و برگشت موج اولتراسونیک کار می کند. سرعت گاز از اختلاف در زمان انتقال یک موج اولتراسونیک در جهت حرکت جریان و خلاف جهت حرکت جریان بدست می آید. به مسیر طی شده توسط موج مسیر آکوستیک گفته می شود. Chord به مسیر مستقیم طی شده در لوله از یک جهت به جهت مخالف را گویند. بر اساس بازتاب، یک مسیر آکوستیک شامل دو یا چند Chord می شود.

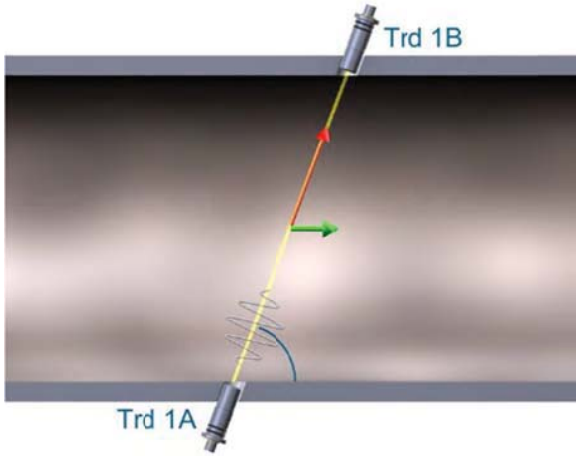
شکل ۲-۲۴. **دستگاه اندازه گیری جریان عبور گاز روی لوله ی DN۳۰۰**

شکل ۲-۲۵. **دستگاه اندازه گیری جریان عبور گاز روی لوله ی DN۱۰۰**

[1] Ultrasonic Gas Flow meter

۲-۳-۱-قانون محاسبه زمان انتقال

برای توضیح این قانون، در یک لوله دو مبدل با نام های فرستنده ۱A و گیرنده ی۱B را در نظر می گیریم که یک مسیر آکوستیک را تولید می کنند و در شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۲۶. **نحوه ارسال و دریافت موج آلتراسونیک**

هر دو مبدل قادر به ارسال و دریافت یک سیگنال آلتراسونیک هستند. به صورتی یک مبدل به عنوان یک فرستنده عمل می‌کند. اگر سرعت جریان داخل لوله صفر باشد، زمان انتقال از یک سمت به سمت دیگر دقیقا برابر با حالت برعکس انتقال می باشد. اما اگر گاز با یک سرعت V در لوله انتقال یابد و C سرعت صوت باشد زمان انتقال صوت در یک جهت و جهت عکس آن مطابق روابط زیر بدست می آید:

$$t_{AB} = \frac{L}{C + V\ \cos\varphi}$$

$$t_{BA} = \frac{L}{C - V\ \cos\varphi}$$

حال با استفاده از دو رابطه‌ی بالا، سرعت گاز از رابطه زیر بدست می آید:

$$V = \frac{L}{۲\cos\varphi}\left(\frac{۱}{t_{AB}} - \frac{۱}{t_{BA}}\right)$$

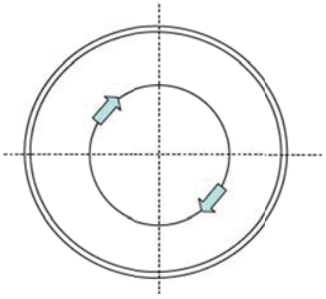
مهم ترین ویژگی این روش، این است که سرعت گاز محاسبه شده، به سرعت صوت بستگی ندارد و سرعت گاز فقط به زمان رفت و برگشت موج بستگی دارد. همچنین لازم به ذکر است که طول Chord(L) و زاویه از طراحی فلومتر معلوم فرض می شود. همچنین می توان سرعت صوت را نیز از رابطه زیر بدست آورد:

$$C = \frac{L}{۲}\left(\frac{۱}{t_{AB}} + \frac{۱}{t_{BA}}\right)$$

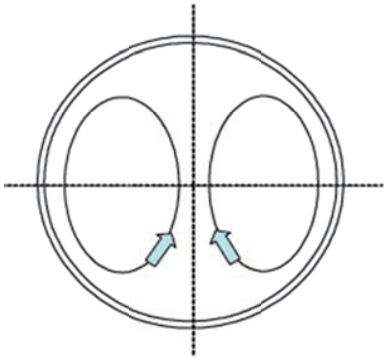
۲-۳-۲-جبران سازی حرکت چرخشی

هنگامی که به یک حفره خاص در لوله نگاه کنیم، بردار سرعت گاز دقیقا موازی محور لوله نیست. این اثر ممکن است ناشی از الگوی سرعت جریان باشد که به نام Swirl شناخته می شود. این الگوی سرعت به تناوب هنگامی رخ می دهد که گاز درون لوله به چرخش در می‌آید. چرخش می تواند نسبت به محور لوله متقارن باشد همان طور که در شکل ۲-۲۷ مشاهده می شود.

اما الگوی سرعت دیگر که به طور متناوب در لوله های خمیده و جریان در زانویی های لوله ها مشاهده می شود، چرخش نامتقارن است که در شکل ۲-۲۸ می توان مشاهده کرد. در این حالت، گاز در دو حجم چرخان مخالف در حال حرکت است.

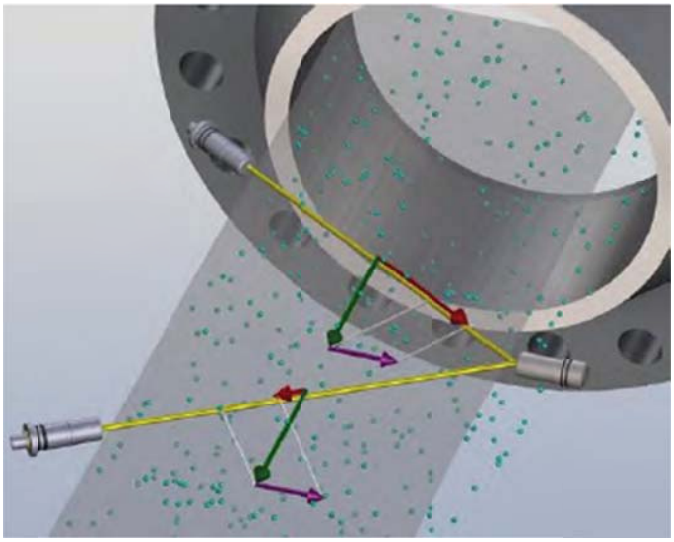


شکل ۲-۲۷. **چرخش گاز درون لوله**



شکل ۲-۲۸. **چرخش نامتقارن در لوله ها**

حرکت چرخشی باعث می شود که سرعت گاز علاوه بر داشتن یک مولفه سرعت در جهت یک Chord، یک مولفه مماسی نیز اضافه گردد. اگرچه می توان Chord ها را به گونه ای تنظیم کردکه اثر چرخشی از میان برود. اگر دو Chord در یک صفحه، جریان را در زاویه های مخالف قطع کند، این Chord ها نسبت به اجزای سرعت مماسی واکنش نشان می دهند (با همان سرعت و در جهت مخالف).



شکل ۲-۲۹. **مولفه های سرعت در لوله حاوی جریان**

این باعث می شود که اثر چرخش با اضافه کردن یا میانگین گیری از مقدار سرعت اندازه گیری شده در هر دو سمت Chord ها، از بین برود. با استفاده از یک مسیر آکوستیک با دو Chord در شکل V مانند، با یک سیگنال