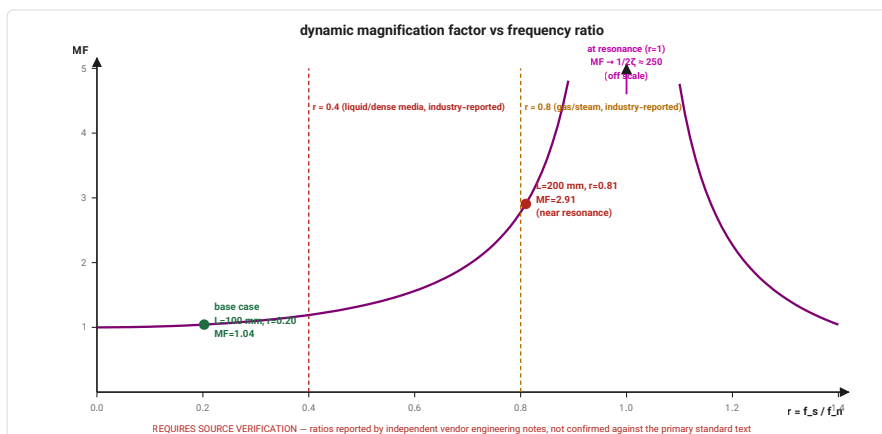


طراحی و راستی‌آزمایی مهندسی فرکانس ارتعاش ترموول

Thermowell Wake-Frequency Design and Verification – Screening to a Full Calculation

مدل فیزیکی ریزش گردابه، فرکانس طبیعی ساقه، معیار نسبت فرکانس، ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی، تنش ترکیبی و خستگی، یک مثال طراحی کارشده کامل، تحلیل حساسیت، بودجه عدم قطعیت، حالت‌های خرابی و ماتریس راستی‌آزمایی – برای مهندسان طراحی، تیم‌های EPC و مشاورانی که باید تصمیم نهایی ابعاد ساقه را با محاسبه، نه حدس، بگیرند.



شکل ۳ – ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی در برابر نسبت فرکانس

تاریخ انتشار

شهریور ۱۴۰۵ – August 2026

سطح محتوا

LEVEL 3

بازنگری

Rev00

شماره سند

NICO-EDU-TWL-L3-003-FA

1 مقدمه

راهنمای سطح ۲ همین مجموعه (NICO-EDU-TWL-L2-002-FA) یک غربالگری کیفی سه‌عاملی برای ریسک ارتعاش Thermowell ارائه داد و صریحاً از دادن آستانه عددی سرعت یا فرکانس خودداری کرد. این سند همان محاسبه را انجام می‌دهد: مدل فیزیکی ریزش گردابه، فرکانس طبیعی ساقه، نسبت فرکانس، ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی، تنش ترکیبی و ارزیابی خستگی – به‌همراه یک مثال طراحی کار شده کامل که مستقیماً ادامه مثال ۲ راهنمای سطح ۲ است.

CAUTION – محدودیت دسترسی به متن استاندارد

متن رسمی ASME PTC 19.3 TW-2016 (R2025) – استاندارد حاکم بر تحلیل دینامیکی Thermowell – در این نشست تألیف در دسترس نبوده (استاندارد Paywalled است). هیچ معادله، ثابت هندسی (C_p) یا آستانه عددی پذیرش، عیناً از متن استاندارد نقل نشده است. محتوای این سند بر دو پایه است: (۱) نظریه عمومی و غیرمحرمانه ارتعاش و مکانیک سیالات – قابل استناد به منابع باز (Blevins، کتب درسی ارتعاش) – که روش محاسبه را آموزش می‌دهد؛ و (۲) مقادیری که به‌طور مستقل توسط دو منبع مهندسی صنعتی نامرتبط (Siemens، Wika) گزارش شده‌اند و با علامت صریح REQUIRES SOURCE VERIFICATION مشخص شده‌اند. هیچ‌کدام از این دو گروه نباید بدون راستی‌آزمایی مستقیم در برابر متن مجاز استاندارد، مبنای تأیید نهایی طراحی قرار گیرد.

پس از مطالعه این راهنما خواهید توانست:

۱. فرکانس ریزش گردابه را از عدد رینولدز و عدد استروهال محاسبه کنید.
۲. فرکانس طبیعی ساقه را با یک مدل ساده‌شده تیر یک‌سرگیردار تخمین بزنید.
۳. نسبت فرکانس را محاسبه و در برابر آستانه‌های گزارش‌شده صنعتی ارزیابی کنید.
۴. ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی و اثر آن بر تنش را محاسبه کنید.
۵. تنش ترکیبی (استاتیک + دینامیک) را محاسبه و با تنش مجاز مقایسه کنید.
۶. چرا معیار فرکانس و معیار تنش دو بررسی مستقل‌اند، نه یک بررسی تکراری، توضیح دهید.
۷. حساسیت نتیجه را نسبت به طول درون‌رفت ارزیابی کنید.
۸. بودجه عدم‌قطعیت این محاسبه را بسازید و حدود اعتبار آن را بیان کنید.
۹. بگویید چه بخش‌هایی از این محاسبه پیش از تأیید نهایی طراحی نیاز به راستی‌آزمایی مستقیم دارند.

2 مبنای طراحی

DESIGN BASIS – داده‌های ورودی الزامی

۱. سیال و فاز. نوع سیال، فاز (گاز/بخار/مایع) و رفتار آن در محدوده دما-فشار سرویس.
۲. چگالی سیال ρ . در دما و فشار عملیاتی – نه در شرایط مرجع.
۳. لزجت دینامیکی سیال μ . در همان دما و فشار.

4. **سرعت جریان L.** در حداقل، عادی و حداکثر بار – هر سه باید بررسی شوند، نه فقط نقطه طراحی.
5. **قطر خارجی ساقه D.** در محل نمایان (root/tip)، بر اساس شکل ساقه انتخاب شده در سطح ۲.
6. **قطر بور سنسور d.** برای محاسبه ممان اینرسی مقطع.
7. **طول درون رفت L.** از سطح اتصال فرآیند تا نوک، طبق سطح ۲.
8. **متریال و مدول یانگ E در دمای سرویس.** نه در دمای محیط.
9. **تنش مجاز متریال mS در دمای سرویس.** از جدول مواد استاندارد کاربردی (مثلاً ASME II-D).
10. **نوع اتصال فرآیند و صلبیت تکیه گاه.** فلنجی/رزوه ای/جوشی از سطح ۲.
11. **نسبت میرایی سازه ای ζ .** وابسته به متریال و تعامل با سیال (گاز در برابر مایع).

جدول ۱ – نمادها

نماد	معنا	واحد
Re	عدد رینولدز	–
St	عدد استروهل	–
s^f	فرکانس ریزش گردابه	Hz
n^f	فرکانس طبیعی ساقه (مد اول)	Hz
r	نسبت فرکانس n^f/s^f	–
MF	ضریب بزرگ نمایی دینامیکی	–
ζ	نسبت میرایی سازه ای	–
n^C	مقدار ویژه مد اول تیر یک سرگیردار یکنواخت	–
E	مدول یانگ در دمای سرویس	Pa
I	ممان اینرسی مقطع (حلقوی، با احتساب بور)	m^4
m	جرم بر واحد طول (فلز + جرم افزوده سیال)	kg/m
i^C, d^C	ضریب درگ و ضریب لیفت مؤثر (rms)	–
σ	تنش خمشی	Pa

3 مدل فیزیکی ریزش گردابه

عبور سیال از یک مانع استوانه ای – از جمله ساقه Thermowell – گردابه هایی به صورت متناوب از دو طرف جدا می کند (Vortex Shedding). این جدایش متناوب، نیروی لیفت نوسانی تقریباً با همان فرکانس ریزش گردابه، و نیروی درگ نوسانی با فرکانس تقریباً دو برابر آن، بر ساقه وارد می کند.

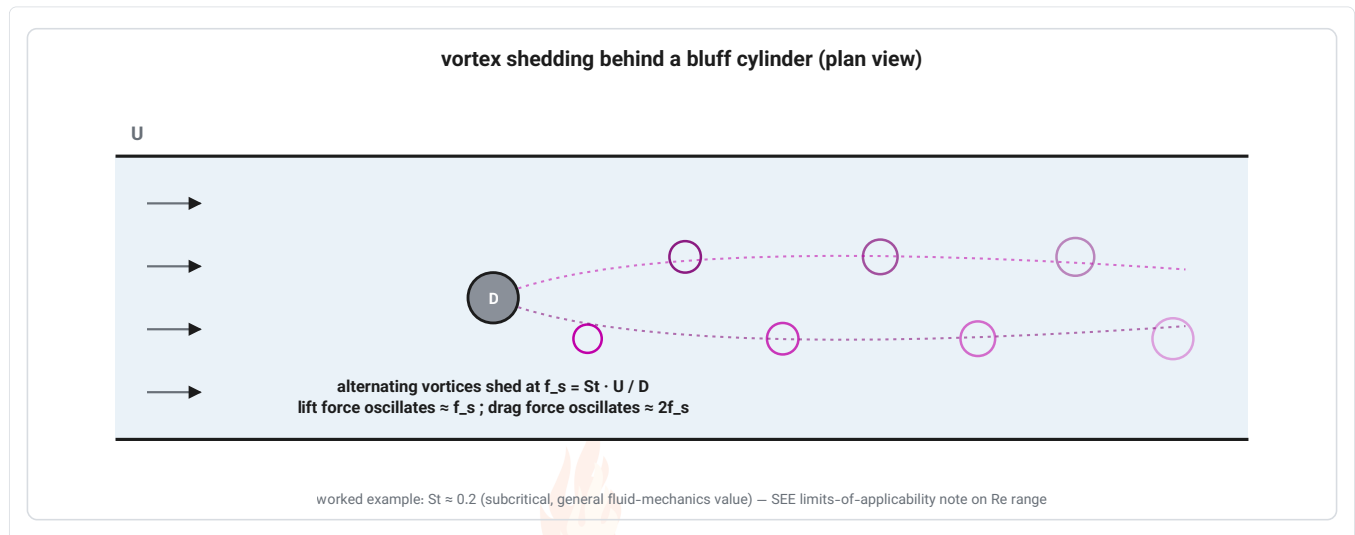
(1)

$$Re = \rho U D / \mu$$

(2)

$$f_s = St \cdot U / D$$

رابطه استروهل (رابطه ۲) یک رابطه عمومی مکانیک سیالات است، نه اختصاصی ASME PTC 19.3 TW. مقدار St خود تابع عدد رینولدز است: برای استوانه دایروی در رژیم زیربحرانی ($300 < Re < 2 \times 10^5$ تقریباً)، $St \approx 0.2$ یک مقدار عمومی شناخته شده است (منبع باز: Thermopedia، با استناد به Blevins). خارج از این بازه، St از ۰.۲ فاصله می‌گیرد و منحنی دقیق آن باید از خود استاندارد یا مرجع تخصصی گرفته شود.



شکل ۱ – ریزش گردابه پشت ساقه و رابطه آن با فرکانس‌های لیفت و درگ

4 فرکانس طبیعی ساقه

برای تشخیص خطر تشدید، فرکانس ریزش گردابه باید با فرکانس طبیعی مد اول ساقه مقایسه شود. مدل دقیق ASME PTC 19.3 TW هندسه واقعی (Stepped یا Tapered، Straight)، صلبیت تکیه‌گاه و جرم افزوده سیال را با ثابت‌های هندسی اختصاصی خود لحاظ می‌کند – این ثابت‌ها در این سند بازتولید نشده‌اند. برای آموزش روش، از مدل کلاسیک و عمومی تیر یک‌سرگیردار با مقطع یکنواخت استفاده می‌شود:

(3)

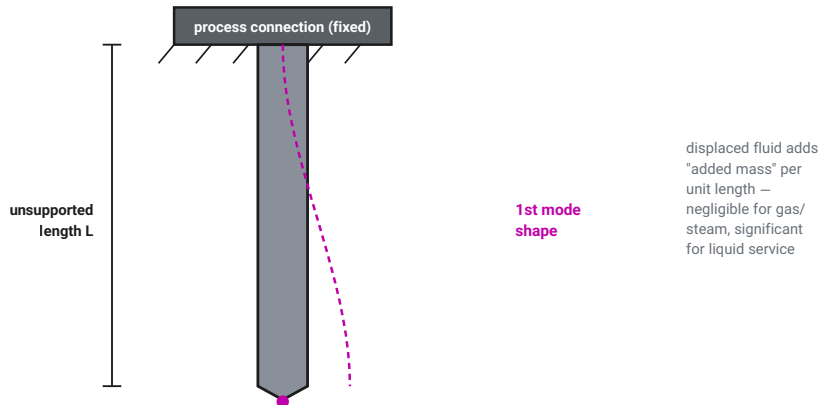
$$f_n = (C_n / 2\pi) \cdot \sqrt{EI / (m \cdot L^4)}$$

با $C_n = 3.516$ برای مد اول تیر یک‌سرگیردار یکنواخت (نتیجه کلاسیک اوپلر-برنولی، در هر کتاب درسی ارتعاش موجود است). I از مقطع حلقوی (قطر خارجی منهای بور) و m از جمع جرم فلز و جرم افزوده سیال جابه‌جاشده محاسبه می‌شود.

ENGINEERING NOTE – چرا این یک ساده‌سازی است

مدل بالا مقطع را یکنواخت فرض می‌کند. ساقه‌های Tapered یا Stepped – که راهنمای سطح ۲ دقیقاً برای کاهش جرم نوک و افزایش فرکانس طبیعی توصیه کرد – C_n متفاوتی دارند که در جداول خود استاندارد آمده و اینجا بازتولید نشده است. همچنین صلبیت تکیه‌گاه (اتصال فرآیند) در مدل بالا بی‌نهایت صلب فرض شده؛ در واقعیت یک اتصال رزوه‌ای یا فلنجی نیمه‌صلب، فرکانس طبیعی واقعی را کمی کاهش می‌دهد.

thermowell stem as a cantilever beam (in-situ idealisation)



$$f_n = (C_n / 2\pi) \cdot \sqrt{(E/I) / (m \cdot L^4)} \text{ – simplified UNIFORM cross-section illustration}$$

actual taper/step geometry, support compliance and added mass use the standard's own formulation – not reproduced here

شکل ۲ – مدل ساده شده تیر یک سرگیردار برای ساقه، با نکته جرم افزوده سیال

5 نسبت فرکانس و معیار پذیرش

با داشتن f_s و f_n ، معیار اصلی غربالگری ارتعاش نسبت فرکانس است:

$$(4) \quad r = f_s / f_n$$

REQUIRES SOURCE VERIFICATION – IMPORTANT

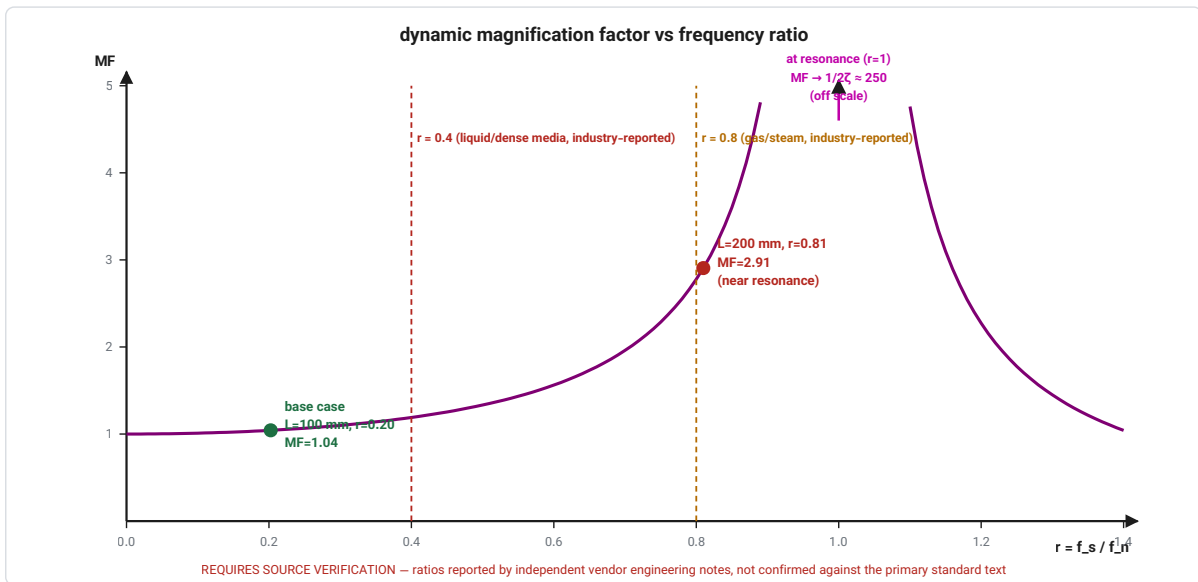
دو منبع مهندسی صنعتی مستقل – یادداشت فنی Siemens و برگه داده Wika IN 0015 – به طور همسو گزارش می کنند که ASME PTC 19.3 TW-2016 برای سرویس های عمومی $r \leq 0.8$ و برای سیال با چگالی بالا/مایع $r \leq 0.4$ را الزام می کند؛ برگه Wika علاوه بر این یک بررسی درگ در $r = 0.5$ و بررسی اصلی لیفت در $r = 1.0$ را جداگانه ذکر می کند. همسویی دو منبع مستقل، اطمینان نسبی می دهد اما جایگزین راستی آزمایی مستقیم نیست. هیچ یک از این چهار عدد را بدون تأیید از متن مجاز استاندارد، مبنای تأیید نهایی طراحی قرار ندهید.

6 ضریب بزرگ نمایی دینامیکی و میرایی

نزدیک شدن r به ۱ فقط به معنای «فرکانس ها نزدیک اند» نیست؛ دامنه نوسان و تنش دینامیکی به صورت غیرخطی بزرگ می شوند. برای یک نوسانگر یک درجه آزادی با میرایی، ضریب بزرگ نمایی دینامیکی (نتیجه کلاسیک ارتعاش اجباری) چنین است:

$$(5) \quad MF = 1 / \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}$$

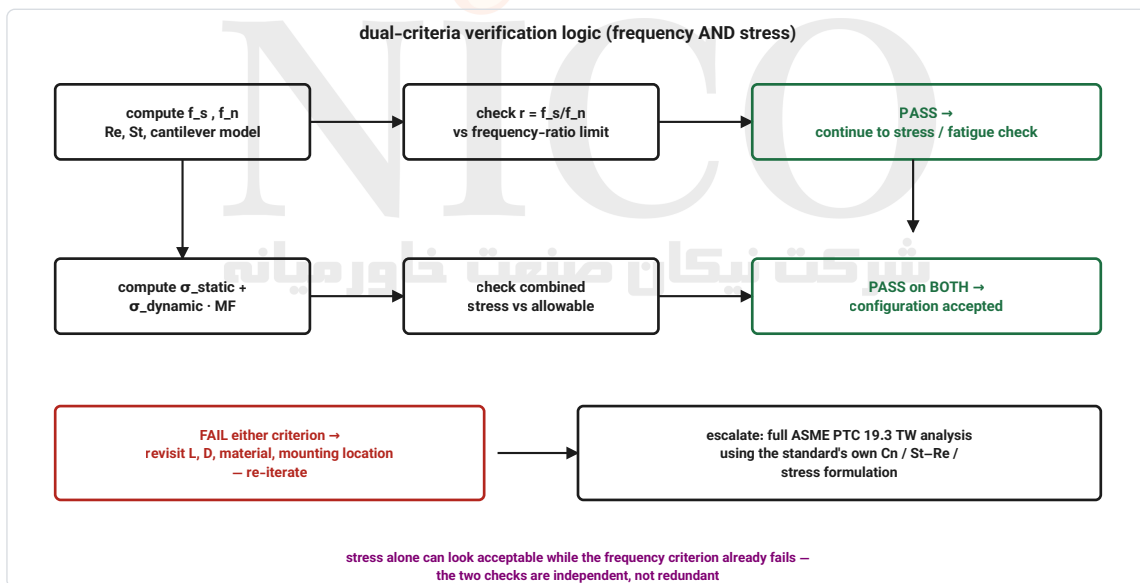
با ζ نسبت میرایی سازه ای. برای یک ساقه فلزی در سرویس گاز/بخار، میرایی معمولاً بسیار کم است ($\zeta \approx 0.001-0.005$)، مقدار عمومی **ASSUMPTION**، نه اندازه گیری شده؛ در سرویس مایع، تعامل ساقه با سیال معمولاً میرایی را افزایش می دهد. در $r = 1$ ، $MF \approx 1/2\zeta$ ، یعنی برای $\zeta = 0.002$ ، بزرگ نمایی به حدود برابر ۲۵۰ می رسد. این عدد به تنهایی نشان می دهد چرا نزدیک شدن به تشدید – حتی برای مدتی کوتاه در یک بار گذرا – می تواند به خستگی سریع ساقه بینجامد.



شکل ۳ – ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی در برابر نسبت فرکانس، با دو نقطه مثال کارشده

7 تنش ترکیبی و ارزیابی خستگی

معیار فرکانس به‌تنهایی کافی نیست: باید جداگانه بررسی شود که تنش خمشی ناشی از نیروهای درگ و لیفت – با احتساب بزرگ‌نمایی دینامیکی – از تنش مجاز متریال کمتر بماند. این دو بررسی **مستقل** از یکدیگرند، نه یک بررسی تکراری با دو نام:



شکل ۴ – منطق راستی‌آزمایی دوگانه: معیار فرکانس و معیار تنش، هر دو باید عبور کنند

(6)

$$F_d = 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D \cdot L$$

(7)

$$\sigma = M \cdot c / I = (F \cdot L) \cdot c / I$$

(8)

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{static,drag}} + \sigma_{\text{lift}} \cdot MF$$

با $C_d \approx 1.2$ برای استوانه دایروی در رژیم زیربحرانی (مقدار عمومی، شناخته شده در مکانیک سیالات) و C_l (لیفت مؤثر) به عنوان یک مقدار نوعی کوچکتر – در این سند $C_l \approx 0.2$ به عنوان **ASSUMPTION** نوعی از منابع عمومی به کار رفته، نه مقدار استاندارد. نیروی استاتیک درگ همیشه حاضر است؛ نیروی نوسانی لیفت با ضریب بزرگنمایی MF از رابطه ۵ بزرگ می شود.

ENGINEERING TIP – چرا تنش به تنهایی کافی نیست

در بخش ۹ نشان داده می شود که در یک هندسه با نسبت فرکانس نزدیک به آستانه، ضریب اطمینان تنش هنوز راحت باقی می ماند در حالی که معیار فرکانس از قبل رد شده است. علت، ماهیت خستگی است: شکست خستگی از سیکل های تکراری تنش نسبتاً کوچک رخ می دهد، نه از یک بار لحظه ای بزرگ. بررسی تنش استاتیک معادل این تجمع سیکلی را کامل نشان نمی دهد؛ به همین دلیل معیار فرکانس یک بررسی مستقل و غیرقابل حذف است.

8 مثال طراحی کار شده کامل

ادامه مثال ۲ راهنمای سطح ۲ – خط بخار DN80

WORKED EXAMPLE

داده فرآیندی (**ASSUMPTION** – مقادیر نوعی برای این مثال، نه اندازه گیری شده). بخار با چگالی $\rho = 9.0 \text{ kg/m}^3$ ، لزجت $\mu = 1.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ و سرعت $U = 35 \text{ m/s}$.

هندسه نامزد. ساقه Straight، قطر $D = 22 \text{ mm}$ ، بور $d = 8.4 \text{ mm}$ ، طول درون رفت $L = 100 \text{ mm}$ – همان طول موجودی انتخاب شده در مثال ۱ راهنمای سطح ۲. متریال 316L با $E \approx 180 \text{ GPa}$ در دمای سرویس (**ASSUMPTION**، کاهش یافته از 193 GPa دمای محیط) و $\sigma_{\text{m}} \approx 115 \text{ MPa}$ (**ASSUMPTION**، باید از جدول مواد ASME II-D در دمای واقعی گرفته شود).

گام ۱ – عدد رینولدز و فرکانس ریزش گردابه (رابطه ۱ و ۲).

$$Re = 9.0 \times 35 \times 0.022 / 1.7 \times 10^{-5} \approx 4.08 \times 10^5$$

$$f_s = 0.2 \times 35 / 0.022 \approx 318.2 \text{ Hz}$$

این Re در مرز بالایی بازه زیربحرانی تأیید شده عمومی ($Re < 2 \times 10^5$) یا کمی بالاتر از آن قرار دارد – دقیقاً نمونه ای از محدودیت روش ساده شده که در بخش ۱۱ به آن پرداخته می شود؛ محاسبه با فرض محافظه کارانه $St = 0.2$ ادامه می یابد اما این نقطه به عنوان مورد باز ثبت شده است.

گام ۲ – فرکانس طبیعی (رابطه ۳). ممان اینرسی مقطع حلقوی: $I = 1.126 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ ($11,255 \text{ mm}^4$)؛ جرم بر واحد طول (فلز + جرم افزوده ناچیز بخار): $m \approx 2.57 \text{ kg/m}$.

$$f_n = (3.516/2\pi) \cdot \sqrt{(180 \times 10^9 \times 1.126 \times 10^{-8} / (2.57 \times 0.1^4))} \approx 1571 \text{ Hz}$$

گام ۳ – نسبت فرکانس و بزرگنمایی (رابطه ۴ و ۵).

$$r = 318.2 / 1571 \approx 0.20 \rightarrow MF \approx 1.04 (\zeta = 0.002)$$

نسبت $r \approx 0.20$ با فاصله راحت زیر هر دو آستانه گزارش شده صنعتی (0.8 و 0.4) قرار دارد.

گام ۴ – تنش ترکیبی (رابطه ۶ تا ۸). نیروی استاتیک درگ $F_d = 14.55 \text{ N}$ ؛ تنش استاتیک ناشی از آن $\sigma_{\text{static}} = 1.42 \text{ MPa}$. تنش لیفت معادل استاتیک 0.24 MPa ، پس از ضرب در $MF \approx 1.04$:

$$\sigma_{\text{total}} \approx 1.42 + 0.25 \approx 1.67 \text{ MPa}$$

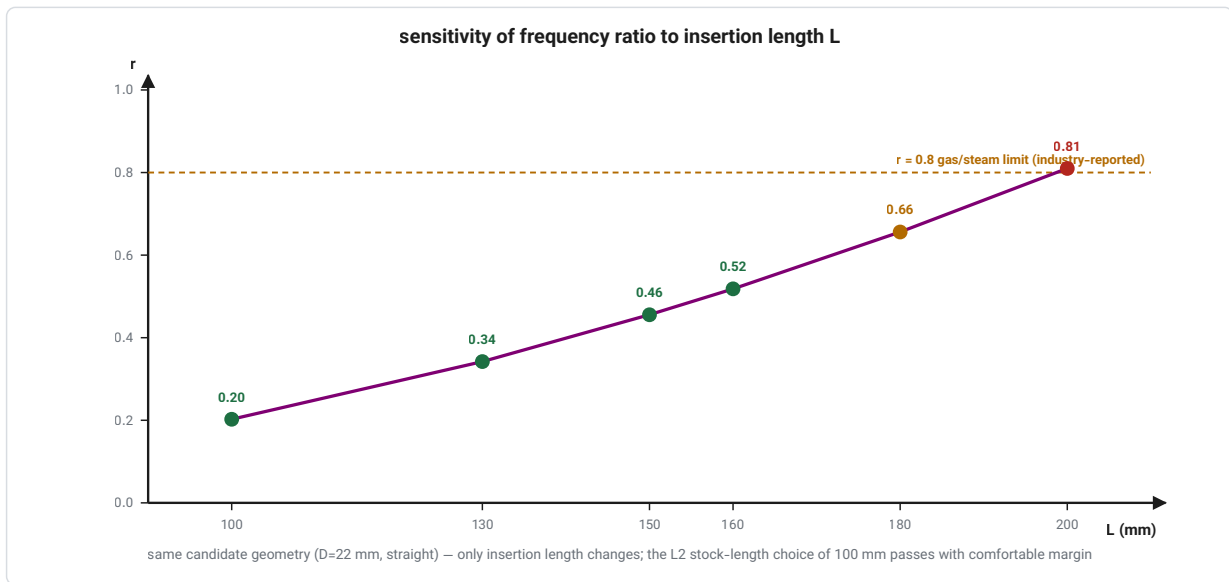
نتیجه: با هندسه نامزد (Straight, $L=100 \text{ mm}$, $D=22 \text{ mm}$)، هر دو معیار عبور می‌کنند – $r \approx 0.20$ (ضریب اطمینان فرکانسی راحت) و $\sigma_{\text{total}} \approx 1.67 \text{ MPa}$ در برابر $\sigma_{\text{mS}} \approx 115 \text{ MPa}$ (ضریب اطمینان $69 \times$). این نتیجه یک نمایش روش محاسبه است، نه تأیید نهایی طراحی – بخش ۱۴ دقیقاً مشخص می‌کند چه چیزی پیش از تأیید نهایی باید راستی‌آزمایی شود.

9 تحلیل حساسیت به طول درون‌رفت

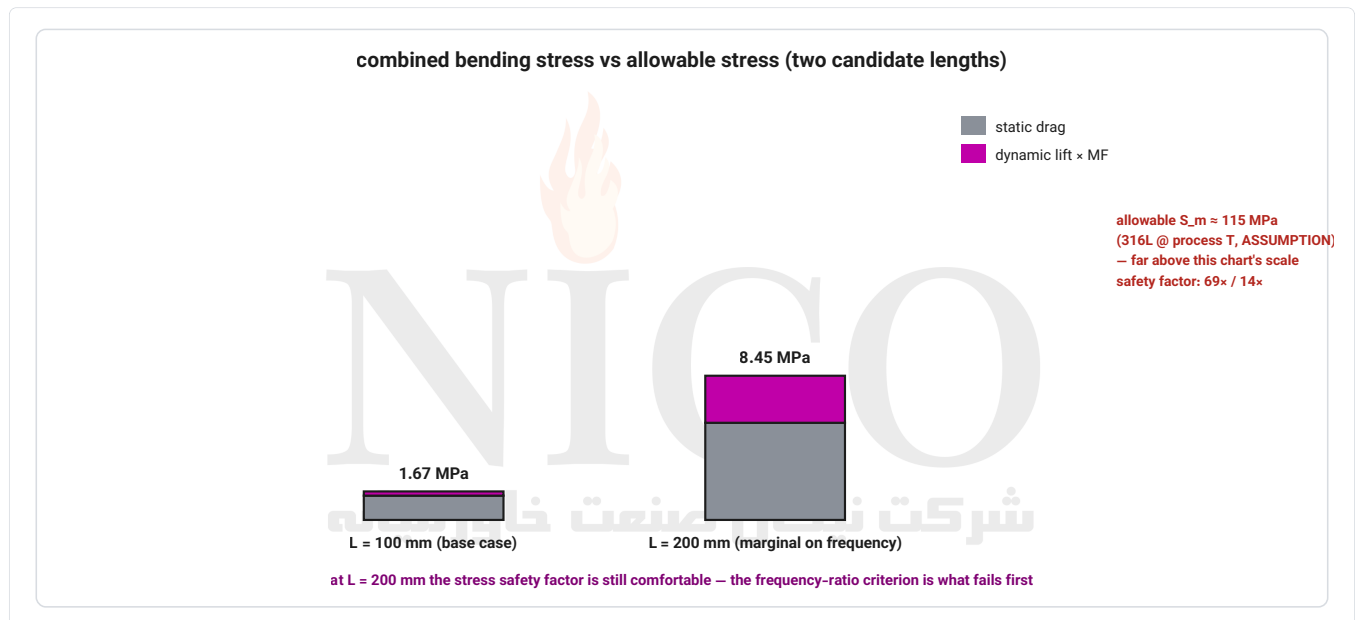
همان هندسه نامزد را در نظر بگیرید، فقط با طول درون‌رفت متفاوت – مثلاً به این دلیل که اندازه خط بزرگ‌تر است و نوک باید فاصله بیشتری تا خط مرکزی طی کند. چون f_n با L^{-2} تغییر می‌کند (رابطه ۳)، حساسیت به طول بسیار بالاست:

جدول ۲ – حساسیت نسبت فرکانس و ضریب بزرگ‌نمایی به طول درون‌رفت

وضعیت	MF	r	f_n (Hz)	L (mm)
راحت – طول موجودی سطح ۲	1.04	0.20	1571	100
قابل قبول	1.13	0.34	930	130
از آستانه سرویس مایع (۰.۴) عبور کرد	1.26	0.46	698	150
قابل قبول برای گاز/بخار	1.37	0.52	614	160
حاشیه در حال کاهش	1.76	0.66	485	180
از آستانه گاز/بخار (۰.۸) عبور کرد	2.91	0.81	393	200



شکل ۵ – حساسیت نسبت فرکانس به طول درون‌رفت، برای هندسه نامزد یکسان



شکل ۶ – تنش ترکیبی در دو طول درون‌رفت؛ ضریب اطمینان تنش در هر دو راحت است

COMMON MISTAKE – اتکا به ضریب اطمینان تنش به‌تنهایی

در $L=200 \text{ mm}$ ضریب اطمینان تنش هنوز حدود $14\times$ است – به‌ظاهر راحت – در حالی که معیار فرکانس از قبل رد شده ($r=0.81 > 0.8$). یک بررسی تنش به‌تنهایی این خطر را کاملاً از قلم می‌اندازد. همین جدول است که راهنمای سطح ۲ را واداشت طول درون‌رفت بیش از حد را به‌عنوان یک ریسک جداگانه (نه فقط «کمی بلندتر») علامت‌گذاری کند.

10 بودجه عدم‌قطعیت

نتیجه این محاسبه به دقت ورودی‌هایی مانند چگالی، لزجت، سرعت، مدول یانگ در دمای سرویس و – مهم‌تر از همه – ثابت‌های هندسی/میرایی که در این سند ساده‌سازی شده‌اند، وابسته است. جدول زیر یک بودجه عدم‌قطعیت نمایشی برای نسبت فرکانس محاسبه‌شده ارائه می‌دهد؛ اعداد آن تصویری‌اند، نه گواهی‌شده.

جدول ۳ - بودجه عدم قطعیت نمایشی برای r

مؤلفه	نوع	سهم تقریبی	مبنا
عدم قطعیت St (رژیم جریان مرزی)	B	$\pm 15\%$	خارج از بازه تأییدشده عمومی - بخش ۱۱
عدم قطعیت C_n (ساده سازی مقطع یکنواخت)	B	$\pm 10\%$	هندسه واقعی ساده سازی شده - بخش ۴
عدم قطعیت E در دمای سرویس	B	$\pm 5\%$	مقدار ASSUMPTION، نه از جدول مواد
عدم قطعیت سرعت جریان (نوسان بار)	A	$\pm 10\%$	تغییرات عملیاتی معمول
عدم قطعیت صلبیت تکیه گاه	B	$\pm 8\%$	مدل تکیه گاه صلب فرض شده

$$u_c = \sqrt{(\sum u_i^2)} \approx \sqrt{(15^2 + 10^2 + 5^2 + 10^2 + 8^2)} \approx \pm 22\% \quad (9)$$

CAUTION - عدم قطعیت با کلاس دقت اشتباه گرفته نشود

این بودجه، عدم قطعیت محاسبه مهندسی را توصیف می کند، نه دقت اندازه گیری یک تجهیز. با عدم قطعیت ترکیبی نمایشی $\pm 22\% \approx r$ ، یک نتیجه محاسبه شده $r = 0.70$ می تواند در واقع هرجایی میان $0.55 \approx$ تا $0.85 \approx$ باشد - یعنی می تواند از آستانه 0.8 عبور کرده یا نکرده باشد. این دقیقاً همان دلیلی است که یک نتیجه «نزدیک به آستانه» باید محافظه کارانه رد شود، نه به سختی پذیرفته شود.

11 حالت های خرابی

جدول ۴ - حالت خرابی، مکانیزم، تشخیص و اقدام طراحی

حالت	مکانیزم	تشخیص	اقدام طراحی
ترک خستگی نزدیک ریشه ساقه	سیکل تکراری تنش خمشی نزدیک یا در تشدید	بازرسی رنگ نفوذی/فراصوت دوره ای؛ ثبت خرابی تکرارشونده	کاهش L، افزایش D، تغییر شکل ساقه یا محل نصب
قفل شدن در تشدید (Lock-in)	بازخورد بین حرکت ساقه و ریزش گردابه، دامنه به شدت افزایش می یابد	ارتعاش قابل مشاهده/ قابل احساس در بازرسی میدانی	خروج فوری از بازه r بحرانی؛ توقف تا اصلاح
سایش فرتینگ در بور	لرزش کوچک مداوم سنسور داخل بور بدون تماس کامل	افت دقت/پاسخ سنسور در طول زمان؛ بازرسی بور هنگام تعویض	سنسور بارگذاری شده با فنر و قطر متناسب (راهنمای سطح ۱)
شل شدگی یا نشستی اتصال فرآیند	بار دینامیک تکراری روی گشتاور رزوه/گسکت فلنج	بازرسی گشتاور/آب بندی دوره ای	کنترل گشتاور طبق رویه؛ در صورت تکرار، تغییر نوع اتصال
خستگی زودرس ناشی از دست کم گرفتن سرعت حداکثر	محاسبه فقط با سرعت طراحی/ نامی، نه سرعت واقعی بار اوج	مقایسه سرعت واقعی ثبت شده با فرض طراحی	تکرار محاسبه با سرعت حداکثر واقعی؛ نه فقط نقطه نامی

12 ماتریس راستی‌آزمایی مهندسی

جدول ۵ – الزام، مقدار محاسبه‌شده و وضعیت راستی‌آزمایی

الزام	هدف	محاسبه‌شده (این سند)	حکم
نسبت فرکانس گاز/بخار	$r \leq 0.8$ REQUIRES SOURCE)VERIFICATION	$r \approx 0.20$	مشروط – روش عبور، عدد آستانه تأیید نشده
ضریب اطمینان تنش ترکیبی	$1 < \text{در برابر } m^S$	$\approx 69 \times$	مشروط – m^S از جدول واقعی مواد تأیید نشده
عدد استروهل در بازه معتبر	Re در بازه تأیید شده $St \approx 0.2$	$Re \approx 4.08 \times 10^5$ – مرز/ خارج بازه	در انتظار راستی‌آزمایی – بخش ۱۱
هندسه واقعی ساقه (غیریکنواخت)	مدل n^C اختصاصی استاندارد	مدل ساده‌شده مقطع یکنواخت	در انتظار راستی‌آزمایی
صلبیت واقعی تکیه‌گاه	مدل صلبیت اتصال فرآیند طبق استاندارد	تکیه‌گاه صلب فرض شده	در انتظار راستی‌آزمایی
ضرایب ζ, η, δ, C	مقادیر تأیید شده برای این هندسه/سرویس	مقادیر عمومی نوعی (ASSUMPTION)	در انتظار راستی‌آزمایی

ENGINEERING NOTE – معنای «مشروط»

ردیف‌های «مشروط» یعنی روش محاسبه درست اجرا شده و نتیجه با حاشیه راحت عبور کرده، اما یک یا چند ورودی آن (آستانه پذیرش، تنش مجاز) از منبع ثانویه گرفته شده، نه از متن مجاز استاندارد. تبدیل این ردیف‌ها به «قبول» نیازمند جایگزینی آن ورودی‌ها با مقادیر تأیید شده است، نه تکرار محاسبه.

13 سناریوی صنعتی

چرا L2 نتوانست به‌تنهایی پاسخ دهد

تصمیم طراحی

«مثال ۲ راهنمای سطح ۲ اتصال فلنجی Class 300 و متریال 316L را برای خط بخار DN80 انتخاب کرد، اما صریحاً نوشت: 'ابعاد ساقه مشروط به تأیید سطح ۳ – نه یک انتخاب نهایی بدون آن بررسی.' علت این محدودیت چه بود؟»

گام ۱ – چرا غربالگری کیفی سطح ۲ برای تصمیم نهایی کافی نبود

راهنمای سطح ۲ سه عامل ریسک را شناسایی کرد (سیال بخار، نسبت طول به قطر بالا، نصب نزدیک منبع اغتشاش) اما آستانه عددی نمی‌داد. این کافی بود تا بگویید «باید محاسبه شود»، اما کافی نبود تا بگویید آیا طول موجودی 100 mm واقعاً قابل قبول است یا خیر.

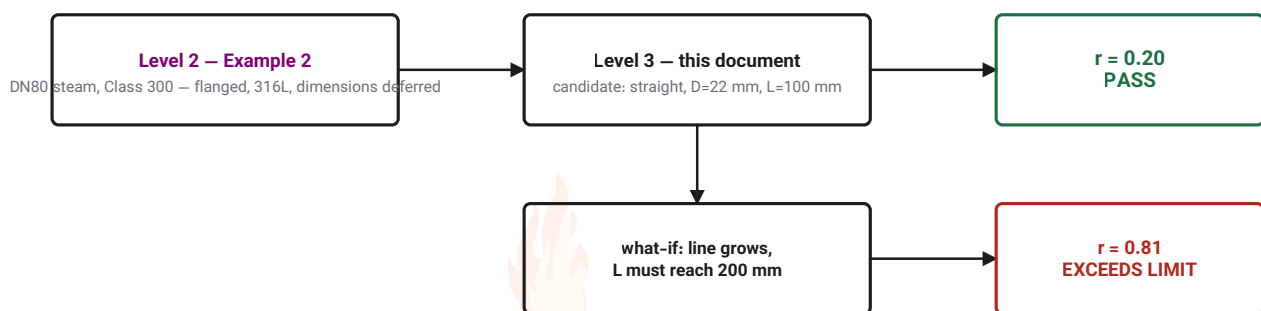
گام ۲ – چه چیزی محاسبه سطح ۳ اضافه کرد

محاسبه این سند نشان داد همان هندسه نامزد با طول 100 mm با حاشیه راحت ($r \approx 0.20$) عبور می‌کند – نتیجه‌ای که غربالگری کیفی به‌تنهایی نمی‌توانست تولید کند، چون بین «قابل قبول با حاشیه زیاد» و «قابل قبول با حاشیه کم» فرق نمی‌گذاشت.

گام ۳ – کجا این نتیجه هنوز نهایی نیست

عدد رینولدز این سرویس ($\approx 4.08 \times 10^5$) در مرز بازه تأییدشده عمومی برای $St \approx 0.2$ قرار دارد، و آستانه‌های پذیرش (0.8/0.4) هنوز REQUIRES SOURCE VERIFICATION هستند. تصمیم نهایی خرید و ساخت باید پس از راستی‌آزمایی این دو نقطه گرفته شود، نه بر مبنای این سند به‌تنهایی.

case study: escalation path from the Level 2 steam-line example



the L2 guide could not answer this question by itself – exactly why the Wake Frequency check is reserved for Level 3

شکل ۷ – مسیر تشدید از غربالگری کیفی سطح ۲ به محاسبه کمی سطح ۳

14 حدود اعتبار و رجیستر موارد باز

LIMITS OF APPLICABILITY – حدود اعتبار روش این سند

- فقط برای ساقه با مقطع تقریباً یکنواخت قابل استفاده مستقیم است.
ساقه‌های Tapered/Stepped نیازمند C_n اختصاصی هندسه‌اند که در این سند نیامده.
- فقط در رژیم زیربحرانی ($Re < 2 \times 10^5$ تقریباً) عدد استروهال ۰.۲ قابل اتکاست.
در Re بالاتر – مانند مثال کارشده این سند – منحنی St واقعی باید از منبع تخصصی گرفته شود.
- تکیه‌گاه (اتصال فرآیند) صلب فرض شده است.
اتصال رزوه‌ای یا فلنجی واقعی صلبیت محدود دارد و فرکانس طبیعی واقعی را کاهش می‌دهد.
- ضرایب C_d ، C_l و C مقادیر عمومی نوعی‌اند، نه اندازه‌گیری‌شده برای این هندسه/سیال.
مقادیر واقعی می‌توانند به‌طور محسوس از این فرض‌ها فاصله بگیرند، به‌ویژه نزدیک تشدید.
- آستانه‌های نسبت فرکانس (۰.۸/۰.۴/۰.۵/۱.۰) از منابع ثانویه‌اند، نه از متن مجاز استاندارد.
REQUIRES SOURCE VERIFICATION – بند ۱ و ۵ این سند.
- این سند تحلیل عمر خستگی کمی (شمارش سیکل، منحنی S-N) ارائه نمی‌دهد.
فقط ضریب اطمینان تنش لحظه‌ای محاسبه شده؛ ارزیابی عمر خستگی کامل، گامی جداگانه است.

جدول ۶ – رجیستر موارد باز

مورد	وضعیت	اثر بر این سند
ثابت‌های n_c برای ساقه Tapered / Stepped	REQUIRES SOURCE VERIFICATION	این سند فقط ساقه Straight را محاسبه کرد
منحنی دقیق Re-St در رژیم فرابحرانی / انتقالی	REQUIRES SOURCE VERIFICATION	مثال کار شده در مرز این رژیم است
آستانه‌های نسبت فرکانس ۰.۸/۰.۴/۰.۵/۱.۰	REQUIRES SOURCE VERIFICATION	معیار پذیرش کل سند به این اعداد متکی است
سال بازتأیید API RP 551	REQUIRES SOURCE VERIFICATION	فقط به‌عنوان مرجع عمومی نصب استفاده شده
مدل صلیبیت تکیه‌گاه فلنجی/رزوه‌ای	NOT MODELLED	فرکانس طبیعی محاسبه‌شده کران بالا (خوش‌بینانه) است

15 چک‌لیست بازبینی طراحی

☐ داده‌های فرآیندی (چگالی، لزجت، سرعت حداقل/عادی/حداکثر) از منبع واقعی – نه فرض – گرفته شده‌اند.

☐ هندسه نامزد (شکل ساقه، L ، D) از سطح ۲ به‌طور کامل مشخص است.

☐ Re محاسبه و در برابر بازه معتبر $St \approx 0.2$ بررسی شده است.

☐ فرکانس طبیعی با مدل مناسب شکل ساقه (نه لزوماً مقطع یکنواخت) محاسبه شده است.

☐ نسبت فرکانس در هر سه نقطه سرعت (حداقل/عادی/حداکثر) بررسی شده است.

☐ تنش ترکیبی با ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی محاسبه و با تنش مجاز واقعی مقایسه شده است.

☐ حساسیت نتیجه به طول درون‌رفت و قطر بررسی شده است.

☐ بودجه عدم قطعیت ساخته و حاشیه واقعی نتیجه ارزیابی شده است.

☐ ماتریس راستی‌آزمایی مرور و ردیف‌های «در انتظار راستی‌آزمایی» ثبت شده‌اند.

☐ آستانه‌های پذیرش و ثابت‌های هندسی از متن مجاز ASME PTC 19.3 TW-2016 – نه از این سند به‌تنهایی – برای تأیید نهایی گرفته شده‌اند.

☐ در صورت نتیجه نزدیک به آستانه، تصمیم محافظه‌کارانه (رد یا اصلاح هندسه) گرفته شده، نه پذیرش با حاشیه کم.

16 جمع‌بندی

این سند روش کامل محاسبه فرکانس بیداری (Wake Frequency) را - از ریزش گردابه تا نسبت فرکانس، بزرگ‌نمایی دینامیکی و تنش ترکیبی - با یک مثال عددی کامل نشان داد. هندسه نامزد ادامه‌یافته از سطح ۲ (DN80، بخار، Straight، $L=100\text{ mm}$) با حاشیه راحت روی هر دو معیار عبور کرد، اما نتیجه به‌طور صریح «مشروط» اعلام شد: چهار مقدار کلیدی - دو آستانه نسبت فرکانس، منحنی $Re-St$ در رژیم بالای زیربحرانی، و ثابت‌های هندسی ساقه غیریکنواخت - هنوز نیازمند راستی‌آزمایی مستقیم در برابر متن مجاز ASME PTC 19.3 TW-2016 هستند.

جمع‌بندی نکات کلیدی

- معیار فرکانس ($r=f_s/f_n$) و معیار تنش، دو بررسی مستقل‌اند - عبور از یکی، عبور از دیگری را تضمین نمی‌کند.
- فرکانس طبیعی با L^{-2} تغییر می‌کند - طول درون‌رفت مهم‌ترین متغیر قابل‌کنترل طراحی است.
- نزدیک تشدید، ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی می‌تواند به دهها برابر برسد؛ خرابی خستگی از تجمع سیکل، نه یک بار لحظه‌ای، رخ می‌دهد.
- آستانه‌های عددی این سند ($0.8/0.4/0.5/1.0$) از منابع ثانویه‌اند و پیش از تأیید نهایی طراحی باید راستی‌آزمایی شوند.
- بودجه عدم‌قطعیت نشان می‌دهد یک نتیجه «نزدیک به آستانه» می‌تواند در واقع رد یا قبول باشد - تصمیم باید محافظه‌کارانه گرفته شود.
- خرابی تکرارشونده در همان الگو (سناریوی سطح ۲) دقیقاً همان نشانه‌ای است که این محاسبه توضیح می‌دهد: بار دینامیک سیستماتیک، نه کیفیت قطعه.

17 پرسش‌های متداول

آیا می‌توان بدون محاسبه فرکانس، فقط با محاسبه تنش، ایمنی ترموول را تأیید کرد؟

خیر. بخش ۹ نشان داد هندسه‌ای با ضریب اطمینان تنش راحت ($\approx 14\times$) هنوز می‌تواند معیار فرکانس را رد کند. خرابی خستگی نزدیک تشدید از تجمع سیکل تنش نسبتاً کوچک رخ می‌دهد، نه از یک تنش لحظه‌ای بزرگ که بررسی استاتیک آن را نشان دهد.

چرا این سند آستانه‌های ۰.۴ و ۰.۸ را «REQUIRES SOURCE VERIFICATION» علامت زده؟

این اعداد از دو یادداشت فنی سازندگان (نه از متن مجاز استاندارد) گرفته شده‌اند. همسویی دو منبع مستقل اطمینان نسبی می‌دهد، اما تأیید نهایی طراحی باید این اعداد را مستقیماً در برابر متن خریداری‌شده ASME PTC 19.3 TW-2016 بررسی کند.

چرا فرمول فرکانس طبیعی این سند «ساده‌شده» نامیده شده؟

چون مقطع ساقه را یکنواخت فرض می‌کند و تکیه‌گاه را کاملاً صلب می‌گیرد. ساقه‌های Tapered یا Stepped و انعطاف واقعی اتصال فرآیند، ثابت‌های متفاوتی نیاز دارند که در جداول اختصاصی خود استاندارد آمده‌اند.

اگر نسبت فرکانس محاسبه‌شده دقیقاً روی آستانه (مثلاً ۰.۷۹) باشد چه باید کرد؟

بودجه عدم‌قطعیت بخش ۱۰ نشان می‌دهد نتیجه‌ای این‌قدر نزدیک به آستانه می‌تواند در واقع بالاتر از آن باشد. رویه محافظه‌کارانه، رد این هندسه و اصلاح طول یا قطر است، نه پذیرش با حاشیه کم.

چرا مثال کارشده این سند دقیقاً همان طول درون رفت مثال ۱ سطح ۲ را استفاده کرد؟

برای نشان دادن اینکه محاسبه سطح ۳ می‌تواند یک انتخاب سطح ۲ را «مشروط به تأیید» به «تأییدشده با حاشیه مشخص» تبدیل کند – بدون تغییر هندسه، فقط با اضافه کردن محاسبه واقعی.

آیا نتایج عددی این سند برای خرید یا ساخت واقعی قابل استفاده‌اند؟

نه به تنهایی. ماتریس راستی‌آزمایی بخش ۱۲ به صراحت هر ردیف را «مشروط» یا «در انتظار راستی‌آزمایی» اعلام می‌کند. این سند روش و ساختار محاسبه را نشان می‌دهد؛ تأیید نهایی نیازمند جایگزینی ورودی‌های علامت‌گذاری شده با مقادیر تأییدشده از متن مجاز استاندارد و داده واقعی پروژه است.

18 استانداردها و منابع

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

استاندارد اصلی حاکم؛ متن آن در این نشست در دسترس نبوده – هیچ معادله یا ثابت هندسی از آن نقل نشده است.

2. Blevins, R. D. – Flow-Induced Vibration (general reference, cited via Thermopedia)

مبنای عمومی رابطه استروهاال و رفتار St در رژیم زیربحرانی؛ منبع باز، غیراختصاصی استاندارد.

3. Siemens – Thermowell stress calculation as per ASME PTC 19.3-TW2016 (technical note)

منبع گزارش آستانه‌های نسبت فرکانس ۰.۸/۰.۴ – REQUIRES SOURCE VERIFICATION.

4. WIKA – Wake frequency calculation, data sheet IN 0015

منبع دوم و مستقل برای همان آستانه‌ها، و برای تفکیک بررسی درگ (۰.۵) از لیفت (۱.۰) – REQUIRES SOURCE VERIFICATION.

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

روش‌شناسی ترکیب عدم قطعیت (RSS) به کاررفته در بخش ۱۰.

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

مرجع ابعاد لوله؛ در تعیین قطر داخلی لوله در سطح ۲ استفاده شده، در این سند فقط برای پیوستگی سناریو ارجاع داده می‌شود.

7. API RP 551 – Process Measurement Instrumentation

راهنمای عمومی نصب؛ سال بازتأیید جاری تأیید نشده – REQUIRES SOURCE VERIFICATION.

شرکت نیکان صنعت خاورمیانه

منابع مرتبط NICO

ادامه همین موضوع

• ترموول چگونه سنسور دما را از فرآیند جدا نگه می‌دارد؟ – NICO-EDU-TWL-L1-001-FA

• راهنمای مهندسی انتخاب و نصب ترموول – NICO-EDU-TWL-L2-002-FA

مرتبط از دسته اندازه‌گیری دما

• سیگنال 4–20 mA چیست؟ – NICO-EDU-SIG-L1-001-FA

این راهنما یک سند آموزشی-مهندسی مفهومی است و هیچ مشخصه یا مدل محصول خاصی در آن ادعا نشده است.