NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

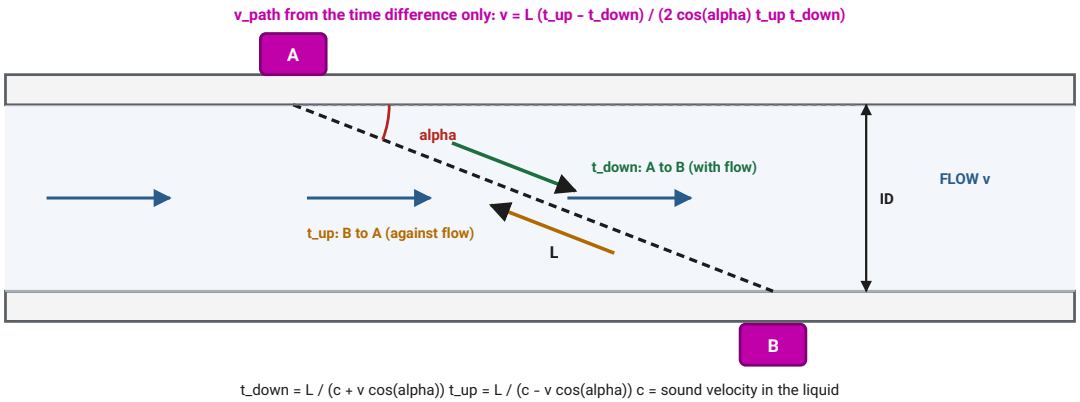
LEVEL 3 — ADVANCED ENGINEERING

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

# مهندسی پیشرفتهٔ فلومتر التراسونیک: از فیزیک Transit-Time تا Multipath، Flow Profile و عدم‌قطعیت اندازه‌گیری

## از Transit-Time Physics تا Multipath، Flow Profile و Measurement Uncertainty

Advanced Ultrasonic Flow Measurement: Transit-Time Physics, Multipath Integration, Flow Profile and Measurement Uncertainty




**شکل ۱** — هندسهٔ مسیر صوتی در روش Transit-Time: $t_{down}$، $t_{up}$، زاویهٔ alpha و طول مسیر L

| شماره سند | بازنگری | سطح محتوا | تاریخ انتشار |
|---|---|---|---|
| NICO-EDU-FLW-L3-013-FA | Rev00 | LEVEL 3 | November 2026 — **آبان ۱۴۰۵** |

# 1 هدف، پرسش مهندسی و مبنای طراحی

این سند سطح ۳ برای مهندسان ارشد ابزار دقیق، طراحان، مشاوران و کارشناسان EPC است. پرسش مهندسی آن این است: **خطا و عدم‌قطعیت دبی در فلومتر التراسونیک (Ultrasonic Flowmeter) از فیزیک انتشار صوت، هندسهٔ لوله، پروفایل سرعت و الکترونیک زمان‌سنج چگونه ساخته می‌شود، و چگونه می‌توان آن را با مدل، حساسیت و بودجهٔ عدم‌قطعیت راستی‌آزمایی کرد؟** اصول پایه در سطح ۱ (NICO-EDU-FLW-L1-011-FA) و انتخاب و نصب عملی در سطح ۲ (NICO-EDU-FLW-L2-012-FA) آمده است؛ این سند آن‌ها را فرض می‌کند و به‌جای تکرار، مدل‌های ریاضی و تحلیل خطا را می‌سازد. هر مدل فقط معادله‌ای را به کار می‌برد که مبنایش در همین سند مشتق یا با منبع مشخص شده است؛ جز در مواردی که صریحاً برچسب MANUFACTURER-SPECIFIC DATA دارد، هیچ ادعایی دربارهٔ الگوریتم یا مشخصهٔ یک مدل تجاری نشده است.

**پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:**

1. معادلات Transit-Time را از $t_{down}$ و $t_{up}$ مشتق کنید و تفاوت وارونی دقیق و تقریب خطی را با عدد نشان دهید.
2. ضریب K پروفایل را از مدل توانی بسازید و خطای تک‌مسیره را در برابر چندمسیره (Multipath) محاسبه کنید.
3. اثر خطای قطر داخلی، ضخامت دیواره، زاویهٔ Snell و سرعت صوت را کمّی کنید و حدود پایین و بالای حساسیت را تعیین کنید.
4. اثر وضوح Delta-t، صفر و Signal Quality را با بودجهٔ سیگنال و بودجهٔ زمانی ارزیابی کنید.
5. بودجهٔ عدم‌قطعیت به روش GUM و ماتریس حساسیت بسازید و U را با $k = 2$ گزارش کنید.
6. FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی را با وضعیت و مورد باز تکمیل کنید.

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

**DESIGN BASIS — مبنای طراحی این سند**

1. سیال مرجع: آب تمیز در 20 °C با سرعت صوت محاسبه‌شده از چندجمله‌ای Marczak؛ مورد گاز فقط مفهومی است و داده‌های آن فرضی است.
2. لولهٔ مرجع Clamp-on: فولاد کربنی با OD برابر 219.1 mm و ضخامت 8.18 mm؛ قطر داخلی 202.74 mm و دبی‌های 40 m³/h، 150 m³/h و 250 m³/h (ASSUMPTION؛ همان لولهٔ مثال سطح ۲).
3. هندسهٔ صوتی: گوهٔ پلاستیکی با سرعت 2500 m/s و زاویهٔ 40 deg، سرعت موج برشی فولاد 3200 m/s؛ همه فرض آموزشی‌اند و دادهٔ هیچ سازنده‌ای نیستند.
4. پروفایل: مدل توانی محورمتقارن با نمای n ( $n = 6$ تا $n = 14$ ) و یک پروفایل آشفتهٔ ساختگی؛ نمای n از Re محاسبه نمی‌شود، پارامتریک است.
5. سطح اطمینان بودجه: $k = 2$ (حدود 95 % برای توزیع نرمال، فرض)؛ مؤلفه‌ها مستقل‌اند.
6. هیچ مشخصهٔ محصول NICO ادعا نشده است؛ UFM20 خانوادهٔ سطح‌سنج است و در این سند به کار نرفته است.

## 2 فرض‌های مدل و برچسب‌های مبنا

ASSUMPTIONS — فرض‌های مدل (همه آموزشی)

1. سیال همگن و بدون حباب در لولهٔ کاملاً پر؛ جریان پایا و محورمتقارن.
   مبنا: ASSUMPTION؛ اثر ناهمگنی در بخش FMEA آمده است.
2. سرعت صوت در سیال ثابت و یکنواخت در طول مسیر است؛ گرادیان دما در مقطع در نظر گرفته نشده است.
   مبنا: ASSUMPTION
3. مسیرهای صوتی خط مستقیم‌اند؛ انحراف پرتو ناشی از جریان در حد مرتبهٔ دوم نادیده گرفته شده است.
   مبنا: ASSUMPTION؛ REQUIRES VERIFICATION
4. سرعت اندازه‌گیری‌شدهٔ هر مسیر برابر میانگین خطی سرعت محوری روی آن مسیر است و جریان عرضی (Swirl) جداگانه بررسی می‌شود.
   مبنا: ASSUMPTION
5. داده‌های کالیبراسیون در بخش ۲۸ ساختگی‌اند و فقط روش را نشان می‌دهند.
   مبنا: ASSUMPTION؛ SYNTHETIC DATA
6. مؤلفه‌های عدم‌قطعیت مستقل‌اند و توزیع هر یک صریحاً ذکر شده است.
   مبنا: روش نوع B در JCGM 100:2008 (GUM)؛ مقادیر ورودی ASSUMPTION

هر گزارهٔ فنی با یک برچسب مبنا مشخص می‌شود تا خواننده بداند حرف از الزام است، توصیهٔ مهندسی است یا داده‌ای که فقط سازنده می‌تواند تأیید کند. برچسب «الزام استاندارد» (NORMATIVE REQUIREMENT) در این سند هیچ‌جا به کار نرفته است، چون متن کامل استانداردهای فهرست‌شده خوانده نشده و فقط عنوان، ویرایش و دامنهٔ آن‌ها از فهرست‌های رسمی بررسی شده است.

**جدول ۱** — برچسب‌های مبنا و کاربرد آن‌ها در این سند

| برچسب | معنا | نمونهٔ استفاده |
|---|---|---|
| NORMATIVE REQUIREMENT | الزام متن استاندارد خواندهٔ شده | در این سند به کار نرفته است |
| ENGINEERING RECOMMENDATION | توصیهٔ مهندسی مبتنی بر فیزیک یا تجربهٔ عمومی | حدود معقول حساسیت و روش بازبینی |
| MANUFACTURER-SPECIFIC DATA | داده یا الگوریتمی که فقط برگهٔ سازنده تأیید می‌کند | نمای ضریب هندسه، موقعیت مسیرها، تأخیرهای گوهٔ ترانسدیوسر |
| NICO DESIGN PRACTICE | رویهٔ پیشنهادی طراحی NICO برای مستندسازی | قالب ماتریس راستی‌آزمایی |
| ASSUMPTION | فرض آموزشی یا ورودی ساختگی | همهٔ عددهای ورودی موردها |
| REQUIRES VERIFICATION | گزاره‌ای که باید با منبع، آزمون یا برگهٔ سازنده تأیید شود | ویرایش استانداردها، الگوریتم دقیق محاسبهٔ هندسه |

## 3 فیزیک موج: طول موج، سرعت صوت و مسیر صوتی

فلومتر التراسونیک از بسامدی در حدود مگاهرتز برای مایعات استفاده می‌کند و صوت در مایع به‌صورت موج طولی منتشر می‌شود. رابطهٔ پایهٔ طول موج با سرعت صوت و بسامد از تعریف موج به دست می‌آید:

$$\lambda = c / f \quad (1)$$

| | | |
|---|---|---|
| **lambda** | طول موج صوت در سیال | m |
| **c** | سرعت صوت در سیال؛ تابع دما، ترکیب و فشار | m/s |
| **f** | بسامد کاری ترانسدیوسر | Hz |

برای آب در 20 °C سرعت صوت حدود 1482.4 m/s است و در بسامد 1 MHz طول موج برابر 1.48 mm می‌شود. این مرتبهٔ بزرگی دو نتیجهٔ مهندسی دارد: ذرات و حباب‌هایی با ابعاد نزدیک یا بزرگ‌تر از طول موج صوت را به‌طور قابل‌توجه بازتاب یا تضعیف می‌کنند، و ضخامت دیوارهٔ فولادی چندمیلی‌متری نسبت به طول موج برشی در فولاد مرتبهٔ کمی بزرگ‌تر است، پس ساختار لایه‌ای دیواره در مدل اهمیت دارد.

> **NOTE – منبع سرعت صوت آب**
>
> مقدار c در این سند از چندجمله‌ای Marczak برای آب خالص به‌دست آمده است (بخش ۱۹)؛ سرعت صوت در سیال واقعی با املاح، گاز حل‌شده و فشار فرق می‌کند و باید از اندازه‌گیری خود فلومتر یا برگهٔ سیال گرفته شود REQUIRES VERIFICATION.

## 4 مشتق Transit-Time: اشتقاق دقیق

دو ترانسدیوسر A و B طوری قرار می‌گیرند که مسیر صوت بین آن‌ها با محور لوله زاویهٔ alpha بسازد و طول مسیر در مایع L باشد. مؤلفهٔ سرعت جریان در راستای مسیر برابر v cos(alpha) است. صوتی که با جریان از A به B می‌رود با سرعت مؤثر c + v cos(alpha) و صوتی که خلاف جریان برمی‌گردد با c - v cos(alpha) حرکت می‌کند. زمان‌های عبور بنابراین عبارت‌اند از:

$$t_{down} = L / (c + v \cos(\alpha)) \quad (2)$$

$$t_{up} = L / (c - v \cos(\alpha)) \quad (3)$$

اگر معکوس این دو زمان از هم کم شود، c حذف می‌شود: $1/t_{down} - 1/t_{up} = 2 v \cos(\alpha) / L$. از اینجا سرعت متوسط روی مسیر، بدون هیچ تقریبی، به‌دست می‌آید:

$$v = L\,(t_{up} - t_{down}) \,/\, (2\cos(alpha) \times t_{up} \times t_{down}) \quad (4)$$

| | | |
|---|---|---|
| $t_{down}$ | زمان عبور در جهت جریان (از ترانسدیوسر بالادست به پایین‌دست) | s |
| $t_{up}$ | زمان عبور خلاف جریان | s |
| L | طول مسیر صوتی در سیال (بدون مسیر در گوه و دیواره) | m |
| alpha | زاویهٔ مسیر صوتی با محور لوله | deg |
| v | سرعت متوسط محوری روی مسیر صوتی ($v_{path}$) | m/s |

این نتیجه مهم است چون نشان می‌دهد در شکل دقیق، سرعت صوت c مستقیماً در رابطه نیست؛ اندازه‌گیری زمان‌های $t_{up}$ و $t_{down}$ و دانستن L و alpha کافی است. اما c از دو راه دوباره وارد می‌شود: نخست از طریق زاویهٔ alpha در مدل Snell (بخش ۱۷) و دوم از طریق هر تقریبی که الگوریتم برای کاهش حجم محاسبات به کار ببرد. تفاوت این دو سنجیدنی است.

## 5 تقریب خطی و مقیاس زمانی Delta-t

برای سرعت‌های جریان بسیار کوچک‌تر از سرعت صوت ($v << c$)، تفاضل $t_{up} - t_{down}$ با بسط مرتبهٔ اول برابر است با:

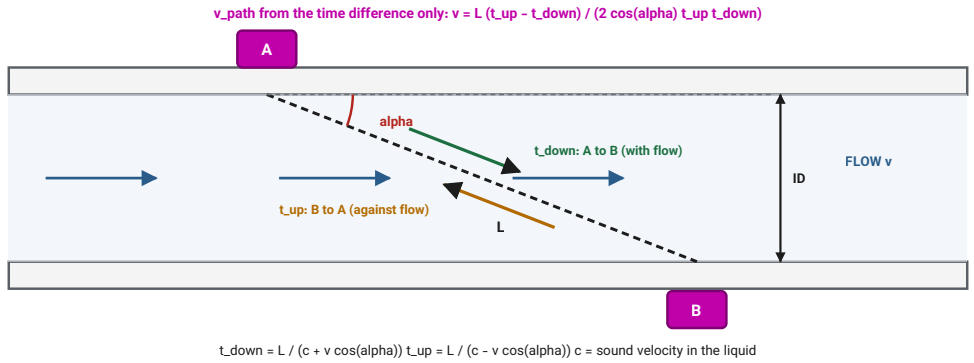
$$\Delta t = t_{up} - t_{down} \approx 2\,L\,v\cos(alpha) \,/\, c^2 \,,\; v \approx c^2\,\Delta t \,/\, (2\,L\cos(alpha)) \quad (5)$$

خطای نسبی این تقریب از مرتبهٔ $(v\cos(alpha)/c)^2$ است. در مثال آب این مقدار در حد کسر ده‌هزارم است و ناچیز است؛ در گاز با 15 m/s و 400 m/s نسبت v/c بزرگ‌تر می‌شود و خطای تقریب 0.07 % به دست می‌آید (بخش ۳۴). نتیجه این است که تقریب خطی برای مایع پذیرفتنی است، ولی در گاز یا با c ناشناخته، باید وارونی دقیق به کار رود.

سرعت مسیر قطری برای $n = 7$ برابر $V_{mean} / K$ با $K = 0.9333$ گرفته شد. اعداد Case A برای لولهٔ مرجع (ID برابر 202.74 mm) با زاویهٔ alpha برابر 67.6 deg و L برابر 219.3 mm در جدول ۲ آمده است. $t_0 = L/c$ حدود 147.9 µs است، یعنی $\Delta t$ در $Q_{normal}$ تنها حدود 105.2 ns است (با سرعت مسیر 1.383 m/s). نسبت $\Delta t / t_0$ از مرتبهٔ $10^{-3}$ می‌شود و همین کوچکی، الزامات زمان‌سنجی را تعیین می‌کند (بخش ۲۲).

**جدول ۲** — زمان‌های عبور و $\Delta t$ در Case A (آب 20 °C، لولهٔ NPS 8)

| نقطه | دبی (m³/h) | $V_{mean}$ (m/s) | $v_{path}$ برای n = 7 (m/s) | $t_{down}$ (µs) | $t_{up}$ (µs) | $t\Delta$ (ns) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Q_{min}$ | 40 | 0.344 | 0.369 | 147.919 | 147.947 | **28.05** |
| $Q_{normal}$ | 150 | 1.291 | 1.383 | 147.881 | 147.986 | **105.20** |
| $Q_{max}$ | 250 | 2.151 | 2.305 | 147.845 | 148.021 | **175.33** |




**شکل ۱** — هندسهٔ مسیر صوتی در روش Transit-Time: $t_{down}$، $t_{up}$، زاویهٔ alpha و طول مسیر L؛ سرعت جریان از اختلاف زمان به‌دست می‌آید

## 6 از سرعت مسیر تا دبی حجمی

فلومتر زمان را در امتداد یک یا چند مسیر می‌سنجد؛ دبی اما انتگرال سرعت روی کل مقطع است. رابطهٔ میان آن‌ها با ضریب K نوشته می‌شود:

$$Q = K \times A \times v_{path} \,,\; K = V_{mean} / v_{path} \tag{6}$$

| | | |
|---|---|---|
| **Q** | دبی حجمی | m³/s |
| **A** | مساحت مقطع جریان از قطر داخلی: $A = (pi / 4) \times ID^2$ | m² |
| **$V_{mean}$** | سرعت متوسط مساحتی؛ برابر Q / A | m/s |
| **$v_{path}$** | سرعت متوسط خطی روی مسیر صوتی (از رابطهٔ دقیق) | m/s |
| **K** | ضریب تبدیل سرعت مسیر به سرعت متوسط (ضریب پروفایل)؛ بدون بُعد | — |

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

این رابطه سه منبع خطا را به‌روشنی جدا می‌کند: خطا در A (قطر داخلی)، خطا در $v_{path}$ (زمان‌سنجی، هندسه، سرعت صوت) و خطا در K (شکل پروفایل). هر بخش بعدی یکی از این سه را بررسی می‌کند. در فلومترهای چندمسیره ضریب K واحد جای خود را به ترکیب وزنی چند $v_{path}$ می‌دهد، ولی ساختار خطا همین سه‌تایی می‌ماند.

## 7 پروفایل سرعت و عدد Reynolds

شکل پروفایل سرعت را رژیم جریان تعیین می‌کند و معیار رژیم عدد Reynolds است:

$$Re = V\ D\ /\ nu \quad (7)$$

| | | |
|---|---|---|
| **Re** | عدد Reynolds؛ بدون بُعد | – |
| **V** | سرعت متوسط مساحتی | m/s |
| **D** | قطر داخلی لوله | m |
| **nu** | لزجت سینماتیکی؛ برای آب در ۲۰ °C حدود $1.004\times10^{-6}$ (ASSUMPTION) | m²/s |

در Case A مقدار Re در سه نقطه برابر 69500، 260600 و 434400 است؛ یعنی جریان در همهٔ نقطه‌ها به‌روشنی آشفته است. حد انتقال رژیم در لوله‌های صنعتی در منابع جریان‌شناسی در حدود چند هزار گزارش می‌شود و ناحیهٔ گذار برای اندازه‌گیری مناسب نیست، چون پروفایل بین دو شکل لایه‌ای و آشفته نوسان می‌کند و ضریب K ثابت نیست ENGINEERING RECOMMENDATION. در گاز، چگالی بزرگ‌تر و لزجت کوچک‌تر باعث می‌شود Re بسیار بزرگ شود و پروفایل تخت‌تر باشد؛ مثال مفهومی بخش ۳۴ مقدار حدود $1.88\times10^{7}$ دارد.

## 8 مدل توانی پروفایل و اشتقاق ضریب K

برای جریان آشفتهٔ تمام‌توسعه‌یافته در لولهٔ صاف، مدل توانی ساده‌ای برای شکل پروفایل به کار می‌رود:

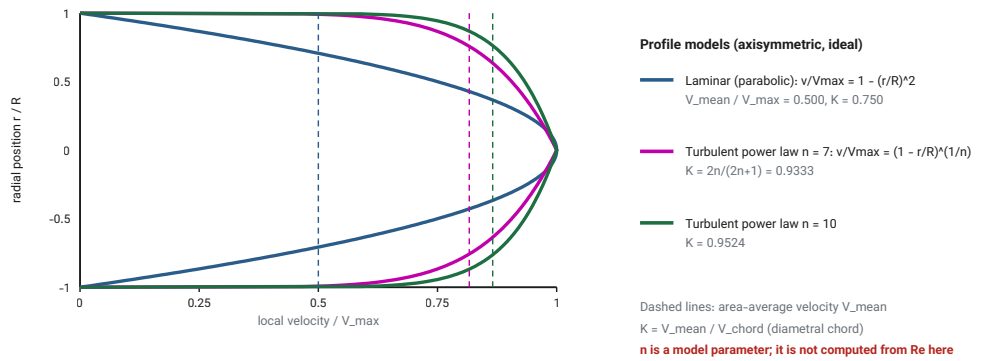
$$v(r) = V_{max} \times (1 - r / R)^{1/n} \quad (8)$$

با انتگرال‌گیری روی مقطع دایره‌ای، سرعت متوسط مساحتی برابر $V_{mean} / V_{max} = 2n^2 / ((n+1)(2n+1))$ است و میانگین خطی روی یک قطر کامل برابر $v_{path} / V_{max} = n / (n+1)$. نسبت این دو، ضریب K را می‌دهد:

$$K = V_{mean} / v_{path} = 2n / (2n + 1) \quad (9)$$

| | | |
|---|---|---|
| **r, R** | شعاع محلی و شعاع داخلی لوله | m |
| **$V_{max}$** | سرعت روی محور لوله | m/s |
| **n** | نمای مدل توانی؛ پارامتر شکل پروفایل (در منابع جریان‌شناسی با افزایش Re بزرگ‌تر گزارش می‌شود؛ مقدار دقیق وابسته به لوله و منبع است REQUIRES VERIFICATION) | – |

برای جریان لایه‌ای پروفایل سهمی $v/V_{max} = 1 - (r/R)^2$ است؛ سرعت متوسط نصف سرعت محور و میانگین خطی روی قطر دو سوم آن است، پس $K = 0.75$. جدول ۳ مقدار K را برای چند نمای n می‌دهد. وقتی n از ۶ به ۱۲ می‌رود، K از 0.9231 به 0.9600 می‌رسد؛ یعنی دامنهٔ تغییر آن در گسترهٔ آشفتهٔ مفید کمتر از چهار درصد است و همین موضوع برای تک‌مسیره قابل‌تحمل ولی برای دقت‌های بالا کافی نیست.




**شکل ۲** — پروفایل‌های لایه‌ای و توانی (n = 7 و n = 10) با سرعت متوسط مساحتی و ضریب K؛ n پارامتر مدل است، نه نتیجهٔ محاسبهٔ Re

## 9 خطای تک‌مسیره و حساسیت به نمای پروفایل

اگر فلومتر تک‌مسیرهٔ قطری ضریب K را از نمای فرضی n = 7 بگیرد و پروفایل واقعی نمای دیگری داشته باشد، خطای دبی برابر K(7) × [n / (n+1)] / [2n² / ((n+1)(2n+1))] - 1 است. اگر ضریب K اصلاً اعمال نشود و فقط $v_{path}$ در A ضرب شود، خطا برای n = 7 برابر 7.14 % + است: سرعت میانگین روی قطر به‌اندازهٔ (2n+1)/(2n) از سرعت متوسط مساحتی بزرگ‌تر است، چون میانگین خطی روی قطر ناحیهٔ پرسرعت مرکز را بیشتر از ناحیهٔ کم‌سرعت کنار دیوار وزن می‌دهد.

**جدول ۳** — ضریب K و خطای تک‌مسیرهٔ قطری برای چند نمای پروفایل

| رژیم | n | $K = V_{mean} / V_{chord}$ | خطای تک‌مسیره بدون K (٪) | خطای تک‌مسیره با K برای n = 7 (٪) |
|---|---|---|---|---|
| Laminar | — | 0.7500 | — | — |
| Turbulent | 6 | 0.9231 | 8.33 | 1.11 |
| Turbulent | 7 | 0.9333 | 7.14 | 0.00 |
| Turbulent | 8 | 0.9412 | 6.25 | -0.83 |
| Turbulent | 10 | 0.9524 | 5.00 | -2.00 |
| Turbulent | 12 | 0.9600 | 4.17 | -2.78 |

جدول نشان می‌دهد وقتی K برای n = 7 تنظیم شده باشد ولی لوله به n = 10 نزدیک‌تر باشد، خطا % 2.00- و برای n = 6 برابر % 1.11+ است. این‌ها مرتبهٔ بزرگی خطای ناشی از «تنظیم ثابت پروفایل» در تک‌مسیره‌اند، نه خطای یک دستگاه مشخص؛ علاوه بر آن، پروفایل واقعی پس از زانو یا شیر محورمتقارن نیست و خطا بزرگ‌تر می‌شود. همین دلیل اصلی است که طراحان برای دقت بالا به چندمسیره می‌روند.

**COMMON MISTAKE — «ضریب پروفایل ثابت است»**

در نظر گرفتن K به‌عنوان ثابت دستگاه، بدون توجه به Re و ناحیهٔ گذار، خطای سیستماتیک ایجاد می‌کند که با تغییر دبی تغییر می‌کند. در دبی کم، Re کوچک‌تر و پروفایل کم‌تخت‌تر است و خطای تک‌مسیره در دبی کم و زیاد هم‌علامت نیست. ENGINEERING RECOMMENDATION

## 10 Multipath: ایدهٔ انتگرال‌گیری مسیرها

فلومتر چندمسیره به‌جای یک ضریب K، چند $v_{path}$ در موقعیت‌های مختلف مقطع می‌سنجد و دبی را از ترکیب وزنی آن‌ها به‌دست می‌آورد؛ یعنی انتگرال سرعت را به‌صورت عددی تقریب می‌زند. سه تصمیم طراحی در این کار وجود دارد: موقعیت مسیرها، وزن هر مسیر، و جهت مسیرها نسبت به هم. اگر پروفایل محورمتقارن و مسیرها در یک صفحه موازی باشند، مسئله به انتگرال یک‌بعدی با وزن هندسی تبدیل می‌شود: طول هر وتر در مقطع دایره $2R\sqrt{(1 - y^2/R^2)}$ است و وزن‌ها باید این هندسه را در بر بگیرند.

برای مسیرهای ضربدری (X) یا مسیرهای غیرهم‌صفحه، چرخش جریان (Swirl) و جریان عرضی می‌توانند اثر متقارن بگذارند؛ آرایش آینه‌ای مسیرها می‌تواند بخشی از این اثر را حذف کند (بخش ۱۳). موقعیت و وزن واقعی مسیرها در هر مدل تجاری MANUFACTURER-SPECIFIC DATA است و این سند هیچ یک را ادعا نمی‌کند؛ به‌جای آن، یک طرح انتگرال‌گیری ریاضی معتبر را به‌عنوان مرجع مدل‌سازی به کار می‌برد.

## 11 طرح انتگرال‌گیری Gauss-Chebyshev برای مسیرهای موازی

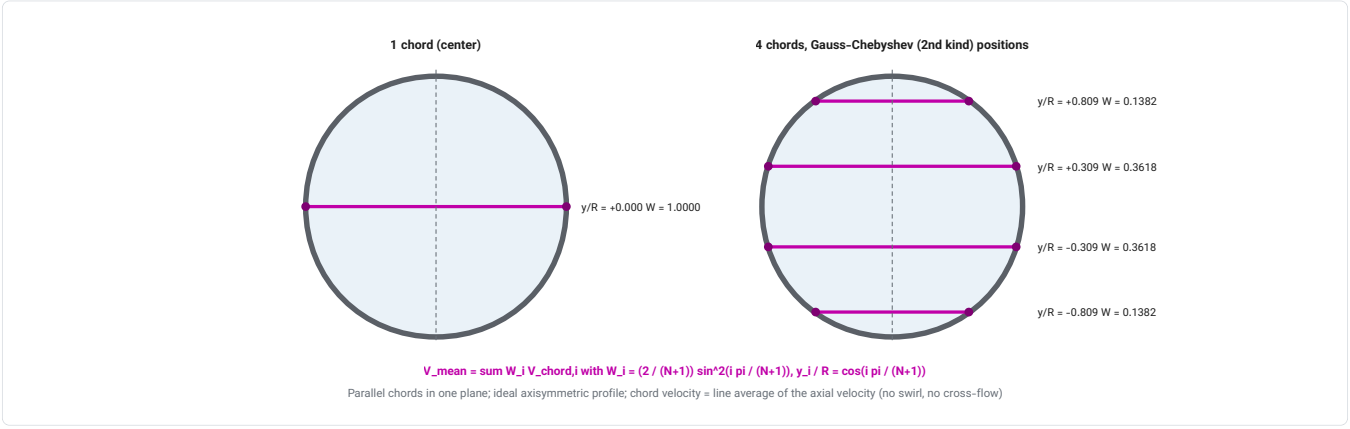
فرض کنید N وتر موازی در یک صفحه، در فاصله‌های بی‌بعد $y_i = Y_i / R$ از مرکز مقطع قرار دارند و سرعت اندازه‌گیری‌شدهٔ هر وتر میانگین خطی سرعت محوری روی آن وتر است ($V_i$). دبی انتگرال سرعت روی مقطع است. چون طول وتر در فاصلهٔ y برابر $2R\sqrt{(1 - y^2)}$ است، می‌توان نوشت $Q = 2\,R^2 \int V(y)\,\sqrt{(1 - y^2)}\,dy$ روی بازهٔ -1 تا +1 ، و سرعت متوسط مساحتی برابر $V_{mean} = (2/\pi) \int V(y)\,\sqrt{(1 - y^2)}\,dy$ می‌شود. وزن $\sqrt{(1 - y^2)}$ درست وزن Chebyshev نوع دوم است و برای آن، قاعدهٔ انتگرال‌گیری گاوسی با N نقطه تا چندجمله‌ای‌های درجهٔ 2N - 1 دقیق است. موقعیت و وزن‌های بی‌بعد (جمع وزن‌ها برابر یک) عبارت‌اند از:

$$V_{mean} \approx \sum_{i=1..N} W_i \times V_i \tag{10}$$

$$y_i = \cos(i\,\pi / (N + 1)) \,,\; W_i = (2 / (N + 1)) \times \sin^2(i\,\pi / (N + 1)) \tag{11}$$

| | | |
|---|---|---|
| **N** | تعداد وترهای موازی | — |
| **$V_i$** | سرعت متوسط خطی روی وتر i (از رابطهٔ دقیق Transit-Time) | m/s |
| **$y_i$** | فاصلهٔ بی‌بعد وتر i از مرکز؛ y / R | — |
| **$W_i$** | وزن بی‌بعد وتر i؛ $\sum W_i = 1$ (در کد راستی‌آزمایی شده است) | — |

برای N = 4 موقعیت‌ها y/R = ±0.809 و ±0.309 با وزن‌های 0.1382 و 0.3618 است (شکل ۳). این یک طرح ریاضی مرجع برای مدل‌سازی است. طرح‌های دیگر مانند Gauss-Jacobi در ادبیات فلومتری چندمسیره گزارش شده‌اند و موقعیت و وزن واقعی هر مدل تجاری MANUFACTURER-SPECIFIC DATA است REQUIRES VERIFICATION.




**شکل ۳** — وترهای موازی برای یک و چهار مسیر در طرح Gauss-Chebyshev نوع دوم؛ موقعیت و وزن از رابطهٔ ۱۱ محاسبه شده است

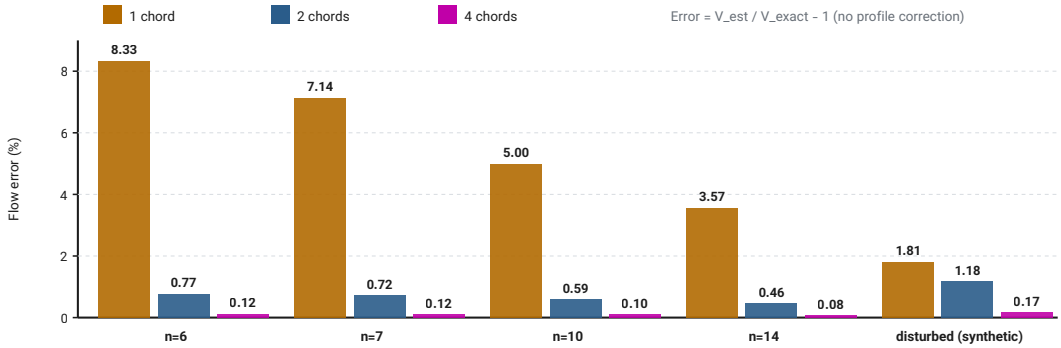
## 12 نتایج عددی انتگرال‌گیری و رفتار همگرایی

برای هر پروفایل، سرعت متوسط دقیق از انتگرال مساحتی و میانگین هر وتر از انتگرال خطی عددی (scipy.integrate.quad) محاسبه شد و برآورد طرح N وتری با مقدار دقیق مقایسه شد. جدول ۴ خطای نسبی را بدون هیچ ضریب اصلاح پروفایل نشان می‌دهد. تک‌وتر مرکزی (N = 1) برای n = 7 خطای 7.14 % + دارد که دقیقاً با مقدار تحلیلی بخش ۹ می‌خواند؛ دو وتر آن را به 0.72 % و چهار وتر به 0.12 % می‌رساند.

**جدول ۴** — خطای انتگرال‌گیری Gauss-Chebyshev نوع دوم نسبت به سرعت متوسط دقیق (٪) بدون ضریب پروفایل

| پروفایل | N = 1 | N = 2 | N = 3 | N = 4 | N = 5 | N = 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n=6 | 8.33 | 0.77 | 0.66 | 0.12 | 0.17 | 0.04 |
| n=7 | 7.14 | 0.72 | 0.58 | 0.12 | 0.15 | 0.04 |
| n=8 | 6.25 | 0.67 | 0.52 | 0.11 | 0.14 | 0.04 |
| n=10 | 5.00 | 0.59 | 0.43 | 0.10 | 0.12 | 0.03 |
| n=14 | 3.57 | 0.46 | 0.32 | 0.08 | 0.09 | 0.03 |
| **پروفایل آشفتهٔ ساختگی** | 1.81 | 1.18 | 0.64 | 0.17 | 0.16 | 0.05 |

دو مشاهده در جدول حاصل نمی‌شود که نادیده گرفته شود. نخست، همگرایی یکنواخت نیست: برای n = 7 خطای N = 5 برابر 0.15 % است و از N = 4 بیشتر است. دلیل این است که مدل توانی در دیواره مشتق بی‌نهایت دارد و حل ریاضی گاوسی برای توابع هموار تضمین همگرایی سریع می‌دهد، نه برای این رفتار نزدیک دیواره؛ بنابراین افزودن مسیر به‌تنهایی خطا را همیشه کم نمی‌کند. دوم، پروفایل آشفتهٔ ساختگی (beta = 0.15، یعنی ناحیهٔ مرکز تخت‌تر و ناحیهٔ کنار دیوار پرسرعت‌تر) برای تک‌وتر فقط 1.81 % خطا می‌دهد، ولی نه به‌دلیل دقت، بلکه به‌خاطر جبران تصادفی دو اثر؛ برای N = 2 خطا 1.18 % و برای N = 4 برابر 0.17 % است. نتیجه: خطای تک‌مسیره را نباید از یک پروفایل خاص تعمیم داد.




**شکل ۴** — خطای انتگرال‌گیری برای یک، دو و چهار وتر در چند پروفایل؛ خطا نسبت به انتگرال دقیق مساحتی و بدون ضریب پروفایل است

**CAUTION — مرز اعتبار جدول ۴**

این خطاها فقط خطای انتگرال‌گیری مدل ایده‌آل‌اند: وترهای مستقیم در یک صفحه، پروفایل محورمتقارن، سرعت محوری و بدون خطای زمان‌سنجی. خطای دستگاه واقعی از ترکیب آن با خطای هندسه، زمان، پروفایل غیرمتقارن و کالیبراسیون ساخته می‌شود و فقط با آزمون یا دادهٔ سازنده قابل تأیید است. REQUIRES VERIFICATION

## 13 اعوجاج پروفایل، Swirl و جریان عرضی

پروفایل پس از زانو، Tee، شیر نیمه‌باز یا پمپ، محورمتقارن نیست و ممکن است Swirl یا جریان عرضی داشته باشد. دو دستهٔ اثر را باید جدا کرد. اثر نخست، اعوجاج محوری است: اگر اغتشاش یک تابع فرد از موقعیت باشد (مثلاً $v \times (1 + a\ y/R)$)، با مسیرهای آینه‌ای و وزن‌های برابر مجموع آن صفر می‌شود، چون انتگرال تابع فرد روی بازهٔ متقارن صفر است. اگر اغتشاش زوج باشد (تخت یا توخالی شدن پروفایل)، مجموع صفر نمی‌شود و فقط با N کافی یا اصلاح می‌توان آن را کم کرد؛ نمونهٔ ساختگی جدول ۴ همین حالت است.

اثر دوم، جریان عرضی است. وقتی مسیر صوتی با محور زاویهٔ alpha دارد، مؤلفهٔ سرعت عرضی هم روی مسیر تصویر می‌شود. اگر چرخش به‌صورت جسم صلب با سرعت مماسی $s \times V_{mean} \times (r/R)$ در نظر گرفته شود، برای وتر در فاصلهٔ y/R از مرکز، سرعت عرضی روی وتر ثابت است و خطای سرعت محوری برآوردشده تقریباً برابر است با:

$$e_{swirl} \approx - s \times (y / R) \times \tan(alpha)\ [\text{relative, to } V_{mean}] \quad (12)$$

| | | |
|---|---|---|
| $e_{swirl}$ | خطای نسبی سرعت محوری برآوردشده در اثر جریان عرضی (برای یک وتر منفرد) | — |
| s | شدت چرخش: نسبت سرعت مماسی در دیواره به سرعت متوسط (ASSUMPTION) | — |
| y / R | فاصلهٔ بی‌بعد وتر از مرکز | — |
| alpha | زاویهٔ مسیر با محور لوله | deg |

**جدول ۵** — خطای تک‌وتر ناشی از Swirl صلب‌گونه برای وتر خارج از مرکز

| زاویهٔ مسیر با محور (deg) | شدت Swirl (s) | y/R = 0.3 (%) | y/R = 0.5 (%) | y/R = 0.7 (%) |
|---|---|---|---|---|
| **45** | 0.02 | -0.60 | -1.00 | -1.40 |
| **45** | 0.05 | -1.50 | -2.50 | -3.50 |
| **45** | 0.10 | -3.00 | -5.00 | -7.00 |
| **60** | 0.02 | -1.04 | -1.73 | -2.42 |
| **60** | 0.05 | -2.60 | -4.33 | -6.06 |
| **60** | 0.10 | -5.20 | -8.66 | -12.12 |

برای زاویهٔ 45 deg، s = 0.05 و وتر در y/R = 0.5 خطا % 2.50- می‌شود؛ برای 60 deg مقدار % 4.33- است. وترهای قرینه نسبت به محور علامت مخالف دارند و در جمع وزنی هم‌دیگر را حذف می‌کنند؛ این همان دلیل استفاده از آرایش آینه‌ای یا ضربدری است. وترِ عبوری از مرکز (y = 0) در این مدل به Swirl صلب‌گونه حساس نیست. نتیجه فقط برای مدل صلب‌گونه است و پروفایل چرخش واقعی پس از اجزای لوله‌کشی ممکن است شکل دیگری داشته باشد REQUIRES VERIFICATION.

## 14 طول مستقیم لوله و نقش CFD

طول مستقیم لوله (Straight Run) بالادست و پایین‌دست برای آن است که پروفایل پیش از رسیدن به مسیرهای صوتی به شکل نزدیک به تمام‌توسعه‌یافته برگردد. این سند هیچ عدد طول مستقیمی نمی‌دهد؛ مقدار لازم برای هر مدل و هر نوع اغتشاش باید از متن استاندارد مربوط یا برگهٔ سازنده گرفته شود MANUFACTURER-SPECIFIC DATA REQUIRES VERIFICATION. آنچه در سطح ۳ می‌توان کرد، سنجش «حساسیت طراحی» است: اگر طول موجود از توصیهٔ سازنده کمتر شد، خطای جابه‌جایی پروفایل چقدر می‌تواند باشد؟ پاسخ از ترکیب نتایج این سند با دادهٔ سازنده یا شبیه‌سازی به‌دست می‌آید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌تواند میدان سرعت پس از یک چینش لوله‌کشی را تخمین بزند و همان میدان را با همان طرح انتگرال‌گیری از بخش ۱۱ به خطای دبی تبدیل کند. محدودیت‌های آن باید ثبت شود: وابستگی نتیجه به مدل آشفتگی و شبکه، نیاز به اعتبارسنجی با داده، و ناتوانی در جایگزینی کالیبراسیون یا آزمون در محل. در تصمیم‌گیری، CFD ابزار رتبه‌بندی گزینه‌های چینش است، نه گواه پذیرش دقت ENGINEERING RECOMMENDATION.

## 15 دقت قطر داخلی: توان ۲ تا ۳ در دبی

دبی با مساحت متناسب است، پس خطای قطر داخلی (ID) اثر دومین‌توان دارد: $Q \sim ID^2$. اما در فلومتر Clamp-on خود سرعت اندازه‌گیری‌شده هم می‌تواند به قطر وابسته باشد. وقتی الگوریتم طول مسیر را از ID ورودی و زاویهٔ Snell بسازد، رابطهٔ دقیق سرعت $v \sim L / \cos(alpha)$ خود با ID متناسب است: اگر قطر واقعی بزرگ‌تر باشد، $\Delta t$ فیزیکی هم بزرگ‌تر می‌شود $(\Delta t \sim ID)$ و $t_{up}\, t_{down} \sim ID^2$، پس نسبت $\Delta t / (t_{up}\, t_{down})$ با $1/ID$ تغییر می‌کند و ضرب آن در $L \sim ID_{set}$ ورودی نتیجه می‌دهد $v_{meter} / v_{true} = ID_{set} / ID_{true}$. با ضرب در مساحت، توان کل ۳ می‌شود:

$$Q_{meter} / Q_{true} = (ID_{set} / ID_{true})^{m} \text{ , } m = 2 \text{ (area only) to } m = 3 \text{ (geometry-coupled)} \quad (13)$$

| | | |
|---|---|---|
| $ID_{set}$ | قطر داخلی واردشده در دستگاه | mm |
| $ID_{true}$ | قطر داخلی واقعی در محل نصب | mm |
| m | توان حساسیت؛ بین دو حد، بسته به نحوهٔ استخراج هندسه در الگوریتم سازنده | – |

بنابراین دو مدل حدی وجود دارد و توان واقعی هر مدل تجاری MANUFACTURER-SPECIFIC DATA است REQUIRES VERIFICATION . تا زمان تأیید، در بودجهٔ عدم‌قطعیت حد بالا (توان ۳) به‌عنوان رویهٔ محافظه‌کارانه به کار می‌رود ENGINEERING RECOMMENDATION. جدول ۶ هر دو حد را برای خطای قطر در Case A نشان می‌دهد: خطای 1+ mm در ID در حد مساحتی 0.99 %+ و در حد جفت‌شده 1.49 %+ است.

**جدول ۶** — خطای دبی در برابر خطای قطر داخلی (Case A، ID = 202.74 mm)

| خطای قطر داخلی (mm) | فقط مساحت، توان ۲ (٪) | هندسهٔ جفت‌شده، توان ۳ (٪) |
|---|---|---|
| **-2.0** | -1.96 | -2.93 |
| **-1.0** | -0.98 | -1.47 |
| **-0.5** | -0.49 | -0.74 |
| **+0.5** | 0.49 | 0.74 |
| **+1.0** | 0.99 | 1.49 |
| **+2.0** | 1.98 | 2.99 |

قطر داخلی از OD - 2t به‌دست می‌آید. اگر OD با نوار محیطی با عدم‌قطعیت استاندارد 0.30 mm و ضخامت با ضخامت‌سنج التراسونیک با 0.15 mm تعیین شود (هر دو ASSUMPTION)، عدم‌قطعیت قطر داخلی از ترکیب مربعی $u_{ID} = \sqrt{(u_{OD}^2 + (2\,u_t)^2)} = 0.42$ mm به‌دست می‌آید؛ یعنی 0.21 % نسبی. اثر آن در دبی 0.42 % (توان ۲) تا 0.63 % (توان ۳) است. دقت می‌شود که ضخامت دو بار در قطر وارد می‌شود، پس خطای ضخامت‌سنجی وزن دو برابر دارد.

## 16 ضخامت دیواره، جنس لوله و لاینر

ضخامت اشتباه به دو راه خطا می‌دهد: مستقیم از ID = OD - 2t، و غیرمستقیم از هندسهٔ مسیر (S و زمان‌های ثابت گوه و دیواره). مورد B (بخش ۳۲) نشان می‌دهد وقتی ضخامت اسمی 6.35 mm به‌جای ضخامت واقعی 8.18 mm وارد شود، ID برابر 206.40 mm می‌شود و خطای دبی بین 3.64 %+ (مساحتی) و 5.51 %+ (جفت‌شده) است. این مرتبه برای یک اشتباه «یک شمارهٔ Schedule» کوچک نیست.

خوردگی و رسوب، قطر مؤثر را کم می‌کنند؛ لاینر (سیمانی، PTFE، لاستیکی) نیز ضخامت دیگری در مسیر می‌افزاید که سرعت صوت آن با فولاد فرق دارد. از آنجا که قانون Snell در لایه‌های موازی ثابت sin(theta)/c را حفظ می‌کند، سرعت صوت لاینر یا دیواره زاویهٔ شکست در سیال را تغییر نمی‌دهد؛ فقط جابه‌جایی جانبی مسیر (فاصلهٔ بهینهٔ ترانسدیوسرها)، تضعیف و دامنهٔ

سیگنال را تغییر می‌دهد. نتیجهٔ عملی: خطای سرعت صوت دیواره اثر مستقیم کوچکی بر زاویه دارد ولی می‌تواند فاصلهٔ بهینه را جابه‌جا کند و دامنه را بیندازد (بخش ۱۸ و ۲۱). اما نادیده گرفتن ضخامت لاینر قطر داخلی را بزرگ‌تر از واقعیت وارد می‌کند و مستقیماً در رابطهٔ ۱۳ وارد می‌شود.

دیواره‌های چدنی، فولاد ضدزنگ جوشی یا لوله‌های پلاستیکی پرتضعیف رفتار صوتی متفاوتی دارند: ناهمسانگردی جوش، ساختار دانه‌ای و تضعیف بالا. مقدار سرعت و تضعیف مواد از برگهٔ ماده یا اندازه‌گیری گرفته می‌شود REQUIRES VERIFICATION.

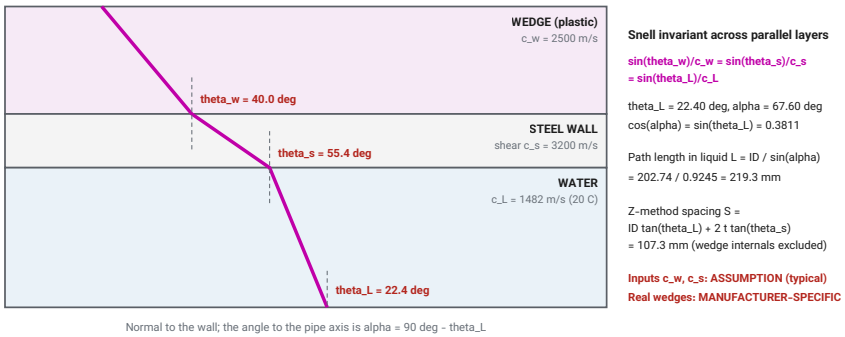
## 17 قانون Snell و مسیر صوتی در لایه‌های موازی

مسیر صوت از گوه (پلاستیک) به دیوارهٔ فولادی و سپس مایع می‌رسد. در مرز دو لایهٔ موازی نسبت سینوس زاویه به سرعت موج ثابت می‌ماند:

$$\sin(\theta_w) / c_w = \sin(\theta_s) / c_s = \sin(\theta_L) / c_L \quad (14)$$

| | | |
|---|---|---|
| $\theta_w$, $c_w$ | زاویه (از عمود بر دیواره) و سرعت صوت در گوه | deg, m/s |
| $\theta_s$, $c_s$ | زاویه و سرعت موج مورد استفاده در دیوارهٔ فولادی (برشی در این مدل) | deg, m/s |
| $\theta_L$, $c_L$ | زاویه و سرعت صوت در مایع | deg, m/s |

با ورودی‌های مرجع ($c_w$ = 2500 m/s، $\theta_w$ = 40°، $c_s$ = 3200 m/s) زاویه در دیواره 55.4 deg و در آب 22.4 deg می‌شود؛ زاویهٔ مسیر با محور $\alpha = 90° - \theta_L$ = 67.6 deg و $\cos(\alpha) = \sin(\theta_L)$ = 0.3811 است. اگر موج طولی فولاد با سرعت حدود 5900 m/s در نظر گرفته شود، $\sin 40° (5900/2500)$ از یک بیشتر است؛ یعنی در این زاویهٔ گوه موج طولی بالک در دیواره منتقل نمی‌شود و فقط موج برشی می‌ماند (ASSUMPTION ؛ سرعت‌ها REQUIRES VERIFICATION). این استدلال توضیح می‌دهد چرا زاویهٔ گوه در فلومتر Clamp-on معمولاً بالاتر از زاویهٔ بحرانی اول انتخاب می‌شود.




**شکل ۵** — شکست مسیر صوتی از گوه به دیوارهٔ فولادی و آب؛ sin(theta)/c در لایه‌های موازی ثابت می‌ماند و زاویهٔ سیال فقط به $c_L$ و گوه بستگی دارد

## 18 مدل فاصلهٔ Transducer و حساسیت هندسی

فاصلهٔ محوری بین دو ترانسدیوسر در روش Z از مجموع جابه‌جایی در مایع و دو عبور از دیواره ساخته می‌شود:

$$S_Z = ID\,\tan(\theta_L) + 2\,t\,\tan(\theta_s)\ ,\ S_V = 2\,ID\,\tan(\theta_L) + 4\,t\,\tan(\theta_s) \quad (15)$$

| | | |
|---|---|---|
| $S_Z$, $S_V$ | فاصلهٔ محوری در روش Z و V (بدون سهم داخل گوه) | mm |
| ID, t | قطر داخلی و ضخامت دیواره | mm |

برای Case A مقدار $S_Z$ = 107.3 mm و $S_V$ = 214.5 mm است. گوه خود جابه‌جایی داخلی ثابت دارد که از مرجع هندسی ترانسدیوسر تا نقطهٔ ورود در سطح لوله فرق می‌کند؛ بنابراین عدد قابل‌استفاده در محل، مقدار دستگاه است و رابطهٔ بالا فقط ساختار و حساسیت را نشان می‌دهد MANUFACTURER-SPECIFIC DATA. حساسیت‌ها: $dS/dID = \tan(\theta_L)$ = 0.4123 و $dS/dt = 2\tan(\theta_s)$ = 2.895، یعنی ضخامت چند برابر قطر روی فاصله اثر می‌گذارد. اگر سرعت برشی دیواره 3+ % بیشتر از فرض باشد، $S_Z$ حدود 2.4 mm تغییر می‌کند؛ این مقدار از ابعاد ناحیهٔ گیرندهٔ یک ترانسدیوسر معمولی کوچک‌تر نیست و می‌تواند دامنه را کم کند، ولی اثر مستقیمش بر سرعت فقط از مسیر الگوریتم است REQUIRES VERIFICATION.

## 19 دما، سرعت صوت و زاویهٔ مسیر

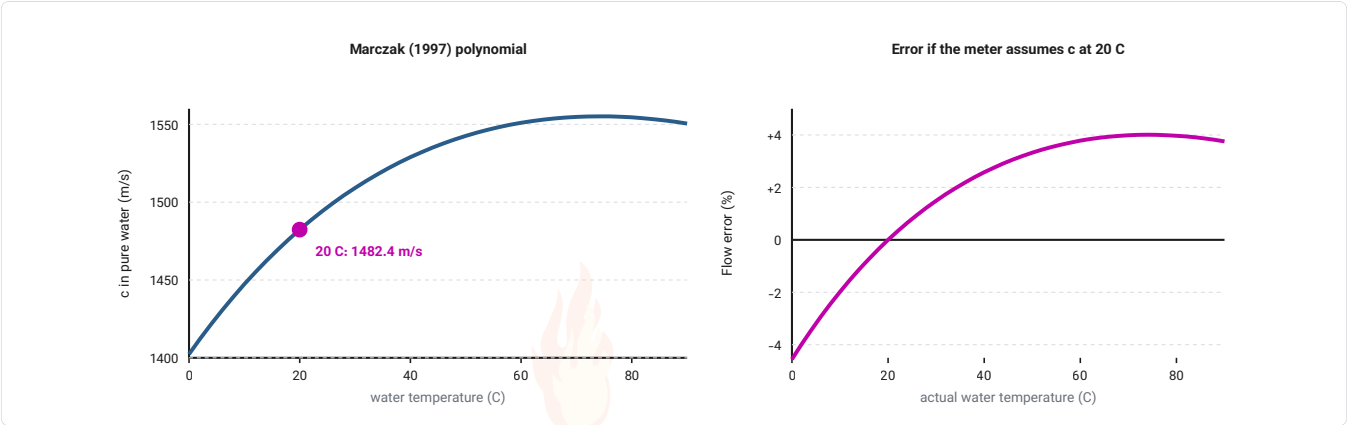
سرعت صوت در آب خالص با دما از چندجمله‌ای Marczak (۱۹۹۷) به‌دست می‌آید (دما به °C و سرعت به m/s):

$$c(T) = 1402.385 + 5.038813\,T - 5.799136\times10^{-2}\,T^2 + 3.287156\times10^{-4}\,T^3 - 1.398845\times10^{-6}\,T^4 + 2.787860\times10^{-9}\,T^5 \quad (16)$$

در 20 °C این رابطه 1482.4 m/s می‌دهد و شیب آن 3.07 m/s/K است؛ یعنی یک درصد اختلاف در c معادل حدود 4.8 K تغییر دماست. اگر الگوریتم زاویهٔ Snell را با c ثابت 20 °C بسازد ولی آب در دمای دیگری باشد، نسبت سرعت اندازه‌گیری‌شده به سرعت واقعی برابر $\sin(2\,\theta_{true}) / \sin(2\,\theta_{assumed})$ است، چون سرعت از رابطهٔ دقیق به $1/\sin(2\,\alpha)$ وابسته است. جدول ۷ برای آب 60 °C خطای 3.78 %+ می‌دهد. دستگاه‌های مبتنی بر اندازه‌گیری c یا جبران دما این خطا را کم می‌کنند؛ روش دقیق هر مدل MANUFACTURER-SPECIFIC DATA است. دمای گوه نیز $c_W$ را تغییر می‌دهد و در این مدل لحاظ نشده است.

**جدول ۷** — سرعت صوت و خطای دبی اگر c در 20 °C ثابت فرض شود (Case A، آب خالص)

| دمای آب (°C) | c (m/s) | اختلاف با ۲۰ °C (٪) | زاویهٔ شکست $theta_L$ (deg) | خطای دبی اگر c در ۲۰ °C فرض شود (٪) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 1426.2 | -3.79 | 21.51 | **-3.19** |
| **20** | 1482.4 | 0.00 | 22.40 | **0.00** |
| **40** | 1528.9 | 3.14 | 23.15 | **2.58** |
| **60** | 1551.0 | 4.63 | 23.50 | **3.78** |
| **80** | 1554.5 | 4.86 | 23.56 | **3.97** |




**شکل ۶** — سرعت صوت در آب خالص بر حسب دما (چندجمله‌ای Marczak) و خطای دبی در صورت ثابت‌گرفتن c در 20 °C

## 20 Sound Velocity به‌عنوان تشخیص راستی‌آزمایی

بسیاری از دستگاه‌ها c را از مجموع زمان‌های عبور حساب می‌کنند: $c \approx 2L / (t_{up} + t_{down})$. این مقدار با هندسهٔ ورودی متناسب است؛ پس خطای ID مستقیماً در c اندازه‌گیری‌شده ظاهر می‌شود: هر 1 mm خطا در ID تقریباً 0.49 % خطا در c و معادل حدود 2.4 K اختلاف دمای ظاهری ایجاد می‌کند. بنابراین مقایسهٔ c اندازه‌گیری‌شده با مقدار مورد انتظار (از دما و ترکیب سیال) یک آزمون حساس هندسه است. ENGINEERING RECOMMENDATION

روش پیشنهادی: دمای فرآیند با حسگر مستقل بخوانید، $c_{expected}$ را از جدول یا رابطهٔ سیال حساب کنید، $c_{meas}$ را از دستگاه بگیرید و اختلاف را با آستانهٔ مستند مقایسه کنید. اختلاف بزرگ‌تر از آستانه چند علت دارد: خطای ID یا ضخامت، دمای اشتباه، سیال با ترکیب متفاوت، گاز یا حباب در مسیر، یا تأخیر ثابت گوه که درست وارد نشده است. چون چند علت با یک نشانه ظاهر می‌شوند، آزمون نیاز به تفکیک دارد و فقط یک شاخص است، نه تأیید دقت. آستانهٔ پذیرش مقدار عددی ندارد مگر از بودجهٔ عدم‌قطعیت پروژه گرفته شود.

## 21 تضعیف، SNR و بودجهٔ سیگنال

برای فلومتر مایع، جذب کلاسیک آب در 1 MHz روی مسیر حدود 219.3 mm ناچیز است (در حد 0.0005 dB)، با ضریب فرضی $2.17\times10^{-3}$ dB/(m·MHz²) (ASSUMPTION). تلفات اصلی در مرزها (گوه به فولاد، فولاد به آب و برگشت)، گسترش پرتو، جذب و پراکندگی توسط حباب و ذرات، و ضخامت لایهٔ رسوب یا لاینر است. جدول ۸ یک بودجهٔ سیگنال نمونه می‌سازد؛ همهٔ عددها فرضی‌اند و فقط روش را نشان می‌دهند.

**جدول ۸** — بودجهٔ سیگنال نمونه برای مسیر Clamp-on (مقادیر ASSUMPTION)

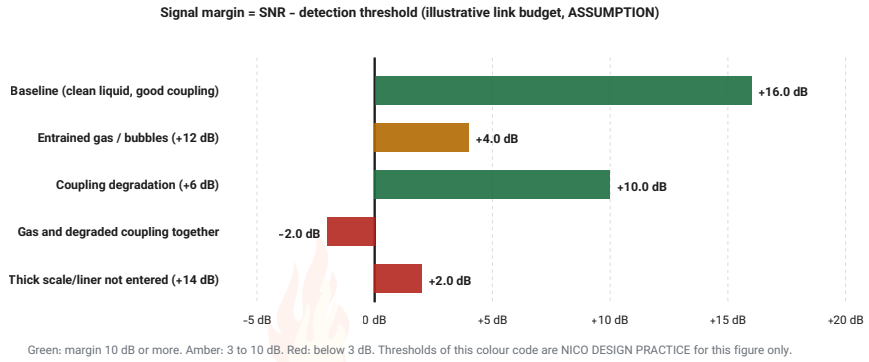
| عنصر مسیر سیگنال | تلفات یا مقدار (dB) |
|---|---|
| Tx electrical to acoustic, wedge | -6.00 |
| Wedge to steel wall (interface) | -10.00 |
| Steel wall to water (interface) | -8.00 |
| Beam spread and path | -6.00 |
| Water absorption (1 MHz) | -0.00 |
| Water to steel wall (interface) | -8.00 |
| Steel wall to wedge (interface) | -10.00 |
| Receive wedge to electrical | -6.00 |
| **جمع تلفات** | **-54.0** |
| **بهرهٔ مرجع الکترونیک نسبت به نویز** (ASSUMPTION) | 90.0 |
| SNR **پایه** | **36.0** |
| **آستانهٔ تشخیص** (ASSUMPTION) | 20.0 |

SNR پایه 36.0 dB و حاشیه نسبت به آستانهٔ 20 dB برابر 16.0 dB است. سناریوهای جدول ۹ نشان می‌دهند چند مورد تلفات اضافی می‌تواند حاشیه را به زیر حد برساند؛ با ورود هم‌زمان گاز و افت Coupling حاشیه منفی می‌شود و دستگاه سیگنال را از دست می‌دهد. این همان رفتاری است که در میدان به‌صورت «نشان‌دادن صفر یا نوسان» دیده می‌شود.

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

**جدول ۹** — حاشیهٔ سیگنال در سناریوهای تلفات اضافی (فرضی)

| سناریو | SNR (dB) | حاشیه (dB) | ارزیابی (قاعدهٔ این شکل) |
|---|---|---|---|
| **مبنا: مایع تمیز و Coupling خوب** | 36.0 | **16.0** | کافی |
| **گاز یا حباب معلق (12 dB تلفات)** | 24.0 | **4.0** | کم |
| **افت Coupling (6 dB تلفات)** | 30.0 | **10.0** | کافی |
| **گاز و افت Coupling با هم** | 18.0 | **-2.0** | ناکافی |
| **رسوب یا لاینر ضخیم ثبت‌نشده (14 dB تلفات)** | 22.0 | **2.0** | ناکافی |




**شکل ۷** — حاشیهٔ سیگنال در پنج سناریو؛ رنگ‌ها فقط قاعدهٔ همین شکل را نشان می‌دهند و آستانهٔ هیچ مدل تجاری نیستند

## 22 وضوح Delta-t، صفر جریان و پایهٔ زمانی

چون Δt از مرتبهٔ ده تا صد نانوثانیه است، خطای زمانی کوچک به خطای دبی بزرگ تبدیل می‌شود. اگر Δt دارای انحراف ثابت delta باشد، سرعت ظاهری در جریان صفر برابر است با

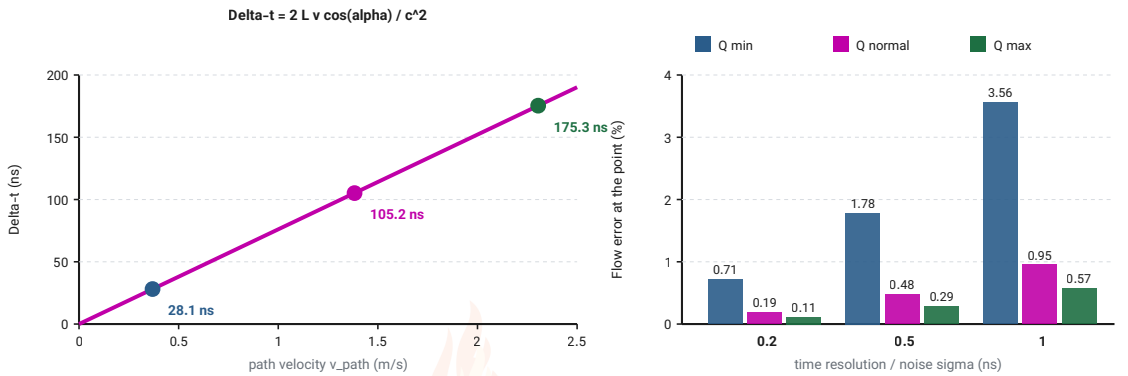
$$v_{offset} = c^2 \times delta / (2\,L\cos(alpha)) \quad (17)$$

| | | |
|---|---|---|
| $v_{offset}$ | سرعت ظاهری ناشی از انحراف صفر | m/s |
| **delta** | انحراف زمانی ثابت (خطای صفر، اختلاف تأخیر مسیر بالا و پایین) | s |

برای Case A هر 1 ns انحراف برابر 13.1 mm/s سرعت ظاهری است. در $Q_{min}$ (سرعت مسیر 0.369 m/s) همین یک نانوثانیه 3.56 % خطا می‌دهد و در $Q_{normal}$ تنها 0.95 %. برای رسیدن به 1 % در $Q_{min}$ کل خطای زمانی باید زیر حدود 0.28 ns بماند. این استدلال نشان می‌دهد چرا Turndown واقعی یک فلومتر به پایداری صفر وابسته است و چرا آزمون صفر جریان با خط واقعاً بسته‌شده بخش جداناپذیر راه‌اندازی است.

**جدول ۱۰** — خطای نسبی دبی ناشی از خطای Delta-t در سه نقطهٔ کاری (Case A)

| sigma یا خطای Delta-t (ns) | در $Q_{min}$ (٪) | در $Q_{normal}$ (٪) | در $Q_{max}$ (٪) |
|---|---|---|---|
| **0.2** | 0.71 | 0.19 | 0.11 |
| **0.5** | 1.78 | 0.48 | 0.29 |
| **1** | 3.56 | 0.95 | 0.57 |
| **سرعت معادل ۱ ns (mm/s)** | | | 13.1 |




**شکل ۸** — رابطهٔ خطی Δt با سرعت و خطای دبی ناشی از خطای زمانی در $Q_{min}$، $Q_{normal}$ و $Q_{max}$

## 23 Cross-Correlation و برآورد تأخیر زمانی

فلومترها تأخیر زمانی بین سیگنال فرستاده و دریافتی، یا بین دو جهت، را معمولاً با همبستگی متقابل برآورد می‌کنند: تأخیر برآوردشده نقطهٔ بیشینهٔ تابع همبستگی است.

$$R_{xy}(tau) = (1/T) \int x(t)\, y(t + tau)\, dt \,,\; tau_hat = \arg\max R_{xy}(tau) \quad (18)$$

| | | |
|---|---|---|
| **x(t), y(t)** | دو سیگنال مقایسه‌شده (مثلاً پالس دریافتی در دو جهت) | V |
| **tau** | تأخیر آزمون | s |
| **tau_hat** | تأخیر برآوردشده | s |

نمونه‌برداری گسسته تفکیک اولیه را به یک دوره نمونه‌برداری محدود می‌کند؛ درون‌یابی (مثلاً سهمی‌گون یا سینک) قله را زیر دوره نمونه‌برداری برآورد می‌کند و کیفیت آن به SNR، پهنای باند پالس و تغییر شکل پالس بین دو جهت وابسته است. میانگین‌گیری N برآورد مستقل نویز تصادفی را حدود √N کاهش می‌دهد، ولی انحراف ثابت صفر را کم نمی‌کند. چون Δt مرتبهٔ صد نانوثانیه و دورهٔ پالس 1 MHz برابر 1000 ns است، اختلاف بین دو جهت از یک دوره کمتر است و ابهام چرخه برای تفاضل بالا و پایین پیش نمی‌آید؛ ابهام در انتخاب چرخهٔ صحیح زمان مطلق عبور مطرح است و با پوشش پالس و حذف تأخیر ثابت حل می‌شود. جزئیات الگوریتم هر مدل MANUFACTURER-SPECIFIC DATA است.

## 24 اشتقاق Doppler و حدود کاربرد

در روش Doppler بازتابنده‌های همراه سیال (ذره یا حباب) موج را بازتاب می‌دهند و بسامد بازتاب با حرکت بازتابنده جابه‌جا می‌شود. برای فرستندهٔ ثابت و بازتابنده‌ای با مؤلفهٔ سرعت v cos(alpha) در راستای مسیر، جابه‌جایی بسامد دوگانه (رفت و برگشت) و برای v << c برابر است با

$$f_D = 2\, f_0\, v \cos(\alpha) / c \tag{19}$$

در فلومتر Clamp-on از قانون Snell داریم $\cos(\alpha) = \sin(\theta_L)$ و $c_L / \sin(\theta_L) = c_W / \sin(\theta_W)$، پس از رابطه حذف می‌شود:

$$v = f_D \times c_w / (2\, f_0 \sin(\theta_w)) \tag{20}$$

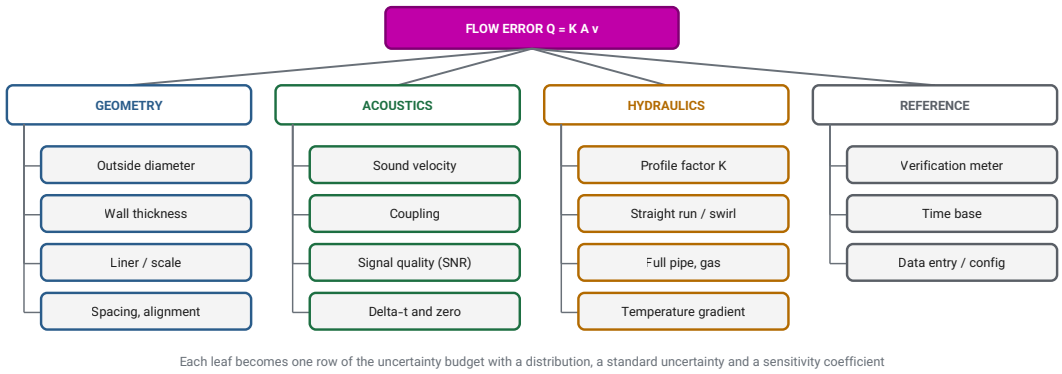
| | | |
|---|---|---|
| $f_D$ | جابه‌جایی بسامد دوپلر | Hz |
| $f_0$ | بسامد فرستاده‌شده | Hz |
| $c_w$, $\theta_w$ | سرعت صوت و زاویهٔ گوه؛ در این مدل تنها این دو پارامتر هندسه را تعیین می‌کنند | m/s, deg |

برای Case A با $f_0$ = 1 MHz، جابه‌جایی بسامد برابر 190 Hz در $Q_{min}$، 711 Hz در $Q_{normal}$ و 1185 Hz در $Q_{max}$ است و رابطهٔ ۲۰ همان سرعت‌ها را برمی‌گرداند. اما حدود کاربرد تعیین‌کننده‌اند: سرعت اندازه‌گیری‌شده میانگین وزنی است که وزن آن به توزیع بازتابنده‌ها و تضعیف بستگی دارد و با میانگین مساحتی برابر نیست؛ ضریب K نامعلوم‌تر از Transit-Time است. اگر بازتابندهٔ کافی یا حباب نباشد، سیگنال ضعیف می‌شود؛ بازتاب ثابت از دیواره و اجزای لوله نیز در سرعت‌های کم خطا می‌دهد. چون این اثرات به سیال و دستگاه وابسته‌اند، این سند عدد دقت یا حد غلظت برای Doppler ادعا نمی‌کند. MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

## 25 درخت خطای Clamp-on

برای ساختن بودجهٔ عدم‌قطعیت باید هر منبع خطا به یک شاخهٔ مشخص منسوب شود. چهار شاخهٔ اصلی وجود دارد: هندسه (قطر بیرونی، ضخامت، لاینر، فاصله و هم‌ترازی)، صوت (سرعت صوت، Coupling، SNR، Delta-t و صفر)، هیدرولیک (ضریب K، طول مستقیم، Swirl، لولهٔ پر) و مرجع (راستی‌آزمایی، پایهٔ زمانی، ثبت داده). هر برگ درخت یک ردیف بودجه می‌شود با توزیع، عدم‌قطعیت استاندارد و ضریب حساسیت. اگر خطای یک برگ سیستماتیک و شناخته‌شده باشد، باید ابتدا تصحیح شود و فقط عدم‌قطعیت تصحیح در بودجه بماند؛ نگه‌داشتن خطای شناخته‌شده در بودجه به‌جای اصلاح آن، روش GUM نیست. ENGINEERING RECOMMENDATION.




**شکل ۹** — درخت خطای فلومتر Clamp-on؛ هر برگ به یک ردیف بودجهٔ عدم‌قطعیت تبدیل می‌شود

## 26 عدم‌قطعیت فلومتر Inline چندمسیره (نمونهٔ توضیحی)

در فلومتر Inline هندسهٔ قطعهٔ لوله ماشین‌کاری و در کارخانه اندازه‌گیری می‌شود، پس مؤلفهٔ قطر داخلی و زاویه بسیار کوچک‌تر از Clamp-on است؛ در عوض، خطای انتگرال‌گیری مسیرها، اثر نصب و مرجع کالیبراسیون جریان در بودجه باقی می‌مانند. جدول ۱۱ ساختار این بودجه را با ورودی‌های توضیحی نشان می‌دهد. این عددها فرضی‌اند و مشخصهٔ هیچ مدل تجاری نیستند؛ فقط نشان می‌دهند چرا بودجهٔ Inline می‌تواند کوچک‌تر از Clamp-on شود و کدام مؤلفه‌ها دیگر قابل‌کاهش نیستند ASSUMPTION.

**جدول ۱۱** — بودجهٔ عدم‌قطعیت توضیحی فلومتر Inline چندمسیره در $Q_{normal}$؛ $U = 0.85\ \%$ $(k = 2)$

| مؤلفه | توزیع | مقدار ورودی (٪) | مقسوم‌علیه | $u_i$ (٪) | ضریب حساسیت | سهم (٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **قطر داخلی قطعهٔ ماشین‌کاری‌شده** | نرمال (u) | 0.05 | 1.000 | 0.050 | 2.00 | 0.100 |
| **طول و زاویهٔ مسیر** | مستطیلی | 0.15 | 1.732 | 0.087 | 1.00 | 0.087 |
| **پایهٔ زمانی و Delta-t** | نرمال (u) | 0.05 | 1.000 | 0.050 | 1.00 | 0.050 |
| **انحراف صفر** | مستطیلی | 0.10 | 1.732 | 0.058 | 1.00 | 0.058 |
| **انتگرال‌گیری مسیرها و پروفایل** | مستطیلی | 0.40 | 1.732 | 0.231 | 1.00 | 0.231 |
| **اغتشاش نصب** | مستطیلی | 0.50 | 1.732 | 0.289 | 1.00 | 0.289 |
| **مرجع کالیبراسیون دبی** | نرمال (U / 2) | 0.15 | 1.000 | 0.150 | 1.00 | 0.150 |
| **$u_c$ (٪)** | جذر مجموع مربعات | | | | | **0.427** |
| **U $(k = 2)$ (٪)** | | | | | | **0.85** |

## 27 فلومتر التراسونیک گاز: مرز دامنه و استانداردها

در گاز، سرعت صوت حدود 300 m/s تا 500 m/s (بسته به ترکیب، دما و فشار) و چگالی بسیار بزرگ‌تر از مایع است؛ Re به مرتبهٔ $10^6$ تا $10^7$ می‌رسد، پروفایل تخت‌تر است، نویز آکوستیکی شیرها و رگولاتورها در بسامد فراصوت می‌تواند SNR را کم کند و عدد Mach (v/c) بزرگ‌تر از مایع است. استانداردهای مرتبط، از جمله ISO 17089-1:2019 برای فلومتر التراسونیک گاز در اندازه‌گیری انتقال مالکیت و تخصیص، و AGA Report No. 9، الزامات عملکرد و آزمون تعریف می‌کنند. در این سند متن آن‌ها خوانده نشده و هیچ ادعای انطباق یا انتقال مالکیت نمی‌شود؛ ویرایش هر دو باید پیش از استفاده تأیید شود REQUIRES VERIFICATION. مرز دامنه باید روشن بماند: مدل‌های این سند برای آب است و فقط مورد مفهومی D (بخش ۳۴) برای نمایش تفاوت مقیاس‌ها گاز را به کار می‌برد.

## 28 کالیبراسیون: خشک، تر، وزنی، حجمی و صفر جریان

کالیبراسیون و راستی‌آزمایی فلومتر التراسونیک را باید از چند لایه جدا کرد. لایهٔ اول، راستی‌آزمایی «خشک» است: بازبینی ابعاد قطعه یا مشخصات لوله، پارامترهای پیکربندی و عملکرد الکترونیک با ابزار زمان‌سنجی، بدون جریان واقعی. لایهٔ دوم، کالیبراسیون «تر» در آزمایشگاه جریان است که دبی مرجع را با روش وزنی (ترازو و زمان‌سنج؛ در عنوان استاندارد ISO 4185 «روش توزین» آمده) یا حجمی (جمع‌آوری مایع در مخزن حجمی؛ ISO 8316) یا مقایسه با فلومتر مرجع تولید می‌کند. نسخهٔ جاری هر دو استاندارد باید تأیید شود REQUIRES VERIFICATION. لایهٔ سوم راستی‌آزمایی در محل با ابزار مرجع قابل‌حمل یا آزمون برگشتی است. برای Clamp-on، لابراتوار فقط الکترونیک و ترانسدیوسرها را روی لولهٔ آزمون می‌سنجد و هندسهٔ لولهٔ پروژه را بازتولید نمی‌کند؛ بنابراین خطای ID، ضخامت و محل نصب همچنان باید در محل بررسی شود.

آزمون صفر جریان نکتهٔ مستقل است: خط باید واقعاً از جریان جدا و از سیال پر باشد، و خروجی سرعت $v_{offset}$ در رابطهٔ ۱۷ ثبت شود. جدول ۱۲ یک کالیبراسیون ساختگی پنج‌نقطه‌ای با سه تکرار برای Case A را نشان می‌دهد؛ U هر نقطه از ترکیب عدم‌قطعیت مرجع (فرض 0.15 % در k = 2 )، تکرارپذیری (مستطیلی) و تفکیک‌پذیری خوانش ساخته شده است. بیشینهٔ خطا 0.87 % در نقطهٔ کم‌دبی رخ می‌دهد که با تحلیل Delta-t همخوان است. اگر مرز پذیرش پروژه MPE باشد، قاعدهٔ تصمیم باید صریحاً بگوید که |e| + U ≤ MPE لازم است یا فقط |e| ≤ MPE؛ این سند MPE ای تعیین نمی‌کند.

**جدول ۱۲** — کالیبراسیون ساختگی Case A (مقادیر SYNTHETIC DATA)

| دبی مرجع (m³/h) | میانگین سه تکرار (m³/h) | خطای نسبی (٪) | تکرارپذیری s (٪) | U (k = 2) (٪) |
|---|---|---|---|---|
| **40** | 40.35 | 0.87 | 0.088 | **0.18** |
| **80** | 80.42 | 0.53 | 0.031 | **0.16** |
| **150** | 150.30 | 0.20 | 0.023 | **0.15** |
| **200** | 200.56 | 0.28 | 0.020 | **0.15** |
| **250** | 250.98 | 0.39 | 0.014 | **0.15** |

ثبت «قبل از تنظیم» و «بعد از تنظیم» (As Found و As Left) الزامی است و باید در گزارش فرق تنظیم و راستی‌آزمایی صریح باشد؛ اگر تنظیمی انجام نشده، نباید نوشته شود که دستگاه تنظیم شده است.

## 29 بودجهٔ عدم‌قطعیت به روش GUM

برای هر مؤلفهٔ مستقل، عدم‌قطعیت استاندارد $u_i$ از توزیع فرض‌شده به دست می‌آید: برای توزیع مستطیلی با نیم‌پهنای a مقدار $u = a/\sqrt{3}$ و برای ورودی نرمال که با U گزارش شده، $u = U/2$. اثر هر مؤلفه با ضریب حساسیت $c_i$ به عدم‌قطعیت دبی می‌رسد و مجموع مربعی، عدم‌قطعیت ترکیبی را می‌دهد:

$$u_c^2 = \mathrm{SUM}_i \, (c_i \times u_i)^2 \qquad (21)$$

$$U = k \times u_c \,, \; k = 2 \qquad (22)$$

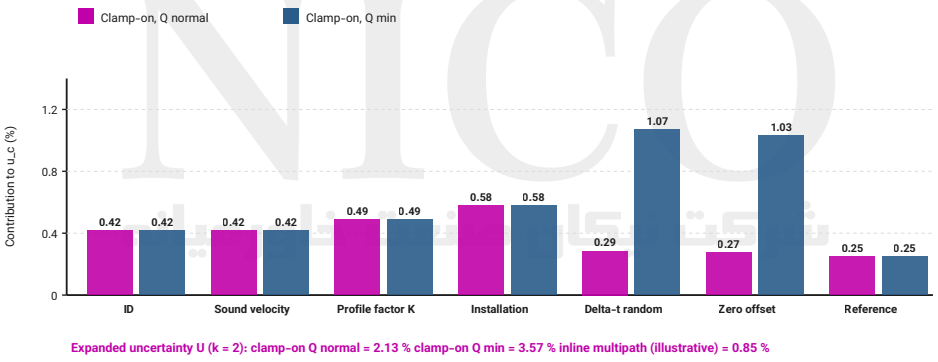
| | | |
|---|---|---|
| $u_i$ | عدم‌قطعیت استاندارد مؤلفهٔ i (نسبی) | % |
| $c_i$ | ضریب حساسیت دبی نسبت به مؤلفهٔ i | — |
| $u_c$ | عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی | % |
| k | ضریب پوشش؛ مقدار ۲ فرض نرمال‌بودن را لازم دارد و درجهٔ آزادی مؤثر محاسبه نشده است | — |

جدول ۱۳ بودجهٔ Case A Clamp-on را در دو نقطهٔ کاری می‌دهد. در $Q_{normal}$ عدم‌قطعیت گسترده $U = 2.13$ % و در $Q_{min}$ برابر $U = 3.57$ % است؛ تفاوت از دو مؤلفهٔ Delta-t و صفر می‌آید که با کاهش Δt بزرگ می‌شوند. اگر قطر داخلی با توان ۳ (حد جفت‌شده) وارد شود، U در $Q_{normal}$ به 2.33 % می‌رسد. همهٔ ورودی‌ها ASSUMPTION هستند و فقط روش و ترتیب بزرگی را نشان می‌دهند؛ نتیجهٔ جدول، مشخصهٔ دقت هیچ دستگاهی نیست.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

**جدول ۱۳** — بودجهٔ عدم‌قطعیت Clamp-on برای Case A (توان ۲ برای قطر داخلی)

| مؤلفه | توزیع | مقدار ورودی (٪) | ضریب حساسیت | سهم در $Q_{normal}$ (٪) | سهم در $Q_{min}$ (٪) |
|---|---|---|---|---|---|
| **قطر داخلی (ID)** | نرمال (u) | 0.21 | 2.00 | 0.419 | 0.419 |
| **سرعت صوت (زاویهٔ مسیر)** | نرمال (u) | 0.50 | 0.83 | 0.415 | 0.415 |
| **ضریب پروفایل K** | مستطیلی | 0.85 | 1.00 | 0.489 | 0.489 |
| **اغتشاش نصب** | مستطیلی | 1.00 | 1.00 | 0.577 | 0.577 |
| **نویز تصادفی Delta-t** | نرمال (u) | 0.29 | 1.00 | 0.285 | 1.069 |
| **انحراف صفر** | مستطیلی | 0.48 | 1.00 | 0.274 | 1.029 |
| **مرجع راستی‌آزمایی** | نرمال (U / 2) | 0.25 | 1.00 | 0.250 | 0.250 |
| **عدم‌قطعیت ترکیبی $u_c$ (٪)** | جذر مجموع مربعات | | | **1.067** | **1.785** |
| **عدم‌قطعیت گسترده U (k = 2) (٪)** | | | | **2.13** | **3.57** |



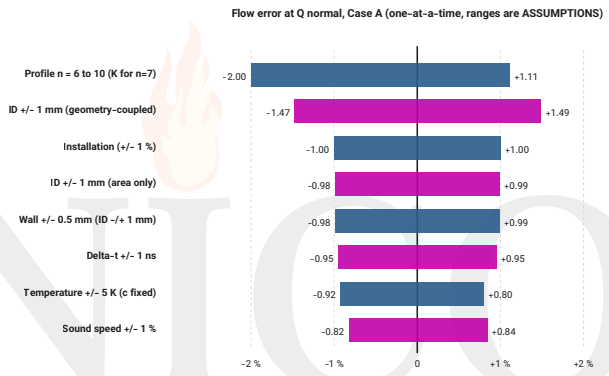

**شکل ۱۰** — سهم مؤلفه‌ها در عدم‌قطعیت ترکیبی Case A در $Q_{normal}$ و $Q_{min}$؛ Delta-t و صفر در دبی کم غالب می‌شوند

## 30 تحلیل حساسیت و Tornado

بودجه نشان می‌دهد هر مؤلفه با چه وزنی در U شرکت می‌کند؛ تحلیل حساسیت می‌پرسد اگر یک پارامتر در بازهٔ محتمل خود جابه‌جا شود، خطای دبی چقدر می‌شود. جدول ۱۴ هشت پارامتر را یک‌به‌یک و در $Q_{normal}$ بررسی می‌کند. بزرگ‌ترین پهنا مربوط به نمای پروفایل (وقتی K برای n = 7 بسته شده است) و قطر داخلی با هندسهٔ جفت‌شده است؛ خطای Delta-t و نصب هم‌مرتبه‌اند. بازه‌ها فرضی‌اند ولی ترتیب نتیجه یک راهنمای عملی است: پیش از هر اصلاح پیچیده، ورودی‌های لوله و تصمیم دربارهٔ پروفایل را بررسی کنید ENGINEERING RECOMMENDATION.

**جدول ۱۴** — حساسیت یک‌به‌یک خطای دبی در $Q_{normal}$ (Case A)

| پارامتر (یک‌به‌یک) | خطای پایین (٪) | خطای بالا (٪) | پهنا (٪) |
|---|---|---|---|
| **پروفایل n از ۶ تا ۱۰ (K برای n = 7)** | -2.00 | 1.11 | **3.11** |
| **قطر داخلی ±۱ mm، هندسهٔ جفت‌شده** | -1.47 | 1.49 | **2.96** |
| **نصب و اغتشاش (±۱ ٪، فرض)** | -1.00 | 1.00 | **2.00** |
| **قطر داخلی ±۱ mm، فقط مساحت** | -0.98 | 0.99 | **1.97** |
| **ضخامت ±۰٫۵ mm (اثر بر قطر داخلی ۱ mm با علامت مخالف)** | -0.98 | 0.99 | **1.97** |
| **خطای Delta-t ±۱ ns** | -0.95 | 0.95 | **1.90** |
| **دما ±۵ K با c ثابت** | -0.92 | 0.80 | **1.72** |
| **سرعت صوت ±۱ ٪** | -0.82 | 0.84 | **1.66** |




**شکل ۱۱** — Tornado حساسیت خطای دبی در $Q_{normal}$؛ بازه‌های ورودی فرضی‌اند و ترتیب آن‌ها فقط برای Case A معتبر است

## 31 مورد A — Clamp-on روی خط آب: مدل کامل

### مثال محاسباتی پیشرفته — هندسه، Delta-t، Snell و بودجه WORKED EXAMPLE A

**داده‌ها (ASSUMPTION):** آب 20 °C، فولاد کربنی، OD برابر 219.1 mm، ضخامت 8.18 mm، دبی‌های 40 m³/h، 150 m³/h و 250 m³/h، $c_w$ = 2500 m/s، $c_s$ = 3200 m/s، $theta_w$ = 40°، بسامد 1 MHz، پروفایل n = 7.

**گام ۱ — هندسه:** ID = OD - 2t = 219.1 - 2×8.18 = 202.74 mm؛ A = (pi/4) ID² = 0.03228 m²؛ $V_{mean}$ = Q/(3600 A): 0.344 m/s، 1.291 m/s، 2.151 m/s؛ Re = V ID/nu: 69500، 260600، 434400 (جریان آشفته).

**گام ۲ — پروفایل:** K(7) = 2×7/(2×7+1) = 0.9333؛ سرعت مسیر قطری $v_{path}$ = $V_{mean}$/K: 0.369 m/s، 1.383 m/s، 2.305 m/s.

**گام ۳ — شکست:** sin($theta_L$) = ($c_L$/$c_w$) sin($theta_w$) = (1482.4/2500) sin 40° و $theta_L$ = 22.4 deg؛ alpha = 90° - $theta_L$ = 67.6 deg؛ cos(alpha) = 0.3811؛ $theta_s$ = 55.4 deg.

**گام ۴ — مسیر و زمان:** $L = ID/\sin(alpha) = 202.74/0.9245 = 219.3\ mm$؛ $t_0 = L/c = 147.9\ \mu s$؛ $\Delta t = 2\,L\,v_{path}\cos(alpha)/c^2$ برابر 28.1 ns، 105.2 ns و 175.3 ns (جدول ۲).

**گام ۵ — فاصله:** $S_Z = 202.74\times0.4123 + 2\times8.18\times\tan(55.4°) = 107.3\ mm$ و $S_V = 214.5\ mm$ (بدون سهم داخل گوه).

**گام ۶ — بودجه:** $u_c = 1.07\ \%$ و $U = 2.13\ \%$ در $Q_{normal}$؛ $u_c = 1.78\ \%$ و $U = 3.57\ \%$ در $Q_{min}$ (جدول ۱۳).

**با ورودی‌های فرضی، سرعت‌ها در محدودهٔ 0.344 m/s تا 2.151 m/s هستند و Δt از 28.1 ns تا 175.3 ns تغییر می‌کند. U در دبی کم نزدیک به دو برابر دبی عادی است. پذیرش یا رد به الزام دقت پروژه و برگهٔ سازنده وابسته است و در ماتریس راستی‌آزمایی «باز» ثبت می‌شود.**

## 32 مورد B — ضخامت دیوارهٔ اشتباه و خطای کمّی دبی

### مثال محاسباتی — اشتباه یک شمارهٔ Schedule WORKED EXAMPLE B

**داده‌ها:** لولهٔ Case A با ضخامت واقعی 8.18 mm؛ مهندس از جدول اسمی ضخامت 6.35 mm را وارد کرده است (مقادیر ابعاد استاندارد ASME B36.10M؛ REQUIRES VERIFICATION).

**گام ۱ — قطر داخلی واردشده:** $ID_{set} = 219.1 - 2\times6.35 = 206.40\ mm$ در برابر $ID_{true} = 202.74\ mm$؛ نسبت 206.40/202.74.

**گام ۲ — خطا:** مساحتی (m = 2): 3.64 %+؛ جفت‌شده (m = 3): 5.51 %+.

**گام ۳ — نشانهٔ تشخیصی:** c اندازه‌گیری‌شده با هندسه متناسب است؛ سرعت صوت ظاهری حدود 1.81 % بزرگ‌تر می‌شود که معادل 8.7 K اختلاف دمای ظاهری است. این اختلاف در بازرسی Sound Velocity قابل‌ردیابی است.

**خطای یک شمارهٔ Schedule دبی را تقریباً بین 3.64 %+ و 5.51 %+ جابه‌جا می‌کند؛ یعنی بزرگ‌تر از کل U عادی Case A. اندازه‌گیری ضخامت با ضخامت‌سنج و مقایسهٔ c ظاهری، این اشتباه را می‌گیرد؛ توان واقعی (m) باید از سازنده تأیید شود** REQUIRES VERIFICATION.

## 33 مورد C — پروفایل آشفته در برابر پروفایل ایده‌آل

### فلومتر بعد از زانو با طول مستقیم کم FIELD SCENARIO C

«فلومتر تک‌مسیره با ضریب K ثابت روی خطی بلافاصله پس از زانو نصب شد؛ دبی نسبت به شمارندهٔ مخزن بالاتر یا پایین‌تر نشان می‌دهد و علامت خطا با تغییر دبی عوض می‌شود. مشاور پیشنهاد چندمسیره داده است.»

**تحلیل مهندسی:** با پروفایل ایده‌آل n = 7 و K متناظر، خطای تک‌مسیره صفر است. اگر پروفایل واقعی به پروفایل آشفتهٔ ساختگی نزدیک باشد (میدان مرکزی تخت‌تر با سرعت بیشتر نزدیک دیواره، beta = 0.15)، میانگین تک‌وتر بدون ضریب فقط 1.81 %+ از سرعت متوسط بالاتر است؛ اما ضریب ایده‌آل K = 0.9333 اگر روی آن اعمال شود خطا را به 4.97 %- می‌رساند. یک طرح Gauss-Chebyshev با دو وتر 1.18 %+ و با چهار وتر 0.17 %+ خطای انتگرال‌گیری دارد (جدول ۴). بنابراین مشکل صرفاً «ضریب غلط» نیست: ضریب ثابت برای پروفایلی ساخته شده که دیگر وجود ندارد. **گزینه‌ها:** افزایش

طول مستقیم یا تغییر محل نصب؛ استفاده از Flow Conditioner که باید با سازنده و اندازه‌گیری تأیید شود؛ چندمسیره با آرایش آینه‌ای؛ تأیید در محل با مرجع مستقل. عدد طول مستقیم یا خطای واقعی بدون دادهٔ سازنده یا آزمون معتبر نیست REQUIRES VERIFICATION.

## 34 مورد D — فلومتر چندمسیرهٔ گاز (مفهومی)

### مثال محاسباتی مفهومی — مقیاس زمان و انتگرال‌گیری در گاز WORKED EXAMPLE D

**داده‌ها (ASSUMPTION؛ بدون داده‌های اختصاصی هیچ سازنده):** قطر 0.300 m، سرعت 15 m/s، سرعت صوت 400 m/s، زاویهٔ مسیر 45 deg، چگالی 50 kg/m³ و لزجت $1.2\times10^{-5}$ Pa·s.

**گام ۱ — طول و زمان:** $L = D/\sin(45°) = 424.3$ mm؛ $t = L/c = 1.061$ ms؛ $\Delta t = 2\,L\,v\cos(\alpha)/c^2 = 56.25$ µs؛ $Mach = v/c = 0.0375$؛ $Re = \rho\,v\,D/\mu = 1.88\times10^{7}$.

**گام ۲ — تقریب خطی:** واروني دقیق و تقریب $c^2\Delta t/(2L\cos\alpha)$ در این نقطه فقط 0.07 % فرق دارد؛ برای هدف 0.1 % این مقدار ناچیز نیست و باید رابطهٔ دقیق به کار رود.

**گام ۳ — نیاز زمانی:** در سرعت 1 m/s مقدار Δt برابر 3.75 µs است؛ برای 0.1 % خطا در آن نقطه، خطای زمانی باید زیر 3.75 ns بماند.

**گام ۴ — انتگرال‌گیری:** نتایج جدول ۱۵ برای پروفایل‌های تخت‌تر (n = 8 تا n = 12) و یک پروفایل آشفتهٔ ساختگی نشان می‌دهد چهار وتر خطای انتگرال‌گیری مدل را به حدود 0.11 % تا 0.14 % می‌رساند، در حالی که تک‌وتر بدون ضریب برای n = 8 6.25 % خطا دارد.

> **این مثال فقط مقیاس‌ها را نشان می‌دهد: Δt از مرتبهٔ ده میکروثانیه، نیاز زمانی در حد چند نانوثانیه و خطای انتگرال‌گیری مدل زیر یک درصد. هیچ‌یک ادعای عملکرد دستگاه گاز نیست؛ قابلیت انتقال مالکیت فقط از استاندارد معتبر و گواهی آزمون به‌دست می‌آید.**

جدول ۱۵ — خطای انتگرال‌گیری مدل برای مورد گاز مفهومی (٪)

| پروفایل | ۱ مسیر (٪) | ۲ مسیر (٪) | ۴ مسیر (٪) |
|---|---|---|---|
| n = 8 | 6.25 | 0.67 | 0.11 |
| n = 10 | 5.00 | 0.59 | 0.10 |
| n = 12 | 4.17 | 0.51 | 0.09 |
| **پروفایل آشفتهٔ ساختگی (n = 10 پایه)** | -0.24 | 0.90 | 0.14 |

## 35 تحلیل حالت‌های خرابی (FMEA)

جدول زیر شانزده حالت خرابی را با مکانیزم فیزیکی، اثر بر اندازه‌گیری، شواهد تشخیصی و اقدام اصلاحی فهرست می‌کند. شدت و احتمال عددی (رتبهٔ RPN) نداده شده است، چون به الزام ایمنی و فرآیند پروژه وابسته است.

**جدول ۱۶** — FMEA فلومتر التراسونیک (Failure Mode، مکانیزم، اثر، شواهد، اقدام)

| حالت خرابی (Failure Mode) | مکانیزم فیزیکی | اثر بر اندازه‌گیری | شواهد تشخیصی | اقدام اصلاحی |
|---|---|---|---|---|
| **قطر یا ضخامت اشتباه** | ورود مقدار اسمی یا خطای اندازه‌گیری | بایاس دبی با توان ۲ تا ۳ | c ظاهری دور از انتظار | اندازه‌گیری مجدد و ثبت پیکربندی |
| Coupling **ضعیف** | حباب یا خشک‌شدن مادهٔ اتصال | افت دامنه و نوسان | Signal Quality پایین، دامنه ناپایدار | تمیزکاری، Coupling جدید، بستن یکنواخت |
| **گاز یا حباب معلق** | پراکندگی و جذب صوت | افت SNR، پرش خوانش، افت سیگنال | حاشیهٔ سیگنال کم، c نوسانی | رفع منبع هوا، تغییر محل، Doppler در صورت مناسب‌بودن |
| **لولهٔ نیمه‌پر** | سطح آزاد یا جیب هوا | مساحت واقعی کمتر، خطای شدید | سیگنال ناپایدار، c غیرعادی | اثبات Full Pipe، جابه‌جایی محل |
| **رسوب یا لاینر ثبت‌نشده** | لایهٔ اضافی با تضعیف و سرعت متفاوت | قطر مؤثر کمتر، افت دامنه | افت SNR و c ظاهری بالا | ثبت لاینر، پاک‌سازی، بازرسی |
| **سرعت صوت نامطابق** | دما یا ترکیب متفاوت | خطای زاویه در الگوریتم بدون اندازه‌گیری c | اختلاف c با دمای مرجع | تصحیح سیال و دما |
| **فاصلهٔ** Transducer **اشتباه** | محاسبهٔ هندسه یا خطای نصب | افت دامنه، شاید بایاس هندسی | Signal Quality پایین‌تر از انتظار | بازتنظیم بر پایهٔ مقدار دستگاه |
| **خرابی کابل یا کانکتور** | تضعیف یا قطع | افت سیگنال یا خطای نویز | مقاومت یا شکل پالس غیرعادی | تعویض کابل و آزمون |
| **انحراف صفر** | عدم‌تقارن مسیر یا الکترونیک | خطای ثابت در دبی کم | صفر جریان غیرصفر | تنظیم صفر در جریان صفر واقعی |
| **اعوجاج پروفایل** | طول مستقیم کم، شیر نیمه‌باز | بایاس وابسته به دبی | اختلاف با مرجع مستقل | تغییر محل، Flow Conditioner، چندمسیره |
| **جریان عرضی** (Swirl) | اجزای لوله‌کشی و پمپ | بایاس تک‌وتر خارج از مرکز | اختلاف مسیرهای قرینه | آرایش آینه‌ای، تغییر محل |
| **گرادیان دما** | جدایش لایه‌ها، دیوارهٔ سرد | انحراف مسیر صوت | c متغیر در طول زمان | اختلاط، تغییر محل |
| **سیگنال گذرنده از دیواره** | مسیر موازی صوت در جدار لوله | خطای خوانش در جریان کم | اثر در جریان صفر | تغییر روش و نقطه نصب |
| **پرش چرخه** (Cycle Slip) | SNR کم و انتخاب قلهٔ دیگر در Cross-Correlation | جهش ناگهانی در $\Delta t$ | پرش‌های گسسته در خوانش | بهبود SNR، فیلتر و آستانهٔ دستگاه |

| حالت خرابی (Failure Mode) | مکانیزم فیزیکی | اثر بر اندازه‌گیری | شواهد تشخیصی | اقدام اصلاحی |
|---|---|---|---|---|
| **نویز الکتریکی یا ارتعاش** | تداخل یا انتقال ارتعاش | نویز در $\Delta t$ | نوسان با فرکانس تجهیز | زمین‌کردن، فاصله‌گیری، شیلد |
| **خطای پیکربندی** | واحد یا پارامتر اشتباه یا ازدست‌رفته | بایاس یا مقیاس اشتباه | مقایسه با نسخهٔ پشتیبان | بازبینی و بازیابی پیکربندی |

## 36 ماتریس راستی‌آزمایی طراحی

ماتریس زیر هر الزام را به ورودی فرآیند، پیکربندی، نتیجهٔ محاسبه یا راستی‌آزمایی، مبنای پذیرش، وضعیت و مورد باز مرتبط می‌کند. وضعیت «قبول» فقط برای بررسی‌های ریاضی همین سند به کار رفته است؛ هر گزارهٔ وابسته به دستگاه واقعی «باز» یا «نیازمند راستی‌آزمایی» می‌ماند.

**جدول ۱۷** — ماتریس راستی‌آزمایی طراحی (Case A)

| الزام (Requirement) | ورودی فرآیند | پیکربندی | محاسبه یا راستی‌آزمایی | مبنای پذیرش | وضعیت | مورد باز |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **سازگاری ریاضی** | — | وزن‌ها | جمع وزن‌های Gauss-Chebyshev برابر یک؛ وارونی دقیق سرعت را برمی‌گرداند | بررسی در کد | PASS | — |
| **محدودهٔ سرعت** | 0.369 تا 2.305 m/s (مسیر) | Clamp-on Transit-Time | جدول ۲ | محدودهٔ برگهٔ سازنده | OPEN | دادهٔ مدل |
| **هندسهٔ لوله** | OD و ضخامت اندازه‌گیری‌شده | ID واردشده | $u_{ID}$ = 0.42 mm؛ اثر 0.42 % تا 0.63 % | الزام دقت پروژه | ASSUMPTION | اندازه‌گیری میدانی |
| **توان حساسیت ID** | — | الگوریتم هندسه | حد ۲ تا ۳ | برگهٔ سازنده | REQUIRES VERIFICATION | توان واقعی |
| **حاشیهٔ سیگنال** | مایع تمیز | مسیر Clamp-on | 16.0 dB پایه (جدول ۸) | حداقل SNR سازنده | OPEN | آستانهٔ واقعی |
| **سرعت صوت** | 20 °C | c اندازه‌گیری | 1482.4 m/s مورد انتظار | آستانهٔ پروژه | OPEN | آستانهٔ مقدار |
| **صفر جریان** | خط بسته و پر | آزمون صفر | 1 ns برابر 13.1 mm/s | حد صفر پروژه | OPEN | حد پذیرش |
| **طول مستقیم** | چینش لوله‌کشی | مدل و محل | عددی ادعا نشده | برگهٔ سازنده یا استاندارد | REQUIRES VERIFICATION | مقدار الزامی |

| الزام (Requirement) | ورودی فرآیند | پیکربندی | محاسبه یا راستی‌آزمایی | مبنای پذیرش | وضعیت | مورد باز |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **عدم‌قطعیت دبی** | $Q_{normal}$ و $Q_{min}$ | بودجهٔ GUM | U = 2.13 % و U = 3.57 % | الزام پروژه | ASSUMPTION | ورودی‌های واقعی |
| **کالیبراسیون و مرجع** | دبی مرجع | روش وزنی یا حجمی | جدول ۱۲ (ساختگی) | گواهی مرجع و استاندارد معتبر | OPEN | آزمون واقعی |
| **داده‌های محصول NICO** | — | — | مشخصهٔ تأییدشده‌ای در دسترس نیست | مدارک تأییدشدهٔ NICO | TBD | برگهٔ محصول |

## 37 نظم استانداردها و ثبت منابع

برای هر منبع فقط آنچه واقعاً بررسی شده ثبت می‌شود. جدول ۱۸ نقش هر استاندارد را در این سند و وضعیت راستی‌آزمایی آن را نشان می‌دهد؛ هیچ‌جا متن الزامی خوانده‌شده‌ای نقل نشده و هیچ ادعای انطباق نمی‌شود.

**جدول ۱۸** — ثبت راستی‌آزمایی استانداردها

| استاندارد | عنوان (از فهرست) | نقش در سند | وضعیت |
|---|---|---|---|
| ISO/TR 12765 | اندازه‌گیری جریان سیال در مجاری بسته — روش‌های فلومتر التراسونیک Transit-Time | پیشینهٔ روش Transit-Time برای مایع | REQUIRES VERIFICATION |
| ISO 17089-1:2019 | اندازه‌گیری جریان سیال در مجاری بسته — فلومتر التراسونیک گاز، بخش ۱ | مرز دامنه (گاز) | REQUIRES VERIFICATION |
| AGA Report No. 9 | اندازه‌گیری گاز با فلومتر التراسونیک چندمسیره | مرز دامنه (گاز) | ویرایش REQUIRES VERIFICATION |
| API MPMS 5.8 | اندازه‌گیری هیدروکربن مایع با فلومتر التراسونیک | مرز دامنه | ویرایش REQUIRES VERIFICATION |
| JCGM 100:2008 | راهنمای بیان عدم‌قطعیت اندازه‌گیری (GUM) | مبنای روش بودجه | REQUIRES VERIFICATION |
| ISO 5168 | اندازه‌گیری جریان سیال — روش‌های ارزیابی عدم‌قطعیت | راهنمای عدم‌قطعیت در جریان‌سنجی | فهرست، ویرایش ۲۰۰۵ و بازنگری در دست تهیه؛ REQUIRES VERIFICATION |
| ISO 4185 و ISO 8316 | روش وزنی و روش مخزن حجمی در اندازه‌گیری جریان مایع | روش‌های کالیبراسیون مرجع | ویرایش‌های فهرست‌شده قدیمی؛ REQUIRES VERIFICATION |

| استاندارد | عنوان (از فهرست) | نقش در سند | وضعیت |
|---|---|---|---|
| ISO 4064-1:2014، OIML R 49، EN 1434 | کنتورهای آب و انرژی حرارتی | مرز دامنهٔ مترولوژی | REQUIRES VERIFICATION |
| ASME B36.10M | ابعاد لولهٔ فولادی جوشی و بدون درز | ضخامت اسمی مورد B | REQUIRES VERIFICATION |

## 38 ثبت معادلات و واژگان

**جدول ۱۹** — فهرست معادلات سند

| شماره | معادله | مبنا |
|---|---|---|
| 1 | lambda = c/f | تعریف موج |
| 2–4 | $t_{down}$، $t_{up}$ و سرعت دقیق مسیر | مشتق در همین سند |
| 5 | Δt تقریبی | بسط مرتبهٔ اول |
| 6–9 | $v_{path}$ A K = Q، Re، پروفایل توانی، K | تعریف و مشتق |
| 10–11 | انتگرال‌گیری Gauss-Chebyshev | ریاضی؛ در کد راستی‌آزمایی شد |
| 12 | خطای Swirl تک‌وتر | مدل صلب‌گونه (ASSUMPTION) |
| 13 | توان حساسیت ID | مشتق؛ توان واقعی از سازنده |
| 14–15 | Snell و فاصلهٔ Transducer | قانون شکست؛ مدل ساده |
| 16 | سرعت صوت آب (Marczak) | چندجمله‌ای منتشرشده |
| 17–18 | انحراف صفر و Cross-Correlation | مشتق و تعریف |
| 19–20 | Doppler | مشتق با Snell |
| 21–22 | GUM: $u_c$ و U | روش JCGM 100:2008 |

**جدول ۲۰** — ثبت واژگان کنترل‌شده

| اصطلاح | رفتار در سند | توضیح |
|---|---|---|
| Transit-Time، Doppler | انگلیسی حفظ شد | اصل اندازه‌گیری |
| Clamp-on، Inline | انگلیسی حفظ شد | آرایش نصب ترانسدیوسر، نه اصل اندازه‌گیری |
| Transducer | ترانسدیوسر؛ در متن انگلیسی | عنصر فرستنده و گیرنده |
| Acoustic Path، Sound Velocity | انگلیسی حفظ شد | مسیر صوتی؛ سرعت صوت |
| Upstream، Downstream | بالادست، پایین‌دست؛ گاهی انگلیسی | نسبت به جهت جریان |
| Flow Profile، Multipath | انگلیسی حفظ شد | پروفایل سرعت؛ چندمسیره |
| Signal Quality، Coupling | انگلیسی حفظ شد | معیار سیگنال؛ اتصال صوتی |
| Cross-Correlation | انگلیسی حفظ شد | برآورد تأخیر زمانی |
| Full Pipe، Reynolds Number | انگلیسی حفظ شد؛ «لولهٔ پر» هم به کار می‌رود | شرط اندازه‌گیری؛ معیار رژیم |

## 39 حدود اعتبار (Limits of Applicability)

مدل‌های این سند برای آموزش و بررسی حساسیت‌اند، نه برای پذیرش نهایی طراحی. چند حد باید همراه هر نتیجه ذکر شود. نخست، نمای n و ضریب K پارامتریک‌اند و نمای واقعی لوله از Re، زبری و اغتشاش بالادست می‌آید. دوم، انتگرال‌گیری فقط برای وترهای مستقیم در یک صفحه و پروفایل محورمتقارن است؛ جریان عرضی و پروفایل واقعی را در بر نمی‌گیرد. سوم، توان حساسیت ID بین ۲ و ۳ دو حد ریاضی است و مقدار واقعی هر دستگاه از سازنده می‌آید. چهارم، سرعت‌های موج گوه و دیواره و ضریب تضعیف فرضی‌اند. پنجم، همهٔ مؤلفه‌های بودجهٔ عدم‌قطعیت فرض شده‌اند، مستقل در نظر گرفته شده‌اند و درجهٔ آزادی مؤثر محاسبه نشده است؛ داده‌های کالیبراسیون ساختگی‌اند. ششم، مورد گاز فقط مفهومی است. متن کامل استانداردهای فهرست‌شده خوانده نشده و ادعای انطباق نشده است؛ مشخصات محصولات NICO تأیید نشده و در سند ادعا نشده است.

## 40 چک‌لیست طراحی

- [ ] مبنای طراحی (سیال، دما، لوله، دبی‌ها، روش) نوشته و فرض‌ها با برچسب مبنا ثبت شده است.
- [ ] OD، ضخامت، جنس و لاینر در محل اندازه‌گیری و عدم‌قطعیت آن‌ها در بودجه آمده است.
- [ ] توان حساسیت ID از سازنده پرسیده یا حد بالا در بودجه لحاظ شده است.
- [ ] رویهٔ پروفایل مشخص است: ضریب K ثابت، چندمسیره یا تأیید با مرجع؛ اثر طول مستقیم از سازنده یا استاندارد گرفته شده است.
- [ ] Sound Velocity اندازه‌گیری‌شده با مقدار مورد انتظار مقایسه و اختلاف توضیح داده شده است.

- [ ] حاشیهٔ سیگنال و سناریوهای گاز، حباب و افت Coupling ارزیابی شده است.
- [ ] آزمون صفر جریان با خط واقعاً بسته و پر انجام و حد پذیرش ثبت شده است.
- [ ] بودجهٔ GUM در $Q_{min}$ و $Q_{normal}$ ساخته و U با k = 2 گزارش شده است.
- [ ] FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی تکمیل و موارد باز مالک و تاریخ دارند.
- [ ] ویرایش استانداردهای ارجاع‌شده تأیید و هیچ مشخصهٔ تأییدنشدهٔ محصول به‌عنوان قطعی ثبت نشده است.

### جمع‌بندی نکات کلیدی

- معادلهٔ دقیق Transit-Time به c وابسته نیست؛ c از راه زاویهٔ Snell و هر تقریب الگوریتم وارد می‌شود.
- Δt مرتبهٔ ده تا صد نانوثانیه است؛ هر نانوثانیه در Case A حدود 13.1 mm/s سرعت ظاهری می‌دهد و در دبی کم خطای بزرگ ایجاد می‌کند.
- ضریب K ثابت فقط برای پروفایل مفروض درست است؛ چندمسیره خطای انتگرال‌گیری را کم می‌کند ولی همگرایی همیشه یکنواخت نیست.
- خطای قطر داخلی بین توان ۲ و ۳ وارد دبی می‌شود؛ یک شمارهٔ Schedule اشتباه می‌تواند چند درصد خطا بدهد.
- بودجه و حساسیت فقط وقتی معتبرند که ورودی‌های آن‌ها منبع، توزیع و برچسب مبنا داشته باشند.

## 41 پرسش‌های متداول پیشرفته

**› چرا معادلهٔ دقیق Transit-Time به سرعت صوت نیاز ندارد ولی خطای c دبی را تغییر می‌دهد؟**

چون در رابطهٔ دقیق c با تفاضل معکوس زمان‌ها حذف می‌شود، اما زاویهٔ alpha از Snell با $c_L$ ساخته می‌شود؛ پس اگر الگوریتم c را اشتباه فرض کند، sin(2 alpha) اشتباه و دبی بایاس می‌شود (جدول ۷).

**› ضریب K چگونه به دست می‌آید و چرا ثابت نیست؟**

در مدل توانی K = 2n/(2n+1) است؛ n با Re و شرایط لوله تغییر می‌کند و برای جریان لایه‌ای K = 0.75 است. بنابراین ثابت‌بودن K تقریبی است.

**› چرا چهار وتر همیشه از دو وتر بهتر نیست؟**

قاعدهٔ گاوسی برای توابع هموار طراحی شده و پروفایل توانی نزدیک دیواره مشتق بی‌نهایت دارد؛ در جدول ۴ برای n = 7 مقدار N = 5 از N = 4 کمی بدتر است.

**› خطای قطر داخلی با توان ۲ است یا ۳؟**

فقط‌مساحت توان ۲ می‌دهد؛ اگر الگوریتم هندسهٔ مسیر را هم از ID بسازد توان ۳ می‌شود. توان واقعی هر دستگاه از سازنده باید تأیید شود.

**› اشتباه در ضخامت دیواره چگونه از روی دادهٔ دستگاه تشخیص داده می‌شود؟**

Sound Velocity ظاهری با هندسه متناسب است؛ یک خطای ID در c اندازه‌گیری‌شده ظاهر می‌شود (مورد B). مقایسهٔ c با مقدار مورد انتظار از دما یک شاخص حساس است.

**› چرا دبی کم خطای بیشتری دارد؟**

چون Δt کوچک است و خطای زمانی و صفر ثابت‌اند؛ در Case A هر نانوثانیه در $Q_{min}$ حدود 3.56 % و در $Q_{normal}$ حدود 0.95 % خطا می‌دهد.

**› کجا Doppler به جای Transit-Time به کار می‌رود؟**

وقتی سیال بازتابنده (ذره یا حباب) دارد و Transit-Time به‌خاطر تضعیف مناسب نیست. دقت و حد غلظت از سازنده باید گرفته شود؛ این سند عددی ادعا نمی‌کند.

**› آیا می‌توان بودجهٔ این سند را برای دستگاه واقعی به کار برد؟**

ساختار بودجه بله، ولی ورودی‌ها فرضی‌اند؛ برای دستگاه واقعی باید ورودی‌ها از برگهٔ سازنده، گواهی کالیبراسیون و اندازه‌گیری میدانی جایگزین شوند.

**› در گاز چه چیز تغییر می‌کند؟**

Mach بزرگ‌تر، Re بسیار بزرگ، Δt در مقیاس میکروثانیه و نیاز زمانی نانوثانیه‌ای؛ همچنین الزامات استانداردهای گاز اضافه می‌شود که متن آن‌ها در این سند خوانده نشده است.

**› CFD می‌تواند جای کالیبراسیون را بگیرد؟**

خیر؛ CFD ابزار رتبه‌بندی چینش‌هاست و باید با داده اعتبارسنجی شود. پذیرش دقت از کالیبراسیون یا مرجع مستقل می‌آید.

## 42 استانداردها و منابع

فهرست زیر منابعی است که عنوان یا دامنهٔ آن‌ها از فهرست‌های رسمی بررسی شده است؛ متن کامل هیچ‌یک خوانده نشده است. ویرایش هر مورد پیش از استناد باید تأیید شود.

1. ISO/TR 12765 — Measurement of fluid flow in closed conduits — Methods using transit-time ultrasonic flowmeters
   گزارش فنی؛ عنوان از فهرست BSI در جلسهٔ قبل تأیید شد؛ وضعیت جاری REQUIRES VERIFICATION.
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 و دامنه از فهرست؛ فقط مرز دامنه؛ متن خوانده نشده است.
3. AGA Report No. 9 — Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters
   ویرایش جاری بررسی نشد (جستجو فقط عنوان مقاله‌های مرتبط را داد)؛ REQUIRES VERIFICATION.
4. API MPMS Chapter 5.8 — Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters
   فقط مرز دامنه؛ ویرایش از فهرست فروشگاه.
5. JCGM 100:2008 — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)
   مبنای روش نوع A و B؛ ویرایش REQUIRES VERIFICATION.
6. ISO 5168 — Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties
   فهرست ویرایش ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد و یک بازنگری در دست تهیه است؛ REQUIRES VERIFICATION.

7. ISO 4185 — Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method; ISO 8316 — Measurement of liquid flow in closed conduits — Method by collection of the liquid in a volumetric tank

ویرایش‌های فهرست‌شده قدیمی‌اند؛ REQUIRES VERIFICATION.

8. Marczak, W., 1997 — Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids, J. Acoust. Soc. Am. 102, 2776

چندجمله‌ای سرعت صوت آب؛ ضرایب با مقدار شناخته‌شدهٔ ۰ °C (۱۴۰۲٫۴ m/s) سنجیده شد.

9. ISO 4064-1:2014 — Water meters for cold potable water and hot water; OIML R 49; EN 1434 — Heat meters; ASME B36.10M — Welded and Seamless Wrought Steel Pipe

فقط مرز دامنه و ابعاد اسمی؛ REQUIRES VERIFICATION.

## منابع مرتبط NICO

**پیش‌نیاز**

- فلومتر التراسونیک چیست و چگونه دبی را اندازه می‌گیرد؟ — NICO-EDU-FLW-L1-011-FA
- راهنمای مهندسی انتخاب، نصب و راه‌اندازی فلومتر التراسونیک — NICO-EDU-FLW-L2-012-FA

این سند مشخصهٔ هیچ محصول فلومتر NICO را تأیید یا ادعا نمی‌کند؛ مشخصات محصول فقط از مدارک تأییدشدهٔ NICO گرفته می‌شود.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه