NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

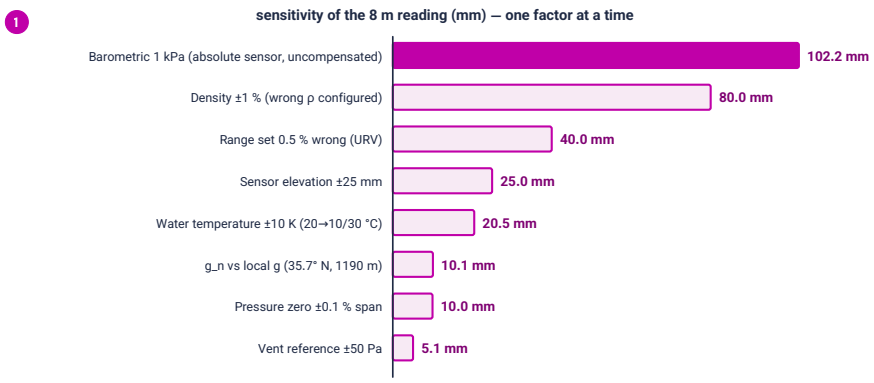
LEVEL 3 — ADVANCED ENGINEERING

مهندسی پیشرفته اندازه‌گیری

سطح هیدرواستاتیک

Advanced Engineering of Hydrostatic Level Measurement — Density, Barometric Compensation, Temperature Effects and Measurement Uncertainty

Density Compensation، Barometric Pressure، Temperature Effects، Dynamic Response و Measurement Uncertainty



حساسیت Level ۸ متر به عوامل خطا (Tornado)

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-LVL-L3-009-FA	Rev00	LEVEL 3	آذر ۱۴۰۵ — November 2026

مبنای طراحی و دامنهٔ سند (Design Basis)

این سند یک مدل مهندسی کامل از زنجیرهٔ «Level مایع ← فشار هیدرواستاتیک ← حسگر فشار ← مرجع فشار ← الکترونیک ← خروجی 4–20 mA ← Level در DCS» می‌سازد و سازوکارهای اصلی خطا را کمی می‌کند. مخاطب، مهندسان ارشد ابزار دقیق، طراحان EPC، مشاوران و مهندسان مترولوژی هستند و فرض بر آن است که مفاهیم سطح ۱ و روش انتخاب و نصب سطح ۲ همین مجموعه را می‌شناسید.

مبنای طراحی این راهنما (Design Basis)

1. **پرسش مهندسی:** برای یک نصب مشخص، Level گزارش‌شده در DCS با چه عدم‌قطعیتی با Level واقعی مایع برابر است و کدام سازوکارها آن را تعیین می‌کنند؟
2. **مدل پایه:** فشار هیدرواستاتیک ساکن بر پایهٔ $P = \rho \cdot g \cdot h$ با جداسازی مرجع فشار (اتمسفر، فشار بخار، خلأ) و تبدیل خطی به 4–20 mA؛ Level بر حسب متر نسبت به Datum تعریف‌شده.
3. **داده‌های سیال:** چگالی آب از IAPWS-95، آب دریا از TEOS-10 و آب‌نمک ۱۰٪ و ۲۰٪ NaCl از جدول مرجع (REFERENCE)؛ هیچ مشخصهٔ محصول NICO ادعا نمی‌شود.
4. **خروجی‌های محاسبه:** معادلات مشتق‌شده، شش مورد کاربردی (A تا F)، تحلیل حساسیت (Tornado)، بودجهٔ عدم‌قطعیت GUM، FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی.

برچسب‌های مبنای ادعا. هر ادعای هنجاری یا عددی با یکی از برچسب‌های زیر مشخص می‌شود تا خواننده بداند چه چیزی الزام استاندارد است و چه چیزی توصیهٔ مهندسی، فرض یا موضوع نیازمند راستی‌آزمایی: NORMATIVE REQUIREMENT الزام بند مشخصی از استاندارد معتبر؛ ENGINEERING RECOMMENDATION توصیهٔ مهندسی با استدلال فیزیکی؛ MANUFACTURER-SPECIFIC DATA داده‌ای که فقط از مدرک رسمی سازنده می‌آید؛ NICO DESIGN PRACTICE روش پیشنهادی طراحی NICO؛ ASSUMPTION فرض آموزشی؛ REQUIRES VERIFICATION موردی که پیش از استناد رسمی باید با متن منبع تطبیق داده شود. در این سند هیچ برچسب NORMATIVE REQUIREMENT برای بندی استفاده نشده که متن کاملش بررسی نشده باشد.

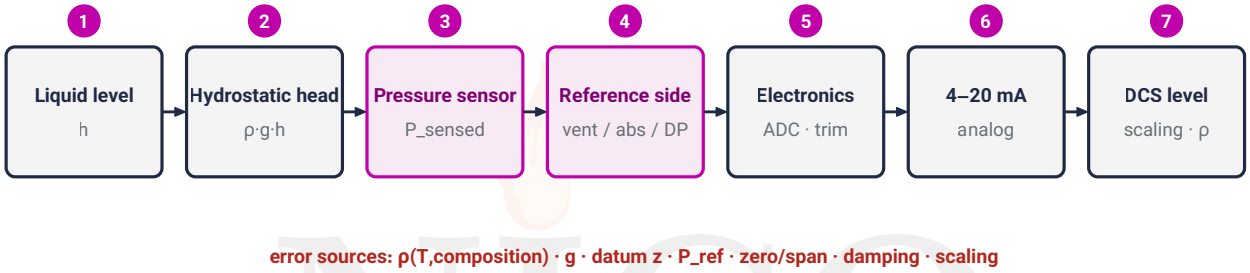
1 مدل کلی هیدرواستاتیک

ستون مایع ساکن به ارتفاع h و چگالی یکنواخت ρ در شتاب گرانش g، در عمق h فشار هیدرواستاتیک ایجاد می‌کند. اگر مایع ناتراکم و دمای آن یکنواخت فرض شود، معادلهٔ تعادل نیرو بر یک ستون با سطح مقطع A (جرم $\rho \cdot A \cdot h$، وزن $\rho \cdot A \cdot h \cdot g$) پس از حذف A به رابطهٔ زیر می‌رسد (شکل ۱ نقش این رابطه را در کل زنجیرهٔ اندازه‌گیری نشان می‌دهد):

$$P = \rho \cdot g \cdot h \tag{1}$$

P	فشار هیدرواستاتیک (فقط سهم ستون مایع)	Pa
ρ	چگالی مایع در دمای کاری	kg/m³
g	شتاب گرانش محلی؛ مقدار استاندارد 9.80665 m/s²	m/s²
h	ارتفاع قائم مایع بالای دیافراگم	m

کنترل یکاها (Unit Handling). 1 Pa = 1 N/m² = 1 kg/(m·s²)؛ بنابراین ρ·g·h با یکاهای kg/m³ × m/s² × m = kg/(m·s²) = Pa سازگار است. برای آب در 20 °C (ρ = 998.21 kg/m³) هر یک متر Level برابر 998.21 × 9.80665 × 1 = 9.789 kPa است؛ «متر ستون آب» قراردادی (mH₂O) بر پایهٔ ρ = 1000 kg/m³ و g_n = 9.80665 m/s² دقیقاً 9.80665 kPa است و با آب واقعی در 20 °C حدود 0.18 % - اختلاف دارد. هر ادعای دقت باید روشن کند «mH₂O» قراردادی است یا آب واقعی. مقدار g_n مطابق NIST SP 811 REQUIRES VERIFICATION



شکل ۱ — مدل زنجیره‌ای اندازه‌گیری؛ از Level مایع تا Level در DCS و نقاط ورود خطا

1 Level مایع 2 ستون هیدرواستاتیک 3 حسگر فشار 4 سمت مرجع فشار 5 الکترونیک و تبدیل 6 جریان 4–20 mA 7 مقیاس‌دهی در DCS

2 معادلهٔ فشار تعمیم‌یافته

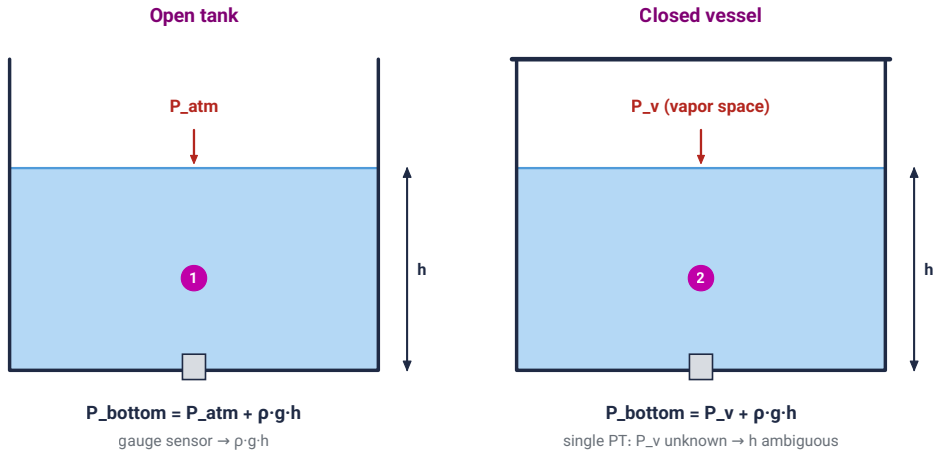
در یک مخزن، فشار روی سطح آزاد مایع $P_{surface}$ به کل ستون منتقل می‌شود (اصل پاسکال)؛ فشار در عمق h مجموع فشار سطح و فشار ستون است:

$$P_{bottom} = P_{surface} + \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

P_{bottom}	فشار مطلق در تراز دیافراگم	Pa
$P_{surface}$	فشار روی سطح مایع: اتمسفر در مخزن باز، فشار فضای بخار در مخزن بسته	Pa
ρ·g·h	سهم ستون مایع	Pa

همین معادله تفاوت بنیادی مخزن باز و بسته را می‌سازد: در مخزن باز $P_{surface} = P_{atm}$ تقریباً ثابت و با حسگر نسبی قابل حذف است؛ در مخزن بسته $P_{surface}$ خود متغیر فرآیندی است (بخش ۲۱). معادله برای مایع ساکن و چگالی یکنواخت معتبر است؛ حدود اعتبار آن در بخش‌های بعد (چگالی متغیر، حرکت مایع) بررسی می‌شود.

3 استخراج برای مخزن باز



شکل ۲ — مخزن باز و مخزن بسته؛ تفاوت فقط در فشار روی سطح مایع است ولی پیامد اندازه‌گیری کاملاً متفاوت است

1 مخزن باز: $P_{surface} = P_{atm}$ 2 مخزن بسته: $P_{surface} = P_v$

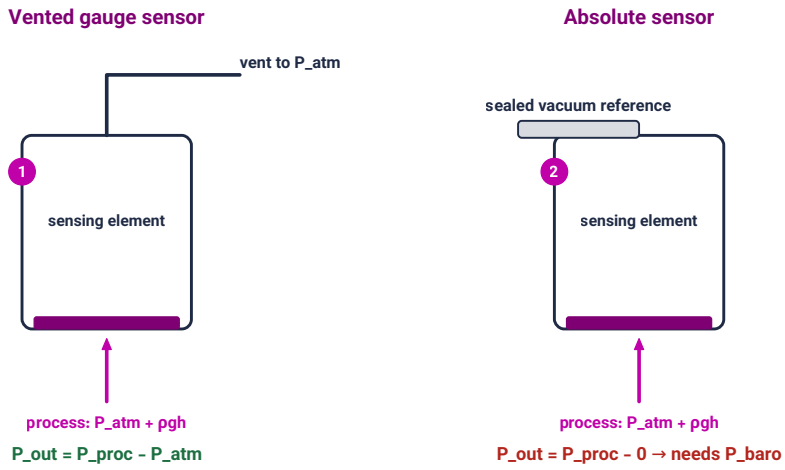
برای مخزن اتمسفری $P_{surface} = P_{atm}$. حسگر نسبی تهویه‌شده (Vented Gauge) فشار را نسبت به مرجع اتمسفری می‌سنجد؛ یعنی خروجی آن متناسب با $P_{bottom} - P_{atm}$ است:

$$h = (P_{bottom} - P_{atm}) / (\rho \cdot g) = \rho \cdot g \cdot h / (\rho \cdot g) \quad (3)$$

P_{atm}	فشار اتمسفر در سمت مرجع حسگر؛ در حسگر نسبی به‌صورت فیزیکی از طریق لولهٔ تنفس اعمال می‌شود	Pa

پس اگر مرجع واقعاً همان P_{atm} باشد که روی سطح مایع اثر می‌کند، P_{atm} از معادله حذف می‌شود و تغییر وضعیت جوی بر Level اثر ندارد. شرط اعتبار: اتمسفر سمت مرجع و اتمسفر روی سطح یکسان باشند؛ در چاه یا مخزن با تهویهٔ محدود این شرط باید بررسی شود (بخش ۶ تا ۸).

4 مدل حسگر مطلق



شکل ۳ — حسگر نسبی تهویه‌شده در برابر حسگر مطلق؛ مرجع فشار در دو معماری

1 مرجع باز به اتمسفر 2 مرجع خلأ آب‌بندی‌شده

حسگر مطلق فشار را نسبت به خلأ مرجع داخلی می‌سنجد: $P_{abs,bottom} = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$. برای استخراج Level، P_{atm} باید جداگانه معلوم باشد:

$$h = (P_{abs,bottom} - P_{baro}) / (\rho \cdot g) \quad (4)$$

$P_{abs,bottom}$	فشار مطلق اندازه‌گیری‌شده توسط حسگر	Pa
P_{baro}	فشار بارومتریک واقعی هم‌زمان در همان محل؛ از ترانسمیتر مرجع، ایستگاه محلی یا مقدار ثابت فرضی	Pa

اگر به‌جای P_{baro} لحظه‌ای یک مقدار ثابت (مثلاً 101.325 kPa) در PLC قرار گیرد، تغییر واقعی فشار جو به خطای Level تبدیل می‌شود (بخش ۵). جبران بارومتریک مستلزم این است که مرجع بارومتریک در همان محل یا با تصحیح ارتفاع در دسترس باشد و زمان‌بندی نمونه‌برداری هر دو یکی باشد. ENGINEERING RECOMMENDATION

5 خطای فشار بارومتریک

فرض کنید حسگر مطلق با فشار بارومتریک ثابت $P_{baro,assumed}$ پردازش می‌شود، در حالی که فشار واقعی $P_{atm} = P_{baro,assumed} + \Delta P_{atm}$ است. Level محاسبه‌شده: $h_{calc} = (P_{abs} - P_{baro,assumed})/(\rho g) = h + \Delta P_{atm}/(\rho g)$. بنابراین:

$$\Delta h = \Delta P_{atm} / (\rho \cdot g) \quad (5)$$

Δh	خطای Level (مثبت یعنی بیش‌نمایی)	m
ΔP_{atm}	اختلاف فشار اتمسفر واقعی با مقدار فرضی	Pa

مثال عددی — خطای بارومتریک در آب 20 °C

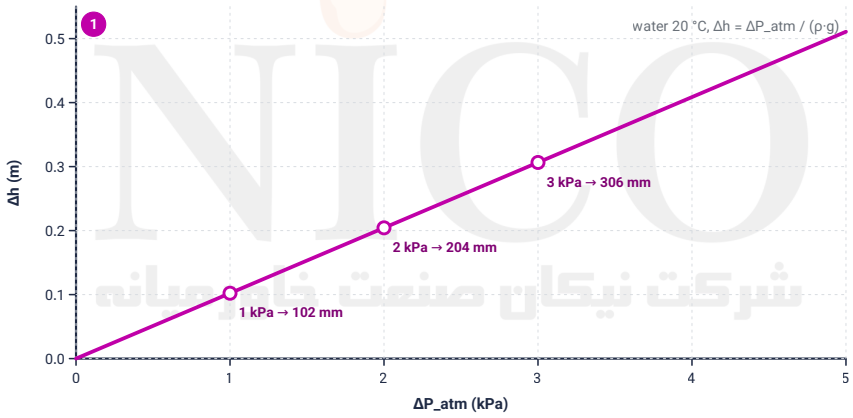
فرض‌ها: آب $\rho = 998.21$ kg/m³؛ حسگر مطلق بدون جبران؛ ASSUMPTION $g = 9.80665$ m/s²

$$\Delta h = \Delta P_{atm} / (\rho \cdot g) = 1000 / (998.21 \times 9.80665) = 0.102 \text{ m}$$

یعنی هر 1 kPa تغییر فشار جو ≈ 102 mm Level. مقادیر دیگر: 0.5 kPa → 51 mm؛ 2 kPa → 204 mm؛ 3 kPa → 306 mm (شکل ۴).

اثر ارتفاع محل: در اتمسفر استاندارد ISO 2533 در 1190 m از سطح دریا $P_{atm} = 87.82$ kPa است، یعنی 13.50 kPa کمتر از 101.325 kPa؛ اگر در PLC مقدار سطح دریا فرض شود، خطای ثابت 1.379 m ایجاد می‌شود. ENGINEERING RECOMMENDATION

> **نتیجه: خطای بارومتریک بر حسب mm حدود صد برابر تغییر فشار بر حسب kPa است؛ در یک ساختار مطلق بدون جبران، حتی نوسان معمول هوا (چند kPa در طول سال) ده‌ها تا صدها mm Level جابه‌جا می‌کند.**



شکل ۴ — خطای Level بر حسب تغییر فشار اتمسفر برای آب 20 °C؛ نقطهٔ قرمز اثر ارتفاع محل 1190 m

1 خط $\Delta h = \Delta P_{atm}/(\rho g)$

6 سیستم Vented Gauge

در پروب غوطه‌ور نسبی، دیافراگم فرآیند از یک سمت با فشار $P_{atm} + \rho gh$ بارگذاری می‌شود و سمت دیگر (پشت دیافراگم) از طریق یک لولهٔ نازک (Vent Tube) درون کابل تا جعبهٔ اتصال بیرون از مایع به اتمسفر وصل است. نیروی خالص بر دیافراگم متناسب با $(P_{atm} + \rho gh) - P_{ref}$ است که اگر $P_{ref} = P_{atm}$ باشد برابر ρgh می‌شود. وظیفهٔ لولهٔ تنفس فقط انتقال فشار مرجع است؛ جریان هوا بسیار کوچک است و ثابت زمانی آن بسته به طول و قطر لوله و حجم حفره‌های پشت دیافراگم می‌تواند

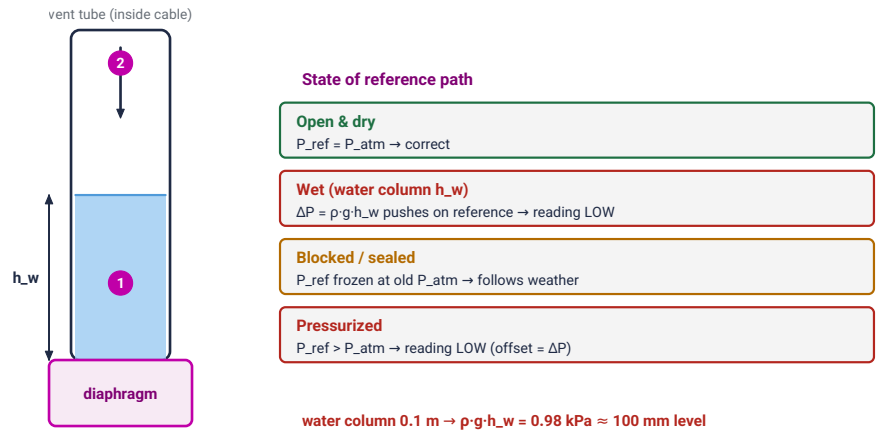
از چند ثانیه تا چند دقیقه باشد (وابسته به طراحی؛ از مدرک سازنده بگیرید). عملکرد درست سیستم به سه شرط وابسته است: باز بودن مسیر، خشک بودن مسیر و اتصال انتهای لوله به اتمسفر همان محل نصب. پایه‌های این بخش با دستورالعمل‌های ثانویهٔ سازندگان تأیید می‌شود.

7 خطای Vent مسدود

چهار وضعیت مرجع باید جدا تحلیل شوند (شکل ۵ و جدول ۱). در همهٔ وضعیت‌ها فرض می‌شود حسگر نسبی سالم است و فقط P_{ref} با P_{atm} یکسان نیست؛ آنگاه خطای فشار $\Delta P = P_{atm} - P_{ref}$ و خطای Level $\Delta h = -\Delta P/(\rho g)$ خواهد بود (علامت: مرجع بزرگ‌تر از اتمسفر → خوانش کمتر از واقعیت).

جدول ۱ — وضعیت‌های مرجع تهویه و اثر آن بر خوانش (شرایط مرزی صریح)

وضعیت	رفتار فیزیکی	اثر بر Level	شرط / فرض
مسدود (Blocked) با هوای محبوس	مرجع در فشار لحظهٔ انسداد (یا نزدیک آن) قفل می‌شود؛ با تغییر دمای هوای محبوس، فشار آن تغییر می‌کند	خوانش با تغییر وضع جوی $\Delta h = (P_{atm,now} - P_{atm,lock})/(\rho g)$ جابه‌جا می‌شود؛ شبیه حسگر مطلق بدون جبران	انسداد کامل؛ بدون نشت؛ حجم هوا ثابت
خیس (Wet) — ستون مایع h_w	مایع تجمع‌یافته در لوله ستونی می‌سازد که بر دیافراگم از سمت مرجع نیرو وارد می‌کند	خوانش کمتر از واقعیت؛ برای $h_w = 0.1$ m آب حدود $\Delta P = \rho_w \cdot g \cdot h_w$ ← 0.98 kPa ≈ 100 mm	ستون در راستای قائم؛ سمت پایین لوله به دیافراگم متصل
تحت فشار (Pressurized)	مرجع به منبعی با $P_{ref} > P_{atm}$ وصل شده یا هوای محبوس منبسط شده	$\Delta h = -(P_{ref} - P_{atm})/(\rho g)$ ← خوانش کمتر	مرجع خارج از اتمسفر؛ اندازهٔ ΔP از پایش جداگانه
آب‌بندی‌شده (Sealed) در کارخانه	مرجع تعریف‌شده (حسگر مطلق یا نسبی آب‌بندی‌شده با مرجع ثابت)	مرجع ثابت است؛ برای نسبی-آب‌بندی‌شده تغییر جو باید جبران شود	معماری سازنده؛ فقط از مدرک سازنده



شکل ۵ — وضعیت مسیر مرجع و اثر آن بر خوانش؛ ستون مایع در لولهٔ تنفس

1 ستون مایع h_W در لوله 2 ورود رطوبت از انتهای کابل

نکتهٔ مهم: انسداد لزوماً «خطای ثابت» نمی‌سازد؛ در حالت مسدود، خطا با تغییر فشار جو و دما نوسان می‌کند و الگوی آن (همبستگی با فشار بارومتریک) خود یک شاخص تشخیصی است ENGINEERING RECOMMENDATION. تحلیل زیر فرض می‌کند حجم هوا ثابت و بدون نشت است؛ نشت کند، ثابت زمانی تعادل به‌جای بی‌نهایت متناهی می‌شود.

8 رطوبت در لولهٔ تنفس

رطوبت از دو مسیر وارد لوله می‌شود: **تقطیر** (هوای گرم و مرطوب در جعبهٔ اتصال که هنگام سرد شدن در لوله یا کابل تقطیر می‌شود) و **نفوذ مستقیم مایع** از کابل یا آب‌بند آسیب‌دیده. اثر هیدرواستاتیک مایع تجمع‌یافته: ستونی به ارتفاع h_W که پایین لوله (نزدیک دیافراگم) انباشته شود بر سمت مرجع دیافراگم فشار $\rho_W \cdot g \cdot h_W$ وارد می‌کند و به شکل خطای صفر دیده می‌شود. از آنجا که ستون مایع در طول زمان با تقطیر بیشتر می‌شود، خطای رانش آهسته و یک‌طرفه (کاهش خوانش) ایجاد می‌شود ENGINEERING RECOMMENDATION. اگر مایع به الکترونیک یا خود حسگر برسد، خطا از رانش به خرابی دائمی تبدیل می‌شود (بخش ۲۷). **توصیه‌های کاهش ریسک:** خاتمهٔ انتهای کابل در محیط خشک و آب‌بند، استفاده از فیلتر یا ماده جاذب رطوبت طبق دستور سازنده و بازرسی دوره‌ای؛ جزئیات روش از دستورالعمل سازنده MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.

مثال عددی **ستون آب ۲۰ سانتی‌متری در لولهٔ تنفس**

$$\Delta P = \rho_w \cdot g \cdot h_w = 998.21 \times 9.80665 \times 0.20 = 1957.8\ \text{Pa} \approx 1.96\ \text{kPa}$$

$$\Delta h = -\Delta P / (\rho \cdot g) = -0.20\ \text{m}\ (\rho_w \approx \rho)$$

نتیجه: اگر مایع داخل لوله با مایع فرآیند هم‌جنس باشد، خطا برابر ارتفاع ستون است (با علامت منفی)، یعنی 200 mm کمنمایی؛ برای محدودهٔ 0–10 m این معادل 2 % از Span است — بسیار بزرگ‌تر از دقت مرجع ترانسمیتر.

9 خطای چگالی

ترانسمیتر فقط فشار را می‌بیند؛ تبدیل به Level با چگالی فرضی $\rho_{assumed}$ انجام می‌شود. اگر فشار واقعی $P = \rho_{actual} \cdot g \cdot h_{actual}$ باشد:

$$h_{calc} = P / (\rho_{assumed} \cdot g) = h_{actual} \cdot \rho_{actual} / \rho_{assumed} \quad (6)$$

h_{calc}	Level محاسبه‌شده توسط ترانسمیتر / DCS	m
$\rho_{assumed}$	چگالی پیکربندی‌شده	kg/m³
ρ_{actual}	چگالی واقعی مایع در شرایط کاری	kg/m³

خطای مطلق و نسبی Level: $e_h = h_{calc} - h_{actual} = h_{actual} \cdot (\rho_{actual}/\rho_{assumed} - 1)$؛ یعنی اگر مایع واقعی سنگین‌تر از فرض باشد، Level بیش‌نمایی می‌شود و برعکس. خطا با Level نسبی است؛ در Level صفر خطا صفر و در Level بالا بیشینه است.

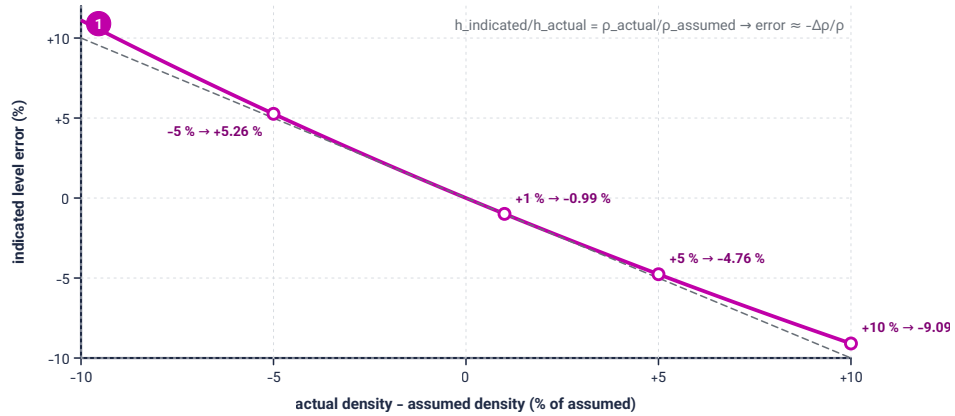
10 حساسیت به چگالی

حساسیت نسبی از مشتق جزئی $dh_{calc}/d\rho_{assumed} = -P/(\rho_{assumed}^2 \cdot g) = -h_{calc}/\rho_{assumed}$ به دست می‌آید:

$$\delta h / h = - \delta\rho_{assumed} / \rho_{assumed} \quad (7)$$

$\delta\rho_{assumed}/\rho_{assumed}$	خطای نسبی چگالی پیکربندی‌شده	—
$\delta h/h$	خطای نسبی Level متناظر	—

فرض‌ها: تبدیل مستقیم $h = P/(\rho g)$، g و P بدون خطا، تغییر کوچک چگالی (مرتبهٔ اول)، و بدون جبران. تحت این مدل ایده‌آل خطای 1 % در چگالی تقریباً خطای نسبی عکس 1 % در Level می‌سازد؛ به‌طور دقیق برای افزایش 1 % در چگالی واقعی Level محاسبه‌شده 1+ % خطا دارد، و اگر چگالی پیکربندی‌شده 1 % بزرگ‌تر از واقعیت باشد Level -0.99 % = 1 - 1/1.01 می‌شود (برای 8 m: 79.2 mm-) (شکل ۶). در عمل همین حساسیت یک‌به‌یک، دلیل اصلی اهمیت ثبت بازهٔ چگالی در برگهٔ داده است. ENGINEERING RECOMMENDATION

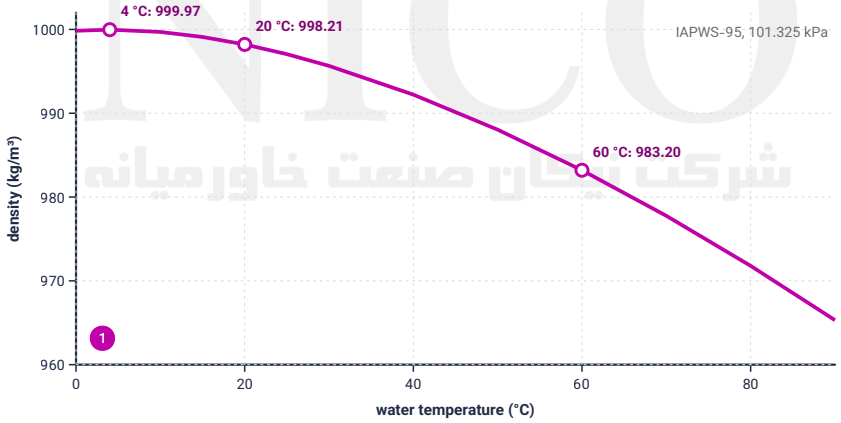


شکل ۶ — خطای نسبی Level بر حسب خطای چگالی؛ خطچین تقریب مرتبهٔ اول و منحنی رابطهٔ دقیق

1 رابطهٔ 1/(1+δ) - 1

11 اثر دما بر چگالی

چگالی تابعی از دماست: ρ = f(T). برای آب در فشار اتمسفر داده‌های IAPWS-95 REQUIRES VERIFICATION نشان می‌دهند که چگالی در 4 °C بیشینه (999.97 kg/m³) است و با افزایش دما کاهش می‌یابد: 998.21 :20 °C؛ 983.20 :60 °C؛ 971.79 kg/m³ :80 °C (شکل ۷). خطای نسبی Level پیکربندی‌شده در دمای T_a ولی کارکرد در T_b: $e_T = \rho(T_b)/\rho(T_a) - 1$.



شکل ۷ — چگالی آب بر حسب دما (IAPWS-95، فشار ۱۰۱٫۳۲۵ kPa)؛ محور عمودی از ۹۶۰ آغاز می‌شود

1 منحنی چگالی آب

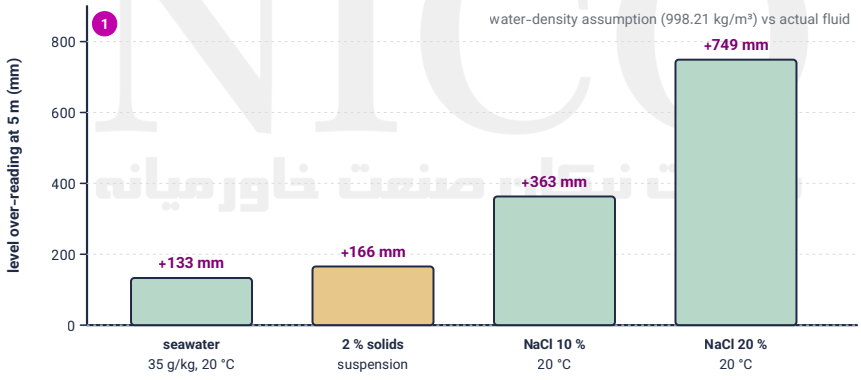
جدول جدول ۲ خطا را برای ترانسمیتر پیکربندی‌شده در 20 °C و 6 m Level نشان می‌دهد. برای سیال‌های دیگر (هیدروکربن‌ها، گلیکول‌ها، محلول‌های نمک) ضریب دمایی بسیار متفاوت است و باید از داده‌های تأییدشده همان سیال گرفته شود؛ استفادهٔ مستقیم از جدول آب مجاز نیست REQUIRES VERIFICATION.

جدول ۲ — خطای Level ناشی از تغییر دمای آب نسبت به 20 °C (Level واقعی 6 m، داده IAPWS-95)

دمای کاری	ρ (kg/m³)	خطای نسبی (٪)	خطا در 6 m (mm)
10 °C	999.70	0.150	9
30 °C	995.65	-0.256	-15
60 °C	983.20	-1.504	-90
80 °C	971.79	-2.646	-159

12 اثر ترکیب (Composition)

چگالی می‌تواند به دلیل غلظت، شوری، ترکیب شیمیایی یا مواد معلق تغییر کند و این تغییر از دمای فرآیند مستقل است. مثال‌ها نسبت به فرض آب خالص (998.21 kg/m³، 20 °C) در 5 m Level (شکل ۸): آب دریا با شوری 35 g/kg: $\rho = 1024.77$ kg/m³ (+2.66 ٪ ← +133 mm) — محاسبه با TEOS-10 REQUIRES VERIFICATION؛ محلول 10 ٪ NaCl: $\rho = 1070.7$ (+7.26 ٪ ← +363 mm) و 20 ٪: $\rho = 1147.8$ (+14.99 ٪ ← +749 mm) — مقادیر مرجع جدول عمومی (REFERENCE، با CRC تطبیق داده شود) REQUIRES VERIFICATION؛ سوسپانسیون 2 ٪ حجمی جامد با $\rho_s = 2650$ kg/m³: $\rho = 1031.2$ kg/m³ (+3.31 ٪) ASSUMPTION. تغییر ترکیب معمولاً در فرآیند ثبت نمی‌شود؛ باید در برگهٔ داده با شاخص‌های مستقل (SG مدیریتی، دانسیمتر، شوری سنج) پایش شود.



شکل ۸ — بیش‌نمایی Level در 5 m هنگام فرض چگالی آب برای سیال‌های واقعی

1 مقایسهٔ اثر ترکیب

13 کاربرد با چگالی متغیر

وقتی SG در بازهٔ وسیعی تغییر می‌کند (مثلاً تغذیهٔ ناهمگن، لایه‌بندی، فرآیندهای بچ)، Level هیدرواستاتیک مستقیماً به همان نسبت خطا پیدا می‌کند و هیچ تنظیمی در ترانسمیتر آن را حل نمی‌کند. سه راه حل متفاوت وجود دارد و هر کدام محدودیت خود را دارد: **چگالی اندازه‌گیری‌شده** — دانسیمتر یا ترانسمیتر دوم در ارتفاع مرجع که ρ را از $\Delta P/(g \cdot \Delta z)$ می‌دهد و در محاسبهٔ Level به‌کار می‌رود (به شرط یکنواختی چگالی بین دو نقطه)؛ **جبران فرآیندی** — محاسبهٔ $\rho(T, x)$ از دما و ترکیب

معلوم؛ به دقت مدل و اندازه‌گیری آن وابسته است؛ **فناوری جایگزین** — فناوری‌هایی که مستقل از چگالی‌اند (راداری، التراسونیک) در شرایط مناسب، با ملاحظات خود (کف، بخار، گرد و غبار) (بخش ۴۳). هیچ‌کدام راهبرد جهانی نیست؛ انتخاب بر پایهٔ شرایط فرآیند و نیاز دقت است.

14 اثر گرانش

شتاب گرانش محلی با عرض جغرافیایی و ارتفاع تغییر می‌کند. از فرمول WGS-84 (سومیلیانا) با تصحیح هوای آزاد استوا 9.7803 m/s² (-0.268 %) نسبت به g_n)، قطب 9.8322 m/s² (+0.260 %)، یک محل نمونه با عرض 35.7° و ارتفاع 1190 m: 9.7943 m/s² (-0.126 %) در 8 m Level این معادل -10.1 mm است؛ یعنی بزرگ‌تر از خطای ناچیز، ولی در مقایسه با چگالی (80 mm برای 1 %) و فشار بارومتریک در ساختار بدون جبران یک مرتبه کوچک‌تر است. **ارزیابی:** برای دقت پروژه‌ای در حد 0.5 % یا بدتر معمولاً می‌توان g_n را به‌کار برد؛ برای کاربردهای دقیق (انتقال حضانتی، کالیبراسیون Level) g محلی باید لحاظ شود. اهمیت آن بیش از حد بیان نمی‌شود.

15 معماری حسگر فشار

در این بخش فقط معماری‌های رایج به‌صورت مفهومی و کلی مقایسه می‌شوند؛ هیچ مشخصهٔ محصولی ادعا نمی‌شود و جزئیات هر مدل از مدرک سازنده باید گرفته شود. **پیزومقاومتی** (Piezoresistive)**:** تغییر شکل دیافراگم سیلیکونی یا فلزی مقاومت پل وتستون را عوض می‌کند؛ رایج در ترانسمیتر فشار صنعتی. **خازنی** (Capacitive)**:** تغییر فاصله بین الکترودها با خمش دیافراگم؛ در برخی معماری‌ها حساسیت زیاد در محدودهٔ کم. **سرامیکی** (Ceramic)**:** دیافراگم یا حسگر سرامیکی که برای محیط‌های ساینده و مقاومت شیمیایی به‌کار می‌رود. **دیافراگم فلزی** (Metal diaphragm)**:** جداسازی سیال فرآیند از حسگر با دیافراگم فلزی و روغن پرکننده در برخی طراحی‌ها. انتخاب معماری بر پایهٔ رسانه، دما، دقت و رفتار دراز مدت صورت می‌گیرد؛ این گزاره‌ها ماهیت عمومی دارند و برای هر ادعای عملکردی نیاز به منبع سازنده دارند.

16 اثرات دیافراگم

دیافراگم مرز فیزیکی میان فرآیند و حسگر است و پنج اثر باید در طراحی بررسی شود: **سختی** (Stiffness) — دیافراگم سفت‌تر برای محدودهٔ فشار بالاتر ولی با حساسیت کمتر؛ محدودهٔ بسیار پایین نیازمند دیافراگم نازک‌تر و آسیب‌پذیرتر است. **دما** — تغییر مدول و ابعاد با دما و در طراحی‌های روغنی، انبساط روغن؛ این اثر در مشخصهٔ «اثر دمای محیط» سازنده منعکس می‌شود. **اضافه فشار** (Overpressure) — فشار بیش از حد مجاز (مثلاً ضربه یا خطای محدوده) می‌تواند به دیافراگم آسیب بزند یا صفر را برای همیشه جابه‌جا کند. **رسوب** (Fouling) — لایهٔ رسوب یا جامد روی دیافراگم سختی مؤثر را عوض می‌کند و فشار منتقل‌شده را کاهش یا تأخیر می‌دهد. **حفاظت مکانیکی** — کلاهک یا روزنه‌دار برای محافظت از ضربه ولی با ریسک گرفتگی. مقادیر عددی هر اثر باید از برگهٔ فنی سازنده گرفته شود.

17 صفر حسگر (Sensor Zero)

سه مفهوم جدا هستند. **انحراف صفر** (Zero Offset): خروجی در فشار مرجع صفر غیر از مقدار نظری است و با Zero Trim قابل اصلاح است. **رانش صفر** (Zero Drift): تغییر آهستهٔ این انحراف با زمان یا دما. **پایداری درازمدت** (Long-Term Stability) : مقدار رانش مجاز در بازهٔ زمانی مشخص (مثلاً ۱۲ ماه) که در مشخصهٔ سازنده می‌آید MANUFACTURER-SPECIFIC DATA. در سطح‌سنجی، خطای صفر ثابت است و در تمام Level ها یک آفست یکسان می‌سازد؛ برای Span کوچک (Level کم) اهمیت نسبی بیشتر دارد: خطای صفر 0.1 % از 10 m Span یعنی 10 mm در همه جا ولی 0.5 % از 2 m Span. رانش صفر باید با راستی‌آزمایی دوره‌ای در یک Level مرجع (یا خروج پروب از مایع و بازبینی صفر در هوا برای حسگر نسبی) پایش شود؛ اثر Zero Trim روی ترانسمیتر نصب‌شده، مبنای مرجع را باید در سند کالیبراسیون ثبت کند ENGINEERING RECOMMENDATION.

18 Datum نصب

بدون تعریف دقیق Datum قائم، هر محاسبهٔ Level بی‌معنی است. سه مرجع ارتفاعی را جدا کنید: **صفر فیزیکی مخزن** (Physical Tank Zero) — تراز کف یا نقطهٔ مرجع مکانیکی که مهندسین مخزن Level را از آن می‌شمارند؛ **ارتفاع دیافراگم حسگر** (Sensor Diaphragm Elevation) — تراز مؤثر فشار؛ در پروب غوطه‌ور آن بخش سطح دیافراگم، و در ترانسمیتر خارجی نقطهٔ تپینگ؛ 0 % **پیکربندی‌شده** (Configured 0 % Level) — Level متناظر با 4 mA در ترانسمیتر و DCS. هر اختلاف این سه ارتفاع مستقیماً به آفست Level تبدیل می‌شود. در نقشه نصب، هر سه ارتفاع و رابطهٔ میان آن‌ها باید ثبت شود NICO DESIGN PRACTICE.

19 خطای ارتفاع حسگر

اگر دیافراگم $z = 0.25$ m بالاتر از Datum واقعی مخزن نصب شده باشد و 0 % روی کف مخزن تعریف شود، ستون مایع بالای دیافراگم 0.25 m کوتاه‌تر از Level واقعی است (شکل ۹):

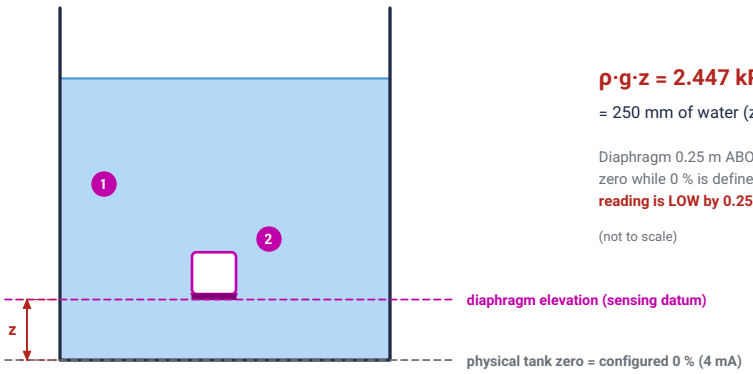
$$\Delta h = -z\,, \quad \Delta P = \rho \cdot g \cdot z \tag{8}$$

z	ارتفاع دیافراگم بالای Datum	m
Δh	خطای Level (منفی: کمنمایی)	m
ΔP	آفست فشار معادل	Pa

مثال عددی **آفست ناشی از 0.25 m اختلاف ارتفاع**

$$\Delta P = 998.21 \times 9.80665 \times 0.25 = 2.447 \text{ kPa}$$

نتیجه: Level 250 mm ≈ 2.447 kPa؛ **برای** Span 0–97.89 kPa (۰–۱۰ m) **این** 2.5 % **از** Span **و معادل** 0.4 mA **است — بسیار بزرگ‌تر از دقت مرجع ترانسمیتر؛ راه‌حل: اندازه‌گیری ارتفاع دیافراگم و ثبت آن در** LRV **یا** Zero Trim **در تراز مرجع.**



شکل ۹ — سه مرجع ارتفاعی؛ اختلاف z دیافراگم با صفر فیزیکی مخزن مستقیماً آفست Level می‌شود

1 Level مایع 2 دیافراگم پروب

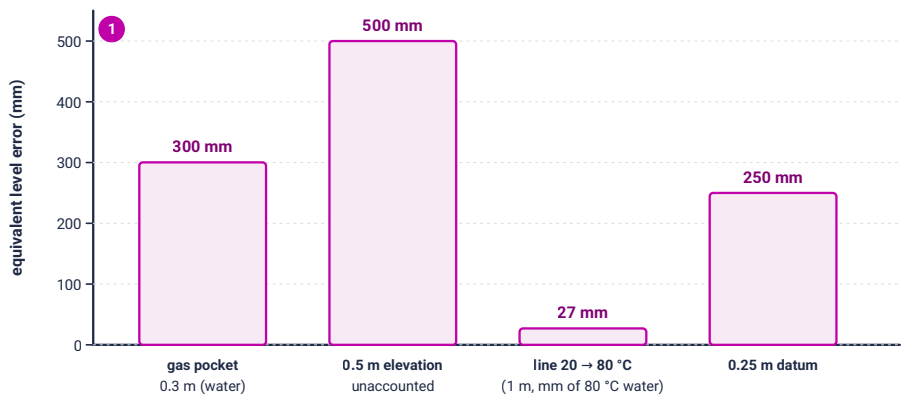
20 Impulse Line خارجی

برای ترانسمیتر خارجی، لولهٔ اتصال (Impulse Line) با ستون مایع خود در اندازه‌گیری شرکت می‌کند. فشار در ترانسمیتر:

$$P_{xmtr} = P_{tap} + \rho_{line} \cdot g \cdot z \qquad (9)$$

P_{tap}	فشار در نقطهٔ تپینگ	Pa
ρ_{line}	چگالی سیال داخل لوله	kg/m³
z	اختلاف ارتفاع قائم ترانسمیتر زیر تپینگ (مثبت) یا بالای آن (منفی)	m

چهار عامل خطا (شکل ۱۰): **حباب گاز** — ستون مایع 0.3 m جای خود را به گاز می‌دهد و ρ·g·0.3 = 2.94 kPa (3.00 ٪ از Span 97.89 kPa) کم می‌شود؛ **چگالی** — اگر سیال لوله با سیال فرآیند فرق داشته باشد (لولهٔ سیل‌شده یا مایع جداگانه)، $\rho_{line} \neq \rho$ و ضریب z عوض می‌شود؛ **ارتفاع** — اختلاف تراز را باید در LRV لحاظ کرد: برای آب z = 0.5 m برابر 4.89 kPa (500 mm) است؛ **دما** — لولهٔ بیرونی با دمای محیط عوض می‌شود: در یک لولهٔ آب به ارتفاع 1 m تغییر از 20 به 80 °C فشار حدود 259 Pa (معادل 27 mm ستون آب 80 °C) را عوض می‌کند. مقدار این اثر در مقایسه با حباب و ارتفاع کوچک ولی در Span کوچک قابل توجه است.



شکل ۱۰ — مقایسهٔ اندازهٔ عوامل خطای Impulse Line و Datum برحسب Level معادل (آب)

1 اندازهٔ خطای هر عامل

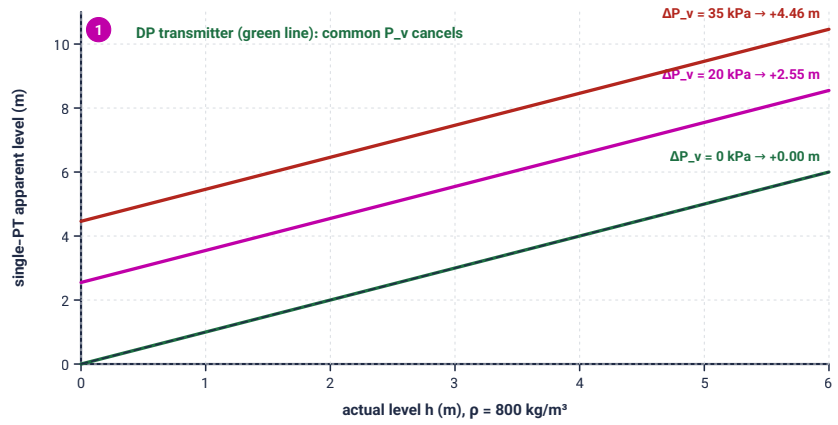
21 مخزن بسته و تحت فشار

از معادلهٔ ۲ ((۲)) برای مخزن بسته با فضای بخار P_V:

$$P_{bottom} = P_v + \rho \cdot g \cdot h\,, \quad h = (P_{bottom} - P_v) / (\rho \cdot g) \tag{10}$$

P_V	فشار فضای بخار (گاز پوششی، بخار تعادلی یا فشار فرآیند)	Pa

ترانسمیتر فشار تنها P_{bottom} را می‌بیند. اگر P_V از $P_{V,0}$ به $P_{V,0} + \Delta P_V$ برسد و Level ثابت باشد، فشار اندازه‌گیری‌شده به همان اندازه بالا می‌رود و Level ظاهری $h_{apparent} = h + \Delta P_V/(\rho g)$ می‌شود: برای $\rho = 800\ kg/m^3$ و $\Delta P_V = 35\ kPa$ خطا 4461 mm است (شکل ۱۱) — بزرگ‌تر از Span بسیاری از مخزن‌ها. بنابراین یک ترانسمیتر فشار تنها هرگز نمی‌تواند Level را در مخزنی با P_V متغیر یکتا تعیین کند؛ دو راه: **ترانسمیتر فشار + جبران** (ترانسمیتر دوم P_V را اندازه می‌گیرد و DCS $h = (P_{bottom} - P_V)/(\rho g)$ را حساب می‌کند؛ دو خطای حسگر و دو مسیر سیگنال، همزمانی لازم) یا **ترانسمیتر اختلاف فشار** (DP) که فشار مشترک را از هر دو سمت حذف می‌کند.



شکل ۱۱ — Level ظاهری تک‌ترانسمیتر فشار برای سه تغییر P_v و رفتار DP

1 مقایسه خطوط Level ظاهری

22 جبران بارومتریک در برابر جبران فشار بخار

این دو مفهوم کاملاً جدا هستند و نباید با هم مخلوط شوند. **جبران بارومتریک** برای مخزن باز (یا مرجع اتمسفری) است: متغیر، فشار اتمسفر P_{atm} است که محدودهٔ تغییر آن چند kPa، کند (ساعت‌ها تا روزها) و بدون ارتباط با فرآیند است. **جبران فشار بخار** برای مخزن بسته است: متغیر، فشار گاز یا بخار داخل مخزن P_v است که می‌تواند ده‌ها یا صدها kPa و سریع باشد و با فرآیند (دما، تغذیه، کنترل فشار) ارتباط دارد. مرجع آن‌ها نیز متفاوت است: P_{atm} را ترانسمیتر مرجع جو یا حسگر نسبی می‌دهد؛ P_v باید از نقطهٔ همان مخزن (فضای بخار) اندازه‌گیری شود. یک ترانسمیتر بارومتریک هرگز P_v مخزن را جبران نمی‌کند و برعکس.

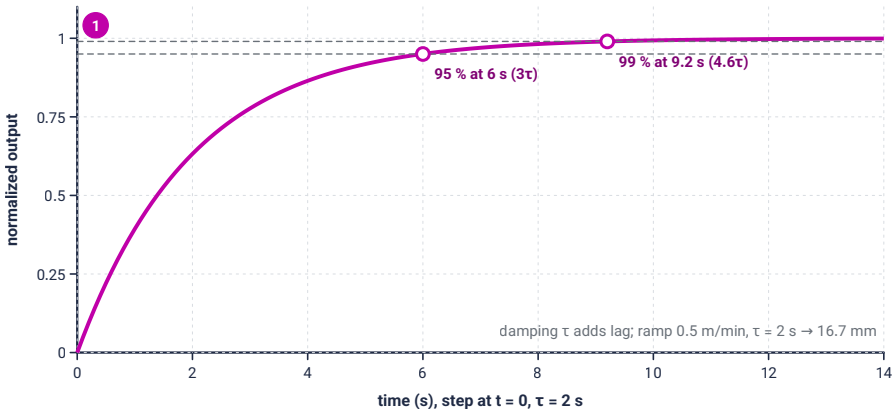
23 پاسخ دینامیکی

زنجیرهٔ دینامیکی: تغییر Level ← تغییر فشار ← دیافراگم ← حسگر ← الکترونیک ← خروجی. زمان پاسخ بیشتر از الکترونیک و Damping تعیین می‌شود؛ حرکت مایع و انتقال فشار از دیافراگم معمولاً بسیار سریع‌تر از مقیاس زمانی Level است. **Damping:** فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ اول با ثابت زمانی τ نوسان را کم می‌کند و پاسخ پله‌ای $y(t) = 1 - e^{-t/\tau}$ دارد.

$$y(t) = 1 - \exp(-t / \tau) \quad (11)$$

τ	ثابت زمانی Damping	s
y	خروجی نرمال‌شده نسبت به مقدار نهایی	—
t	زمان از لحظهٔ پله	s

برای τ = 2 s: 95 % در 3τ = 6 s و 99 % در 4.605τ = 9.2 s (شکل ۱۲). برای Level متغیر با نرخ 0.5 m/min، یک فیلتر مرتبهٔ اول با τ = 2 s تأخیر ماندگار v·τ = 16.7 mm ایجاد می‌کند. Damping بلند برای حذف موج مفید ولی برای کنترل سریع یا آلارم Level بالا مضر است؛ مقدار آن باید با فرآیند تطبیق داده شود. کابل بلند و فیلتر الکترونیکی در حلقهٔ 4–20 mA نیز ثابت زمانی کوچک اضافه می‌کنند؛ مقدار آن از مدرک سازنده MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.



شکل ۱۲ — پاسخ پله‌ای ترانسمیتر با Damping مرتبهٔ اول و τ = 2 s

1 منحنی پاسخ

24 حرکت مایع

موج، همزن و تلاطم پمپ دو اثر دارند. اثر اول **نوسان** Level است: موج به ارتفاع 0.1 m نوسان فشار ρgΔh = 0.98 kPa ایجاد می‌کند که با Damping میانگین‌گیری می‌شود ولی نه حذف. اثر دوم **فشار دینامیکی** است: اگر دیافراگم در مسیر جریان با سرعت v قرار گیرد، فشار اضافی در جهت جریان حدود فشار سکون (Stagnation) است:

$$\Delta P_{dyn} \approx \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \qquad (12)$$

ΔP_{dyn}	فشار دینامیکی در نقطهٔ سکون؛ بالای حد برای جریان یکنواخت روبه‌روی دیافراگم	Pa
v	سرعت محلی مایع در محل دیافراگم	m/s

برای آب با v = 1 m/s: ΔP_{dyn} = 499 Pa (51 mm) و برای 0.5 m/s: 125 Pa (13 mm). علامت خطا به جهت جریان نسبت به دیافراگم بستگی دارد؛ یک ابزار عملی برای کاهش خطا قرار دادن پروب در لولهٔ آرام‌کننده (Stilling Well) یا دور از ورودی/پمپ است ENGINEERING RECOMMENDATION. این تقریب مرتبهٔ اول فقط جریان یکنواخت را پوشش می‌دهد؛ گرداب و کاویتاسیون موضعی را شامل نمی‌شود ASSUMPTION.

25 حرکت پروب غوطه‌ور

پروبی که آویزان است می‌تواند در اثر جریان، همزن یا کشش کابل جابه‌جا یا نوسان کند. سه اثر: **تغییر عمق** — نوسان قائم پروب مستقیماً Δh = Δz می‌سازد؛ **تغییر زاویه** — پروب کج با زاویهٔ θ نسبت به قائم، عمق مؤثر دیافراگم را به L·cosθ کاهش می‌دهد (اثر مرتبهٔ دوم برای زاویه‌های کوچک: Δh ≈ L·θ²/2) و دیافراگم نیروی دینامیکی جانبی دریافت می‌کند؛ **نیروی جریان** — مطابق معادلهٔ فشار دینامیکی. توصیه‌ها: وزنهٔ مناسب (مطابق دستور سازنده)، لولهٔ راهنما، تکیه‌گاه کابل در بالا و جلوگیری از چرخش آزاد.

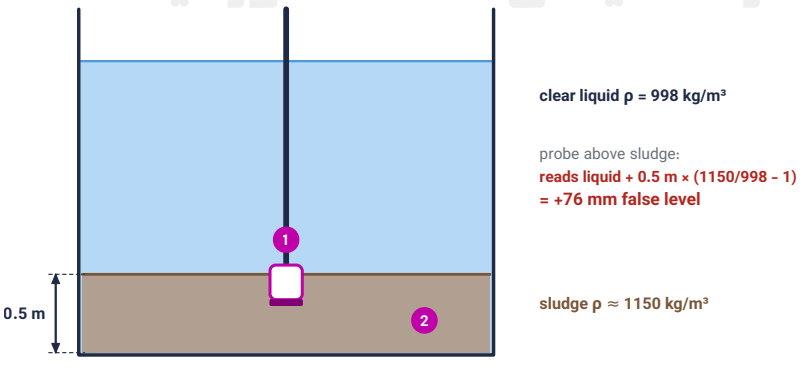
26 لجن و رسوب

در حوضچه‌های فاضلاب و مخازن حاوی رسوب چهار پدیده رخ می‌دهد (شکل ۱۳): **دفن شدن پروب** در لجن؛ **مسدود شدن دیافراگم** (منفذ یا کلاهک)؛ **اختلاف چگالی** میان لجن و مایع روشن؛ و Level **کاذب**. اگر پروب در بستر لجن به ضخامت h_s و چگالی ρ_s نصب شود، فشار آن بیشتر از ستون مایع است:

$$\Delta h = h_s \cdot (\rho_s / \rho_w - 1) \quad (13)$$

h_s	ضخامت لایهٔ لجن بالای دیافراگم	m
ρ_s, ρ_w	چگالی لجن و مایع روشن	kg/m³

برای h_s = 0.5 m، ρ_s = 1150 kg/m³ و ρ_w = 998.21: Δh = +76 mm — بیش‌نمایی. اگر پروب کاملاً در لجن غوطه‌ور و دیافراگم مسدود شود، فشار منتقل‌شده ناقص است و Level پایین‌تر یا ساکن دیده می‌شود. چون این اثر به رفتار ضخیم‌شدن لجن بستگی دارد، فاصله از بستر و برنامهٔ تمیزکاری باید طراحی شود. **ENGINEERING RECOMMENDATION**



شکل ۱۳ — پروب بالاتر از بستر لجن؛ خطای ناشی از چگالی بالاتر لجن

1 پروب با دیافراگم 2 بستر لجن

27 نفوذ آب

ورود آب به کابل یا محفظه از طریق آب‌بند آسیب‌دیده، خاتمهٔ نادرست یا خیس‌شدن لولهٔ تنفس سه نوع پیامد دارد. **پیامد اندازه‌گیری:** تغییر مرجع فشار (در حسگر نسبی)، رانش صفر و نویز در سیگنال. **پیامد قابلیت اطمینان:** خوردگی اتصال‌ها، نشتی جریان به زمین، خرابی الکترونیک و در بدترین حالت تماس مایع با حسگر. **عدم تشخیص:** بسیاری از این خطاها ابتدا به‌صورت رانش یا بی‌ثباتی ظاهر می‌شوند و به همین علت در پایش روند (Trend) و مقایسه با Level مستقل دیده می‌شوند. معیار IP (مطابق IEC 60529 REQUIRES VERIFICATION) فقط شرایط آزمون محفظه را توصیف می‌کند و به‌تنهایی عمر طولانی در غوطه‌وری، ایمنی کابل یا سالم بودن مسیر تهویه را تضمین نمی‌کند.

28 طول کابل در برابر محدودهٔ اندازه‌گیری

می‌خواهیم صریحاً نشان دهیم طول کابل یک پارامتر نصب و محدودهٔ فشار / Level یک پارامتر اندازه‌گیری است. در معادلهٔ $P = \rho \cdot g \cdot h$، h ارتفاع قائم مایع بالای دیافراگم است؛ طول کابل L_c در این رابطه ظاهر نمی‌شود. **اثبات مفهومی:** فرض کنید پروب ثابتی در عمق قائم d زیر سطح مایع باشد؛ فشار آن $\rho \cdot g \cdot d$ است. کابل بلندتر یا کوتاه‌تر که فقط مسیر پروب تا جعبه را می‌سازد (حتی اگر پیچ و تاب بخورد یا افقی باشد)، d را تغییر نمی‌دهد؛ بنابراین P و محدودهٔ لازم نیز تغییر نمی‌کنند. شرط ضروری تنها مسیر افقی/عمودی تا جعبه + رزرو + $L_c \geq d_{install}$ است. مثال: چاه با $L_c = 100\ m$ ولی پروب در $80\ m$ زیر زمین و آب ایستا در $25\ m$: ستون آب $55\ m$، $P = 538.9\ kPa$؛ اگر همان پروب با کابل $150\ m$ در همان نقطه آویزان شود، همان فشار و همان محدودهٔ (0–6 bar) لازم است. محدوده از Level و چگالی؛ کابل از عمق نصب و مسیر تعیین می‌شود. دو پارامتر در برگهٔ داده در دو ستون جدا ثبت شوند NICO DESIGN PRACTICE.

29 انتخاب محدودهٔ فشار

دو ریسک متقابل وجود دارد. **محدودهٔ بسیار باریک** — اگر P_{max} بیش از محدودهٔ حسگر شود خروجی اشباع می‌شود و در اضافه‌فشار شدید آسیب دائمی ممکن است؛ باید $P_{max} = \rho_{max} \cdot g \cdot h_{max}$ با Overfill و بیشینهٔ چگالی کمتر از محدودهٔ مجاز اضافه‌فشار باشد. **محدودهٔ بسیار پهن** — Span کاربردی کسر کوچکی از محدودهٔ حسگر می‌شود؛ خطای مرجع که معمولاً به‌صورت درصدی از محدودهٔ حسگر (URL) تعریف می‌شود در Turndown بالا به خطای بزرگ‌تری نسبت به Span کاربردی تبدیل می‌شود: $e_{span} = e_{URL} \times (URL/Span)$. برای مثال با فرض خطای 0.1 % از URL و Turndown 4:1، خطای نسبی نسبت به Span برابر 0.40 % خواهد بود ASSUMPTION. معماری دقت ترانسمیتر (اینکه خطا نسبت به URL یا Span تعریف شود، و Turndown مجاز) فقط از مدرک سازنده MANUFACTURER-SPECIFIC DATA و فقط پس از تأیید قابل استفاده است REQUIRES VERIFICATION.

30 مدل دقت ایستا (Static Accuracy Model)

خطای ایستای Level را به مؤلفه‌های مستقل تفکیک می‌کنیم (جدول ۳). هر مؤلفه با یکای Level بیان می‌شود و در بخش ۳۱ با GUM ترکیب می‌شود.

جدول ۳ — مؤلفه‌های مدل دقت ایستا و منشأ هر کدام

مؤلفه	منشأ	اثر بر Level
دقت مرجع (Reference Accuracy)	کالیبراسیون، خطی بودن، پسماند (Hysteresis) و تکرارپذیری حسگر در شرایط مرجع	δP/(ρg)؛ مستقل از Level، متناسب با Span
خطای صفر (Zero Error)	انحراف صفر و رانش صفر	آفست ثابت mm
خطای Span (Span Error)	خطای شیب، پیکربندی URV	خطای نسبی با Level متناسب
اثر دما	دمای محیط و فرآیند بر حسگر و الکترونیک	جابه‌جایی صفر و Span
پایداری درازمدت	رانش با زمان	جابه‌جایی صفر و Span در یک سال
خطای چگالی	$\rho_{assumed} \neq \rho_{actual}$	متناسب با Level
خطای نصب	Datum، ارتفاع حسگر، Impulse Line	آفست ثابت
خطای بارومتریک	مرجع نادرست در مدل مطلق یا Vent مسدود	متناسب با تغییر P_{atm}

31 عدم‌قطعیت اندازه‌گیری (Measurement Uncertainty)

عدم‌قطعیت Level به‌صورت رسمی بر پایهٔ راهنمای JCGM 100:2008 (GUM) REQUIRES VERIFICATION ترکیب می‌شود؛ جمع ساده درصدها مجاز نیست، چون مؤلفه‌ها مستقل‌اند و با احتمال جبران هم‌دیگر را کم‌اهمیت می‌کنند. معادلهٔ مدل اندازه‌گیری برای حسگر نسبی تهویه‌شده:

$$h = (P_{meas} - P_{ref}) / (\rho \cdot g) - z \qquad (14)$$

P_{meas}	فشار اندازه‌گیری‌شده توسط حسگر	Pa
P_{ref}	باقی‌ماندهٔ مرجع (Vent) نسبت به اتمسفر واقعی	Pa
z	اختلاف ارتفاع دیافراگم با Datum	m

ضرایب حساسیت (Sensitivity Coefficients) از مشتق جزئی: $c_P = dh/dP = 1/(\rho g)$، $c_\rho = dh/d\rho = -h/\rho$، $c_g = dh/dg = -h/g$، $c_z = dh/dz = -1$. هر ورودی x_i با عدم‌قطعیت استاندارد $u(x_i)$ سهمی $c_i \cdot u(x_i)$ به خروجی می‌دهد. چون ورودی‌ها مستقل فرض می‌شوند:

$$u_c(h) = \sqrt{\left(\Sigma\, c_i^2 \cdot u^2(x_i) \right)}, \quad U = k \cdot u_c \qquad (15)$$

u_c	عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی	mm
k	ضریب پوشش؛ k = 2 برای حدود ۹۵٪ تحت فرض توزیع نرمال	—
U	عدم‌قطعیت بسط‌یافته	mm

$$u = a / \sqrt{3} \quad (16)$$

a	نیم‌پهنای بازه برای توزیع مستطیلی (Rectangular) با حدود a± و بدون اطلاع بیشتر	همان یکای x_i

فرض‌های بودجهٔ عدم‌قطعیت (Assumptions)

1. مؤلفه‌ها مستقل هستند و همبستگی ندارند (در عمل رانش و اثر دما ممکن است همبسته باشند؛ آن‌گاه بودجهٔ کمتر از واقعیت است).
   ASSUMPTION
2. مشخصات ترانسمیتر (±۰٫۱۰ ٪ Span برای دقت مرجع، اثر دما و پایداری) فرض آموزشی‌اند، نه مشخصهٔ هیچ محصول NICO؛ باید با برگهٔ فنی جایگزین شود.
   ASSUMPTION · REQUIRES VERIFICATION
3. توزیع‌های مستطیلی برای مؤلفه‌هایی که فقط حد دارند؛ $u = a/\sqrt{3}$. اندازه‌گیری مرجع با u = 2 mm استاندارد.
   ENGINEERING RECOMMENDATION (GUM)
4. k = 2 با درجات آزادی مؤثر بزرگ؛ برای بودجه‌ای که یک مؤلفهٔ مستطیلی بر آن غالب است باید با شبیه‌سازی مونت‌کارلو (JCGM 101) تأیید شود.
   REQUIRES VERIFICATION

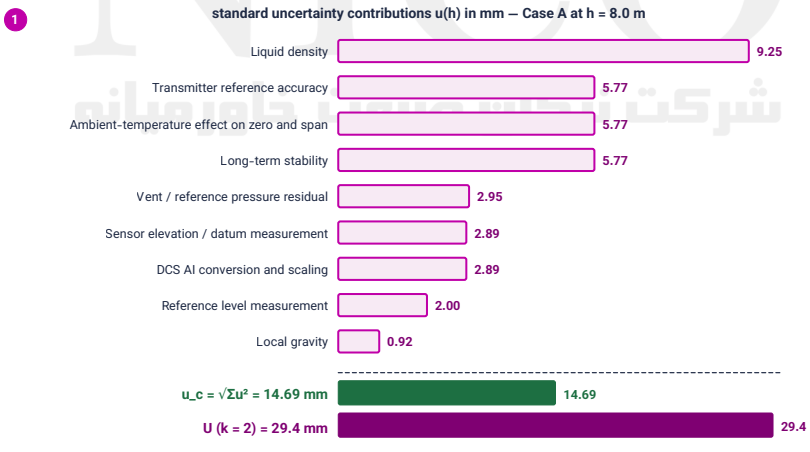
بودجهٔ عدم‌قطعیت — مورد Level A (8.0 m از مخزن آب، 10 m Span، 0–97.89 kPa)

جدول ۴ — بودجهٔ عدم‌قطعیت استاندارد Level بر حسب mm؛ ضرایب c_i به mm تبدیل شده‌اند

ID	منبع عدم‌قطعیت	مبنا / توزیع	u_i (mm)	سهم از u_c^2 (٪)
u1	Transmitter reference accuracy (calibration + linearity + hysteresis)	±0.10 % of span, rectangular	5.77	15.4
u2	Ambient-temperature effect on zero and span	±0.10 % of span, rectangular	5.77	15.4
u3	Long-term stability (12 months)	±0.10 % of span, rectangular	5.77	15.4
u4	Liquid density (water 10–30 °C vs design ρ at 20 °C)	±2.0 kg/m³, rectangular	9.25	39.7

ID	منبع عدم‌قطعیت	مبنا / توزیع	(mm) u_i	سهم از (%) u_c^2
u5	Sensor elevation / datum measurement	±5 mm tape, rectangular	2.89	3.9
u6	Local gravity (after g correction)	±0.02 %, rectangular	0.92	0.4
u7	Vent / reference pressure residual	±50 Pa, rectangular	2.95	4.0
u8	DCS AI conversion and scaling	±0.05 % of span, rectangular	2.89	3.9
u9	Reference level measurement (verification tape)	u = 2 mm, standard	2.00	1.9
	$u_c = \sqrt{\Sigma u_i^2}$		**14.69**	100
	(k = 2) $U = 2 \cdot u_c$		**29.4**	

نتیجه: u_c = 14.69 mm و U (k=2) = 29.4 mm، یعنی 0.37 % از Level خوانده‌شده (8 m) و 0.29 % از 10 m Span (حدود 0.047 mA روی خروجی 4–20 mA). غالب‌ترین مؤلفه چگالی است (39.7 % از u_c^2)، سپس سه مؤلفهٔ ترانسمیتر (15.4 % هر کدام). جمع حسابی نیم‌پهناها 65 mm می‌شد که «کران بدترین حالت» است و نه برآورد آماری؛ اختلاف آن با U دلیل رد جمع ساده است (شکل ۱۴). اگر چگالی را با اندازه‌گیری دما اصلاح کنیم، بزرگ‌ترین سهم کم می‌شود؛ ولی خطای مدل چگالی و اندازه‌گیری دما جایگزین آن می‌شوند.



شکل ۱۴ — سهم مؤلفه‌ها در عدم‌قطعیت استاندارد Level؛ ترکیب با ریشهٔ مجموع مربعات

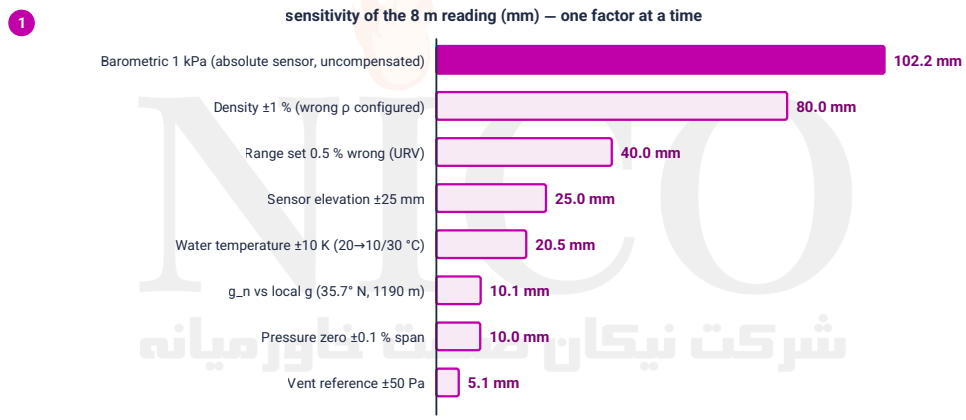
1 بودجهٔ مورد A

32 تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis)

حساسیت Level خوانده‌شده 8 m به شش عامل را با تغییر یک‌به‌یک (One-at-a-time) و با دامنه‌های واقع‌گرایانهٔ هر عامل مقایسه می‌کنیم (شکل ۱۵ و جدول ۵). این تحلیل «کدام عامل مهم‌تر است» را مشخص می‌کند، نه عدم‌قطعیت کل.

جدول ۵ — ماتریس حساسیت Level 8 m به ورودی‌ها (اثر در mm)

عامل	دامنه	اثر (mm)	توضیح
فشار بارومتریک (حسگر مطلق بدون جبران)	1 kPa	102.2	Δh = ΔP/(ρg)؛ با حسگر نسبی سالم صفر است
چگالی	±1 %	80.0	δh = h·δρ/ρ
پیکربندی URV	0.5 %	40.0	خطای Span؛ با Level متناسب
ارتفاع حسگر	±25 mm	25.0	آفست مستقیم
دمای آب	±10 K (20→10/30 °C)	20.5	از IAPWS-95؛ بزرگ‌ترین دو جهت
g_n در برابر g محلی	35.7° N، 1190 m	10.1	در دقت‌های معمول ناچیز
صفر فشار	±0.1 % Span	10.0	آفست ثابت
مرجع Vent	±50 Pa	5.1	باقی‌ماندهٔ مرجع



شکل ۱۵ — نمودار Tornado؛ حساسیت Level 8 m به عوامل (یک عامل در هر بار)

1 مرتب‌شده از بزرگ‌ترین

نتیجه: بدون جبران بارومتریک، یک ساختار مطلق بدون جبران بدترین حساسیت را دارد؛ چگالی دومین عامل است؛ عوامل نصب (ارتفاع) و پیکربندی (URV) قابل کنترل با روش‌اند. این ترتیب برای هر فرآیند متفاوت است و با تغییر دامنه‌ها عوض می‌شود؛ بنابراین جدول فقط برای دامنه‌های ذکرشده معتبر است ASSUMPTION.

33 مورد A — مخزن آب باز

مورد A **مخزن آب باز** با 10 m Level **عملیاتی** 8.0 m

داده‌ها: ارتفاع مخزن 10 m؛ آب 20 °C؛ چگالی ρ = 998.21 kg/m³ (IAPWS-95)؛ حسگر نسبی؛ دیافراگم در Datum؛ Span 0–10 m.

$$P(8\ m) = 998.21 \times 9.80665 \times 8 = 78.31\ kPa$$

$$LRV = 0\ kPa\ ;\ URV = 97.89\ kPa\ (10\ m)\ ;\ Span = 97.89\ kPa$$

$$I = 4 + 16 \times (78.31 - 0) / (97.89 - 0) = 16.80\ mA$$

عدم‌قطعیت (جدول جدول ۴): U (k=2) = 29.4 mm یعنی ±0.29 % از Span یا ±0.047 mA روی 16.80 mA.

نتیجه: 8.0 m ± 29.4 mm (k = 2)؛ **سهم غالب: چگالی** (39.7 %)، **سپس مؤلفه‌های ترانسمیتر. اگر دقت ±۰٫۳ % Span لازم باشد، این طراحی با فرض‌های بالا مرز را برآورده می‌کند** ASSUMPTION.

34 مورد B — چاه عمیق

مورد B **چاه با کابل بلند؛ پروب در** 80 m**، آب ایستا در** 25 m**، محل** 1200 m **از سطح دریا**

فشار مورد انتظار: ستون آب 55 m، ρ = 999.10 kg/m³ (15 °C):

$$P_{gauge} = 999.10 \times 9.80665 \times 55 = 538.9\ kPa$$

$$P_{atm}\ (ISA,\ 1200\ m) = 87.7\ kPa \rightarrow P_{abs} = 626.6\ kPa$$

محدوده: برای 60 m حداکثر ستون: P_{max} = 587.9 kPa ← محدودهٔ نمونهٔ 0–6 bar (بهره‌برداری 98 % نسبت به این Level است؛ حاشیهٔ بیشتر نیاز دارد) ASSUMPTION.

معماری مرجع فشار: دو گزینه. (۱) حسگر نسبی با 100 m Vented Cable: P_{atm} خودکار حذف می‌شود؛ ریسک: مسیر تهویه و رطوبت. (۲) حسگر مطلق + جبران بارومتریک: مرجع بارومتریک در سر چاه لازم است؛ اگر مقدار سطح دریا فرض شود، خطای ثابت 1.39 m (102 mm به‌ازای هر kPa) ایجاد می‌شود. مناسب‌ترین گزینه به دسترسی به مرجع بارومتریک و ریسک Vent وابسته است ENGINEERING RECOMMENDATION.

مؤلفه‌های عدم‌قطعیت استاندارد:

مؤلفه	u_i (mm)
Pressure sensor reference + stability (±0.10 % of 600 kPa span)	35.4
Probe depth reference (cable stretch / mark, ±0.15 m)	86.6
Density (groundwater 12–18 °C, ±0.6 kg/m³ about 999.1)	19.1
Vent reference residual (±100 Pa, 100 m vented cable)	5.9
DCS scaling and AI (±0.05 % of span)	17.7
Reference measurement (e-line, u = 10 mm)	10.0

$$u_c = \sqrt{\Sigma u_i^2} = 98 \text{ mm} ; U\ (k = 2) = 196 \text{ mm}$$

نتیجه: $U \approx 196$ mm **(حدود 0.36 % از 55 m)؛ مؤلفهٔ غالب عمق مرجع پروب (کشش کابل و علامت‌گذاری) است، نه حسگر. بهبود عدم‌قطعیت با اندازه‌گیری مستقل عمق پروب انجام می‌شود، نه با ترانسمیتر دقیق‌تر.**

35 مورد C — آب شور

مورد C **فرض چگالی آب در برابر چگالی واقعی آب‌نمک**

داده‌ها: Level واقعی 5 m؛ ترانسمیتر برای $\rho_{assumed}$ = 998.21 kg/m³ پیکربندی شده؛ سیال‌های واقعی در 20 °C : آب دریا 1024.77 (TEOS-10) REQUIRES VERIFICATION، NaCl 10 %: 1070.7، NaCl 20 %: 1147.8 kg/m³ (مرجع REQUIRES VERIFICATION).

$$e = h \cdot (\rho_{actual}/\rho_{assumed} - 1)$$

NaCl 20 % : 5000 × (1147.8 / 998.21 - 1) = +749 mm (+14.99 %)

NaCl 10 % : +363 mm (+7.26 %)

Seawater : +133 mm (+2.66 %)

نتیجه: چگالی بالاتر ← خوانش بیش‌نمایی‌شده؛ برای آب‌نمک ۲۰٪ در 5 m خطا +749 mm است (شکل ۸). اگر محدودهٔ ترانسمیتر هم بر پایهٔ آب انتخاب شده باشد، خروجی در Level کمتر از Level بالا اشباع می‌شود (مورد C سطح ۲). راه‌حل: ثبت چگالی واقعی در پیکربندی، یا اندازه‌گیری چگالی/شوری و جبران.

36 مورد D — تغییر دما

مورد D **خطای Level ناشی از تغییر چگالی آب بین دو دما**

داده‌ها (IAPWS-95 REQUIRES VERIFICATION**):** ρ(20 °C) = 998.21 kg/m³، ρ(60 °C) = 983.20 kg/m³؛ Level واقعی 6 m؛ ترانسمیتر برای 20 °C پیکربندی شده است.

$$e_T = \rho(60) / \rho(20) - 1 = 983.20 / 998.21 - 1 = -1.504\ \%$$

$$\Delta h = 6000 \times (-1.504 / 100) = -90\ \text{mm}$$

نتیجه: برای مخزن آب 60 °C با پیکربندی 20 °C، Level واقعی 90- mm (1.504- %) کمتر نشان داده می‌شود. جبران دما، فقط تغییر چگالی ناشی از دما را حل می‌کند و خطای ناشی از غلظت یا ترکیب را جبران نمی‌کند؛ بنابراین جبران دما «مشکل چگالی» را کلاً حل نمی‌کند. برای 20 °C → 80 °C: 2.646- %.

37 مورد E — حسگر مطلق

مورد E **حسگر مطلق بدون جبران بارومتریک**

داده‌ها: آب 20 °C؛ $P_{baro,assumed}$ = 101.325 kPa ثابت؛ فشار جو واقعی 2 kPa کمتر از مقدار فرضی (نمونه؛ ASSUMPTION).

$$\Delta h = \Delta P_{atm} / (\rho \cdot g) = 2000 / (998.21 \times 9.80665) = 204\ \text{mm}$$

نتیجه: ΔP_{atm} = 2- kPa ← **خوانش حدود 204 mm کمتر (در 10 m Span معادل 0.33 mA)؛ علامت: افت فشار جو → Level محاسبه‌شده کمتر. این خطا به Level مایع بستگی ندارد و در هر Level ثابت است.**

38 مورد F — مخزن بسته

مورد F **خطای Level از تغییر فشار بخار و حذف آن با DP**

داده‌ها: ρ = 800 kg/m³؛ Level واقعی 3 m؛ فشار بخار از $P_{v,0}$ به $P_{v,0}$ + 35 kPa می‌رسد (نمونه؛ ASSUMPTION).

$$\text{Single PT}: \Delta h = \Delta P_v / (\rho \cdot g) = 35000 / (800 \times 9.80665) = 4461\ \text{mm}$$

معماری DP: سمت HP به پایین مخزن و سمت LP به فضای بخار (Dry Leg) وصل است؛ اگر پایهٔ LP با گاز با چگالی ρ_v = 3 kg/m³ و ارتفاع H = 5 m پر باشد:

$$\Delta P = (P_v + \rho g h) - (P_v + \rho_v g H) = \rho \cdot g \cdot h - \rho_v \cdot g \cdot H$$

$$\rho_v \cdot g \cdot H = 3 \times 9.80665 \times 5 = 147\ \text{Pa} \rightarrow 0.62\ \%\ \text{of}\ \rho \cdot g \cdot h\ \text{at}\ h = 3\ \text{m}$$

نتیجه: P_v از ΔP حذف می‌شود؛ خطای باقی‌مانده فقط سر ستون گاز 147 Pa (0.62 %) **است که ثابت و جبران‌شدنی در** LRV **است. در مقابل، یک ترانسمیتر فشار تنها برای تغییر** 35 kPa **خطای** 4461 mm **می‌دهد. محدودیت:** DP **فقط وقتی** P_v **را حذف می‌کند که هر دو سمت همان فشار را ببینند و سیال پایه‌ها تعریف‌شده** (Dry **یا** Wet Leg) **باشد؛ طراحی پایه‌ها موضوع محتوای** DP Level **است.**

39 کالیبراسیون

باید دو فعالیت را از هم جدا کرد. **کالیبراسیون فشار** (Pressure Calibration) : ترانسمیتر با مرجع فشار قابل‌ردیابی (Traceability) در چند نقطه بررسی می‌شود؛ خروجی: خطای As Found و As Left. **راستی‌آزمایی کامل** Level **نصب‌شده**: کل زنجیره (حسگر، مرجع، Datum، چگالی، مقیاس‌دهی DCS) با Level واقعی مقایسه می‌شود. کالیبراسیون به‌خودی‌خود تنظیم (Adjustment) نیست؛ تا زمانی که Zero/Span تغییر نکرده، نباید گفته شود ابزار «تنظیم» شده است.

جدول ۶ — روش‌های کالیبراسیون و راستی‌آزمایی سطح‌سنج هیدرواستاتیک

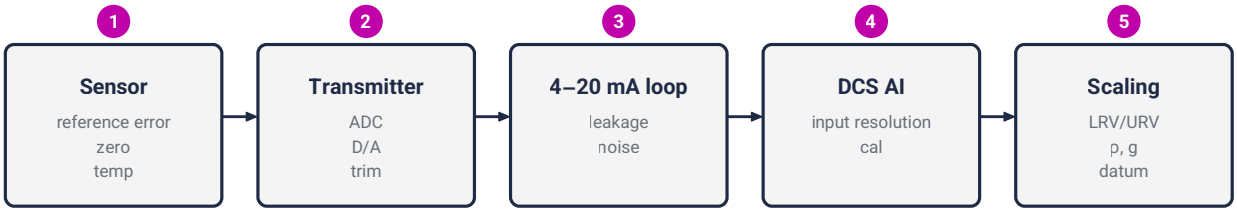
روش	شرح	محدودیت
کالیبراسیون فشار (Dry)	اعمال فشار معلوم (کالیبراتور یا Deadweight) به دیافراگم؛ بررسی 4–20 mA در ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ ٪	Datum، چگالی و Vent را نمی‌سنجد
شبیه‌سازی فشار خشک (Dry Pressure Simulation)	ایجاد فشار معادل pgh برای هر Level؛ مناسب پیش از نصب	جایگزین کالیبراسیون واقعی نیست؛ چگالی فرضی در محاسبه
کالیبراسیون تر (Wet)	غوطه‌ور کردن در مایع با Level معلوم و مقایسه با مرجع	وابسته به چگالی و مرجع Level؛ مناسب در کارگاه
راستی‌آزمایی صفر	پروب در هوا (برای نسبی) یا مخزن خالی با Level معلوم؛ Zero Trim فقط در شرایط تعریف‌شده	در مخزن بسته به مرجع نیاز دارد
راستی‌آزمایی Span	مقایسه در Level بالا با مرجع مستقل (متر، لوله‌کشی، لوله سنجش)	u مرجع مستقیم در بودجه می‌آید
راستی‌آزمایی نصب‌شده	مقایسهٔ Level DCS با Level مرجع در حداقل دو نقطه و ثبت اختلاف به‌همراه U	اختلاف باید با U ترکیبی قیاس شود

40 خطای 4–20 mA

زنجیرهٔ تبدیل از فشار تا Level در DCS پنج مرحله دارد (شکل ۱۶) و هر مرحله خطای مستقل خود را اضافه می‌کند. نگاشت خطی جریان:

$$I = 4 + 16 \cdot (P - LRV) / (URV - LRV)\ [mA] \quad (17)$$

I	جریان خروجی	mA
LRV, URV	فشار متناظر با ۴ mA و ۲۰ mA	Pa



each stage contributes an independent standard uncertainty; they are combined as root-sum-of-squares

شکل ۱۶ — منشأ خطا در پنج مرحلهٔ تبدیل از فشار تا Level در DCS

1 حسگر 2 ترانسمیتر 3 حلقه 4 ورودی DCS 5 مقیاس‌دهی

جدول ۷ — تفکیک خطاها در زنجیرهٔ 4–20 mA

مرحله	منشأ خطا	روش کنترل
خطای حسگر فشار	دقت مرجع، رانش، اثر دما، مرجع فشار	کالیبراسیون فشار، پایش روند
تبدیل ترانسمیتر	مبدل آنالوگ-دیجیتال و دیجیتال-آنالوگ، Trim خروجی	Output Trim با ابزار مرجع جریان
خروجی آنالوگ	خطای جریان، بار حلقه، نویز و نشتی عایقی	بررسی مقاومت حلقه، شیلد و زمین
ورودی DCS (AI)	رزولوشن و خطای ورودی، مقاومت شنت	کالیبراسیون کارت ورودی (مطابق مشخصه)
مقیاس‌دهی واحد مهندسی	URV/LRV، چگالی و Datum در DCS	راستی‌آزمایی با Level مرجع

مثال: خطای 0.05 % از Span در ورودی DCS معادل 5 mm در محدودهٔ 0–10 m و 0.008 mA است؛ این مقدار در بودجهٔ مورد A با u = 2.89 mm آمده است. خطای مقیاس‌دهی (مثلاً چگالی غلط در DCS) جزء بزرگ‌ترین منابع میدانی است و باید جدا از خطای ابزار بازرسی شود.

FMEA 41

جدول ۸ — تحلیل حالت‌های خرابی و اثرات (FMEA) سطح‌سنج هیدرواستاتیک

Failure Mode	Physical Mechanism	Measurement Effect	Diagnostic Evidence	Corrective Action
Vent **مسدود**	مرجع در فشار قبلی قفل می‌شود	خوانش با وضع جوی جابه‌جا می‌شود	همبستگی خروجی با فشار بارومتریک؛ ثابت‌ماندن مرجع	رفع انسداد؛ بازرسی فیلتر و انتهای کابل

Failure Mode	Physical Mechanism	Measurement Effect	Diagnostic Evidence	Corrective Action
Vent خیس	ستون مایع در لولهٔ تنفس	کمنمایی برابر ارتفاع ستون ($\rho_w g h_w$)	رانش یک‌طرفه؛ آب در انتهای کابل	خشک‌سازی یا تعویض کابل؛ حفاظت خاتمه
چگالی نادرست	$\rho_{assumed} \neq \rho_{actual}$	خطای نسبی عکس در Level	اختلاف با مرجع متناسب با Level	ثبت و اصلاح چگالی؛ جبران
محدودهٔ نادرست	P_{max} > URL یا Span خیلی بزرگ	اشباع یا رزولوشن ضعیف	خروجی ثابت در بالا؛ نوسان زیاد در پایین	اصلاح محدوده؛ محاسبهٔ P_{max}
پروب در لجن	$\rho_s > \rho_w$ و مسدودی دیافراگم	بیش‌نمایی یا Level ساکن	تغییر ناگهانی پس از تمیزکاری	بالا بردن پروب؛ لوله راهنما
خطای ارتفاع پروب	اختلاف دیافراگم با Datum	آفست ثابت z	اختلاف ثابت با مرجع در همه Levelها	اندازه‌گیری z؛ اصلاح LRV
آسیب کابل	برش، له‌شدگی، نفوذ آب	نویز، قطع یا کم‌نمایی (مسیر تهویه)	مقاومت عایقی پایین؛ آلارم قطع	تعویض کابل؛ حفاظت مکانیکی
نفوذ آب	آب‌بند آسیب‌دیده یا خاتمه نادرست	رانش، بی‌ثباتی، خرابی	رطوبت داخل محفظه؛ افت عایقی	تعویض آب‌بند؛ بازرسی خاتمه
رانش حسگر	رانش درازمدت صفر / Span	آفست یا خطای شیب با زمان	اختلاف روند با مرجع در بازهٔ زمانی	کالیبراسیون دوره‌ای؛ Trim مستند
اضافه فشار	فشار بیش از حد مجاز (ضربه، Overfill)	جابه‌جایی صفر دائمی یا خرابی دیافراگم	صفر ثابت جدید پس از رویداد	تعویض حسگر؛ اصلاح محدوده و حفاظت
جبران اتمسفری نادرست	مرجع بارومتریک ثابت یا نامعتبر در مدل مطلق	خطای $\Delta P_{atm}/(\rho g)$	همبستگی با فشار جو	جبران واقعی بارومتریک
مقیاس‌دهی DCS اشتباه	LRV، URV یا چگالی در DCS نادرست	خطای شیب یا آفست در Level	ترانسمیتر درست، DCS اشتباه	تطبیق با برگهٔ داده؛ آزمون حلقه
مخزن بسته بدون جبران فشار گاز	P_V متغیر	Level ظاهری با فشار فرآیند تغییر می‌کند	همبستگی با فشار مخزن	DP یا ترانسمیتر دوم P_V

42 ماتریس راستی‌آزمایی طراحی (Design Verification Matrix)

ماتریس زیر برای «مورد A» تکمیل شده تا الگوی استفاده را نشان دهد. وضعیت‌ها: Verified (با محاسبه یا مدرک تأیید شده)، Assumed (فرض)، Open (باز، نیازمند داده). مقادیری که از برگهٔ سازنده می‌آیند عمداً «Open» نگه داشته شده‌اند، زیرا این راهنما مشخصهٔ محصول NICO را مستند نمی‌کند.

جدول ۹ — ماتریس راستی‌آزمایی طراحی؛ نمونهٔ تکمیل‌شده برای مورد A

Requirement	Input	Calculated / Selected	Verification Basis	Status	Evidence	Open Item
نوع مخزن	مخزن اتمسفری باز	باز؛ $P_{surface} = P_{atm}$	برگهٔ داده	Verified	P&ID	—
محدودهٔ Level	0–10 m؛ عملیاتی 8 m	URV = 97.89 kPa	محاسبه ρgh	Verified	محاسبه بخش ۳۳	—
چگالی	آب 20 °C	998.21 kg/m³	IAPWS-95	Verified	جدول چگالی	تأیید کتابخانه
تغییر چگالی	10–30 °C	تا -2.56 kg/m³؛ +1.49 بودجه ±2.0	IAPWS-95	Verified	مورد D	—
دما	10–30 °C	ماکزیمم 30 °C	برگهٔ داده	Assumed	—	تأیید دمای واقعی
مرجع فشار	اتمسفر	Vented Gauge	بخش‌های ۳ و ۶	Verified	معماری	—
نسبی / مطلق	—	Gauge	بخش ۴	Verified	برگهٔ داده	—
Vent	فیلتر / خاتمه خشک	مسیر باز	بخش ۷ و ۸	Open	—	دستور سازنده خاتمه
طول کابل	طبق نقشه	TBC	بخش ۲۸	Open	—	تعیین از نقشه نصب
Material	آب	TBC	سازگاری سازنده	Open	—	داده سازنده
دیافراگم	آب تمیز	Flush یا Protected: TBC	بخش ۱۶ و سطح ۲	Open	—	تأیید جنس
محدودهٔ فشار	P_{max} = 99.85 kPa (Overfill)	نمونه: 0–1.6 bar	بخش ۲۹	Assumed	—	برگهٔ فنی سازنده
Overpressure	—	طبق برگه	سازنده	Open	—	حد مجاز
خروجی	2-wire	4–20 mA	برگهٔ داده	Verified	—	—
Datum **نصب**	دیافراگم در تراز کف	z = 0	بخش ۱۸	Open	—	اندازه‌گیری z
دقت	±0.3 % Span	(U) ±0.29 %	بودجه GUM	Assumed	بخش ۳۱	مقادیر سازنده
عدم‌قطعیت	—	U = 29.4 mm (k = 2)	JCGM 100	Verified	بخش ۳۱	مونت‌کارلو

Requirement	Input	Calculated / Selected	Verification Basis	Status	Evidence	Open Item
راه‌اندازی	—	چک‌لیست + مقایسه Level	بخش ۳۹	Open	—	اجرای سایت

43 مقایسهٔ فناوری‌ها

برای یک کاربرد دشوار — مخزن محلول شیمیایی با چگالی متغیر، فضای بخار تحت فشار متغیر و کف سطحی — چهار فناوری را به‌صورت شرطی مقایسه می‌کنیم. این جدول برنده اعلام نمی‌کند: هر ردیف فقط می‌گوید این عامل در کدام شرایط به نفع یا ضرر فناوری است.

جدول ۱۰ — مقایسهٔ شرطی هیدرواستاتیک، راداری، التراسونیک و DP برای کاربرد دشوار

معیار	Hydrostatic	Radar	Ultrasonic	DP Level
حساسیت به چگالی	مستقیم؛ نیاز به ρ معلوم یا جبران	مستقل از چگالی	مستقل از چگالی (ولی وابسته به سرعت صوت)	مستقیم؛ مثل هیدرواستاتیک
فشار مخزن	تک‌ترانسمیتر کافی نیست؛ نیاز به جبران	معمولاً با طراحی مناسب مجاز؛ از مدرک سازنده	محدودیت فشار و دما	P_v حذف می‌شود
کف	تحت تأثیر نیست (فشار ستون)	می‌تواند ضعیف‌کننده باشد؛ بسته به سطح کف	جذب صوت؛ مشکل‌ساز	تحت تأثیر نیست
بخار / گاز	ρ_v کوچک؛ خطای فضای بخار با DP	ثابت دی‌الکتریک بخار می‌تواند اثر بگذارد	تغییر سرعت صوت با دما و ترکیب	خط LP و چگالی گاز
نصب	غوطه‌ور یا نازل پایین	نازل بالا؛ بدون تماس	نازل بالا؛ بدون تماس	دو اتصال و پایه‌ها
تماس با فرآیند	دارد (دیافراگم)	ندارد (غیرتماسی)	ندارد	دارد (اتصال‌های فشار)
نگهداری	تمیزکاری دیافراگم، بازرسی Vent	تمیزکاری آنتن	تمیزکاری مبدل	پایه‌ها، شیرها و منیفولد
دقت	وابسته به ρ و صفر	معمولاً مستقل از ρ؛ از سازنده	وابسته به شرایط محیط	وابسته به ρ و پایه‌ها
عوامل هزینه	محدوده، کابل، جنس	آنتن، اتصال، فشار	مبدل، دما	DP، سیل، شیرها

نتیجه: هیچ فناوری برنده جهانی نیست. اگر چگالی ثابت و معلوم باشد، هیدرواستاتیک یا DP ساده و اقتصادی‌اند؛ اگر چگالی متغیر و کف یا بخار معقول باشد، فناوری غیرتماسی با بررسی سازگاری ممکن است مناسب‌تر باشد. ادعاهای عملکردی هر فناوری باید از مدرک سازندهٔ همان مدل گرفته شود MANUFACTURER-SPECIFIC DATA.

44 پرسش‌های متداول پیشرفته

Density Error چگونه روی Hydrostatic Level اثر می‌گذارد؟

ترانسمیتر فشار را می‌بیند و با چگالی پیکربندی‌شده به Level تبدیل می‌کند: $h_{calc} = h_{actual} \cdot \rho_{actual} / \rho_{assumed}$. اگر مایع سنگین‌تر از فرض باشد Level بیش‌نمایی می‌شود و برعکس؛ خطا با Level نسبی است و در مدل ایده‌آل خطای 1 % چگالی خطای نسبی عکس 1 % در Level ایجاد می‌کند.

Barometric Pressure چه خطایی ایجاد می‌کند؟

در حسگر مطلق بدون جبران، هر 1 kPa تغییر فشار جو در آب 20 °C حدود 102 mm خطای Level می‌دهد ($\Delta h = \Delta P_{atm} / (\rho g)$). در حسگر نسبی سالم این اثر در ساختار حذف می‌شود.

Vented Cable چگونه فشار اتمسفر را جبران می‌کند؟

لولهٔ تنفس داخل کابل، پشت دیافراگم حسگر نسبی را به اتمسفر وصل می‌کند؛ پس فشار اتمسفر هم از سمت فرآیند و هم از سمت مرجع اعمال می‌شود و در اختلاف حذف می‌شود. صحت آن به باز و خشک بودن مسیر وابسته است.

اگر Vent Tube بسته شود چه اتفاقی می‌افتد؟

مرجع در فشار لحظهٔ انسداد قفل می‌شود و خوانش با تغییر وضع جوی (و دمای هوای محبوس) جابه‌جا می‌شود؛ رفتار مشابه حسگر مطلق بدون جبران است. شاخص تشخیصی: همبستگی خروجی با فشار بارومتریک.

آیا Temperature Compensation مشکل تغییر Density را حل می‌کند؟

فقط بخشی که ناشی از دماست. تغییر چگالی ناشی از غلظت، شوری یا مواد معلق را جبران نمی‌کند، و خود جبران به مدل $\rho(T)$ و اندازه‌گیری دما وابسته است که عدم‌قطعیت خود را دارد.

چرا Hydrostatic Level در مخزن تحت فشار خطا می‌کند؟

چون فشار کف $P_{bottom} = P_v + \rho g h$ است و ترانسمیتر فشار تنها نمی‌تواند P_v را از ستون مایع جدا کند؛ هر تغییر P_v به Level ظاهری تبدیل می‌شود. راه‌حل: DP یا جبران با ترانسمیتر مستقل فشار بخار.

Gauge Sensor بهتر است یا Absolute Sensor؟

هیچ‌کدام در همهٔ شرایط برتر نیست. Gauge ساده‌تر و بدون نیاز به مرجع بارومتریک است ولی به سلامت Vent وابسته است؛ Absolute نیاز به Vent ندارد ولی جبران بارومتریک و مرجع معتبر می‌خواهد.

چرا Cable Length با Measurement Range یکی نیست؟

چون فشار فقط به ارتفاع قائم مایع بالای دیافراگم، چگالی و گرانش بستگی دارد ($P = \rho g h$) و طول کابل در آن نیست؛ کابل فقط پروب را به جعبهٔ اتصال می‌رساند و شرط آن عمق نصب + مسیر + رزرو $\geq L_c$ است.

عدم قطعیت Hydrostatic Level چگونه محاسبه می‌شود؟

با مدل $h = (P - P_{ref})/(\rho g) - z$، ضرایب حساسیت c_i، عدم‌قطعیت‌های استاندارد $u(x_i)$ (برای حدود مستطیلی $a/\sqrt{3}$)، ترکیب $u_c = \sqrt{\Sigma c_i^2 u_i^2}$ و $U = k \cdot u_c$ مطابق GUM؛ جمع ساده درصدها مجاز نیست.

‹ چرا آب شور باعث خطای Level می‌شود؟

چگالی آب شور بیشتر از آب شیرین است؛ اگر ترانسمیتر برای چگالی آب پیکربندی شده باشد، فشار بیشتر به Level بیشتر تبدیل می‌شود: برای شوری آب دریا حدود % 2.7+ و برای محلول ۲۰٪ NaCl حدود % 15+.

حدود اعتبار و فرض‌های کلیدی (Limits of Applicability)

مدل‌های این سند فقط تحت شرایط زیر معتبرند و هر نصب باید قبل از استناد، این شرایط را بررسی کند. **مایع ساکن یا شبه‌ساکن** با چگالی یکنواخت در ستون بین دیافراگم و سطح؛ **تراکم‌ناپذیر**؛ g **ثابت** در ارتفاع ستون؛ **ترانسمیتر سالم** و دارای مرجع تعریف‌شده؛ Datum **معلوم**. مدل چگالی دما بر پایهٔ آب خالص است و برای مایع دیگر قابل تعمیم نیست؛ اثر فشار دینامیکی مرتبهٔ اول و برای جریان یکنواخت است؛ بودجهٔ عدم‌قطعیت بر فرض استقلال مؤلفه‌ها و مقادیر نمونهٔ ترانسمیتر است و باید با مدرک سازنده بازنویسی شود REQUIRES VERIFICATION. این سند طراحی ایمنی (SIL)، طراحی منطقهٔ خطرناک یا طراحی الکتریکی حفاظت Surge را پوشش نمی‌دهد.

جمع‌بندی مهندسی

نکات کلیدی طراحی و راستی‌آزمایی

- مدل پایه $P_{bottom} = P_{surface} + \rho g h$ است؛ مرجع $P_{surface}$ تعیین می‌کند ساختار اندازه‌گیری چیست.
- چگالی مهم‌ترین عامل قابل کنترل است؛ $\delta h/h = -\delta\rho/\rho$.
- بارومتریک ≠ فشار بخار؛ حسگر مطلق نیاز به جبران دارد، مخزن بسته نیاز به DP یا ترانسمیتر دوم.
- Datum و ارتفاع حسگر (0.25 m ⇒ 250 mm) باید ثبت و اصلاح شوند.
- عدم‌قطعیت را با GUM ترکیب کنید؛ جمع حسابی درصدها نادرست است.
- طول کابل پارامتر نصب است، محدودهٔ فشار پارامتر اندازه‌گیری.

ثبت منابع (Source Register)

جدول ۱۱ — ثبت منابع و وضعیت راستی‌آزمایی

منبع	کاربرد در این سند	وضعیت
— JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)	روش ترکیب عدم‌قطعیت، توزیع مستطیلی	REQUIRES VERIFICATION (متن بند به بند)
— JCGM 101:2008 Monte Carlo supplement to the GUM	تأیید ترکیب با k = 2	REQUIRES VERIFICATION

منبع	کاربرد در این سند	وضعیت
IAPWS-95 — Formulation for the thermodynamic properties of ordinary water substance	چگالی آب برحسب دما	محاسبه با کتابخانهٔ iapws؛ تطبیق با جدول مرجع
TEOS-10 (IOC, SCOR, IAPSO 2010)	چگالی آب دریا	محاسبه با کتابخانهٔ gsw؛ REQUIRES VERIFICATION
NIST SP 811	$g_n = 9.80665\ m/s^2$ و تعریف mH_2O قراردادی	REQUIRES VERIFICATION (ویرایش جاری)
ISO 2533 — Standard Atmosphere	فشار اتمسفر استاندارد با ارتفاع	REQUIRES VERIFICATION
WGS-84 / **فرمول سومیلیانا**	گرانش محلی	REQUIRES VERIFICATION
IEC 62828 series — Reference conditions and procedures for testing industrial and process measurement transmitters	چارچوب آزمون عملکرد ترانسمیتر؛ فقط نام برده شده	جایگزین IEC 60770-1 (ابطال‌شده ۲۰۲۰)؛ ویرایش‌ها و اجزا REQUIRES VERIFICATION
IEC 60529 — Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)	مفهوم IP؛ نه ایمنی غوطه‌وری درازمدت	REQUIRES VERIFICATION
IEC 60079 series — Explosive atmospheres	اشاره به الزام منطقهٔ خطرناک؛ بدون استناد بند	خارج از دامنه؛ REQUIRES VERIFICATION
CRC Handbook — NaCl solution density	چگالی آب‌نمک ۱۰٪ و ۲۰٪	REFERENCE؛ REQUIRES VERIFICATION
Siemens SITRANS LH100، AutomationDirect ProSense SLT، Dwyer / Omega FBLT — **مستندات سازندگان**	مفهوم Vent، فیلتر و خاتمه کابل	MANUFACTURER-SPECIFIC؛ فقط کیفی

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

ثبت اصطلاحات (Terminology Register)

اصطلاح	کاربرد / سیاست
Vent Tube ،Vented Gauge ،Vented Cable	Class A: انگلیسی حفظ می‌شود
Datum ،Span ،LRV ،URV ،Turndown	Class A: انگلیسی؛ Span با «محدوده» یکی نیست
Hydrostatic Level Transmitter **(ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک)**	Class B: در اولین استفاده دوزبانه
Impulse Line ،Dry Leg ،Wet Leg	Class A؛ معادل‌های ابداعی فارسی ممنوع
عدم‌قطعیت (Uncertainty)	Class C: با «دقت» (Accuracy) یکی نیست
Calibration ،Adjustment ،As Found ،As Left	Class A؛ کالیبراسیون ≠ تنظیم

ثبت معادلات (Equation Register)

جدول ۱۲ — فهرست معادلات شمارۀدار و شرط اعتبار

شماره	معادله	شرط اعتبار
(۱)	$P = \rho \cdot g \cdot h$	مایع ساکن، ρ یکنواخت
(۲)	$P_{bottom} = P_{surface} + \rho g h$	اصل پاسکال
(۳)	$h = (P_{bottom} - P_{atm})/(\rho g)$	$P_{ref} = P_{atm}$
(۴)	$h = (P_{abs} - P_{baro})/(\rho g)$	P_{baro} هم‌زمان و هم‌محل
(۵)	$\Delta h = \Delta P_{atm}/(\rho g)$	حسگر مطلق بدون جبران
(۶)	$h_{calc} = h \cdot \rho_{actual}/\rho_{assumed}$	تبدیل مستقیم
(۷)	$\delta h/h = -\delta\rho/\rho$	مرتبۀ اول
(۸)	$\Delta h = -z$	0 % در Datum
(۹)	$P_{xmtr} = P_{tap} + \rho_{line} g z$	لولۀ پر و قائم
(۱۰)	$h = (P_{bottom} - P_v)/(\rho g)$	P_v معلوم
(۱۱)	$y = 1 - \exp(-t/\tau)$	فیلتر مرتبه اول
(۱۲)	$\Delta P_{dyn} \approx \frac{1}{2}\rho v^2$	جریان یکنواخت

شماره	معادله	شرط اعتبار
(۱۳)	$\Delta h = h_s(\rho_s/\rho_w - 1)$	بستر لجن یکنواخت
(۱۴)	$h = (P_{meas} - P_{ref})/(\rho g) - z$	مدل اندازه‌گیری
(۱۵)	$u_c = \sqrt{\Sigma c_i^2 u_i^2}$	ورودی‌های مستقل
(۱۶)	$u = a/\sqrt{3}$	توزیع مستطیلی
(۱۷)	$I = 4 + 16(P - LRV)/(URV - LRV)$	خروجی خطی

این سند سطح ۳ است. مقادیر مشخصهٔ ترانسمیتر در بودجه‌ها نمونه و فرض‌اند (ASSUMPTION) و جایگزین برگهٔ فنی و پیشنهاد رسمی سازنده نیستند. مشخصات، محدوده و گواهی‌های محصول NICO فقط از برگهٔ فنی رسمی همان محصول گرفته شود.

منابع مرتبط NICO

پیش‌نیاز و سطوح دیگر

- سطح‌سنج هیدرواستاتیک چیست؟ (سطح ۱) — NICO-EDU-LVL-L1-007-FA
- راهنمای مهندسی انتخاب، سایزینگ و نصب (سطح ۲) — NICO-EDU-LVL-L2-008-FA

تجهیزات مرتبط NICO

- HLT40 — ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک NICO
- DPT11 — ترانسمیتر اختلاف فشار NICO برای مخزن بسته

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه