NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

LEVEL 1 — FUNDAMENTALS

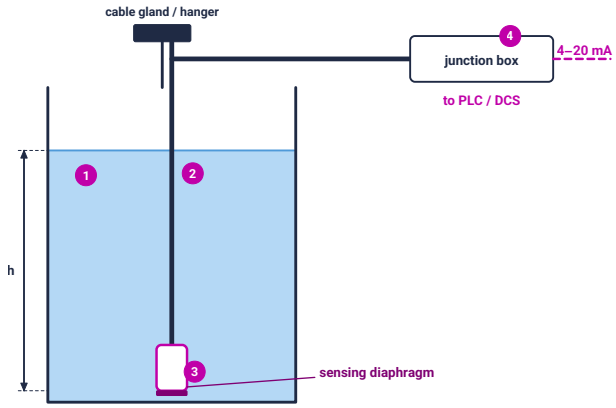
سطح‌سنج هیدرواستاتیک چیست؟

چگونه فشار ستون مایع را به Level تبدیل می‌کند؟

How Does a Hydrostatic Level Transmitter Work?

From Liquid Head Pressure to Level Measurement

از رابطهٔ P = ρgh تا Submersible Level Transmitter و خروجی 4–20 mA



شکل ۱ — ترانسمیتر سطح غوطه‌ور: پروب آویزان درون مایع با دیافراگم نزدیک کف

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-LVL-L1-007-FA	Rev00	LEVEL 1	November 2026 — **آذر ۱۴۰۵**

1 فشار هیدرواستاتیک (Hydrostatic Pressure) چیست؟

چگونه می‌توان فقط با اندازه‌گیری فشار در پایین یک ستون مایع، ارتفاع مایع را به‌دست آورد؟ پاسخ در یک رابطهٔ ساده از مکانیک سیالات است: فشار در عمق مایع ساکن با ارتفاع ستون مایع بالای آن نسبت مستقیم دارد. **سطح‌سنج هیدرواستاتیک** — که در صنعت با نام ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک (Hydrostatic Level Transmitter) یا لول ترانسمیتر هیدرواستاتیک هم شناخته می‌شود — همین فشار را اندازه می‌گیرد و آن را به Level تبدیل می‌کند.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. رابطهٔ P = ρgh را از دید فیزیکی توضیح دهید و فشار ستون آب را با واحد صحیح محاسبه کنید.
2. زنجیرهٔ اندازه‌گیری از Level تا 4–20 mA و PLC / DCS را توضیح دهید.
3. ترانسمیتر غوطه‌ور (Submersible Level Transmitter) و نصب جانبی از اتصال پایین مخزن را از هم تشخیص دهید.
4. فشار نسبی (Gauge Pressure)، فشار مطلق (Absolute Pressure) و نقش Vented Cable را بشناسید.
5. توضیح دهید چرا چگالی (Density) و SG بر نتیجه اثر می‌گذارند و چرا مخزن تحت فشار نیازمند توجه ویژه است.
6. تفاوت Level و Volume را بدانید و مقیاس‌دهی 4–20 mA را انجام دهید.

فشار هیدرواستاتیک فشاری است که وزن یک ستون سیال ساکن در یک نقطه ایجاد می‌کند. در یک مخزن، هر چه مایع بالای یک نقطه بیشتر باشد، وزن بیشتری روی آن نقطه قرار می‌گیرد و فشار افزایش می‌یابد. رابطهٔ ریاضی آن در معادلهٔ زیر آمده است:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

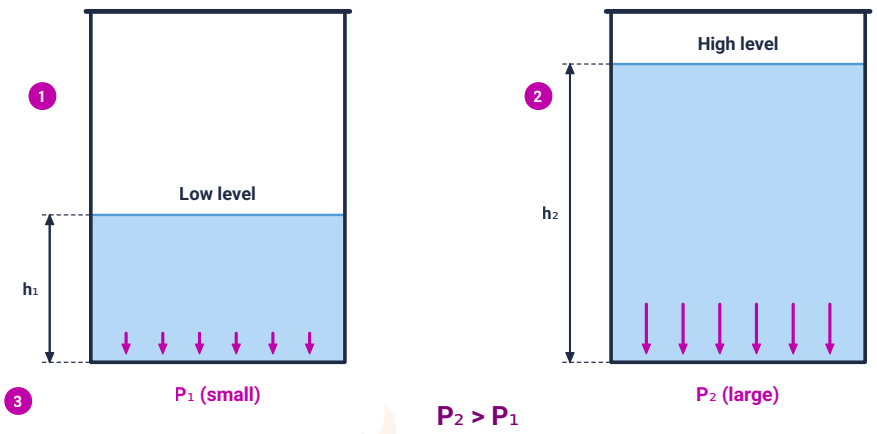
P	فشار هیدرواستاتیک ناشی از ستون مایع (Hydrostatic Pressure)	Pa
ρ	چگالی مایع (Liquid Density)	kg/m³
g	شتاب گرانش (Gravitational Acceleration)؛ مقدار استاندارد 9.80665 m/s²	m/s²
h	ارتفاع قائم ستون مایع بالای نقطهٔ اندازه‌گیری (Liquid Height)	m

دلیل فیزیکی رابطه روشن است. ستونی از مایع با سطح مقطع A و ارتفاع h حجمی برابر A·h دارد؛ جرم آن ρ·A·h و وزنش ρ·A·h·g است. این وزن روی سطح قاعدهٔ A می‌افتد و فشار، نیرو بر واحد سطح است؛ پس P = ρ·A·h·g / A = ρ·g·h. سطح مقطع A ساده می‌شود و از رابطه بیرون می‌رود؛ به همین دلیل پهنای مخزن در فشار ته آن نقشی ندارد. این نتیجه در بخش ۱۵ دوباره به کار می‌آید.

مقدار g در سراسر این راهنما برابر مقدار استاندارد 9.80665 m/s² گرفته شده است (مرجع: NIST SP 811)؛ شتاب گرانش واقعی در هر نقطهٔ زمین اندکی با آن تفاوت دارد، اما در سطح یادگیری این راهنما می‌توان از این تفاوت صرف‌نظر کرد.

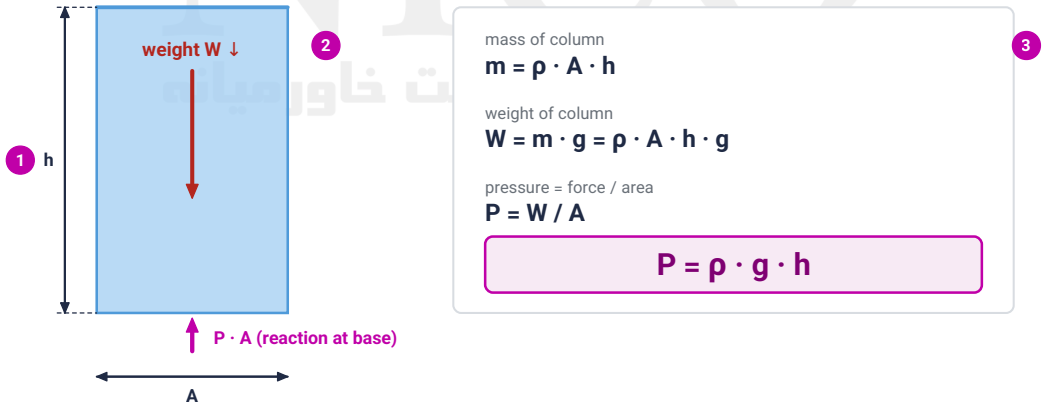
2 چرا بالا رفتن Level فشار پایین مخزن را زیاد می‌کند؟

یک مخزن شفاف و عمودی را تصور کنید. اگر مایع کم باشد، ستون روی کف کوتاه است و وزن کمی به کف وارد می‌کند. اگر همان مخزن را بیشتر پر کنیم، ستون بلندتر می‌شود و وزن بیشتری روی کف قرار می‌گیرد. پس هر چه Level بالاتر باشد فشار کف بیشتر است، و هر چه Level پایین‌تر باشد فشار کف کمتر است (شکل ۱). این رابطه به‌صورت خطی است: دو برابر شدن ارتفاع مایع، فشار هیدرواستاتیک را دو برابر می‌کند.



شکل ۱ — مفهوم فشار هیدرواستاتیک؛ ستون بلندتر مایع، فشار بیشتری در کف ایجاد می‌کند ($P_2 > P_1$)

1 مخزن با Level پایین؛ ستون کوتاه و فشار کم 2 مخزن با Level بالا؛ ستون بلند و فشار زیاد 3 فشار کف؛ فلش‌های بزرگ‌تر یعنی فشار بیشتر



شکل ۲ — اشتقاق فیزیکی $P = \rho \cdot g \cdot h$ از جرم و وزن ستون مایع؛ سطح مقطع A از رابطه حذف می‌شود

1 ارتفاع ستون مایع h 2 وزن ستون W که رو به پایین وارد می‌شود 3 سه گام: جرم، وزن، فشار = نیرو بر سطح

3 مثال ساده: فشار ستون آب ۵ متری

مثال **فشار هیدرواستاتیک در کف مخزن آب**

داده‌ها: آب با چگالی تقریبی $\rho = 1000\ kg/m^3$، ارتفاع مایع $h = 5\ m$، شتاب گرانش استاندارد $g = 9.80665\ m/s^2$.

فرمول و جای‌گذاری:

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1000\ kg/m^3 \times 9.80665\ m/s^2 \times 5\ m = 49\,033.25\ Pa$$

یکا: $kg/m^3 \times m/s^2 \times m = kg/(m \cdot s^2) = N/m^2 = Pa$؛ یکای فشار در SI پاسکال است.

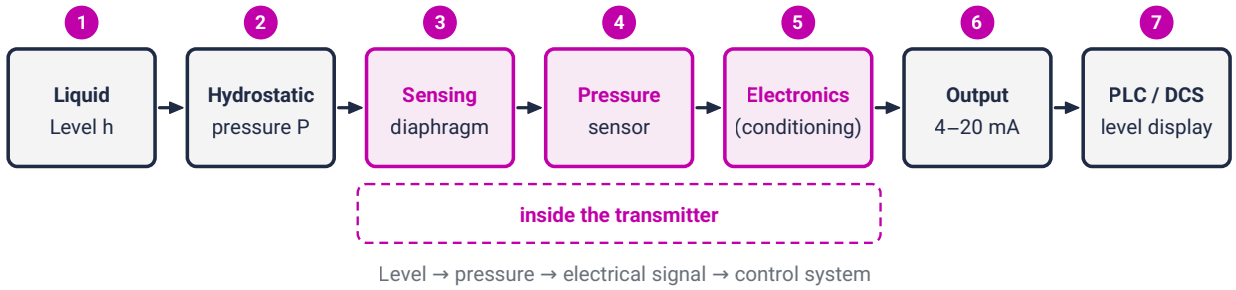
تبدیل: $49\,033.25\ Pa = 49.03\ kPa = 0.4903\ bar = 490.3\ mbar$. هم‌ارز ستون آب: $5000\ mmH_2O$ (مقدار قراردادی).

نتیجه: ستون آب ۵ متری حدود 49.03 kPa (نسبی) فشار در کف ایجاد می‌کند. با $g = 9.81\ m/s^2$ مقدار 49.05 kPa به‌دست می‌آید؛ اختلاف فقط حدود 0.034 % است.

یک قاعدهٔ حفظی مفید: هر **یک متر آب** حدود 9.8 kPa یا حدود 0.098 bar فشار می‌دهد؛ یعنی ستون ۱۰ متری آب نزدیک به 1 bar (دقیق‌تر 0.9807 bar). این هم‌ارزی فقط برای آب با چگالی حدود $1000\ kg/m^3$ درست است و برای مایعات دیگر باید چگالی را عوض کرد.

4 ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک و زنجیرهٔ اندازه‌گیری

ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک (Hydrostatic Level Transmitter) در اصل یک ترانسمیتر فشار است که مقدار آن بر حسب ارتفاع مایع مقیاس‌دهی شده است. Level مستقیماً دیده نمی‌شود؛ بلکه فشار ناشی از آن اندازه گرفته و سپس به Level تبدیل می‌شود. مراحل کار در شکل ۳ آمده است: مایع در Level مشخص فشار هیدرواستاتیک ایجاد می‌کند؛ این فشار روی دیافراگم حسگر (Sensing Diaphragm) می‌افتد و آن را اندکی تغییر شکل می‌دهد؛ حسگر فشار این تغییر شکل را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند؛ الکترونیک ترانسمیتر سیگنال را تقویت، خطی‌سازی و مقیاس‌دهی می‌کند و خروجی 4–20 mA (و در برخی مدل‌ها ارتباط دیجیتال مانند HART) را می‌سازد؛ در پایان PLC یا DCS این جریان را به مقدار Level تبدیل و نمایش می‌دهد.



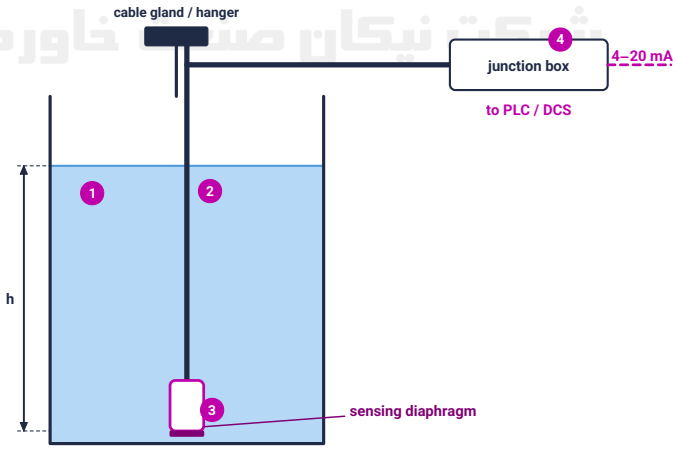
شکل ۳ — زنجیرهٔ کامل اندازه‌گیری سطح هیدرواستاتیک؛ از Level مایع تا PLC / DCS

1 Level مایع و ارتفاع ستون
2 فشار هیدرواستاتیک ناشی از ستون
3 دیافراگم حسگر در تماس با مایع
4 حسگر فشار
5 الکترونیک و شرایط‌دهی سیگنال
6 خروجی جریان 4–20 mA
7 PLC / DCS و نمایش Level

دو نکته در این زنجیره مهم است. نخست اینکه ترانسمیتر **فشار** را اندازه می‌گیرد، نه Level را؛ تبدیل فشار به Level به چگالی مایع وابسته است (بخش‌های ۱۰ و ۱۱). دوم اینکه خروجی 4–20 mA نمایندهٔ همان فشار مقیاس‌دهی‌شده است (بخش ۱۷). اگر هرکدام از این مفروضات تغییر کند، عدد نمایش‌داده‌شده در PLC دیگر Level واقعی را نشان نمی‌دهد.

5 ترانسمیتر غوطه‌ور (Submersible Level Transmitter)

در ترانسمیتر غوطه‌ور، حسگر در یک پروب (Probe) جمع شده است که با کابل مستقیماً درون مایع آویزان می‌شود و نزدیک کف قرار می‌گیرد (شکل ۴). دیافراگم حسگر در انتهای پروب است و فشاری که اندازه می‌گیرد، فشار ستون مایع بالای **دیافراگم** است؛ پس h ارتفاع مایع بالای دیافراگم است و نقطهٔ صفر Level همان ارتفاع دیافراگم محسوب می‌شود. کابل علاوه بر انتقال سیگنال، پروب را نگه می‌دارد و در بسیاری از مدل‌ها مسیر مرجع اتمسفر را هم دربر دارد (بخش ۸).



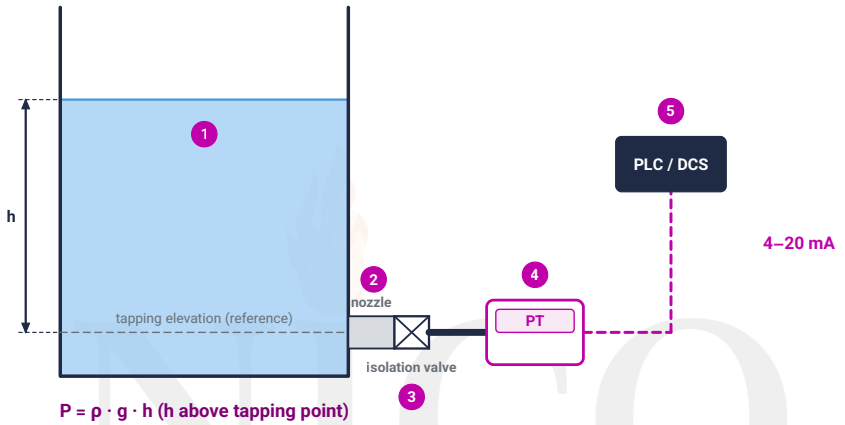
شکل ۴ — ترانسمیتر سطح غوطه‌ور؛ پروب آویزان درون مخزن، چاه یا حوضچه با دیافراگم نزدیک کف

1 Level مایع بالای دیافراگم
2 کابل آویز پروب و انتقال سیگنال
3 دیافراگم حسگر در انتهای پروب
4 جعبه تقسیم و ادامهٔ سیگنال به PLC / DCS

این طراحی برای مخزن آب، حوضچه، مخزن ذخیرهٔ باز، چاه عمیق و مخزن‌های مشابه که پروب می‌تواند از بالا پایین برود بسیار متداول است. مزیت اصلی آن این است که به اتصال فرآیندی روی بدنهٔ مخزن نیاز ندارد؛ در عوض پروب در تماس دائم با مایع است و جنس بخش‌های خیس (Wetted Parts) باید با مایع سازگار باشد. سازگاری مواد را همیشه با داده‌های رسمی سازنده بررسی کنید.

6 اندازه‌گیری از اتصال پایین مخزن (نصب جانبی)

راه دوم، نصب ترانسمیتر فشار روی یک نازل (Nozzle) در بدنهٔ مخزن و نزدیک کف است (شکل ۵). در این حالت ترانسمیتر بیرون از مخزن قرار دارد، معمولاً با یک شیر قطع (Isolation Valve) بین آن و مخزن، و فشار مایع از طریق نازل به دیافراگم می‌رسد. h در اینجا ارتفاع سطح مایع بالای **نقطهٔ تپینگ** (محل اتصال نازل) است. اگر ترانسمیتر بالاتر یا پایین‌تر از نقطهٔ تپینگ نصب شود، ارتفاع آن نسبت به نقطهٔ مرجع در محاسبه اثر می‌گذارد؛ این موضوع در سطح ۲ همین مجموعه بررسی می‌شود.



شکل ۵ — اندازه‌گیری هیدرواستاتیک با ترانسمیتر فشار نصب‌شده روی نازل پایین مخزن

1 Level مایع بالای نقطهٔ تپینگ 2 نازل اتصال به مخزن 3 شیر قطع 4 ترانسمیتر فشار 5 PLC / DCS

جدول ۱ — مقایسهٔ مفهومی ترانسمیتر غوطه‌ور و نصب جانبی

معیار	غوطه‌ور (Submersible)	نصب جانبی از نازل
محل حسگر	داخل مایع، در انتهای پروب آویزان	بیرون از مخزن، روی نازل پایین
مرجع Level (صفر)	ارتفاع دیافراگم پروب	ارتفاع نقطهٔ تپینگ
نیاز به اتصال روی مخزن	معمولاً نیاز به نازل ندارد؛ آویز از بالا	نازل و شیر قطع لازم است
تماس با مایع	کل پروب و بخشی از کابل با مایع در تماس‌اند	فقط دیافراگم و مسیر نازل
کاربرد متداول	چاه، حوضچه، مخزن آب، مخزن باز	مخزن‌هایی که اتصال پایین دارند و سرویس‌پذیری بیرونی مطلوب است

7 فشار نسبی (Gauge Pressure) و مرجع اتمسفر

در یک مخزن باز، سطح مایع در تماس با هوا است و فشار اتمسفر (P_{atm}) روی آن وارد می‌شود. این فشار از سطح مایع به همهٔ عمق‌ها منتقل می‌شود؛ پس فشار مطلق (Absolute Pressure) در کف مخزن برابر مجموع فشار اتمسفر و فشار ستون مایع است. اما Level فقط به فشار ستون مایع مربوط است، نه به فشار هوا. برای حذف اثر اتمسفر، از رابطهٔ فشار نسبی استفاده می‌شود:

$$P_{gauge} = P_{abs} - P_{atm} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

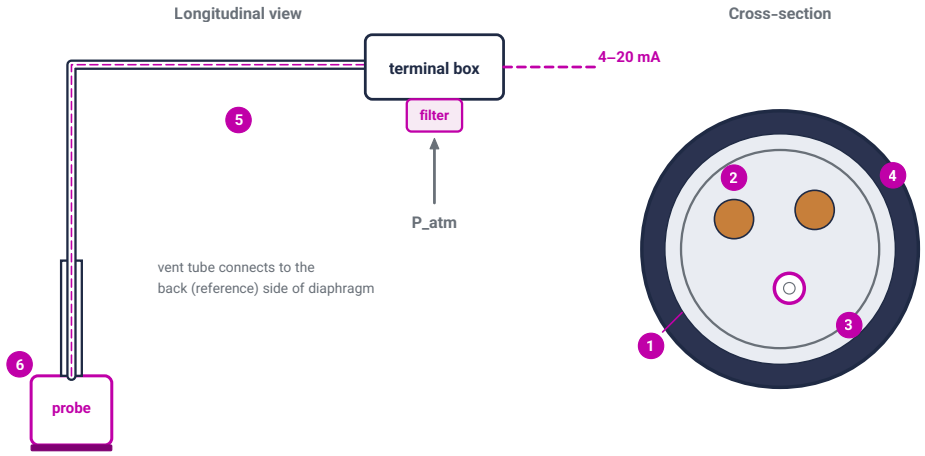
P_{gauge}	فشار نسبی (Gauge Pressure)؛ فشار نسبت به فشار اتمسفر محیط	Pa
P_{abs}	فشار مطلق (Absolute Pressure)؛ فشار نسبت به خلأ کامل	Pa
P_{atm}	فشار اتمسفر (Atmospheric Pressure) در محل نصب	Pa

حسگر فشار نسبی طوری ساخته می‌شود که پشت دیافراگم آن به اتمسفر باز باشد. فشار اتمسفر هم روی روی دیافراگم (از طریق مایع) و هم پشت آن (از طریق مسیر مرجع) وارد می‌شود و اثرشان یکدیگر را خنثی می‌کند؛ آنچه باقی می‌ماند فقط فشار ستون مایع است. اگر مسیر مرجع اتمسفر دچار مشکل شود، همین خنثی‌سازی از بین می‌رود (بخش ۸).

8 Vented Cable چیست و چرا اهمیت دارد؟

در ترانسمیتر غوطه‌ور، پروب زیر مایع است و پشت دیافراگم نمی‌تواند مستقیماً به هوای آزاد وصل باشد. راه‌حل رایج در بسیاری از ترانسمیترهای غوطه‌ور با حسگر فشار نسبی، Vented Cable است: کابلی که علاوه بر هادی‌های برق و سیگنال، یک لولهٔ باریک تنفس (Vent Tube) هم در خود دارد. یک سر این لوله به پشت دیافراگم (سمت مرجع) در پروب وصل است و سر دیگر آن در بالای مسیر، معمولاً در جعبهٔ اتصال یا سر کابل، به اتمسفر باز می‌شود (شکل ۶). به این ترتیب پشت دیافراگم همیشه فشار اتمسفر محل نصب را «می‌بیند».

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه



شکل ۶ — مفهوم Vented Cable؛ سمت چپ: مسیر لولهٔ تنفس از پروب تا جعبهٔ اتصال با فیلتر؛ سمت راست: برش عرضی کابل

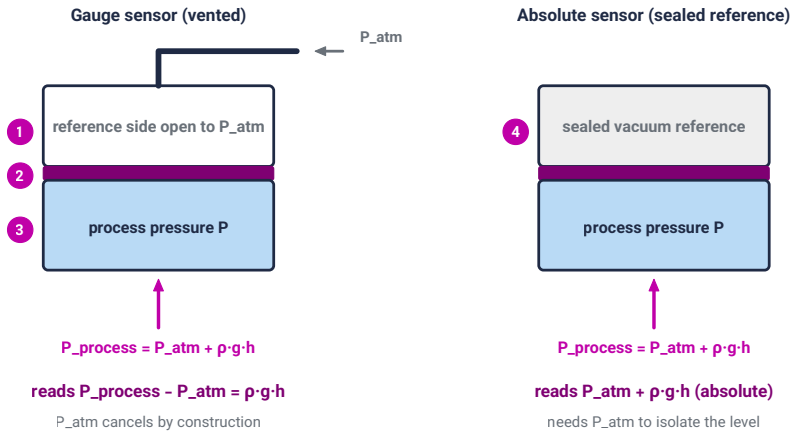
1 غلاف بیرونی کابل
2 هادی‌های برق و سیگنال
3 لولهٔ تنفس (Vent Tube) برای مرجع اتمسفر
4 مواد داخلی کابل و عایق
5 مسیر ارتباط لوله با اتمسفر در بالا (معمولاً از طریق فیلتر)
6 پروب و دیافراگم حسگر

اگر لولهٔ تنفس مسدود، له‌شده یا آلوده به رطوبت شود، پشت دیافراگم دیگر فشار اتمسفر واقعی را دریافت نمی‌کند. در این حالت خنثی‌سازی اتمسفر کامل انجام نمی‌شود و خروجی ترانسمیتر دچار خطا می‌شود؛ ورود رطوبت یا آب به لوله نیز می‌تواند به حسگر آسیب بزند. به همین دلیل Vented Cable صرفاً یک کابل الکتریکی نیست؛ بخشی از سیستم اندازه‌گیری فشار است. سازندگان این تجهیزات معمولاً چند توصیهٔ عملی می‌کنند: انتهای کابل را در محیط مرطوب بدون حفاظت رها نکنید، کابل را طوری خم یا له نکنید که لولهٔ تنفس بسته شود، و انتهای کابل (که لولهٔ تنفس در آن است) را مطابق دستور سازنده و معمولاً با فیلتر یا جعبهٔ اتصال مناسب ببندید.

> **CAUTION — Vented Cable را کوتاه یا مسدود نکنید**
>
> سر کابلی که لولهٔ تنفس در آن قرار دارد، بخشی از مسیر مرجع اتمسفر است. بریدن، چسباندن یا آب‌بندی بی‌دقت آن می‌تواند مسیر را ببندد یا رطوبت را وارد کند. روش صحیح اتصال و حفاظت را فقط از دستورالعمل رسمی سازندهٔ همان مدل بگیرید.

9 حسگر فشار مطلق (Absolute Pressure Sensor)

در حسگر فشار مطلق، پشت دیافراگم به یک مرجع خلأ بسته (Sealed Vacuum Reference) متصل است و فشار نسبت به خلأ کامل سنجیده می‌شود (شکل ۷). بنابراین چنین حسگری فشار اتمسفر را به‌طور خودکار حذف نمی‌کند: خروجی آن مجموع فشار اتمسفر و فشار ستون مایع است. برای رسیدن به Level، فشار اتمسفر باید جداگانه تعیین و کم شود؛ مثلاً با یک ترانسمیتر فشار مطلق دوم (فشار بارومتریک یا Barometric Pressure) یا با روشی که سازنده یا طراح سیستم پیش‌بینی کرده است. اینکه این جبران در ترانسمیتر انجام می‌شود یا در PLC / DCS، به معماری سیستم بستگی دارد و در سطوح ۲ و ۳ این مجموعه بررسی می‌شود.



شکل ۷ — مقایسهٔ حسگر فشار نسبی (مرجع باز به اتمسفر) و فشار مطلق (مرجع خلأ بسته)

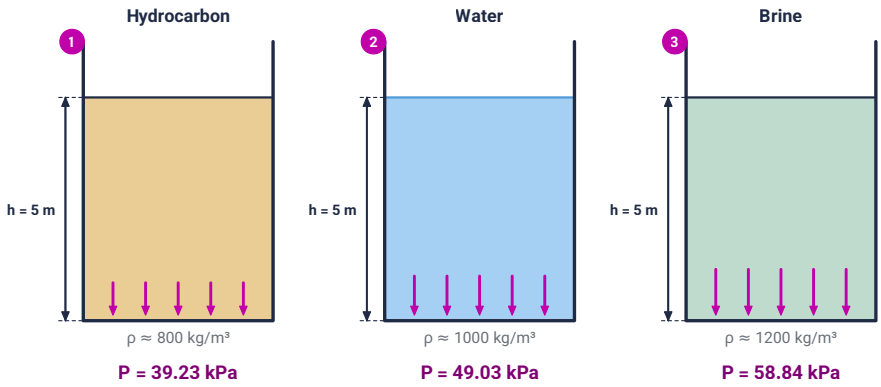
1 سمت مرجع باز به اتمسفر در حسگر نسبی
2 دیافراگم حسگر
3 سمت فرآیند که فشار مایع را دریافت می‌کند
4 مرجع خلأ بسته در حسگر مطلق

جدول ۲ — تفاوت مفهومی حسگر فشار نسبی و فشار مطلق در سطح‌سنجی

معیار	فشار نسبی (Gauge)	فشار مطلق (Absolute)
مرجع	اتمسفر (از طریق Vent)	خلأ کامل (مرجع بسته)
اثر فشار اتمسفر	در ساختار حسگر حذف می‌شود	در خروجی وجود دارد و باید جداگانه جبران شود
نیاز به مسیر مرجع	بله؛ مانند Vented Cable	خیر
رایج‌ترین کاربرد در سطح‌سنجی	مخزن باز، چاه، حوضچه	کاربردهایی که معماری سیستم جبران بارومتریک را پیش‌بینی کرده است

10 چگالی (Density) چرا مهم است؟

در رابطهٔ P = ρgh، فشار فقط به ارتفاع وابسته نیست؛ به چگالی هم وابسته است. مایع سنگین‌تر در همان ارتفاع، فشار بیشتری ایجاد می‌کند. پس ترانسمیتر هیدرواستاتیک در واقع فشار را می‌بیند و فقط با **فرض یک چگالی مشخص** آن را به Level تبدیل می‌کند (شکل ۸). مثال: در ارتفاع 5 m، هیدروکربن سبک با چگالی حدود 800 kg/m³ فشار 39.23 kPa ، آب با 1000 kg/m³ فشار 49.03 kPa و آب‌نمک سنگین با حدود 1200 kg/m³ فشار 58.84 kPa در کف ایجاد می‌کند. چگالی‌های این مثال فقط برای توضیح مفهوم انتخاب شده‌اند.



شکل ۸ — یک Level یکسان با چگالی‌های متفاوت؛ فشار کف تغییر می‌کند (چگالی‌ها فرضی و آموزشی‌اند)

1 هیدروکربن سبک؛ فشار کمتر 2 آب؛ مرجع رایج 3 مایع سنگین‌تر؛ فشار بیشتر

11 چگالی نسبی (Specific Gravity)

چگالی نسبی یا SG (Specific Gravity) نسبت چگالی مایع به چگالی یک مایع مرجع، معمولاً آب، است:

$$SG = \rho_{liquid} / \rho_{water} \quad (3)$$

SG	چگالی نسبی (Specific Gravity)؛ عدد بدون بُعد	—
ρ_{liquid}	چگالی مایع فرآیند	kg/m³
ρ_{water}	چگالی آب مرجع، در این راهنما حدود 1000 kg/m³	kg/m³

مثلاً مایعی با چگالی 800 kg/m³ نسبت به آب با 1000 kg/m³، SG حدود 0.8 دارد. در تنظیم ترانسمیتر، معمولاً یا مستقیماً چگالی یا SG مایع به‌عنوان داده وارد می‌شود، یا ترانسمیتر برای آب پیکربندی می‌شود و تبدیل بعدی در PLC / DCS انجام می‌گیرد.

مشکل زمانی ایجاد می‌شود که محصول داخل مخزن عوض شود ولی تنظیم ترانسمیتر تغییر نکند. فرض کنید ترانسمیتر برای آب پیکربندی شده است و ارتفاع واقعی مایع 5 m است. اگر مایع داخل مخزن 800 kg/m³ باشد، فشار کمتر از آب است و ترانسمیتر 4.00 m نشان می‌دهد؛ اگر مایع 1200 kg/m³ باشد، فشار بیشتر است و ترانسمیتر 6.00 m نشان می‌دهد. در هر دو حالت ارتفاع واقعی همان 5 m بوده است. عدد نمایش‌داده‌شده با تغییر چگالی تغییر کرده، نه با تغییر Level.

COMMON MISTAKE — تغییر محصول بدون بازنگری تنظیم

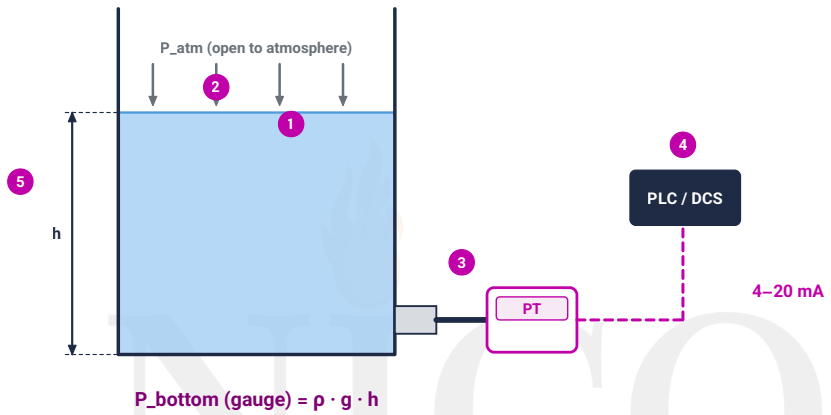
اگر چگالی مایع در عمل با مقدار تنظیم‌شده تفاوت داشته باشد، Level نمایش‌داده‌شده به همان نسبت جابه‌جا می‌شود. هنگام تغییر محصول، تنظیم چگالی یا SG ترانسمیتر و مقیاس PLC / DCS را بازبینی کنید. اثر تغییرات دمایی چگالی در سطح ۳ بررسی می‌شود.

12 مخزن باز (Open Tank)

ساده‌ترین حالت کاربرد سطح‌سنج هیدرواستاتیک، مخزن باز است که سطح مایع آن به اتمسفر باز است (شکل ۹). در چنین مخزنی فشار روی سطح مایع همان فشار اتمسفر است؛ با استفاده از حسگر فشار نسبی که مرجع آن به اتمسفر متصل است، فشار اتمسفر خنثی می‌شود و فشار اندازه‌گیری‌شده فقط ناشی از ستون مایع است. تبدیل فشار به Level هم از همان رابطه انجام می‌شود:

$$h = P_{gauge} / (\rho \cdot g) \quad (4)$$

در این رابطه h ارتفاع مایع بالای دیافراگم (یا نقطهٔ تپینگ)، P_{gauge} فشار نسبی اندازه‌گیری‌شده، ρ چگالی و g شتاب گرانش است. برای مثال بخش ۳: h = 49 033.25 Pa / (1000 × 9.80665) = 5 m.



شکل ۹ — ساختار استاندارد سطح‌سنجی هیدرواستاتیک در مخزن باز؛ فشار کف نسبی برابر ρ·g·h است

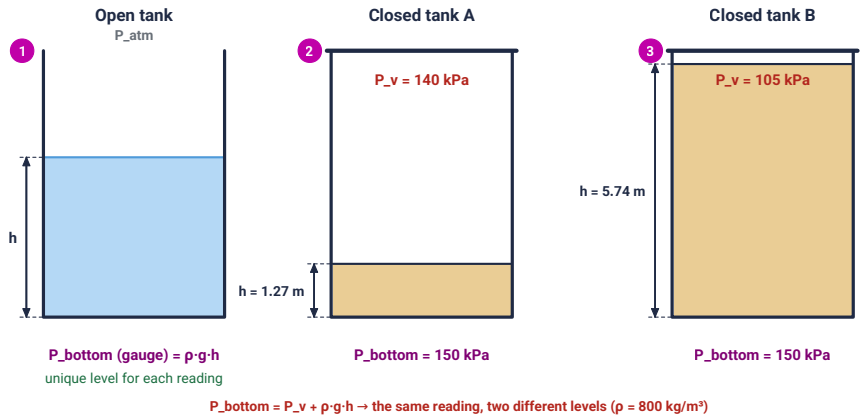
1 Level مایع 2 سطح مایع در تماس با اتمسفر 3 ترانسمیتر فشار نسبی روی نازل پایین 4 PLC / DCS 5 ارتفاع h بالای نقطهٔ اندازه‌گیری

13 مخزن بسته یا تحت فشار

در مخزن بسته یا تحت فشار، بالای مایع یک فضای بخار یا گاز با فشار P_v وجود دارد. این فشار نیز از سطح مایع به همهٔ عمق‌ها منتقل می‌شود؛ پس فشار در کف مخزن مجموع دو بخش است:

$$P_{bottom} = P_v + \rho \cdot g \cdot h \quad (5)$$

یک ترانسمیتر فشار تنهای پایین مخزن فقط P_{bottom} را می‌بیند و معمولاً نمی‌تواند تشخیص دهد چه مقدار آن مربوط به ستون مایع و چه مقدار مربوط به فشار فضای بخار است. اگر P_v ثابت و معلوم باشد، می‌توان آن را در محاسبه لحاظ کرد؛ اما اگر P_v تغییر کند، همان تغییر به‌صورت Level ظاهری در خروجی دیده می‌شود. شکل ۱۰ این وضعیت را نشان می‌دهد: با چگالی 800 kg/m³، فشار کف 150 kPa هم می‌تواند به Level حدود 5.74 m (وقتی P_v = 105 kPa) و هم به Level حدود 1.27 m (وقتی P_v = 140 kPa) مربوط باشد. در این مثال همهٔ فشارها در یک مبنای مرجع یکسان بیان شده‌اند.



شکل ۱۰ — مخزن باز در برابر مخزن بسته؛ در مخزن تحت فشار یک فشار کف یکسان می‌تواند به دو Level متفاوت مربوط باشد

1 مخزن باز: فشار کف نسبی فقط ستون مایع است 2 مخزن بسته با فشار بخار 140 kPa 3 مخزن بسته با فشار بخار 105 kPa

IMPORTANT — سطح‌سنج هیدرواستاتیک در هر مخزن تحت فشار خودکار کار نمی‌کند

برای مخزن تحت فشار باید فشار فضای بخار حذف یا جبران شود؛ مثلاً با اندازه‌گیری اختلاف فشار (DP یا Differential Pressure) بین پایین مخزن و فضای بخار، یا با معماری دیگری که فشار فضای بخار را مستقل اندازه می‌گیرد و از فشار کف کم می‌کند. انتخاب روش به نوع سیال، شرایط فرآیند و خطاهای قابل قبول وابسته است و در سطح ۲ همین مجموعه (و پایهٔ آن در سطح ۳) بررسی می‌شود. در این راهنما فقط محدودیت اصلی بیان شد.

14 کف (Foam) و شرایط سطح مایع

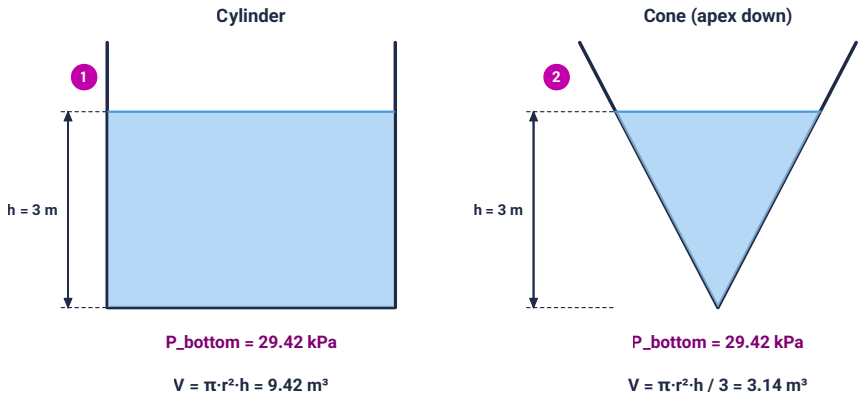
اندازه‌گیری هیدرواستاتیک فشار ستون مایع زیر نقطهٔ اندازه‌گیری را می‌بیند؛ سطح بالایی مایع را مانند اندازه‌گیری‌های بازتابی (مانند رادار یا اولتراسونیک) «نمی‌بیند». به همین دلیل لایهٔ کف روی سطح، که انعکاس سیگنال را مختل می‌کند، به‌طور کلی اثر مستقیم بر اصل کار ندارد. اما این به معنای بی‌اثر بودن کف در همهٔ کاربردها نیست. کف و هوادهی بر چگالی مؤثر مایع اثر می‌گذارند؛ اگر پروب یا نازل در ناحیه‌ای با مایع هوادار قرار گیرد، چگالی مؤثر کمتر از چگالی مایع بدون حباب است و Level کمتر از واقعیت دیده می‌شود. لایهٔ سنگین کف نیز خود وزنی دارد. در مخزن‌هایی که چند فاز یا لایه (مثلاً روغن روی آب) وجود دارد، فشار کف مجموع اثر هر لایه است و Level نمایش‌داده‌شده به چگالی هر لایه وابسته می‌شود. بنابراین نتیجهٔ صحیح این است: هیدرواستاتیک به بازتاب سطح وابسته نیست، اما به **چگالی مؤثر و وضعیت لایه‌ها** حساس است.

15 شکل مخزن

فشار هیدرواستاتیک در یک نقطه فقط به ارتفاع قائم مایع بالای آن نقطه، چگالی و شتاب گرانش وابسته است؛ پهنای مخزن در رابطه ظاهر نمی‌شود (بخش ۱). پس مخزن استوانه‌ای و مخزن مخروطی که مایع یکسانی تا ارتفاع یکسان در آن‌ها قرار دارد، در نقطهٔ پایین فشار یکسانی ایجاد می‌کنند. شکل ۱۱ این را برای دو مخزن با $h = 3\ m$ و آب نشان می‌دهد: هر دو 29.42 kPa فشار کف دارند. اما این برابری به معنای برابری مقدار مایع نیست؛ همین موضوع به تفاوت Level و Volume می‌رسد.

16 Level در برابر Volume

ترانسمیتر هیدرواستاتیک Level را اندازه می‌گیرد یا از فشار استنتاج می‌کند؛ Volume را مستقیماً نمی‌دهد. برای تبدیل Level به حجم باید هندسهٔ مخزن معلوم باشد: در استوانهٔ قائم $V = \pi \cdot r^2 \cdot h$ و در مخروط با رأس پایین $V = \pi \cdot r^2 \cdot h / 3$. در مثال شکل ۱۱ با شعاع 1 m در سطح مایع، حجم استوانه 9.42 m³ و حجم مخروط 3.14 m³ است، در حالی که Level و فشار کف هر دو یکسان‌اند.



شکل ۱۱ — Level یکسان و فشار یکسان در دو مخزن با شکل متفاوت؛ حجم مایع متفاوت است

1 مخزن استوانه‌ای 2 مخزن مخروطی با رأس پایین

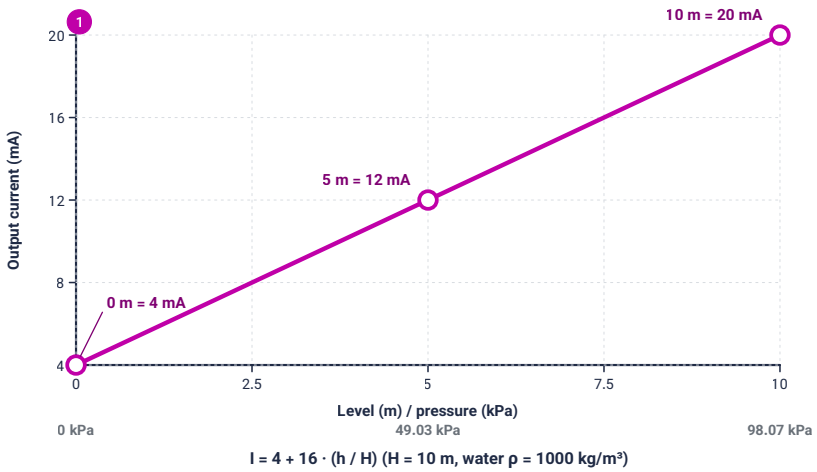
در عمل، برای مخزن‌هایی با شکل پیچیده از جدول تبدیل Level به حجم (Strapping Table) یا رابطهٔ هندسی در PLC / DCS استفاده می‌شود. این جدول بر اساس ابعاد واقعی مخزن ساخته می‌شود و باید با نقطهٔ صفر Level هم‌خوان باشد.

17 مقیاس‌دهی خروجی 4–20 mA

خروجی آنالوگ ترانسمیتر معمولاً جریان 4–20 mA است. مقدار 4 mA به پایین محدودهٔ اندازه‌گیری (LRV) و 20 mA به بالای آن (URV) نسبت داده می‌شود؛ فاصلهٔ این دو مقدار Span است. چون جریان صفر حتی در پایین‌ترین مقدار هم 4 mA است، قطع سیم یا خرابی حلقه با جریان نزدیک به صفر قابل تشخیص است؛ به همین دلیل به آن Live Zero می‌گویند. اگر ترانسمیتر برای مخزنی با Level بین 0 m و 10 m تنظیم شده باشد و مایع آب باشد، LRV برابر فشار 0 kPa و URV برابر 98.07 kPa (نسبی) است. رابطهٔ خطی جریان و Level:

$$I = 4 + 16 \cdot (h / H) \qquad (6)$$

I	جریان خروجی ترانسمیتر	mA
h	Level مایع	m
H	Level متناظر با 20 mA (بالای محدودهٔ مقیاس‌دهی‌شده)	m



شکل ۱۲ — مقیاس‌دهی 4–20 mA برای 0–10 m آب؛ 0 m = 4 mA، 5 m = 12 mA و 10 m = 20 mA

1 رابطهٔ خطی Level و جریان خروجی

جدول ۳ — مقادیر مقیاس‌دهی 4–20 mA برای 0–10 m آب

Level (m)	فشار نسبی آب (kPa)	درصد از Span	جریان (mA)
0	0	0 %	4.00
2.5	24.52	25 %	8.00
5	49.03	50 %	12.00
7.5	73.55	75 %	16.00
10	98.07	100 %	20.00

به‌عنوان نمونه، برای h = 5 m: I = 4 + 16 × (5 / 10) = 12 mA. این جدول فقط برای آب با چگالی 1000 kg/m³ و g = 9.80665 m/s² معتبر است؛ با تغییر چگالی، فشار متناظر هر Level تغییر می‌کند و باید مقیاس یا چگالی ورودی اصلاح شود. نحوهٔ انتخاب محدودهٔ مناسب و در نظر گرفتن حاشیهٔ اضافه‌سطح در سطح ۲ آمده است.

18 کاربردهای پایه

سطح‌سنج هیدرواستاتیک به دلیل سادگی اصل کار، در بسیاری از کاربردهای مایعات متداول است. جدول زیر کاربردهای آموزشی و نکتهٔ مفهومی هرکدام را بیان می‌کند. این جدول جایگزین بررسی کاربرد واقعی نیست؛ همیشه شرایط فرآیند و سازگاری مواد باید با داده‌های رسمی تأیید شود.

جدول ۴ — کاربردهای پایهٔ سطح‌سنج هیدرواستاتیک

کاربرد	نکتهٔ مفهومی
مخزن آب (سطح‌سنج مخزن آب)	مایع ساده با چگالی تقریباً معلوم؛ هم آویز غوطه‌ور و هم نصب جانبی ممکن است.
چاه عمیق (سطح‌سنج چاه)	پروب با کابل بلند از بالا آویخته می‌شود؛ طول کابل با Level اندازه‌گیری‌شده یکی نیست (توضیح در سطح ۲).
مخزن ذخیره و آب‌انبار (Reservoir)	Level متغیر در مخزن باز؛ فشار اتمسفر با حسگر نسبی حذف می‌شود.
حوضچهٔ فاضلاب (Wastewater Basin)	وجود جامدات، لجن و گاهی کف؛ طراحی مکانیکی دیافراگم و محل نصب باید بررسی شود.
مخزن مواد شیمیایی	فقط در صورتی که جنس بخش‌های خیس با ماده سازگار باشد؛ سازگاری باید از داده‌های رسمی تأیید شود.
ظرف فرآیندی باز	تا وقتی سطح مایع به اتمسفر باز است، رابطهٔ ساده برقرار است؛ ظرف تحت فشار حالت دیگری دارد.

19 برداشت‌های نادرست رایج

COMMON MISTAKE — هشت برداشت نادرست پرتکرار

این برداشت‌ها در انتخاب، نصب و تنظیم سطح‌سنج هیدرواستاتیک زیاد دیده می‌شوند و هر هشت مورد در جدول زیر اصلاح شده‌اند.

برداشت نادرست	واقعیت
× ترانسمیتر هیدرواستاتیک مستقیماً سطح مایع را می‌بیند.	✓ فقط فشار در محل دیافراگم را اندازه می‌گیرد و Level را از آن محاسبه می‌کند.
× قطر مخزن فشار هیدرواستاتیک را تغییر می‌دهد.	✓ فشار فقط به ارتفاع قائم، چگالی و گرانش وابسته است؛ پهنا اثری ندارد.
× فشار یکسان همیشه به Level یکسان می‌انجامد.	✓ فقط وقتی چگالی و فشار فضای بالای مایع یکسان باشد.
× چگالی مهم نیست.	✓ چگالی ضریب مستقیم رابطهٔ فشار و Level است.
× Vented Cable فقط یک کابل الکتریکی است.	✓ لولهٔ تنفس آن مسیر مرجع اتمسفر را می‌سازد و مسدود شدنش خطا ایجاد می‌کند.
× حسگر فشار نسبی و مطلق رفتار یکسان دارند.	✓ حسگر نسبی اتمسفر را حذف می‌کند؛ حسگر مطلق نه.
× سطح‌سنج هیدرواستاتیک در هر مخزن تحت فشار خودکار کار می‌کند.	✓ فشار فضای بخار باید حذف یا جبران شود.
× ترانسمیتر «۱۰ متری» یعنی ۱۰ متر از هر مایعی.	✓ «۱۰ متر» به چگالی مبنای تنظیم (معمولاً آب) وابسته است؛ مایع سنگین‌تر محدودهٔ فشار را زودتر پر می‌کند.

20 جمع‌بندی

سطح‌سنج هیدرواستاتیک Level را از فشار ستون مایع نتیجه می‌گیرد: P = ρgh. هر نقطه از زنجیرهٔ اندازه‌گیری — دیافراگم، حسگر فشار، الکترونیک، 4–20 mA، PLC / DCS — بخشی از نتیجهٔ نهایی را می‌سازد و هر مفروضه (چگالی، مرجع اتمسفر، فشار فضای بالا) روی Level نمایش‌داده‌شده اثر مستقیم دارد. در مخزن باز با حسگر فشار نسبی، این رابطه ساده و کارآمد است؛ در مخزن تحت فشار، حسگر تنها کافی نیست.

Level h → P = ρ·g·h → Sensing diaphragm → Pressure sensor → Electronics → 4–20 mA → PLC / DCS

جمع‌بندی نکات کلیدی

- فشار هیدرواستاتیک با ارتفاع ستون مایع و چگالی نسبت مستقیم دارد: P = ρgh؛ پهنای مخزن اثری ندارد.
- ترانسمیتر هیدرواستاتیک فشار را اندازه می‌گیرد و با فرض چگالی، آن را به Level تبدیل می‌کند.
- غوطه‌ور (Submersible) از بالا آویزان می‌شود؛ نصب جانبی روی نازل پایین مخزن است.
- در مخزن باز، حسگر فشار نسبی اتمسفر را خنثی می‌کند؛ Vented Cable مسیر مرجع اتمسفر را فراهم می‌کند.
- حسگر فشار مطلق اتمسفر را حذف نمی‌کند و به جبران جداگانه نیاز دارد.
- در مخزن تحت فشار، فشار فضای بخار باید حذف یا جبران شود.
- Level برابر Volume نیست؛ برای حجم هندسهٔ مخزن لازم است.

21 پرسش‌های متداول

› سطح‌سنج هیدرواستاتیک چیست؟

سطح‌سنج هیدرواستاتیک (Hydrostatic Level Transmitter) ابزاری است که فشار ستون مایع را در یک نقطهٔ پایین اندازه می‌گیرد و با فرض چگالی مایع، آن را به Level تبدیل می‌کند. اصل کار آن رابطهٔ P = ρgh است.

› لول ترانسمیتر هیدرواستاتیک چگونه کار می‌کند؟

فشار ناشی از ستون مایع روی دیافراگم حسگر می‌افتد؛ حسگر فشار آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند و الکترونیک خروجی استاندارد مانند 4–20 mA می‌سازد که PLC یا DCS به Level تبدیل می‌کند.

› Submersible Level Transmitter چیست؟

ترانسمیتر غوطه‌ور پروبی است که با کابل مستقیماً درون مایع آویزان می‌شود و دیافراگم حسگر نزدیک انتهای پروب قرار دارد. برای مخزن، چاه، حوضچه و آب‌انبار متداول است.

› سطح‌سنج چاه چگونه کار می‌کند؟

پروب غوطه‌ور با کابل بلند در چاه پایین می‌رود و فشار ستون آب بالای دیافراگم را اندازه می‌گیرد. Level از فشار و چگالی محاسبه می‌شود؛ طول کابل لزوماً با Level برابر نیست، چون پروب در عمق مشخصی از چاه آویخته شده است.

Vented Cable چیست؟

کابلی که علاوه بر هادی‌ها، یک لولهٔ تنفس دارد تا پشت دیافراگم حسگر فشار نسبی به فشار اتمسفر متصل بماند. مسدود شدن این مسیر خطای اندازه‌گیری ایجاد می‌کند.

چرا Density در اندازه‌گیری سطح مهم است؟

چون در رابطهٔ P = ρgh چگالی ضریب فشار است. مایع سنگین‌تر در همان ارتفاع فشار بیشتری ایجاد می‌کند؛ اگر چگالی واقعی با تنظیم ترانسمیتر فرق کند، Level نمایش‌داده‌شده به همان نسبت جابه‌جا می‌شود.

آیا سطح‌سنج هیدرواستاتیک برای مخزن آب مناسب است؟

بله؛ مخزن آب یکی از رایج‌ترین کاربردهای آن است، به‌ویژه در مخزن باز. جنس بخش‌های خیس، محدودهٔ اندازه‌گیری و شرایط نصب باید با داده‌های رسمی سازنده بررسی شود.

آیا برای فاضلاب می‌توان از Hydrostatic Level استفاده کرد؟

در حوضچه‌های فاضلاب کاربرد متداولی دارد، اما جامدات، لجن و کف می‌توانند اثر داشته باشند و طراحی دیافراگم و محل نصب باید برای آن شرایط بررسی شود.

Gauge Pressure و Absolute Pressure چه تفاوتی دارند؟

فشار نسبی نسبت به اتمسفر و فشار مطلق نسبت به خلأ کامل سنجیده می‌شود. حسگر نسبی اتمسفر را حذف می‌کند؛ حسگر مطلق نه، و برای رسیدن به Level باید فشار اتمسفر جداگانه جبران شود.

آیا Hydrostatic Level برای مخزن تحت فشار مناسب است؟

یک ترانسمیتر فشار تنها در پایین مخزن، فشار ستون مایع را از فشار فضای بخار تفکیک نمی‌کند. برای مخزن تحت فشار معمولاً اندازه‌گیری اختلاف فشار (DP) یا معماری جبران دیگری لازم است.

فرق Level و Volume چیست؟

Level ارتفاع مایع است و Volume مقدار حجم آن. هیدرواستاتیک Level را می‌دهد؛ برای Volume، هندسهٔ مخزن (استوانه، مخروط، یا جدول Strapping) لازم است.

خروجی 4–20 mA چگونه به Level تبدیل می‌شود؟

با رابطهٔ خطی I = 4 + 16·(h/H)؛ برای مثال در محدودهٔ 0–10 m، 4 mA برابر 0 m، 12 mA برابر 5 m و 20 mA برابر 10 m است.

22 واژه‌نامه و منابع

اصطلاح	معنا
Hydrostatic Head	فشار ناشی از ارتفاع ستون مایع ساکن
Gauge Pressure	فشار نسبت به فشار اتمسفر محیط
Absolute Pressure	فشار نسبت به خلأ کامل
Vented Cable	کابل دارای لولهٔ تنفس برای مرجع اتمسفر
URV / LRV	مقدار پایین / بالای محدودهٔ مقیاس‌دهی‌شده
Span	اختلاف URV و LRV
Live Zero	مقدار غیرصفر برای پایین محدوده (4 mA) که قطع حلقه را قابل تشخیص می‌کند
SG	نسبت چگالی مایع به چگالی آب

1. NIST SP 811 — Guide for the Use of the International System of Units (SI)
مرجع مقدار استاندارد شتاب گرانش 9.80665 m/s² و تعریف یکاها؛ ویرایش جاری پیش از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی شود.

2. IEC 62828 series — Reference conditions and procedures for testing industrial and process measurement transmitters
مجموعه‌ای که جایگزین IEC 60770-1 شده است (IEC 60770-1:2010 در سال ۲۰۲۰ ابطال شد)؛ در این سند فقط نام برده شده و هیچ حد یا روش آزمونی از آن نقل نشده است.

3. Siemens — SITRANS LH100 hydrostatic level transmitter, operating instructions
منبع ثانویهٔ سازنده برای مفهوم لولهٔ تنفس، فیلتر و توصیه‌های نصب؛ فقط برای توضیح کیفی استفاده شده است.

4. AutomationDirect — ProSense SLT submersible level transmitter, user manual
منبع ثانویهٔ سازنده برای مفهوم Vented Cable و رعایت خم نکردن لولهٔ تنفس؛ ادعاهای محصول آن نقل نشده است.

5. Dwyer / Omega — Submersible level transmitters (Series FBLT), bulletin
منبع ثانویهٔ سازنده برای مفهوم کلی ترانسمیتر غوطه‌ور؛ ادعاهای محصول آن نقل نشده است.

این راهنما سند سطح ۱ است و عمداً وارد جزئیات انتخاب محدوده، اثر دما بر چگالی، خطای فشار بارومتریک، تحلیل عدم‌قطعیت و تحلیل مخزن تحت فشار نمی‌شود؛ این موضوعات در راهنماهای سطح ۲ و ۳ همین مجموعه بررسی می‌شوند. شکل‌ها آموزشی و غیرمقیاس‌دارند و جایگزین نقشهٔ رسمی سازندهٔ تجهیز نیستند.

منابع مرتبط NICO

گام بعدی

- راهنمای مهندسی انتخاب، سایزینگ و نصب سطح‌سنج هیدرواستاتیک — NICO-EDU-LVL-L2-008-FA
- مهندسی پیشرفته اندازه‌گیری سطح هیدرواستاتیک — NICO-EDU-LVL-L3-009-FA
- سیگنال 4–20 mA چیست؟ — NICO-EDU-SIG-L1-001-FA

تجهیزات مرتبط NICO

- HLT40 — ترانسمیتر سطح هیدرواستاتیک (Hydrostatic Level Transmitter) NICO
- DPT11 — ترانسمیتر اختلاف فشار NICO، برای معماری‌هایی که اندازه‌گیری اختلاف فشار لازم دارند

مشخصات، محدودهٔ اندازه‌گیری، مواد و گواهی‌های هر محصول NICO باید از برگهٔ فنی رسمی همان محصول گرفته شود؛ هیچ مشخصهٔ محصولی در این راهنما ادعا نشده است.