NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

LEVEL 3 — ADVANCED ENGINEERING

مهندسی پیشرفتهٔ اندازه‌گیری دما

تطبیق سنسور، پاسخ دینامیکی، خطا و عدم‌قطعیت حلقه

Advanced Engineering of Temperature Measurement Loops — Sensor Matching, Dynamic Response and Measurement Uncertainty

مدل کامل حلقهٔ Pt100 و ترموکوپل، خطای سیم و خودگرمایی، CJC، دقت ترکیبی، ثابت زمانی ترموول، Damping ، خطای 4–20 mA و HART، بودجهٔ عدم‌قطعیت و FMEA.

COMPLETE MEASUREMENT LOOP: WHERE DELAY, ERROR, DRIFT AND UNCERTAINTY ENTER

	PROCESS	THERMOWELL	RTD SENSOR	TRANSMITTER	4–20 mA / HART	DCS
DELAY	-	tau_w	tau_s	tau_d	-	scan
ERROR	-	conduction	tolerance, self-heat	reference	D/A, load	AI, scaling
DRIFT	-	-	R0 shift	stability	-	-
UNCERTAINTY	-	u4	u1, u2	u3, u5	-	u7

u6 (calibration reference) acts on the whole chain; tau = time constant; u = standard uncertainty.

شکل ۱ — مدل کامل حلقه: ورود تأخیر، خطا، رانش و عدم‌قطعیت در هر بلوک

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-TMP-L3-013-FA	Rev00	LEVEL 3	October 2026 — **مهر ۱۴۰۵**

1 هدف، پرسش مهندسی و مبنای طراحی

پرسش مهندسی این سند: **در یک حلقهٔ دمای واقعی — Pt100، ترموول، ترانسمیتر HART و DCS — خطای هر بلوک چقدر است، چگونه ترکیب می‌شود و سرعت پاسخ کل حلقه چقدر است؟** پاسخ با مدل‌سازی هر بلوک، محاسبهٔ عدم‌قطعیت استاندارد آن و ترکیب با روش GUM داده می‌شود. مفاهیم پایه در NICO-EDU-TMP-L1-011-FA و سیم‌بندی و راه‌اندازی در NICO-EDU-TMP-L2-012-FA آمده‌اند؛ تحلیل ترموول در NICO-EDU-TWL-L3-006-FA انجام شده است.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. خطا، تأخیر، رانش و عدم‌قطعیت هر بلوک حلقهٔ دما را مدل کنید.
2. رابطهٔ Callendar–Van Dusen، خطای خطی‌سازی، خطای سیم رابط و خودگرمایی RTD را حساب کنید.
3. خطای CJC ترموکوپل و اثر تطبیق سنسور–ترانسمیتر را برآورد کنید.
4. دقت ترکیبی را با روش Root-Sum-Square به‌جای جمع ساده بسازید و Uncertainty Budget با k = 2 Coverage Factor تنظیم کنید.
5. ثابت زمانی ترکیبی ترموول، سنسور و Damping را تحلیل و مصالحهٔ نویز و تأخیر را ارزیابی کنید.
6. مسیر آنالوگ و دیجیتال HART را مقایسه، FMEA تهیه و نتیجه را در یک مثال کامل تأیید کنید.

DESIGN BASIS — مبنای طراحی این سند

1. حلقهٔ مرجع: Pt100 سه سیمه (Class A فرضی) داخل ترموول، ترانسمیتر Head Mount هوشمند با HART و ورودی آنالوگ DCS؛ دمای عادی 120 °C، دمای فرآیند 180…20 °C.
2. محدودهٔ پیکربندی 200…0 °C (Span = 200 °C)؛ جریان در 120 °C برابر 13.6 mA؛ ضریب تبدیل 12.5 °C/mA.
3. دمای محیط ترانسمیتر 60…20 °C؛ کابل 4–20 mA به طول بلند؛ ورودی DCS آنالوگ 250 ohm (1–5 V).
4. سطح اطمینان گزارش: عدم‌قطعیت گسترده Expanded Uncertainty با k = 2 (حدود ۹۵ درصد در توزیع نرمال).
5. ارتباط با ترموول: m·L = 8 از طراحی ترموول (راهنمای NICO-EDU-TWL-L3-006-FA) به‌عنوان ورودی فرضی.

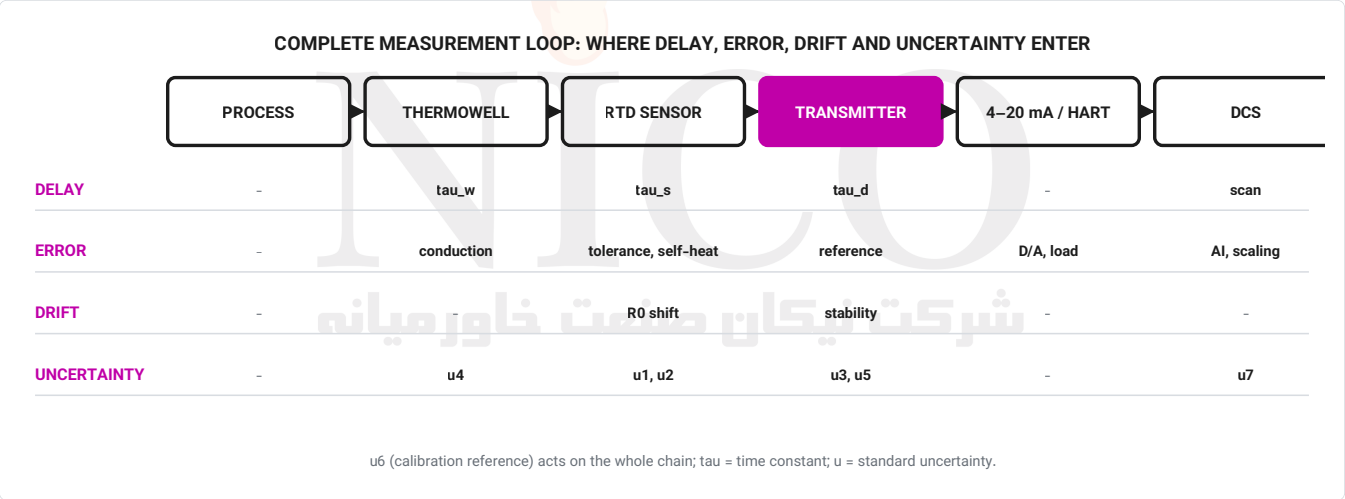
ASSUMPTIONS — فرض‌های مدل (نیست NICO همه آموزشی؛ هیچ‌کدام دادهٔ محصول)

1. تلرانس Pt100 برابر ±(0.15 + 0.002|t|) °C (Class A) و برای Class B ±(0.30 + 0.005|t|) °C.
   مبنا: فرمول‌های رایج استاندارد IEC 60751؛ REQUIRES SOURCE VERIFICATION.
2. ضرایب Callendar–Van Dusen: $A = 3.9083\times10^{-3}$، $B = -5.775\times10^{-7}$، $C = -4.183\times10^{-12}$ (R0 = 100 ohm).
   مبنا: مقادیر رایج منتشرشده؛ REQUIRES SOURCE VERIFICATION با ویرایش جاری.
3. جریان تحریک 0.5 mA و ضریب خودگرمایی 0.2 °C/mW در ترموول.
   مبنا: فرض آموزشی؛ باید از برگهٔ فنی سنسور و ترانسمیتر گرفته شود.

4. عدم‌تطابق سیم سه‌سیمه 0.02 ohm؛ توزیع مستطیلی برای همهٔ حدود خطا (u = a / √3).
   مبنا: روش نوع B در JCGM 100:2008؛ ویرایش و نسخه باید راستی‌آزمایی شود.
5. ترانسمیتر: دقت مرجع ±0.10 °C، D/A برابر 0.02 % Span، پایداری ±0.05 °C در سال، اثر دمای محیط 0.003 °C/°C.
   مبنا: مدل فرضی، نه مشخصات محصول؛ مقادیر واقعی از برگهٔ فنی همان مدل.
6. ورودی آنالوگ DCS برابر ±0.1 % از گسترهٔ 16 mA؛ Calibration مرجع 0.05 °C با k = 1.
7. ثابت‌های زمانی: ترموول و لایهٔ فیلم 12 s، سنسور در 6 s Bore، 2 s Damping؛ فاصلهٔ به‌روزرسانی 0.5 s؛ شیب فرآیند 2 °C/min.
   مبنا: فرض؛ مقادیر واقعی باید از اندازه‌گیری یا مدل ترموول گرفته شود.

2 مدل کامل حلقهٔ اندازه‌گیری دما

هر حلقه از بلوک‌هایی ساخته می‌شود که هرکدام می‌توانند چهار اثر داشته باشند: **تأخیر** (پاسخ را به عقب می‌اندازند)، **خطای ایستا** (مقدار نهایی را جابه‌جا می‌کنند)، **رانش** (خطا را در طول زمان تغییر می‌دهند) و **عدم‌قطعیت** (نادانستگی باقی‌مانده دربارهٔ خطای ایستا). شکل ۱ این چهار اثر را به بلوک‌های فرآیند، ترموول، سنسور، ترانسمیتر، سیگنال و DCS نسبت می‌دهد. جدول ۱ همان نگاشت را با نام عامل‌هایی که در بودجهٔ عدم‌قطعیت (بخش ۱۷) به‌کار می‌روند می‌آورد.



شکل ۱ — بلوک‌های حلقهٔ دما و محل ورود تأخیر، خطا، رانش و عدم‌قطعیت؛ u6 روی کل زنجیره اثر می‌گذارد

جدول ۱ — عوامل خطا و عدم‌قطعیت در حلقه

نماد	عامل	ماهیت	بلوک
u1	تلرانس سنسور و خودگرمایی	خطای ایستا؛ وابسته به کلاس و دما	سنسور
u2	عدم‌تطابق سیم رابط	خطای ایستا؛ وابسته به نصب	سیم‌بندی
u3	دقت مرجع، پایداری و D/A	ایستا و رانش	ترانسمیتر
u4	خطای رسانش ترموول	ایستا؛ وابسته به m·L	ترموول
u5	اثر دمای محیط	ایستا؛ وابسته به محیط	ترانسمیتر
u6	مرجع کالیبراسیون	ایستا؛ ردیابی	کل حلقه
u7	ورودی آنالوگ DCS	ایستا؛ فقط در مسیر آنالوگ	DCS
tau	ثابت‌های زمانی	تأخیر؛ خطای دینامیکی در شیب	ترموول، سنسور، Damping

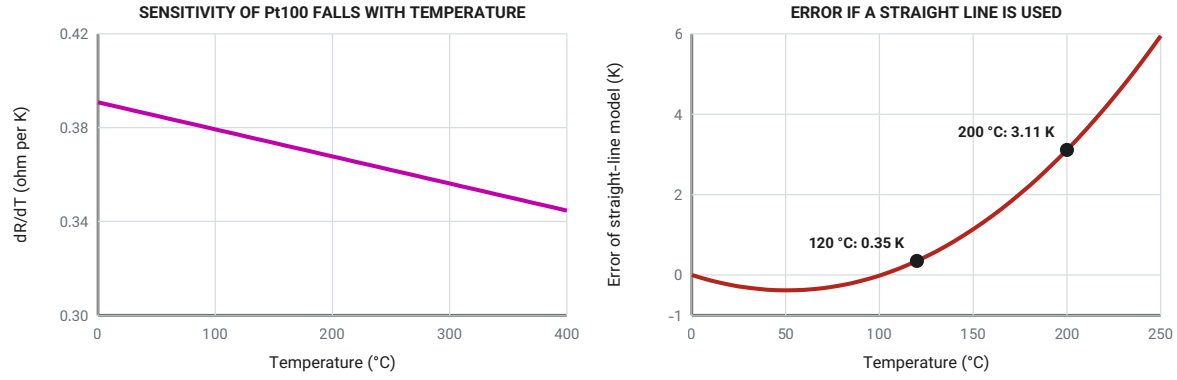
3 ریاضیات Pt100: ضریب دمایی و Callendar–Van Dusen

مقاومت پلاتین با دما تقریباً خطی تغییر می‌کند و ضریب دمایی نمونه (alpha) برای Pt100 صنعتی حدود 0.00385 1/°C است. رابطهٔ دقیق‌تر، Callendar–Van Dusen (CVD) است که در دمای صفر و بالاتر یک چندجمله‌ای درجه دوم ساده است و در دماهای منفی جملهٔ اضافی دارد. ضرایب A، B و C نیاز به راستی‌آزمایی با ویرایش جاری IEC 60751 دارند.

$$R(t) = R_0 \times (1 + A\cdot t + B\cdot t^2) \quad (t \geq 0\ ^\circ C)\ ;\ R(t) = R_0 \times [1 + A\cdot t + B\cdot t^2 + C\cdot(t - 100)\cdot t^3] \quad (t < 0\ ^\circ C) \tag{1}$$

$R(t)$	مقاومت سنسور در دمای t	ohm
R_0	مقاومت در صفر درجه؛ 100 ohm برای Pt100	ohm
t	دما	°C
A, B, C	ضرایب CVD؛ مقادیر بخش فرض‌ها؛ REQUIRES SOURCE VERIFICATION	—

مشتق این رابطه، حساسیت سنسور (dR/dt) را می‌دهد که با دما کاهش می‌یابد؛ از حدود 0.39 ohm/°C در صفر درجه تا 0.32 ohm/°C در 600 °C (محاسبه). این کاهش برای تأثیر مقاومت سیم و نویز بر خطای دمایی مهم است: در دمای بالاتر، همان خطای مقاومتی خطای دمایی بزرگ‌تری می‌دهد. مقاومت در نقاط کلیدی (محاسبه): R(0) = 100.00 ohm، R(120) = 146.07 ohm، R(200) = 175.86 ohm. اگر ترانسمیتر به‌جای CVD از خط راست alpha ثابت استفاده کند، خطای خطی‌سازی در 120 °C حدود 0.35 °C و در 200 °C حدود 3.11 °C می‌شود (شکل ۲)؛ بنابراین ترانسمیتر باید از منحنی واقعی استفاده کند.



شکل ۲ — کاهش حساسیت Pt100 با دما و خطای مدل خط راست نسبت به CVD (محاسبه)

4 خطای سیم رابط در دو، سه و چهار سیمه

اگر R_L مقاومت هر سیم رابط و dR/dt حساسیت سنسور باشد، در **دو سیمه** خطای ایستا 2·R_L / (dR/dt) به قرائت اضافه می‌شود. برای کابل 1.5 mm² به طول یک‌طرفه 50 m مس با مقاومت ویژهٔ 0.0172 ohm·mm²/m، در 120 °C با dR/dt = 0.377 ohm/°C خطا حدود 3.04 °C می‌شود. در **سه سیمه** ترانسمیتر یک سیم را از دو سیم دیگر کم می‌کند و فقط **اختلاف** مقاومت دو سیم باقی می‌ماند: برای 0.02 ohm عدم‌تطابق، خطا برابر 0.02 / 0.377 = 0.053 °C است. در **چهار سیمه** این سهم عملاً حذف می‌شود. نکتهٔ مهم این است که عدم‌تطابق سه‌سیمه تصادفی نیست، بلکه از ترمینال، تفاوت طول یا کیفیت اتصال می‌آید و باید در بودجه با توزیع مستطیلی لحاظ شود (u2 / u1).

5 خودگرمایی RTD

جریان تحریک در سنسور توان گرما می‌دهد و دمای المان را از دمای محیط بالاتر می‌برد. اگر I جریان، R مقاومت سنسور و theta ضریب خودگرمایی (افزایش دما به ازای هر میلی‌وات) باشد:

$$\Delta T_{sh} = I^2 \times R \times \text{theta} \qquad (2)$$

ΔT_{sh}	خطای خودگرمایی	°C
I	جریان تحریک سنسور	A
R	مقاومت سنسور در دمای کار	ohm
theta	ضریب خودگرمایی؛ وابسته به ساخت و تماس حرارتی؛ فرض 0.2 °C/mW	°C/mW

با I = 0.5 mA و R(120) = 146.07 ohm: توان برابر $(0.5\times10^{-3})^2 \times 146.07 = 36.5\ \mu W = 0.0365\ mW$ و خودگرمایی 0.0365 × 0.2 = 0.0073 °C است. این مقدار در ترموول با تماس خوب ناچیز است، اما در سنسور آزاد در هوای ساکن یا با جریان تحریک بزرگ‌تر می‌تواند چند برابر شود؛ به همین دلیل مشخصهٔ خودگرمایی باید از برگهٔ فنی و در شرایط واقعی خوانده شود.

6 فیزیک ترموکوپل: Seebeck، ولتاژ و غیرخطی بودن

ولتاژ ترموکوپل از اختلاف دمای دو اتصال و ضریب Seebeck (S) نتیجه می‌شود. برای تقریب نزدیک به دمای معین:

$$E \approx S \times (T_{hot} - T_{ref}) \quad (3)$$

E	ولتاژ خروجی ترموکوپل	µV
S	ضریب Seebeck مؤثر در بازهٔ دمایی؛ برای Type K مرتبهٔ 41 µV/°C (تقریبی، REQUIRES SOURCE VERIFICATION)	µV/°C
T_{hot}	دمای Hot Junction	°C
T_{ref}	دمای اتصال مرجع (Reference Junction)	°C

رابطهٔ بالا فقط تقریب موضعی است؛ مشخصهٔ واقعی هر نوع غیرخطی است و در IEC 60584-1 به‌صورت جدول یا چندجمله‌ای آمده است که ترانسمیتر باید از آن استفاده کند. دو نتیجهٔ مهندسی مهم است: نخست، حساسیت ترموکوپل کوچک است؛ برای Type K خطای ورودی 5 µV حدود 5 / 41 = 0.12 °C خطای دما می‌سازد؛ دوم، Reference Junction باید با دقت جبران شود، چون خطای آن مستقیماً به نتیجه می‌رود.

7 جبران اتصال مرجع (CJC) و منابع خطای آن

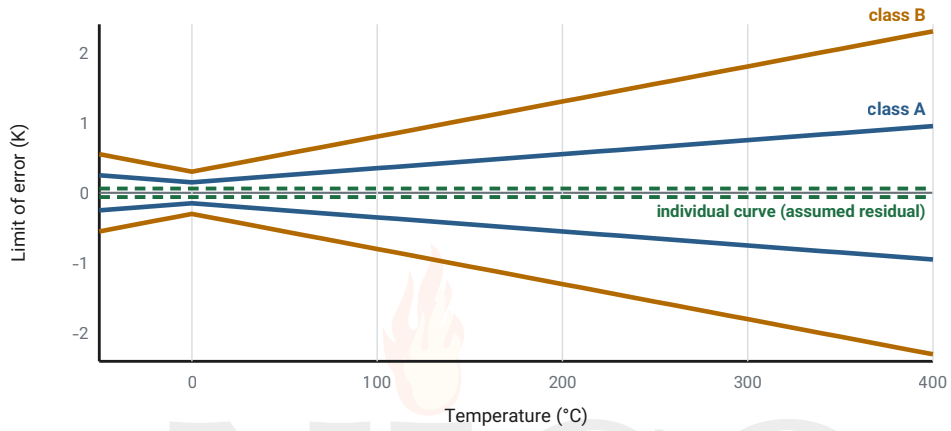
ترانسمیتر دمای Reference Junction را با سنسور داخلی (CJC) اندازه می‌گیرد و معادل ولتاژ آن را به ولتاژ اندازه‌گیری‌شده اضافه می‌کند؛ سپس دمای Hot Junction را از مشخصهٔ ترموکوپل می‌خواند. سه منبع خطا وجود دارد. اول، **خطای خود سنسور** CJC، که مستقیم به قرائت منتقل می‌شود (فرض 0.5 °C). دوم، **گرادیان دما** بین سنسور CJC و ترمینال‌های واقعی؛ این گرادیان از تابش آفتاب، گرمای اجزای الکترونیک یا جریان هوا می‌آید و می‌تواند چند درجه باشد. سوم، **دمای محفظه** که با ساعت‌های روز و بار کاری تغییر می‌کند. برای مثال ترموکوپل Type K با خطای ورودی 5 µV و خطای CJC 0.5 °C (هر دو مستطیلی) عدم‌قطعیت استاندارد 0.30 °C = √((0.5/√3)² + (0.122/√3)²) و U (k=2) ≈ 0.59 °C می‌دهد؛ اگر گرادیان 3 °C هم بدون جبران باقی بماند، U به حدود 3.5 °C می‌رسد.

8 خطی‌سازی: سیگنال سنسور در برابر دمای خطی‌شده

خروجی 4–20 mA ترانسمیتر دما باید با **دما** خطی باشد، نه با مقاومت یا ولتاژ سنسور. ترانسمیتر ابتدا سیگنال را به مقاومت یا ولتاژ تبدیل، سپس با رابطهٔ استاندارد به دما تبدیل (Linearization) و در پایان مقیاس می‌کند. بنابراین «خطی بودن Pt100» یا «خطی بودن ترموکوپل» مشخصه خود سنسور است، اما خطی بودن خروجی ترانسمیتر نسبت به دما وظیفهٔ Linearization است و به نوع سنسور و منحنی بارگذاری‌شده بستگی دارد. اگر نوع سنسور اشتباه یا منحنی با سنسور هم‌خوان نباشد، خروجی نسبت به دما غیرخطی و دارای خطای سیستماتیک می‌شود.

9 تطبیق سنسور و ترانسمیتر (Sensor Matching)

ترانسمیتر معمولاً منحنی عمومی Pt100 را به‌کار می‌برد و فرض می‌کند سنسور در محدودهٔ تلرانس Class A یا Class B به آن نزدیک است. بخش عمدهٔ خطای حلقه همین تلرانس است: در 120 °C حدود ±0.39 °C برای Class A و ±0.90 °C برای Class B (فرمول فرضی). برخی ترانسمیترها امکان Sensor Matching دارند: ضرایب CVD هر سنسور مشخص، پس از کالیبراسیون جداگانه، در ترانسمیتر بارگذاری می‌شود و خطای منحنی عمومی حذف می‌شود؛ خطای باقی‌مانده به عدم‌قطعیت کالیبراسیون آن سنسور محدود می‌شود. این قابلیت در همهٔ مدل‌ها وجود ندارد و شرط آن، سنسور کالیبره‌شده با ضرایب مشخص و مستند است.



شکل ۳ — باند تلرانس Class A و Class B در مقابل باند باقی‌ماندهٔ فرضی پس از Sensor Matching

اثر آن بر بودجهٔ این سند (بخش ۱۷) روشن است: اگر سهم تلرانس سنسور 0.225 °C (مستطیلی از 0.39 °C) با باقی‌ماندهٔ فرضی 0.03 °C جایگزین شود، عدم‌قطعیت گسترده از 0.56 °C به 0.34 °C می‌رسد. برای هر پروژه باید بررسی شود که برگهٔ کالیبراسیون سنسور ضرایب لازم را می‌دهد و ترانسمیتر واقعاً از آن‌ها استفاده می‌کند؛ ادعای «Sensor Matching» بدون سند نباید پذیرفته شود.

10 مدل دقت ترانسمیتر

دقت ترانسمیتر دما چندین جمله دارد و در برگهٔ فنی معمولاً به‌صورت خطای مطلق (برحسب درجه) برای ورودی و درصدی از Span برای خروجی آنالوگ آمده است. جدول ۲ جمله‌های مدل را معرفی می‌کند. تأکید می‌شود که مقادیر ستون آخر فرض آموزشی این سند هستند، نه مشخصات محصول.

جدول ۲ — جمله‌های مدل دقت ترانسمیتر

جمله	توضیح	مقدار فرضی
Reference Accuracy	دقت در شرایط مرجع (محیط مرجع، تغذیه نام‌گذاری‌شده)	±0.10 °C
Ambient Temperature Effect	اثر انحراف دمای محیط از مرجع، به‌صورت ضریب بر درجه	0.003 °C/°C
اثر تغذیه	اثر تغییر ولتاژ تغذیهٔ حلقه در محدودهٔ مجاز	ناچیز (فرض)
Stability	رانش در بازهٔ زمانی مشخص، مثلاً یک سال	±0.05 °C در سال
A/D	خطا و Resolution تبدیل آنالوگ به دیجیتال ورودی	در دقت مرجع لحاظ
Linearization	خطای تقریب منحنی استاندارد در ترانسمیتر	در دقت مرجع لحاظ
D/A **و خروجی آنالوگ**	خطای خروجی 4–20 mA به‌صورت درصد Span	0.04 °C = Span 0.02 %
Sensor Matching	حذف خطای منحنی عمومی در صورت وجود قابلیت	بخش ۹

11 دقت ترکیبی: جمع ساده درست نیست

جمع حسابی حدود خطا، بدبینانه‌ترین حالت را می‌دهد که تقریباً هیچ‌گاه رخ نمی‌دهد، زیرا فرض می‌کند همهٔ خطاها هم‌زمان در یک جهت و در حد بالا باشند. روش مرجع مهندسی، GUM (JCGM 100:2008) است: هر سهم به عدم‌قطعیت استاندارد تبدیل می‌شود و سپس مجذور مجموع مربعات (Root-Sum-Square) با ضرایب حساسیت محاسبه می‌شود. برای حدود خطای ±a با توزیع مستطیلی، عدم‌قطعیت استاندارد u = a / √3 است.

$$u_c = \sqrt{\left(\text{sum of } c_i^2 \cdot u_i^2\right)} \;;\; U = k \times u_c \qquad (4)$$

u_i	عدم‌قطعیت استاندارد سهم i (a / √3 برای حد مستطیلی a)	°C
c_i	ضریب حساسیت سهم i نسبت به خروجی؛ در این مثال همه ۱ (بر حسب °C)	—
u_c	عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی (Combined Standard Uncertainty)	°C
k	ضریب پوشش (Coverage Factor)؛ k = 2 برای حدود ۹۵ درصد در توزیع نرمال	—
U	عدم‌قطعیت گسترده (Expanded Uncertainty)	°C

در این سند جمع بدترین حالت سهم‌ها (مجموع حدود خطا) 1.13 °C است، در حالی که U با Root-Sum-Square برابر 0.56 °C است: تقریباً نصف. استفاده از جمع ساده ممکن است به انتخاب بی‌دلیل سنسور یا ترانسمیتر گران‌تر بینجامد؛ استفاده از Root-Sum-Square بدون بررسی استقلال و بدون ثبت فرض‌ها هم می‌تواند ادعای دقت بیش از واقعیت بدهد. به همین دلیل بودجهٔ بخش ۱۷ هر سهم و فرض آن را ثبت می‌کند.

12 پاسخ دینامیکی ترموول و مدل مرتبهٔ اول

ترموول، سنسور را از فرآیند جدا می‌کند و در برابر آن تأخیر ایجاد می‌کند (تحلیل ترموول در NICO-EDU-TWL-L3-006-FA). اگر زنجیرهٔ انتقال حرارت هر مرحله را با یک مقاومت و ظرفیت گرمایی مدل کنیم، هر مرحله یک پاسخ مرتبهٔ اول است. برای یک مرحله با ثابت زمانی tau پس از پلهٔ دمای T_f:

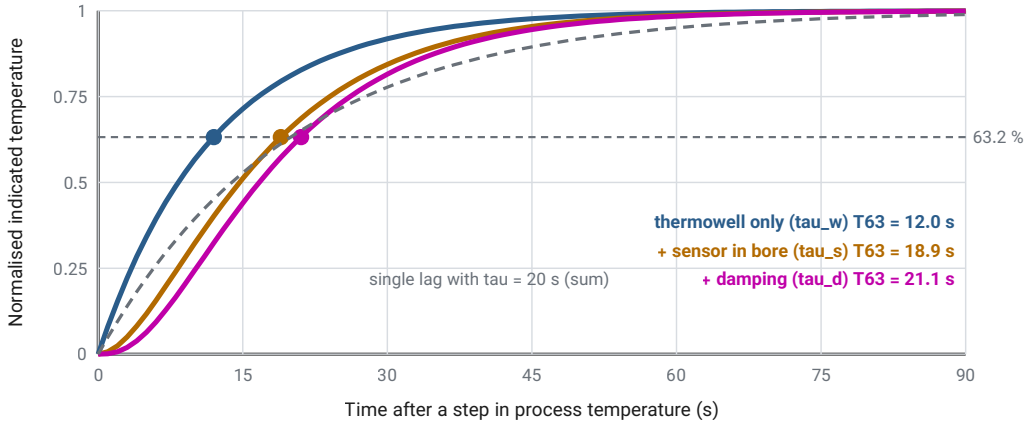
$$T(t) = T_f - (T_f - T_0) \times e^{-t / tau} \quad (5)$$

$T(t)$	دمای نشان‌داده‌شده در زمان t	°C
T_f , T_0	دمای نهایی و اولیه فرآیند	°C
tau	ثابت زمانی؛ زمان رسیدن به ۶۳٫۲٪ تغییر (T63)	s

برای یک مرحله T63 برابر tau، T95 حدود 3 tau و زمان نشست (Settling Time) تا ۹۹ درصد حدود 4.6 tau است. نکتهٔ کلیدی این است که ترموول **مقدار نهایی** را تغییر نمی‌دهد؛ فقط زمان رسیدن به آن را بیشتر می‌کند. در شیب دمایی پیوسته، این تأخیر به خطای ایستای دینامیکی تبدیل می‌شود: برای شیب r و ثابت زمانی کل tau ، قرائت پس از گذر زمان به اندازهٔ r × tau از مقدار واقعی عقب می‌ماند.

13 ثابت زمانی ترکیبی: فرآیند، ترموول، سنسور و Damping

در عمل چند مرحله پشت سر هم قرار می‌گیرند: انتقال از سیال به دیوارهٔ ترموول، رسانش در دیواره، عبور از Air Gap، پاسخ سنسور و در نهایت فیلتر Damping ترانسمیتر. با فرض‌های سند (tau_w = 12 s، tau_s = 6 s، tau_d = 2 s) سه برآورد ممکن است. جمع ساده 20 s است. Root-Sum-Square 13.6 s می‌دهد، که برای مراحل هم‌مرتبه درست نیست. حل عددی زنجیره، T63 برابر 21.1 s و T95 برابر 46.3 s می‌دهد؛ یعنی T63 کمی بیشتر از جمع ساده است (چون پاسخ زنجیره‌ای Sشکل است) و T95 کمتر از یک مرحلهٔ واحد با tau = 20 s (که 59.9 s است).



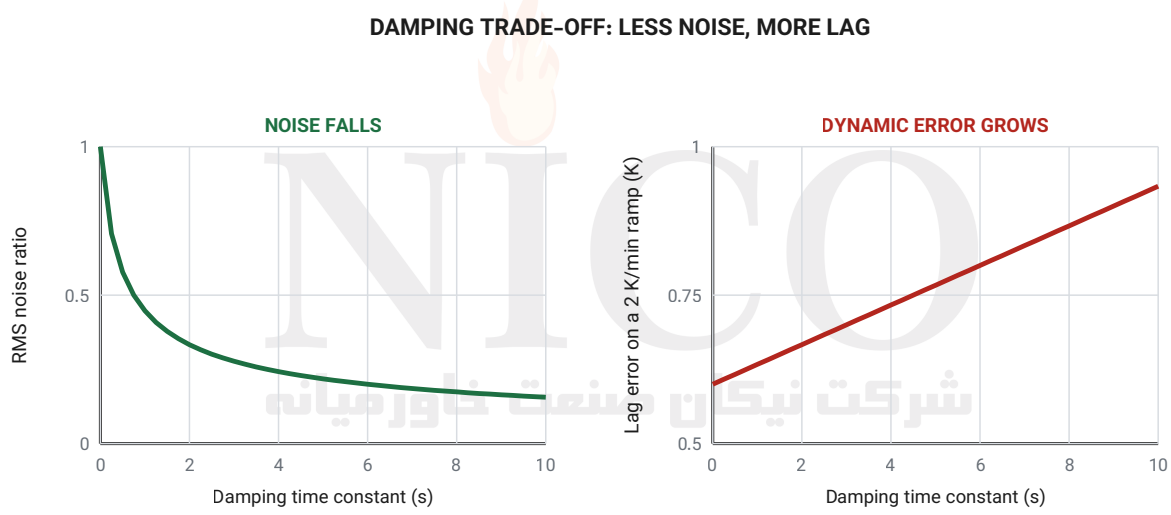
شکل ۴ – پاسخ پله در سه مرحلهٔ متوالی؛ T63 به ترتیب 12.0 s، 18.9 s و 21.1 s؛ خط‌چین یک مرحلهٔ واحد با tau = 20 s

جدول ۳ — برآورد ثابت زمانی ترکیبی و خطای شیب 2 °C/min (محاسبه)

روش	T63 (s)	خطای دینامیکی در شیب (°C)	ملاحظه
بدون Damping **(ترموول + سنسور)**	19.0	0.60	حل عددی دو مرحله
جمع ساده ثابت‌ها	20.0	0.67	برای خطای شیب پایدار دقیق است
Root-Sum-Square **ثابت‌ها**	13.6	—	برای T63 این زنجیره درست نیست
حل عددی سه مرحله	21.1	0.67	مرجع این سند

14 Damping: مصالحهٔ نویز و تأخیر

Damping ترانسمیتر یک فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ اول است. افزایش آن نویز قرائت را کم می‌کند، اما ثابت زمانی کل را بزرگ‌تر و خطای دینامیکی را بیشتر می‌کند. برای نویز سفید با فاصلهٔ به‌روزرسانی $T_s = 0.5$ s و فیلتر با ضریب $alpha_f = T_s / (tau_d + T_s)$، نسبت انحراف معیار خروجی به ورودی برابر $\sqrt{alpha_f / (2 - alpha_f)}$ است. جدول ۴ نتیجه را برای مقادیر مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵ — اثر Damping: کاهش نویز و افزایش خطای دینامیکی در شیب 2 °C/min (فرض‌های بخش ۱)

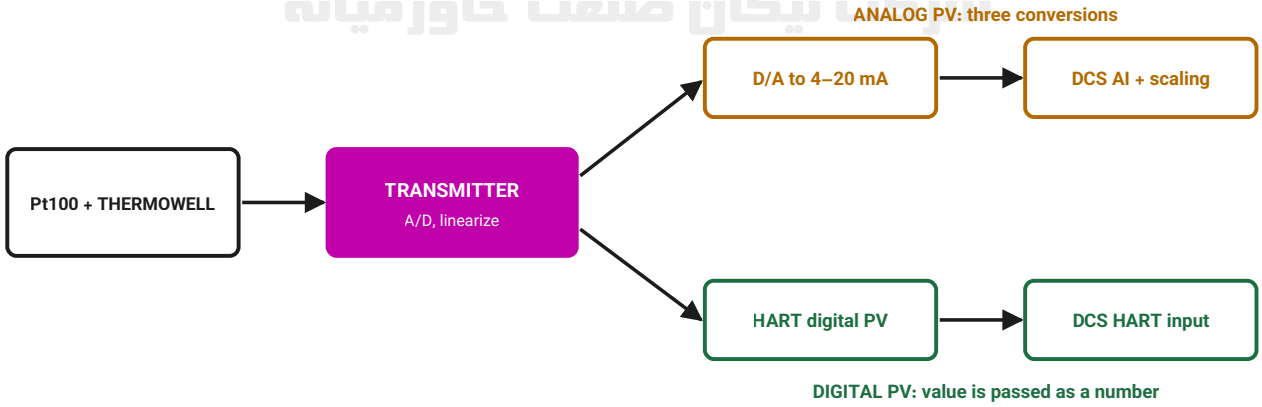
جدول ۴ — Damping، نسبت نویز و خطای شیب (محاسبه)

Damping (s)	نسبت RMS نویز	خطای شیب 2 °C/min (°C)
0	1.00	0.60
1	0.45	0.63
2	0.33	0.67
5	0.22	0.77
10	0.16	0.93

تحلیل نشان می‌دهد وقتی مجموع ثابت‌های زمانی فرآیند (18 s) بسیار بزرگ‌تر از Damping است، افزودن Damping 2 s تقریباً هزینه ندارد (حدود 0.07 °C خطای شیب) ولی نویز را به حدود یک‌سوم می‌رساند. در فرآیند سریع یا حلقهٔ کنترل، همین Damping می‌تواند پایداری حلقه را مختل کند؛ تصمیم باید با ثابت‌های زمانی واقعی و هدف کنترلی گرفته شود.

15 خطای مسیر 4–20 mA و مسیر دیجیتال HART

در مسیر آنالوگ، مقدار دما سه بار تبدیل می‌شود: A/D در ترانسمیتر، D/A برای تولید جریان و A/D در کارت ورودی DCS. هر تبدیل خطا و Resolution دارد. با Span = 200 °C، ضریب تبدیل 200/16 = 12.5 °C/mA است؛ پس هر 1 µA خطای جریان معادل 0.0125 °C است. خطای D/A (0.02 % Span = 0.04 °C) و ورودی DCS (0.1 % از 16 mA یعنی 0.2 °C) در بودجه دیده می‌شوند؛ Resolution تبدیل ۱۶ بیتی (حدود 0.003 °C) ناچیز است. اگر DCS متغیر فرآیند (Primary Variable) را از طریق HART به‌صورت دیجیتال بخواند، خطای D/A و ورودی آنالوگ حذف می‌شود و فقط خطای ترانسمیتر و سنسور می‌ماند (شکل ۶).



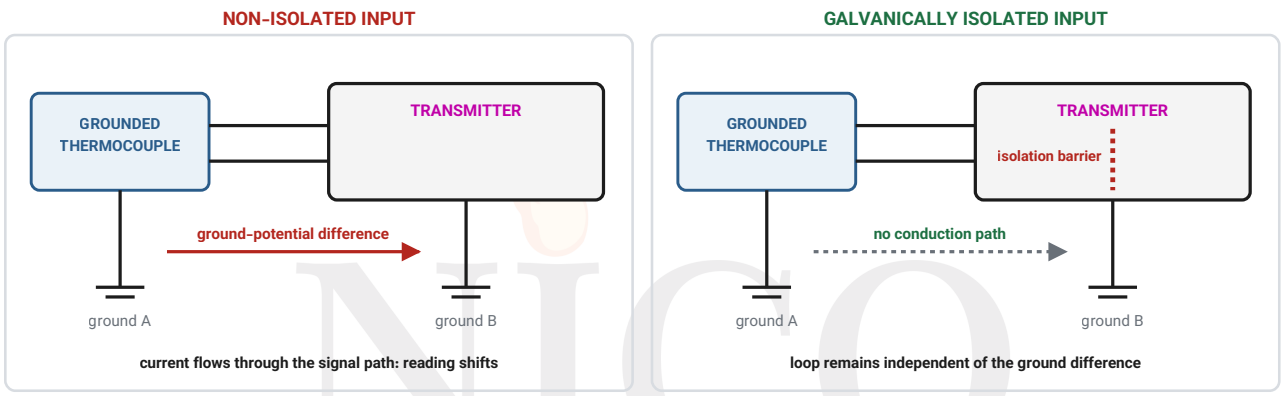
شکل ۶ — مسیر آنالوگ (D/A و ورودی DCS) در برابر مسیر دیجیتال HART برای Primary Variable

IMPORTANT – مسیر دیجیتال به معنای حذف سیگنال آنالوگ نیست

خواندن دیجیتال Primary Variable مزیت دقت دارد، اما حلقهٔ 4–20 mA برای کنترل، هشدار خرابی و ایمنی هنوز لازم است. پیکربندی DCS باید مشخص کند کدام مقدار برای کنترل و کدام فقط برای ثبت و نگهداری استفاده می‌شود.

16 اثر محیط، RFI / EMI، ایزولاسیون و رانش

دمای محیط: با ضریب 0.003 °C/°C و انحراف 40 °C از مرجع، اثر 0.12 °C (حد) به بودجه اضافه می‌شود. این سهم با انتقال ترانسمیتر از محل داغ یا با نگهداری محفظه در دمای پایدار کم می‌شود. **نویز:** نویز Common Mode از اختلاف پتانسیل زمین و نویز Differential Mode از کوپل الکترومغناطیسی روی جفت‌سیم می‌آید؛ نویز Common Mode در ورودی ایزوله‌شده بر سیگنال تأثیر کمتری می‌گذارد. VFD، تابش رادیویی و زمین‌های نامتعادل منابع اصلی‌اند. شیلد یک‌طرفه و مسیردهی جدا، سیگنال را حفظ می‌کند. **ایزولاسیون:** ترموکوپل زمین‌شده یا سنسوری با غلاف متصل به سازه می‌تواند با زمین سیستم کنترل اختلاف پتانسیل بسازد؛ Galvanic Isolation از عبور جریان حلقه از مسیر سیگنال جلوگیری می‌کند (شکل ۷).



شکل ۷ – ترموکوپل زمین‌شده با ورودی غیرایزوله و ایزوله؛ وجود ایزولاسیون از برگهٔ فنی مدل خوانده می‌شود

رانش: رانش R0 در Pt100 (مثلاً در اثر تنش مکانیکی و دمای بالا) و پایداری ترانسمیتر خطا را در طول زمان تغییر می‌دهند. با فرض 0.05 °C در سال برای ترانسمیتر، دو برابر کردن فاصلهٔ کالیبراسیون به دو سال، U را فقط از 0.56 °C به 0.57 °C می‌رساند، چون سهم غالب بودجه، تلرانس سنسور است؛ اما رانش واقعی Pt100 و محیط خورنده می‌تواند بسیار بیشتر باشد و تنها با داده‌های As Left / As Found تاریخی تعیین می‌شود.

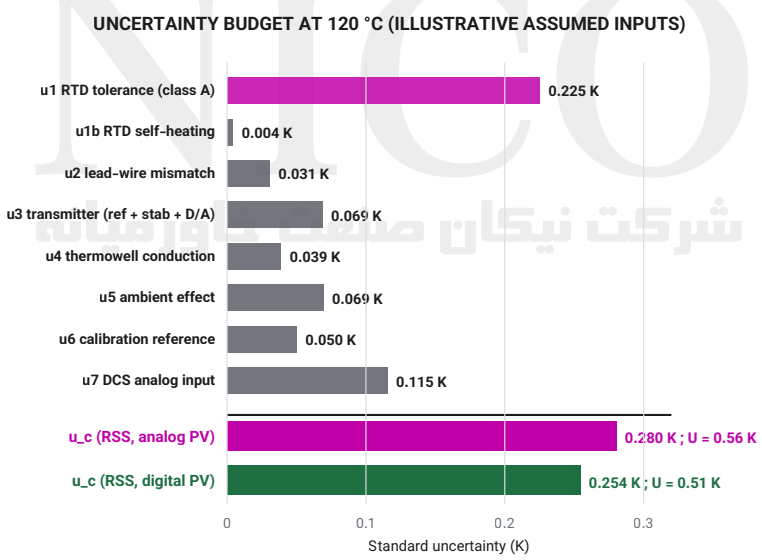
17 بودجهٔ عدم‌قطعیت (Uncertainty Budget)

جدول ۵ همهٔ سهم‌ها را در 120 °C با ورودی‌های بخش فرض‌ها جمع می‌کند. هر ردیف حد خطا (a) و عدم‌قطعیت استاندارد را نشان می‌دهد. توزیع‌ها مستطیلی‌اند، به‌جز u6 که عدم‌قطعیت استاندارد از گواهی کالیبراسیون است. ضرایب حساسیت همه ۱ هستند، چون هر سهم مستقیماً بر حسب °C بیان شده است.

جدول ۵ — بودجهٔ عدم‌قطعیت در 120 °C (مسیر آنالوگ؛ فرض‌های بخش ۱؛ محاسبه)

نماد	سهم	حد خطا a (°C)	u (°C)	سهم از واریانس
u1	تلرانس Pt100 (Class A)	0.390	0.225	64.6 %
u1b	خودگرمایی	0.007	0.004	0.0 %
u2	عدم‌تطابق سیم سه‌سیمه	0.053	0.031	1.2 %
u3	ترانسمیتر: مرجع، پایداری و D/A	0.10 / 0.05 / 0.04	0.069	6.0 %
u4	رسانش ترموول	0.067	0.039	1.9 %
u5	اثر دمای محیط	0.120	0.069	6.1 %
u6	مرجع کالیبراسیون	—	0.050	3.2 %
u7	ورودی آنالوگ DCS	0.200	0.115	17.0 %

$$u_c = \sqrt{(0.225^2 + 0.004^2 + 0.031^2 + 0.069^2 + 0.039^2 + 0.069^2 + 0.050^2 + 0.115^2)} = 0.280\ °C\ ;\ U = 2 \times 0.280 = 0.56\ °C \quad (6)$$



شکل ۸ — بودجهٔ عدم‌قطعیت: سهم هر عامل و مقایسهٔ u_c در مسیر آنالوگ و دیجیتال

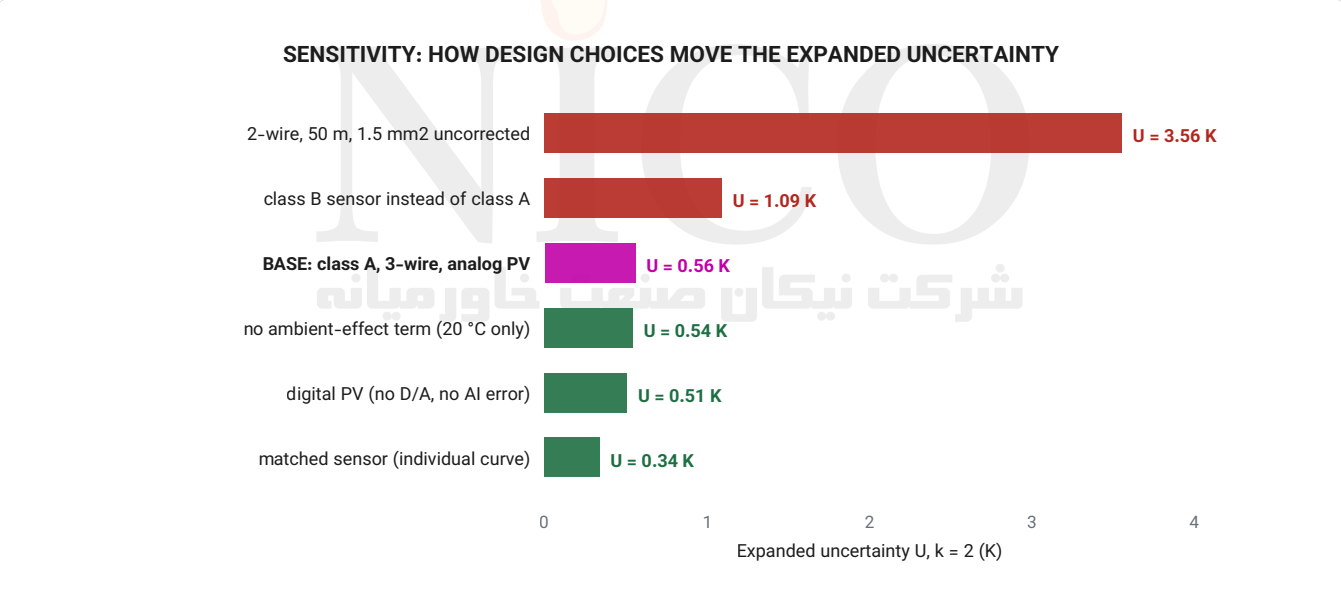
تلرانس سنسور u1 حدود دو سوم واریانس را می‌سازد؛ پس بیشترین بهبود دقت از انتخاب سنسور بهتر یا Sensor Matching می‌آید، نه از ارتقای ترانسمیتر. ورودی آنالوگ u7 DCS دومین سهم است (حدود ۱۷٪) و با خواندن دیجیتال Primary Variable حذف می‌شود: u_c از 0.280 °C به 0.254 °C و U به 0.51 °C می‌رسد.

18 تحلیل حساسیت: کدام تصمیم طراحی بیشترین اثر را دارد؟

بودجهٔ عدم‌قطعیت نشان می‌دهد هر سهم چقدر بزرگ است؛ تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) نشان می‌دهد **تغییر کدام تصمیم طراحی** عدد نهایی را بیشتر جابه‌جا می‌کند. روش ساده این است که یک انتخاب را عوض کنیم، بودجهٔ بخش ۱۷ را دوباره حساب کنیم و Expanded Uncertainty را با حالت پایه مقایسه کنیم. حالت پایه همان حلقهٔ مرجع است: Pt100 سه‌سیمهٔ Class A، ترانسمیتر با خروجی آنالوگ و U برابر 0.56 °C.

جدول ۶ — اثر تغییر یک تصمیم طراحی بر عدم‌قطعیت گسترده (k = 2؛ محاسبه)

تغییر نسبت به حالت پایه	U (°C)	نسبت به پایه
دوسیمه با کابل مسی 1.5 mm² **و طول** 50 m**، بدون جبران**	3.56	حدود ۶٫۴ برابر
سنسور Class B **به‌جای** Class A	1.09	حدود ۱٫۹ برابر
حالت پایه (Class A**، سه‌سیمه، خروجی آنالوگ**)	0.56	مرجع
حذف اثر دمای محیط (فقط محیط 20 °C)	0.54	حدود ۳٪ کمتر
خواندن دیجیتال Primary Variable **از طریق** HART	0.51	حدود ۹٪ کمتر
سنسور تطبیق‌یافته (Sensor Matching)	0.34	حدود ۴۰٪ کمتر



شکل ۹ — حساسیت عدم‌قطعیت گسترده به تصمیم‌های طراحی؛ سیم‌بندی نادرست و کلاس سنسور بیشترین اثر را دارند

نتیجه دو بخش دارد. خطای ساختاری مانند دوسیمه در کابل بلند، بزرگ‌تر از همهٔ بهبودهای ظریف ترانسمیتر است؛ هیچ ترانسمیتر دقیقی آن را جبران نمی‌کند. وقتی ساختار درست باشد، بزرگ‌ترین اهرم دقت تلرانس سنسور است: Sensor Matching حدود ۴۰٪ و خواندن دیجیتال حدود ۹٪ می‌کاهد. حذف اثر محیط تقریباً بی‌اثر است، چون سهم آن کوچک است. حساسیت به پایداری هم کم است: دو برابر کردن رانش سالانه (دو سال بدون کالیبراسیون) U را فقط به 0.57 °C می‌رساند. بنابراین سرمایه‌گذاری برای دقت باید به ترتیب روی سیم‌بندی، کلاس یا تطبیق سنسور و سپس مسیر دیجیتال برود.

19 تحلیل حالت‌های خرابی (FMEA)

عدم‌قطعیت خطای «معمولی» را می‌سنجد؛ خرابی‌ها چیز دیگری‌اند. جدول ۷ ده حالت خرابی رایج حلقهٔ دما را کیفی ارزیابی می‌کند. شدت و تشخیص‌پذیری از قضاوت مهندسی در این حلقهٔ مرجع آمده‌اند و عدد RPN محاسبه نشده است، چون بدون دادهٔ نرخ خرابی هر عدد ساختگی خواهد بود.

جدول ۷ — FMEA کیفی حلقهٔ دما (Pt100، ترانسمیتر HART، DCS)

حالت خرابی	اثر روی قرائت	شدت	تشخیص‌پذیری	اقدام پیشگیرانه
قطع سنسور RTD	خروجی به سطح Burnout می‌رود	بالا	خوب (هشدار خرابی)	جهت Upscale یا Downscale با ارزیابی ایمنی؛ مقادیر NAMUR NE 43 از منبع
اتصال‌کوتاه یا نشتی عایق سنسور	قرائت پایین یا ناپایدار	بالا	متوسط	بازرسی عایق؛ آب‌بندی سر اتصال
عدم‌تطابق سیم‌های سه‌سیمه	خطای ثابت چنده‌هم درجه	متوسط	ضعیف	اتصال محکم؛ سیم هم‌جنس؛ چهارسیمه در دقت بالا
قطبیت معکوس ترموکوپل	خطای بزرگ و تغییر جهت	بالا	خوب در راه‌اندازی	آزمون گرمایش؛ کنترل قطبیت
خرابی یا گرادیان سنسور CJC	جابه‌جایی تقریباً یک‌به‌یک قرائت	متوسط	ضعیف	ترمینال دور از منبع گرما؛ مقایسه با مرجع
رانش ترانسمیتر	خطای آهسته و تدریجی	متوسط	ضعیف	برنامهٔ Verification با ثبت As Left / As Found
نوع سنسور یا محدودهٔ نادرست در پیکربندی	خطای بزرگ یا خروج از مقیاس	بالا	خوب در راه‌اندازی	چک‌لیست پیکربندی؛ آزمون حلقه
عدم‌تطابق URV / LRV **با مقیاس** DCS	قرائت متناسب ولی اشتباه	بالا	متوسط	مقایسهٔ قرائت DCS با HART
حلقه زمین (Ground Loop) **یا نویز**	جهش و نوسان قرائت	متوسط	خوب	شیلد یک‌طرفه؛ ایزولاسیون؛ جداسازی مسیر
تنظیم ناخواسته Damping **یا سطح هشدار**	تأخیر کنترل یا هشدار نادرست	متوسط	ضعیف	کنترل تغییر و ثبت پیکربندی

الگوی مشترک جدول این است که خرابی‌های «بی‌صدا» — عدم‌تطابق سیم، رانش، گرادیان CJC و تغییر پیکربندی — تشخیص‌پذیری ضعیف دارند، در حالی که قطع سنسور با هشدار خرابی دیده می‌شود. پس بیشترین ارزش مهندسی در پیشگیری و در Verification دوره‌ای است، نه در تکیه بر آلارم.

20 مثال کامل مهندسی: از انتخاب تا تأیید حلقهٔ Pt100 + ترموول + DCS + HART

این مثال مراحل بخش‌های قبل را در یک حلقه یکپارچه می‌کند. معیار پذیرش فرضی برای یک خط فرآیندی عبارت است از U کمتر یا مساوی 1.0 °C و T63 کمتر یا مساوی 30 s. همهٔ ورودی‌ها از فرض‌های بخش ۱ می‌آیند و دادهٔ محصول NICO نیستند.

مثال ۱ — حلقهٔ دمای 120 °C: دقت، پاسخ و پذیرش EXAMPLE

گام ۱ — محدوده: فرآیند 180…20 °C، عادی 120 °C؛ محدودهٔ 200…0 °C انتخاب می‌شود تا همهٔ فرآیند با حاشیه پوشش یابد.

$$\text{Span} = 200 - 0 = 200\ °C\ ;\ K/mA = 200 / 16 = 12.5\ °C/mA$$

گام ۲ — سنسور: مقاومت و حساسیت Pt100 در 120 °C از Callendar–Van Dusen (REQUIRES SOURCE VERIFICATION):

$$R(120) = 146.068\ ohm\ ;\ dR/dt = 0.3770\ ohm/°C$$

گام ۳ — خروجی:

$$I = 4 + 16 \times (120 - 0) / 200 = 13.6\ mA$$

گام ۴ — عدم‌قطعیت: مطابق جدول ۵، بزرگ‌ترین سهم u1 برابر 0.225 °C و سپس u7 برابر 0.115 °C است.

$$u_c = 0.280\ °C\ ;\ U = 2 \times 0.280 = 0.56\ °C$$

گام ۵ — پاسخ دینامیکی: سه مرحلهٔ متوالی با ثابت‌های زمانی 12 s، 6 s و 2 s:

$$T63 = 21.1\ s\ ;\ T95 = 46.3\ s\ ;\ lag(ramp\ 2\ °C/min) = (2/60) \times (12 + 6 + 2) = 0.67\ °C$$

گام ۶ — تأیید: U = 0.56 °C کمتر از 1.0 °C است و T63 = 21.1 s کمتر از 30 s؛ هر دو معیار برقرارند. با Class B، U برابر 1.09 °C می‌شود و معیار برقرار نیست؛ با دوسیمهٔ بدون جبران U = 3.56 °C است.

> **نتیجه: حلقهٔ مرجع با Class A، سه‌سیمه و مسیر آنالوگ پذیرفته می‌شود** (U = 0.56 °C، T63 = 21.1 s). **خطای شیب دینامیکی** 0.67 °C **است و در U لحاظ نشده؛ در کنترل باید جداگانه دیده شود. خواندن دیجیتال** U HART **را به** 0.51 °C **می‌رساند.**

FIELD SCENARIO **کنترل دمای مبدل حرارتی پس از افزایش Damping**

«برای کم شدن نوسان قرائت، Damping را از ۲ ثانیه به ۱۰ ثانیه بردیم؛ نوسان قرائت کم شد ولی کنترل‌کننده حالا زیاد از هدف رد می‌شود.»

تحلیل مهندسی: Damping نویز را کم می‌کند ولی تأخیر را به حلقه اضافه می‌کند. با فرض‌های این سند، مجموع ثابت‌های زمانی از 20 s به 28 s می‌رسد و خطای شیب (جدول ۴) از 0.67 °C به 0.93 °C افزایش می‌یابد. کنترل‌کننده تأخیر بیشتری می‌بیند و با تنظیم قبلی ناپایدارتر می‌شود. راه درست یافتن منبع نویز (شیلد، زمین، Ground Loop)، کاهش Damping به مقدار کم و در صورت نیاز بازتنظیم کنترل‌کننده یا بهبود تماس حرارتی سنسور با ترموول است، نه پنهان کردن نویز با Damping بزرگ.

21 حدود اعتبار (Limits of Applicability)

نتایج این سند فقط در شرایطی معتبرند که فرض‌های بخش ۱ برقرار باشند. موارد زیر مرز اعتبار را مشخص می‌کنند.

1. تمام مقادیر ورودی (تلرانس، ضرایب ترانسمیتر، ثابت‌های زمانی، اثر محیط، ورودی DCS) فرض آموزشی‌اند؛ برای پروژهٔ واقعی باید با برگهٔ فنی همان مدل و گواهی کالیبراسیون جایگزین شوند.
2. توزیع مستطیلی و ترکیب Root-Sum-Square برای سهم‌های مستقل است؛ اگر خطاها همبسته باشند (مثلاً رانش مشترک دو دستگاه کالیبره‌شده با یک مرجع) باید همبستگی در محاسبه آورده شود.
3. مدل دینامیکی مرتبهٔ اول و متوالی است؛ در ترموول‌های ضخیم، فاصلهٔ هوایی بزرگ در Bore یا جریان بسیار کم، رفتار واقعی ممکن است از این مدل منحرف شود.
4. مثال عددی برای Pt100 در حدود دمای متوسط است؛ در محدوده‌های خیلی پایین یا بالا ضرایب Callendar–Van Dusen و تلرانس باید از استاندارد گرفته شوند.
5. برای ترموکوپل فقط برآورد مرتبه‌بزرگی ارائه شد؛ منحنی و تلرانس واقعی IEC 60584-1 باید از ویرایش جاری استاندارد خوانده شود.
6. عدم‌قطعیت فرآیندی (مثلاً توزیع دمای واقعی لوله، نماینده‌بودن نقطهٔ نصب) در بودجه نیامده و بسته به کاربرد ممکن است از همهٔ سهم‌های بالا بزرگ‌تر باشد.
7. مقادیر و ویرایش IEC 60751، IEC 60584-1، NAMUR NE 43 و JCGM 100:2008 در این سند راستی‌آزمایی نشده‌اند و باید قبل از استفاده در مدرک رسمی کنترل شوند.

COMMON MISTAKE – پنج اشتباه پرتکرار در تحلیل دقت حلقهٔ دما

۱) جمع ساده حدود خطا و ادعای «بدترین حالت» یا برعکس، گزارش فقط خطای مرجع ترانسمیتر به‌عنوان دقت حلقه؛ ۲) فراموش کردن خطای سیم‌بندی، خودگرمایی و رسانش ترموول؛ ۳) گزارش دقت بدون ذکر Coverage Factor؛ ۴) افزایش Damping برای پنهان کردن نویز بدون در نظر گرفتن تأخیر کنترل؛ ۵) خلط دقت ترانسمیتر در کالیبراسیون روی میز با دقت نصب‌شدهٔ حلقه.

22 چک‌لیست طراحی و تأیید

- [ ] نوع و کلاس سنسور، سیم‌بندی و در صورت نیاز Sensor Matching بر اساس U مورد نیاز انتخاب و مستند شده است.
- [ ] بودجهٔ عدم‌قطعیت با فرض‌های صریح، توزیع و Coverage Factor ثبت شده و منبع هر عدد مشخص است.
- [ ] خطای سیم رابط، خودگرمایی و رسانش ترموول بررسی شده‌اند.
- [ ] برای ترموکوپل، CJC، گرادیان ترمینال و نوع کابل بررسی شده‌اند.
- [ ] ثابت زمانی ترکیبی حساب و با نیاز کنترلی مقایسه شده است؛ Damping با دلیل تعیین شده است.
- [ ] مسیر آنالوگ یا دیجیتال HART برای Primary Variable انتخاب و اثر آن در بودجه آمده است.

گروه دوم موارد، پس از انتخاب سنسور و ترانسمیتر و هنگام بررسی نصب، پیکربندی و بهره‌برداری کنترل می‌شود. هر مورد باید در مدرک حلقه با مسئول و تاریخ ثبت شود تا در بازرسی بعدی یا هنگام عیب‌یابی قابل ردیابی باشد؛ مواردی که تأیید نشده‌اند به‌صراحت «باز» نگه داشته می‌شوند.

- [ ] اثر دمای محیط، RFI / EMI، ایزولاسیون و زمین‌کردن شیلد بررسی شده‌اند.
- [ ] FMEA انجام شده و هشدار خرابی (Burnout) با ارزیابی ایمنی تعیین شده است.
- [ ] URV / LRV و مقیاس DCS یکسان و بررسی شده‌اند.
- [ ] برنامهٔ Verification و ثبت As Left / As Found تعریف شده است.
- [ ] حدود اعتبار مدل و موارد راستی‌آزمایی‌نشده در مدرک ثبت شده‌اند.

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

جمع‌بندی نکات کلیدی

- دقت حلقه از ترکیب Root-Sum-Square سهم‌های مستقل به‌دست می‌آید و گزارش آن بدون Coverage Factor ناقص است؛ در حلقهٔ مرجع U = 0.56 °C به‌دست آمد.
- تلرانس سنسور بزرگ‌ترین سهم است؛ Sensor Matching و Class A بیش از ارتقای ترانسمیتر اثر دارند.
- خطای ساختاری مانند دوسیمه در کابل بلند از هر بهبود دیگری بزرگ‌تر است و با کالیبراسیون ترانسمیتر حذف نمی‌شود.
- خواندن دیجیتال Primary Variable سهم D/A و ورودی آنالوگ DCS را حذف می‌کند.
- Damping نویز را می‌کاهد ولی تأخیر و خطای شیب را بالا می‌برد؛ ثابت‌های زمانی ترموول، سنسور و Damping جمع می‌شوند.
- خرابی‌های بی‌صدا (رانش، عدم‌تطابق سیم، گرادیان CJC) با Verification دوره‌ای و ثبت پیکربندی مهار می‌شوند، نه با آلارم.
- همهٔ اعداد این سند فرض آموزشی‌اند و باید با دادهٔ پروژه و برگهٔ فنی جایگزین شوند.

23 پرسش‌های متداول

› چرا دقت حلقه از دقت ترانسمیتر بدتر است؟

چون دقت ترانسمیتر فقط یک بلوک است. تلرانس سنسور، سیم‌بندی، خودگرمایی، رسانش ترموول، اثر محیط، D/A و ورودی DCS هم به عدم‌قطعیت حلقه اضافه می‌شوند؛ در مثال این سند سهم سنسور از ترانسمیتر بیشتر بود.

› چرا خطاها را جمع ساده نمی‌کنیم؟

جمع ساده فرض می‌کند همهٔ خطاها هم‌زمان و هم‌جهت در بدترین حد باشند، که بسیار نامحتمل است. ترکیب Root-Sum-Square برای خطاهای مستقل واقع‌بینانه‌تر است؛ در مثال جمع بدترین حالت 1.13 °C و U برابر 0.56 °C شد.

› Sensor Matching چه زمانی ارزش دارد؟

وقتی تلرانس سنسور سهم غالب بودجه است و دقت بهتر از Class A لازم است. تطبیق ضرایب منحنی سنسور با ترانسمیتر، سهم تلرانس را بسیار کاهش می‌دهد؛ در مثال U از 0.56 °C به 0.34 °C رسید.

› Damping را چقدر تنظیم کنیم؟

کمترین مقداری که نویز را به حد قابل قبول برساند. هر ثانیهٔ Damping به ثابت زمانی حلقه اضافه می‌شود و برای کنترل سریع تأخیر می‌سازد. ابتدا منبع نویز را رفع کنید.

› چرا خواندن دیجیتال HART دقیق‌تر است؟

چون مقدار به‌صورت عدد منتقل می‌شود و تبدیل D/A، خطای حلقهٔ آنالوگ و ورودی آنالوگ DCS از مسیر حذف می‌شوند. به‌شرط پشتیبانی DCS و دستگاه، Primary Variable مستقیماً خوانده می‌شود.

خودگرمایی RTD چقدر مهم است؟

در جریان تحریک پایین و تماس خوب با ترموول کوچک است؛ در مثال حدود 0.007 °C. در تماس ضعیف، هوای ساکن یا جریان تحریک بالا می‌تواند بزرگ‌تر شود و باید از برگهٔ فنی سنسور و ترانسمیتر کنترل شود.

ترموکوپل در این تحلیل چه تفاوتی با Pt100 دارد؟

سیگنال ترموکوپل بسیار کم‌سطح است و خطای CJC مستقیماً به قرائت می‌رود؛ خطای چند میکروولت یا گرادیان چند درجه‌ای ترمینال به همین اندازه در دما دیده می‌شود. برآورد دقیق نیازمند جدول و تلرانس IEC 60584-1 است.

این محاسبات را برای گزارش رسمی می‌توان استفاده کرد؟

روش قابل استفاده است، ولی اعداد این سند فرض آموزشی‌اند. برای گزارش رسمی باید ورودی‌ها را با دادهٔ سازنده و گواهی کالیبراسیون جایگزین و ویرایش استانداردها را راستی‌آزمایی کرد.

24 استانداردها و منابع

1. IEC 60751 — Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors

   مرجع منحنی Pt100 و کلاس‌های دقت؛ فرمول‌های تلرانس و ضرایب این سند راستی‌آزمایی نشده‌اند و باید با ویرایش جاری کنترل شوند.

2. IEC 60584-1 — Thermocouples — Part 1: EMF specifications and tolerances

   مرجع منحنی و تلرانس ترموکوپل؛ مقادیر این سند فقط برآورد مرتبه‌بزرگی‌اند.

3. JCGM 100:2008 — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)

   مبنای روش ترکیب عدم‌قطعیت و ضریب پوشش؛ ویرایش و بند مرتبط راستی‌آزمایی نشده است.

4. NAMUR NE 43 — Standardization of the signal level for the failure information of digital transmitters

   مقادیر و ویرایش جاری راستی‌آزمایی نشده؛ سطوح هشدار باید از منبع رسمی و برگهٔ فنی دستگاه تأیید شود.

5. HART Communication Protocol — FieldComm Group

   مشخصهٔ پروتکل و دسترسی به Primary Variable؛ جزئیات از مستند رسمی هر مدل خوانده می‌شود.

6. ASME PTC 19.3 TW — Thermowells

   مرجع تحلیل ارتعاش و استحکام ترموول؛ در راهنمای ترموول سطح ۳ NICO به‌کار رفته و در این سند فقط ارجاع شده است؛ ویرایش جاری راستی‌آزمایی نشده.

این راهنما سند سطح ۳ است. مقادیر ورودی (تلرانس، دقت ترانسمیتر، ثابت‌های زمانی، اثر محیط، مقاومت سیم، دقت ورودی DCS) فرض آموزشی‌اند و دادهٔ محصول NICO یا نتیجهٔ آزمون نیستند. فرمول‌های تلرانس و ضرایب استاندارد باید با ویرایش جاری راستی‌آزمایی شوند.

منابع مرتبط NICO

گام‌های قبلی و مرتبط

- ترانسمیتر دما چیست؟ — NICO-EDU-TMP-L1-011-FA
- راهنمای انتخاب، سیم‌بندی و راه‌اندازی ترانسمیتر دما — NICO-EDU-TMP-L2-012-FA
- طراحی ترموول و فرکانس ویک — NICO-EDU-TWL-L3-006-FA

تجهیزات مرتبط NICO

- ترانسمیتر دمای TTM30-H — Head Mount
- ترانسمیتر دمای TTM30-F — Field Mount
- ترانسمیتر دمای TTM30-R — (DIN Rail) Rail Mount

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