

کاهش هزینه‌ها با عیب‌یابی به موقع رویکردی نوین به عیوب متداول فید پمپ‌ها



داستان فید پمپ در فولادسازی

در دنیای پیچیده و حیاتی صنعت، هر قطعه‌ای نقشی اساسی ایفا می‌کند و پمپ‌های فید صنعتی از جمله این قطعات کلیدی هستند. این پمپ‌ها وظیفه خطیر انتقال سیالات را به قلب سیستم‌های حساس مانند دیگ‌های بخار، راکتورها و سیستم‌های تصفیه بر عهده دارند و عملکرد صحیح آن‌ها به منزله تپش منظم قلب یک مجموعه صنعتی است. با این حال، همانند هر قلب دیگری، این پمپ‌ها نیز آسیب‌پذیرند و ممکن است با مشکلات متعددی روبرو شوند که در صورت عدم رسیدگی، پیامدهای سنگینی به دنبال دارند.

صنایع ایران، به ویژه در حوزه‌های سنگینی همچون فولادسازی، پتروشیمی و نیروگاه‌ها، وابستگی چشمگیری به عملکرد این پمپ‌ها دارند. در یکی از همین واحدهای فولادسازی در جنوب ایران، آقای مهندس "احمدی" به تازگی مدیریت واحد تعمیر و نگهداری را بر عهده گرفته بود. او با وجود سال‌ها تجربه در سایر تجهیزات، با پیچیدگی‌های پمپ‌های فید و اهمیت حیاتی آن‌ها در فرآیند تولید بیگانه بود. در یک روز گرم تابستانی، اپراتورها متوجه صدای غیرعادی و لرزش شدید در یک پمپ شدند. این پمپ به دلیل کاویتاسیون، که ناشی از دمای بالای آب ورودی بود، در حال تخریب تدریجی بود. با وجود هشدارهای اولیه، مهندس احمدی که هنوز به طور کامل با حساسیت این پمپ‌ها آشنا نبود، به دلیل حجم بالای کار و عدم توقف خط تولید، به این موضوع رسیدگی فوری نکرد. چند ساعت بعد، پمپ به طور کامل از کار افتاد و کل خط تولید به مدت چندین ساعت متوقف شد. این توقف نه تنها هزینه‌های مالی زیادی را به بار آورد، بلکه

نشان داد که نادیده گرفتن عیوب متداول فید پمپ‌ها و عدم شناخت کافی از آن‌ها می‌تواند چقدر گران تمام شود.

در این مقاله، قصد داریم تا با نگاهی دقیق به عیوب متداول فید پمپ‌ها، علل ریشه‌ای آن‌ها، و راهکارهای عملی برای پیشگیری و نگهداری بپردازیم. هدف ما ارائه یک راهنمای جامع است تا مهندسان و تکنسین‌های ایرانی بتوانند با دانش و آمادگی بیشتری با این چالش‌ها روبرو شوند و از وقوع فاجعه‌هایی مشابه داستان فوق جلوگیری کنند.

بخش اول: کاویتاسیون، دشمن پنهان پمپ‌ها

اولین تجربه من با عیوب متداول فید پمپ‌ها به زمانی برمی‌گردد که به تازگی در واحد فولادسازی مشغول به کار شده بودم و گزارش خرابی یکی از پمپ‌ها به من رسید. وقتی به محل رسیدم، اپراتورها پمپ را باز کرده بودند و با دست‌های اشاره‌گر خود، پروانه پمپ را به من نشان دادند. از دیدن وضعیت آن شوکه شدم. سطح پروانه به شکلی عجیب و وحشتناک تخریب شده بود. انگار کسی با ناخن‌های بلند و تیز روی فلز خراش‌های عمیقی ایجاد کرده بود. در ابتدا فکر کردم ممکن است جسم سختی وارد پمپ شده و این آسیب را ایجاد کرده باشد، اما هیچ اثری از ضربه یا جسم خارجی وجود نداشت. مسئول قدیمی‌تر تعمیرات که متوجه تعجب من شد، لبخندی زد و با آرامش گفت: "این اثر دست کاویتاسیون است." این اولین درس من در زمینه عیب‌یابی پمپ‌های فید بود.

کاویتاسیون (Cavitation) یک پدیده مخرب فیزیکی است که زمانی رخ می‌دهد که فشار مایع در قسمت ورودی پمپ به کمتر از فشار بخار آن در دمای عملیاتی کاهش یابد. این کاهش فشار باعث می‌شود که مایع به فاز بخار تبدیل شده و حباب‌های کوچکی را تشکیل دهد. زمانی که این حباب‌ها

به قسمت‌های پرفشار پمپ می‌رسند (معمولاً در نزدیکی پروانه)، به دلیل افزایش فشار، به سرعت منفجر می‌شوند. این انفجارها نیروی بسیار زیادی را در نقطه‌ای کوچک آزاد می‌کنند که می‌تواند به تدریج سطح پروانه، بدنه و حتی شفت پمپ را تخریب کند.

علل اصلی کاویتاسیون:

کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار مکش موجود (NPSHa) پمپ کمتر از فشار مکش مورد نیاز (NPSHr) برای کارکرد صحیح آن باشد. عوامل زیر باعث افت فشار مکش می‌شوند:

- دمای بالای مایع ورودی: هرچه دمای مایع بالاتر باشد، فشار بخار آن نیز بالاتر می‌رود. در نتیجه، رسیدن فشار مایع به فشار بخار و تشکیل حباب‌ها آسان‌تر می‌شود.
- موانع در مسیر ورودی: گرفتگی فیلترها، شیرهای نیمه‌باز یا خمیدگی لوله‌ها باعث افت فشار در سمت ورودی پمپ شده و به کاویتاسیون منجر می‌شوند.
- نصب نادرست پمپ: اگر پمپ در ارتفاعی بالاتر از مخزن ورودی نصب شده باشد، نیروی گرانش نیز به کاهش فشار مکش کمک می‌کند.
- جریان بیش از حد: در صورتی که پمپ با دبی بیش از حد طراحی شده خود کار کند، سرعت مایع افزایش یافته و طبق اصل برنولی، فشار آن کاهش می‌یابد.

آسیب‌ها و اثرات کاویتاسیون:

تخریب ناشی از کاویتاسیون تنها به ظاهر پمپ محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای جدی‌تری دارد:

- **فرسایش (Erosion):** انفجار حباب‌های بخار باعث کنده شدن ذرات فلز از سطح پروانه و بدنه پمپ شده و ظاهری حفره‌دار یا شبیه به لانه زنبور (honeycomb) ایجاد می‌کند.
- **کاهش عملکرد:** با تخریب پروانه، کارایی پمپ به شدت کاهش یافته و توانایی آن در ایجاد فشار و دبی مورد نیاز از بین می‌رود.
- **لرزش و سر و صدای غیرعادی:** انفجارهای حباب‌ها باعث ایجاد ارتعاش و صدای بلند می‌شوند که به سایر قطعات پمپ مانند بلبرینگ‌ها آسیب می‌رساند.

یک نکته کلیدی:

کاویتاسیون را مانند بازی با میلیون‌ها نارنجک کوچک در نظر بگیرید که برای پرتاب، نیازی به ضامن ندارند! داستان از جایی شروع می‌شود که پمپ تلاش می‌کند مایع را با سرعت بسیار بالا بکشد، اما عواملی که در بالا اشاره شد، مانند **دمای بالای مایع ورودی، موانع در مسیر،** یا نصب نادرست پمپ، مثل یک ضامن عمل می‌کنند. این عوامل فشار مکش را کاهش می‌دهند و این دقیقاً همان لحظه‌ای است که نارنجک‌ها (حباب‌های بخار) در حال شکل‌گیری هستند.

با کشیده شدن ضامن توسط این عوامل، نارنجک‌ها آماده انفجار می‌شوند. آن‌ها در بخش ورودی پمپ، در نقطه‌ای که فشار به کمترین حد خود می‌رسد، به تعداد بی‌شماری متولد می‌شوند. اما لحظه خطرناک، لحظه انفجار است. نارنجک‌ها به سرعت به سمت ناحیه پرفشار، یعنی اطراف پروانه، حرکت می‌کنند. در آنجا، افزایش ناگهانی فشار باعث می‌شود که در یک چشم بر هم زدن، هر حباب به صورت مجزا منفجر شود و نیرویی باورنکردنی را به سطح فلز وارد کند. این انفجارهای پی‌درپی و بی‌امان، سطح پروانه را ذره‌ذره می‌تراشند و آن شیارها و حفره‌هایی را که من دیدم،

ایجاد می‌کنند. این پدیده به قدری قدرتمند است که می‌تواند سخت‌ترین فولادها را نیز به مرور زمان از بین ببرد.

بخش دوم: سکوت، نشستی و لرزش؛ نشانه‌هایی که نباید نادیده گرفت

بعد از اجرای کاویتاسیون، حساسیت من به پمپ‌ها به شدت بالا رفته بود. هر صدای غیرعادی یا لرزش کوچکی را با دقت بررسی می‌کردم. اما مشکل بعدی به شکل دیگری خود را نشان داد: سکوت. نه صدای بلندی، نه لرزش شدیدی. فقط یک قطره کوچک آب که به آرامی از زیر پمپ می‌چکید و زیر پای آن، یک گودال کوچک را ایجاد کرده بود. اپراتورها می‌گفتند "این نشستی عادی است" اما چیزی در وجودم می‌گفت این قطره عادی نیست. بررسی بیشتر نشان داد که این نشستی کوچک، نشانه خرابی یک مکانیکال سیل بود و مایع به آرامی به سمت بلبرینگ‌ها نفوذ می‌کرد. بعد از این ماجرا بود که فهمیدم نادیده گرفتن یک قطره نشستی کوچک می‌تواند به اندازه یک خرابی بزرگ پرهزینه باشد.

۱. نشستی (Leakage):

نشستی، از رایج‌ترین عیوب متداول فید پمپ‌ها است که اغلب نادیده گرفته می‌شود. هرچند ممکن است در ابتدا بی‌اهمیت به نظر برسد، اما به مرور زمان آسیب‌های جدی و پرهزینه‌ای را به دنبال دارد. اغلب نشستی‌ها از مکانیکال سیل‌ها یا گسکت‌ها رخ می‌دهند که وظیفه آب‌بندی شفت پمپ را بر عهده دارند.

علل اصلی نشستی:

- **فرسودگی مکانیکال سیل:** با گذشت زمان و کارکرد مداوم، سطح سیل‌ها فرسوده شده و خاصیت آب‌بندی خود را از دست می‌دهند.

- **نصب نادرست:** نصب غیراصولی سیل ها و گسکت ها می تواند باعث ایجاد فضای خالی و نشت مایع شود.
- **ارتعاشات بیش از حد:** لرزش پمپ می تواند باعث حرکت و جابجایی سیل شده و به آن آسیب برساند.

پیامدهای نشتی:

- **اتلاف مایع و انرژی:** نشتی مداوم باعث از بین رفتن مایع پمپ شونده و در نتیجه کاهش راندمان سیستم می شود.
- **آسیب به بلبرینگ ها:** ورود مایع به محفظه بلبرینگ ها می تواند روان کاری را مختل کرده و باعث فرسایش و خرابی زودرس آن ها شود.
- **آلودگی محیطی:** به ویژه در صنایع شیمیایی، نشتی می تواند منجر به آلودگی محیط زیست و ایجاد خطرات ایمنی شود.

۲. ارتعاش و لرزش (Vibration):

لرزش پمپ هرگز یک پدیده طبیعی نیست. لرزش بیش از حد مانند فریاد پمپ برای کمک است و می تواند نشانه ای از مشکلات عمیق تر باشد. این مشکل می تواند به صورت ناگهانی یا تدریجی رخ دهد و در هر دو حالت، نیاز به بررسی فوری دارد.

علل اصلی ارتعاش:

- **عدم هم راستایی (Misalignment) شفت:** اگر شفت موتور و پمپ در یک راستا نباشند، تنش های مکانیکی زیادی به وجود می آید که باعث لرزش شدید و در نهایت خرابی بلبرینگ ها و کوپلینگ ها می شود.
- **عدم بالانس بودن روتور:** در صورتیکه پروانه یا روتور پمپ بالانس نباشد، در سرعت های بالا لرزش های زیادی ایجاد می کند.

- **فرسودگی بلبرینگ‌ها:** بلبرینگ‌های فرسوده، خود منبعی برای لرزش هستند و با ایجاد اصطکاک، می‌توانند باعث افزایش دما و آسیب‌های جدی‌تر شوند.
- **کاویتاسیون و پدیده سرج (Surge):** همانطور که در بخش قبل گفته شد، کاویتاسیون باعث لرزش می‌شود. همچنین پدیده سرج در سیستم‌های پمپاژ نیز می‌تواند ارتعاش ایجاد کند.

نکته کلیدی:

به پمپ‌ها مانند یک انسان زنده نگاه کنید. نشتی، مانند تعریق بیش از حد است که نشان می‌دهد بدن در حال از دست دادن مایعات حیاتی خود است. و لرزش، مانند لرزش بدن در هنگام تب شدید است؛ نشانه‌ای است از یک بیماری یا مشکل جدی که باید به سرعت تشخیص داده و درمان شود.

بخش سوم: داغی و بی‌حالی؛ وقتی پمپ از نفس می‌افتد

بعد از ماجرای نشتی، حساسیت من به نشانه‌های ظریف بیشتر شد. روزی از کنار یکی از پمپ‌ها رد می‌شدم که بوی عجیبی به مشام رسید، شبیه به بوی روغن سوخته. دستم را نزدیک پمپ بردم و متوجه شدم بدنه آن بیش از حد داغ است، به طوری که به سختی می‌شد دست را روی آن نگه داشت. اپراتورها می‌گفتند "این پمپ همیشه داغ کار می‌کند" اما درسی که از نشتی گرفته بودم باعث شد شک کنم. این داغی نشانه یک مشکل درونی بود، و بعد از بررسی‌ها متوجه شدیم که بلبرینگ‌ها به دلیل روان‌کاری نامناسب در حال فرسایش شدید بودند.

از طرفی، وقتی که پمپ داغی نداشت اما فشار یا دبی خروجی آن به تدریج کاهش یافته بود، مشکل دیگری در کار بود. پمپ مانند یک ورزشکار خسته عمل می‌کرد که دیگر توانایی کافی برای دویدن ندارد. این حالت بی‌حالی،

نشانه‌ای از سایش پروانه یا گرفتگی در خطوط بود که به مرور زمان رخ می‌داد و به آرامی کارایی کل سیستم را پایین می‌آورد. این تجربیات نشان دادند که نادیده گرفتن این نشانه‌ها، مانند داغی یا کاهش عملکرد، در نهایت منجر به خرابی کامل و پرهزینه می‌شود.

۱. گرمای بیش از حد (Overheating):

افزایش دمای پمپ، زنگ خطری جدی است که نباید نادیده گرفته شود. این گرما می‌تواند به سرعت به قطعات حیاتی مانند بلبرینگ‌ها، سیل‌ها و حتی موتور آسیب برساند.

علل اصلی گرمای بیش از حد:

- **اصطکاک بالا:** خرابی بلبرینگ‌ها، تماس بین پروانه و بدنه، یا روان‌کاری نامناسب باعث افزایش شدید اصطکاک و تولید گرما می‌شوند.
- **کارکرد بدون مایع (Dry Running):** اگر پمپ بدون مایع کار کند، گرمای ناشی از اصطکاک قطعات داخلی به سرعت افزایش می‌یابد.
- **فشار برگشتی زیاد:** کارکرد پمپ در برابر یک شیر خروجی بسته یا یک سیستم با فشار بالا، باعث گردش مجدد مایع در داخل پمپ و تولید گرما می‌شود.

۲. کاهش فشار یا دبی (Reduced Pressure/Flow):

اگر پمپ دیگر نتواند فشار یا دبی مورد نیاز را تأمین کند، نشانه این است که توانایی خود را از دست داده است. این مشکل می‌تواند به تدریج رخ داده و به سختی قابل تشخیص باشد.

علل اصلی کاهش عملکرد:

- **سایش پروانه (Impeller Wear):** با مرور زمان، لبه‌های پروانه ساییده شده و فاصله بین پروانه و بدنه پمپ (Clarence) افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود مایع از سمت پرفشار به سمت کم‌فشار جریان پیدا کرده و راندمان پمپ کاهش یابد.
- **گرفتگی فیلتر یا خط ورودی:** وجود اجسام خارجی یا رسوبات در مسیر ورودی پمپ می‌تواند جریان مایع را محدود کرده و دبی را کاهش دهد.
- **نشتی داخلی:** همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، نشتی داخلی باعث از دست رفتن فشار پمپ می‌شود.

بخش چهارم: درس‌هایی برای مهندسان ایرانی

بعد از این تجربه‌های تلخ و شیرین، به این نتیجه رسیدم که عیوب متداول فید پمپ‌ها تنها مشکلات فنی نیستند، بلکه درس‌هایی برای نگاه دقیق‌تر به صنعت ما هستند. در صنایع ایران، با توجه به شرایط خاص و چالش‌های واردات، اهمیت نگهداری پیشگیرانه و دانش داخلی دوچندان می‌شود. دیگر نمی‌توان به سادگی یک قطعه خراب را دور انداخت و منتظر قطعه جایگزین ماند.

حاصل عمر: قبل از هر اظهار نظر، به دنبال سؤال درست باش

اگر از من بپرسند که در این سال‌ها مهم‌ترین درسی که از پمپ‌ها و مشکلاتشان گرفتم چه بود، شاید جوابم یک فرمول پیچیده یا یک راهکار فنی نباشد. بلکه یک جمله مدیریتی ساده و عمیق است: "قبل از هر اظهار نظر، به دنبال سؤال درست باش." در گذشته، وقتی با مشکلی روبرو می‌شدم، سریعاً به دنبال راه‌حل بودم: "پمپ داغ کرده، پس باید

روان کاری‌اش را چک کنیم." یا "پمپ نشتی دارد، پس مکانیکال سیل را عوض کنیم." اما هر بار که این کار را می‌کردم، مشکل پس از مدتی دوباره برمی‌گشت. این اشتباه بود.

درس اصلی این است که به جای تمرکز بر «راه‌حل»، باید به «چرایی» مشکل فکر کرد. سؤال درست این بود: "چرا بلبرینگ‌ها در حال فرسایش هستند؟" یا "چرا این نشتی مدام تکرار می‌شود؟" این سؤال‌ها ما را به ریشه مشکلات، مانند عدم هم‌راستایی شفت یا کاویتاسیون، هدایت می‌کنند. حاصل سال‌ها تلاش من این بود که فهمیدم اگر سؤال درست را نپرسید، حتی بهترین پاسخ‌ها هم شما را به جایی نمی‌رساند.

امیدوارم این مقاله به مهندسان و تکنسین‌های کشورمان کمک کند تا با نگاهی تازه به این تجهیزات حیاتی نگاه کنند. به جای نادیده گرفتن یک صدای عجیب، یک لرزش کوچک، یا یک قطره نشتی، آن‌ها را به عنوان نشانه‌های حیاتی در نظر بگیرند که اگر به موقع تشخیص داده شوند، می‌توانند از توقف تولید و هزینه‌های میلیاردي جلوگیری کنند. پمپ‌های ما، مانند قلب‌های تپنده صنعت، شایسته توجه و مراقبت هستند.

تهیه و تدوین : علی منتظرالظهور تابستان ۱۴۰۴

منابع و مراجع

- Bloch, H. P. (۲۰۱۲). *Pump User's Handbook: Life Extension*. The Fairmont Press, Inc.
- Karassik, I. J. (۲۰۰۷). *Pump Handbook*. McGraw-Hill Education.
- Finnemore, E. J. & Daugherty, R. L., Franzini, J. B. (۲۰۰۱). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. McGraw-Hill.
- American Petroleum Institute (API) Standard 610 (۲۰۱۰). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries*.