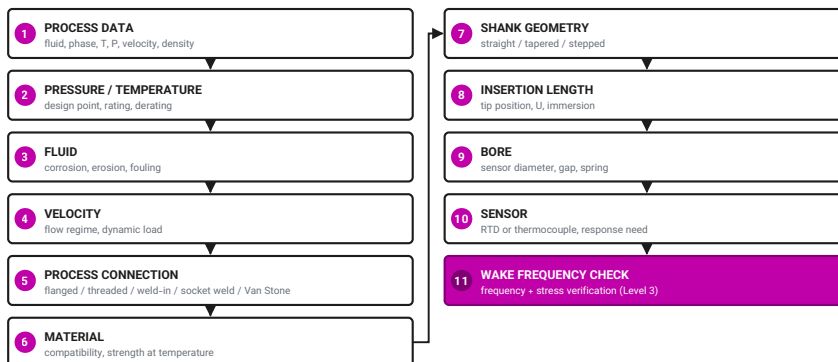


راهنمای مهندسی انتخاب، سائزینگ و نصب ترموول

برای سنسورهای RTD و Thermocouple

Engineering Guide to Thermowell Selection, Sizing and Installation for RTD and Thermocouple Sensors

از داده‌های فرآیندی تا اتصال، هندسه، Insertion Length، Bore، ماده و Derating؛ چهار مورد کارشده، عیب‌یابی و فلوچارت انتخاب.



Iterate: if the verification fails, change geometry, length, material or location and repeat from step 5.

شکل ۷ – فلوچارت انتخاب ترموول: از داده‌های فرآیندی تا بررسی Wake Frequency

تاریخ انتشار

مهر ۱۴۰۵ – October 2026

سطح محتوا

LEVEL 2

بازنگری

Rev00

شماره سند

NICO-EDU-TWL-L2-005-FA

1 پرسش مهندسی و دامنه این راهنما

یک ترموول (Thermowell) درست، فقط ترموولی نیست که روی لوله «جا بیفتد». باید فشار و دمای طراحی را تحمل کند، با سیال سازگار باشد، نوکش در جریان واقعی قرار گیرد، Bore آن به سنسور بخورد، پاسخ دمایی قابل قبولی بدهد و در سرعت جریان سرویس دچار ارتعاش مخرب نشود. این راهنما یازده تصمیم را به ترتیب مرور می‌کند و برای هرکدام معیار انتخاب، ملاحظه نصب و خطای رایج را می‌آورد.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

1. داده‌های لازم برای انتخاب ترموول (Process Data) را فهرست و از داده ناقص تشخیص دهید.
2. اتصال‌های Flanged، Threaded، Weld-in، Socket Weld و Van Stone و هندسه‌های Straight، Tapered و Stepped را بر اساس سرویس مقایسه کنید.
3. Immersion Length، Insertion Length و U-Length را با مرجع صریح تعریف و محاسبه کنید.
4. جایگاه نوک را در لوله کوچک، لوله بزرگ، Elbow و مخزن تعیین کنید.
5. Air Gap، Bore Diameter و سنسور Spring-Loaded را برای RTD و Thermocouple انتخاب کنید.
6. اثر ضخامت نوک، Bore، ماده و Air Gap بر Response Time و خطای رسانی را برآورد کنید.
7. ماده و Derating فشار-دما را بررسی و Corrosion را از Erosion تفکیک کنید.
8. چهار مورد کارشده آب، بخار، گاز داغ و مایع خورنده را دنبال و علائم خرابی را عیب‌یابی کنید.

CAUTION – مرز میان سطح ۲ و سطح ۳

این راهنما ارتعاش ناشی از جریان را فقط در حد مقدمه حرفه‌ای معرفی می‌کند (بخش ۱۳). محاسبه فرکانس بیداری، فرکانس طبیعی، تنش و تأیید طراحی به سطح ۳ همین مجموعه (NICO-EDU-TWL-L3-006-FA) و استاندارد ASME PTC 19.3 TW واگذار شده است. مقادیر عددی این راهنما نمونه‌های آموزشی‌اند و جایگزین داده پروژه نیستند.

2 داده‌های ورودی طراحی (Process Data)

انتخاب از روی «نوع اتصال و طول» شروع نمی‌شود؛ از داده شروع می‌شود. اگر یکی از ردیف‌های جدول ۱ معلوم نباشد، آن را فرض نکنید و در برگه ورودی با وضعیت Not Provided یا TBC ثبت کنید، چون هر ردیف می‌تواند نتیجه انتخاب را عوض کند.

جدول ۱ – Process Data لازم برای انتخاب ترموول

داده	اثر بر انتخاب
سیال و فاز (مایع، گاز، بخار)	انتخاب ماده، ضریب انتقال حرارت، نوع بار جریان
دما و فشار کارکرد و طراحی	رتبه اتصال، Derating، تنش مجاز ماده
سرعت جریان (حداقل، عادی، حداکثر)	بار درگ، ارتعاش، Erosion، انتخاب هندسه

داده	اثر بر انتخاب
چگالی و لزجت	عدد رینولدز، فرکانس بیداری، نیروی جریان
Erosion و Corrosion	ماده، پاداش خوردگی (Corrosion Allowance)، بازرسی دوره‌ای
اندازه لوله، Schedule و ماده	قطر داخلی، ضخامت دیواره، طول نازل، جایگاه نوک
نوع و قطر سنسور	Air Gap، Bore Diameter، ظرفیت جای‌گذاری Spring-Loaded
Response Time مورد نیاز	هندسه، قطر نوک، پر کردن Air Gap

3 انتخاب اتصال فرآیندی

پنج اتصال رایج با معیارهای انتخاب در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. هیچ نوع اتصالی بدون قید «برای فشار، دما و سرویس معین» بهتر نیست؛ ستون‌ها فقط جهت ملاحظه‌اند و حد فشار یا دمای مطلق نمی‌دهند.

جدول ۲ – مقایسه اتصالات‌های فرآیندی ترموول

اتصال	ویژگی ساختاری	آب‌بندی و نشتی	تعویض و بازرسی	ملاحظه کاربرد
Flanged	فلنج روی نازل؛ Class یا PN و Facing (RTJ یا RF) باید با لوله هم‌خوان باشد	آب‌بندی با Gasket؛ نیازمند گشتاور پیچ و تمیزی سطح	تعویض مستقیم‌تر؛ بازرسی از بیرون	رایج در فشار و دمای بالاتر، سیال‌های سخت و سرویس‌هایی که تعویض دوره‌ای دارند
Threaded	رزوه NPT یا BSP در ترموول و Boss یا نیم‌کوپلینگ	آب‌بندی رزوه؛ حساس به درگیری رزوه و ماده سیل	تعویض ساده در شرایط عادی؛ خطر Gallling و خوردگی رزوه	سرویس‌های کم‌شدت‌تر؛ برای ارتعاش و چرخه حرارتی شدید با احتیاط انتخاب شود
Weld-in	اتصال جوشی مستقیم به لوله یا نازل	جوش آب‌بند؛ بدون مسیر نشتی رزوه‌ای	تعویض مستلزم برش و جوش مجدد	سرویس‌های سخت یا حساس به نشتی؛ نیازمند روش جوش و بازرسی تأییدشده
Socket Weld	ساقه در Socket می‌نشیند و با جوش گوشه ثابت می‌شود	جوش گوشه؛ شکاف Socket باید طبق روش اجرایی رعایت شود	تعویض مستلزم برش جوش	جایگزین جوش لب‌به‌لب در اتصالات‌های کوچک؛ محدودیت‌های کدی پروژه کنترل شود
Van Stone	یقه ترموول با فلنج آزاد (Lap Joint)	آب‌بندی با Gasket روی یقه	فلنج آزاد برای هم‌ترازی می‌چرخد	گاهی با فلنج ارزان‌تر روی یقه آلیاژی؛ توضیح سازندگان است و باید با طراحی سازنده کنترل شود

4 انتخاب هندسه ساقه

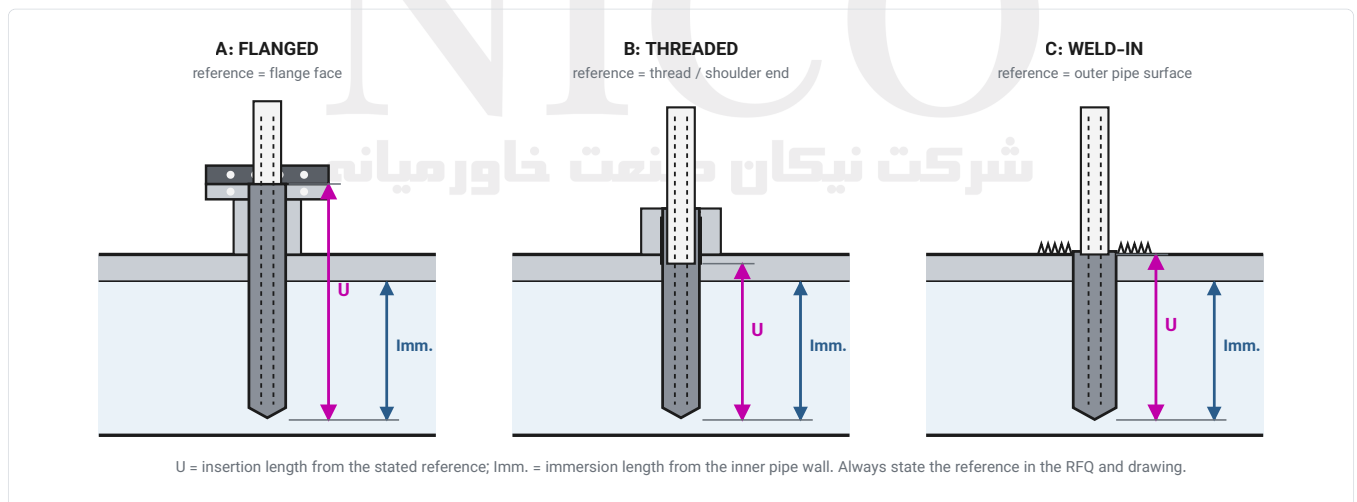
سه هندسه Straight، Tapered و Stepped میان استحکام ریشه و سبکی نوک مصالحه می‌کنند. جدول ۳ پنج معیار انتخاب را کنار هم می‌گذارد؛ رتبه‌بندی‌ها کیفی‌اند و فقط مسیر تصمیم را نشان می‌دهند، نه پذیرش یا رد یک هندسه.

جدول ۳ – مقایسه کیفی هندسه ساقه

هندسه	استحکام ریشه	پاسخ دمایی	سرعت جریان	فشار	ریسک Wake Frequency
Straight	یکنواخت	کندتر	مناسب سرعت پایین تا متوسط	دیواره ثابت؛ ساخت ساده	در طول‌های بلند بالاتر
Tapered	ریشه قوی‌تر	سریع‌تر	رایج در سرعت بالاتر	مناسب؛ ساخت پیچیده‌تر	معمولاً با فرکانس طبیعی بالاتر کاهش می‌یابد
Stepped	ریشه قوی؛ پله تمرکز تنش	سریع در ناحیه نوک	بسته به محل پله	پله باید بررسی شود	وابسته به محل و اندازه پله

5 U-Length و Immersion Length، Insertion Length

این سه اصطلاح در بسیاری از کاتالوگ‌ها و بازارها هم‌معنا استفاده می‌شوند اما یک تعریف واحد جهانی ندارند. «طبق Reference مورد استفاده» یعنی هر سند باید مرجع اندازه‌گیری را همراه عدد بنویسد. در این مجموعه، Insertion Length (که با حرف U هم نشان داده می‌شود) از نقطه مرجع اتصال فرآیندی تا نوک و Immersion Length از دیواره داخلی لوله تا نوک است؛ گردن ابزار بالای اتصال Lag Extension یا T نام دارد.



شکل ۱ – سه مثال از مرجع اندازه‌گیری Insertion Length: وجه فلنج، انتهای رزوه و سطح خارجی لوله

برای ترموول فلنجی و نازل با ارتفاع H_n ، رابطه زیر طول لازم از وجه فلنج تا نوک را به طول فرورفته در سیال ربط می‌دهد:

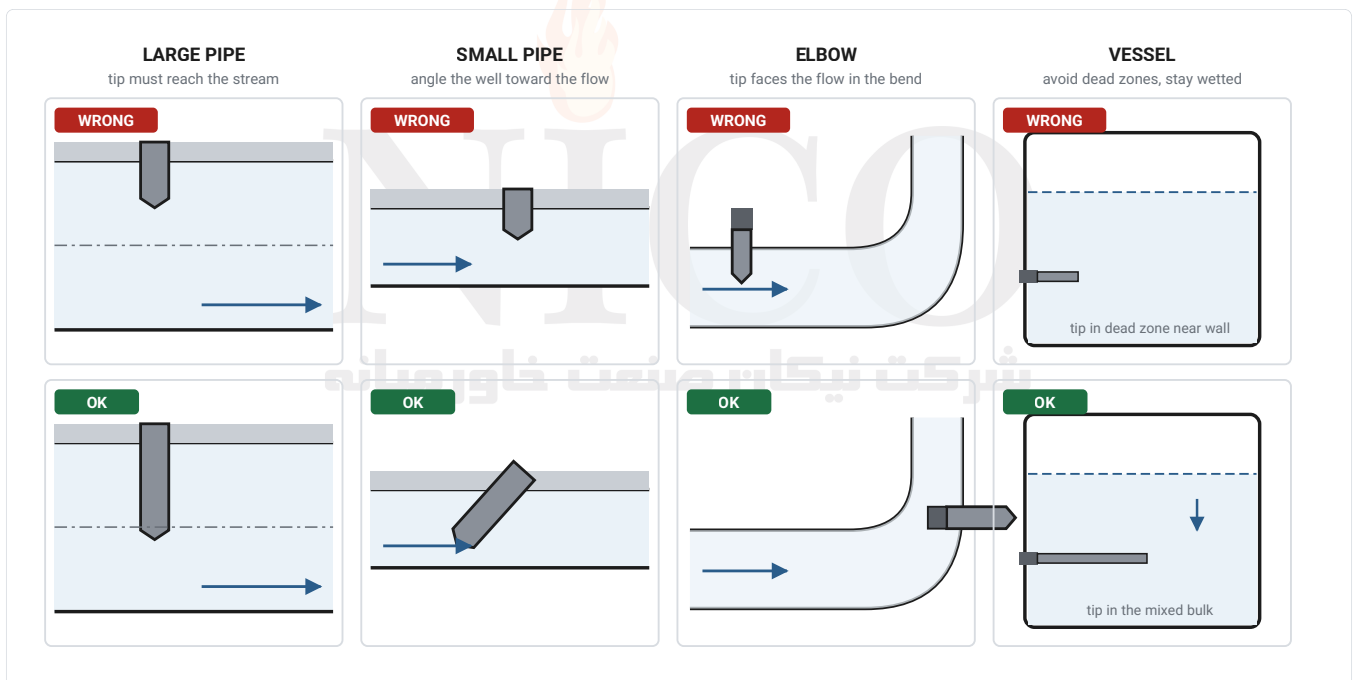
$$(1) \quad U = H_n + t_w + I_m$$

mm	Insertion Length از وجه فلنج تا نوک	U
mm	ارتفاع نازل: از وجه فلنج تا سطح خارجی لوله	H_n
mm	ضخامت دیواره لوله	t_w
mm	Immersion Length هدف از دیواره داخلی تا نوک	I_m

انتخاب طول چهار اثر همزمان دارد: نوک کوتاه، دما را به دمای دیوار نزدیک می‌کند و خطای رسانش (بخش ۹) می‌سازد؛ نوک بلندتر نمایندگی بهتری از جریان دارد اما بار خمشی ریشه را بالا می‌برد و فرکانس طبیعی را پایین می‌آورد؛ پاسخ دمایی با طول تقریباً تغییر نمی‌کند اما تنش و ارتعاش به شدت تغییر می‌کنند؛ و ساخت و موجودی نیز به طول‌های استاندارد سازنده محدود است.

6 جایگاه نوک و نصب در لوله کوچک

نوک باید در جریان نماینده فرآیند باشد، نه در لایه مرزی کنار دیوار. در عمل، در لوله بزرگ نوک معمولاً تا حوالی خط مرکزی یا کمی کوتاه‌تر از آن می‌رسد. این یک رویه رایج است، نه الزام استاندارد؛ مشخصات پروژه حاکم است و طول نهایی باید با بررسی ارتعاش (سطح ۳) سازگار باشد. جدول ۴ رویکرد هر حالت نصب را خلاصه می‌کند.



شکل ۲ - جایگاه نادرست و مناسب نوک در لوله بزرگ، لوله کوچک، Elbow و مخزن؛ شماتیک مفهومی

جدول ۴ - رویکرد نصب بر اساس هندسه لوله

حالت	مشکل رایج	راه حل رایج
لوله بزرگ	نوک کوتاه در لایه مرزی؛ یا طول زیاد و ارتعاش	نوک در جریان اصلی با رعایت بررسی ارتعاش
لوله کوچک	طول لازم از قطر لوله بیشتر است؛ نوک به دیوار روبه‌رو می‌رسد	نصب زاویه‌دار رو به جریان، Elbow یا بخش بزرگ‌شده (Tee یا Reducer)

حالت	مشکل رایج	راه حل رایج
Elbow	نوک عمود در جهت اشتباه یا در ناحیه مرده	در امتداد محور لوله ورودی و رو به جریان
مخزن	نوک در ناحیه ساکن، بالای سطح مایع یا کنار ورودی‌ها	نوک در ناحیه مخلوط و همیشه خیس

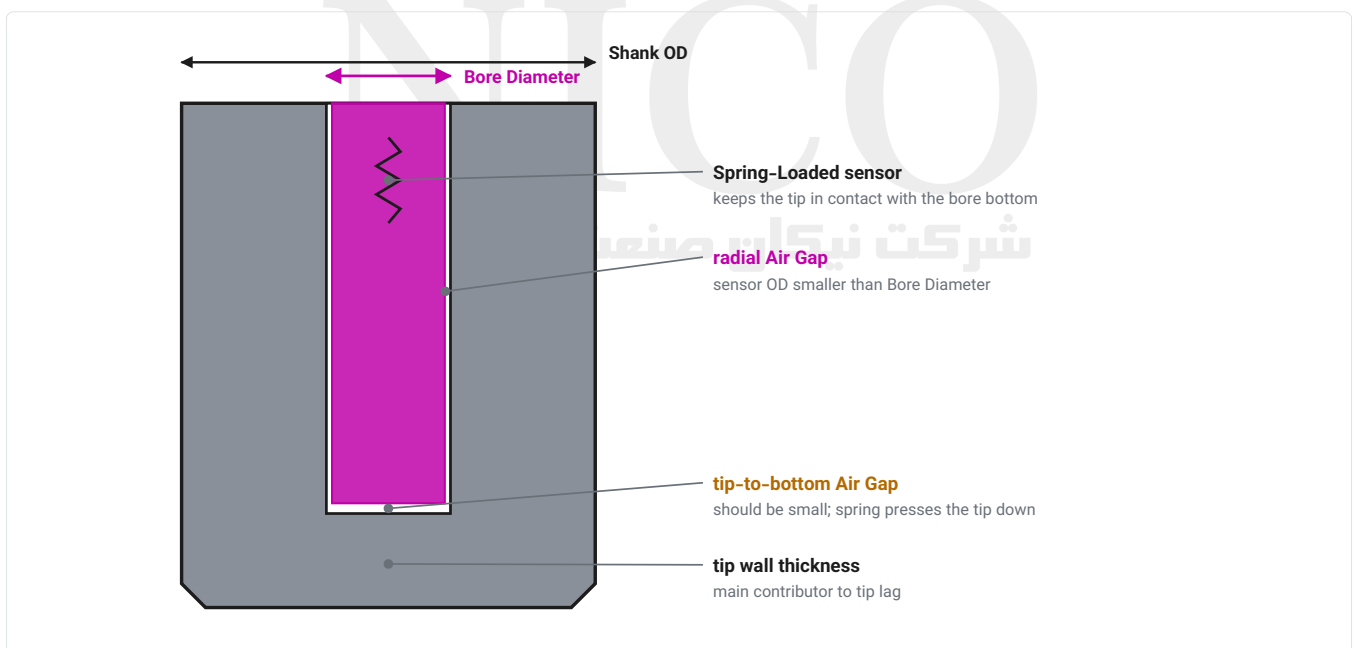
در نصب زاویه دار با زاویه alpha نسبت به عمود لوله، طول درون دیواره و سیال بزرگتر از عمق مؤثر می‌شود:

$$(2) \quad L_{ang} = (t_w + l_m) / \cos(\alpha)$$

برای لوله NPS 2 Sch 80 با قطر داخلی 49.2 mm و عمق هدف 25 mm، طول داخل دیواره و سیال در نصب عمود 30.5 mm و در نصب 45° برابر 43.2 mm می‌شود؛ یعنی زاویه، بدون رسیدن به دیواره مقابل، نوک را به عمق مؤثر نزدیک می‌کند. محاسبه کامل در مورد D (بخش ۱۵) آمده است.

7 انتخاب Bore Diameter و Air Gap

Bore باید سنسور را با لقی اندک نگه دارد. لقی زیاد Air Gap شعاعی می‌سازد و پاسخ را کند می‌کند؛ لقی صفر نصب و تعویض سنسور را دشوار می‌کند. سنسور Spring-Loaded نوک را به ته Bore فشار می‌دهد و مهم‌ترین ابزار کاهش فاصله هوایی انتهایی است.



شکل ۳ – مقطع بزرگ‌نمایی‌شده نوک: Bore Diameter، Air Gap شعاعی و انتهایی، ضخامت دیواره نوک و فنر

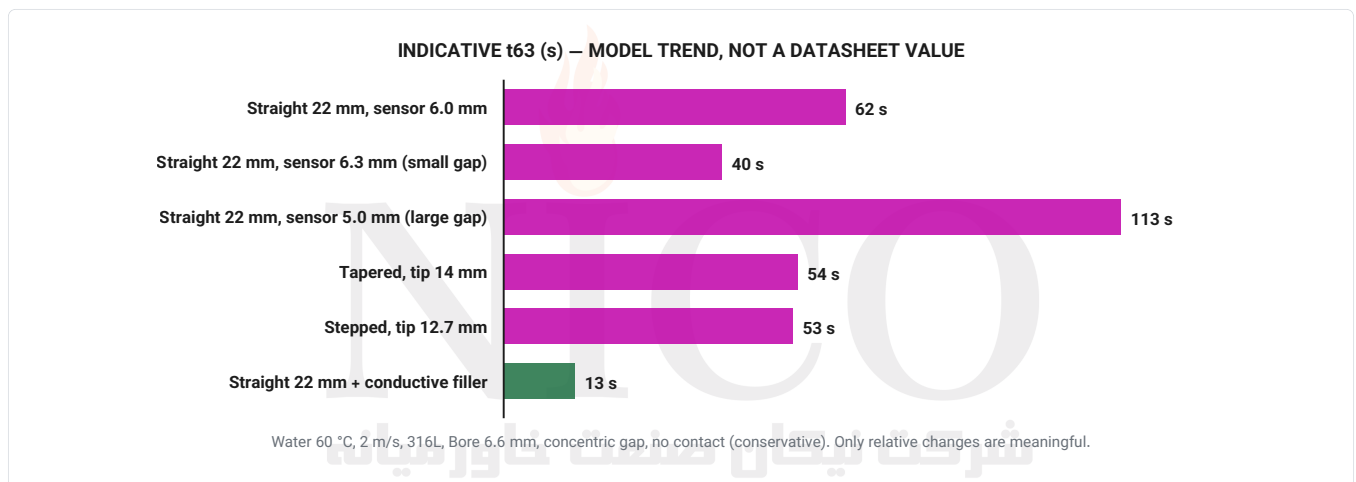
جدول ۵ – ملاحظات انتخاب Bore و سنسور

موضوع	ملاحظه
قطر سنسور و Bore Diameter	قطر Bore باید از قطر خارجی غلاف سنسور اندکی بزرگتر باشد؛ ترکیب هماهنگ را برگه فنی سنسور و ترموول تعیین می‌کند

موضوع	ملاحظه
Spring-Loaded	تماس نوک با ته Bore را حفظ می‌کند؛ باید متناسب با ارتعاش و طول بررسی شود
قابلیت تعویض	طول بدون مانع از بالا و ورودی Bore برای بیرون کشیدن سنسور لازم است
RTD و Thermocouple	ابعاد و طول المان RTD با نقطه Hot Junction ترموکوپل متفاوت است؛ سازگاری با طول ته Bore باید کنترل شود
پرکننده رسانا	گاهی برای کاهش Air Gap استفاده می‌شود؛ فقط اگر مشخصات سنسور و دمای کار اجازه دهد

8 Response Time

Response Time مجموع تأخیر لایه‌های انتقال حرارت است: ضخامت دیواره نوک، قطر Bore، قطر سنسور، Air Gap، سرعت سیال (ضریب جابه‌جایی) و ماده. در مدل مرتبه اول، مقدار کمی آن با ثابت زمانی (Time Constant) و زمان رسیدن به $\frac{1}{2}$ یا $\frac{63}{100}$ تغییر پله‌ای (t_{63}) بیان می‌شود. شکل ۴ نتیجه یک مدل دوطرفیتی ساده (دیواره نوک و غلاف سنسور) را برای آب 60°C با سرعت 2 m/s نشان می‌دهد.



شکل ۴ – روند t_{63} برای چند ترکیب هندسه و Air Gap با مدل ساده؛ فقط تغییر نسبی معنادار است

NOTE – این اعداد داده برگه فنی نیستند

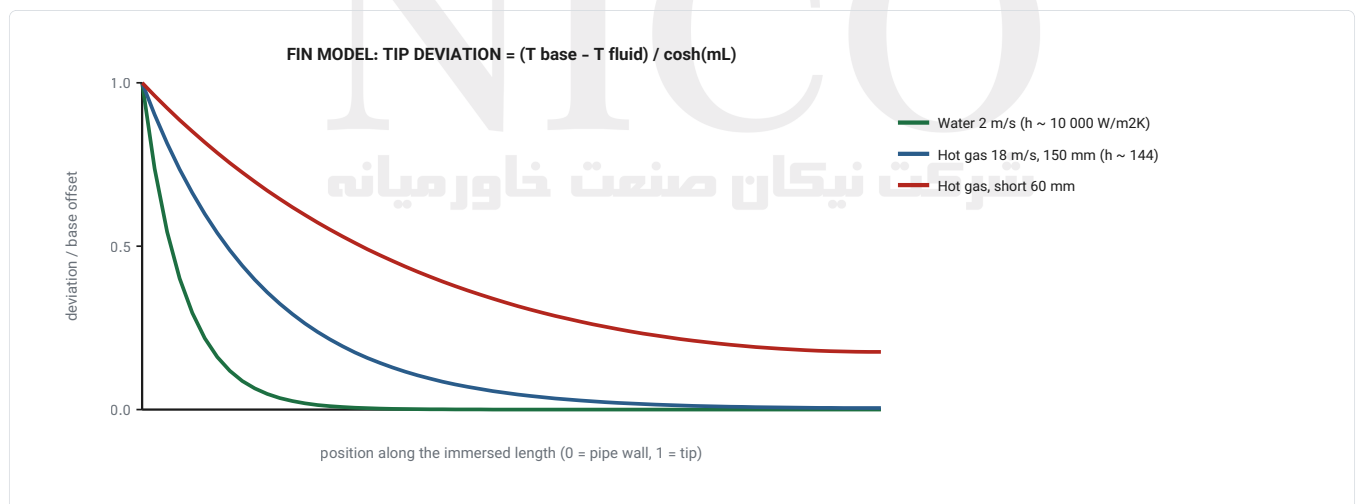
مدل شکاف را هم‌محور و بدون هیچ تماس فلزی فرض می‌کند، پس مقدار مطلق t_{63} محافظه‌کارانه و بزرگ‌تر از واقعیت یک مجموعه فندار است. ماده، دمای فرآیند و ضریب جابه‌جایی نیز فرض هستند (ASSUMPTION). سه نتیجه نسبی قابل‌اتکاست: کاهش لقی شعاعی (قطر سنسور 6.3 mm به جای 6.0 mm در 6.6 mm Bore) زمان را از حدود 62 s به حدود 40 s می‌رساند؛ باریک‌کردن نوک به 14 mm یا 12.7 mm آن را حدود 13 تا 15 درصد کاهش می‌دهد؛ و پر کردن شکاف با ماده رسانا (فرض $k = 1\text{ W/m}\cdot\text{K}$) آن را تا حدود 13 s پایین می‌آورد، یعنی Air Gap از ضخامت دیواره اثر بیشتری دارد.

9 خطای رسانش (Conduction Error)

ترموول مثل یک پره (Fin) از دیواره لوله یا گردن گرم یا سرد به سمت نوک رسانش دارد و نوک را از دمای سیال دور می‌کند. اگر ترموول به صورت میله توپر با جابه‌جایی یکنواخت مدل شود و نوک آن عایق فرض شود، انحراف دمای نوک از دمای سیال چنین است:

$$(3) \quad \Delta T_{\text{tip}} = (T_{\text{base}} - T_f) / \cosh(m \cdot L), \quad m = \sqrt{(h \cdot P / (k \cdot A))}$$

ΔT_{tip}	انحراف دمای نوک از دمای سیال	K
T_{base}	دمای پایه ترموول (دیواره یا گردن)	°C
T_f	دمای سیال	°C
m	پارامتر پره	1/m
L	Immersion Length مؤثر	m
h	ضریب جابه‌جایی سیال	W/m ² ·K
P	محیط بیرونی ساقه	m
k	رسانایی گرمایی ماده	W/m·K
A	سطح مقطع فلزی (بدون Bore)	m ²



شکل ۵ - توزیع انحراف دما در طول ساقه؛ در آب با جابه‌جایی شدید ناچیز و در گاز با طول کوتاه قابل توجه است

این مدل ساده شده است (سنسور، فلنج و تابش لحاظ نشده) و روش استاندارد نیست، اما روند را درست نشان می‌دهد: خطا با افزایش $m \cdot L$ نمایی کاهش می‌یابد. در گاز، h کوچک است و m هم کوچک می‌شود، پس طول بیشتر یا عایق‌کاری گردن ضرورت دارد؛ در آب با h بزرگ، عملاً خطایی از رسانش دیده نمی‌شود.

10 انتخاب ماده

ماده باید همزمان در برابر سیال، دما، فشار و بار جریان مقاوم باشد. جدول ۶ پنج دسته را با ملاحظه اصلی هرکدام معرفی می‌کند. هیچ ردیفی «سازگار» یا «ناسازگار» بودن با یک سیال مشخص را اعلام نمی‌کند؛ این قضاوت فقط با جدول مقاومت خوردگی معتبر، داده ترکیب سیال و تجربه سرویس ممکن است.

جدول ۶ – دسته‌های ماده برای ترموول

ماده	ملاحظه اصلی	نکته انتخاب
SS304	فولاد زنگ‌نزن آستنییتی عمومی؛ مقاومت کمتر در برابر خوردگی حفره‌ای کلریدی نسبت به SS316	سرویس‌های ملایم؛ تأیید با جدول خوردگی
SS316L / SS316	انتخاب عمومی صنعتی؛ SS316L برای جوش‌کاری کم‌کربن‌تر است	دمای بالا و محیط‌های خاص نیازمند بررسی تنش مجاز
Duplex	استحکام بالاتر و رفتار متفاوت در خوردگی تنشی کلریدی	محدودیت دمایی و جوش‌پذیری سازنده کنترل شود
Hastelloy	آلیاژ پایه‌نیکل برای محیط‌های بسیار خورنده؛ هزینه بالا	گرید دقیق (مانند C-276) در سفارش ذکر شود
Inconel	آلیاژ پایه‌نیکل با کاربرد رایج در دمای بالا	گرید دقیق ذکر شود

IMPORTANT – سرویس ترش و الزام‌های ماده

در سرویس‌های دارای Sour Service، مشخصات ماده و سختی باید با NACE MR0175 / ISO 15156 کنترل شود؛ ویرایش جاری آن پیش از ارجاع رسمی راستی‌آزمایی نشده است. نام ماده به‌تنهایی تأیید انطباق نیست.

11 فشار، دما و Derating

رتبه فشار هر اتصال با افزایش دما کاهش می‌یابد، چون تنش مجاز ماده در دمای بالا کمتر است. تصمیم بر اساس نام رتبه نیست؛ باید فشار مجاز در دمای طراحی از جدول رتبه فشار-دمای استاندارد اتصال خوانده شود و از فشار طراحی کمتر نباشد. برای فلنج‌ها جدول‌های فشار-دما در ASME B16.5 ماده به ماده آمده‌اند؛ ویرایش جاری و مقدار هر ردیف باید پیش از استفاده راستی‌آزمایی شود و در این سند هیچ عددی از آن نقل نشده است.

(4)

$$P_{allow}(T_{design}) \geq P_{design}$$

COMMON MISTAKE – یکی گرفتن Class و PN

PN و Class دو سیستم رده‌بندی متفاوت‌اند و برابر ریاضی نیستند؛ هر مقایسه باید با ماده، دما و استاندارد جدول رتبه انجام شود. فلنج Class بالاتر در دمای بالا هم ممکن است از PN ظاهراً بزرگ‌تر کمتر تحمل کند.

12 جزئیات اتصال فلنجی، رزوه‌ای و جوشی

جدول ۷ – اقلام تعیین‌کننده هر نوع اتصال در سفارش و بازبینی

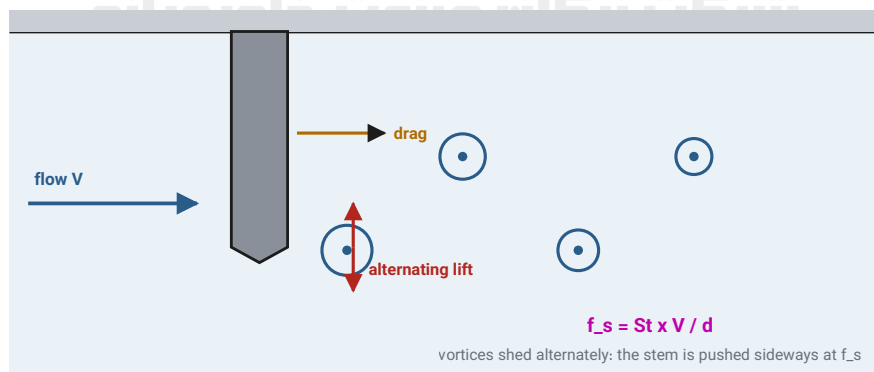
اتصال	اقلامی که باید مشخص شود	بازبینی و خطای رایج
Flanged	اندازه فلنج، Class یا PN، Facing (RF یا RTJ)، طول گردن، Bore Diameter، ابعاد Shank	ناهمخوانی Facing با فلنج نازل؛ نوع Gasket؛ جهت‌گیری Bore
Threaded	نوع رزوه (NPT یا BSP، که معادل هم نیستند)، درگیری رزوه، ماده سیل، جهت قرارگیری سر ابزار	اختلاط NPT و BSP؛ درگیری ناکافی؛ Galling در فولاد زنگ‌زن
/ Weld-in Socket Weld	جزئیات جوش، سازگاری ماده با لوله، شکاف Socket، بازرسی جوش	جوش بدون روش تأییدشده؛ آلودگی؛ ناتوانی در جداکردن برای تعویض

13 ارتعاش ناشی از جریان – مقدمه

جریان عبوری از ساقه گردابه‌هایی متناوب از دو طرف جدا می‌کند (Vortex Shedding) و نیروی نوسانی عرضی با فرکانس ریزش گردابه $f_s = St \times V / d$ بر ساقه وارد می‌کند. اگر این فرکانس به فرکانس طبیعی ساقه نزدیک شود، پاسخ ارتعاشی ناگهان بزرگ می‌شود (تشدید) و شکست خستگی در ریشه می‌تواند رخ دهد. فرکانس طبیعی با افزایش طول کم می‌شود؛ پس هر افزایش طول باید با بررسی ارتعاش همراه باشد.

IMPORTANT – این بررسی اختیاری نیست

بررسی ارتعاش باید پیش از تأیید نهایی هر ترموول انجام شود؛ روش و ضوابط پذیرش در سطح ۳ همین مجموعه و در ASME PTC 19.3 TW آمده است. این راهنما مقدار پذیرش نمی‌دهد و عبور یا رد هندسه را اعلام نمی‌کند.



If f_s approaches the natural frequency of the stem, the response grows (resonance) – full check: Level 3

شکل ۶ – ریزش گردابه متناوب پشت ساقه و نیروی لیفت نوسانی؛ مقدمه بررسی Wake Frequency

14 Erosion و Corrosion یکی نیستند

Corrosion واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی ماده با سیال است؛ Erosion برداشت فیزیکی ماده توسط سرعت، ذرات یا قطرات است. دو پدیده می‌توانند هم‌زمان رخ دهند و سرعت جریان هر دو را شدیدتر می‌کند، اما راه‌حل آن‌ها فرق دارد.

جدول ۸ – تفکیک Erosion و Corrosion

معیار	Corrosion	Erosion
منشأ	شیمیایی یا الکتروشیمیایی	مکانیکی: سرعت، ذرات، قطره، کاویتاسیون
اثر سرعت	می‌تواند فیلم محافظ را بشکند	معمولاً با افزایش سرعت شدیدتر می‌شود
محل رایج	سطح خیس، ریشه، رزوه، شکاف	نوک و سطح رو به جریان
اقدام رایج	تغییر ماده، پاداش خوردگی	کاهش سرعت، ماده سخت‌تر، تغییر جایگاه

15 چهار مورد کارشده

چهار مورد زیر با داده‌های فرضی (ASSUMPTION) یک مسیر تصمیم کامل را نشان می‌دهند. هیچ‌یک مشخصه محصول NICO یا نتیجه طراحی نهایی نیست.

مورد A – آب فرآیندی در لوله NPS 4 Sch 40

داده: آب 60 °C، 6 bar(g)، سرعت 2 m/s؛ ترموول فلنجی Straight از SS316L با قطر 22 mm و 6.6 mm Bore؛ ارتفاع نازل (ASSUMPTION) 100 mm.

گام ۱ – طول. قطر داخلی لوله 102.3 mm (از 114.3 mm OD و دیواره 6.02 mm؛ ابعاد لوله از ASME B36.10M و باید با ویرایش جاری کنترل شود). عمق هدف تا خط مرکزی 51.1 mm که به 50 mm گرد می‌شود.

$$U = 100 + 6.02 + 50 = 156.0 \text{ mm}$$

گام ۲ – جریان. با خواص آب (چگالی 983.5 kg/m³، لزجت 4.66×10⁻⁴ Pa·s و قطر 22 mm:

$$\text{Re} = 983.5 \times 2 \times 0.022 / 4.66 \times 10^{-4} \approx 9.3 \times 10^4 ; h \approx 1.05 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} ; q = 0.5 \times 983.5 \times 2^2 \approx 1967 \text{ Pa}$$

گام ۳ – خطای رسانش. برای 316L با رسانایی 16.3 W/m·K پارامتر 1/m ≈ 359 و m ≈ 18 می‌شود؛ انحراف نوک عملاً صفر است.

نتیجه: ترموول با U = 156 mm در آب سریع و بدون خطای رسانش است. سرعت پایین، ریسک ارتعاش را کم می‌کند، اما تأیید نهایی هنوز با سطح ۳ است. ملاحظه اصلی در این سرویس، Air Gap و کیفیت تماس سنسور است، نه ضخامت دیواره.

مورد B – بخار فوق داغ در لوله NPS 6 Sch 40

داده: بخار 250 °C، 10 bar(g)، 11 bar(a)، سرعت 30 m/s؛ ترموول فلنجی با قطر ریشه 25.4 mm و نوک 12.7 mm؛ نازل 100 mm (ASSUMPTION).

گام ۱ – طول. ID لوله 154.1 mm؛ عمق تا خط مرکزی 77 mm که به 75 mm گرد می‌شود.

$$U = 100 + 7.11 + 75 = 182.1 \text{ mm}$$

گام ۲ – بار جریان. بر اساس IAPWS-IF97، چگالی بخار 4.745 kg/m³ و لزجت 1.804×10⁻⁵ Pa·s است.

$$q = 0.5 \times 4.745 \times 30^2 \approx 2135 \text{ Pa} ; \text{Re}(\text{root}) \approx 2.0 \times 10^5 ; \text{Re}(\text{tip}) \approx 1.0 \times 10^5$$

گام ۳ – غربالگری فرکانس. با St ≈ 0.2 (فرض عمومی رژیم زیر بحرانی):

$$f_s(\text{root}) = 0.2 \times 30 / 0.0254 \approx 236 \text{ Hz} ; f_s(\text{tip}) = 0.2 \times 30 / 0.0127 \approx 472 \text{ Hz}$$

نتیجه: U ≈ 182 mm در سرعت زیاد بخار، ترموول را وارد محدوده ارتعاش جدی می‌کند و Re ریشه در مرز بالای رژیم زیر بحرانی است؛ اعتبار St = 0.2 باید با منبع تأیید شود. این مورد بدون بررسی Wake Frequency سطح ۳ نهایی نیست.

مورد C – گاز داغ در لوله NPS 12 Sch 40

داده: گاز مشابه هوا 450 °C، 1.5 bar(g)، سرعت 18 m/s؛ ترموول فلنجی با قطر 25.4 mm؛ نازل 150 mm (ASSUMPTION)؛ خط عایق کاری شده.

گام ۱ – طول. ID لوله 303.3 mm؛ عمق تا مرکز 150 mm.

$$U = 150 + 10.31 + 150 = 310.3 \text{ mm}$$

گام ۲ – جریان. چگالی 1.204 kg/m³ و ضریب جابه‌جایی 144 W/m²·K (همبستگی استوانه‌ای عرضی):

$$\text{Re} \approx 1.6 \times 10^4 ; m = 40.3 \text{ 1/m} ; m \cdot L = 6.05 ; \Delta T_{\text{tip}} = 30 / \cosh(6.05) \approx 0.14 \text{ K}$$

گام ۳ – حساسیت. با گردن بدون عایق (پایه 150 K سردتر) انحراف 0.7 K می‌شود؛ اما اگر طول کوتاه 60 mm انتخاب شود (m·L = 2.4)، همان پایه 150 K سردتر انحراف حدود 26 K می‌سازد.

نتیجه: در گاز، طول کافی و عایق کاری گردن خطای رسانش را حذف می‌کند، اما U بیش از 300 mm ریسک ارتعاش و تنش را بالا می‌برد. اینجا ماده و Derating نیز بحرانی است: دمای 450 °C نیاز به تنش مجاز ماده در دمای واقعی دارد.

مورد D – مایع خورنده در لوله کوچک NPS 2 Sch 80

داده: ترکیب مایع باید از داده پروژه (TBC)؛ دما 40 °C، 8 bar(g)، سرعت 1.5 m/s؛ ترموول Weld-in یا فلنجی با قطر 22 mm و 8.4 mm Bore.

گام ۱ – نصب. ID لوله 49.2 mm؛ عمق هدف 25 mm نزدیک مرکز. نصب عمود به 30.5 mm نیاز دارد و نوک عملاً به محدوده مرکز می‌رسد، اما ترموول 22 mm بخش بزرگی از مقطع 49.2 mm را اشغال می‌کند و افت فشار و بار جریان را بالا می‌برد. با نصب زاویه‌دار 45°:

$$L_{ang} = (5.54 + 25) / \cos(45^\circ) = 43.2 \text{ mm}$$

گام ۲ – پاداش خوردگی. با نرخ فرضی 0.1 mm/year و عمر 10 years:

$$t_{loss} = 0.1 \times 10 = 1.0 \text{ mm} ; t_{wall} = (22 - 8.4) / 2 = 6.8 \text{ mm} ; t_{remaining} = 5.8 \text{ mm}$$

نتیجه: نرخ خوردگی فقط فرض است؛ مقدار واقعی را باید داده ترکیب و جدول خوردگی تعیین کند. در لوله کوچک، ترموول نصب‌شده با زاویه یا در بخش بزرگ‌شده، مقطع کمتر مسدود می‌کند. انتخاب ماده بین Hastelloy، Duplex و SS316L به داده سیال بستگی دارد و در این سند اعلام نمی‌شود.

جدول ۹ – خلاصه چهار مورد کارشده

مورد	سیال	هندسه	U (mm)	نکته تصمیم
A	آب	Straight	156	Air Gap مهم‌تر از دیواره
B	بخار	Tapered	182	بررسی Wake Frequency الزامی
C	گاز داغ	Straight	310	رسانش، Derating و ارتعاش
D	مایع خورنده	زاویه‌دار	43 (در سیال و دیواره)	ماده و پاداش خوردگی

قرائت دمای پایین و پاسخ کند در گاز داغ

FIELD SCENARIO

«ترموکوپل روی خط گاز داغ، حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه پایین‌تر از ثبت‌کننده مرجع می‌خواند و پس از تغییر بار دقایقی طول می‌کشد تا ثابت شود. سنسور را در کارگاه کالیبره کرده‌ایم و سالم است.»

تحلیل مهندسی: الگوی «قرائت پایین‌تر در گاز داغ» در درجه اول به خطای رسانش مشکوک می‌کند. مقادیر بخش ۹ نشان می‌دهد با طول کوتاه ($m \cdot L \approx 2.4$) و گردن بدون عایق، انحراف می‌تواند به حدود دهها کلوین برسد. باید نخست Immersion Length واقعی با نقشه مقایسه، عایق‌کاری گردن بازبینی و سپس کیفیت تماس سنسور با ته Bore بررسی شود. کندی پاسخ در گاز طبیعی‌تر از مایع است، چون ضریب جابه‌جایی کم است؛ اما اگر Air Gap زیاد باشد این کندی بدتر می‌شود. اقدام اصلاحی نخست افزایش طول یا عایق‌کاری گردن است، نه تغییر سنسور.

16 عیب‌یابی

جدول ۱۰ - عیب‌یابی نصب و سرویس ترموول

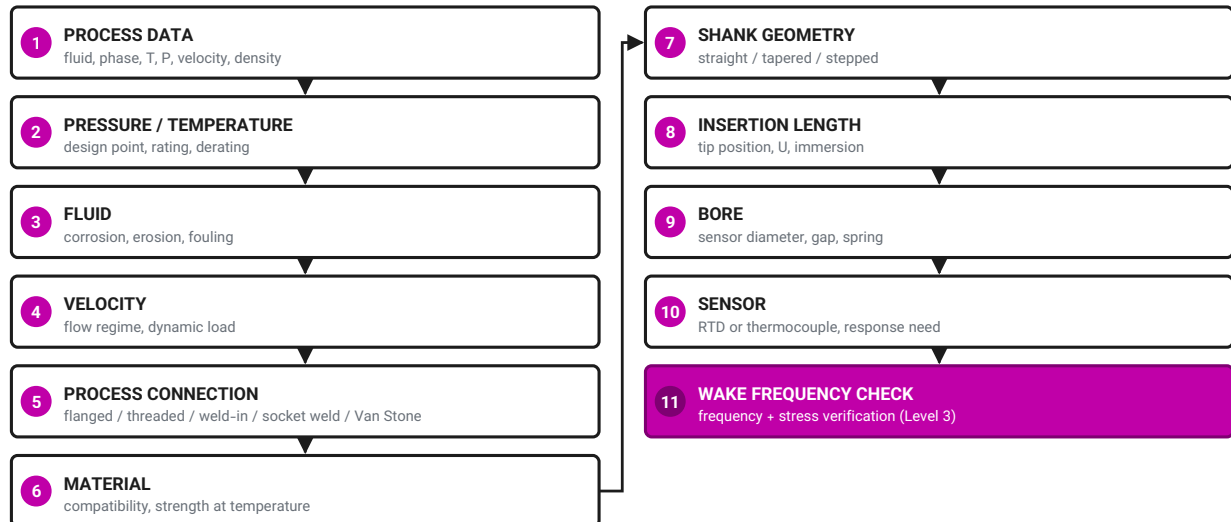
Symptom	Possible Cause	Check	Corrective Action
پاسخ کند	Air Gap زیاد، دیواره ضخیم، سنسور بدون فنر	قطر سنسور و Bore؛ تماس نوک	سنسور هماهنگ‌تر و Spring-Loaded؛ پرکننده رسانا در صورت مجاز بودن
قرائت پایین‌تر یا بالاتر از واقعی	طول کوتاه، خطای رسانش، نوک در لایه مرزی	Immersion Length؛ عایق گردن؛ جایگاه نوک	افزایش طول در حد مجاز؛ عایق‌کاری گردن؛ نصب زاویه‌دار
آسیب سنسور	ارتعاش، ورود آب به Bore، دمای بیش از حد	وضعیت غلاف و سیم‌ها؛ آب‌بندی سر ابزار	اصلاح آب‌بندی؛ بررسی ارتعاش؛ سنسور مناسب دما
ارتعاش ترموول	نزدیکی Wake Frequency به فرکانس طبیعی	سرعت واقعی؛ طول؛ نوع هندسه	بازبینی طراحی با سطح ۳؛ کاهش طول یا تغییر هندسه
سایش نوک	Erosion ناشی از سرعت یا ذرات	بازرسی نوک؛ سرعت و ذرات	ماده سخت‌تر، جایگاه یا هندسه دیگر
نشتی در اتصال فرآیندی	Gasket، رزوه یا جوش نامناسب؛ بار ارتعاشی	سطح آب‌بندی؛ گشتاور؛ ثبت بازرسی	اصلاح طبق روش اجرایی تأییدشده کارخانه؛ بازبینی نوع اتصال
Air Gap بیش از حد	سنسور با قطر کوچک‌تر از انتظار؛ ته Bore بدون تماس	اندازه سنسور و طول Bore	سنسور استاندارد با فنر؛ کنترل ابعاد قبل از نصب

CAUTION - این سند روش اجرایی کار روی خط تحت فشار نیست

بازکردن، تعویض یا بازرسی ترموول روی خط زنده یا تحت فشار تابع روش اجرایی تأییدشده کارخانه، مجوز کار و دستورالعمل سازنده تجهیز است؛ جدول ۱۰ فقط منطق عیب‌یابی را نشان می‌دهد.

17 فلوچارت انتخاب

مسیر یازده مرحله‌ای شکل ۷ همه تصمیم‌های این راهنما را به ترتیب منطقی ردیف می‌کند. گام نهایی یعنی بررسی Wake Frequency تصمیم قبلی را تأیید یا رد می‌کند؛ در صورت رد، یکی از طول، هندسه، ماده یا محل را تغییر دهید و از گام ۵ تکرار کنید.



Iterate: if the verification fails, change geometry, length, material or location and repeat from step 5.

شکل ۷ - فلوچارت انتخاب ترموول: فرآیند، فشار و دما، سیال، سرعت، اتصال، ماده، هندسه، طول، Bore، سنسور و بررسی فرکانس

قواعد کلی تصمیم (پیش از تأیید با برگه فنی و سطح ۳)

Straight ->	سرعت پایین، مایع، فشار و دمای متوسط؛ اتصال طبق پروژه
Stepped / Tapered ->	سرعت بالا، بخار یا گاز، یا نیاز به پاسخ سریع؛ بررسی Wake Frequency الزامی است
Socket Weld / Weld-in ->	سیال خطرناک یا حساس به نشتی؛ روش جوش تأییدشده لازم است
Elbow نصب زاویه دار یا ->	لوله کوچک

18 چک لیست مهندسی

- ☐ Process Data کامل است و داده‌های ناقص با وضعیت صریح (TBC یا Not Provided) ثبت شده‌اند.
- ☐ فشار مجاز اتصال در دمای طراحی از جدول رتبه فشار-دما خوانده شده و از فشار طراحی کمتر نیست.
- ☐ نوع اتصال، Facing و گاسکت با فلنج نازل یا Boss هم‌خوان است؛ NPT و BSP اشتباه گرفته نشده‌اند.
- ☐ مرجع Insertion Length در نقشه و سفارش صریح و برای تأمین‌کننده یکسان است.
- ☐ جایگاه نوک (لوله بزرگ، کوچک، Elbow، مخزن) با اصل نمایندگی جریان بررسی شده است.
- ☐ Bore Diameter با سنسور هماهنگ و Air Gap کنترل شده است؛ سنسور Spring-Loaded انتخاب شده است.
- ☐ خطای رسانش در گاز یا گردن بدون عایق برآورد شده است.

□ ماده با داده سیال و دما، و در سرویس ترش با NACE MR0175 / ISO 15156، کنترل شده است.

□ Erosion و Corrosion جداگانه ارزیابی شده‌اند.

□ بررسی Wake Frequency و تنش طبق سطح ۳ و ASME PTC 19.3 TW انجام یا برنامه‌ریزی شده است.

19 اشتباهات رایج

COMMON MISTAKE – پنج برداشت نادرست پرتکرار در انتخاب

این برداشت‌ها در RFQ و بازبینی طراحی زیاد دیده می‌شوند و جدول زیر هرکدام را اصلاح می‌کند.

واقعیت	برداشت نادرست
✓ مرجع اندازه‌گیری باید همراه عدد و در نقشه نوشته شود.	✗ Insertion Length در همه کاتالوگ‌ها یک تعریف دارد.
✓ مرکز لوله یک رویه رایج است؛ طول نهایی تابع بررسی ارتعاش و مشخصات پروژه است.	✗ نوک همیشه باید تا مرکز لوله برسد.
✓ ضخامت بیشتر پاسخ را کند می‌کند و جرم نوک را بیشتر می‌کند؛ ایمنی از بررسی فرکانس و تنش می‌آید.	✗ ترموول ضخیم‌تر همیشه ایمن‌تر است.
✓ سازگاری فقط با داده معتبر خوردگی تأیید می‌شود.	✗ هر ماده مقاوم به خوردگی برای هر سیالی مناسب است.
✓ دو سیستم رده‌بندی متفاوت‌اند؛ مقایسه با جدول فشار-دما انجام می‌شود.	✗ Class و PN یکسان‌اند.

20 جمع‌بندی

جمع‌بندی نکات کلیدی

- انتخاب از Process Data کامل آغاز می‌شود؛ هر داده گم‌شده را صریح ثبت کنید، نه فرض.
- هر نوع اتصال و هندسه برای سرویس معین مناسب است، نه به صورت مطلق؛ جدول‌ها فقط ملاحظه‌اند.
- Insertion Length بدون مرجع صریح معنا ندارد؛ Immersion Length از دیواره داخلی اندازه گرفته می‌شود.
- Air Gap معمولاً بیش از ضخامت دیواره بر Response Time اثر می‌گذارد؛ سنسور Spring-Loaded و لقی کم مؤثرند.
- در گاز، طول و عایق گردن خطای رسانش را تعیین می‌کند؛ در آب این خطا عملاً ناچیز است.
- Erosion و Corrosion دو پدیده متفاوت‌اند و PN و Class برابر نیستند.
- بررسی Wake Frequency پیش از تأیید نهایی الزامی است و در سطح ۳ آمده است.

21 پرسش‌های متداول

➤ Insertion Length ترموول را چگونه تعیین کنم؟

از Immersion Length هدف (معمولاً تا حوالی خط مرکزی در لوله بزرگ) شروع کنید و ارتفاع نازل و ضخامت دیواره لوله را اضافه کنید:

$$U = H_n + t_w + l_m$$
 مرجع اندازه‌گیری را در نقشه بنویسید و طول را با بررسی Wake Frequency تأیید کنید.

➤ Thermocouple و RTD برای چه تفاوتی دارد؟

خود ترموول تفاوت ساختاری ندارد؛ تفاوت در سنسور است. RTD المانی با طول محدود دارد و Thermocouple نقطه Hot Junction دارد. قطر سنسور باید با Bore Diameter و طول ته Bore سازگار باشد.

➤ چه ماده‌ای برای ترموول مناسب است؟

پاسخ از داده سیال، دما و فشار می‌آید. SS316 / SS316L انتخاب عمومی است؛ Duplex، Hastelloy و Inconel برای سرویس‌های سخت‌تر مطرح می‌شوند. هیچ ماده‌ای بدون جدول خوردگی معتبر تأیید نمی‌شود.

➤ کدام اتصال بهتر است: Weld-in یا Threaded، Flanged؟

هیچ‌کدام مطلقاً بهتر نیست. Flanged تعویض را ساده می‌کند، Threaded فشرده‌تر است و Weld-in مسیر نشی رزوه‌ای ندارد اما تعویض آن دشوار است. انتخاب با فشار، دما، سرویس و سیاست نگهداری انجام می‌شود.

➤ چطور Response Time را کم کنم؟

قطر نوک را کاهش دهید (هندسه Tapered یا Stepped)، لقی سنسور و Bore را کم کنید، سنسور Spring-Loaded به‌کار ببرید و در صورت مجاز بودن Air Gap را با ماده رسانا پر کنید. هر کاهش ضخامت باید با بررسی استحکام و ارتعاش همراه باشد.

➤ چرا در گاز داغ قرائت پایین است؟

اغلب خطای رسانش است: ضریب جابه‌جایی گاز کم است و ساقه از گردن یا دیواره سردتر حرارت می‌گیرد یا از دست می‌دهد. طول بیشتر و عایق‌کاری گردن اثر را کم می‌کند.



22 استانداردها و منابع

1. ASME PTC 19.3 TW-2016 (R2025) – Thermowells

استاندارد حاکم بر طراحی و تأیید ارتعاش و تنش؛ متن آن در این سند در دسترس نبوده و هیچ معادله یا حد پذیرشی از آن نقل نشده است.

2. ASME B16.5 – Pipe Flanges and Flanged Fittings

مرجع ابعاد و جدول رتبه فشار-دما؛ ویرایش جاری راستی‌آزمایی نشده و عددی از آن نقل نشده است.

3. ASME B1.20.1 – Pipe Threads, General Purpose (Inch)

مرجع رزوه NPT؛ ویرایش جاری باید پیش از ارجاع رسمی کنترل شود.

4. ASME B36.10M – Welded and Seamless Wrought Steel Pipe

مرجع ابعاد لوله؛ مقادیر OD و ضخامت در این سند باید با ویرایش جاری راستی‌آزمایی شوند.

5. NACE MR0175 / ISO 15156 – Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H2S-containing environments

مرجع سرویس ترش؛ ویرایش جاری راستی‌آزمایی نشده است.

6. IAPWS-IF97 – Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam

پایه محاسبه خواص آب و بخار در موارد A و B.

7. Churchill, S. W. and Bernstein, M. (1977) – A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow

همبستگی عمومی ضریب جابه‌جایی استوانه‌ای عرضی؛ منبع باز، غیراختصاصی استاندارد.

8. WIKA – Thermowells, technical information IN 00.15

منبع ثانویه سازنده برای انواع اتصال و هندسه ساقه؛ فقط برای توضیح کیفی استفاده شده است.

داده‌های ورودی، ابعاد نازل، مشخصات ماده و ضرایب انتقال حرارت در مثال‌ها فرض آموزشی‌اند. مقادیر بدون منبع استاندارد (به‌ویژه ابعاد لوله، جدول فشار-دما و رسانایی مواد) باید پیش از استفاده در طراحی راستی‌آزمایی شوند.

منابع مرتبط NICO

پیش‌نیاز و گام بعدی

- ترموول چیست و چگونه از سنسور دما محافظت می‌کند؟ – NICO-EDU-TWL-L1-004-FA
- طراحی پیشرفته و Design Verification ترموول – NICO-EDU-TWL-L3-006-FA

تجهیزات مرتبط NICO

- سنسورهای دما، ترانسمیترهای دما و ترموول‌های NICO در گروه اندازه‌گیری دما

مشخصات، مدل‌ها و محدوده محصولات NICO باید از برگه فنی رسمی همان محصول گرفته شود؛ هیچ مشخصه محصولی در این راهنما ادعا نشده است.

