



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-053

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

دستورالعمل تست عملکرد هیدرولیکی پمپ های سانتریفیوژ

۱- هدف

این دستورالعمل برای آزمون های پذیرش کارخانه ای برای اثبات عملکرد هیدرولیکی پمپ های سانتریفیوژ مطابق با استاندارد ISO 9906، API 610 و ISO 5199 در کارخانه شرکت آریا سپهر کیهان می باشد. هدف از این دستورالعمل، انجام صحیح و استاندارد این تست به منظور اطمینان از صحت عملکرد هیدرولیکی دستگاه مطابق با الزامات قراردادی می باشد.

۲- محدوده کار

این دستورالعمل برای تمامی پمپ های سانتریفیوژ افقی مکش از انتها، پمپ های سانتریفیوژ عمودی خطی In-Line، پمپ های عمودی سامپ، پمپ های سانتریفیوژ طبقاتی افقی و عمودی، پمپ های مستغرق فاضلابی و به طور کلی تمامی پمپ های سانتریفیوژ تولیدی این شرکت کاربرد دارد.

جانمایی آزمایشگاه امکان تست سایر پمپ ها مانند پمپ های روتاری و جابجایی مثبت را دارد که جهت تست عملکرد هیدرولیکی باید از دستورالعمل های مربوط به آن پیروی شود.

آزمون های پذیرش هیدرولیکی مطابق با آیین نامه های ثابت که در استانداردهای مناسب تعریف شده است، می باشد.

این آیین نامه ها، ارتباط بین سازنده یا تأمین کننده پمپ و خریدار یا بازرس تأییدکننده آزمون را تسهیل می کند.

عموماً آیین نامه شامل موارد زیر می باشد:

- تعریف تمامی پارامترهای مورد نیاز برای توصیف عملکرد پمپ سانتریفیوژ به منظور تعیین نقاط گارانتی (Q_G , H_G), راندمان (η_G) و مقدار NPSH مورد نیاز (NPSHR).
 - تعیین گارانتی های فنی و شرایط احراز آنها
 - توصیه هایی برای آماده سازی برای اجرای آزمون های پذیرش جهت نقاط گارانتی.
 - ترسیم روش هایی که برای مقایسه نتایج اندازه گیری شده با نقاط گارانتی باید استفاده شود و توصیف نتیجه گیری.
 - توصیه هایی برای تهیه گزارش تست
 - توصیف مهمترین روش های اندازه گیری که برای تأیید نقاط گارانتی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.
- عباراتی که در این متن مورد استفاده قرار می گیرد مانند "گارانتی" یا "پذیرش" مفهوم فنی دارند و نباید از منظر قانونی تلقی شوند. عبارت "گارانتی" مقادیر تست قراردادی را مشخص می کند، اما نسبت به قوانین و تعهدات که اگر این مقادیر بدست نیامده باشد، هیچ معنی ندارد. عبارت "پذیرش" هیچ معنی حقوقی در این متن ندارد. آزمون پذیرش موفق خودش معنی پذیرش حقوقی ندارد.
- اندازه گیری های دقیقتر آزمون و نزدیکتر به مقادیر گارانتی شامل رویه های اضافی و پر هزینه می باشد. این اندازه گیری ها برای مواقعی که اطمینان از کارکرد بدون خطای تأسیسات ضروری است، استفاده می شود.

۳- ایمنی

۳-۱- ایمنی عمومی

- اپراتور تست و بازرسی باید از اقدامات احتیاطی برای ایمنی و جلوگیری از صدمات فیزیکی آگاهی داشته باشند.
- هرگز پمپ را زیر دبی مینیمم، و یا حالت خشک و یا بدون پرایم کردن به مدت بیش از ۱۰ ثانیه تحت تست قرار ندهید.
- هرگز پمپ را با شیر فلکه مکش بسته استفاده نکنید.

۲-۳- ایمنی محیطی

- همیشه محیط نصب پمپ را تمیز نگه دارید.
- از تمام خطرات الکتریکی مانند شوک های الکتریکی و قوس الکتریکی خطرناک اجتناب کنید.
- تنها از اتصالات با سایز و مواد مناسب استفاده کنید.
- مطمئن شوید که تمام اتصالات به طور مناسبی محکم شده اند و چیزی از قلم نیفتاده است.
- هرگز قبل از اینکه تجهیزات ایمنی نصب شده باشند از پمپ استفاده نکنید.
- هرگز قبل از اینکه محافظ کوپلینگ نصب شده باشد از پمپ استفاده نکنید.
- هرگز پمپ را بدون پرایم کردن مناسب راه اندازی نکنید.
- اتصالات الکتریکی باید توسط تکنسین ماهر، انجام گیرد.
- برای اتصالات الکتریکی مطمئن شوید که محصول از منبع تغذیه قطع شده است.
- مطمئن شوید که تجهیزات بالابرنده در شرایط مناسبی قرار دارند.

۳-۳- اقدامات احتیاطی حین کار

هنگام کار با پمپ به اقدامات احتیاطی و ایمنی زیر توجه کنید:

- هرگز به تنهایی کار نکنید.
- همیشه لباس و دستکش ایمنی به تن کنید.
- دور از بارهای آویزان قرار گیرید.
- همیشه دستگاه را با تجهیزات بالابرنده اش بلند کنید.
- اگر دستگاه با کنترل سطح اتوماتیک می باشد، مواظب خطرات ناشی از استارت ناگهانی دستگاه باشید.
- بعد از دمنتاژ پمپ، آن را با آب بشویید.
- از ماکزیمم فشار کاری پمپ تجاوز نکنید.
- وقتی سیستم تحت فشار است، شیر هواگیری و یا تخلیه را باز نکنید. قبل از دمنتاژ پمپ، و یا باز کردن اتصالات لوله کشی، مطمئن شوید که پمپ از سیستم جدا شده است و پمپ تحت فشار نمی باشد.
- هرگز پمپ را بدون محافظ کوپلینگ استفاده نکنید.

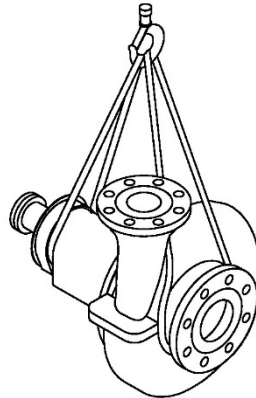
۴-۳- روش های بلند کردن دستگاه و تجهیزات جانبی

دستگاه و تجهیزات جانبی آن سنگین هستند. عدم بلند کردن مناسب و نگهداری دستگاه ممکن است باعث صدمات فیزیکی و یا آسیب به دستگاه شود. دستگاه را تنها از محل های تعبیه شده بلند کنید. تجهیزات بالابرنده باید به طور مناسبی تحمل وزن دستگاه را داشته باشند.

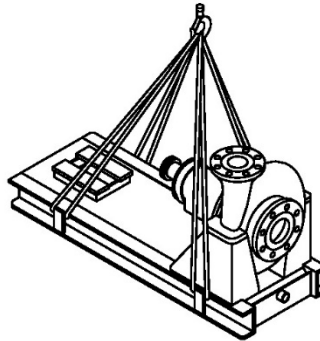
جدول شماره ۱: روشهای بلند کردن دستگاه

روش بلند کردن	نوع پمپ
از قلاب مناسب که به نحو مطلوبی به قسمتهای صلب پمپ مانند حلزونی، فلنج ها و یا محفظه یاتاقان متصل شده اند استفاده کنید.	پمپ خالی بدون دستگیره های بالابرنده
پمپ را با دستگیره های آن بلند کنید.	پمپ خالی با دستگیره های بالابرنده
از قلاب هایی استفاده کنید که به زیر پوسته و موتور و یا زیر ریل های شاسی انداخته شده است.	پمپ روی شاسی

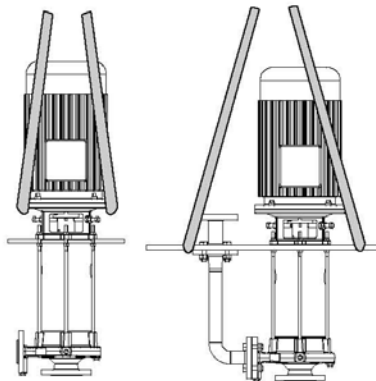
- هرگز طناب های قلاب را به محور متصل نکنید. در غیر اینصورت ممکن است دستگاه آسیب ببیند.



شکل شماره ۱: مثالی از روش بلند کردن مناسب



شکل شماره ۲: مثالی از روش بلند کردن مناسب



شکل شماره ۳: مثالی از روش بلند کردن مناسب

۴- کالیبراسیون تجهیزات اندازه گیری آزمایشگاه

کلیه تجهیزات ابزار دقیق مورد استفاده در آزمایشگاه تست هیدرولیک به صورت دوره ای می بایست کالیبر شوند. دوره کالیبراسیون وابسته به تجارب سازنده در آزمایشگاه مربوطه می باشد. در جدول شماره ۲ دوره مناسب کالیبراسیون تجهیزات ابزار دقیق تست داده شده است.

جدول شماره ۲: دوره مناسب کالیبراسیون تجهیزات ابزار دقیق
آزمایشگاه تست هیدرولیک شرکت آریا سپهر کیهان

دوره مناسب کالیبراسیون	دستگاه / تجهیز / ابزار
دبی سنج	
۱ سال	دبی سنج مغناطیسی Electromagnetic Flow meter
۶ ماه	دبی سنج التراسونیک Ultrasonic Flow meter
فشار سنج	
۱ سال	گیج فشار فنری Spring Pressure Gauge
۱ سال	ترانسمیتر فشار Transducers
توان	
۱ سال	آمپر متر و ولتمتر قابل حمل
۳ سال	آمپر متر و ولتمتر ثابت
سرعت	
۳ سال	تاکومتر (عمومی) tachometer
ارتعاش و نویز	
۱ سال	ارتعاش سنج پرتابل
۱ سال	نویز سنج پرتابل

۵- معرفی آزمایشگاه تست

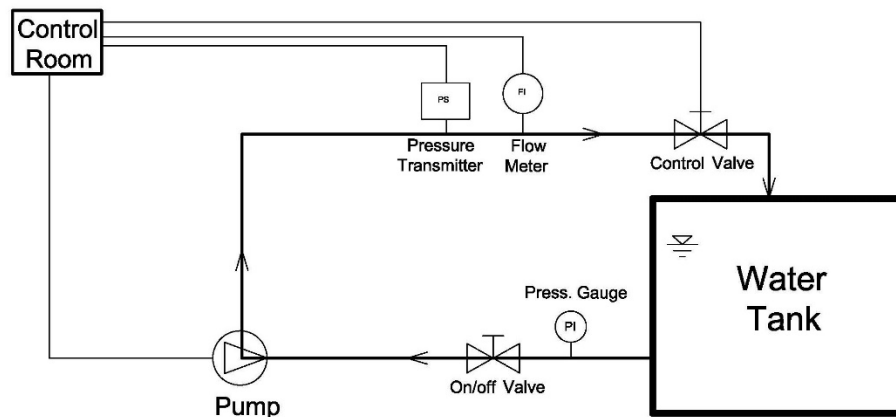
۵-۱- ایستگاه تست

آزمایشگاه تست پمپ شامل سه خط ۲ اینچ، ۶ اینچ و ۱۲ اینچ می باشد. بسته به دی پمپ و پس از محاسبه سرعت سیال در هر خط، سایز مناسب خط جهت تست پمپ انتخاب می شود. مدار ایستگاه به صورت بسته می باشد. بدین معنی که سیال مخزن (آب) توسط پمپ مکش می شود و مجدداً پس از خروج از پمپ و عبور از تجهیزات ابزار دقیق (فشارسنج و دی سنج) به مخزن باز می گردد. در خط مکش پمپ، یک فشار سنج عقربه ای (در بعضی مواقع ترانسمیتر فشار)، فشار مکش پمپ رو اندازه گیری می کند. در هر خط خروجی پمپ یک ترانسمیتر فشار و یک دی سنج مغناطیسی، فشار و دی پمپ رو به ترتیب اندازه گیری می کند و دیتاهای مربوطه را به اتاق کنترل ارسال می کند. یک شیر کنترلی در نزدیکی انتهای خط خروجی وظیفه کنترل جریان را برعهده دارد. اگرچه امکان همسان سازی مدار ایستگاه تست با شرایط واقعی نصب پمپ در سایت وجود ندارد. اما جانمایی خطوط مکش و رانش، این امکان را فراهم می کند که پارامترهای هیدرولیکی پمپ با تقریب قابل قبولی مشابه با شرایط موجود در سایت باشد.

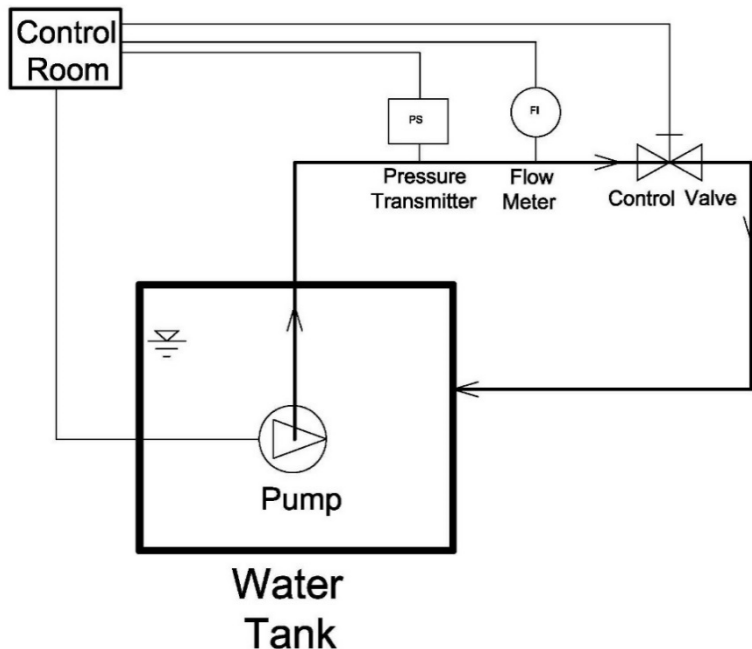
۵-۲- اتاق کنترل

اتاق کنترل آزمایشگاه شامل یک سیستم پیشرفته PLC و نمایشگر HMI می باشد. دیتاهای کنترلی پمپ شامل دی، فشار، آمپر مصرفی الکتروموتور، ولتاژ تغذیه و سطح آب مخزن به اتاق کنترل ارسال می شود و پس از پردازش و فیلتر از طریق نمایشگر HMI نشان داده می شود.

در اتاق کنترل، امکان تنظیم شیر کنترلی جهت تست پمپ در شرایط مختلف هیدرولیکی وجود دارد. در مواردی که امکان تست پمپ در سرعت نامی وجود ندارد (مثلاً دانسیته سیال واقعی بسیار کمتر از دانسیته آب باشد)، یک میدل فرکانسی (اینورتور) در اتاق کنترل، تنظیم دور پمپ را امکان پذیر می کند.



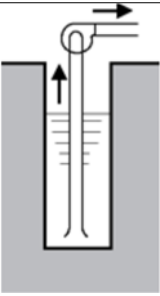
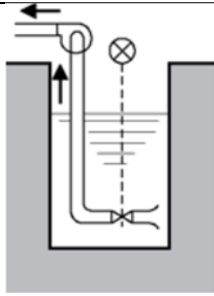
شکل شماره ۴: ایستگاه تست پمپ های نصب خشک

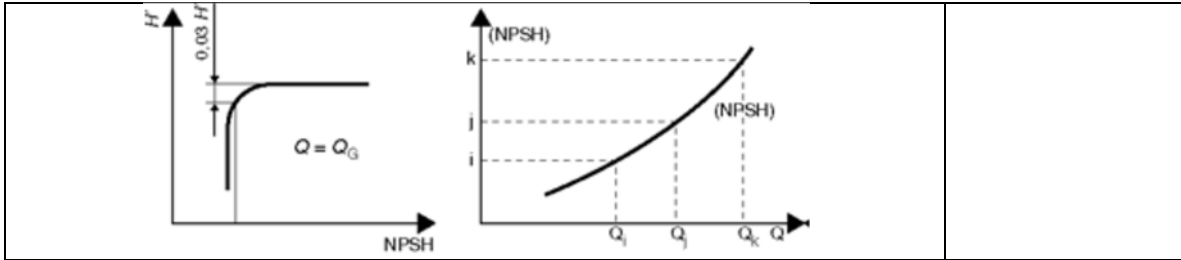


شکل شماره ۵: ایستگاه تست پمپ های نصب تر

نحوه نصب برای اندازه گیری NPSH پمپ در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول شماره ۳: انواع سیستم های نصب برای اندازه گیری NPSH

سیستم های باز		سیستم
بین ۲.۵ متر تا ۸ متر با سطح آب کنترل شده	کمتر از ۲.۵ 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
	$Q_G =$ دبی ثابت $Q =$ دبی کل $H' =$ هد طبقه اول	روش برآورد در دبی ثابت. $n, H', Q (Q_G)$ مقادیر اندازه گیری شده می باشند.



۶- آزمون های پذیرش مطابق استاندارد EN ISO 9906

این استاندارد برای آزمون هیدرولیکی پمپ های سانتریفیوژ است و ترکیبی از استانداردهای بین المللی قبلی زیر می باشد:

- ISO 3555: "پمپ های سانتریفیوژ (شعاعی، جریان مختلط و محوری) - راهنمایی هایی برای آزمون های پذیرش - کلاس B" (مطابق با گرید ۱ استاندارد جدید)
- ISO 2548: "پمپ های سانتریفیوژ (شعاعی، جریان مختلط و محوری) - راهنمایی هایی برای آزمون های پذیرش - کلاس C" (مطابق با گرید ۲ استاندارد جدید)

این استاندارد بیشتر جایگزین استاندارد ملی زیر شده است:

- DIN 1944: "آزمون های پذیرش برای پمپ های سانتریفیوژ"

فاکتورهای تفرانس جدید به گونه ای معرفی شده اند که تا آنجا که امکان دارد، یک پمپ که تحت استانداردهای بین المللی قبلی (ISO 2548 و یا ISO 3555) قابل تأیید بوده است، در استاندارد بین المللی جدید نیز قابل تأیید باشد.

استاندارد بین المللی ISO 5198 با نام "پمپ های سانتریفیوژ (شعاعی، جریان مختلط و پمپ های محوری) - دستورالعمل برای آزمون های عملکرد هیدرولیکی - گرید دقیق" نباید به عنوان یک دستورالعمل آزمون پذیرش تلقی شود. این استاندارد راهنمایی برای اندازه گیری های خیلی دقیق از طریق روش های ترمودینامیکی برای اندازه گیری مستقیم راندمان ها می باشد، اما برای تأیید گارانتی هیچ توصیه ای ندارد.

۶-۱- کلیات

استاندارد بین المللی EN ISO 9906 آزمون های عملکرد هیدرولیکی برای پذیرش پمپ های سانتریفیوژ (شعاعی، جریان مختلط و پمپ های محوری، از این به بعد برای ساده سازی "پمپ ها" نامیده می شود) را مشخص کرده است. استاندارد شامل دو گرید دقت در اندازه گیری می باشد:

- گرید ۱، برای دقت بالاتر
- گرید ۲، برای دقت پایین تر

این گریدها مقادیر مختلفی برای ضرایب تفرانس، نوسانات مجاز و عدم قطعیت ها در اندازه گیری، دارند.

برای پمپ هایی که در تعداد زیاد تولید می شوند و از طریق منحنی عملکرد نمونه ای انتخاب می شوند و همچنین برای پمپ های با توان ورودی کمتر از ۱۰ کیلووات، جداول ۷ و ۸ را ملاحظه کنید. مقادیر نشان داده شده در این جدول ضرایب تفرانس بالاتری دارند.

این استاندارد هم برای پمپ تنها بدون اتصالات و هم برای ترکیب پمپ و تمام یا قسمتی از اتصالات بالادستی و یا پایین دستی، کاربرد دارد.

اگر سازنده / تأمین کننده و خریدار توافق دیگری نداشته باشند، موارد زیر به کار می رود:

- دقت با گرید ۲
- تست در کارخانه سازنده انجام می شود.

- تست کاویتاسیون (NPSH) انجام نمی شود.
- هر گونه مغایرت از موارد فوق می بایست بین سازنده و خریدار مورد توافق قرار گیرد.
- متداولترین این مغایرتها به شرح ذیل می باشد:
- دقت مطابق با گرید ۱
- ضرایب تفرانس منفی مجاز نباشد.
- ضرایب تفرانس بالاتر برای پمپ های ساخته شده به صورت سری و برای پمپ های با توان ورودی کمتر از ۱۰ کیلووات.
- تعداد پمپ هایی که باید تست شوند در حالتی که چندین پمپ وجود دارد.
- بررسی رفتار پمپ در ارتباط با دمای یاتاقان ها، سطوح نوپز و ارتعاش حین تست عملکرد
- بستر تست برای بررسی قابلیت خودمکشی یک پمپ خودمکش
- رویه پیش بینی عملکرد واقعی پمپ بر پایه تست با آب سرد تمیز
- شرح گارانتی
- الف) پمپ بدون الکتروموتور یا پمپ با الکتروموتور
- ب) پمپ با یا بدون لوله کشی
- پ) مقادیر گارانتی برای یک یا چند نقطه عملکرد (مانند، دبی، هد کل، توان جذبی، راندمان، NPSHR)
- ضرایب تفرانس در نقطه عملکرد و نقاط دیگر، (اگر چندین نقطه عملکرد باید گارانتی شود)
- ساختار مشابه پمپ ها (مثلاً چندین روتور در یک پوسته)
- الزام برای تست کاویتاسیون (NPSH)

۶-۲- گارانتی

یک نقطه گارانتی باید توسط یک دبی گارانتی Q_G و یک هد گارانتی H_G تعریف شود. سازنده / تأمین کننده تحت شرایط مشخص شده و در سرعت مشخص شده، گارانتی می کند که منحنی $H(Q)$ اندازه گیری شده، از محدوده تفرانس حول نقطه گارانتی عبور می کند (شکل ۶). علاوه بر این ممکن است در دبی گارانتی، یک یا چندین پارامتر زیر در شرایط مشخص شده و در سرعت مشخص شده، گارانتی شود:

- راندمان پمپ η_G یا راندمان کل دستگاه شامل پمپ و موتور η_{grG}
 - مقدار NPSH مورد نیاز NPSHR
- اگر طور دیگری توافق نشده باشد، نقطه گارانتی برای آب سرد تمیز معتبر می باشد.

۶-۳- سرعت تست

اگر طور دیگری توافق نشده باشد، تست ها ممکن است در یک سرعت چرخش بین محدوده ۵۰ تا ۱۲۰٪ سرعت مشخص شده انجام شود. اما، وقتی سرعت تست بیشتر از ۱۲۰٪ سرعت مشخص شده باشد، این موضوع باید به عنوان مغایرت نوشته شود. تست در سرعت های بیشتر از ۱۲۰٪ سرعت مشخص شده، ممکن است بر راندمان پمپ تأثیر داشته باشد. برای تست های NPSH، سرعت چرخش در تست باید بین ۸۰ تا ۱۲۰٪ سرعت دوران مشخص شده باشد. همچنین دبی باید بین ۵۰ تا ۱۲۰ درصد دبی BEP (نقطه بهترین راندمان) در سرعت دوران تست قرار گیرد. سرعت ها باید طوری باشد که عدد نوع Type number برابر با ۲ یا کمتر باشد. برای پمپ های با عدد نوع بیشتر از ۲، توافقات ویژه ای باید بین طرفین بدست آید.

۴-۶- تست پمپ هایی که سیالی به غیر از آب سرد تمیز پمپاژ می کنند

اساساً عملکرد یک پمپ با خصوصیات سیال پمپ شونده متفاوت می شود. (ویسکوزیته، گازهای نامحلول، ذرات جامد و ...). اگر چه امکان ندارد که یک قانون کلی در این مورد ارائه داد که در چه مواقعی عملکرد با آب سرد تمیز می تواند برای پیشگویی عملکرد سیال دیگر مورد استفاده قرار گیرد. انتظار می رود طرفین قرارداد در خصوص قوانین تجربی و مناسب بودن تست پمپ با آب سرد تمیز توافق کنند.

مشخصه "آب تمیز سرد" مطابق با استاندارد در جدول زیر تعریف می شود:

جدول شماره ۴: "مشخصه آب تمیز سرد"

مقدار بیشینه	واحد	خصیصه
40	°C	دما
1.75×10^{-6}	m ² /s	ویسکوزیته سینماتیک
1050	kg/m ³	دانسیته (چگالی)
2.5	kg/m ³	مقدار ذرات جامد نامحلول
50	kg/m ³	مقدار ذرات جامد محلول

مقدار کل گاز محلول و آزاد آب نباید از حجم اشباع و مطابق با شرایط زیر فراتر باشد:

- برای یک مدار باز، حجم اشباع مربوط به فشار و دما در سمت مکش مخزن باز است.
- برای یک مدار بسته، حجم اشباع مربوط به فشار و دما در مخزن بسته می باشد.

پمپ هایی که برای سیالی به غیر از آب سرد تمیز استفاده می شوند، اگر سیال پمپ شونده مشخصات جدول زیر را داشته باشد، ممکن است برای تست دبی، هد و راندمان با آب سرد تمیز تست شود. مقدار گاز محلول و آزاد سیال نباید از حجم اشباع تعریف شده در بالا، فراتر رود.

جدول شماره ۵: خصوصیات سیالات

مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	واحد	خصیصه سیال
10×10^{-6}	بدون محدودیت	m ² /s	ویسکوزیته سینماتیک
2000	450	kg/m ³	دانسیته
5.0	-	kg/m ³	مقدار ذرات جامد نامحلول

برای تست پمپ هایی که برای سیالی به غیر از خصوصیات فوق مورد استفاده قرار می گیرد، باید توافق ویژه ای بعمل آید. اگر طور دیگری توافق نشده باشد، تست های کاویتاسیون باید با آب سرد تمیز انجام شود. مقدار NPSH مورد نیاز همیشه برای آب سرد تمیز داده می شود.

۵-۶- مقادیر ضرایب ترانس

پمپ های سانتریفیوژ با ترانس های مجاز در ریخته گری و ماشین کاری ساخته می شوند. حین تولید، هر پمپ با مغایرت هایی نسبت به ابعاد نقشه تولید می شود.

وقتی نتایج تست با مقادیر گارانتی شده مقایسه می شود (نقاط عملکرد)، تolerانس ها باید مجاز دانسته شود تا هرگونه مغایرت در تست پمپ نسبت به یک پمپ ساخته شده بدون هرگونه اختلاف نسبت به طراحی (صرفاً از منظر تئوری) پوشش داده شود. در صورتی که توافق ویژه ای صورت نگرفته باشد، ضرایب تolerانس در جدول زیر باید برای نقاط گارانتی H_G و Q_G استفاده شود:

جدول شماره ۶: مقادیر ضرایب تolerانس

اندازه گیری	نماد	گرید ۱ %	گرید ۲ %
دبی	t_Q	± 4.5	± 8
هد کل پمپ	t_H	± 3	± 5
راندمان پمپ	t_η	- 3	- 5

برای پمپ های تولید شده به صورت سری که از منحنی های عملکرد نمونه ای انتخاب می شوند، ضرایب تolerانس زیر کاربرد دارد:

جدول شماره ۷: ضرایب تolerانس برای پمپ های تولید شده به صورت سری

اندازه گیری	نماد	ضریب تolerانس %
دبی	t_Q	± 9
هد کلی پمپ	t_H	± 7
توان جذبی پمپ	t_P	9+
توان ورودی موتور	$t_{P_{gr}}$	9+
راندمان	t_η	7-

برای پمپ های با توان جذبی کمتر از 10 kW و بیشتر از 1 kW، جایی که اتلافات اصطکاکی در اجزا مکانیکی گوناگون (بلبرینگ ها، نوارهای گرافیتی و مکانیکال سیل ها) به طور نسبی مهم و قابل پیش بینی نمی باشد، ضرایب تolerانس در جدول زیر می تواند به کار رود:

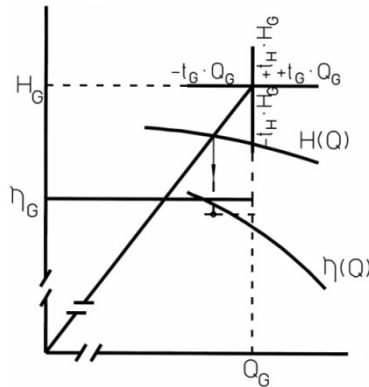
جدول شماره ۸: ضرایب تolerانس برای پمپ های با توان جذبی بین ۱ تا ۱۰ کیلووات

اندازه گیری	نماد	ضرایب تolerانس %
دبی	t_Q	± 10
هد کل پمپ	t_H	± 8

۶-۶- احراز گارانتی

احراز هر گارانتی باید بوسیله مقایسه نتایج بدست آمده از تست ها (شامل هرگونه عدم قطعیت اندازه گیری) با مقادیر گارانتی شده در قرارداد (شامل تolerانس های مربوطه) صورت پذیرد.

۶-۶-۱- احراز گارانتی دبی، هد و راندمان



شکل شماره ۶: احراز گارانتی دبی، هد و راندمان

مقادیر اندازه گیری شده به مقادیر در سرعت مشخص شده تبدیل می شود. این مقادیر بر حسب دبی Q رسم می شود. منحنی هایی با بهترین تقریب برای نقاط اندازه گیری شده نمایشگر عملکرد پمپ می باشد. یک صلیب تفرانسی حول نقطه گارانتی به گونه ای ترسیم می شود که در امتداد افق از $Q = Q_G - t_Q$ تا $Q = Q_G + t_Q$ و در امتداد عمود از $H = H_G - t_Q$ تا $H = H_G + t_Q$ کشیده شود. مقدار گارانتی دبی و هد کل وقتی بدست می آید که منحنی QH خط عمودی و یا افقی را قطع کند و یا حداقل در یک نقطه مماس شود (شکل ۶).

راندمان باید از منحنی QH اندازه گیری شده بدست آید، یک خط مستقیم گذرنده از نقطه گارانتی Q_G, H_G و نقطه صفر محورهای QH رسم می شود. از نقطه برخورد این خط با منحنی QH یک خط مستقیم عمودی رسم می شود تا منحنی $Q\eta$ را قطع کند (شکل ۶).

شرط گارانتی راندمان برقرار خواهد بود اگر مقدار بدست آمده برای راندمان بیشتر یا حداقل برابر با $\eta_G \cdot (1 - t_\eta)$ باشد. اگر مقادیر اندازه گیری شده Q و H بیشتر از مقادیر گارانتی شده Q_G و H_G ولی در محدوده تفرانسی باشد، و راندمان نیز در محدوده تفرانسی باشد، توان جذبی واقعی ممکن است بیشتر از مقدار داده شده در دیتاشیت شود.

۶-۷-۶-۱- کاهش قطر پروانه

وقتی از نتایج تست ها معلوم شود که مشخصه های پمپ بیشتر از مشخصه های تعیین شده است، عموماً قطر پروانه یا قطر پره ها کاهش می یابد.

اگر اختلاف بین مقادیر توافق شده و مقادیر اندازه گیری شده کوچک باشد، امکان دارد به منظور اجتناب از تست مجدد از قوانین تشابه استفاده شود. با استفاده از قوانین تشابه، قطر پروانه یا پره با دقت کافی بدست می آید. (فصل ۱۸ را ببینید)

۶-۷-۶-۲- تغییر سرعت

اگر یک پمپ با محرکه سرعت متغیر از مقادیر گارانتی شده فراتر رود یا به آن نرسد، نقاط تست ممکن است برای یک سرعت دیگر مجدداً محاسبه شود، به شرط آنکه سرعت از ماکزیمم سرعت پیوسته مجاز فراتر نرود.

۸-۶- تست های کاویتاسیون

در بیشتر موارد کاویتاسیون بوسیله کاهش در هد خروجی در دبی داده شده تعیین می شود. در پمپ های چند طبقه، اگر امکان پذیر باشد، کاهش هد در طبقه اول اندازه گیری می شود. اگر هد طبقه اول قابل اندازه گیری نباشد، از تقسیم هد کل بر تعداد طبقات بدست می آید.

بیشتر تست های کاویتاسیون با آب سرد تمیز انجام می شود. اما تست های کاویتاسیون با آب سرد تمیز نمی تواند به طور دقیق رفتار پمپ با سیالات دیگر را پیشگویی کند.

انواع مختلف تست های کاویتاسیون مطابق الزامات یا توافقات قابل انجام می باشد.

۸-۶-۱- احراز مشخصه های گارانتی شده در یک مقدار NPSH تعیین شده

یک بررسی ساده برای تعیین عملکرد دبی پمپ در مقدار NPSH تعیین شده بدون بروز اثرات کاویتاسیون ممکن است صورت پذیرد.

پمپ مطابق الزامات است اگر هد کل پمپ و راندمان گارانتی شده در دبی و NPSHA تعیین شده بدست آید.

۸-۶-۲- احراز اینکه عملکرد پمپ در مقدار NPSHA تعیین شده بوسیله کاویتاسیون تحت تأثیر نمی باشد.

یک بررسی ممکن است به این منظور انجام شود که دبی پمپ در شرایط تعیین شده تحت اثر کاویتاسیون نبوده است. پمپ مطابق الزامات است اگر یک تست در مقدار NPSH بالاتر از مقدار NPSHA تعیین شده، همان هد کل و راندمان را در همان دبی بدهد.

۸-۶-۳- تعیین NPSH3

در این تست، NPSH به طور پیوسته کاهش می یابد تا هد کل (برای پمپ های طبقاتی، هد طبقه اول) در دبی ثابت ۳٪ کاهش یابد. این مقدار NPSH به NPSH3 معروف است.

پمپ مطابق الزامات است اگر مقادیر اندازه گیری شده، کمتر یا برابر مقدار NPSHR (مقداری که توسط سازنده داده می شود) باشد.

برای پمپ های با هد کل خیلی پایین، کاهش بیشتر هد برای احراز گارانتی می تواند توافق شود.

۸-۶-۴- ضرایب تلرانس برای NPSHR

ماکزیمم اختلاف مجاز بین NPSHR اندازه گیری شده و گارانتی شده برابر است با:

$$t_{NPSHR} = + 3\% \text{ or } t_{NPSHR} = + 0.15 \text{ m} \quad \text{برای گرید ۱}$$

$$t_{NPSHR} = + 6\% \text{ or } t_{NPSHR} = + 0.30 \text{ m} \quad \text{برای گرید ۲}$$

هر کدام که بزرگتر باشد.

با استفاده از فرمول زیر، گارانتی برقرار می باشد، اگر:

$$(NPSHR)_G + (t_{NPSHR} \cdot NPSHR_G) \geq NPSHR_{measured}$$

یا:

$$(NPSHR)_G + (0.15 \text{ m and/or } 0.3.0 \text{ m}) \geq NPSHR_{measured}$$

۷- آزمون های پذیرش مطابق با استاندارد API 610 ویرایش یازدهم سال ۲۰۱۰

تست های عملکرد و NPSH باید با استفاده از روش ها و الزامات مربوط به عدم قطعیت که در استاندارد ISO 9906 گرید ۱، ANSI/HI 1.6 (برای پمپ های سانتریفیوژ) یا ANSI/HI 2.6 (برای پمپ های عمودی) بیان شده است، باشد. تolerانس های عملکرد مطابق با جدول زیر می باشد.

جدول شماره ۹: تolerانس 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) تolerانس 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 تolerانس 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 تolerانس مربوط به آن در زمان خرید باید مذاکره شود.

برآورد نتایج تست مشابه روش بیان شده در استاندارد ISO 9906 می باشد.

۸- الزامات اساسی

۸-۱- الزامات اساسی قبل از آزمون پذیرش

مطابق با استاندارد API 610، الزامات زیر باید قبل از انجام تست عملکرد و هنگامی که پمپ به مدار تست بسته شده است، رعایت شود:

- آبندها و یاتاقان های ذکر شده در قرارداد باید برای تست عملکرد استفاده شوند.
 - اگر توسط خریدار تأیید شود و اگر به جهت جلوگیری از خرابی آبندها های ذکر شده در قرارداد احتیاج باشد و یا اگر آبندهای ذکر شده در قرارداد با سیال تست همخوانی نداشته باشد، آبندهای جایگزین ممکن است حین تست عملکرد استفاده شود (به استاندارد ISO 21049:2004 بند 10.3.5 مراجعه شود).
 - آبندها (آبندها) حین تست عملکرد پمپ نباید هیچگونه نشستی فراتر از موارد بیان شده در استاندارد ISO 21049:2004 بخش A.1.3 داشته باشند، مگر آنکه بین خریدار و فروشنده توافق صورت گرفته باشد. هرگونه نشستی غیر مجاز حین تست عملکرد مستلزم دمنتاژ و تعمیر آبندها می باشد.
- وقتی پمپ در مدار تست می باشد و سیال تست، آب است، آبندهای مناسب برای تست با آب نباید نشستی قابل مشاهده ای داشته باشند. برای تأیید اینکه آیا معیار نشستی غیر قابل مشاهده معیار مناسبی برای آبندها تست می باشد، استاندارد ISO 21049:2004،

A.1.3 باید بررسی شود. بخصوص، آبیندهای دوگانه تحت فشار با سیال باربر فشار بالا (بیشتر از ۴۰ بار)، باید مورد بررسی قرار گیرند.

تذکر: استاندارد ISO 21049 با استاندارد ANSI/API Std 682 / ISO 21049 برابر است.

- اگر طور دیگری توافق نشده باشد، تست های عملکرد باید با آب در دمای کمتر از 55°C (130°F) انجام شود.

۲-۸ الزامات اساسی حین انجام تست عملکرد

اگر طور دیگری توافق نشود، مطابق با استاندارد API 610 برای تست عملکرد باید موارد زیر رعایت شود:

- 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:

(۱) نقطه شات-اف (اندازه گیری ارتعاش لازم نیست)

(۲) مینیمم دبی پیوسته پایدار (شروع محدوده عملکرد مجاز)

(۳) بین ۹۵٪ و ۹۹٪ دبی نقطه کاری

(۴) بین دبی نقطه کاری و ۱۰۵٪ دبی نقطه کاری

(۵) دبی تقریبی نقطه بهترین راندمان (اگر دبی نقطه کار در فاصله ۵٪ دبی بهترین راندمان نباشد)

(۶) انتهای محدوده عملکرد مجاز

- اگر طور دیگری توافق نشده باشد، سرعت تست در فاصله ۳٪ سرعت کاری تعیین شده در دیتاشیت باید باشد. نتایج باید برای سرعت کاری اصلاح شود.

۳-۸ الزامات اساسی بعد از انجام تست عملکرد

مطابق با استاندارد API 610، الزامات زیر باید پس از انجام تست عملکرد رعایت شود:

- اگر لازم باشد بعد از تست عملکرد، پمپ برای قرارگیری در محدوده تلهرانسی هد، تراش پروانه داده شود و در واقع پمپ دمنناژ شود، تست مجدد پمپ نیاز نیست اگر کاهش قطر پروانه از ۵٪ قطر کامل پروانه کمتر باشد.
- اگر مشخص شده باشد، برای پمپ های طبقاتی حتی اگر کاهش قطر پروانه کمتر از ۵٪ باشد، تست مجدد باید انجام شود.

۹- مقایسه استانداردهای ISO، API 610 و انستیتو هیدرولیک HI در ارتباط با نقاط گارانتی و اندازه گیری عدم قطعیت ها

جدول شماره ۱۰: مقایسه استاندارد ISO 9906 گرید ۱ و ۲ و استاندارد ISO 5198

ISO 9906 گرید ۲	ISO 9906 گرید ۱	ISO 5198 بالاترین گرید دقت	گرید دقت مطابق استاندارد ISO									
<p>تلرانس ساخت در عدم قطعیت اندازه گیری کل، لحاظ شده است. مقدار گارانتی دبی و هد کل وقتی بدست می آید که منحنی QH خط عمودی و یا افقی را قطع کند و یا حداقل در یک نقطه مماس شود. راندمان باید از منحنی QH اندازه گیری شده بدست آید، یک خط مستقیم گذرنده از نقطه گارانتی Q_G، H_G و نقطه صفر محورهای QH رسم می شود. از نقطه برخورد این خط با منحنی QH یک خط مستقیم عمودی رسم می شود تا منحنی Qη را قطع کند. شرط گارانتی راندمان برقرار خواهد بود اگر مقدار بدست آمده برای راندمان بیشتر یا حداقل برابر با $\eta_G \cdot (1 - t_\eta)$ باشد.</p>												
$\left[\frac{H_G \cdot t_G}{\Delta H} \right]^2 + \left[\frac{Q_G \cdot t_Q}{\Delta Q} \right]^2 \geq 1$			شرط گارانتی عملکرد									
±5% ±8% 5%- 6% < 0.3 m	±3% ±4.5% 3%- 3% < 0.15 m	(1.5%) (2.5%) (-2.2%) (3% < 0.15 m)	t _H t _Q t _η t _{NPSH3}									
ماکزیمم پراکندگی مجاز مقدار اندازه گیری شده بر اساس دقت آمادی ۹۵٪												
9	7	5	3	9	7	5	3	9	7	5	3	تعداد مشاهدات در هر نقطه اندازه گیری
1.6	1.4	1.0	0.6	0.8	0.7	0.5	0.3	0.9	0.7	0.5	0.25	n± به % (سرعت)
5.8	4.5	3.5	1.8	2.8	2.2	1.6	0.8	2.8	2.2	1.6	0.8	H, P, Q± به % (اطلاعات عملکرد)
عدم قطعیت کل مجاز برای تجهیزات اندازه گیری و اندازه گیری ها: مقادیر داخل پرانتز مربوط به ابزار دقیق ها می باشد.												
(± 2.5) ± 3.5%			(± 1.5) ± 2.0%			(± 1.0) ± 1.5%						دبی
(± 1.5) ± 3.5%			(± 1.0) ± 1.5%			(± 0.5) ± 1.0%						هد
(± 2.0) ¹ ± 4.0%			(± 1.0) ± 2.0%			(± 0.6) ± 1.3%						توان ورودی
± 6.4%			± 3.2%			± 2.25%						راندمان
(± 1.4) ± 2.0%			(± 0.35) ± 0.5%			(± 0.1) ± 0.2%						سرعت
(۱) برای تعیین راندمان پمپ												

جدول شماره ۱۱: مقایسه استاندارد API 610 ویرایش یازدهم و استاندارد HI

استانداردهای انستیتو هیدرولیک شماره 1.6 و 2.6	API 610 (ISO 13709)		
برای پذیرش سطح A، پمپ ها باید در محدوده تoleransi زیر باشند: در هد نقطه کار: $\pm 10\%$ دبی نقطه کار یا در دبی و سرعت نقطه کاری $\pm 5\%$ هد برای هدهای کمتر از ۱۵۰ متر $\pm 3\%$ هد برای هدهای بیشتر از ۱۵۰ متر تطابق با یکی از تoleransi های فوق لازم است. تoleransi های منفی برای دبی، هد و راندمان در نقطه کاری مجاز نمی باشد.	در Q_G و η_G :		
	شات-اف	نقطه گارانتی	هد کلی پمپ
	$\pm 10\%$	$\pm 3\%$	تا ۷۵ متر
	$\pm 8\%$	$\pm 3\%$	بین ۷۵ تا ۳۰۰ متر
	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$	بیشتر از ۳۰۰ متر
	گارانتی نمی شود.		η_G
		P_G	
		NPSHR	
نوسان مجاز عدم قطعیت اندازه گیری (ابزار دقیق)			
دبی	$\pm 2\% (\pm 1.5)$	عدم قطعیت های اندازه گیری در مقادیر پیشنهاد شده در فوق لحاظ شده است	
هد	$\pm 2\% (\pm 1.0)$		
هد مکش	$\pm 2\% (\pm 0.5)$		
سرعت	$\pm 0.3\% (\pm 0.3)$		
توان ورودی	$\pm 2\% (\pm 1.5)$		
۱) تoleransi منفی تنها زمانی مجاز است که منحنی عملکرد پمپ هنوز نزولی باشد.			

۱۰- مقایسه استانداردها در رابطه با ارتعاشات پمپ

۱۰-۱- ISO 9908 - خصوصیات فنی پمپ های سانتریفیوژ - کلاس ۳

این استاندارد شامل احتیاجات پمپ های سانتریفیوژ یک مرحله ای، چند مرحله ای، افقی یا عمودی می شود. احتیاجات کلاس ۳ با تسامح بیشتری نسبت به استاندارد ISO 5199 تعیین شده است.

• شرایط:

- بین پمپ ها بنا بر ارتفاع خط محور آنها (بالتر از ۲۲۵ میلیمتر یا پایین تر از آن) و سرعت آنها (تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه یا از ۱۸۰۰ تا ۴۵۰۰ دور در دقیقه) تفاوت قائل می شود.
 - مقادیر در Bearing housing، به صورت شعاعی در یک نقطه عملکردی در سرعت ($\pm 5\%$) و شدت جریان ($\pm 5\%$) که پمپ بدون کاپیتاسیون کار می کند، اندازه گیری می شود.
 - هنگامی که در پمپ هایی با لاین شفت عمودی از کوپلینگ های صلب استفاده می شود، ثبات ها در فلنج بالایی و هنگامی که از کوپلینگ های انعطاف پذیر استفاده می شود، نزدیک بیرینگ بالایی پمپ قرار دارند.
- برای دستیابی به حدهای ارتعاشی این استاندارد به جدول ۱۲ مراجعه شود.

جدول شماره ۱۲- حد های شدت ارتعاش برای پمپ های افقی با چند پره ISO 9908

سرعت دورانی n RPM	سرعت در مقیاس rms (mm/s)	
	$h_1 \leq 225mm$	$h_1 > 225mm$
$n \leq 1800$	2.8	4.5
$1800 < n \leq 4500$	4.5	7.1

توضیحاتی درباره ی مقدار h_1 :

- ❖ تعیین مقدار آن بر اساس ISO2372 است.
- ❖ برای پمپ های افقی، h_1 فاصله ی بین baseplate در تماس با پمپ و خط مرکزی محور پمپ است.

کاربرد این استاندارد

این استاندارد برای تمامی پمپ های سانتریفیوژ light duty (پمپ هایی که هد و دبی پایینی دارند) مناسب است ولی بیشتر برای پمپ های مکش از انتها مطابق استاندارد EN733 کاربرد دارد.

۱۰-۲- ISO 5199- خصوصیات فنی پمپ های سانتریفیوژ- کلاس ۲

این استاندارد شامل خصوصیات پمپ های سانتریفیوژ یک مرحله ای، چند مرحله ای، افقی و عمودی کلاس ۲ با هر کاربرد، نحوه نصب و نوع موتوری می باشد. پمپ های مورد استفاده در صنایع شیمیایی بیشترین سهم را در این استاندارد دارند.

• شرایط:

- بین پمپ ها بر حسب ۴ فاکتور تمایز قائل می شود:
 - ۱- ارتفاع محور بالا و پایین ۲۲۵ میلیمتر
 - ۲- صلب افقی
 - ۳- انعطاف پذیر افقی
 - ۴- تمامی پمپ های عمودی
- برای دستیابی به حدهای ارتعاشی این استاندارد به جدول ۱۳ مراجعه شود.

جدول شماره ۱۳- حد های شدت ارتعاش ISO 5199

	سرعت در مقیاس rms (mm/s)		
	افقی صلب	افقی انعطاف پذیر	عمودی
$h \leq 225mm$	3	5.5	7.1
$h > 225mm$	4.5	7.1	7.1

پارامتر h ارتفاع خط مرکزی پمپ است.

کاربرد این استاندارد

این استاندارد برای تمامی پمپ های سانتریفیوژ medium duty مناسب است ولی برای پمپ های مکش از انتها طبق استاندارد ISO 2858 کاربرد بیشتری دارد. از این پمپ ها در صنایع شیمیایی استفاده می شود و سیال آن خورنده، سمی و دما بالا است.

۱۰-۳- ISO 9905- خصوصیات فنی پمپ های سانتریفیوژ- کلاس ۱

این استاندارد شامل (سختگیرانه ترین) احتیاجات پمپ های سانتریفیوژ کلاس ۱ در صنایع مختلف است ولی شامل پمپهای صنایع نفت و پتروشیمی و گاز طبیعی نمی شود.

شرایط:

- بین پمپ ها بنا بر ارتفاع خط محور آنها (بالتر از ۲۲۵ میلیمتر یا پایین تر از آن) و سرعت آنها (تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه یا از ۱۸۰۰ تا ۴۵۰۰ دور در دقیقه) تفاوت قائل می شود.
- مقادیر در Bearing housing، به صورت شعاعی در یک نقطه عملکردی در سرعت ($\pm 5\%$) و شدت جریان ($\pm 5\%$) که پمپ بدون کاویتاسیون کار می کند، اندازه گیری می شود.
- هنگامی که در پمپ هایی با لاین شفت عمودی از کوپلینگ های صلب استفاده می شود، ثبات ها در فلنج بالایی و هنگامی که از کوپلینگ های انعطاف پذیر استفاده می شود، نزدیک بیرینگ بالایی پمپ قرار دارند.

برای دستیابی به حدهای ارتعاشی این استاندارد به جدول ۱۴ مراجعه شود.

جدول شماره ۱۴- حد های شدت ارتعاش برای پمپ های افقی با چند پره (بر اساس ISO 10816-1)

سرعت دورانی N RPM	بیشینه ی سرعت ارتعاشی برای شفتی با ارتفاع محور h_1 در مقیاس (mm/s) rms	
	$h_1 \leq 225mm$	$h_1 > 225mm$
$n \leq 1800$	2.8	4.5
$1800 < n \leq 4500$	4.5	7.1

کاربرد این استاندارد

این استاندارد برای پمپ های سانتریفیوژ heavy duty با وظایف سخت مثلا کار در فشار و دمای بالا مناسب است ولی همانطور که پیش تر اشاره شد در صنایع نفت و پتروشیمی و گاز کاربرد ندارد.

۱۰-۴- ISO 10816-3- ارتعاشات مکانیکی- ارزیابی ارتعاشات ماشین با اندازه گیری ارتعاش قطعات غیر

دوار

(بخش سوم- ماشین های صنعتی با قدرت نامی بالاتر از ۱۵ کیلو وات و سرعت نامی بین ۱۲۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه اندازه گیری شده در محل کارکرد طبیعی)

کاربرد این استاندارد

این قسمت از استاندارد ISO 10816 دیگر در صنعت پمپ کاربردی ندارد. اکنون به جای این استاندارد از بخش هفتم آن استفاده می شود.

۱۰-۵- ISO 10816-7- ارتعاشات مکانیکی- ارزیابی ارتعاشات ماشین با اندازه گیری ارتعاش قطعات غیر دوار

(بخش هفتم- پمپ های روتودینامیکی برای کاربردهای صنعتی- اندازه گیری از روی شفت دوار)

این استاندارد ماشین های صنعتی با قدرت نامی بالاتر از ۱۵ کیلو وات را شامل می شود. اندازه گیری ارتعاشات اجزای دوار و غیر دوار در این استاندارد بیان شده و راهنمایی برای شدت ارتعاش در محل کارکرد طبیعی و تاسیسات تولیدی ها، در دامنه های عملکردی «ترجیح داده شده» و «مجاز» ارائه شده است. تفاوت بخش هفتم با بخش سوم در این است که برخلاف بخش سوم، در بخش هفتم تفاوتی بین نصب صلب یا انعطاف پذیر وجود ندارد.

پمپ ها به دو دسته تقسیم می شوند:

دسته ی اول : پمپ های نیازمند به پایداری (اطمینان پذیری)، در دسترس بودن و نکات امنیتی بالا (مثلا پمپ هایی برای سیالات سمی و زیان آور، کاربردهای مهم، نفت و گاز، نیروگاه های هسته ای و...)

دسته ی دوم : پمپ هایی برای کاربرد عام (مثلا پمپ های عمودی (VS) با سرعتی بیش از ۶۰۰ دور در دقیقه)

استاندارد برای ارتعاش اجزای غیر دوار پمپ های روتودینامیکی با توان بالای ۱ کیلو وات و تعداد پره های پروانه بیشتر از ۳، نواحی ای را جهت تعیین حدود ارتعاشی مشخص می کند. نواحی عبارتند از:

- ناحیه A: ارتعاشات ماشین های تازه به کار گرفته شده
- ناحیه B: مناسب برای عملکردهای طولانی مدت یا نامحدود
- ناحیه C: نامناسب برای عملکردهای طولانی مدت یا نامحدود
- ناحیه D: ارتعاشات با شدت ارتعاشی بالای منجر به خسارت

شایان ذکر است که اگر هنگامی که پمپ کار نمی کند ارتعاشات زمین بیشتر از ۲۵٪ مقدار ارتعاش اندازه گیری شده در هنگام عملکرد پمپ باشد، نیاز به اصلاح کننده ای برای کاهش ارتعاشات زمین وجود دارد. جدول ۱۵ حدود ارتعاشات اندازه گیری شده در اجزای غیردوار را نشان می دهد.

کاربرد این استاندارد

این استاندارد آخرین نسخه از استانداردهای مشابه است که بیشترین مورد استفاده را در کارخانجات دارد. این استاندارد بیشتر برای پمپ های پروانه ای چند پره مناسب است.

این استاندارد دسته بندی ۱ و ۲ را معرفی می کند و پمپ هایی با سیال سمی را در دسته ی ۱ قرار می دهد که با استاندارد ISO5199 در تناقض است. بیشتر تولید کنندگان توصیه می کنند که پمپ های شیمیایی تولید شده مطابق با استاندارد ISO2858 که کاملا نکات فنی استاندارد ISO5199 را برآورده می کنند، باید محدودیت های ارتعاشی بیان شده در استاندارد ISO10816-7 را نیز بر آورده کنند.

طبق استاندارد، پمپ های عمودی کلا در دسته ی دوم قرار می گیرند. این دسته بندی کلی باعث شده است که این استاندارد برای پمپ های عمودی چندان مناسب نباشد. به همین دلیل برای پمپ های عمودی از استاندارد ISO5199 استفاده می شود.

جدول شماره ۱۵- حدود ارتعاشات اندازه گیری شده در اجزای غیردوار(بر اساس ISO 10816-7)

		حد سرعت ارتعاشی در مقیاس rms (mm/s)			
		دسته اول		دسته دوم	
ناحیه	توضیحات	≤ 200KW	> 200KW	≤ 200KW	> 200KW
A	ارتعاشاتماشینهایتازهبهکارگرفتهشده در POR	2.5	3.5	3.2	4.2
B	مناسببرایعملکردهایطولانیمدتیانامحدود در AOR	4	5	5.1	6.1
C	عملکرد محدود	6.6	7.6	8.5	9.5
D	خسارت آور	>6.6	>7.6	>8.5	>9.5
تست در محل سایت	POR	2.5	3.5	3.2	4.2
	AOR	3.4	4.4	4.2	5.2
تست در کارخانه	POR	3.3	4.3	4.2	5.2
	AOR	4	5	5.1	6.1

۱۰-۶- ISO13709:2009 پمپ های سانتریفیوژ برای صنایع نفت، پتروشیمی و گاز طبیعی (API 610)

در این استاندارد حدود ارتعاشات حین تست های عملکرد با توجه به رابطه ی بین شدت جریان و ارتعاشات تعیین می شود و در نتیجه محدوده مجاز عملکرد (AOR) و محدود هاراجع عملکرد (POR) معرفی می شوند. ناحیه ی مجاز عملکرد باید تعیین شود. اگر ناحیه ی مجاز عملکرد توسط فاکتوری غیر از ارتعاشات محدود شده است، آن فاکتور نیز باید مشخص شود. جهت مطالعه بیشتر، به فصل ۱۷ بخش ۱۷-۳ مراجعه شود.

در این استاندارد موارد زیر تعیین شده است:

- 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):

جدول شماره ۱۶

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

- حدود ارتعاشات برای پمپ های OH و BB با ژورنال بیرینگ هیدرو دینامیکی (اندازه گیری شده از شفت پمپ):

جدول شماره ۱۷

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

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

جدول شماره ۱۸

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

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

جدول شماره ۱۹

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

- 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 ۷ حدود ارتعاشات برای چنین پمپ هایی نشان داده شده است.

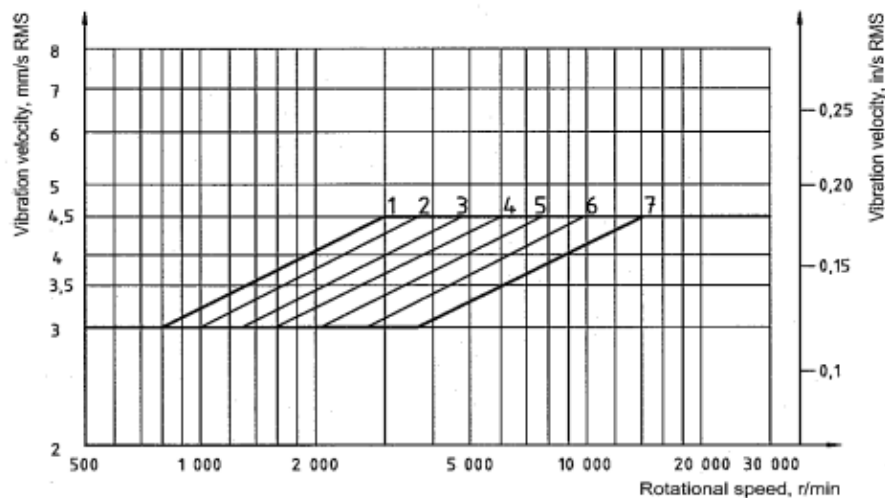
برای تمام پمپ ها و انواع بیرینگ:

- 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.

کاربرد این استاندارد

این استاندارد کاربرد بسیار زیادی در صنایع نفت و پتروشیمی و گاز دارد. این استاندارد معمولاً برای پمپ هایی به کار می رود که از الزامات استانداردهای دیگر مانند استانداردهای ISO 2858 یا ANSI B73.1 پیروی نمی کنند.



شکل شماره ۷- 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 ۷:

$P \geq \frac{3000KW}{stage}$	۱
$P = \frac{2000KW}{stage}$	۲
$P = \frac{1500KW}{stage}$	۳
$P = \frac{1000KW}{stage}$	۴
$P = \frac{700KW}{stage}$	۵
$P = \frac{500KW}{stage}$	۶
$P \leq \frac{300KW}{stage}$	۷

۱۱- روش انجام آزمایش

قبل از هرگونه اقدام برای تست، کالیبراسیون تجهیزات اندازه گیری را بررسی کنید. مطمئن شوید علاوه بر اعتبار کالیبراسیون تجهیزات، وضعیت ظاهری و قرارگیری آنها نیز در موقعیت مناسبی قرار دارد. برنامه کالیبراسیون تجهیزات را مطالعه کنید و در صورت نیاز قبل از اتمام دوره کالیبراسیون، اقدامات لازم جهت ارسال تجهیزات به آزمایشگاه های مرجع را انجام دهید.

۱۱-۱- انتخاب خط تست

خط تست بر اساس سرعت سیال در لوله انتخاب می شود. سرعت سیال در خط خروجی پمپ باید بین ۰.۵ تا ۲.۵ متر بر ثانیه باشد. سرعت سیال در خط بر اساس فرمول زیر محاسبه می شود:

$$V = 354 \times \frac{Q}{D^2} \quad (1)$$

Q: دبی پمپ بر حسب متر مکعب بر ساعت

D: قطر لوله بر حسب میلیمتر

■ مثال ۱: برای دبی ۴۰ متر مکعب بر ساعت، خط لوله مناسب برای آزمایشگاه، کدام است؟

$$2" \text{ Pipeline} : V = 354 \times \frac{40}{50^2} = 5.67 \text{ m/s}$$

$$6" \text{ Pipeline} : V = 354 \times \frac{40}{150^2} = 0.63 \text{ m/s}$$

بنابراین نصب پمپ در خط ۶ اینچ (۱۵۰ میلیمتر) مناسبتر می باشد.

۱۱-۲- نصب و استارت پمپ

- پس از انتخاب خط تست مناسب، فلنج مکش و رانش پمپ را به آزمایشگاه متصل کنید. (مطمئن شوید لوله های انعطاف پذیر در مکش و رانش پمپ به طور مستقیم به پمپ متصل شده است و عاری از هرگونه کشش و پیچش باشد).
- شیر خط مکش را به طور کامل باز کنید. (در صورتی که مکش پمپ مستغرق باشد، به مرحله بعد بروید)

- از طریق اتاق کنترل شیر خط رانش را به طور کامل ببندید.
- مطمئن شوید هیچگونه هوایی در داخل پمپ محبوس نباشد (در صورت نیاز اتصالات هواگیری پمپ را باز کنید).
- پمپ و موتور را با توجه به دستورالعمل های مربوطه همراستا کنید.
- مطمئن شوید کلید اصلی برق اتاق کنترل خاموش باشد.
- اپراتور برق با رعایت کلیه نکات ایمنی، کابل برق الکتروموتور را متصل کند.
- مطمئن شوید که خطر برق گرفتگی حین کارکرد پمپ وجود نداشته باشد (ترمینال باکس موتور و مسیر عبور کابل را محافظت کنید)

- مطمئن شوید افراد در کنار پمپ ازدحام نکرده باشند.

- از اتاق کنترل دکمه استارت پمپ را فشار دهید.

- جهت چرخش محور پمپ را بررسی کنید. در صورتی که پمپ در جهت معکوس می چرخد، پمپ را خاموش کنید و اتصال یکی از فازها را تعویض کنید.

- مجدداً پمپ را استارت کنید و به آرامی شیر کنترل خط رانش را باز کنید تا دبی پمپ به دبی مینیمم برسد. (دبی مینیمم را از دیتاشیت پمپ بدست بیاورید)

- وضعیت کلی عملکرد دستگاه را بررسی کنید. مطمئن شوید نشتی در محل اتصالات ایستگاه تست و یا از خود پمپ وجود نداشته باشد. همچنین مطمئن شوید لرزش یا صدای غیر عادی وجود ندارد.

۱۱-۳- ثبت مشخصه های هیدرولیکی و مکانیکی

- با باز و بسته کردن شیر کنترلی، مشخصه های هیدرولیکی و مکانیکی پمپ را برای پنج نقطه زیر یادداشت کنید.

(الف) نقطه شات-اف (اندازه گیری ارتعاش لازم نیست)

(ب) مینیمم دبی پیوسته پایدار (شروع محدوده عملکرد مجاز)

(پ) بین ۹۵٪ و ۹۹٪ دبی نقطه کاری

(ت) بین دبی نقطه کاری و ۱۰۵٪ دبی نقطه کاری

(ث) انتهای محدوده عملکرد مجاز

برای هر نقطه، مشخصه های هیدرولیکی شامل پارامترهای زیر می باشد:

(الف) دبی

(ب) هد

(پ) آمپر مصرفی

(ت) ولتاژ شبکه

(ث) ارتعاش پمپ در محل یاتاقان ها در هر سه جهت

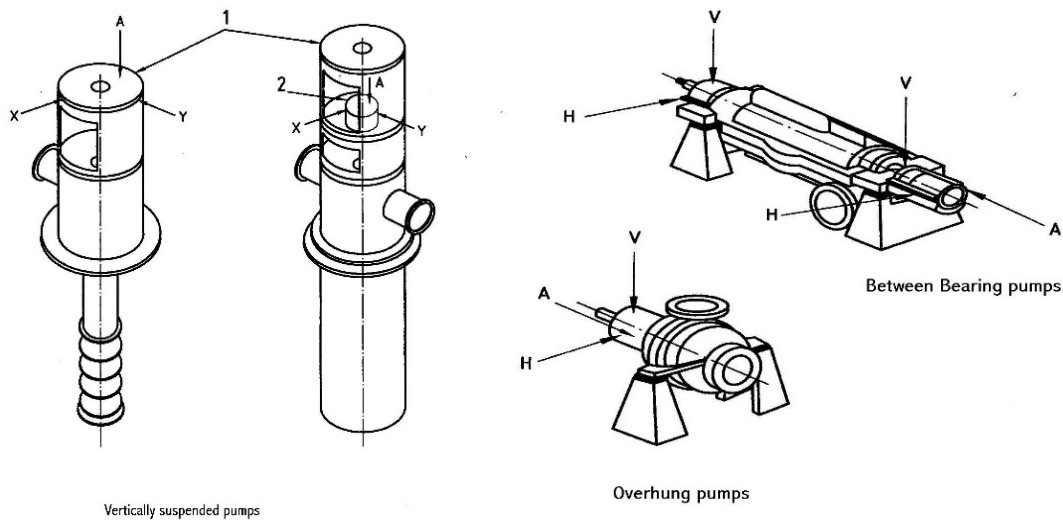
(ج) ارتعاش موتور در محل یاتاقان سمت کوپلینگ در سه جهت

(چ) نویز پمپ

- هد کل پمپ را در دبی نقطه کاری با توجه به روابط فصل ۱۲ محاسبه کنید. در صورتی که در محدوده تیرانس مجاز عملکرد قرار نداشت، علت را بررسی، اصلاح و مجدداً تست را تکرار کنید. (در صورتی که هد کل پمپ بیشتر از حد بالایی تیرانس مجاز عملکرد باشد، قطر پروانه نیاز به تراش دارد - برای محاسبه قطر تراش پروانه به فصل ۱۸ رجوع شود).

۴-۱۱- تست ارتعاش

- دستگاه تست ارتعاش سنج پرتابل را روشن کنید. از قسمت تنظیمات، دستگاه را در وضعیت کاری قرار دهید. اگر طور دیگری در قرارداد مشخص نشده باشد، دستگاه را طوری تنظیم کنید که ارتعاش بر حسب mm/s در مقیاس RMS نمایش داده شود.
- پراب دستگاه را در محل بدون ارتعاش قرار دهید. مطمئن شوید که دستگاه ارتعاش صفر را نشان می دهد.
- مطابق شکل ۸، پراب دستگاه را در محل یاتاقان ها قرار دهید و پس از ثابت شدن اعداد نمایشگر دستگاه، عدد ارتعاش را در جهات H, V, A ثبت کنید.
- برای پمپ های OH، ارتعاش در محل یاتاقانهای خارجی پمپ و یاتاقان DE (Drive End) موتور را ثبت کنید (شکل شماره ۸)
- برای پمپ های BB، ارتعاش در محل هر دو محفظه یاتاقان و یاتاقان DE موتور را ثبت کنید (شکل شماره ۸)
- برای پمپ های VS، محل اندازه گیری ارتعاش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل شماره ۸: محل های اندازه گیری ارتعاش در پمپ (استاندارد API 610)

۵-۱۱- تست نویز

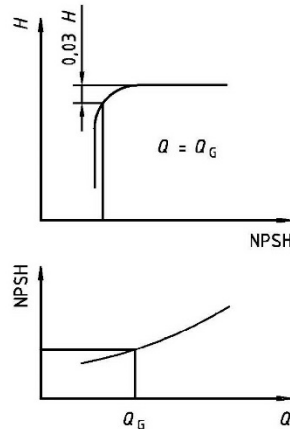
- تا آنجا که امکان دارد فضای محیط را از صداهای مزاحم پاک کنید. صدای پرسنل، دستگاه های تراش، کمپرسور باد، سنگ دستی، جرقه‌کاری و جوشکاری از منابع اصلی تداخل نویز در انجام آزمایش هستند.
- دستگاه اندازه گیری نویز را روشن کنید. محدوده اندازه گیری را بین ۴۰ تا ۱۰۰ دسی بل تنظیم کنید.
- در شعاع یک متر از مرکز الکتروپمپ قرار بگیرید. حسگر دستگاه را به سمت دستگاه نشانه روید.
- مقدار نویز بر حسب دسی بل را قرائت کنید.
- مطابق تمامی استانداردهای موجود، نویز دستگاه نباید از ۸۵ تا ۹۰ دسی بل برای مجموعه پمپ و الکتروموتور بیشتر باشد.

۶-۱۱- تست NPSH

- در این تست $NPSH_a$ (NPSH) در دسترس مربوط به ایستگاه تست) به طور متناوب کاهش پیدا کرده تا حد کل (در طبقه اول) در دبی ثابت ۳ درصد افت کند. این مقدار $NPSH_3$ 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) 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. 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. (شکل شماره ۹ مشاهده گردد). این لحظه شروع کاویتاسیون می باشد و $NPSH_r = NPSH_a$ خواهد بود. از روابط مربوط به فصل ۱۵، مقدار $NPSH$ پمپ را محاسبه کنید.



شکل شماره ۹ (مرجع: استاندارد ISO 9906-1999)

۱۱-۷- اتمام تست

پس از ثبت اطلاعات آزمایش، برای خاموش کردن پمپ و خارج نمودن پمپ از مدار تست، اقدامات زیر را انجام دهید:

- شیر کنترلی را در وضعیت دبی مینیمم قرار دهید.
- از اتاق کنترل، دکمه استاپ را فشار دهید.
- ابتدا شیر رانش و سپس شیر مکش پمپ را ببندید.
- مطمئن شوید کلید اصلی برق اتاق کنترل خاموش باشد.
- اپراتور برق با رعایت کلیه نکات ایمنی، کابل برق الکتروموتور را جدا کند.
- درپوش تخلیه پمپ را باز کنید و اجازه دهید سیال درون پوسته و لوله های مکش و رانش تخلیه گردد.
- فلنج های مکش و رانش پمپ و تجهیزات جانبی (در صورت وجود) را باز کنید.
- با استفاده از تجهیزات بالابر مناسب، دستگاه را از محل تست خارج کنید.
- با استفاده از کمپرسور باد، داخل گذرگاه های عبور سیال در پمپ را تا آنجا که امکان دارد تمیز و خشک کنید.
- مطمئن شوید که وجود قطرات آب باعث زنگ زدگی دستگاه نمی شود. در صورت نیاز از محلول های ضد زنگ و محافظ سطح جهت شستشو استفاده کنید (محلول های محافظ باید به مدت ۴ ساعت در داخل پمپ بماند).

۱۲- محاسبه هد کل پمپ

بر اساس تئوری مکانیک سیالات (معادلات اوپلر) و استاندارد ISO 9906، هد کل در هر مقطع از رابطه کلی زیر محاسبه می شود:

$$H_x = Z_x + \frac{p_x}{\rho g} + \frac{U_x^2}{2g} \quad (2)$$

که Z ارتفاع مرکز سطح مقطع نسبت به صفحه مبنا و p فشار گنج مربوط به مرکز سطح مقطع می باشد. U هم سرعت متوسط سیال در همان سطح مقطع می باشد.

با این تعریف، هد کل ورودی و خروجی در پمپ ها با روابط زیر تعریف می شود:

هد کل ورودی :

$$H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} \quad (3)$$

هد کل خروجی پمپ :

$$H_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} \quad (4)$$

و با توجه به روابط بالا، هد کل پمپ برابر است با:

$$H = H_2 - H_1 \quad (5)$$

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} \quad (6)$$

از آنجا که نقاط گارانتی بر مبنای فلنج های مکش و رانش پمپ می باشد، و عموماً نقاط اندازه گیری فشار با این فلنج ها فاصله دارند، لازم است به هد کل پمپ، هد های اتلافی اصطکاکی (H_f) بین نقاط اندازه گیری و فلنج های پمپ را اضافه نمود.

هد اتلافی اصطکاکی برای آزمایشگاه تست هیدرولیک شرکت آریا سپهر کیهان از رابطه زیر بدست می آید:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (7)$$

برای لوله های گالوانیزه در آزمایشگاه ضریب f برابر است با 0.02

L طول لوله معادل به متر می باشد.

D: قطر لوله به متر می باشد.

U سرعت متوسط سیال به متر می باشد.

H_f : هد های اتلافی اصطکاکی به متر است.

در آزمایشگاه تست، محل قرائت فشار مکش دقیقاً در مقطع فلنج مکش پمپ می باشد، بنابراین اتلافات اصطکاکی در سمت مکش صفر می باشد.

در نتیجه هد کل پمپ برابر است با:

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + H_{f2} \quad (8)$$

شتاب گرانش زمین برابر با 9.81 m/s^2 می باشد و دانسیته سیال تست مطابق با آزمایشات انجام شده برابر است با 1007

kg/m^3

در نتیجه می توان نوشت:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

$$\rho = 1007 \text{ kg/m}^3 \text{ (10)}$$

همچنین سرعت سیال در لوله از رابطه شماره ۱ بدست می آید:

$$U = 354 \times \frac{Q}{D^2}$$

Q: دبی پمپ بر حسب متر مکعب بر ساعت

D: قطر لوله بر حسب میلیمتر

با جایگذاری روابط ۷، ۹ و ۱۰ در رابطه ۸، روابط زیر بدست می آید:

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + f \frac{L_2}{D_2} \frac{U_2^2}{2g} \text{ (11)}$$

و از رابطه ۱ داریم:

$$U_1 = 354 \frac{Q}{D_1^2}$$

$$U_2 = 354 \frac{Q}{D_2^2}$$

$$\rho g = 1007 \times 9.81 = 9879$$

$$2g = 2 \times 9.81 = 19.62 \text{ m/s}^2$$

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

در نتیجه می توان نوشت:

$$H = Z_2 - Z_1 + 10.12 (p_2 - p_1) + 6,387.2 Q^2 \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right) + 127,873.5 Q^2 \left(\frac{L_2}{D_2^5} \right) \text{ (12)}$$

در آزمایشگاه تست هیدرولیک شرکت آریا سپهر کیهان ترم p_2 10.12 از اتاق کنترل و در نمایشگر HMI قابل قرائت می باشد. این ترم را H_2 نامگذاری می کنیم.

$$H = \Delta Z + H_2 - 10.12 (p_1) + 6,387.2 Q^2 \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right) + 127,873.5 Q^2 \left(\frac{L_2}{D_2^5} \right) \text{ (13)}$$

در رابطه فوق داریم:

- H هد کل پمپ بر حسب متر می باشد.
- مقدار ΔZ برابر با ارتفاع هندسی مرکز سطح مقطع فلنج مکش پمپ (یا خط مبنای پروانه در پمپ های عمودی) با مرکز سطح مقطع محل قرارگیری فشار سنج خروجی بر حسب متر می باشد (هد استاتیکی).
- H_2 عدد قرائت شده برای هد خروجی پمپ از نمایشگر HMI اتاق کنترل بر حسب متر می باشد.
- P_1 فشار گیج نصب شده روی فلنج مکش پمپ بر حسب bar می باشد. در صورتی که مکش پمپ غوطه ور باشد، عبارت $10.12 (p_1)$ برابر با عمق استغراق خط مبنای پروانه نسبت به سطح آزاد سیال به متر می باشد. یعنی اگر عمق استغراق ۲ متر باشد، عبارت $10.12 (p_1)$ برابر با ۲ متر می باشد.
- Q دبی پمپ بر حسب متر مکعب بر ساعت می باشد.
- D_2 قطر لوله در محل نصب فشار سنج رانش بر حسب میلیمتر می باشد.
- D_1 قطر فلنج مکش پمپ بر حسب میلیمتر می باشد
- L_2 طول لوله معادل به متر می باشد. در محاسبه طول لوله معادل، علاوه بر طول لوله مستقیم، می بایست طول معادل اتصالات و زانویی ها را نیز در نظر گرفت. برای آزمایشگاه تست هیدرولیک شرکت آریا سپهر، طول لوله معادل در خطوط مختلف در جدول زیر محاسبه شده است:

جدول شماره ۲۰: طول لوله معادل L_2

سایز خط تست	طول لوله معادل L_2
۲ اینچ	۲۷,۰ متر
۶ اینچ	۳۵ متر
۱۲ اینچ	۴۲ متر

■ مثال ۲: الکتروپمپی به مدار تست خط ۲ اینچ بسته شده است. سایز مکش پمپ ۳ اینچ می باشد. در نقطه ای از آزمایش دبی پمپ ۲۵ متر مکعب بر ساعت و هد H_2 برابر با ۴۳ متر قرائت شده است. فشار گیج نصب شده روی فلنج مکش پمپ عدد 0.15 bar را نشان می دهد. مطلوب است هد کل پمپ در نقطه آزمایش شده؟ هد استاتیکی ایستگاه ۳ متر می باشد.
حل: از رابطه ۱۳ می توان نوشت:

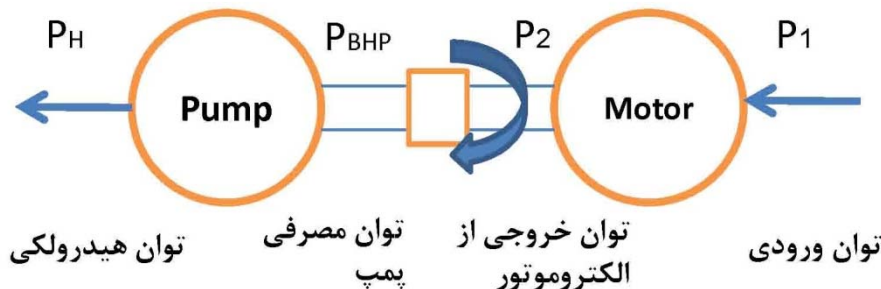
$$H = 3 + 43 - 10.12 (0.15) + 6,387.2 \times 25^2 \left(\frac{1}{50^4} - \frac{1}{80^4} \right) + 127,873.5 \times 25^2 \left(\frac{27}{50^5} \right)$$

$$H = 3 + 43 - 1.518 + 0.541 + 6.905 \rightarrow H = 52 \text{ m}$$

۱۳- محاسبه توان و راندمان

۱۳-۱ انواع توان

توان در الکتروپمپ ها چهار نوع می باشد



شکل شماره ۱۰: توان مصرفی در پمپ ها

۱۳-۲ توان ورودی P_1

توان الکتریکی ورودی به الکتروموتور از رابطه زیر بدست می آید.

$$P_1 = \sqrt{3} V I \cos \phi \quad (14)$$

P_1 توان ورودی الکتریکی به وات

V ولتاژ منبع تغذیه به ولت می باشد.

I متوسط جریان مصرفی در هر خط به آمپر می باشد.

$\cos \phi$ ضریب قدرت الکتروموتور است.

■ **مثال ۳:** توان ورودی الکتروموتوری با ولتاژ منبع تغذیه ۳۸۴ ولت، آمپر مصرفی ۲۸ آمپر و ضریب قدرت ۰.۸۹ چند کیلووات می باشد؟

$$P_1 = \sqrt{3} \times 384 \times 28 \times 0.89 \rightarrow P_1 = 16,555 \text{ W} = 16.555 \text{ kW}$$

۳-۱۳- توان خروجی الکتروموتور P_2

توان خروجی الکتروموتور همان توان مکانیکی روی محور آن می باشد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_m \quad (15)$$

η_m راندمان الکتروموتور می باشد و از کاتالوگ سازنده و یا دیتاشیت آن قابل قرائت می باشد.

لازم به توضیح است توان نامی الکتروموتور که در پلاک آن درج می شود، همان ماکزیمم توان خروجی یا ماکزیمم توان مکانیکی قابل استحصال موتور می باشد.

■ **مثال ۴:** در مثال فوق در صورتی که راندمان الکتروموتور ۰.۹۲ باشد، توان مکانیکی خروجی موتور چند کیلووات می باشد؟

$$P_2 = 16.555 \times 0.92 \rightarrow P_2 = 15.23 \text{ kW}$$

۴-۱۳- توان مصرفی پمپ P_{BHP}

توان مصرفی پمپ یا همان توان ورودی پمپ، توان مکانیکی روی محور پمپ می باشد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_{BHP} = P_2 \cdot \eta_C \quad (16)$$

η_C راندمان کوپلینگ یا قطعه انتقال قدرت (مانند گیربکس، پولی-تسمه) می باشد. راندمان قطعه انتقال قدرت به آسانی قابل دستیابی نیست و ممکن است به صورت پیش فرض مقدار ۰.۹۰ تا ۰.۹۵ را در نظر گرفت.

■ **مثال ۵:** در مثال فوق در صورتی که راندمان کوپلینگ ۰.۹ باشد، توان مکانیکی ورودی پمپ چند کیلووات می باشد؟

$$P_{BHP} = 15.23 \times 0.9 \rightarrow P_{BHP} = 13.7 \text{ kW}$$

۵-۱۳- توان هیدرولیکی P_H

توان هیدرولیکی یا همان توان خروجی پمپ از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_H = P_{BHP} \cdot \eta_P \quad (17)$$

η_P راندمان پمپ می باشد.

از طرفی توان هیدرولیکی خروجی از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (18)$$

$$P_H = 2.74 Q \cdot H \quad (19)$$

که

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

H هد کل پمپ بر حسب متر می باشد.

P_H توان هیدرولیکی بر حسب وات می باشد.

■ **مثال ۶:** توان هیدرولیکی خروجی پمپی با دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت و هد ۹۰ متر چند کیلووات است؟

حل: از رابطه ۱۹ می توان نوشت:

$$P_H = 2.74 \times 100 \times 90 \rightarrow P_H = 24,300 \text{ W} = 24.3 \text{ kW}$$

■ مثال ۷: در مثال فوق در صورتی که توان مصرفی پمپ ۳۵٫۳ کیلووات باشد، راندمان پمپ چند درصد است؟
حل: از رابطه ۱۷ داریم:

$$P_H = P_{BHP} \cdot \eta_P \rightarrow 24.3 = 35.3 \times \eta_P \rightarrow \eta_P = 0.688 \text{ (68.8\%)}$$

۱۳-۶- راندمان کلی الکتروپمپ η_T :

راندمان کلی الکتروپمپ یا به اصطلاح راندمان سیم به آب برابر است با:

$$\eta_T = \frac{P_H}{P_1} = 1.58 \frac{Q.H}{V.I.Cos\phi} \quad (20)$$

■ مثال ۸: در مثال فوق در صورتی که توان ورودی الکتروموتور ۴۲ کیلووات باشد، راندمان کلی الکتروپمپ چند درصد است؟
حل: از رابطه ۲۰ داریم:

$$\eta_T = \frac{24.3}{42} \rightarrow \eta_T = 0.58 \text{ (58\%)}$$

۱۳-۷- راندمان پمپ η_P :

از روابط فوق راندمان پمپ بصورت زیر بدست می آید:

$$\eta_P = \frac{P_H}{P_{BHP}} = \frac{2.74 Q.H}{P_1 \cdot \eta_m \cdot \eta_C} = \frac{2.74 Q.H}{\sqrt{3} V.I \cos\phi \cdot \eta_m \cdot \eta_C}$$

$$\eta_P = \frac{P_H}{P_{BHP}} = \frac{2.74 Q.H}{P_1 \cdot \eta_m \cdot \eta_C} = 1.58 \frac{Q.H}{V.I \cos\phi \cdot \eta_m \cdot \eta_C} \quad (21)$$

و یا:

$$\eta_P = \frac{\eta_T}{\eta_m \cdot \eta_C} \quad (22)$$

در روابط فوق:

دبی Q بر حسب متر مکعب بر ساعت

هد کل پمپ H بر حسب متر

ولتاژ منبع تغذیه V بر حسب ولت

آمپر مصرفی خط a بر حسب آمپر

می باشد.

در آزمایشگاه تست هیدرولیک شرکت آریا سپهر کیهان جهت محاسبه راندمان پمپ از رابطه ۲۱ استفاده می شود.

۱۴- اصلاح تست عملکرد هیدرولیکی برای سیالاتی به غیر از آب

۱۴-۱- 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 ۹:** 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:

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

۱۴-۲- وِسکوزیته

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

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

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

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

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

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

■ **مثال ۱۰:** 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 وِسکوزیته (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

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.

۱۴-۳- ذرات جامد (اسلاری)

وجود ذرات جامد معلق (سوسپانسیون) در سیال باعث کاهش مشخصه های هیدرولیکی پمپ های سانتریفیوژ نسبت به آب تمیز می شود. تأثیر معکوس وجود ذرات جامد بر عملکرد پمپ اصولاً ناشی از موارد زیر است:

- لغزش بین سیال و مواد جامد حین شتاب گرفتن در ورود به پروانه و کاهش شتاب هنگام خروج از پروانه باعث اتلاف انرژی می شود. این اتلاف انرژی سبب افزایش سرعت ته نشینی ذرات می شود.

- افزایش اتلافات اصطکاکی در پمپ. این اتلافات با افزایش دانسیته و ویسکوزیته اسلاری افزایش می یابد.

اثرات ذرات جامد به صورت ضرایب HR و ER بیان می شود:

$$H_m = HR \cdot H_w \quad (28)$$

$$\eta_m = ER \cdot \eta_w \quad (29)$$

در روابط فوق اندیس m برای مخلوط اسلاری و اندیس w مربوط به آب تمیز می باشد. بنابراین:

H_m هد پمپ وقتی مخلوط اسلاری پمپاژ می کند.

H_w هد پمپ وقتی آب تمیز پمپاژ می کند. (حالت تست در آزمایشگاه)

η_m راندمان پمپ وقتی مخلوط اسلاری پمپاژ می کند.

η_w راندمان پمپ وقتی آب تمیز پمپاژ می کند. (حالت تست در آزمایشگاه)

HR: ضریب کاهش هد در پمپاژ اسلاری

ER: ضریب کاهش راندمان در پمپاژ اسلاری

برای تعیین HR و ER باید پارامترهای زیر باید مشخص و مورد توافق باشد:

- غلظت حجمی ذرات جامد در مخلوط اسلاری CV

- متوسط قطر ذرات جامد d_{50} به میلیمتر از لحاظ تئوریک اندازه صفحه صافی است که ۵۰ درصد ذرات از آن عبور می کنند و ۵۰ درصد پشت آن باقی می ماند)

- قطر پروانه D

- وزن مخصوص ذرات جامد SG_s

شکل ۱۲ از نتایج آزمایشات بدست آمده است. بوسیله این شکل تخمین منطقی HR و ER در اکثر حالات امکانپذیر می باشد.

به طور مشابه، توان مورد نیاز اسلاری از ضرب ساده توان مورد نیاز برای آب تمیز در وزن مخصوص اسلاری (S_m) بیشتر خواهد بود.

■ **مثال ۱۱:** برای تست عملکرد هیدرولیکی با آب یک پمپ سانتریفیوژ اسلاری با دبی، هد و راندمان گارانتی شده به ترتیب ۱۵۰

متر مکعب بر ساعت، ۲۵ متر و ۵۵ درصد، دبی، هد و راندمان تست با آب چقدر باید باشد؟ قطر پروانه پمپ ۳۶۵ میلیمتر و

مشخصه های اسلاری به شرح ذیل می باشد:

$$d_{50} = 0.365 \text{ mm}$$

$$SG_s = 2.65$$

$$CV = 30\%$$

حل: برای استفاده از منحنی های شکل ۱۲، ابتدا پارامتر d_{50}/D را محاسبه می کنیم:

$$\frac{d_{50}}{D} = \frac{0.365}{365} = 0.001$$

با استفاده از منحنی های شکل ۱۲ و همانطور که در شکل با نقاط ۱ تا ۸ نشان داده شده است، ER و HR بدست می آید:

$$HR = 0.84, ER = 0.8$$

از روابط ۲۸ و ۲۹ می توان نوشت:

$$25 = 0.84 \times H_w \rightarrow H_w = 29.8 \text{ m}$$

$$55 = 0.8 \times \eta_w \rightarrow \eta_w = 68.8 \%$$

وجود ذرات جامد تأثیری بر دبی ندارد. لذا دبی آب، همان دبی اسلاری می باشد.

$$Q_m = Q_w = 150 \text{ m}^3/\text{hr}$$

بنابراین برای تأیید نقاط گارانتی با آب، پمپ اسلاری مذکور باید در دبی ۱۵۰ متر مکعب بر ساعت، هد ۲۹٫۸ متر و راندمان ۶۸٫۸ درصد، عملکرد هیدرولیکی مطلوبی با آب در محدوده ترانس می مجاز داشته باشد.

۱۴-۴ - پمپاژ کف Froth Pumping

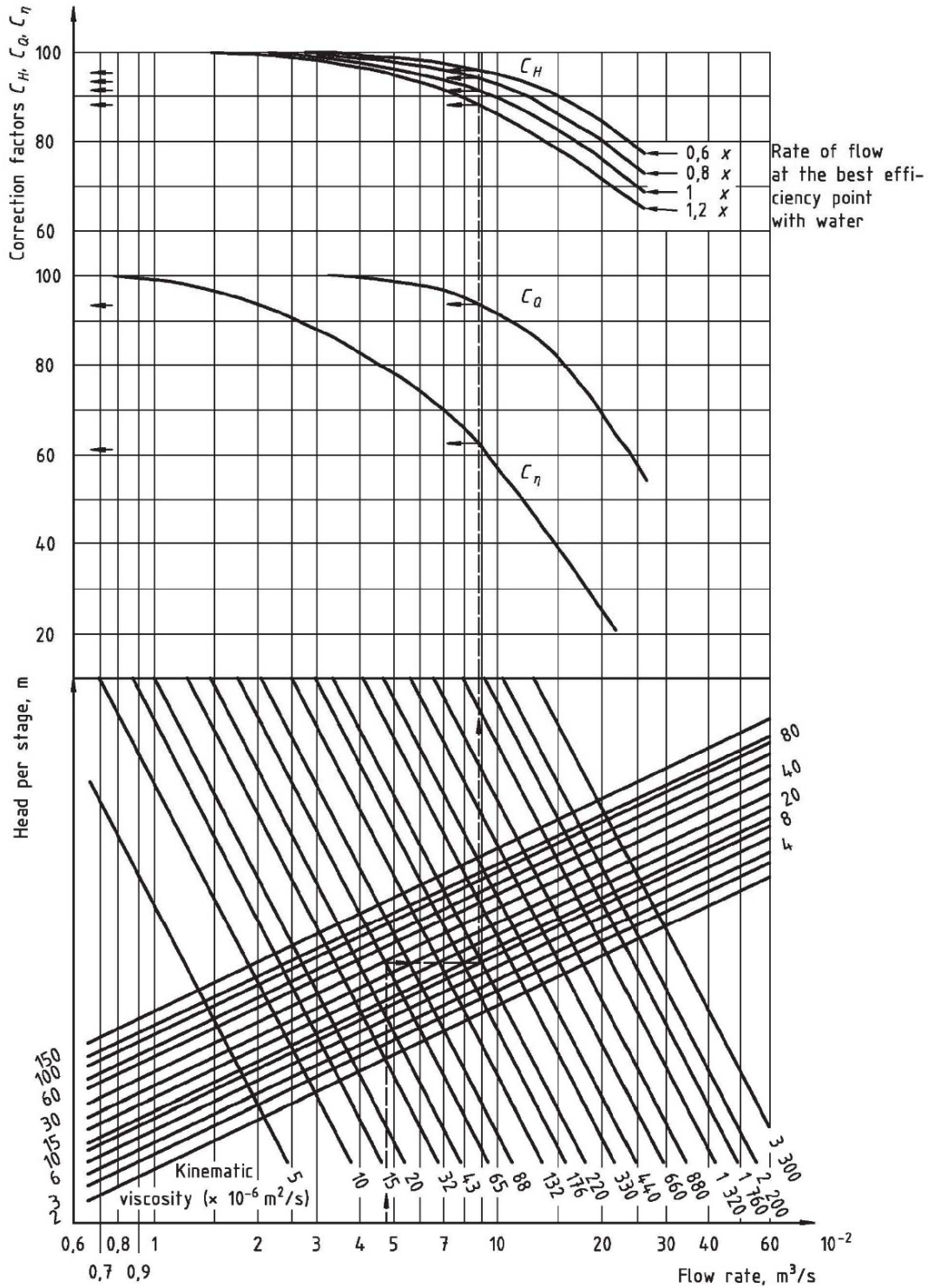
دبی واقعی کف (اسلاری بعلاوه حباب) که پمپاژ می شود می تواند به طور محسوسی با دبی اسلاری بدون حباب متفاوت باشد. فاکتور کف Froth Factor ممکن است برای کف های ناپایدار و ضعیف ۱۵۰٪ و برای کف های بسیار سرسخت و قوی ۵۰۰٪ باشد.

دبی اسلاری، Q، باید در ضریب کف ضرب گردد تا دبی واقعی کف Q_f بدست آید. پمپ Q_f را پمپاژ می کند اما مقدار اسلاری پمپاژ شده Q می باشد. Q و Q_f ممکن است در یک واحد فلوتاسیون در بازه های زمانی کوتاه با توجه به شرایط معدن در حال بهره برداری اختلاف زیادی داشته باشد.

وجود حبابهای هوا در کف باعث می شود مقدار موثر وزن مخصوص مخلوط اسلاری S_m کاهش یابد. فشردن حبابها بوسیله هد تولیدی پمپ به سرعت باعث افزایش مقدار S_m می شود. متعاقب آن، این مقدار بلافاصله پس از خروجی پمپ در خط لوله کاهش می یابد. به طور معکوس، سرعت خروجی مخلوط V_d به خاطر انبساط حبابها در خط لوله افزایش می یابد.

برای تست عملکرد هیدرولیکی پمپ هایی که پمپاژ کف انجام می دهند باید برای تأیید نقاط گارانتی، دبی Q_f در نظر گرفته شود.

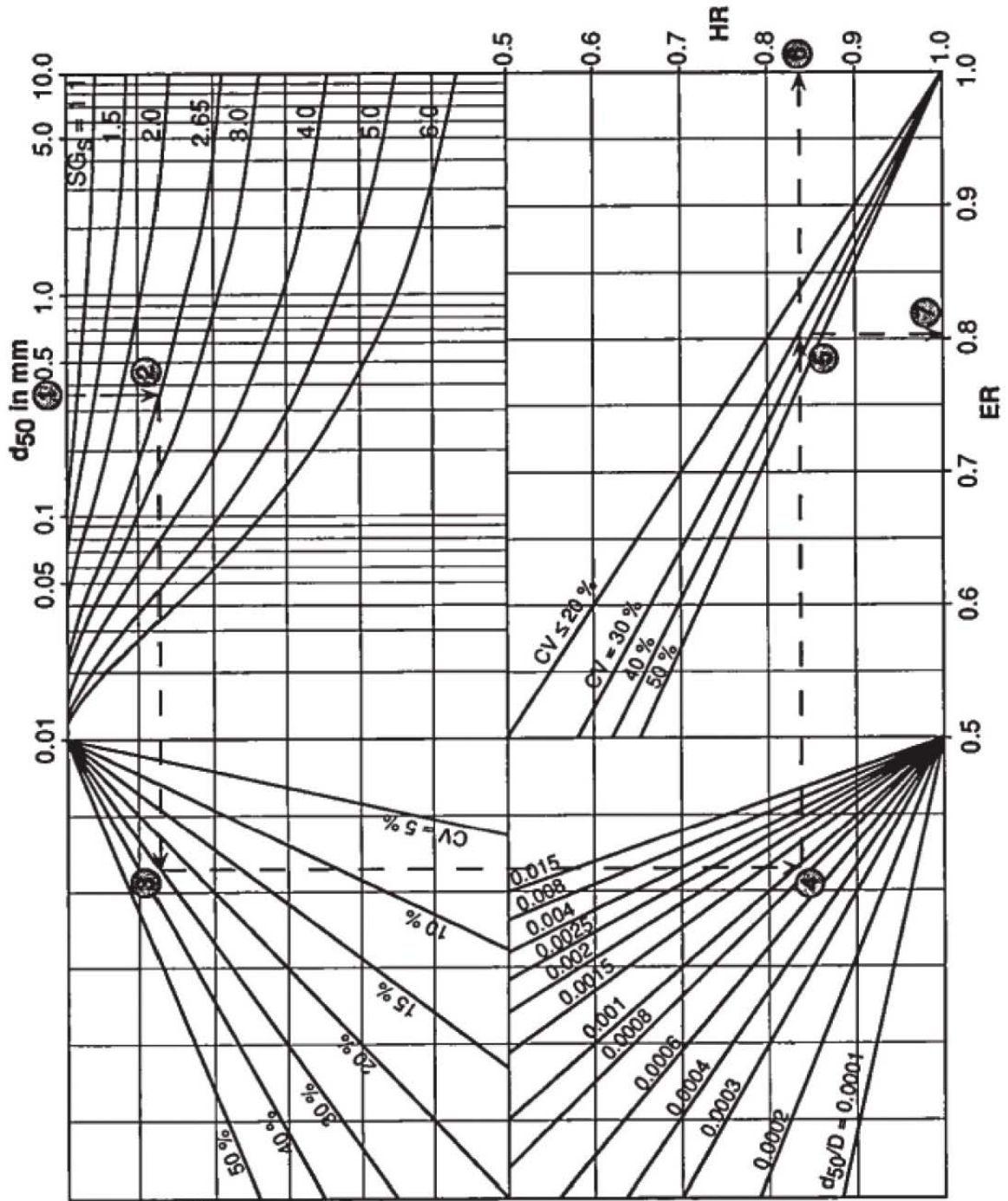
$$Q_G = Q_f$$



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), 1985.

Figure G.1 — Performance correction chart for viscous liquids

شکل شماره ۱۱: چارت اصلاح عملکرد برای سیالات ویسکوز (استاندارد ISO 9906)



شکل شماره ۱۲: تأثیر مواد جامد (اسلاری) بر عملکرد هیدرولیکی پمپ های سانتریفیوژ (هندبوک شرکت Weir)

۱۵- محاسبه NPSH

هد خالص مکش مثبت NPSH از رابطه عمومی زیر بدست می آید:

$$NPSH = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_{PS} + \frac{U_1^2}{2g} \quad (30)$$

که :

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:

$$P_v = 0.0234 \text{ bara}$$

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

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

Z_{PS} ارتفاع عمودی گیج فشار تا مرکز مقطع لوله مکش می باشد (برای شرایط آزمایشگاه این عدد صفر در نظر گرفته می شود).

$$Z_{PS} = 0 \text{ m}$$

در نتیجه می توان نوشت:

$$NPSH = 10.12 (0.817 + P_1) + 6,393.7 Q^2 \left(\frac{1}{D_1^4} \right) \quad (31)$$

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.

■ مثال ۱۲: در صورتی که با کاهش فشار مکش به -0.4 barg ، هد کل پمپ در دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ساعت ۳ درصد افت کند،

مقدار NPSH چند متر می باشد؟ قطر فلنج مکش ۶ اینچ (۱۵۰ میلیمتر) می باشد.

حل: از رابطه ۳۱ می توان نوشت:

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

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

۱۶- قوانین تشابه

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. قواعد تشابه موارد زیر را به سهولت مشخص می کند :

- تغییرات دبی ، Q ، بطور مستقیم با تغییرات سرعت متناسب است ،
- تغییرات هد ، H ، به طور مستقیم با مربع تغییرات سرعت متناسب می باشد ،
- تغییرات توان مستقیماً با مکعب تغییرات سرعت متناسب دارد ،

با نوشتن به شکل معادله ، داریم :

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

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

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

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

■ مثال ۱۳: دانسیته سیال پروپان در شرایط عملیاتی 470 kg/m^3 می باشد. دبی، هد و توان مصرفی گارانتی شده به ترتیب ۳۰ متر مکعب بر ساعت ، ۴۰ متر و ۲٫۳۶ کیلووات می باشد و توان نامی الکتروموتور ۴ کیلووات با دور ۲۹۴۰ 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 ۴ کیلووات می باشد، تست در دور نامی با سیال آب آزمایشگاه مقذور نمی باشد.

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.

■ مثال ۱۴: در مثال فوق در دور 2719.14 rpm پمپ چه هد و دبی خواهد داشت؟

حل:

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

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

اطلاعات اندازه گیری شده برای مقدار NPSH می تواند با فرمول زیر تبدیل شود:

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^x \quad (35)$$

به عنوان یک تقریب، اگر حالت فیزیکی مایع در ورودی پروانه به گونه ای باشد که جدایش گازی، عملکرد پمپ را تحت تأثیر قرار ندهد، توان $x = 2$ ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.

اگر پمپ نزدیکی محدوده کاویتاسیون عمل نماید، مقادیر توان x بین ۱,۳ تا ۲ در نظر گرفته می شود که مقدار دقیق باید بین طرفین برای تعیین فرمول تبدیل، مورد توافق قرار گیرد.

■ مثال ۱۵: در مثال فوق اگر NPSHr برابر با ۲,۷ متر تعهد شده باشد، در سرعت تست 2719.14 rpm مقدار NPSHr چند متر باید باشد؟ توان x را برابر ۲ در نظر بگیرید.

حل: از رابطه ۳۵ داریم:

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^x \rightarrow \frac{2.7}{NPSH_2} = \left(\frac{2940}{2719.14}\right)^2 \rightarrow NPSH_2 = 2.31 \text{ m}$$

۱۷- منحنی های عملکرد

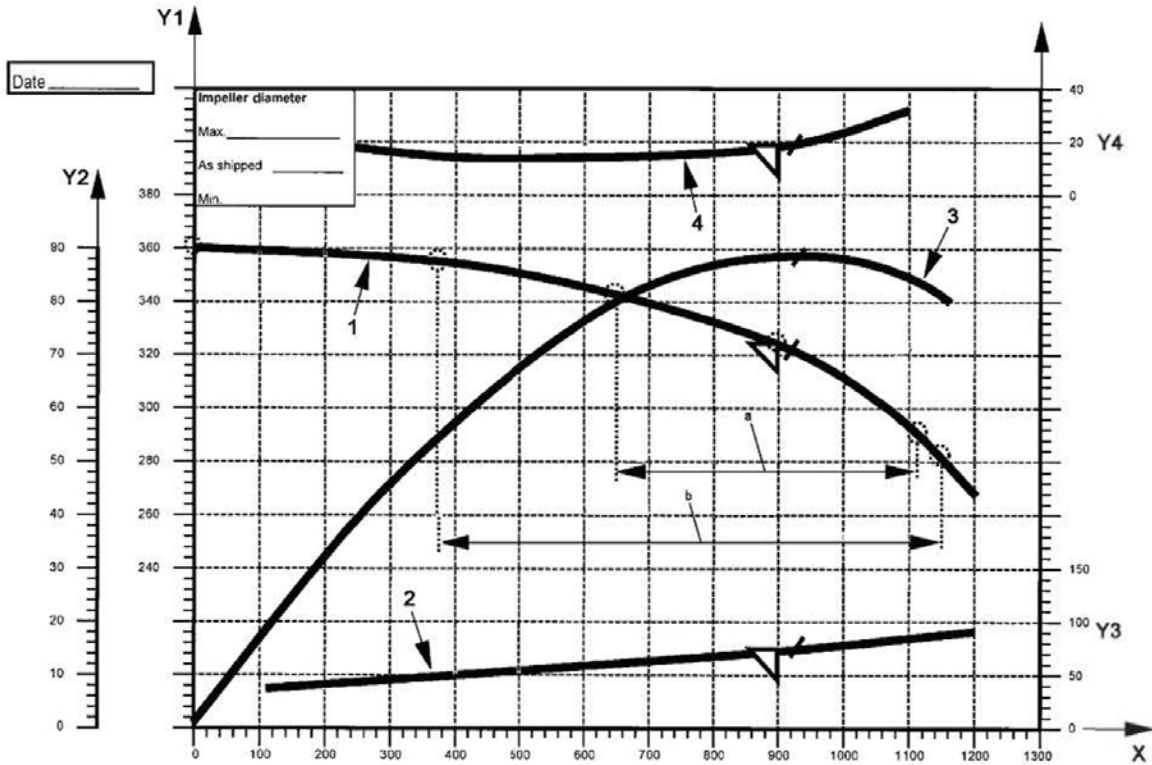
منحنی های عملکرد پمپ شامل چهار منحنی به شرح ذیل می باشد:

هد بر حسب دبی

توان مصرفی پمپ بر حسب دبی

راندمان بر حسب دبی

NPSH پمپ بر حسب دبی



شکل شماره ۱۳: منحنی عملکرد نمونه وار یک پمپ سانتریفیوژ (مرجع: استاندارد API 610)

در شکل فوق:

X محور دبی است.

Y1 محور هد است.

Y2 محور راندمان است.

Y3 محور توان مصرفی پمپ است.

Y4 محور NPSH پمپ است.

a محدوده عملکرد ارجح (Preferred Operating Region (POR) است.

b محدوده عملکرد مجاز (Allowable Operating Region (AOR) است.

1 منحنی هد بر حسب دبی است.

2 منحنی توان مصرفی پمپ بر حسب دبی است.

3 منحنی راندمان بر حسب دبی است.

4 منحنی NPSH پمپ بر حسب دبی است.

منحنی هد بر حسب دبی H-Q (منحنی ۱) باید اکیدا نزولی می باشد. در این منحنی، دو محدوده عملکرد و ۷ نقطه از اهمیت خاصی برخوردار است.

۱۷-۱- محدوده های عملکرد مهم در منحنی های عملکرد

- محدوده عملکرد ارجح Preferred Operating Region - به اختصار POR

مطابق با تعریف استاندارد API 610 ویرایش یازدهم سال ۲۰۱۰، محدوده عملکرد ارجح، بین ۷۰ تا ۱۲۰ درصد نقطه بهترین راندمان BEP می باشد.

$$0.7 Q_{BEP} \leq POR \leq 1.2 Q_{BEP} \quad (36)$$

در این محدوده، عملکرد پمپ از منظر سطح ارتعاش و مقدار راندمان در سطح مطلوبی می باشد.

- محدوده عملکرد مجاز Allowable Operating Region - به اختصار AOR

مطابق با تعریف استاندارد API 610 ویرایش یازدهم سال ۲۰۱۰، محدوده عملکرد مجاز، محدوده عملکردی از پمپ می باشد که سطوح ارتعاشی در حد مجاز باقی می ماند (شکل شماره ۱۴ را ببینید). در خارج از این محدوده ارتعاشات پمپ از حد مجاز فراتر می رود و عملا امکان کارکرد طولانی مدت پمپ وجود ندارد. به عنوان یک تقریب می توان محدوده عملکرد مجاز را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$0.3 Q_{BEP} \leq AOR \leq 1.3 Q_{BEP}$$

۱۷-۲- نقاط عملکردی مهم در منحنی های عملکرد

- نقطه دبی صفر Shut off

این نقطه در منتهی الیه سمت چپ منحنی و از تلاقی منحنی H-Q با محور Y1 (محور هد) بدست می آید. بیشینه فشار ایجاد شده در پمپ در این نقطه حاصل می شود. در این نقطه ماکزیمم فشار پمپ ایجاد می شود (در دبی صفر).

$$Shut\ off \rightarrow Q = 0, H = Max., P_{BHP} = Min.$$

از آنجا که در این نقطه توان مصرفی پمپ مینیمم است، پمپ های سانتریفیوژ را در این نقطه راه اندازی می کنند (شیر فلکه رانش بسته).

- نقطه دبی مینیمم پایا Minimum Stable Flow rate یا Q_{min}

این نقطه حد پایین منطقه عملکرد مجاز پمپ می باشد. در واقع کارکرد طولانی مدت پمپ در کمتر از این دبی باعث افزایش بازچرخش های داخلی در پمپ، گرم شدن سیال، بروز کاویتاسیون، افزایش سطح ارتعاشی پمپ و آسیب به سیستم آببندی و یاتاقان های پمپ می شود.

$$Q_{min} \cong (0.15\ to\ 0.30) Q_{BEP}$$

- نقطه کار عادی Normal Operating Point

نقطه ای از منحنی عملکرد که انتظار می رود پمپ در شرایط فرایندی عادی در آن نقطه کار کند.

- نقطه کاری Rated Operating Point

این نقطه، نقطه گارانتی سازنده می باشد. در واقع سازنده عبور منحنی عملکرد حول این نقطه در محدوده تیرانسی مجاز را گارانتی می کند. معمولاً دبی این نقطه ۱۰ درصد بیشتر از دبی نقطه کار عادی می باشد.

$$Q_{Rated} \cong 1.1 Q_{Normal}$$

اگر طور دیگری توافق نشده باشد، اختلاف هد نقطه کاری با نقطه شات اف باید حداقل ۱۰ و حداکثر ۲۰ درصد باشد.

Head Rise to Shut off

$$1.1 H_{Rated} \leq H_{Shut\ off} \leq 1.2 H_{Rated} \quad (37)$$

تیرانس های منفی مجاز تست برای نقطه شات اف نباید باعث شود که منحنی پمپ از حالت اکیدا نزولی خارج شود. همچنین در حالتی که عملکرد موازادی دو پمپ Parallel Operation وجود دارد، اختلاف هد نقطه کاری با نقطه شات اف باید حداقل ۱۰ درصد باقی بماند و تیرانس های منفی مجاز تست نباید این اختلاف را کاهش دهد.

- نقطه بهترین راندمان (BEP) Best Efficiency Point

دبی که در آن بیشینه راندمان پمپ در آن قطر پروانه، بدست می آید. این نقطه از دیدگاه طراحی و کارکرد پمپ، مهمترین نقطه در منحنی عملکرد می باشد. در قطر پروانه ماکزیمم، این نقطه همان نقطه طراحی پمپ می باشد که در ابتدا طراح، پمپ را برای این نقطه طراحی کرده است. روابط مربوط به سرعت مخصوص Specific Speed و سرعت مخصوص مکش Suction Specific Speed که مهمترین پارامترها در طراحی پمپ می باشد، در قطر پروانه ماکزیمم و در نقطه BEP از روابط زیر بدست می آید:

$$n_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (37)$$

$$n_{ss} = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{NPSH^{0.75}} \quad (38)$$

که در آن:

n_s : سرعت مخصوص پمپ است.

n_{ss} : سرعت مخصوص مکش پمپ است.

N : سرعت دوران پمپ به RPM است.

Q : دبی پمپ به m^3/s است. در پمپ های دومکشه باید نصف دبی در روابط گذاشته شود (دبی در هر چشم پروانه).

H : هد هر طبقه پمپ به متر است. در پمپ های طبقاتی هد طبقه اول در روابط گذاشته می شود.

$NPSH$: هد مثبت خالص مکش پمپ به متر است.

■ مثال ۱۶: سرعت مخصوص و سرعت مخصوص مکش پمپی با دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت، هد ۳۰ متر، سرعت دورانی ۲۹۰۰ دور بر دقیقه و $NPSH$ برابر با ۴ متر در قطر ماکزیمم را بدست آورید؟ تمامی اعداد فوق در نقطه BEP با قطر پروانه ماکزیمم می باشد.

حل: از روابط ۳۷ و ۳۸ داریم:

$$n_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{0.75}} = \frac{2900 \sqrt{100/3600}}{30^{0.75}} \rightarrow n_s = 37.7 \text{ (SI Units)}$$

$$n_{ss} = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{NPSH^{0.75}} = \frac{2900 \sqrt{100/3600}}{4^{0.75}} \rightarrow n_{ss} = 170.88 \text{ (SI Units)}$$

در روابط فوق سرعت مخصوص و سرعت مکش در سیستم SI بدست می آید. برای تبدیل اعداد به سیستم انگلیسی USC، کافی است اعداد بدست آمده را در ضریب ۵۱٫۶۴ ضرب کرد.

■ مثال ۱۷: در مثال فوق سرعت مخصوص و سرعت مکش در سیستم انگلیسی USC چقدر می باشد؟
حل:

$$n_s = 37.7 \times 51.64 \rightarrow n_s = 1946.8 \text{ (USC Units)}$$

$$n_{ss} = 170.88 \times 51.64 \rightarrow n_{ss} = 8,824.2 \text{ (USC Units)}$$

معمولا توصیه می شود سرعت مخصوص مکش از ۱۲۵۰۰ در سیستم آحاد انگلیسی تجاوز نکند.

- نقطه دبی ماکزیمم Q_{Max}

این نقطه حد بالایی منطقه عملکرد مجاز پمپ می باشد. در واقع کارکرد طولانی مدت پمپ در بیشتر از این دبی باعث افزایش سطح ارتعاشی پمپ و آسیب به سیستم آبنندی و یاتاقان های پمپ می شود.

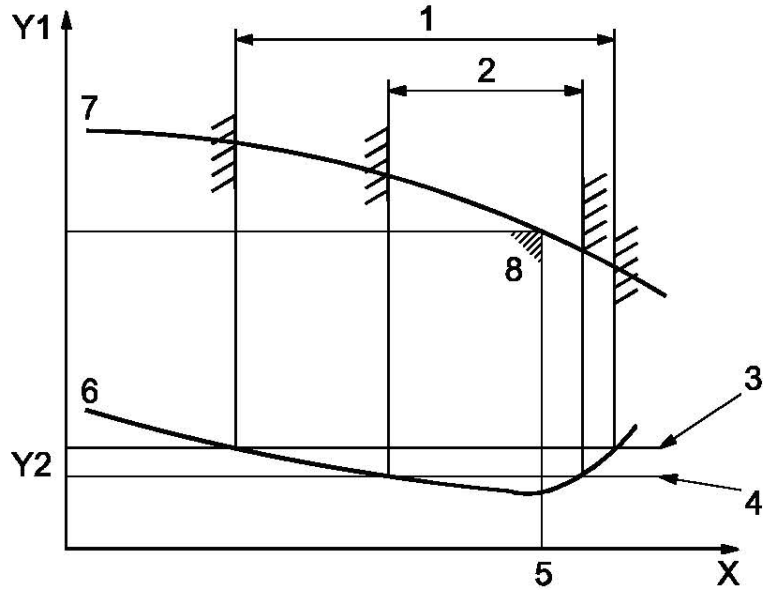
$$Q_{Max} \cong (1.3 \text{ to } 1.35)Q_{BEP}$$

- نقطه پایانی منحنی عملکرد Run Out / End Curve

نقطه پایانی منحنی عملکرد، بیشینه دبی پمپ صرفنظر از سطوح ارتعاشی مجاز می باشد. در واقع عملا پمپ بیشتر از این نقطه، امکان عبور سیال در واحد زمان را ندارد و منحنی عملکرد بعد از این نقطه به صورت خط عمودی تا حد صفر امتداد خواهد داشت.

۱۷-۳- منحنی ارتعاش بر حسب دبی

به دلیل اهمیت ارتعاشات پمپ، در برخی موارد منحنی ارتعاش پمپ بر حسب دبی نیز ترسیم می شود. اگرچه این منحنی جزو منحنی های مشخصه پمپ نمی باشد.



شکل شماره ۱۴: منحنی ارتعاشی نمونه ای یک پمپ سانتریفیوژ (مرجع: استاندارد API 610)

در شکل فوق:

X محور دبی است

Y1 محور هد است

Y2 محور ارتعاش است

1 منطقه عملکرد مجاز Allowable Operating Region (AOR) است.

2 منطقه عملکرد ارجح Preferred Operating Region (POR) است.

3 ماکزیمم حد ارتعاشی مجاز در محدوده دبی های مجاز است.

4 حد پایه ای ارتعاشی است

5 نقطه بهترین راندمان، دبی

6 منحنی نمونه ای ارتعاش بر حسب دبی

7 منحنی هد بر حسب دبی

8 نقطه بهترین راندمان، هد و دبی

۱۸- تعیین قطر تراش پروانه

عموما هنگام تست عملکرد هیدرولیکی، مواقعی اتفاق می افتد که مشخصه های هد و دبی پمپ از مشخصه های تعیین شده بالاتر است، در این مواقع عموماً قطر پروانه تراش می خورد.

تعیین قطر تراش پروانه به راحتی امکان پذیر نمی باشد. از آنجا که با تراش پروانه، عموماً زاویه خروج پره ها تغییر می کند، امکان محاسبات دقیق امکانپذیر نمی باشد. برای تراش پروانه های کمتر از ۵ درصد قطر متوسط، در صورتی که تصور شود شکل پره ها بعد از تراش (از منظر زاویه خروج و زاویه باریک شدن) بدون تغییر می ماند، می توان از رابطه زیر برای برآورد مشخصه های هیدرولیکی جدید استفاده کرد:

$$R = \left(\frac{D_r^2 - D_1^2}{D_t^2 - D_1^2} \right)^{1/2} \quad (39)$$

$$Q_r = R \cdot Q_t \quad (40)$$

$$H_r = R^2 \cdot H_t \quad (41)$$

که:

D_1 : قطر متوسط لبه مکش پره می باشد.

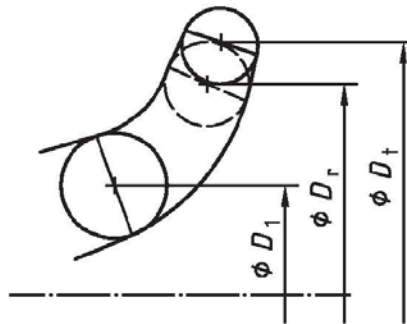
D_r : قطر متوسط تراش پره می باشد. (مجهول)

D_t : قطر متوسط پره تست شده است. (قطر موجود)

Q_r و H_r : دبی و هد مورد نظر

Q_t و H_t : دبی و هد تست شده

منظور از قطر متوسط $Mean Diameter$ ، قطر مربوط به خط مرکزی پره است. (شکل شماره ۱۵)



شکل شماره ۱۵: تراش پروانه (استاندارد ISO 9906)

■ مثال ۱۸: دبی و هد گارانتی شده پمپی به ترتیب برابر با ۸۵ متر مکعب بر ساعت و ۴۵ متر می باشد. در آزمایشات اولیه تست

عملکرد هیدرولیک در دبی گارانتی شده، هد ۵۰ متر بدست آمده است. در صورتی که قطر متوسط لبه مکش پره D_1 برابر با ۱۲۰

میلیمتر باشد، و قطر متوسط پروانه تست شده نیز ۱۵۵ میلیمتر باشد، مطلوب است محاسبه قطر تراش پروانه؟

حل: از روابط ۳۹ تا ۴۱ می توان نوشت:

$$Eq. 39 \rightarrow R = \left(\frac{D_r^2 - 120^2}{155^2 - 120^2} \right)^{1/2} \rightarrow R = \frac{\sqrt{D_r^2 - 120^2}}{98.1} \rightarrow R^2 = \frac{D_r^2 - 120^2}{9625}$$

$$Eq. 41 \rightarrow 45 = \frac{D_r^2 - 120^2}{9625} \cdot 50 \rightarrow D_r = 152 \text{ mm}$$

با کاهش قطر پروانه از ۱۵۵ میلیمتر به ۱۵۲ میلیمتر می توان انتظار داشت هد کل پمپ از ۵۰ متر به ۴۵ متر کاهش یابد. اما

مطابق با رابطه ۳۸، دبی پمپ نیز کاهش می یابد:

$$Eq. 40 \rightarrow Q_r = R = \frac{\sqrt{D_r^2 - 120^2}}{98.1} \cdot 85$$

با جایگذاری $D_r = 152 \text{ mm}$ خواهیم داشت:

$$Q_r = R = \frac{\sqrt{152^2 - 120^2}}{98.1} \cdot 85 \rightarrow Q_r = 81 \text{ m}^3/\text{hr}$$

همانطور که ملاحظه می شود دبی ۴٫۷ درصد کاهش یافته است. در صورتی که تراش پروانه ۱۵۲ میلیمتر باشد، به علت کاهش دبی و تفرانس منفی دبی ۴٫۷ درصد، تست پمپ در هیچیک از استانداردهای ISO 9906 گرید ۱ و ۲ و استاندارد API 610 قابل پذیرش نخواهد بود.

با تقریب جدید، قطر تراش پروانه را ۱۵۳ میلیمتر در نظر می گیریم و محاسبات را با استفاده از روابط ۳۹ تا ۴۱ مجدد تکرار می کنیم.

$$R = \left(\frac{153^2 - 120^2}{155^2 - 120^2} \right)^{1/2} \rightarrow R^2 = 0.936 \rightarrow R = 0.97$$

$$Q_r = 0.97 \times 85 \rightarrow Q_r = 82.45 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$H_r = 0.936 \times 50 \rightarrow H_r = 46.8 \text{ m}$$

با قطر پروانه ۱۵۳ میلیمتر تفرانس منفی ۳ درصد برای دبی در تمامی استانداردها قابل قبول خواهد بود و برای هد کل پمپ، تفرانس مثبت ۴ درصد بدست می آید که تنها در استاندارد ISO 9906 گرید ۱ قابل پذیرش می باشد و در استاندارد API 610 (تفرانس $\pm 3\%$) قابل پذیرش نمی باشد. (مگر آنکه با توجه به تفرانس مثبت، مورد قبول کارفرما شود).

۱۹- مراجع و استانداردها

- 1- API Standard 610, Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, Eleventh Edition, September 2010
- 2- BS EN ISO Standard 9906: 2012 Rotodynamic Pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1 and 2
- 3- Hydraulic Institute (H.I) Standard 1.6 & 2.6 Centrifugal Pump Tests, 2000
- 4- ISO 21049 / API 682 : 2004 Pumps – Shaft sealing systems for centrifugal and rotary pumps
- 5- ISO Standard 5199:2002, Technical Specifications for Centrifugal Pumps – Class II
- 6- ISO 9908:2011, Technical Specifications for Centrifugal Pumps – Class III
- 7- ISO 9905:2011, Technical Specifications for Centrifugal Pumps – Class I
- 8- ISO 10816-1: 1995, Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines
- 9- ISO 10816-3: 2009, Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ

- 10- ISO 10816-7:2009, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts
- 11- IPS-G-SF-900 General Standard for Noise Control and Vibration, Jan. 2005
- 12- Basic Principles for the Design of Centrifugal Pump Installations, Sterling Fluid Systems Group, 2003
- 13- Slurry Pump Handbook – Weir Slurry group, Inc. Fifth edition, Feb. 2009

۱۴- جزوه کمک آموزشی آزمون های پذیرش هیدرولیکی برای پمپ های سانتریفیوژ - شرکت آریا سپهر کیهان / امور تحقیق و توسعه سال ۱۳۹۱ رسول پایدار نوبخت

۱۵- نشریه تحقیق و توسعه شرکت آریا سپهر کیهان - شماره ۶، پاییز ۱۳۹۲، مقایسه استانداردهای مختلف در رابطه با ارتعاشات پمپ، اردلان ملکی