

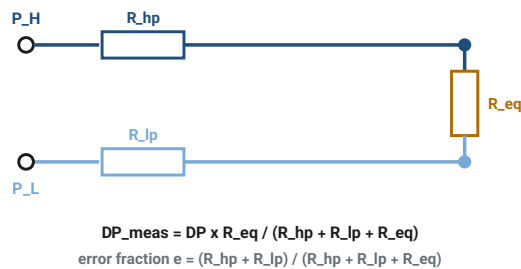
مهندسی پیشرفته Instrument Manifold

Design Verification و Failure Mode ،Pressure Integrity ،Leakage

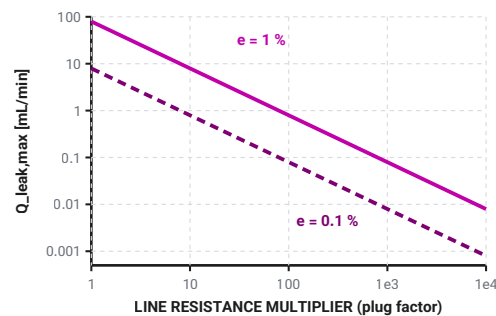
Advanced Engineering and Design Verification of Instrument Manifold Systems

از مدل هیدرولیکی نشتی تا FMEA، عدم قطعیت و ماتریس راستی آزمایی طراحی.

EQUALIZE SEAT LEAK AS A RESISTANCE DIVIDER



ALLOWABLE EQUALIZE LEAK AT FULL DP



شکل ۳ – مدل نشتی Equalize و حد مجاز نشتی در برابر وضعیت خطوط

تاریخ انتشار

October 2026 – مهر ۱۴۰۵

سطح محتوا

LEVEL 3

بازنگری

Rev00

شماره سند

NICO-EDU-ACC-L3-003-FA

1 مدل هیدرولیکی عمومی و مبنای طراحی

راهنماهای سطح ۱ و ۲ نشان دادند Manifold چه می‌کند و چگونه انتخاب می‌شود. این سند می‌پرسد: چقدر نشتی، چه نوع مقاومتی در خطوط و چه حدی از خطا و تنش برای یک طراحی قابل قبول است؟ پاسخ در مدل‌های ساده قابل حل با دست است، با فرض‌های صریح. هر عدد هندسی یا نشتی این سند فرض آموزشی است و جای داده‌های برگه فنی را نمی‌گیرد.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. مدل هیدرولیکی مسیر فرآیند تا سلول را با مقاومت و ظرفیت بسازید و ثابت زمانی پاسخ را برآورد کنید.
2. حد مجاز نشتی Block Valve و Equalize Valve را از بودجه خطا و مقاومت خطوط محاسبه کنید.
3. خطر فشار ناشی از مایع و گاز محبوس را با کران بالا ارزیابی کنید.
4. نیروی Stem، بار Packing و تنش جداره و اتصال را با روابط مهندسی بسنجید.
5. جدول FMEA و ماتریس راستی‌آزمایی طراحی را برای یک Manifold تکمیل کنید.
6. عدم قطعیت دبی را با روش RSS محاسبه و منبع غالب خطا را شناسایی کنید.

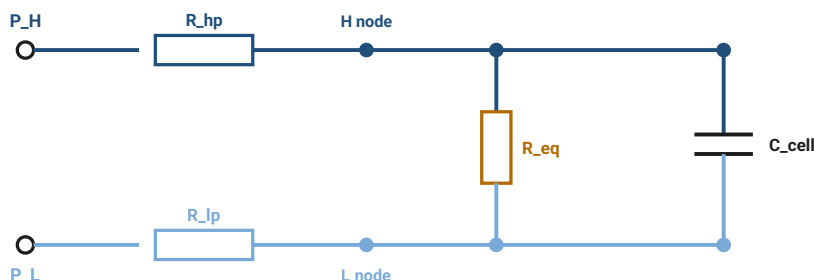
NOTE – این سند روش اجرایی کار روی خط تحت فشار نیست

مدل‌ها و وضعیت‌ها مفهومی‌اند. توالی عملیات روی خط زنده باید از روش اجرایی تأییدشده کارخانه و دستورالعمل سازنده گرفته شود. استانداردها فقط به عنوان مرجع آمده‌اند و ویرایش و دامنه کاربرد هر یک پیش از ارجاع رسمی باید راستی‌آزمایی شود.

زنجیره اندازه‌گیری از فرآیند تا سلول را می‌توان با یک مدل مقاومت-خازن (شکل ۱) توصیف کرد. هر Impulse Line و هر Block Valve یک مقاومت هیدرولیکی است؛ حجم جابه‌جاشده سلول و سیال تراکم‌پذیر محبوس، ظرفیت (Compliance) می‌سازند؛ و مسیر نشتی بسته Equalize مقاومتی بسیار بزرگ میان دو حفره است. این مدل بر دو فرض ساده تکیه دارد: جریان آرام در خطوط (رابطه Hagen–Poiseuille) و رفتار خطی در بازه کوچک اختلاف فشار.



LUMPED HYDRAULIC ANALOG



R_hp, R_lp: impulse line + Block Valve
R_eq: leak path of closed Equalize
C_cell: cell displacement compliance

شکل ۱ – زنجیره اندازه‌گیری و مدل مقاومت-خازن معادل آن

(1)

$$R = 128 \times \mu \times L / (\pi \times d^4)$$

Pa·s/m ³	R	مقاومت هیدرولیکی جریان آرام در خط
Pa·s	μ	گرانروی دینامیکی سیال
m	L, d	طول و قطر داخلی خط

DESIGN BASIS – مبنای طراحی این سند

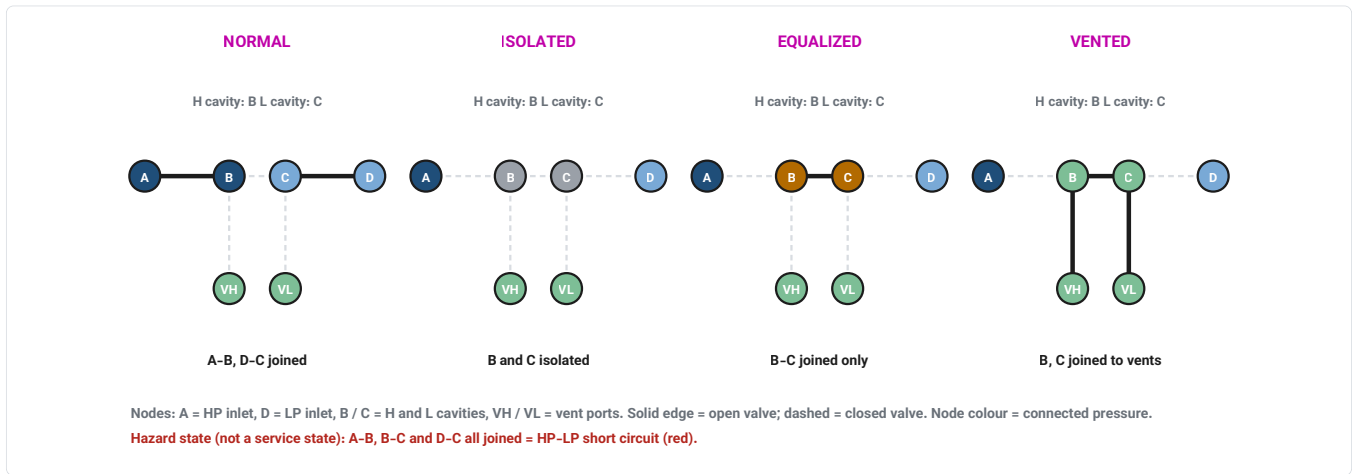
1. سرویس مرجع: آب و بخار اشباع؛ ترانسسمیتر اختلاف فشار با Manifold پنج‌شیره روی اریفیس.
2. اختلاف فشار کامل: 250 mbar (سه سطح دبی ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ درصد).
3. فشار ایستا: 20 bar(g) و طراحی 30 bar(g) در 60 °C (آب)؛ 13 bar(g) در 200 °C (بخار).
4. هر Impulse Line: قطر داخلی 6 mm، طول 3 m.
5. رتبه فشار-دما، همانند سند سطح ۲، فرض آموزشی است: 413 bar در 38 °C و 350 bar در 200 °C.

ASSUMPTIONS – فرض‌های مدل

1. جریان آرام و خطی در خطوط؛ نشستی با گذر لایه نازک یا شکاف مدل می‌شود.
مبنا: معادله Hagen–Poiseuille؛ اعتبار فقط برای Reynolds پایین.
2. جابه‌جایی حجم سلول در دامنه کامل برابر 0.1 cm³ است؛ مقدار واقعی DPT11 برابر TBD است.
مبنا: فرض آموزشی؛ باید از برگه فنی ترانسسمیتر جایگزین شود.
3. هندسه Seat و Packing، فرضی است و به‌عنوان مشخصه ACC55 ادعا نمی‌شود.
مبنا: مثال محاسباتی؛ هندسه واقعی TBD.
4. خواص آب و بخار با IAPWS-IF97 محاسبه شده‌اند؛ مقادیر مرجع مواد تقریبی‌اند.
مبنا: کتابخانه iapws؛ مقادیر ماده باید با گواهی ماده تأیید شوند.

2 مسیر جریان داخلی و نمودار وضعیت

برای تحلیل رفتار یک Manifold، هر حفره یک گره و هر شیر یک یال است. گره‌های A و D ورودی HP و LP، گره‌های B و C حفره‌های H و L سلول و گره‌های VH و VL درگاه‌های Vent‌اند. فشار هر گره، فشار مؤلفه همبندی‌اش است. شکل ۲ چهار وضعیت را نشان می‌دهد و تنها وضعیت خطرناک – اتصال هم‌زمان B–C، A–B، و D–C – اتصال کوتاه HP و LP است. همین نمودار می‌تواند برای هر طراحی خاص بازتولید شود و مبنای آزمون «شیر نادرست» را در FMEA می‌سازد.



شکل ۲ - نمودار همبندی گره‌ها در چهار وضعیت مفهومی 5-Valve Manifold

جدول ۱ - رابطه وضعیت شیرها و فشار حفره‌های سلول

وضعیت	حفره H (گره B)	حفره L (گره C)	DP دیده شده توسط سلول
عادی	فشار HP	فشار LP	P _L - P _H
جدا شده	فشار محبوس	فشار محبوس	تفاضل مقادیر محبوس
هم فشار	فشار مشترک	فشار مشترک	تقریباً صفر
Vent باز	جو	جو	تقریباً صفر
Block و دو Equalize باز	HP	HP	صفر؛ HP و LP اتصال کوتاه

3 فشار ایستا در برابر اختلاف فشار

خصوصیت بنیادین اندازه‌گیری با DP این است که کمیت مفید بسیار کوچک‌تر از فشار ایستای حامل آن است. در مثال 100 bar فشار ایستا در برابر 100 mbar اختلاف فشار، نسبت برابر هزار به یک است. دو پیامد مهندسی مستقیم دارد: نخست، هر مسیر نشتی که با فشار ایستا (و نه با DP) رانده شود می‌تواند جریانی هزار برابر یک مسیر رانده شده با DP بسازد؛ دوم، هر اثر ثانویه فشار ایستا روی سلول (Zero Shift) باید در Span کوچک به صورت درصد بزرگ‌تری از Span دیده شود. این دو پیامد، مبنای بخش‌های بعدی‌اند.

$$(2) \quad r = P_s / DP = 100 \text{ bar} / 0.1 \text{ bar} = 1000$$

4 مدل خطای نشتی Equalize

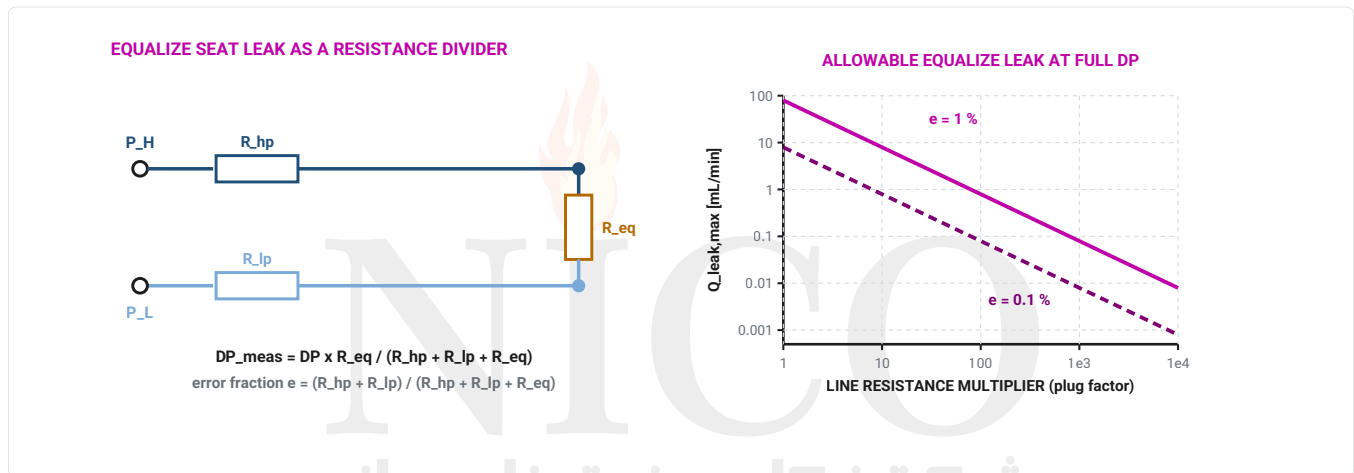
فرض کنید سلول به اندازه کافی صلب است و نشتی از Equalize بسته دو حفره H و L جریان می‌دهد. جریان ناشی از DP حقیقی باید از طریق خطوط HP و LP تأمین و بازگردانده شود؛ پس سه مقاومت سری‌اند و DP دیده شده توسط سلول سهمی از DP حقیقی است (رابطه ۳). برای خطای نسبی کمتر از e، مقاومت نشتی باید از حد پایین رابطه ۴ بزرگ‌تر باشد و معادلاً بیشینه جریان نشتی مجاز در DP کامل از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$(3) \quad DP_{\text{meas}} = DP \times R_{\text{eq}} / (R_{\text{hp}} + R_{\text{lp}} + R_{\text{eq}})$$

$$(4) \quad R_{\text{eq,min}} = (R_{\text{hp}} + R_{\text{lp}}) \times (1 - e) / e$$

$$(5) \quad Q_{\text{leak,max}} = e \times DP_{\text{fs}} / (R_{\text{hp}} + R_{\text{lp}})$$

Pa·s/m ³	مقاومت هیدرولیکی خط و Block Valve در سمت HP و LP	R_{hp}, R_{lp}
Pa·s/m ³	مقاومت مسیر نشتی Equalize بسته	R_{eq}
—	خطای نسبی مجاز در DP (بدون بُعد)	e
Pa	اختلاف فشار کامل	DP_{fs}
m ³ /s	بیشینه جریان نشتی مجاز	Q_{leak,max}



شکل ۳ - مدل تقسیم‌کننده مقاومتی نشتی Equalize و حد مجاز نشتی در برابر وضعیت خطوط

برای دو خط آب به قطر 6 mm و طول 3 m، هر خط مقاومتی برابر $9.43 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$ دارد، پس مجموع دو خط 1.89×10^8 است. با DP کامل 250 mbar (25000 Pa)، حد نشتی برای خطای 0.1% برابر 7.95 mL/min است؛ یعنی در خطوط باز، نشتی Seat باید بسیار بزرگ باشد تا اثر قابل‌اندازه‌گیری بگذارد. اگر مقاومت خطوط هزار برابر شود (گرفتگی جزئی)، همین حد به 0.0080 mL/min می‌رسد. نتیجه مهندسی این است که شدت اثر نشتی Equalize را وضعیت خطوط تعیین می‌کند، نه فقط کیفیت Seat.

جدول ۲ – بیشینه جریان نشتی Equalize مجاز در DP کامل (250 mbar)

خطای مجاز 0.1 %	خطای مجاز 1 %	ضریب مقاومت خطوط
7.95 mL/min	79.5 mL/min	(باز) ×1
0.0795 mL/min	0.795 mL/min	×100
0.0080 mL/min	0.0795 mL/min	×1000
0.0008 mL/min	0.0080 mL/min	×10000

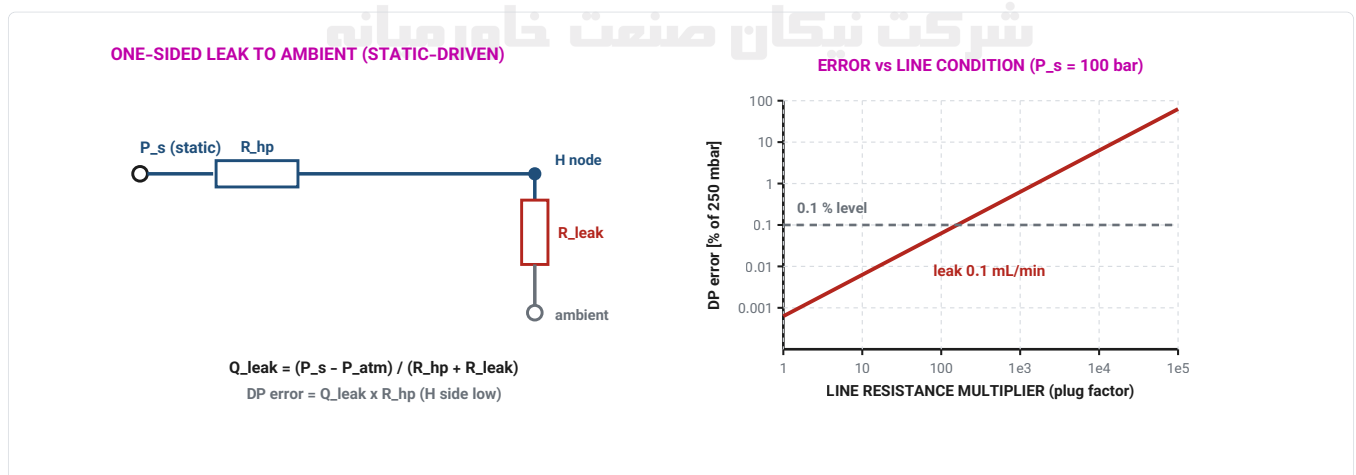
CAUTION – «Equalize بسته است» برابر «نشتی ندارد» نیست

این مدل نشان می‌دهد نشتی کوچک Seat در خطوط باز اثر کوچکی دارد، اما در خطوط تا حدی گرفته یا در سرویس با گرانی‌های بالا همان نشتی خطا یا کاهش DP قابل توجه می‌سازد. معیار پذیرش نشتی را باید در مشخصات خرید و آزمون پذیرش با داده‌های سازنده تعیین کرد.

5 نشتی Block Valve

اگر Seat یک Block Valve یا یک Vent، به محیط یا به مسیر کم‌فشار نشتی کند، مسیر نشتی دیگر با DP رانده نمی‌شود، بلکه با فشار ایستا رانده می‌شود. جریان نشتی از تقسیم فشار ایستا بر مجموع مقاومت‌ها به دست می‌آید و خطای DP برابر افت فشار همین جریان در خط سمت نشتی است (رابطه ۶). چون فشار ایستا هزار برابر DP است، آستانه حساسیت به گرفتگی نیز پایین‌تر می‌آید.

(6) $DP_{err} = - Q_{leak} \times R_{hp}$; $Q_{leak} = (P_s - P_{atm}) / (R_{hp} + R_{leak})$



شکل ۴ – نشتی یک‌طرفه به محیط: مدل مقاومتی و خطا در برابر ضریب گرفتگی

برای نشتی 0.1 mL/min روی 100 bar و خط آب 3 m × 6 mm، خطا 0.157 Pa یعنی 0.0006 % از 250 mbar است؛ اما اگر مقاومت خط هزار برابر باشد، همان نشتی 0.63 % خطا می‌سازد و در ضریب 10^5 به 63 % می‌رسد. افزون بر این، در سرویس‌هایی که یک Leg پر از مایع دارند، تخلیه تدریجی Leg ارتفاع ستون را تغییر می‌دهد و خطای سیستماتیک ایجاد می‌کند که از این مدل مقاومتی بزرگ‌تر است؛ این اثر در بخش عدم قطعیت دیده می‌شود.

6 افت فشار در Manifold و ضریب Kv

افت فشار گذرگاه Manifold فقط وقتی معنا دارد که جریان واقعی عبور کند: هنگام Flush، Purge یا Bleed، یا در جریان نشستی. در اندازه‌گیری ایستا، جریان در حد میکرولیتر در دقیقه است و افت فشار گذرگاه ناچیز است. رابطه ضریب شیر برای مایع، با ضریب Kv بر حسب m^3/h و افت فشار بر حسب bar، به صورت زیر است.

$$(7) \quad Q = Kv \times \sqrt{(\Delta P / SG)} ; \Delta P = SG \times (Q / Kv)^2$$

با فرض Kv برابر 0.1 (فرض آموزشی؛ مقدار واقعی TBD) و آب، جریان $6 \times 10^{-5} m^3/h$ (یک میلی‌لیتر در دقیقه) افتی برابر $3.6 \times 10^{-7} bar$ دارد؛ جریان $0.01 m^3/h$ افتی برابر 0.010 bar و جریان $0.1 m^3/h$ افتی برابر 1.0 bar. نتیجه: Kv برای ارزیابی زمان تخلیه یا Purge اهمیت دارد، نه برای دقت اندازه‌گیری ایستا.

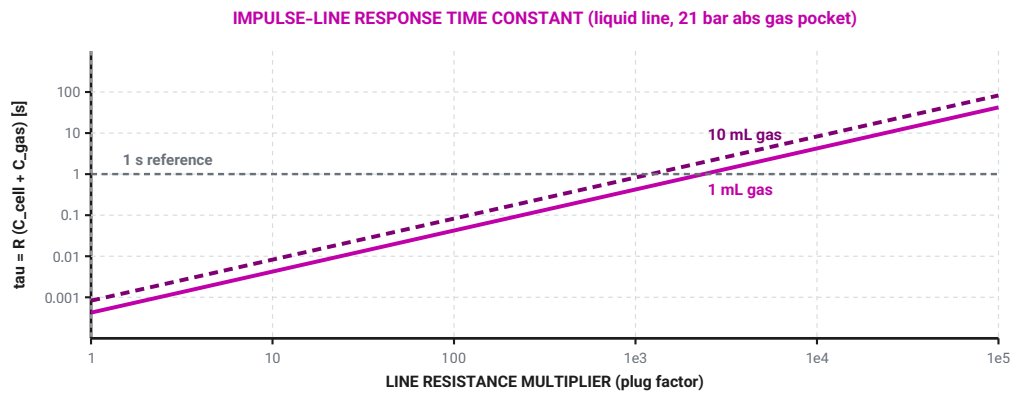
7 گذرای هم‌فشارسازی و پاسخ زمانی

هنگام تغییر وضعیت یا تغییر فرآیند، حفره‌ها باید حجم کوچکی سیال را جابه‌جا کنند و سرعت آن را مقاومت خط و ظرفیت (سلول و سیال تراکم‌پذیر محبوس) تعیین می‌کند. ثابت زمانی مدل مرتبه اول برابر حاصل ضرب مقاومت در ظرفیت است. ظرفیت سلول برابر جابه‌جایی حجم تقسیم بر Span، ظرفیت مایع تراکم‌پذیر برابر حجم در تراکم‌پذیری، و ظرفیت گاز محبوس برابر حجم تقسیم بر فشار مطلق است.

$$(8) \quad \tau = R \times (C_{cell} + C_{gas}) ; C_{cell} = dV / DP_{fs} ; C_{gas} = V_g / P_{abs} ; C_{liq} = V \times \kappa$$

s	ثابت زمانی پاسخ خط	tau
m^3/Pa	ظرفیت جابه‌جایی سلول	C_{cell}
m^3/Pa	ظرفیت گاز محبوس	C_{gas}
1/Pa	تراکم‌پذیری همدمای مایع	kappa

با C_{cell} برابر $4 \times 10^{-12} m^3/Pa$ ، گذرگاه Equalize به قطر 3 mm و طول 20 mm ثابت زمانی $2.0 \times 10^{-5} s$ دارد؛ یعنی هم‌فشارسازی در یک سیستم تمیز عملاً آبی است. اما یک حباب گاز 1 mL در فشار 21 bar(a) در خط آب ثابت زمانی را به $4.2 \times 10^{-4} s$ در حالت باز می‌رساند، و با ضریب گرفتگی 10^3 به 0.42 s و با ضریب 10^5 به 42 s (شکل ۵). پس پاسخ کند معمولاً نشانه گرفتگی یا حباب است، نه مشکل Manifold.



شکل ۵ - ثابت زمانی پاسخ خط آب در برابر ضریب گرفتگی برای دو حجم گاز محبوس

8 انبساط حرارتی مایع محبوس

اگر مایع در حجمی میان دو شیر بسته محبوس شود و دمایش بالا برود، فشار آن از انبساط حرارتی بالا می‌رود، چون حجم نمی‌تواند آزادانه افزایش یابد. در مدل «ظرف صلب» افزایش دما ΔT ، با ضریب انبساط حجمی β و تراکم‌پذیری همدمای κ ، بیشینه نظری شیب فشار را می‌دهد. واقعیت همیشه کمتر است، چون بدنه کمی تغییر شکل می‌دهد و آب‌بندی‌ها نشستی جزئی دارند؛ پس این عدد «کران بالا» است، نه پیش‌بینی.

(9) $dP / dT = \beta / \kappa ; \Delta P_{\max} = (\beta / \kappa) \times \Delta T$

1/K	β	ضریب انبساط حجمی مایع
1/Pa	κ	تراکم‌پذیری همدمای مایع
K	ΔT	افزایش دمای مایع محبوس
Pa	$\Delta P_{\max}$	کران بالای افزایش فشار در ظرف صلب

برای آب در 20°C ، مقادیرها با خواص IAPWS-IF97 (تفاضل محدود چگالی) محاسبه شده است: β برابر $2.092 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ و κ برابر $4.578 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$. در نتیجه:

$$dP / dT = 2.092 \times 10^{-4} / 4.578 \times 10^{-10} = 4.57 \times 10^5 \text{ Pa/K} = 4.57 \text{ bar/K}$$

یعنی افزایش 5 K تا کران 23 bar، افزایش 10 K تا 46 bar و افزایش 30 K تا 137 bar فشار اضافه می‌سازد (شکل ۶، نمودار چپ). مقایسه با رتبه 413 bar نشان می‌دهد که حجم محبوس آب با چند ده درجه گرمایش می‌تواند فشار را به مرز رتبه یا بالاتر برساند. به همین دلیل، حجم‌هایی که به صورت طراحی یا اشتباه عملیاتی ممکن است بین دو شیر بسته محبوس شوند، باید در مرحله طراحی و HAZOP به عنوان «حجم قابل‌انزوا» شناسایی و برای آنها تصمیم طراحی (مثل مسیر تخفیف حرارتی یا الزام ثبت وضعیت شیر) گرفته شود. این سند روش عملیاتی ارائه نمی‌دهد.

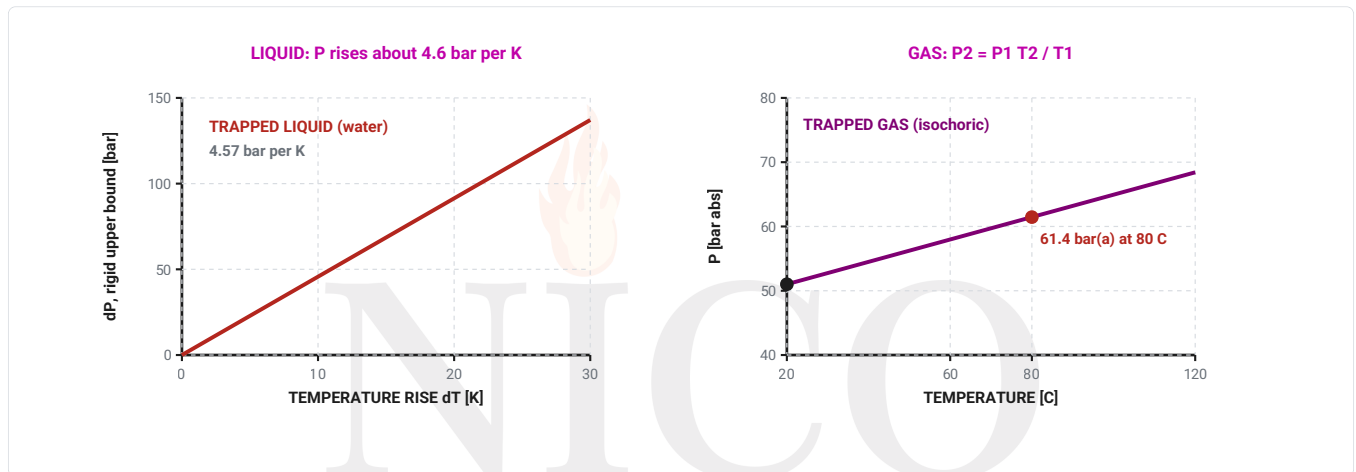
9 فشرده‌سازی و انبساط گاز محبوس

گاز محبوس در حجم ثابت از رابطه همحجم پیروی می‌کند. در دماهای مطلق و فشار مطلق، فشار با دمای مطلق متناسب است. برای گاز در 51.01 bar(a) و 20 °C (یعنی 293.15 K) که تا 80 °C (353.15 K) گرم شود:

$$(10) \quad P_2 = P_1 \times T_2 / T_1 = 51.01 \times 353.15 / 293.15 = 61.45 \text{ bar(a)} = 60.44 \text{ bar(g)}$$

bar(a)	P1, P2	فشار مطلق اولیه و نهایی
K	T1, T2	دمای مطلق اولیه و نهایی

افزایش فشار برابر 20.5 % است، یعنی بسیار کوچک‌تر از مایع محبوس (شکل ۶، نمودار راست). نتیجه طراحی: خطر فشار ناشی از گرمایش در گاز محدود به نسبت دماهای مطلق است، ولی گاز محبوس در Remote Mount یا حفرة سلول اثر دیگری دارد: تغییر دما، قرائت DP را از راه اختلاف دمای دو خط تغییر می‌دهد، که در بخش خطای اندازه‌گیری شمرده می‌شود.



شکل ۶ – کران بالای افزایش فشار مایع محبوس (آب) و فشار گاز محبوس در حجم ثابت بر حسب دما

10 مکانیک Stem و Seat: رابطه $F = P \times A$

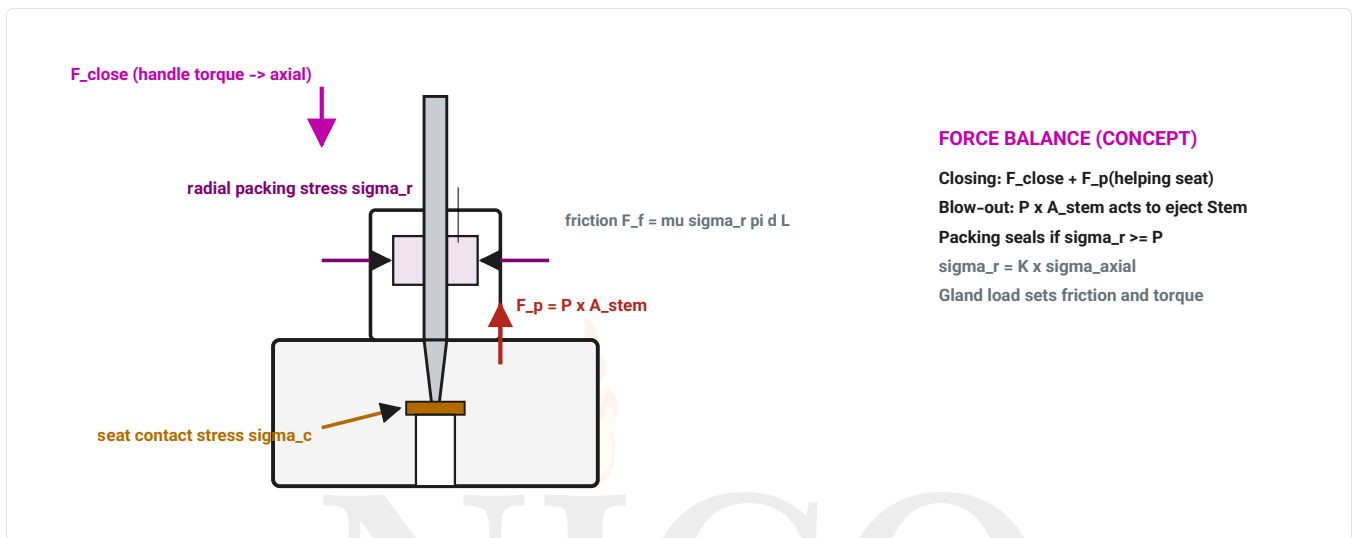
فشار فرآیند روی سطح مقطع Stem نیرویی محوری ایجاد می‌کند که می‌خواهد Stem را از بدنه خارج کند (Blow-out). این نیرو از حاصل ضرب فشار در سطح مقطع Stem به دست می‌آید و به جز اصطکاک Packing و نیروی بسته‌کننده شیر، عاملی اساسی در طراحی مهار محوری Stem (Bonnet، رزوه و Retainer) است.

$$(11) \quad F_p = P \times A_{\text{stem}} ; A_{\text{stem}} = \pi \times d^2 / 4$$

N	F_p	نیروی محوری فشار روی Stem
Pa	P	فشار فرآیند (نسبی)
m ²	A_stem	سطح مقطع Stem
m	d	قطر Stem

برای Stem به قطر 6.35 mm (فرض آموزشی؛ قطر واقعی TBD) سطح مقطع 31.67 mm^2 است. در فشار 100 bar نیرو برابر $10 \text{ MPa} \times 31.67 \text{ mm}^2 = 317 \text{ N}$ و در 400 bar برابر 1267 N است (شکل ۷). این نیرو باید با مهار مکانیکی بدنه تحمل شود، نه با اصطکاک.

در طرف Seat، بسته شدن آببند محصول نیروی بسته کننده و سطح تماس مؤثر است. حلقه تماس به قطر 3 mm و پهنای 0.2 mm سطحی برابر $\pi \times 3 \times 0.2 = 1.885 \text{ mm}^2$ دارد. با نیروی بسته کننده 100 N تنش تماس ظاهری برابر $100 / 1.885 = 53.1 \text{ MPa}$ است. مقایسه با حد تسلیم مرجع فولاد 316 آنیل شده، حدود 205 MPa (REFERENCE)، نه داده (NICO)، نسبت 0.26 می دهد؛ یعنی تماس در این مثال در محدوده الاستیک است. افزایش نیروی بسته کننده تا تسلیم موضعی ممکن است آببندی را بهتر کند، اما سایش و آسیب Seat را زیاد می کند.



شکل ۷ – توازن نیروها در Stem: نیروی فشار محوری، تنش شعاعی Packing، اصطکاک و تنش تماس Seat

11 مهندسی Packing

Packing (آببند Stem) با تنش شعاعی روی Stem آببندی می کند. تنش شعاعی از تنش محوری Gland با ضریب انتقال K ساخته می شود و باید دست کم برابر فشار فرآیند باشد تا نشی خارجی رخ ندهد. به همین دلیل، اصطکاک Stem نیز با فشار بالا می رود و گشتاور عملیاتی را زیاد می کند.

$$\sigma_r = K \times \sigma_a \geq P ; F_{\text{gland}} = \sigma_a \times A_{\text{pack}} ; F_f = \mu_p \times \sigma_r \times \pi d L \quad (12)$$

Pa	تنش شعاعی Packing روی Stem	σ_r
Pa	تنش محوری Gland روی Packing	σ_a
-	ضریب انتقال تنش محوری به شعاعی (فرض)	K
-	ضریب اصطکاک Packing و Stem (فرض)	μ_p
m^2	سطح حلقوی Packing	A_{pack}
m	قطر Stem و طول Packing	d, L

با فرض $K = 0.5$ ، ضریب اصطکاک 0.1، سوراخ Packing به قطر 9.5 mm و طول 6 mm (همگی فرض آموزشی) برای فشار 100 bar تنش شعاعی لازم 10 MPa و تنش محوری لازم $20 \text{ MPa} = 10 / 0.5$ است. سطح حلقوی برابر 39.2 mm^2 و نیروی Gland برابر $20 \text{ MPa} \times 39.2 \text{ mm}^2 = 784 \text{ N}$ می‌شود. اصطکاک Stem نیز $0.1 \times 10 \text{ MPa} \times \pi \times 6.35 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} = 120 \text{ N}$ (317 N) Blow-out است؛ پس سفت‌کردن بیش از حد Gland نه تنها Packing را زود فرسوده می‌کند، بلکه Stem را سخت‌تر می‌چرخاند و به آسیب می‌رساند. این مقادیر فرض آموزشی‌اند و داده‌های واقعی Packing، دما و جنس را باید سازنده بدهد. آزمون نشتی خارجی از مسیر استاندارد (مثل ISO 15848-1) برای شیرهای فرآیندی مرجع است.

12 مرز فشار و بررسی رتبه – Pressure Boundary

مرز فشار از بدنه، Bonnet، Stem، Packing، اتصال‌ها و پایین‌ترین رتبه اجزای متصل تشکیل می‌شود. دو بررسی مکمل لازم است: رتبه فشار-دما از برگه فنی، و تنش جداره در محل بحرانی. برای جداره ضخیم استوانه‌ای، تنش محیطی در سطح داخلی سوراخ از رابطه Lamé به دست می‌آید.

$$\sigma_{\theta,i} = P \times (r_o^2 + r_i^2) / (r_o^2 - r_i^2) \quad (13)$$

Pa	تنش محیطی در سطح داخلی سوراخ	$\sigma_{\theta,i}$
Pa	فشار داخلی	P
m	شعاع داخلی و خارجی جداره	r_i, r_o

برای سوراخ با شعاع داخلی 3 mm و خارجی 12 mm، ضریب $1.133 = (144 - 9) / (144 + 9)$ است. تنش محیطی در 100 bar برابر 11.3 MPa و در 413 bar برابر 46.8 MPa می‌شود؛ نسبت به حد تسلیم مرجع 205 MPa این دو مقدار نسبت‌های 0.055 و 0.23 دارند. توجه: این بررسی فقط جداره ساده را می‌سنجد؛ تمرکز تنش در محل تقاطع حفره‌ها، رزوه و گوشه‌ها، رتبه‌بندی رسمی شیر (ASME B16.34 یا ضوابط سازنده) و آزمون هیدرواستاتیک را جایگزین نمی‌کند.

CAUTION – رتبه مرجع در مثال‌ها داده NICO نیست

مقادیر رتبه فشار-دما این سند (413 bar در 38 °C و 350 bar در 200 °C) فرض آموزشی با وضعیت TBD هستند. رتبه ACC53، ACC54، ACC55 و ACC56 فقط از برگه فنی تأییدشده همان مدل برداشته می‌شود.

13 مهندسی مواد

انتخاب جنس برای Manifold از سه پرسش می‌گذرد: سازگاری با سیال و محیط خارجی، رفتار مکانیکی در دما، و جفت‌شدن اجزای متحرک. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی (SS316 یا SS316L) پایه رایج است، ولی در محیط کلرایدار دما بالا، آلیاژهای دوفازی (Duplex) یا نیکلی (Monel، Hastelloy) باید بررسی شوند. هر جنس باید بر پایه داده سازنده و استاندارد مواد پروژه تأیید شود، نه از روی نام.

مسئله مکانیکی مهم Gallling است: جفت‌های هم‌جنس آستنیتی در لغزش تحت بار تماس می‌توانند به هم بچسبند و سطح را بکنند. این پدیده روی رزوه Stem، Packing و Seat ظاهر می‌شود و نشتی داخلی یا گیرکردن Stem می‌آورد. راهکارهای طراحی عبارتند از اختلاف سختی جفت، پوشش یا عملیات سطحی، و روان‌کار سازگار با سیال؛ انتخاب آنها با سازنده است و در ماتریس راستی‌آزمایی ثبت می‌شود.

14 سرویس ترش – Sour Service

در حضور H₂S مرطوب، فولادها و آلیاژها دچار ترک‌خوردگی تنش سولفیدی و سایر مکانیزم‌ها می‌شوند. سری ISO 15156 ضوابط مواد برای این محیط را تعیین می‌کند؛ شماره Part، ویرایش، حدود فشار جزئی و دمای مجاز مواد در این سند عمداً ذکر نمی‌شود و باید از نسخه معتبر استاندارد استخراج شود.

آنچه مهندس ورودی ارزیابی می‌کند، فشار جزئی H₂S است که از کسر مولی و فشار مطلق به دست می‌آید. برای مثال، گاز با 2 % مولی H₂S در 20 bar(g) (یعنی 21.013 bar(a)) فشار جزئی 0.42 bar(a) = 21.013 × 0.02 دارد. این عدد «ورودی ارزیابی» است، نه حکم پذیرش یا رد؛ حکم فقط با استاندارد، pH، کلراید، دما و سختی مواد صادر می‌شود. گواهی مواد و کنترل سختی باید در مدارک شیر قابل‌ردیابی باشد.

15 هندسه Seat و نوک – Tip

آب‌بندی داخلی Manifold به هندسه تماس بستگی دارد. تماس فلز به فلز با سطح باریک تنش تماس بالا و آب‌بندی ایستا می‌دهد، ولی ذرات و سایش آن را از بین می‌برند. Seat نرم (پلیمری) نشتی داخلی را به شدت کم می‌کند، ولی دما، فشار، سازگاری شیمیایی، خزش و مقاومت در برابر آتش را محدود می‌کند. جدول زیر مقایسه مهندسی کیفی است و عدد نشتی ندارد، چون مقدار نشتی هر محصول فقط از آزمون و برگه فنی همان محصول می‌آید.

جدول ۳ – مقایسه مهندسی هندسه Seat و نوک

هندسه	مزیت	محدودیت	اثر بر نشتی Equalize
نوک مخروطی فلزی	تنش تماس بالا، مقاوم در دما	حساس به ذره و Gallling	بسته به پرداخت سطح
نوک کروی (Ball)	خودتنظیم نسبی	سطح تماس دایره‌ای باریک	مناسب نیروی بسته‌کننده کم
Seat نرم	نشتی داخلی کم	دما، فشار، سازگاری شیمیایی محدود	مطلوب در بار پایین
Seat فلزی Lapped	مقاومت در دما و فشار بالا	هزینه، حساسیت به آلودگی	بسته به کلاس آب‌بندی

16 تنش اتصال و بار مکانیکی ترانسسمیتر

در آرایش Direct Mount، وزن ترانسسمیتر و ارتعاش روی اتصال Manifold-سلول لنگر خمشی ایجاد می‌کند. برای جرم 3 kg (فرض آموزشی؛ جرم TBD DPT11)، شتاب ارتعاشی 3 g و بازوی 0.1 m، لنگر برابر است با:

$$(14) \quad M = m \times a \times h = 3 \times (3 \times 9.80665) \times 0.1 = 8.83 \text{ N}\cdot\text{m}; \sigma = M / Z$$

$$Z = \pi \times (D^4 - d^4) / (32 \times D)$$

N.m	M	لنگر خمشی روی گردن اتصال
kg	m	جرم ترانسسمیتر (فرض)
m/s ²	a	شتاب ارتعاشی
m	h	بازوی لنگر
m ³	Z	مدول مقطع گردن
m	D, d	قطر خارجی و داخلی گردن

برای گردن اتصال با قطر خارجی 15 mm و داخلی 6 mm، مدول مقطع $3.229 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ است و تنش خمشی $8.83 / 3.229 \times 10^{-7} = 27.3 \text{ MPa}$ می‌شود. این مقدار نسبت به حد تسلیم مرجع 205 MPa نسبت 0.13 دارد، اما برای خستگی در ارتعاش مداوم و بار مرکب باید ضریب ایمنی و ضریب تمرکز تنش (رزوه، گوشه) نیز اعمال شود. اگر این ضریب قابل قبول نباشد، Remote Mount یا پایه، راهکار طراحی است.

17 گرادیان دما و انتقال حرارت

در سرویس بخار و دمای بالا، حرارت از مسیر فلزی به ترانسسمیتر می‌رسد. رسانش یک‌بعدی با قانون فوریه برآورد می‌شود. برای فولاد 316 (ضریب رسانش مرجع $16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)، مقطع 1 cm^2 ، طول 0.15 m و اختلاف دمای 159 K (از 200°C تا 41°C):

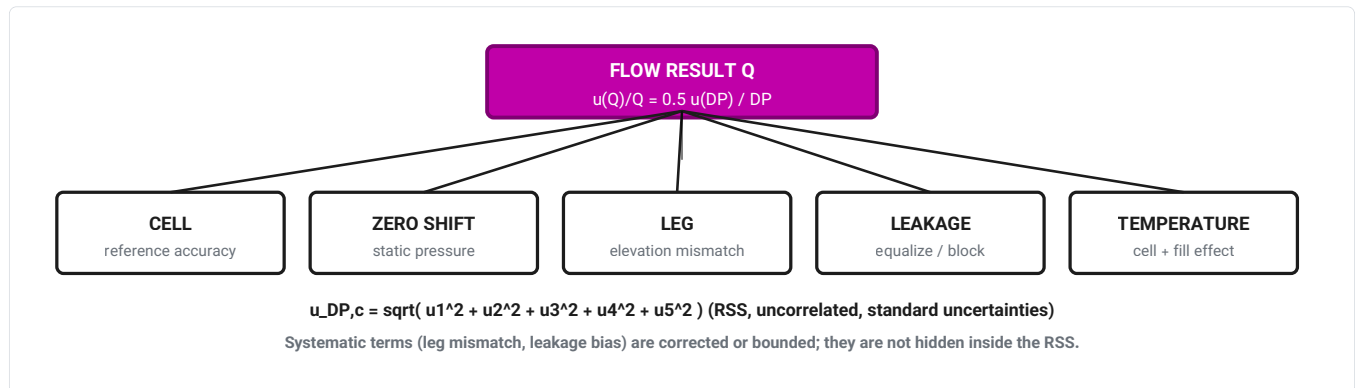
$$(15) \quad Q = k \times A \times \Delta T / L = 16 \times 1 \times 10^{-4} \times 159 / 0.15 = 1.70 \text{ W}$$

W	Q	توان حرارتی رسانش
W/(m.K)	k	ضریب رسانش حرارتی
m ²	A	سطح مقطع مسیر رسانش
K	ΔT	اختلاف دمای دو سر
m	L	طول مسیر

اگر بدنه مقید باشد و بخواهد انبساط حرارتی کند، کران بالای تنش حرارتی از رابطه $E \times \alpha \times \Delta T / (1 - \nu)$ به دست می‌آید. با مقادیر مرجع $E = 193 \text{ GPa}$ ، $\alpha = 16 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ ، $\nu = 0.3$ و $\Delta T = 100 \text{ K}$ این کران 441 MPa است. این عدد فقط کران نظری مقیدبودن کامل است و از تنش واقعی بسیار بیشتر است؛ نکته طراحی آن است که اتصال‌ها باید اجازه انبساط بدهند و گرادیان دمایی حاصل از Impulse Line بلند یا بدون عایق‌کاری بررسی شود.

18 درخت خطای اندازه‌گیری

خروجی دبی اریفیس از ریشهٔ اختلاف فشار ساخته می‌شود، پس هر خطای کوچک در DP در دبی پایین بزرگ می‌شود. درخت خطا منابع مستقل را از سلول تا نتیجهٔ دبی نشان می‌دهد (شکل ۸). پنج منبع برای مورد بخار در نظر گرفته شده است: دقت مرجع سلول، جابه‌جایی صفر ناشی از فشار ایستا، اختلاف ارتفاع Leg‌ها، نشتی Equalize و Block، و اثر دما. همهٔ مقدارهای ورودی فرض‌اند و به مشخصات تأییدشدهٔ DPT11 و ACC55 وابسته‌اند.



شکل ۸ – درخت خطا: ترکیب RSS منابع مستقل DP و انتشار آن به خطای دبی

جدول ۴ – منابع خطای DP در مورد بخار (250 mbar مقیاس کامل)

منبع	مقدار (mbar)	مبنا	وضعیت
دقت مرجع سلول	0.188	فرض 0.075 % مقیاس؛ عدد TBD DPT11	فرض
جابه‌جایی صفر ایستا	0.100	فرض آموزشی	فرض
اختلاف ارتفاع Leg‌ها	1.73	20 mm × چگالی مایع اشباع $g \times 882.6 \text{ kg/m}^3$	محاسبه
نشتی Equalize و Block	0.050	معادل 0.02 % مقیاس	هدف طراحی
اثر دما	0.200	فرض آموزشی	فرض

19 عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی

ترکیب عدم قطعیت‌ها طبق راهنمای GUM (JCGM 100:2008) برای منابع مستقل به صورت جمع مربعی (RSS) انجام می‌شود. منابع سیستماتیک (اختلاف ارتفاع Leg، سوگیری نشتی) باید اصلاح یا کران‌گذاری شوند و نباید در RSS پنهان بمانند. در این مثال برای نشان دادن حساسیت، آنها به عنوان عدم قطعیت استاندارد وارد شده‌اند.

$$(16) \quad u_{DP,c} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2}; \quad u(Q)/Q = 0.5 \times u_{DP,c} / DP$$

mbar	عدم قطعیت استاندارد منابع مستقل DP	u1...u5
mbar	عدم قطعیت استاندارد ترکیبی DP	u_DP,c
-	عدم قطعیت نسبی دبی	u(Q)/Q
mbar	DP در نقطه کار	DP

$$u_{DP,c} = \sqrt{(0.188^2 + 0.100^2 + 1.73^2 + 0.050^2 + 0.200^2)} = \sqrt{3.081} = 1.755 \text{ mbar} = 0.70 \% \text{ of span}$$

سهم اختلاف ارتفاع Leg ها حدود 97 % واریانس کل است ($1.73^2 / 3.081 = 0.971$). اگر Leg ها برابر باشند، RSS به 0.296 mbar می‌رسد؛ اگر اختلاف ارتفاع تا 2 mm کنترل شود (یعنی 0.173 mbar)، RSS برابر 0.343 mbar می‌شود.

جدول ۵ – عدم قطعیت نسبی دبی، $u(Q)/Q$ ($k=1$) و عدم قطعیت گسترده ($k=2$)

دبی	DP (mbar)	مبنای Leg: 20 mm	Leg برابر	Leg کنترل شده 2 mm
100 %	250.0	0.35 % ; U = 0.70 %	0.059 % ; U = 0.12 %	0.069 % ; U = 0.14 %
50 %	62.5	1.40 % ; U = 2.81 %	0.237 % ; U = 0.47 %	0.275 % ; U = 0.55 %
25 %	15.6	5.62 % ; U = 11.2 %	0.948 % ; U = 1.90 %	1.10 % ; U = 2.20 %

نتیجه حساسیت: در دبی ۲۵ درصد، کنترل تیرانس ارتفاع Leg ها خطای دبی را از 5.62 % به 1.10 % کاهش می‌دهد؛ یعنی مؤثرترین اقدام کاهش خطا در این مورد، نه ارتقای دقت سلول، که حدود 0.188 mbar را می‌سازد، بلکه کنترل نصب است. این مقادیر فقط با ورودی‌های فرضی معتبر هستند و ارزیابی نهایی را داده‌های تأیید شده می‌سازند.

20 جدول FMEA: حالت‌های خرابی و اثر آنها

FMEA زیر روی Manifold بررسی می‌شود تا مشخص شود هر حالت خرابی کدام ستون را هدف می‌گیرد: قرائت (Measurement Effect)، تمامیت فشار (Integrity Effect) یا هر دو. تشخیص‌ها و اقدام‌های اصلاحی در سطح طراحی و بازرسی‌اند و روش اجرایی روی خط تحت فشار نیستند.

جدول ۶ – FMEA مختصر برای Instrument Manifold

Failure Mode	مکانیزم	اثر بر اندازه‌گیری	اثر بر تمامیت	تشخیص	اقدام اصلاحی
نشستی Equalize	سایش یا ذره روی Seat، نیروی بسته‌کننده ناکافی	DP به سمت صفر کوچک می‌شود	اتصال کوتاه HP و LP داخلی	روند DP در بار پایین، بررسی صفر	کلاس نشستی، فیلتراسیون، تعویض طبق سازنده
نشستی Block	Seat آسیب‌دیده، ذره	خطای یک‌طرفه یا رانش فشار محبوس	ایزولاسیون ناقص	رفتار Vent / Test در روش مصوب سایت	تعویض، کلاس آب‌بندی مناسب

Failure Mode	مکانیزم	اثر بر اندازه‌گیری	اثر بر تمامیت	تشخیص	اقدام اصلاحی
نشئی Stem	رزوه یا آب‌بند Bonnet	معمولاً ناچیز	از دست رفتن مهر	بازرسی، نشت‌یاب	آب‌بند سازگار، کنترل گشتاور
خرابی Packing	سایش، سیکل حرارتی، Gland بیش‌ازحد سفت	ناچیز	نشئی خارجی	بازرسی دوره‌ای، Fugitive Emission	Packing سازگار با دما، تعویض
گرفتگی (Plugging)	ذره، یخ‌زدگی، پلیمریزاسیون	پاسخ کند، خطای یک‌طرفه	ندارد	آزمون پاسخ، نویز سیگنال	Purge، ردیابی حرارتی، قطر بزرگ‌تر
وضعیت اشتباه شیر	Equalize باز یا Block بسته جا مانده	DP صفر یا ثابت	احتمال حجم محبوس	Valve Status Sheet، DP غیرمنتظره	قفل و برچسب، مدرک وضعیت
معکوس HP / LP	اتصال اشتباه	علامت DP وارونه	ندارد	علامت DP در جریان واقعی	برچسب‌گذاری، راستی‌آزمایی شماتیک
مایع محبوس	گرمایش حجم بین دو شیر بسته	انحراف صفر، اضافه‌فشار سلول	اضافه‌فشار بدنه	افزایش ناگهانی فشار	شناسایی حجم قابل‌انزوا در HAZOP
خوردگی	کلراید، H ₂ S، محیط خارجی	نشئی تدریجی	کاهش ضخامت، ترک	بازرسی، NDT	ارتقای جنس طبق استاندارد
Galling	لغزش جفت هم‌جنس تحت بار	گیرکردن Stem یا نشئی Seat	ناتوانی در ایزوله‌کردن	افزایش گشتاور	اختلاف سختی، پوشش، روان‌کار
Seat آسیب‌دیده	فرسایش، ذره، اعمال گشتاور زیاد	نشئی Equalize یا Vent	دور زدن ایزولاسیون	مانند نشئی Equalize	تعویض Manifold یا قطعه
نشئی اتصال	خزش گسکت، رزوه معیوب، ارتعاش	خطای یک‌طرفه	نشئی خارجی	نشت‌یاب، بازرسی	مشخصات مونتاژ، Remote Mount

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

دبی بخار در بار پایین کمتر از ترازنامه جرمی

FIELD SCENARIO

«در بار کامل دبی با ترازنامه جرمی می‌خواند، اما در ۲۵ درصد بار حدود چند درصد اختلاف دارد؛ ترانس‌میتور در آزمایشگاه سالم بود.»

تحلیل مهندسی: دو علت محتمل با الگوی متفاوت جدا می‌شوند. نشئی DP Equalize را به نسبت ثابت کوچک می‌کند، پس خطای نسبی دبی در همه بارها تقریباً یکسان است. اختلاف ارتفاع Legها یک انحراف ثابت بر حسب mbar است، پس خطای نسبی با کاهش DP مانند عکس DP بزرگ می‌شود (جدول ۵). اگر خطای دبی با کاهش بار شدیداً بالا برود، علت محتمل‌تر Leg است. این تفکیک روی داده‌های روند انجام می‌شود، نه دستکاری شیر روی خط.

21 ماتریس راستی‌آزمایی طراحی – Design Verification Matrix

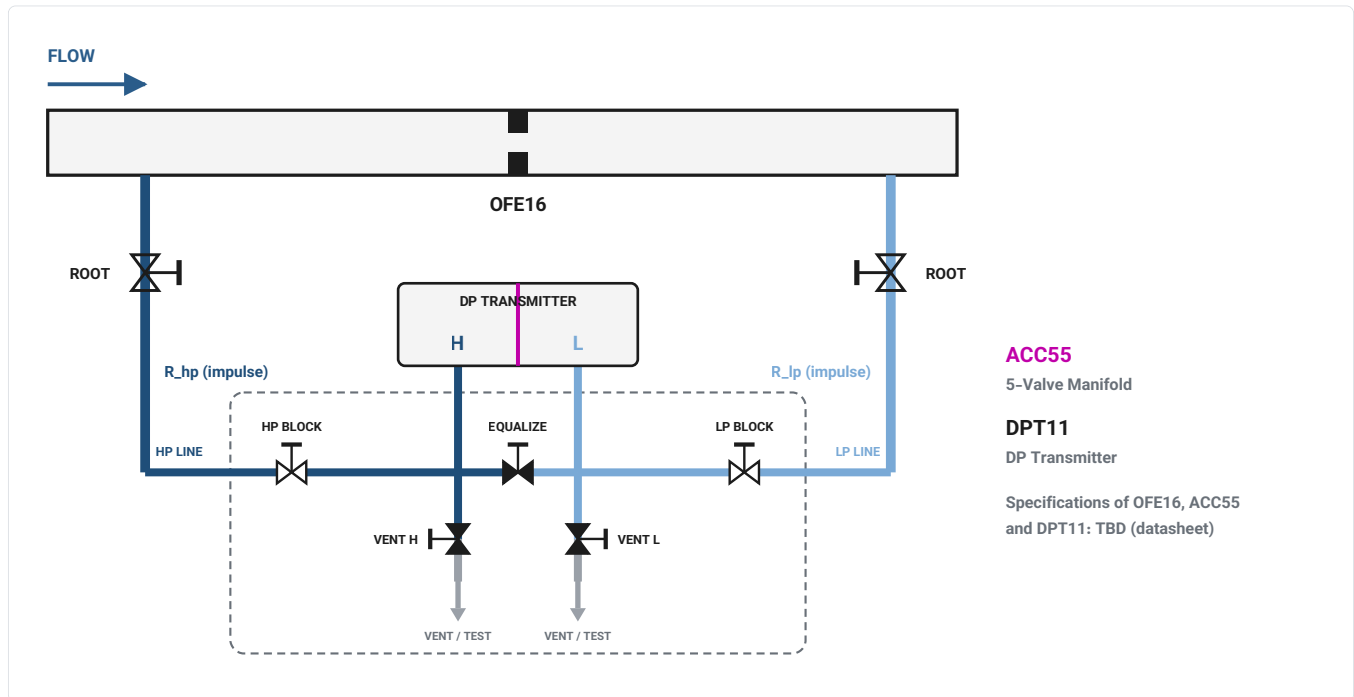
ماتریس زیر Design Basis را به انتخاب و روش راستی‌آزمایی وصل می‌کند. وضعیت VERIFIED یعنی با تحلیل همین سند یا مدرک موجود تأیید شده است؛ REQUIRES VERIFICATION یعنی ابتدا باید با برگه فنی یا آزمون تأیید شود؛ و TBD یعنی داده هنوز تعیین نشده است. هیچ مشخصه محصول NICO در ستون «انتخاب» ادعا نشده است.

جدول ۷ – ماتریس راستی‌آزمایی طراحی برای مورد بخار

نیازمندی	مبنای طراحی	انتخاب	روش راستی‌آزمایی	وضعیت
رتبه فشار-دما	200 °C در 13 bar(g)	TBD : ACC55	منحنی رتبه در برگه فنی و ASME B16.34 یا ضوابط سازنده	REQUIRES VERIFICATION
تعداد شیر و Vent	دو Block، یک Equalize، دو Vent / Test	5-Valve Manifold	تحلیل اتصال وضعیت‌ها (جدول ۱) و شماتیک سازنده	VERIFIED (کارکردی)
اتصال به ترانس‌میتور	ابعاد اتصال طبق IEC 61518	TBD	نقشه ابعادی و Mating	REQUIRES VERIFICATION
نشستی داخلی Equalize	حداکثر 1.59 mL/min (خط تمیز)	TBD : کلاس Seat	گزارش آزمون کارخانه	TBD
جنس و گواهی	پایه 316؛ سرویس بخار	TBD	گواهی مواد (MTC)، مشخصات مواد پروژه	REQUIRES VERIFICATION
نشستی خارجی و Packing	الزام پروژه	TBD	گزارش آزمون نوعی (مثل ISO 15848-1) در صورت الزام	TBD
مهار محوری Stem	317 N در 100 bar (فرض)	TBD	گزارش طراحی سازنده	REQUIRES VERIFICATION
حجم‌های قابل‌انزوا	شناسایی در HAZOP	بدون انتخاب	سند HAZOP و Valve Status Sheet	REQUIRES VERIFICATION
تولرانس ارتفاع Leg	حداکثر 2 mm	مشخصات نصب	اندازه‌گیری As-Built	TBD
عدم قطعیت دبی	1.10 % در دبی ۲۵ % (k=1)	محاسبه	بودجه خطا طبق GUM	VERIFIED (با ورودی فرضی)

22 مطالعه موردی: OFE16، Impulse Line، ACC55 و DPT11

اندازه‌گیری دبی بخار اشباع با اریفیس OFE16 (آرایش اندازه‌گیری DP)، دو Impulse Line، ACC55 5-Valve Manifold و DPT11 (شکل ۹). فشار کارکرد 10 bar(g) (برابر 11.013 bar(a) با دمای اشباع 184.1 °C)، طراحی 13 bar(g) در 200 °C، DP مقیاس کامل 250 mbar، Impulse Line فرضی به قطر 6 mm و طول 3 m. مشخصات OFE16، ACC55 و DPT11 در این سند TBD هستند.



شکل ۹ - شماتیک مورد مطالعه: OFE16، Root Valve، Impulse Line، Manifold پنج‌شیره و ترانسسمیتر DP

رتبه و نسبت فشار ایستا به DP: نسبت فشار طراحی به رتبه فرضی در دمای طراحی $0.037 = 13 / 350$ است. فشار ایستا 13 bar نسبت به DP برابر $52 = 13000 / 250$ است؛ جابه‌جایی صفر ناشی از فشار ایستا و اثر آن روی سلول باید از برگه فنی DPT11 گرفته شود.

حد مجاز نشتی Equalize برای بودجه خطای 0.05 mbar

صورت مسئله: بودجه خطای نشتی 0.05 mbar از 250 mbar مقیاس کامل؛ Impulse Line فرضی به قطر 6 mm و طول 3 m برای هر طرف. بیشینه جریان نشتی مجاز Equalize خواسته شده است.

فرض: جریان آرام، خط تمیز، مقاومت هر خط $9.431 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ از رابطه Hagen–Poiseuille برای آب.

$$e = 0.05 / 250 = 2 \times 10^{-4} \text{ (0.02 \% of span)}$$

$$R_{hp} + R_{lp} = 2 \times 9.431 \times 10^7 = 1.886 \times 10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$$

$$Q_{\text{leak,max}} = e \times DP_{fs} / (R_{hp} + R_{lp}) = 2 \times 10^{-4} \times 25000 / 1.886 \times 10^8$$

$$Q_{\text{leak,max}} = 2.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} = 2.65 \times 10^{-8} \times 6 \times 10^7 \text{ mL}/\text{min} = 1.59 \text{ mL}/\text{min}$$

نتیجه: برای خط تمیز 1.59 mL/min؛ با گرفتگی 1000 × مقاومت هزار برابر و حد مجاز به $1.6 \times 10^{-3} \text{ mL}/\text{min}$ می‌رسد. پس سطح آلودگی خط، مرز عملی را تعیین می‌کند، نه فقط کیفیت Seat.

مایع محبوس: Leg های پر از میعان و حفره های Manifold حجم های بالقوه محبوس اند. شیب 4.57 bar/K برای آب در 20 °C کران بالا را می دهد؛ شیب در دماهای بالا باید با خواص همان دما محاسبه شود. هر حجمی که ممکن است بین دو شیر بسته بماند، در HAZOP به عنوان حجم قابل انزوا ثبت می شود.

خطای دبی: بدون کنترل Leg ها، عدم قطعیت دبی در ۲۵ % برابر 5.62 % ($k=1$) است؛ با تolerانس 2 mm به 1.10 % می رسد. تصمیم طراحی: تolerانس ارتفاع Leg ها در مشخصات نصب تعریف و در بازرسی As-Built کنترل شود، و Equalize با نشی بالاتر از حد جدول ۲ در دبی پایین قابل قبول نباشد. این ترتیب، تصمیم مهندسی است و دستور کار روی خط زنده نیست.

IMPORTANT – حدود اعتبار (Limits of Applicability)

مدل های این سند آموزشی اند: جریان آرام تراکم ناپذیر در خط، یک سلول با ظرفیت خطی، رتبه فرضی، و ورودی های فرضی. نتایج برای تعیین سطح اهمیت و ترتیب بزرگی مناسب اند، نه جایگزین برگه فنی، آزمون کارخانه یا بررسی مهندسی ثبت شده پروژه. محاسبه تنش جداره ساده، رتبه بندی رسمی شیر را نمی دهد. برای سرویس ترش، بخار فوق گرم، سیال دوفازی، فشار یا دمای نزدیک رتبه، یا تغییر سریع دما، باید تحلیل تخصصی انجام شود.

23 چک لیست طراحی

☐ Design Basis (فشار و دمای کارکرد و طراحی، سیال، DP مقیاس کامل) ثبت و منبع هر مقدار مشخص است.

☐ رتبه فشار-دمای Manifold از منحنی برگه فنی در دمای طراحی کنترل شده است.

☐ جنس بدنه، Stem، Seat و Packing با سیال و محیط خارجی (کلراید، H2S) و استاندارد مواد پروژه تأیید شده است.

☐ حد نشی مجاز Equalize و Block از بودجه خطا و مقاومت خطوط محاسبه و با کلاس نشی سازنده مقایسه شده است.

☐ حجم های قابل انزوا در HAZOP شناسایی و برای مایع محبوس تصمیم طراحی ثبت شده است.

☐ مهار محوری Stem و Bonnet برای نیروی $F = P \times A$ بررسی شده است.

☐ تنش اتصال و ارتعاش (Direct Mount) یا الزام Remote Mount ارزیابی شده است.

☐ تolerانس ارتفاع Leg ها در مشخصات نصب و بازرسی As-Built تعریف شده است.

☐ FMEA برای حالت های خرابی مهم کامل و اقدام اصلاحی هر مورد تعیین شده است.

☐ ماتریس راستی آزمایی وضعیت هر مورد را (VERIFIED، REQUIRES VERIFICATION، TBD) نشان می دهد.

COMMON MISTAKE – بهبود دقت سلول به جای کنترل منبع غالب خطا

در مورد بخار، دقت سلول فقط حدود سه درصد از واریانس خطای DP را می سازد، در حالی که اختلاف ارتفاع Leg ها حدود ۹۷ درصد آن است. ارتقای ترانس میتر بدون کنترل منبع غالب خطا، دقت دبی را بهبود چشمگیری نمی دهد.

جمع‌بندی نکات کلیدی

- نشستی مجاز Equalize با مقاومت خطوط نسبت وارونه دارد؛ گرفتگی خط حد مجاز نشستی را صدها برابر کوچک می‌کند.
- نشستی یک‌طرفه در خط تمیز بی‌اثر است، ولی با گرفتگی خط به خطای بزرگ DP تبدیل می‌شود.
- مایع محبوس با شیب حدود 4.6 bar/K برای آب خطرناک‌ترین مکانیزم فشار حرارتی است؛ گاز محبوس فقط با نسبت دماهای مطلق بالا می‌رود.
- نیروی Stem Blow-out برابر $P \times A$ است و باید با مهار مکانیکی تحمل شود؛ سفت‌کردن بیش از حد Packing اصطکاک و آسیب Seat را زیاد می‌کند.
- در دبی پایین، عدم قطعیت از ریشه DP بزرگ می‌شود؛ در مورد بخار، کنترل ترانس ارتفاع Leg‌ها مؤثرتر از ارتقای دقت سلول است.
- هر مقدار ورودی که از برگه فنی تأیید شده نیامده، با وضعیت TBD یا REQUIRES VERIFICATION در ماتریس راستی‌آزمایی ثبت می‌شود.

24 پرسش‌های متداول

› نشستی Equalize چقدر مجاز است؟

از بودجه خطا و مقاومت خطوط محاسبه می‌شود. با ضریب خط تمیز و خطای مجاز 1 %، حدود 79.5 mL/min؛ با گرفتگی $\times 1000$ حدود 0.08 mL/min (جدول ۲).

› چرا نشستی کوچک Block می‌تواند خطای بزرگ ایجاد کند؟

چون خطای DP برابر جریان نشستی ضربدر مقاومت خط سمت نشستی است. وقتی گرفتگی مقاومت را بالا ببرد، همان جریان خطای بزرگ‌تری می‌سازد (شکل ۴).

› چرا مایع محبوس خطرناک است؟

چون مایع تراکم‌ناپذیر است و با گرمایش حجم محبوس، فشار طبق $\Delta P = (\text{beta} / \text{kappa}) \times \Delta T$ بالا می‌رود؛ برای آب حدود 4.57 bar/K در 20 °C به‌عنوان کران بالا.

› آیا دقت بیشتر سلول عدم قطعیت دبی را کم می‌کند؟

فقط اگر دقت سلول منبع غالب باشد. در مورد بخار این سهم حدود سه درصد واریانس است؛ اختلاف ارتفاع Leg‌ها غالب است.

› آیا استاندارد ISO 15156 برای هر Manifold لازم است؟

فقط برای سرویس ترش (حضور H2S مرطوب). الزام و ضوابط دقیق باید از ویرایش معتبر استاندارد و مشخصات پروژه گرفته شود.

› این سند جایگزین برگه فنی سازنده است؟

خیر. مقدارهای رتبه، هندسه و مشخصات فرضی‌اند و فقط روش تحلیل را نشان می‌دهند. تصمیم نهایی با داده‌های تأیید شده هر محصول گرفته می‌شود.

25 واژه‌نامه و منابع

اصطلاح	معنا
Equalization Time	زمان رسیدن فشار دو حفره به برابری پس از تغییر وضعیت یا تغییر فرآیند
Trapped Volume	حجم سیال محبوس بین دو شیر بسته که اتصال آزاد به فرآیند ندارد
Block and Bleed	آرایش ایزولاسیون با Block و مسیر تخلیه برای راستی‌آزمایی آب‌بندی
Fugitive Emission	نشتی خارجی کوچک و کنترل‌نشده سیال به محیط
RSS	جمع مربعی (Root Sum of Squares) عدم قطعیت‌های مستقل

1. IEC 61518:2001 – Mating dimensions between differential pressure (type) measuring instruments and flanged-on shut-off devices up to 413 bar (41.3 MPa)
مرجع ابعاد اتصال؛ وضعیت اعتبار ویرایش پیش از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی شود.
2. ISO 15848-1 – Industrial valves – Measurement, test and qualification procedures for fugitive emissions – Part 1
مرجع آزمون نشتی خارجی؛ ویرایش (2015 و اصلاحیه 1:2017 Amd) و دامنه پیش از ارجاع تأیید شود.
3. ASME B16.34 – Valves – Flanged, Threaded, and Welding End
مرجع رتبه‌بندی فشار-دما؛ ویرایش با پروژه تأیید شود.
4. ASME B1.20.1 – Pipe Threads, General Purpose (Inch)
مرجع رزوه NPT؛ ویرایش تأیید شود.
5. ISO 15156 – Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production
مرجع مواد سرویس ترش؛ Part و ویرایش تأیید شود؛ هیچ آستانه عددی در این سند نقل نشده است.
6. ISO 5167 – Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
مرجع دبی‌سنجی با اختلاف فشار؛ Part و ویرایش با پروژه تأیید شود.
7. JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)
مرجع بودجه عدم قطعیت.

سند سطح ۳؛ ورودی‌های مدل (رتبه، هندسه، جرم، ضرایب و دقت) فرضی با وضعیت TBD هستند و هیچ مشخصه محصول NICO ادعا نشده است. شماره و ویرایش استانداردها پیش از استفاده رسمی راستی‌آزمایی شود. هیچ بخشی روش اجرایی کار روی خط تحت فشار نیست.

منابع مرتبط NICO

همین خوشه – سطح ۱ و ۲

- NICO-EDU-ACC-L1-001-FA – 5-Valve Manifold و 3-Valve، 2-Valve آشنایی با
- NICO-EDU-ACC-L2-002-FA – Instrument Manifold نصب و عیب‌یابی

تجهیزات مرتبط NICO

- ACC53 (2-Way Manifold)، ACC54 (3-Way Manifold)، ACC55 (5-Way Manifold) و ACC56 (Root Valve)
- ترانس‌میتر اختلاف فشار سری DPT11 و اریفیس OFE16

عنوان «Way» در نام مدل‌ها و ارتباط آن با تعداد شیر، آرایش داخلی و مشخصات هر مدل باید با برگه فنی رسمی همان محصول کنترل شود. هیچ مشخصه محصولی در این راهنما ادعا نشده است.