



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-066

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.

منابع سر و صدای پمپ‌های سانتریفیوژ



The sources of noises

۱. بررسی و تحلیل آکوستیکی پمپ‌های سانتریفیوژ

اگر چه مقدار مشخصی از سروصدا از پمپ‌های سانتریفیوژ و محرک‌های آن‌ها انتظار می‌رود، اما سروصداها بالا و غیرمعمول (بیش از ۱۰۰ دسی‌بل) یا خصوصا فرکانس‌های بالا (مثل صداهاى مهیب سیستم پمپ) می‌تواند به‌سادگی نشانه بروز خرابی‌های مکانیکی یا مشکلات ارتعاشاتی در پمپ‌های سانتریفیوژ باشد.

هدف از ارائه این نوشتار تمرکز بر روی مکانیزم‌هایی است که سبب تولید سروصدا به‌عنوان یک محصول جانبی می‌شوند و همچنین در ادامه روش‌هایی برای جلوگیری از تشدید یا تولید این سروصداهاى ناخواسته ارائه می‌شود.

تعریف منبع و دلیل ایجاد سر و صدا اولین گام در تعیین آن است که آیا سر و صدا طبیعی است یا آن‌که مشکلی در سیستم وجود دارد. سر و صدا در سیستم‌های پمپ می‌تواند از حرکت‌های مکانیکی اجزای پمپ و حرکت سیال در پمپ و سیستم‌های لوله‌کشی تولید شود. سر و صدا از منابع مکانیکی و سیالاتی داخل پمپ می‌تواند به محیط ارسال شود. تشخیص و اصلاح موثر منابع سر و صدا برای کنترل سر و صدای پمپ، نیازمند دانش سیالاتی و مکانیکی مکانیزم‌های تولید سر و صدا و مسیرهای هدایت سر و صداست.

۲. منابع سر و صدای پمپ

۲.۱. منابع سر و صدای مکانیکی

منابع معمولی مکانیکی تولید سر و صدا شامل اجزا یا سطوح ارتعاشاتی پمپ است که به خاطر تغییرات فشاری که در مایع یا جامد تولید می‌شود بروز می‌نماید. پروانه یا آب‌بندهای سائیده شده، یاتاقان‌های ازکارافتاده، لوله‌هایی با دیواره‌های مرتعش و روتورهای نامتوازن از مثال‌های منابع مکانیکی می‌باشند.

در ماشین‌های سانتریفیوژ، نصب نامناسب کوپلینگ اغلب سبب ایجاد سر و صدا در سرعتی معادل دوبرابر سرعت پمپ می‌شود (هم‌محور نبودن). اگر سرعت پمپ در نزدیکی یا در حال عبور از سرعت بحرانی عرضی (سرعتی است که در آن بیشترین پاسخ ارتعاشاتی اتفاق می‌افتد) باشد، سر و صدا می‌تواند در نتیجه ارتعاشات زیاد حاصل از عدم توازن، سایش یاتاقان‌ها یا آب‌بندها یا پروانه تولید شود. اگر سایش اتفاق بیافتد مشخصه آن یک صدای جیغ با زیر و بمی بسیار بالاست. المان‌های چرخشی آسیب‌دیده یاتاقان، سر و صداهایی فرکانس بالا و مرتبط با اندازه و سرعت یاتاقان‌ها تولید می‌کنند.

۲.۲. منابع سر و صدای سیالاتی

نوساناتی فشاری وجود دارند که مستقیماً توسط حرکت سیال تولید می‌شوند. سر و صدای سیال می‌تواند توسط تشکیل گردابه^۱ در جریان‌های با سرعت بالا (آشفته^۲)، نوسانات، کاویتاسیون، روشن و خاموش شدن، پی‌درپی ضربه‌زدن آب، جدایش جریان و تداخل پروانه با زبانه پمپ^۳ (محلای دارای کمترین فاصله پروانه به حلزونی) تولید شود. ضربات فشاری و مدولاسیون جریان می‌تواند اجزای با فرکانس گسترده یا پهن‌بند^۴ را تولید کند. اگر فرکانس‌های تولیدشده هر یک از اجزای سازه (شامل لوله کشی) را تحریک کند یا از طریق اجزای پمپ به ارتعاشات مکانیکی منجر شود، می‌تواند سر و صدا را به محیط پیرامون خود منتقل کند.

چهار نوع از منابع ضربه‌ای که به طور معمول در پمپ‌های سانتریفیوژ اتفاق می‌افتند به ترتیب زیر می‌باشند:

- اجزای فرکانس گسترده تولید شده توسط پروانه پمپ مثل فرکانس گذر پره^۵
 - ضربه‌های القایی جریان تولید شده توسط آشفتگی مثل عبور جریان از شاخه‌های جانبی و محدودیت‌های سیستم لوله-کشی
 - انرژی آشفته پهن‌بند در سرعت‌های بالای جریان
 - انفجارهای متناوب انرژی با پهنای زیاد تولید شده توسط کاویتاسیون، نوسان عملکرد پمپ^۶ و ضربه آب (ضربه قوچ)^۷
- وقتی پمپ در شرایط خارج از نقطه طراحی^۸ کار می‌کندف جریان‌های ثانویه‌ای ایجاد می‌شوند که سبب تولید نوسانات فشاری می‌شوند. در شکل شماره ۱ انواع مکانیزم‌های ممکن حرکت سیال داخل پروانه نشان داده شده است. این مکانیزم‌ها عبارتند از:

- واماندگی^۹
- گردش دوباره (جریان ثانویه)
- گردش

¹ Vortex

² Turbulence

³ Pump Cutwater

⁴ Broad-Band

⁵ Blade pass frequency

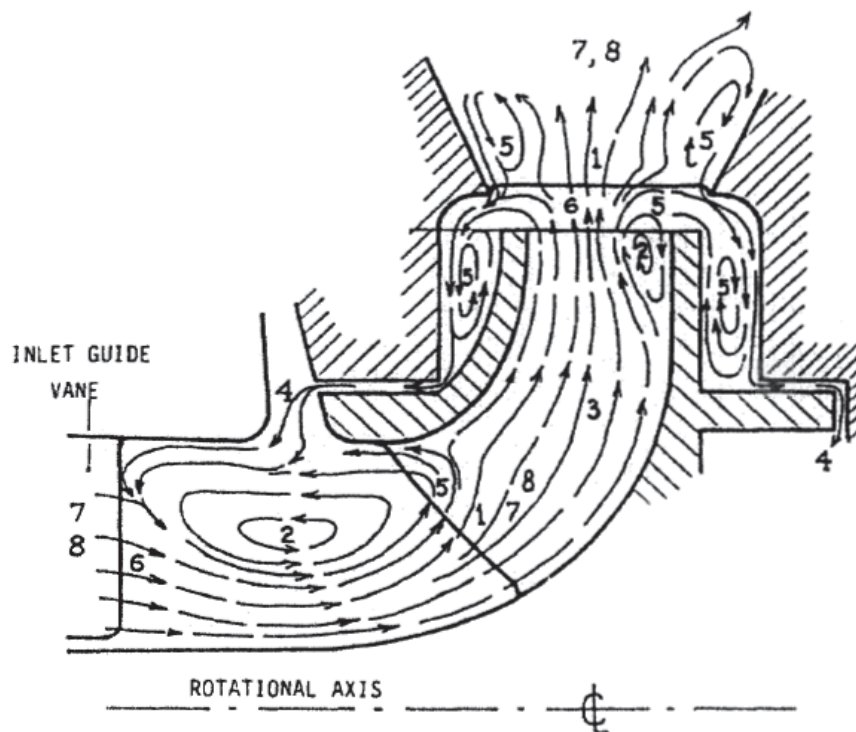
⁶ Flashing

⁷ Water hammer

⁸ Off- design

⁹ Stall

- نشت
- نوسانات جریان ناپایا
- جریان‌های حلقوی^{۱۰} (گردابه‌ها)
- آشفتگی
- کاویتاسیون



شکل ۱- جریان‌های ثانویه اطراف پروانه پمپ

۳. دلایل ارتعاشات

دلایل ارتعاشات در کانون توجه ما قرار دارد زیرا آسیب‌های وارده به پمپ و سیستم‌های لوله‌کشی از ارتعاشات بیش از اندازه حاصل می‌شود. ارتعاشات در پمپ می‌تواند در نتیجه نصب و نگهداری غیر صحیح، بهره‌برداری‌های غیر اصولی، تداخل هیدرولیکی با سیستم لوله‌کشی یا کاستی‌های طراحی و ساخت باشد. برخی از دلایل ایجاد ارتعاشات بیش از اندازه عبارتند از:

¹⁰ Wake

۳.۱. نصب و نگهداری

- عدم توازن
- همراستا نبودن محور پمپ و موتور
- ساییدگی آببند محور
- شکستگی‌های پوسته ناشی از بارهای لوله‌کشی
- پاسخ دینامیکی سیستم لوله‌کشی (پایه‌ها و قیده‌ها)
- جواب‌های سازه‌ای پایه‌ها (فونداسیون)
- محکم نبودن اتصالات
- مونتاژ نامناسب

۳.۲. بهره‌برداری

- عملکرد پمپ در شرایط خارج از نقطه طراحی
- سرعت/جریان نامناسب
- هد مکش مثبت خالص^{۱۱} ناکافی
- ورود هوا

۳.۳. هیدرولیک

- تداخل پمپ با رزنانس‌های لوله‌کشی (مودهای طبیعی لوله‌کشی)
- ناپایداری‌های هیدرولیکی
- رزنانس‌های آکوستیکی (ضربه‌های فشاری)
- ضربه‌های آب (ضربه قوچ)
- مشکلات توزیع جریان
- بازچرخش

¹¹ NPSH

- کاویتاسیون
- تحریک القایی جریان (آشفتگی)
- سرعت بالای جریان

۳.۴. طراحی و ساخت

- سرعت بحرانی عرضی
- سرعت بحرانی پیچشی
- آببندها یا یاتاقان‌های نامناسب
- ناپایداری روتورها^{۱۲}
- هم‌محور نبودن یاتاقان‌ها
- رزنانس پروانه
- رزنانس قسمت ثابت یاتاقان‌ها/ سرپیچ‌ها

بسیاری از این دلایل در نتیجه تداخل پمپ با سیال یا بدنه و ساختار است. این روابط فعل و انفعالی نیازمند آن است که کل سیستم قبل از آنکه تک‌تک اعضاء در هنگام بروز مشکل بررسی شوند، مورد ارزیابی قرار گیرد. اگرچه معمولاً پمپ‌های با طراحی جدید و یا پمپ‌هایی که برای بار اول ساخته می‌شوند دچار این مشکلات می‌شوند، اما طراحی استاندارد نیز از این مشکلات در امان نیست.

۳.۵. اثرات نصب / نگه‌داری

۳.۵.۱. عدم توازن

عدم توازن شفت می‌تواند سبب ایجاد ارتعاشات بزرگ عرضی در سرعت‌های خاصی، به عنوان سرعت بحرانی شود، که با فرکانس-های طبیعی عرضی محور هم‌زمان می‌شود. ارتعاشات عرضی با توجه به عدم توازن بیشترین دلیل خرابی و از کارافتادگی در پمپ-های سانتریفیوژ است. آسیب‌های مربوط به پاسخ عدم توازن، می‌تواند از ساییدگی یاتاقان‌ها یا آببندها تا خرابی‌های فاجعه بار روتور باشد. عدم توازن بیش از اندازه می‌تواند از انحنای روتور، کوپلینگ نامتوازن، شکست‌های حرارتی یا قطعات لق باشد.

¹² Rotor

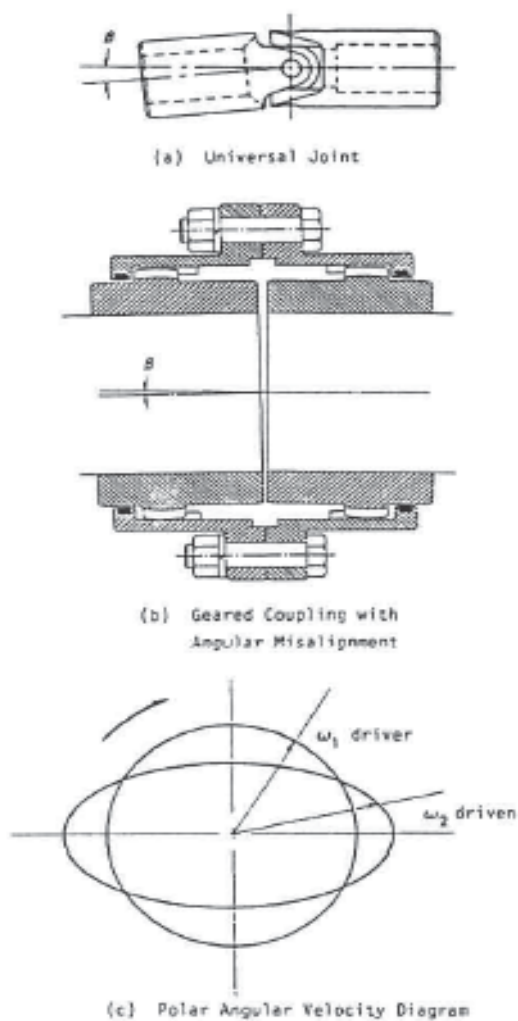
اگرچه روتور پمپ ممکن است در آغاز کار به اندازه کافی تراز (بالانس) شده باشد، اما مدتی پس از عملکرد پمپ، روتور پمپ بر اثر فرسایش و خوردگی ممکن است نامتوازن شود. این عدم توازن می‌تواند از رسوب غیریکنواخت سیال پمپ‌شده به روی سطح پروانه ایجاد شود. در این مورد تمیزکردن پروانه می‌تواند توازن و تعادل را به سیستم باز گرداند. خوردگی‌های پروانه که به وسیله کاویتاسیون یا واکنش‌های شیمیایی با سیال ایجاد می‌شود می‌تواند سبب ایجاد عدم توازن دائمی در سیستم شود که تنها با تعویض پروانه برطرف می‌شود. خوردگی‌های ایجاد شده به وسیله سایش در پروانه یا شفت نیازمند تعمیر یا تعویض اجزاء می‌باشد. به دلایل دیگری، عدم توازن می‌تواند زمانی اتفاق بیافتد که کوپلینگ‌های روان کاری شده از گریس‌ها یا رسوب‌های ناصاف ایجاد شده باشند.

عملیات ساخت یا مونتاژ می‌تواند در حالتی که روتور به طور دقیق در مرکز قرار نگرفته باشد، سبب ایجاد عدم توازن شود. عملیات-های آهنگری و ریخته‌گری می‌تواند سبب ایجاد تفاوت‌های محلی در دانسیته فلز با توجه به گنجایش‌ها و خلل و فرج‌ها شود. در قطعه ریخته‌گری بزرگی مثل پروانه، قطر شفت نباید به طور دقیق با اندازه‌های ریخته‌گری هم‌مرکز شود. مونتاژ یک روتور می‌تواند سبب شکست و پیچش حرارتی شفت یا پروانه شود که موجب تولید یک پروانه کج می‌شود. عدم تقارنی در حدود چند هزارم اینچ، که توسط این روش‌های مونتاژ و ساخت ایجاد می‌شود، می‌تواند سبب نیروی قابل‌ملاحظه‌ای شود که توسط روتور سرعت بالا ایجاد می‌شود. اکثر این عدم تقارن‌ها به وسیله تراز کردن روتور می‌توانند جبران شوند.

۳.۵.۲. عدم هم‌راستایی

عدم هم‌راستایی زاویه‌ای بین دو شفت متصل شده به وسیله یک کوپلینگ انعطاف‌پذیر، یک نیروی رانشی اضافه تولید می‌کند که می‌تواند ارتعاشات پیچشی یا عرضی تولید کند. نیروها در کوپلینگ صنعتی معمولی به نیروها در یونیورسال جوینت^{۱۳} شبیه می‌باشند (مانند شکل زیر). وقتی یک عدم هم‌راستایی زاویه‌ای کوچک اتفاق می‌افتد، نسبت سرعت درگذر از این اتصال ثابت نیست. اگر سرعت یک شفت ثابت فرض شود، شفت دیگر دارای نرخ چرخش بیشتری می‌باشد. اختلاف سرعت چرخشی سبب ایجاد دومین مولفه ارتعاشاتی هارمونیک می‌شود (دو برابر سرعت شفت).

¹³ Universal joint



شکل ۲- اثرات عدم هم‌راستایی زاویه‌ای در کوپلینگ شفت

۳.۵.۳. لوله‌کشی و سازه

پمپ باید به طور تقریبی از سیستم لوله‌کشی ایزوله شود. بارگذاری حرارتی و وزنی بر روی اتصالات مکش و تخلیه باید کمینه شود. نیروهای استاتیکی از سیستم لوله‌کشی می‌توانند پمپ را نسبت به موتورش کج و غیرمتوازن کنند یا در بارگذاری بیش از-اندازه، محفظه پمپ می‌تواند تاب برداشته و سبب ایجاد سائیدگی در آب‌بندها و ایجاد خسارت و آسیب در یاتاقان‌ها شود. آنالیز انعطاف‌پذیری حرارتی لوله‌ها باید برای اندازه‌گیری میزان بار و طراحی پایه‌ها و قیده‌های لازم جهت کمینه‌کردن انتقال بار لوله‌کشی به تجهیزات عملیاتی انجام شود. ارتعاشات لوله‌کشی یا پایه‌های سازه، می‌توانند به صورت مکانیکی به پمپ منتقل شوند. لوله‌کشی

و سازه نباید دارای فرکانس‌های رزونانس به‌طور هم‌زمان با هر یک از فرکانس‌های تحریک پمپ مثل فرکانس گذر از پره باشند. ارتعاشات منتقل شده از لوله‌کشی به سازه می‌تواند با به‌کارگیری مواد ویسکو-الاستیک بین لوله‌ها و بسط لوله‌ها، کم شود.

۴. کاربردها

اولین مرحله طراحی پمپ باید شامل تعریف شرایط محدوده عملیاتی چون فشار، جریان، دما و خصوصیات سیال باشد. کاربری غلط یا تغییر شرایط می‌تواند منجر به مشکلات متعددی شود. عملکرد در شرایط دبی بالا و هد پایین، می‌تواند سبب ارتعاش در روتور و پوسته شود. هد مکش مثبت خالص ناکافی سبب کاویتاسیون می‌شود که می‌تواند منجر به سر و صدا و ارتعاشات در درجات مختلفی شود.

۴.۱. یاتاقان‌ها

سر و صدا و ارتعاش به‌طور معمول نتیجه خوردگی یاتاقان‌ها می‌باشد. با خوردگی اجزای چرخشی یا قاب آن‌ها، سطوح سائیده یا معیوب به‌طور ابتدایی ایجاد سر و صدا و ارتعاش می‌کنند و با افزایش سائیدگی این ارتعاشات و سر و صداها می‌توانند قابل توجه گردند. بعضی از فرکانس‌های ارتعاشاتی وابسته به ابعاد اجزای یاتاقان و سرعت چرخشی آن‌هاست. معمولاً این فرکانس‌ها بالای سرعت عملیاتی می‌باشند. بسیاری از خرابی‌های بلبرینگ مربوط به آلودگی‌های موجود در روان‌کارهاست که پس از شروع به کار دستگاه خود را در بلبرینگ‌ها نمایان می‌سازند. اکثر این آلودگی‌ها شامل رطوبت، خاک‌ریزه و دیگر ذرات متفرقه است که وقتی در داخل یاتاقان‌ها گیر می‌کنند می‌توانند سبب سائیدگی یا تورفتگی دائمی ساچمه‌ها و مسیر گردش ساچمه‌ها، تحت فشار بسیار زیاد تولید شده در شرایط عملیاتی شوند.

۴.۲. آب‌بندها

دینامیک جریان در عبور از آب‌بندها اثرات دراماتیکی بر دینامیک چرخشی می‌گذارد. نیروهای هیدرودینامیکی مورد بحث، در پایداری یا ناپایداری ماشین‌های چرخشی نقش اساسی دارند. آب‌بندهای با جریان محوری زیاد در محدوده جریان آشفته، مثل پمپ‌های آب‌تغذیه، تمایل به تولید ضریب استهلاک و سختی بالایی دارند که برای ارتعاشات روتور و پایداری آن مفید است. سائیدگی آب‌بندها فواصل را افزایش می‌دهد و سبب نشت بیشتر می‌گردد و نیز ممکن است سبب تغییرات در مشخصات روتور دینامیکی آب‌بندها شود که منجر به افزایش ارتعاشات می‌شود.

۵. اثرات هیدرولیکی

اثرات هیدرولیکی و ضربات نوسانی می‌توانند در نتیجه هر فرکانس از ارتعاشات پمپ یا سیستم لوله‌کشی از اولین فرکانس در هر دور تا فرکانس گذر از پره و هارمونیک آن باشد. فرکانس‌های زیر سرعت مداوم (حرکت) می‌توانند توسط رزنانس‌های آکوستیکی تولید شوند. معمولاً این اثرات با توجه به پروانه گذرنده از دیفیوزر تخلیه یا دیگر ناپیوستگی‌ها در پوسته است. هر گونه عدم تقارن در ورودی پمپ ممکن است یک توزیع فشار متغییر ایجاد کند که سبب وارد آمدن نیروهایی به روتور شود.

۵.۱. ناپایداری‌ها

روشن کردن و متوقف کردن پمپ همراه با باز و بسته کردن دریچه‌های مربوطه، دلیل اصلی ناپایداری‌های شدید در سیستم لوله-کشی است. ضربه فشار نتیجه، منتسب به ضربه قوچ، می‌تواند یک نیروی شدید را به پمپ، داخل آن و لوله‌کشی وارد کند. ضربه قوچ سبب ترک‌هایی در سازه‌های به هم پیوسته در محل اتصال لوله‌ها می‌شود. بستن ناگهانی دریچه‌های مرسوم مورد استفاده در خطوط سیستم تغذیه آب، می‌تواند سبب ایجاد ضربه قوچ شدید شود. افزایش زمان بستن این دریچه‌ها می‌تواند شدت ضربه فشار را کاهش دهد. روش‌های تحلیلی برای تعیین میزان ضربه قوچ در یک شکل مخصوص لوله‌کشی برای نرخ‌های متفاوت بستن دریچه‌ها وجود دارد.

۵.۲. کاویتاسیون و فلاشینگ

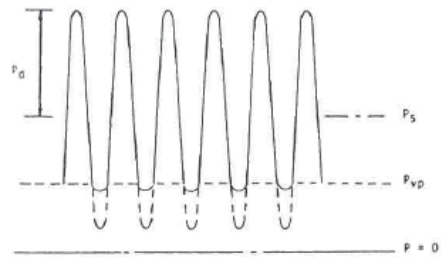
برای بسیاری از سیستم‌های لوله‌کشی پمپ، بسیار متداول است که درجاتی از کاویتاسیون و فلاشینگ وابسته به پمپ یا دریچه-های کنترل فشار در سیستم لوله‌کشی را داشته باشیم. نرخ بالای جریان، سبب ایجاد کاویتاسیون شدیدتر، به دلیل افت جریان بیشتر در گذر از محدودیت‌ها می‌شود. کاویتاسیون فشار محلی بالایی تولید می‌کند که می‌تواند مستقیماً به پمپ یا سیستم لوله-کشی و یا از طریق سیال به دیگر نقاط سیستم لوله‌کشی منتقل شود. کاویتاسیون یکی از متداول‌ترین و آسیب‌رسان‌ترین رخداد‌های موجود در پمپ است. اصطلاح کاویتاسیون، به تشکیل و متلاشی شدن سریع حباب بخار در مایع به دلیل اختلافات فشار در نزدیکی فشار بخار، برمی‌گردد. کاویتاسیون می‌تواند سبب ایجاد سر و صدا، ارتعاش، افت هد و دبی به علاوه سایش پروانه و سطوح پوسته شود. قبل از آن‌که فشار مایع در حال عبور از پمپ سانتریفیوژ افزایش یابد، سیال ممکن است افت فشاری را در داخل محفظه پمپ تجربه کند. این موضوع با توجه به شتاب سیال در چشم پروانه و جدایش جریان در پره‌های ورودی پروانه است.

اگر جریان در طراحی اشتباه یا زاویه پره ضمنی ناصحیح باشد، ادی‌های^{۱۴} کم‌فشار و سرعت بالا شکل می‌گیرند. اگر فشار سیال به فشار بخار کاهش یابد، سیال فلاش خواهد کرد (به صورت ناگهانی جهش خواهد کرد). سپس در مسیر جریان فشار افزایش می‌یابد. انفجاری اتفاق می‌افتد که به دنبال آن عواقبی به وجود می‌آید که به عنوان سر و صدای کاویتاسیون شناخته می‌شوند. متلاشی- شدن حباب‌های بخار، به طور معمول در قسمت بدون فشار پره‌های پروانه، آسیب‌های شدیدی (سایش پره‌ها) را علاوه بر سرو صدا ایجاد می‌کنند. اگر پمپ سانتریفیوژی در نقطه‌ای دور از نقطه بهترین راندمان خود کار کند، سرو صدا اغلب از پوسته پمپ به گوش می‌رسد. شدت و فرکانس این سر و صدا از پمپی به پمپ دیگر متغیر است و به میزان هدی که پمپ تولید می‌کند، نسبت هد مکش مثبت خالص مورد نیاز به هد مکش مثبت در دسترس و میزانی که جریان واقعی از جریان ایده‌آل منحرف می‌شود بستگی دارد. سر و صدا معمولاً زمانی تولید می‌شود که زاویه پره‌های دهانه ورودی، پروانه و دیفیوزر برای نرخ جریان واقعی نادرست باشند. بهترین راه تشخیص کاویتاسیون از مشاهده امواج مختلط یا اختلاف فشار دینامیکی با استفاده از یک اسیلوسکوپ و یک ترانسدیوسر فشار است. شکل موج فشاری یک موج غیرسینوسی با بیشترین تیزی در اوج (کوتاه مدت و نوک تیز) و بیشترین گردی در اوج در زمانی که فشار بخار اتفاق می‌افتد است. با افت فشار نمی‌توان مکشی کمتر از فشار بخار تولید کرد. سر و صداهای شبه کاویتاسیون در جریان‌های پایین‌تر از طراحی شنیده می‌شوند، حتی در زمانی که هد مکش مثبت خالص ورودی بیشتر از هد مکش مثبت خالص مورد نیاز باشد و این یک مشکل بسیار پیچیده است. سر و صداهای کم، فرکانس تصادفی ولی با شدت بالا، از جریان برگشتی در چشم پروانه یا در خروجی پروانه و یا هر دو اتفاق می‌افتد. هر پمپ سانتریفیوژ تحت شرایط مشخصی از کاهش جریان، این بازچرخش را دارد. عملکرد تحت شرایط بازچرخش می‌تواند به قسمت فشار ورودی یا قسمت تخلیه پره‌های پروانه آسیب بزند (همچنین پره‌های محفظه). شاهد و گواهی این بازچرخش جریان، افزایش بلندی سر و صدای عبور ناپیوسته امواج فشاری در اتمسفر^{۱۵} و افزایش ضربات فشاری مکش یا تخلیه با کاهش جریان است. در شکل ۴ سطوح صوتی اندازه‌گیری شده در پوسته یک پمپ با توان ۸۰۰۰ اسب بخار و در نزدیکی لوله مکش در خلال یک کاویتاسیون دیده می‌شود. کاویتاسیون سبب ایجاد یک شوک پهن باند می‌شود که بسیاری از فرکانس‌ها را تحریک می‌کند. به هر حال در این مورد، فرکانس گذر از پره (تعداد گردش پره‌های پروانه در هر ثانیه) و چند برابر آن مود غالب می‌باشند. کاویتاسیون از این نوع، سر و صدایی با فرکانس بالا تولید می‌کند که بیشتر به صدایی شبیه به ترق ترق^{۱۶} کردن شبیه است.

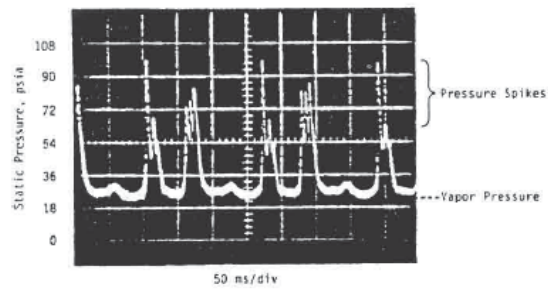
¹⁴ Eddies

¹⁵ Banging type

¹⁶ Crackling

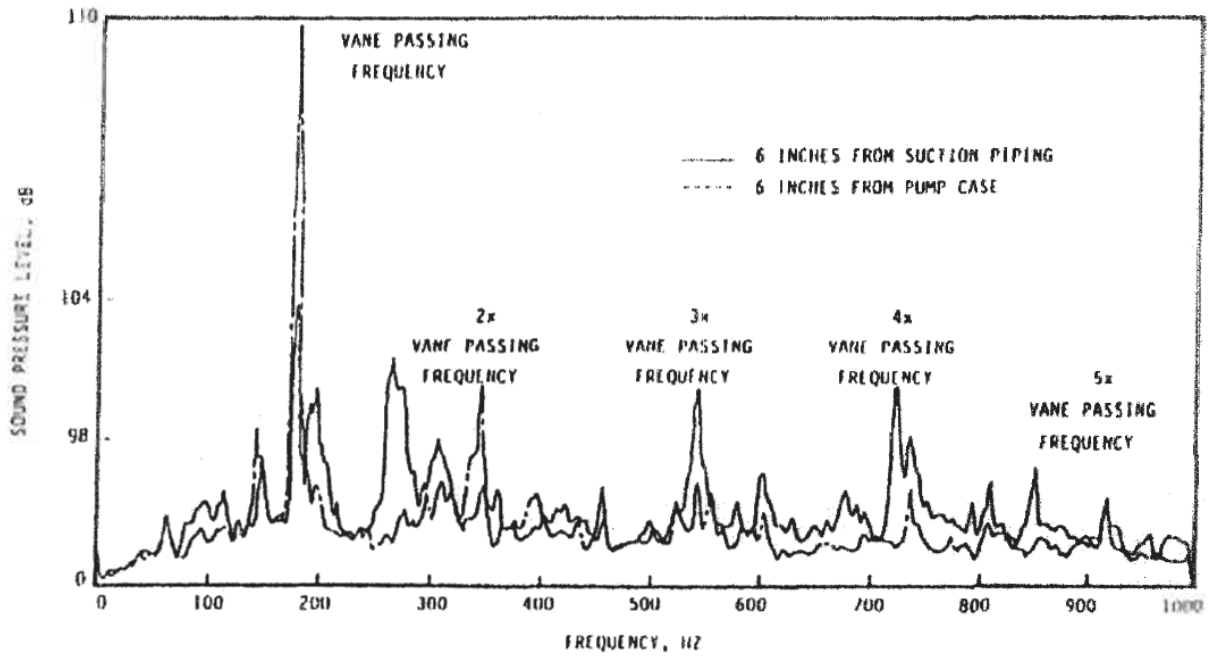


(a) Cavitation Theory
 If $P_d > P_s - P_{vp}$ then cavitation will occur.
 P_s = Static Pressure
 P_d = Dynamic Pulsations, zero-peak
 P_{vp} = Vapor Pressure



(b) Complex waveform of Pressure
 Showing Effects of Cavitation

شکل ۳- اثرات کاویتاسیون بر فشار دینامیکی



شکل ۴- طیف سر و صدای یک پمپ سانترفیوژ

فلاشینگ به طور معمول در سیستم‌های آب گرم اتفاق می‌افتد (سیستم‌های تغذیه آب)، زمانی که آب گرم و با فشار در عبور از محدودیت‌هایی چون دریچه و غیره، کاهش فشاری را تجربه کند. این کاهش فشار به سیال اجازه می‌دهد که به طور ناگهانی بخار شود و ایجاد یک ضربه شدید کند که منجر به ایجاد سر و صدایی شبیه به سر و صدای حاصل از کاویتاسیون می‌شود. برای جلوگیری از فلاشینگ پس از یک محدودیت هندسی، فشار پشتی^{۱۷} به میزان کافی باید تامین شود. متناوباً، محدودیت می‌تواند در انتهای خط قرار گیرد که این انرژی فلاشینگ در حجمی بزرگتر ناپدید گردد.

۵.۳. آشفته‌گی جریان

منابع فشار دینامیکی تولیدی پمپ شامل آشفته‌گی (آشفته‌گی‌ها یا گردابه‌ها)، در فضای خالی بین نوک پره پروانه و دیفیوزر ثابت یا لبه‌های محفظه ایجاد می‌شود. نوسانات فشار دینامیکی یا ضرباتی که از این طریق تولید می‌شوند، می‌توانند سبب ارتعاشات پروانه شوند و یا با برخورد ضربات فشاری بر روی پروانه، سبب ارتعاشات شفت شوند.

جریان با عبور از یک مانع یا محدودیت در لوله‌کشی، ممکن است ضرباتی ناشی از آشفته‌گی یا جریان القایی ایجاد کند. این ضربات می‌توانند باعث تولید سر و صدا و ارتعاش در یک باند فرکانسی گسترده شوند. فرکانس‌ها وابسته به سرعت جریان و ابعاد مانع هستند. این ضربات می‌توانند دچار تداخل رزونانسی با دیگر اجزای سیستم‌های لوله‌کشی آکوستیکی شوند. اکثر این مسیرهای جریان ناپایدار به وسیله برش در مرز بین محدوده سرعت بالا و سرعت پایین در میدان سیال ایجاد می‌شوند. مثال‌های معمول از این نوع آشفته‌گی، جریان دور موانع یا در گذر از محدوده آب مانده یا جریان دوطرفه است. عمل برش، آشفته‌گی یا ادی‌هایی تولید می‌کند که می‌توانند به توزیع فشار در دیواره لوله تبدیل شوند که این ارتعاشات سبب تحریک ارتعاشات محلی لوله یا اجزای پمپ می‌شوند. مدهای پاسخ طبیعی آکوستیکی سیستم لوله‌کشی و محل آشفته‌گی، اثرات زیادی بر دامنه و فرکانس این پخش گردابه دارند. اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهد که جریان گردابه وقتی که رزونانس آکوستیکی یک سیستم همزمان با تولید فرکانس یک منبع باشد، شدید است. گردابه‌ها یک انرژی آشفته پهن باند را با فرکانسی تولید می‌کنند که این فرکانس می‌تواند از طریق عدد بی‌بعد اشتروهل^{۱۸} از ۰.۲ تا ۰.۵ از طریق زیر تعیین گردد:

$$f = \frac{S_n}{VD} \quad (1)$$

که :

¹⁷ Back pressure

¹⁸ Strouhal

$f =$ فرکانس گردابه (Hz)

$S_n =$ عدد بی بعد اشتروهاال (0.2 – 0.5)

$V =$ سرعت جریان در لوله $\left(\frac{ft}{sec}\right)$

$D =$ یک بعد مشخصه مانع (ft)

برای جریان‌های گذرنده از لوله، D قطر لوله، و برای تحریک به وسیله جریان گذرنده از یک شاخه جریان، D قطر داخلی شاخه لوله است. که عدد اشتروهاال نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = \frac{fL}{V} \quad (2)$$

که در آن f فرکانس انتشار گردابه، L طول مشخصه و V سرعت سیال است.

دریچه‌های کنترل جریان و رگولاتورهای فشار می‌توانند سبب تولید سر و صدای مربوط به آشفتگی و جدایش جریان شود. وقتی این دریچه‌ها در افت فشار شدید و جریان سرعت بالا کار کنند آشفتگی قابل ملاحظه‌ای تولید می‌شود.

۵.۴. ضربات نوسانی

سیستم‌های پمپاژ، تغییرات فشار دینامیکی تولید می‌کنند و یا نوساناتی را در کارکرد معمولی به وجود می‌آورند. منابع عمومی نوسانات ضربه‌ای از مکانیزم‌هایی در داخل پمپ به وجود می‌آیند. دامنه این نوسانات در پمپ‌های سانتریفیوژ به وسیله انرژی آشفتگی که به فضای باز بین نوک پره پروانه و دیفیوزرهای ثابت و یا لبه‌ی پوسته، فضای باز نصب آب‌بندها، رینگ‌های سائیده شده و تقارن روتور پمپ و پوسته بستگی دارد، تولید می‌شود. به دلیل آن که این ابعاد به درستی شناخته نشده‌اند، پیش‌بینی دامنه نوسانات بسیار مشکل می‌باشد. حتی پمپ‌های شناخته شده نیز دارای دامنه نوسانات نامشخصی هستند.

حتی در پمپی که در بهترین نقطه عملکردی خود و در شرایط مناسب فعالیت کند، نوسانات ممکن است به وسیله سرعت‌های بالای جریان و آشفتگی در نوک پره‌ها یا محل برش آب (جایی که پروانه و پوسته کمترین فاصله را با یکدیگر دارند) ایجاد شوند. با فاصله گرفتن شرایط کاری از شرایط طراحی، منابع دیگری چون کاویتاسیون، گردش دوباره جریان و ناپایداری‌های جریان پدیدار می‌شوند.

این نوسانات می‌توانند با فرکانس‌های طبیعی آکوستیکی یا هیدرولیکی سیستم لوله‌کشی برای تقویت نوسانات تداخل داشته باشند. فرکانس‌های طبیعی در سیستم لوله‌کشی تابعی از خصوصیات سیال، لوله‌کشی و ابعاد پمپ است. تداخل آکوستیکی می‌تواند با یک رزنانس لوله که در آن آشفتگی در لبه به یک صدای قابل شنیدن تقویت شده تبدیل می‌شود مقایسه شود. متشابهاً، نوسانات از پمپ به نوسانات فشاری تقویت شده‌ای تبدیل می‌شوند که در زانویی‌ها و محدودیت‌ها، دریچه‌های بسته و تغییرات اندازه در لوله‌کشی سبب ایجاد نیروهای دینامیکی تکان‌دهنده می‌شوند. این تغییرات نیروی هیدرولیکی به مکانیکی می‌توانند منجر به ارتعاشات در پمپ، لوله‌کشی و سازه‌های نگه‌دارنده آن‌ها شوند.

در مرحله طراحی، فرکانس‌های طبیعی آکوستیکی به وسیله روش‌های مدل‌سازی آنالوگ و یا دیجیتال می‌تواند محاسبه شود. در این جا به بیان فرمولی برای فرکانس گذرنده از پره می‌پردازیم:

$$f = \frac{nN}{60} \quad (3)$$

که در آن n تعداد پره‌ها و N تعداد دور الکتروموتور (تعداد چرخش پروانه در دقیقه) می‌باشد.

به عنوان مثال وقتی موتوری با فرکانس گذر از پره ۳۶۰ هرتز (یعنی دارای ۶ پره با تعداد دور ۳۶۰۰ دور بر دقیقه) با پاسخ آکوستیکی ۳۶۰ هرتزی پمپ کوپل می‌شود، پمپ دچار ناپایداری می‌شود. از این رو برای اصلاح این موضوع از پروانه‌ای با ۷ پره استفاده می‌کنیم که به ما فرکانسی در حدود ۴۲۰ هرتز می‌دهد.

۵.۵. رزنانس آکوستیکی

وقتی یک نوسان فشاری دینامیکی از لوله عبور می‌کند و به یک محدودیت یا تغییر اندازه در لوله‌ها می‌رسد، نوسان منعکس می‌شود. زمانی که یک سری از این نوسانات فشاری بازتابانده شوند، یک موج ایستا تشکیل می‌شود که در یک نقطه از لوله، فشار به صورت تناوبی به بالا و پایین خط میانگین فشار افزایش و کاهش می‌یابد (تغییرات ساده هارمونیک). برهم‌نهی یک نوسان پیش‌رونده و یک نوسان بازگشتی، یعنی جمع دو نوسان متحرک در خلاف جهت یکدیگر، یک موج ایستا تولید می‌کند.

اگر زمان (فاز) یک موج بازتابی با یک موج جدید هم‌زمان شود، دو نوسان به یکدیگر اضافه می‌شوند یا تقویت می‌شوند. فاز نوسان‌ها وابسته به سرعت پمپ (فرکانس گذرنده از پره)، طول لوله و خصوصیات فیزیکی سیال است. سرعت آکوستیکی، تابعی از چگالی سیال و مدول بالک، که فاکتور مهمی در تعیین فرکانس رزنانس طول لوله است می‌باشد.

سرعت آکوستیکی سیالات از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$c = 8.615 \sqrt{\frac{K_s}{Sp. gr}} \quad (4)$$

که در آن c سرعت آکوستیکی بر حسب فوت بر ثانیه، $Sp. gr$ گرانش مخصوص و K_s مدول بالک ایزنتروپیک است.

که در فرمول بالا مدول بالک از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_s = 1000K_0 + 3.4P \quad (5)$$

که K_0 در آن ثابتی است که از جدول زیر برای آب بدست می‌آید و P فشار بر حسب پاسکال است.

جدول ۱- ثابت K_0 برای تصحیح فشار برای مدول بالک آب

**Constant K_0 for Pressure Correction for
Bulk Modulus of Water**

$$K_s = 1000 K_0 + 3.4P$$

P = pressure, psia

(valid up to 45000 psia)

Temperature (°F)	Constant K_0
32	289
50	308
68	323
86	333
104	340
122	345
140	348
158	348
176	341
194	342
212	336

شرایط رزونانس زمانی وجود دارد که دامنه موج ایستا تقویت شود، پس دامنه فشار دینامیکی بیشینه حقیقی اساساً بزرگتر از نوسانات القایی است. بدین گونه در فرکانس‌های (سرعت‌های پمپ) مربوط به رزونانس، سطح انرژی بالاتری نسبت به شرایط دور از رزونانس تولید می‌شود. اگر فرکانس‌های موج به گونه‌ای باشد که امواج رفت و برگشتی قابل جمع باشند، نوسانات تقویت می‌شوند. اگر هیچ استهلاکی وجود نداشته باشد، دامنه‌های فشاری در شکم‌ها به صورت تئوری به سمت بی‌نهایت می‌رود. اما در سیستم‌های لوله‌کشی حقیقی، استهلاک به دلایل زیر وجود دارد:

- عملکرد سیال لزج
- انتقال، نبود انعکاس کل در انتهای یک خط (این انتقال سبب کاهش میزان نوسان می‌شود)
- مقاومت لوله‌کشی، زبری‌های لوله، محدودیت‌ها و اریفیس‌ها

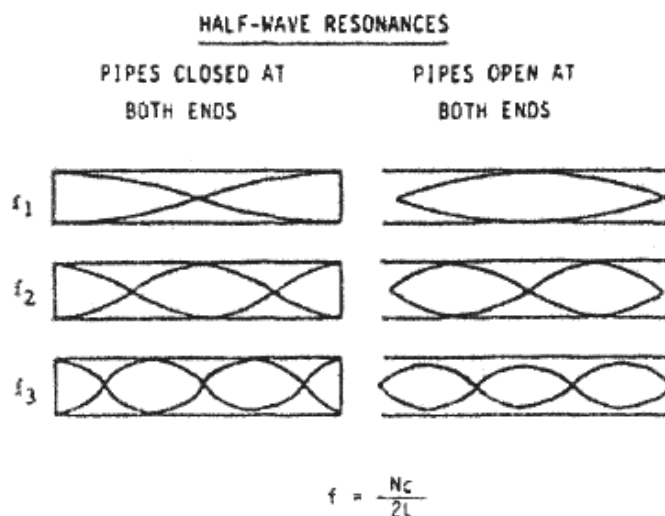
مفاهیم امواج آکوستیکی، بازتابش و رزونانس می‌توانند برای تشریح طول کلاسیک رزونانس استفاده شوند. در زیر رابطه بین سرعت آکوستیکی و طول موج و فرکانس را مشاهده می‌کنید:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

در زیر به بیان چند مدل از انواع رزونانس‌ها می‌پردازیم:

❖ رزونانس نیم‌موج (در لوله‌های دو سر باز و یا در لوله‌های دو سر بسته)

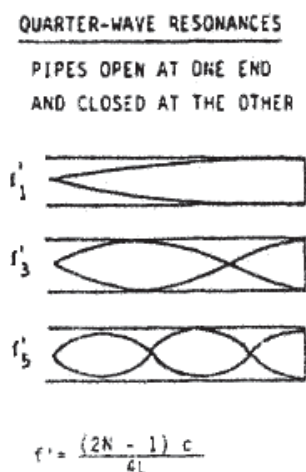
در شکل ۵ مدهای حرکت موج را در این حالت مشاهده می‌کنید:



شکل ۵- مودهای رزونانس نیم‌موج

❖ رزونانس $1/4$ موج (در لوله‌های یک سر باز و یک سر بسته)

در شکل ۶ مودهای حرکت موج را در این حالت مشاهده می‌کنید:



شکل ۶- مودهای رزونانس $1/4$ موج

وجود فرکانس‌های طبیعی نیم موج یا $1/4$ موج به تنهایی سبب ایجاد فرکانس رزونانس نمی‌شوند. برای آن‌که رزونانس اتفاق بیافتد، یک نوسان دینامیکی باید در فرکانسی مساوی با فرکانس آکوستیکی طبیعی تولید شود. تقویت دامنه به این دلیل اتفاق می‌افتد که یک موج بازتابی در زمانی مناسب، برای تقویت موج تولید شده در پمپ می‌رسد. رسیدن موج بازتابی به خصوصیات و طول لوله وابسته است. بنابر این، دامنه مسیر موج ایستا تقویت می‌شود از این رو که شدت موج نوسانی بیشینه حقیقی اساساً بزرگتر از سطح

القایی است. رزناس آکوستیکی سیستم‌های لوله‌کشی برای پمپ‌های سرعت ثابت، معمولا می‌تواند برای خارج از فرکانس رزناس قرار دادن آن‌ها از سرعت عملیاتی پمپ و فرکانس‌های گذر از پره و جلوگیری از تقویت نوسانات تنظیم شوند. به هر حال اگر پمپ فراتر از محدوده سرعت خود عمل کند و باند فرکانس تحریک آن گسترده شود، نیازمند دقت بیشتری در جایگذاری فرکانس رزناس است.

۵.۶. ناپایداری‌ها

ناپایداری‌های هیدرولیکی می‌تواند نتیجه تداخل دینامیکی یک پمپ سانتریفیوژ و پاسخ آکوستیکی سیستم لوله‌کشی باشد. عملکرد یک پمپ سانتریفیوژ برای تقویت یا کاهش اغتشاشات فشاری گذرنده از پمپ، وابسته به پارامترهای زیر است:

- شیب منحنی هد و نقطه عملکرد
- استهلاک جریان سیستم
- وجود رزناس واکنشی قوی در سیستم لوله‌کشی (مخصوصا اگر با فرکانس‌های گردابه‌ها هم‌زمان شوند)
- محل قرار گرفتن پمپ در میدان موج ایستا (در سرعت بیشینه نسبت به فشار بیشینه)
- تراکم‌پذیری سیال

دامنه نوسانات به شرایط کاری مثل سرعت، نرخ جریان و افت‌ها، به همان اندازه فرکانس طبیعی آکوستیکی و خصوصیات سیال وابسته است. پس در نهایت شدت نوسانات معمولا به وسیله تغییرات در شرایط کاری یا ترکیب سیال تاثیر می‌پذیرد. نوسانات معمولا به وسیله آشفتگی جریان در تغییرات سطح مقطع و محدودیت‌ها یا در پروانه پمپ آغاز می‌شود. وقتی فرکانس این انرژی آشفته یکی از رزناس‌های سیستم لوله‌کشی را تحریک کند و یا اگر پمپ در نزدیکی سرعت بیشینه در رزناس سیستم لوله‌کشی قرار داشته باشد، سپس نوسانات با شدت بالا و خود ساخته ایجاد می‌شوند. این نوع از ناپایداری‌ها در جریان‌های با دبی کمتر امکان‌پذیرترند، زیرا استهلاک آکوستیکی تولیدشده توسط اثرات اصطکاک جریان، در جریان‌های با نرخ بالا بیشترند.

۶. طراحی و ساخت

پاسخ دینامیکی اجزای پمپ به نیروهای محرک در محدوده فرکانس عملیاتی، می‌تواند سبب ایجاد مشکلاتی شود که منجر به تعمیرات و نگهداری بیشتر و خرابی‌های فاجعه‌بار شود. ساخت و یا مونتاژ نامناسب می‌تواند سبب عدم توازن شود که منجر به

ارتعاشات آسیب‌زننده در زمانی که سرعت پمپ به فرکانس طبیعی سیستم روتور برسد شود. بررسی دینامیک چرخشی^{۱۹} طراحی روتور پمپ در اجتناب از سرعت مربوط به ارتعاشات بسیار تعیین‌کننده است. فاکتورهای توضیح داده شده در زیر نقش بسیار مهمی را در کنترل پاسخ‌های روتور دینامیکی پمپ‌های سانتریفیوژ دارد.

۷. تحلیل روتور دینامیکی

سرعت بحرانی جانبی به عنوان سرعتی که در آن قله پاسخ ارتعاشاتی (پیکی از ارتعاش) اتفاق می‌افتد. در سرعت بحرانی نسبت به سرعت‌های دیگر، روتور به عدم تعادل، بسیار حساس‌تر است. باید از رسیدن به سرعت بحرانی پمپ جهت نگه‌داشتن دامنه‌های ارتعاشاتی قابل قبول، اجتناب کرد.

۸. تحلیل سرعت بحرانی جانبی

روتور دینامیک پمپ به تعداد متغیرهای بیشتری از طراحی نسبت به دیگر نمونه‌های تجهیزات چرخشی بستگی دارد. در کنار مشخصه‌های یاتاقان‌گردها و شفت‌ها، مشخصه‌های دینامیکی آب‌بندها می‌تواند اثرات مشخصی بر محل سرعت بحرانی، حساسیت عدم توازن و پایداری روتور داشته باشد. اشکال مختلفی از آب‌بندها مثل آب‌بند رینگی شناور، آب‌بند شیاردار و بقیه وجود دارد. در این جا به بیان اثری به نام اثر لوماکین^{۲۰} می‌پردازیم:

اثر صلبیت لوماکین انحراف شفت را در زمانی که پمپ در حال انجام عملیات است کم می‌کند. در بعضی موارد اثر لوماکین می‌تواند شدت کافی را برای جلوگیری از رسیدن به سرعت بحرانی روتور داشته باشد. افت فشار در طول آب‌بندها با توان دوم سرعت پمپ افزایش می‌یابد و همچنین صلبیت آب‌بندها با مربع سرعت افزایش می‌یابد.

تحلیل سرعت بحرانی جانبی برای توسعه طراحی یک پمپ قابل اطمینان و بدون مشکل بسیار ضروری است. بررسی‌های طراحی باید شامل موارد زیر باشند:

- نقشه سرعت بحرانی
- فرکانس‌های طبیعی نامیرا و شکل مودها

¹⁹ Rotordynamic

²⁰ Lomakin effect

- صلبیت یاتاقان‌ها و خواص میرایی
- صلبیت آب‌بندها و خواص میرایی
- پاسخ روتور به عدم توازن
- اثرات فونداسیون و پایه‌ها بر پاسخ
- پایداری روتور

۸.۱. صلبیت یاتاقان‌ها و میرایی

صلبیت دینامیکی و ضرائب میرایی یاتاقان‌ها می‌تواند به وسیله ۸ ضریب خطی شبیه‌سازی شود ($K_{xx}, K_{yy}, K_{xy}, k_{yx}, C_{xx}, C_{yy}, C_{xy}, C_{yx}$). صلبیت یاتاقان‌ها و ضرائب میرایی آن‌ها تابعی از نوع یاتاقان، طول قطر آن، لزجت، بار، سرعت، فاصله و عدد سامرفیلد^{۲۱} است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{\mu NDL}{W} \left(\frac{R}{C}\right)^2 \quad (7)$$

که در آن μ لزجت روان‌کننده، N سرعت روتور، D قطر یاتاقان، L طول یاتاقان، R شعاع یاتاقان، W بار یاتاقان و C شعاع فاصله تراشکاری شده است. معمولا کمترین صلبیت در شرایط بیشترین فاصله، کمترین پیش‌بار و بالاترین دمای روغن تعریف می‌شود و بلعکس.

منابع

- [1]. Paresh Girdhar, Practical Centrifugal Pumps (Design, Operation and Maintenance), Elsevier, 2005
- [2]. Val s. Lobanoff, Centrifugal Pumps design and application, second edition, Gulf publishing company, 1992

²¹ Sommerfeld Number