پدیده گالینگ در پمپ ها

واکاوی پدیده گالینگ در پمپ‌های فرآیندی

www.alimontazer.com & www.farbodsanatco.com

مقدمه :

در سکوتِ سنگین و پرالتهاب شبِ واحد پتروشیمی، ناگهان صدای ناهنجار و لرزاننده پمپ کاندنسیت جدید، آرامش نسبی اتاق کنترل را برهم زد؛ صدایی که نه شبیه به چرخشِ معمول یک تجهیز دوار، بلکه بیشتر شبیه به خرد شدنِ فلز در میان چرخ‌دنده‌هایی عظیم بود. مهندس جوان، در حالی که از تحلیلِ بی‌ثمرِ اعداد و ارقام متناقض سنسورهای ارتعاش خسته به نظر می‌رسید، به سراغ منتور ارشد رفت تا شاید تجربه سالیان او گره از این معما بگشاید. در دستانِ لرزان او، تکه فلزی براق و کنده شده قرار داشت که با دقتی وسواس‌گونه از داخل محفظه یاتاقان و مجاورت رینگ‌های سایشی پیدا کرده بود. این قطعه، علیرغم ظاهر صیقلی‌اش در برخی نقاط، در لبه‌ها دچار کشیدگی و چسبندگی شدیدی شده بود که در نگاه اول، بوی تند و آشنای "گالینگ" را به مشام می‌رساند. این گفتگو، تلاشی است عمیق برای کشف رازی فنی که در پسِ ارتعاشات ویرانگر و ۱۰ برابری پمپ استیل نهفته است؛ جایی که متالورژی و مکانیک در نقطه‌ای بحرانی با هم تلاقی می‌کنند.

بخش اول: ماهیت جرم - گالینگ چیست؟

منتی: جناب مهندس، ما پوسته را از فولاد به استیل ۳۱۶ ارتقا دادیم تا خوردگی را مهار کنیم و عمر مفید پمپ را در برابر کاندنسیت خورنده افزایش دهیم. اما حالا با لرزشی مواجهیم که انگار پمپ در حال خرد کردن سنگ است و ارتعاشات به طرز وحشتناکی بالا رفته. چرا متریالی که از نظر شیمیایی و مکانیکی مقاوم‌تر و گران‌تر است، چنین آشوب و ناپایداری بزرگی در سیستم به پا کرده؟

منتور: سوال هوشمندانه‌ای است. ببین پسرم، استیل ۳۱۶ در برابر "خوردگی شیمیایی" و اسیدیته کاندنسیت یک قهرمان است، اما در دنیای "اصطکاک فیزیکی" و لغزش سطوح، یک فاجعه متالورژیکی محسوب می‌شود. آنچه تو می‌بینی سایش معمولی (Erosion) یا خوردگی نیست؛ پدیده **Galling** است. تصور کن دو سطح فوق‌الاده تمیز و صیقلی از استیل آستنیتی با لقی بسیار ناچیز روی هم می‌لغزند. استیل به طور طبیعی یک لایه میکروسکوپی و بسیار نازک از اکسید کروم دارد که از آن محافظت می‌کند. اما زمانی که فشار هیدرولیکی یا ارتعاشات ناشی از کاویتاسیون این لایه محافظ را پاره کند، اتم‌های فلزِ لخت و فعال در کسری از ثانیه به هم می‌رسند. از آنجایی که این دو سطح غریبه نیستند و از یک خانواده و هم‌جنس هستند، در اثر نیروی لغزش و حرارت، در یک لحظه پیوندهای اتمی پایداری ایجاد کرده و به هم "جوش" می‌خورند.

منتی: یعنی در دور بالایی مثل ۲۹۵۰، این قطعات رینگ سایشی مدام در حال جوش خوردن لحظه‌ای و کنده شدن فیزیکی از هم هستند؟ این موضوع چطور باعث تخریب می‌شود؟

منتور: دقیقاً همین‌طور است. این "جوش خوردن و بلافاصله کنده شدن" در هر دور چرخش، سطح صاف و صیقلی رینگ سایشی را به یک جاده ویران و پر از دست‌اندازهای نوک‌تیز تبدیل می‌کند. ذرات فلزی که کنده می‌شوند، بین دو سطح گیر کرده و مانند یک رنده عمل می‌کنند که به آن سایش خراشان (Abrasive) هم می‌گویند. ارتعاشی که تو روی سنسورها می‌بینی و صدایی که می‌شنوی، در واقع فریادِ اتم‌هایی است که به زور از هم جدا می‌شوند؛ لرزشی که ناشی از ناهمواری‌های شدیدی است که در لقی‌های بسیار کم (در حد صدم میلی‌متر) ایجاد شده و تعادل هیدرولیکی روتور را کاملاً برهم زده است.

نکته کلیدی ۱: گالینگ سایش معمولی نیست، بلکه یک «شکست پیوند اتمی» و انتقال جرم بین سطوح است که عمدتاً در فلزات هم‌جنس، نرم و چکش‌خوار (مانند استیل‌های سری ۳۰۰) رخ می‌دهد.

بخش دوم: علائم و نشانه‌های بالینی

منتی: چرا ارتعاش پمپ ما دقیقاً ۱۰ برابر شده؟ آیا این عدد فقط یک حدس است یا معنای تحلیل خاصی پشت آن نهفته است؟

منتور: خیر، این یک عدد تصادفی نیست. در طراحی پمپ‌های OH2 طبق استاندارد API 610، لقی (Clearance) بین رینگ‌های سایشی تنها یک فاصله خالی نیست، بلکه به عنوان یک "یاناقان هیدرولیکی" عمل کرده و وظیفه میرایی (Damping) و پایداری روتور را بر عهده دارد. وقتی گالینگ رخ می‌دهد، هندسه صیقلی این ناحیه تخریب شده و لقی از حالت یکنواخت خارج می‌شود. در این شرایط، روتور که با سرعت بالای ۲۹۵۰ دور در دقیقه می‌چرخد، تکیه‌گاه هیدرولیکی خود را از دست داده و دچار پدیده "ناپایداری گردابی" (Fluid Whirl) می‌شود. این یعنی شفت دیگر حول مرکز خود نمی‌چرخد و شروع به ضربه زدن به پوسته می‌کند. صدای برخورد متناوبی که می‌شنوی، در واقع صدای برخوردِ فیزیکی نقاطِ برجسته و جوش‌خورده روی رینگ متحرک با دیواره رینگ ثابت است؛ برخوردی که با هر ضربه، لرزش را به تمام بدنه پمپ و شاسی تزریق می‌کند.

منتی: پس افزایش آمپر مصرفی موتور هم که ثبت کردیم، ناشی از همین درگیری‌های فیزیکی و اصطکاک وحشتناک بین رینگ‌هاست؟

منتور: کاملاً درست است. موتور پمپ نه تنها باید انرژی صرفِ جابجایی سیال کند، بلکه حالا باید یک توانِ مکانیکیِ مازاد برای پاره کردن پیوندهای متالورژیکی که در هر میلی‌ثانیه بین دو رینگ ایجاد می‌شود، صرف نماید. این مقاومت فیزیکی شدید، یعنی تبدیل مستقیم انرژی الکتریکی به گرما در ناحیه‌ای که تنها چند صدم میلی‌متر فضا دارد. این افزایش حرارت ناگهانی در محل لقی، خود باعث انبساط بیشتر رینگ‌ها و تنگ‌تر شدن فضا می‌شود که یک چرخه مخرب (Vicious Cycle) ایجاد کرده و در نهایت می‌تواند منجر به قفل شدن (Seize) کامل پمپ و سوختن الکتروموتور یا بریدن شفت شود.

نکته کلیدی ۲: صدای برخورد فلزی (Metallic Knocking) در کنار جهش ارتعاشات، امضای قطعی شروع پدیده گالینگ در Wear Ringهاست؛ مرحله‌ای که پمپ از مرز سایش عبور کرده و وارد فاز تخریب ساختاری شده است.

بخش سوم: چرا تغییر جنس، فاجعه را بدتر کرد؟

منتی: ما قبلاً در پوسته فولادی هم لرزش داشتیم، اما نه به این شدت. چرا با استیل وضعیت وخیم شد؟ آیا متریال استیل به خودی خود باعث تشدید ارتعاشات می‌شود؟

منتور: سوال عمیقی است. در واقع ما با ترکیبی از سه عامل فیزیکی و متالورژیکی روبرو هستیم که با هم هم‌افزایی (Synergy) منفی ایجاد کرده‌اند:

۱. **کاهش خاصیت دمپینگ (Damping):** فولاد کربنی به دلیل ساختار میکروسکوپی‌اش، قابلیت جذب و میرا کردن انرژی ارتعاشات را دارد. اما استیل ۳۱۶ به دلیل ساختار آستنیتی، رفتاری "صلب‌تر" در برابر فرکانس‌های صوتی و ارتعاشی نشان می‌دهد. این یعنی کوچک‌ترین ارتعاش ناشی از جریان سیال یا ناترازی، بجای اینکه در بدنه مستهلک شود، مانند یک سیم گیتار که به شدت کشیده شده، ارتعاش را با تمام توان به سمت یاتاقان‌ها و شاسی منتقل می‌کند.

۲. **بحران انبساط حرارتی (Thermal Expansion):** اینجاست که هندسه با متالورژی درگیر می‌شود. سیال پمپ تو کاندنسیت ۱۰۰ درجه است. ضریب انبساط حرارتی استیل ۳۱۶ حدود ۳۰ درصد بالاتر از فولاد است. این یعنی وقتی پمپ به دمای کاری می‌رسد، رینگ‌های استیل بسیار بیشتر از رینگ‌های قدیمی فولادی منبسط می‌شوند. لقی که تو در دمای محیط (مثلاً ۲۵ درجه) با فیلر اندازه گرفتی، در دمای ۱۰۰ درجه عملاً به صفر نزدیک شده است. در واقع، قطعات در اثر حرارت به هم "چسبیده‌اند" و هیچ فضایی برای چرخش آزادانه باقی نمانده است.

منتی: و آن کاویتاسیونی که در عکس‌های پوسته استیل جدید دیدیم چه نقشی دارد؟ آیا استیل جدید باعث بروز آن شده؟

منتور: پوسته استیل جدید اگر از نظر هیدرولیکی و زبری سطح (Roughness) دقیقاً مشابه طراحی اصلی نباشد، می‌تواند جریان گردابی ایجاد کند. اما نقش اصلی کاویتاسیون در اینجا مانند یک "چکش هیدرولیکی" است. انفجار حباب‌ها در ورودی پروانه، ضرباتی به شفت وارد می‌کند که باعث جابجایی‌های میکرونی (Shaft Deflection) می‌شود. در پمپ قبلی، لقی بیشتری بود و شفت فضای مانور داشت. اما در این پمپ استیل با لقی‌های تنگ شده ناشی از حرارت، این تکان‌های ریز بلافاصله منجر به تماسِ فلز با فلز (Metal-to-Metal Contact) می‌شود. در واقع کاویتاسیون «ماشه» را می‌کشد و گالینگِ استیل «شلیک» نهایی را انجام می‌دهد.

نکته کلیدی ۳: در تغییر متریال به استیل، اگر لقی (Clearance) را حداقل ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به استاندارد فولاد افزایش ندهید، عملاً در حال کار با پمپی هستید که لقی‌اش در دمای کاری منفی است؛ و این یعنی حکم اعدام زودرس برای روتور و پوسته.

بخش چهارم: راهکارهای نجات

منتی: حالا در جلسه فردا چه پیشنهادی بدهم که هم از نظر علمی شکست‌ناپذیر باشد و هم از نظر عملی برای تیم تعمیرات قابل اجرا باشد؟

منتور: باید با یک رویکرد سه‌گانه وارد شوی و از "قانون اختلاف سختی" به عنوان سنگ بنای پیشنهادت صحبت کنی:

۱. **قانون ۵۰ برینل و مهندسی معکوس متریال:** به آن‌ها با قاطعیت بگو که نباید هر دو رینگ (ثابت و متحرک) از یک خانواده نرم مثل استیل ۳۱۶ باشند. بر اساس استانداردهای بین‌المللی، بین دو سطح لغزنده باید حداقل ۵۰ واحد برینل (یا معادل آن در راکول) اختلاف سختی وجود داشته باشد. پیشنهاد مشخص ما این است: رینگ متحرک (Impeller Wear Ring) را از همان استیل ۳۱۶ نگه دارید، اما رینگ ثابت (Casing Wear Ring) را به متریالی مانند **PH ۱۷-٤** تغییر دهید و آن را تحت عملیات

حرارتی قرار دهید تا به سختی ۴۰ راکول C برسد. این اختلاف سختی باعث می‌شود اتم‌های دو سطح تمایلی به پیوند با هم نداشته باشند.

۲. **بهره‌گیری از آلیاژهای خودروانکار و ضد گالینگ:** اگر بودجه اجازه می‌دهد، به سراغ "سوپر آلیاژها" بروید. متریال‌هایی مثل **Nitronic 60** دارای نیتروژن و منگنز بالا هستند که در هنگام اصطکاک، یک لایه اکسید بسیار پایدار ایجاد می‌کنند که حتی تحت فشار و دمای بالا هم پاره نمی‌شود. گزینه دیگر استفاده از پوشش‌های سخت مانند **Stellite** یا متریال‌های غیرفلزی نظیر **Graphalloy** است. این مواد عملاً مفهوم گالینگ را از معادلات حذف می‌کنند زیرا ماهیت متالورژیکی متفاوتی دارند.

۳. **مهندسی مجدد لقی‌ها (Clearance Optimization):** لقی‌ها نباید صرفاً بر اساس اعداد عمومی تعیین شوند. باید لقی‌ها را بر اساس پیوست‌های استاندارد API 610 برای متریال‌های "مستعد گالینگ" (Galling-prone materials) بازنگری و به طور دقیق تراشکاری کنید. ما به فضای بیشتری برای انبساط حرارتی کاندنسیت ۱۰۰ درجه نیاز داریم؛ در واقع باید اجازه دهیم فلز "نفس کشیدن" تا در هنگام شروع به کار یا نوسانات هیدرولیکی، اولین تماس منجر به فاجعه نشود.

منتی: اگر در جلسه مخالفت کردند و مدیرانِ بهره‌برداری گفتند افزایش لقی باعث فرار سیال و افت شدید راندمان پمپ می‌شود، چه پاسخی بدهم؟

منتور: پاسخ تو باید قاطع باشد: به آن‌ها بگو پمپی که به دلیل گالینگ دچار ارتعاش ۱۰ برابری شده، عملاً راندمانش صفر است، زیرا هر لحظه خطر شکست شفت و توقف کامل کل واحد پتروشیمی را به همراه دارد! یک افت راندمان ۲ درصدی ناشی از لقیِ مهندسی شده، بسیار ارزان‌تر از هزینه‌ی تعویض کامل روتور و توقف تولید است. پایداری مکانیکی (Reliability) همیشه مقدم بر راندمانِ کاغذی است.

نکته کلیدی ۴: راه حل نهایی گالینگ در تعادل بین "هندسه هوشمندانه" (لقی مهندسی شده) و "متالورژی پیشرفته" (اختلاف سختی و متریال ضد چسبندگی) نهفته است؛ هر راهکاری که فقط به تقویت سازه یا یاتاقان بپردازد، تنها صورت مسئله را پاک کرده است.

نتیجه‌گیری نهایی

پمپ کاندنسیت شما اکنون قربانی پدیده‌ای شده است که می‌توان آن را یک "ارتقای ناقص" یا مهندسی تک‌بعدی نامید. اگرچه با تغییر متریال به استیل ۳۱۶، هدفِ اولیه یعنی مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی (Corrosion) به خوبی محقق شده، اما این پیروزی به قیمتِ فدا کردن پایداری مکانیکی و نادیده گرفتن خواص اصطکاکی و حرارتی بحرانی فلز تمام شده است. در واقع، ما ناداسته پمپ را از یک بحران شیمیایی به یک بن‌بستِ فیزیکی هدایت کرده‌ایم.

بنابراین، دستور کار جلسه فردا نباید صرفاً بر تعمیرات معمول متمرکز باشد، بلکه باید بر دو محور بنیادین استوار گردد: نخست، اصلاح **جفت متریال رینگ‌ها** با تکیه بر اصل اختلاف سختی جهت جلوگیری از چسبندگی اتمی، و دوم، **بازنگری سیستمی در لقی‌های حرارتی** با در نظر گرفتن ضرایب انبساط واقعی استیل در دمای ۱۰۰ درجه. فراموش نکنید که در دنیای مهندسی، هر انتخابی در متالورژی، زنجیره‌ای از تبعات مکانیکی و هیدرولیکی به همراه دارد که نادیده گرفتن حتی یکی از حلقه‌های این زنجیره، می‌تواند کل یک مجتمع تولیدی را به چالش بکشد.

منابع مورد استناد:

- *API 610 Standard, Section 6.7 (Wear Rings)*
- *Materials Selection for Petroleum Refineries and Gathering Facilities (NACE)*
- *Pump Handbook, Vol. 4 (Igor Karassik)*