NICO TECHNICAL LEARNING SERIES

مجموعه آموزش فنی ابزار دقیق

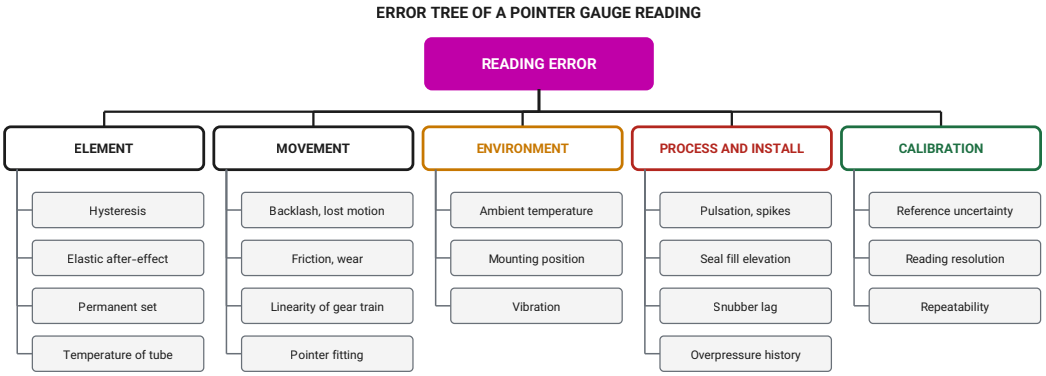
LEVEL 3 — ADVANCED ENGINEERING

مهندسی پیشرفتهٔ گیج فشار

از مکانیک Bourdon Tube تا ضربان، خستگی، خرابی و عدم‌قطعیت اندازه‌گیری

Advanced Pressure Gauge Engineering: Bourdon Tube Mechanics, Pulsation, Fatigue, Failure and Measurement Uncertainty

مدل مهندسی گیج بوردونی از لوله و مکانیزم تا خطا، ضربان، خستگی و Measurement Uncertainty؛ با مدل‌های پارامتریک، مثال کالیبراسیون، FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی.



شکل ۱ — درخت خطای قرائت گیج فشار؛ هر شاخه یک مؤلفهٔ عدم‌قطعیت مستقل است

شماره سند	بازنگری	سطح محتوا	تاریخ انتشار
NICO-EDU-PRS-L3-008-FA	Rev00	LEVEL 3	November 2026 — **آبان ۱۴۰۵**

1 هدف، پرسش مهندسی و مبنای طراحی

این سند سطح ۳ برای مهندسان ارشد ابزار دقیق، طراحان و مشاوران است. پرسش مهندسی آن این است: **خطا، عمر و ایمنی یک گیج فشار بوردونی چگونه از مکانیک لوله، مکانیزم، دما، ضربان و نصب نتیجه می‌شود، و چگونه می‌توان آن را با مدل، کالیبراسیون و بودجهٔ عدم‌قطعیت تحلیل و راستی‌آزمایی کرد؟** انتخاب و نصب عملی در سطح ۲ (NICO-EDU-PRS-L2-007-FA) و مفاهیم پایه در سطح ۱ (NICO-EDU-PRS-L1-006-FA) آمده است؛ این سند آن‌ها را فرض می‌کند. هر مدل فقط معادله‌ای را به کار می‌برد که مبنایش مشخص است؛ فرمول بستهٔ بدون منبع برای تغییر شکل لولهٔ بوردون در این سند ادعا نشده است.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. منابع خطای یک گیج بوردونی را از لوله تا عقربه دسته‌بندی و به مؤلفهٔ عدم‌قطعیت تبدیل کنید.
2. هیسترزیس، تکرارپذیری و خطای دما را از داده تفکیک و با Maximum Permissible Error مقایسه کنید.
3. اثر ضربان و ضربه را با مدل پاسخ دینامیکی و مدل Snubber ارزیابی و سازگاری با حد دقت را بسنجید.
4. حساسیت عمر چرخه‌ای را نسبت به رنج با مدل پارامتریک و فرض‌های صریح بررسی کنید.
5. بودجهٔ عدم‌قطعیت کالیبراسیون را بسازید و U با k = 2 را گزارش کنید.
6. FMEA گیج را بنویسید و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی را با وضعیت و مورد باز تکمیل کنید.

DESIGN BASIS — **مبنای طراحی این سند**

1. ابزار مرجع: گیج فشار بوردونی با لولهٔ C-Type، Accuracy Class 1.0، رنج 0…10 bar (اسپن 10 bar) و Maximum Permissible Error برابر ±0.10 bar روی همهٔ مقیاس.
2. سرویس مرجع برای مدل‌های ضربان: فشار میانگین 6 bar(g)، ضربان ±0.5 bar در 5 Hz، ضربهٔ گذرا 1.2 bar؛ همهٔ مقادیر فرض آموزشی‌اند.
3. دمای مرجع کالیبراسیون 20 °C؛ ضریب دمای نمونه 0.4 % مقیاس کامل به‌ازای 10 K از برگهٔ PM 02.02 (WIKA) فقط برای رتبه‌بندی اثر.
4. سطح اطمینان گزارش عدم‌قطعیت: k = 2 (حدود 95 % در توزیع نرمال، فرض).
5. هیچ مشخصهٔ محصول NICO در این سند ادعا نشده است؛ مدل‌های PGN، ACC50 و DST40 فقط نام‌گذاری شده‌اند.

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

1. لوله و مکانیزم در ناحیهٔ کشسان خطی کار می‌کنند: جابه‌جایی نوک متناسب با فشار و معکوس مدول کشسانی است.

مبنا: ASSUMPTION؛ ثابت تناسب باید از سازنده یا آزمون به‌دست آید.

2. خستگی با مدل پارامتریک نمایی بر پایهٔ دامنهٔ نسبی فشار توصیف می‌شود؛ نمای m برابر ۳، ۵ و ۸ فرض شده است.
مبنا: ASSUMPTION؛ منحنی S-N لوله ادعا نشده و REQUIRES VERIFICATION با آزمون یا داده سازنده.

3. پاسخ عقربه و مکانیزم مدل مرتبهٔ دو با بسامد طبیعی 10 Hz و ضریب میرایی 0.05، 0.3 و 0.7 است.
مبنا: ASSUMPTION؛ اندازه‌گیری دینامیکی واقعی انجام نشده است.

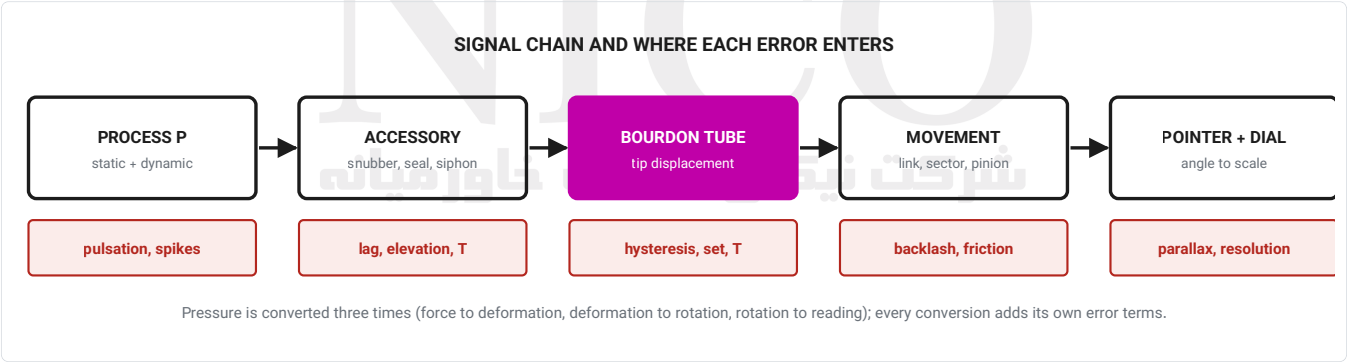
4. Snubber مدل مرتبهٔ یک با ثابت زمانی 0.05، 0.2 و 1 s.
مبنا: ASSUMPTION؛ ثابت زمانی واقعی به محدودکننده و حجم بستگی دارد.

5. داده‌های کالیبراسیون در بخش ۱۹ ساختگی‌اند (SYNTHETIC DATA) و برای نمایش روش‌اند، نه نتیجهٔ آزمون واقعی.
مبنا: ASSUMPTION.

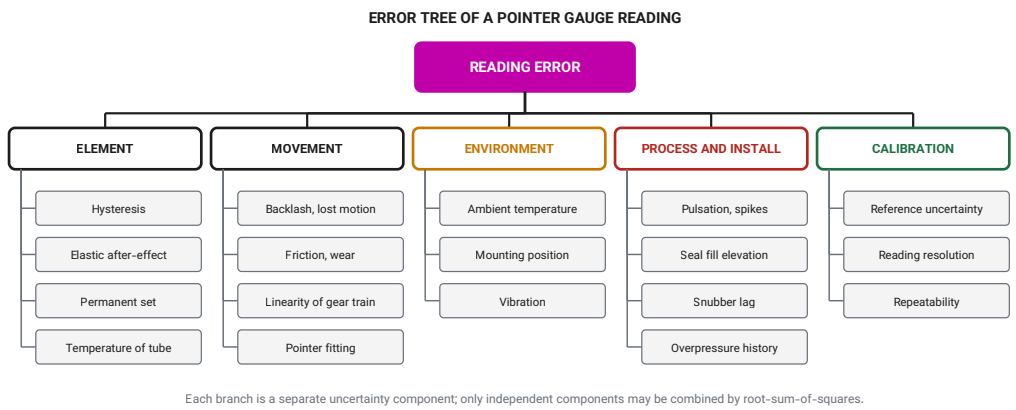
6. مؤلفه‌های عدم‌قطعیت مستقل‌اند و توزیع مستطیلی دارند؛ استاندارد مرجع با k = 2 نرمال است.
مبنا: رویهٔ نوع B در JCGM 100:2008 به‌عنوان چارچوب روش؛ ویرایش و بند باید قبل از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی شود.

2 معماری سیستم و محل ورود خطا

گیج بوردونی زنجیره‌ای از سه تبدیل است: نیرو به تغییر شکل لوله، تغییر شکل به چرخش از راه مکانیزم و چرخش به قرائت روی صفحه. هر تبدیل ترم‌های خطای خودش را دارد و لوازم جانبی (سیل، Snubber، Siphon) دو مورد اضافه می‌کنند: تأخیر و اختلاف دما یا ارتفاع. مهم‌ترین نتیجهٔ این ساختار آن است که بخشی از خطا ناشی از خود لوله (کشسانی، دما) و بخشی ناشی از مکانیزم (بک‌لش، اصطکاک) است و فقط مؤلفه‌های مستقل را می‌توان با جذر مجموع مربعات ترکیب کرد.



شکل ۱ — زنجیرهٔ سیگنال و محل ورود هر خطا؛ سه تبدیل نیرو، چرخش و قرائت



شکل ۲ — درخت خطای قرائت گیج فشار با پنج شاخه: لوله، مکانیزم، محیط، فرآیند و نصب، کالیبراسیون

3 هندسهٔ لولهٔ بوردون و تبدیل فشار به جابه‌جایی

لولهٔ بوردون نوع C-Type یک لولهٔ فلزی خمیده با مقطع غیردایره‌ای (بیضی یا تخت) است. فشار داخلی مقطع را به‌سمت دایره می‌برد؛ چون سطح بیرونی قوس بلندتر از سطح داخلی است، لوله تمایل به باز شدن (صاف‌تر شدن) پیدا می‌کند و نوک آزاد جابه‌جا می‌شود. برای تحلیل مهندسی، در ناحیهٔ کشسان خطی و برای فشارهای کوچک نسبت به حد تسلیم، فرض می‌شود جابه‌جایی نوک با فشار متناسب است:

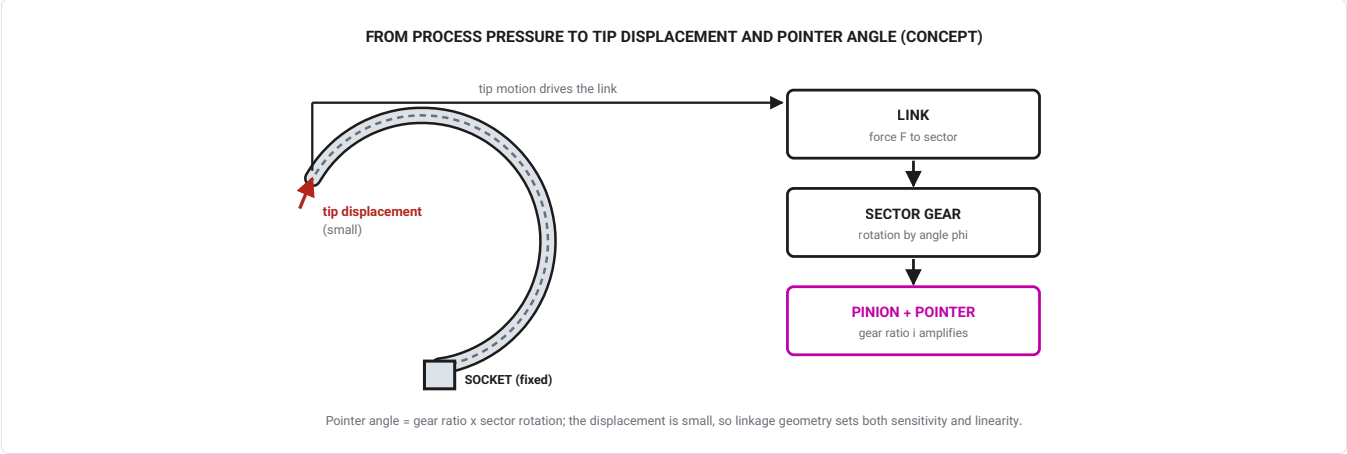
$$d_{tip} = S \times P \;;\; S = k_s / E(T) \qquad (1)$$

d_{tip}	جابه‌جایی نوک آزاد لوله (در حد ده‌ها میکرومتر تا چند میلی‌متر؛ مرتبهٔ بزرگی، بدون ادعای عدد برای مدل مشخص)	mm
k_s	ثابت هندسی لوله (مقطع، شعاع خمش، ضخامت)؛ ASSUMPTION	mm·GPa/bar
S	حساسیت لوله؛ به هندسهٔ مقطع، شعاع خمش، ضخامت و ماده بستگی دارد (ASSUMPTION؛ از سازنده یا آزمون)	mm/bar
P	فشار نسبی در لوله	bar
$E(T)$	مدول کشسانی ماده در دمای T؛ با افزایش دما معمولاً کاهش می‌یابد	GPa

CAUTION — فرمول بسته برای لولهٔ بوردون ادعا نشده است

رابطهٔ تحلیلی کامل جابه‌جایی لولهٔ بوردون به نظریهٔ پوستهٔ نازک خمیده با مقطع بیضوی بستگی دارد و در منابع مختلف با فرض‌های متفاوت آمده است؛ بدون متن منبع تأییدشده در این پروژه، از فرمول جایگزین استفاده نشد. مدل رابطهٔ (۱) فقط جهت و مرتبهٔ اثرها را نشان می‌دهد: افزایش E یا ضخامت جابه‌جایی را کم و افزایش شعاع خمش یا لاغری مقطع آن را زیاد می‌کند.

REQUIRES VERIFICATION



شکل ۳ — از فشار تا جابه‌جایی نوک و زاویهٔ عقربه؛ جابه‌جایی کوچک با لینک و چرخ‌دنده تقویت می‌شود (مفهومی)

4 مکانیزم حرکت: لینک، سکتور، پینیون و خطاهای مکانیکی

نوک لوله با یک لینک (Link) به سکتور چرخ‌دنده (Sector Gear) متصل است؛ سکتور پینیون و عقربه را می‌چرخاند و زاویهٔ عقربه تقریباً از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$A_p = G \times d_{tip} + A_0 + e_{mech} \quad (2)$$

A_p	زاویهٔ عقربه روی صفحه	deg
G	بهرهٔ هندسی لینک و چرخ‌دنده؛ تقریباً ثابت ولی به هندسهٔ لینک وابسته (منبع خطای خطی‌بودن)	deg/mm
A_0	زاویهٔ صفر؛ با تنظیم عقربه تغییر می‌کند	deg
e_{mech}	خطای مکانیکی: بک‌لش، اصطکاک و گشتاور غیرخطی فنر مویی	deg

چهار پدیدهٔ مکانیکی بیشترین سهم را دارند. **بک‌لش و حرکت از دست رفته** (Lost Motion) هنگام تغییر جهت فشار قرائت را جابه‌جا می‌کند و در منحنی کالیبراسیون به‌صورت فاصلهٔ بین مسیر رفت و برگشت دیده می‌شود. **اصطکاک** در یاتاقان‌های محور و بین دندانه‌ها باعث می‌شود عقربه در تغییر کوچک فشار حرکت نکند و بعد جهش کند. **سایش** بک‌لش را در درازمدت زیاد می‌کند و در ارتعاش شدید سریع‌تر است. **خطی‌بودن مکانیزم:** چون بهرهٔ G به زاویهٔ لینک وابسته است، قرائت در وسط و دو سر مقیاس خطای متفاوتی دارد؛ تنظیم کارخانه این خطا را با تنظیم طول لینک و موقعیت سکتور کمینه می‌کند. اثر مجموع این‌ها همان چیزی است که Accuracy Class در عمل کنترل می‌کند.

5 کشسانی، تسلیم و تغییر شکل دائمی

تا وقتی تنش لوله در ناحیهٔ کشسان است، بعد از رفع فشار لوله به شکل اولیه برمی‌گردد. اگر فشار از حد کشسانی بگذرد، بخشی از تغییر شکل دائمی (Permanent Set) می‌شود: نتیجه جابه‌جایی صفر عقربه و تغییر حساسیت است. برای ناحیهٔ کشسان، رابطهٔ تنش و کرنش خطی است؛ در ناحیهٔ تسلیم با کرنش کمی بیشتر، تنش تقریباً ثابت می‌ماند و بخشی از کرنش

برگشت‌ناپذیر است. مهم برای طراح: پس از یک اضافه‌فشار که عقربه در صفر برنمی‌گردد، گیج باید به‌عنوان آسیب‌دیده در نظر گرفته شود، حتی اگر در فشارهای بالاتر هنوز به‌نظر درست باشد، چون حساسیت و صفر هر دو ممکن است تغییر کرده باشند. برای تعیین حد اضافه‌فشار مجاز از برگهٔ سازنده استفاده کنید؛ در این سند عددی برای آن ادعا نشده است.

6 هیسترزیس، تکرارپذیری، دقت و تفکیک‌پذیری

این چهار اصطلاح در گفتار روزمره همگی «دقت» نامیده می‌شوند ولی هرکدام یک پدیدهٔ جدا است و در بودجهٔ عدم‌قطعیت هر کدام جدا وارد می‌شوند.

جدول ۱ — تمایز مفاهیم دقت در یک گیج فشار

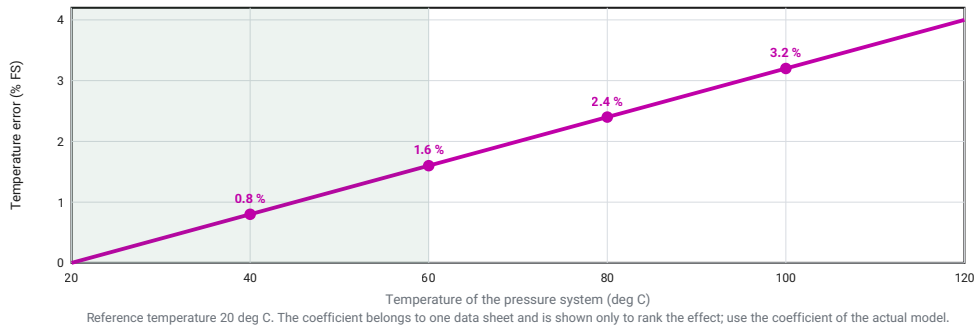
مفهوم	تعریف عملی در گیج	چگونه از داده جدا می‌شود
Accuracy **(خطای قرائت)**	اختلاف قرائت با مقدار مرجع در هر نقطه	قرائت منهای مرجع
Hysteresis	اختلاف قرائت در یک فشار یکسان هنگام رفتن و برگشتن	قدر مطلق (قرائت برگشت - قرائت رفت) در یک نقطه
Repeatability	پراکندگی قرائت‌های تکرار شده در شرایط یکسان و یک جهت	دامنهٔ قرائت‌های رفت چند دور
Resolution	کوچک‌ترین تغییر قابل تشخیص روی صفحه (مرتبط با تقسیم‌بندی و قابلیت خواندن)	برآورد اپراتور از تقسیم‌بندی صفحه
Maximum Permissible Error	حد خطای مجاز بر پایهٔ کلاس و اسپن	(Class / 100) × Span

7 اثر دما

دما از دو راه اثر می‌گذارد: مدول کشسانی ماده با دما تغییر می‌کند (که حساسیت S را در رابطهٔ (۱) عوض می‌کند) و ابعاد و پرکننده تغییر می‌کند. در برگه‌های سازندگان اثر مجموع این‌ها با یک ضریب دمایی بیان می‌شود. برای نمونه، برگهٔ PM 02.02 شرکت WIKA مقدار حدود 0.4 % مقیاس کامل به‌ازای هر 10 K انحراف از 20 °C را آورده است MANUFACTURER PRACTICE؛ اعتبار آن فقط برای همان مدل است و برای مدل دیگر باید ضریب خودش گرفته شود.

$$e_T = c_T \times (T - T_{ref}) / 10\ \mathrm{K}\ \ [\%\ \mathrm{FS}] \qquad (3)$$

e_T	خطای دمایی افزوده به خطای کلاس	% FS
c_T	ضریب دمایی نمونه، 0.4 % FS / 10 K (ASSUMPTION) برای مدل واقعی؛ (REQUIRES VERIFICATION)	% FS / 10 K
T	دمای سیستم فشار (لوله و پرکننده)، نه لزوماً دمای محیط	°C
T_{ref}	دمای مرجع، 20 °C	°C



شکل ۴ — خطای دمایی با ضریب نمونه؛ در 80 °C حدود 2.4 % مقیاس کامل است

با این ضریب، در دمای سیستم 60 °C خطای افزوده برابر 1.6 % مقیاس کامل است؛ یعنی بیشتر از خطای کلاس 1.0. این عدد نشان می‌دهد چرا کاهش دمای سیستم (خنک‌سازی یا Siphon) در سرویس داغ همان‌قدر مهم است که انتخاب کلاس دقت. دمای T را باید در محل لوله اندازه‌گیری یا برآورد کرد، نه از دمای فرآیند.

8 بار ایستا و چرخه‌ای؛ مدل ضربان

فشار واقعی در بسیاری از کاربردها ثابت نیست. مدل ساده برای فشار در ورودی گیج، جمع یک مؤلفهٔ میانگین و یک مؤلفهٔ متناوب است:

$$P(t) = P_{mean} + P_{dyn}(t) \;;\; P_{dyn}(t) = \Delta P_a \times \sin(2 \times pi \times f \times t) \quad (4)$$

P_{mean}	فشار میانگین (در سرویس مرجع 6 bar(g))	bar
ΔP_a	دامنهٔ مؤلفهٔ متناوب (در سرویس مرجع 0.5 bar)	bar
f	بسامد ضربان (در سرویس مرجع 5 Hz)؛ باید از سازندهٔ پمپ یا اندازه‌گیری به‌دست آید	Hz

دو کمیت برای طراحی مهم‌اند: دامنهٔ نسبی a = ΔP_a / FS که در خستگی به کار می‌رود و فشار میانگین نسبی P_mean / FS که سطح تنش میانگین را تعیین می‌کند. مدل (۴) همهٔ ضربان‌ها را سینوسی فرض می‌کند؛ ضربان پیستونی واقعی هارمونیک‌های بالاتر دارد و باید تحلیل طیفی شود.

9 ضربه و اضافه‌فشار: تحلیل نردبان فشار

ضربه (Pressure Spike) یک رویداد گذرا است؛ اضافه‌فشار (Overpressure) هر فشار بالاتر از حد کاری است. برای تحلیل، پنج سطح باید جدا ثبت شوند: فشار عادی، بیشینهٔ کاری، انتهای مقیاس، حد اضافه‌فشار سازنده و حد ترکیدن. فاصلهٔ هر ضربه تا حد اضافه‌فشار سازنده اندازهٔ حاشیهٔ ایمنی را نشان می‌دهد؛ و اگر ضربهٔ مرجع 1.2 bar روی فشار میانگین 6 bar بنشیند، قله 7.7 bar (با ضربان ±0.5 bar) و برای رنج 0…10 bar برابر 77 % مقیاس کامل است. این عدد از 75 % توصیهٔ ایستا بالاتر و از 65 % توصیهٔ دینامیکی هم بالاتر است؛ بنابراین یا باید ضربه با Snubber تضعیف شود یا رنج بالاتر انتخاب شود.

ENGINEERING RECOMMENDATION

10 خستگی چرخه‌ای لولهٔ بوردون و اثر رنج

فشار ضربان‌دار تنش را در هر سیکل تغییر می‌دهد و خطر شکست خستگی در درازمدت ایجاد می‌کند. برای طراحی دقیق باید منحنی S-N ماده و تنش واقعی را داشت؛ این داده‌ها در این پروژه موجود نیستند. بنابراین از یک مدل **پارامتریک** فقط برای بررسی حساسیت استفاده می‌شود: فرض می‌شود تنش دامنه‌ای متناسب با دامنهٔ نسبی فشار a = ΔP_a / FS است (چون لوله برای فشار مقیاس کامل طراحی می‌شود) و عمر با توان m از آن کم می‌شود:

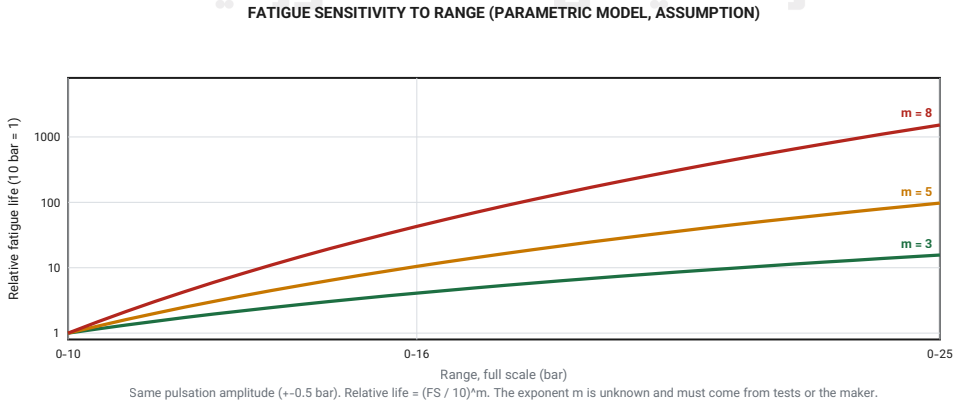
$$N / N_{ref} = (a_{ref} / a)^{m} \;;\; a = \Delta P_a / FS \qquad (5)$$

N / N_{ref}	عمر چرخه‌ای نسبی نسبت به رنج مرجع (در جدول، رنج 0…10 bar)	—
a	دامنهٔ نسبی فشار نسبت به مقیاس کامل	—
m	نمای حساسیت خستگی؛ نامعلوم است (ASSUMPTION: ۳، ۵ و ۸)	—

برای اثر ترکیبی چند سطح دامنه، مفهوم قاعدهٔ مایْنر (Miner's Rule) به‌کار می‌رود: D = sum(n_i / N_i) و شکست وقتی D به یک نزدیک شود؛ ولی چون N_i معلوم نیست، در این سند فقط به‌عنوان مفهوم آمده و عدد ندارد.

جدول ۲ — حساسیت عمر نسبی به رنج برای ضربان ثابت ±0.5 bar و فشار میانگین 6 bar (مدل پارامتریک، فرض)

رنج (bar)	فشار میانگین % FS	دامنه % FS	عمر نسبی m = 3	عمر نسبی m = 5	عمر نسبی m = 8
0…10	60.0	5.00	1.0	1.0	1
0…16	37.5	3.12	4.1	10.5	43
0…25	24.0	2.00	15.6	97.7	1526



شکل ۵ — عمر نسبی بر حسب رنج برای سه نمای فرضی؛ نمای m ناشناخته است

IMPORTANT – جهت اثر قطعی است، عدد نه

مدل نشان می‌دهد با دو برابر کردن رنج در همان ضربان، عمر چرخه‌ای افزایش می‌یابد، ولی مقدار افزایش به نمای m بستگی دارد (از حدود ۴ برابر تا بیش از ۴۰ برابر برای رنج 0…16 bar). این اعداد را در مشخصهٔ فنی نقل نکنید؛ آزمون خستگی یا برگهٔ سازنده لازم است. رنج بالاتر هزینهٔ وضوح قرائت را دارد: در جدول ۲ فشار میانگین از 60 % به 37.5 % مقیاس کاهش می‌یابد.

11 پاسخ دینامیکی: مدل مرتبهٔ دو برای لوله، مکانیزم و عقربه

مجموعهٔ لوله، مکانیزم و عقربه را می‌توان با یک سیستم جرم، فنر و میرایی مدل کرد. پاسخ به ورودی سینوسی فشار با نسبت بسامد r = f / f_n و ضریب میرایی zeta مشخص می‌شود:

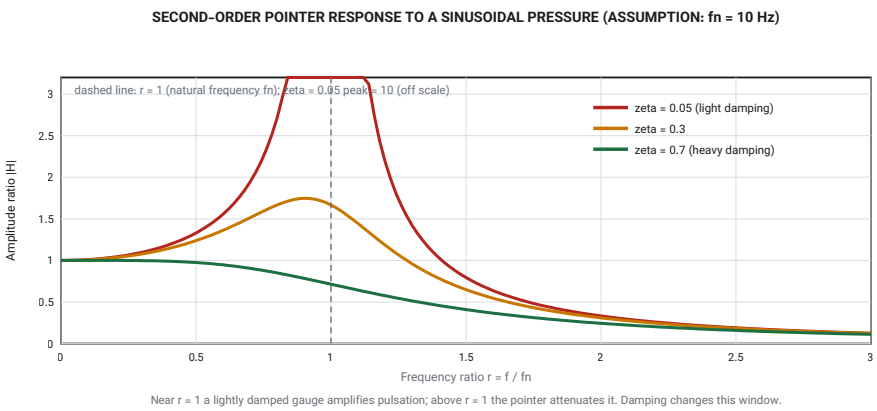
$$|H(r)| = 1 / \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2 \times \text{zeta} \times r)^2} \quad ; \quad r = f / f_n \tag{6}$$

$\lvert H \rvert$	نسبت دامنهٔ حرکت عقربه (بر حسب فشار معادل) به دامنهٔ فشار ورودی	–
f_n	بسامد طبیعی مجموعه؛ در مثال 10 Hz (ASSUMPTION؛ اندازه‌گیری واقعی نشده)	Hz
zeta	ضریب میرایی؛ برای گیج خشک کوچک و برای گیج روغنی بزرگ‌تر (ASSUMPTION: 0.05، 0.3، 0.7)	–

نتیجهٔ مهم: وقتی بسامد ضربان نزدیک بسامد طبیعی باشد (r نزدیک ۱)، گیج با میرایی کم دامنهٔ ضربان را تقویت می‌کند؛ بسیار بالاتر از آن، عقربه ضربان را تضعیف می‌کند و عملاً میانگین را نشان می‌دهد. جدول زیر مقدار |H| و شاخص‌های پاسخ پله را برای سه میرایی نشان می‌دهد؛ فراجهش از رابطهٔ exp(-pi × zeta / √(1 - zeta²)) و زمان نشست از تقریب 4 / (zeta × w_n) به‌دست آمده است.

جدول ۳ – پاسخ مدل مرتبهٔ دو برای f_n = 10 Hz (فرض)

zeta	فراجهش پله (٪)	زمان نشست (ts (s))	|H| در ۲ Hz	|H| در ۵ Hz	|H| در ۱۰ Hz	|H| در ۲۵ Hz
0.05	85.4	1.273	1.041	1.330	10.000	0.190
0.3	37.2	0.212	1.034	1.238	1.667	0.183
0.7	4.6	0.091	1.000	0.975	0.714	0.158



شکل ۶ — نسبت دامنه بر حسب نسبت بسامد برای سه میرایی؛ تقویت نزدیک بسامد طبیعی در میرایی کم

12 پرکنندهٔ مایع به‌عنوان عنصر میرایی

پرکننده با ایجاد لزجت در اطراف مکانیزم، میرایی zeta را بالا می‌برد. در مدل رابطهٔ (۶)، این معادل حرکت از ستون zeta = 0.05 به zeta = 0.3 یا بیشتر است و فراجهش پله را از حدود 85 % به حدود 37 % می‌رساند (جدول ۳). این اثر روی حرکت مکانیکی است؛ فشاری که به لوله می‌رسد تغییری نمی‌کند. بنابراین پرکننده ضربان را فقط از دید عقربه کم می‌کند و لوله همچنان همان دامنهٔ تنش را تجربه می‌کند. پرکننده بدون اسنابر خستگی ناشی از ضربان را کاهش نمی‌دهد؛ این تمایز برای عمر لوله مهم است. محدودیت دمایی پرکننده (برای نمونه، گلیسیرین و سیلیکون در برگهٔ PM 02.02) و انبساط حجمی آن نیز باید با دمای واقعی تطبیق داده شود.

13 Snubber: مدل مرتبهٔ یک و مبادلهٔ میرایی و سرعت

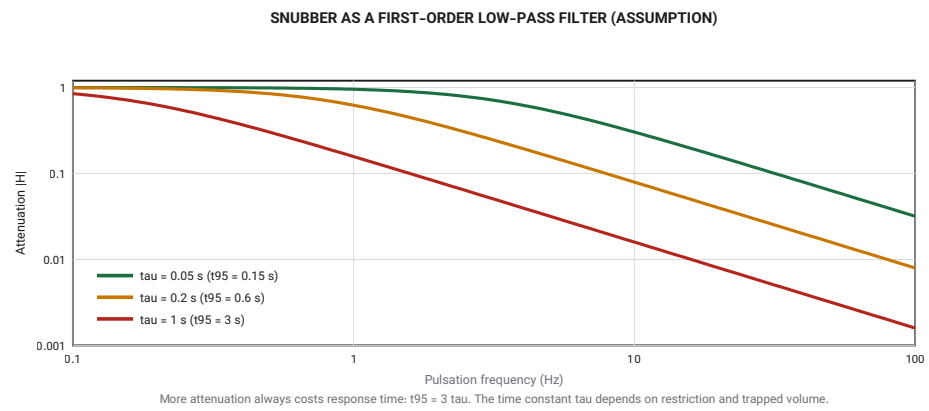
Snubber ترکیبی از یک محدودیت جریان و یک حجم پشت آن است و مانند فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ یک عمل می‌کند. دو کمیت اصلی را باید هم‌زمان دید: تضعیف ضربان و تأخیر پاسخ:

$$|H(f)| = 1 / \sqrt{1 + (2 \times \pi \times f \times \tau)^2} \quad ; \quad t_{95} = 3 \times \tau \tag{7}$$

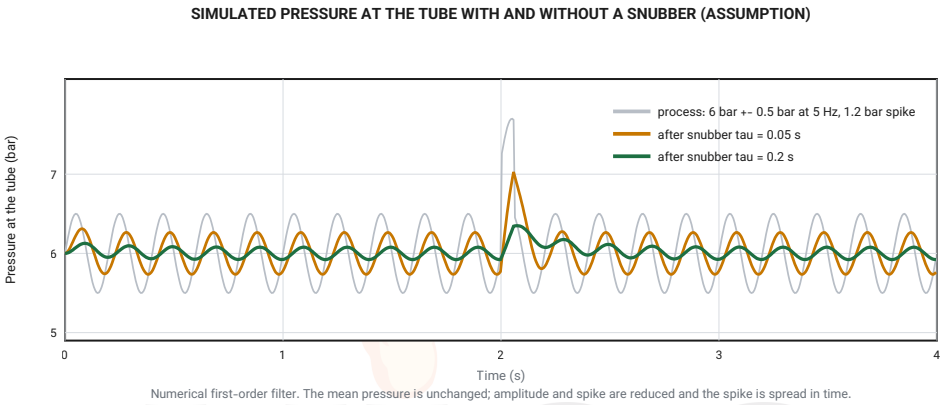
tau	ثابت زمانی؛ از مقاومت جریان و حجم پشت محدودکننده (ASSUMPTION: 0.05، 0.2، 1 s)	s
t_{95}	زمان رسیدن پاسخ پله به حدود ۹۵ ٪ مقدار نهایی	s
f	بسامد ضربان	Hz

جدول ۴ — تضعیف و زمان پاسخ برای سه ثابت زمانی فرضی

tau (s)	زمان ۹۵ ٪ (t95 (s))	|H| در ۱ Hz	|H| در ۵ Hz	|H| در ۲۵ Hz
0.05	0.15	0.954	0.537	0.126
0.2	0.60	0.623	0.157	0.032
1.0	3.00	0.157	0.032	0.006



شکل ۷ — تضعیف اسنابر بر حسب بسامد برای سه ثابت زمانی؛ هر تضعیف بیشتر پاسخ کندتری دارد



شکل ۸ — شبیه‌سازی فشار در لوله با و بدون اسنابر برای ضربان 5 Hz و ضربهٔ 1.2 bar

برای سرویس مرجع (5 Hz) اسنابر با tau = 0.2 s دامنه را به 0.157 دامنهٔ اولیه می‌رساند (یعنی ضربان ±0.5 bar به حدود ±0.08 bar) ولی زمان رسیدن به ۹۵ ٪ تغییر پله برابر 0.6 s است. این مبادله مشخص می‌کند چرا اندازهٔ اسنابر نمی‌تواند عدد جهانی داشته باشد: پایش کند (فرایند آهسته) تضعیف بیشتری می‌پذیرد؛ حفاظت و هشدار سریع کمتر. همچنین مسدود شدن در سیال کثیف ثابت زمانی را به‌مرور بالا می‌برد.

14 Diaphragm Seal: اثر پرکننده، ارتفاع و پاسخ

سیل با یک ستون مایع فشار را منتقل می‌کند؛ بنابراین سه اثر دارد: وزن ستون پرکننده (انحراف صفر)، انبساط پرکننده با دما و تأخیر پاسخ در لولهٔ موئین بلند. انحراف صفر ناشی از ارتفاع از رابطهٔ زیر می‌آید:

$$\Delta P_{seal} = rho \times g \times h \quad (8)$$

ΔP_{seal}	انحراف صفر ناشی از اختلاف ارتفاع بین سیل و گیج	Pa
rho	چگالی پرکننده؛ 960 و 1100 kg/m³ نمونه‌اند (ASSUMPTION؛ از برگهٔ سازندهٔ سیل)	kg/m³
h	اختلاف ارتفاع مرکز سیل و مرکز گیج	m

جدول ۵ — انحراف صفر سیل بر حسب ارتفاع و چگالی پرکننده (فرض)

h (m)	ΔP، (bar) rho = 960	ΔP، (bar) rho = 1100	% از رنج 0…6 (rho = 960)	% از رنج 0…10 (rho = 960)
0.5	0.047	0.054	0.78	0.47
1.0	0.094	0.108	1.57	0.94
2.0	0.188	0.216	3.14	1.88
3.0	0.283	0.324	4.71	2.83

در رنج 0…6 bar ارتفاع 1 m با پرکنندهٔ 960 kg/m³ نزدیک 1.57 % مقیاس کامل را جابه‌جا می‌کند؛ یعنی بیشتر از خطای کلاس 1.0. جابه‌جایی را با تنظیم صفر در محل نصب نهایی می‌توان حذف کرد، ولی تغییر بعدی ارتفاع یا دمای پرکننده دوباره آن را برمی‌گرداند. Diaphragm Seal یک گیج دیافراگمی (Diaphragm Gauge) نیست و عنصر حس‌کننده همچنان لولهٔ بوردون است.

15 سرویس بخار و نقش حرارتی Siphon

در بخار، دمای سیستم فشار مستقیماً از رابطهٔ (۳) به خطا تبدیل می‌شود: 80 °C دما خطای 2.4 % مقیاس کامل و 100 °C خطای 3.2 % مقیاس کامل با ضریب نمونه می‌دهد (شکل ۴). Siphon ستون میعان را بین بخار و لوله نگه می‌دارد تا دمای رسیده به لوله به سطح قابل‌تحمل برسد. مقدار کاهش دما به طول و جنس مسیر، عایق، شرایط محیط و دبی میعان بستگی دارد و عدد تضمین‌شده ندارد؛ بنابراین دمای واقعی پس از سیفون باید اندازه‌گیری یا از سازنده گرفته شود. دمای بخار اشباع در فشار مثلاً 10 bar(g) (حدود 184 °C در 11 bar(a)) REQUIRES VERIFICATION با جدول بخار تأیید شود. نکتهٔ طراحی: دمای مجاز پرکننده، واشر و جنس لوله باید روی دمای پس از سیفون تطبیق داده شوند، نه دمای بخار.

16 الگوی ایمنی و تحلیل ترکیدن

تحلیل اضافه‌فشار سه سطح را از هم جدا می‌کند: (الف) حد اضافه‌فشار مجاز که پس از آن گیج هنوز باید قابل استفاده باشد، (ب) حد نامطمئن که آسیب دائمی محتمل است و (ج) حد ترکیدن که تخلیه از راه الگوی ایمنی انتظار می‌رود. در گیج با الگوی ایمنی، سازندگان دیوارهٔ ثابت بین مکانیزم و شیشه و پشت تخلیه‌شونده می‌گذارند؛ اعتبار آن به رعایت فاصلهٔ آزاد پشت و جهت نصب بستگی دارد. نام‌گذاری S1، S2 و S3 و فاصلهٔ ۲۰ میلی‌متر پشت گیج در برگه‌های سازندگان آمده است MANUFACTURER PRACTICE و باید برای مدل خاص راستی‌آزمایی شود؛ این سند گواهی انطباق ایجاد نمی‌کند و ادعایی دربارهٔ گیج‌های PGN ندارد.

17 تحلیل حالت‌های خرابی (FMEA)

جدول زیر پانزده حالت خرابی را با مکانیزم فیزیکی، علامت، اثر روی اندازه‌گیری، پیامد ایمنی، روش تشخیص و اقدام اصلاحی فهرست می‌کند.

جدول ۶ — FMEA گیج فشار بوردونی

حالت خرابی	مکانیزم فیزیکی	علامت	اثر بر اندازه‌گیری	پیامد ایمنی	تشخیص	اقدام
تغییر شکل دائمی	اضافه‌فشار فراتر از حد کشسانی	صفر برنمی‌گردد	انحراف صفر، تغییر حساسیت	کم	صفر در فشار صفر	تعویض یا کالیبراسیون
ترک خستگی لوله	ضربان چرخه‌ای	نشتی ناگهانی	قرائت افت می‌کند	متوسط تا زیاد	بازرسی، نشتی	تعویض، رنج و اسنابر
ترکیدن لوله	فشار بیش از حد، خستگی، خوردگی	تخلیه ناگهانی	از دست رفتن قرائت	زیاد	—	الگوی ایمنی، فاصلهٔ پشت
مسدود شدن مسیر یا اسنابر	رسوب، ذرات، بلورها	عقربه ثابت	قرائت نادرست یا کند	متوسط	مقایسه با مرجع	تمیزکاری، سیل
خوردگی قطعات تماس‌دار	سازگار نبودن سیال	نشتی، رسوب	تغییر حساسیت	متوسط	بازرسی چشمی	جنس مناسب یا سیل
سایش مکانیزم	ارتعاش، اصطکاک	جهش عقربه، بک‌لش	هیسترزیس بالا	کم	کالیبراسیون رفت و برگشت	گیج روغنی، تعویض
لق شدن عقربه	ضربه، ارتعاش	صفر نادرست	انحراف ثابت	کم	صفر در فشار صفر	تنظیم یا تعویض
نشتی پرکننده	واشر، دمای بالا	کاهش سطح مایع	میرایی کمتر	کم	بازرسی چشمی	تعویض گیج
نفوذ رطوبت (گیج خشک)	درزبندی ناکافی	مه روی شیشه	خوانایی کم	کم	بازرسی چشمی	گیج روغنی یا درزبندی بهتر
تخریب پرکننده	دمای بیش از حد	تغییر رنگ، غلظت	میرایی و اثر دمایی	کم	بازرسی دوره‌ای	تطبیق دما، تعویض
نشتی رزوه	رزوهٔ مخلوط یا آب‌بندی بد	نشتی در اتصال	افت فشار	متوسط	بازرسی نشتی	رزوهٔ هم‌خانواده
سیفون خالی	راه‌اندازی بدون پر کردن	قرائت ناپایدار	خطای دمایی زیاد	متوسط	بررسی پرشدگی	پر کردن، رویهٔ راه‌اندازی
پارگی یا افت پرکنندهٔ سیل	خوردگی غشا، نشتی لوله موئین	قرائت صفر یا افت	از دست رفتن اندازه‌گیری	متوسط تا زیاد	مقایسه با مرجع	تعویض سیل
انحراف صفر سیل	ارتفاع یا دمای پرکننده	قرائت ثابتاً جابه‌جا	انحراف صفر	کم	صفر در محل	تنظیم صفر، ثبت ارتفاع
مسدود شدن مسیر تخلیه	نصب بدون فاصله روی پنل	—	—	زیاد	بازرسی نصب	اصلاح نصب

18 مدل دقت و کالیبراسیون

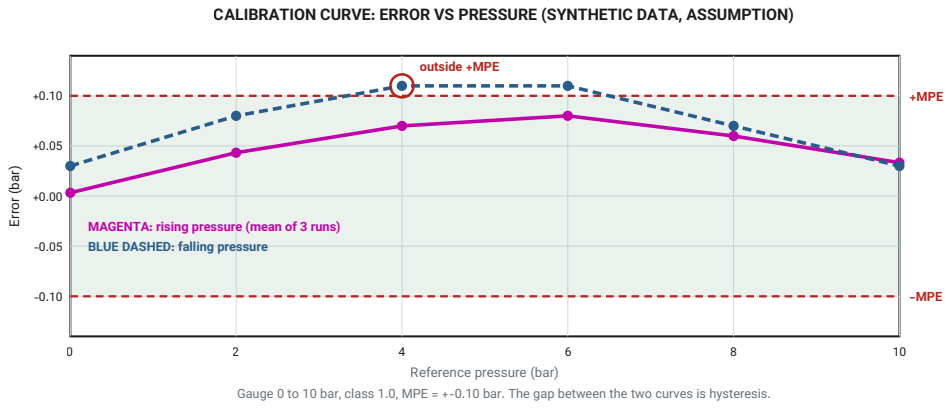
سه اصطلاح باید جدا بمانند: کالیبراسیون (Calibration) مقایسه با مرجع و ثبت خطا است؛ تنظیم (Adjustment) تغییر ابزار برای کاهش خطا است؛ و راستی‌آزمایی (Verification) بررسی انطباق با یک حد است. کالیبراسیون به‌خودی‌خود به معنای تنظیم نیست. مقدار «پیش از تنظیم» (As Found) و «پس از تنظیم» (As Left) باید جدا ثبت شوند؛ و اگر تنظیمی انجام نشده نباید ادعا شود. حد خطای مجاز از Accuracy Class به‌دست می‌آید: MPE = (Class / 100) × Span (برای مرجع این سند، ±0.10 bar). قاعدهٔ تصمیم باید پیش از آزمون تعیین شود: پذیرش ساده (|e| ≤ MPE) یا پذیرش با حاشیهٔ محافظ (|e| ≤ MPE − U).

19 مثال کالیبراسیون (دادهٔ ساختگی)

داده‌های جدول ۷ ساختگی (SYNTHETIC DATA, ASSUMPTION) هستند و فقط روش محاسبه را نشان می‌دهند. گیج 0…10 bar کلاس 1.0 در شش نقطه با سه دور رفت و یک دور برگشت بررسی شده است.

جدول ۷ — داده‌ها و نتایج کالیبراسیون ساختگی (رفت: میانگین سه دور)

مرجع (bar)	قرائت رفت، میانگین (bar)	قرائت برگشت (bar)	خطای رفت (bar)	خطای برگشت (bar)	هیسترزیس (bar)	تکرارپذیری (bar)
0	0.003	0.03	0.003	0.03	0.027	0.01
2	2.043	2.08	0.043	0.08	0.037	0.01
4	4.070	4.11	0.070	0.11	0.040	0.02
6	6.080	6.11	0.080	0.11	0.030	0.02
8	8.060	8.07	0.060	0.07	0.010	0.02
10	10.033	10.03	0.033	0.03	0.003	0.01



شکل ۹ — منحنی خطا بر حسب فشار برای مسیر رفت و برگشت؛ دو نقطهٔ مسیر برگشت از حد مجاز بالاترند (دادهٔ ساختگی)

مثال ۱ — ارزیابی انطباق در برابر MPE EXAMPLE

داده (ساختگی): MPE = ±0.10 bar؛ بیشترین خطا در جدول ۷ برابر 0.11 bar+ در 4 bar و 6 bar مسیر برگشت؛ بیشترین هیسترزیس 0.04 bar؛ بیشترین پراکندگی تکرار 0.02 bar.

$$|e|_{max} = 0.11 \text{ bar} > MPE = 0.10 \text{ bar} \text{ ; as-found: outside limit}$$

گیج در حالت پیش از تنظیم بدون توجه به عدم‌قطعیت از حد مجاز بیرون است (حتی بدون حاشیهٔ محافظ)، پس تنظیم یا تعویض لازم است. دادهٔ «پس از تنظیم» موجود نیست و ادعایی دربارهٔ آن نمی‌شود. مؤلفهٔ هیسترزیس 0.04 bar (0.4 % اسپن) **نشان می‌دهد بخش قابل‌توجهی از خطا از مکانیزم است و تنظیم صفر تنها آن را برطرف نمی‌کند.**

20 بودجهٔ عدم‌قطعیت کالیبراسیون (Measurement Uncertainty)

نتیجهٔ یک کالیبراسیون بدون عدم‌قطعیت ناقص است. روش، از چارچوب GUM (JCGM 100:2008؛ ویرایش و بند باید پیش از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی شود) گرفته شده است: هر مؤلفه به عدم‌قطعیت استاندارد تبدیل و مؤلفه‌های مستقل با جذر مجموع مربعات ترکیب می‌شوند. **جمع جبری درصدها نادرست است** چون فرض می‌کند همهٔ خطاها هم‌زمان در یک جهت و در بیشینه‌اند.

$$u_i = a / \sqrt{3} \ \text{(rectangular)} \ ; \ u_i = U_{ref} / k \ \text{(normal)} \quad (9)$$

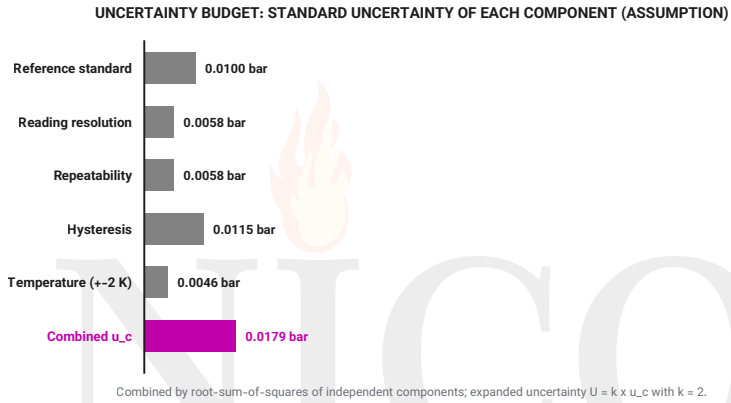
$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)} \ ; \ U = k \times u_c \quad (10)$$

a	نیم‌پهنای حد خطای یک مؤلفه با توزیع مستطیلی	bar
u_i	عدم‌قطعیت استاندارد مؤلفهٔ i	bar
u_c	عدم‌قطعیت استاندارد ترکیبی (مؤلفه‌ها مستقل فرض شده‌اند)	bar
k	ضریب پوشش، k = 2 (ASSUMPTION حدود ۹۵ ٪)	—
U	عدم‌قطعیت گسترده	bar

مؤلفه‌ها برای کالیبراسیون مرجع این سند: استاندارد مرجع با U = 0.02 bar (k = 2؛ فرض)، تفکیک‌پذیری قرائت با برآورد یک‌پنجم تقسیم روی 0.1 bar، تکرارپذیری و هیسترزیس از جدول ۷، و دمای کالیبراسیون ±2 K با ضریب 0.4 % FS / 10 K.

جدول ۸ — بودجهٔ عدم‌قطعیت کالیبراسیون گیج 0…10 bar (فرض آموزشی)

مؤلفه	توزیع	a یا U (bar)	مقسوم‌علیه	u_i (bar)
استاندارد مرجع	نرمال (k = 2)	0.0200	2.000	0.0100
تفکیک‌پذیری قرائت	مستطیلی	0.0100	1.732	0.0058
تکرارپذیری	مستطیلی	0.0100	1.732	0.0058
هیسترزیس	مستطیلی	0.0200	1.732	0.0115
دما (±۲ K)	مستطیلی	0.0080	1.732	0.0046
عدم‌قطعیت ترکیبی u_c	جذر مجموع مربعات			**0.0179**
عدم‌قطعیت گسترده U (k = 2)				**0.0359**



شکل ۱۰ — سهم هر مؤلفه در عدم‌قطعیت استاندارد؛ بزرگ‌ترین سهم از استاندارد مرجع و هیسترزیس است

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

مثال ۲ — نتیجهٔ بودجه و قاعدهٔ تصمیم EXAMPLE

داده: مؤلفه‌های جدول ۸؛ MPE = 0.10 bar.

$$u_c = \sqrt{(0.0100^2 + 0.0058^2 + 0.0058^2 + 0.0115^2 + 0.0046^2)} = 0.0179 \text{ bar}$$

$$U = 2 \times 0.0179 = 0.036 \text{ bar} \quad (0.36 \text{ \% of span})$$

$$\text{MPE} / U = 0.10 / 0.036 = 2.8 \; ; \; \text{guard-band limit} = \text{MPE} - U = 0.064 \text{ bar}$$

گزارش: خطا ± 0.036 bar (k = 2). با قاعدهٔ حاشیهٔ محافظ، فقط خطاهای تا 0.064 bar به‌طور مطمئن در حدند؛ در جدول ۷ مسیر رفت (تا 0.08 bar) هم از این حد بیرون است. نسبت MPE / U برابر ۲٫۸ است؛ حد پذیرش این نسبت را پروژه یا آزمایشگاه تعیین می‌کند و در این سند عدد جهانی ادعا نمی‌شود.

21 تحلیل حساسیت: رنج، ضربان و خستگی

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد کدام ورودی بیشترین اثر را دارد. برای سرویس مرجع، سه ورودی بررسی شد. (۱) رنج: از 0…10 به 0…16 bar عمر پارامتریک ۴ تا ۴۳ برابر (به نمای m) و فشار میانگین نسبی از ۶۰ ٪ به ۳۷٫۵ ٪ می‌شود (جدول ۲). (۲) ثابت زمانی اسنابر: از 0.05 به 0.2 s دامنه از 0.54 به 0.16 کاهش می‌یابد ولی زمان ۹۵ ٪ از 0.15 به 0.6 s می‌رسد (جدول ۴). (۳) دما: هر 10 K حدود 0.4 % مقیاس کامل (شکل ۴). نتیجه: تضعیف ضربان و رنج روی عمر اثر دارند؛ دما و سیل روی دقت؛ و هیچ‌یک جای دیگری را نمی‌گیرد.

22 مطالعات موردی

مطالعهٔ پمپ با چهار پیکربندی روی همان ضربان مرجع (±0.5 bar در 5 Hz، f_n = 10 Hz): الف) گیج خشک، ب) گیج روغنی، ج) گیج روغنی با Snubber (tau = 0.2 s)، د) گیج با Gauge Saver. اعداد از مدل‌های فرضی بخش‌های قبل است.

جدول ۹ — پیکربندی‌های گیج روی خروجی پمپ با ضربان مرجع (مدل، فرض)

پیکربندی	ضربان در لوله (bar)	ضربان عقربه (bar)	اثر بر خستگی	ملاحظه
الف) خشک	±0.50	±0.67	بدون تغییر	|H| برابر ۱٫۳۳ (r = 0.5، zeta = 0.05)
ب) روغنی	±0.50	±0.62	بدون تغییر	|H| برابر ۱٫۲۴ (zeta = 0.3)؛ پرکننده ضربان بسامد پایین را کم نمی‌کند
ج) روغنی + Snubber	±0.08	±0.10	بسیار بهتر (۲۵۸ برابر برای m = 3، پارامتریک)	پاسخ کندتر؛ t95 = 0.6 s

پیکربندی	ضربان در لوله (bar)	ضربان عقربه (bar)	اثر بر خستگی	ملاحظه
د) با Gauge Saver	±0.50	بسته به مدل	ضربان بدون تغییر؛ فقط ضربه محدود می‌شود	نوع و رفتار از برگهٔ سازنده

COMMON MISTAKE – گیج روغنی را راه‌حل ضربان دانستن

وقتی عقربه روی خروجی پمپ می‌لرزد، تعویض گیج خشک با گیج روغنی عقربه را آرام‌تر نشان می‌دهد ولی دامنهٔ فشار رسیده به لوله را عوض نمی‌کند (جدول ۹). نتیجه، گیجی است که آرام به‌نظر می‌رسد ولی لوله‌اش همچنان خسته می‌شود.

FIELD SCENARIO **ترک لولهٔ بوردون پس از شش ماه روی پمپ پیستونی**

«گیج روغنی 0…10 bar روی خروجی پمپ پیستونی هر چند ماه نشتی می‌کند؛ عقربه آرام است و قرائت درست به‌نظر می‌رسد.»

تحلیل مهندسی: آرام بودن عقربه نشان می‌دهد میرایی مکانیکی کافی است، نه اینکه دامنهٔ فشار کم باشد. در ضربان پیستونی بسامد پایین است و در مدل مرتبهٔ دو پرکننده آن را کم نمی‌کند (جدول ۳). دامنهٔ نسبی 5 % مقیاس کامل با فشار میانگین 60 % مقیاس، لوله را در معرض خستگی چرخه‌ای می‌گذارد. اقدام: اندازه‌گیری دامنه و بسامد ضربان، افزودن Snubber با ثابت زمانی متناسب یا افزایش رنج و بازبینی دوبارهٔ دقت، و ثبت علت در FMEA. عدد عمر باقی‌مانده فقط با آزمون یا داده سازنده قابل ادعا است.

نتیجهٔ جالب برای طراح: در بسامد پایین‌تر از f_n، پرکننده ضربان را به‌طور محسوس کم نمی‌کند؛ فقط اسنابر فشار رسیده به لوله را کم می‌کند و در نتیجه عمر لوله را بالا می‌برد. این موضوع تفکیک «لرزش مکانیکی» و «ضربان فشار» در سطح ۲ را به یک مدل کمّی ارتقا می‌دهد.

بخار: بدون سیفون و با دمای سیستم فرضی 150 °C خطای دمایی 5.2 % مقیاس کامل (از رابطهٔ (۳)) است؛ با سیفون و دمای 60 °C (فرض، باید اندازه‌گیری شود) 1.6 % می‌شود. این عدد دلیل کمّی لازم بودن سیفون در سرویس بخار است. **سیال خورنده:** نصب مستقیم لوله را در معرض سیال می‌گذارد؛ با سیل، تماس حذف می‌شود ولی انحراف صفر 0.094 bar (برای 1 m و 960 kg/m³) و عدم‌قطعیت اضافی ناشی از دما و ارتفاع ایجاد می‌شود. مقایسه تنها با خطای مؤلفه‌ها و سازگاری شیمیایی ممکن است.

23 ترکیب خطای نصب و درخت خطا

مثال: گیج 0…10 bar کلاس 1.6 روی سیال با دمای سیستم 60 °C و سیل با ارتفاع 1 m. سه مؤلفه: خطای کلاس ±0.16 bar، خطای دمایی 0.16 bar (1.6 % FS) و انحراف سیل 0.094 bar.

مثال ۳ — جمع بدترین حالت در برابر ترکیب مستقل EXAMPLE

$$\text{worst case} = 0.16 + 0.16 + 0.094 = 0.414 \text{ bar } (4.1\ \%\ \text{FS})$$

$$\text{RSS} = \sqrt{(0.16^2 + 0.16^2 + 0.094^2)} = 0.245 \text{ bar } (2.5\ \%\ \text{FS})$$

جمع بدترین حالت حد بالای محافظه‌کارانه است؛ ترکیب مستقل فقط وقتی معتبر است که مؤلفه‌ها واقعاً مستقل و تصادفی باشند. انحراف سیل ثابت و سیستماتیک است و با تنظیم صفر در محل نصب حذف‌شدنی است؛ پس در عمل بزرگ‌ترین سهم باقی‌مانده همان دماست و راه کاهش آن خنک‌سازی است.

24 ماتریس راستی‌آزمایی طراحی

جدول ۱۰ — ماتریس راستی‌آزمایی طراحی (سرویس مرجع)

الزام	ورودی فرآیند	پیکربندی	محاسبه یا راستی‌آزمایی	مبنای پذیرش	وضعیت	مورد باز
رنج مناسب	6 bar میانگین، قله 7.7 bar	0…10 bar یا 0…16 bar	قله / FS = ۷۷ ٪ (۱۰ بار)	توصیهٔ ۷۵ ٪ / ۶۵ ٪ ENGINEERING (RECOMMENDATION)	OPEN	اسنابر یا رنج ۱۶ بار
حد خطا	کلاس 1.0	MPE ±0.10 bar	جدول ۷: بیشینه 0.11 bar	|e| ≤ MPE	FAIL (ساختگی)	دادهٔ پس از تنظیم
عدم‌قطعیت کالیبراسیون	مرجع 0.02 bar	U = 0.036 bar	جدول ۸	قاعدهٔ تصمیم پروژه	ASSUMPTION	اعتبار مرجع واقعی
اثر دما	دمای سیستم 60 °C	خنک‌سازی یا سیفون	1.6 % FS (رابطهٔ ۳)	ضریب مدل واقعی	REQUIRES VERIFICATION	ضریب برگهٔ مدل
ضربان	±0.5 bar در 5 Hz	Snubber با tau = 0.2 s	جدول ۴	تأخیر قابل‌قبول فرآیند	ASSUMPTION	اندازه‌گیری ضربان
عمر چرخه‌ای	دامنه نسبی ۵ ٪	رنج و اسنابر	جدول ۲ (پارامتریک)	آزمون یا برگهٔ سازنده	REQUIRES VERIFICATION	نمای m
ایمنی ترکیدن	فشار فرآیند	الگوی ایمنی	—	برگهٔ سازنده	OPEN	نسخه و فاصلهٔ پشت
سازگاری مواد	سیال	جنس تماس‌دار	—	برگهٔ سازگاری	OPEN	اطلاعات سیال

25 نظم استانداردها و برچسب مبنا

هر گزارهٔ فنی با یک برچسب مبنا مشخص می‌شود تا خواننده بداند حرف از الزام است یا از تجربه. جدول زیر کاربرد هر برچسب را نشان می‌دهد و ثبت راستی‌آزمایی استانداردها وضعیت هر منبع را بیان می‌کند.

جدول ۱۱ — برچسب‌های مبنا و کاربرد آن‌ها در این سند

برچسب	معنا	استفاده در این سند
NORMATIVE REQUIREMENT	الزام صریح متن استاندارد	به کار نرفته (متن استاندارد خوانده نشده)
ENGINEERING RECOMMENDATION	توصیهٔ مهندسی از ادبیات استاندارد یا سازندگان	ضرایب ۷۵ / ۶۵ / ۵۰ ٪ رنج
MANUFACTURER PRACTICE	رویهٔ یک سازنده برای مدل خاص	ضریب دما، دمای پرکننده، فاصلهٔ پشت
NICO DESIGN PRACTICE	رویهٔ طراحی تأییدشدهٔ NICO	به کار نرفته (منبع تأییدشده نیست)
ASSUMPTION	فرض مدل یا دادهٔ ساختگی	همهٔ داده‌های عددی مدل‌ها
REQUIRES VERIFICATION	باید قبل از استفاده تأیید شود	دمای بخار اشباع، ضریب دما، نمای خستگی

جدول ۱۲ — ثبت راستی‌آزمایی استانداردها

استاندارد	راستی‌آزمایی‌شده	راستی‌آزمایی‌نشده
EN 837-1	شناسه و سال ۱۹۹۶؛ کلاس‌ها از برگهٔ سازندگان	متن بندها، آزمون‌ها، حدود
EN 837-2	شناسه و سال ۱۹۹۷؛ ضرایب از ادبیات سازندگان	متن توصیه‌ها
EN 837-3	عنوان از فهرست BSI	دامنه و جدول‌ها
ASME B40.100	ویرایش ۲۰۲۲	متن، قاعدهٔ ۵۰ ٪
JCGM 100:2008	چارچوب روش GUM	بندهای دقیق پیش از ارجاع رسمی

26 ثبت معادلات، واژگان و منابع

جدول ۱۳ — ثبت معادلات این سند و مبنای هرکدام

رابطه	محتوا	مبنا
(۱)	جابه‌جایی نوک لوله، کشسان خطی	ASSUMPTION؛ فرمول بسته ادعا نشده
(۲)	زاویهٔ عقربه	مدل هندسی مفهومی
(۳)	خطای دمایی	MANUFACTURER PRACTICE برای ضریب
(۴)	مدل ضربان	تعریف مدل
(۵)	حساسیت خستگی	ASSUMPTION؛ REQUIRES VERIFICATION
(۶)	پاسخ مرتبهٔ دو	معادلهٔ کلاسیک؛ پارامترها فرض
(۷)	اسنابر مرتبهٔ یک	معادلهٔ کلاسیک؛ tau فرض
(۸)	انحراف سیل	هیدرواستاتیک؛ چگالی فرض
(۹)، (۱۰)	عدم‌قطعیت	چارچوب GUM؛ بند راستی‌آزمایی شود

واژگان کنترل‌شده: Pressure Gauge، Bourdon Tube، Snubber، Siphon، Diaphragm Seal، Gauge Saver، Accuracy Class، Maximum Permissible Error، Hysteresis، Repeatability. هیچ اصطلاح فارسی جدید برای آن‌ها ساخته نشد؛ «گیج دیافراگمی» تنها برای Diaphragm Gauge به کار رفته و با سیل اشتباه گرفته نمی‌شود.

27 حدود اعتبار (Limits of Applicability)

مدل‌های این سند برای آموزش و بررسی حساسیت‌اند، نه برای پذیرش نهایی طراحی. سه حد مهم: اول، مدل کشسان خطی فقط تا ناحیهٔ کشسان معتبر است و پس از اضافه‌فشار تغییر شکل دائمی را پیش‌بینی نمی‌کند. دوم، مدل پارامتریک خستگی نمای m و منحنی S-N ندارد و فقط جهت اثر را می‌دهد؛ عدد عمر ندارد. سوم، پاسخ دینامیکی با بسامد طبیعی و میرایی فرضی ساخته شده و باید با اندازه‌گیری تأیید شود. همچنین مؤلفه‌های عدم‌قطعیت فرض شده‌اند؛ هیچ کالیبراسیون واقعی ثبت نشده و داده‌های جدول ۷ ساختگی‌اند. متن کامل استانداردهای فهرست‌شده خوانده نشده و ادعای انطباق با آن‌ها نشده است. مشخصات محصولات NICO تأیید نشده است.

28 چک‌لیست طراحی

- ☐ مبنای طراحی (رنج، کلاس، سرویس، دما، ضربان) نوشته و فرض‌ها با برچسب مبنا ثبت شده است.
- ☐ قله فشار (میانگین + ضربان + ضربه) با توصیهٔ ضریب رنج مقایسه شده است.
- ☐ دمای سیستم فشار، نه دمای فرآیند، برای خطای دمایی به کار رفته و ضریب مدل واقعی گرفته شده است.

- [ ] پاسخ دینامیکی و اسنابر با بسامد ضربان مقایسه و زمان پاسخ قابل‌قبول فرآیند تأیید شده است.
- [ ] FMEA انجام و اقدام برای حالت‌های با پیامد ایمنی بالا ثبت شده است.
- [ ] کالیبراسیون با داده رفت و برگشت، As Found و As Left و بودجهٔ عدم‌قطعیت گزارش می‌شود.
- [ ] قاعدهٔ تصمیم (پذیرش ساده یا با حاشیه) پیش از آزمون تعیین شده است.
- [ ] ماتریس راستی‌آزمایی تکمیل و موارد باز با مسئول و تاریخ ثبت شده‌اند.

جمع‌بندی نکات کلیدی

- خطای گیج بوردونی از لوله، مکانیزم، دما، فرآیند و کالیبراسیون می‌آید و فقط مؤلفه‌های مستقل با جذر مجموع مربعات ترکیب می‌شوند.
- پرکننده ارتعاش را میرا می‌کند ولی ضربان بسامد پایین را برای لوله کم نمی‌کند؛ فقط اسنابر فشار رسیده به لوله را کم می‌کند و پاسخ را کندتر می‌کند.
- جهت اثر رنج روی خستگی قطعی است ولی عدد آن به نمای m وابسته است و باید با آزمون یا سازنده تأیید شود.
- دمای سیستم فشار و ارتفاع سیل دقت را بیش از کلاس دقت تغییر می‌دهند.
- کالیبراسیون باید رفت و برگشت، As Found و عدم‌قطعیت داشته باشد؛ داده‌های این سند ساختگی‌اند.

29 پرسش‌های متداول پیشرفته

› چرا گیج بوردونی هیسترزیس دارد؟

به دلیل بک‌لش و اصطکاک مکانیزم و پسماند کشسانی لوله؛ در کالیبراسیون به‌صورت فاصلهٔ بین مسیر رفت و برگشت دیده می‌شود.

› آیا پرکنندهٔ روغنی عمر لوله را زیاد می‌کند؟

پرکننده لرزش مکانیکی را میرا می‌کند ولی فشار رسیده به لوله را تغییر نمی‌دهد؛ برای خستگی ناشی از ضربان فشار، اسنابر یا رنج بالاتر لازم است.

› آیا می‌توان عمر خستگی گیج را محاسبه کرد؟

فقط با منحنی S-N ماده و تنش واقعی یا آزمون. این سند فقط حساسیت پارامتریک را نشان می‌دهد و عدد عمر نمی‌دهد.

› چرا درصدهای خطا را نباید جمع کرد؟

چون جمع جبری فرض می‌کند همهٔ خطاها هم‌زمان بیشینه و هم‌جهت‌اند؛ برای مؤلفه‌های مستقل جذر مجموع مربعات رایج‌تر است.

› Accuracy Class و عدم‌قطعیت کالیبراسیون یکی هستند؟

خیر؛ کلاس حد خطای مجاز ابزار است و عدم‌قطعیت کیفیت اندازه‌گیری آزمایشگاه یا مرجع را نشان می‌دهد.

› اسنابر چه زمانی ضربهٔ واقعی را پنهان می‌کند؟

وقتی ثابت زمانی از زمان رویداد بزرگ‌تر است؛ در این صورت گیج برای هشدار سریع مناسب نیست.

› اثر دما در گیج چقدر است؟

با ضریب نمونه 0.4 % FS / 10 K برای 60 °C حدود 1.6 % مقیاس کامل؛ ضریب مدل واقعی باید گرفته شود.

› انحراف صفر سیل چگونه برآورد می‌شود؟

از rho × g × h با چگالی پرکننده و اختلاف ارتفاع؛ برای 1 m و 960 kg/m³ حدود 0.094 bar.

› As Found و As Left چیست؟

قرائت‌های پیش از هر تنظیم و پس از آن؛ اگر تنظیمی انجام نشده فقط As Found ثبت می‌شود و ادعای As Left نادرست است.

› داده‌های کالیبراسیون این سند واقعی‌اند؟

خیر؛ همه ساختگی‌اند و برای نمایش روش آمده‌اند.

› این سند ادعای انطباق با EN 837 دارد؟

خیر؛ متن استاندارد خوانده نشده و ضرایب از منابع سازندگان و ادبیات ثانویه‌اند.

30 استانداردها و منابع

1. EN 837-1 — Pressure gauges — Part 1: Bourdon tube pressure gauges — Dimensions, metrology, requirements and testing

ویرایش ۱۹۹۶؛ شناسه راستی‌آزمایی شد؛ متن نقل نشده است.

2. EN 837-2 — Pressure gauges — Part 2: Selection and installation recommendations for pressure gauges

ویرایش ۱۹۹۷؛ ضرایب رنج از ادبیات سازندگان؛ متن خوانده نشده است.

3. EN 837-3 — Pressure gauges — Diaphragm and capsule pressure gauges — Dimensions, metrology, requirements and testing

عنوان از فهرست BSI تأیید شد؛ دامنه از متن خوانده شود.

4. ASME B40.100 — Pressure Gauges and Gauge Attachments

ویرایش ۲۰۲۲؛ متن خوانده نشده؛ قاعدهٔ ۵۰ ٪ دست‌دوم است.

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

چارچوب روش؛ بندها پیش از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی شود.

6. WIKA data sheet PM 02.02 — Bourdon tube pressure gauge, stainless steel

نمونهٔ برگهٔ سازنده؛ ضریب دما و دمای پرکننده فقط برای همان مدل معتبرند.

همهٔ داده‌های عددی مدل‌ها فرض آموزشی‌اند. داده‌های کالیبراسیون ساختگی‌اند. متن کامل استانداردهای فهرست‌شده خوانده نشده و ادعای انطباق نمی‌شود.

شرکت تجهیزات صنعت خاورمیانه

منابع مرتبط NICO

سطوح پایین‌تر

- گیج فشار چیست و چگونه فشار را به حرکت عقربه تبدیل می‌کند؟ — NICO-EDU-PRS-L1-006-FA
- راهنمای مهندسی انتخاب، سایزینگ و نصب گیج فشار صنعتی — NICO-EDU-PRS-L2-007-FA
- انتخاب رنج مناسب گیج فشار — NICO-EDU-PRS-L2-001-FA

تجهیزات مرتبط NICO

- گیج‌های فشار سری PGN — خانوادهٔ PGN10 تا PGN15 و PGNS10
- اسنابر — ACC50
- دیافراگم سیل — DST40

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

NICO
شرکت نیکان صنعت خاورمیانه