NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

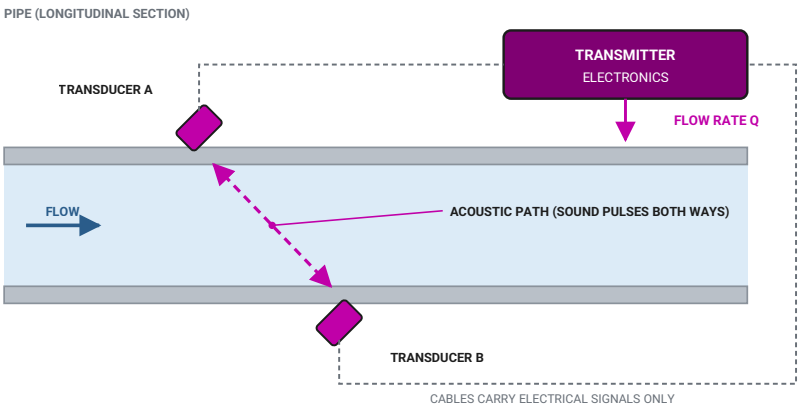
LEVEL 1 — FUNDAMENTALS

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

فلومتر التراسونیک چیست و چگونه با امواج صوتی دبی را اندازه‌گیری می‌کند؟

How Does an Ultrasonic Flowmeter Work? Fundamentals of Transit-Time and Doppler Flow Measurement

فلومتر التراسونیک (Ultrasonic Flowmeter) بدون قطعهٔ متحرک در مسیر جریان چگونه سرعت و دبی را می‌سنجد؟ اصل Transit-Time و Doppler، تفاوت Inline و Clamp-on، نقش داده‌های لوله، Full Pipe، حباب و ذرات و مقایسه با سایر فناوری‌های دبی — با ده شکل آموزشی.



شکل ۱ — مفهوم اندازه‌گیری با فلومتر التراسونیک: دو Transducer و مسیر صوتی در لوله

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-FLW-L1-011-FA	Rev00	LEVEL 1	November 2026 — **آبان ۱۴۰۵**

فلومتر التراسونیک (در بازار فارسی: فلومتر اولتراسونیک یا دبی‌سنج التراسونیک، Ultrasonic Flowmeter) دبی را با موج صوتی بسامد بالا اندازه می‌گیرد. اثر حرکت سیال بر عبور صدا سنجیده می‌شود، از آن سرعت سیال به دست می‌آید و با مساحت مقطع لوله به دبی حجمی تبدیل می‌شود. در این روش هیچ قطعهٔ متحرکی در مسیر جریان لازم نیست و در برخی مدل‌ها حتی نیازی به باز کردن لوله نیست. این راهنما برای دانشجو، تکنسین، کارشناس خرید و مهندس تازه‌کار نوشته شده و بدون وارد شدن به محاسبات سنگین، زنجیرهٔ کامل را از «صوت» تا «دبی» توضیح می‌دهد.

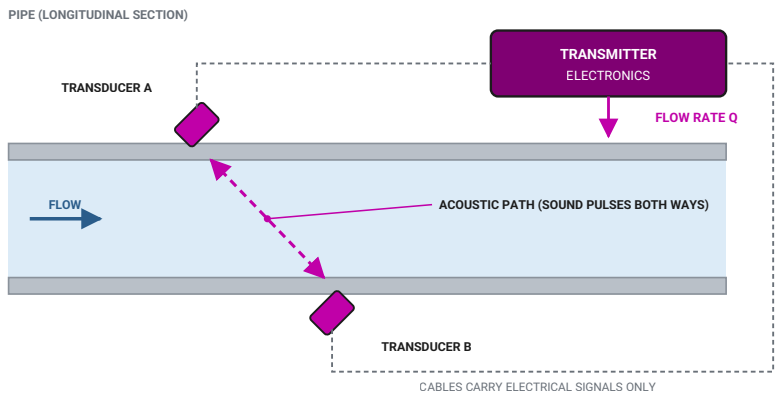
پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. توضیح دهید فلومتر التراسونیک چگونه بدون قطعهٔ متحرک، سرعت و دبی سیال را اندازه می‌گیرد.
2. اصل Transit-Time و اصل Doppler را از هم جدا کنید و بدانید هر کدام برای چه سیالی طراحی شده است.
3. Inline و Clamp-on را به‌عنوان دو آرایش نصب، و نه دو اصل اندازه‌گیری، مقایسه کنید.
4. رابطهٔ دبی حجمی با سرعت متوسط و مساحت مقطع را بنویسید و نقش قطر داخلی لوله را توضیح دهید.
5. اثر Sound Velocity، Full Pipe، حباب و ذرات را در سطح مفهومی بشناسید.
6. فلومتر التراسونیک را با فلومتر مغناطیسی، توربینی، ورتکس و کوریولیس مقایسه کنید و هفت تصور غلط رایج را اصلاح کنید.

1 فلومتر التراسونیک چیست؟

فلومتر التراسونیک دستگاهی است که دبی سیال داخل لولهٔ بسته را از روی رفتار موج فراصوتی در سیال تعیین می‌کند. دستگاه از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود: حسگرهای پیزوالکتریک به نام Transducer که صوت می‌فرستند و دریافت می‌کنند، و واحد الکترونیکی که سیگنال‌ها را پردازش می‌کند و خروجی دبی را می‌سازد. چون اندازه‌گیری بر پایهٔ زمان و بسامد صوت است، روتور، پره یا شناور درون جریان لازم نیست؛ همین ویژگی باعث می‌شود این فناوری برای آب، پساب و بسیاری از مایعات صنعتی مورد توجه باشد.

نکتهٔ مهم این است که «التراسونیک» نام یک خانواده است، نه یک فناوری یکسان. دو فلومتر التراسونیک می‌توانند از نظر اصل اندازه‌گیری، آرایش نصب، نوع سیال مناسب و محدودیت‌ها تفاوت اساسی داشته باشند. به همین دلیل هر خرید یا ارزیابی باید با دو پرسش آغاز شود: اصل اندازه‌گیری چیست و ترانسدیوسرها چگونه روی لوله نصب می‌شوند؟



شکل ۱ — مفهوم اندازه‌گیری با فلومتر التراسونیک: دو Transducer، مسیر صوتی و واحد الکترونیکی

شکل ۱ ساختار کلی را نشان می‌دهد: دو Transducer روی دو سمت مسیر قرار دارند، صدا میان آن‌ها در هر دو جهت رد و بدل می‌شود و واحد الکترونیکی از روی سیگنال‌ها دبی را می‌سازد. همین ساختار با تفاوت‌هایی در اصل اندازه‌گیری و نحوهٔ نصب در مدل‌های مختلف تکرار می‌شود، و جدول ۱ این تفاوت‌ها را در دو محور مستقل خلاصه می‌کند.

جدول ۱ — دو محور طبقه‌بندی فلومتر التراسونیک

محور	گزینه‌ها	به چه پرسشی پاسخ می‌دهد؟
اصل اندازه‌گیری	Transit-Time یا Doppler	دستگاه از کدام اثر صوتی سرعت را به دست می‌آورد: اختلاف زمان عبور یا تغییر بسامد بازتاب؟
آرایش نصب	Inline یا Clamp-on	حسگرها در بدنهٔ قطعهٔ خطی قرار دارند یا بیرون لولهٔ موجود بسته می‌شوند؟

2 موج فراصوتی چیست؟

صوت، نوسانی از فشار است که در یک محیط مادی (جامد، مایع یا گاز) منتشر می‌شود. فراصوت (Ultrasonic) به صوتی گفته می‌شود که بسامدش بالاتر از آستانهٔ شنوایی انسان است؛ مرز معمول آن حدود 20 kHz در نظر گرفته می‌شود. در فلومتر، Transducer با ماده‌ای پیزوالکتریک ساخته می‌شود: وقتی ولتاژ می‌گیرد مرتعش می‌شود و پالس صوتی تولید می‌کند، و وقتی صوت به آن می‌رسد سیگنال الکتریکی می‌دهد. بسامد کار هر مدل و سرعت‌های پردازش آن را سازنده تعیین می‌کند و در این راهنما عدد ثابتی برای آن داده نمی‌شود.

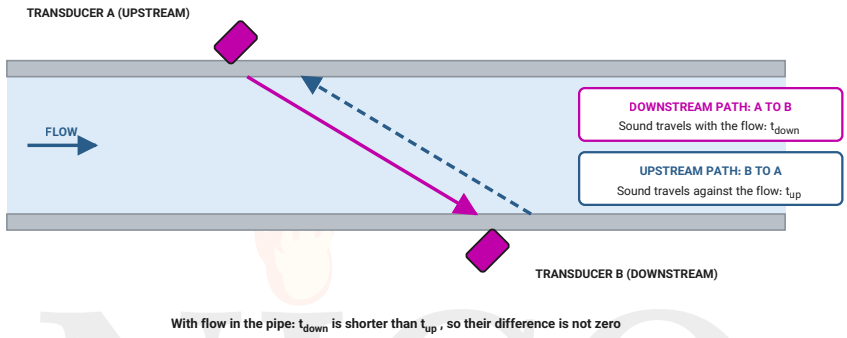
سرعت انتشار صوت (Sound Velocity) به محیط بستگی دارد. برای آب در دمای اتاق مرتبهٔ بزرگی آن حدود 1480 m/s است (مقدار آموزشی؛ مقدار دقیق به دما و ترکیب بستگی دارد). صوت در خلأ منتشر نمی‌شود و در هوا یا گاز کم‌چگال انرژی‌اش زود تضعیف می‌شود؛ بنابراین حباب‌های بزرگ و بسته‌های هوا درون لوله مایع می‌توانند عبور صوت را مختل کنند.

> **NOTE — سطح‌سنج التراسونیک، فلومتر نیست**
>
> سطح‌سنج التراسونیک فاصلهٔ سطح تا حسگر را از زمان رفت‌وبرگشت پژواک تعیین می‌کند و دبی نمی‌دهد. دو دستگاه از صوت فراصوتی بهره می‌برند ولی کمیت اندازه‌گیری‌شده، ساختار و کاربرد آن‌ها متفاوت است و نباید در استعلام یا مشخصات فنی با هم اشتباه گرفته شوند.

3 اصل Transit-Time: زمان رفت و برگشت صدا

در اصل Transit-Time (یا Time of Flight در برخی اسناد) دو Transducer به نام‌های A و B روی دو نقطهٔ مقابل مسیر قرار می‌گیرند. پالس صوتی یک بار از A به B می‌رود و بار دیگر از B به A. مسیر A به B با جهت جریان همراه است (سمت Downstream) و مسیر B به A خلاف جریان است (سمت Upstream).

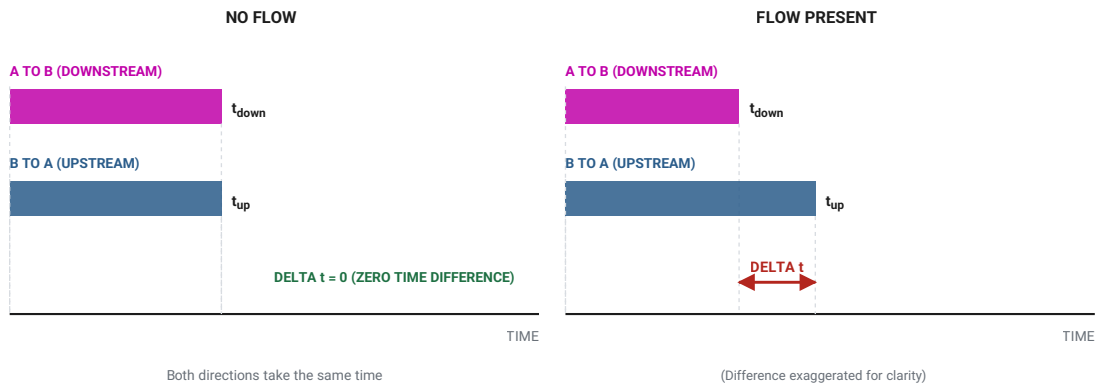
سیال متحرک، صوت را مانند جریان رودخانه‌ای که شناگر را همراهی می‌کند حمل می‌کند: در جهت جریان زمان عبور کوتاه‌تر و خلاف جریان بلندتر می‌شود. اگر زمان عبور در جهت جریان را t_{down} و زمان عبور خلاف جریان را t_{up} بنامیم، در حالت جریان t_{down} کوچک‌تر از t_{up} است. هرچه سرعت سیال بیشتر باشد این اختلاف بزرگ‌تر می‌شود، و دستگاه از همین اختلاف سرعت متوسط سیال در طول مسیر صوتی (Acoustic Path) را محاسبه می‌کند. فرمول‌نویسی کامل و فرض‌های آن در راهنمای سطح ۳ همین مجموعه آمده است.



شکل ۲ — اصل Transit-Time: پالس صوتی از A به B (همراه جریان) و از B به A (خلاف جریان) با دو زمان متفاوت عبور می‌کند

4 نمودار ساده: بدون جریان و با جریان

برای دیدن ایدهٔ اصلی بهتر است دو حالت را کنار هم ببینیم. وقتی سیال ساکن است، صوت در هر دو جهت با یک سرعت می‌رود و زمان‌ها برابرند؛ اختلاف زمان صفر است. وقتی سیال جریان دارد، زمان یک جهت کوتاه و جهت دیگر بلند می‌شود و اختلاف زمان (Δt) ناصفر می‌شود. اختلاف‌ها معمولاً بسیار کوچک‌اند و اندازه‌گیری دقیق زمان یکی از کارهای اصلی الکترونیک فلومتر است؛ شکل ۳ برای وضوح، اختلاف را بزرگ‌نمایی کرده است.

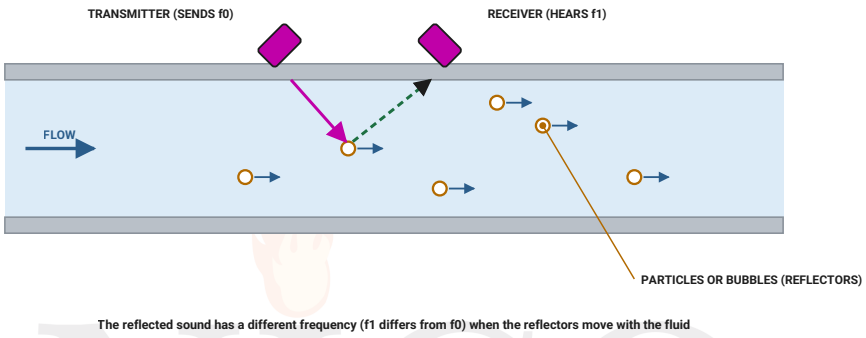


شکل ۳ — زمان عبور صوت در دو جهت: بدون جریان زمان‌ها برابرند و با جریان اختلاف Δt پدید می‌آید (اختلاف برای وضوح بزرگ‌نمایی شده است)

5 اصل Doppler: بازتاب از ذرات و حباب‌ها

در اصل Doppler صدای فرستاده‌شده از Transducer به ذرات معلق یا حباب‌های ریز درون سیال می‌خورد و بازتاب می‌شود. اگر این بازتابنده‌ها با سیال حرکت کنند، بسامد صدای بازتاب‌شده با بسامد صدای ارسالی فرق می‌کند؛ همان اثری که در تغییر صدای آژیر یک آمبولانس در حال عبور شنیده می‌شود. اختلاف بسامد با سرعت بازتابنده‌ها متناسب است و فلومتر آن را به سرعت سیال تبدیل می‌کند.

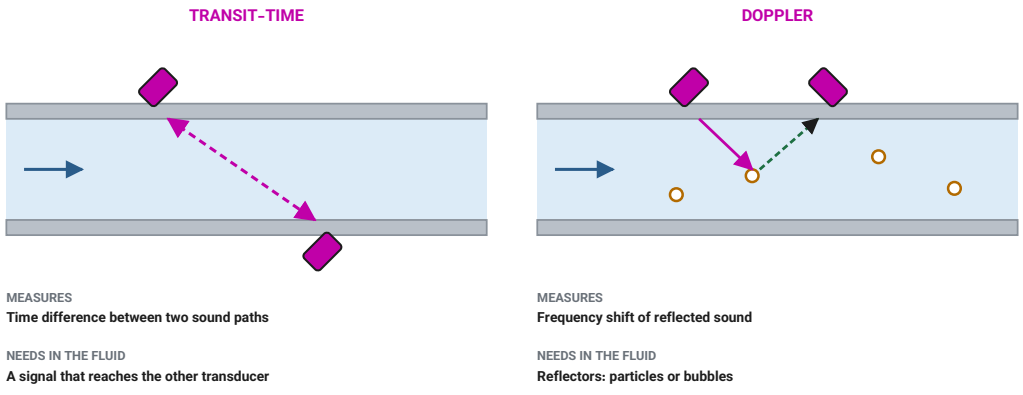
پس فلومتر Doppler برای کار کردن به بازتابنده در سیال نیاز دارد. این روش برای مایعاتی که ذرات یا حباب پراکندهٔ مناسب دارند، مثل بعضی پساب‌ها و دوغاب‌های رقیق، مطرح می‌شود؛ اما نباید گفت که برای هر مایع تمیزی مناسب است: در مایع بسیار تمیز ممکن است بازتابندهٔ کافی وجود نداشته باشد. سرعت به‌دست‌آمده نیز نمایندهٔ سرعت بازتابنده‌ها در ناحیه‌ای است که صدا آن را می‌بیند، بنابراین مقدار و محل توزیع ذرات روی نتیجه اثر می‌گذارد.



شکل ۴ — اصل Doppler: بازتاب صدا از ذرات یا حباب‌های متحرک و تغییر بسامد صدای بازگشتی

6 مقایسهٔ Transit-Time و Doppler

دو اصل بالا پاسخ‌هایی متفاوت به یک پرسش‌اند و شرایط سیال تعیین می‌کند کدام مناسب‌تر است. جدول ۲ مقایسهٔ آموزشی آن‌هاست؛ هر ستون بیانگر وضعیت «معمول» است و جایگزین برگهٔ فنی سازنده یا آزمون در سرویس نیست.



شکل ۵ — مقایسهٔ تصویری اصل Transit-Time (اختلاف زمان دو مسیر) و Doppler (تغییر بسامد بازتاب از ذرات)

جدول ۲ — مقایسهٔ اصل Transit-Time و Doppler

ویژگی	Transit-Time	Doppler
اصل اندازه‌گیری (Measurement Principle)	اختلاف زمان عبور صوت در جهت جریان و خلاف آن	تغییر بسامد صدای بازتاب‌شده از ذرات یا حباب‌های متحرک
وضعیت معمول سیال (Typical Fluid Condition)	مایع نسبتاً تمیز که صوت از آن عبور می‌کند و به Transducer مقابل می‌رسد	مایع دارای ذرات یا حباب پراکنده به‌عنوان بازتابنده
نیاز به بازتابندهٔ صوتی (Acoustic Reflectors)	لازم نیست؛ ذرات و حباب زیاد حتی می‌توانند سیگنال را ضعیف کنند	لازم است؛ بدون بازتابندهٔ کافی سیگنال قابل‌اتکا نیست
مفهوم نصب (Installation Concept)	دو Transducer روی مسیر عبور صدا، با آرایش Inline یا Clamp-on	Transducer فرستنده و گیرنده، معمولاً در یک سمت لوله؛ آرایش Inline یا Clamp-on
کاربرد معمول (Typical Application)	آب تمیز، مایعات فرآیندی تمیز، خطوط اصلی آب	پساب با مواد معلق، دوغاب رقیق، سیال حاوی حباب پراکنده

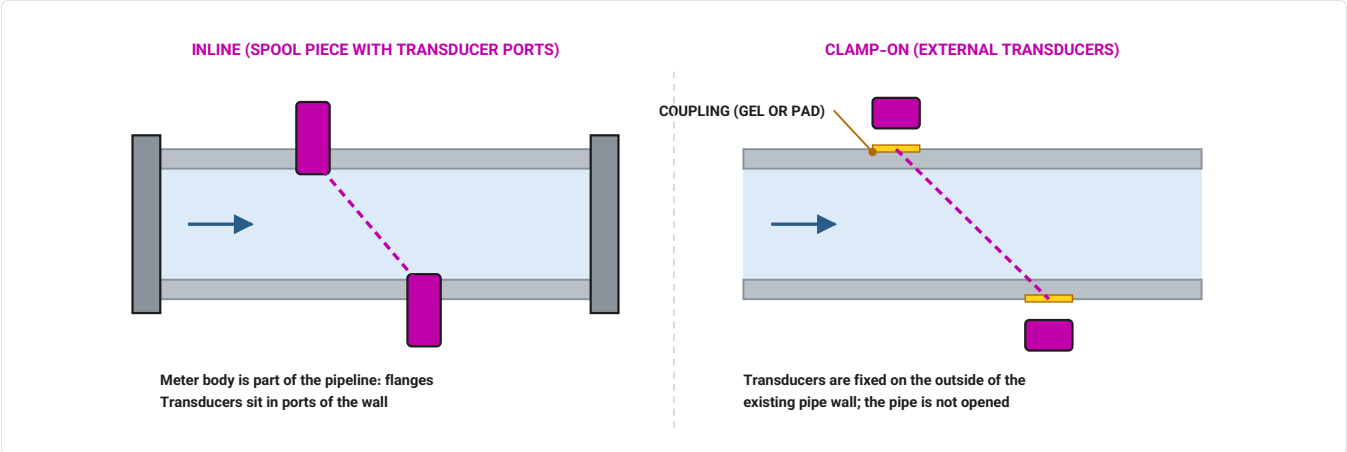
IMPORTANT — جدول، جایگزین برگهٔ فنی نیست

مرز میان دو اصل ثابت نیست. بعضی مدل‌ها هر دو را پشتیبانی می‌کنند و رفتار هر مدل با مقدار ذرات، حباب و قطر لوله فرق دارد. غلظت یا اندازهٔ مجاز ذرات را فقط از برگهٔ فنی سازنده بگیرید؛ در این سند عدد جهانی برای آن داده نمی‌شود.

7 Inline و Clamp-on: دو آرایش نصب

در آرایش Inline (فلومتر اینلاین)، حسگرها در بدنهٔ یک قطعهٔ خطی (Spool Piece) قرار دارند و این قطعه مانند یک اتصال فلنجی یا رزوه‌ای به خط لوله اضافه می‌شود؛ بنابراین برای نصب اولیه باید خط باز شود. در آرایش Clamp-on (فلومتر کلمپی)، Transducerها با بست بیرون لولهٔ موجود محکم می‌شوند و صدا پس از عبور از دیوارهٔ لوله وارد سیال می‌شود؛ لوله بریده نمی‌شود.

مهم است که Clamp-on اصل اندازه‌گیری نیست، بلکه روش نصب Transducer است. فلومتر کلمپی می‌تواند بر پایهٔ Transit-Time یا Doppler کار کند؛ همین موضوع در مورد Inline هم صادق است.



شکل ۶ — مقایسهٔ آرایش Inline (حسگرها در قطعهٔ خطی) و Clamp-on (حسگرها روی دیوارهٔ بیرونی لوله)

جدول ۳ — مقایسهٔ مفهومی Inline و Clamp-on

جنبه	Inline	Clamp-on
جایگاه Transducer	در پورت‌های بدنهٔ قطعهٔ خطی	روی سطح بیرونی لولهٔ موجود
باز کردن لوله	در نصب اولیه لازم است	لازم نیست
نقش دیوارهٔ لوله	بسته به طراحی، صدا مستقیم وارد سیال می‌شود	صدا از دیواره (و پوشش یا لاینر) عبور می‌کند
هندسهٔ مسیر صوتی	معمولاً از طراحی بدنه معلوم است	از روی داده‌های لوله و فاصلهٔ نصب Transducer تنظیم می‌شود
نصب موقت یا آزمون میدانی	معمولاً مناسب نیست	رایج و عملی است
وابستگی به شرایط لوله	بیشتر به شرایط سیال و نصب خط	به جنس، ضخامت، پوشش، رسوب و سطح لوله هم وابسته است

IMPORTANT — «بهتر» و «دقیق‌تر» را از نصب جدا نکنید

نمی‌توان گفت Clamp-on همیشه ساده‌تر یا Inline همیشه دقیق‌تر است. عملکرد هر دو به مدل، کالیبراسیون، کیفیت داده‌های لوله، نصب درست و شرایط سیال بستگی دارد. مقایسهٔ دقت باید با برگهٔ فنی هر مدل و شرایط مرجع آن انجام شود.

8 چرا فلومتر کلمپی اهمیت دارد؟

فلومتر کلمپی که در گفتار بازار «فلومتر بدون برش لوله» هم نامیده می‌شود، چند مزیت عملی دارد. نخست، حسگرها روی لولهٔ موجود بسته می‌شوند؛ پس در بسیاری از موارد نیازی به قطع خط و جوشکاری یا فلنج‌کاری نیست. دوم، Transducer با سیال تماس ندارد، که برای سیال‌های خورنده یا حساس مفید است. سوم، برای بررسی موقت دبی یا مقایسه با فلومتر نصب‌شده می‌توان آن را در زمان کوتاهی نصب و بعد جمع کرد.

در بازار گاهی به آن «فلومتر غیرتماسی» می‌گویند. این عبارت فقط یعنی حسگر با سیال تماس ندارد؛ Transducer به‌هرحال با دیوارهٔ لوله از طریق ماده‌ای واسط (Coupling) تماس دارد. نکتهٔ مهم‌تر آن است که چون صدا از دیوارهٔ لوله عبور می‌کند، جنس، ضخامت، پوشش داخلی و رسوب روی دیواره اثر مستقیم بر کیفیت سیگنال و درستی مقدار دارند و باید در انتخاب بررسی شوند.

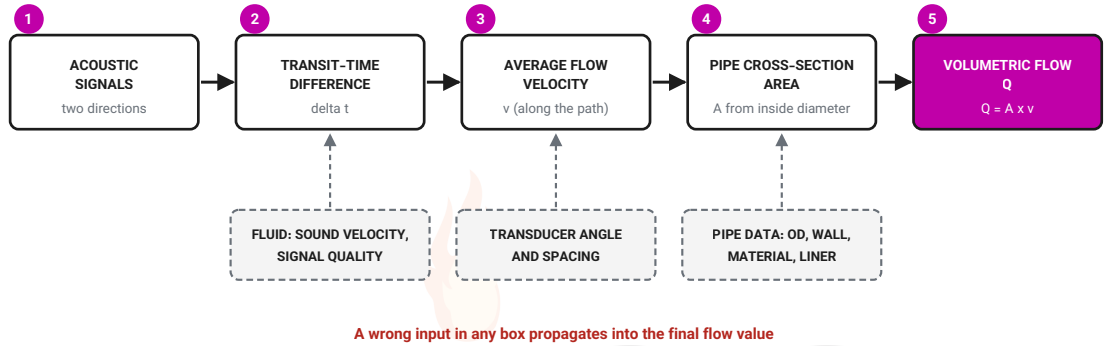
9 از اختلاف زمان تا دبی حجمی

فلومتر التراسونیک کمیت «دبی» را مستقیم اندازه نمی‌گیرد. زنجیره از چند گام تشکیل می‌شود: سیگنال‌های صوتی دریافت می‌شوند، اختلاف زمان عبور (در Transit-Time) یا اختلاف بسامد (در Doppler) به‌دست می‌آید، این اختلاف با هندسهٔ مسیر به سرعت متوسط سیال تبدیل می‌شود، و سرعت در مساحت مقطع لوله ضرب می‌شود تا دبی حجمی به‌دست آید.

$$Q = A \times v$$

Q	دبی حجمی (Volumetric Flow Rate)	m^3/s
A	مساحت مقطع جریان لوله، از قطر داخلی	m^2
v	سرعت متوسط جریان	m/s

برای تبدیل به متر مکعب بر ساعت، مقدار بر حسب m^3/s در 3600 ضرب می‌شود. سرعتی که دستگاه از مسیر صوتی می‌گیرد، سرعت متوسط روی همان مسیر است؛ تبدیل آن به سرعت متوسط کل مقطع به الگوی جریان (توزیع سرعت در لوله) بستگی دارد. این موضوع در سطح ۳ بررسی می‌شود و در اینجا کافی است بدانیم هر مرحلهٔ زنجیره می‌تواند منبع خطا باشد.



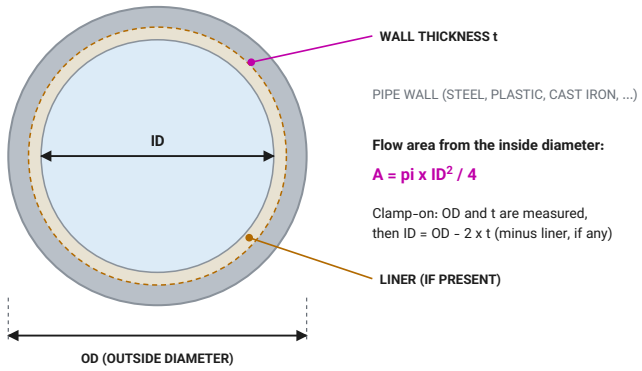
شکل ۷ — زنجیرهٔ اندازه‌گیری: سیگنال صوتی، اختلاف زمان، سرعت متوسط، مساحت مقطع و دبی حجمی

10 مساحت مقطع لوله

مساحت از قطر داخلی (ID) به‌دست می‌آید، نه از قطر بیرونی (OD) و نه از قطر اسمی جدول. فاصلهٔ بین قطر بیرونی و داخلی را ضخامت دیواره می‌سازد؛ اگر لوله لاینر یا پوشش داخلی داشته باشد، قطر مؤثر جریان کوچک‌تر هم می‌شود.

$$A = (pi / 4) \times ID^2$$

A	مساحت مقطع جریان	m^2
ID	قطر داخلی لوله (در صورت وجود لاینر: قطر داخلی مؤثر)	m
pi	عدد ثابت، تقریباً ۳٫۱۴۱۶	—



شکل ۸ — قطر بیرونی (OD)، ضخامت دیواره، قطر داخلی (ID) و لاینر در مقطع لوله

CAUTION — خطای قطر در مساحت دو برابر می‌شود

چون مساحت با مجذور قطر متناسب است، خطای کوچک در قطر داخلی تقریباً دو برابر در مساحت و در نتیجه در دبی اثر می‌کند. برای نمونه خطای 5 % در قطر داخلی حدود 10 % خطا در مساحت ایجاد می‌کند (مثال آموزشی). به همین دلیل داده‌های لوله باید اندازه‌گیری یا از مدرک معتبر گرفته شود.

11 چرا داده‌های لوله مهم‌اند؟

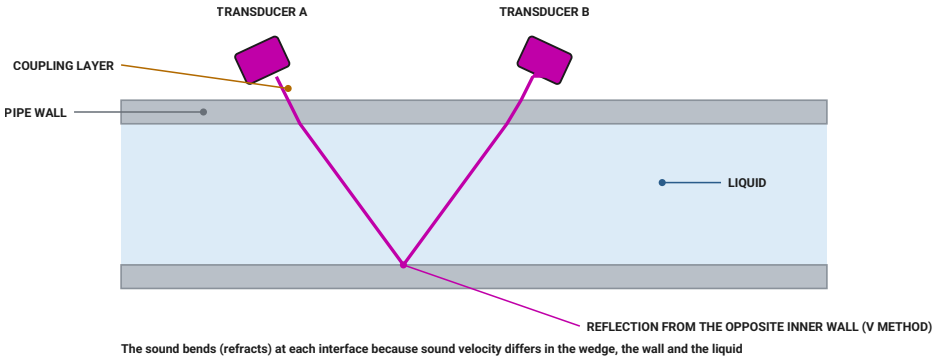
برای فلومتر کلمپی، دستگاه باید فاصلهٔ نصب Transducerها و زاویهٔ مسیر صدا را از روی مشخصات لوله حساب کند، و در هر دو آرایش مساحت مقطع باید دقیق باشد. بنابراین پیش از نصب باید داده‌های جدول ۴ مشخص باشد.

جدول ۴ — داده‌های لولهٔ لازم برای تنظیم فلومتر التراسونیک

داده	چرا لازم است؟	منبع معمول
قطر بیرونی (OD)	پایهٔ محاسبهٔ قطر داخلی و هندسهٔ نصب در Clamp-on	اندازه‌گیری میدانی یا مشخصات لوله
ضخامت دیواره (Wall Thickness)	قطر داخلی از آن به‌دست می‌آید و مسیر صوتی در دیواره را تعیین می‌کند	اندازه‌گیری میدانی یا لیست خطوط
قطر داخلی (ID)	مساحت مقطع و در نتیجه دبی از آن به‌دست می‌آید	محاسبه یا اندازه‌گیری
جنس لوله (Pipe Material)	Sound Velocity در دیواره و کیفیت عبور صوت به جنس بستگی دارد	مدارک خط یا آزمون میدانی
لاینر یا پوشش (Liner)	قطر مؤثر را کوچک می‌کند و صدا از آن هم عبور می‌کند	مدارک خط و بازرسی

12 سرعت صوت در مسیر: چرا مهم است؟

در فلومتر کلمپی صدا پیش از رسیدن به سیال از گوه یا بستر Transducer، لایهٔ Coupling، دیوارهٔ لوله و بعد خود سیال می‌گذرد. در هر مرز، به‌دلیل تفاوت سرعت صوت در دو ماده، مسیر صدا خم می‌شود (Refraction). بنابراین زاویهٔ ورود صدا به سیال و فاصلهٔ لازم بین دو Transducer به Sound Velocity در جنس لوله و در سیال بستگی دارد. اگر دستگاه سرعت صوت سیال را اشتباه فرض کند، هندسهٔ مسیر خطا پیدا می‌کند و نتیجه جابه‌جا می‌شود.

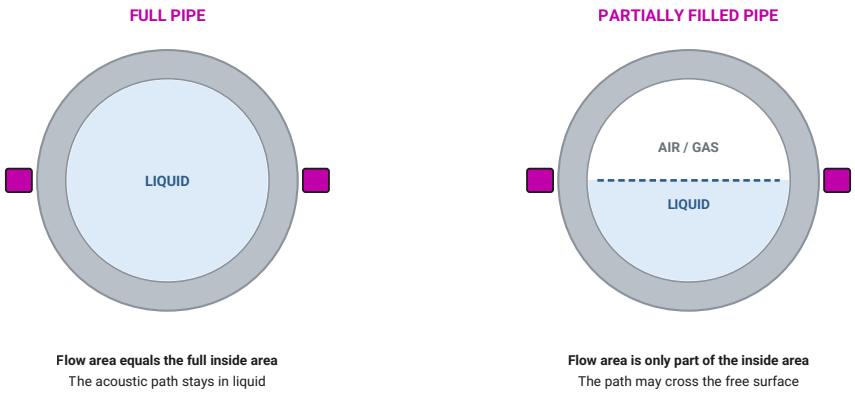


شکل ۹ — مسیر صوتی در فلومتر کلمپی: Transducer، لایهٔ Coupling، دیوارهٔ لوله، سیال و بازتاب از دیوارهٔ مقابل (آرایش V Method)

دستگاه‌ها سرعت صوت سیال را به یکی از دو شکل به‌دست می‌آورند: بعضی مدل‌ها آن را از جدول سیال یا ورودی کاربر می‌گیرند و بعضی آن را از سیگنال اندازه می‌گیرند و نشان می‌دهند. در هر دو حالت، مقایسهٔ مقدار نمایش‌داده‌شده با مقدار مورد انتظار برای آن سیال و دما یک بررسی ساده و مفید است؛ اختلاف زیاد معمولاً از داده‌های اشتباه، سیال متفاوت یا مشکل سیگنال خبر می‌دهد. دما و ترکیب سیال سرعت صوت را تغییر می‌دهند، پس در تغییر شرایط فرآیند باید دوباره بررسی شود.

13 لوله باید پر باشد: Full Pipe

فلومتر التراسونیک برای لوله‌ای که کاملاً از مایع پر است (Full Pipe) طراحی شده است. اگر لوله فقط تا حدی پر باشد، دو اشکال پیش می‌آید: مساحت واقعی جریان کوچک‌تر از مساحت مقطع کامل است و دستگاه که آن را کامل فرض کرده دبی را بیش از مقدار واقعی گزارش می‌دهد؛ علاوه بر آن، مسیر صدا ممکن است از سطح آزاد یا حباب هوا بگذرد و سیگنال قطع یا ناپایدار شود.



شکل ۱۰ — لولهٔ کاملاً پر (Full Pipe) و لولهٔ نیمه‌پر (Partially Filled): تفاوت مساحت جریان و مسیر صدا

لولهٔ نیمه‌پر معمولاً در خط‌های شیب‌دار، نقطه‌های بالای مسیر، خروجی‌های آزاد، هنگام خالی شدن خط یا وقتی پمپ خاموش است دیده می‌شود. اندازه‌گیری در کانال باز (Open Channel) موضوع جداگانه‌ای است که با روش‌های سطح و سازهٔ هیدرولیکی انجام می‌شود و در این راهنما بررسی نمی‌شود.

14 حباب و ذرات: اثر آن‌ها بر سیگنال

حباب و ذرات معلق دو نقش متفاوت دارند: در Doppler مفید و حتی لازم‌اند چون بازتابنده می‌سازند، اما در Transit-Time اگر زیاد باشند، صدا را پراکنده و تضعیف می‌کنند و ممکن است Signal Quality پایین بیاید. هیچ عدد جهانی برای حد مجاز حباب یا ذره وجود ندارد؛ بسته به مدل، بسامد، قطر لوله، مسیر صدا و نوع ذره فرق می‌کند و باید از سازنده پرسیده شود.

جدول ۵ — اثر مفهومی حباب و ذرات بر دو اصل اندازه‌گیری

وضعیت سیال	اثر بر Transit-Time	اثر بر Doppler
مایع بسیار تمیز	شرایط مطلوب برای عبور صدا	ممکن است بازتابندهٔ کافی وجود نداشته باشد
حباب پراکندهٔ کم	ممکن است تحمل شود؛ به مدل بستگی دارد	می‌تواند به‌عنوان بازتابنده عمل کند
ذرات معلق متوسط	سیگنال ضعیف‌تر؛ باید با سازنده بررسی شود	معمولاً شرایط مناسب‌تری برای بازتاب
هوای تجمع‌یافته یا حفره	می‌تواند عبور صدا را قطع کند	سیگنال ناپایدار و مقدار نامعتبر محتمل است

15 مفاهیم نصب: محل، جهت و فاصلهٔ مستقیم

کیفیت اندازه‌گیری فقط به خود دستگاه بستگی ندارد؛ محل نصب نیز مهم است. در لولهٔ افقی معمولاً توصیه می‌شود Transducerها کنار لوله و تقریباً در ارتفاع محور قرار گیرند تا از هوای تجمع‌یافتهٔ بالای لوله و رسوب پایین لوله دور بمانند. در لولهٔ عمودی، جریان رو به بالا کمک می‌کند لوله پر بماند. ENGINEERING RECOMMENDATION قاعدهٔ قطعی هر مدل را باید از دفترچهٔ سازنده گرفت.

اغتشاش جریان بعد از زانو، شیر، پمپ یا کاهنده (Reducer) شکل توزیع سرعت را تغییر می‌دهد و می‌تواند اندازه‌گیری را از ایدهٔ مبنا دور کند. به همین دلیل سازندگان فاصلهٔ لولهٔ مستقیم (Straight Run) بالادست و پایین‌دست را مشخص می‌کنند. در این راهنما عدد فاصله داده نمی‌شود؛ مقدار باید از برگهٔ فنی همان مدل یا استاندارد مرتبط گرفته شود. REQUIRES VERIFICATION

16 بدون قطعهٔ متحرک، بدون نگهداری نیست

نبود قطعهٔ متحرک در مسیر جریان یعنی سایش و گیر کردن مکانیکی روتور وجود ندارد، ولی به معنای بی‌نیازی از نگهداری نیست. مادهٔ واسط Coupling (ژل یا پد) در طول زمان خشک یا جابه‌جا می‌شود، بست‌ها شل می‌شوند، کابل و اتصال‌ها آسیب می‌بینند، رسوب یا خوردگی در دیواره سیگنال را ضعیف می‌کند و تنظیمات دستگاه باید با تغییر سیال یا لوله به‌روز بماند. بازبینی دوره‌ای کیفیت سیگنال (Signal Quality) و مقایسه با یک مرجع، از ساده‌ترین روش‌های کنترل است.

17 افت فشار

فلومتر Clamp-on مانعی در داخل لوله ایجاد نمی‌کند و بنابراین افت فشار ناشی از خود حسگر ندارد. در آرایش Inline افت فشار به هندسهٔ قطعهٔ خطی بستگی دارد: اگر قطر عبور جریان با لوله برابر باشد و حسگرها از دیواره وارد شوند، مانع بزرگی در مسیر نیست؛ اما اگر مسیر کاهش یافته باشد، افت فشار بیشتر است. برای هر مدل Inline مقدار افت فشار را فقط از سازنده بخواهید.

18 مقایسهٔ فلومتر التراسونیک با فناوری‌های دیگر

انتخاب فناوری دبی به سیال، لوله، دقت لازم و شرایط نصب بستگی دارد. جدول ۶ مقایسهٔ مفهومی پنج فناوری رایج است؛ ردیف‌ها برای فهم تفاوت اصل کار هستند، نه رتبه‌بندی برتری.

جدول ۶ — مقایسهٔ مفهومی فناوری‌های دبی (همهٔ مقادیر نوعی و شرطی‌اند)

فناوری	اصل اصلی	سیال معمول	قطعهٔ متحرک در جریان	نفوذ در لوله	حجمی یا جرمی
التراسونیک (Ultrasonic)	زمان یا بسامد صدا	مایعات؛ بسته به نوع و مدل	ندارد	در Clamp-on ندارد؛ در Inline بسته به طراحی	حجمی
مغناطیسی (Magnetic)	القای الکترومغناطیسی فارادی	مایع با رسانایی کافی	ندارد	قطعهٔ لاینردار در خط	حجمی
توربینی (Turbine)	سرعت چرخش روتور	سیال تمیز با گرانروی مناسب	دارد (روتور)	قطعهٔ خطی	حجمی
ورتکس (Vortex)	بسامد گردابه‌های پشت مانع	مایع، گاز و بخار؛ بسته به مدل	ندارد (مانع ثابت)	قطعهٔ خطی یا نوع Insertion	حجمی
کوریولیس (Coriolis)	نیروی کوریولیس در لولهٔ مرتعش	مایع و گاز؛ بسته به مدل	ندارد (لولهٔ مرتعش)	قطعهٔ خطی	جرمی؛ چگالی هم قابل‌ارائه است

فلومتر التراسونیک مستقیماً دبی جرمی نمی‌دهد؛ برای تبدیل به جرم باید چگالی سیال را هم دانست. در مقابل فلومتر مغناطیسی فقط برای سیال رسانا مناسب است و Coriolis اندازه‌گیری مستقیم جرم را انجام می‌دهد. نام مدل‌های مربوط NICO در بخش منابع مرتبط آمده است.

19 چهار مثال ساده

مثال الف — خط آب تمیز EXAMPLE

آنچه می‌بینید: خط آب تمیز با قطر داخلی 100 mm و سرعت متوسط 2 m/s که دبی آن را می‌خواهیم.

محاسبه: مساحت $A = (pi / 4) \times 0.1^2 = 0.007854\ m^2$؛ دبی $Q = 0.007854 \times 2 = 0.01571\ m^3/s$؛ تبدیل به ساعت: $0.01571 \times 3600 = 56.5\ m^3/h$.

> **فلومتر Transit-Time با Clamp-on یا Inline برای آب تمیز گزینهٔ مطرح است؛ پیش از تصمیم باید داده‌های لوله، Full Pipe و فاصلهٔ لولهٔ مستقیم بررسی شود. اعداد آموزشی‌اند.**

مثال ب — بررسی موقت دبی پمپ EXAMPLE

آنچه می‌بینید: مهندس بهره‌برداری می‌خواهد دبی یک پمپ را بدون قطع خط بسنجد.

> **فلومتر Clamp-on قابل‌حمل کار را بدون بریدن لوله انجام می‌دهد. نتیجه به داده‌های لوله، تمیزی دیواره و کیفیت Coupling وابسته است و فقط به‌عنوان بررسی میدانی ارزش دارد، نه جایگزین کالیبراسیون رسمی.**

مثال پ — پساب با مواد معلق EXAMPLE

آنچه می‌بینید: پساب خام حاوی مواد معلق و حباب پراکنده.

> **اصل Doppler چون بازتابنده دارد گزینهٔ مطرح است، ولی بعضی مدل‌های Transit-Time هم برای شرایط خاص ساخته شده‌اند. تصمیم باید بر پایهٔ داده‌های سیال و برگهٔ فنی سازنده گرفته شود؛ نه نام کلی «فلومتر پساب».**

مثال ت — خط لولهٔ بزرگ EXAMPLE

آنچه می‌بینید: خط آب قطر بزرگ که قطع آن دشوار است.

> **نصب Clamp-on از بریدن لوله پرهیز می‌کند، اما مسیر صدا طولانی‌تر است و جنس و ضخامت دیواره، رسوب و لاینر اثر بیشتری دارد. انتخاب Inline یا Clamp-on در سطح ۲ با فهرست داده‌ها و معیارهای تصمیم بررسی می‌شود.**

20 تصورات غلط رایج

این هفت تصور بیش از بقیه در گفت‌وگوهای خرید و بهره‌برداری شنیده می‌شود؛ هر کدام با توضیح کوتاه اصلاح شده است.

تصور غلط	واقعیت
× هر فلومتر التراسونیک برای هر سیالی مناسب است.	✓ اصل کار، نوع نصب و شرایط سیال (حباب، ذرات، دما) محدودهٔ کاربرد هر مدل را تعیین می‌کند.
× Clamp-on همیشه ساده‌تر و Inline همیشه دقیق‌تر است.	✓ هر دو به مدل، داده‌های لوله و نصب درست وابسته‌اند؛ برتری مطلق وجود ندارد.
× چون قطعهٔ متحرک ندارد، نگهداری نمی‌خواهد.	✓ Coupling، بست، کابل، رسوب و تنظیمات همچنان بازبینی می‌خواهند.
× برای Clamp-on قطر اسمی لوله کافی است.	✓ قطر بیرونی، ضخامت دیواره، جنس و لاینر لازم‌اند؛ قطر داخلی واقعی مساحت را تعیین می‌کند.
× Transit-Time و Doppler نام دو برند یا دو نصب‌اند.	✓ دو اصل فیزیکی متفاوت‌اند؛ Clamp-on و Inline نوع نصب هستند.
× سطح‌سنج و فلومتر التراسونیک یک دستگاه‌اند.	✓ یکی فاصلهٔ سطح را از پژواک می‌سنجد و دیگری سرعت و دبی سیال را.
× عدد پایدار روی نمایشگر یعنی درست است.	✓ مقدار پایدار با داده‌های اشتباه لوله هم ثابت می‌ماند؛ پایداری دلیل درستی نیست.

COMMON MISTAKE — وارد کردن ضخامت دیواره یا قطر اشتباه

رایج‌ترین خطای راه‌اندازی Clamp-on وارد کردن داده‌های لولهٔ حدسی است: قطر اسمی به‌جای قطر واقعی یا ضخامت دیواره بدون اندازه‌گیری. دستگاه با این داده‌ها هم عددی پایدار نشان می‌دهد، ولی دبی به همان نسبت نادرست است. پیش از نصب، OD و ضخامت دیواره را اندازه بگیرید و در صورت لاینر یا پوشش آن را مستند کنید.

21 قیمت، خرید و انتخاب تأمین‌کنندهٔ فلومتر التراسونیک

قیمت فلومتر التراسونیک به نوع (اینلاین یا کلمپی)، قطر لوله، اصل اندازه‌گیری، خروجی‌ها، تأییدیه‌ها و خدمات کالیبراسیون یا راه‌اندازی بستگی دارد و در این سند عددی برای آن داده نمی‌شود. برای خرید فلومتر التراسونیک یا ارزیابی تولیدکننده و سازندهٔ آن، پرسش‌های فنی زیر پیش از مقایسهٔ قیمت اهمیت بیشتری دارند.

- ☐ اصل اندازه‌گیری و نوع نصب برای سیال و لولهٔ شما چیست و بر چه مبنایی انتخاب شده است؟
- ☐ برگهٔ فنی رسمی مدل شامل شرایط مرجع، محدودهٔ سرعت، دما و فشار در اختیار شما قرار گرفته است؟
- ☐ چه داده‌هایی از لوله (قطر بیرونی، ضخامت، جنس، لاینر) و سیال لازم است و چه کسی مسئول تأیید آن‌هاست؟
- ☐ روش راه‌اندازی، بررسی کیفیت سیگنال و مستندسازی تنظیمات چگونه انجام می‌شود؟
- ☐ برای مدل‌های Clamp-on، چه روشی برای بررسی یا اعتبارسنجی نتیجه در محل پیشنهاد می‌شود؟
- ☐ پشتیبانی، قطعات یدکی و مدارک (گواهی کالیبراسیون یا آزمون) چگونه ارائه می‌شود؟

جمع‌بندی نکات کلیدی

- فلومتر التراسونیک دبی را از اثر حرکت سیال بر عبور صوت به دست می‌آورد و در مسیر جریان قطعهٔ متحرک لازم ندارد.
- اصل Transit-Time اختلاف زمان عبور در دو جهت را می‌سنجد؛ اصل Doppler تغییر بسامد بازتاب از ذرات یا حباب را.
- Inline و Clamp-on آرایش نصب‌اند، نه اصل اندازه‌گیری؛ هیچ‌کدام به‌طور مطلق بهتر نیست.
- دبی حاصل ضرب مساحت مقطع در سرعت متوسط است و مساحت با مجذور قطر داخلی تغییر می‌کند؛ پس داده‌های لوله حیاتی‌اند.
- Full Pipe، حباب، ذرات و Signal Quality دامنهٔ کاربرد هر مدل را مشخص می‌کنند و باید با سازنده بررسی شوند.
- پایداری عدد نمایشگر دلیل صحت آن نیست؛ بازبینی داده‌های لوله و سیگنال بخش اصلی هر راه‌اندازی است.

22 پرسش‌های متداول

› فلومتر التراسونیک چیست و چگونه کار می‌کند؟

دبی‌سنجی است که با امواج فراصوتی سرعت سیال را اندازه می‌گیرد و با مساحت مقطع لوله آن را به دبی حجمی تبدیل می‌کند. در اصل Transit-Time از اختلاف زمان عبور صوت در دو جهت و در اصل Doppler از تغییر بسامد بازتاب استفاده می‌شود.

› فلومتر کلمپی (Clamp-on) چیست؟

فلومتری است که Transducerها را روی سطح بیرونی لولهٔ موجود می‌بندد و صدا را از دیواره به سیال می‌فرستد. Clamp-on نوع نصب است و می‌تواند بر پایهٔ Transit-Time یا Doppler کار کند.

› تفاوت Transit-Time و Doppler چیست؟

Transit-Time اختلاف زمان عبور صوت در جهت جریان و خلاف آن را می‌سنجد و به مایع نسبتاً تمیز نیاز دارد؛ Doppler تغییر بسامد بازتاب از ذرات یا حباب‌ها را می‌سنجد و به بازتابنده نیاز دارد.

› آیا فلومتر التراسونیک برای هر مایعی مناسب است؟

نه. نوع سیال، حباب، ذرات، دما، قطر لوله و مدل دستگاه دامنهٔ کاربرد را تعیین می‌کنند. انتخاب باید با داده‌های سیال و برگهٔ فنی سازنده انجام شود.

› آیا فلومتر التراسونیک بدون برش لوله نصب می‌شود؟

نوع Clamp-on روی لولهٔ موجود بسته می‌شود و نیازی به بریدن لوله ندارد. نوع Inline یک قطعهٔ خطی است و در نصب اولیه باید در خط قرار گیرد.

› چرا برای فلومتر کلمپی ضخامت دیواره و جنس لوله لازم است؟

چون صدا از دیواره می‌گذرد و مسیر آن با جنس و ضخامت تغییر می‌کند؛ ضخامت دیواره در محاسبهٔ قطر داخلی و در نتیجه مساحت و دبی هم مستقیماً اثر دارد.

آیا فلومتر التراسونیک آب را اندازه می‌گیرد؟

آب تمیز از رایج‌ترین کاربردهای فلومتر التراسونیک است و در بازار با نام فلومتر آب یا دبی‌سنج آب هم جست‌وجو می‌شود. کیفیت نتیجه به نوع نصب، داده‌های لوله و Full Pipe بستگی دارد.

حباب و ذرات معلق چه اثری دارند؟

در Transit-Time مقدار زیاد آن‌ها صدا را تضعیف می‌کند و در Doppler مقدار مناسب آن‌ها برای بازتاب لازم است. حد عددی جهانی وجود ندارد و باید از سازنده پرسید.

آیا لوله باید حتماً پر باشد؟

برای فلومترهای مخصوص لولهٔ بسته، بله. در لولهٔ نیمه‌پر مساحت جریان و مسیر صدا تغییر می‌کند و دبی خطا پیدا می‌کند یا سیگنال قطع می‌شود.

تفاوت فلومتر التراسونیک با فلومتر مغناطیسی چیست؟

فلومتر مغناطیسی از القای الکترومغناطیسی استفاده می‌کند و به سیال رسانا نیاز دارد؛ فلومتر التراسونیک از صوت استفاده می‌کند و به رسانایی سیال وابسته نیست، ولی به شرایط صوتی سیال و لوله حساس است.

دقت فلومتر التراسونیک چقدر است؟

عدد ثابتی برای همهٔ مدل‌ها وجود ندارد. دقت به مدل، شرایط مرجع، داده‌های لوله، نصب و محدودهٔ سرعت وابسته است و باید از برگهٔ فنی همان مدل خوانده شود.

آیا فلومتر التراسونیک گاز را هم اندازه می‌گیرد؟

اندازه‌گیری گاز با فلومتر التراسونیک دستهٔ جداگانه‌ای است و طراحی و استانداردهای خاص خود را دارد؛ این راهنما به سیال‌های مایع می‌پردازد و گاز در سطح ۳ فقط در حد معرفی دامنه آمده است.

23 استانداردها و منابع

1. ISO/TR 12765 — Measurement of fluid flow in closed conduits — Methods using transit-time ultrasonic flowmeters

   گزارش فنی (ویرایش ۱۹۹۸)؛ عنوان و وضعیت جاری از فهرست BSI (نسخهٔ BS ISO/TR 12765) تأیید شد؛ متن آن خوانده نشده و مطلبی از آن نقل نشده است.

2. ISO 17089-1:2019 — Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas — Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement

   عنوان، ویرایش دوم و دامنهٔ گاز از فهرست SIS تأیید شد؛ فقط برای جداسازی دامنه ذکر شده و متن آن خوانده نشده است.

3. API MPMS Chapter 5.8 — Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters

   فهرست فروشگاه استاندارد، ویرایش ۲۰۲۵ را جاری و جایگزین ویرایش ۲۰۱۱ نشان می‌دهد؛ دامنه: هیدروکربن مایع؛ متن خوانده نشده است.

این راهنما سند سطح ۱ است و عمداً وارد استخراج کامل رابطهٔ Transit-Time، Multipath، تصحیح Reynolds Number، الگوریتم‌های پردازش سیگنال، بودجهٔ عدم‌قطعیت، محاسبهٔ فاصلهٔ Transducerها و اندازه‌گیری گاز نمی‌شود؛ این موضوعات در راهنماهای سطح ۲ و ۳ بررسی می‌شوند. اعداد مثال‌ها آموزشی‌اند و هیچ مشخصهٔ فنی محصول NICO در این راهنما ادعا نشده است.

منابع مرتبط NICO

گام بعدی

- راهنمای مهندسی انتخاب، نصب و راه‌اندازی فلومتر التراسونیک — NICO-EDU-FLW-L2-012-FA
- مهندسی پیشرفتهٔ اندازه‌گیری دبی با التراسونیک: Multipath، Flow Profile و عدم‌قطعیت — NICO-EDU-FLW-L3-013-FA
- دبی جرمی و حجمی چه تفاوتی دارند؟ — NICO-EDU-FLW-L1-008-FA

فناوری‌های مرتبط NICO برای مقایسه

- فلومتر الکترومغناطیسی — MAG20
- فلومتر کوریولیس — CMF55
- روتامتر فلزی و شیشه‌ای — MTR25 و GTR25

مشخصات، محدودهٔ کاربرد و تأییدیهٔ هر مدل باید از برگهٔ فنی رسمی NICO گرفته شود؛ هیچ مشخصهٔ محصولی در این راهنما ادعا نشده است.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه