

بررسی آسیب خوردگی حفره‌ای یاتاقان‌های تجهیزات دوار

نیروگاهی و روش‌های بهبود آنها

سید علیرضا حسینی^۱

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

حمیدرضا شفاعت زاده

کارشناس مهندسی مکانیک

چکیده

خرابی یاتاقان‌ها عامل مهمی در از کار افتادگی تجهیزات دوار نیروگاه‌ها به حساب می‌آید که اغلب منجر به قطع برق طولانی مدت و تعمیرات پرهزینه می‌شود. این مشکلات نه تنها آسیب جدی به خود یاتاقان وارد می‌سازد، بلکه روتور، استاتور و سایر تجهیزات نزدیک به آن را نیز در معرض خسارت قرار می‌دهد. شناسایی نوع خرابی و دلایل احتمالی آن مسئله‌ای مهم در جلوگیری از خرابی‌های آینده می‌باشد. یکی از چالش برانگیزترین آسیب‌های یاتاقان، خوردگی حفره‌ای است که معمولاً به واسطه تخلیه الکتریسیته از طریق روانکار به بدنه یاتاقان و محور دوار رخ می‌دهد. در این مقاله به بررسی این آسیب، فرآیند اثر آن و صدمات ناشی از آن پرداخته می‌شود. همچنین چگونگی تشخیص این آسیب و نحوه اجرای اقدامات اصلاحی به منظور راه‌اندازی مجدد تجهیزات دوار نیروگاهی نیز ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: یاتاقان، محور، خرابی، خوردگی حفره‌ای، تخلیه الکتریکی، یاتاقان ژورنال، یاتاقان تراست

۱-مقدمه

اشکال در عملکرد یاتاقان تجهیزات دوار مانند پمپ‌ها، فن‌ها، توربین‌ها و موتورهای سبب بروز خسارات جبران ناپذیری می‌شود. بدین منظور شناسایی عوامل آسیب زا، نوع خرابی و نحوه پیش‌گیری و رفع عیب آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خرابی‌های معمول در یاتاقان‌های ساده را می‌توان طبق جدول (۱) دسته‌بندی نمود (پینکاس^۲، ۱۹۹۱). این دسته‌بندی، سبب درک بهتر از نوع آسیب و نحوه برخورد با آن می‌شود. گاهی یاتاقان با ترکیبی از آسیب‌ها روبروست که باید ابتدا ریشه این مجموعه از آسیب‌ها مشخص شود و سپس اقدامات اصلاحی با توجه به نوع خرابی اجرا شود. البته دلایل متنوعی می‌تواند سبب بروز آسیب‌ها شود که گاهی در چند نوع از آسیب مشترک هستند. با این وجود آشکار شدن دلیل خرابی بسیار مهم است.

جدول (۱). روش‌های خرابی یاتاقان

نام آسیب	نام انگلیسی	نام‌های دیگر
خراش	Abrasive damage	scoring, scratching
خرابی پیوند	bond failure	Sapling
فرسایش کاویتاسیون	cavitation erosion	Cavitation
خوردگی	corrosion	Chemical attack
خوردگی حفره‌ای الکتریکی	electrical pitting	Frosting
فرسایش	erosion	Worm tracks
خستگی	fatigue	-
سایش فرتینگ	fretting	Fretting corrosion
آسیب کرومیوم بالا	high chromium damage	Wire-wool, black scab
غیر همگنی	Non-homogeneity	Blistering, porosity

¹ Hk_mh@yahoo.com

² Pinkus

Mottling, anisotropy, ratcheting, sweating	overheating	بیش از حد گرم شدن
-	seizure	گیرپاژ
-	structural damage	آسیب ساختاری
Black scale	tin oxide damage	آسیب اکسید قلع
wear	surface wear	ساییدگی سطح
Smearing, polishing	wiping	زدودگی به واسطه مالش

گام اول در رفع عیب یاتاقان شناسایی نوع آسیب و مقایسه آن با دسته‌بندی‌های معمول مانند جدول (۱) است. واضح است که برای تشخیص آسیب و نوع آن، استفاده از ابزارهای تست آزمایشگاهی ضروری است. با این وجود تجربیات گذشته درباره آسیب‌ها، مشاهدات عینی و تصاویر یاتاقان‌های معیوب در شناسایی نوع آسیب بسیار مفید است. به طور کلی، قبل از تشخیص دلیل مشخصی برای خرابی، معمولاً لازم است اطلاعات فراوانی از یاتاقان آسیب دیده ثبت شود. این موارد می‌تواند شامل تصاویر متنوع از سطح آسیب با بزرگنمایی‌های متنوع، شرایط محیطی و عملیاتی یاتاقان، تجربیات گذشته در سایت کارگاهی و سایر شواهد مهم محیطی باشد. پس از شناسایی آسیب و نوع آن، سه انتخاب کلی وجود دارد (پینکاس، ۲۰۱۲):

۱. تجدید و ترمیم یاتاقان: شامل بازگشت یاتاقان به فرمی است که قبل از خرابی بدون ایجاد هرگونه تغییری، به جز موارد کوچک مانند جایگزینی پخ‌ها^۱، اریفیس‌های ورودی روغن یا شاید لقی یاتاقان، وجود داشته است.
۲. طراحی مجدد یاتاقان: شامل تغییر هندسه یاتاقان بدون اعمال هیچگونه تغییر دیگری است.
۳. مجموعه‌ای جدید یاتاقان: نیازمند ایجاد تغییرات در ابعاد پوسته^۲ یاتاقان و بدنه اصلی^۳ است.

در این مقاله تنها بر روی آسیب خوردگی حفره‌ای الکتریکی^۴ تمرکز شده است. هدف آشنایی با این آسیب و مکانیزم ایجاد آن است. در انتها نیز راهبردهایی عمومی برای رفع عیب ارائه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که آشنایی با سایر آسیب‌های یاتاقان ضروری می‌باشد زیرا بسیاری از آسیب‌ها به هم مرتبط بوده و می‌تواند سبب بروز خرابی دیگری شوند (پینکاس، ۱۹۹۱).

۲- آسیب خوردگی حفره‌ای الکتریکی

۲-۱- مکانیزم آسیب

این آسیب اغلب در یاتاقان‌ها و گاه‌ها در چرخنده‌ها رخ می‌دهد. علت آسیب به خاطر جرقه‌های جریان الکتریکی متناوب می‌باشد که در نتیجه سبب تخلیه ولتاژ در امتداد فیلم روغن می‌شود. منبع جریان الکتریسیته عموماً ناشی از ژنراتورها و یا حوادث تصادفی مثل روانکار باردار از جریان برق است. شکل (۱) تصویری میکروسکوپی از حفره‌های ایجاد شده ناشی از جریان الکتریسیته را نشان می‌دهد.



شکل (۱). تصویری میکروسکوپی از حفره‌زایی ناشی از جریان الکتریسیته روی سطح یاتاقان بابیت دار

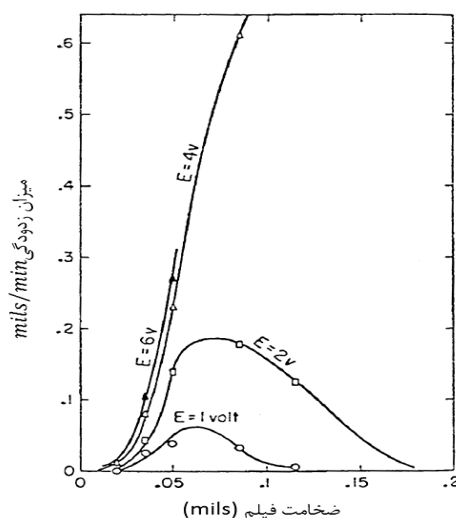
¹ Chamfer

² Shell

³ Housing

⁴ Electrical pitting

ساییدگی که در خوردگی حفره‌ای الکتریکی اتفاق می‌افتد، به وسیله گذرگاه جریان متناوب بین یاتاقان و چرخنده ایجاد می‌شود. برای جرقه زنی، به ولتاژهای بالا نیاز نیست و آسیب می‌تواند در پتانسیل‌های کم‌تر از یک ولت نیز رخ دهد. حاصل جرقه‌زنی، از بین رفتن فلز گداخته شده در جرقه، به دنبال ساییدگی مکانیکی می‌باشد. در شرایط حادثه با شکل‌گیری سطح زبر، روغن روانکاری آلوده می‌شود. آسیب ممکن است بعد از راه‌اندازی به سرعت رخ دهد و یا ممکن است بعد از چند ماه ظاهر گردد. نکته مهم این است که وجود جریان پیوسته الکتریکی ضرورتاً مضر نیست؛ بلکه تخلیه پی در پی که به صورت جرقه‌زنی آزاد می‌شود، سبب ایجاد آسیب می‌باشد.

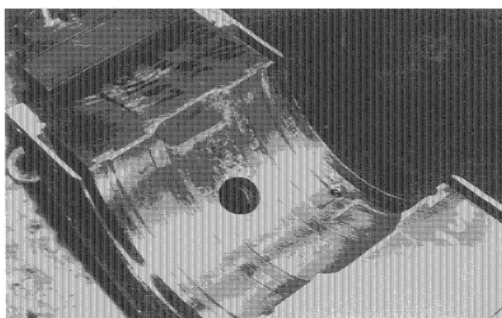


شکل (۲). نرخ ساییدگی در برابر ضخامت فیلم برای ولتاژهای متفاوت

پس وقتی که ضخامت فیلم خیلی کم است و تماس نزدیک بین زبری‌های چرخنده و یاتاقان وجود دارد، بخاطر این که پتانسیل جریان پیوسته‌ای تولید نمی‌شود، ممکن است ساییدگی رخ ندهد. از سویی دیگر، اگر ضخامت فیلم خیلی زیاد باشد، مقاومت در طول فیلم برای جلوگیری از تخلیه، خیلی زیاد بوده و جرقه‌زنی اتفاق نمی‌افتد. بین این دو حالت (همانند شکل ۲)، موقعیتی برای حداکثر سایش وجود دارد.

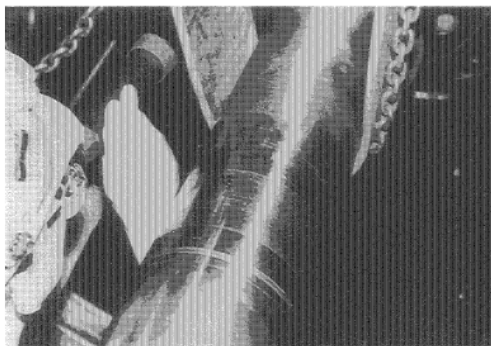
۲-۲- درجات آسیب

تولید جرقه الکتریکی چهار اثر را به همراه دارد. در اکثر آسیب‌ها، حفره زایی و ساییدگی بوجود می‌آید. همچنین اغلب اوقات لایه‌ای نازک از بابت در سطح، بیش از حد گرم می‌شود. در نهایت، ذرات فلزی در روغن آزاد و فرآیند سایش آغاز می‌شود. اگرچه، همانند شکل (۲)، اغلب اوقات هردو اثر رخ می‌دهد، اما در مجموع، سطح ژورنال آسیب جدی کمتری را به علت حفره زایی نسبت به بابت خواهد داشت. همان‌گونه که انتظار می‌رود، این مسأله با توجه به فضای بزرگتر و دمای ذوب بالاتر ماده ژورنال اتفاق می‌افتد (بویرز^۱، ۱۹۹۴). آسیب حادثه، ایجاد زبری به واسطه ذرات معلق است که شدیداً ساییدگی مکانیکی را افزایش می‌دهد.



¹ Bowers

(الف)



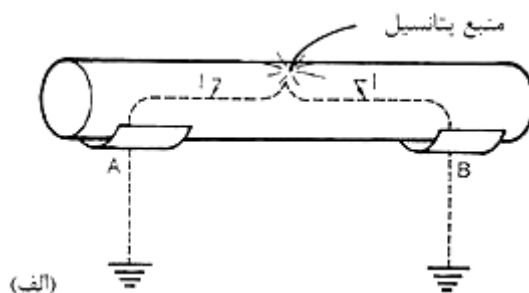
(ب)

شکل (۲). خوردگی حفره‌ای الکتریکی ژورنال یاتاقان (الف) پد یاتاقان حفره حفره شده (ب) ژورنال حفره حفره شده

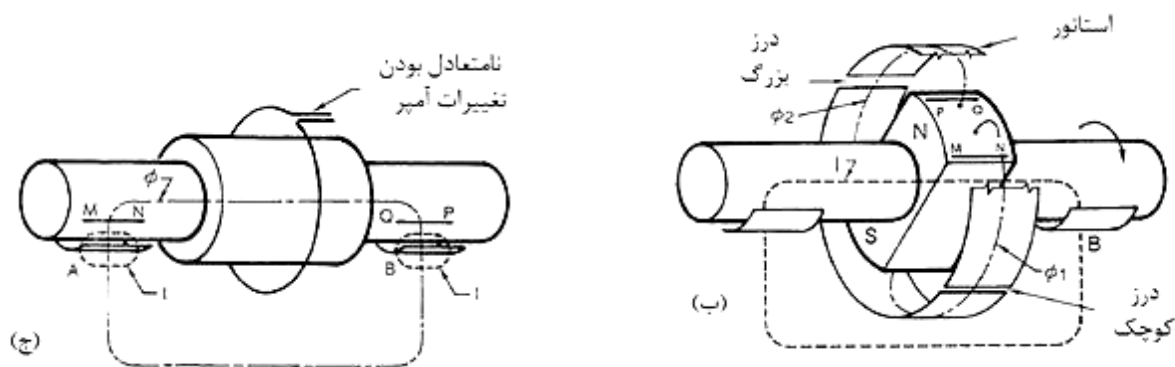
۲-۳- منابع پتانسیل الکتریکی

شکل ۳ منابع مؤثر در ایجاد ولتاژ الکترواستاتیکی را نمایش می‌دهد که عبارتند از (شفاعت زاده، ۱۳۹۳):

- نوسانات تصادفی به خاطر وجود مقداری ولتاژ ورودی شفت که ممکن است از تجهیزات یا نصب کردن مدارهای الکتریکی ایجاد شود.
- عدم تقارن ژنراتور به علت تغییر شار با موقعیت زاویه‌ای روتور یا به خاطر نابالانسی سیم‌پیچ^۱.
- ماندگاری بارهای ثابت به واسطه عوامل خارجی مانند بخار، قطرات ریز آب، یونیزه شدن اجزاء روانکار، اصطکاک به وسیله تسمه‌های محرک، یا دیگر منابع مشابه.



¹ winding



شکل (۳). منابع بروز پتانسیل الکتریکی بین شفت و یاتاقان (الف) ارادی یا تصادفی بودن اعمال پتانسیل به شفت (ب) تأثیر عدم تقارن؛ تغییر شار با موقعیت زاویه‌ای شفت به علت عدم تقارن مناطیسی در ماشین (ج) اثر مغناطیس‌پذیری شفت (اثر هم‌قطبی)؛ بالانس نبودن تغییرات آمپر مستقیم یا متناوب که سبب مغناطیس پذیرش محوری شفت شده است.

۳-شناسایی خرابی و دلایل ممکن برای آن

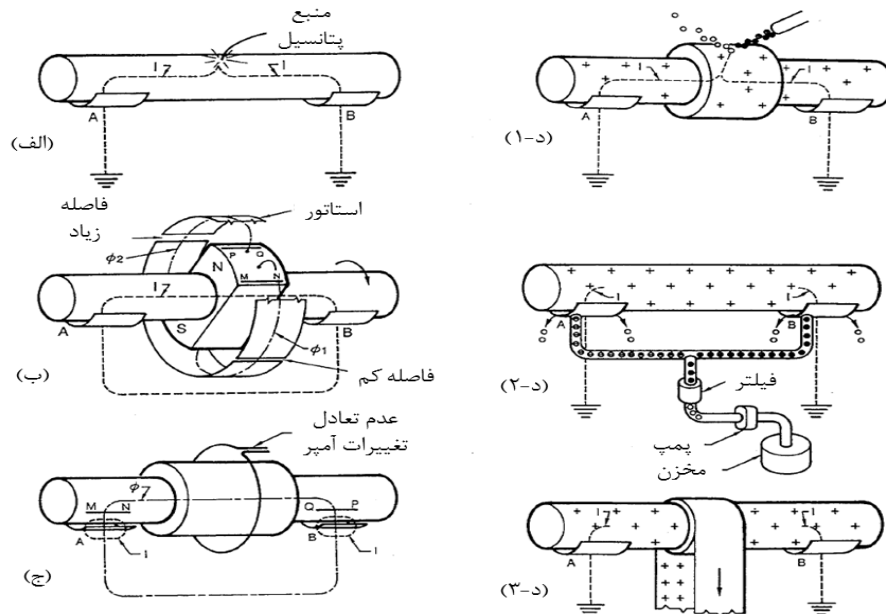
۳-۱-شناسایی

در مراحل اولیه آسیب به واسطه خوردگی حفره‌های الکتریکی، حفره‌های ریزی در فضایی با حداقل ضخامت فیلم روغن بوجود می‌آید و به یاتاقان سطحی برفکی شکل می‌دهد. تی گردش روغن ضعیف است، مشکلات ناشی از جریان الکتریسته به علت افزایش تدریجی دمای یاتاقان و سیاه شدن روغن آشکار می‌شود. در هر تخلیه الکتریکی، توده‌ای از ذرات ریز بابت را آزاد می‌گردند که در پی آن روغن کربنی می‌شود. با کربنی شدن روغن، مقاومت آن کاهش می‌یابد و در نتیجه اجازه عبور جریان بالاتر را می‌دهد و آسیب رسانی را تسریع می‌کند. هنگامی که فرآیند ادامه یابد، حفره‌ها شروع به همپوشانی کرده و بیشتر شواهد آسیب اصلی را پنهان می‌سازند. با وجود این، اگر هنوز سطح برفکی نمایان باشد، شناسایی خوردگی حفره‌ای با موشکافی دقیق اطراف نواحی برفکی امکان‌پذیر است. همچنین با ارسال مناسب پرتوهای نور به نواحی برفکی، حفره‌های الکتریکی معمولاً با بازتاب پرتو از سطوح نرم و ذوبی شکل آنها قابل تشخیص هستند. با ادامه شرایط دمای زیاد روغن و تولید جرقه‌های الکتریکی، بابت بیش از پیش از بین می‌رود تا نهایتاً پس از مدتی تنها اندکی از آن باقی می‌ماند که موجب می‌شود تا آسیب‌های شدیدی به پوسته فلزی یاتاقان و شفت وارد شود. البته زورنال که معمولاً سخت است، حفره‌های کوچک‌تری خواهد داشت که مانند یاتاقان، همگن نیستند (پیناچی و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

۳-۲-علت آسیب

خوردگی حفره‌ای الکتریکی به خاطر حضور دو نوع جریان رخ می‌دهد: جریان ناشی از القای الکترواستاتیک و جریان ناشی از القای الکترومغناطیسی. با وجود این که هر دو نوع این جریان‌ها منجر به حفره زایی می‌شوند، اما طبیعت و قابلیت‌های تخریب آنها متفاوت است. شکل ۴ خلاصه‌ای از منابع اصلی تولید جریان الکتریکی در سیستم شفت و یاتاقان را ارائه می‌کند (پیناچی، ۲۰۱۲).

¹ Pennacchi



شکل (۴). منابع اصلی جریان یاتاقان (الف) پتانسیلی که به شفت اعمال می‌شود (ب) اثر عدم تقارن (ج) اثر مغناطیسی کردن شفت (د-۱) اثر پتانسیل الکترواستاتیک ناشی از حمله ذرات خارجی (د-۲) اثر پتانسیل الکترواستاتیک ناشی از روانکار باردار (د-۳) اثر پتانسیل الکترواستاتیک تسمه که باردار است.

برای تشخیص پتانسیل‌های الکترواستاتیک، ترجیحاً از ولت‌متر الکترواستاتیکی استفاده می‌شود. احتمالاً ولتاژ بازه ۰/۱ تا ۲ ولت مشکل‌ساز می‌باشد، زیرا ولتاژ محدودکننده بستگی به ضخامت حداقل روغن و سایر مشخصه‌های سیستمی دارد (پینکاس، ۱۹۹۱). از آنجاکه در حالت عدم تقارن یاتاقان‌ها با نیروی محرکه الکتریکی تولید شده سری هستند، گاه‌آ اندازه‌گیری پتانسیل بین شفت و یاتاقان قابل اطمینان نیست. در چنین مواردی قابل اطمینان‌ترین روش، اندازه‌گیری نهایت پتانسیل بالا و پایین شفت است.

۴- فرایندهای رفع عیب

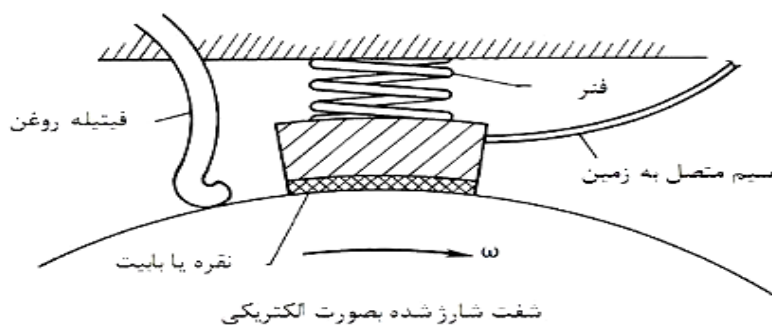
روش اصلی حذف خوردگی حفره‌ای الکتریکی، حذف منبع جریان الکتریسیته می‌باشد. با این وجود، اغلب اوقات نیاز به طراحی مجدد تجهیزاتی است که ممکن است قابل استفاده و سودمند نباشند. وقتی که منبع ایجاد ولتاژ را نتوان حذف کرد، یکی از موارد زیر ممکن است راه مناسبی باشد (کورنگ^۱، ۲۰۱۲):

- یاتاقان را عایق نمایید- تمامی اتصالات به یاتاقان مانند مسیرهای روغن و ... باید بگونه‌ای عایق شود که هیچ‌گونه تماس فلزی بین یاتاقان و هرگونه عامل هادی جریان برق وجود نداشته باشد. معمولاً اثربخشت‌ترین و ساده‌ترین روش، جاگذاری عایق در زیر سرپیچ یا سگدست‌ها^۲ می‌باشد. در این حالت معمولاً ضخامت ۳ سانتی‌متری از عایق کافی است. یاتاقان‌های عایق شده همواره باید برای اتصال کوتاه الکتریکی بررسی شوند.
- از کفشک اتصال زمین استفاده نمایید. البته نقطه ضعف برس اتصال زمین در یاتاقان ژورنال، تولید ساییدگی نسبتاً قابل توجه است. روش بهتر استفاده از نوعی کفشک اتصال زمین همانند شکل ۵ است. ایده اصلی، وجود لغزنده شبه هیدرودینامیکی است که عملکرد دوگانه (برای تولید فیلم پیشگیری‌کننده از ایجاد شیار در شفت) داشته و به اندازه کافی کوچک تا جریان الکتریکی پیوسته و بدون جرقه را برقرار نماید.

¹ Koring

² Brackets

- طراحی ماشین را اصلاح نمایید.



شکل (۵). کفشک لغزشی برای ایجاد ولتاژ در شفت دورانی

مراجع

- شفاعت‌زاده، ح. (۱۳۹۳). بررسی جامعی از عوامل مؤثر در آسیب یاتاقان‌های بابیتی تراست و ژورنال تولید داخلی، گزارش درون سازمانی، شرکت مهندسی پایوران پارس‌یان، شهرپور.
- Pinkus, O. (1991). *Manual of bearing failures and repair in power plant rotating equipment* (No. EPRI-GS-7352). Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); Mechanical Technology, Inc., Latham, NY (United States).
- Pinkus, O. (2012). Field Guide: Bearing Damage Mechanisms. *EPRI*.
- Bowers, S.V., (1994). Proactive Motor Monitoring Through Temperature, Shaft Current, and Magnetic Flux Measurements. *CSI 1994 Conference, Nashville*.
- Pennacchi, P., Ricci, R., Chatterton, S., Borghesani, P., Vania, A., D'Antona, G., ... & Rolla, C. (2012, August). Dynamic effects of electrical pitting in steam-turbine tilting-pad thrust-bearings. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 45004, pp. 731-738). American Society of Mechanical Engineers.
- Koring, R. (2012). Changes in Plain Bearing Technology. *Published by SAE International and Expert Verlag*.

