



AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

ویرایش یازدهم
سال ۲۰۱۰

آموزش استاندارد API 610

گفتار چهاردهم: تست پمپ های API 610

TESTING OF API 610 PUMPS

تست پمپ های API 610

- در این بخش الزامات استاندارد مهم ترین تست های پمپ های سانتریفیوژ ارائه می گردد.
این تست ها شامل:

(۱) بازرسی متریال محفظه فشار

(۲) تست هیدرواستاتیکی

(۳) تست بالانس دینامیکی

(۴) تست عملکرد هیدرولیکی Performance

(۵) تست ارتعاش

(۶) تست NPSH

تست NPSH جزو تست های آپشنال می باشد.

Pressure Casing
Material Inspection

Hydrostatic Test

Balancing Test

Performance Test

Vibration Test

NPSH Test

بازرسی متریال محفظه فشار



- مطابق بند ۸,۲,۲,۱ متریال محفظه های فشار باید بر طبق الزامات جدول ۱۴ بازرسی شود.

اگرچه پمپ برای فشار و دمای مشخص طراحی می شود و پوسته مطابق الزامات این استاندارد تست هیدرواستاتیکی می شود، اما این به تنهایی گارانتی نمی کند که متریال کیفیت مناسبی برای سرویس عملکرد دارد. کیفیت ریخته گری به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر تغییرات در فرآیند تولید متریال می باشد. استانداردهای متریال مانند ASTM حداقل الزامات را برای خود متریال فراهم می کنند، اما ریخته گری می تواند در معرض انقباض و Shrinkage، تخلخل گازی Gas porosity، ترک های گرم، اختلاط ماسه Sand Inclusion، تعمیرات جوشکاری نامناسب و مانند آن باشد. به علاوه، برخی متریال ها گرایش به ترک های مرز دانه بندی دارند که می تواند تحت تنش های کارکرد ناشی از دما، فشار، ارتعاش و کرنش لوله کشی، گسترش پیدا کند.

بازرسی متریال محفظه فشار – ادامه

Table 14 — Pressure casing material inspection requirements

Type of component	Requirements by inspection class ^a		
	I	II	III
—	Minimum	> 80 % MAWP and > 200 °C (392 °F)	< 0,5 SG or > 200 °C (392 °F) and < 0,7 SG, or > 260 °C (500 °F) Extremely hazardous services ^g
Casing ^b : cast	VI	VI, plus MT or PT of critical areas	VI, plus MT or PT of critical areas, plus RT or UT of critical areas
Casing ^b : wrought ^c	VI	VI, plus MT or PT of critical areas	VI, plus MT or PT (critical areas), plus UT (critical areas)
Nozzle weld: casing	VI, plus 100 % MT or PT	VI, plus 100 % MT or PT	VI, plus 100 % MT or PT plus RT (100 %)
Auxiliary connection welds ^d	VI	VI, plus MT or PT	VI, plus MT or PT (100 %)
Internals	VI	VI	VI
Auxiliary process piping: socket-welded	VI	VI, plus 100 % MT or PT	VI, plus 100 % MT or PT
Auxiliary process piping: butt-welded	VI, plus 5 % RT	VI, plus 100 % MT or PT and 5 % RT	VI, plus 100 % MT or PT and 10 % RT

a: VI: بازرسی ظاهری، RT: بازرسی رادیوگرافی

MT: بازرسی ذرات مغناطیسی، PT: بازرسی مایع نافذ، UT: آزمون التراسونیک،

b: منظور از Casing تمام قطعاتی که در مرز فشار پوسته یک پمپ تکمیل شده می باشد (مانند خود پوسته و قطعاتش مانند نازل ها، فلنج ها و نظایر آن که به پوسته متصل شده است). / منظور از Critical areas موقعیت های نازل ها مکش و رانش و محل هایی که ضخامت دیواره پوسته تغییر می کند. سازنده باید جزئیات مناطق بحرانی را برای بازرسی های MT/PT/RT/UT را به منظور تایید مشتری پیشنهاد کند.

c: متریال Wrought شامل فورجینگ، Plate و قطعات تیوب مانند است.

d: به خاطر هندسه پیچیده و تغییرات ضخامت، RT اتصالات جانبی پوسته که Butt` weld می باشد، عملی نیست.

e: سرویس های Extremely hazardous توسط خریدار مشخص می شود.

بازرسی متریال محفظه فشار – ادامه

Table 15 — Materials inspection standards

Type of inspection	Methods	Acceptance criteria	
		For fabrications	For castings
Radiography	ASME BPVC, Section V, Articles 2 and 22	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, UW-51 (for 100 % radiography) and UW-52 (for spot radiography)	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 7
Ultrasonic inspection	ASME BPVC, Section V, Articles 5 and 23	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 12	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 7
Liquid-penetrant inspection	ASME BPVC, Section V, Articles 6 and 24	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 8	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 7
Magnetic-particle inspection	ASME BPVC, Section V, Articles 7 and 25	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 6	ASME BPVC, Section VIII, Division 1, Appendix 7
Visual Inspection (all surfaces)	ASME BPVC, Section V, Article 9	In accordance with the material specification and the manufacturer's documented procedures	MSS SP-55

- مطابق بند ۸,۲,۲,۵ اگر طور دیگری مشخص نشده باشد، روش های بازرسی و معیارهای پذیرش باید مطابق با جدول ۱۵ باشد. اگر تست های اضافی PT/MT/UT/RT برای جوش ها یا متریال ها توسط مشتری مشخص شده باشد، روش های بازرسی و معیارهای پذیرش آنها نیز مطابق با جدول ۱۵ است.

بازرسی متريال محفظه فشار – PMI

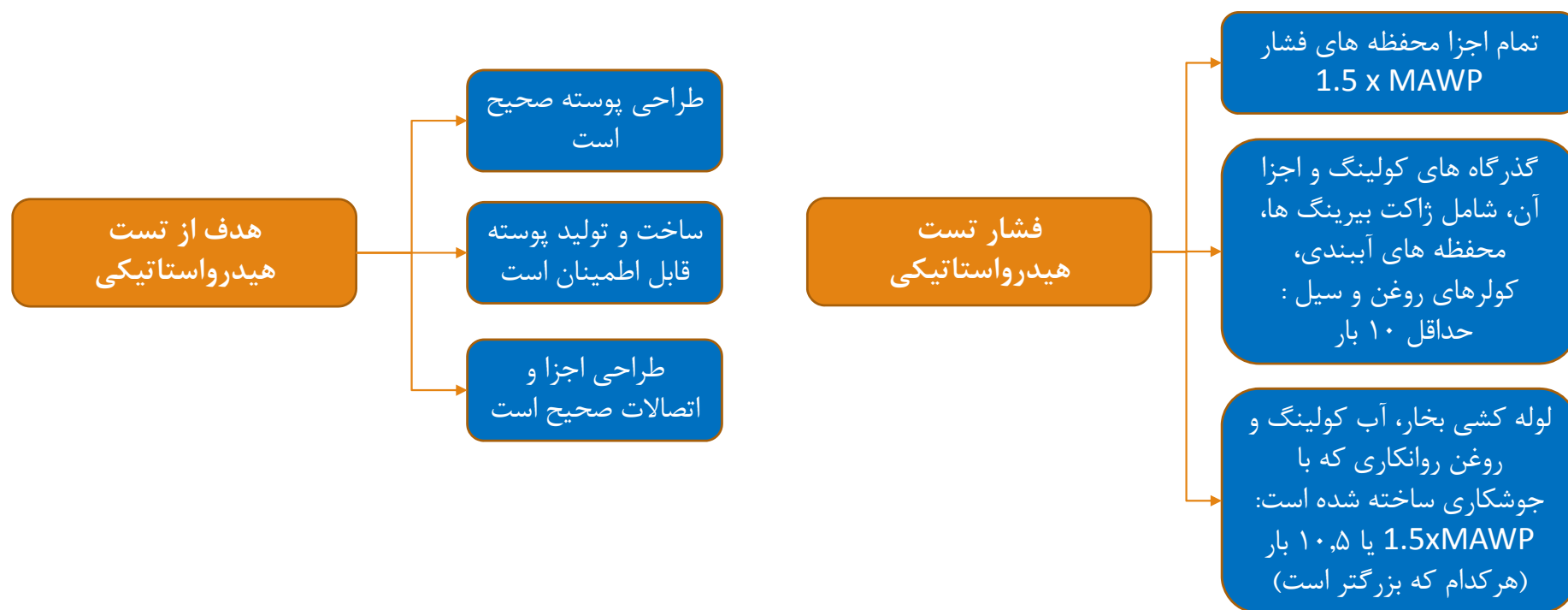
- مطابق بند ۸,۲,۲,۸ اگر مشخص شده باشد، قطعات مرزی فشاری

Pressure boundary parts با متريال آلیاژی باید تست Positive material identification (PMI) شوند. خریدار و سازنده باید روی قطعاتی که باید تست شوند، رویه های مورد استفاده و معیارهای پذیرش توافق کنند. تنها تکنیک هایی که نتایج مقداری می دهند باید استفاده شود. گزارش های Mill test، گواهینامه های ترکیب متريال، حک ظاهری یا مارکینگ **نباید** به عنوان جایگزینی برای تست PMI مورد توجه قرار گیرد.

PMI برای تمایز بین گریدهای مختلف کربن استیل در دسترس نیست.



تست هیدرواستاتیکی



تست هیدرواستاتیکی – خصوصیات سیال تست



- مطابق بند ۸,۳,۲,۸ مقدار کلراید سیال برای تست متریال استنلس استیل آستنیتی نباید بیشتر از ۵۰ mg/kg (50 ppm) باشد. به منظور جلوگیری از رسوب کلراید در نتیجه خشک شدن و تبخیر، تمامی سیال باقیمانده پس از نتیجه گیری از تست، باید از قطعات تست شده خارج شود. مقدار کلراید به خاطر جلوگیری از ترک خوردگی تنش Stress-Corrosion cracking محدود شده است.

تست هیدرواستاتیکی – مدت زمان تست



Hydrostatic Test Stand

- 1) Water Tank
- 2) Pump Casing (Part to be subjected to Hydro test)
- 3) Piston Pump, Max Press.: 150 Bar
- 4) Calibrated Pressure Gauge (Oil Filled)

- مطابق بند ۸,۳,۲,۱۱ تست ها باید برای مدت زمان کافی انجام شود تا آزمون قطعات تحت فشار تکمیل شود. تست هیدرواستاتیکی رضایت بخش است اگر هیچگونه نشتی از قطعات تحت فشار و اتصالات آن در طول **مدت ۳۰ دقیقه** اتفاق نیفتد.

اگر بین خریدار و سازنده توافق شده باشد، قطعات فشاری سنگین و بزرگ می توانند مدت زمان بیشتری نیاز داشته باشند.

تست هیدرواستاتیکی – نحوه تست

- مطابق بند ۸,۳,۲,۲ تمامی قطعات محفظه فشار باید به طور مونتاژ شده تست هیدرواستاتیکی شوند.

- مطابق بند ۸,۳,۱,۳ در طول تست هیدرواستاتیکی مکانیکال سیل ها نباید استفاده شوند. (اما در طول تست Running یا Performance استفاده می شوند).

- پمپ های دو پوسته ای، پمپ های طبقاتی افقی، پمپ های سری OH6 که مطابق بند ۶,۳,۶ ممکن است بخش های مختلف پوسته برای فشارهای مختلفی طراحی شده باشد، و همچنین پمپ های خاص که توسط مشتری تأیید شده باشد، ممکن است بخش های مختلف پوسته، جداگانه تست هیدرواستاتیک شوند.

- اگر طور دیگری مشخص نشده باشد، اجزا محفظه پمپ های OH تک طبقه با قطر متوسط گسکت ۶۱۰ میلیمتر یا کمتر، ممکن است به صورت اجزا تست شوند.

تست بالانس

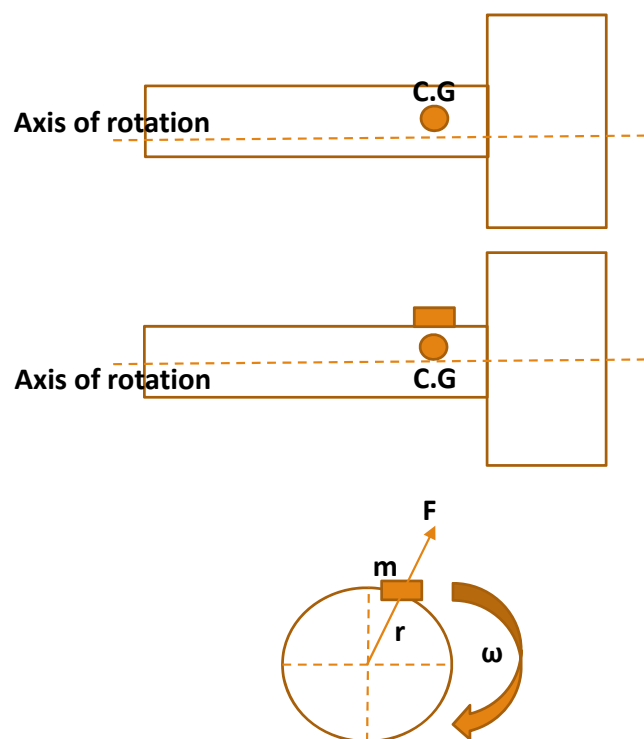


- مطابق بند ۶,۹,۴,۱ پروانه ها، Balancing Drum و قطعات دوار مشابه باید بالانس دینامیکی مطابق با استاندارد ISO 1940-1 گرید ۲,۵ شوند. جرم میله arbour استفاده شده برای بالانس نباید از جرم قطعه ای که بالانس می شود، بیشتر باشد.

- محورها نیازی به بالانس ندارند.

- برای روتور پمپ های تک طبقه BB1 و BB2 سازنده ممکن است به جای بالانس تک تک قطعات دوار اصلی، روتور مونتاژ شده (با قطعات Interference fit) را مطابق بخش ۹,۲,۴,۲ بالانس کند.

تست بالانسی – انواع نابالانسی (استاتیک)



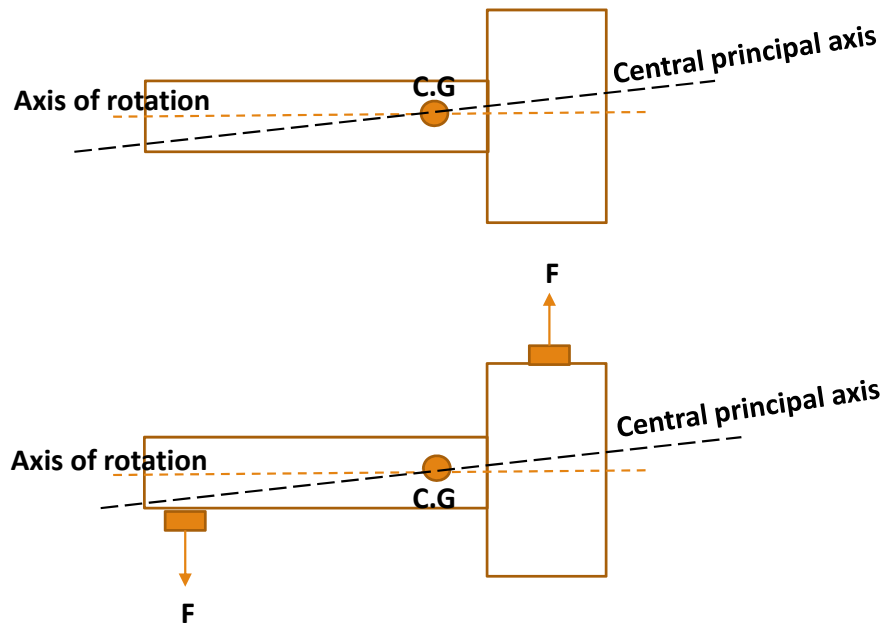
– نابالانسی استاتیک: شرایطی که مرکز جرم بر محور چرخش منطبق نمی باشد.

نابالانسی استاتیک حالت ایده آل است.

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad n[\text{rpm}]$$

تست بالانسی – انواع نابالانسی (کوپل)

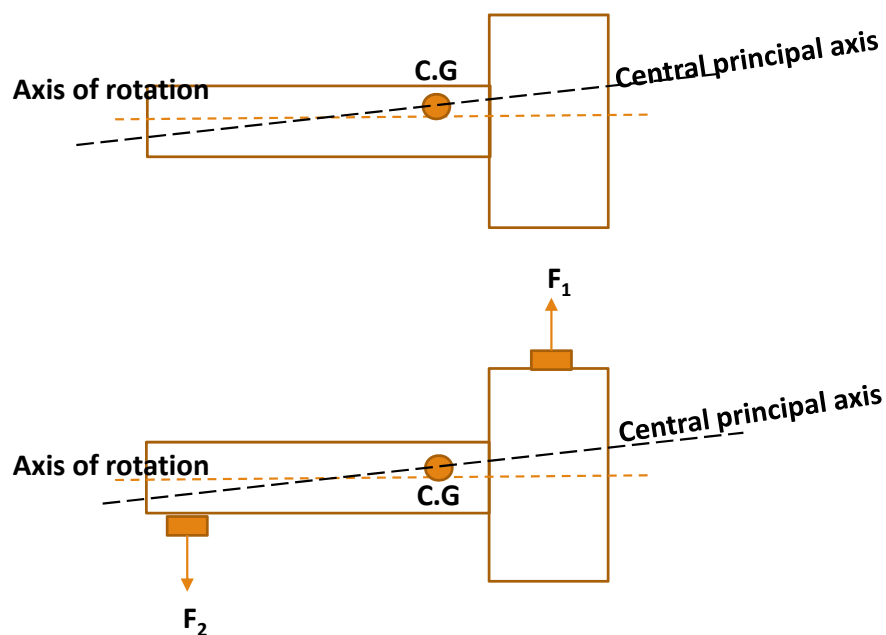


– نابالانسی کوپل: شرایطی که محور اصلی مرکز جرم با محور دوران موازی نیست. در این حالت اگرچه روتور از لحاظ استاتیکی بالانس می باشد، اما کوپل نابالانسی حول مرکز جرم ایجاد می شود.

در این نابالانسی، مرکز جرم بر محور چرخش و محور اصلی مرکز جرم منطبق است.

نابالانسی کوپل حالت ایده آل است.

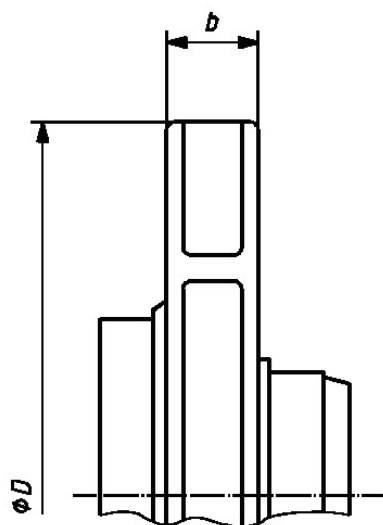
تست بالانسی – انواع نابالانسی (دینامیکی)



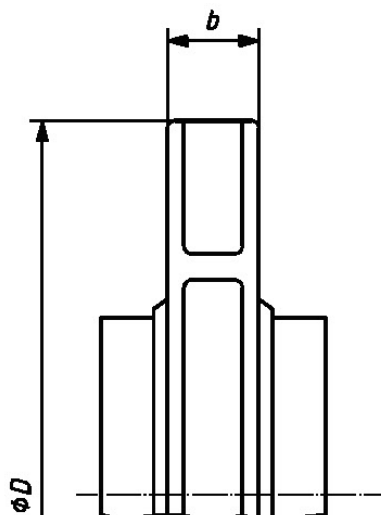
- نابالانسی دینامیکی: عمومی ترین حالت نابالانسی حالتی است که محور اصلی مرکز جرم موازی با محور چرخش نیست و آن را در نقطه مرکز جرم قطع نمی کند. همچنین نابالانسی دینامیکی را نابالانسی دو صفحه نیز می گویند. چرا که اصلاحات باید در دو صفحه انجام گیرد. نابالانسی دینامیکی تمام نابالانسی های موجود در روتور را شامل می شود. این نوع نابالانسی را تنها می توان با دستگاه های بالانس اندازه گیری کرد.

تست بالانس – ادامه

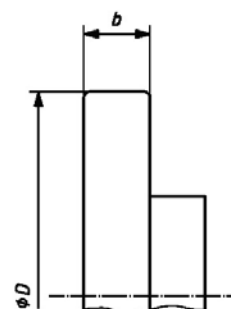
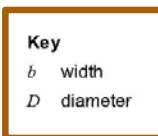
- مطابق بند ۶,۹,۴,۲ بالانس اجزا ممکن است به صورت تک صفحه ای باشد اگر نسبت D/b (شکل ۳۵) ۶ یا بیشتر باشد.



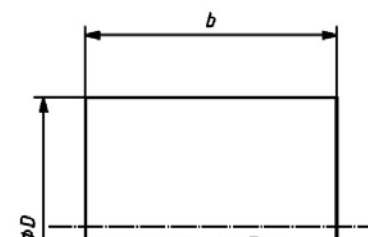
a) Single-suction impeller



b) Double-suction impeller



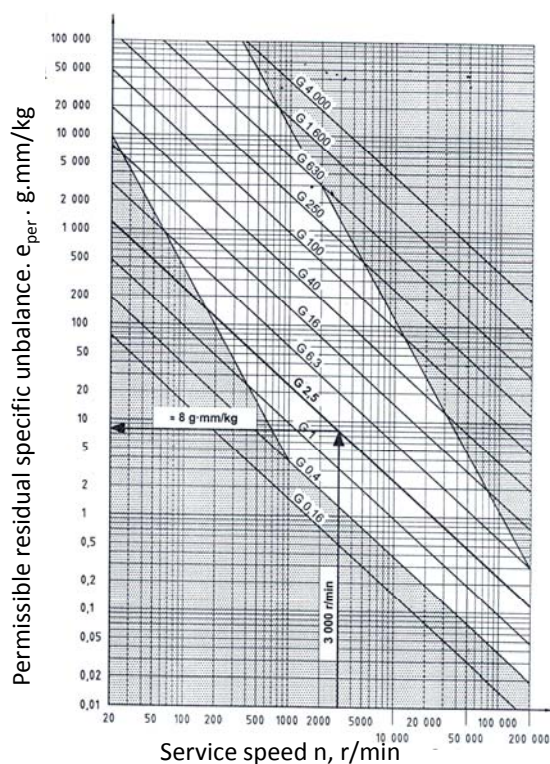
c) Thrust collar



d) Balancing drum

Figure 35 — Rotating component dimensions to determine if single-plane balancing is allowable

تست بالانس – ادامه



بر پایه تجربیات
 عمومی محدوده
 سفید محدوده
 استفاده معمولی
 می باشد

- مطابق بند ۶,۹,۴,۴ اگر مشخص شده باشد، Balancing drums و قطعات

اجزا مشابه باید بالانس دینامیکی مطابق با گرید ۱ استاندارد ISO 1940.1

شوند.

- مطابق توضیحات فنی ذیل همین بند، برای قطعاتی که با گریدهای بالانس

کمتر از G 2.5 تست می شوند، عملیات بالانس به دلیل مقدار جرم خارج از

مرکز mass eccentricity بسیار کم، تکرار پذیر نمی باشد.

تست بالانس – اصطلاحات تخصصی ISO 1940.1

– عدم توازن باقی مانده مجاز U_{per} را می توان بر اساس درجه کیفیت توازن G از رابطه زیر بدست آورد :

$$U_{per} = 1000 \frac{(e_{per} \cdot \Omega) \cdot m}{\Omega}$$

U_{per} مقدار عددی عدم توازن باقی مانده مجاز برحسب (gr.mm) می باشد.

$(e_{per} \cdot \Omega)$: مقدار عددی درجه کیفیت توازن انتخاب شده برحسب G

m : مقدار عددی جرم روتور که بر حسب کیلوگرم بیان می شود. (kg)

و Ω : مقدار عددی سرعت زاویه ای در سرعت کارکرد می باشد برحسب رادیان بر ثانیه بیان می شود که $\Omega = n/10$ و n سرعت کارکرد بر حسب رادیان بر ثانیه می باشد.

تست بالانس – اصطلاحات تخصصی ISO 1940.1

– مثال ۱: برای پروانه پمپ سانتریفیوژی مطابق با استاندارد API 610 به جرم ۴۰ کیلوگرم که در دور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می چرخد، مقدار عدم توازن باقیمانده مجاز چقدر می باشد؟

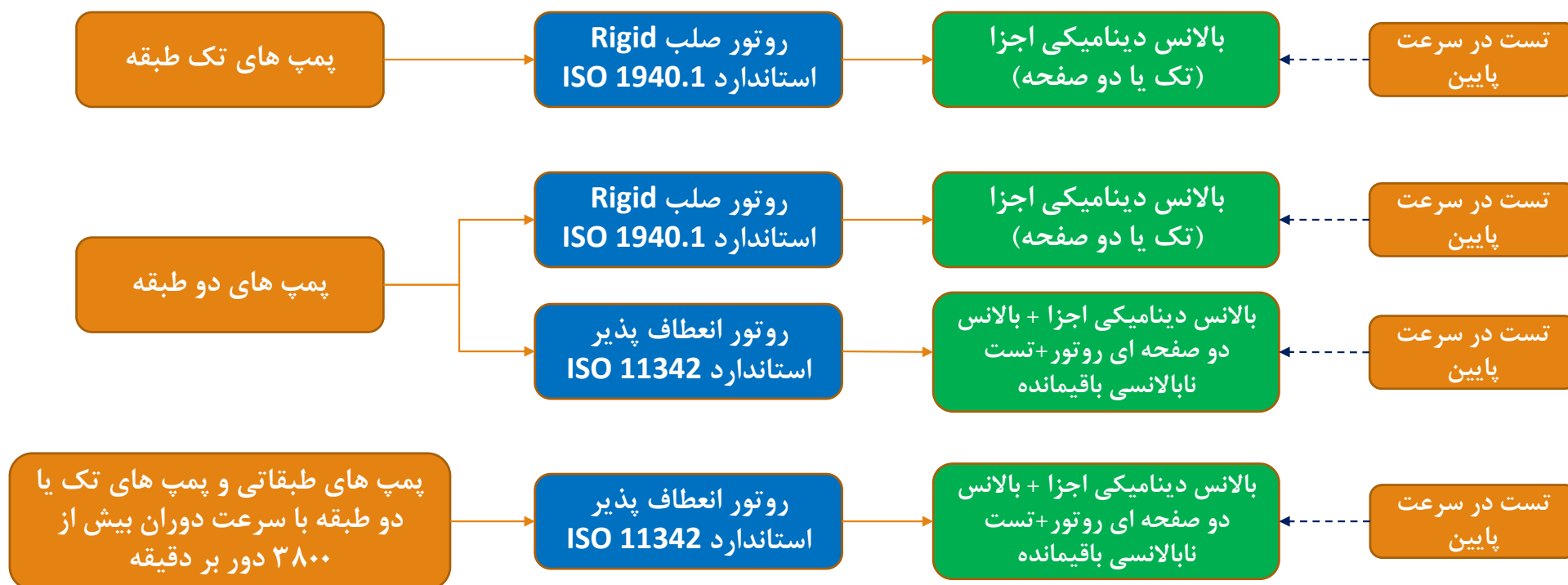
حل: گرید بالانس را ۲,۵ در نظر می گیریم:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314.2 \text{ rad / s}$$

$$U_{per} = 1000 \frac{2.5 \cdot 40}{314.2} = 318.27 \text{ gr.mm}$$

این بدین معناست که اگر قطر پروانه ۳۱۸ میلیمتر باشد، حداکثر ۰,۵ گرم نابالانسی در این قطر مجاز می باشد.

تست بالانس پمپ های API 610



Performance **تست**

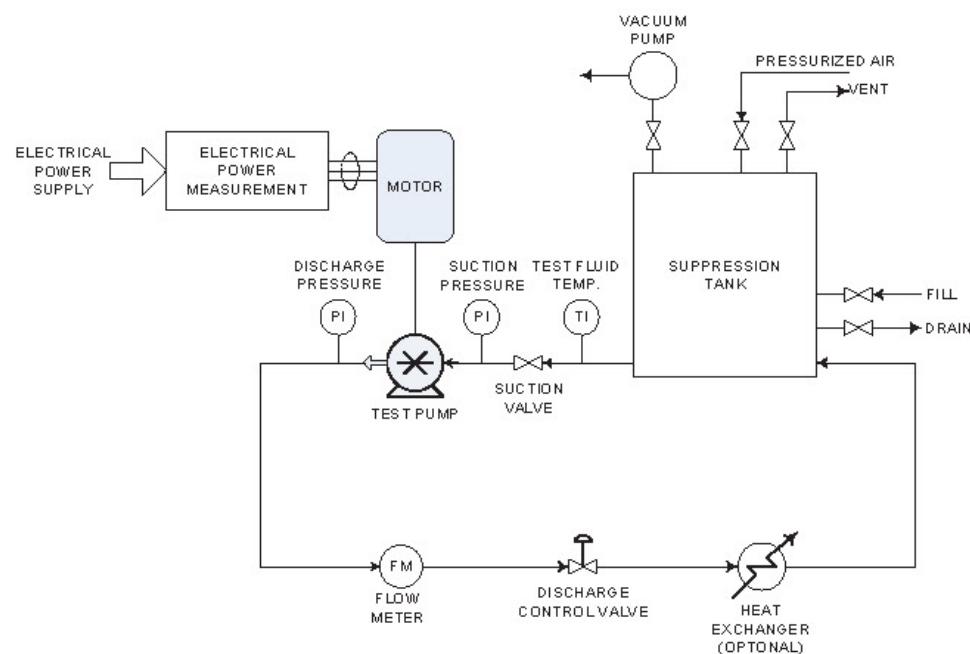
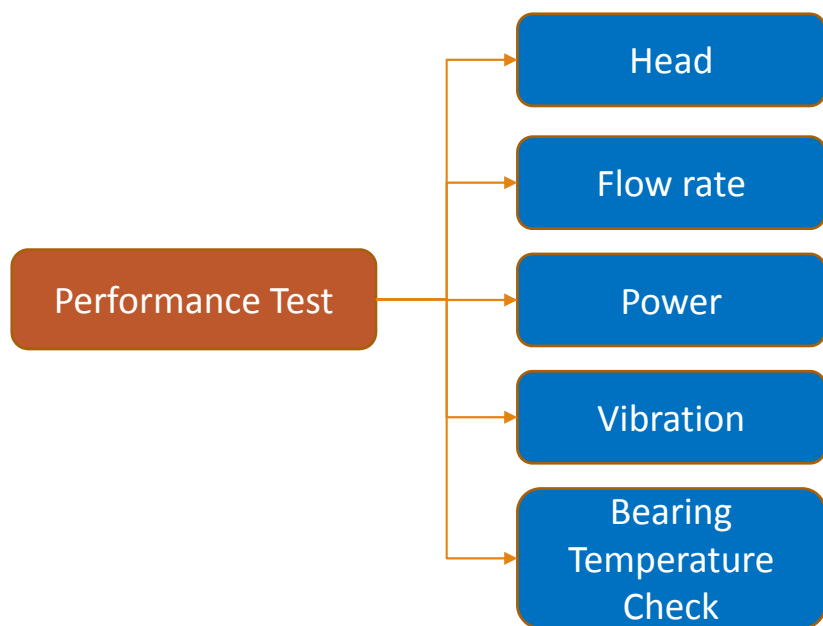


Figure 1. Basic Pump Performance Test Loop

تست Performance – الزامات اساسی حین تست



تست پمپ با آب با دمای کمتر از ۵۵ درجه سانتیگراد باشد.

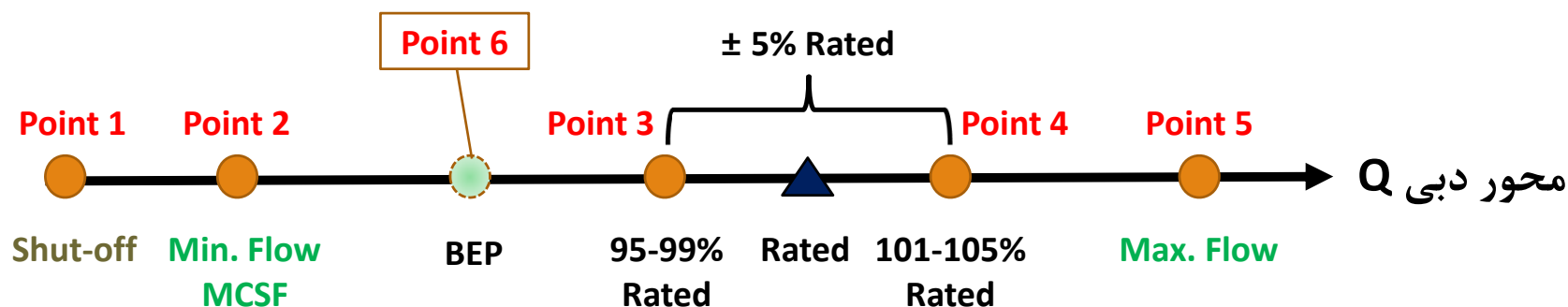
آببندها و یاتاقان های اصلی در پمپ استفاده شود.

هیچگونه نشتی از پمپ مشاهده نشود.

دمای یاتاقان ها و روانکارها در محدوده مجاز باشند.

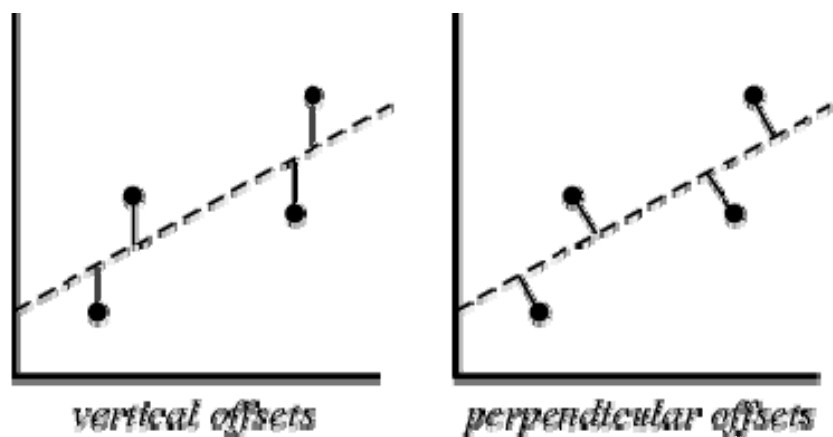
تست Performance – نقاط تست

مطابق بند ۸.۳.۳.۳ اگر طور دیگری توافق نشود، سازنده باید اطلاعات تست شامل **هد، دبی، توان و ارتعاش** را حداقل در ۵ نقطه یادداشت نماید. این نقاط معمولاً به شرح زیر می باشد:
 همچنین اگر دبی تقریبی نقطه **BEP** در محدوده $\pm 5\%$ نقطه کار نباشد (به عنوان نقطه ششم تست).



تست Performance – ترسیم منحنی تست

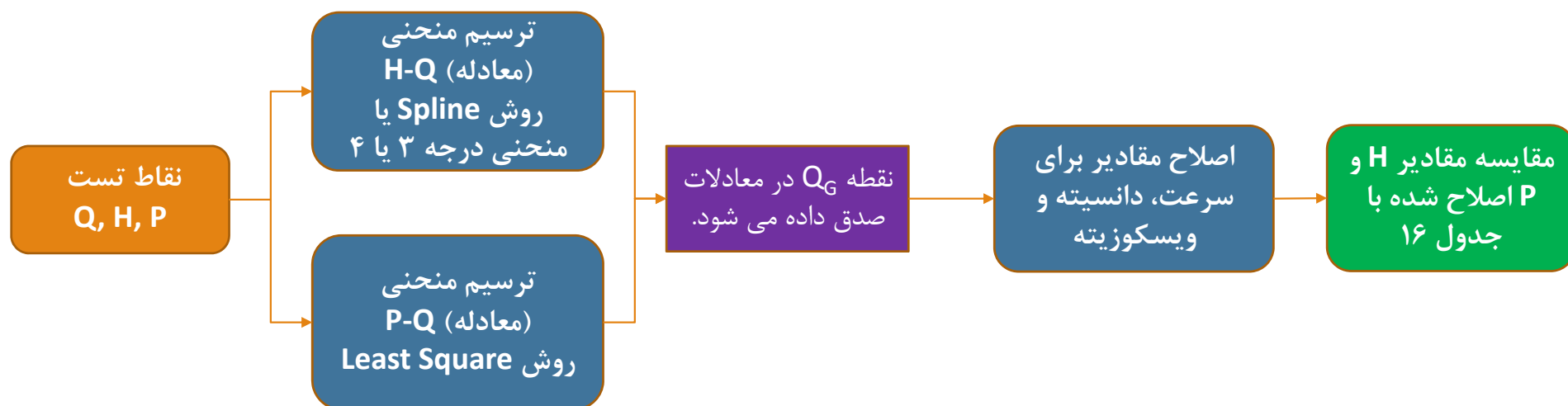
منحنی هد بر حسب دبی باید به روش Spline یا منحنی مناسب درجه ۳ یا ۴ ترسیم شود. منحنی توان باید با استفاده از least squares method ترسیم شود.



least squares method (Power Curve)

دبی گارانتی (Rated) باید در معادله منتج شده وارد شود و مقادیر هد و توان از معادله محاسبه شود. این مقادیر باید برای سرعت، ویسکوزیته و دانسیته اصلاح شوند. مقادیر اصلاح شده هد و توان باید در محدوده تفرانس های مجاز در جدول ۱۶ باشد.

تست Performance – احراز شرایط گارانتی



تست Performance – تفرانس های تست (جدول ۱۶)

جدول ۱۶: تفرانس های عملکرد مطابق استاندارد API 610 ویرایش یازدهم سال ۲۰۱۰

شرایط	نقطه کاری %	نقطه شات - اف (دبی صفر)
هد نقطه کار:		
0 m to 75 m (0 ft to 250 ft)	±3	±10 ^a
> 75 m to 300 m (> 250 ft to 1000 ft)	±3	±8 ^a
> 300 m (> 1000 ft)	±3	±5 ^a
توان نقطه کار	4 ^b	-
راندمان	c	
NPSH نقطه کار	0	-

(a) تفرانس منفی تنها زمانی مجاز است که منحنی عملکرد پمپ هنوز نزولی باشد.

(b) با نتایج تست تصحیح شده برای شرایط نقطه کار برای دبی، سرعت، دانسیته (وزن مخصوص) و ویسکوزیته، لازم است که توان به هر دلیلی از ۱۰۴٪ مقدار نامی rated فراتر نرود (تجمیع تفرانس ها مجاز نیست).

(c) عدم قطعیت راندمان تست توسط کد تست تعیین شده، ±2.5٪ است.

بنابراین، راندمان شامل عملکرد نقطه کاری پمپ نمی باشد. در کاربردهایی که راندمان اهمیت اساسی برای خریدار دارد، مقدار مشخص و تفرانس مربوط به آن در زمان خرید باید مذاکره شود.

تست Performance – ادامه

- مطابق بند ۸,۳,۳,۳ بخش b، برای پمپ های با انرژی بالا، پمپ های سری OH6 و پمپ های طبقاتی، ممکن است تست در نقطه شات آف عملی نباشد.

- مطابق بند ۸,۳,۳,۳ بخش c، اگر طور دیگری توافق نشده باشد، سرعت تست باید در محدوده ۳ درصد سرعت کاری نشان داده شده در دیتاشیت پمپ باشد. نتایج تست باید برای سرعت کاری اصلاح شوند.

- مطابق بند ۸,۳,۳,۴ برای پمپ های با توان بالا (بیش از ۱ مگاوات)، تفرانس های تست پرفورمانس ممکن است با جدول ۱۶ متفاوت باشد. اگر مشخص شده باشد، راندمان پمپ در دبی کاری باید در پیشنهاد فنی گزارش شود و خریدار تفرانس مورد قبول آن را تعیین کند و در تست عملکرد بررسی شود. اگر برای راندمان نقطه کاری تفرانس مشخص شده باشد، هنگام تست عملکرد، حداقل امکان باید نقطه نزدیک دبی کاری تست شود.

اصلاح تست عملکرد برای سیالاتی به غیر از آب

۱. دانسیته

در عمل دانسیته سیال واقعی با دانسیته سیال آزمایشگاه متفاوت است. تغییر دانسیته سیال تنها در منحنی توان مصرفی بر حسب دبی تأثیر دارد و سایر منحنی های عملکرد بدون تغییر خواهد بود.
با تغییر دانسیته توان مصرفی پمپ بر اساس رابطه زیر تغییر می کند.

$$P_{BHP} = \frac{P_H}{\eta_P} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_P} \quad (23)$$

■ مثال ۱: پمپی سیال روغن سبک با دانسیته 840 kg/m^3 پمپاژ می کند. توان مصرفی آن در شرایط تست آزمایشگاهی 35.7 kW ثبت شده است. توان مصرفی واقعی پمپ در شرایط کار واقعی چقدر می باشد؟
حل: از رابطه ۲۳ داریم:

$$\frac{(P_{BHP})_{oil}}{(P_{BHP})_{water}} = \frac{\rho_{oil}}{\rho_w} (23 - 1) \rightarrow \frac{(P_{BHP})_{oil}}{35.7} = \frac{840}{1007} \rightarrow (P_{BHP})_{oil} = 29.78 \text{ kW}$$

اصلاح تست عملکرد برای سیالاتی به غیر از آب

۲. ویسکوزیته

در صورتی که ویسکوزیته سیال واقعی به غیر از آب باشد، باید منحنی های عملکرد برای سیال واقعی مجدداً ترسیم شود. ویسکوزیته اثر مستقیمی بر دبی، هد و راندمان پمپ دارد و بالطبع آن روی منحنی توان مصرفی بر حسب دبی نیز تأثیر می گذارد. اثرات ویسکوزیته مطابق با ضمیمه G استاندارد ISO 9906 ویرایش سال ۲۰۱۲ (گراف G.1) محاسبه می شود. (شکل شماره ۱۱ را ببینید).

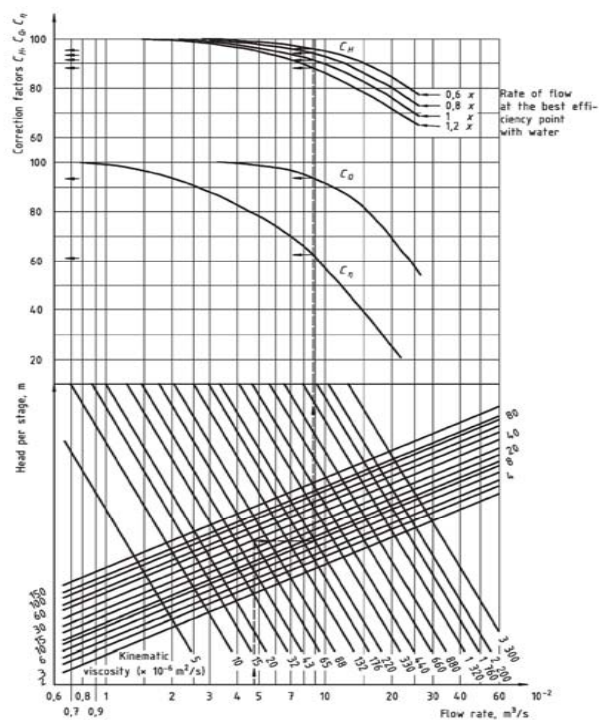
اثرات ویسکوزیته به صورت ضرایب C_Q ، C_H و C_η بیان می شود:

$$Q_{vis} = C_Q \times Q_W \quad (24)$$

$$H_{vis} = C_H \times H_W \quad (25)$$

$$\eta_{vis} = C_\eta \times \eta_W \quad (26)$$

$$P_{vis} = \frac{Q_{vis} \times H_{vis} \times \rho_{vis} \times g}{\eta_{vis}} \quad (27)$$



NOTE: The values shown in this figure are averages from tests of conventional single-stage centrifugal pumps of DN 50 to DN 200 handling petroleum oils. These data are based on Hydraulic Institute Standards (HIS), 1969.

Figure G.1 — Performance correction chart for viscous liquids

اصلاح تست عملکرد برای سیالاتی به غیر از آب

۲. ویسکوزیته (ادامه)

■ مثال ۲: مشخصات هیدرولیکی گارانتی شده پمپی به شرح ذیل می باشد. در صورت تست عملکرد هیدرولیکی با سیال آب، جهت تأیید نقاط گارانتی شده، دبی، هد، راندمان و توان مصرفی پمپ با آب چه اعدادی باید باشد؟

مشخصات هیدرولیکی گارانتی شده پمپ:

نام سیال: روغن هیدرولیک

دانسیته: ۸۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب

ضرایب ویسکوزیته (مطابق گراف G.1 استاندارد ISO 9906) : $C_Q : 0.97$, $C_H : 0.96$, $C_\eta : 0.82$

دبی: ۱۴۰ متر مکعب بر ساعت

هد: ۸۰ متر

راندمان: ۵۵ درصد

اصلاح تست عملکرد برای سیالاتی به غیر از آب

حل:

از روابط ۲۴ تا ۲۷ می توان نوشت:

$$Q_{vis} = C_Q \times Q_W \rightarrow 140 = 0.97 \times Q_W \rightarrow Q_W = 144.33 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$H_{vis} = C_H \times H_W \rightarrow 80 = 0.96 \times H_W \rightarrow H_W = 83.33 \text{ m}$$

$$\eta_{vis} = C_\eta \times \eta_W \rightarrow 0.55 = 0.82 \times \eta_W \rightarrow \eta_W = 0.67 \text{ (67\%)}$$

$$P_{vis} = \frac{Q_{vis} \times H_{vis} \times \rho_{vis} \times g}{\eta_{vis}} \rightarrow P_{vis} = \frac{(140/3600) \times 80 \times 820 \times 9.81}{0.55} = 45,503 \text{ W} = 45.5 \text{ kW}$$

$$P_W = \frac{Q_W \times H_W \times \rho_W \times g}{\eta_W} \rightarrow P_W = \frac{(144.33/3600) \times 83.33 \times 1007 \times 9.81}{0.67} = 49.26 \text{ kW}$$

بنابراین در تست عملکرد هیدرولیکی به منظور تأیید نقاط گارانتی، باید دبی ۱۴۴,۳۳ متر مکعب بر ساعت، هد ۸۳,۳۳ متر، راندمان ۶۷ درصد و توان مصرفی ۴۹,۲۶ کیلووات بدست آید.

قوانین تشابه در تست عملکرد

در مواقعی که دانسیته سیال واقعی نسبت به آب بسیار کم باشد، ممکن است توان الکتروموتور، امکان تست با سیال آب را ندهد. بنابراین می بایست تست پمپ در سرعتی کمتر از سرعت نامی انجام شود تا از آسیب به الکتروموتور جلوگیری شود. از آنجا که تست پمپ در سرعت پایین تری انجام می شود، برای پیش بینی عملکرد پمپ در سرعت واقعی باید از قوانین تشابه استفاده نمود.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (32)$$

قواعد تشابه موارد زیر را به سهولت مشخص می کند :

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (33)$$

تغییرات دبی ، Q ، بطور مستقیم با تغییرات سرعت متناسب است ،

تغییرات هد ، H ، به طور مستقیم با مربع تغییرات سرعت متناسب می باشد ،

$$\frac{P_{BHP1}}{P_{BHP2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (34)$$

تغییرات توان مستقیماً با مکعب تغییرات سرعت متناسب دارد ،

با ایجاد تغییرات کوچک در سرعت (بین 20 – 50 rpm) ، بازده پمپ تحت تأثیر قرار نمی گیرد . اما با نصف یا دو برابر شدن سرعت باید انتظار 2 % یا 3 % تغییر در بازده پمپ را داشت.

قوانین تشابه در تست عملکرد – مثال

■ مثال ۳: دانسیته سیال پروپان در شرایط عملیاتی 470 kg/m^3 می باشد. دبی، هد و توان مصرفی گارانتی شده به ترتیب 30 متر مکعب بر ساعت، 40 متر و 2.36 کیلووات می باشد و توان نامی الکتروموتور 4 کیلووات با دور 2940 دور بر دقیقه می باشد. مطلوب است محاسبه حداکثر دوری که بتوان الکتروپمپ مذکور را تست نمود؟

حل: در صورتی که الکتروپمپ در سرعت نامی 2940 rpm تست شود، توان مصرفی پمپ برابر است با (رابطه ۲۳-۱):

$$(P_{BHP})_w = (P_{BHP})_{propane} \times \frac{\rho_w}{\rho_{propane}}$$

$$(P_{BHP})_w = 2.36 \times \frac{1007}{470} = 5.06 \text{ kW}$$

لذا با توجه به اینکه توان الکتروموتور 4 کیلووات می باشد، تست در دور نامی با سیال آب آزمایشگاه مقدور نمی باشد.

قوانین تشابه در تست عملکرد – مثال – ادامه

بنابراین باید به منظور تست الکتروپمپ، دور کاهش یابد. بنابراین می توان نوشت:

$$\frac{P_{BHP1}}{P_{BHP2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$

$$\frac{5.06}{4.0} = \left(\frac{2940}{N_2}\right)^3$$

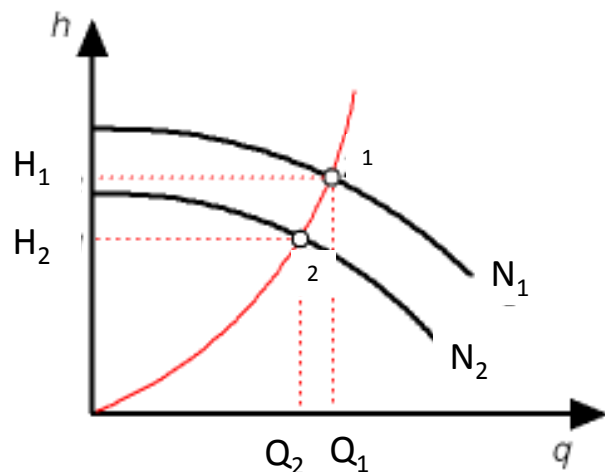
$$1.264 = \left(\frac{2940}{N_2}\right)^3 \rightarrow N_2 = 2719.14 \text{ rpm}$$

بنابراین باید تست پمپ حداکثر در دور 2719.14 rpm انجام گیرد.

قوانین تشابه در تست عملکرد – مثال – ادامه

■ مثال ۴: در مثال فوق در دور 2719.14 rpm پمپ چه هد و دبی خواهد داشت؟

حل:



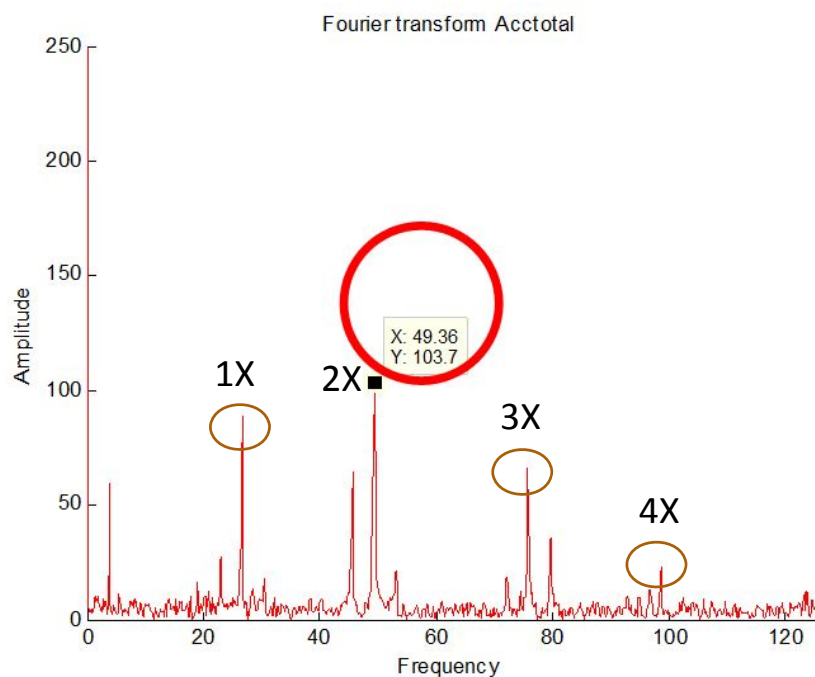
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \rightarrow \frac{2940}{2719.14} = \frac{30}{Q_2} \rightarrow Q_2 = 27.75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \rightarrow \frac{40}{H_2} = \left(\frac{2940}{2719.14}\right)^2 \rightarrow H_2 = 34.22 \text{ m}$$

تست ارتعاشات

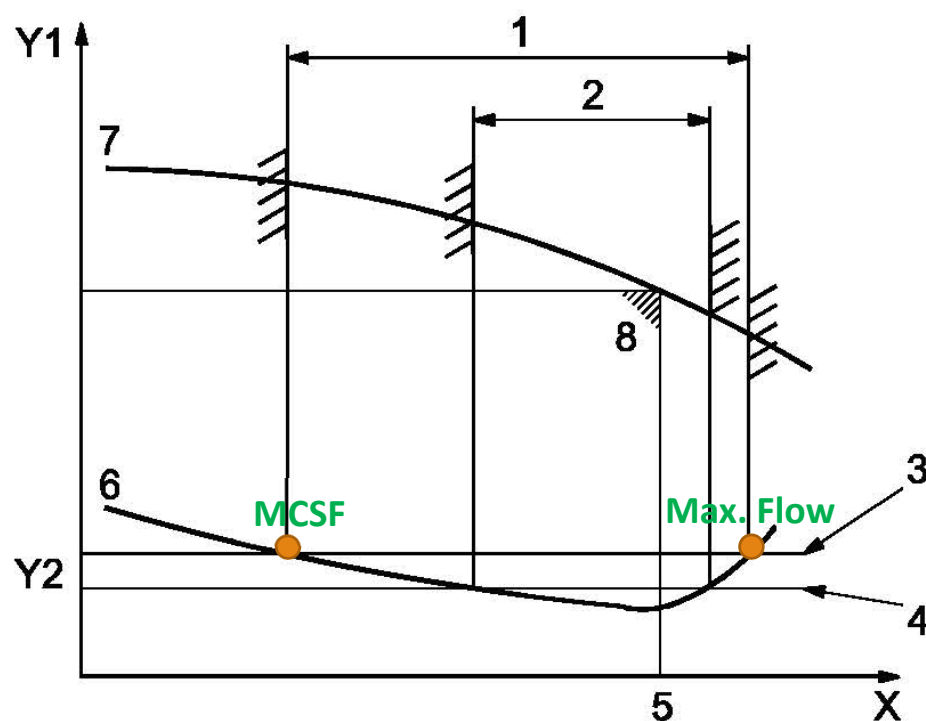
- مطابق بند ۶,۹,۳,۲ هنگام تست عملکرد، اندازه گیری
 ارتعاشات کلی در محدوده فرکانسی ۵ تا ۱۰۰۰ هرتز و طیف
 Fast Fourier Transform (FFT) باید برای هر نقطه تست
 (به غیر از شات آف) ترسیم شود.

- طیف های FFT باید شامل محدوده فرکانس های ۵ تا ۲ برابر
 تعداد پره های پروانه باشد. اگر مشخص شده باشد، طیف های
 ترسیم شده باید به همراه نتایج تست ها گزارش شوند.



تست ارتعاشات – منحنی ارتعاشات

منحنی ارتعاشات طبق استاندارد API 610



X: محور دبی

Y1: محور هد

Y2: محور ارتعاش

۱- منطقه دبی AOR

۲- منطقه دبی POR

۳- حد ماکزیمم مجاز ارتعاش

۴- حد مبنای ارتعاش

۵- دبی نقطه بهترین راندمان BEP

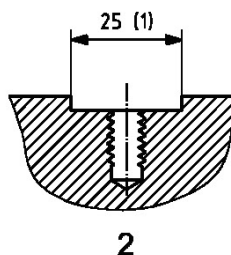
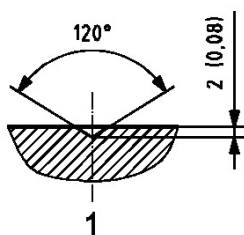
۶- منحنی ارتعاش بر حسب دبی (نمونه وار)

۷- منحنی هد بر حسب دبی

۸- نقطه بهترین راندمان BEP (هد و دبی)

تست ارتعاشات – موقعیت های اندازه گیری

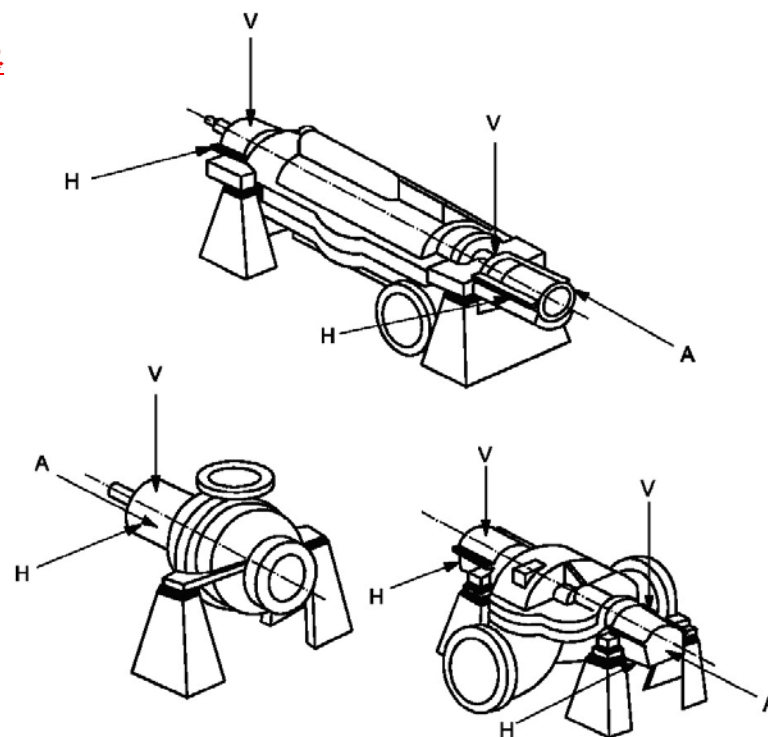
پمپ های افقی



Key

- 1 dimple (see 6.10.2.9)
- 2 optional arrangement for mounting vibration-measuring equipment (see 6.10.2.10)
- A axial
- H horizontal
- V vertical

Figure 31 — Locations for taking vibration readings on OH and BB type pumps



تست ارتعاشات – موقعیت های اندازه گیری

پمپ های عمودی In-Line

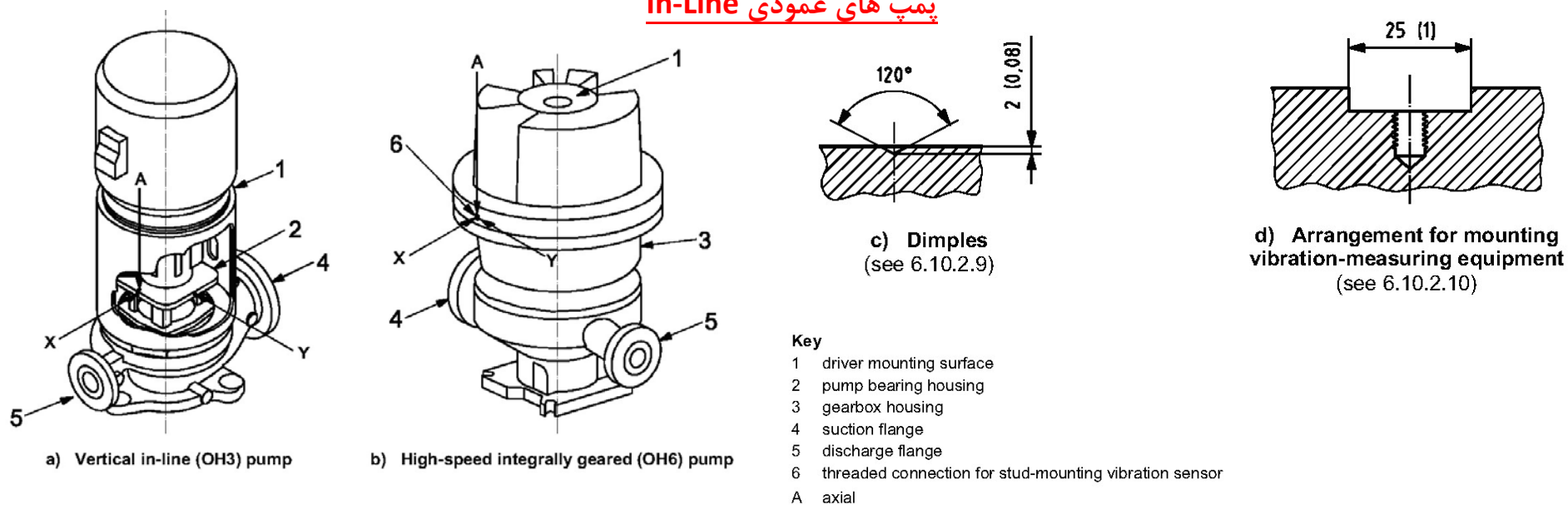
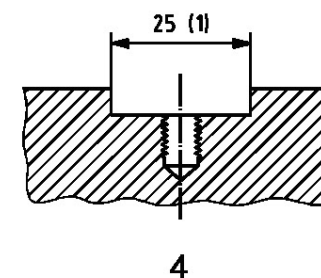
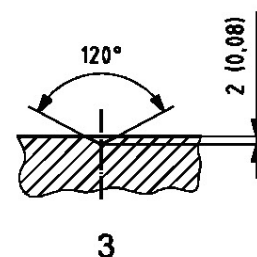
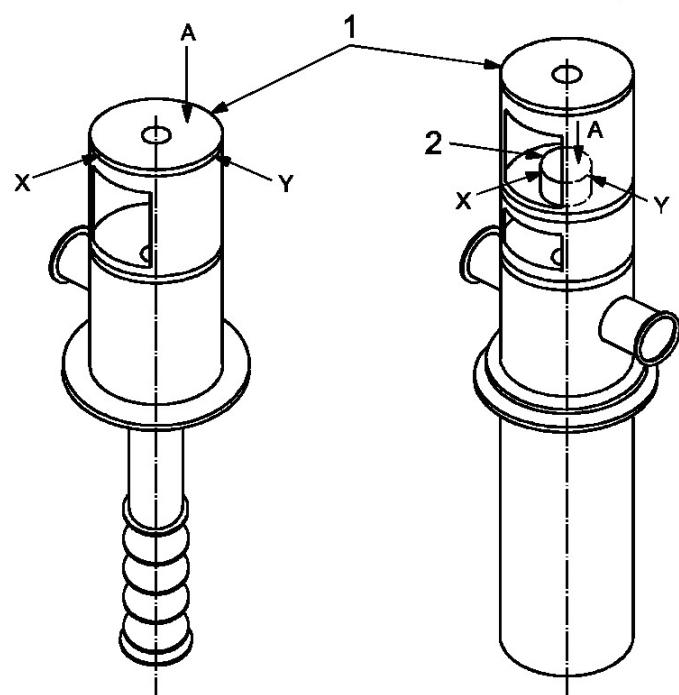


Figure 33 — Locations for taking vibration readings on [a] vertical in-line (OH3) and [b] high-speed integrally geared (OH6) pumps

تست ارتعاشات – موقعیت های اندازه گیری

پمپ های عمودی VS



Key

- 1 driver mounting surface
- 2 pump bearing housing
- 3 dimple (see 6.10.2.9)
- 4 optional arrangement for mounting vibration-measuring equipment (see 6.10.2.10)
- A axial

Figure 32 — Locations for taking vibration readings on vertically suspended (VS) pumps

تست ارتعاشات – حدود ارتعاشات مجاز

سرعت (mm/s RMS)	POR	AOR
مجموع	۳	۳,۹
فرکانس های گسسته	۲	۲,۶

حدود ارتعاشات برای پمپ های OH و BB که توانی تا ۳۰۰ کیلووات در هر طبقه دارند و سرعت آنها تا ۳۶۰۰ دور در دقیقه است، با هر نوع بیرینگ (اندازه گیری شده از bearing housing)

:

حد بالا	اندازه (میکرومتر مضاعف)
۵۰	مجموع
۱۶,۵	فرکانس های گسسته

حدود ارتعاشات برای پمپ های OH و BB با ژورنال بیرینگ هیدرودینامیکی (اندازه گیری شده از شفت پمپ)

تست ارتعاشات – حدود ارتعاشات مجاز

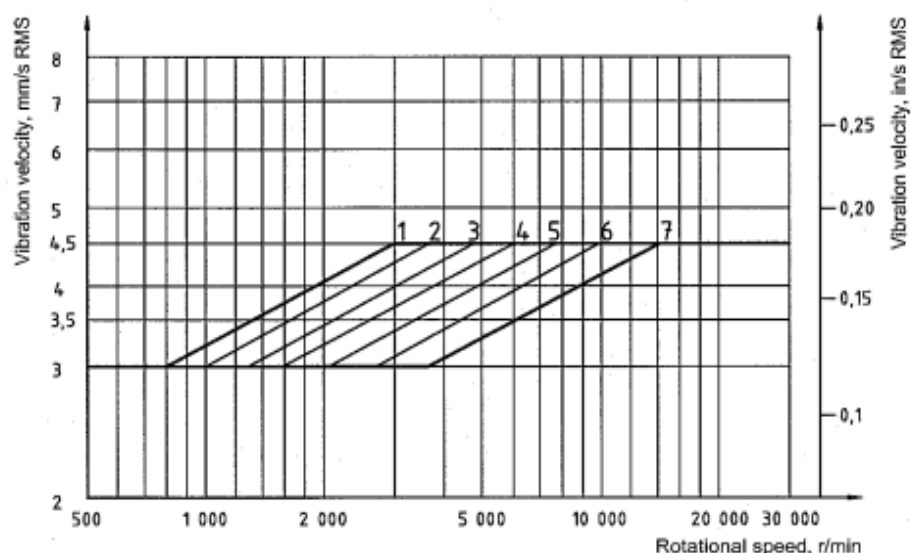
حد بالا	اندازه (میکرومتر مضاعف)
۱۰۰	مجموع
۷۵	فرکانس های گسسته

حدود ارتعاشات برای پمپ های VS با ژورنال بیرینگ
هیدرودینامیکی (اندازه گیری شده از شفت پمپ)

AOR	POR	سرعت (mm/s RMS)
۶,۵	۵	مجموع
۴,۴	۳,۴	فرکانس های گسسته

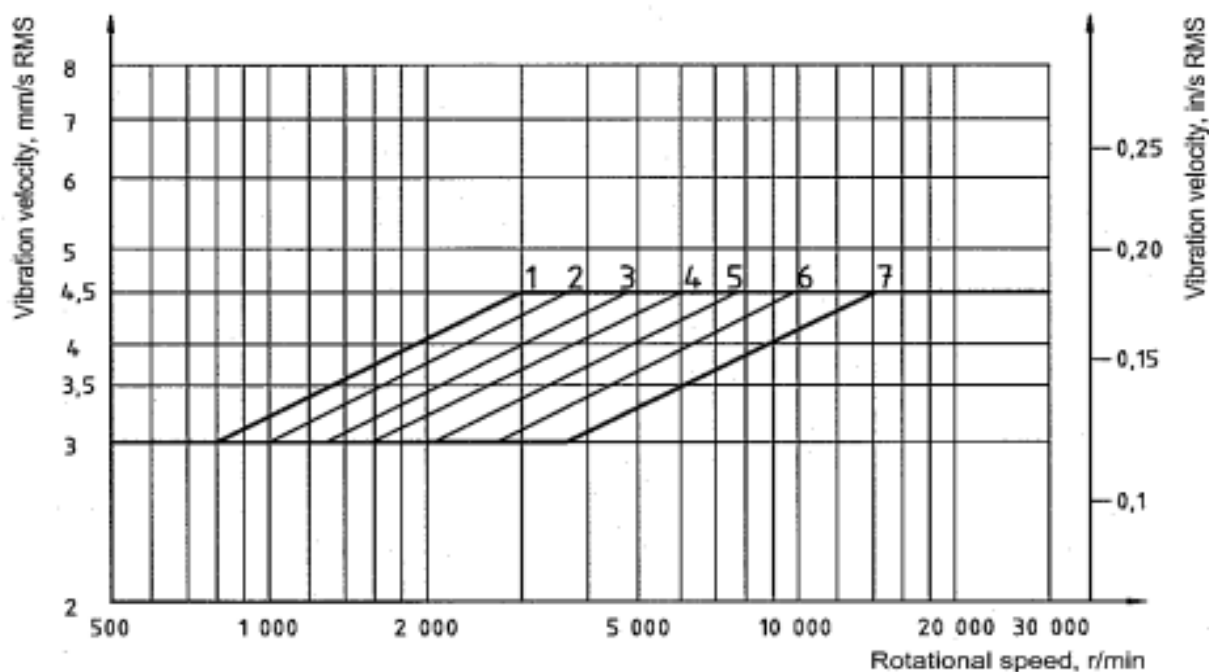
حدود ارتعاشات پمپ های VS با هر بیرینگ
(اندازه گیری شده از بیرینگ کف گرد)

تست ارتعاشات – پمپ های با انرژی بالا



حدود ارتعاشات برای پمپ های افقی با توان جذبی بیش از ۳۰۰ کیلو وات در هر طبقه یا کارکرد در دور بیش از ۳۶۰۰ دور در دقیقه در شکل روبرو حدود ارتعاشات برای چنین پمپ هایی نشان داده شده است. برای تمام پمپ ها و انواع بیرینگ: در هر سرعتی بزرگتر از ماکزیمم سرعت دائم (تا سرعت تریپ که شامل خود آن هم می شود) ارتعاشات نباید از ۱۵۰٪ ماکزیمم حد مجاز تجاوز کند. پمپ های سرعت متغیر می توانند خارج از محدوده ی سرعت مشخص شده ی خود، بدون اینکه از حدود ارتعاشاتی تجاوز کنند کار کنند.

تست ارتعاشات – پمپ های با انرژی بالا



در شکل روبرو :

1. $P \geq \frac{3000KW}{stage}$
2. $P = \frac{2000KW}{stage}$
3. $P = \frac{1500KW}{stage}$
4. $P = \frac{1000KW}{stage}$
5. $P = \frac{700KW}{stage}$
6. $P = \frac{500KW}{stage}$
7. $P \leq \frac{300KW}{stage}$

تست NPSH – روش انجام تست

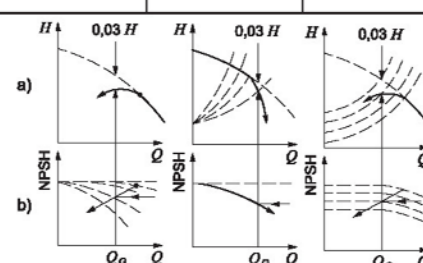
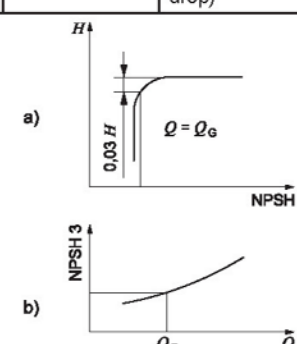
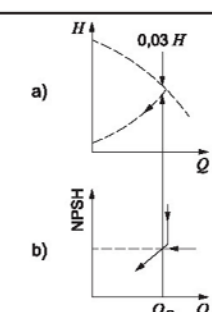
در این تست $NPSH_a$ (NPSH در دسترس مربوط به ایستگاه تست) به طور متناوب کاهش پیدا کرده تا هد کل (در طبقه اول) در دبی ثابت ۳ درصد افت کند. این مقدار $NPSH$ را $NPSH_3$ می نامند. در واقع در این حالت وقتی هد به میزان ۳ درصد افت پیدا می کند $NPSH_a$ برابر با $NPSH_r$ می باشد. کاهش $NPSH_a$ از طریق بستن شیر مکش و یا کاهش سطح سیال در مخزن و یا هر دو باهم (در سیستم های باز) و یا با کاهش فشار مخزن از طریق پمپ وکیوم (در سیستم های بسته) ایجاد می شود.

برای پمپ هایی با هد کمتر از ۲۰ متر ، افت هد ۵ درصد (به جای ۳ درصد) در نظر گرفته می شود. (الزام ISO 9906)

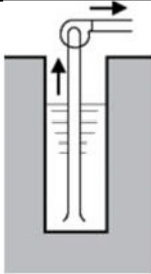
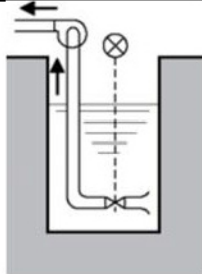
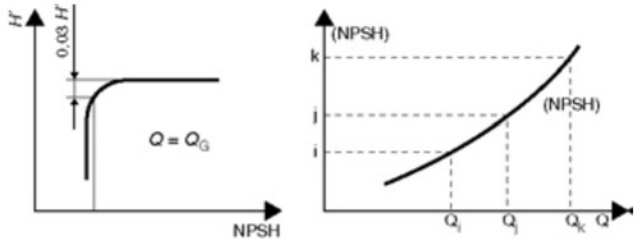
با کاهش فشار در رابطه ، $NPSH$ فشار مکش کاهش می یابد و در نتیجه مقدار $NPSH$ نیز کاهش خواهد یافت. کاهش $NPSH$ (کاهش فشار مکش) تا اندازه ای ادامه می یابد که هد کل پمپ در دبی ثابت به مقدار ۳ درصد افت پیدا کند. این لحظه شروع کاویتاسیون می باشد و $NPSH_R = NPSH_A$ خواهد بود.

تست NPSH – روش های تست مطابق ISO 9906

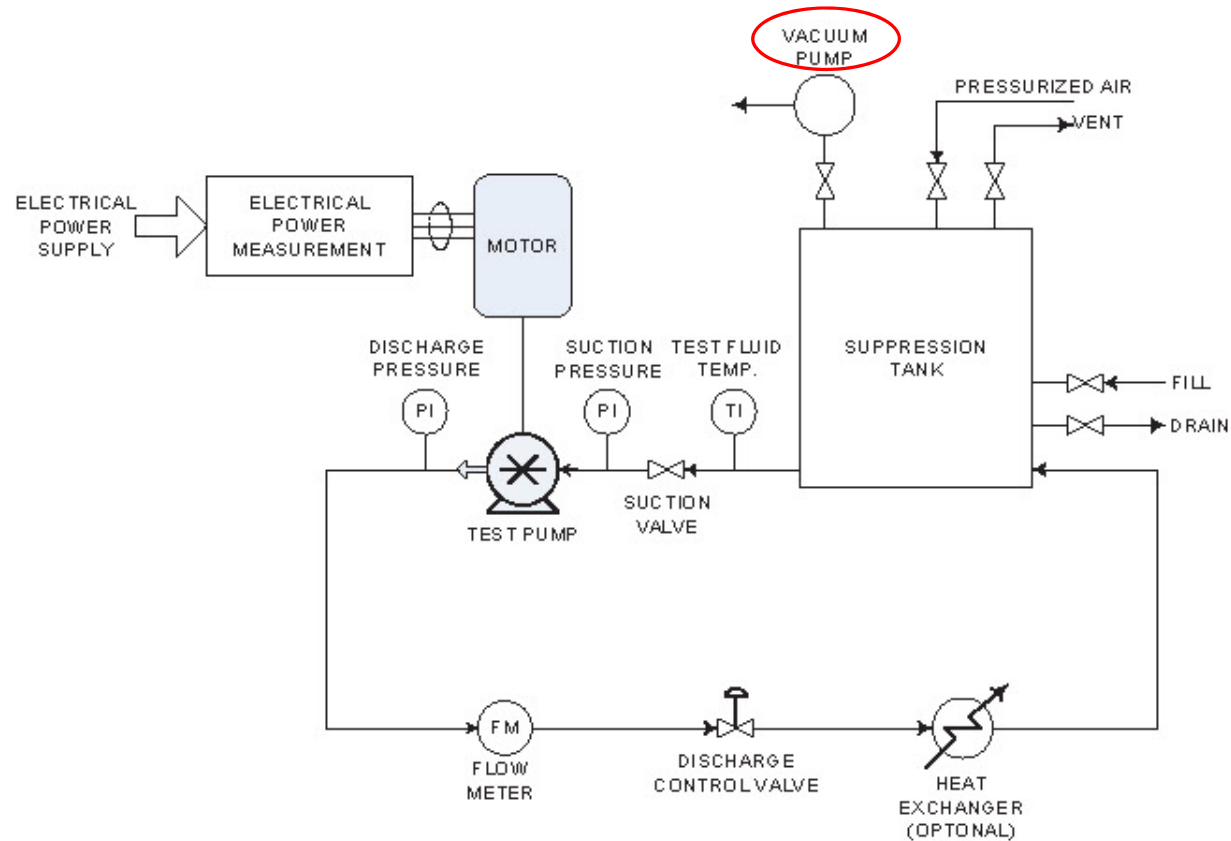
Table 10 — Methods of determining NPSH3

Type of installation	Open sump	Open sump	Open sump	Open sump	Open sump	Closed loop	Closed loop	Closed loop	Closed sump or loop
Independent variable	Inlet throttle valve	Outlet throttle valve	Water level	Inlet throttle valve	Water level	Pressure in the tank	Temperature (vapour pressure)	Pressure in the tank	Temperature (vapour pressure)
Constant	Outlet throttle valve	Inlet throttle valve	Inlet and outlet throttle valves	Rate of flow	Rate of flow	Rate of flow	Rate of flow	Inlet and outlet throttle valves	
Quantities that vary with changes to the independent variable	Total head, rate of flow, NPSHA, water level	Total head, rate of flow, NPSHA, water level	Total head rate of flow NPSHA	NPSHA, total head, outlet throttle valve, (for constant rate of flow)	NPSHA, total head; outlet throttle valve	Total head, NPSHA, outlet throttle valve (for constant rate of flow; when total head begins to drop)	NPSHA, head, outlet throttle valve (for constant rate of flow, when head begins to drop)	— NPSHA; — total head and rate of flow, when a certain level of cavitation is reached	
Head characteristic curve versus rate of flow and NPSH									
NPSH characteristic curve versus rate of flow									

تست NPSH – روش سیستم باز Open Loop

سیستم های باز		سیستم
بین 2.5 متر تا 8 متر با سطح آب کنترل شده	کمتر از 2.5 m با شیر خفه کننده مکش	محدوده NPSH
		اصول نصب
دبی های پایین	تمام دبی ها	دبی ها
تغییر سطح آب	خفه کردن فشار مکش	روش کنترل
		روش برآورد در دبی ثابت. Q_G = دبی ثابت Q = دبی کل H' = هد طبقه اول Q, H', n (مقادیر Q_G) اندازه گیری شده می باشند.

تست NPSH – روش سیستم بسته Closed Loop



تست NPSH – محاسبه NPSH

$$NPSH = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_{PS} + \frac{U_1^2}{2g}$$

P_{atm} – فشار اتمسفر در محل آزمایشگاه می باشد که برای شهر تبریز داریم: **$P_{atm} = 0.84 \text{ bara}$**

P_1 – فشار گیج نصب شده در مکش پمپ می باشد.

P_v – فشار بخار آب در دمای محیط آزمایشگاه می باشد که برای آب ۲۲ درجه سانتیگراد (تقریباً تمامی روزهای سال) داریم: **$P_v = 0.0234 \text{ bara}$**

Z_{PS} – ارتفاع عمودی گیج فشار تا مرکز مقطع لوله مکش می باشد (برای شرایط آزمایشگاه این عدد صفر در نظر گرفته می شود). **$Z_{PS} = 0 \text{ m}$**

$$\rho g = 1007 \times 9.81 = 9879 \frac{kg}{m^2 \cdot s^2}$$

$$1 \text{ bar} = 100,000.0 \text{ pa}$$

تست NPSH – محاسبه NPSH

در نتیجه می توان نوشت:

$$NPSH = 10.12 (0.817 + P_1) + 6,393.7 Q^2 \left(\frac{1}{D_1^4} \right)$$

در رابطه فوق:

NPSH بر حسب متر می باشد.

P_1 بر حسب barg می باشد و معمولاً عددی منفی می باشد.

Q دبی پمپ بر حسب متر مکعب بر ساعت می باشد.

D_1 قطر فلنج مکش پمپ (جایی که فشار سنج P_1 متصل است) به میلیمتر می باشد.

توجه!

با توجه به اعمال فشار هوا در شهر تبریز، این

رابطه برای این شهر صادق است.

برای سایر شهرها می بایست فشار هوای همان

شهر (محل آزمایشگاه) را در معادلات نوشت.

تست NPSH – محاسبه NPSH – مثال

■ مثال ۱۲: در صورتی که با کاهش فشار مکش به -0.4 barg ، هد کل پمپ در دبی $200 \text{ متر مکعب بر ساعت}$ 3% درصد افت کند، مقدار NPSH چند متر می باشد؟ قطر فلنج مکش 6 اینچ (150 میلیتر) می باشد.

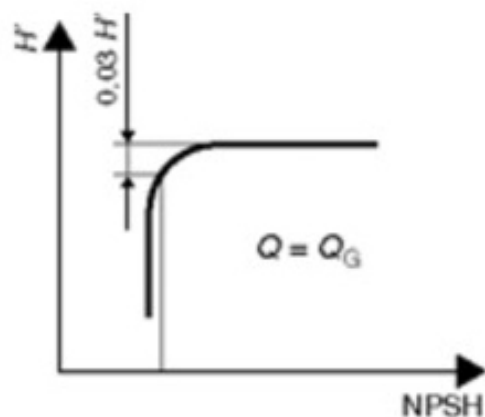
حل: از رابطه ۳۱ می توان نوشت:

$$NPSH = 10.12 (0.817 + (-0.4)) + 6,393.7 \times 200^2 \left(\frac{1}{150^4} \right)$$

$$NPSH = 4.22 + 0.505 \rightarrow NPSH = 4.725 \text{ m}$$

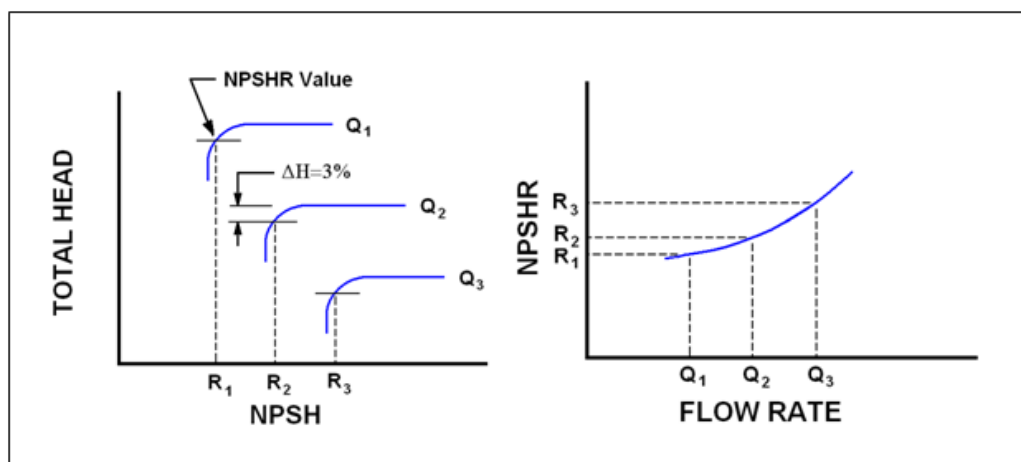
تست NPSH – الزامات API 610

- مطابق بند ۸.۳.۴.۳.۱ اگر مشخص شده باشد، تست NPSH باید در تمامی نقاط عملکردی پمپ (مطابق تست Performance) به غیر از نقطه شات آف انجام گیرد.



- مطابق بند ۸.۳.۴.۳.۳ تست NPSH باید مقدار واقعی NPSHr را در افت هد ۳ درصد تعیین کند. اگر طور دیگری مشخص نشده باشد، منحنی های دبی ثابت برای هر نقطه باید ترسیم شود. **تست NPSHr باید حداقل با NPSHA ایستگاه تست که تست عملکرد انجام گرفته است و حداقل دوبرابر NPSH3 که در منحنی عملکرد پروپوزال نشان داده شده است، آغاز شود.** دو نقطه ابتدایی تست نباید اختلافی بیشتر از عدم قطعیت دستگاه اندازه گیری هد داشته باشد. اگر نقطه دوم تست در دبی ثابت کاهش هد را نشان دهد، NPSHA ایستگاه باید افزایش یابد تا دو نقطه ابتدایی تست اختلاف هد نداشته باشند. این دو نقطه باید حداقل ۱ متر NPSHA با یکدیگر تفاوت داشته باشند. منحنی های تست NPSH3 باید بر طبق استانداردهای H.I یا ISO 9906 ترسیم شوند. تست نباید بیشتر از ۲۰ درصد کاهش هد (هد طبقه اول) ادامه یابد.

تست NPSH – تفرانس های مجاز تست



– مطابق بند ۸,۳,۴,۳,۴ مقدار NPSH3 در نقطه کاری

نباید از مقادیر تعهد شده فراتر رود (تفرانس صفر است).

دمنثاژ پمپ برای اصلاح عملکرد NPSH3 مستلزم

تست مجدد می باشد.