

۱. بررسی تاثیر داکت برنر بر عملکرد بویلر بازیاب و سیکل ترکیبی
۲. بررسی اثر ریکوپراتور بر راندمان سیکل توربین گاز و تعیین نرخ بازگشت سرمایه سیکل های دارای ریکوپراتور
۳. بررسی پدیده ضربه قوچ و کاویتاسیون در توربو ماشین ها و راه های جلوگیری
۴. کاربرد روش عملیات حرارتی تمپرینگ جهت اصلاح سختی در روتورهای نیروگاهی HP .
۵. آنالیز تخریب فن خنک کاری ژنراتور مدل ۳۷۰-۲۴۰ شرکت GEC ALSTHOM
۶. تحلیل شکست پره های فن خنک کن ژنراتور توربین گاز
۷. پیشگیری و کاهش ریسک خوردگی سرد در بویلرهای بازیاب
۸. تأثیر ممانعت کننده های پایه پلیمری بر کنترل خوردگی و رسوب در آب های خورنده
۹. آنالیز تخریب سر شفت روتور توربین گاز هیتاچی مدل MS۵۰۰۱
۱۰. روش های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در صنعت و مروری بر روش های مراقبت وضعیت
۱۱. کاربرد مانیتورینگ بلادرنگ عمر باقیمانده در سیستم نگهداری بویلر
۱۲. بررسی ترکیب شیمیایی، خواص خوردگی و علل تخریب پره های ردیف اول توربین های گازی از جنس سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-۴۱۴
۱۳. طراحی هیدرولیکی و بررسی ضربه قوچ سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا و مقایسه آن با استاندارد AWWA-۴۵
۱۴. مدل سازی و تحلیل تنش لوله های ورودی اصلی سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا
۱۵. مدیریت تعمیرات پیشگیرانه
۱۶. مفهوم اکسرژی و بررسی آن برای سیکل رانکین نیروگاه
۱۷. تعمیرات دوره ای در واحدهای صنعتی
۱۸. مطالعه موردی و متدولوژی تعیین وضعیت و برآورد عمر باقیمانده اجزاء یک بویلر ۴۴۰ مگاواتی
۱۹. نگهداری و مراقبت از وضعیت ماشین آلات با استفاده از آنالیز روغن
۲۰. مقایسه و بررسی انواع سطوح تقال حرارت و مواد مورد استفاده در صنعت ساخت ریکوپراتور
۲۱. تولید همزمان، شدت نیاز به گرمایش، شدت نیاز به بخار، شعاع اقتصادی



بررسی تاثیر داکت برنر بر عملکرد بویلر بازیاب و سیکل ترکیبی

مهدی شاهرودی - حسین شریفی - محمد بهزاد

شرکت مینا بویلر

تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: داکت برنر، بویلر بازیاب، احتراق اضافی، سیکل ترکیبی

سیستم احتراق اضافی با استفاده از اکسیژن موجود در دود خروجی بمنظور افزایش تولید بویلر بازیاب، انعطاف پذیری بیشتر و راندمان اقتصادی بالاتر بویلر بازیاب و در بعضی مواقع سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرد. در بسیاری از واحدها که نیاز به تولید بخار با شرایط ثابت برای واحد دارند، این مشعلها قادر به جبران کمبود تولید ناشی از تغییر شرایط محیطی و به تبع آن تغییر عملکرد توربین گاز می باشند. در حدود ۷۵ درصد کل بویلرهای بازیاب جدید دارای داکت برنر هستند. در ایران نیز در آینده نزدیک درصد قابل توجهی از برق از طریق نیروگاههای سیکل ترکیبی دارای داکت برنر تولید می شود. در این مقاله با استفاده از محاسبات نرم افزاری، به بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی داکت برنر و تاثیر آن بر عملکرد بویلر بازیاب و سیکل ترکیبی پرداخته، و مزایا و معایب بکار گیری آن در واحدهای سیکل ترکیبی بررسی شده است.

۱- مقدمه

در توربین گاز تنها ۲۵ تا ۳۵ درصد از اکسیژن موجود در هوا در احتراق شرکت می کنند. ازبقیه این اکسیژن می توان در احتراق اضافی برای بویلر بازیاب استفاده نمود. بر اساس اینکه مشعل داکت برنر نیاز به فن هوای اضافه داشته باشد و یا اکسیژن موجود در دود برای احتراق کافی باشد به دو دسته زیر تقسیم می شود [۱]:

۱- سیکل ترکیبی با احتراق اضافی محدود شده

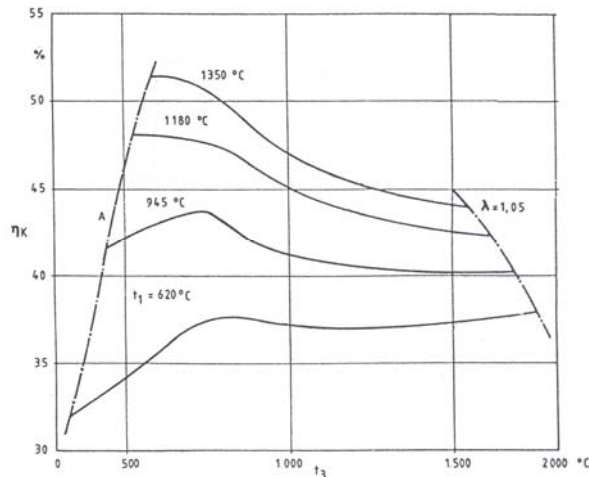
۲- سیکل ترکیبی با ماکزیمم احتراق اضافی

درحالت اول نهایتا دمای دود در ورودی به بویلر بازیاب به حدود 800°C می رسد. مقدار سوخت داکت برنر بر این اساس تنظیم می شود که اکسیژن دود پس از داکت برنر از ۱۰ تا ۱۲ درصد حجمی کاهش پیدا نکند. زیرا موجب ناپایداری شعله می گردد.

تا دمای دود حدود 750°C ، بویلرهای بازیاب نیاز به خنک کردن ناحیه محفظه احتراق ندارند. بالاتر از این نقطه یک سیستم خنک کننده باید بکار گرفته شود.

واحدهای سیکل ترکیبی با ماکزیمم احتراق اضافی گاهی به یک فن مجهز می شوند که حتی در صورت خارج از مدار بودن توربین گاز قادر به بهره برداری از توربین بخار است. این به معنی افزایش قابلیت دسترسی واحد می باشد. واحدهای سیکل ترکیبی با احتراق اضافی ماکزیمم در صورتی که دمای دود ورودی به توربین گاز بالا باشد منجر به کاهش راندمان می شوند.

مزیت ترمودینامیکی داکت برنر، افزایش دمای دود خروجی از توربین گاز در صورت کاهش دمای آن در اثر تغییر بار توربین گاز و یا تغییر شرایط محیطی می باشد. بعلاوه افزایش دمای دود در داکت برنر موجب کاهش دمای دود خروجی از بویلر بازیاب شده و از این طریق راندمان بویلر بازیاب و در محدوده خاصی راندمان سیکل ترکیبی افزایش می یابد.



شکل (۱) رابطه راندمان سیکل ترکیبی و دمای دود در ورودی به توربین گاز و بویلر بازیاب

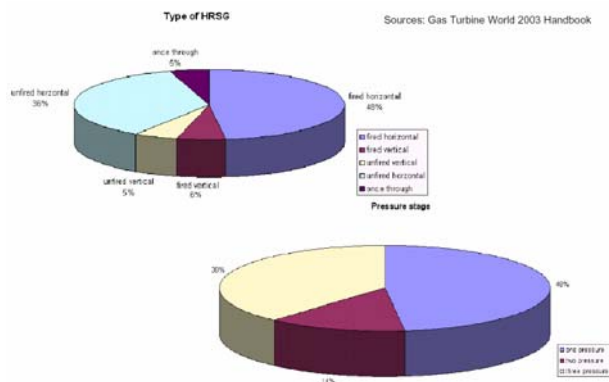
$\eta_k =$ راندمان سیکل ترکیبی

$t_1 =$ دمای دود در ورودی به توربین گاز

$t_p =$ دمای دود در ورودی بویلر بازیاب

شکل فوق تنها برای سیکلهای ترکیبی یک فشاره معتبر است.

امروزه تقریباً ۷۵ درصد کل بویلرهای بازیاب از نوع دارای احتراق اضافی می باشند.



شکل (۲) انواع بویلرهای بازیاب ساخته شده [۲]

۲- مزایای و معایب احتراق اضافی :

از مزایای بکارگیری داکت برنر عبارتند از [۳، ۴]:

۱- کنترل بهتر توان حرارتی خروجی :

داکت برنر با تنظیم بهتر دبی بخار و درجه حرارت بخار سوپر هیت، توازن بهتری بین تولید الکتریسیته و نیازهای پروسسی برقرار می کند. از این دیدگاه در اکثر واحدهای تولید همزمان گرما و برق بدلیل کنترل بهتر نیازهای پروسسی از داکت برنر استفاده می شود.



راندمان بالاتر تولید بخار :

در مقایسه با بویلرهای حرارتی، احتراق در داکت برنر راندمان بالاتری ایجاد می نماید. علت عمده این موضوع، استفاده این سیستم از اکسیژن پیش گرم شده در خروجی توربین گاز می باشد. در حالی که بویلرهای حرارتی از هوای محیط که نیاز به پیشگرم شدن دارد استفاده می شود. بعلاوه تمام انرژی اضافه شده از طریق داکت برنر در بویلر بازیاب جذب و به توان خروجی اضافه می شود. وقتی دمای دود ورودی به بویلر بازیاب افزایش می یابد دمای دود خروجی از بویلر بازیاب کاهش خواهد یافت. یعنی کاهش تلفات بویلر بازیاب و افزایش راندمان آن. علت این موضوع در بخشهای بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳- ثابت نگهداشتن تولید بخار با کاهش بار توربین گاز و یا حتی خاموش شدن توربین گاز

در بارهای پایین توربین گاز، دبی و درجه حرارت دود خروجی از توربین گاز کاهش می یابد. در بویلرهای بازیاب unfired تولید بخار با کاهش بار توربین گاز کاهش می یابد ولی سیستم داکت برنر قابلیت جبران انرژی در دسترس بویلر بازیاب را فراهم می سازد. در بعضی از داکت برنرها که مجهز به فن های هوا می باشند این امکان وجود دارد که حتی در مواقعی که توربین گاز از مدار خارج می شود، تولید بخار بویلر بازیاب را در یک سطح معینی ثابت نگهدارد.

۴- جبران تغییرات محیطی :

عملکرد توربین گاز کاملاً وابسته به شرایط محیطی می باشد. شرایط محیطی می تواند بر دبی جرمی و دمای دود خروجی و در نتیجه بر توان خروجی HRSG تأثیر بگذارد. داکت برنر می تواند این کاهش انرژی را جبران نماید.

۵- استفاده از سوختهایی که مناسب برای احتراق در توربین گاز نمی باشد.

داکت برنر قابلیت احتراق با سوختهایی سنگین، ذغال سنگ و یا گازهای با ارزش حرارتی پایین را دارد.

در کنار مزایای گفته شده، بکار گیری داکت برنر می تواند معایبی هم داشته باشد که از جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- از آنجا که اجزا سیکل باید برای ماکزیمم درجه حرارت طراحی شوند در حالت های Part Load و یا Unfired از حالت بهینه دور می شوند.

۲- نیاز به مراقبت بیشتری در هنگام بهره برداری برای جلوگیری از اورهیت شدن لوله ها وجود دارد.

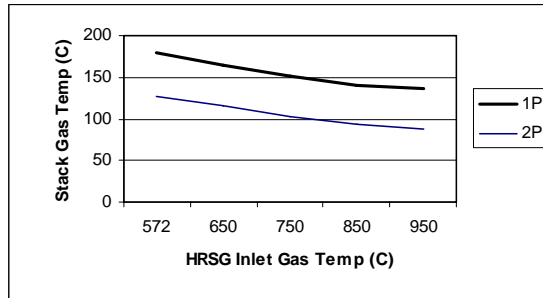
۳- هزینه ساخت واحد به میزان ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش می یابد.

۴- از آنجا که سوخت داکت برنر در سیکل رانکین سوزانده می شود و راندمان سیکل رانکین از راندمان سیکل ترکیبی کمتر است این امر موجب کاهش راندمان سیکل ترکیبی خواهد شد. (البته این کاهش زیاد نمی باشد و در بویلر های تکفشاره بعلاوه افزایش شدید راندمان سیکل رانکین با بکار گیری داکت برنر، تا دمای حدود 750°C راندمان سیکل ترکیبی افزایش خواهد یافت).

در مجموع قیمت الکتریسیته در بسیاری مواقع استفاده از داکت برنر را اقتصادی می نماید. این مسئله بخصوص در فصل تابستان که قیمت تولید برق در بعضی از کشورها تا ۳۰ برابر حالت عادی افزایش می یابد توجیه اقتصادی خواهد داشت.

۳- تأثیر داکت برنر بر عملکرد بویلر بازیاب

با افزایش درجه حرارت دود ورودی به بویلر بازیاب دمای دود خروجی آن کاهش می یابد.



شکل (۳) تغییرات دمای دود خروجی از بویلر بازیاب با افزایش دمای دود ورودی

برای بررسی این پدیده ابتدا معادلات انتقال حرارت در بویلر بازیاب را مورد بررسی قرار می دهیم. جذب حرارت در سطوح حرارتی از روش LMTD برابر است با :

$$Q = U \times A \times \Delta T_{LMTD}$$

$$\frac{1}{UA} = \left(\frac{1}{h_f} + R_i\right) \frac{1}{A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k} + \left(\frac{1}{h_G} + R_o\right) \frac{1}{A_o}$$

U = ضریب انتقال حرارت کلی ($\text{kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{c}$)

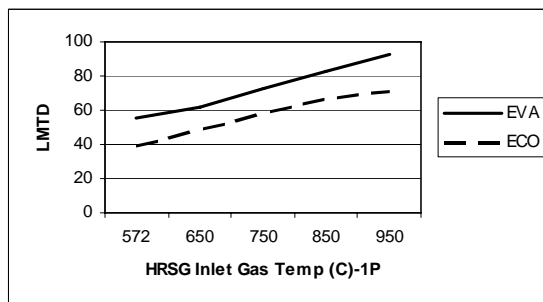
h_G = ضریب انتقال حرارت طرف گاز

h_f = ضریب انتقال حرارت سیال داخل لوله

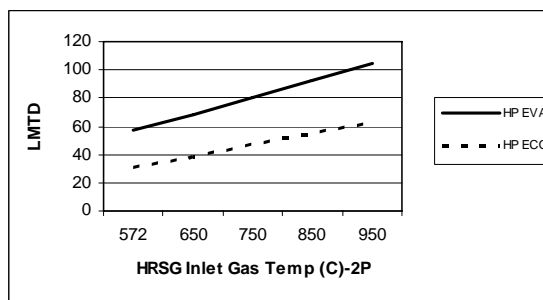
R_i = فاکتور رسوب داخل لوله

R_o = فاکتور رسوب خارج لوله

با افزایش درجه حرارت دود ورودی، اولین پارامتری که شدیداً افزایش می یابد ΔT_{LMTD} می باشد.



شکل (۴) تغییرات ΔT_{LMTD} با افزایش درجه حرارت دود ورودی در یک بویلر بازیاب تک فشاره



شکل (۵) تغییرات ΔT_{LMTD} با افزایش درجه حرارت دود ورودی در بخش فشار بالا در یک بویلر دو فشاره



میزان افزایش در بخش Eco کمتر بوده، که علت آن جذب حرارت دود در بخشهای سوپر هیتر و اوپراتور می باشد. همزمان با افزایش ΔT_{LMTD} با افزایش جذب حرارت، میزان دبی بخار تولیدی توسط بویلر بازیاب افزایش یافته و ضریب انتقال حرارت بخش آب و بخار نیز افزایش می یابد. ضریب انتقال حرارت در اکونومایزر طبق رابطه دیتوس-بولتر برابر است با:

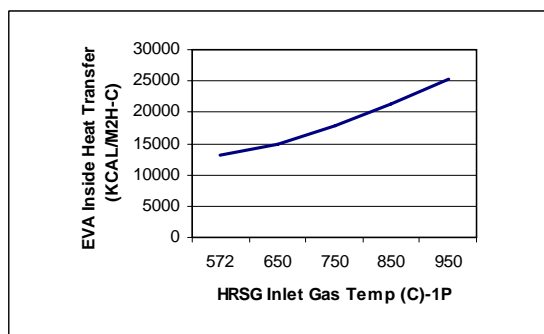
$$h_i = 0.0023 * \frac{k}{D_i} * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

و ضریب انتقال حرارت در EVA طبق رابطه جونز-لوتس از رابطه زیر بدست می آید.

$$h_i = \frac{q^{3/4} * e^{p/63}}{0.82}, \quad q=Q/A$$

که در آن p فشار اوپراتور می باشد.

افزایش ضریب انتقال حرارت در هر دو بخش اوپراتور و اکونومایزر صورت می گیرد ولی افزایش ضریب انتقال حرارت در بخش اوپراتور بیشتر می باشد.

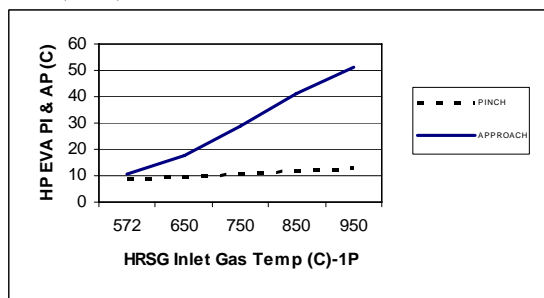


شکل (۶) افزایش ضریب انتقال حرارت آب و بخار در HP EVA با افزایش درجه حرارت دود ورودی در یک بویلر بازیاب تک فشاره

از آنجایی که افزایش جذب حرارتی در اوپراتور بیشتر از اکونومایزر می باشد، نرخ افزایش دبی عبوری از اکونومایزر بیشتر از نرخ افزایش جذب حرارتی آن و به تبع آن کاهش دمای آب خروجی از آن می باشد. در شکل (۷) تغییرات دمای Approach & Pinch با افزایش درجه حرارت دود ورودی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، دمای Approach بشدت افزایش یافته است.

$$Pinch = T_{gas} (Eva outlet) - T_{sat}(Eva)$$

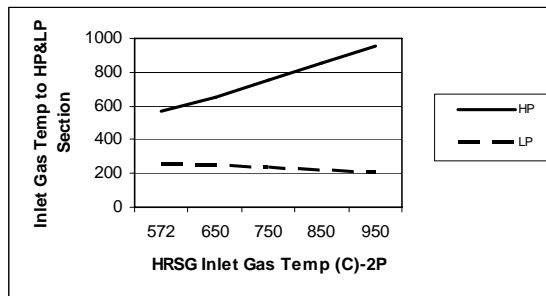
$$Approach = T_w(Eco outlet) - T_{sat}(Eva)$$



شکل (۷) تغییرات دمای Approach & Pinch با افزایش درجه حرارت دود ورودی

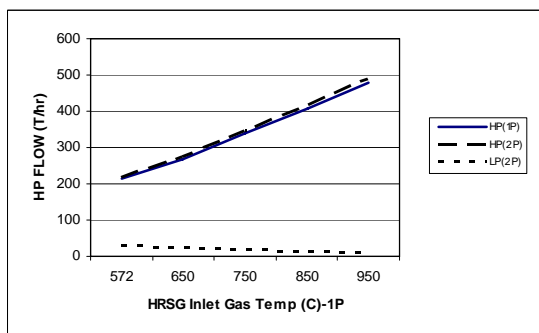


در یک بویلر بازیاب دو فشاره با افزایش دبی بخار در بخش HP و کاهش درجه حرارت دود خروجی از بخش HP، جذب حرارت در بخش LP کاهش یافته و دبی بخار تولیدی توسط بخش LP کم می شود.



شکل (۸) تغییرات دمای دود در ورود به بخشهای HP و LP با افزایش درجه حرارت دود

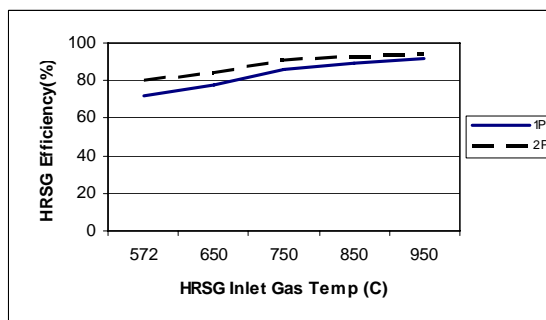
نکته مهمی که از این موضوع استخراج می شود این است که در دماهای بالا، راندمان بویلرهای تکفشاره و چند فشاره به هم نزدیک می شود و مزایای سیستمهای چند فشاره عملاً از بین می رود. عموماً سیستمهای چند فشاره در درجه حرارتهای پایین که جذب حرارتی آن پایین تر است کارایی بیشتری دارند.



شکل (۹) افزایش دبی بخار تولیدی با افزایش درجه حرارت دود

ع-تأثیر داکت برنر بر راندمان بویلر بازیاب و سیکل ترکیبی

داکت برنر از طریق افزایش جذب حرارتی در سطوح حرارتی بویلر بازیاب و کاهش دمای دود خروجی از آن راندمان بویلر بازیاب را افزایش می دهد.



شکل (۱۰) تغییر راندمان بویلرهای بازیاب تک فشاره و دوفشاره با افزایش درجه حرارت دود

راندمان کلی سیکل ترکیبی را می توان مطابق زیر تعریف کرد [۱]:



$$\eta_K = \frac{P_{GT} + P_{ST}}{Q_{GT}}$$

همچنین برای پروسه توربین گاز داریم:

$$\eta_{GT} = \frac{P_{GT}}{Q_{GT}}$$

و برای پروسه توربین بخار نیز داریم:

$$\eta_{ST} = \frac{P_{ST}}{Q_{EXH} + Q_{SF}}$$

با ترکیب معادلات بالا داریم:

$$\eta_K = \frac{\eta_{GT} Q_{GT} + \eta_{ST} (Q_{SF} + Q_{GT} [1 - \eta_{GT}])}{Q_{GT} + Q_{SF}}$$

داکت برنر در حالتی می تواند موجب افزایش راندمان سیکل ترکیبی گردد که :

$$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_{SF}}$$

با لحاظ کردن رابطه فوق در معادله راندمان سیکل ترکیبی و یکسری ساده سازی به نا معادله زیر خواهیم رسید:

$$\frac{\partial \eta_{ST}}{\partial Q_{SF}} \cdot \frac{P_{ST}}{\eta_{ST}} > \eta_K - \eta_{ST}$$

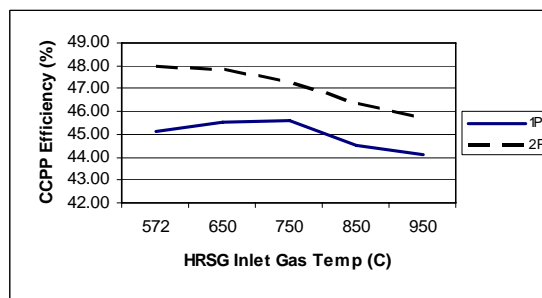
نا مساوی بالا نشان می دهد در صورتی داکت برنر می تواند موجب افزایش راندمان سیکل ترکیبی شود که

اولاً: داکت برنر موجب افزایش راندمان سیکل رنکین شود (این شرط تقریباً همیشه برقرار است)

ثانیاً: نرخ افزایش راندمان سیکل رنکین بگونه ای باشد که نا مساوی بالا ارضا گردد.

محاسبات نشان می دهد که در بویلر های چند فشاره نرخ افزایش راندمان سیکل رنکین بحدی نیست که نامساوی بالا ارضا

شود. بنا بر این راندمان سیکل رنکین در این واحدها همیشه با بکار گیری داکت برنر کاهش خواهد یافت .



شکل (۱۱) تغییرات راندمان سیکل ترکیبی در دو واحد با بویلر های تک فشاره و دو فشاره

اما بعلت افزایش شدید راندمان در بویلر های تکفشاره تا دمای حدود $750^{\circ}C$ ، افزایش راندمان سیکل رنکین در حدی است که

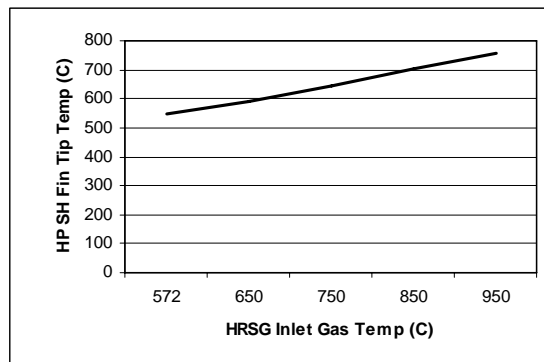
می تواند نامساوی بالا را ارضا نماید. بنابر این در بویلر های تکفشاره تا این دما داکت برنر قادر به افزایش راندمان سیکل ترکیبی

می باشد و بالاتر از آن راندمان سیکل ترکیبی کاهش خواهد یافت.

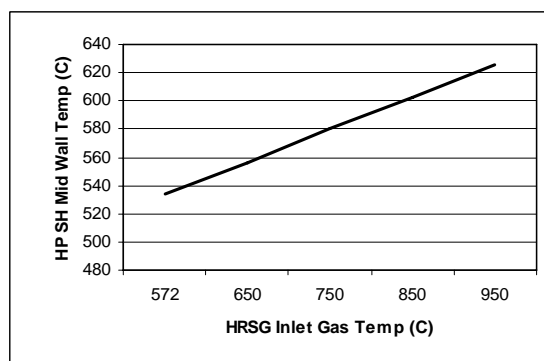
۵-تاثیر داکت برنر بر طراحی و عملکرد سوپرهیتر



با افزایش درجه حرارت دود ، با توجه به پایین بودن ضریب انتقال حرارت سیال داخل لوله در SH نسبت به بخشهای EVA و ECO ، درجه حرارت سطح لوله و فین بشدت بالا می رود.



شکل (۱۲) افزایش درجه حرارت نوک فین در لوله های سوپرهیتر



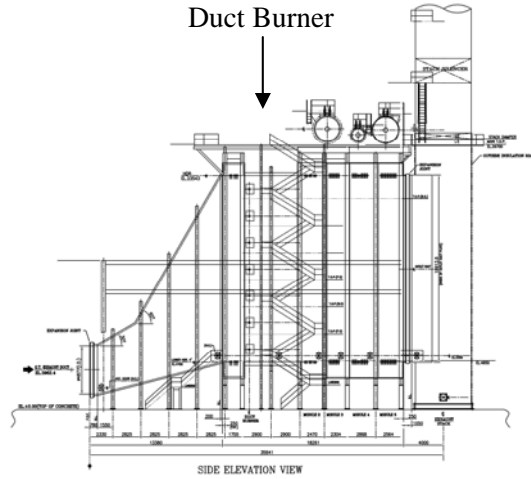
شکل (۱۳) افزایش درجه حرارت سطح لوله های سوپرهیتر

در این حالت نیاز به تغییر جنس لوله و همچنین افزایش ضخامت لوله می باشد که با توجه به گران بودن لوله های سوپرهیتر(مخصوصا لوله های درجه حرارت بالا)، هزینه زیادی در بر دارد .

مشکل دیگر که با افزایش جذب حرارت در لوله های سوپرهیتر روی می دهد، افزایش میزان دبی آب اسپری می باشد تا درجه حرارت خروجی ثابت نگه داشته شود

در صورتی که درجه حرارت دود ورودی 570°C باشد و برای ثابت نگهداشتن درجه حرارت بخار در 530°C نیازی به آب اسپری نباشد، در درجه حرارت دود 950°C ، برای ثابت نگهداشتن درجه حرارت بخار نیاز به ۱۲۶ تن بر ساعت آب اسپری خواهد بود. این مسئله علاوه بر افزایش هزینه های تجهیزات آب اسپری، خطرات مربوط به وجود قطرات آب در بخار خروجی را نیز افزایش می دهد.

برای غلبه بر این مشکل در طراحی سعی می شود در صورت افزایش مگاوات داکت برنر ، چند ردیف از سوپر هیتر قبل از داکت برنر قرار گیرد، تا جذب حرارت در ردیفهای سوپر هیتر کاهش یابد.



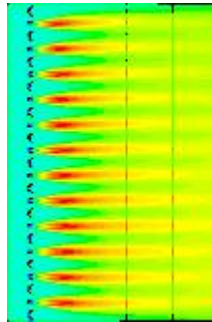
شکل (۱۴) یک نمونه داکت برنرهای سطوح SH

۶-تشنوع در داکت برنر

تشنوع در داکت برنر از طریق رابطه زیر تخمین زده می شود:

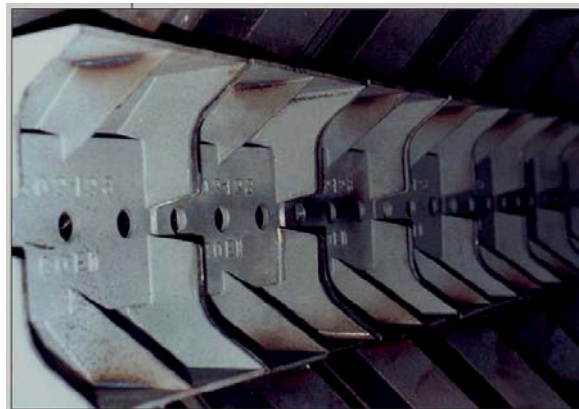
$$q = CA \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \text{ Kcal/hr}$$

که: $C = 2.6 - 3 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{hr}^4}$ for GasFuel



شکل (۱۵) کانتور دما در داکت برنر

مشعلهای داکت برنرهای ، مخصوصا داکت برنرهایی که از اکسیژن موجود در دود استفاده می کنند از نوع Grid می باشد که در چند ردیف در مقطع داکت نصب می شوند. دبی عبوری از این مشعلها زیاد نمی باشد و ابعاد شعله ها کوچک است.



شکل (۱۶) یک نمونه مشعل داکت برنر از نوع Grid



گرچه دمای آدیاباتیکی شعله های گازی حدود $2000^{\circ}k$ می باشد ولی بخش بسیار کوچکی از شعله های داکت برنر به این درجه حرارت می رسند . بنابراین در مواردی که دمای متوسط بعد از داکت برنر زیر $750^{\circ}C$ می باشد تشعشع ناچیز فرض می شود .

۷- نتیجه گیری

استفاده از داکت برنر موجب کاهش راندمان سیکل ترکیبی خواهد شد ولی بعلاوه افزایش ضریب انتقال حرارت در بویلر بازیاب موجب افزایش راندمان آن می شود. و در صورتی که راندمان بویلر بازیاب پایین باشد ، استفاده از داکت برنر میتواند حتی موجب افزایش راندمان سیکل ترکیبی گردد. از این رو استفاده از داکت برنر در واحدهای Cogeneration بعلاوه ثابت نگهداشتن نیازهای پروسسی و راندمان بالاتر بسیار مناسب می باشد. در واحدهای سیکل ترکیبی گرچه استفاده از داکت برنر موجب کاهش راندمان می شود ولی استفاده از آن تابع نیاز الکتریسیته و نیازمندیهای توربین بخار می باشد.

References:

۱. "Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plant" Rolf Bachmann, Henrik Nielsen, Judy Warner, Rolf Kehlhofer
۲. "Gas Turbine Handbook" , ۲۰۰۳
۳. "Alternative Fuel For Supplementary Firing Add Value and Flexibility to Combined Cycle and Cogeneration Plants", A. Batshon , J.C. Backlund , Power Generation International ۲۰۰۱
۴. "Thermal and Economical Analysis of Supplementary Firing Large Combined Cycle Plants", J. Backlund , J. Froeming , Coen Company
۵. "Introduction to Heat Transfer", Incropera, F.P., Dewit, D.P. John Wiley & Sons., ۱st Edition, ۱۹۸۵.



بررسی اثر ریکوپراتور بر راندمان سیکل توربین گاز و تعیین نرخ بازگشت سرمایه سیکل های دارای ریکوپراتور

مجید منتظر بارفروش

دانشگاه صنعت آب و برق - دانشکده انرژی - صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۱۷۹۱

Email: mj_montazer@yahoo.com

چکیده

یکی از راهکارهای افزایش راندمان حرارتی سیکل توربین گاز، استفاده از سیستم های بازیافت حرارت می باشد که در آن توسط یک مبدل حرارتی، گرمای گازهای داغ خروجی از توربین گاز به هوای سرد و متراکم ورودی به محفظه احتراق منتقل شده و با این عمل میزان سوخت مصرفی سیکل جهت گرمایش هوای ورودی به توربین کاهش یافته و در نتیجه راندمان حرارتی سیکل که برابر هدف (نسبت کار خالص خروجی) به هزینه (سوخت مصرفی) می باشد، افزایش خواهد یافت. وسیله ای که عمل مبادله حرارت را انجام می دهد بازیاب نامیده می شود و در حالت کلی بازیاب ها به دو دسته ریزراتورها^۱ و ریکوپراتورها^۲ تقسیم می شوند. ریزراتورها به صورت دوره ای^۳ عمل نموده و در یک دوره زمانی، گرمای گازهای داغ خروجی از توربین را در ماتریس مبدل ذخیره نموده و در دوره زمانی بعدی، ضمن تماس با هوای سرد متراکم شده خروجی از کمپرسور، آنرا منتقل می کنند. ریکوپراتورها مبدل های حرارتی گاز به گاز فشرده ای هستند که به صورت پیوسته عمل انتقال حرارت را از گازهای گرم خروجی از توربین به هوای سرد خروجی از کمپرسور انجام می دهند و مورد بحث این مقاله می باشند.

هدف این مقاله بررسی دو جنبه ترمودینامیکی و اقتصادی تاثیر یک ریکوپراتور بر سیکل توربین گاز می باشد. در جنبه ترمودینامیکی پس از تعریف پارامترهای عملکردی سیکل های دارای ریکوپراتور، تاثیر سه پارامتر بازده ریکوپراتور، افت فشار سمت هوا و افت فشار سمت گاز ریکوپراتور بر راندمان حرارتی سیکل بررسی خواهد شد. در انتها یک برنامه کامپیوتری عملکرد یک سیکل توربین گاز دارای ریکوپراتور را که در حالت کارکرد واقعی مدلسازی شده است، با سیکل های بدون ریکوپراتور و سیکل های با ریکوپراتور ایده ال مقایسه خواهد نمود. در جنبه اقتصادی با در نظر گرفتن قیمت ریکوپراتورهای مدرن امروزی و محاسبه میزان صرفه جویی در سوخت ناشی از نصب یک ریکوپراتور در سیکل، نرخ بازگشت سرمایه^۴ انواع مختلف ریکوپراتورها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه های کلیدی: ریکوپراتور، بازیافت حرارت، مصرف ویژه سوخت، نرخ بازگشت سرمایه

Regenerator
Recuperator
Periodic
Rate of Return



مقدمه

امروزه استفاده از ریکوپراتورها در واحد های میکروتوربین برای رسیدن به راندمان حرارتی بیش از ۳۰ درصد اجتناب ناپذیر شده است. شناخت ویژگی ها و تاثیراتی که ریکوپراتورها بر عملکرد سیکل توربین گاز می گذارند بسیار حائز اهمیت می باشد. دو جنبه بسیار مهم بررسی ریکوپراتورها جنبه های ترمودینامیکی و اقتصادی-به دلیل قیمت زیاد واحدهای ریکوپراتور- مسئله می باشد که در این مقاله پس از بررسی ترمودینامیکی و بیان تاثیرات و مزایای ترمودینامیکی یک ریکوپراتور. به بحث قیمت و تعیین نرخ بازگشت سرمایه ریکوپراتورها پرداخته شده است. مواردی که در بخش های مختلف مقاله مورد بررسی قرار گرفته اند عبارتند از: ۱. تحلیل ترمودینامیکی سیکل های ساده و دارای بازیاب توربین گاز، ۲. تعریف دو پارامتر بازده ریکوپراتور و افت فشار سمت هوا و گاز ریکوپراتور به عنوان مهمترین پارامترهای موثر بر عملکرد سیکل های دارای ریکوپراتور، ۳. مطالعه موردی سیکل توربین گاز ۱۵۰ kW و مقایسه پارامتر مصرف ویژه سوخت در دو حالت سیکل با ریکوپراتور و بدون ریکوپراتور، ۴. بررسی تاثیرات سه پارامتر بازده ریکوپراتور، افت فشار سمت هوا و افت فشار سمت گاز ریکوپراتور بر راندمان سیکل دارای بازیاب و مقایسه آن با عملکرد سیکل دارای ریکوپراتور ایده ال و سیکل ساده توربین گاز و ۵. دسته بندی انواع ریکوپراتورها بر حسب بازده قابل دستیابی و تعیین نرخ بازگشت سرمایه برای هر نوع. در ادامه به بررسی هر یک از موارد فوق پرداخته خواهد شد.

۱- سیکل ساده توربین گاز (سیکل برایتون) [۱]

اجزای یک سیکل ساده توربین گاز در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدا با فرض عملکرد سیکل در حالت ایده ال، راندمان سیکل ساده نشان داده شده برابر خواهد بود با:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (1)$$

که در آن $r = P_2 / P_1 = P_3 / P_4$ می باشد. بنابراین راندمان فقط به نسبت فشار و ماهیت گاز (γ) بستگی دارد. همچنین کار خروجی مخصوص در حالت ایده ال برابر است با:

$$\frac{W}{c_p T_1} = t \left(1 - \frac{1}{r^{(\gamma-1)/\gamma}} \right) - \left(r^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right) \quad (2)$$

که در آن $t = T_3 / T_1$. کار خروجی مخصوص در نسبت فشاری که درجه حرارت خروجی از کمپرسور و توربین در آن مساوی می باشد، بیشترین مقدار را خواهد داشت. نتیجه به این صورت خواهد بود که برای تمامی مقادیر t ، بین ۱ و $t^{\gamma/2(\gamma-1)}$ ، T_4 بیشتر از T_2 خواهد بود و بدین جهت می توان یک مبدل حرارتی را برای کاهش انتقال حرارت از منبع خارجی بکار برد و در نتیجه راندمان را افزایش داد. این مبدل حرارتی بازیاب نامیده می شود.



۲- سیکل دارای بازیاب توربین گاز^۱ [۱]

شماتیک سیکل توربین گاز دارای مبدل بازیاب، به همراه نمودار T-S آن در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که در نمودار نشان داده شده، دمای گاز خروجی از توربین در نقطه ۴ بیش از دمای هوای خروجی از کمپرسور در نقطه ۲ می باشد. بنابراین حرارت می تواند از گاز داغ خروجی از توربین به هوای سرد و پرفشار خروجی از کمپرسور منتقل شود. اگر این عمل در یک مبدل حرارتی با جریان معکوس، که به آن بازیاب می گویند روی دهد، در حالت ایده ال، دمای گاز پرفشار خروجی از کمپرسور به T_5' می رسد، که برابر دمای خروجی از توربین، T_4 می باشد. برای افزایش دما از T_5' به T_3 به انتقال حرارت از منبع خارجی نیاز می باشد. در حالت واقعی دمای گاز خروجی از بازیاب به T_5 خواهد رسید و این دما از T_5' کوچکتر خواهد بود. بر همین اساس راندمان یک بازیاب توسط رابطه زیر تعریف می گردد:

$$\varepsilon = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (۲)$$

و راندمان سیکل دارای بازیاب برابر خواهد بود با:

$$\eta_{regeneration} = \frac{W_{net}}{Q_{input}} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \cdot (r_p)^{(y-1)/\gamma} \quad (۴)$$

بنابراین در سیکل برایتون با بازیاب، بازده حرارتی نه تنها تابع نسبت فشار است بلکه تابع کمترین دمای سیکل به بیشترین دمای سیکل نیز می باشد. برای یک مقدار معین T_1/T_3 ، راندمان با کاهش نسبت فشار، افزایش پیدا می کند (در حالی که در سیکل ساده، افزایش فشار راندمان را بالا می برد). با بکارگیری بازیاب در سیکل توربین گاز می توان مصرف سوخت تزریقی به سیکل را کم نموده و از این طریق بازده کلی سیکل را افزایش داد.

۳- سیکل های واقعی^۲ [۱]

به دلائلی مانند وجود اصطکاک در مسیر جریان سیال که موجب افت فشار در اتاق احتراق، مبدل حرارتی و همچنین کانال های ورودی و خروجی می گردد، همچنین اختلاف در درجه حرارت انتهایی در مبدل بازیاب و غیره، کارایی سیکل واقعی با کارایی یک سیکل ایده ال متفاوت است. تعریف راندمان برای یک سیکل ایده ال روشن است، لیکن برای سیکل باز با احتراق داخلی، این تعریف صدق نمی کند. در سیکل های واقعی با دانستن حرارت تولیدی کمپرسور، ترکیب سوخت و درجه حرارت مورد نیاز ورودی به توربین، نسبت سوخت به هوای مورد لزوم با محاسبه ساده احتراق به دست می آید. همچنین برای در نظر گرفتن احتراق ناقص، یک راندمان احتراق نیز گنجانده می شود. بنابراین می توان کارایی سیکل را بر حسب مصرف سوخت در واحد کار خروجی بیان کرد. یکی از پارامترهای تعیین عملکرد سیکل های واقعی توربین گاز، S.F.C^۳ یا مصرف ویژه سوخت می باشد که برابر میزان مصرف سوخت بر توان خالص تولیدی سیکل می باشد و توسط رابطه زیر تعریف می گردد:

^۱Heat-Exchange Cycle

^۲Real Cycles

^۳Specific Fuel Consumption



$$s.f.c = \frac{3600 f}{W_N} \text{ kg/kW.h} \quad (5)$$

که در آن W_N ، کار مخصوص خالص خروجی بر حسب kW در kg/s، گذر هوا است. از این معادلات با تعریف راندمان حرارتی سیکل های واقعی بر اساس کار خروجی به حرارت داده شده، نتیجه خواهد شد:

$$\eta = \frac{3600}{s.f.c / [kg/kW.h] \times Q_{net,p} / [kJ/kg]} \quad (6)$$

تفاوت سیکل های واقعی دارای بازیاب و بدون بازیاب در مصرف ویژه سوخت آنها بوده و مقدار این پارامتر در سیکل های دارای بازیاب کمتر می باشد.

۴- افت فشار بازیاب [۱]

سه پارامتر اساسی و مهم در انتخاب یک بازیاب در یک سیکل توربین گاز، مقدار افت فشار در دو سمت هوا و گاز و بازده یک بازیاب می باشد. نحوه تعیین بازده یک بازیاب در معادله (۳) تعریف شده است و تنها تفاوت تعیین بازده در حالت واقعی، استفاده از دماهای سکون در معادله می باشد. شکل ۴ افت های فشار را در یک سیکل توربین گازی با بازیاب نشان می دهد که در آن ΔP_b افت فشار در اتاق احتراق، ΔP_{ha} افت فشار در پاساژهای سمت هوا در مبدل بازیاب و ΔP_{hg} افت فشار در پاساژهای سمت گاز در مبدل بازیاب می باشد. مقادیر ΔP_{ha} و ΔP_{hg} معمولاً توسط سازندگان مبدل های حرارتی ارائه خواهد شد و برای یک بازیاب (ریکوپراتور) ایده ال در کاربرد های میکروتوربین های کوچک مورد بحث این مقاله، این مقدار در حدود $\Delta P / P_{tot} = 5\%$ می باشد [۳]. از نمودار شکل ۴ نتیجه خواهد شد:

$$P_{03} = P_{02} - \Delta P_b - \Delta P_{ha} \quad (7)$$

$$P_{04} = P_a - \Delta P_{hg} \quad (8)$$

و اگر ΔP_b و ΔP_{ha} را بصورت درصد ثابتی از فشار تولیدی کمپرسور در نظر گرفته شود، آنگاه:

$$P_{03} = P_{02} \left(1 - \frac{\Delta P_b}{P_{02}} - \frac{\Delta P_{ha}}{P_{02}} \right) \quad (9)$$

با استفاده از معادلات بالا یک نمونه مطالعه موردی بر روی سیکل های توربین گاز ۱۵۰kW و دو برنامه کامپیوتری یکی برای بررسی اثرات ریکوپراتورها بر راندمان حرارتی سیکل های دارای ریکوپراتور و دیگری برای بدست آوردن نرخ بازگشت سرمایه، بدست آمده است که در ادامه ارائه خواهند شد.

۵- مطالعه موردی

یک نمونه مطالعه موردی برای مقایسه راندمان حرارتی سیکل های توربین گاز ۱۵۰kW با انجام فرضیاتی انجام شده و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. فرضیات انجام شده شامل نسبت فشار کمپرسور ۴، درجه حرارت ورودی توربین ۱۱۰۰ کلوین، راندمان ایزنتروپیک کمپرسور ۰.۸۵، راندمان ایزنتروپیک توربین ۰.۸۷، راندمان انتقال مکانیکی ۰.۹۹، راندمان احتراق ۰.۹۸، راندمان حرارتی بازیاب ۰.۸، افت فشار اتاق احتراق ۲ درصد فشار تولیدی، افت فشار بازیاب ایده ال در سمت هوا ۳ درصد فشار تولیدی، افت فشار بازیاب ایده ال سمت گاز ۴kPa، شرایط محیطی، T_a, P_a ، ۱۰۱kPa و ۲۸۸ کلوین.



نتایج نشان می دهد که راندمان سیکل های دارای ریکوپراتور بیش از ۱۰ درصد بالاتر از راندمان سیکل های بدون ریکوپراتور میباشد، همچنین مصرف ویژه سوخت سیکلهای بدون ریکوپراتور ۶۴ درصد بیشتر از سیکل های دارای ریکوپراتور در مطالعه موردی انجام شده می باشد. میزان صرفه جویی مالی ناشی از این مطلب در بخش های بعدی مقاله مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۶- برنامه کامپیوتری

با فرضیات ارائه شده در بخش ۵، یک برنامه کامپیوتری با دریافت اطلاعاتی مانند نسبت فشار کمپرسور (CR)، ارزش حرارتی گاز طبیعی مصرفی به عنوان سوخت (Q_{HHV})، ماکزیمم دمای کارکرد سیکل (دمای ورودی توربین) و غیره، مقدار بازده حرارتی سیکل توربین گاز دارای ریکوپراتور را بر اساس سه پارامتر مهم سیکل، یعنی بازده ریکوپراتور (ϵ)، افت فشار سمت هوا (dPha) بر حسب kPa و افت فشار سمت گاز (dPhg) بر حسب kPa نشان خواهد داد. نتایج در شکل های ۵ الی ۷ نشان داده شده اند.

۷- بررسی اقتصادی سیکل های دارای ریکوپراتور

پس از بررسی تاثیرات ترمودینامیکی یک ریکوپراتور بر راندمان سیکل توربین گاز در بخش های ۱ الی ۶، یکی دیگر از مهمترین پارامترهایی که برای انتخاب مابین یک سیکل دارای ریکوپراتور و یک سیکل بدون ریکوپراتور می بایست مدنظر قرار گیرد در این بخش بررسی خواهد شد و آن بررسی اقتصادی سیکل های دارای ریکوپراتور می باشد. ریکوپراتورها ۲۵ الی ۳۰ درصد به قیمت مجموعه توربوژنراتورها که خود از گرانترین اجزای سیستم های توربین گاز به شمار می آیند اضافه می نمایند که این خود دلیل واضحی برای لزوم بررسی اقتصادی ریکوپراتورها و تعیین نرخ بازگشت سرمایه سیستم هایی که از ریکوپراتور در سیکل خود استفاده می کنند می باشد [۳].

با مقایسه میزان صرفه جویی در مصرف سوخت سالبانه و قیمت ریکوپراتورهای مدرن امروزی، نرخ بازگشت سرمایه برای انواع بازده های ریکوپراتورها توسط یک برنامه کامپیوتری که توسط نگارنده مقاله تهیه شده است تعیین شده و نتایج در شکل های ۸ و ۹ ارائه شده است. در صورتی که ریکوپراتورها را به سه دسته ریکوپراتورهای پوسته و لوله^۱، ریکوپراتورهای پره و صفحه^۲ و ریکوپراتورهای سطح اصلی^۳ تقسیم بندی شوند [۲]، راندمان این سه دسته در سه بازه به ترتیب ۷۵-۶۰، ۸۵-۷۵ و ۹۵-۸۵ درصد خواهد بود که در شکل ۹ نرخ بازگشت سرمایه این سه دسته نشان داده شده اند. فرضیات انجام شده برای محاسبه نرخ بازگشت سرمایه عبارتند از: ارزش حرارتی گاز برابر $Q=4310 \text{ kJ/kg}$ ، [۱]، سوخت مصرفی سیکل گاز طبیعی می باشد، قیمت جهانی گاز طبیعی $6.5 \text{ \$/MBtu}$ ، [۴]، سیکل ۳۰۰ روز در سال و روزانه ۶ ساعت کارکرد خواهد داشت، قیمت یک ریکوپراتور در بازه $240-90 \text{ \$/kW}$ برای کارتریج کامل می باشد که در اینجا حد بالایی قیمت یعنی $240 \text{ \$/kW}$ برای تولید در مقادیر تکی در نظر گرفته شده است و برای مطالعه موردی ریکوپراتور

**Shell and Tube

**Plate-Fin

**Primary Surface



۱۵۰kW این مقدار \$۳۶۰۰۰ خواهد بود [۲]. نتایج نرخ بازگشت سرمایه برای یکسال و یک دوره پنج ساله در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند.

۸- نتایج

از مجموع اطلاعات بدست آمده در مباحث قبلی و مطالعات موردی انجام شده، موارد زیر نتیجه گیری خواهد شد:

با در نظر گرفتن یک بازده مشخص ریکوپراتور، بازدهی سیکل دارای ریکوپراتور، با افزایش افت فشار سمت هوای ورودی و گازهای خروجی (ناشی از تکنولوژی ساخت)، کاهش خواهد یافت. لزوم استفاده از یک ریکوپراتور با تکنولوژی پیشرفته (و در نتیجه قیمت ساخت بالاتر) با افت فشار $\Delta P / P_{tot} < 5\%$ در نتایج به وضوح مشاهده می گردد و در بعضی موارد افت بازده حرارتی بیش از ۱۰ درصد برای ریکوپراتورهای با افت فشار بیشتر نشان داده شده است.

لازم به ذکر است، افت فشار سمت گاز و در مواردی سمت هوا می تواند ناشی از رسوب گذاری سیال در مسیرهای جریان نیز باشد که این امر بایستی بوسیله گروه های نگهداری بعد از راه اندازی ریکوپراتور کنترل شود.

با افزایش بازده ریکوپراتورها، بازده سیکل های دارای ریکوپراتور به طور چشمگیری افزایش پیدا خواهد نمود و مطالعه موردی انجام شده در سیکل توربین گاز ۱۵۰kW نشان می دهد که این افزایش در سیکل های دارای ریکوپراتور ایده ال با $\Delta P / P_{tot} < 5\%$ و $\varepsilon > 90\%$ تا بیش از ۱۰۰ درصد نیز خواهد بود.

تقریباً تمامی انواع ریکوپراتورها بازدهی حرارتی سیکل را افزایش خواهند داد و تنها دو عامل محدود کننده افت فشار و قیمت ریکوپراتورها باعث عدم بکارگیری بعضی از انواع ریکوپراتورها خواهد بود. بررسی عامل افت فشار نشان خواهد داد که ریکوپراتورهای با $\Delta P / P_{tot} < 5\%$ ، قابلیت بکارگیری از بازده ۲۰ درصد الی ۱۰۰ درصد را دارا می باشند، اما با بررسی عامل اقتصادی نتایج بسیار محدودتر خواهند شد. نتایجی که از تحلیل نمودار بازگشت سرمایه ریکوپراتورهای با بازدهی متفاوت بدست خواهد آمد این مطلب را نشان خواهد داد که با در نظر گرفتن یک دوره بازگشت سرمایه مورد نیاز (به عنوان نمونه دوره سه ساله در این مقاله بررسی شده است)، ریکوپراتورهای با بازدهی کمتر از ۸۰ درصد از فهرست حذف خواهند شد و این بدان معنی است که ریکوپراتورهای پوسسته لوله ای و ریکوپراتورهایی که به علت پایین بودن تکنولوژی ساخت و عدم نگهداری صحیح و در نتیجه رسوب گذاری، دارای بازدهی کمتر از ۸۰ درصد می باشند از دیدگاه اقتصادی به صرفه نخواهند بود. لذا برای انتخاب یک ریکوپراتور می بایست با در نظر گرفتن نرخ بازگشت سرمایه، قیمت سوخت، نرخ بهره و تکنولوژی ساخت، نوعی انتخاب شود که در نمودار شکل ۹، خط قیمت ریکوپراتور را تا قبل از سال در نظر گرفته شده برای بازگشت سرمایه ناشی از صرفه جویی در مصرف سوخت قطع نماید.

مراجع

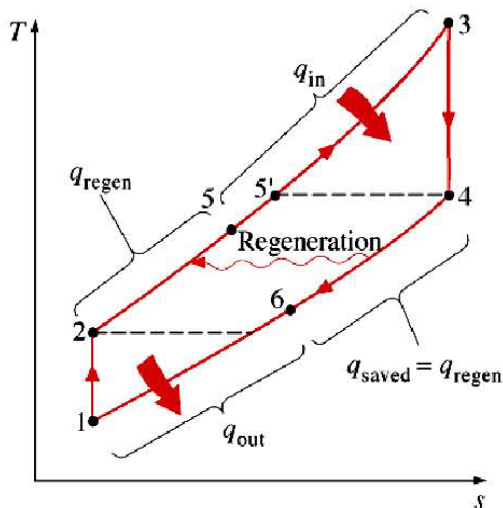
۱. Cohen H, Rogers GFC and Saravanamuttoo H: "Gas Turbine Theory". Longman Group Ltd. ۴th ed. London, ۱۹۹۶.
۲. C. F. McDonald, Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines, Applied Thermal Engineering ۲۳ (۲۰۰۳) ۱۴۶۳-۱۴۸۷.



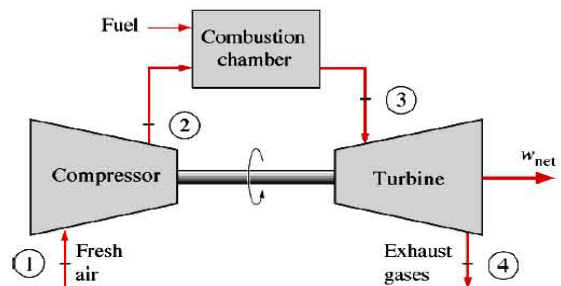
- ۳. C. F. McDonald, "Low Cost Primary Surface Recuperators Concept for Microturbines", Journal of Applied Thermal Energy, ۲۹, pp. ۴۷۱-۴۹۷.
- ۴. <http://www.Microturbine.com>

جدول ۱؛ نتایج مطالعه موردی بر روی سیکل توربین گاز ۱۵۰-kW

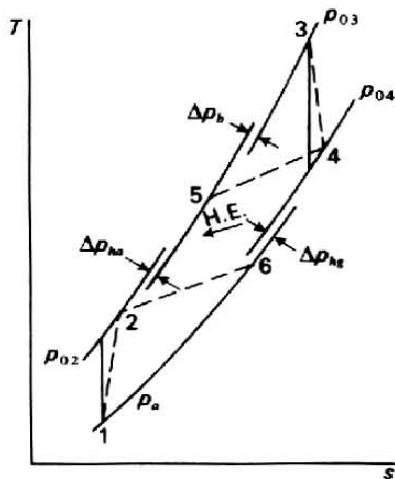
واحد	مقدار	پارامتر
kg/kW.h	۰.۲۵۲	مصرف ویژه سیکل با ریکوپراتور ریکوپراتور
kg/kW.h	۰.۴۲۲	مصرف ویژه سوخت بدون ریکوپراتور
درصد	۳۳	راندمان حرارتی سیکل با ریکوپراتور
درصد	۱۹.۷	راندمان سیکل بدون ریکوپراتور
-	۱.۶۴۷	نسبت مصرف ویژه سوخت سیکل با ریکوپراتور و بدون ریکوپراتور



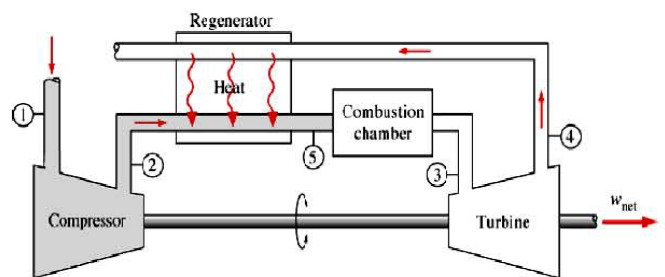
شکل ۲؛ نمودار T-S سیکل توربین گاز با مبدل بازیاب



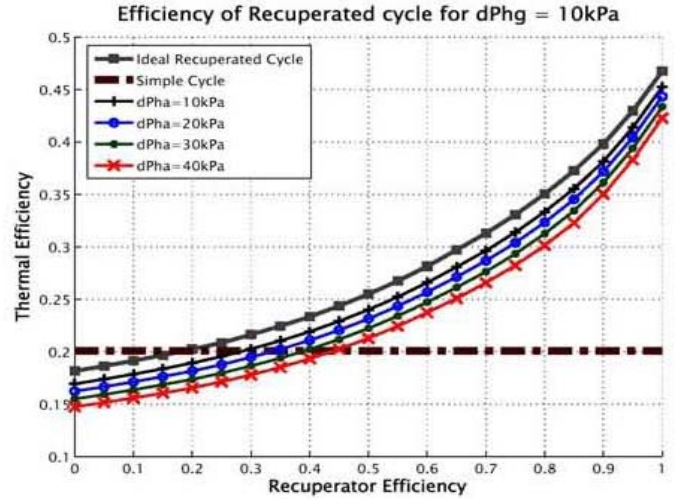
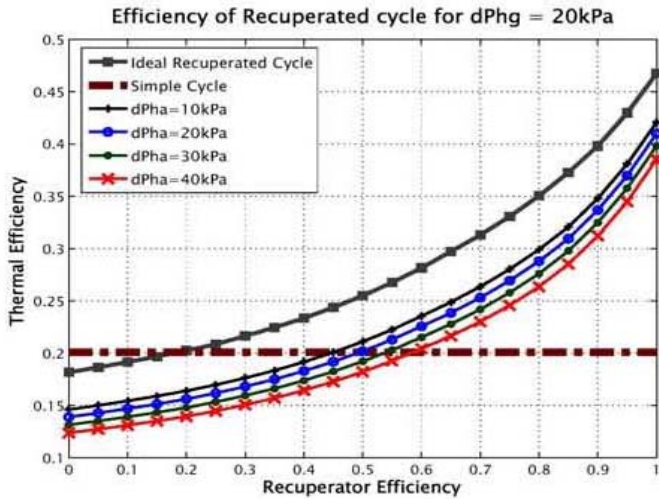
شکل ۱؛ تصویر شماتیک سیکل های ساده توربین گاز



شکل ۴؛ افت های فشار در سیکل توربین گاز با بازیاب

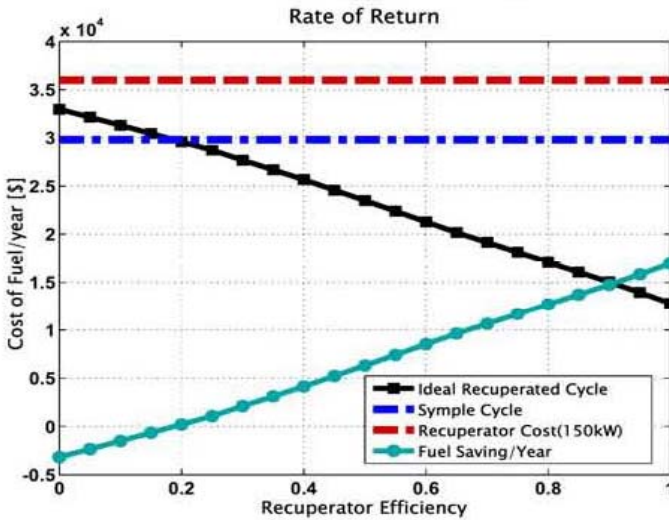


شکل ۳؛ شماتیک سیکل های توربین گاز با بازیاب

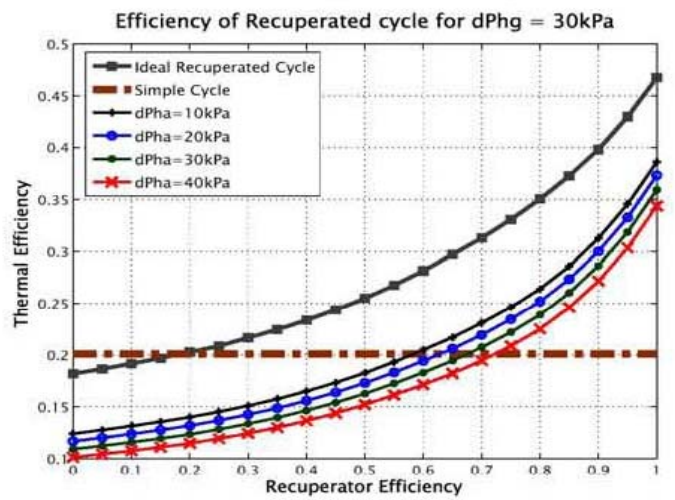


شکل ۶: بازدهی سیکل دارای ریکوپراتور بر حسب مقادیر مختلف ϵ و $dPha$ با فرض مقدار ثابت $dPhg=20kPa$

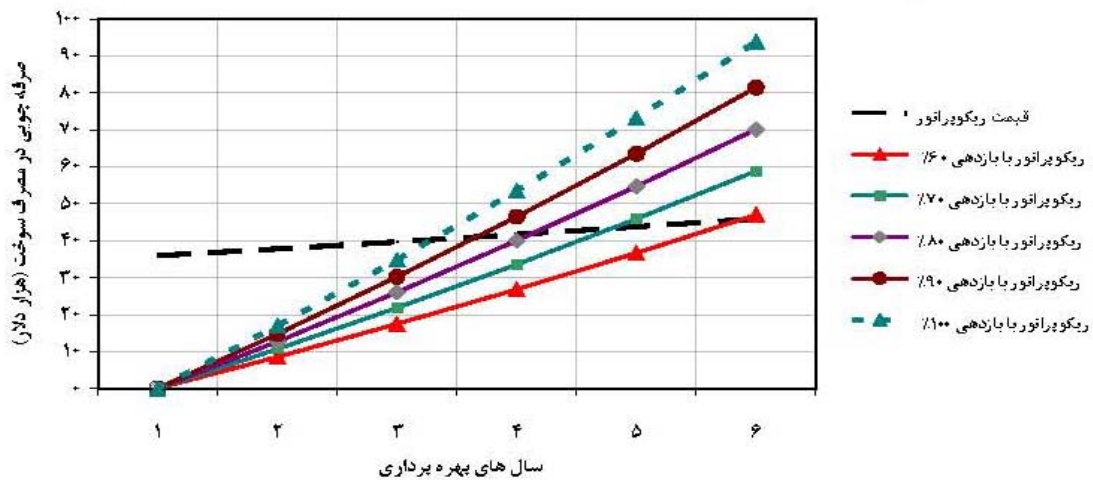
شکل ۵: بازدهی سیکل دارای ریکوپراتور بر حسب مقادیر مختلف ϵ و $dPha$ با فرض مقدار ثابت $dPhg=10kPa$



شکل ۸: مقایسه میزان بهای مصرف سوخت سیکل های ساده و سیکل های دارای ریکوپراتور در یک سال



شکل ۷: بازدهی سیکل دارای ریکوپراتور بر حسب مقادیر مختلف ϵ و $dPha$ با فرض مقدار ثابت $dPhg=30kPa$



شکل ۹: میزان صرفه جویی در مصرف سوخت انواع ریکوپراتورها با بازده های مختلف طی ۵ سال و تعیین نرخ بازگشت سرمایه



بررسی پدیده ضربه قوچی و کاویتاسیون در توربو ماشین ها وراه های جلوگیری

پوریا احمدی و شعیب خانمحمدی

دانشکده انرژی - دانشگاه صنعت آب و برق

چکیده

در این مقاله ابتدا به بررسی عوامل مؤثر در پدیده ضربه قوچی که در تجهیزات نیروگاهی و لوله ها به وقوع می پیوندد توضیح می دهیم و سپس در مورد کاویتاسیون صحبت می کنیم و در نهایت روش های جلوگیری از این پدیده ها را شرح می دهیم

واژه های کلیدی: "کاویتاسون" - "ضربت قوچی" -

"هد خالص مکش" - "مخزن سرج"

مقدمه

به طور کلی توربوماشین به معنای ماشین دوار یا گردنده است و به قسمت اعظم ماشینهایی که به سیال انرژی می دهند، یا از سیال انرژی می گیرند، اطلاق می شود. در توربوماشینها عامل اصلی انتقال انرژی بین سیال و ماشین حرکت دورانی محور (مجموعه پره و شافت) است.

این ماشینها کاربردهای صنعتی، کشاورزی و خدمات فراوانی دارند و شامل انواع فن ها، پمپ ها، کمپرسورها، توربین های هیدرولیکی، گازی و غیره هستند.

به همین دلیل این نکته اهمیت می یابد راه های جلوگیری از آسیب دیدن آن ها را شناسایی کنیم زیرا در اکثر تجهیزات نیروگاهی و پتروشیمی از توربوماشین ها استفاده می شود.

از جمله مواردی که باعث آسیب رساندن به توربو ماشین ها می شود کاویتاسیون و ضربت قوچی می باشد. که در زیر این پدیده ها را شرح خواهیم داد و به راه های جلوگیری از این مشکلات می پردازیم.

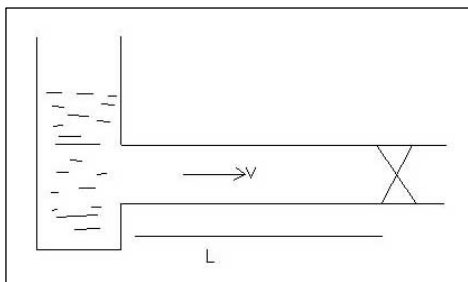
^۱ - دانشجوی کارشناسی مکانیک سیالات - گرایش نیروگاه
عضو انجمن مهندسان مکانیک ایران

۱- ضربه قوچ (Water hammer) [۱]

ضربه قوچ که در بعضی از متون فارسی از آن به عنوان «چکش آبی» نیز یاد شده است، ترجمه واژه Water Hammer است. در بعضی از سیستم های هیدرولیکی نظیر خطوط انتقال آب، نفت یا شبکه های توزیع و لوله های آب منتهی به توربین ها، پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج های فشاری سریع، زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می شود. ترکیدن لوله ها در سیستم های انتقال و شبکه های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه های کنترل پمپ ها از نمونه های بارز تاثیر این پدیده می باشد. امروزه در کلیه طرح های انتقال آب یا سیستم های انتقال سیالات، بررسی و مطالعه دقیق ضربه قوچ به عنوان یک امر لازم و ضروری می باشد.

۲- بررسی پدیده ضربه قوچ:

برای آشنایی با پدیده ضربه قوچ ساده ترین سیستم ممکن در نظر گرفته می شود. این سیستم شامل یک مخزن حاوی سیال، یک لوله افقی با قطر ثابت و یک شیر به فاصله L از مخزن بر روی خط لوله می باشد. شکل (۱).



شکل (۱)



ρ : جرم مخصوص سیال واقع در لوله بر حسب 3 kg/m^3

$$\Delta H = \frac{a \cdot \Delta V}{g}$$

رابطه فوق را می توان به صورت زیر نوشت:

که در این رابطه :

ΔH : ازدیاد فشار ناشی از ضربت قوچ بر حسب ارتفاع ستون سیال، بر حسب متر

g : شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه

روابط فوق با فرضیات زیر بدست آمده است:

- تلفات اصطکاکی در لوله نسبت به فشار استاتیک لوله ناچیز است.

- همراه سیال گاز موجود نبوده و سیال به صورت یک فازه می باشد.

- تغییر سرعت سیال در زمانی کوتاهتر از زمان بحرانی صورت گیرد.

- زمان انعکاس موج که زمان بحرانی نامیده می شود برابر است با:

$$t_r = \frac{2L}{a}$$

در این رابطه :

t_r : زمان بحرانی با زمان انعکاس موج

L : فاصله بین نقطه ایجاد موج فشاری و نزدیکترین نقطه انعکاس آن

سرعت انتشار امواج فشاری a ، تابعی از پارامترهای زیر است:

جرم مخصوص و مدول الاستیسیته سیال.

ابعاد لوله از نظر قطر، ضخامت جداره و نیز تکیه گاه های آن.

مدول الاستیسیته ماده بکار رفته در ساخت لوله.

رابطه پیشنهادی (۲۸) برای بدست آوردن سرعت انتشار موج بصورت زیر می باشد:

(۴)

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{DC_1}{Ee} \right)}}$$

از اصطکاک سیال در داخل لوله و همچنین از هد دینامیکی سیال نسبت به فشار ناشی از ضربه قوچ صرف نظر می کنیم.

هرگاه شیر تعبیه شده به طور ناگهانی بسته شود، سرعت سیال مجاور آن به صفر می رسد. بنابراین هد سیال در

نزدیکی شیر به طور ناگهانی به مقدار $H\Delta$ افزایش می یابد. که در آن $H\Delta$ از رابطه ژوکوفسکی به دست می آید.

این افزایش فشار با سرعت معادل سرعت انتشار موج در سیال (a) به طرف بالا دست شیر حرکت می کند. این موج

فشار پس از زمان $t=L/a$ به مخزن خواهد رسید. در این زمان سرعت سیال در سرتاسر خط لوله صفر بوده و فشار

نیز برابر با $H+\Delta H$ می باشد. به دلیل اختلاف فشار مابین

مخزن و خط لوله، شرایط ناپایدار هیدرولیکی در سرتاسر خط لوله به وجود می آید. در نتیجه این شرایط نامتعادل،

سیال شروع به جریان از داخل لوله به طرف مخزن خواهد نمود. پس از $L/a^2t=$ فشار سرتاسر خط لوله به حالت

معمولی برگشته و فقط سیال دارای سرعتی معادل V در جهت معکوس است. در لحظه رسیدن این موج به شیر به

علت بسته بودن شیر و تخلیه سیال موجود در خط لوله به داخل مخزن، فشار در محل شیر به اندازه $H\Delta$ کاهش می

یابد. این کاهش فشار باعث انقباض جداره لوله و انبساط سیال می گردد. پس از زمان $L/a^3t=$ موج با هد $H-\Delta H$ به مخزن

می رسد. این بار هم به دلیل اختلاف فشار مابین مخزن و خط لوله، شرایط ناپایدار هیدرولیکی ایجاد می شود.

در نتیجه مجدداً سیال وارد خط لوله شده و سرعت آن به V می رسد. پس از زمان $L/a^4t=$ وضعیت در سرتاسر لوله عیناً

مانند حالت اول می شود. در صورت عدم استهلاک انرژی این روند همچنان ادامه می یابد.

اولین محاسبات مربوط به برآورد ازدیاد فشار ناشی از

ضربت قوچ، بوسیله ژوکوفسکی در سال ۱۸۹۸ انجام گرفت. رابطه بدست آمده توسط او بصورت زیر است:

که در آن:

ΔP : فشار ناشی از ضربت قوچ بر حسب 2 N/m^2

a : سرعت انتشار امواج ضربه ای بر حسب m/s

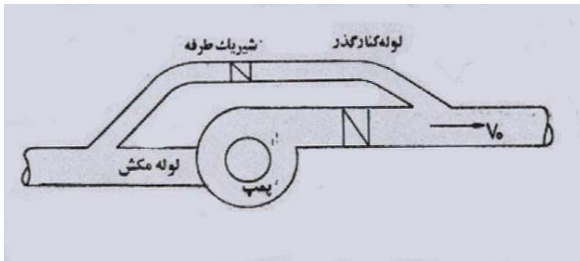
ΔV : تغییر سرعت سیال در لوله بر حسب m/s



برای جلوگیری از بوجود آمدن تغییرات شدید در فشار، به هنگام بروز ضربت قوچی آب می توان اقدامات زیر را انجام داد.

طراحی لوله رانش بر اساس سرعتهای کم همانگونه که گفته شد، چون ازدیاد فشار ناشی از ضربت قوچ، نسبت مستقیم با تفاضل سرعت دارد، هرچه سرعت کمتر باشد، تاثیر ضربت قوچ هم کمتر خواهد شد.

تعبیه لوله کنار گذر پمپ با شیر یکطرفه یکی از ساده ترین روش های پیشگیری اثرات ناشی از ضربت قوچ، تعبیه لوله کنار گذر پمپ، با شیر یکطرفه، مطابق شکل (۲) می باشد. در شرایط عادی، فشار پمپ سبب بسته ماندن شیر یکطرفه می شود. پس از توقف پمپ، فشار لوله رانش در لوله رانش کاهش یافته و چنانچه از فشار قسمت مکش پمپ کمتر شود، شیر یکطرفه باز و سیال از قسمت مکش وارد لوله رانش می گردد و از کاهش بیشتر جلوگیری می کند.



(۲) کاربرد لوله کنار گذر همراه با شیر کنار گذر

نصب مخازن سرج

این مخازن که به عنوان یک منبع موج گیر عمل می نماید، بر روی لوله رانش پمپ نصب می گردند. در مواقعی که فشار در لوله افزایش می یابد، سیال از داخل لوله وارد مخزن شده و در آن ذخیره می گردد و به عکس، هنگام کاهش فشار در لوله، سیال از مخزن وارد لوله رانش شده و به این ترتیب از تغییرات سریع جلوگیری بعمل می آید.

این مخازن در دو نوع یکطرفه و دوطرفه ساخته می شوند. مخازن دوطرفه همانگونه که گفته شد، در هر دو

در این رابطه:

a: سرعت انتشار موج

D: قطر لوله

e: ضخامت جداره لوله

E: مدول الاستیسیته جنس لوله

K: مدول الاستیسیته حجمی سیال

p: جرم مخصوص سیال

۱C: ضریبی ثابت که مربوط به نحوه مهار کردن لوله است.

مقدار این ضریب ثابت از جداول مربوطه محاسبه می شود.

۳- عوامل ایجاد ضربت قوچی

موجهای فشاری در یک سیستم پمپاژ، به علت باز و بسته شدن سریع شیرها، راه اندازی و خاموش کردن پمپ ها و یا تغییر سرعت دورانی آنها بطور ناگهانی، بوجود می آید. علاوه بر این عوامل، مسائل اتفاقی و غیر معمول نیز باعث بروز پدیده ضربت قوچ خواهد شد. اهم این مسائل عبارتند از:

- از کار افتادن موتور، به علت قطع برق

- عملکرد نادرست شیرهای یکطرفه، شیرهای کنترل و

حفاظتی سیستم در اثر قطع ولتاژ کنترل، از کار افتادن موتور

الکتریکی شیرها و یا اشکالات نظیر آن

- قفل شدن یا تاقانهای پمپ، یا هر اشکالی در محور که منجر

به از کار افتادن پمپ شود.

- مسدود شدن جریان بطور ناگهانی در داخل پمپ به علت

وجود یک جسم خارجی.

- حرکات لرزشی و نامنظم صفحه یا قسمتهای متحرک شیرها

- از بین رفتن پروانه پمپ در اثر کاویتاسیون یا مسائل نظیر

آن و در نتیجه عدم کار پمپ (در صورت وقوع ناگهانی)

- عدم دقت در پر کردن خطوط خالی، به هنگام پر کردن

خطوط لوله در ابتدای راه اندازی

- عدم طراحی صحیح سیستم لوله کشی

ع- راه های جلوگیری از ضربه قوچ



علت توقف سریع محور پمپ، ضربه های مکانیکی شدیدی تولید می گردد.
کاویتاسیون:

اگر به جدول ترمودینامیک قسمت مایع اشباع توجه شود ملاحظه می شود که به ازای هر دمایی فشار متناظر آن، جلوی دما درج شده است. این به این معنی است که مایع در آن فشار و دما به بخار تبدیل می شود. با توجه به پیوستگی موجود در سیالهای تراکم ناپذیر این حبابها به مدخل پمپ هدایت می شود و خساراتی جبران ناپذیر را وارد می کند. هدف از ارائه این مقاله اشاره ای است به بحث کاویتاسیون و NPSH که متأسفانه در حال فراموشی از یاد مهندسان مکانیک است، می باشد.

کاویتاسیون از کلمه cavity به معنای حفره گرفته شده است. آب یا هر مایع دیگر در هر درجه حرارتی، به ازای یک فشار معین تبخیر می شود. به عنوان مثال آب در فشار اتمسفر در کنار دریا، در ۱۰۰ درجه سانتی گراد و در فشار ۲،۰ atm در ۲۰ درجه سانتی گراد تبخیر می گردد.

هر گاه در حین جریان مایع در داخل چرخ یک پمپ، فشار در نقطه ای از فشار تبخیر مایع در درجه حرارت مربوط کمتر شود، حباب های بخار به وجود می آید که به همراه مایع به نقطه ای دیگر با فشار بالا تر حرکت می کند اگر در محل جدید فشار مایع به اندازه کافی زیاد باشد، حباب های بخار در این محل تقطیر شده و در نتیجه ذراتی از مایع از مسیر اصلی خود منحرف می شوند و با سرعت های فوق العاده زیاد به اطراف و از جمله به پره بر خورد می نمایند.

در چنین مکانی بسته به شدت بر خورد، سطح پره ها خورده شده و متخلخل می گردند به این پدیده کاویتاسیون می گویند پدیده کاویتاسیون برای پمپ ها

بسیار خطرناک بوده و ممکن است پس از زمانی کوتاه چرخ آن از بین برود. لذا باید از باید وجود چنین پدیده ای در پمپ ها جلوگیری نمود.

پریود افزایش و کاهش فشار وارد مدار شده و معمولا در تاسیساتی بکار می روند که ارتفاع خط شیب هیدرولیکی نسبت به خط لوله زیاد نباشد.

در مخازن سرچ یکطرفه، سیال فقط به هنگام کاهش فشار در خط رانش، از داخل مخزن به لوله جریان یافته و برگشت سیال از خط لوله به داخل مخزن به علت نصب شیر یکطرفه امکان پذیر نیست. این نوع مخازن معمولا در ایستگاه های پمپاژ و خطوط لوله ای مورد استفاده قرار می گیرند که ارتفاع خط شیب هیدرولیکی، نسبت به خط لوله زیاد است. مخزن سرچ از نوع یکطرفه، وسیله مطمئنی برای جلوگیری از پدیده جدایی ستون مایع می باشد. برای پرشدن این مخازن، بعد از هر بار عملکرد، باید از وسایل جنبی استفاده نمود و یا با نصب شیرهای شناور آنها را پر نمود.

نصب شیرهای کنترل فشار

این شیرها که در فشارهای بالا و غیر مجاز سریعاً باز می شوند، در نقاط حساس سیستم نصب شده و در مواقع افزایش فشار، با باز شدن سریع خود مقداری از سیال را به خارج هدایت می کنند. در نتیجه این عمل، فشار در لوله کاهش یافته و از آسیب رسیدن به آن جلوگیری می شود.

نصب شیرهای خلاء

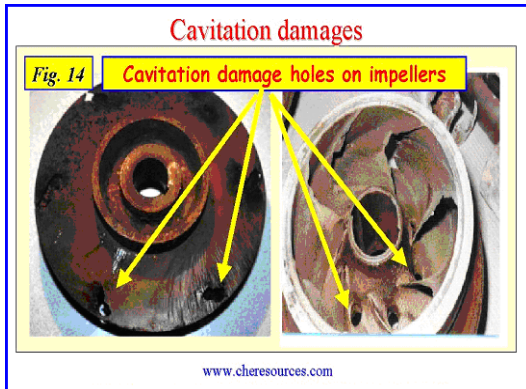
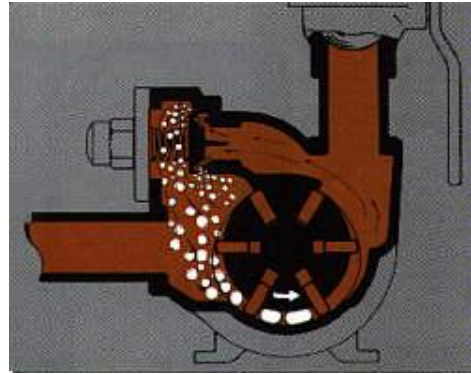
این شیرها در نقاطی از لوله نصب می گردند که امکان تبخیر آب به علت موجهای با فشار منفی وجود دارد. هنگامی که فشار از میزان معینی پایین تر بیاید، شیرها باز شده و مقداری هوا وارد سیستم می شود.

استفاده از ترمزهای زبانه دار

این وسیله بر روی محور پمپ نصب می گردد و مانع از چرخیدن آن در جهت عکس، به هنگام معکوس شدن جریان می شود. همراه با این وسیله یک لوله فرعی، آب موجود در لوله رانش را تا زمانی که اثرات موج فشاری از بین برود، به خارج هدایت می کند و بدین وسیله از افزایش فاشر ناشی از ضربت قوچ جلوگیری بعمل می آید. استفاده از این وسیله در پمپ های کوچک توصیه نمی شود، زیرا در بعضی از آنها، به



سرعت های فوق العاده بالا (تا چندین ۱۰ متر بر ثانیه) پیدا می کنند. برخورد ذراتی با چنین سرعت و فرکانس بالا به طور مداوم به سطح چرخ باعث کنده شدن فلز و خوردگی آن و از بین رفتن آن می گردد در این محل است که خوردگی هایی شدید به چشم می خورد. در شکل زیر نمونه ای از کاویتاسیون روی پره پمپ مشخص است.



در پمپ های سانتریفوژ هنگام ورود مایع به داخل چرخ، به علت افزایش سرعت فشار موضعی پایین می آید و در نقطه ای نزدیک دهانه ورودی پمپ به حداقل خود می رسد. اگر در این نقطه (فشار مینیمم)، فشار مایع از فشار تقطیر مایع عبوری از پمپ بیشتر باشد مایع در طول حرکت خود در داخل چرخ همواره در یک فاز باقی می ماند و پدیده کاویتاسیون به وجود نخواهد آمد.

نشانه های کاویتاسیون:

کاویتاسیون همواره با صدای منقطع شروع می شود و سپس در صورت ادامه کاهش فشار در دهانه ورودی پمپ، به شدت این صدا افزوده می شود. صدای کاویتاسیون کاملاً معلوم و مشخص بوده و شبیه صدای برخورد گلوله هایی به یک سطح فلزی می باشد.

همزمان با تولید این صداها پمپ نیز به ارتعاش در می آید که در تاسیسات بزرگ ارتعاشات بزرگ تر و صداها شبیه برخورد سنگ ها به پروانه های پمپ می باشد ولی در پمپ های کوچک مخصوصاً در نوع دو ورودی گاهی اوقات تنها صدای خش خش و... می آید که این نشان از این است که کاویتاسیون در حال شروع است.

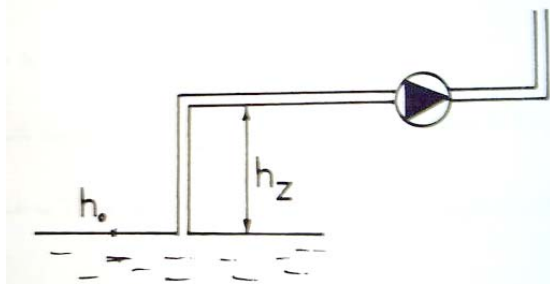
خوردگی های ناشی از کاویتاسیون

خوردگی های شدید فلز توسط کاویتاسیون در محل به وجود آمدن حباب های بخار نیست بلکه هنگامی که این حباب ها همراه جریان به نزدیک محل خروج از چرخ برسند در اثر افزایش فشار به یک باره و به شدت تقطیر می شوند. تقطیر ناگهانی حباب های بخار موجب کوچک شدن فضای اشغالی توسط بخار می گردد در این حالت ذراتی از مایع که در همسایگی این ابر بخار قرار گرفته اند مجبور به پر کردن این فضای خالی خواهند شد این ذرات در اثر اختلاف فشار زیاد،

هد خالص مثبت مکش: NPSH

امروزه جهت کنترل پدیده کاویتاسیون و شرایط لازم جهت به وجود نیامدن این حالت از پارامتر هایی به نام NPSH استفاده می شود. برای این منظور به جای اینکه نقطه مینیمم فشار بر روی پره کنترل شود حداقل فشار در ورودی به پمپ را کنترل تا آن حداقل فشار بر روی پره در نقطه ای به P_{min} برسیم.

خود سازنده این عمل کنترل را انجام می دهد و وقتی می گوید مثلاً NPSH باید a باشد یعنی حداقل فشار در ورودی به پمپ با در نظر گرفتن ارتفاع قبل از پمپ بایستی a باشد طبق شکل داریم:





ارتفاع مکش یک پمپ

که در آن :

h_0 : هد (فشار) مطلق مربوط به سطح مخزن مکش h_z :

ارتفاع سیال قبل از پمپ

h_{vp} : هد (فشار) بخار سیال در درجه حرارت ورودی

h_f : افت هد در اثر اصطکاک در لوله تا قسمت ورودی

پمپ

h_D : فشار دینامیکی موجود پشت پمپ به صورت $C_{12}/2g$

بنابراین هد موجود پشت پمپ برابر است با :

$$h_D = h_0 - h_z - h_f - h_D$$

این فشار بایستی بزرگتر از فشار بخار در درجه حرارت

محیط باشد تا عمل جوشش پیش نیاید و تا حدی می تواند

مساوی این مقدار نیز باشد.

$$h_0 - h_z - h_f - h_D > h_{vp}$$

پس به عبارتی مقدار اختلاف هد ورودی به پمپ و هد

مربوط به فشار بخار بایستی بزرگتر از صفر باشد یعنی :

$$h_0 - h_z - h_f - h_D - h_{vp} > 0$$

به این مقدار NPSH می گوئیم .

$$NPSH = h_0 - h_z - h_f - h_D - h_{vp}$$

بنابراین مفهوم $NPSH > 0$ این است که فشار قبل از

پمپ بیش از فشار بخار باشد و سیال در ورود نجوشد.

بنابراین می توان گفت مقدار NPSH با توجه به تعاریف بالا

به عوامل زیر بستگی دارد:

- با بالا بردن ارتفاع مکش (h_z) مقدار NPSH کاهش

می یابد .

- با ناصاف شدن لوله ورودی (افزایش افت h_f) مقدار

NPSH کاهش می یابد. این پروسه با افزایش طول

لوله نیز نتیجه مشابه دارد . این افزایش طول حتما به

صورت افقی نیز منظور است.

- با افزایش دبی ، چون سرعت ورودی به پمپ

افزایش می یابد . h_D افزایش یافته و NPSH کاهش

می یابد البته همزمان افت نیز بیشتر می گردد. افت

با توان دوم سرعت بستگی دارد .

- با افزایش درجه حرارت محیط ، فشار بخار (h_{vp})

افزایش یافته و NPSH کاهش می یابد .

بنابراین عوامل فوق در ایجاد کاویتاسیون موثر هستند و برای پیشگیری از کاویتاسیون پارامتر های فوق را کنترل نمود. برای مثال در اثر به وجود آمدن کاویتاسیون می توان اولین کاری که انجام داد که شیر خروجی را ببندیم چون این عمل باعث می شود که اولاً سرعت ورود به پمپ کم شده و در نتیجه مقدار h_v کاهش یابد و نیز مقدار افت کم شود و NPSH که کم شده بود زیاد شود .

باید دقت شود که شیر خروجی بسته شود چون بستن شیر ورودی موجب افزایش h_D و کاهش بیشتر NPSH گردد. انواع دیگری از کاویتاسیون

۱- کاویتاسیون ثابت Fixed cavitation

این حالت زمانی اتفاق می افتد که جریان سیال از سطح جامد و بدنه غوطه ور در مایع جدا می شود در اثر این جدایی و ایجاد خلا در آن منطقه جوششی به وجود می آید. سیال مجاور منطقه کاویتاسیون همچنان به حرکت خود که دارای حباب های کوچکی است ادامه می دهد و تا زمانی که حباب ها تحت فشار قرار دارد. شکل خود را حفظ کرده و در ناحیه ای که فشار خارجی افزایش می یابد این حباب ها ترکیده و ناپدید می شوند .

کاویتاسیون ارتعاشی: Vibration Cavitation

این نوع کاویتاسیون در سطوح اجسام جامد غوطه ور که فشار اشباع به وسیله حرکت نوسانی تولید می شود به وجود می آید این نوع کاویتاسیون را می توان در محفظه خنک کن موتور های احتراق داخلی یافت.

کاویتاسیون گردابی Swirling cavitation

این نوع در مناطقی مانند لوله کشی یا اطراف قطعاتی شکل خاصی دارند در مرکز منطقه مغشوش به وجود می



آیند حباب های تولید شده در این نوع نسبت به انواع دیگر آن دارای عمر کمتری می باشند.

نویز و ارتعاشات حاصل از کاویتاسیون:

وقتی که حباب های بخار تجزیه متلاشی می گردند نویز حاصل می شود که این نویز شاخص کاویتاسیون به شمار می رود (مشابه به پمپاژ شن و ماسه) تغییرات رنج های طیف صدا، از ۱۰۰ هرتز به منطقه * (۱۰۰ کیلو هرتز) می رسد. که این مقادیر به مشخصات پمپ بستگی دارد شدت صدای تولیدی توسط پمپ با کاهش مقدار NPSH افزایش می یابد چون که منطقه کاویتاسیون افزایش می یابد.

کاهش نویز در مقدار NPSH کم مربوط به حالت کاویتاسیون کامل بوده جایی که پره کمتر یا بیشتر، دائماً با بخار پر می شود. برای مثال یک پمپ نبایستی بیشتر از 78^{db} صدا داشته باشد این نتیجه در مقدار NPSH برابر ۹ رخ می دهد.

ارتعاشات ناشی از کاویتاسیون نتیجه ۳ عامل است :

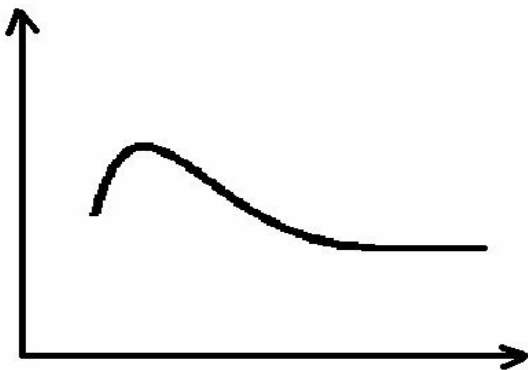
(۱) به خاطر اختلاف در تیغه ها منطقه کاویتاسیون در تمام ناحیه تیغه ها یکسان نیست. در نتیجه دبی اطراف تیغه ها متغیر در یک حالت غیر بالانس و نامتعادل ایجاد می گردد که این منجر به ارتعاش تیغه های پروانه می گردد.

(۲) طول منطقه کاویتاسیون ثابت نیست لذا باعث ارتعاشات با فرکانس بالا می شود

(۳) اگر منطقه کاویتاسیون امتداد داشته باشد طوری که جریان سیال مغشوش گردد (افت هد) سیال پره را ترک کرده و همچنین نامنظم و غیر یکنواخت خواهد شد که این امر منجر به جدایی از تیغه می شود.

(۴) فرکانس ارتعاشات ایجاد شده عبارت است از: فرکانس دورانی \times تعداد تیغه های پره

شکل زیر نشان می دهد که نیروی متغیر در تغییرات رتور تابعی از NPSH می باشد. دامنه ارتعاشات بستگی به صلبیت قطعات پمپ ها با طراحی هیدرولیکی پمپ و طراحی خود سیستم دارد.



تأثیر تغییر نیرو بر NPSH

ایجاد صر و صدا و ارتعاش در پمپ ها مضرات بیشماری را به همراه خواهد داشت از قبیل برخورد قطعات متحرک به ثابت و شل شدن پیچ ها مربوط به فونداسیون و غیره



کاربرد روش عملیات حرارتی تمپرینگ جهت اصلاح سختی در روتورهای نیروگاهی HP

اسماعیل پورسعیدی^۱ - علیرضا رضوی^۱ - علی احمدی^۱

Email: epsaeidi@mail.znu.ac.ir

۱- زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی

۱، ۲ و ۳ - کرج - کیلومتر ۷ جاده ملارد - شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها - ص - پ ۱۱۳۷ -

دارای حداکثر سختی HV ۶۹۸-۳۵۰) و کاهش دامنه پراکندگی سختی در سطح ژورنال روتور اشاره نمود.

۱- مقدمه

تعمیر و استفاده مجدد از قطعات آسیب دیده بعنوان یک روش کاملاً اقتصادی مورد توجه تمام شرکتها و کارخانجات قرار گرفته است. صنعت برق نیز بعنوان یکی از صنایع مهم در هر کشور از این قاعده مستثنی نیست. نیروگاهها بعنوان منابع مولد برق در این صنعت، نقش اصلی را بعهده دارند. اکثر قطعات بکار رفته در نیروگاهها از نظر تولید دارای تکنولوژی بالایی می باشند و بنابر این در صورت بازسازی این قطعات می توان مبالغ زیادی از هزینه ها را کاهش داد. یکی از مهمترین قطعات مورد استفاده در نیروگاهها، روتورها هستند. از آنجائیکه روتورهای نیروگاهی، بسته به شرایط سرویس دهی می بایست دارای مجموعه بهینه ای از خواص فیزیکی - شیمیایی و مکانیکی باشند بنابراین انتخاب نامناسب پارامترهای مؤثر در عملیات حرارتی می تواند روتورهای مزبور را با مشکلاتی همچون ایجاد فازهای ترد و شکننده، سختی ثانویه، ترکها، پوسته ای شدن (Scaling)، اعوجاج ثقلی و... مواجه سازد.

تجارب شرکت های مختلفی همچون شرکت A.B.B آلمان یا L.M.Z روسیه و /یا Elbar هلند که در خصوص تعمیر روتورهای نیروگاهی فعالیت های گسترده ای دارند، نشان داده است که آنها را می توان بسته به اهداف مورد نظر، با استفاده از روش های مختلف حرارتی اصلاح و بازسازی کرد. ولی این کار مستلزم شناخت دقیق متغیرهای عملیات حرارتی

افزایش سختی موضعی در سطح روتورهای نیروگاهی که گاهی اوقات عملکرد روتور را دچار اختلال می کند، می تواند منشاء زیادی داشته باشد. در این مقاله اصلاح محل های تحت سایش ژورنال روتورهای نیروگاهی که بعلت ایجاد اختلال ناگهانی در سیستم روغن رسانی مابین شفت روتور - یاتاقان دچار افزایش سختی موضعی شده اند، بروش عملیات حرارتی تمپرینگ مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، پس از انجام تست سختی سنجی (غیرمخرب) بر روی سطح ژورنال روتور مشخص گردید علت اصلی افزایش بیش از حد سختی با دامنه پراکندگی فراوان (HV ۶۹۸-۳۰۰) عمدتاً استحاله فازی مارتنزیتی و بعضاً عوارض ناشی از تنش های مکانیکی در حوالی محل های مزبور بوده است. بر این اساس سیکل عملیات حرارتی تمپرینگ تدوین و اجرا شد. مبنای طراحی سیکل های حرارتی در روش عملیات حرارتی تمپرینگ در جهت تأمین دو هدف استوار گردید (۱): کاهش سختی محل های آسیب دیده ژورنال روتور در حد قابل قبول (HV ۲۸۰-۲۳۰) و (۲) عدم کاهش سختی یا کاهش معقول سختی محل های سالم. بدین منظور پس از بررسی ها و محاسبات مربوط به فولاد روتور (A۴۷۰Cl.۸)، سیکل عملیات حرارتی مزبور با انتخاب دمای C ۶۸۰ و زمان ۸ hr بعنوان حداقل دما و زمان بهینه جهت تأمین دو هدف مزبور به مورد اجرا گذاشته شد. از نتایج این تحقیق می توان به حذف نواحی ترد (محل های



افزایش سختی (سختی ثانویه) و یا کاهش بیش از حد سختی شود... پس می توان گفت که اثرات تمپرینگ عملاً تنها تابع درجه حرارت نیست بلکه به زمان نگهداری قطعه نیز مربوط می باشد [۲].

۲-۲- اهداف عملیات حرارتی تمپرینگ

هدف از انجام عملیات حرارتی مزبور عبارتست از:

- ۱- تعدیل یا زدودن تنشهای ایجاد شده در حین رخداد حادثه در حین سرویس دهی.
- ۲- کاهش سختی ایجاد شده در اثر سیکلهای مختلف حرارتی یا عوارض مکانیکی ایجاد شده در حین سرویس دهی بر روی قطعه .
- ۳- ایجاد پایداری در حالت دینامیک.
- ۴- افزایش قابلیت انعطاف پذیری و مقاومت به ضربه .
- ۵- تنظیم رابطه مناسب بین ویژگیهای مختلف مکانیکی در قطعه .

۶- کاهش خطر ناشی از شکست ترد ماده (زیرا تنشهای پسماند میتوانند شکست ترد قطعه را حتی در شرایط کاری فراهم نمایند) [۲،۳]. شایان توجه است موارد ۱، ۲ و ۶ از جمله اهداف مورد نظر در این پروژه می باشد .

۲-۳- تدوین پروسه عملیات حرارتی تمپرینگ

مبانی متالورژیکی مربوط به علت انتخاب درجه حرارت ۶۸۰ درجه سانتی گراد بعنوان دمای تمپرینگ در روشهای محاسباتی از این قرار است که:

درجه حرارت مناسب برای تمپرینگ فولادهای کربنی و کم آلیاژی را میتوان با توجه به ترکیب شیمیایی آنها و سختی نهایی مورد نظر بطور تقریبی مشخص کرد. این روش بر اساس فرمولها و نمودارهای ارائه شده توسط Gordon و با این فرض که ریز ساختار فولاد، عمدتاً مارتنزیتی میباشد به صورت زیر بیان می شود [۳].

$$T = 30 (H_c - H_a) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$T =$ درجه حرارت بر حسب فارنهایت

و آگاهی کامل از تأثیر هر یک از آنها بر خواص اساسی روتورها می باشد [۱]. بدیهی است انتخاب متغیرهای بهینه عملیات حرارتی مستلزم شناخت دقیق مواد مورد استفاده در روتورهای نیروگاهی از جنبه های مختلف می باشد. از میان روشهای مرمتی موجود در این حیطة (جوشکاری، اسپری حرارتی، فرایندهای پوششی در مهندسی سطح و...) روش عملیات حرارتی تمپرینگ بعنوان آسانترین، سریعترین و اقتصادی ترین روش (با توجه به امکانات موجود در کارگاه) انتخاب و به مورد اجرا گذاشته شد. بنابر این در پژوهش حاضر سعی بر آن شد تا با استفاده از پارامترهای اساسی عملیات حرارتی تمپرینگ (دما و زمان) دو هدف اساسی زیر تامین شود :

۱) میزان سختی محلهای استحاله یافته (محلهایی که در اثر رخداد این حادثه تحت استحاله فازی مارتنزیتی قرار گرفته و دارای حداکثر سختی هستند) در دامنه قابل قبول کاهش یابد.

۲) میزان سختی محلهای استحاله نیافته (محلهایی که در اثر رخداد این حادثه آسیب ندیده و اساساً دارای ساختار اولیه بینیتی بودند) را تحت تأثیر قرار ندهد و / یا در حد قابل قبول تحت تأثیر قرار دهد.

۲- زمینه علمی (Scientific Background)

۲-۱- عملیات حرارتی تمپرینگ

به طور کلی ، عملیات حرارتی تمپرینگ اساساً عبارتست از : " حرارت دادن فولاد حاوی تنش های داخلی (سخت شده) تا دمایی زیر درجه حرارت A_{e1} ، نگه داشتن آن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق " . آنچه که در این عملیات مهم است، درجه حرارت و زمان نگهداری قطعه در دمای انتخاب شده که هر دو وابستگی شدیدی به ترکیب شیمیایی فولاد ، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر دارند . بدیهی است انتخاب نامناسب دمای تمپرینگ و همچنین زمان نگهداری نامناسب در آن دما ، نه تنها اهداف مورد نظر (زدایش تنش، کاهش سختی و ...) را تامین نمی کند بلکه ممکن است باعث



۳-۲-آزمایشات اولیه

آزمایشات اولیه اساساً شامل سختی سنجی غیر مخرب، رپلیکا (Replica) و تست اعوجاج سنجی Run-out میباشد که در ذیل بطور اختصار توضیح داده شده است.

۳-۲-۱-آزمایش کوانتومتری

ابتدا به منظور شناخت دقیق متریاال مورد استفاده، روتور مزبور تحت تست آنالیز شیمیایی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی، دستیابی به کد فولاد روتور براساس استانداردهای مختلف جهانی و همچنین آگاهی کامل از ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و متالورژیکی می باشد. که در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است.

۳-۲-۲-آزمایش سختی سنجی غیر مخرب

هدف از انجام تست سختی سنجی، بررسی میزان تغییرات سختی در محلهای آسیب دیده (محلهای تحت سایش یا Rubbing) و مقایسه آن با محلهای سالم نظیر کولپینگ روتور می باشد. با تعیین میزان سختی در مناطق آسیب دیده (محل ژورنال) محل دارای ماگزیمم سختی جهت بررسیهای متالوگرافی غیر مخرب علامت گذاری و مشخص می شود. در حقیقت این تست پیش نیاز متالوگرافی غیر مخرب در محل مورد نظر می باشد. نحوه انجام تست سختی سنجی بدین ترتیب بود که ابتدا پیرامون روتور به منظور تعیین ماگزیمم منطقه سختی به نه قسمت تقسیم بندی شدند. این قسمتها با زوایای اصلی $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ و در نقاط مختلف A, B, C در محل ژورنال علامت گذاری شد (مطابق شکل ۴). بدین ترتیب که در مرحله اول تست سختی سنجی بر روی سطح اولیه ژورنال (موضع آسیب دیده) بعمل آمد، سپس آخرین مرحله از تست مزبور پس از عملیات حرارتی انجام گرفت (مطابق جدول ۴).

۳-۲-۳-آزمایش رپلیکا (کپی برداری سطحی)

جهت بررسی ریز ساختاری بطور غیر مخرب، لازم است کپی برداری سطحی از محلهای مورد نظر انجام گیرد.

H_c = سختی راکول محاسبه شده از روی ترکیب

شیمیایی

H_a = سختی راکول مورد نظر پس از بازگشت یا تمپرینگ

اگر درجه حرارت تمپرینگ (بازگشت) را به سانتی گراد

تبدیل کنیم، رابطه فوق به صورت رابطه ۲ در می آید:

$$T = 16,67 (H_c - H_a) - 17,8 \quad (\text{رابطه ۲})$$

توجه: مقادیر مختلف H_c با توجه به درصد کربن و

عناصر آلیاژی از روی نمودارهای نشان داده شده در شکل ۳

بدست می آید. از آنجائیکه با ریز شدن دانه های فولاد

مقاومت آن در برابر نرم شدن در ضمن بازگشت افزایش

می یابد، این اثر نیز باید در نظر گرفته شود.

۳- روش انجام کار (Methodology)

این پروژه اساساً شامل دو مرحله تحقیقاتی و

صنعتی میباشد. مرحله اول شامل بررسیها و آزمایشات

اولیه در کارگاه تعمیرات روتور می باشد که به منظور

ارزیابی کیفی وضعیت روتور مخصوصاً در محل آسیب دیده

ژورنال (شکل ۱) انجام شد، و مرحله دوم که شامل فرکانس

اجرایی عملیات حرارتی تمپرینگ میباشد. در اینجا روند انجام

هر دو مرحله همراه با نتایج مربوطه بطور جداگانه ارائه می

شود.

۳-۱-بررسیهای اولیه

نتایج حاصل از بررسیهای اولیه که شامل بازرسیهای

چشمی بر روی محلهای آسیب دیده ژورنال روتور می باشد،

(شکل ۱)، نمایانگر این واقعیت شد که محلهای مزبور عمدتاً

تحت تأثیر پدیده سایش (Rubbing) بوده است. وجود علائم

موجود بر روی ژورنال همچون سایش سطح خارجی،

خوردگیهای موضعی (شکل ۲)، تخلخلها یا ناهمواریهای سطحی،

خراشیدگی یا ریز ترکههای موجود همگی مؤید همین واقعیت

است.



۷) اجرای سیکل حرارتی از قبل طراحی شده بر اساس پروسه نشان داده شده در شکل ۹.

۵- بحث و نتیجه گیری

براساس گزارش ارسالی از نیروگاه و تحقیقات انجام شده در مورد روند رخداد این حادثه چنین بر می آید که بعلت ایجاد اختلال در سیستم روغن رسانی مابین شفت روتور - یاتاقان از طریق کاهش جریان روغن و بعضاً مسدود شدن راهگاههای روغن، شفت روتور ابتدا در تماس مستقیم با باییت قرار گرفته و سپس با از بین بردن سریع باییت ها (بدلیل نرم بودنشان) در معرض تماس مستقیم با یاتاقان بوده است. در اینجا قصد بر این است تا فعل و انفعالات ایجاد شده در طول رخداد حادثه از نظر متالورژیکی موردتحلیل قرار داده شود. بدین ترتیب که مسدود شدن برخی از راهگاههای روغن و کاهش جریان روغن رسانی به محل ژورنال در اثر ایجاد اختلال در سیستم مزبور، باعث شده تا فیلم روغن موجود در فصل مشترک شفت روتور با باییت سریعاً از بین رفته و لذا شفت روتور سریعاً در تماس مستقیم با یاتاقان قرارگیرد. این امر باعث تشدید اصطکاک و به تبع آن افزایش قابل توجه دما در حد ایجاد تغییراتی در ریزساختار داخلی در حد استحاله فازی در سطح ژورنال روتور می شود. بدیهی است با توجه به دیانگرم استحاله مربوط به فولادهای روتور مزبور، این نوع فولادها در دماهای فراتر از 750°C مستعد به تشکیل فاز آستنیت شده و در صورت تشکیل آستنیت، چنانچه شرایط سردکردن برای فولادهای مزبور حتی در هوای عادی صورت گیرد، استعداد زیادی به ایجاد ساختار مارتنزیتی را فراهم میسازند. چه بسا در این حادثه سطح روتور پس از افزایش قابل توجه دما و در نهایت توقف اضطراری آن در شرایط عادی یعنی هوا همراه بامواردی که به هر نوعی باعث تشدید انتقال حرارت از سطح فولاد روتور شده، سرد شده که این امر کمک بسزایی در تشدید شدت سرد کنندگی محیط و به تبع آن ترغیب رخداد استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت داشته است. این نتیجه با تصاویر حاصل از متالوگرافی غیر مخرب (رپلیکا) در محل آسیب دیده تا حدودی قابل بررسی است. در این شکل

نحوه انجام تست رپلیکا بدین ترتیب است که:

پس از زدودن اکسیدها و عیوب سطحی محل مورد نظر توسط دستگاه فرز دستی با سمباده های چتری با مش ۱۸۰، ۱۸۰، ۲۴۰ به ترتیب سمباده زده شد و در ادامه با سمباده هایی بامشهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ عمل سمباده زنی انجام گرفت. بعد از مراحل سمباده زنی عملیات پولیشینگ انجام پذیرفت و سطح توسط خمیر الماسه های $1\mu\text{m}, 3\mu\text{m}, 6\mu\text{m}$ همراه با نمدهای مربوط به ترتیب پولیش گردید. پس از اچ شدن مرحله نهایی، برچسب رپلیکا توسط استون فعال شده بر روی سطح چسبانیده شد.

برای بررسی رپلیکا ابتدا روی سطح آن پوششی در حدود 30nm از طلا یا کربن داده شد و با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت [۳]. نتایج مربوط به این مرحله در شکل های ۵ و ۶ نشان میدهد که افزایش سختی موضعی در سطح محل ژورنال اساساً ناشی از رخداد استحاله فازی مارتنزیتی می باشد (به دلیل افزایش بیش از حد دما در آن مواضع). بنابر این پروسه عملیات حرارتی تمپرینگ انطباقی بر مبنای کاهش سختی محلهای آسیب دیده ژورنال روتور در حد قابل قبول ($280-330$ ویکرز) در ضمن عدم کاهش سختی یا کاهش معقول سختی در محلهای سالم بر طبق مراحل زیر به مورد اجرا گذاشته شد.

۴- مراحل اجرایی عملیات حرارتی تمپرینگ در محل

ژورنال روتورهای نیروگاهی

۱) پاشش محلول کربنات کلسیم به منظور جلوگیری

از رخداد اکسیداسیون (مطابق شکل ۷).

۲) نصب ورقه های مسی قبل از نصب المنت ها و بعد

از ترموکوپل ها در منطقه تحت عملیات حرارتی

۳) نصب ترموکوپل ها در منطقه تحت عملیات حرارتی

۴) نصب المنت های مقاومتی در منطقه تحت عملیات

حرارتی (مطابق شکل ۸).

۵) عایق کاری کل منطقه تحت عملیات حرارتی

۶) اجرای عملیات عمودی کردن روتور مزبور



یابد و برعکس [۶]. این امر که ناشی از عدم کنترل پارامترهای عملیات حرارتی در حین پروسه تولید است و معمولاً هم در فولادهای روتور به چشم می خورد ، می تواند رفتار استحاله ای ژورنال را در قبال این حادثه (سایش ژورنال و افزایش سختی توام با دامنه پراکندگی فراوان) به طرقی در مواضع مختلف تحت تاثیر قرار دهد .

• بررسی اثر سرعت گرمایش

در این حوزه ، بررسی اثر سرعت گرمایش بر روی دماهای بحرانی و تاثیراتش بر اجزای ریز ساختاری (ذرات کاربیدی) مورد بررسی قرار میگیرد. که این نیز منجر به تنوع سختی می شود. از آنجائیکه در این تحقیق سرعت گرمایش خیلی سریع و زمان توقف در دمای حداکثر ، خیلی کوتاه است در نتیجه اثرات استحاله اهمیت پیدا می کند . سرعت گرم شدن بالا باعث می شود استحاله های نفوذی از قبیل فریت/پرلیت/بینیت به آستنیت مشکل شود. بدین ترتیب که دماهای موثر استحاله از قبیل دمای بحرانی پائین A_{C1} و دمای بحرانی بالا A_{C3} در نمودار فازی Fe-Fe₃C افزایش یابد. اثر سرعت گرم شدن با مقادیر بالاتر عناصر کاربیدزا از قبیل W, V, Mo, Cr از بین می رود زیرا این عناصر سرعت نفوذ پائین تری دارند و نفوذ کربن را به تاخیر می اندازند . (استحاله نفوذی را کند میکنند) از طرف دیگر سرعت گرمایش بالا همراه با زمان توقف کوتاه در دمای بالا ، نیز باعث تشکیل آستنیت ناهمگن می شود که دلیل این موضوع ، انحلال سریع کاربیدهایی از قبیل سمنتیت از پرلیت یا فاز دیگر می باشد . به دلیل عدم فرصت کافی برای نفوذ یا همگن شدن بعضی از مناطق بطور موضعی غنی از کربن می شوند سپس به علت سریع سرد شدن بعدی (نسبتاً سریع) پس از این حادثه و سختی پذیری بالای این فولاد ، این نوع ناهمگنی

به هم ریختگی ساختاری و تغییرات قابل توجه این ساختار نسبت به ساختارهای گرفته شده از محل سالم (شکل ۶) بعنوان ساختار مرجع) بوضوح مشخص است . مشاهده می شود که لایه های بینیتی در اثر بروز این حادثه کاملاً از بین رفته و مورفولوژی آن کمی شبیه به ساختار مارتنزیتی در این گونه فولادهاست .

بررسی نتایج سختی سنجی از دیگر مواردی است که مؤید رخداد استحاله فازی M- γ در مواضع خاصی از روتور می باشد، مطابق نتایج سختی سنجی دامنه استاندارد سختی روتور از HV ۲۲۰ تا HV ۲۸۰ (قبل از حادثه) به حداکثر HV ۶۹۸ صعود کرده است . این میزان سختی دقیقاً منطبق بر میزان سختی نشان داده شده در منطقه فازی مارتنزیت می باشد [۴]. نکته دیگری که محوریت اصلی این پروژه محسوب میشود وجود تنوع سختی با دامنه پراکندگی فراوان در سطح ژورنال میباشد. در ادامه بحث به بررسی پارامترهای متالورژیکی و مکانیکی موثر بر تنوع سختی پرداخته میشود. این پارامترها اساساً عبارتند از :

(۱) بررسی اثر تاریخچه تولید فولاد از جهات مختلف

(۲) بررسی اثر سرعت گرمایش

(۳) بررسی اثر سرعت سرمایش و تنشهای تماسی و

استحاله ای

بدیهی است عدم کنترل دقیق پارامترهای عملیات حرارتی آستنیت کردن فولاد روتور در حین پروسه تولید، منجر به تنوع اندازه دانه می گردد به گونه ای که محققان، عدد اندازه دانه را در روتورها بین ۹-۵ اندازه گیری و گزارش می دهند [۵]. تنوع در ابعاد دانه ها، منجر به تنوع شدت سختی پذیری شده، به گونه ای که برخی از مواضع شفت روتور که دارای ابعاد دانه ای بزرگتری است سختی پذیری به شدت افزایش یافته و این بدان مفهوم است که حتی با اعمال یک سیستم حرارتی یکسان نسبت به مکانهای دانه ریز فولاد ، میزان استعداد فولاد در قسمتهای دانه درشت به ترغیب استحاله های مارتنزیتی / برشی به شدت افزایش می



کریستال نظیر جاهای خالی، نابجائیهها و ... می باشد که محصول نهایی همه عیوب فوق، ایجاد میدانهای تنشیهی اعم از میدانهای تنشیهی فشاریهی و کششیهی در اطراف خود می باشد. آنچه که در اینجا مورد توجه است، اندرکنش میدانهای تنشیهی مزبور با همدیگر است که اثرات بسزایی بر روی افزایش سختیهی در مواضع مشخصیهی از ژورنال می گردد.

آنچه در فوق گفته شد مربوط به مکانیزمهای افزایش سختیهی و تنوع آن در سطح ژورنال روتور میباشد ولی در ذیل به مکانیزمهای سختیهی زدایی پس از انجام عملیات حرارتیهی تمپرینگ پرداخته می شود که با قصد دستیابی به دما و زمان بهینه در عملیات حرارتیهی تمپرینگ به منظور کاهش دامنه پراکندگی سختیهی در محل مزبور، انجام میشود. بعبارت دیگر مبنای طراحی عملیات حرارتیهی تمپرینگ انجام شده براساس دما و زمان مناسب جهت کاهش سختیهی فازمارتنزیت در مواضعیهی که استحاله مارتنزیتیهی صورت گرفته و از طرف دیگر عدم کاهش سختیهی یا عدم تأثیر گذاری جدی بر ریز ساختار اصلی روتور یعنی بینیت تمپر شده استوار شده است. در ادامه به روند بازگشت سختیهی در طی اجرای سیکلهای عملیات حرارتیهی پرداخته می شود.

از آنجاییکه مارتنزیت فازی بسیار مستحکم ولی در عین حال بسیار ترد و شکننده می باشد لذا لازم است که خواص مکانیکیهی آن با انجام عملیات حرارتیهی در محدوده 200°C تا 700°C اصلاح شود. این فرآیند بازگشت نامیده می شود. اساساً مارتنزیت یک محلول جامد فوق اشباع از کربن در آهن است که در حین بازگشت کربن را به صورت کاربید ظریف خارج می کند. نتیجه نهایی بازگشت توزیع مناسب کاربیدها در زمینه ای از آهن است. باید در نظر داشت که در بسیاری از فولادها واکنش تشکیل مارتنزیت در اثر سرمایهش کامل نمی شود که نتیجه آن مقادیر متفاوتیهی آستنیت باقیمانده است که در خلال عملیات بازگشت به فولاد صورت ناپایدار باقی می ماند. افزایش عناصر آلیاژی به فولاد اثر اساسی بر سینتیک استحاله های فوق دارد. بیشتر عناصر آلیاژی معمولی رخداد استحاله های فوق را به طرف دماها

باعث تشکیل مناطقی با مارتنزیت پرکربن بطور موضعی می شود و به همین دلیل سختیهی بطور وسیع در منطقه آسیب دیده از پراکندگی زیادیهی برخوردار است [۷].

• بررسی اثر سرعت سرمایهش

بطور اجمالی، به لحاظ متنوع بودن سرعت گرمایش در حین رخداد حادثه (به دلایلی که قبلاً گفته شد) و به تبع آن تغییرات مورفولوژیکی، ماهیت یا حتی سینتیک استحاله های حاصله، بدیهی است سرعت تنوع سرمایهش نیز باعث تغییرات مزبور می گردد. علت تنوع سرعتهای سرمایهش در محل ژورنال پس از رخداد حادثه را می توان به عواملی همچون: وجود فیلم روغن در برخی از مواضع ژورنال و عدم وجود روغن در مواضع دیگر، متنوع بودن تغییرات دمایی، در شفت ژورنال و سایر دلایل دیگر نام برد. این تنوع در سرعت سرمایهش تأثیر بسزایی در تنوع مورفولوژی و ماهیت محصولات ریزساختاری دارد. به گونه ای که در حین سرد شدن متنوع، آستنیت به مورفولوژیهای متفاوت، (مارتنزیت ظریف و خشن) تبدیل می شود [۶].

علاوه بر بررسی اثرات پارامترهای متالورژیکی که در قسمتهای قبل ذکر شده نباید از اثرات مکانیکیهی دخیل در این حادثه غافل ماند. در این قسمت عمدتاً پارامترهایی همچون تنشهای استحاله ای ناشی از تغییرات ساختاری در سطح ژورنال و همچنین تنشهای مکانیکیهی ناشی از سایش دو سطح لغزنده، اشاره میشود که محصول این تنشها، رخداد پدیده کار سختیهی (Work hardening) در سطح ژورنال می باشد بدین مفهوم که با ایجاد تغییر شکل پلاستیکیهی موضعی ناشی از تنشهای تماسی در برخی از مواضع ژورنال، مواضع مزبور دچار نوعی تغییر و تحولات زیر ساختاری می شوند. این تغییر و تحولات اساساً شامل افزایش عیوب



تمپرینگ به ترتیب تادمای 690°C و زمان 5hr جهت کاهش بیشتر سختی قابل افزایش است.

مراجع

- ۱) عبدالمجید حبیب الهی، "تأثیر جوشکاری تعمیراتی بر عملکرد محورهای نیروگاهی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶
- ۲) ASM handbook, "Heat Treating", Vol. ۴, August ۱۹۹۱, PP. ۳۳-۳۴.
- ۳) Charlie R. Brooks, "Principles of the Heat treatment of plain carbon and alloy steels", ASM International, December ۱۹۹۶, PP. ۱۲۷-۱۳۶.
- ۴) Ron Van Gestel, "Rotor Repairs", ASME - Presented at the International Gas Turbines, Netherlands, June ۱۳-۱۶, ۱۹۹۴.
- ۵) سید حسن حائریان، "بررسی پارامترهای مؤثر بر عملیات حرارتی فولادهای کم آلیاژی نیکل-کروم-مولیبدن-وانادیم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹
- ۶) R.i.Jaffee, "Rotor forgings for Turbines and Generators", Proceedings of International workshop sponsored by Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, September ۱۴-۱۷, ۱۹۸۰.
- ۷) Viswanathan R. "Damage Mechanisms and life Assessment of High Temperature Components" ASM International pub, ۱۹۸۳.

وزمانهای طولانی تر انتقال می دهند. در خصوص اثر عناصر آلیاژی بر تشکیل کاربیدها گفته میشود چهار وجهی بودن مارتنزیت تا 300°C در فولادهای ساده کربنی از بین می رود. ولی در فولادهایی که حاوی عناصر آلیاژی همچون کرم، مولیبدن، تنگستن، وانادیم، تیتانیم و سیلیسیم می باشند. چهار وجهی بعد از بازگشت در 450°C حتی فراتر از آن مشاهده می شود. بر اساس مطالب فوق می توان نتیجه گرفت که کاهش سختی در ژورنال پس از عملیات حرارتی تمپرینگ (شکل ۱۰) می تواند متاثر از موارد زیر باشد:

- ۱- کاهش / خروج اتمهای فوق اشباع کربن در شبکه مارتنزیت در طول عملیات حرارتی تمپرینگ
- ۲- کاهش/ازبین رفتن شبکه اعوجاج یافته مارتنزیت و تبدیل آن به فریت متعارف در طول عملیات حرارتی تمپرینگ
- ۳- کاهش/ازبین رفتن نابعیهای و سایر عیوب کریستالی حاصل از شبکه اعوجاج یافته مارتنزیت در طول عملیات حرارتی تمپرینگ (یعنی کاهش اثرات کار سختی)
- ۴- افزایش اندازه رسوبات کاربیدهای آلیاژی [۳].

۷- جمع بندی نتایج

۱) نتایج حاصل از بررسیها و آزمایشات اولیه (رپلیکا و سختی سنجی) نشان داد که افزایش سختی موضعی در سطح محل ژورنال ناشی از رخداد استحاله فازی مارتنزیتی می باشد (به دلیل افزایش بیش از حد دما در آن مواضع) ولی افزایش سختی موضعی (نه چندان قابل توجه) در برخی مواضع در اثر عوارض ناشی از تنشهای مکانیکی (سایش) می باشد.

۲) در طول اجرای سیکلهای حرارتی در عملیات تمپرینگ مشاهده شد که با افزایش دما و زمان تمپرینگ میزان سختی اساساً روبه کاهش می نهد به گونه ای که مشخص گردید که دمای 680°C و زمان 8hr بعنوان دما و زمان بهینه جهت ایجاد یک انطباق نسبی سختی بین محلهای آسیب دیده و سالم می باشد.

۳) از تجارب حاصل از اجرای سیکلهای مختلف حرارتی در عملیات تمپرینگ چنین استنتاج می شود افزایش دما و زمان



جدول ۱: محدوده ترکیب شیمیایی استاندارد مربوط به فولاد روتور توربین کمپرسور (A۴۷۰ CL.۸) همراه با کد فولاد روتور برحسب استانداردهای مختلف جهانی

نام عنصر	%C	Si	Mn	P,S	Cr	Ni	Mo	V
درصد وزنی	۰.۲۵ -	۰.۱۵-	۱-۰.۷	۰.۰۱۵	۰.۹-	۰.۷۵	۱-۱.۲	۰.۲-
عنصر	۰.۳۵	۰.۳۵			۱.۵			۰.۳
DIN			ASTM		تجاری			
۱.۸۰۷۰			A۴۷۰-class.۸		۲۱CrMoV۵۱۱			

جدول ۲: نتیجه آنالیز کوانتومتری مربوط به فولاد روتور تحت بررسی

نام عنصر	%C	Si	Mn	P,S	Cr	Mo	Ni	V
درصد وزنی عنصر	0.27	0.2	0.79	0.02	0.97	1.22	0.31	0.26

جدول ۳: خواص مکانیکی فولاد روتور در دمای محیط

A	B	C
238	253	266
298	269	265
409	634	260
508	659	286
566	648	261
590	597	235
508	698	269
418	680	280
251	279	256

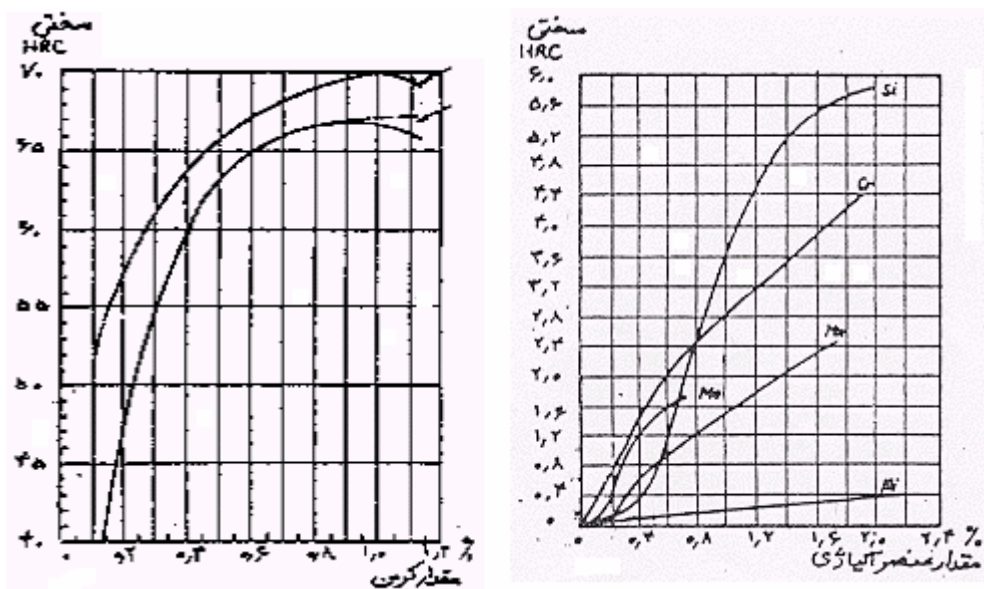
جدول ۴: نتایج مربوط به تست سختی سنجی در محل آسیب دیده (قبل از عملیات حرارتی)



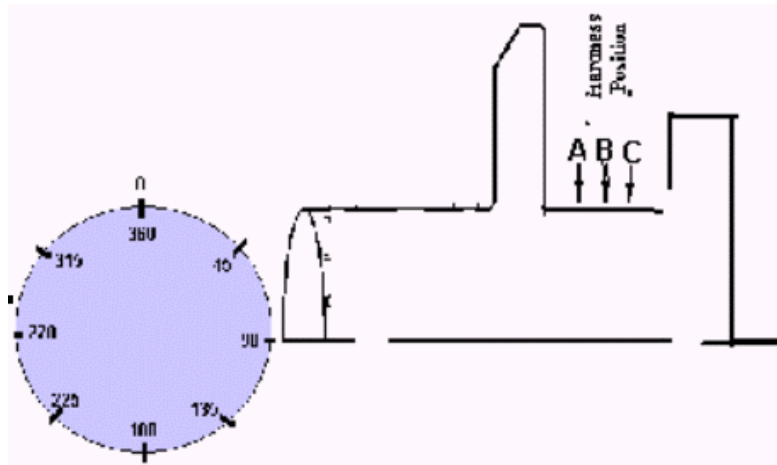
شکل ۱: نمای از یک روتور نیروگاهی که در قسمت ژورنال دچار افزایش سختی شده است.



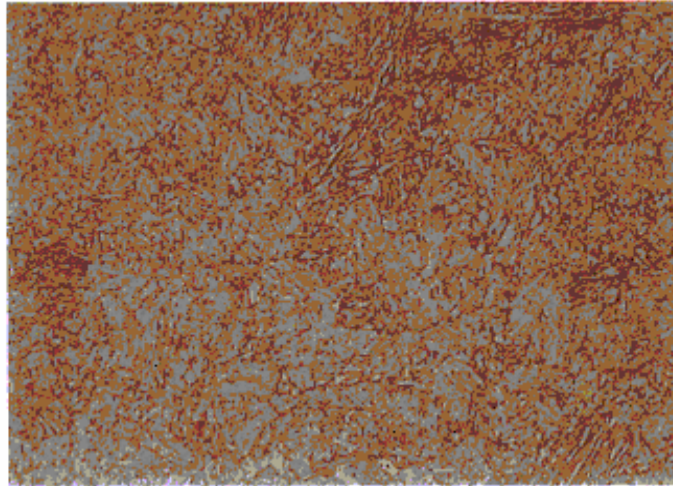
شکل ۲: حضور اثرات ناشی از ایجاد اصطکاک/سایش شدید بین ژورنال و یاتاقان



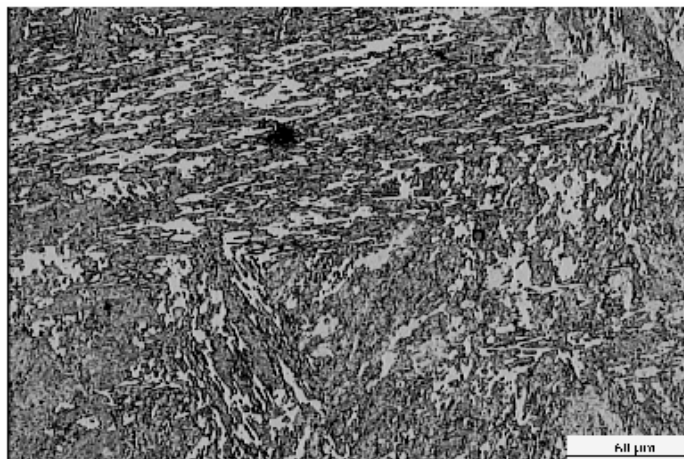
شکل ۳: افزایش سختی راکول سی Hc بر حسب درصد های مختلف کربن و عناصر آلیاژی فولاد



شکل ۴: نواحی و موقعیت تحت آزمایش بر روی سطح خارجی روتور



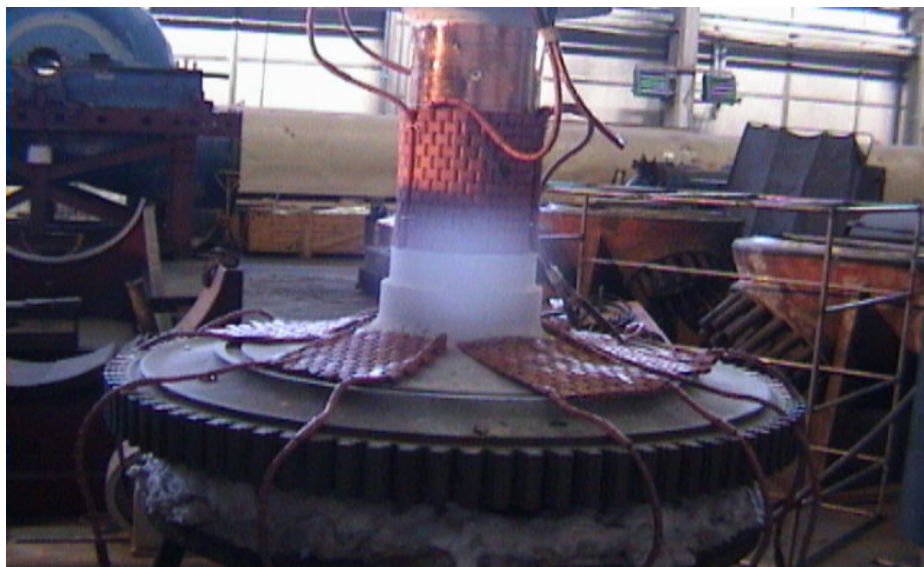
شکل ۵: ریز ساختار مربوط به منطقه آسیب دیده ژورنال



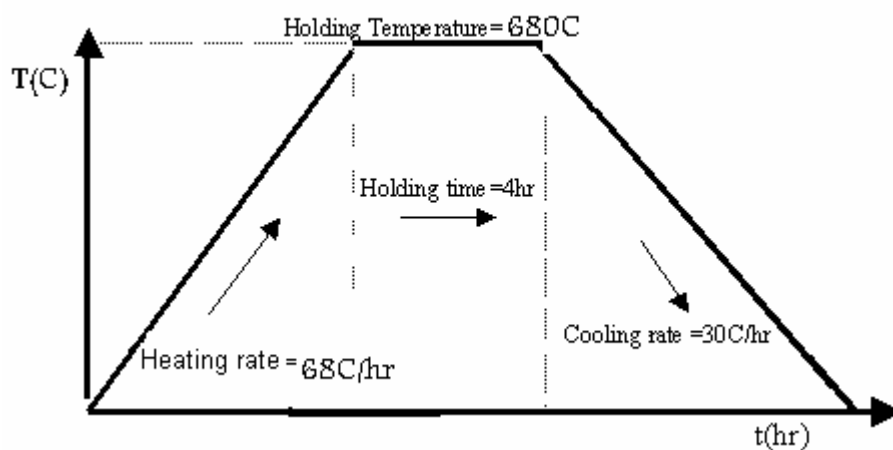
شکل ۶: ریز ساختار مرجع مربوط به فولاد روتور (محلول اچ ۲٪ نایتال)



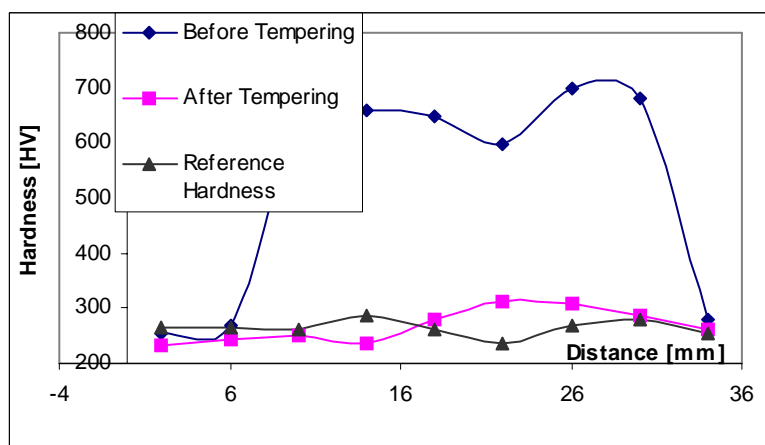
شکل ۷: پاشش محلول کربنات کلسیم به منظور جلوگیری از رخدادهای اکسیداسیون



شکل ۸: نصب ترموکوپل ها و المنت های مقاومتی در منطقه تحت عملیات حرارتی



شکل ۹: سیکل اجرای عملیات حرارتی تمپرینگ اجرا شده بر روی روتور مزبور در محل ژورنال



شکل ۱۰: میزان تاثیر گذاری عملیات حرارتی تمپرینگ با بررسی نتایج سختی در سه حالت قبل و بعد از عملیات

حرارتی و مقایسه آن با سختی مرجع



آنالیز تخریب فن خنک کاری ژنراتور مدل ۳۷۰-۲۴۰ شرکت GEC ALSTHOM

اسماعیل پورسعیدی^۱ - علی احمدی^۲

Email: epsaeidi@mail.znu.ac.ir

۱- زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی

۲- کرج - کیلومتر ۷ جاده ملارد - شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها - ص - پ ۱۱۳۷-۳۱۵۸۵

واژه های کلیدی: آنالیز تخریب، پره فن و سطوح شکست

چکیده

ژنراتور مدل ۳۷۰-۲۴۰ شرکت GEC ALSTHOM ۱۰ ساعت پس از تعمیرات اساسی دچار حادثه شد. در بررسی وضعیت داخلی ژنراتور علاوه بر شکست ۳ پره فن خنک کاری و آسیب دیدگی سایر پره ها، تعداد زیادی از شینه ها، رینگ نگهدارنده و گاید هوا نیز دچار آسیب گردیده اند. جهت بررسی علل شکست پره های فن، بررسی ها و آزمایشهایی شامل بازرسی ظاهری، اندازه گیری ابعادی، مایعات نافذ، آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، متالوگرافی و شکست نگاری صورت گرفت. بر اساس نتایج آزمایشهای سختی سنجی و متالوگرافی مشخص گردید که تغییرات سختی و یا ساختار محدود به نواحی متاثر از آسیبهای ناشی از نشت الکتریکی (ذوب سطحی و قوس زدگی) می باشد. بررسی های سطح شکست نیز نشان داد که شکست پره ها بر اثر مکانیزم خستگی در سیکلهای زیاد، تحت دامنه تنش متغیر و میانگین کم صورت گرفته است. جوانه زنی ترکهای خستگی در قسمت وسط سطح پره و در هر دو قسمت مقعر و محدب اتفاق افتاده است و اشاعه اولیه ترکهای خستگی عمدتاً بصورت درون دانه ای بوده که تا انتها ادامه داشته است. عیوب خاص مرتبط با ساخت و یا علائم سطحی غیرعادی اطراف نواحی جوانه زنی مشاهده نمی شود.

۱- مقدمه و تاریخچه کارکرد

واحد شش گازی نیروگاه منتظر قائم از نوع ۳۷۰-۲۴۰ ساخت شرکت GEC ALSTHOM با مشخصات عمومی شامل سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، توان خروجی ۱۱۸ مگاوات و فرکانس ۵۰ هرتز می باشد. ژنراتور آن دارای دو فن در دو انتها، یکی در سمت توربین (کوپلینگ) و دیگری در سمت تحریک است. هرفن شامل یازده پره که هر پره توسط دو پیچ روی رینگ نگهدارنده بسته می شود، می باشد. با توجه به اینکه این چهارمین حادثه مشابه در ژنراتور های واحدهای دیگر می باشد لذا بررسی علل این حادثه اهمیت زیادی دارد. حادثه اول مربوط به ژنراتور نیروگاه نیشابور بود که در حین آزمایشهای نهایی در کارخانه سازنده اتفاق افتاده است. همچنین حادثه دوم نیز مربوط به یکی دیگر از واحدهای نیروگاه نیشابور بود که در حین آزمایشهای راه اندازی اولیه واحد اتفاق افتاد. سومین حادثه نیز در یکی از واحدهای نیروگاه منتظر قائم رخ داده بود. شایان توجه است که Mounting Angle اولیه پره ها ۱۴ درجه بوده است که شرکت سازنده ژنراتور اقدام به اصلاح آنها و تغییر زاویه پره ها از ۱۴ به ۱۹ درجه نموده است ولی پس از رخداد حادثه نیشابور اقدام به تعویض پره های ۱۹ درجه به همان پره های با زاویه ۱۴ درجه قدیم در نیروگاه نیشابور نمود، ولی این اقدام در واحدهای نیروگاه منتظر قائم صورت نگرفته بود [۱].

۲- شرح حادثه شکست

ژنراتور واحد ۶ بعد از تعمیرات اساسی راه اندازی گردید و با شبکه پارالل شد. اما پس از ۱۰ ساعت کار رله های حفاظت ژنراتور عمل نمودند و واحد تریپ نمود. در این حادثه دو در ورودی بازرسی ژنراتور از جا کنده شده و به فاصله چند متر به بیرون پرتاب شدند. در بررسی وضعیت داخلی ژنراتور مشخص شد که علاوه بر شکست ۳ پره و آسیب دیدگی سایر پره های فن خنک کاری ژنراتور، تعداد زیادی از شینه ها، رینگ نگهدارنده و گاید هوا نیز دچار آسیب گردیده اند. هیچگونه لرزش غیرعادی ژنراتور یا افزایش دما در فاصله زمانی ۱۰ ساعته از راه اندازی پس از

- دکترای مکانیک^۱

- کارشناس ارشد مکانیک^۲



تعمیرات اساسی ثبت نشده و دریافت علائم نشت الکتریکی باعث توقف خودکار سیستم شده است. اطلاعات ارتعاشات مربوط به سنسورهای یاتاقان ژنراتور سمت کولپینگ تا لحظه تریپ بدلیل نقص فنی فاقد اعتبار بوده و نمی توان به آنها اعتماد کرد. در حالیکه فن سمت تحریک دچار هیچگونه خسارتی نشده ولی فن سمت کولپینگ دچار خسارت شدید شده است. وضعیت و موقعیت شماتیک پره های فن سمت کولپینگ نسبت به یکدیگر در یک نمای کلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- روشهای آزمایش

جهت بررسی علل شکست پره های فن، بررسی ها و آزمایشهایی شامل بازرسی ظاهری، اندازه گیری ابعادی، مایعات نافذ، آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، متالوگرافی و شکست نگاری صورت گرفت. بازرسی چشمی و شکست نگاری پره ها با استفاده از ذره بین، میکروسکوپ نوری، استریو میکروسکوپ و میکروسکوپ الکترونی SEM در بزرگنمایی *۲۰ الی *۱۰۰۰۰ انجام شد. آنالیز شیمیایی پره ها با استفاده از کوانتومتری و آنالیز شیمیایی رسوبات با استفاده از میکروپروب به روش EDAX انجام گرفت. ساختار میکروسکوپی پره ها پس از آماده سازی نمونه های لازم توسط میکروسکوپ نوری و تحلیل گر تصویری (Image Analyzer) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت اندازه گیری ابعاد، وزن و مقایسه سختی نواحی مختلف پره ها و همچنین تعیین مشخصات آسبهای سطحی بترتیب از کولیس، ترازو، دستگاه سختی سنجی بروش برینل و زبری سنج استفاده شده است. بدین منظور نمونه هایی از موقعیت های مختلف پره ها تهیه شدند. موقعیت نمونه های مربوط به آزمایشهای مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۱- آزمایشهای بازرسی چشمی، مایعات نافذ، اندازه گیری ابعادی، وزن و زبری

بر اساس بازرسی ظاهری و آزمایش مایعات نافذ روی پره های سمت کولپینگ و تحریک به منظور مشاهده عیوب و ترکهای سطحی، پره های فن سمت کولپینگ به سه دسته شامل پره های کاملاً شکسته، پره های حاوی ترک و پره های فاقد ترک طبقه بندی شدند (جدول ۱). اندازه گیری ابعادی انجام شده در جهت عرضی روی سه مقطع مختلف Airfoil تغییر در هندسه و کاهش ابعادی را نشان می دهد. کاهش عرض پره در سه مقطع اندازه گیری روی سه پره جدا شده (پره های ۱ و ۸ و ۱۱) بسیار کمتر از بقیه پره ها است. همچنین کلیه پره ها کاهش وزن حدود ۱۸.۳g-۹.۲g نسبت به وزن حک شده روی پره هارانشان می دهند. لذا می توان گفت که پس از جدا شدن پره های شکسته شده عرض پره ها کاهش یافته است. اندازه گیری صافی سطح پره ها کاهش بسیار زیادی را نشان می دهند که در بعضی از قسمتها روی Airfoil اثرات Pitting کاملاً مشاهده می شود (شکل ۳).

۳-۲- آزمایش آنالیز شیمیایی

ترکیب شیمیایی پره ها با استفاده از روش کوانتومتری تعیین گردید. بدین منظور دو نمونه از پره های ۳ و ۴ از ناحیه ۲ شکل ۲ مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج حاصله در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده آلیاژ بکار رفته در ساخت پره ها حاوی مقدار متوسط ۴/۲ درصد وزنی مس می باشد که باتوجه به مقدار Si، Mg و Mn موجود نزدیکترین ترکیب استاندارد آلیاژ ۲۱۲۴ آلومینیوم که کارپذیر و عملیات حرارتی پذیر می باشد. باتوجه به قابلیت رسوب سختی این آلیاژ، انجام عملیات حرارتی پیر کردن منجر به تشکیل رسوبات بسیار ریز و افزایش استحکام آن می شود. این آلیاژ در مقایسه با آلیاژهای قدیمی تر ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ حاوی آهن و سیلیسیم کمتری



است. با کاهش مقادیر آهن و سیلیسیم تمایل به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی درشت کاهش یافته و چقرمگی شکست و انعطاف‌پذیری افزایش می‌یابد. درحالی‌که خواص استحکامی در همان سطح حفظ می‌شوند.

۳-۳- آزمایش متالوگرافی

به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی، نمونه‌هایی مطابق شکل ۲ از مقاطع طولی و عرضی پره‌های ۳ و ۴ تهیه شدند که پس از آماده‌سازی توسط محلول اصلاح شده Keller اچ شدند. سپس سطوح نمونه‌های متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی *۵۰ الی *۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر ساختار میکروسکوپی پره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ساختار میکروسکوپی پره‌ها متشکل از دانه‌های کشیده شده در امتداد محور طولی پره به همراه ذرات بین‌فلزی پراکنده می‌باشد. تجمعی از ذرات بین‌فلزی در نزدیکی سطح آزاد در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر ذرات بین‌فلزی، نمونه‌های متالوگرافی توسط میکروسکوپ الکترونی SEM مورد بررسی قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی این ذرات با استفاده از روش نیمه کمی EDAX مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده ذرات سفید، خاکستری و تیره مشاهده شده در تصویر الکترونی برگشتی شامل ترکیبات متفاوتی از مس، منیزیم، منگنز و آهن به همراه آلومینیوم می‌باشند (جدول ۳ و شکل ۵).

۳-۴- آزمایش سختی‌سنجی

به منظور بررسی مقدار سختی پره‌ها و تغییرات آن در نواحی مختلف از آزمایش سختی‌سنجی به روش برینل تحت بار ۱۲۵kgf و قطر ساچمه ۵mm استفاده شد. سختی پره‌های فن سمت کپلینگ و سمت تحریک در منطقه پایه در قسمت بالای سوراخ‌های تعبیه شده (ناحیه ۱۰ شکل ۲)، بترتیب در محدوده ۱۳۱ ± ۳ و ۱۳۵ ± ۴ برینل قرار دارند. سختی متوسط ناحیه ایرفویل در مقاطع طولی پره‌های ۳ و ۴ به ترتیب ۱۳۲ و ۱۲۸ و مقاطع عرضی به ترتیب برابر ۱۳۳ و ۱۳۰ اندازه‌گیری شد که در محدوده سختی پایه‌ها قرار دارد. به منظور بررسی تأثیر قوس‌زدگی بر روی مقدار سختی، مقطع عرضی از ناحیه قوس زده نزدیک به رأس پره ۴ تهیه شد (ناحیه ۸ شکل ۲) که سختی متوسط در این ناحیه به ۱۱۲ برینل کاهش یافته است. با دور شدن از ناحیه قوس‌زدگی، سختی ایرفویل به مقدار اولیه ۱۳۰ برینل افزایش می‌یابد. سختی ناحیه ایرفویل پره‌های شکسته نیز مستقیماً بر روی ایرفویل‌ها اندازه‌گیری شد که مقدار متوسط سختی ایرفویل پره ۸، ۱ و ۱۱ (در نواحی دور از اثرات ذوب سطحی) به ترتیب برابر ۱۳۰، ۱۳۲ و ۱۳۰ برینل بدست آمد که در محدوده سختی پره‌ها قرار دارد. در پره‌های ۱۱ با نزدیک شدن به نواحی ذوب سطحی سختی پره افت محسوسی را نشان می‌دهد بطوریکه در پره ۱ مقدار متوسط سختی از ۱۳۰ برینل به مقدار متوسط ۱۰۸ و حداقل ۹۹ برینل کاهش می‌یابد (جدول ۴). تغییرات سختی در پره ۱ در امتداد دو مسیر طولی با دور شدن از ناحیه ذوب سطحی به تدریج به مقدار اولیه افزایش می‌یابد.

۳-۵- شکست‌نگاری

تصاویر سطوح شکست ایرفویل پره‌های ۱، ۸ و ۱۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. جزئیات سطح شکست ایرفویل پره ۱ دلیل ذوب سطحی چندان قابل تشخیص نیست و آثار دوده بر روی سطح شکست ایرفویل ۱۱ نیز به چشم می‌خورد. سطوح شکست کلیه ایرفویل‌ها در مقیاس ماکروسکوپی از دو ناحیه مجزا و مشخص تشکیل شده است. ناحیه اول، ناحیه‌ای به شکل نیم‌بیضی است که روشن‌تر و دارای زبری سطحی کمتری است و جهت‌گیری آن عمود بر



محور طولی ایرفویل می‌باشد و ناحیه دوم که در بیرون ناحیه نیم بیضی شکل قرار داشته و در تصویر تیره‌تر و با زبری سطحی و پستی و بلندی‌های بیشتر دیده می‌شود. جهت‌گیری عمومی صفحات شکست در این ناحیه متفاوت است و شامل سطوح مورب با زاویه تقریبی ۴۵ درجه نیز می‌باشد. در تصویر سطح شکست ایرفویل ۸ در ناحیه مسطح و نیم‌بیضی شکل در سمت لبه حمله در بزرگنمایی ۲ برابر تشکیل خطوط ساحلی (Beach Marks) موازی در مقیاس ماکروسکوپی در شکل ۶ قابل تشخیص می‌باشد. تصویری از سطح شکست ایرفویل ۱۱ در ناحیه مسطح و نیم بیضی در بزرگنمایی *۲۵۰۰ در شکل ۷ نمایش داده شده است که در آن تشکیل خطوط موازی (Striation) بر روی سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی نیز مشاهده می‌شود. مجموعه شواهد شامل، وجود دو ناحیه مجزا، حضور خطوط ساحلی در مقیاس ماکروسکوپی و تشکیل خطوط موازی در مقیاس میکروسکوپی همگی دلالت بر شکست پره‌ها از طریق مکانیزم خستگی تحت بارگذاری تناوبی دارند. بنابراین ناحیه نیم بیضی شکل در سطوح شکست ایرفویل‌ها، ناحیه شکست خستگی و ناحیه دیگر ناحیه شکست نهایی می‌باشد. جوانه زنی و رشد ترک در ناحیه نیم‌بیضی شکل تحت بارگذاری سیکلی و تناوبی و در ناحیه شکست نهایی در اثر Overload کششی و یا خمشی اتفاق افتاده است. با رشد ترک خستگی و گسترش ناحیه نیم‌بیضی شکل، سطح مقطع باقیمانده کوچکتر شده و پس از رسیدن ابعاد ترک به مقدار بحرانی، سطح باقیمانده به صورت ناگهانی دچار شکست می‌شود. مقایسه سطوح شکست ایرفویل پره‌های ۱، ۸ و ۱۱ در شکل ۸ نشان می‌دهد که ناحیه شکست نهایی بخش کوچکی از سطح شکست را تشکیل می‌دهد، لذا فرآیند بارگذاری تناوبی در طی شکست پره‌ها از نوع خستگی در سیکل زیاد (HCF) قلمداد می‌شود. در این شکل نواحی جوانه‌زنی اولیه ترک و مسیر کلی و ماکروسکوپی اشاعه ترکهای خستگی در هر یک از پره‌ها ترسیم گردیده‌اند. به طوریکه ملاحظه می‌شود جوانه‌زنی ترکهای اصلی خستگی در پره‌های ۱ و ۸ در سطح مقعر داخلی ایرفویل و در پره‌های ۱۱ در سطح محدب خارجی ایرفویل صورت پذیرفته است. در کلیه مقاطع شکسته شده، جوانه‌زنی و تشکیل ترکهای اولیه و کوچک خستگی به شکل نیم‌بیضی‌های کوچک، در سمت مخالف رشد ترک اصلی (عامل شکست) نیز مشاهده می‌شوند. از مقایسه شکل کلی ناحیه اصلی نیم‌بیضی شکل و ترکهای ریز تشکیل شده در سمت مخالف می‌توان نتیجه گرفت که ترکهای خستگی رشد ترجیحی بیشتری در امتداد قطر بزرگتر بیضی داشته‌اند. به عبارت دیگر رشد ترکهای اولیه در امتداد سطح ایرفویل سریعتر از رشد ترک در جلو آن یعنی در عمق ایرفویل بوده است. این اثرات حاکی از نقش مؤثر تنشهای خمشی در رشد ترک خستگی در پره‌ها می‌باشد.

در تصاویر سطح شکست ریشه پره‌های ۱ و ۱۱، خطوط شعاعی برجسته و نسبتاً روشن منشعب از نواحی جوانه‌زنی و تشکیل شده در مسیر رشد ترک مشخص هستند. امتداد خطوط مذکور در جهت عکس به نقاط یا نواحی جوانه‌زنی ختم می‌گردد. تصویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه جوانه‌زنی پره ۸ در بزرگنمایی *۱۵۰ در شکل ۹ نشان می‌دهد که جوانه‌زنی عمدتاً از نوع زیرسطحی بوده و محل آن در نزدیک سطح ایرفویل قرار دارد. بررسی‌های انجام شده در بزرگنمایی‌های بالاتر در میکروسکوپ الکترونی بیانگر وجود ذرات بین فلزی در برخی از نواحی جوانه‌زنی می‌باشد. در شکل ۱۰ یکی از نواحی جوانه‌زنی در ایرفویل پره ۱۱ نشان داده شده است. جهت آشکارسازی اجزای ساختاری موجود در محل جوانه‌زنی، این ناحیه توسط محلول اچانت، اچ شد که در نتیجه آن تجمع ذرات بین‌فلزی در این ناحیه در تصویر مشهود می‌باشد. لازم به ذکر است که در بررسی تصاویر سطوح شکست در محل‌های مختلف جوانه‌زنی و بررسی‌های چشمی انجام شده بر روی سطح پره‌ها در اطراف محل‌های جوانه‌زنی اثراتی نظیر کندگی، حفره و یا ترکهای مرزخانه‌ای ناشی از اصابت جسم خارجی و یا فرآیندهای خوردگی تنش مشاهده نمی‌شود. همچنین در این نواحی عیوب خاصی که مرتبط با ساخت پره‌ها باشد به چشم نمی‌خورد. بررسی سطوح شکست ایرفویل‌های مختلف



در نواحی اطراف محل جوانه‌زنی حاکی از حالت درون‌دانه‌ای (Transgranular) رشد ترک‌های خستگی می‌باشد که به طور تریجی از داخل دانه‌های نشان داده شده در ساختار متالوگرافی اشاعه یافته و پیشروی می‌کنند (شکل ۴).
 باتوجه به عدم مشاهده رشد اولیه ترک‌های خستگی بر روی سطوح لغزش مورب و در زاویه تقریبی 45° نسبت به محور ایرفویل، در مقاطع شکست مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که ترک‌های خستگی پس از جوانه‌زنی مستقیماً وارد مرحله II یا رشد ترک بر روی سطوح قائم بر محور پره شده‌اند. بنابراین ناحیه نیم‌بیضی شکل ترک خستگی در سطوح شکست پره‌ها به طور کلی شامل ناحیه رشد ترک‌های مرحله II می‌باشد، این مسأله باتوجه به خصوصیات متالورژیکی آلیاژ نظیر کشیدگی دانه‌ها در امتداد محور طولی پره و حضور ذرات فاز دوم در اغلب مناطق جوانه‌زنی دور از انتظار نمی‌باشد. به طور کلی حالت درون‌دانه‌ای رشد ترک‌های خستگی در نواحی مختلف ناحیه نیم‌بیضی شکل حاکم می‌باشد. انجام بررسی در نواحی مختلف سطح شکست خستگی حاکی از عدم حضور ترک‌های ثانویه، یا ترک‌های متقاطع با ترک اصلی خستگی در زیر سطح شکست می‌باشد.

۴- فرضیات شکست و تحلیل آنها

در ابتدا فرضیات و نظریاتی بعنوان عوامل شکست پره‌ها مطرح شدند. این فرضیات شامل برخورد شی خارجی با پره‌ها، اشکال در نصب، ضعف متریال، نقص در تولید، ایجاد پدیده Pitting ناشی از محیط کاری پره‌ها، تنش‌های حرارتی، ارتعاشات پره‌ها در اثر ارتعاشات روتور، اغتشاشات آیرودینامیکی جریان هوا در اطراف پره‌ها (اشتباه یا ضعف در طراحی و شکل آیرودینامیکی پره‌ها)، تغییرات چگالی جریان هوا (افزایش چگالی هوا در اثر وجود ذرات بخار روغن در هوا) و ضعف شدن عایق شینه‌های ژنراتور می‌باشند. لذا بمنظور دستیابی به نتیجه مطلوب این فرضیه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و فرکتوگرافی سطح شکست که مبین اعمال خستگی روی پره‌ها بوده است، لذا فرضیه برخورد شی خارجی و ایجاد تغییر شکل یا شکست ناگهانی منتفی گردید و مشکل نصب، ضعف متریالی و ساخت مشاهده نگردید.

در مورد فرضیه ارتعاشات پره‌ها با توجه به اشاعه اولیه ترک‌های خستگی در سطوح داخلی و خارجی ایرفویل پره‌های شکسته شده ۱ و ۸ حاکی از لرزشها یا ارتعاشات غیرعادی سیستم در طی حادثه می‌باشد. افزایش ناحیه شکست نهایی بر روی سطح شکست پره ۱۱ در مقایسه با دو پره شکسته شده ۸ و ۱ و تشکیل ترک‌های طویل در سایر پره‌ها حاکی از تشدید لرزشها و تنشهای خمشی نوسانی حاصله به مرور پیشروی حادثه می‌باشد. سطح مقطع باقیمانده پره ۱ (بعنوان محتمل ترین پره شکسته شده قبل از بقیه پره‌ها) حدود ۲۰٪ کل سطح مقطع ایرفویل پره می‌باشد. لذا بطور کلی می‌توان نتیجه گیری کرد که سطح تنشهای اعمالی به پره نسبت به تنش تسلیم در سطح پائین قرار داشته و تعداد سیکل‌های ارتعاشی زیاد بوده است. لذا می‌توان نتیجه گیری کرد که عامل شکست پره‌ها، تنش‌های خمشی تناوبی بوده است. با توجه به اینکه نشی روغن باعث آلودگی هوای اتمسفر در حال سیر کوله خنک کاری ژنراتور می‌شود که آلوده بودن کولر ژنراتور مبین وجود اتمسفر آلوده به روغن است. لذا تاثیر اتمسفر آلوده به روغن که با اتمسفر طراحی متفاوت است و سبب اعمال نیروی بیش از حد طراحی روی پره‌ها می‌گردد، می‌تواند عامل شکست پره در اثر خستگی باشد ولی با عنایت به شروع و رشد ترک‌ها از هر دو سمت محدب و مقعر این عامل نیز مردود گردید. باتوجه به نوع حادثه و وجود حفاظت‌های متعدد جهت کنترل ژنراتور وقوع این حادثه در اثر ضعف عایقی بسیار ضعیف است بخصوص آنکه تست رله ای حفاظت ژنراتور بطور کامل صورت گرفته است و پس از وقوع حادثه نیز صحت تنظیم‌های صورت گرفته یکبار کنترل گردیده است. همچنین اطلاعات حاصل از عملیات بازسازی



ژنراتور حاکی از عدم وجود نقص ساخت در هسته و شینه های ژنراتور مورد بحث است و شینه های آسیب دیده همگی در اثر وقوع این حادثه صدمه دیده اند. لذا این احتمال نیز منتفی قلمداد می گردد.

۵- بحث

بر اساس بررسی سطوح شکست پره ها، شکست بر اثر مکانیزم تدریجی و پیشرونده خستگی اتفاق افتاده است. ترکهای خستگی در یک یا چند ناحیه در سطح آزاد و یا در نزدیکی آن و در محل اتصال ایرفویل به پایه تشکیل شده و به مرور زمان به ابعاد بحرانی اشاعه یافته اند. در برخی نواحی جوانه زنی حضور ترکیبات درشت بین فلزی مشهود می باشد و عیوب خاصی که مرتبط با ساخت پره ها باشد به چشم نمی خورد. با توجه به مساحت کم ناحیه شکست نهایی در سطوح شکست پره ها، می توان نتیجه گرفت که فرآیند خستگی در سیکل های زیاد HCF و دامنه تنش ارتعاشی بالا و تنش میانگین کم بر روی پره ها فعال بوده است. در پره های فن، نوسانات تنش در فرآیند خستگی در سیکل های زیاد مرتبط با نیروهای خمشی ناشی از ارتعاشات سیستم و نیروی وزن در طی چرخش پره ها می باشد.

بررسی سطوح شکست پره های ۱ و ۸ نشانگر جوانه زنی ترکهای متعدد خستگی بر روی سطح محدب خارجی می باشد. این نواحی بصورت نواحی نیم بیضی شکل که در امتداد سطح خارجی کشیده شده اند در تصاویر سطوح شکست (شکل ۶) و شکلهای شماتیک ترسیم شده از سطوح شکست (شکل ۸) مشاهده می شوند. حالت نیم بیضی شکل این نواحی می تواند حاکی از جوانه زنی و رشد اولیه آنها تحت تاثیر تنشهای خمشی وارد شده بر سطح محدب خارجی باشد. لذا، سطوح داخلی و خارجی صفحه ایرفویل بطور همزمان تحت تأثیر تنشهای خمشی مخالف قرار داشته اند. این شرایط بارگذاری می تواند بیانگر لرزشها یا ارتعاشات غیرعادی سیستم در طی حادثه باشد که در نتیجه آن سطوح داخلی و خارجی ایرفویل تحت تنشهای خمشی تناوبی قرار گرفته اند. مقایسه سطوح شکست ایرفویل پره های ۱ و ۸، اولین و آخرین ایرفویل شکسته شده نیز نشان از افزایش مساحت ناحیه شکست نهایی در ایرفویل ۱۱ دارد. این افزایش می تواند حاکی از تشدید لرزش سیستم، افزایش دامنه نوسانات تنش و افزایش میزان تنش میانگین بر اثر شکست پره های ۱ و ۸ باشد. مقایسه ابعاد ترکهای تشکیل شده در سایر پره ها نیز نشان می دهد که در کلیه پره های حاوی ترک، طول ترک حداقل به ۸۰ mm در سطح مقعر داخلی ایرفویل می رسد (جدول ۵). تشکیل ترکهای بزرگ و تقریباً یک اندازه در این پره ها نیز نشانگر افزایش دامنه نوسانات تنش بر اثر افزایش لرزشهای سیستم و متعاقب آن جوانه زنی سریع ترکهای خستگی و یا رشد سریع ترکهای اولیه به ابعاد بزرگتر در ادامه حادثه می باشد.

در شکل ۱۳ سطح ترک موجود در ایرفویل یکی از پره های حاوی ترک (پره ۷)، نشان داده شده است. به منظور آشکار شدن سطح ترک موجود در این پره، مقطع باقیمانده در امتداد ترک به دقت بریده شده و در انتها با اعمال نیروی مکانیکی سریع سطوح ترک از یکدیگر باز شدند، سطح ترک پوشیده از مواد استفاده شده در آزمایش غیرمخرب مایعات نافذ است. این آزمایش پس از حادثه بر روی پره ها انجام شده بود. ناحیه نیم بیضی شکل ناشی از رشد ترک خستگی در شکل به خوبی نمایان است. بررسی دقیقتر تصویر حاکی از ورود ترک خستگی به مرحله شکست نهایی می باشد. نفوذ مواد استفاده شده در آزمایش غیرمخرب به خارج ناحیه نیمه بیضی شکل و تغییر خصوصیات ماکروسکوپی سطح شکست نشانگر این انتقال است. بنابراین با از کار افتادن ژنراتور و فن، ادامه شکست نهایی پره ۷ متوقف شده و شکست نهایی بطور کامل محقق نشده است. مقایسه سطح ترک خستگی در این ایرفویل با سایر ایرفویل های شکسته شده، نشان دهنده افزایش شدید دامنه نوسانات تنش و تنش ماکزیمم در مراحل پایانی حادثه می باشد. نتایج بدست آمده از آزمایشهای سختی سنجی و متالوگرافی حاکی از آنست که سختی ناحیه ریشه پره های



فن سمت توربین (131HB) و پره‌های فن سمت تحریک (135HB) در یک محدوده قرار دارند. همچنین سختی ایرفویل‌های شکسته شده در بیرون نواحی ذوب سطحی نیز در محدوده کلی سختی نواحی ریشه قرار دارد. کلیه مقادیر سختی فوق نیز با سختی آلیاژ T6-2014 (135HB) مطابقت نزدیکی دارند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که شکست پره‌ها تحت تأثیر افت خواص مکانیکی به جهت قرار گرفتن در معرض دماهای بالاتر از دمای سرویس نبوده است. بعلاوه بررسی‌های انجام شده حاکی از آنست که نشت الکتریکی و Flash Over که می‌توانسته موجب افزایش دمای ژنراتور بشود پس از شکست هر سه ایرفویل آغاز گردیده است. بنابراین به نظر می‌رسد نشت الکتریکی و افزایش موضعی دما اثر ثانویه شکست ایرفویل‌ها و پرتاب آنها به داخل ژنراتور باشد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱- شکست پره‌ها بر اثر مکانیزم خستگی در سیکل‌های زیاد تحت دامنه تنش متغیر و میانگین کم صورت گرفته است.
- ۲- جوانه‌زنی ترک‌های خستگی ترجیحاً در ارتباط با ترکیبات درشت بین فلزی موجود در ساختار اتفاق افتاده است. عیوب خاص مرتبط با ساخت و یا علائم سطحی غیرعادی اطراف نواحی جوانه‌زنی مشاهده نمی‌شود. اشاعه اولیه ترک‌های خستگی عمدتاً بصورت درون دانه‌ای بوده که تا انتها ادامه داشته است.
- ۳- جوانه‌زنی ترک‌های نیم بیضی‌شکل خستگی در سطح خارجی ایرفویل پره‌های شکسته ۱ و ۸ حاکی از لرزشها یا ارتعاشات غیرعادی سیستم در طی حادثه می‌باشد.
- ۴- افزایش ناحیه شکست نهایی بر روی سطح شکست پره ۱۱ در مقایسه با دو پره شکسته دیگر و تشکیل ترک‌های طویل در سایر پره‌ها حاکی از تشدید لرزشها و تنشهای خمشی نوسانی حاصله به مرور پیشروی حادثه می‌باشد. لذا محتملترین ترتیب شکست پره‌ها، به ترتیب ۱، ۸ و ۱۱ می‌باشد.
- ۵- براساس نتایج آزمایشهای گسترده سختی‌سنجی و متالوگرافی، تغییرات سختی و یا ساختار محدود به نواحی متأثر از آسیبهایی ناشی از نشت الکتریکی نظیر ذوب سطحی و قوس زدگی می‌باشد.
- ۶- آسیبهایی ناشی از نشت الکتریکی و Flash Over پس از شکست پره‌های ۱، ۸ و ۱۱ اتفاق افتاده است.
- ۷- با توجه به رد فرضیات در نظر گرفته شده و نتایج کلیه تست‌های انجام شده می‌توان گفت جریان هوای اطراف ایرفویلها در بعضی شرایط خاص دچار اغتشاش گردیده و باعث ارتعاش پره‌ها و نهایتاً شکست آنها می‌گردد. عوامل ارتعاش پره‌ها می‌تواند ناشی از ارتعاشات روتور، اغتشاشات هوای اطراف پره‌ها در اثر ضعف طراحی و عدم انتخاب زوایه مناسب (بعنوان پارامتر غالب)، افزایش چگالی هوا در اثر وجود ذرات بخار روغن در هوا و تغییر چگالی هوا در یک دور چرخش روتور و ایجاد اغتشاش حاصل از تغییر چگالی هوا باشد. لذا جهت تجزیه و تحلیل دقیقتر پیشنهاد میگردد آنالیز تنش با استفاده از نرم افزارهای پیشرفته F.E.M. با در نظر گرفتن سیال با چگالیهای مختلف بعنوان شرایط مرزی صورت گیرد و ضمناً با عنایت به طراحی اولیه این پره‌ها زوایه پره‌ها از ۱۹ درجه به ۱۴ درجه کاهش یابد.

مراجع

- ۱- پورسعیدی، اسماعیل، احمدی. علی "گزارش نهایی بررسی علل شکست پره‌های فن ژنراتور نیروگاه منتظر قائم"، شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، اسفند ماه ۱۳۸۲.



جدول ۱: مشخصات، وضعیت و طبقه بندی پره ها

ن	طبقه بندی	شماره پره	شرایط پره ها
کوپلینگ	شکسته	۱ و ۸ و ۱۱	ایرفویل جدا شده
	حاوی ترک	۲ و ۳ و ۵ و ۷ و ۹ و ۱۰	ترکهای لبه ای و مرکزی
	بدون ترک	۴ و ۶	فاقد ترکهای سطحی
تحریک	ظاهر سالم	۱ الی ۱۱	فاقد ترک و آسیبهای سطحی

جدول ۲: نتایج و مقایسه آنالیز شیمیایی آن با آلیاژ ۲۱۲۴

	S i	F e max	C u	M n	M g	Z n max
۲ ۱۲۴	۰ /۲۰ max	۰ /۳۰	۳ -۸ ۴/۹	۰ /۳۰ - ۰/۹	۱ /۲ - ۱/۸	۰ /۲۵
۴ ۳	۰ /۱۶۹	۰ /۱۱۰	۴ /۱۶۳	۰ /۶۲۶	۱ /۷۲۲	۰ /۰۲۹
۳ ۳	۰ /۱۶۷	۰ /۱۰۵	۴ /۱۹۶	۰ /۶۲۰	۱ /۷۲۱	۰ /۰۲۹
	T i max	C r max	N i	P b	S n	
۲ ۱۲۴	۰ /۱۵	۰ /۱۰	-	-	-	
۴ ۳	۰ /۰۰۶	۰ /۰۰۶	۰ /۰۰۳	۰ /۰۰۹	۰ /۱۷۵	
۳ ۳	۰ /۰۰۶	۰ /۰۰۶	۰ /۰۰۳	۰ /۰۰۸	۰ /۱۶۹	

جدول ۳: آنالیز EDS کمی رسوبات (درصدوزنی)

نقطه c	نقطه b	نقطه a	عنصر
/۲۶۵ ۳۷	/۱۳۸ ۵۲	/۷۷۸ ۲۷	Al
/۱۲۵ ۲۵	-	-	Fe
/۹۲۵	/۸۶۲	/۵۲۳	Cu



۳۹	۴۷	۶۴	
۶۸۵/ ۱۰	-	-	Mn
-	-	۷/۶۹۹	Mg

جدول ۴: نتایج سختی سنجی پره های شکسته شده او ۱۱

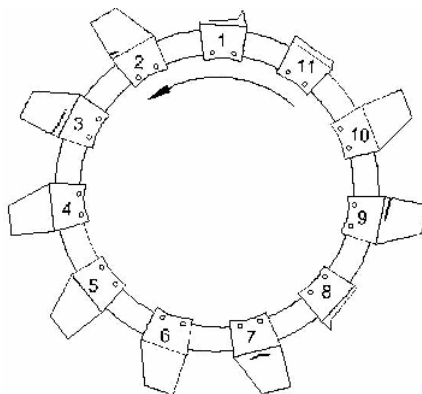
شماره پره	نزدیک سمت سطح شکست	سمت میانی	را س لبه	نزدیک ک سطح شکست	سمت میانی	موقعیت	
						داخلی	خارجی
۱	۱۱۵	۱	۱	۱۲	۱		
		۲۵	۳۰	۳	۲۱		
	۱۱۱	۱	۱	۱۲	-		
		۳۰	۳۰	۳			
A vg.	۹۸,۶	۱	۱	۱۲	-		
		۲۵	۳۰	۵			
	۱۰۸	۱	۱	۱۲	-		
		۲۷	۳۰	۴			
۱	۱۳۰	-		-	-		۱۷
	۱۳۳	-		-	-		۱۹
	۱۳۳	-		-	-		۲۵
A vg.	۱۳۲	-		-	-		۲۰

جدول ۵: طول تقریبی ترک در پره های (mm)

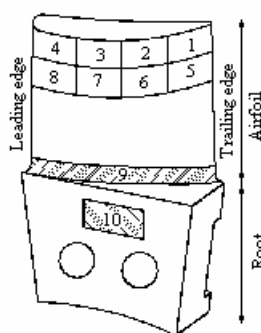
شماره پره					موقعیت
۱۰	۹	۷	۳	۲	
۲۳	۶۸	۷۰	۳	۲۴	سطح خارجی



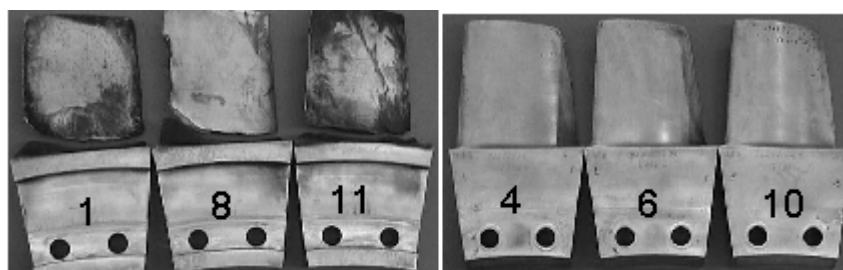
-	۸۰	-	۹۰	۷۹	سطح داخلی
---	----	---	----	----	-----------



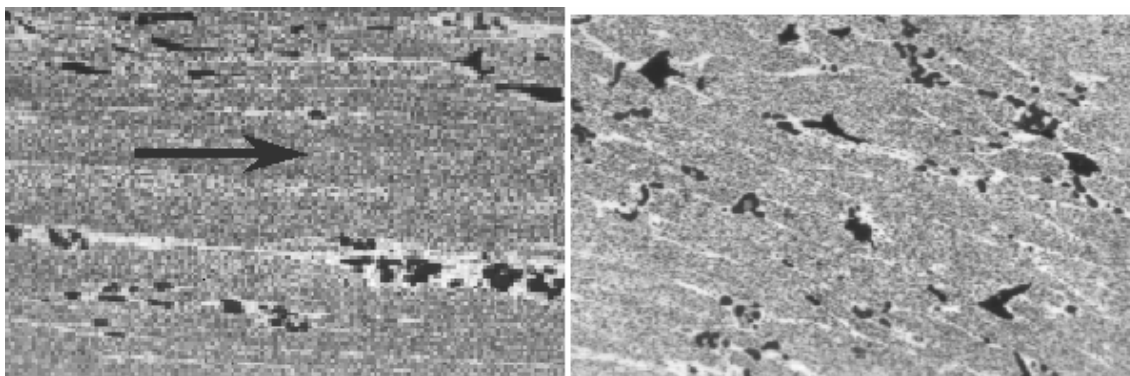
شکل ۱: موقعیت پره های فن سمت توربین



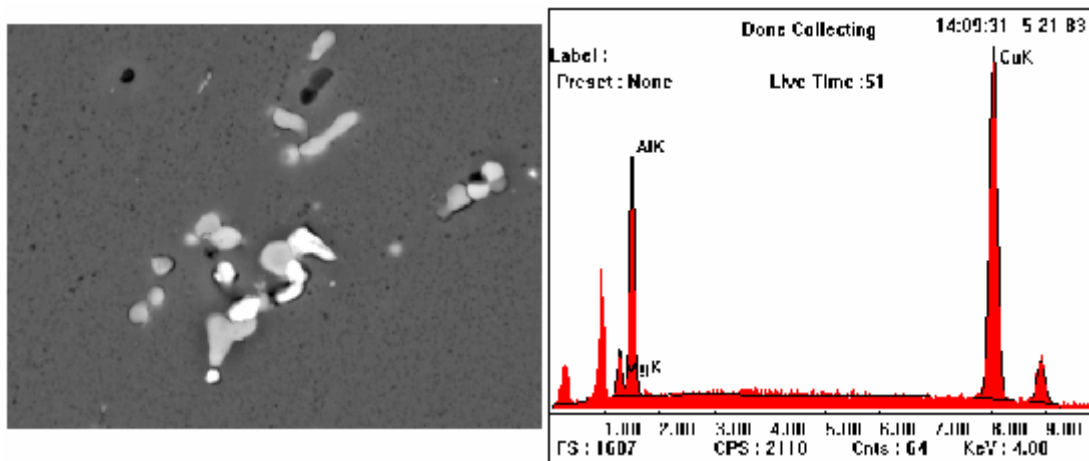
شکل ۲: موقعیت نمونه های تهیه شده برای آزمایشها (SEM: ۱، ۴؛ Chemical Analysis: ۲؛ Fractography: ۹؛ Hardness, Metallography: ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰)



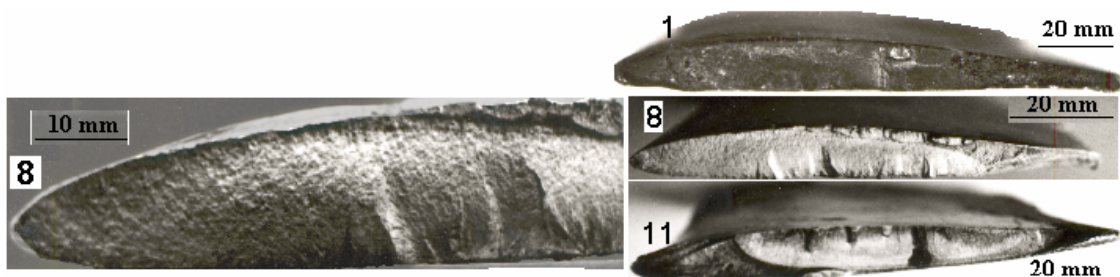
شکل ۳: نمای کلی پره های بدون ترک (۶ و ۱۰) و شکسته (۸ و ۱۱) سمت کولینگ



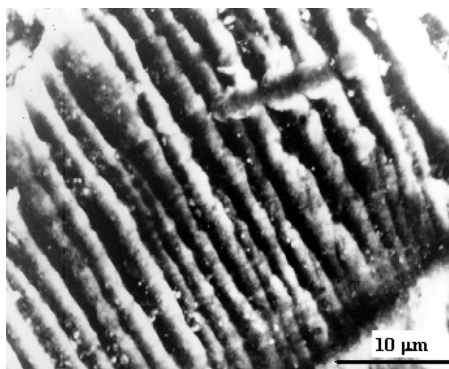
شکل ۴: ساختار میکروسکوپی مقطع طولی پره ها (جهت پیکان راستای طولی ایرفویل) و تجمع ذرات بین فلزی در نزدیکی سطح در بزرگنمایی ۲۰۰x



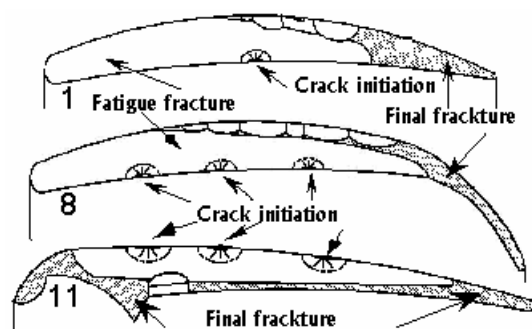
شکل ۵: تصویر الکترونیهای برگشتی از رسوبات زمینه ۱۰۰۰x و آنالیز کمی از رسوب EDS نقطه a



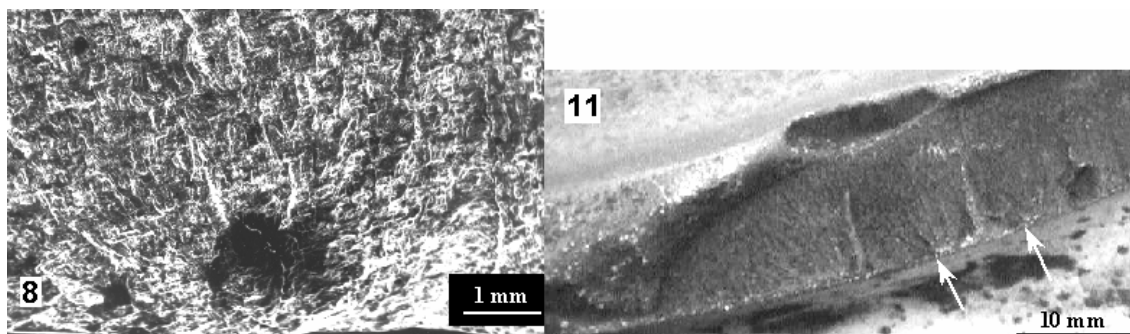
شکل ۶: سطوح شکست ایرفویل پره ها ۱، ۸ و ۱۱ و خطوط ساحلی سطح شکست خستگی ایرفویل پره شماره ۸ (بزرگنمایی ۲x)



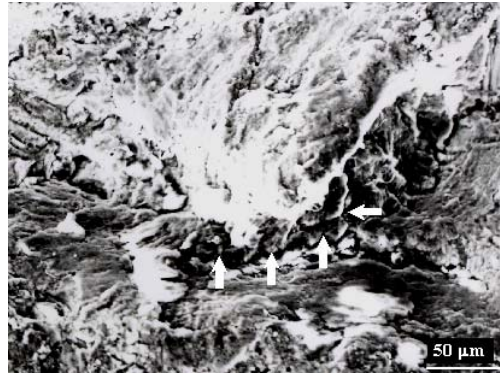
شکل ۷: خطوط موازی و موج میکروسکوپی سطح شکست ایرفویل پره شماره ۱۱ (بزرگنمایی ۲۵۰۰x)



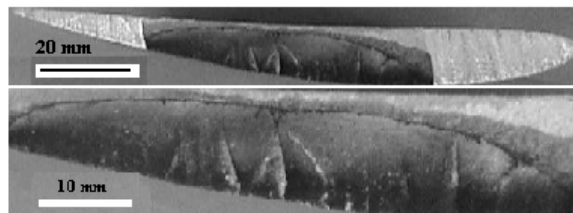
شکل ۸: شماتیک سطوح شکست ایرفویل پره های بترتیب ۱، ۸ و ۱۱



شکل ۹: محل های جوانه زنی ترک در سطح شکست ریشه پره ۱۱ (بزرگنمایی ۲x) و تصویر میکروسکوپ الکترونی از نواحی جوانه زنی پره ۸



شکل ۱۰: تجمع ذرات بین فلزی در منطقه جوانه زنی ترک خستگی در پره شماره ۱۱



شکل ۱۱: سطح ترک باز شده ایرفویل پره شماره ۷ (از نمای دور و نزدیک)



تحلیل شکست پره های فن خنک کن ژنراتور توربین گاز

علی جهانگیری - محمد هادی کامروا

میثم احمدیان کیسمی - پیمان احمدیان نمینی

(دانشگاه صنعت آب و برق)

چکیده

از آنجائیکه راندمان ژنراتورهای مولد برق متأثر از افزایش دما می‌باشد، یک سیستم خنک کاری برای کنترل دمای ژنراتورها استفاده می‌شود. این خنک کاری با آب، هوا و گاز هیدروژن انجام می‌شود. پنج مورد شکست پره‌های فن خنک کن ژنراتور با هوا در توربین گاز، موجب خسارات مالی فراوانی شده است. این مقاله به تحلیل شکست پره‌ها از دیدگاه‌های زیر می‌پردازد: ۱- بررسی آماری ۲- بررسی جنس ۳- بررسی خصوصیات مکانیکی ۴- بررسی سطوح شکست با SEM ۵- تحلیل نیروها و تنشهای وارد بر پره به کمک آنالیز CFD ۶- آنالیز مودال پره به کمک نرم افزار Ansys

مقدمه

ژنراتور آخرین حلقه از زنجیره ماشین‌آلات در یک مرکز تولید برق است. دقت در حفاظت و جلوگیری از بروز هرگونه مشکل در این قسمت، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. برای نگهداری بهتر و افزایش کارایی ژنراتور، استفاده از یک سیستم خنک‌کننده برای دفع حرارت تولید شده در شینه‌ها و مدارهای الکتریکی ژنراتور ضروریست. یکی از روش‌های معمول استفاده از فن‌های محوری است. شکل ظاهری پره فن در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای خنک‌کن در یک سیکل بسته چرخش می‌کند، بدین ترتیب که هوا پس از عبور از داخل روتور گرم شده، از قسمت بالای ژنراتور خارج می‌شود و با عبور از یک کولر، با جریان آب خنک می‌شود. هوا پس از سرد شدن، مجدداً از طرفین به سمت روتور هدایت می‌شود و توسط فن‌هایی که روی حلقه نگهدارنده ژنراتور (Retaining Ring)

نصب شده‌اند، به طرفین روتور دمیده می‌شود. هر فن از ۱۱ پره تشکیل شده است که با ۱۱ قطعه فاصله دهنده از هم جدا می‌شوند. در شکل ۲ نمای کلی ژنراتور و چرخه هوا را نشان داده شده است. [۱]
در پنج مورد پره‌های فن ژنراتور این نوع توربین گاز در ۱۰۰ ساعت اولیه بهره برداری (پس از اولین راه اندازی و یا پس از تعمیرات) شکسته است و در مواردی پره‌های شکسته شده در شینه‌های استاتور فرو رفته، موجب اتصال کوتاه بین روتور و استاتور شده و باعث انفجار واحد و بروز خسارات مالی فراوان شده است. به منظور بررسی علل شکست پره، این موضوع از دیدگاه‌های مختلف به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

۱- بررسی آماری ۲- بررسی جنس و ریزساختار ۳- بررسی خصوصیات مکانیکی ۴- بررسی سطوح شکست با SEM ۵- تحلیل نیروها و تنشهای وارد بر پره به کمک آنالیز CFD ۶- آنالیز مودال پره به کمک نرم افزار Ansys



۱- بررسی آماری

از دیدگاه آماری تمامی این شکستها پس از اولین راهاندازی و یا در ساعات اولیه بهره‌برداری پس از تعمیرات، اتفاق افتاده است یعنی در ۶۰ ساعت اولیه بهره‌برداری و هیچ شکستی پس از ۱۰۰ ساعت بهره‌برداری واقع نشده است که این امر نشان می‌دهد چگونگی بستن پره‌ها در شکست آنها مؤثر بوده است.

۲- بررسی جنس و ریز ساختار

نتایج بدست آمده از آزمایش کوانتومتری انجام شده بر روی پره نشان می‌دهد که جنس پره آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ می‌باشد [جدول ۱]. همچنین نتایج آزمایش متالوگرافی بر روی پره نشان داد که پره‌ها به روش ریخته‌گری در قالب‌های فلزی دایکاست (Die cast) تولید نشده‌اند، بلکه برای ساخت پره‌ها از عملیات ریخته‌گری، نوردکاری، تراشکاری و نهایتاً صیقل کاری (Polishing) سطح پره‌ها استفاده شده است. کریستالهای جهت دار در امتداد طول پره مؤید این روش تولید است. عملیات حرارتی بکار رفته در این پره از نوع عملیات حرارتی T۳۵۱ می‌باشد.

۳- بررسی خصوصیات مکانیکی

خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در جدول ۲ ارائه شده است [۵]. مقادیر تنش‌های دینامیکی که در ۳۰۰۰ rpm در پره اندازه‌گیری شده است به شرح جدول ۳ است [۲]. مقایسه مقادیر این تنش‌ها با مقادیر تنش حدی ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که تنش‌های اعمال شده به پره بسیار کمتر از این حدود بوده و بنابراین امکان شکست پره در شرایط بهره‌برداری عادی وجود ندارد.

۴- بررسی سطوح شکست با SEM

یکی از بهترین روشهای شناخت علت شکست بررسی کیفیت سطوح شکست با میکروسکوپهای الکترونی (Scanning Electron Microscope-SEM) است. با میکروسکوپ SEM تصویر برداری از مقاطع شکست و همچنین آنالیز کمی و کیفی سطوح ممکن می‌شود. با توجه به اینکه احتمال شکست پره‌ها در اثر برخورد جسم خارجی و یا شکست در اثر اعمال بارهای تناوبی و بروز خستگی وجود داشت، دو حالت از شکست، شکست در اثر خستگی و شکست در اثر برخورد جسم خارجی (شکست لحظه‌ای) مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۳ نمایی کلی از سطح مقطع شکست پره را نشان می‌دهد. در این پره شکست از نقطه A شروع شده است. لازم به ذکر است که مهمترین نشانه سطح شکست ایجاد شده در اثر خستگی، وجود دایره‌های متحد مرکزی هستند که مرکز آنها نقطه شروع ترک (crack initiation) می‌باشد. با توجه به اینکه آلیاژ مورد بررسی، مورد سخت کاری رسوبی (precipitation hardening) قرار گرفته است، این ذرات رسوب موجب ناپیوستگی در خطوط خستگی شده‌اند و بنابراین خطوط خستگی بصورت تقریباً موازی ولی گسسته دیده می‌شوند. نمونه‌ای از خطوط ایجاد شده در سطح پره در شکل ۴ مشاهده می‌شود. البته ممکن است فرو رفتن اجسام خارجی در سطح بیرونی پره نیز موجب تمرکز تنش شده و شروع ترک را تسهیل نمایند.



به منظور بررسی سطحی که در اثر برخورد شیئی خارجی و شکست ناگهانی ایجاد می شود نمونه ای به ابعاد $10 \times 10 \times 50$ mm از جنس پره تهیه شده و پس از بستن یک طرف آن به گیره، با یک ضربه چکش شکسته شده است. تا سطح شکست آن با سطح شکست پره در حین بهره برداری مورد مقایسه قرار گیرد. کیفیت این سطح شکست بسیار متفاوت از سطح شکست پره بوده و از ویژگی های این سطح، حفره دار بودن آن با لبه های تیز می باشد (Dimple Rupture) که این ویژگی بدلیل شبکه FCC و قابلیت تغییر فرم لغزشی زیاد آلومینیوم می باشد [شکل ۵].

مقایسه و بررسی سطوح شکست پره نشان می دهد که پره در اثر برخورد شیئی خارجی و در یک لحظه گسیخته نشده بلکه ترک از یک یا چند نقطه در قسمت میانی سطح مقعر یا محدب پره شروع شده و در اثر بارگذاری تناوبی پره، در حین چرخش ترک پیشرفت کرده (بدلیل خستگی) و منجر به شکست پره شده است.

۵- تحلیل نیروها و تنشهای وارد بر پره به کمک آنالیز CFD

جهت بررسی وضعیت عملکرد هر یک از پره های فن خنک کن ژنراتور، باید عملکرد فن را شبیه سازی نمود. برای این منظور از در زمینه دینامیک سیالات از نرم افزار Fluent و برای مطالعه تنش های اعمال شده به پره و آنالیز ارتعاشی از نرم افزار Ansys کمک گرفته شده است.

از جمله عواملی که می تواند باعث ارتعاش در پره های فن گردد پدیده جدایی و جریانهای گردابی می باشد. این پدیده باعث تغییر نوسانی توزیع فشار در دو سمت پره شده و نیروی ناشی از فشار سیال به پره به صورت تابعی از زمان تغییر می کند که باعث ارتعاش پره و ایجاد تنشهای تناوبی در آن می شود که می تواند با ایجاد خستگی در پره باعث شکست آن گردد. هدف نهایی از تحلیل CFD در این مسئله، بدست آوردن توزیع سرعت در اطراف پره ها و بررسی خطوط جریان هوا (به منظور مشاهده جریانهای گردابی احتمالی و مشکلات ناشی از آن) و نیز تعیین نیروی حاصله از فشار هوا بر روی پره ها می باشد. بدین منظور پس از تعیین پروفیل پره (با استفاده از ATOS¹) مدل سازی کانال عبور هوا امری ضروری می باشد، که توسط گروه نرم افزارهای CAD انجام گرفته است. پس از مشخص شدن دامنه حل و انجام مش بندی حجم مورد نظر توسط نرم افزار جانبی Gambit باید با توجه به اطلاعات موجود به تعیین شرایط مرزی پرداخت. دقت در این امر می تواند از بروز خطاهای احتمالی در حل عددی جلوگیری نماید. در نهایت پس از ذخیره فایل با فرمت msh می توان این فایل را به عنوان case وارد نرم افزار Fluent نمود. [شکل ۶]

انجام تنظیمات اولیه در Fluent

جهت رسیدن به حل عددی مطلوب بایستی با توجه به نوع جریان و معادلات آن، مناسب ترین روش حل اتخاذ گردد. بدین منظور از Solver سه بعدی یک دفته (۳D) استفاده شده است. نوع حل کننده مسئله Steady State انتخاب و سایر شرایط برای جریان و سیال عبارتند از: مغشوش بودن جریان، تراکم پذیر بودن سیال (هوا)

¹ - یکی از جدیدترین و دقیق ترین روش های موجود برای بدست آوردن پروفیل اجسام، بر اساس عکس برداری دیجیتالی سه بعدی با استفاده از کامپیوتر



و غیر قابل تراکم بودن جریان (چون عدد ماخ کوچکتر از 0.4 است). همچنین مدل $K - \varepsilon$ (2 eqn) برای اغتشاش جریان انتخاب گردیده است.

در اینگونه مسائل که جسم متحرکی عامل جریان سیال است، می توان به جای متحرک در نظر گرفتن پره، آنرا ثابت فرض نموده و یک مؤلفه دورانی سرعت به بردار سرعت سیال در ورود افزود. برای تحلیل حرکت هوا در اطراف پره با این روش، هوا به عنوان سیال عامل، دارای حرکتی چرخشی خواهد بود و سیستم مختصات مرجع در محاسبات مربوطه چرخان و با سرعت زاویه ای معادل $314/1592$ رادیان بر ثانیه انتخاب می گردد. سرعت زاویه ای سیستم مختصات چرخان به شکل زیر محاسبه می گردد:

$$f_r = \frac{3000 \text{ rpm}}{60} = 50 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f_r = 2 \times \pi \times 50 = 314.1592 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

تعیین شرایط مرزی در Fluent

به این دلیل که در اسناد نیروگاه، میزان دبی حجمی هوای ورودی به فن داده شده است، بنابراین بهترین گزینه جهت اعمال شرایط ورودی هوا، گزینه Velocity Inlet است. با توجه به اینکه دبی حجمی کل هوای خنک کاری، یعنی مجموع هوای خنک کاری سمت توربین و سمت اکسایاتور، $45/6 \text{ m}^3 / \text{s}$ می باشد، بنابراین فقط نیمی از آن به سمت پره های فن خنک کن سمت توربین و نیم دیگر به سمت اکسایاتور هدایت خواهد شد. با محاسبه سطح داکت ورودی هوا، که به صورت دایره ای با شعاع تقریبی 7 cm است، می توان سرعت هوای ورودی را به شرح زیر محاسبه نمود. باید توجه داشت که سطح عبور هوا، اختلاف سطح مقطع کانال و محور ژنراتور می باشد.

$$r_1 = 0.225 \text{ m} \quad Q = V \times A$$

$$r_2 = 0.696 \text{ m} \quad \text{شعاع کانال هوا}$$

و با دانستن اینکه :

$$Q = 45.6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{و} \quad A = \pi(r_2^2 - r_1^2)$$

⇔

مقدار سرعت هوا به شرح زیر محاسبه می شود:

$$V = \frac{Q/A}{2} = 16.71 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

به این دلیل که تنها شرطی که برای تمامی سطوح خروجی و داکت آن یکسان و در دسترس می باشد، فشار هوا در محفظه داکت است (که تقریباً برابر با فشار محیط خواهد بود) بنابراین جهت تعیین شرایط مرزی هوا در مقطع خروجی از گزینه Pressure outlet استفاده می شود. در این مرحله نیز باید دقت داشت که به منظور کاهش دامنه حل تا رسیدن به کوچکترین دامنه ممکن و منطقی، از خاصیت تحلیل پرئودیک استفاده می شود.

حل مسئله:



در آغاز حل، باید برای شروع سعی و خطا، مقدار اولیه‌ای را برای نرم‌افزار در نظر گرفت. با توجه به داده‌ها مقدار سرعت سیال در ورودی که محاسبه شد به عنوان مقدار اولیه وارد می‌شود. پس از مشخص کردن دفعات تکرار حل (Iteration)، باید باقیمانده‌های حل (Residuals) همگرا شوند که با توجه به شرط همگرایی که 10^{-3} انتخاب شده است تعداد تکرار تا جایی ادامه می‌یابد که دقت همگرایی در دو مرحله متوالی کمتر از مقدار انتخاب شده گردد. [۳]

تحلیل نتایج نرم‌افزار Fluent

پس از تحلیل جریان هوا بر روی پره، توزیع فشار هوا در نقاط مختلف سطوح پره بدست می‌آید. مقادیر فشار در طرفین پره بسیار ناچیز و طبیعی بوده و هرگز به تنهایی نمی‌تواند در پره ایجاد مشکل نماید. در پشت پره و در قسمت پایین آن، فشار نسبی منفی بوده و در روی گرده پره تا حدود 56 KPa - کاهش یافته است. [شکل ۷ و ۸] با توجه به نتایج بدست آمده از بردارهای نسبی پره، مشاهده می‌شود که خطوط جریان کاملاً مماس بر پره بوده و در هیچ قسمتی پدیده جدایی جریان بوجود نیامده است. در طول جریان حرکت سیال، فقط در بردارهای سرعت مطلق یک گردابه مشاهده شده است [شکل ۹ و ۱۰]. همچنین مقدار نیروی کل وارد بر پره تقریباً مساوی 346 نیوتن است.

۶- آنالیز مودال پره به کمک نرم افزار Ansys

به منظور تعیین تنش‌های اعمال شده بر پره در صورت وقوع ارتعاشات، و بررسی امکان شکست آن به دلیل خستگی، در اثر رزونانس، به مدل سازی پره به روش اجزای محدود پرداخته و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

به این منظور پس از وارد کردن مختصات پره، به شبکه‌بندی حجم می‌پردازیم. پس از انجام شبکه‌بندی برای حصول اطمینان از صحت حجم تولیدی، در نرم‌افزارهای CAD و تقسیم‌بندی صحیح و مناسب پره به اجزای محدود، حجم پره داخل نرم‌افزار ANSYS مجدداً اندازه‌گیری شد که با حجم واقعی پره حدود 0.7% اختلاف داشت که بیانگر دقت بالای شبکه‌بندی می‌باشد. [شکل ۱۱]

دو روش جهت تحلیل توسط این نرم‌افزار بکار رفته است: ۱- آنالیز مودال ۲- آنالیز هارمونیک. در آنالیز مودال، تحلیل با کمک فرکانسهای طبیعی جسم انجام می‌گیرد و در روش آنالیز هارمونیک که بعد از آنالیز مودال انجام گرفت، تحلیل مسئله براساس فرکانسهای تحریک متفاوت صورت پذیرفت. [۴] ابتدا با منظور کردن شرایط مرزی مختلف، میزان سفت شدن پیچ‌ها مدل‌سازی و تأثیری که بر محکم نگه‌داشتن ریشه پره خواهد داشت، بررسی شده است. برای بررسی این شرایط چهار حالت مختلف مورد نظر قرار گرفت:

- ۱- فقط نقاط اطراف پیچها فیکس شده‌اند. [شکل ۱۲]
- ۲- کل نقاط هم ارتفاع با پیچها فیکس شده‌اند.
- ۳- علاوه بر کل نقاط هم ارتفاع با پیچها که در تمام جهات فیکس شده‌اند، المان‌هایی که بر روی سطح و در تماس با رینگ نگهدارنده پره‌ها هستند نیز در جهت عمود بر سطح مزبور نمی‌توانند حرکت کنند.
- ۴- کل ریشه پره در تمام جهات ثابت شده است.



مقادیر فرکانسهای طبیعی پره در ۵ مود برای شرایط مرزی مختلف بدست آمد. با توجه به اینکه فرکانس طبیعی اول پره در حالت چهارم (۵۳۸Hz) بسیار نزدیک به فرکانس نیروی ناشی از جریان هوا بر روی پره‌ها (۵۵۰ Hz) بوده به همین دلیل وقوع رزونانس در شرایط فوق بسیار محتمل است، بنابراین ابتدا این حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. [شکل ۱۳]

با توجه به نتایج بدست آمده از این تحلیل دیده می‌شود که مقدار تنش عمودی در اغلب فرکانس‌ها در حدود ۱۰ MPa است. این مقدار در محدوده فرکانسی ۴۰۰ تا ۴۵۰ هرتز تا بیش از ۲۰ MPa افزایش می‌یابد که همچنان بسیار کمتر از حد تحمل پره در شرایط خستگی ($\sigma_e = 140 \text{ MPa}$) است. ولی در حالت تشدید، تنش اعمال شده به ریشه پره به صورت کششی از ۱۶۰ MPa نیز بیشتر خواهد شد. گرچه این مقدار کمتر از ۳۵٪ مقدار تنشی است که اگر به صورت استاتیکی به پره اعمال شود باعث گسیختگی آن خواهد گردید. ولی در اثر اعمال تناوبی آن و بدلیل آنکه از حد تحمل آلیاژ مورد نظر ($\sigma_e = 140 \text{ MPa}$) بیشتر است، باعث محدودیت عمر پره و شکست آن پس از تعدادی سیکل می‌شود. بنابراین پره، در کلیه فرکانس‌ها، حتی در حالت تشدید، می‌تواند به خوبی بارهای استاتیکی را تحمل نماید. ولی در صورت بروز رزونانس، تنش حد تحمل حدود ۸۰٪ تنش اعمال شده به پره خواهد بود. این به آن معنی است که پره نمی‌تواند حالت رزونانس را به مدت نامحدودی تحمل کند و پس از مدتی خواهد شکست. از آنجایی که فرکانس نیروی اعمال شده به پره مساوی ۵۵۰ Hz و در حوالی اولین فرکانس طبیعی پره (یعنی ۵۳۸ Hz) قرار گرفته است، بروز حالت تشدید و به دنبال آن ایجاد شرایط خستگی در پره، با تغییر در شرایط بستن پره، محتمل خواهد بود.

در صورتی که به هر دلیلی در نواحی تنش ماکزیمم، ترک (حتی در حد میکروسکوپی) به وجود آید، این ترک به مرور زمان توسعه یافته در مدتی بسیار کمتر از عمر پیش بینی شده برای پره، باعث شکستن آن خواهد شد [شکل ۱۴ و ۱۵]

تحلیل نتایج نرم‌افزار ANSYS

منطقه تنش ماکزیمم، در دو محل، یکی روی گرده ایرفویل و در سطح خارجی، و دیگری در داخل گودی پره و در سطح داخلی، و در هر دو حالت، در محل اتصال ایرفویل و ریشه پره قرار دارد، و از نظر تئوری، شکستن پره‌ها باید از یکی از این دو محل اتفاق بیفتد. مشاهده پره‌های شکسته شده نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند.

نتیجه گیری نهایی

۱. بررسی سطوح شکست نشان می‌دهد که احتمال برخورد جسم خارجی بزرگ و شکست لحظه‌ای پره منتفی است.
۲. فرضیه وجود ترک غیر سطحی مردود است، زیرا ترک اصلی همواره از سطح شروع شده است.
۳. تحلیل CFD نشان می‌دهد که نیروهای ناشی از جریان هوا بر روی پره در حدی نیستند که بتوانند باعث شکستن پره شوند.



۴. با توجه به خطوط جریان هوا در اطراف پره، می‌توان نتیجه گرفت که فقط در بردارهای سرعت مطلق گردابه مشاهده شده است و مقادیر نیروی محاسبه شده با در نظر گرفتن این گردابه بدست آمده است.
۵. در صورت اعمال نیرویی با فرکانس ۵۵۰ هرتز، پره در شرایط تشدید، قرار گرفته و به دلیل تحمل تنش از مرتبه ۱۶۰ تا ۲۳۶ MPa دارای عمر محدود، خواهد بود.

مراجع

۱. نقشه‌های نیروگاه منتظر قائم
۲. گزارش شرکت آلستوم درباره حادثه نیروگاه نیشابور، ۷۶/۲/۲۸
۳. رحیمی اصل، ر. سلطانی، م. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به کمک نرم‌افزار FLUENT، چاپ اول انتشارات نشر طراح، ایران، بهار ۱۳۸۲
۴. جاهد مطلق، ح. نوبان، م. اشراقی، م. اجزاء محدود ANSYS، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، تابستان ۱۳۸۲

۵. ASM Hand book. Vol. ۲, Page ۷



جدول ۱- درصد وزنی عناصر موجود در پره و مقایسه آن با آلیاژ ۲۰۲۴

عنصر	Al	Zn	Si	Fe	Mn	Mg	Cu
آزمایش کوانتومتری	Base	۰.۰۷	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۶۷	۱.۳۶	۳.۹۷
آلیاژ ۲۰۲۴	Base	---	---	---	۰.۶	۱.۵	۴.۴

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴

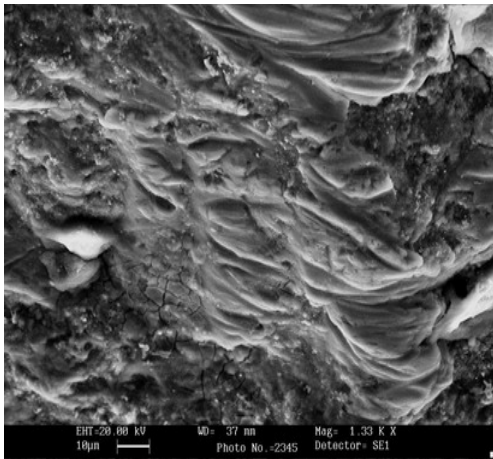
Alloy	Ultimate tensile strength σ_{ut}	Yield tensile strength σ_{yp}	Fatigue endurance limit σ_e
Al ۲۰۲۴	۴۷۰ MPa	۳۲۵ MP	۱۴۰ MPa

جدول ۳- تنش های دینامیکی در پره

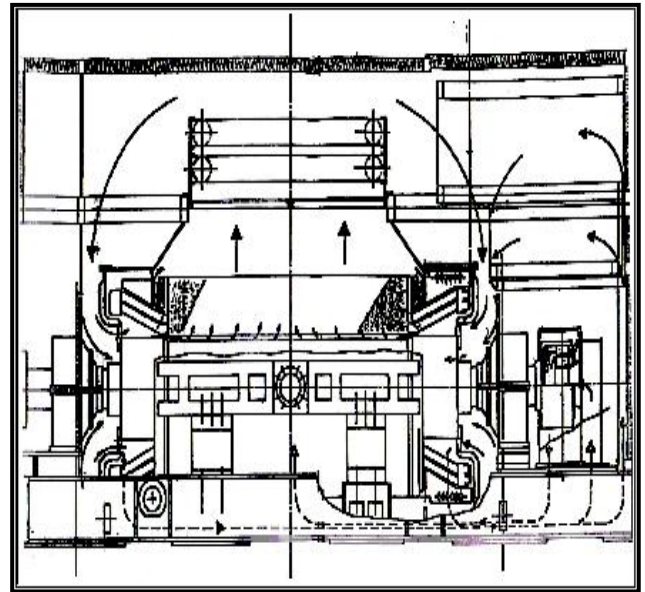
شماره پره	حداکثر تنش در rpm ۳۰۰۰
۱FE	۹ MPa
۲FE	۷,۶MPa
۳FE	۱۸MPa
۴FE	۱۰,۴ MPa



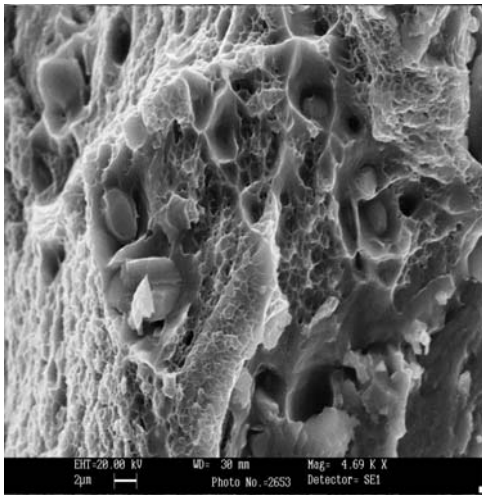
شکل ۱- نمایی



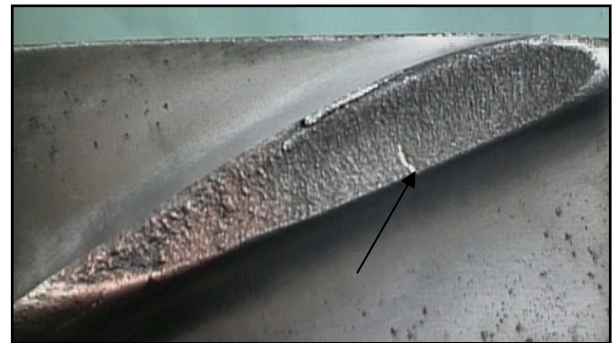
شکل ۴- خطوط ایجاد شده در اثر پیشرفت ترک خستگی



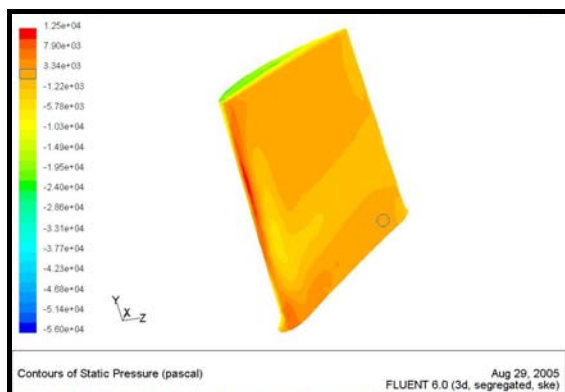
شکل ۲- نقشه کلی ژنراتور



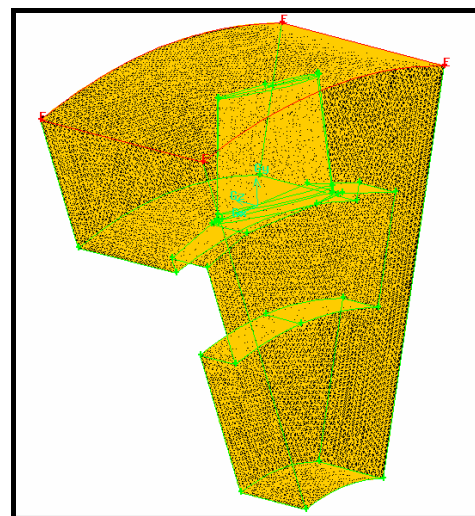
شکل ۵- شکست حفره ای در نمونه شکسته شده با ضربه



شکل ۳- نمای سطح مقطع شکست پره

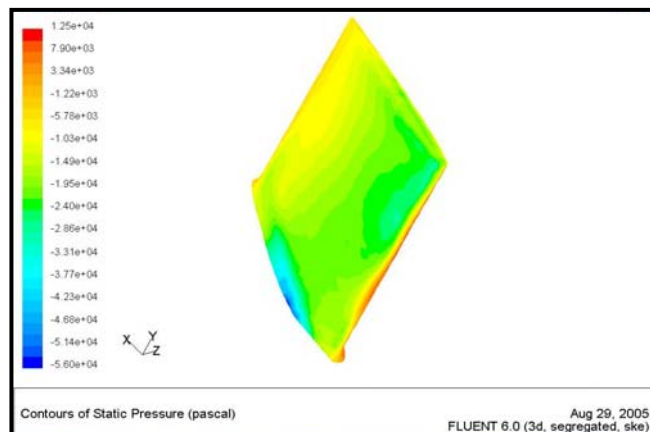
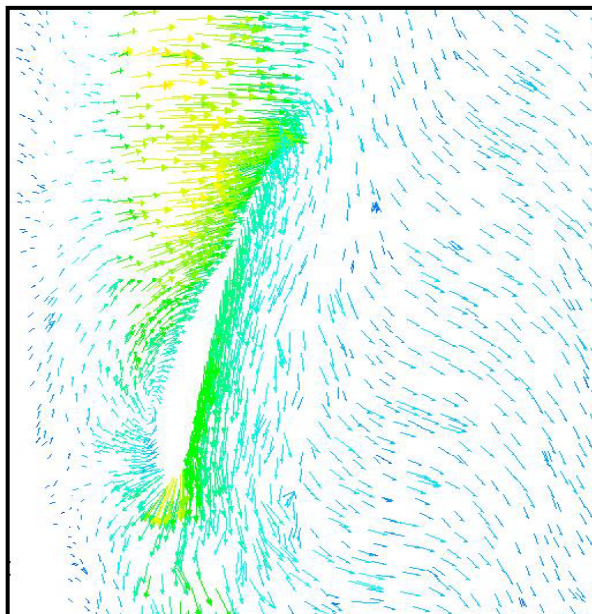


شکل ۹- راستای بردارهای سرعت مطلق



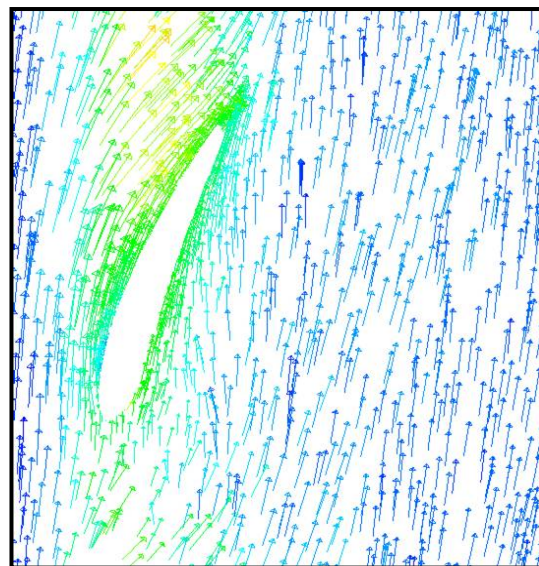
شکل ۶- نمایی از فضای منش بندی شده دامنه حل

هوا در پره

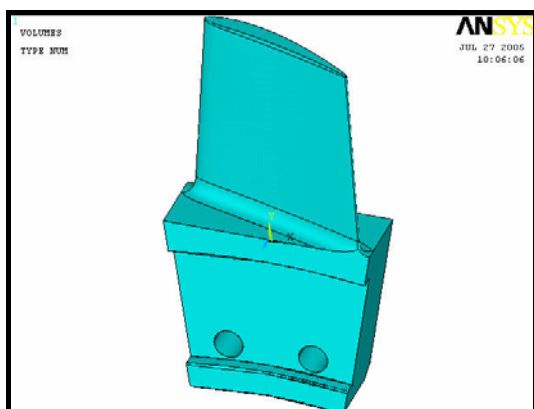


شکل ۸- توزیع فشار در سطح برآمده (محدب) پره

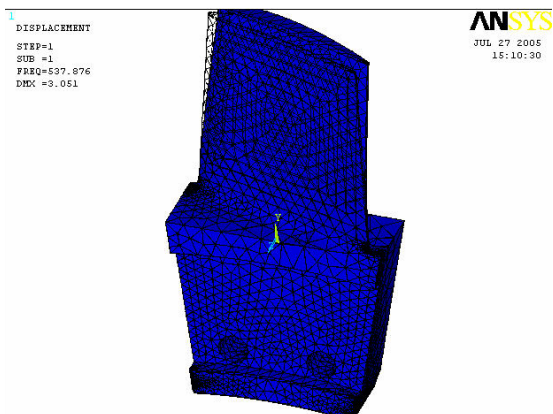
شکل ۹- راستای بردارهای سرعت مطلق هوا در پره



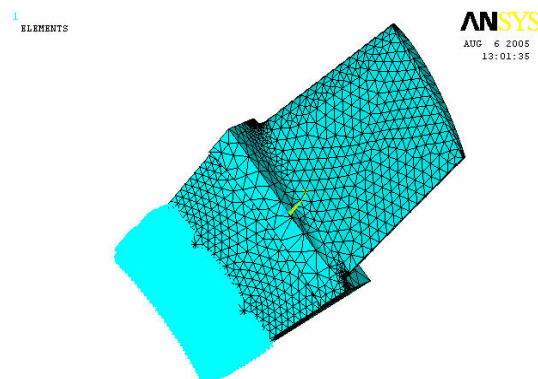
شکل ۱۰- بردارهای سرعت نسبی هوا در اطراف پره



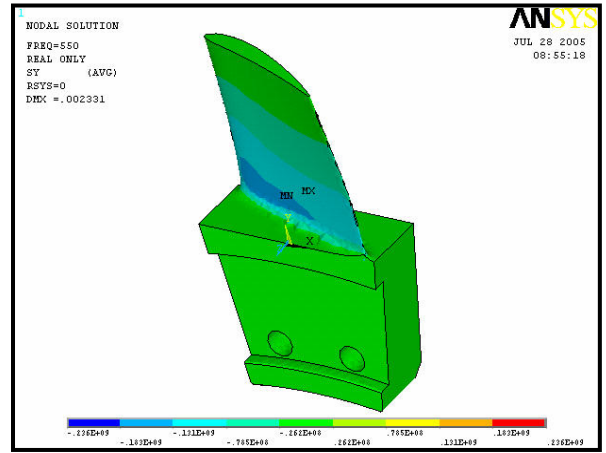
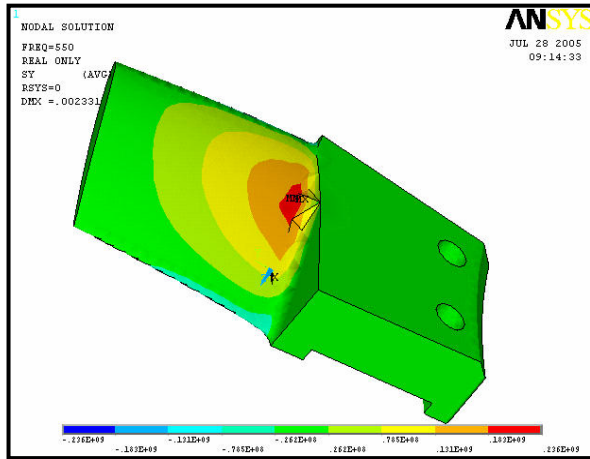
شکل ۱۱- حجم تولید شده از پره



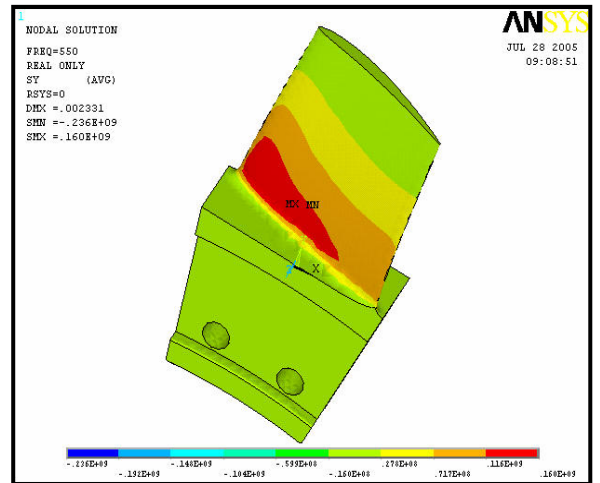
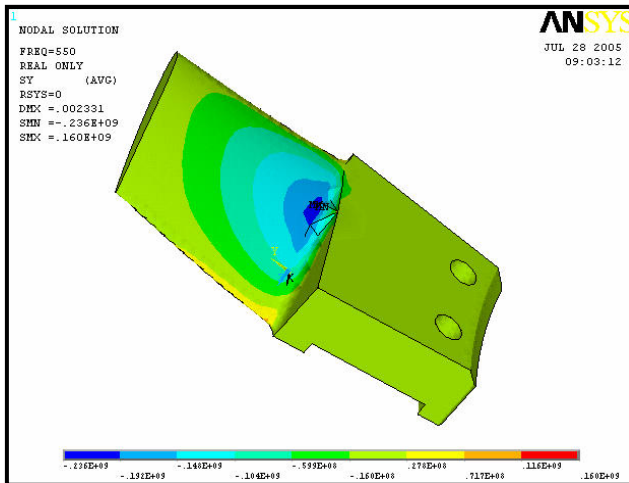
شکل ۱۳- مود اول ارتعاشی پره با فرکانسی در حدود ۵۳۸ هرتز



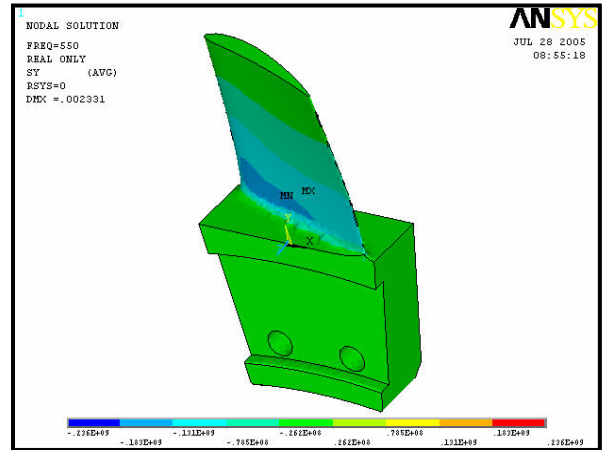
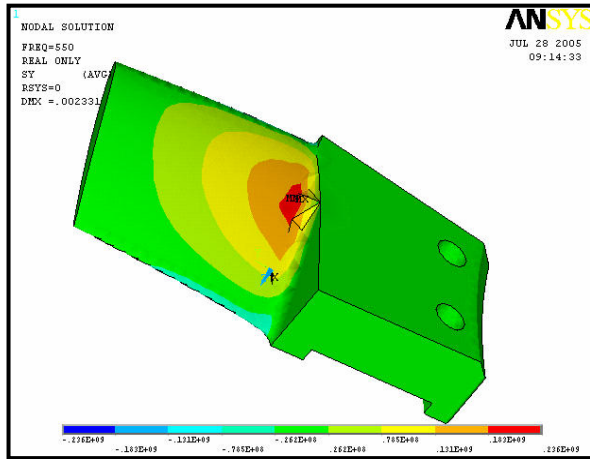
شکل ۱۲- حالت اول (فقط نقاط اطراف پیچها فیکس شدهاند)



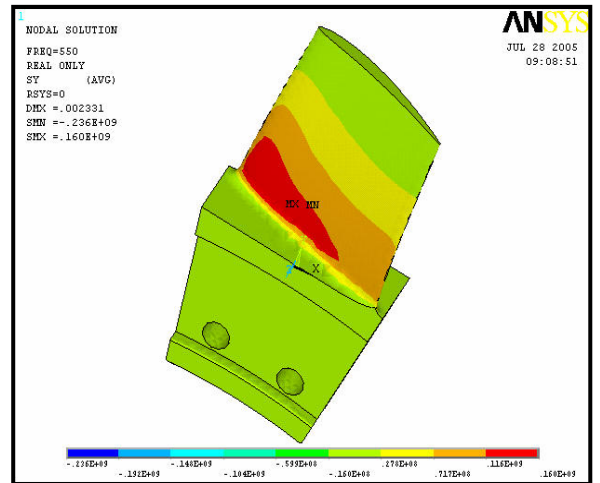
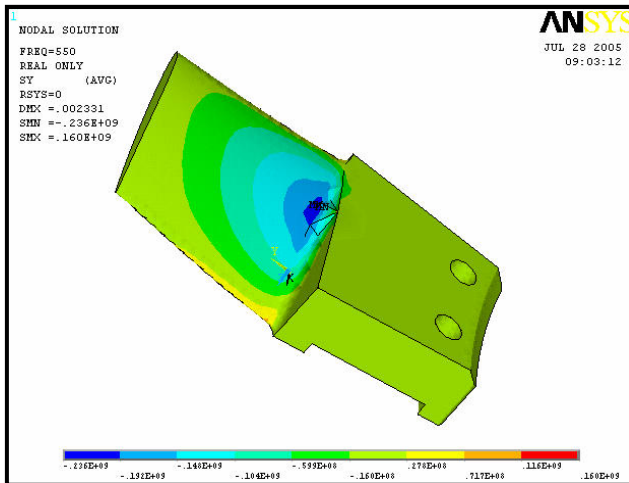
شکل ۱۴- توزیع تنش عمودی در جهت Y در فرکانس تحریک پره (۵۵۰ هرتز) در لحظه‌ای که سطح داخلی پره تحت فشار و سطح خارجی تحت کشش است.



شکل ۱۵- توزیع تنش عمودی در جهت Y در فرکانس تحریک پره (۵۵۰ هرتز) و در زیر آن، در لحظه‌ای که سطح داخلی پره تحت کشش و سطح خارجی تحت فشار است.



شکل ۱۴- توزیع تنش عمودی در جهت Y در فرکانس تحریک پره (۵۵۰ هرتز) در لحظه‌ای که سطح داخلی پره تحت فشار و سطح خارجی تحت کشش است.



شکل ۱۵- توزیع تنش عمودی در جهت Y در فرکانس تحریک پره (۵۵۰ هرتز) و در زیر آن، در لحظه‌ای که سطح داخلی پره تحت کشش و سطح خارجی تحت فشار است.



“پیشگیری و کاهش ریسک خوردگی سرد در بویلرهای بازیاب”

مهدی عمرانی - احسان رئیسی نژاد - حسین شریفی

شرکت مپنا بویلر

تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: خوردگی سرد - نقطه شبنم اسیدی - بویلر بازیاب - پیشگرمکن آب تغذیه

چکیده:

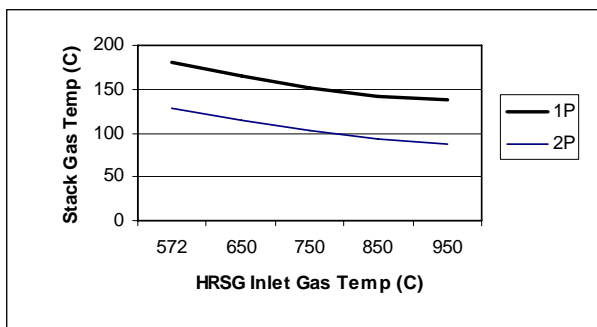
تمام روشهای افزایش راندمان سیکل ترکیبی، به کاهش دمای گازهای خروجی از HRSG و یا افزایش میزان رطوبت موجود در گاز ختم می شود. به این مشکل باید پایین بودن دمای آب تغذیه (در بسیاری از مواقع زیر نقطه شبنم آب) و روشهای افزایش توان سیکل رانکین مانند استفاده از داکت برنر که منجر به کاهش دمای دود خروجی از بویلر بازیاب می شود نیز اضافه شود. نتیجه این شرایط، احتمال خوردگی در قسمت انتهایی بویلر بازیاب می باشد.

در این مقاله علت و روشهای مقابله با خوردگی در بویلرهای بازیاب و مقایسه آنها با یکدیگر و تاثیر این روشها بر عملکرد بویلر

بازیاب بررسی شده است.

- مقدمه:

بسیاری از روشهای افزایش راندمان سیکل ترکیبی به کاهش دمای گازهای خروجی از HRSG و یا افزایش میزان رطوبت موجود در گاز ختم می گردد. در بویلرهای چند فشاره، درجه حرارت دود خروجی تا حد نقطه شبنم و یا پایین تر از آن کاهش می یابد. در مدل های تک فشاره گرچه دمای دود خروجی از بویلر بازیاب بالا می باشد ولی با به کارگیری روشهای افزایش توان مانند داکت برنر، دمای دود خروجی به علت افزایش جذب حرارتی در سطوح حرارتی بویلر بازیاب کاهش می یابد. شکل زیر کاهش درجه حرارت دود خروجی را در دو بویلر بازیاب تک فشاره (1P) دو فشاره (2P) با افزایش درجه حرارت دود ورودی نشان می دهد.



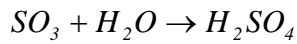
شکل (۱) کاهش درجه حرارت دود خروجی با افزایش درجه حرارت دود ورودی

در بسیاری از بویلرهای بازیاب نیز که از دیریتور نوع Integrated استفاده می کنند، از پیش گرمکن برای افزایش راندمان بویلر استفاده میشود که درجه حرارت آب ورودی آن پایین می باشد. در نتیجه، احتمال خوردگی در مسیر دود



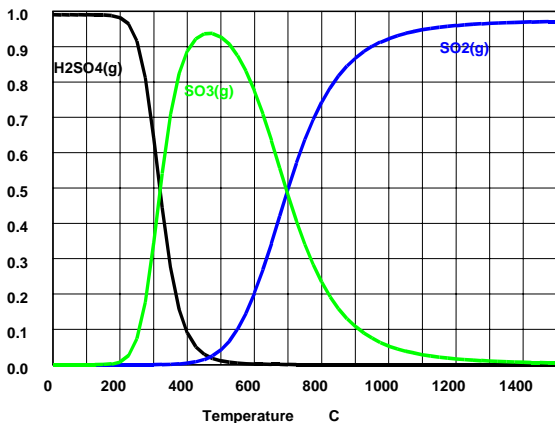
قدیمی‌تر باشند، تبدیل SO_2 به SO_3 بر اثر تأثیرات کاتالیستی رسوبات افزایش می‌یابد.

افزایش هوای اضافه نیز باعث افزایش در دسترس بودن اکسیژن و در نتیجه افزایش سرعت تبدیل SO_2 به SO_3 می‌شود. SO_3 تولید شده در دماهای پائین‌تر سرعت با آب موجود ترکیب شده و اسید سولفوریک را تشکیل می‌دهد:



این واکنش بسیار سریع است و به محض تشکیل SO_3 و در حضور بخار آب در دماهای زیر $340^\circ C$ ، اسید سولفوریک خواهیم داشت. افزایش بخار آب نیز عاملی در تسریع واکنش محسوب می‌گردد.

در دماهای پایین و مقادیر زیاد بخار آب این واکنش شیمیایی تا مرحله تکمیل پیش می‌رود. بنابراین مقدار بخار اسید سولفوریک برابر مقدار SO_3 موجود در گازهای خروجی می‌باشد.



شکل (۲) ترکیب تعادلی انواع سولفورها در گازهای خروجی

گرچه سوخت‌های گازی دارای ترکیبات گوگردی اندکی مثل H_2S هستند، ولی سوخت‌های مایع مانند گازوئیل دارای درصد بالاتری از گوگرد بوده و با توجه به درصد بالای اکسیژن موجود در دود، SO_3 زیادی تولید می‌نمایند.

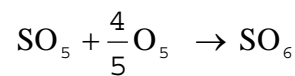
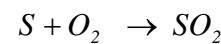
افزایش می‌یابد. حمله خوردگی به این سطوح عموماً خوردگی سرد نامیده می‌شود که ناشی از میعان ترکیبات اسیدی مثل H_2SO_4 و تشکیل اسیدهایی مانند H_2CO_3 در روی سطح می‌باشد. دمایی که در آن میعان آغاز می‌شود، نقطه شبنم می‌نامند. حمله خوردگی در این حالت، خوردگی اسیدی نامیده می‌شود.

مقدار گوگرد موجود در گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی مانند ذغال سنگ و گازوئیل پایین‌تر است. بنابراین ریسک خوردگی آن پایین‌تر است ولی با توجه به استفاده از گازوئیل در مواقعی از سال در توربین گاز، خطر خوردگی اسیدی قابل توجه می‌شود و باید در طراحی HRSG لحاظ شود.

۲- مکانیزم ایجاد خوردگی [۱،۲،۳].

گاز خروجی از یک سیکل ترکیبی در نتیجه احتراق گاز طبیعی در این سیکل بوجود می‌آیند. این احتراق در محفظه احتراق توربین گاز و داکت برنر ایجاد می‌شود.

به طور کلی در سوخت‌هایی که شامل گوگرد یا ترکیبات گوگرد دار مانند H_2S می‌باشند، گوگرد موجود در سوخت با اکسیژن محفظه احتراق ترکیب و SO_2 را بوجود می‌آورد.



تشکیل SO_3 به طور مستقیم وابسته به مقدار گوگرد سوخت می‌باشد. در بویلرهای صنعتی، ۱ تا ۵ درصد SO_3 به SO_2 تبدیل می‌شود. سرعت واکنش به غلظت اکسیژن و حضور کاتالیزورهایی مانند اکسید وانادیم، نیکل، اکسید آهن و ... بستگی دارد.

در تجهیزات جدیدتر (سطوح تمیز) وضعیتی که SO_3 به SO_2 تبدیل می‌شود در محدوده دمایی $900-1000^\circ C$ از طریق تماس با سطح فلز رخ می‌دهد. وقتی تجهیزات

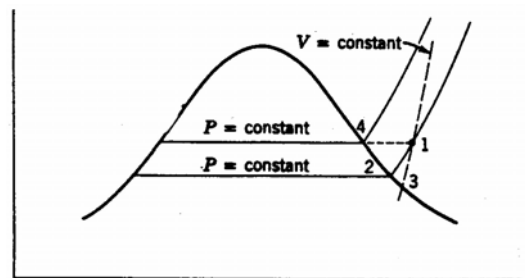


ترکیبات خورنده تنها شامل ترکیبات گوگردی نمی‌شوند، بلکه بسیاری از انیدریدهای موجود در دود مثل CO₂ با آب تولید اسید می‌کنند.

CO₂ گرچه نمی‌تواند با بخار آب تولید اسید پایدار نماید، ولی در حضور فاز مایع، تولید اسید H₂CO₃ می‌نماید. بنابراین در هیچ حالتی نباید دمای سطح در HRSG به زیر نقطه شبنم آب کاهش یابد.

۳- تخمین نقطه شبنم

نقطه شبنم مخلوط گاز - بخار درجه حرارتی است که بخار تبدیل به مایع می‌گردد و البته این پدیده زمانی رخ می‌دهد که بخار داغ در فشار ثابت سرد گردد. این نکته روی نمودار T-S برای بخار در شکل (۳) نشان داده شده است [۴]. تصور کنید که درجه حرارت مخلوط گازی و فشار جزئی بخار در مخلوط به گونه‌ای است که بخار در حالت ۱ سوپر هیت می‌باشد. اگر مخلوط در فشار ثابت سرد شود، فشار جزئی تا رسیدن به نقطه ۲ ثابت می‌ماند و سپس چگالش شروع می‌شود. درجه حرارت در حالت ۲، درجه حرارت نقطه شبنم است. اما خط ۳-۱ روی نمودار نشان می‌دهد که اگر مخلوط در حجم ثابت سرد شود، چگالش در نقطه ۳ آغاز می‌شود که اندکی کمتر از نقطه شبنم است.



شکل (۳) نمودار دما-آنتروپی برای تعریف ترمودینامیکی نقطه شبنم

۳-۱- محاسبه نقطه شبنم آب:

با فرض گاز ایده آل برای بخار، نسبت رطوبت ω به صورت زیر تعریف می‌شود [۴].

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

m_v جرم بخار آب

m_a جرم محصولات احتراق خشک

این تعریف برای هر مخلوط گاز - بخار یکسان است و زیر نویس a مشخص کننده گاز است. با قراردادن تعاریف گاز ایده آل، عبارت زیر برای نسبت رطوبت بدست می‌آید:

$$\omega = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a}$$

M_v = جرم مولکولی بخار آب

M_a = جرم مولکولی محصولات احتراق خشک

R_a = ثابت گاز (محصولات احتراق)

R_v = ثابت بخار آب

P_a = فشار جزئی محصولات احتراق

P_v = فشار جزئی بخار آب

با محاسبه ω از فرمول اول و محاسبه فشار جزئی محصولات احتراق در هر نقطه از بویلر بازیاب، P_v از طریق معادله دوم محاسبه شده و نقطه شبنم آب که برابر دمای اشباع در P_v می‌باشد، قابل محاسبه است.

۳-۲- محاسبه نقطه شبنم اسید سولفوریک:

[۵،۶،۷،۸،۹]

با توجه به اینکه در بویلر هم در اثر چگالش اسید و هم در اثر چگالش آب و تشکیل اسید، خوردگی رخ می‌دهد، به بررسی فرمولهای تخمین نقطه شبنم آب و اسید سولفوریک پرداخته می‌شود.



جدول (۱) محاسبه DT_{dp}

$100 * (P_{H_2SO_3} / P_{H_2O})$	DT_{dp} °C
1,000E-07	20
2,000E-07	23
4,000E-07	25
6,000E-07	25.5
6,500E-07	26
8,000E-07	27
1,000E-06	28
2,000E-06	30
4,000E-06	32
6,000E-06	34
8,000E-06	35
1,000E-05	37
2,000E-05	40
4,000E-05	45
6,000E-05	48
8,000E-05	50
1,000E-04	53
2,000E-04	57
4,000E-04	62
6,000E-04	67
8,000E-04	70
1,000E-03	72
2,000E-03	78
4,000E-03	88
6,000E-03	85
8,000E-03	90
1,000E-02	93
2,000E-02	100
4,000E-02	108
6,000E-02	112
8,000E-02	114

تلاش زیادی در طول سالیان گذشته جهت ایجاد روش‌هایی برای پیش بینی نقطه شبنم اسید سولفوریک صورت پذیرفته است.

در ادامه به بررسی چند نمونه از آن می پردازیم.

Pierce روش

$$T_{dp} = 1000 / (1.782 + 0.0269 \log(H_2O) - 0.1029 \log(SO_3) + 0.0329 \log(SO_3) * \log(H_2O))$$

Okkes روش

$$T_{dp} = 203.5 + 27.6 \log(P_{H_2O}) + 10.83 \log(P_{SO_3}) + 1.06 (\log(P_{SO_3}) + 8)^{2.19}$$

در معادلات بالا:

T_{dp} : نقطه شبنم اسیدی (° K)

$P_{SO_3} \& P_{H_2O}$: فشار جزئی SO_3 و H_2O در محصولات

احتراق

$SO_3 \& H_2O$: درصد حجمی بخار آب در محصولات

احتراق و میزان SO_3 (ppm)

Verhoff & Banchemo روش

$$\frac{1000}{T_d} = 2.276 - 0.0294 \ln(P_{H_2O}) - 0.0858 \ln(P_{H_2SO_4}) + 0.0062 \ln(P_{H_2O}) \ln(P_{H_2SO_4})$$

که در آن:

T_{dp} : نقطه شبنم اسیدی (° C)

Peter Muller روش نموداری

در این روش نقطه شبنم با میانمایی از یک جدول بدست می آید.

$$T_{dp} = DT_{dp} + TW_{dp}$$

T_{dp} : نقطه شبنم اسیدی (° C)

TW_{dp} : نقطه شبنم آب



$$(tw)_1 = 95^\circ C$$

$$\text{و } (tw)_2 = 104^\circ C$$

همانطور که مشاهده می شود، بعلت بالا بودن ضریب انتقال حرارت در پیش گرمکن، افزایش ۵۰ درجه ای محصولات احتراق، تنها ۹ درجه دمای سطح را افزایش داده است. پس مطمئن ترین راه برای اطمینان از عدم رسیدن به دمای نقطه شبنم، اطمینان از بالا بودن دمای سیال در داخل بویلر می باشد.

۱,۰۰E-۰۱	۱۱۸
۲,۰۰E-۰۱	۱۲۳
۴,۰۰E-۰۱	۱۳۳
۶,۰۰E-۰۱	۱۴۰
۸,۰۰E-۰۱	۱۶۰

در صورتیکه درصد حجمی بخار آب ۱۱/۴۲ درصد و میزان SO₃ نیز ۲۲/۸ ppm باشد نقطه شبنم اسیدی طبق روابط فوق برابر است با:

۵- مقاومت فولادهای مختلف در برابر خوردگی

فولادهای کربنی در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ (بیش از ۹۰ درصد) مشکلی ندارند. فولادهای کم آلیاژ فولادهایی هستند که با داشتن ۲ الی ۵ درصد آلیاژ، میزان مقاومت در برابر خوردگی آنها بالاتر بوده و نسبت به فولادهای زنگ نزن ارزان تر می باشند. استفاده از آلیاژهای کرم و نیکل به اندازه حداکثر ۲ یا ۳ درصد و یا کمی بیشتر باعث افزایش مقاومت آنها در برابر خوردگی می گردد. اما در فولادهای زنگ نزن مقدار کرم معمولاً بیشتر از ۱۱ درصد است.

بطور کلی وجود عناصر مختلف و میزان درصد آنها در فولادهای آلیاژی بر خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی موثر است. یکی از عناصر بسیار موثر و مهم کرم می باشد. افزایش درصد کرم باعث افزایش شدید مقاومت در برابر خوردگی می گردد. در خصوص تاثیر مواد مختلف در ساختار فولاد آلیاژی می توان بطور خلاصه به موارد ذیل اشاره نمود.

فولادهای آستنیتی در محیطهای مرطوب بشدت در مقابل عاملهای خوردنده آسیب پذیر میباشد و برای بهره برداری در محیطهای مرطوب باید تنشهای بهره برداری و تنشهای باقیمانده راکاهش داد.

جدول (۲) مقایسه نتایج فرمولهای مختلف

روش	T _{dp} (°C)
Pierce	۱۴۷,۱
Okkes	۱۴۲
Verhoff & Bachero	۱۳۹
Peter Muller	۱۴۹,۶

۴- تخمین دمای سطح در پیش گرمکن

متوسط دمای دیواره برای لوله های پیش گرمکن بوسیله معادله ساده زیر بدست می آید [۲].

$$t_w = 0.5 \left[t_i + t_g - u(t_g - t_i) \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{h_i} \right) \right]$$

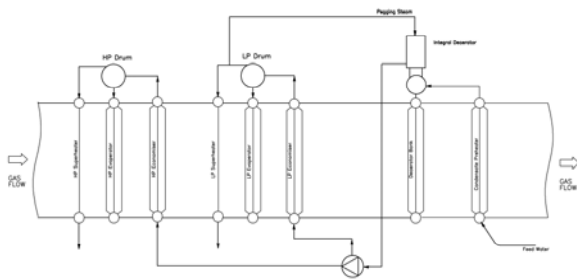
بعنوان نمونه در یک پیش گرمکن برای دو حالت زیر:

$$1- t_i = 60^\circ C \text{ و } t_g = 225^\circ C$$

$$2- t_i = 60^\circ C \text{ و } t_g = 275^\circ C$$

دمای دیواره (با فرض $u = 45 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ و

$$h = 72 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \text{ و } h_i = 5000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \text{ برابر است با:}$$



شکل (۴) شماتیک یک بویلر بازیاب دوفشاره

در این سیستم آب برگشتی از سیکل وارد پیش گرمکن آب تغذیه شده و از آنجا وارد دیریتور می شود. از آنجا که عموماً در سیکل‌های ترکیبی از پیش گرمکن بخاری برای افزایش دمای آب تغذیه استفاده نمی شود، دمای آب تغذیه ورودی به پیش گرمکن در بسیاری از فصول سال حتی زیر نقطه شبنم آب می باشد.

با استفاده از دیریتور External که در بیرون بویلر بازیاب قرار دارد و بخار آن توسط بویلر تأمین می شود، می توان درجه حرارت آب ورودی به بویلر بازیاب را بالاتر از دمای نقطه شبنم اسیدی قرارداد، ولی معایب این سیستم و مزایای دیریتور Integral موجب استفاده کمتر دیریتور External شده است.

مزایای دیریتور Integral

به علت پایین بودن دمای آب ورودی به بویلر بازیاب، جذب حرارت در این نوع بویلر بیشتر بوده و راندمان آن بالاتر است.

بخار مورد نیاز برای این نوع دیریتور توسط خود آن تأمین می شود در حالی که در دیریتور External به علت این که باید بخار مورد نیاز توسط خود واحد تأمین شود، لذا سایز لوله های اوپراتور، اکونومایزر، سوپرهیتر و حجم درام نسبت به دیریتور Integral بیشتر خواهد شد.

دیریتور Integral در مجموع فضای کمتری اشغال می کند، به علاوه اینکه به صورت مجتمع با خود بویلر می باشد در حالی که برای دیریتور External نیاز به در نظر گرفتن فضای اضافی در اطراف بویلر می باشد.

دیریتور Integral نیاز به لوله کشی کمتری نیز دارد.

وجود سیلیسیم باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی شده ولی اثر افزایش و یا کاهش درصد آن بر مقاومت خوردگی دقیقاً مشخص نمی باشد.

وجود عناصر منگنز، آلومینیم، تنگستن، کبالت، مولیبدن و فسفر اثر نامشخصی بر مقاومت در برابر خوردگی دارند. اما وجود عناصری مانند کرم، نیکل، وانادیم و مس باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی شده که در این میان اثر کرم و نیکل بسیار بیشتر است. وجود عنصری مانند گوگرد نیز مقاومت در برابر خوردگی را کاهش می دهد. وجود کربن در فولادهای آلیاژی به لحاظ افزایش و یا کاهش میزان درصد کربن در فولاد، تاثیری بر مقابل مقاومت خوردگی ندارد.

در هر حال تمامی فولادهای آلیاژی در مجاورت اسید دچار خوردگی می گردند، اما نرخ خوردگی متناسب با آلیاژهای بکار رفته در ساختار فولادها با یکدیگر متفاوت است.

۶- راههای کاهش خوردگی و تأثیر آن بر عملکرد

بویلر بازیاب:

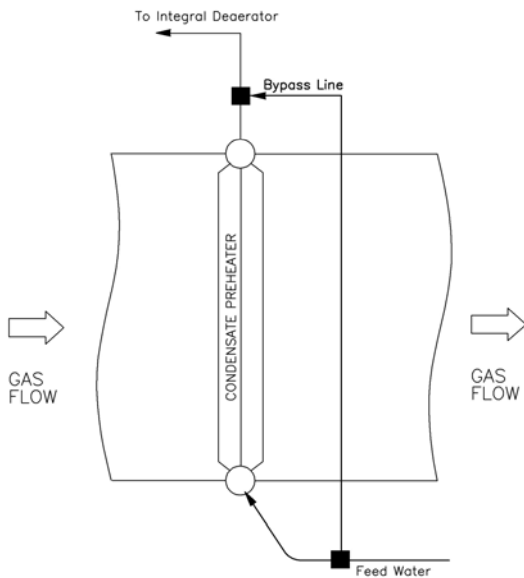
ساده ترین آرایش یک بویلر بازیاب، یک سیستم تک فشاره می باشد که شامل اکونومایزر، اوپراتور و سوپرهیتر می باشد. به منظور افزایش بازیافت انرژی، عموماً از بویلرهای دو یا چند فشاره استفاده می شود. این نوع بویلرها با افزایش راندمان ترمودینامیکی، امکان جذب بیشتر حرارت توسط سطوح را فراهم می آورند.

از راههای دیگر افزایش راندمان یک بویلر بازیاب، استفاده از دیریتور Integral می باشد که مانند یک سیستم کم فشار عمل می نماید. برای کاهش میزان بخار مورد نیاز برای این نوع دیریتورها عموماً یک سیستم پیش گرمکن قبل از آن قرارداد می شود.

در شکل زیر شماتیک یک بویلر بازیاب دو فشاره که دارای دیریتور Integral می باشد نشان داده شده است.



می‌باشد. در این حالت نیاز به بخار اضافی برای تأمین حداقل فشار دیریتور می‌باشد که عموماً از خط LP تأمین می‌شود.



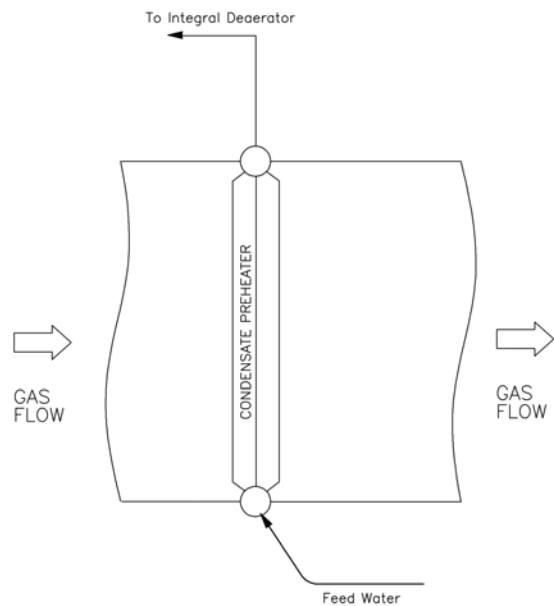
شکل (۶) شماتیک یک پیش‌گرمکن و کنار گذر آن

در جدول زیر اطلاعات سیکل در هر دو حالت با هم مقایسه شده است.

جدول (۳) مقایسه اثر بای پس پیش‌گرمکن بر عملکرد بویلر بازیاب

With Bypass	Without Bypass	
۲۳۹,۹۱۰	۲۴۱,۳۸۸	دبی بخار فشار بالا (T/hr)
۹,۴۹۴	۳۲,۰۷۵	دبی بخار فشار پایین (T/hr)
۱۷,۶۳۸	.	میزان بخار Pegging برای دیریتور (T/hr)
۱.۵	۵.۶۶	فشار دیریتور (bar)
۷۹,۴	۸۵,۹۳	راندمان بویلر بازیاب

در مجموع مزایای بالا موجب کاربرد بیشتر سیستم Integral شده است، ولی مهمترین عیب این سیستم، کاهش درجه حرارت در ناحیه انتهایی بویلر بازیاب و افزایش میزان خوردگی در این سیستم می‌باشد. برای مقابله با خوردگی در ناحیه دیریتور، مینیمم فشار دیریتور بگونه ای تعیین می‌شود که دمای اشباع آن بالاتر از نقطه شبنم اسیدی باشد، ولی در لوله های پیش‌گرمکن به علت پایین بودن دما ریسک خوردگی وجود دارد.



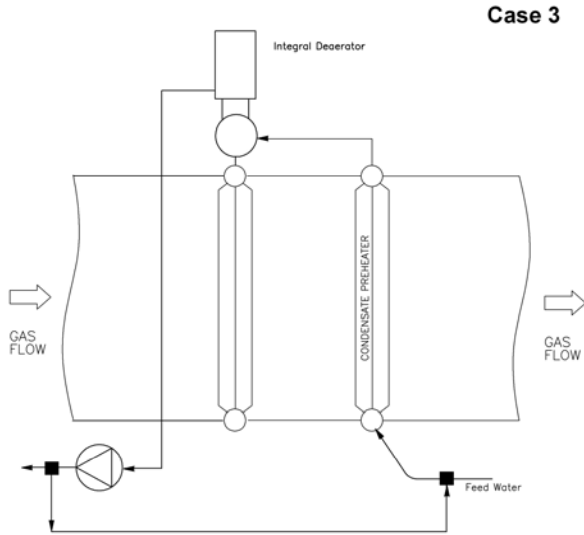
شکل (۵) شماتیک جریان آب و دود در یک پیش‌گرمکن آب تغذیه

در مواردی که سوخت گاز بوده و میزان ترکیبات گوگردی آن ناچیز باشد کفایت درجه حرارت آب تغذیه بالاتر از نقطه شبنم آب باشد تا مانع از تشکیل بعضی از اسیدها که در حضور آب تشکیل می‌شوند، شود. در صورتی که SO_3 موجود در دود کمتر از ۳ppm باشد مقدار آن ناچیز فرض شده و دمای نقطه شبنم آب به عنوان عامل محدود کننده در نظر گرفته می‌شود.

در صورتی که از سوخت مایع در توربین گاز استفاده شود، دمای سطح فلز در هیچ حالتی نباید پایین تر از نقطه شبنم قرار گیرد. ساده ترین روش در این حالت استفاده از کنار گذر پیش‌گرمکن و انتقال مستقیم آب تغذیه به دیریتور



شکل (۸) افزایش درجه حرارت آب تغذیه با ترکیب مقداری از آب خروجی از پیش گرمکن با آب تغذیه ورودی (روش ۲)



شکل (۹) افزایش درجه حرارت آب تغذیه با ترکیب آب تغذیه بعد از دیریتور با آب تغذیه ورودی (روش ۳)

مقایسه روش‌های فوق:

روش اول: این روش به علت هزینه زیاد ساخت پیش گرمکن بخاری و نیاز به بخار از واحد عموماً استفاده نمی‌شود.

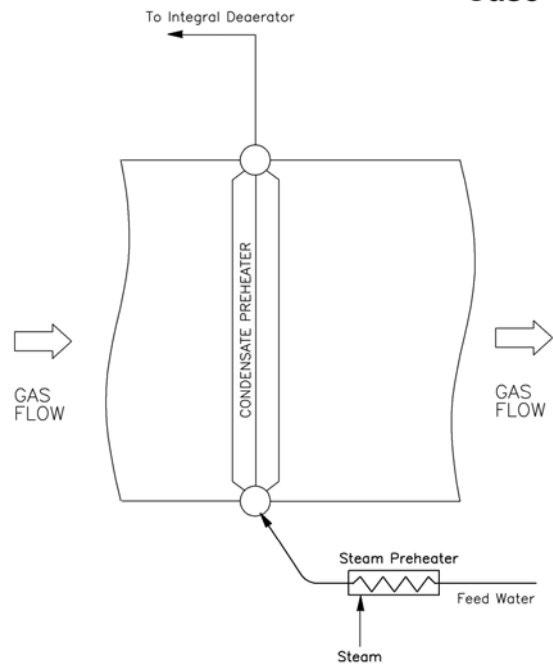
روش دوم: نیاز به در نظر گرفتن یک پمپ برای چرخش سیال می‌باشد.

روش سوم: در این روش بجای پمپ اضافه، از پمپ آب تغذیه بویلر زیر کش می‌شود. گرچه نیاز به سایز بزرگتر پمپ و لوله کشی وجود دارد، ولی در مجموع به صرفه‌تر می‌باشد.

در بعضی موارد از ترکیب روش دوم و سوم استفاده می‌شود بگونه‌ای که اگر نیاز به افزایش اندکی در درجه حرارت باشیم مسیر روش دوم و در صورت نیاز به افزایش بیشتر درجه حرارت، مسیر روش سوم باز می‌شود.

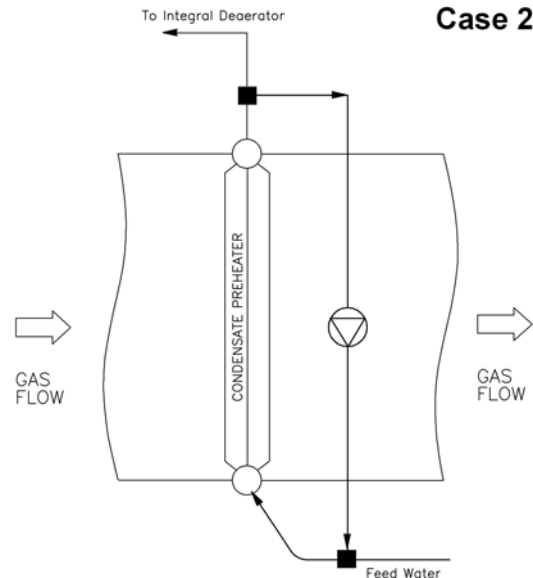
روش فوق هزینه اندکی دارد ولی در مواردی که SO_2 موجود در دود ناچیز است و دمای آب پایین‌تر از نقطه شبنم آب می‌باشد روش مناسبی نیست زیرا می‌توان با افزایش اندکی در درجه حرارت آب ورودی از خوردگی جلوگیری نمود. در شکل‌های (۷) تا (۹) روش‌های متداول برای افزایش درجه حرارت آب تغذیه ورودی به پیش گرمکن نشان داده شده است.

Case 1



شکل (۷) افزایش درجه حرارت آب تغذیه با استفاده از پیش گرمکن بخاری (روش ۱)

Case 2





همانطور که در شکل (۱۱) دیده می شود کاهش راندمان در هر دو روش کم می باشد.

کاهش فشار دیریتور نیز به علت کاهش درجه حرارت آب ورودی به دیریتور (افزایش Approach) می باشد. در هر صورت نکته مهم در هر دو روش محدود بودن افزایش درجه حرارت آب تغذیه می باشد. بنابراین این دو روش برای افزایش درجه حرارت آب تغذیه تا بالاتر از نقطه شبنم آب مناسب می باشند ولی با توجه به بالا بودن نقطه شبنم اسید سولفوریک این روش ها کارایی ندارند. مگر درحالی که درجه حرارت آب تغذیه بالا باشد.

۷- نتیجه گیری

۱- خوردگی اسیدی ناشی از اسیدهای خورنده مثل اسید سولفوریک می تواند با افزایش درجه حرارت آب تغذیه و دمای دود کنترل شود.

۲- در هنگام استفاده از سوخت های مایع باید پیشگرمکن بای پس شود. حداقل فشار دیریتور نیز باید بگونه ای باشد که درجه حرارت اشباع آن بالاتر از نقطه شبنم اسیدی باشد. ۳- در هیچ حالتی نباید درجه حرارت آب تغذیه کمتر از دمای نقطه شبنم آب باشد. بنابراین وجود یک مسیر ریسیرکوله نمودن آب گرم در بویلرهای بازیاب الزامی است.

۴- گرچه بعضی از فلزات در مقابل خوردگی مقاومت بیشتری از خود نشان می دهند ولی در مجموع هیچ فلزی در دراز مدت قادر به مقاومت در برابر خوردگی نمی باشد.

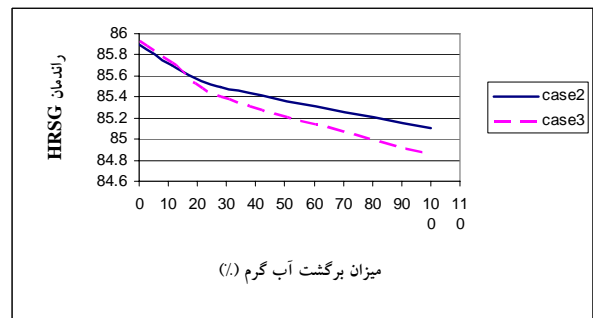
۸- مراجع

1. Land Instrument INT. "The Theory of Acid Deposition and Its Application to Dew Point

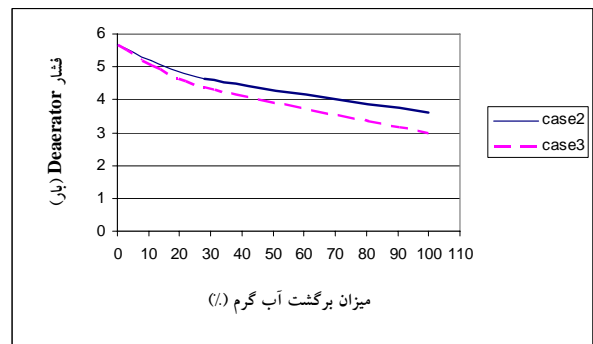


شکل (۱۰) میزان افزایش دمای آب ورودی بر حسب درصد برگشت آب گرم به ورودی پیش گرمکن

همانطور که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود افزایش درجه حرارت آب تغذیه در این روش محدود می باشد. علت این مسئله پایین بودن فشار دیریتور و در نتیجه پایین بودن درجه حرارت آب گرم خروجی پیش گرمکن و آب اشباع دیریتور می باشد.



شکل (۱۱) تغییر راندمان با ریسیرکوله نمودن آب گرم



شکل (۱۲) تغییر فشار دیریتور با ریسیرکوله نمودن آب گرم



۶. Verhoff, F.H. & Banchero, J.T., "Predicting Dew Point of Flue Gases", Chem. Eng. prog., August, ۱۹۷۴

۷. Verhoff, F. H., and Banchero, J. T., "A Note on the Equilibrium Partial Pressures of Vapors Above Sulfuric Acid Solutions", AIChE J., ۱۸, ۱۲۶۵-۱۲۶۸, ۱۹۷۲.

۸. Banchero, J. T., and Verhoff, F. H., "Evaluation and interpretation of the vapour pressure data for sulphuric acid aqueous solutions with application to flue gas dewpoints", J. Inst. Fuel, ۷۶-۸۰, June ۱۹۷۵.

۹. F.Gabrielli, S.Goodstine, T.Mastrorade "Cold-End Corrosion in HRSG", The Journal of all power plant chemistry, march ۲۰۰۲

Meter". Journal of The Institute of Fuel, June ۱۹۷۷, P. ۲۰۰۱-۲۰۰۸.

۲. Ganapathy, V., "Cold end Corrosion", Journal of Hydrocarbon Processing, January, ۱۹۸۹, p. ۵۷-۵۹.

۳. Robert, D., Harvey, M., "The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis", McGraw-Hill, ۱۹۹۱.

۴. Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., "Fundamentals of Classical Thermodynamics", John Wiley, ۱۹۷۶.

۵. Perry, R.H. & Chilton, C.H., "Chemical Engineers Hand book", ۵th ed, McGraw-Hill, New Yourk, ۱۹۸۷.



تأثیر ممانعت کننده‌های پایه پلیمری بر کنترل خوردگی و رسوب در آبهای خورنده

خسرو رحمانی^۱ - مجید عباسی^۲ - علیرضا کریمی^۳ - غلامرضا جعفری^۴

۱ و ۲- دانشگاه صنعت آب و برق، ۳ و ۴- نیروگاه همدان

کلمات کلیدی: ممانعت کننده، آب، خوردگی،

رسوبگذاری، کوپلیمر و هموپلیمر.

چکیده:

آبهای خنک کن مصرفی در صنایع مختلف پس از سیر کلاسیون در مبدل‌های حرارتی و رسیدن به حد تغلیظ معین، از سیکل آب گردش خارج شده و آب جبرانی جهت کنترل خوردگی و رسوبگذاری به آن اضافه می‌شود. در مواردی استفاده از آب خروجی یا حتی استفاده از آبهای خورنده جبرانی، به دلیل مشکلات مربوط به تأمین آب، اجتناب ناپذیر است. در این مقاله، ضمن بررسی شرایط خوردگی و رسوبگذاری یک نمونه آب خورنده، عملکرد ترکیبی از ممانعت کننده‌های پایه پلیمری در آزمونهای پلاریزاسیون و لوپ بر روی کوپنهای فولاد کربنی و برنجی مورد توجه قرار گرفته شده است. ترکیب ممانعت کننده‌های HEDP, PBTC, MA/CAC, HMPA جهت کنترل رسوب به‌مراه ممانعت کننده‌های خوردگی MBT-۲, HMP ZnSO_۴ در یک نمونه آب با کندانسیویته $۹۲۰۰ \mu\text{s}/\text{cm}$ باعث کاهش خوردگی نمونه‌های فولادی و برنجی به ترتیب از میزان $۱۰/۹۴(\text{mpy})$ و $۰/۶۱۳(\text{mpy})$ به میزان $۱/۸۴(\text{mpy})$ و $۰/۱۲(\text{mpy})$ شده است. میزان رسوب نیز بر روی کوپنهای فولادی از $۱۶/۱۶(\text{mg}/\text{cm}^2)$ به $۰/۰۲۵(\text{mg}/\text{cm}^2)$ رسیده است. این کاهش رسوب بر روی کوپنهای مسی از $۰/۰۳۹(\text{mg}/\text{cm}^2)$ به $۰/۰۲۵(\text{mg}/\text{cm}^2)$ می‌باشد.

۱- مقدمه و تئوری:

با توجه به شرایط آب گردش در سیستم‌های خنک کن صنایع مختلف و آلیاژهای بکار رفته در آنها، جهت کنترل و خوردگی از تمهیداتی همچون تنظیم اندیسهای تعادل رایزنر یا لانگلیر، ممانعت کننده‌های پلی فسفات به‌مراه ترکیبات روی جهت کنترل خوردگی و رسوب برای آلیاژهای پایه فولادی و از ممانعت کننده‌های پایه آزول مثل ^۱MBT، ^۲TTA، ^۳BTA جهت کنترل خوردگی آلیاژهای مس استفاده می‌شوند. مواد شیمیایی مذکور با پلاریزه کردن کاتدی و آندی مطابق مکانیزمهای ارائه شده در مراجع [۱ و ۲ و ۳ و ۴] می‌توانند باعث کاهش خوردگی و رسوبگذاری شوند. بررسیها نشان داده است که در شرایط خوردگی زیاد آب، تنظیم اندیس اشباع کارساز نبوده و ممانعت کننده پایه فسفات مطابق واکنش زیر هیدرولیز و خود باعث رسوبگذاری شده و ممانعت کننده‌های روی و

^۱-Mercapto Benzo Triazole

^۲-Toli Tri Azole

^۳-Benzo Tri Azole



آزولها خصوصاً بر روی آلیاژهای مس، تأثیر خود را از دست می‌دهند [۵]. لذا جهت کنترل خوردگی و رسوب جهت کنترل خوردگی و رسوب در آبهای خورنده، استفاده از ممانعت کننده‌های پایه پلیمری پخش کننده رسوب اخیراً مورد توجه قرار گرفته شده است. مواد پلیمری بر اساس وزن ملکولی خود ممکن است لخته‌ساز و یا پراکنده‌ساز باشند. پلیمرهای لخته‌ساز عموماً وزن ملکولی بیشتر از ۱۰۰۰۰۰۰ گرم است. مواد پراکنده‌ساز عموماً دارای وزن مولکولی ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ می‌باشند. از مهمترین مواد پایه پلیمری می‌توان به کوپلیمرها، هموپلیمرها اشاره نمود که با توجه به آب خورنده، و ملاحظات اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پلیمرهای پایه فسفونات مثل HEDP^۴، اسیدهای کوپلیمر مثل مالتیک و کربوکسیک اسیدها با نام MA/CAC^۵، هموپلیمرها مثل مالتیک آنهیدرید HPMA^۶ و همچنین PBTC^۷ از معروفترین ممانعت کننده‌های رسوب در آبهای رسوبگذار و خورنده بشمار می‌روند که هم اکنون تحقیقات زیادی بر روی آنها در حال انجام است. مطابق با شرایط آب، مواد مذکور به نسبت‌های مختلفی ترکیب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶].

دی فسفوناتها (HEDP) با فرمول شیمیایی $C_2H_8O_7P_2$ ، عمدتاً جهت جلوگیری از رسوبات کربنات و سولفات کلسیم و زنگ آهن به ترتیب به میزان ۰/۲۵ (ppm) و ۳۰ (ppm) و ۱ (ppm) به آب اضافه می‌شوند. کوپلیمر پایه اسیدی مالتیک آنهیدرید - کربوکسیلیک اسید (MA/CAC) با فرمول شیمیایی $(C_4H_4O_4-R)_m - (C_4H_4O_4)_n$ علاوه بر رسوبات کربنات و سولفات کلسیم، از رسوبات فسفات جلوگیری کرده و ممانعت خوردگی مناسبی برای فولادها بشمار می‌رود. میزان مصرف آن در حدود ۱ ppm است. ترکیب PBTC نیز پایه اسیدی دارد. فرمول شیمیایی آن $C_7H_{11}O_4P$ بوده و به میزان ۳-۴ ppm به آب خورنده اضافه می‌شود. این ماده نسبت به پلی فسفاتها در شرایط دمایی بالاتر و سرعت بیشتر سیال کارائی بهتری دارد. هموپلیمر مالتیک آنهیدرید با ترکیب شیمیایی $(C_4H_4O_4)_m - (C_4H_4O_4)_n$ در آبهای با سختی و دمای بالا در حد ۱ ppm کارائی مناسبی از خود نشان می‌دهد [۶]. علاوه بر ممانعت کننده‌های مذکور جهت کنترل خوردگی سازه‌های فولادی و آلیاژهای مسی می‌باید از ممانعت کننده‌های پایه روی مثل سولفات یا کلرور روی هگزا متا فسفات برای سازه‌های فولادی و ترکیبات آزول مثل MBT و BTA برای آلیاژهای مس استفاده نمود. میزان مصرف ترکیبات روی باید به اندازه‌ای باشد که روی باقیمانده در آب از ۲ ppm تجاوز نکند. MBT و BTA نیز در حد ۲-۱ ppm به آب اضافه می‌شود [۶ و ۷].

۲- روش تحقیق:

۲-۱- تهیه آب خورنده و کوپن خوردگی:

جهت بررسی عملکرد ممانعت کننده‌های خوردگی و رسوب، از آب با کندانسیوتته $9200 \mu s/cm$ با آنالیز شیمیایی زیر استفاده گردید.

۴-Hydroxythylidene-۱,۱-Diphosphonic Acid
 ۵-Maleic Anhydride/Carboxylic Copolymer
 ۶-Maleic Anhydride Homopolymer
 ۷-۲-Phosphono-Butane-۱,۲,۴-Tricarboxylic Acid



جدول ۱- آنالیز آب خورنده جهت آزمایش

Cond ($\mu s/cm$)	pH	T.H (CO_3^{--})	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	P O ₄ ⁻ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	M (ppm)	SI
۹۲۰۰	۸	۱۴۲۰	۱۲۵	۲۷۵	۱۴	۵۱	۶	۰/۴

T.H=Total Hardness

M=Alkalinity M

SI=Stability Index

جهت بررسی خوردگی و رسوبگذاری آب از نمونه‌های برنجی و فولادی با ترکیب شیمیایی زیر استفاده گردید. نمونه‌های مذکور از لوله‌های آدمیرالتی و ورقهای ساخت شرکت فولاد مبارکه تهیه شدند.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی نمونه‌های خوردگی

فولاد ساده کربنی	۰/۱۲ %C:	۰/۶۰ %Mn:	۰/۰۱ %Si:	۰/۰۱۲ %P:	۰/۰۰۶ %S:
برنج آدمیرالتی	۷۱/۶ %Cu:	۲۷ %Zn:	۱ %Sn:	سایر عناصر: ۰/۴%	

۲-۲- فرمولاسیون ممانعت کننده ترکیبی:

ممانعت کننده‌ها و افزودنیها معمولاً به دو صورت جداگانه و یا ترکیبی به آب اضافه می‌شوند. با توجه به اینکه ممکن است بعضی از ممانعت کننده‌ها بر اثر کنشهای شیمیایی یکدیگر، رسوبات سنگینی را ایجاد کنند، مهندسی خوردگی تمایل دارند ممانعت کننده طراحی شده را به صورت ترکیبی ارائه نموده و با مقدار مشخص آنرا تزریق کنند. جهت تحقیق مورد نظر از این روش استفاده شده است. ممانعت کننده‌های مورد نظر در سه ترکیب A و B و C فرموله شده‌اند. ممانعت کننده‌های B و C برای آب با شرایط معمولی کاربری دارند ولی برای آبهای خورنده کارساز نیستند. میزان هر یک از ممانعت کننده‌ها بر اساس مقادیر ارائه شده در منابع [۶ و ۷ و ۸] تهیه و به pH مناسب رسانده شده‌اند. جدول (۳) ترکیب ممانعت کننده‌ها جهت انجام آزمایشها را ارائه می‌دهد.

جدول ۳- تهیه ترکیب ممانعت کننده‌های خوردگی و رسوب در آب خورنده

ترکیب ممانعت کننده رسوب (A)	HEDP: ۱۰cc	PBT C: ۱۰cc	MA/C AC: ۱۲cc	HP MA: ۸cc	HCl(۳۷%): ۵cc	H ₂ O: ۵۵cc
ممانعت کننده	ZnSO ₄ .۷	H ₂ O	-	-	-	-



خوردگی فولاد کربنی (B)	H ₂ O: ۱۸gr	: ۸۲cc				
ممانعت کننده خوردگی آلیاژ مس (C)	MBT: ۲gr	NaOH: ۳gr	H ₂ O: ۹۵cc	-	-	-

در قسمتهای بعدی بطور اختصار از ترکیب A, B, C نام برده می شود.

۲-۳- بررسی آزمونهای الکترو شیمیایی جهت تعیین تزریق بهینه:

جهت تعیین تزریق مواد ممانعت کننده های فرموله شده در جدول (۳)، ممانعت کننده رسوب و ممانعت کننده خوردگی فولاد در سه مقدار ۲۰ ppm و ۴۰ ppm و ۵۰ ppm و ممانعت کننده خوردگی آلیاژهای مس در دو مقدار ۱/۵ ppm تا ۲/۵ ppm مورد بررسی قرار گرفته شدند. نمونه های برنجی و فولادی پس از شستشو و چربی زدایی در آب با کنداکت $9200 \mu s/cm$ قرار گرفته شده و منحنی پلاریزاسیون (پتانسیو دینامیک) آنها توسط دستگاه پتانسیو گالوانو استات EG&G مدل ۲۶۳A ترسیم شدند. جدول ۴ و ۵ خلاصه نتایج آزمونهای پلاریزاسیون را در شرایط با و بدون ممانعت کننده نشان می دهد. با توجه به تغییرات پتانسیل خوردگی، ترکیب ممانعت کننده ها رفتار آندی داشته و واکنشهای آندی را مختل می سازند. با اعمال ممانعت کننده ها، منطقه رویین بر روی نمونه های برنجی وسیع تر بوده ولی تأثیر پسیو شدن در نمونه های فولادی به اندازه آلیاژهای مس نیست.

جدول ۴- نتایج آزمونهای پلاریزاسیون در شرایط مختلف تزریق در آب با کنداکت $9200 \mu s/cm$ برای فولاد

میزان تزریق بر حسب (ppm)	O.C.P (mV)	E _C _{orr} (mV)	I _{Corr} ($\mu A/cm^2$)	R.P (K Ω)	C.R (m.p.y)
بدون ممانعت کننده	۵۹	۶۱	۱۰/۰۴	/۹۴۸	۶۳
	-۰/۹	--		.	۴/



	۴۸	/۴	۳/۷۲	/۷۱۳	۷۲
A+B=۲۰	-۲	-۴۹۰	۳/۲۸	۲	۱/
C=۲	۴۴	/۹	۳/۴۵	/۹۵۶	۵۱
A+B=۴۰	-۴	-۴۵۱		۲	۱/
C=۲	۴۶	/۷		/۵۳۶	۵۹
A+B=۶۰	-۴	-۴۷۱		۳	۱/
C=۲					
B=۱۰	-۲	-	۸/۶۱۵	/۲۹۲	۹۸
C=۱/۵	۵۳	۵۴	۴/۳۹۷	۱	۳/
B=۲۰	-۸	-۵	۶/۴۹۳	/۳۲۹	۰۳
C=۲	۶۰	۶۱		۲	۲/۱
B=۳۰	-۹	-۶		/۵۴۱	۹۹
C=۲/۵				۱	۲/۹

جدول ۵- نتایج آزمونهای پلاریزاسیون در شرایط مختلف تزریق در آب با کنداکت $9200 \mu s/cm$ برای برج

میزان تزریق بر حسب (ppm)	O.C.P (m V)	E _C _{orr} (m V)	I _{Corr} ($\mu A/cm^2$)	R.P (K Ω)	C.R (m .p.y)
بدون ممانعت کننده	۱۱	/۴	۲/۵۳۲	/۱۸۳	۲۲
	-۰/۷	-۶۹		۴	۱/۷
A+B=۲۰	۷۱	۱۳	۰/۳۹۷	/۴۲	۱۹
C=۲	-	-۹۷/	۰/۱۶۷	۲۸	۰/۲
A+B=۴۰	۱۱	/۲	۰/۳۷	/۸۵	۰۸
C=۲	-۸	-۱۴۴		۷۲	/۱
A+B=۶۰	۱۰	/۷		/۷۱	۱۷
C=۲	-۶	-۱۲۸		۳۱	-/۹
	۱۳	۱۴	۱/۸۷۷	/۴۵۴	۹۰



B=۱۰	-۷	-۴	۱/۵۸	۵	۰/۹
C=۱/۵	۱۶	۵۷	۱/۸۱۵	۶/۱۶	۷۶
B=۲۰	-۲	-۹۴/		۴/۸۸	۰/۵
C=۲	۱۳	۱۴			۸۷
B=۳۰	-۲	-۲			۰/۹
C=۲/۵					

با توجه به بررسی پلاریزاسیون و تکرار پذیری منحنی‌های پلاریزاسیون، بهینه‌تزیق C=۲ppm و A+B=۴۰ppm تشخیص داده شد.

۲-۴- بررسی آزمونهای لوپ:

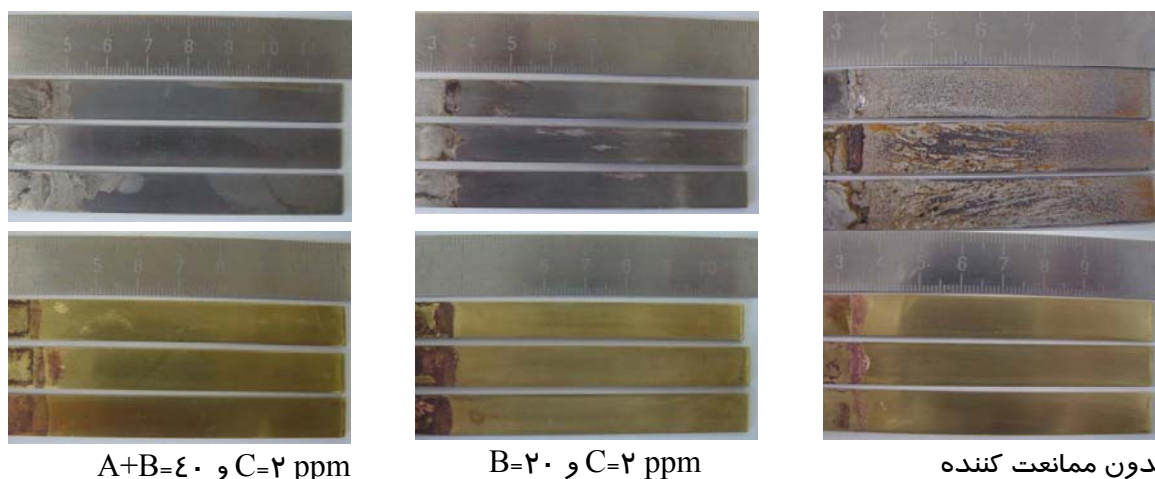
جهت اطمینان از عملکرد ممانعت کننده‌های مذکور در آب خورنده با کنداکت $9200 \mu s/cm$ ، کوپنهای فولادی و آدمیرالتی در ابعاد حدودی $9 \times 1 \text{ cm}^2$ در هر شرایط ۳ عدد کوپن (تکرار پذیری آزمایش) تهیه و پس از آماده سازی سطح، در سیستم لوپ که مطابق استاندارد ASTM - D2686 ساخته شده، قرار گرفت. زمان آزمون در حدود یک ماه بوده و جهت حذف اثرات فعالیتهای میکروبی روزانه به مخزن سیستم لوپ، کلر تزریق شد؛ به میزانی که اندازه گیری کلر باقیمانده پس از یکساعت کمتر از $1/5 \text{ ppm}$ می باشد. آزمون مذکور در شرایط با و بدون ممانعت کننده برای فولاد کربنی و برنج آدمیرالتی در جدول (۶) ارائه شده است.



جدول ۶- نتایج حاصل از آزمونهای لوب در آب با کدکات $100 \mu s/cm$ در شرایط مختلف تزریق

وزن رسوب (mg/cm^2)	سرعت خوردگی (mpy)	محصولات خوردگی (g)	وزن پس از شستن رسوب (g)	وزن قبل از شستن رسوب (g)	وزن اولیه (g)	ابعاد (mm)	نمونه	شرایط آب و میزان تزریقات
۰/۰۴۳	۰/۵۱۵	۸/۹۶۴۲	۸/۹۷۳۷	۸/۹۷۴۵	۸/۹۸۱۵	۸۹x۱۰/۴	برنج ۱	آب بدون ممانعت کننده
۰/۰۳۷	۰/۴۲۶	۸/۸۹۰۵	۸/۸۹۹۰	۸/۸۹۹۷	۸/۹۰۴۸	۸۹x۱۰/۴	برنج ۲	
۰/۰۳۸	۰/۹۰	۸/۷۸۱۴	۸/۷۸۹۳	۸/۷۹۰۰	۸/۸۱۱۶	۸۹x۱۰/۲	برنج ۳	
۱۶/۴۸	۱۰/۷۶	۷/۰۷۴۵	۷/۰۸۶۱	۷/۳۴۰۷	۷/۳۴۸۲	۷۷/۲x۱۰	فولاد ۱	
۱۳/۰۴	۹	۷/۰۶۱۲	۷/۰۷۲۹	۷/۲۷۷۷	۷/۲۸۷۳	۷۶/۶x۱۰	فولاد ۲	
۱۸/۹۸	۱۳/۰۷	۶/۸۷۱۱	۶/۸۸۰۰	۷/۱۷۳۱	۷/۳۰۳۶	۷۷/۲x۱۰	فولاد ۳	
۰/۱۳۸	۰/۲۴	۸/۷۳۸۴	۸/۷۳۹۳	۸/۷۴۱۸	۸/۷۴۴۶	۸۹/۶x۱۰/۱	برنج ۱	آب همراه با
۰/۱۵۰	۰/۳۲	۸/۷۹۲۴	۸/۷۹۳۸	۸/۷۹۵۶	۸/۸۰۰۶	۸۹/۵x۱۰	برنج ۲	B=۲۰ ppm
۰/۱۴۴	۰/۳۰	۸/۸۲۴۴	۸/۸۲۶۲	۸/۸۲۸۸	۸/۸۳۱۵	۸۹/۹x۱۰	برنج ۳	C=۲ ppm
۲/۳۳	۱/۶۵	۸/۶۲۵۵	۸/۶۳۷۴	۸/۶۸۰۲	۸/۶۸۲۶	۹۱/۸x۱۰	فولاد ۱	
۱/۷۸	۱/۵۱	۸/۶۷۳۲	۸/۶۷۶۶	۸/۷۰۵۹	۸/۷۲۵۷	۹۲x۱۰	فولاد ۲	
۲/۵۴	۱/۵	۸/۶۹۰۵	۸/۶۹۳۷	۸/۷۴۰۵	۸/۷۴۲۳	۹۱/۸x۱۰	فولاد ۳	
۰/۰۲۲	۰/۱۱	۹/۰۲۴۴	۹/۰۲۷۴	۹/۰۲۷۸	۹/۰۲۸۰	۸۹/۹x۱۰	برنج ۱	آب همراه با
۰/۰۳۱	۰/۰۹	۷/۸۶۴۵	۷/۸۶۶۵	۷/۸۶۷۰	۷/۸۶۷۲	۸۷/۳x۹	برنج ۲	A+B=۴۰ ppm
۰/۰۲۲	۰/۱۶	۸/۹۸۸۸	۸/۹۹۳۸	۸/۹۹۴۲	۸/۹۹۴۱	۸۹/۵x۱۰	برنج ۳	C=۲ ppm
۱/۱۵	۱/۹۹	۸/۱۷۴۸	۸/۲۲۰۷	۸/۲۴۱۵	۸/۲۲۱۱	۹۰x۱۰	فولاد ۱	
۰/۶۴۸	۱/۶۷	۸/۱۰۳۴	۸/۱۳۳۲	۸/۱۴۴۷	۸/۱۴۲۰	۸۹/۶x۹/۹	فولاد ۲	
۰/۶۳۶	۱/۸۸	۸/۰۴۴۴	۸/۰۷۴۸	۸/۰۸۶۱	۸/۰۸۷۸	۸۹/۶x۹/۹	فولاد ۳	

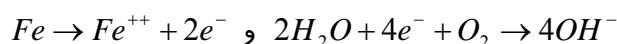
تصاویر کوپنهای خوردگی در شرایط مختلف در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- تصاویر کوپنهای خوردگی در آزمون لوپ در شرایط مختلف تزریق مواد ممانعت کننده و بدون ممانعت کننده

۳- بحث و نتیجه گیری

بررسیهای رسوب و خوردگی بر روی کوپنهای خوردگی در آزمون لوپ در آب خورنده بدون ممانعت کننده، شرایط حاد به لحاظ خوردگی و رسوب را نشان می‌دهد. تجمع شدید رسوبات و خوردگی در زیر آن خصوصاً برای نمونه‌های فولادی قابل توجه است. واکنشهای آندی و کاتدی فولاد در شرایط آب خورنده بصورت زیر است:



با وجود تنظیم pH جهت کنترل رسوبگذاری، به دلیل وجود آنیونهای فسفاتی و سولفات رسوبات متنوع فسفات و سولفات به همراه زنگ و سولفید آهن بر روی کوپنها تجمع پیدا کرده است. این مسئله توسط ثوابت تعادلی مربوط به تشکیل رسوبات فسفات و سولفات کلسیم به اثبات رسیده است. با حذف رسوبات، خوردگی حفره‌ای شدیدی که بعضاً در جهت رشد رسوبات، ایجاد شده‌اند، قابل مشاهده است. پیل اختلاف دمشی علت اصلی خوردگیهای مذکور است. رسوبات بر روی کوپنهای برنجی به گونه‌ای است که در زیر آن رسوبات روی زدایی به راحتی مشاهده می‌شوند. با توجه به مقاومت مناسب خوردگی برنج آدمیرالیتی نسبت به فولاد، عمده خوردگی آلیاژ زدایی در زیر رسوبات مشاهده می‌شود. با اضافه کردن ممانعت کننده‌های سولفات روی، هگزا متا فسفات و MBT میزان رسوبات و خوردگی کمتر شده ولی باز هم مواردی از مشکلات مذکور دیده می‌شوند. هگزامتا فسفات به دلیل هیدرولیز شدن، رسوبات سفید رنگی ایجاد می‌کند که از کارایی ممانعت کننده‌های روی و آزولها می‌کاهد [۵ و ۹]. استفاده از ممانعت کننده پایه پلیمر با ترکیبات مختلف به لحاظ رسوب و خوردگی توانسته است شدت خوردگی را تا ۱۰ برابر کمتر کرده و رسوبگذاری را بر روی کوپنهای برنجی به حد صفر برساند. بررسیهای AC آمپدانس و مطالعات اسپکتروسکوپی (FTIR) نشان داده است که ممانعت کننده‌های پلیمری فسفوناتی، یک لایه محافظ بر روی سطوح فولادی ایجاد می‌کنند که هم از رشد رسوب جلوگیری می‌کند و هم یک فیلم محافظ به حساب می‌آید [۹]. مکانیزم عمده‌ای که جهت کنترل خوردگی و رسوبگذاری خصوصاً ارائه شده به این صورت است که رسوبات کلسیمی اولیه که بر روی سطوح فولادی و حتی برنجی قرار می‌گیرند دارای بار الکتریکی مثبت هستند. وقتی مواد پلیمری مذکور به آب اضافه



می‌شوند، قطب رسوبات میکرو کریستالی به دلیل جذب منفی می‌شوند به همین دلیل رسوبات کلسیمی دیگر قادر به جذب روی سطوح نیستند. از جهتی جوانه‌های رسوب در داخل آب جذب ترکیبات اسید کربوکسیلیک شده و حالت پخش کنندگی به آنها داده امکان ترسیب بر روی سطوح را نخواهند داشت [۲ و ۹].

نمکهای روی به عنوان یک ممانعت کننده کاتدی به صورت هیدروکسید روی بر روی مناطق کاتدی راسب شده و واکنشهای کاتدی را مختل می‌سازد. نمکهای روی به تنهایی در pH بالا کارایی ندارند ولی وقتی با پلیمرهای آلی ترکیب می‌شوند ممانعت کنندگی خود را تا pH=۹ حفظ می‌کنند. ترکیبات آزولی با پیوند نیتروژنی خود به عنوان یک ممانعت کننده نوع جذبی بر روی سطوح برنجی تشکیل یک پیوند کووالانسی می‌دهد [۴].

مراجع

- ۱- NACE TPC۱ “Cooling Water Treatment Manual”, ۱۹۹۷.
- ۲- L.Legrand, “Prevention of Corrosion and Scaling in Water Supply System”, ۱۹۹۱.
- ۳- Y.Muller, Corrosion Science, ۳۸, ۱۱۰۳, ۱۹۹۶.
- ۴- J.B.Cotton and I.R.Scholes, “BTA and Related Compounds as Corrosion Inhibitors for Copper”, Brit.Corrosion.J, Vol.۲, Jan, ۱۹۶۷.
- ۵- J.W.McCoy, “The Chemical Treatment of Cooling Water”, Chemical Publishing Company, New York, ۱۹۷۴.
- ۶- EPRI Report, “Influence of Generic Chemical Additives on Cooling System Performance”, RP ۱۲۶۱-۱۵, ۱۹۸۸.
- ۷- Nathan, “Corrosion Inhibitors”, NACE, ۱۹۹۲.
- ۸- L.Sastri, “Corrosion Inhibitors”, ۱۹۹۸.
- ۹- X.H.To, N.Peber, “A Corrosion-Protective Film Formed on Carbon Steel by an Organic Phosphonate”, Corrosion Sci., Vol.۳۹, No۱۰-۱۱, ۱۹۹۷.



آنالیز تخریب سر شفت روتور توربین گاز هیتاچی مدل MS 5001

اسماعیل پورسعیدی^۱ - علی احمدی^۲ - علیرضا رضوی^۳

Email: epsaeidi@mail.znu.ac.ir

۱- زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی

۱، ۳ و ۲ - کرج - کیلومتر ۷ جاده ملارد - شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها - ص - پ ۱۱۳۷-۳۱۵۸۵
واژه های کلیدی: آنالیز تخریب، روتور، مکانیک شکست، توربین گازی و سطوح شکست

چکیده

یک واحد توربین گازی هیتاچی مدل MS 5001 بعد از حدوداً ۹۵۰۰۰ ساعت کارکرد دچار حادثه گردید. در اثر این حادثه خسارات بسیار زیادی به توربین و کمپرسور وارد شد. به منظور بررسی نوع و مکانیزم شکست سرشفت، آزمایشهای بازدید چشمی، اندازه گیری ابعادی، آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، رپلیکا، شکست نگاری و همچنین آزمایشهای کشش و ضربه انجام گردید. نتایج آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، آزمایش کشش نمونه های استاندارد، تست متالوگرافی و Replica منطبق بر نتایج متریال اعلام شده از طرف شرکت تولید کننده می باشد. نتایج حاصل از بررسی شکست نگاری توسط SEM نشان می دهند که مکانیزم اتصال حفره ها در سرتاسر سطح شکست روتور بعنوان

مکانیزم غالب، فعال بوده است. نظر به اینکه مکانیزم اتصال حفره ها از مکانیزمهای اصلی شکست ناشی از اضافه بار یا overload می باشد. لذا می توان این عامل را بعنوان علت اصلی شکست روتور قلمداد کرد. نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه های شیاردار اختلاف معنی داری را نسبت به از مشخصات مکانیکی اعلام شده از طرف شرکت تولید کننده نشان داد. نتایج حاصل از آزمایش ضربه در دماهای مختلف نشان می دهد که دمای لازم برای ۵۰ درصد شکست ترد روتور نزدیک به دمای اتاق می باشد.

۱- مقدمه

امروزه نظر به کارآیی و قابلیت اطمینان دستگاهها نیاز به مواد با خواص بهتر و درک بیشتری از رفتار آنها

^۱ - دکترای مکانیک

^۲ - کارشناس ارشد مکانیک

^۳ - کارشناس ارشد متالورژی



بکار برده می شود که اغلب به عنوان انتشار سریع ترک ها بدون تغییر شکل پلاستیک و در تنشی کمتر از حد تسلیم ماده در صورت می گیرد. در عمل بیشتر شکست های ترد قدری تغییر شکل پلاستیک را در نوک ترک از خود نشان می دهند که می تواند از درون دانه ها (کلیواژ) بین دانه ها رخ دهد. اگر درجه حرارت به اندازه کافی پائین باشد، تقریباً تمام جامدات کریستالی در اثر کلیواژ دچار شکست می شو ند. همچنین فلزاتی که اغلب از خود رفتار نرم نشان می دهند، تحت بعضی شرایط نظیر بارگذاری سه بعدی، سرعت بارگذاری بالا و دمای های پائین می توانند به شکلی شکننده که منجر به رشد سریع و ناپایدار ترک می شود رفتار کنند. هر چند که ترک های خستگی به وسیله تکرار بارگذاری دینامیکی ایجاد می شوند ولی شکست ترد، در شرایط مناسب به آسانی به وسیله تنش استاتیکی نیز شروع می شود. از ویژگیهای عمومی فرآیند خستگی در سیکلهای زیاد در موارد زیر خلاصه می شوند.

- دامنه تنش (تفاضل تنش ماکزیمم و تنش مینیمم) کم است و تنش ماکزیمم کمتر از تنش تسلیم است.
- پراکندگی در عمر خستگی زیاد است.
- ناحیه شکست نهایی بخش کوچکی از سطح شکست را تشکیل می دهد (البته به سطح تنش وارده وابسته است).
- خطوط ساحلی تحت شرایط دامنه تنش متغیر تشکیل می شوند و خطوط موج خستگی در برخی آلیاژها و در برخی نواحی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی قابل تشخیص می باشند.

۲- تاریخچه و شرح حادثه

یک واحد گازی از نوع MS 5001 شرکت هیتاچی که دارای مشخصات سرعت دورانی ۵۱۰۰ دور بر دقیقه و توان خروجی حدود ۱۸ مگاوات می باشد، پس از استارت با شبکه پارالل شده ولی پس از حدود ۳ ساعت کارکرد عادی با صدای انفجار، دچار حادثه گردید. در

تحت شرایط کاری می باشد. از آنجاکه شرایط کاری روز به روز سخت تر و پیچیده تر می شود، بنابر این طراحان بایستی درک صحیحی از انواع مختلف از کارافتادگی و شکست مواد موجود تحت شرایط بارگذاری واقعی داشته باشند. انواع اصلی از کارافتادگی شامل تسلیم عمومی، تغییر شکل پلاستیک، ناپایداری پلاستیک، کماتش، خستگی، خوردگی، خوردگی تنشی، خزش و شکست ترد می باشند. بطور کلی یک یا چند نوع از کارافتادگی قبل از این که قطعه به شکست نهایی برسد ممکن است دخالت داشته باشند. این مطلب بویژه در مواردی از اضمحلال ناشی از خستگی، خزش یا خوردگی که در آنها شکست نهایی می تواند در اثر شکست ترد انجام شود صادق است. شکست نرم معمولاً پس از تغییر شکل پلاستیک گسترده به وجود می آید. که معمولاً از تشکیل و به هم پیوستن نابجائیها نتیجه می شود. نابجائیها اغلب درناخالصی ها در اثر تنش های کششی بالا در محل سطح مشترک ناخالصی- فلز به وجود می آیند. شکست نرم معمولاً یک مسیر درون دانه ای را طی می کند ولی اگر دانسیته ناخالصی ها یا جای خالیهای از قبل موجود در مرزدانه ها بیشتر از درون دانه ها باشد، آنگاه مسیر شکست می تواند از مرزدانه ها بگذرد که بدین ترتیب یک شکست فیبری یا بین دانه ای نرم بوجود می آید. در مواردی که ناخالصی وجود ندارد، دیده شده است که نابجائیها از طریق حضور باند لغزشی موضعی و ناپایداری های ماکروسکوپی در محدوده های شدیداً تغییر شکل یافته به وجود می آیند و این موضوع منجر به باریک شدن مقطع یا تشکیل ناحیه های برش متمرکز می شود. مسیر شکست نرم اغلب بی قاعده است و تعداد زیادی از نابجائیهای کوچک موجود ظاهری رگه دار به سطح شکست می دهد. قابلیت و ظرفیت بیشتر فلزات مهندسی برای تغییر شکل پلاستیک و کارسختی دارای ارزش بسیار زیادی در ایمن سازی علیه اشتباهات طراحی، بارگذاری های بیش از حد اتفاقی یا شکست به علت خستگی، خوردگی یا خزش می باشد. عبارت شکست ترد برای توصیف شکست های ناپایدار سریع



مختلفی شامل سه برش عرضی (عمودبرمحور روتور) و سه برش طولی (در راستای محور روتور) بر روی سرشفت شکسته شده انجام گرفت (شکل ۲). سرشفت بوسیله ماشین افزار تراشکاری، به دو قسمت Z1 و Z2 تقسیم گردید که قسمت Z1 شامل سطح شکسته شده و قسمت Z2 شامل قسمت انتهایی ویاتاقان محوری می باشد. سپس قسمت سطح شکسته شده Z1 بوسیله دستگاه برش به دو قسمت Y1، Y2 تقسیم گردید که ابتدا بر روی دو طرف قسمت Y2 (مقاطع برش خورده) آزمایش سختی سنجی انجام گردید و سپس همین قسمت به منظور تهیه نمونه های آزمایش کشش و ضربه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). همچنین قسمت سطح شکسته شده Y1 تحت آزمایش سختی سنجی قرار گرفت و سپس بوسیله دستگاه برش به دو قسمت X1، X2 تقسیم گردید. در ادامه ابتدا X1 به سه قسمت W1، W2 و W3 و سپس W3 نیز به چهار قسمت A، B، C و D با برشهای طولی برای تهیه نمونه های فرکتوگرافی (با استفاده از میکروسکوپ SEM) تقسیم گردیدند (شکل ۴). سپس قسمت X2 نیز بوسیله دستگاه برش برای تهیه نمونه های آزمایشهای متالوگرافی، آنالیز شیمیایی و سختی سنجی به سه قسمت U1، U2، U3 و خود قسمت U2 نیز به چهار قسمت E، F، G، H به منظور انجام آزمایش متالوگرافی و آنالیز شیمیایی تقسیم گردید که بر روی قسمت E و F بترتیب آزمایش متالوگرافی و آنالیز شیمیایی صورت گرفت (شکل ۴).

۳-۱- آنالیز شیمیایی و سختی سنجی

آزمایش آنالیز شیمیایی کوانتومتری در چند موقعیت مختلف شامل سطح خارجی و سطح داخلی سرشفت شکسته شده روتور انجام گردید. جنس روتور براساس اسناد و مدارک سازنده فولاد NiCrMoV می باشد و شیمیایی فولاد بر اساس استاندارد ASTM منطبق برکد A471CL.19 میباشد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

اثر این حادثه خسارات بسیار زیادی به توربین و کمپرسور وارد شد. بطوریکه قسمتهای ذیل دچار خسارت اساسی گردیده و تقریباً کلیه اجزای توربو کمپرسور غیرقابل استفاده شدند. تخریب توربین راه انداز در ناحیه اتصال به سرشفت کمپرسور (کوپلینگ، محورها و پوسته ها)، تخریب کامل سرشفت روتور در ناحیه یاتاقان ژورنال سمت کمپرسور (جدایش و شکست کامل در این ناحیه)، تخریب کامل یاتاقانهای ژورنال، محوری و پوسته یاتاقان سمت کمپرسور، تخریب پوسته ورودی هوای کمپرسور، پوسته های Discharge و Forward کمپرسور، تخریب کلیه پره های ثابت کمپرسور، خمیدگی و خسارت شدید نوک پره های متحرک ردیف اول تا چهارم کمپرسور، تخریب کامل پره های متحرک ردیف پنجم تا ۱۶ کمپرسور، تخریب کامل بولتهای اتصال کمپرسور به تورک تیوب (جدایش و شکست کامل در این ناحیه)، خسارت به تعدادی از اسپیندل بولتهای کمپرسور، تورک تیوب، Tip Rubbing شدید پره های ردیف اول توربین، پره های ثابت، Rubbing شدید شکست تعدادی از پره های ردیف دوم توربین، تخریب پره های ثابت ردیف دوم توربین، همچنین خسارات به قسمتهای ناحیه خروجی دود و ناحیه گیربکس کاهش دور وارد شده است (شکل ۱). این روتور به مدت ۹۵۰۰۰ ساعت کار کرده و تعداد استارتهای آن ۳۷۸۵ است. همچنین ازداده ها و اطلاعات ثبت شده بهره برداری و لرزش یاتاقانهای آن شرایط غیرعادی گزارش نشده است.

۳-۲- آزمایشها

به منظور بررسی نوع و مکانیزم شکست سرشفت، آزمایشها و بررسی های مختلفی انجام گردید و اسناد و مدارک نیروگاه شامل نقشه ها و داده های بهره برداری مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشهایی شامل بازدید چشمی، اندازه گیری ابعادی، آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، رپلیکا، شکست نگاری و همچنین آزمایشهای کشش و ضربه بر روی سرشفت انجام گردید. آماده سازی نمونه های آزمایشی با برشهای



تشخیص است. مطابق شکل مشاهده می شود که ذرات کاربیدی بصورت تصادمی در زمینه انتشار یافته اند. این ذرات ماهیتا کاربیدهای وانادیم و بعضا کروم و مولیبدن بوده که بعنوان فازهای اصلی کاربیدی ایفای نقش می کنند (استحکام دهی و پایداری ساختاری در شرایط کاری).

۳-۳ - آزمایشهای مایع نافذ، بازرسی

چشمی و شکست نگاری ماکروسکوپی

آزمایش مایع نافذ به منظور مشاهده عیوب و ترکهای سطحی انجام شد که هیچگونه ترک سطحی مشاهده نگردید.

در مقیاس ماکروسکوپی سطح شکست روتور از دو ناحیه متفاوت مدور و هلالی شکل تشکیل شده است (نواحی A و B در شکل ۷ بعنوان ناحیه مدور و ناحیه هلالی شکل C). ناحیه مدور که قسمت بزرگتری از سطح شکست را به خود اختصاص داده، در امتداد یک کمان تقریباً ۱۲۰ درجه از شیار موجود بر روی سطح روتور (ناحیه A) شروع شده و در ناحیه B گسترش یافته است. بررسیهای انجام شده با استریو میکروسکوپ وجود خطوط ماشینکاری و شبه ترکهایی را در شیار روتور نشان می دهد (شکل ۷). وجود شیار و خطوط ماشینکاری، باعث ایجاد تمرکز تنش در این ناحیه گردیده و وجود شبه ترکهای ریز مسئله بارهای سیکلی را تداعی می نماید. در ناحیه A شکل ۷، خطوط موج مشاهده می شود که می توانند نشانه هایی از فعال بودن مکانیزم خستگی در چندین نقطه روی سطح ناحیه A باشند که از نقطه X شروع شده و به ناحیه D ختم می شوند و در ادامه در ناحیه B خطوط شعاعی، نواحی غیر همسطح را بر روی سطح شکست از یکدیگر جدا کرده و مسیر ماکروسکوپی رشد ترک را نشان می دهند. در ناحیه C نیز خطوط مواجی مشاهده می شوند که می توانند ناشی از رشد جبهه ترک در بارگذارهای کششی یا نشانه ای از فعال بودن مکانیزم خستگی تحت بارگذارهای خمشی و پیچشی باشند. ناحیه D، آخرین ناحیه سطح شکست می باشد. بررسیهای

آزمایش سختی سنجی بر روی سطح خارجی (قسمت خارجی روتور) و همچنین مقاطع برش خورده روتور (قسمت داخلی روتور) انجام گردید. سختی سنجی بر روی سطح خارجی در دو مرحله شامل سختی سنجی بر روی سر شفت شکسته شده سمت کولپینگ و سختی سنجی بر روی روتور سمت کمپرسور انجام گردید (شکل ۵) نتایج سختی سنجی بر روی سطح خارجی روتور سمت کولپینگ در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آزمایش سختی سنجی در نواحی مختلف (۷ موقعیت در جهت طولی و ۸ موقعیت در جهت پیرامونی) نشان می دهد که سختی در محدوده استاندارد قرار دارد. آزمایش سختی سنجی بر روی چندین مقطع برش خورده با فاصله گرفتن از قسمت سطح شکست انجام گردید. این آزمایشها بر روی دو مقطع برش خورده قطعه Y2 (مقاطع A-A و B-B) و U3 نیز انجام گردید. نتایج آزمایش های سختی سنجی نشان می دهند که سختی در محدوده استاندارد قرار دارد.

۳-۲ - آزمایش متالوگرافی

به منظور بررسیهای ریز ساختاری از سرشفت تخریب یافته روتور آزمایش متالوگرافی مخرب بر روی یکی از نمونه های تهیه شده از مقاطع برش خورده (نمونه ۴ شکل ۴) و آزمایش رلیکا در سه موقعیت مختلف (شکل ۵) انجام گردید که نواحی رلیکا به ترتیب شماره رلیکا ۱، ۲ و ۳ از نزدیکترین منطقه مشرف به سطح شکست شروع شده و به سمت کولپینگ (فواصل دورتر از منطقه شکست و نزدیک Collar) ختم می شود. ریز ساختار عمومی مربوط به فولاد روتورهای NiCrMoV در حالت نرمال در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، ساختار این فولاد بر حسب ترکیب شیمیایی و همچنین ملزومات سرویس دهی (تافنس وانعطاف پذیری مطلوب مخصوصا در دماهای پائین، مقاومت به حساسیت در برابر شیار و حفظ استحکام مکانیکی در شرایط کاری و ...) اساسا از بینیت تشکیل یافته که در این شکل تیغه های پرشکل بینیت بالایی بوضوح قابل



تشخیص داده شد. مسیر اشاعه ترک در نمونه A بطور ترجیحی در امتداد مرزهای دانه قرار داشته، اگر چه در برخی نواحی نیز این مکانیزم بصورت درون دانه ای فعال بوده است. لازم به ذکر است در شروع ناحیه A نشانه های از خطوط دوار وجود دارد و ادامه رشد ترک، پایدار صورت گرفته است. ویژگیهای میکروسکوپی سطوح شکست نمونه های B و C نیز تا حدود زیادی با ویژگیهای سطح شکست نمونه A تطابق دارند. تصاویری از سطح شکست نمونه های B در بزرگنماییهای کم و زیاد به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می شود شکست روتور در این نمونه ها نیز از طریق مکانیزم اتصال حفره ها اتفاق افتاده و مسیر عمومی ترک نیز بطور ترجیحی در امتداد مرزهای دانه روتور قرار داشته است. لیکن علاوه بر مکانیزم اتصال حفره ها، علایم شکست کلیواژ نیز به صورت ایزوله در برخی نواحی بر روی سطح شکست این دو نمونه قابل شناسایی می باشند. دومورد از نواحی ایزوله کلیواژ مربوط به نمونه های B و C به ترتیب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بنابر این با توجه به بررسی های شکست نگاری انجام شده بر روی نمونه های A، B و C می توان نتیجه گیری کرد که جوانه زنی و گسترش ترک در ناحیه مدور بطور ترجیحی در امتداد مرزهای دانه و با مکانیزم اتصال حفره ها اتفاق افتاده است و با ادامه پیشروی ترک، مکانیزم شکست کلیواژ بصورت ایزوله در برخی نواحی فعال گردیده است. در شکل ۱۲ تصاویری از سطح شکست نمونه D در ناحیه هلالی شکل ارایه گردیده است. اشاعه مرز دانه ای ترک از طریق مکانیزم اتصال حفره ها در این تصاویر نیز قابل مشاهده است و ویژگیهای عمومی سطح شکست در ناحیه هلالی شکل مشابه ویژگیهای ناحیه مدور می باشد.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی شکست نگاری نواحی مدور و هلالی شکل می توان نتیجه گرفت که مکانیزم اتصال حفره ها در سرتاسر سطح شکست روتور بعنوان مکانیزم غالب، فعال بوده است. نظر به اینکه مکانیزم

شکست نگاری حاکی از ناصافی نسبتا زیاد سطح شکست و وجود برخی Facet ها (سطح شکست در راستای ضخامت کریستالی دانه های فولاد روتور) بر روی سطح شکست می باشد. ناصافی سطح شکست احتمالا ناشی از بالا بودن سطح تنش وارده در طی شکست و وجود Facet ها حاکی از تاثیرات خصوصیات ساختار میکروسکوپی و دانه بندی درشت فولاد روتور بر روی مکانیزم شکست می باشد. بررسی دقیق تر Facet ها و خطوط موازی مطالعه سطح شکست در بزرگنمایی بالاتر و بوسیله میکروسکوپ الکترونی SEM را ضروری نشان داد.

۳-۴- آزمایش شکست نگاری میکروسکوپی

به منظور بررسی ویژگیهای سطح شکست یک برش عرضی عمود بر محور طولی روتور و در امتداد سطح شکست آن تهیه شد که توسط برشهای طولی به ۴ نمونه کوچکتر تقسیم شد (شکل ۴). نمونه های A، B، C در مسیر عمومی رشد ترک از ناحیه جوانه زنی ترک بر روی سطح روتور تا انتهای ناحیه مدور را شامل می شوند. نمونه D نیز شامل بخشی از سطح شکست ناحیه هلالی شکل می باشد. به منظور تعیین نحوه جوانه زنی و مکانیزم اشاعه اولیه ترک، ناحیه جوانه زنی در امتداد پله موجود بر روی سطح روتور در نمونه A در میکروسکوپ الکترونی SEM به دقت مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۸ تصویر سطح شکست در مجاورت محل شروع ترک از پله ناحیه داخل کادر در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است. حالت سه بعدی و ناصاف سطح شکست در این ناحیه مشهود می باشد و همچنین حالت سه بعدی سطح شکست ناشی از اشاعه ترک در امتداد مرزهای دانه فولاد روتور مشخص می باشد. با توجه به حفره های ریز موجود بر روی سطح شکست مکانیزم اشاعه اولیه ترک را می توان مکانیزم اتصال حفره ها معرفی کرد که این مکانیزم در ادامه پیشروی ترک نیز فعال بوده است. در بررسی نواحی مختلف سطح شکست نمونه A مکانیزم اتصال حفره ها بعنوان تنها مکانیزم فعال در شکست روتور در این ناحیه



معمولی یا بدون شیار همیشه تغییرات محیطی یا متالورژیکی را که به نرمی موضعی کم منجر می شود را نشان نمی دهند. تمایل به کاهش نرمی در حضور میدان تنش سه بعدی و شیبهای تند تنش مانند حالت ایجاد شده در یک شیار، حساسیت شیار نامیده می شود. یک روش متداول برای تعیین حساسیت شیار، انجام آزمایش کشش با استفاده از نمونه شیاردار می باشد. این آزمایش برای تحقیق و بررسی خواص فولادهای با استحکام زیاد، مطالعه تردی هیدروژن و سنجشهای مکانیک شکست مورد استفاده قرار می گیرد. استحکام شیار بر حسب بار حداکثر تقسیم بر سطح مقطع اولیه در شیار تعریف می شود که بدلیل وجود قید پلاستیک در شیار، اگر ماده کمی نرم باشد استحکام شیار از استحکام کششی یک نمونه بدون شیار بیشتر خواهد شد. نسبت استحکام کششی برای نمونه شیاردار در بار حداکثر به استحکام کششی برای نمونه بدون شیار را نسبت استحکام شیار می گویند که اگر کمتر از یک باشد، ماده مورد نظر تردی شیار دارد. مقایسه ای بین نتایج آزمایشهای کشش انجام شده بر روی نمونه های استاندارد و شیاردار شامل استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نهایی انجام گردید که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می شود در حالیکه نمونه بدون شیار دارای استحکام و درصد ازدیاد طول قابل قبولی مطابق مشخصات فنی روتور می باشد، لیکن استحکام نهایی نمونه شیاردار بطور قابل ملاحظه ای پایینتر می باشد. بعلاوه حضور شیار تاثیر بسیار شدیدتری بر درصد ازدیاد طول نسبی یا داکتیلیتی فولاد روتور دارد بطوریکه باعث کاهش مقدار آن به یک سوم مقدار اولیه می گردد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حضور شیار به طور همزمان باعث کاهش استحکام و داکتیلیتی، و در نتیجه تافنس می گردد و تمایل به شکست ترد را تشویق می نماید.

• آزمایش ضربه

مزیت اصلی آزمایش ضربه شارپی با شیار V این است که آزمایش نسبتاً ساده ای است که در آن از یک نمونه آزمایش کوچک و نسبتاً ارزان استفاده می شود. برای

اتصال حفره ها از مکانیزمهای اصلی شکست ناشی از اضافه بار یا (overload) می باشد، لذا می توان این عامل را بعنوان علت اصلی شکست روتور قلمداد کرد. از طرف دیگر با توجه به عدم مشاهده علایم حاکی از رشد تدریجی یا سیکنی ترک (باستناد خطوط دوار اولیه در سطح نمونه A) در نواحی مختلف نمونه های A الی D می توان نتیجه گرفت که نوسانات تنش در شکست نهایی روتور نقشی نداشته است. شکست مرز دانه ای و شکست کلیواژ هر دو از انواع شکست ترد قلمداد می شوند و نظر به اینکه شکست مرز دانه ای بصورت گسترده و شکست کلیواژ بصورت موضعی بر روی سطح شکست روتور مشاهده گردیده است، ارزیابی زوال احتمالی خواص مکانیکی در طی کارکرد طولانی مدت روتور ضرورت دارد، لذا آزمایشهای مکانیکی ضربه و کشش انجام گردید.

۳-۵- آزمایشهای مکانیکی ضربه و کشش

به منظور بدست آوردن مشخصات مکانیکی روتور، آزمایشهای ضربه، کشش معمولی و شیاردار (notch) براساس استاندارد ASTM انجام گردید. نمونه های آزمایشی برای آزمایشهای ضربه، کشش استاندارد (معمولی و شیاردار) مطابق شکل ۳ از روتور در جهت محوری آن تهیه و ساخته شدند. مشخصات مکانیکی قسمت شکسته شده سر شفت روتور بر اساس اطلاعات شرکت سازنده در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج آزمایشهای چهار نمونه کشش استاندارد و شیاردار در جدول ۴ نشان داده شده است.

• آزمایش کشش

بطور معمول ناپیوستگی و یا ناهمواریهای مختلفی بر روی محورهای انتقال توان بصورت موضعی مشاهده می شود که توزیع تنش در نواحی فوق تغییر یافته و باعث تمرکز تنش می گردد. حساسیت به شیار بوسیله آزمایشهای ضربه و کشش نمونه های شیاردار تعیین می شود، این آزمایشها برای سنجش نسبی مواد گوناگون و تعیین میزان تردی آنها در دمای پائین مفید است. مقادیر نرمی نمونه های کشش استاندارد



این پراکندگی به علت تغییر موضعی خواص فولاد و برخی به علت مشکلات تولید شیارهای مشابه است. چون هیچ کمیتی برحسب میزان تنش وجود ندارد، ربط دادن داده های شاری با ویژگیهای موجود در عمل مشکل است. همچنین هیچ رابطه ای بین داده های شاری با اندازه ترک ریزووجود ندارد. علاوه براین، وجود پراکندگی زیاد که در این آزمایش ذاتی است می تواند تعیین منحنیهای مشخص دمای انتقالی را مشکل کند.

براساس استاندارد مرجع ASTM E23 آماده سازی نمونه های ضربه صورت گرفت. آزمایش مکانیکی ضربه در دماهای منفی چهل، صفر، دمای محیط (بیست و پنج) و نود درجه سانتیگراد صورت گرفت. نتایج حاصل از آزمایش های مکانیکی ضربه در جدول ۵ نشان داده شده است. آزمایش ضربه، آزمایش مناسبی برای ارزیابی تردی نسبی فولاد روتور می باشد. منحنی تغییرات انرژی ضربه با دما در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می شود با کاهش دما از ۹۰ درجه سانتیگراد به ۴۰- درجه سانتیگراد انرژی جذب شده در آزمایش ضربه فولاد روتور از حدود ۸۰ به ۲۵ کاهش یافته و لذا تمایل به شکست ترد افزایش یافته است. دمای انتقال از رفتار شکست نرم به شکست ترد از طریق بررسی درصد لبه های برشی بر روی سطوح شکست نمونه های ضربه در دماهای مختلف قابل تعیین می باشد. بر این اساس و با توجه به بررسی های انجام شده، دمای لازم برای ۵۰ درصد شکست ترد در فولاد روتور نزدیک به دمای اتاق می باشد. بنابراین در صورت اعمال اضافه بار ناگهانی به نمونه های شیاردار در نزدیکی دمای اتاق، شکست ترد بطور قابل توجهی انرژی لازم برای شکست را کاهش می دهد. این رفتار عمدتاً ناشی از خصوصیات ساختار میکروسکوپی فولاد روتور و دانه بندی درشت آن است. اگر اثر اندازه یا ضخامت را نیز بر دمای انتقال در نظر بگیریم می توان انتظار داشت که با توجه به ابعاد بسیار بزرگتر روتور در مقایسه با نمونه های استاندارد ضربه دمای انتقال واقعی برای ۵۰ درصد شکست ترد از

تعیین تمایل ماده به داشتن رفتار ترد، از آزمایش ضربه استفاده می شود. این نوع آزمایش تفاوتی را بین مواد مشخص می کند که در آزمایش کشش قابل مشاهده نیستند ولی نتایج حاصل به سادگی برحسب نیازهای طراحی بیان نمی شوند، چون اندازه گیری مؤلفه های شرایط تنش سه بعدی در شیار ممکن نیست. همچنین در مورد تفسیر یا اهمیت نتایج حاصل از این نوع آزمایش هیچگونه توافق کلی به دست نیامده است. قید پلاستیک در شیار یک حالت تنش سه بعدی به وجود می آید که مقادیر نسبی سه تنش اصلی به شدت به ابعاد نمونه و جزئیات شیار بستگی دارند. کمیت اصلی که در آزمایش ضربه اندازه گیری می شود، انرژی جذب شده در شکست نمونه است. توجه به این مطلب که انرژی شکست اندازه گیری شده از آزمایش شاری فقط یک انرژی نسبی است و نمی تواند مستقیماً در معادلات طراحی به کار رود، از اهمیت زیادی برخوردار است. معیار دیگری که از آزمایش شاری به دست می آید، از بررسی سطح شکست برای تعیین اینکه آیا شکست برشی، شکست رخ برگی و یا مخلوطی از هر دو است، حاصل می شود. سطح صاف شکست رخ بازتاب پذیری زیاد و ظاهری براق دارد، در صورتی که سطح گود شده یک شکست برشی نرم به صورت یک سطح جاذب نور و دارای ظاهری کدر است. سومین کمیتی که گاهی در آزمایش شاری به دست می آید، نرمی است، که با درصد انقباض نمونه در محل شیار نشان داده می شود. آزمایش ضربه با میله شیاردار هنگامی معنی پیدا می کند که در یک دامنه دمایی انجام شود و تا دمایی که در آن انتقال نرمی به تردی رخ می دهد تعیین شود. انرژی جذب شده با کم شدن دما، کم می شود ولی در بیشتر موارد کاهش در یک دمای خیلی مشخص رخ نمی دهد. این عامل باعث می شود که تعیین دقیق دمای انتقال مشکل شود. در انتخاب یک ماده از دیدگاه چقرمگی شیار یا تمایل به شکست ترد، دمای انتقالی عامل مهمی است. آزمایشهای ضربه با میله شیاردار در معرض پراکندگی زیادی، به ویژه در ناحیه دمای انتقال قرار دارند. بیشتر



برای اضافه بار ناگهانی، با جذب انرژی کم از محل پله دچار شکست ترد شده است.

عمدتاً ناشی از خصوصیات ساختار میکروسکوپی فولاد روتور و دانه بندی درشت آن است. اگر اثر اندازه یا ضخامت را نیز بر دمای انتقال در نظر بگیریم می توان انتظار داشت که با توجه به ابعاد بسیار بزرگتر روتور در مقایسه با نمونه های استاندارد ضربه دمای انتقال واقعی برای ۵۰ درصد شکست ترد از دمای اتاق بالاتر و نزدیکتر به دمای کاری روتور باشد. بنابراین با در نظر گرفتن پله موجود بر روی سطح روتور بعنوان یک شیار (notch) ملایم، می توان استدلال نمود که روتور

مراجع

- 1-ASM , ASM Handbook . Failure analysis and prevention Vol.11, ed. 1998.
- ۲ - اسماعیل پورسعیدی، علی احمدی، علیرضا رضوی "گزارش بررسی علل شکست سر شفت روتور واحد ۱۸ نیروگاه ری"، شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، بهمن ماه ۱۳۸۳.

جدول ۱: مقایسه نتایج آزمایشهای کوانتومتری

Others	%V	%Ni	%Mo	%Cr	%S	%P	%Mn	%Si	%C	آزمایش
	≤ ۰.۰۵	۲ - ۴.۰۰	۰.۴ - ۰.۷	۲ - ۰.۷	≤ ۰.۰۱۵	≤ ۰.۰۱۵	≤ ۰.۷	≤ ۰.۱۰	۰.۳۵ - ۰.۳۸	استاندارد ASTM A471 Cl.1-9
-	۰.۱۶	۲.۵۴	۰.۵۸	۱.۴۵	۰.۰۱۶	۰.۰۶۸	۰.۳۹	۰.۲۶	۰.۳۲	مرحله اول

جدول ۲: نتایج آزمایش سختی سنجی بر روی سطح خارجی روتور

Location	Hardness Measurement Of Turbine Rotor (HV)							
	۴۵	۹۰	۱۳۵	۱۸۰	۲۲۵	۲۷۰	۳۱۵	۳۶۰
۱	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۲	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۳	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۴	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۵	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۶	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱
۷	۴۵۶	۴۶۱	۴۶۶	۴۷۱	۴۷۶	۴۸۱	۴۸۶	۴۹۱

جدول ۳: مشخصات مکانیکی سر شفت روتور بر اساس اطلاعات شرکت سازنده

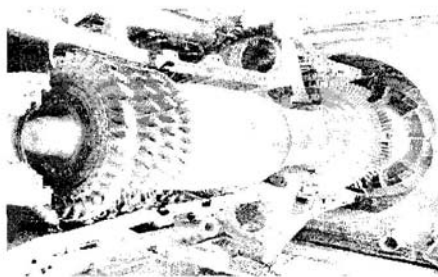
سختی (HB)	انرژی ضربه (kgm)	میزان کاهش در سطح منحنی (%R.A)	میزان انقباض طولی (%E1)	استحکام کشش نهایی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)
241-293		>38	>13	>827	>654

جدول ۴: نتایج آزمایش کشش انجام شده بر روی نمونه های معمولی

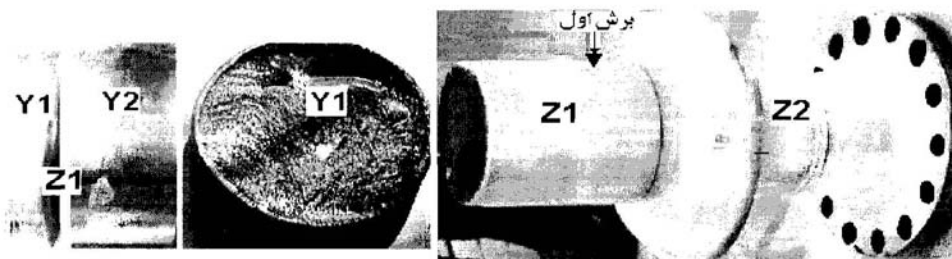
ردیف	نوع نمونه	سطح مقطع اولیه (mm ²)	طول گیج (mm)	استحکام تسلیم (N/mm ²)	استحکام نهایی (N/mm ²)	ازدیاد طول نسبی %
۱	استاندارد	60.13	35	687	847	20
۲		59.86	35	687	847	18
۳	شیاردار	29.32	20	550	582	6
۴		30.29	20	510	547	6

جدول ۵: نتایج حاصل از آزمایش مکانیکی ضربه

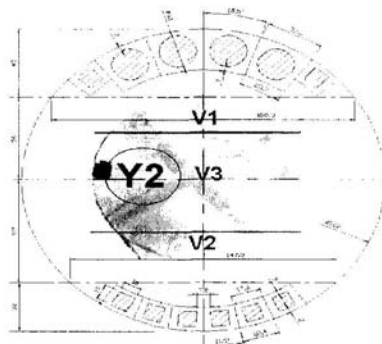
ردیف	ابعاد نمونه (mm)	موقع شکاف	عمق شکاف (mm)	زاویه شکاف (درجه)	درجه حرارت انجام آزمایش (C)	انرژی (J)	ملاحظات
۱	9.99 * 9.99 * 55.0	V Notch	2	45	90	34	خفاش
۲	9.99 * 9.99 * 55.0	V Notch	2	45	90	74	خفاش
۳	9.99 * 9.99 * 55.0	V Notch	2	45	25	56	خفاش
۴	9.99 * 10.0 * 55.0	V Notch	2	45	25	40	خفاش
۵	9.99 * 10.0 * 55.0	V Notch	2	45	سفت	46	خفاش
۶	9.98 * 9.98 * 55.0	V Notch	2	45	-40	24	خفاش
۷	9.99 * 9.98 * 55.0	V Notch	2	45	-40	36	خفاش
۸	9.97 * 9.99 * 55.0	V Notch	2	45	-40	20	خفاش



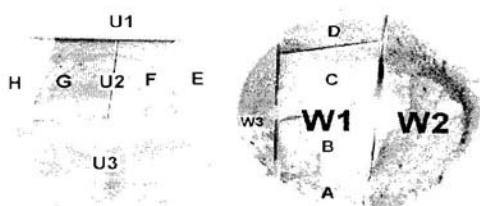
شکل ۱: نمای کلی تخریب روتور



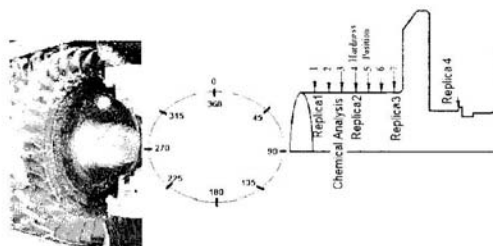
شکل ۲: تقسیم قسمت شکسته شده سرشفت با استفاده از ماشین ابزار و دستگاه برش



شکل ۳: تقسیم قسمتهای برش خورده برش طولی برای تهیه نمونه های آزمایش کشش و ضربه



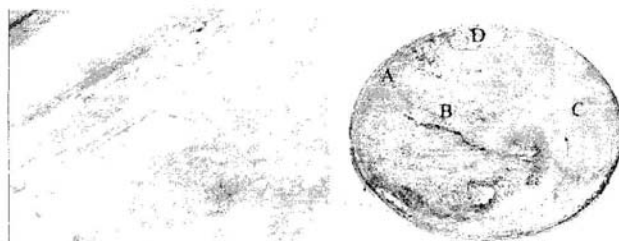
شکل ۴: موقعیت نمونه های SEM (سطح شکست روتور) و نمونه های متالوگرافی و آنالیز شیمیایی



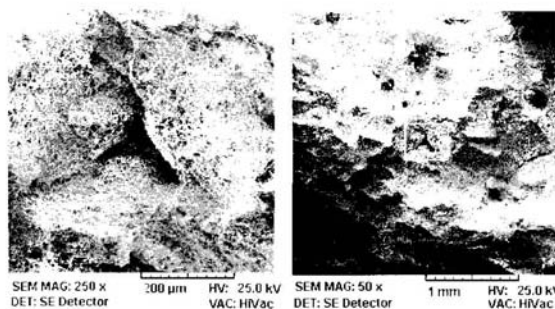
شکل ۵: نواحی و موقعیت تحت آزمایش بر روی سطح خارجی روتور



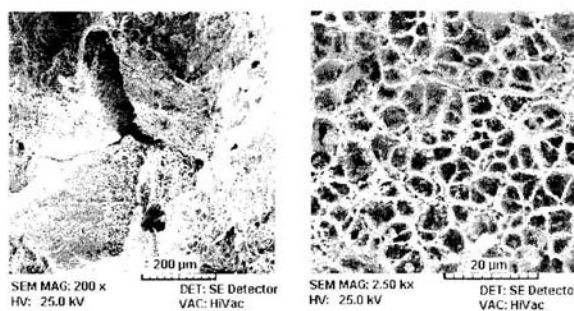
شکل ۶: ریز ساختار عمومی مربوط به فولاد روتور NiCrMoV (بزرگنمایی: 200X)



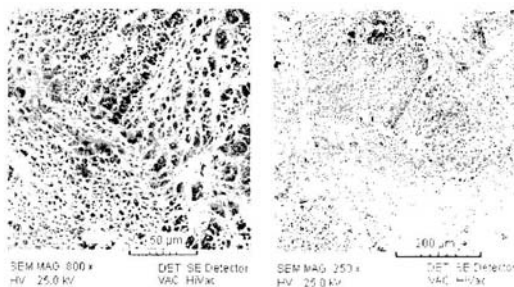
شکل ۷: سطح شکست روتور و خطوط ماشینکاری و شبه ترکهای شیار روتور



شکل ۸: تصویر SEM از محل شروع ترک از پله در نمونه A و از ناحیه داخل کادر با بزرگنمایی بالاتر



شکل ۹: تصویر سطح شکست نمونه B در بزرگنمایی ۲۵۰ و ۲۰۰ برابر



شکل ۱۰: تصویر سطح شکست نمونه C در بزرگنمایی ۲۵۰ و ۸۰۰ برابر



روشهای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در صنعت و مروری بر روشهای مراقبت وضعیت

عبدالحسین نیکجو، عضو هیئت علمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
مصطفی مینائی، کارشناس واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق
حسین میسمی، کارشناس ارشد واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق

چکیده:

در طی سالیان اخیر، دستگاهها و تجهیزات رشد و تکامل روز افزونی پیدا کرده اند و همواره بحث نگهداری و تعمیرات (نت) آنها، یکی از مهمترین مسائل مدیران صنایع مختلف بوده است. در این رابطه تلاشهایی برای دست یابی به روشهایی جهت افزایش راندمان، ایمنی و کاهش هزینه ها ادامه داشته است. در واقع با پیش بینی زمان خرابی، کاهش هزینه تعمیرات و کاهش وقفه های زمانی در بهره برداری از ماشین آلات، می توان امکان برنامه ریزی موثر در عملکرد دستگاه ها، افزایش ایمنی، صرفه جوئی های مالی و به طور کلی افزایش بازده اقتصادی را بوجود آورد. در این مقاله سعی شده روشهای مختلف پی بردن به عیوب و تعمیرات آن به طور مختصر بیان گردد.

کلمات کلیدی: PM، PDM، مراقبت وضعیت، مدیریت تعمیرات و نگهداری

۱- مقدمه:

امروزه در اکثر صنایع کشور انجام برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات با عنوان PM مطرح می باشد و در واقع تشکیل بخش PM در نمودار سازمانی و تهیه نرم افزارهای مرتبط به صورت یک روش عام به کار گرفته می شود. لیکن با توجه به رشد روز افزون علوم مختلف، مبحث برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات نیز از این قاعده مستثنی نبوده و روش های جدیدی جهت انجام برنامه ریزی ابداع شده است. در سالهای اخیر روند تعمیرات صنایع بزرگ مراحلای را پشت سر گذاشته است. که در ادامه به طور مختصر شرح داده می شود.

I. نگهداری و تعمیرات بعد از خرابی دستگاه:

برخی از معایب این روش مواردی چون داشتن اطلاع از بروز خرابی تقریباً غیر ممکن است، وجود خرابی در یک قطعه از دستگاه می تواند عامل انتشار خرابی و آسیب به دیگر قسمتهای ماشین گردد، خرابی و توقف ناگهانی دستگاهی که در یک مجموعه از ماشین آلات قرار دارد و تهیه و تدارک قطعات یدکی مورد نیاز و گردآوری افراد مجرب تعمیر کار مربوطه به منظور انجام سریع و اقتصادی انواع تعمیرات پیش بینی نشده، است.

II. تعمیرات پیشگیرانه:

در این روش با یک برنامه مشخص و از پیش تعیین شده و بر اساس زمان و یا میزان مسافت طی شده و یا بر اساس تاریخ، به سرویس و تعویض قطعات مشخصی از دستگاه پرداخته می شود. در این نوع تعمیرات، همه قطعات حتی اگر نیاز به سرویس و یا تعویض نداشته باشد، طبق دستور العمل تهیه شده مورد سرویس قرار می گیرد.



بنابراین هنوز هم هزینه های اضافی برسیستم تحمیل میشود . هر چند با بکارگیری تعمیرات پیش گیرانه نسبت به روش قبل سالانه حدود ۲۵٪ صرفه جویی در هزینه ها می گردد , اما بر اساس آمار , مشخص شده است که یک سوم (۳۳٪) هزینه برنامه تعمیرات پیش گیرانه تلف می شود. برخی از معایب این تعمیرات بشرح ذیل میباشد :

- باز و بسته کردن قطعات خود میتواند عامل صدمه دیدن باشد.
- در صورت عدم دقت در مراحل باز و بسته کردن قطعات و اجزا دستگاه , امکان آسیب رسیدن به قطعات و بروز قطعات و بروز عیوب دیگر وجود دارد .
- با تعویض و سرویس قطعات در این تعمیرات , ممکن است هنوز بخش قابل توجهی از عمر مفید قطعات باقی مانده باشد.
- چون اطلاعات دقیقی از وضعیت داخلی سیستم در این روش در دسترسی نیست , ممکن است حتی پس از تعمیرات پیشگیرانه , مشکلات و عیوب هنوز در دستگاه باقی مانده باشد و در بین دو فاصله تعمیرات دوره ای بروز نماید .

III تعمیرات پیش بینانه :

هدف اصلی این نوع تعمیرات بر طرف کردن عیوب روش قبلی و جلوگیری از تعمیرات غیر ضروری ایجاد شده است.

در این روش که با برنامه نگهداری و تعمیرات بر اساس مراقبت وضعیت و یا تعمیرات مبتنی بر وضعیت دستگاه صورت میگیرد, با استفاده از آزمایشات غیر مخرب به سلامت قطعه مورد نظر و در حالت کلی به سلامت قطعه مورد نظر و در حالت کلی به سلامت یا خرابی دستگاه و سیستم ی برده میشود . بر اساس نتایج بدست آمده از علائم و نشانه هایی از وضعیت ماشین در حال کار (این علائم و نشانه ها ضمن مشخص نمودن زمان و محل دقیق خرابی تضمین کننده کار دستگاه در شرایط ایمن و اقتصادی می باشند) نسبت به تعمیرات تصمیم گیری خواهد شد . برخی از مزایای استفاده از روش تعمیرات پیش نگر عبارتند از :

کاهش سطح تعمیرات عمومی, کاهش قابل توجه خرابی های زنجیره ای , کاهش تعداد خرابی های سنگین و پر هزینه, افزایش امکان برنامه ریزی جهت نگهداری و تعمیرات دستگاهها , بهبود ایمنی کار ماشین آلات و برنامه تولید , کاهش هزینه سرویس از طریق افزایش فاصله زمانی تعمیرات , افزایش عمر مفید دستگاه , آماده بکار بودن بیشتر ماشین آلات بویژه در مواقع ضروری و حساس.

اگر مقایسه ای بین این سه روش داشته باشیم که در روش تعمیرات بعد از خرابی دستگاه , زمان تعمیرات (زمان توقف دستگاه) و مقدار و حجم تعمیرات زیاد می باشد . در تعمیرات پیش گیرانه , اولین تعمیر نسبت به حالت قبل در زمان زودتر و مقدار تعمیرات بیشتر انجام شده و تعمیرات بعدی در زمان های مشابه حالت قبل و با مقدار تعمیرات به مراتب کمتر انجام می شود . در حالت سوم یعنی تعمیرات پیش نگر , زمان تعمیرات زودتر از خرابی دستگاه و با حجم تعمیرات بسیار کمتر انجام می شود.

IV تعمیرات پیش گستر :



در صورتیکه با استفاده از روش های مختلف CM علاوه بر یافتن علائم و نشانه های عیوب به ریشه یابی و رفع علل اصلی خرابی ها پرداخته شود، تعمیرات را تعمیرات پیش گستر می نامند. در اغلب موارد علائم و نشانه های خرابی مانند نقاب، علل اصلی و ریشه ای خرابی ها را می پوشاند.

در این روش به دنبال علل اصلی عیوب و خرابی ها را می پوشاند.

در این روش به دنبال علل اصلی عیوب و خرابی ها و جلوگیری از ایجاد آن ها در آینده می باشیم. بطور کلی در این روش نقش اساسی به عهده آنالیز ریشه یابی خرابی ها می باشد. برای روشن شدن موضوع مثال های زیر قابل ذکر هستند: اغلب علت خرابی یاتاقان ها به روانکار نامناسب نسبت داده میشود. با بررسی بیشتر و ریشه یابی علت اصلی خرابی ها ناشی از خرابی فیلتر، بروز آلودگی در روانکار و یا نصب نادرست یاتاقان مشاهده شده است.

۲- نگهداری و تعمیرات جهت دار :

جهت رسیدن به هدف مناسب که حذف نقاط ضعف سیستم و بهبود کیفیت خروجی دستگاهها می باشد، بایستی نگهداری و تعمیرات، جهت دار باشد.

در حال حاضر اکثر شرکت ها به دنبال افزایش قابلیت اطمینان و کارایی همچنین پائین آوردن هزینه های سیستم و ماشین آلات می باشند. با اجرای روش های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، پیش نگر و پیش گستر به تنهایی نمی توان به نیازهای فوق تحقق بخشید و فقط در دراز مدت با اجرای نگهداری و تعمیرات جهت دار میتوان به اهداف مورد نظر رسید.

برای اجرای نگهداری و تعمیرات جهت دار بایستی مراحل خاصی را طی نمود که این مراحل بصورت منحصر به فردی با یکدیگر در ارتباط می باشند.

مراحل اصلی این روش به ترتیب عبارتند از:

تهیه ساختار و داده های دستگاه (تعریف دستگاه)، تهیه مدل عملیاتی و کاربردی از دستگاه، مشخص کردن شرایط مطلوب دستگاه، مشخص کردن و شناسایی شرایط واقعی دستگاه، مقایسه شرایط مطلوب با واقعی، عیب یابی و تجزیه و تحلیل نقاط ضعف، بهینه سازی و حذف نقاط ضعف دستگاه.

منافع اجرای تعمیرات جهت دار مواردی چون استفاده از حداکثر عمر مفید دستگاه، افزایش راندمان زمانی دستگاه، جلوگیری از تعمیرات بی مورد قطعات دستگاه، اجرای برنامه لازم جهت تعمیرات، کاهش نظارت مستمر بر وضعیت دستگاه بواسطه استفاده از تجهیزات ایمن، افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد دستگاه است.

پس از طرح و اجرای این نوع از تعمیرات بر روی دستگاه مورد نظر، بایستی بارها مورد اصلاح و بهینه سازی قرار گیرد تا در هر زمان عملکرد نگهداری و تعمیرات بهتر از زمان قبل گردد. تنها در این حالت است که نگهداری و تعمیرات موفق حاصل می شود.

۳- تقسیم بندی روش های مراقبت وضعیت :

به دو دسته کلی off-line و on-line تقسیم می شود. منظور از روش های مراقبت off-line، روش هایی است که، ثبت داده ها در دوره های (پریود های) زمانی گسسته و قابل برنامه ریزی انجام گردد. در حالیکه در روش های مراقبت وضعیت on-line پارامترها و داده های دستگاه بصورت پیوسته انجام می گیرد.



۳-۱- مراقبت وضعیت off-line:

در این روش شاخصه ها و خروجی ها به صورت غیر پیوسته از دستگاه جهت اجرای تعمیرات پیش نگر استخراج می شود. روش های مراقبت وضعیت را می توان به دو صورت on-load و off-load انجام داد. در روش off-load پارامترها و داده های دستگاه در حالت بی باری و خاموش بودن دستگاه انجام می شود. آنالیز روغن، فرو گرافی آنالیز ذرات سایشی مثال هایی از روش مراقبت off-load می باشد. ثبت داده ها و پارامترها در روش on-load در حالت روشن بودن و یا زیر بار بودن دستگاه انجام می گیرد. آنالیز دود، آنالیز ارتعاشات، ترموویژن، تست مافوق صوت روش های مختلفی از مراقبت on-load می باشد.

۳-۲- مراقبت وضعیت on-line:

در روش های مراقبت وضعیت مدرن عمده توجه و علاقه مدیران و مهندسان به سمت نصب سیستم های on-line معطوف گشته است. علت این امر کاهش هزینه ها و زمان تعمیرات و زمان تعمیرات، افزایش عمر دستگاهها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم ها می باشد.

۳-۲-۴- روش های مراقبت وضعیت ماشین آلات:

در روش مراقبت وضعیت از آزمایشات و تست های غیر مخرب استفاده و پارامترها و کمیت های مورد نیاز اندازه گیری می شوند. با دقت در روند تغییر پارامترها و کمیت ها به سلامت، شروع خرابی و یا صدمه دیدگی کلی قطعه و دستگاه پی برده می شود.

- آنالیز روغن: در این روش با نمونه گیری روغن از دستگاه در حال کار و انجام انواع تست ها و آزمایشات شیمیایی، فیزیکی، فیزیکی و شیمیایی و تست روی میز، از سلامت و خرابی دستگاه و سطح آلودگی روغن آگاهی حاصل می شود. آنالیز روغن در تمام دستگاههایی که در آن روغن به عنوان روانساز جدا کننده قطعات متحرک می باشد، قابل بهره گیری است.

- آنالیز ارتعاشات: عموماً جزء جدانشدنی از ماشین آلات صنعتی، ارتعاش می باشد.

نیروهای ارتعاشی سبب تشدید استهلاک ماشین می شوند و کلیه عیوبی که در یک ماشین دوار اتفاق می افتد، از جمله عدم بالانس، ناهمراستایی، خمیدگی شافت، لقی بلبرینگها، لقی اجزا، شکستگیها، عیوب الکتریکی، رزونانس و... همگی در ایجاد ارتعاشات نقش دارند. بنابر این آنالیز ارتعاشات در کلیه دستگاههایی که عامل ارتعاش در عملکرد دستگاه نقش دارد، قابل استفاده می باشد.

- ترمو گرافی: کارکرد دستگاهها عموماً تولید گرما می نماید. این گرما می تواند ناشی از فرآیند های تبدیل انرژی مثل احتراق، گرمایش الکتریکی، گرمای ناشی از عملکرد نیروهای اصطکاک و یا تنش های مکانیکی باشد. این انرژی بعد از رسیدن به سطح دستگاه از طریق تشعشع و جابه جایی آزاد می شود. کلیه سطوح بسته به میزان درجه حرارتشان دارای یک نرخ تشعشع در ناحیه مادون قرمز میباشند. و به دلیل نامرئی بودن آن برای انسان از سیستم ترموویژن جهت مرئی کردن آن استفاده می شود.

در حال حاضر این سیستم بطور گسترده در شبکه های برق (تولید، انتقال و توزیع)، ماشینهای الکتریکی، ترانسفورماتورها، ژنراتورها، رله های الکتریکی، بریکرهای قدرت، شافت، یاتاقان، و کولپینگ فن های الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد.



- **آنالیز ذرات سایشی:** در این روش فیلتر روغن توسط حلال شسته شده و کلیه آلودگی ها و ذرات سایشی از آن جدا می گردد. سپس این ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی و یا به شیمیایی مورد شناسایی جنس و مقدار قرار می گیرد و از روی آنها موضع معیوب مورد شناسایی قرار می گیرد.

- **فروگرافی:** روش قابل انعطافی جهت شناسایی نشانه های اولیه سایش است. در این روش نمونه روغن رقیق شده با دبی کم روی شیشه نازکی که در روی آن میدان قوی مغناطیسی قرار دارد جاری میگردد، در این حالت ذرات سایش فلزی به طور منظم و بترتیب درشت به ریز روی اسلایدشیشه ای رسوب می کند. این رسوب پس از خشک شدن کامل قابل مشاهده میکروسکوپی است.

- **آنالیز دود:** در این روش گاز خروجی از مخزن احتراق به داخل اگزوز مورد آنالیز قرار می گردد و مقدار گازها و ذرات معلق مونوکسید کربن و سایر مواد مورد بررسی قرار می گیرد. با مقایسه گازها و ذرات با مقدار استاندارد به سلامت و عیوب دستگاه پی برده می شود.

- **زمان کاهش سرعت در هنگام توقف ماشین آلات:** محور همه ماشین آلات دوار پس از قطع جریان بسوی توقف میل پیدا می کند که این خاصیت پدیده "کاهش سرعت" نامیده می شود مدت زمان این پدیده به "زمان کاهش سرعت در هنگام توقف ماشین" معروف می باشد. این روش بسیار مفید در پی بردن نحوه کارکرد یاتاقان ها باشد. هر گاه زمان کار دستگاه زیاد باشد ولی زمان توقف ماشین کاهش داشته باشد نشانگر وجود مشکل در کارکرد قسمتهایی نظیر یاتاقان ها دارد.

- **آزمایش آلتراسونیک:** در این روش با ارسال امواج فراصوتی به داخل قطعات و بازگشت آن امواج می توان محل خرابی را پیدا نمود. از آنجائیکه انتشار امواج صوتی در محیط مادی امکان پذیر است در این روش محدودیت جنس و ضخامت وجود ندارد.

- **ذرات مغناطیسی:** در این روش با استفاده از اجاد میدان مغناطیسی و ذرات فرو مغناطیس عیوب سطحی و زیر سطحی مانند ترکها و حفره ها قابل تشخیص می گردند.

- **نفوذ رنگ:** کلیه ترکها و شکافهای سطحی را به راحتی می توان با این آزمایش تشخیص داد. در این روش رنگ دانه های فلورسنت بر روی سطح مورد آزمایش ریخته شده سپس مواد ثابت کننده به آن افزوده شده آنگاه سطح در زیر نور ماورائ بنفش مورد بررسی کامل قرار می گیرد.

- **رادیو گرافی:** در این روش به کمک اشعه ایکس هر نوع بروز عیب داخلی نظیر ترک در قطعات مشخص می گردد.

۵- نتیجه گیری:

- با توجه به مطالب گفته شده در بالا که اکثرا کاربردی بوده لزوم بکارگیری بیش از پیش این موارد را در صنعت متذکر می گردد.

- کلیه روشهایی که به نوعی در مبحث تعمیرات و نگهداری مطرح است به نوعی مرتبط با کاهش هزینه ها و کارکرد مناسب تر تجهیزات می باشد لذا در توسعه صنعتی مباحث تعمیرات و جلوگیری از بروز خرابی باید در اولویت قرار گیرد.



- تهیه تجهیزات و وسائل مورد نیاز تعمیرات پیشگیرانه و سایر شاخه های مرتبط با تعمیرات از ضروریات مهم این رشته در کشور می باشد.

۶- یادداشت ها:

Preventive Maintenance: نت پیشگیرانه
Predictive Maintenance: نت پیشینانه
Proactive Maintenance: نت کنشگرایانه

۷- مراجع:

- نیکجو، ع. پروژه قابلیت اطمینان تاسیسات ثابت نیروگاه بعثت، ۱۳۸۱
- نوری، ع. روش های نگهداری و تعمیرات در صنعت، آذر ۱۳۸۴، ماهنامه بین المللی نفت و انرژی
- عبدالحسین نیکجو، احداث نیروگاه یا احیاء واحدهای فرسوده، ۱۳۸۳، شانزدهمین کنفرانس بین المللی برق
- عبدالحسین نیکجو، قابلیت اطمینان توصیفی، ۱۳۸۳،
- قابلیت اطمینان توصیفی مولدها، ۱۳۷۹، ع. نیکجو
- نوری، ع. روش های نگهداری و تعمیرات در صنعت، آذر ۱۳۸۴، ماهنامه بین المللی نفت و انرژی
- رزومه شرکت ثبت شده در سیستم مکانیزه نت "نگهدار" در شرکت سیمان خوزستان، ۱۳۸۴.
- تجربیات بخش برنامه ریزی نت شرکت داده پردازان احداث، ۱۸۴، "مدیریت تعمیرات پیشگیرانه".
- Pool, n., "PM Management and Effect", ۲۰۰۴,
- Nicole, O., "PM Analiz", AIM, ۲۰۰۵,

کاربرد مانیتورینگ بلادرنگ عمر باقیمانده در سیستم نگهداری بویلر

اسماعیل پورسعیدی ۴- علی احمدی ۵

Email: a_ahmadi20@yahoo.com

۱- زنجان- دانشگاه زنجان- دانشکده مهندسی

۲۰- کرج- کیلومتر ۷ جاده ملارد- شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها- ص- پ ۱۱۳۷-۳۱۵۸۵

واژه های کلیدی: عمر باقیمانده، مانیتورینگ بلادرنگ، سیستم تعمیرات نگهداری و اجزاء بویلر

چکیده

با توجه به طراحی محافظه کارانه بویلرها، معمولا عمر واقعی آنها بیشتر از عمر طراحی است. لذا پس از پایان عمر طراحی، ادامه تولید از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود. همچنین بدلیل مشکلات زیست محیطی، عوامل

۴- کارشناس ارشد مکانیک

۵- دکترای مکانیک



اقتصادی و طولانی بودن زمان ساخت بویلرها فعالیت‌هایی تحت عنوان ارزیابی وضعیت، تخمین عمر باقیمانده و افزایش عمر معرفی شده اند. ارزیابی وضعیت و تخمین عمر باقیمانده که شامل انجام محاسبات و آزمایشهای مختلفی است، می تواند کمک بسیار مؤثری در استفاده بهینه از اینگونه تجهیزات نماید. بنابراین یک سیستم مانیتورینگ بلادرنگ برای تعیین، محاسبه و کنترل عوامل اصلی کاهش عمر از قبیل خستگی، خزش، اندرکنش خزش-خستگی، می تواند پایه اساسی برنامه های نگهداری و تعمیرات(نت) قرار گیرد. این سیستم، وضعیت و تغییرات فشار و دمای سیال را جمع آوری می کند و میزان بارگذاری(بارهای محوری و خمشی) در اجزای مختلف را محاسبه می کند. سپس اقدام به تجزیه و تحلیل و محاسبه کسر عمر لحظه به لحظه سیستم می نماید. بنابراین با استفاده از نتایج محاسبات عمر باقیمانده می توان برنامه نت پیش بینانه ای برای بویلر ارائه داد.

۱- مقدمه

ارزیابی وضعیت و تخمین عمر اجزای بویلر براساس دو معیار ایمنی و هزینه که شامل پارامترهایی مانند مدت زمان خروج جهت تعمیرات، هزینه تعمیرات، خسارت مدت زمان خروج واحد و خطر مرگ کارکنان انجام می شود. در بسیاری موارد جداول زمانبندی بازرسی و ارزیابی براساس برنامه خروج واحد طبق نظر سازنده تهیه شده است. لذا تعمیر یا تعویض قطعات طی این برنامه نگهداری و تعمیرات (نت) که از وقوع از کار افتادگیهای ناگهانی و تعمیرات اضطراری جلوگیری می کند، انجام می شود. ولی برای واحدهایی که عمر طراحی آنها را پشت سر گذاشته اند، ضروری است برنامه زمانبندی بازرسی و تعمیرات براساس نتایج آزمایشهای عمر باقیمانده صورت گیرد. نت عکس العملی (Reactive Maintenance) یا نت از کارافتادگی (Breakdown Maintenance) قدیمی ترین و ساده ترین روش مورد استفاده بود که براساس از کارافتادگی کار می کرد. در این شیوه، ماشین تا مرحله از کار افتادگی کار می کرد و تا مادامیکه از کار افتادگی در ماشین رخ نداده بود، هیچ فعالیت نتی بر روی آن صورت نمی گرفت [۱]. استفاده از چنین شیوه ای برای بویلر به دلیل توقف های فراوان و بدون برنامه بسیار گران تمام می شود. لذا بکارگیری تکنیکهای پیشرفته نت با استفاده از نتایج آزمایشهای عمر باقیمانده امری اجتناب ناپذیر می باشد.

۲- روشهای ارزیابی عمر باقیمانده

روش های ارزیابی وضعیت و تخمین عمر شامل انجام محاسبات و آزمایشهای مختلفی می باشد که با کمک آن می توان از وضعیت اجزای مهم بویلر اطلاعات مناسبی کسب کرد. به منظور ارائه برنامه مناسب نت شناخت عوامل از کار افتادگیها در قسمتهای مختلف بویلر ضروری می باشد. جداول ۱ و ۲ عوامل از کارافتادگی قسمتهای مختلف بویلر را نشان می دهند. عوامل یا مکانیزمهای تخریب بویلرها را می توان به سه گروه تقسیم بندی نمود. گروه اول به عوامل مخربی که منشأ فیزیکی دارند اطلاق می شود. برخی از مهمترین آنها در این گروه عبارتند از: تردی حرارتی یا تمپر، استحاله کاربیدهای آلیاژی یا خشن شدن آنها، اثرات ناگوار آخالها نظیر MnS و پیرشوندگی. همه این عوامل در جهت ایجاد زوال تدریجی در ساختار داخلی لوله های بویلر و به تبع آن زوال خواص متالورژیکی آنها پیش می روند. گروه دوم شامل شناسایی پارامترهای مکانیکی یا ترمومکانیکی است که منشأ رخداد پدیده هایی همچون خستگی مکانیکی، خستگی ترمومکانیکی یا حرارتی، شکست نرم و ترد، تغییر شکل غیر مجاز، گسیختگی، خزش، اندرکنش خزش-خستگی و کمانش می باشند. بدیهی است محیط داخل کوره که لوله های بویلر در معرض آنها قرار دارند، موجب پیچیدگیهای وابسته به فرآیندهای گرمایی و مکانیکی می شوند که واماندگی یا آسیبهای ناشی از این فرآیندها بسیار متداول است



و می تواند به زیانهای اقتصادی قابل ملاحظه ای بیانجامد. لذا کوشش در راه شناسایی دلایل رخداد این پدیده ها که منشا مکانیکی - حرارتی دارند و پیش بینی رفتار احتمالی آنها در عمر باقیمانده ضروری به نظر می رسد. در نهایت گروه سوم که به تخریب هایی که منشاء شیمیایی دارند، اطلاق می شوند. خوردگی خراشیدگی، خوردگی تنشی (S.C.C)، خوردگی خستگی و خوردگی داغ مثالهای بارزی از پدیده های مخرب بر عمر باقیمانده تلقی می شوند [۲].

از روشهای محاسباتی و آزمایشگاهی (آزمایشهای مخرب و غیر مخرب) جهت تعیین میزان خسارت استفاده می گردد که شامل بازدید چشمی، تهیه نمونه از لوله های بویلر، متالوگرافی غیر مخرب یا رپلیکا، سختی سنجی، ضخامت سنجی و آزمایشهای متالوگرافی، اندازه گیری ابعادی و روشهای مبتنی بر تخمین دما و همچنین آزمایشهای خزش، خستگی، گسیختگی، کشش و ضربه می باشد و بسته به شرایط، هر کدام از آنها می تواند انجام شود. شایان توجه است از آنجائیکه امکان نمونه برداری از هدرها و لوله های اصلی بخار نمی باشد، لذا از بین روشهای یاد شده صرفاً روشهای غیر مخرب نظیر رپلیکا، سختی سنجی، ضخامت سنجی، آزمایشهای ذرات مغناطیسی، آلتراسونیک و یا جریان گردابی انجام می شود. بدیهی است بدلیل محدودیت موجود از نظر نمونه برداری، روشهای محاسباتی که عمدتاً براساس رشد ترک می باشد، در این راستا از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در هر صورت باید توجه داشت که هر کدام از روشهای فوق دارای مزایا و محدودیت هایی هستند که کار برد آنها منوط به بررسی امکانات موجود، حساسیت قطعه، ارزش اقتصادی، تدابیر و سیاستهای نت می باشد. با عنایت به عوامل تخریب در بویلرها، شناخت و تحلیل سیستمها، تعیین موقعیتهای بحرانی و تهیه اطلاعات بهره برداری، خواص مواد و مشخصات طراحی بویلر از نیازمندیهای اولیه در تخمین عمر باقیمانده می باشند:

- اطلاعات و مشخصات فنی طراحی
- دما و فشار طراحی و کاری
- تعداد ساعات کارکرد
- تعداد استارت داغ، گرم و سرد و نرخ تغییرات دما و فشار آنها
- تعداد تریپها و توقفهای عادی
- ثبت دقیق اطلاعات از کارافتادگی ها
- اطلاعات و موقعیتهای تعمیرات
- اطلاعات خستگی LCF ، HCF و چقرمگی
- مشخصات رشد ترک خزشی و خستگی
- اطلاعات Creep و Stress Rupture
- اطلاعات برهمکنش خزش و خستگی

امروزه در صنایع مختلف از سیستم های مانیتورینگ بلادرنگ (On-line Manitoring) بخاطر مزایای بسیار زیاد آنها بصورت بسیار وسیعی استفاده می شود. با توجه به اهمیت و حجم بسیار زیاد داده ها و اطلاعات مورد نیاز تخمین عمر باقیمانده استفاده از سیستم های مانیتورینگ بلادرنگ کمک بسیار موثری می باشد که می توان از نتایج ارزیابی عمر باقیمانده در تهیه و کنترل برنامه های نت کمک گرفت. استفاده از یک سیستم مانیتورینگ بلادرنگ که شامل شناسایی عوامل اصلی کاهش عمر شامل خستگی، خزش، اندرکنش خزش - خستگی، خوردگی و سایش و سپس تعیین وضعیت و



تخمین عمر باقیمانده با استفاده از روشهای محاسباتی و آزمایشگاهی است، می تواند پایه اساسی برنامه های نت قرار گیرد.

۳- برنامه بلادرنگ نت

خرابی در تجهیزات به مرور شروع شده و توسعه می یابد و در نهایت منجر به از کارافتادگی می گردد. چنین روندی، امری طبیعی است ولی آنچه که مهم است شناسایی خرابی های اولیه و جلوگیری از گسترش آنها است. برطرف کردن خرابی های اولیه تجهیزات با هزینه کمی امکانپذیر است، در حالیکه اگر خرابی های جزئی بر طرف نشوند چه بسا ممکن است بخشهای دیگری از ماشین را نیز تحت تاثیر قرار داده و خرابی عمده ای بوجود آید [۳]. باتوجه به اسناد و مدارک سازندگان، بویلرها دارای تعمیرات اساسی (درحدود هر ۵ سال یا ۴۰۰۰۰ ساعت یکبار)، تعمیرات میان دوره ای (درحدود هر دو سال یکبار) و بازدیدهای دوره ای (سالی یکبار) می باشند که طبق برنامه زمانبندی شده ای انجام می شود البته ممکن است به دلیل خرابیهای اضطراری به منظور کاهش توقفهای بویلر تغییراتی در این برنامه های زمانبندی شده صورت گیرد. اما برای واحدهای با کار کرد بالا ضروری است تعمیرات بر اساس نتایج روشهای عمر باقیمانده صورت گیرد. در یک برنامه ایده آل مناسب است تعمیرات دقیقاً در لحظه ای اعمال شوند که اگر در این لحظه اعمال نشوند، دستگاه دچار خرابی خواهد شد، ولی پیش بینی دقیق لحظه خرابی امکان پذیر نیست و همچنین از نظر اقتصادی نیز توقف ماشین در هر لحظه مقرون به صرفه نیست. بدین منظور ایجاد سیستمی که بر روی دستگاهها نصب شود و وضعیت آن را به طور مستمر به نمایش گذارد، می تواند برنامه نت را تحت کنترل خود در آورد. اجرای سیستم نت چنانچه بر اساس داده های حاصل از محاسبات و آزمایشهای روشهای عمر باقیمانده برنامه ریزی شود کارایی آن بمراتب بیشتر خواهد بود.

۳-۱- نت پیشگیرانه

با رشد فناوری در زمینه الکترونیک و با وجود آمدن کامپیوترهای بزرگ تدابیر نت پیشگیرانه (Preventive Maintenance Technology) مورد استفاده قرار گرفت. در این روش جداول زمانی مربوط به نت به طور خودکار و با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری تهیه می شد و انجام آن از طریق صدور دستور کارهای لازم براساس مدارک سازندگان در زمانهای تعیین شده تضمین می شد که هدف اصلی آن کنترل و برنامه ریزی فعالیتهای نت است. سیستم کامپیوتری مدیریت نت یا سیستم CMMS، برنامه را تدوین و انجام آن را کنترل می کند. این برنامه کامپیوتری بودجه و اساس فعالیتهای روزانه، کنترل فهرست، قطعات یدکی، پرونده گذشته دستگاهها و آنالیز هزینه های بخش نت را مشخص می کند. می توان این روش را گامی در جهت سازماندهی و کنترل بیشتر فعالیتهای نت به حساب آورد. این روش درمقایسه با روش عکس العملی، تامین کننده شیوه ای برای کنترل فرآیند نت می باشد که با کاربرد مؤثر آن هزینه های نت به میزان سی درصد کاهش می یابد [۴].

۳-۲- نت پیش بینانه

چنانچه روش نت پیشگیرانه در کلیه سیستمها مورد استفاده قرار گیرد ممکن است به منظور حصول اطمینان از عدم توقف سیستمها فعالیت های نت غیر ضروری زیادی انجام گیرد که این امر هزینه های غیر ضروری بر سیستم تحمیل می کند. لذا فناوری پیشرفته تری بنام نت پیش بینانه (Predictive Maintenance Technology) ارائه گردید. این



روش با استفاده از فناوریهای پیشرفته و ابزارهای دقیق با اندازه گیری شرایط کاری دستگاهها، وضعیت غیر طبیعی آنها را شناسایی می کند و در نتیجه، برنامه ریزی برای تعمیر به موقع آنها را فراهم می کند. در واقع نت پیش بینانه ضمن اندازه گیری وضعیت سیستمها، نحوه انجام نت پیشگیرانه را تعیین و کنترل می کند. لذا برای دستیابی به چنین هدفی، سیستم CMMS طوری برنامه ریزی می شوند که بررسی های تحقیقی از کلیه تجهیزات و قطعات مهم قبل از تعمیرات اساسی زمانبندی شده (Overhaul) انجام گیرد. این روش براین اصل استوار است که کلیه قطعات آسیب دیده، علائم و نشانه هایی (تغییرات ساختاری، سختی، ابعادی، ضخامت و کاهش راندمان) از خود نشان می دهند. این نوع نت یک فعالیت اخطار دهنده از کارافتادگی است که مستلزم مانیتورینگ سیستم ها برای تعیین خرابی در حال وقوع در مواد و تجهیزات می باشد، در چنین حالتی نشان می دهد که از کارافتادگی اولیه شروع شده است و می تواند منجر به از کارافتادگی پیشرفته و خرابی کامل شود. در واقع نت پیش بینانه مانیتورینگ وضعیت فرسوده شدن مواد و تجهیزات را نشان می دهد، هر چند که ممکن است نتواند زمان دقیق از کارافتادگی را مشخص کند ولی می تواند به پرسنل نت برای برنامه ریزی و کاهش زمان توقف اخطار دهد. این روش نیازمند اطلاعات دقیق و بموقع خاص هر سیستم است چرا که مبتنی بر روند تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده برای پیش بینی از کار افتادگی می باشد. از منافع این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شرایط کاری تجهیزات که تحت کنترل قرار دارند شناخته شده و برنامه ریزی نت از توقف و تخریب بیجای آنها جلوگیری می کند.
 - نیازهای تعمیراتی از دیدگاه نیروی انسانی و قطعات یدکی را می توان ارزیابی و برنامه ریزی کرد.
- با وجود سازندگان سیستم های مانیتورینگ وضعیت و دستگاههای جمع آوری داده چند کاناله همراه با بسته های نرم افزاری مختلف، دنیای جدیدی برای تحلیلگران مانیتورینگ وضعیت گشود شده است. نوآوری هایی از قبیل سنسورها و حسگرهای هوشمند همراه با سیستمهای انتقال اطلاعات بی سیم به دستگاه مرکزی باعث تحول بزرگی در این زمینه شده است. نرم افزارها کلید بهبود بخشیدن کارایی مانیتورینگ وضعیت می باشند و سیستم های خبره و قانونمند که با نرم افزارهای شبکه عصبی ترکیب شده اند می توانند یک ارزیابی واقعی از وضعیت ارائه دهند. با توسعه این سیستمها، تشخیص و تعیین دقیق عیب در ماشینها امکانپذیر می باشد و با دقت بیشتری می توان شدت خطر را ارزیابی و عمر باقیمانده دستگاه را نیز تخمین زد [۳].

۳-۳- نت فعالانه

در سالهای اخیر، فناوری پیشرفته تری بنام فناوری نت فعالانه مطرح شده است که بسیار کارآمدتر از فناوریهای پیشگیرانه و پیش بینانه می باشد. در این روش توجه خاصی بر کاهش میزان کلی فعالیتهای نت مورد نیاز و به حداکثر رساندن عمر کاری دستگاهها صورت می گیرد که این امر از طریق از بین بردن منظم منشاء و علل توقف های بیجا انجام می شود.

۴- ابزارها و مراحل مانیتورینگ

مانیتورینگ بویلرهای نیروگاهی نیازمند یک سیستم جمع آوری داده (DAS) می باشد که بایستی شامل موارد زیر باشد.

- تعیین کمیتهایی مورد نظر اندازه گیری و موقعیتهای آنها در بویلر



- انتخاب و نصب مبدل‌های اندازه گیری کمیتها
- سیستمهای سخت افزاری جمع آوری داده (کارت جمع آوری داده)
- سیستمهای نرم افزاری جمع آوری داده همراه با تجزیه و تحلیل داده ها

کل سیستم شامل سیستم جمع آوری داده، سیستم آنالیز بویلر (تجزیه و تحلیل وضعیت و آنالیز تنش) و سیستم نمایش دهنده می باشند. نصب سیستم جمع آوری داده شامل کامپیوتر، مبدلها و تجهیزات جانبی می باشد. سیستمهای جمع آوری داده به اندازه گیری یک سیگنال حقیقی نظیر ولتاژ و ارسال آن به کامپیوتر جهت پردازش، تجزیه و تحلیل، ذخیره و اعمال تغییرات می پردازد. در شکل ۱ اجزای یک سیستم جمع آوری داده که بطور معمول شامل مبدل، تطبیق دهنده سیگنال، کارت جمع آوری داده، کامپیوتر و نرم افزار جمع آوری داده است، نشان داده شده است. مبدلها کمیت فیزیکی مورد نظر (دما و فشار) را سنجیده و یک سیگنال الکتریکی متناسب با مقدار اندازه گیری شده تولید می کنند. به عنوان مثال ترموکوپل هایی که می توان آنها را نوعی مبدل فرض کرد، درجه حرارت را به ولتاژ تبدیل می کنند. سپس این سطوح ولتاژ توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) قابل اندازه گیری خواهند بود [۵].

با عنایت به عوامل از کار افتادگی در بویلر (پدیده های خزش و خستگی) و توانایی روشهای اندازه گیری، بایستی کمیتهای دما، فشار و زمان اجزای مورد نظر اندازه گیری شوند. لذا با توجه به جداول ۱ و ۲ مبدلهای دما و فشار در نواحی سوپر هیتر و ری هیتر (هدرها و خطوط اصلی بخار) نصب می گردند. فرکانس نرخ داده برداری با توجه به طبیعت تغییرات دما و فشار تعیین می گردد. دریافت سیگنالهای مختلف از تجهیزات، اولین مرحله مانیتورینگ می باشد. انتخاب صحیح پارامترهای مورد اندازه گیری، انتخاب و تعیین محل نصب سنسورها اهمیت خاصی دارد. این داده ها همراه با داده های بهره برداری با استفاده از یک برنامه نرم افزاری تجزیه و تحلیل و دسته بندی می شوند. سپس با استفاده از روابط خزش و خستگی محاسبات کسر عمر خزشی و خستگی انجام می گیرد. فلوجارت اجرایی این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.

۵- بحث

برای مراقبیت و کنترل خسارت در قسمتهای فشار و دما بالای نیروگاهی برنامه های مختلف On-line و Off-line برای اجزای مختلف نیروگاه پیشنهاد شده است. یکی از این سیستمها PlusEra Technology یا Plant life usage (Surveillance) که در انگلستان برای مانیتورینگ On-line ارزیابی عمر خستگی - خزش هدرهای بویلر مورد استفاده قرار گرفته است. هسته اصلی این سیستم مراقبتی آنالیز تنش - کرنش بلادرنگ است که از طریق جمع آوری سیگنالها و سپس تبدیل آنها به عمر مصرفی صورت می گیرد. این سیستم همچنین شامل یک بخش Off-line دما/ تنش براساس روش اجزای محدود می باشد که از بانک اطلاعات متریالی نیز استفاده می کند. سیستم شامل بانک اطلاعات داده های متریالی، داده های بهره برداری و داده های طراحی می باشد [۶]. همچنین سیستم ERNA شرکت Babcock که بصورت On-line کاهش عمر خزشی و خرابی در اثر بارهای سیکلیک را مطابق با استاندارد TRD انجام می دهد [۷].

با توجه به عوامل کاهش عمر که شامل پدیده های خزش، خستگی، خوردگی و سایش می باشند، بایستی از امکانات و ابزارهای مختلف به منظور مشخص کردن مقدار خسارت هر یک از این عوامل استفاده کرد. با انجام آزمایشهای ارزیابی وضعیت و عمر باقیمانده می توان وضعیت نواحی مختلف بویلر را از لحاظ مکانیزمهای غالب تخریب مشخص نمود. از نتایج این آزمایشها مقدار ضخامت، وضعیت سختی و مشخصات میکروساختار از نظر تغییرات و وضعیت زوال



با تعیین کلاسهای ساختاری و خزشی بدست می آید. داده های جمع آوری شده از اجزاء بویلر، داده های ورودی برای برنامه آنالیز تنش در برنامه مانیتورینگ و ضمناً مقایسه عمر بدست آمده از تست ها با عمر پیش بینی شده توسط نرم افزارهای نوشته شده در سیستم مانیتورینگ بوده و در گام آخر تصحیح روند پیش بینی عمر توسط مانیتورینگ در دوره های آتی می باشد. این برنامه محدوده های تنش و کرنش هر یک از اجزاء را با در اختیار داشتن مشخصات متریالی، ابعادی و ضرایب هندسی طراحی، محاسبه می کند تا خسارت خزش/خستگی تعیین گردد. با استفاده از این نتایج وضعیت فعلی و روند تغییرات آتی بویلر مشخص و پیشنهاداتی شامل انجام تنظیمات یا تغییرات بر روی قسمتهای مختلف بویلر و همچنین نوع، حجم و زمان آزمایشهای بعدی نیز مشخص می گردد. در این قسمت، بعنوان مثال، امکانات و ابزارهای مورد نیاز برای مانیتورینگ و محاسبات پدیده های مخرب خزش و خستگی در قسمتهای جدار ضخیم بویلر (هدرها و لوله های بخار اصلی) مورد بررسی قرار گرفته است. لذا به منظور محاسبه کسر عمر خزشی و خستگی موارد زیر بایستی اندازه گیری و تهیه شوند.

- دما و فشار کاری
- مشخصات ابعادی و متریالی لوله ها و هدرها
- ضخامت اندازه گیری شده لوله ها و هدرها

با نصب ابزارهای اندازه گیری فشارسنج و ترموکوپل در نقاط خاصی از اجزاء بویلر، دما و فشار کاری اندازه گیری می شوند (شکل ۳). با استفاده از وسایل اندازه گیری التراسونیک، ضخامت لوله ها و هدرها مشخص می گردد. این داده ها توسط سیستم جمع آوری داده با یک نرخ داده برداری مناسب در کامپیوتر ثبت و ذخیره می شوند. کلیه داده های فوق، داده های مربوط به مشخصات متریالی، مشخصات ابعادی طراحی، داده های بهره برداری، نتایج حاصل از آزمایشهای دوره ای ارزیابی وضعیت و تخمین عمر باقیمانده در یک بانک جمع آوری می شوند و سپس با استفاده برنامه کامپیوتری دسته بندی می شوند. در نهایت با استفاده از روابط محاسباتی خزش و خستگی میزان خسارات یا کسر عمر برای اجزاء مختلف لذا با استفاده برنامه کامپیوتری (خسارات تجمعی) براساس کارکرد واحد می تواند محاسبه گردد. با این اطلاعات یک وحدت رویه ای برای قطعه ای که در خطر از کار افتادگی است ایجاد می گردد. اگر از کار افتادگی در قطعه ای پیش بینی شود، یک بازبینی جهت تعیین وضعیت و پیشرفت خسارت قطعه، در نظر گرفته می شود. بدلیل اینکه در کلیه موارد از سیستم کامپیوتری کمک گرفته می شود، لذا انجام مراحل مختلف این فرآیند آسان می باشد. با توجه به نصب سیستمهای جمع آوری داده کامپیوتری (Paperless) در بعضی از نیروگاههای کشور به عنوان مثال نیروگاه اسلام آباد اصفهان و نتایج حاصل از انجام آزمایشهای دوره ای ارزیابی وضعیت و تخمین عمر باقیمانده، می توان نسبت به اجرای یک برنامه نت پیش بینانه و یا فعالانه اقدام نمود.

۶- نتیجه گیری

در نهایت نتایج و منافع حاصل از اجرای این سیستم می توان موارد زیر را بر شمرد.

- ۱- کلیه داده های جمع آوری شده و محاسبات از طریق سیستم کامپیوتری انجام می شود، لذا انجام مراحل مختلف این فرآیند آسان می باشد و ضمناً جهت کنترل نتایج آن در زمان تعمیرات اساسی یکسری آزمایشها روی المانها صورت گرفته و تجزیه و تحلیل صورت می گیرد.
- ۲- با استفاده از سیستم جمع آوری داده، داده های مختلف بویلر مانند دما، فشار، دبی جریان، بار واحد و ... ثبت و ذخیره می شوند (نمایش و آنالیز وضعیت پارامتر های کاری بویلر).



- ۳- به پهنه کردن نرخهای راه اندازی و خاموش کردن (با مشخص کردن خسارات موقتی) کمک می کند.
 ۴- برنامه ریزی بهتر با در اختیار داشتن داده های متعدد و در نتیجه کاهش هزینه های نت.
 ۵- افزایش در دسترسی واحد برای تولید و همچنین کمک در افزایش عمر قطعات می باشد.

مراجع :

- ۱- حاج شیر محمدی، علی، برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات، چاپ پنجم، انتشارات غزل اصفهان، ۱۳۷۷.
 ۲) Viswanathan R. "Damage Mechanisms and life Assessment of High Temperature Components" ASM International pub, ۱۹۸۳.
 ۳- اسماعیل زاده خادم، سیامک، نسرين امیدخواه، محمدرضا، لیاقت، غلامحسین، مانیتورینگ وضعیت ماشین آلات، چاپ اول، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.
 ۴- اسماعیل زاده خادم، سیامک، نسرين امیدخواه، محمدرضا، درويزه، ابوالفضل، تکنولوژی های نگهداری و تعمیرات و آنالیز ارتعاشی ماشین آلات، چاپ اول، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.
 ۵- قابوسی، فرید، راهنمای جامع نرم افزار Lab VIEW، چاپ اول، نشر آفرنگ، ۱۳۸۲.
 ۶. Cane, B.J, Surveillance and control of damage in elevated temperature pressure parts in power and process plants, ERA technology limited , EPRI conference, ۱۹۹۶.
 ۷. Kmminski, T., Lifetime monitoring with ERNA system, ASME joint International power conference, ۱۹۹۴. generation

جدول ۱: عوامل از کار افتادگیهای بویلر

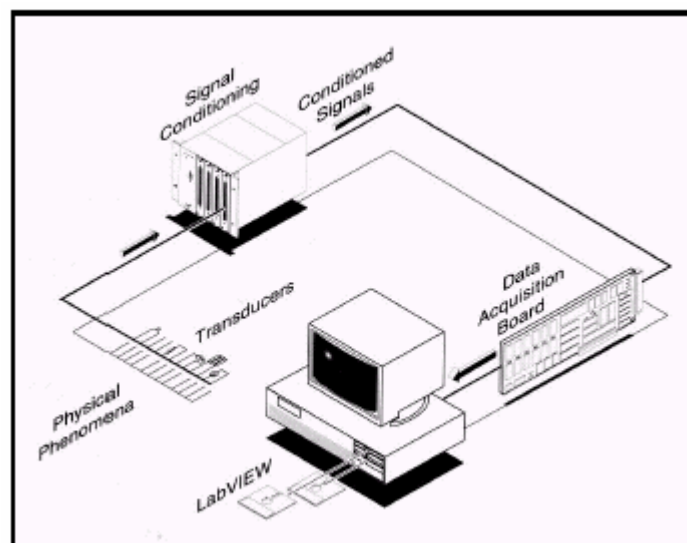
ردیف	عامل از کار افتادگی	نوع عامل از کار افتادگی	نحوه عملکرد
۱	خرش	خرش کوتاه مدت	تغییر شکل زیاد در طی زمان کوتاه در اثر اورهیت
		خرش بلند مدت	تغییر شکل کم در طی زمان طولانی تحت دمای زیاد و تنش
۲	خستگی	خستگی کم چرخه	تحت تنش حرارتی بالا در تعداد کم چرخه
		خستگی چرخه زیاد	تحت تنش پائین ولی در چرخه بسیار زیاد
۳	خوردگی و سایش	خوردگی دمای بالا	کاهش ضخامت و ایجاد ترک تحت شرایط مختلف در اثر عوامل مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی
		خوردگی دمای پائین	
		خوردگی حفره ای	
		سایش	
		خستگی خوردگی	



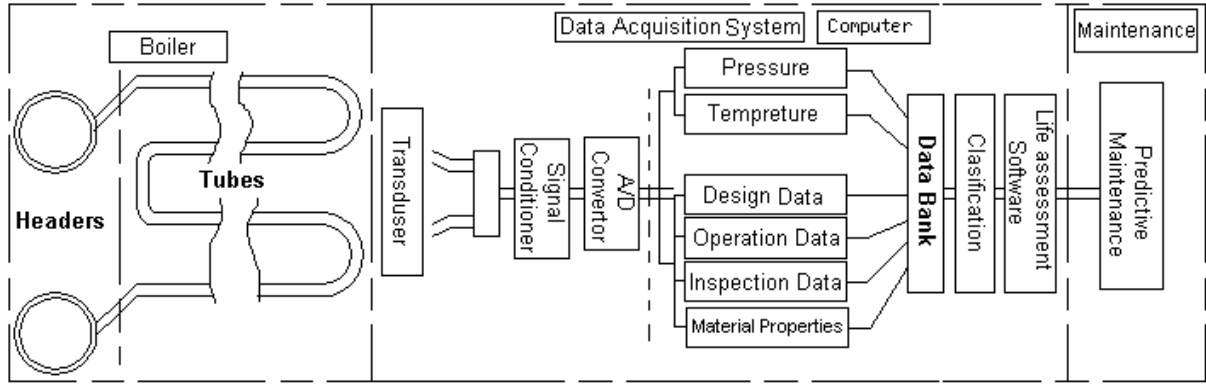
	خوردگی مرزدانه ای		
--	-------------------	--	--

جدول ۲: عوامل از کارافتادگی قسمت‌های مختلف بویلر

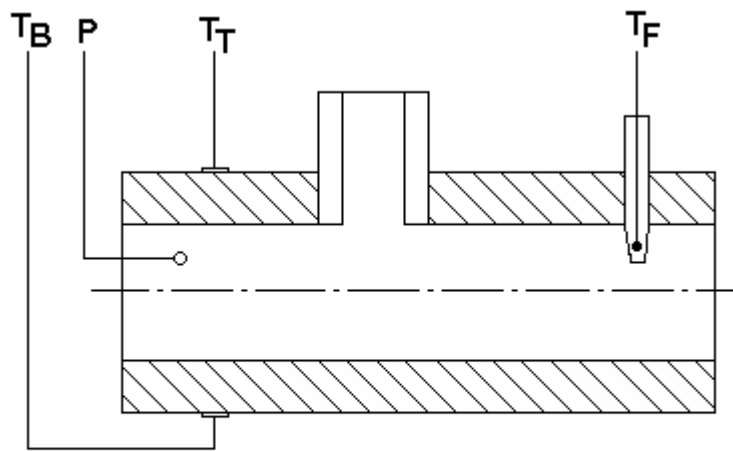
ردیف	قسمت بویلر	موقعیتها	عامل از کارافتادگی
۱	قسمتهای دما بالا و با ضخامت زیاد	هدرهای سوپر هیتر و ری هیتر لوله های اصلی بخار سوپر هیتر لوله های اصلی بخار ری هیتر	خزش خستگی پیری
۲	قسمتهای با دمای متوسط و ضخامت زیاد و همچنین لوله ها	درام، اوپراتور، لوله های سوپر هیتر و ری هیتر	خزش، خستگی و خوردگی
		لوله های اکونومایزر	خوردگی
۳	لوله های دیواره کوره	لوله های دیواره بویلر	وتخریب هیدروژنی



شکل ۱: اجزای یک سیستم جمع آوری داده



شکل ۲: فلوجارت اجرایی سیستم مانیتورینگ اجزای بویلر



T_B : Temperature bottom surface T_F : Temperature fluid
 T_T : Temperature top surface P : Pressure

شکل ۳: نصب ابزارهای اندازه گیری فشارسنج و ترموکوپل در اجزاء بویلر



بررسی ترکیب شیمیایی، خواص خوردگی و علل تخریب

پره های ردیف اول توربین های گازی از جنس سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-۴۱۴

علی ترابیان، کارشناس مهندسی مکانیک دانشگاه شهید عباسپور

خسرو رحمانی، عضو هیأت علمی دانشگاه شهید عباسپور

چکیده

در توربین های گاز، نازل های ردیف اول تحت تاثیر بالاترین دمای محصولات ورودی به توربین قرار دارند ولی از جهتی تنش مکانیکی آنها کمتر از پره های متحرک است. این نازل ها گازهای داغ را به سمت پره ها جهت می دهند و در نتیجه باید دارای مقاومت اکسیداسیون و خوردگی داغ بسیار بالا (بوپزه در محیط های سولفوری)، جوش پذیری نسبتا خوب برای سهولت ساخت و تعمیر و قابلیت ریخته گری خوبی باشند.

عمر مطلوب پنجاه تا صد هزار ساعت برای پره های ثابت توربین صنعتی نشان دهنده آن است که یک دمای مناسب خنک کاری برای عمر خزشی و مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی مورد نیاز ضروری است. اگرچه تنش های گریز از مرکز روی پره ها وجود ندارد، ترکیب بارهای خمشی ناشی از فشار گاز و گرادیان دمایی ایجاد شده به وسیله خنک کاری پره باعث تنش های بالای موضعی در پره های ثابت می شود. تنش های گرمایی ناشی از گرم و سرد شدن نابرابر لبه حمله و لبه فرار در طول راه اندازی و از کاراندازی نیز فاکتوری است که می تواند باعث شکست ایرفویل در این قسمت ها شود. لذا استفاده از با استحکام ترین و پیشرفته ترین آلیاژهای در دسترس برای پره های طبقه اول امری معمول و ضروری است. لازمه انتخاب مواد، دریافت مفاهیم پیشرفته متالورژیکی از استحکام آلیاژی و خصوصیات عناصری آلیاژ به همراه ملزومات طراحی مکانیکی، خوردگی و انتقال حرارت است.

کلمات کلیدی:

سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-۴۱۴، پره های توربین گاز، آبکاری، اکسیداسیون، خوردگی، خزش، خستگی حرارتی، سایش، شکست

مقدمه:

عمر مطلوب پنجاه تا صد هزار ساعت برای پره های ثابت توربین صنعتی نشان دهنده آن است که یک دمای مناسب خنک کاری برای عمر خزشی و مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی مورد نیاز ضروری است. اگرچه تنش های گریز از مرکز روی پره ها وجود ندارد، ترکیب بارهای خمشی ناشی از فشار گاز و گرادیان دمایی ایجاد شده به وسیله خنک کاری پره باعث تنش های بالای موضعی در پره های ثابت می شود.

برای نازل های مورد بحث تا چند سال اخیر استفاده از سوپر آلیاژهای پایه نیکل مرسوم بود اما با شناخت و توسعه خواص سوپر آلیاژهای پایه کبالت، این آلیاژها نیز پا به عرصه رقابت گذاشتند.

از مهم ترین آلیاژهای پایه کبالت در حال حاضر ۳۱ Haynes Stellite Alloy No. (X-۴۰) و نوع کم کربن اش X-۴۵ می باشد. این آلیاژها هر دو به صورت ریخته گری در هوا ساخته می شوند که FSX-۴۱۴ به عنوان آلیاژ توسعه یافته کروم بالای X-۴۰ کاربرد بسیاری یافته است.



FSX-۴۱۴ یکی از سوپر آلیاژهای پایه کبالت است که به دلیل خواص خوردگی، مکانیکی و حرارتی بالای آن در نازل های ردیف اول برخی از توربین های گاز شرکت جنرال الکتریک مانند GE-F۵, GE-F۹ و مدل های MS-۷۰۰۱ به کار گرفته شده است. این آلیاژ در سال ۱۹۶۸ به وسیله شرکت جنرال الکتریک ساخته شد. ترکیب شیمیایی اسمی به صورت درصد وزنی % ۲۹/۵ کروم، % ۱۰/۵ نیکل، % ۷ تنگستن و % ۰/۲۵ کربن، % ۰/۰۱ بور و بقیه کبالت می باشد. پروژه حاضر به شناخت و بررسی خواص آلیاژ FSX-۴۱۴ و همچنین عوامل تخریب آن می پردازد. فصل اول در ارتباط با جنس مواد و آلیاژهای به کار رفته در پره های ثابت ردیف اول توربین گازهایی است که از سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-۴۱۴ بهره می برند. فصل دوم به بررسی شرایط احتراق و ایجاد شرایط اکسیداسیون و خوردگی در این پره ها می پردازد و در فصل سوم علل خرابی این پره ها شامل شکست در اثر تنش های کششی، فشاری، خستگی حرارتی، خزش و برش مورد بحث قرار می گیرد. همچنین در این فصل دو نمونه شکست واقعی در توربین های GE MS۷۰۰۱ مدل های ۷E و ۷B که در باکت های ردیف اول خود از این آلیاژ بهره می برند، تشریح شده است.

جنس مواد و آلیاژهای به کار رفته در پره های ثابت ردیف اول توربین های گازی

هرچه فشار و دمای حاصل گازهای احتراق در توربین گاز بالاتر رود راندمان و قدرت خروجی افزایش می یابد، اما این افزایش دما به دلیل مشکلات متالوژی سوپر آلیاژها دارای محدودیت است. هرچند علم متالوژی در زمینه سوپر آلیاژها پیشرفت محسوسی داشته است و امروزه سوپر آلیاژهایی با تحمل دمایی بالا ساخته شده اند اما پره ها بازم در برابر تنش های حرارتی، خوردگی، اکسیداسیون و ... برای مدت زمان طولانی نمی توانند مقاومت کنند. شرایط کارکرد توربین ایجاب می کند که اجزا مختلف توربین خصوصا پره های ثابت ردیف اول دارای مقاومت بالای دمایی، اکسیداسیون و خوردگی باشند. تاکنون آلیاژی ساخته نشده که به تنهایی بتواند پاسخگوی خصوصیات مربوط به مقاومت دما بالا و همچنین خوردگی داغ و اکسیداسیون باشد، لذا سازندگان توربین معمولا از سوپر آلیاژهای پایه نیکل استفاده می کنند. در چند دهه اخیر با شناخت خواص مناسب آلیاژهای پایه کبالت برای نازل های ردیف اول، این گروه از سوپر آلیاژها در کانون توجه سازندگان توربین های گازی قرار گرفته است. یکی از مهمترین این آلیاژها، سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-۴۱۴ است که در بسیاری از توربین های گازی ساخت شرکت جنرال الکتریک به ویژه توربین های F۵ و F۹ که در کشور ما نیز مورد بهره برداری قرار گرفته اند، استفاده شده است. لذا شناخت این آلیاژ و بررسی خواص و خصوصیات آن می تواند کمک شایانی در جهت بهره برداری هرچه بهتر و طولانی تر این توربین ها نماید.

بررسی مبانی احتراق و شرایط اکسیداسیون و خوردگی

با افزایش پیچیدگی سوپر آلیاژها جهت استحکام در دمای بالاتر و با افزایش دمای آتش توربین ساخت اجزای عبوری گازهای داغ با مقاومت اکسیداسیون و خوردگی کافی سخت تر می شود. باکت های پوشش داده شده اولین بار در توربین های گاز هواپیما در دهه ۱۹۶۰ بکار گرفته شدند. پوشش های نوع نفوذی آلومینیوم حفاظت کافی در کاربردهای توربین گاز صنعتی به دلیل زمان کار طولانی تر و مقادیر بیشتر آلودگیهای سوخت، هوا و بخار تزریقی نداشتند و در نتیجه افزایش مقادیر آلودگی موجب خوردگی داغ می شد، شکل پیشرفته آن مربوط به آلودگی های آلکالی فلزی مانند سدیم و پتاسیم است که با سولفور داخل سوخت جهت تشکیل سولفات های مذاب واکنش می دهد.

بررسی مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی:

خوردگی داغ دو نوع است: نوع دما بالا (نوع ۱) که شکل بسیار سریع اکسیداسیون است و در



۸۱۵ تا 925°C در حضور سولفات سدیم اتفاق می افتد که بوسیله واکنش بین سدیم و آلودگی های سولفور در محصولات احتراق تشکیل می شود. نوع دما پایین (نوع ۲) خوردگی داغ در 595°C تا 760°C اتفاق می افتد و نیازمند یک فشار جزئی مشخص دی اکسید سولفور (SO_2) است که بوسیله ترکیبات یوتکتیک مذاب تشکیل یافته به وسیله واکنش میان Na_2SO_4 و عناصر آلیاژی مانند نیکل و کبالت ایجاد می شود. خوردگی داغ بوسیله کاهش آلودگی های هوا / سوخت، استفاده از آلیاژهای با مقاومت بالا در مقابل خوردگی و به کار بردن پوشش مقاوم به خوردگی کاهش می یابد.

همچنین اکسیداسیون دما بالا امروزه یک نگرانی اساسی در توربین های گاز با دمای آتش بالا است. در دماهای بالای 870°C اکسیداسیون می تواند سریع اتفاق بیفتد مگر اینکه حائلی مقابل نفوذ اکسیژن روی سطح قسمت وجود داشته باشد.

برخی سوپرآلیاژها پوشش های محافظ خود را مانند پوسته های چسبناک اکسید آلومینیوم، در طول اولین مراحل اکسیداسیون شکل می دهند، البته به شرطی که میزان آلومینیوم به اندازه کافی باشد اما برخی از آلیاژهای مقاوم فعلی به اندازه کافی پوسته محافظ تشکیل نمی دهند زیرا خواص شیمیایی شان بیشتر برای مقاومت در دمای بالا و پایداری متالورژیکی بهینه شده تا برای مقاومت در مقابل اکسیداسیون و خوردگی. به همین دلیل اغلب اجزا سوپر آلیاژ تحت حفاظت پوشش هایی برای مقاومت به اکسیداسیون قرار می گیرند. در ماشین های پیشرفته هر دو سطوح خارجی و گذرگاه های داخلی مانند سوراخ های خنک کاری باید پوشش داده شوند.

از نظر خوردگی، آلیاژهای کبالت می توانند به دو دسته تقسیم شوند: آلیاژهای دسته اول دارای کربن کمی ($0.15-0.25\%$) هستند و برای محیط هایی می باشند که خوردگی شدید و دما بالاست و یا برای شرایط کاری هستند که انعطاف پذیری برای آلیاژ مسئله مهمی است. آلیاژهای دسته دوم دارای کربن زیادند (3% تا 1%)، که سختی زیادی را از خود نشان داده و در مقابل تنش های برشی و به عبارتی سایش مقاوم اند ولی انعطاف پذیری کمی دارند.

یکی از مهمترین خواص آلیاژهای پایه کبالت مقاومت به تخریب سطح توسط خوردگی داغ است. برخی از آن ها در شکل (۱- a) مقایسه شده اند که تحت دمای 870°C در شرایط احتراق با سوزاندن روغن باقیمانده، شامل 3% سولفور و 325 PPM NaCl است، قرار گرفته اند. برخلاف مقاومت خوردگی، مقاومت به اکسیداسیون آلیاژهای پایه کبالت بسیار کمتر از اغلب آلیاژهای پایه نیکل است. مقایسه تعدادی از این آلیاژها در مقاومت اکسیداسیون در شکل (۱- b) نشان داده شده است که در معرض سوخت گاز طبیعی با دمای 1100°C بوده اند. هنگامی که مقاومت بالای اکسیداسیون مدنظر می باشد، غالباً آلیاژهای نیکل انتخاب می شوند.

شکل ۱- مقاومت نسبی خوردگی داغ و اکسیداسیون آلیاژهای پایه کبالت

آزمایش ترکیبات اکثریت آلیاژهای کبالت نشان می دهد که برای اغلب این آلیاژها اصلی ترین عنصر برای کنترل اکسیداسیون و خوردگی داغ کروم است.

از آنجا که رفتار اکسیداسیون مورد نظر است، پدیده نفوذ خود به خودی^۶ کاتیون ها در اکسیدهای مختلف اهمیت زیادی دارد. پدیده مذکور به ضریب ثابت نرخ رشد لایه های اکسید محافظ که به صورت سهمی است، ارتباط دارد. شکل (۲) تغییرات ضریب نفوذ کاتیون های مختلف در اکسیدهای مربوط به خود را برحسب دما نشان می دهد.

شکل ۲: خودنفوذی کاتیون ها در اکسیدهای مختلف

^۶Self-diffusion



این شکل نرخ های اکسیداسیون کمتری برای نیکل خالص، در مقایسه با کبالت نشان می دهد و نیز نشان می دهد که آلیاژهای Co-Cr، مقاومت اکسیداسیون برابر یا کمی بیشتر نسبت به آلیاژهای Ni-Cr تحت شرایطی که منجر به تشکیل حائل های اسپینل Cr_2O_3 یا $MgCrO_4$ می شود، دارند. افزایش Al موجب افزایش مقاومت اکسیداسیون نیکل و کبالت با تشکیل Al_2O_3 یا MAI_2O_4 می گردد. افزایش همزمان آلومینیوم و کروم مقاومت اکسیداسیون کبالت را با تشکیل یک لایه Al_2O_3 داخلی در مجاورت فلز و یک لایه خارجی از Cr_2O_3 ، افزایش می دهد. افزایش تانتالیوم مقاومت اکسیداسیون آلیاژهای Co-۳۰Cr را افزایش می دهد. افزایش تانتالیوم به آلیاژ Co-۳۰Cr باعث افزایش مقاومت اکسیداسیون و نیز جلوگیری از پدیده شکست پی در پی لایه اکسید محافظ در دماهای بالای $1150^\circ C$ می شود. افزایش Mo و Ni به آلیاژهای Co-Cr تاثیر مخرب بر مقاومت اکسیداسیون دارد. این تاثیر به دلیل تشکیل اکسید $CoMoO_4$ است که نقطه ذوب پایین دارد. نشان داده شده است که افزایش تنگستن به آلیاژهای Co-۱۰Cr یا Co-۳۰Cr اندکی سودمند است ولی نقش اساسی تنگستن، استحکام دهی کاربیدی یا تشکیل محلول جامد در سوپر آلیاژ است.

آلیاژهای کبالت تجارتي شامل میزان ۳۰-۲۰٪ وزنی کروم اند در حالی که آلیاژهای نیکل فقط دارای میزان متوسطی کمتر از ۱۵٪ وزنی می باشند. آلیاژهای FSX-۴۱۴ و FSX-۴۱۸ به طور ویژه ای با میزان کروم بالا جهت مقاومت در مقابل سولفیداسیون طراحی شده اند.

روش های پوشش دهی سوپر آلیاژ پایه کبالت و تاثیر آن در کاهش اکسیداسیون

رشد پوشش های آلومیناید نفوذی به وسیله انتقال عوامل نفوذکننده به سطح کنترل می شود. هر دو پوشش های آلومیناید نفوذی اکتیویته بالا (رشد به وسیله نفوذ آلومینیوم به داخل زمینه) و آلومیناید اکتیویته پایین (رشد به وسیله نفوذ نیکل از زمینه به سطح) جهت تشکیل پوشش و تامین مقاومت اکسیداسیون دما بالای آلیاژهای پایه نیکل برای ده ها سال مورد استفاده قرار می گرفته است. ظاهراً نرخ نفوذ کبالت در سوپر آلیاژ پایه کبالت جهت تشکیل لایه پوشش با ترکیب $CoAl$ در مقایسه با آلومینیوم بسیار کندتر است و در نتیجه رشد پوشش های اکتیویته پایین در مقایسه با اکتیویته بالا روی آلیاژهای کبالت بسیار کند است. به دلیل زمان طولانی مورد نیاز جهت به دست آمدن ضخامت کافی پوشش آلومیناید اکتیویته پایین برای شرایط بهره برداری توربین گاز روی آلیاژهای کبالت، این پوشش ها گران قیمت هستند. هنگامی که پوشش های آلومینایدی نفوذی اکتیویته بالا روی سوپر آلیاژهای پایه کبالت استفاده می شود نیز با مشکلاتی برخورد می شود. در نتیجه انواع گوناگونی از پوشش های نفوذی مخصوص برای آلیاژهای پایه کبالت توسعه داده می شود. ساخت تمام این آلومینایدهای نفوذی به کمک ایجاد لایه ماقبل آلومینایزینگ اصلاح می شوند. این عملیات اساساً چهار نوع است:

- کرومایزینگ به وسیله سمنتاسیون جعبه ای یا به وسیله سمنتاسیون در فاز بخار
- آبکاری الکتریکی رودیم
- پوشش نیکل توسط سمنتاسیون جعبه ای یا توسط آبکاری الکتریکی
- تخلیه عناصر آلیاژی از زمینه به وسیله فرآیند سمنتاسیون

این مساله باید مورد توجه قرار بگیرد که حین پوشش دهی سوپر آلیاژهای پایه نیکل با سمنتاسیون جعبه ای از امکان ورود ترکیبات سولفور به سطح از جعبه حاوی پودر به قطعه کار استفاده می شود و سپس نیکل رسوب کرده و آلومیناید بر روی آن شکل می گیرد و در نتیجه احتمالاً شامل غلظت بالای سولفور است. سولفور تاثیر معکوس بر چسبندگی لایه محافظ آلومینا دارد. در مطالب زیر این موضوعات بحث می شود:

- آزمایش مکانیسم شکست اساسی پوشش های نفوذی استاندارد روی مواد پایه کبالت ریخته گری شده در اتمسفر



- تعیین اینکه آیا عملیات پیش آلومینایزینگ می تواند این شکل شکست را رفع کند.
- تعیین اینکه آیا عملیات پیش آلومینایزینگ مقاومت اکسیداسیون سیکنی پوشش های نفوذی روی آلیاژهای پایه کبالت ریخته گری شده در اتمسفر را بهبود می بخشد.

بررسی علل تخریب مکانیکی نازل های ردیف اول

به دلایل زیر نقش آلیاژهای کبالت در آینده چشمگیر خواهد بود:

- آلیاژهای کبالت مزایای بالایی در کاربردهای نوع خوردگی داغ دارند اگرچه مقاومت اکسیداسیون آنها اسما به خوبی آلیاژهای پایه نیکل نیست.
- سیستم های کبالت دارای خصوصیات پارامتری تنش گسیختگی به دما- زمان بسیار تختی هستند، با این ساختار بسیار پایدار دارای ارزش ویژه ای برای قسمت های ثابت با عمر طولانی اند که اغلب در تنش های پایین و دماهای بالا کار می کنند ولی در اجزای متحرک، آلیاژهای نیکل اصل فرار می گیرند.
- آلیاژهای کبالت دارای تفاوت خواص فیزیکی کمی نسبت به آلیاژهای پایه نیکل اند. آنها کمی رسانایی گرمایی بیشتر و انبساط گرمایی کمتری دارند. برای اجزای بزرگ با عمر طولانی و مقاومت گرمایی- خستگی خوب مناسبند.

رشد ترک ناپایدار

وضعیت تنش در نوک ترک می تواند به وسیله فاکتور شدت تنش k توضیح داده شود:

$$K = \sigma_{app} \sqrt{Q \cdot a}$$

که σ_{app} تنش اعمالی، a طول ترک و Q فاکتور معرف شکل و محل ترک است. وقتی ابعاد یک ترک تحت تنش اعمالی از اندازه بحرانی تجاوز کند رشد ناپایدار ترک آغاز می شود. رابطه بین σ_{app} و اندازه بحرانی ترک a_{crit} ، برای تمام مواد می تواند از روش آنالیز استاندارد تست چقرمگی شکست تعیین می شود. این روش شامل بارگذاری قطعه مورد آزمایش با ترک اولیه در یک نرخ مشخص تا رسیدن به شکست است. بار اعمالی (p)، جابجایی دهانه ترک (COD) و گسترش ترک به صورت پیوسته در خلال آزمایش نشان داده می شود. بروز شکست وقتی که ماده در نوک ترک هنوز رفتار الاستیک دارد اتفاق می افتد و آزمایش یک فاکتور شدت تنش کرنش بحرانی سطح K_{IC} می دهد. در منابع مربوطه توضیحات K_{IC} الاستیک خطی موجود است که می توان Q را برای بیشتر شکل های شکست در موقعیت های مختلف هندسی تعیین کند.

جابگذاری Q و K_{IC} تعیین شده در آزمایشگاه در معادله فوق، رابطه ای بین σ_{app} و a_{crit} را برای ترک نتیجه می دهد. قطعه مورد آزمایش دارای شکست اولیه ساخته شده از سه آلیاژ پایه نیکل ریخته گری شده در دمای اتاق و دماهای 750°C و 850°C طی یک رفتار الاستیک می شکنند. مقادیر بدست آمده K_{IC} با مقادیر دینامیک برای IN738LC در جدول (۱) مقایسه شده است.

جدول ۱: آلیاژهای پایه نیکل ریخته گری شده

ماده	تحلیل	$K_{IC} (MNm^{-3/2})$		
		20°C	750°C	850°C
IN713LC	LEFM	۷۳	۶۶	۶۴
IN738LC	LEFM	۷۴(۷۹)	۵۷	۵۷(۴۶)
IN792	LEFM	۸۸	۷۷	۷۲



خواص مواد و یا محدودیت های هندسی می تواند باعث شود که چنین شکستی بعد از تسلیم اصلی اتفاق بیفتد و رشد آرام ترک بر شکست سریع مقدم شود. در این شرایط COD بحرانی در جایی که رشد آرام ترک شروع شود باید از تست آزمایشگاهی بدست آید. عبارتی که رابطه میان σ_{app} و a_{crit} را توضیح می دهد می تواند به وسیله جایگذاری جابجایی نوک ترک بحرانی δ_c در معادله Bilby تعیین شود:

$$\delta_c = \frac{-8\sigma_y}{\pi E} a_{crit} \ln \sec\left[\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_y}{\sigma_{app}}\right] \quad (2)$$

که σ_y تنش تسلیم و E مدول الاستیسیته است.

رشد آرام ترک در 850°C و 950°C مقدم بر شکست ناپایدار قطعات مورد آزمایش آلیاژ پایه کبالت دارای پیش ترک است. چقرمگی شکست این ماده چنان بود که تخمین های صحیحی از K_{IC} نمی توانست روی قطعه های با ضخامت 25 mm آزمایشگاهی در این دماها تعیین شود. در هر حال COD های بحرانی نقطه بار که برای محاسبه مقادیر δ_c استفاده شده در جدول (2) داده شده است. جایگذاری این مقادیر δ_c در معادله 2 رابطه σ_{app} را با a_{crit} در شکل (3) نشان می دهد. انتشار ناپایدار ترک در آلیاژ FSX-414 نیز در طول مسیر دندریت ها هنگامی که از a_{crit} تجاوز شود، مشاهده می شود.

جدول 2: آلیاژ پایه کبالت ریخته گری

ماده	تحلیل	δ_c (mm)		
		20°C	850°C	950°C
FSX-414	GYMF	0/06	0/09	0/23

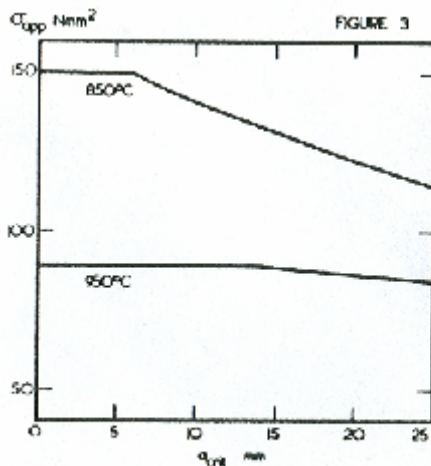


Figure 3. Critical defect sizes in FSX414 at 850°C and 950°C .

شکل 3-3- اندازه های شکست بحرانی FSX-414 در 850°C و 950°C

رشد ترک پایدار

چرخه کار اجزا توربین گاز در بالاترین دماها معمولاً شامل یک تنش متوسط شامل تنش های القایی گرمایی یا گریز از مرکز است که فشار در آغاز کار به بالاترین مقدار رسیده، در طول حالت پایدار در یک مقدار کشش ثابت قرار گرفته و در نهایت هنگام از کاراندازی به کشش ماکزیمم می رسد.

نتیجه گیری و پیشنهاد

استانداردهای فعلی قابل قبول برای اجزای دما بالای توربین گاز به طور وسیعی بر پایه حساسیت تکنیک های تست غیرمخرب موجود بنا شده است. کاربرد روش مکانیک شکست جهت تعیین اهمیت شکست ها در پره روتور ریخته گری شده و آلیاژهای پایه



نیکل داکت نشان می‌دهد که برای سخت‌ترین شکست‌های سطح ضخیم میانی، روش فعلی قابل قبول است. کاربرد روش مشابه ماده پره استاتور پایه کبالت ریخته شده نشان می‌دهد که قبول شکست‌های امن در این اجزاء ممکن است. تست‌ها برای تعیین مشخصات رفتار مکانیکی دما بالای سوپر آلیاژ FSX-۱۴ انجام می‌شود. نتایج تست‌های استاتیک، خزش و خستگی گزارش شدند. یک هدف خاص از این تست‌ها به دست آوردن اطلاعات مناسب از رفتار در شرایط تغییر دماست و لذا تست‌های Bithermal ارائه شد. نتایج تست‌های خستگی در شرایط مختلف گزارش و توضیح داده شد. در مورد عمر خستگی، نمودار Manson-Coffin نشان می‌دهد که خطوط موازی متناظر شرایط تستی مختلف است. بر پایه مشاهدات متالوگرافیک که یک ریخت مشابه از سطح ترک را نشان می‌دهد، نتایج تست‌های Bithermal IP و OP ممکن است به LCF به ترتیب در ۴۵۰ و ۹۵۰°C وابسته باشد. در هر دو مورد یک کاهش عمر چشمگیر برای تست‌های BT مشاهده شده است. این نشان می‌دهد که چگونگی تست‌های LCF جهت تعیین خصوصیات مواد برای استحکام خستگی در دماهای بالا نامناسب است. هنوز تحقیقات بیشتری جهت به دست آوردن دانش بیشتری از رفتار ترمومکانیکی مواد مورد نیاز است و نیاز به توسعه مدل پیش‌بینی عمر که بتواند سازگاری مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی فراهم کند احساس می‌شود.

مراجع:

- ۱- Sims, Chester., Superalloys, ۱۹۹۰, General Electric Company
- ۲- Schilke, P.W; et all., Land-based gas turbines
- ۳- Coutsouradis, D., et all., Cobalt-based Superalloys for application in gas turbines, ۱۹۸۷
- ۴- Brunetad ,R., et all., Proc.Symp. on high temperature alloys for gas turbines, ۱۹۸۲
- ۵- Bernstein.H.L., et all., Analysis of General Electric Model ۷۰۰۱ First Stage Nozzle Cracking, ۱۹۹۴
- ۶- Holdsworth.S.R., The Significance of defects in gas turbines alloys., United Kingdom
- ۷- Bicego,V., et all Proc conf of Materials aging and component life extension; Vol.۱۱, Milan; Italy; PP.۱۰۸۵-۱۰۹۴, oct ۱۹۹۵
- ۸- Woodford .D.A., et all, Materials Science & Engineering, Elsevier Sequoia S.A., Lausanne., ۱۹۷۴



طراحی هیدرولیکی و بررسی ضربه قوچ سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا و مقایسه آن با استاندارد

AWWA-۴۵

سیدمجید یادآور نیکروش^۱، سجاد رنجبران^۲، حسام پیروزمند^۳

چکیده

با توجه به نقش پر اهمیت کندانسور در یک سیکل نیروگاهی، استفاده از یک سیال خنک کن به منظور جذب حرارت نهفته در بخار خروجی از اگزوز توربین و انتقال آن به محیط الزامی است. جهت اینکار عموماً از سیال آب به عنوان خنک کننده استفاده شده است. این عامل، طراحان را در امر تعیین محل نصب نیروگاه با محدودیت مواجه ساخته است بدین معنی که آنها را مقید می کند تا نیروگاه را در محلی که منابع آب قابل دسترس وجود دارد نصب نمایند. یکی از انواع سیستمهای خنک کن استفاده شده در نیروگاهها، سیستم خنک کن یک بار گذر می باشد که انرژی غیر قابل دسترس بخار خروجی از توربین بطور مستقیم به آب خنک کن هدایت می کند. که برای دریافت این گرما از آب رودخانه، رود، دریا و یا دریاچه مصنوعی استفاده می شود. در سیستم سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا از این سیستم استفاده شده است. این سیستم ابتدا بر اساس استاندارد AWWA-۴۵ و به کمک نرم افزار FLUID FLOW طراحی شده و سپس امکان مهار ضربه قوچ بر اساس همین استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نتایج بدست آمده داریم انتخاب پمپ در قسمت طراحی می تواند هد مورد نیاز را در بارهای مختلف نیروگاه تامین کند. و سیستم طراحی شده با توجه به استفاده از لوله های FRP در مقابل ضربه قوچ ایمن می باشد زیرا معیارهای استاندارد مذکور را تامین می کند.

بخش اول - طراحی سیستم آب خنک کن

طراحی این سیستم بر طبق یک سری مسائل هیدرولیکی، اقتصادی، اجرایی و مهندسی سازه مورد نیاز سیستم، پایه ریزی می شود. پارامترهای کلیدی برای این طرح در موارد زیر خلاصه بندی شده است:

- ۱- هد پمپ
- ۲- سرعت آب داخل زانویی لوله ها
- ۳- تغییرات سطح فشار آب توسط پمپ
- ۴- بزرگی و اندازه غربال ها
- ۵- اثر کیفیت و چگونگی آب
- ۶- نرخ تغییرات فشار سیستم
- ۷- دمای محیط

طراحی این پروسه با مطالعات خارجی و اطلاعات جمع آوری شده برای رسیدن به پارامترهای کلیدی آغاز می شود

استاندارد AWWA M-۴۵

^۱ - استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

^۲ - دانشجو کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ - فارغ التحصیل رشته مکانیک دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)



یکی از جامع ترین استانداردهای تعریف شده برای لوله های می باشد. این استاندارد جهت خطوط انتقال آب تحت فشار دارای مشخصات کامل برای لوله و اتصالات می باشد که بر اساس آزمایشهای کنترل کمیت و تعیین صلاحیت طبق الگوی مناسب طراحی شده است. لوله های استفاده شده در سیستم خنک کن نیروگاه مطابق با این استاندارد طراحی شده اند. اخیراً راهنمای طراحی لوله های تحت استاندارد AWWA C950 را با نام M-۴۵ تدوین نموده که چندین بخش آن به طراحی لوله های جهت کاربردهای نصب مدفون و روی کار اختصاص یافته است.

رفتار هیدرولیکی لوله های FRP بر اساس استاندارد AWWA M-۴۵ اساس شامل موارد ذیل می باشد:

- سطح داخلی صاف موجب مقاومت هیدرولیکی کم می شود و این خود باعث می شود قدرت مورد نیاز پمپ کمتر باشد و این خصوصیت باعث صرفه جویی در هزینه ها می شود.
- سطح داخلی این لوله ها در اثر گذشت زمان تغییر نمی کند و همانطور صاف می ماند.
- سطح داخلی صاف موجب استفاده از لوله ای با قطر کمتر می شود. قطر داخلی از قطر استاندارد دیگر لوله با جنسهای دیگر در همان سایز نامی بزرگتر است.

انتخاب سایز لوله

اولین قدم در طراحی سیستم لوله کشی تعیین سایز لوله مورد استفاده است. بعد از اینکه سرعت سیال و افت فشار مشخص شد، انتخاب پمپ برای ایجاد دبی مناسب در فشار مورد نیاز آسان است. معادلات بعدی برای انتخاب سایز لوله است.

$$v = 48 / \rho^{0.33}$$

ماکزیمم سرعت برای آب

v سرعت سیال بر حسب فوت بر ثانیه

ρ دانسیته سیال بر حسب پوند بر فوت مکعب که برابر ۶۲/۴ پوند بر فوت مکعب می باشد این فرمول برای مواد

$$v = 24 / \rho^{0.33}$$

خورنده و ساینده بصورت مقابل می باشد.

حداقل قطر لوله برای آب

$$d = 0.73 [(Q)/(SG)]^{0.5} / \rho^{0.33}$$

d قطر داخلی لوله بر حسب اینچ

Q دبی بر حسب گالن بر دقیقه و

SG دانسیته نسبی

برای مواد خورنده و ساینده به صورت

$$d = 1.03 [(Q)/(SG)]^{0.5} / \rho^{0.33}$$

معادلات بخش قبل مربوط به تعیین بیشترین سرعت و کمترین قطر برای آب و سیالات ساینده و خورنده بود قطر برای لوله های فایبر گلاس تحت فشار و تست مکش از روابط زیر استفاده می شود.

$$d = 0.321 [(Q)/(SG)^2]^{0.434}$$

قطر برای لوله های تحت فشار:

$$d = 0.434 [(Q)/(SG)^2]^{0.434}$$

قطر برای لوله های مکش:



$$v = 0.409(Q/d^2)$$

رابطه تبدیل دبی به سرعت:

محاسبه افت فشار در لوله های FRP بر اساس استاندارد

افت هد و افت فشار در کلیه لوله ها به دلیل تغییر ارتفاع، گردها به دلیل تغییر ناگهانی جهت و اصطکاک در لوله و اتصالات است. چند مورد حل می تواند برای تعیین افت هد در لوله های فایبر گلاس استفاده شود. بیشتر روشهای معمول معادلات هیزن-ویلیامز و مانینگ و دارسی- وایسباخ است مورد استفاده هر کدام از این معادلات بستگی به نوع جریان (ثقلی یا استفاده از پمپ) و دقت مورد نیاز است

سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا

سیستم خنک کن اصلی یک سیستم باز است که آب دریا را توسط یک سازه ورودی می گیرد. سپس آب دریا به کندانسور پمپ می شود و از آنجا به محفظه موج گیر تخلیه می شود. این سیستم شامل تجهیزات زیادی و همچنین سیستمهای فرعی است که در زیر به آنها اشاره شده است:

(۱) ایستگاه پمپاژ

(۲) سیستم تصفیه مکانیکی آب شامل:

۱-۲- سیستم سد کننده

۲-۲- سیستم غربال میله ای و آشغالگیر

۲-۳- غربال گردان

۲-۴ سیستم شستشو و دفع مواد زائد

(۳) دو پمپ عمودی

(۴) کندانسور

(۵) سیستم تخلیه هوا از واترباکس شامل: پمپ تخلیه و دیگر ملزومات

(۶) سیستم تمیز کننده لوله های کندانسور شامل پخش کننده و صافی توپها

(۷) سیستم کلر زنی

(۸) سیستم دبریس

(۹) شیر خلا هوا

(۱۰) محفظه موج گیر

(۱۱) لوله ها اتصالات، شیرهای هیدرولیکی و موتوری و ردیوسر و دیگر لزومات

خط لوله تخلیه دو پمپ اصلی پس از رسیدن به هم در هدر بصورت مدفون با قطر ۲۲۰۰ میلی متر ادامه پیدا می کند. سپس دوشاخه با قطر ۱۶۰۰ میلی متر از خط اصلی جدا شده وارد نازل های کندانسور می شوند. سپس لوله هایی با همین قطر از آن خارج شده به هم متصل می شوند با قطر ۲۰۰۰ میلی متر به داخل محفظه موج گیر می ریزند. اتصالات انعطاف پذیر برای جلوگیری از بارهای ناشی از انبساط حرارتی باید در نظر گرفته شود. قطعات بتنی برای قسمتهایی از لوله که از زیر جاده یا لوله های دیگر عبور می کند لازم است

در حالت بهره برداری عادی دو پمپ بصورت موازی آب دریا را به هدر تخلیه می کنند. امکان کار فقط یک پمپ نیز وجود دارد. دو پمپ بصورت عمومی ۵۰ درصد هستند. آب دریا توسط این پمپها لوله با قطر نامی ۲۲۰۰ میلی متر ریخته می شود. این لوله سپس به دو شاخه برای تخلیه در کندانسور تقسیم می شود. برای جلوگیری از کاویتاسیون پمپها، در ارتفاع مناسبی برای تامین



NPSH لازم نصب می شوند. رفتار هد تولیدی پمپ بصورتی است که با کاهش آن دبی افزایش می یابد. در نتیجه در زمان قطع سیستم بیشترین هد را دارد. تمام قسمت‌های گردان بصورت استاتیکی و دینامیکی برای جلوگیری از ارتعاش بالانس شده اند

شرایط طراحی مکانیکی

طراحی بر حسب فشار

فشار طراحی معیاری برای انتخاب تجهیزات و سائز لوله ها می باشد. فشار طراحی که تجهیزات تحت فشار داخلی و خارجی کار می کنند بصورت زیر بکار برده شده است. طراحی براساس ASME SEC VIII.DIV L می باشد فشار طراحی ۳۰ psi معمولا بیشتر از فشار کارکرد که ۱۰ درصد بزرگتر از فشار کارکردن پیشنهاد می شود تجهیزاتی که تحت فشار زیر اتمسفر هستند. برای شرایط کاملا خلا طراحی شده اند. لوله های روی سطح زمین برای خلا کامل طراحی شده اند.

- **دمای طراحی:** دمای طراحی برای آب دریا ۳۰ سانتیگراد، دمای طراحی محیط ۲۳ سانتیگراد دمای طراحی تجهیزات الکتریکی ۴۰ سانتیگراد می باشد.

بیشترین سرعت در لوله ها

بیشترین سرعت در لوله ها مدفون براساس استاندارد AWWA M۴۵ نباید از ۳/۷ متربر ثانیه تجاوز کند.

مسائل هیدرولیکی

مقدار آب عبوری از سیستم به هد، قطر، طول لوله، شرایط داخلی لوله، تعداد خم ها، زانوییها شاخه ها و شیرها و دیگر تجهیزات بستگی دارد. هد کل از جمع هد سرعت، افت هد در ورودی افت هد اصطکاکی خمها و شیرها و دیگر تجهیزات بدست می آید. افت کندانسور، دبریس فیلتر، سیستم تصفیه مکانیکی و محفظه موج گیر نیز در نظر گرفته شده است.

دبی در سیستم خنک کن

دبی نامی طراحی درحالت کارکرد عادی دوپمپ موازی ۳۸۰۰۰ متر مکعب بر ساعت برای کندانسور اصلی ۴۰۵ متر مکعب بر ساعت برای سیستم خنک کن کمکی نیروگاه، سیستم بک واش دبریس فیلتر ۲/۵ تا ۴ درصد از کل دبی، سیستم بک واش سیستم تصفیه مکانیکی ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت. دبی نامی طراحی درحالت کارکرد یک پمپ: ۱۹۰۰۰ متر مکعب بر ساعت برای کندانسور اصلی و ۴۰۵ متر مکعب بر ساعت برای سیستم خنک کن کمکی نیروگاه و سیستم بک واش دبریس فیلتر ۲/۵ تا ۴ درصد کل. دبی سیستم بک واش تصفیه مکانیکی ۵۴ متر مکعب بر ساعت.

اطلاعات در مورد سیستم خنک کن اصلی

آب دریا در خنک کاری کندانسور نیروگاه سیکل ترکیبی نکا استفاده می شود. دوپمپ ۵۰ درصد موازی برای تامین دبی ۳۸۰۰۰ متر مکعب بر ساعت استفاده می شود. این پمپها آب دریا را از ارتفاع ۹۵/۶ متری به نازل های کندانسور در ارتفاع ۱۱۰/۱۹۶ و ۱۰۶/۹۵۱ متری پمپ می کند.

خط تخلیه پمپ ها پس از عبور از شیر موتوری پروانه ای به یک هدر رسیده از آنجا با لوله ای به قطر ۲/۲ متری پس از طی تقریبا ۳۱۰ متر به ۲ شاخه تقسیم شده و وارد کندانسور می شود. در ورودی و خروجی کندانسور اتصالات انعطاف پذیر و شیر پروانه ای استفاده شده است. بر سر راه هر خط ورودی به کندانسور یک دبریس فیلتر برای برداشتن هرگونه آشغال نصب شده است. آب دریا با دمایی برابر ۳۸ سانتیگراد وارد کندانسور شده است. خروجی دو کندانسور پس از رسیدن به هم توسط لوله ای به قطر ۲ متر و عبور از ۱۲۶ متر لوله به محفظه موج گیر می رسد. به دلیل بزرگ بودن قطر لوله ها از ماینها بجای خمها استفاده شده است.

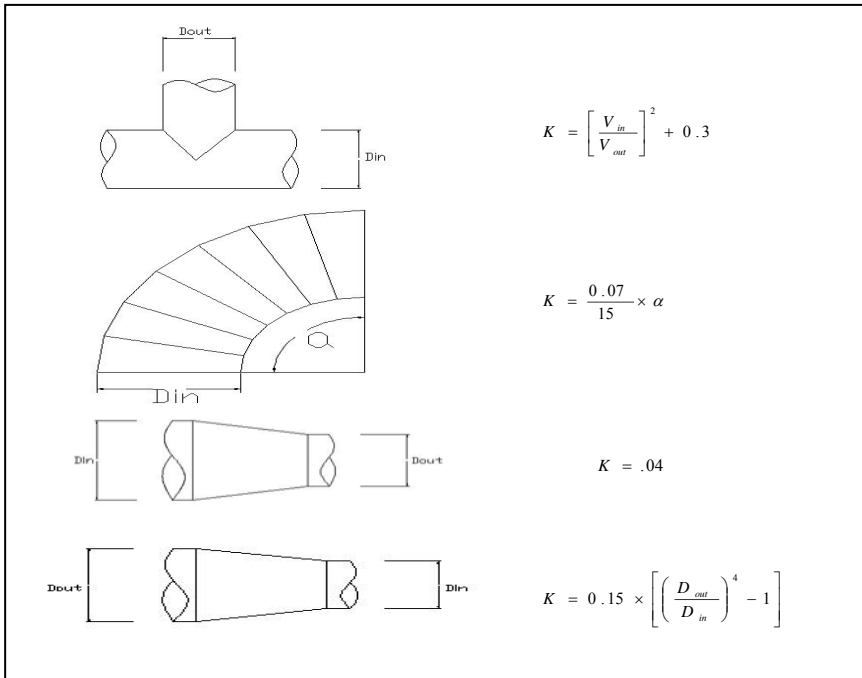
ارتفاعهای قسمت‌های مختلف:

ارتفاع نازل پایینی کندانسور: ۱۰۶/۹۵۱ متر ارتفاع سطح آب دریا: ۹۵/۶ متر



ارتفاع نازل بالایی کندوانسور: ۱۱۰/۱۹۶ متر ارتفاع محور لوله خط اصلی مدفون: ۱۰۰/۲ متر
ارتفاع سطح آب محفظه موج گیر: ۱۰۳ متر

افتها:



شکل اتصالات

بکار رفته

و فرمول محاسبه

افت آنها

افتها با توجه به شکل بالا و فرمول های مربوطه محاسبه شده اند:

ردیوسر از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ میلی متر: $K = .22$

افت دبیریس فیلتر: یک متر آب

ماتیر ۶۰ درجه: $K = .28$ ماتیر ۹۰ درجه $K = .42$

ماتیر ۳۰ درجه

ماتیر ۴۵ درجه: $K = .21$ $K = .14$

افت هد سیستم تصفیه مکانیکی: یک متر آب

ماتیر ۱۵ درجه: $K = .14$

افت ارتفاع سیستم تمیز کاری لوله های کندانسور توسط توپها: ۵/ متر آب

روش محاسبات

برای مدل کردن و محاسبات هیدرولیکی سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا از نرم افزار PIPING SYSTEM FLUID FLOW استفاده شده است. این نرم افزار قادر به مدل کردن سیستم های هیدرولیکی قبل از اجرا و نصب می باشد. در این صورت مشکلات بالقوه سیستم را نیز اصلاح کرد. برای آنالیز این سیستم از معادلات داری استفاده شده است با فرضیات دیگر: برای تنظیم دبی در هر خط یک ارفیس قبل از شیرهای پروانه قرار داده شده است. وقتی یک پمپ کار کند ارفیس مانع از ایجاد کاویتاسیون می شود. برای محاسبه سیستم بک و ایش و سیستم خنک کن کمکی نیروگاه دبی لازم در محاسبات لحاظ شده است. در این نرم افزار برای مدل کردن اتصالات T شکل فقط از k_f استفاده می شود. در نتیجه برای مدل کردن اتصالات T به صورت دقیق یک K برای هر ورودی (قسمت مستقیم و قسمت قائم شاخه) و هر k نیز توسط فرمولهای مربوطه محاسبه می گردد.



نتایج

در حالت بهره برداری عادی از سیستم مجموع کل افت هدها در حدود ۲۶/۴ متر می باشد. در این شرایط دبی در حدود ۳۸۵۵۶ متر مکعب بر ساعت می باشد. برای تنظیم دبی ورودی به کندانسور شیرهای پروانه ای موتوری از ۲ تا ۵ درصد باید بسته باشند. در حالت تک پمپ دبی برابر ۲۲۹۲۸ متر مکعب بر ساعت می باشد که این در حدود ۶۰/۳۳ درصد دبی عادی سیستم می باشد.

بخش دوم - فشارهای گذرا، ضربه قوچ

شوک های داخلی که شناخته شده ترین آنها ضربه قوچ است در اثر تغییر ناگهانی در سرعت سیال درون سیستم ایجاد میشود. در شرایط خاصی این نیروی ضربه می تواند آنقدر زیاد باشد که سیستم را متلاشی کند. فشار گذرا با سرعت موج در سیستم حرکت میکند و قادر است با توجه به منبع و جهت حرکت موج باعث افزایش یا کاهش فشار گردد. بستن سریع شیر بخاطر تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل می تواند ایجاد موج فشاری کند. این موج در سیستم حرکت می کند و می تواند در محلی بسیار دورتر از منبع آن ایجاد خطر کند. اندازه ضربه قوچ بستگی به خصوصیات و سرعت سیال، مدول الاستیسیته لوله، ضخامت لوله و شدت تغییر ممتد سیال دارد. مدول الاستیسیته کم در لوله های فایبر گلاس باعث توانایی بالای دفع نیروی موج و کاهش تاثیر موج در سیستم می شود. شدت موج فشاری در لوله های فلزی بخاطر بالابودن مدول الاستیسیته آنها بیشتر است. بدین ترتیب شدت ضربه قوچ در لوله های FRP حدودا نصف شدت آن در شرایط مشابه در لوله های کربن استیل یا چدنی می باشد. این لوله های در هر رده فشاری قادر به تحمل ضربه قوچ تا ۰.۴٪ بیش از فشار اسمی خود می باشند. برای مثال لوله با فشار کاری ۱۰ بار تا فشار ۱۴ بار در برابر ضربه قوچ مقاوم است.

عوامل ایجاد ضربه قوچ :

- موجهای فشاری در یک سیستم پمپاژ، به علت باز و بسته شدن سریع شیرها، راه اندازی و خاموش کردن پمپ ها و یا تغییر سرعت دورانی آنها بطور ناگهانی، بوجود می آید. علاوه بر این عوامل، مسائل اتفاقی و غیرمعمول نیز باعث بروز پدیده ضربت قوچ خواهد شد. اهم این مسائل عبارتند از:
- از کار افتادن موتور به علت قطع برق.
- عملکرد نادرست شیرهای یکطرفه، شیرهای کنترل و حفاظتی سیستم در اثر قطع ولتاژ کنترل، از کار افتادن موتور الکتریکی شیرها و یا اشکالات نظیر آن.
- قفل شدن یا تاقانهای پمپ، با هر اشکالی در محور که منجر به از کار افتادن پمپ شود.
- مسدود شدن جریان بطور ناگهانی در داخل پمپ به علت وجود یک جسم خارجی.
- حرکات لرزشی و نامنظم صفحه یا قسمتهای متحرک شیرها.
- از بین رفتن پروانه پمپ در اثر کاویتاسیون با مسائل نظیر آن و در نتیجه عدم کار پمپ (در صورت وقوع ناگهانی).
- عدم دقت در پرکردن خطوط خالی، به هنگام پر کردن خطوط لوله در ابتدای راه اندازی.
- عدم طراحی صحیح سیستم لوله کشی

عوامل موثر در شدت ضربت قوچ

سیستم های پمپاژ با فشار کم و زیاد، پروفیل خط لوله رانش، قطر لوله، تعداد پمپ ها

اقدامات حفاظتی

برای جلوگیری از بوجود آمدن تغییرات شدید در فشار، به هنگام بروز ضربه قوچ آب می توان اقدامات زیر را انجام داد:



طراحی لوله رانش براساس سرعتهای کم، افزایش ممان اینرسی پمپ، استفاده از لوله کنارگذر، نصب مخازن سرج، نصب مخزن هوا، نصب شیرهای کنترل فشار، استفاده از شیرهای یکطرفه، نصب شیر خلا.

محاسبات ضربه قوچ

معادله تالبوت برای محاسبه ضربه قوچ بصورت زیر بکار می رود

$$P_s = (a/g)(SG/2.3)(\Delta v)$$

$$a = 12 / [(\rho/g)(1/k + d/E(t))]^{0.5}$$

P_s فشار ناشی از ضربه قوچ بر حسب psi

a سرعت موج بر حسب فوت بر ثانیه

K مدول حجمی تراکم پذیری مایع بر حسب psi که برای آب برابر 4.0×10^6 psi می باشد

E مدول الاستیسیته لوله بر حسب psi

کلاس فشار P_C باید بزرگتر یا مساوی جمع فشار کاری و فشار ناشی از ضربه قوچ باشد تقسیم بر $1/4$ باشد بیشتر هندبوکهای هیدرولیک و مکانیک سیالات از معادله تالبوت برای محاسبه ضربه قوچ به دلیل بسته شدن یک شیر استفاده می کنند البته برنامه های پیشرفته و مدرن کامپیوتری برای محاسبه ضربه قوچ در شرایط پیچیده مانند لوله های چند شاخه و شرایط مختلف وجود دارند

$$P_C \geq (P_w + P_s)/1.4$$

نتایج

بر اساس کلاس فشاری لوله های FRP استفاده شده در خط لوله سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا و مدول الاستیسیته لوله ها معادله بالا برای این سیستم ارضا شده است. البته در طراحی برای بالا بردن ضریب اطمینان از شیر خلا استفاده شده است. شیر خلا داری شناوری است که در اثر وزن خود در هنگام خالی بودن لوله از آب و با ایجاد فشار منفی، پایین می آید. در اثر پر شدن لوله از آب، شناور به طرف بالا حرکت کرده و روزنه شیر بسته می شود. اگر فشار درون لوله در اثر ضربه قوچ و یا در هنگام تخلیه لوله از آب منفی شود، شناور پایین آمده و هوا وارد لوله می شود.

منابع و مراجع

۱- مپنا مدارک نیروگاه سیکل ترکیبی نکا ۱۳۸۴

۲- دکتر بیرامی "سیستمهای انتقال آب" دانشگاه صنعتی اصفهان ۱۳۸۰

۳- Standard AWWA - ۴۵ ۱۹۹۸

۴- David R. Sherwood "The piping guide" ۲۰۰۱

۵- Mohinder L. Nayyar "Piping handbook" ۲۰۰۲

۶- McGraw-Hill - Piping Handbook vE- Mohindar L. Nayyar, P.E.

The fifth edition of this Handbook was edited by Reno C. King, B.M.E., M.M.E., D.Sc., P.E.

۷- Process plant layout and piping design - By Roger Hunt, Ed Bausbacher

۸- ASME B31, ۱- ۲۰۰۴ - ASME Code For Pressure Piping, B31

۹- Applied Process Design - Ernest E. Ludwig - Gulf Professional Publishing



مدلسازی و تحلیل تنش لوله های ورودی اصلی سیستم خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا

سیدمجید یادآور نیکروش¹، سجاد رنجبران²، حسام پیروزمند³

چکیده

همواره مساله تنش و نیروهای موجود در سیستم های لوله کشی بسیار حساس بوده تا آنجا که در برخی موارد عدم توجه به این موضوع باعث خسارت های سنگین شده است. در این مقاله لوله های ورودی به کندانسور سیستم خنک کن نیروگاه مورد بررسی قرار میگیرند و با کمک نرم افزار CAESAR ۴.۵ این خطوط مدلسازی می شوند و آنالیز تنش روی آنها انجام می گیرد. همچنین با توجه به اهمیت تجهیزات نیروهای وارده به آنها نیز بررسی می شوند و در پایان پس از انجام سعی و خطا و ایجاد تغییرات در مدل نتایج ارائه می شود.

مقدمه

تاثیر تنش های بالا بر سیستمهای لوله کشی بسیار مخرب است. نمونه ای از مشکلات که ناشی از تنش حاصله از وزن و انبساط حرارتی است بشرح زیر است:

- ایجاد فرسودگی در یاتاقان پمپ ها
- ایجاد ترک و پیشرفت آن در محل تقاطع نازل و Vessel
- نشست سیال از فلنج ها
- تغییر شکل دائمی لوله ها

نخستین هدف آنالیز تنش آنست که تنش ها در حد مجاز نگه داشته شوند. این تنش های مجاز از سازنده های المان های سیستم لوله کشی گرفته می شود و در صورتی که موجود نباشد باید از استانداردهای طراحی استفاده نمود. این مقادیر مجاز با توجه به نوع تجهیزات مرتبط، دما، فشار، نوع بارگذاری و موارد دیگر برای یک جنس خاص و اندازه مشخص تغییر می کند. یکی دیگر از اهداف آنالیز تنش حصول اطمینان از ایمنی و مقاومت یک طرح در شرایط بهره برداری مختلف مانند راه اندازی، از مدار خارج کردن، ضربات هیدرولیکی، عملکرد شیرهای اطمینان و ... می باشد. جلوگیری کردن از نشستی در سیستم مخصوصا در فلنج ها و جلوگیری از ایجاد کرنش های اضافی در محل اتصال لوله به تجهیزات مانند مخازن تحت فشار از اهداف دیگر آنالیز تنش می باشد. در سیستم های لوله کشی نیروگاهی استاندارد معمول ASME B31.1 می باشد.

۱ - استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳ - فارغ التحصیل رشته مکانیک دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

مراحل انجام آنالیز تنش



باید توجه داشت در آنالیز تنش صرفاً کار بر روی تنش‌ها متمرکز نمی‌باشد و باید مواردی مانند نیروهای وارده به تجهیزات و تغییر شکل قسمت‌های مختلف سیستم لوله کشی نیز مدنظر قرار گیرد.

- تهیه لیست خطوط بحرانی

لیست خطوط بحرانی لیستی است که مهندس تنش در آن لیست، خطوطی را که باید برای آنها آنالیز رسمی انجام شود مشخص می‌کند. تهیه لیست خطوط بحرانی توسط مهندس تنش و تجربیات او انجام می‌شود.

- تهیه نقشه ایزومتریک اولیه

این مرحله به عنوان پایه محاسبات تنش می‌باشد.

- آنالیز و ایجاد تغییر در مدل

در این مرحله با کمک نرم افزارهایی همچون CAESAR یا AUTO PIPE مدل سیستم پیاده می‌شود و آنالیز انجام می‌شود. ساپورت گذاری و ایجاد تغییر در مدل و نیز استفاده از اتصالات انبساطی ابزاری برای کاهش تنش می‌باشد. ساپورت گذاری باید مطابق با نقشه STRUCTURE باشد.

- تهیه مدل سه بعدی نهائی و نقشه ایزومتریک نهائی

در این مرحله از نرم افزارهایی همچون PDMS استفاده می‌شود.

بارهای وارد بر سیستم های لوله کشی

بارهای ثابت *Sustained load* وزن - فشار

بارهای *occasional* - بارهای ناشی از ارتعاشات *VIBRATION* - بارهای انبساطی

Expansion Load

ترکیب بارگذاری ها

بارهای عملکردی طبیعی، وزن مرده (*dead weight*) به علاوه بارهای حرارتی هستند. این بارها ممکن است با بارهای *occasional* ترکیب شوند که باید در معیار طراحی لحاظ شود.

کد ASME B.31.1 خطوط نیروگاهی POWER PIPING

این کد حداقل الزامات را برای طراحی، مواد، ساخت، مونتاژ، نصب و راه اندازی، تست و بازرسی سیستم‌های نیروگاهی و سرویس های متفرقه در ایستگاههای تولید برق، واحدهای صنعتی، واحدهای حرارتی مرکزی یا ناحیه ای فراهم آورده است. سرویس های *piping* نیروگاهی میتواند شامل سرویس های مواد گاز، روغن، آب و بخار باشد. الزامات طراحی ذکر شده در این کد شامل لوله، فلنج ها، واشرها و وسایل و قطعات تحت فشار و یا اقلام دیگر *piping* می باشد. همچنین قبود و تجهیزات دیگر لازم جهت جلوگیری از تنش های غیرمجاز در اجزای تحت فشار را در بر می گیرد.

بارگذاری هایی که در B31.1 باید در نظر گرفته شوند عبارتند از فشار، وزن (بارهای زنده *live* و مرده *dead* و تحت آزمایش). ضربه (برای مثال ضربه قوچ)، باد، زمین لرزه (در صورت وجود)، ارتعاشات و بارهایی که از انبساط و انقباض حرارتی به وجود می آیند. در این کد معمولاً فرض شده که بار ناشی از باد و زمین لرزه به طور همزمان به سیستم وارد نمی شوند.

- تنش های ناشی از بارگذاری پایدار

اثرات وزن، فشار و دیگر بارهای مکانیکی باید

$$S_L = \frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h$$

معادله زیر را ارضا کنند:



P فشار داخلی (نسبی)

D_o قطر خارجی لوله بر حسب in

t ضخامت اسمی دیواره لوله بر حسب in

M_A گشتاور خمشی معادل در مقطع عرضی ناشی از وزن و بارهای پایدار دیگر in_lb

Z مدول مقطع لوله in^3

i ضریب تشدید تنش (حاصلضرب $0.75i$ ، هیچگاه کوچکتر از یک در نظر گرفته نمی شود).

S_h تنش مجاز ماده در حداکثر دما از جداول تنشهای مجاز

– تنش های ناشی از بارگذاری Occasional

اثرات فشار وزن دیگر بارهای پایدار و بارهای Occasional همچون زمین لرزه باید رابطه زیر رارضا کنند:

$$\frac{P D_o}{4t} + \frac{0.75i(M_A + M_B)}{Z} \leq k S_h$$

k برابر 1.15 برای بارهای Occasional که

در کمتر از 10 درصد پیروود کاری اعمال می شوند.

K برابر 1.2 برای بارهای که در کمتر از 1 درصد پیروودکاری اعمال می شوند.

M_B : ممان خمشی معادل در سطح مقطع، ناشی از بارهای Occasional، اگر زمین لرزه باید در نظر گرفته شود، تنها نصف

گشتاور ناشی از لرزش زمین لرزه باید استفاده شود. in_lb

– دامنه تنش ناشی از بارهای انبساطی

اثرات تنش های ناشی از انبساط حرارتی باید معادله

را ارضاء کند

$$\frac{i M_C}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L)$$

M_C دامنه گشتاور خمشی معادل ناشی از انبساط حرارتی in_lb

S_A دامنه تنش مجاز برای تنش های ناشی از انبساط حرارتی = $f(1.25S_C + 0.25S_h)$

S_C تنش مجاز ماده در حداقل دما (سرد) از جداول تنش مجاز مواد Kpa

f ضریب کاهش دامنه تنش برای شرایط سیکلی طی حالت های کاری که از جدول زیر بدست

می آید :



Number of Equivalent Full Temperature Cycles, N	f
7,000 and less	1.0
7,000–14,000	0.9
14,000–22,000	0.8
22,000–45,000	0.7
45,000–100,000	0.6
100,000 and over	0.5

طبق این کد لازم است سیستم در حداکثر دمای ممکن فلز طراحی شود در کد B31.1 آمده که دمای طراحی همان دمای سیال فرض می شود، مگر اینکه محاسبات دیگری برای تعیین دمای لوله انجام شود. البته تحت هیچ شرایطی دمای طراحی کمتر از متوسط دمای سیال و دمای دیواره خارجی لوله در نظر گرفته نمی شود

مدلسازی و آنالیز تنش لوله های ورودی به کندانسور خطوط خنک کن نیروگاه سیکل ترکیبی نکا

خطوط مورد بررسی از جنس فایبر گلاس تقویت شده می باشد (FRP) که توسط شرکت فراسان تولید شده است. با توجه به شرایط خاص لوله های Composite که ساختار آنها بصورت لایه لایه است، بهمین دلیل می بایست مشخصات لوله همچون چگالی، مقادیر تنش های مجاز و مواردی از این قبیل را از شرکت سازنده دریافت نمود. این موارد به شرح زیر است:

چگالی لوله: $1.66 \text{ kg/(cm}^3\text{)}$ مدول الاستیسیته محوری: $22.63 \text{ N/(mm}^2\text{)}$

ضریب انبساط حرارتی: $(1/K) 216$ تنش محوری مجاز برای لوله 26.4 MPa

تنش خمشی مجاز برای لوله 3.0 Mpa تنش برشی برای لوله (پیچشی) 7.8 Mpa

تنش محوری مجاز برای اتصالات 23.0 Mpa تنش خمشی مجاز برای اتصالات 23.0 Mpa

تنش برشی مجاز برای اتصالات (پیچشی) 5.7 Mpa Hoop Stress: 62.0 MPa

پس از بدست آمدن شرایط لوله، از آنجائی که بخش اعظم لوله ها در این پروژه زیر خاک است نوبت به بدست آوردن شرایط خاک می رسد. از این گزارشات از بخش مهندسی عمران گرفته می شود که بشرح زیر است:

چگالی خاک: $1.6 \text{ kg/(dm}^3\text{)}$ تغییرات دمائی: زاویه اصطکاک: مقاومت برشی خاک: 0.2

عمق های مختلف لوله ها نسبت به سطح خاک:

$0.6m, 1.1m, 1.5m, 2.0m$

باتوجه به شرایط ذکر شده، برای این پروژه باید پنج گونه خاک مدلسازی کرد.

شرایط دیگر طرح که نقش اساسی دارند بشرح زیر است:

دمای طراحی: 31°C برای لوله های ورودی به کندانسور

فشار طراحی (ماکزیمم فشار عملکردی سیستم): 2.45 bar

قطر داخلی لوله ها: $140.0 \text{ mm}, 160.0 \text{ mm}, 200.0 \text{ mm}, 220.0 \text{ mm}$

مدلسازی

با کمک نقشه PFD و PIPING PLAN مدل اولیه با کمک نرم افزار CAESAR تولید شده و بخش اول آنالیز انجام می شود. پس از سعی و خطا و ایجاد تغییر در مکان اتصالات انبساطی با توجه به نقشه STEEL STRUCTURE ساپورت گذاری ابتدائی برای تحمل وزن سیستم انجام می شود. باید توجه داشت در این مورد به علت ساختار قسمتهای دیگر محدودیت فضا وجود دارد و تنها ROUTE قابل اجرا نقشه از پیش طراحی شده است و بنابراین نمیتوان مدل را برای کاهش تنش تغییر داد و تنها ابزار در دسترس ساپورت ها و اتصالات انبساطی می باشد. با توجه به وزن بالا و دمای بالا در سیستم از ساپورت های Roller و Expansion Joint فلزی از نوع Tied استفاده میشود



نقاط ورود و خروج سیستم به خاک و نقاط تغییر مسیر سیستم نقاط بحرانی سیستم می باشند و باید به تنشهای این نقاط توجه مخصوص داشت

انبساط حرارتی کندانسور هم بعنوان یک جابجائی تحمیل شده برسیستم وجود دارد که بشرح زیر است :

No	Nozzle No.	X-disp.(mm)	Y-disp(mm)	Z-disp(mm)
1,۰	X۳	1,۳	۶,۷	۵,۷
۲,۰	X۴	1,۳	۳,۲	۵,۷

دو نقطه ابتدا و انتها یعنی پمپ و کندانسور نقاط ثابت هستند و باید به عنوان anchor مدل شوند و نیروی وارد بر آنها از حد مجاز کمتر باشد. مدلی که در اینجا نمایش داده شد مدل کامل همراه با ساپورت و نوع نهائی اتصالات انبساطی می باشد حالت های بار گذاری که برای سیستم در نظر گرفته می شود بشرح زیر است :

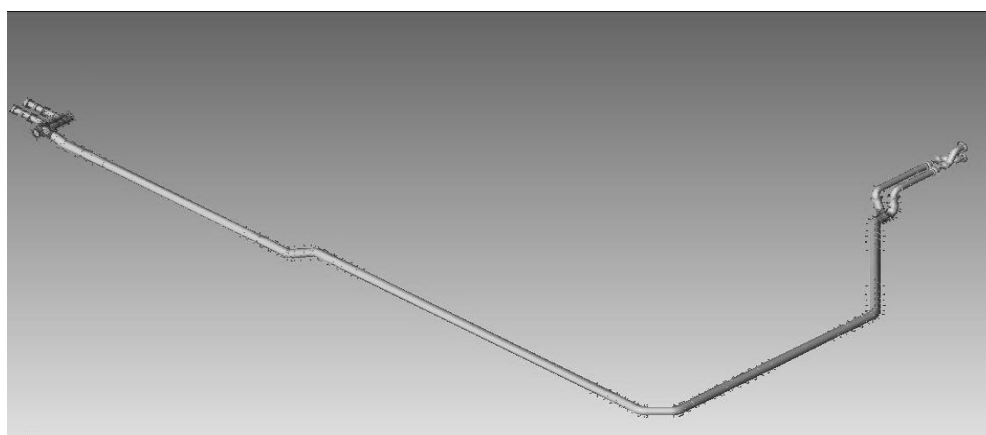
(۱) حالت عملکرد عادی : بار ناشی از فشار + بار ناشی از دما + بار ناشی از جابجائی حرارتی کندانسور + بار ناشی از وزن سیستم

(۲) حالت بار گذاری دائمی : بار ناشی از وزن + بار ناشی از فشار

(۳) اختلاف تغییر طول ناشی از حالت اول و دوم

همچنین داخل اتاق توربین و محفظه پمپ قبل از ورود لوله به خاک ساپورت گذاری انجام می شود. از آنجائی که المانهائی همچون فیلتر ها و شیرها و صافی فقط از نظر وزنی و نیروهای وارده به آنها مهم می باشند بصورت اجزای صلب همراه با وزنشان مدل میشوند

نتایج مدلسازی



اتصالات انبساطی مورد استفاده درجدول زیر آمده اند:

No	TYPE	AXIAL (N/mm)	LATERAL (N/mm)	TORSION. (N/mm)	REMARKS



۱	TIED	RIGID	۱...	RIGID	۱۶۰۰-NB/Near condenser
۲	TIED	RIGID	۱...	RIGID	۱۶۰۰-NB/Near condenser
۳	TIED	RIGID	۴..	RIGID	۱۶۰۰-NB
۴	TIED	RIGID	۴..	RIGID	۱۶۰۰-NB
۵	TIED	RIGID	۱...	RIGID	۱۴۰۰-NB/Near CW Pump
۶	TIED	RIGID	۱...	RIGID	۱۴۰۰-NB/Near CW Pump

نیروهای وارده به کندانسور:

Nozzle No. X1 (Caesar Node no.1)

Noz. Allowable resultant force = ۳.۶۱۶ kgf

Noz. Allowable resultant Moment = ۳.۱۵۹.۳۹۱ Kgf-m

NO	Load case	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (N-m)	My (N-m)	Mz (N-m)
۱	OPE	۷۱۹	-۱۵۶۱۱	-۱۴۳۸۳	۲۵۱۱	۱۸۰	۳۷۰۸
۲	SUS	۲۸۳	-۸۳۷۸	-۴۸۹۹	۷۰۸	۷۲	۱۴۵۷
۳	EXP	۴۳۵	-۷۲۳۲	-۹۹۳۹	۱۸۰۲	۱۰۷	۲۲۳۴

نیروهای وارده به نازل بالائی کندانسور در خط ورودی به کندانسور

$$F = \sqrt{(719)^2 + (-15611)^2 + (-14383)^2}$$

$$F = 21238 N < 35000 N$$

Nozzle No. X1 (Caesar Node no.1.1)

Noz. Allowable resultant force = ۳.۶۱۶ kgf

Noz. Allowable resultant Moment = ۳.۱۵۹.۳۹۱ Kgf-m



نیروهای وارده به نازل پائینی کندانسور در خط ورودی به کندانسور

$= (5681) \square + (-21275) \square$

$F = 26185 N <$

No	Load case	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (N-m)	My (N-m)	Mz (N-m)
1	OPE	5681	-14169	-21275	2148	1417	385
2	SUS	37.9	-1136.	-16935	1445	922	-13.8
3	EXP	1972	-28.8	-434.	7.3	495	-922

$F \square$
 $14169) \square + (-$
 $35... N$

مقادیر حداکثر تنش :

۲. OCCASIOANAL STRESS VALUES. 1. SUSTAINED STRESS VALUES

No	Type of stress	Caesar Node no	Max. Stress value (N/sq.mm)
1,-	Bending stress	3.-	9,3
2,-	Torsional stress	21.-	-,7
3,-	Axial stress	255	6,4

No	Type of stress	Caesar Node no	Max. Stress value (N/sq.mm)
1,-	Bending stress	3.-	5,978
2,-	Torsional stress	107.-	-,432
3,-	Axial stress	170.2	6,25
4,-	Hoop stress	170.2	12,61

۳. OPERATION STRESS VALUES.

No	Type of stress	Caesar Node no	Max. Stress value (N/sq.mm)
1,-	Bending stress	3.-	15,3
2,-	Torsional stress	21.-	-,96
3,-	Axial stress	170.2	6,1
4,-	Hoop stress	170.2	12,61



نتیجه گیری :

با توجه به سعی و خطاهای انجام شده و تغییر مکان تکیه گاهها کلیه تنش ها به پائین تر از مقادیر مجاز کاهش یافت و با کمک *Expansion Joint* بکار رفته نیروهای وارده به تجهیزات در حد مطلوب قرار گرفتند . در بسیاری از موارد به علت محدودیت هائی همچون قیمت تجهیزات ، کمبود مکان و مواردی نظیر اینها نمی توان تنش ها را به میزان مطلوب کاهش داد و باید بین این موارد یک حالت بهینه در نظر گرفت .

منابع :

۱- *Mcgraw-Hill - Piping Handbook* VE- Mohindar L. Nayyar, P.E.

The fifth edition of this Handbook was edited by Reno C. King, B.M.E, M.M.E., D.Sc., P.E.

۲- *Process plant layout and piping design* –By Roger Hunt , Ed Bausbacher

۳- *ASME B 31.1- ۲۰۰۴ ASME Code For Pressure Piping , B 31*

۴- *Applied Process Design* –Ernest E. Ludwig - Gulf Professional Publishing



مدیریت تعمیرات پیشگیرانه

عبدالحسین نیکجو، عضو هیئت علمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

نورا... عیسی نژاد، کارشناس واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق

حسین میسمی، کارشناس ارشد واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق

چکیده:

با توجه به رشد روز افزون صنایع و پدید آمدن ابرصنایعی نظیر پالایشگاهها، مراکز هسته ای، صنایع عظیم فولاد و پایانه های حمل و نقل و هواپیماسازی نیاز به اجرای مدیریت منسجم و یکپارچه جهت مدیریت این مراکز بیش از پیش احساس شد. با اجرای مدیریت فراگیر بسیاری از جنبه های مدیریتی جدید با توجه به نیاز این مراکز روشن و ابداع شد. از آنجمله بحث مدیریت تعمیرات و نگهداری بود. در صنایع مادر بروز خرابی و رفع نقص آن گاهها به بروز خسارتها و آثار نامطلوب بسیاری منجر می شد و گاهها در مورد نیروگاهها موجب قطعی شریان های حیاتی و ارتباطی مجامع انسانی می گردید. لذا نیاز به اجرای یک مدیریت پیشگیرانه و پیش بینانه جهت جلوگیری از شات دان ها، خرابی ها، بریک آپ ها و استفاده بهینه و بروز کمترین زمان خارج از خط بودن قسمت ها احساس می گردید. مدیریت تعمیرات پیشگیرانه با توجه به شاخص های مطلوبی که داراست می تواند در مدیریت تعمیرات و نگهداری تحولی بزرگ و شگرف ایجاد نماید. اصول حاکم بر مدیریت تعمیرات و نگهداری مواردی است که در این تحقیق به آن اشاره شده و در ادامه آن روش های بروز شده TPM و PDM نیز شرح داده می شود.

کلمات کلیدی: PM ، TPM ، PDM ، ، مدیریت تعمیرات و نگهداری

۱- مقدمه:

امروزه راهها و وسایل ارتباطی جزء مهمترین شریان های حیاتی یک کشور محسوب می شوند. بطوریکه می توان آنها را به مثابه رگ های بدن در پیکره کشور دانست. گسترش راهها و بهبود شرایط حمل و نقل باعث می گردد توسعه یافتگی با سرعت بیشتر و صرف هزینه های کمتر ایجاد گردد. بسیاری از کشورهایی که از نظر حمل و نقل با مشکل روبرو هستند شاید سالها رنگ توسعه یافتگی را نبینند. از میان روش های مختلف حمل و نقل راه آهن ریلی از نظر امنیت در مقام ممتازی قرار دارد و از نظر هزینه بعد از حمل و نقل دریایی جایگاه دوم را به خود اختصاص داده است. لزوم بهره وری و استفاده بهینه در این فن آوری با توجه به اهمیت آن در کشور بر کسی پوشیده نیست.

لازم به ذکر است که با راهبرد شمال-جنوب ابتکاری از سوی شورمان در جهت اتصال آسیای میانه به آبهای آزاد و نقشی که راه آهن ریلی به عنوان مکمل این طرح ایفا می کند، لزوم استفاده کامل از امکانات موجود حمل و نقل ریلی و گسترش آن لازم به نظر می رسد.



در حمل و نقل ریلی مهمترین رکن لوکوموتیو و واگن های متصل به آن می باشند (البته شایان ذکر است که با پیشرفت فن آوری و ورود واگن های خودکششی به عرصه حمل و نقل نقش لوکوموتیو کم رنگ تر گردیده است). این رکن مهم به دلیل استفاده های مکرر و فشار کاری زیاد به آن و با توجه به محدودیتهای موجود در راستای تامین لوکوموتیو جدید نیازمند تعمیرات، نگهداری و رسیدگی بسیار مناسب دارد که در این تحقیق سعی شده است ضمن بیان اصول تعمیرات پیشگیرانه به مبحث تعمیرات پیشگیرانه دیزل ژنراتور قطار و نیازمندی های اجرایی این سیستم اشاره گردد.

۲- اصول نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (Preventive Maintenance)

هزینه های نگهداری و تعمیرات قسمت زیادی از هزینه های راه اندازی و بهره برداری واحدهای صنعتی تجهیزات حمل و نقل واحدهای تولیدی و مراکز بزرگ صنعتی را شامل می شود که بسته به نوع صنعت، این هزینه ها می تواند ۱۴٪ الی ۴۵٪ هزینه های نهایی تولید را شامل گردد. به عنوان مثال در صنایع تهیه صفحات کاغذ ۱۰٪، صنایع غذایی ۱۵٪، صنایع سنگین ۴۰٪ و صنایع حمل و نقل تا حدود ۷۰٪ از هزینه های کلی را در بر می گیرد.

البته با تحقیقات انجام شده ثابت گردیده است حدود ۳۰٪ هزینه های نگهداری به علت راههای بکارگرفته شده غیر صحیح و ضروری می باشد. اگر هزینه های تعمیر و نگهداری صنایع سنگین کشور را ۴۰۰ میلیارد تومان در نظر بگیریم ۳۰٪ این مبلغ، مقدار قابل توجهی خواهد بود.

اهمیت تعمیر و نگهداری در در سود دهی و راندمان کارکرد صنایع با مقدار اشاره شده آشکار می شود. آشکار است که مدیریت ناکارآمد نگهداری و تعمیرات قابلیت های واحدها را در تهیه محصولات و رقابت آنها با واحدهای دیگر در کشور و دنیا کاهش می دهد. امروزه با بکارگیری تجهیزات ابزار دقیق متصل به میکروپروسور و مونیتورینگ تجهیزات و ادوات توانایی های مدیریت نگهداری و تعمیرات فوق العاده افزایش پیدا کرده است.

با مطالب گفته شده خاطر نشان می سازیم که رشد و توسعه در مدیریت تعمیرات و نگهداری باعث حذف تعمیرات غیر ضروری، جلوگیری از خرابی های مکرر، شات دان های ناگهانی، حذف روش های نامناسب نگهداری و موارد زیادی شده است.

در زیر به مبانی اجرا، پیاده سازی و جزئیات دیگر مدیریت تعمیرات و نگهداری می پردازیم:

۲-۱- اجرای PM در محدوده مشخص:

در مرحله راه اندازی مدیریت تعمیرات پیشگیرانه در ابتدای کار هزینه های زیادی بر دوش واحد تولیدی یا واحد صنعتی قرار می گیرد که دلیل آن این است که مخارج صورت گرفته جهت تعمیرات پیشگیرانه در بازه زمانی T صورت گرفته ولی جلوگیری از بروز شات دان ها و خرابی های مکرر در بازه بسیار طولانی تر (T+x) مورد انتظار ما است. لذا باید به دلیل کاهش هزینه در ابتدای امر حدود ۱۰٪ الی ۱۵٪ از تجهیزات و تاسیسات اصلی واحد مد نظر در اجرای PM مورد ارزیابی و اجرایی آزمایشی قرار گیرد. با این روش برگشت سرمایه ناشی از صرفه جویی در خرابی های این قسمت از واحد می تواند ما را در اجرای کامل برنامه مذکور برای کل واحد کمک نماید.

۲-۲- چگونگی شروع مطالعات PM

در آغاز کار باید مطالعات جامعی در راستای شناسایی محلی از واحد که در صورت اجرای PM بازگشت سرمایه سریعتر و امکان پذیرتر است، صورت پذیرد که جهت شناسایی این قسمت از واحد می توان از آنالیز نقاط ضعف تجهیزات و تاسیسات که توسط کاربران آن واحد تهیه شده و یا تهیه می گردد استفاده کرد.



البته شایان ذکر است که معمولا در کاتالوگ ها و توصیه های اولیه طراحان و سازندگان این موارد ذکر گردیده است.

۲-۳- انتخاب روند کار

عموما دو روند در اجرای مدیریت تعمیرات پیشگیرانه وجود دارد. یکی تعمیرات پیشگیرانه تابع زمان (بصورت دوره ای) و دیگری تعمیرات پیشگیرانه تابع وضعیت.

مدیریت تعمیرات پیشگیرانه تابع وضعیت عموما در مواقعی که وضعیت استهلاک تجهیزات از مقدار مشخصی فراتر می رود به اجرا در می آید و به نسبت مدیریت تابع زمان از بهره وری بالاتری بهره مند است. با این حال مدیریت تابع وضعیت نیازمند سامان دهی دقیق و درست فعالیت های مختلف مورد نیاز می باشد چراکه در این روند زمان مشخصی جهت تعمیرات پیشگیرانه مشخص نشده و به عنوان مثال جهت انجام تعمیرات نیاز به هماهنگی با فعالیت های مختلف بهره برداری واحد می باشد. ضمنا اجرای روند مدیریت تابع وضعیت نیازمند نصب و پایش سنسورهای بیانگر وضعیت تجهیزات بوده که بسیار هزینه بر و نیازمند مانیتورینگ پیوسته می باشد.

به همین خاطر عموما توصیه می گردد در واحدهای کوچکتر و یا با اهمیت کمتر و دست دوم از روند مدیریتی تابع زمان استفاده شود و در دراز مدت با توجه به پیش زمینه هایی که ایجاد شده و تامین مالی مطمئن روند مدیریتی تابع وضعیت اجرا گردد.

۲-۴- تعیین بازه زمانی مورد نیاز برای تعمیرات پیشگیرانه:

معمولا معین نمودن چگونگی و بازه های زمانی انجام تعمیرات پیشگیرانه بر پایه داده های منتج از آنالیز نقاط ضعف تجهیزات صورت می پذیرد. راهکارهای دیگر بدست آوردن داده ها در این راستا موارد ذیل را شامل می گردد.

- توصیه های سازنده تجهیزات
- گزارشات کاربران واحدها
- پیشنهادات بهره برداران و ...

لذا با توجه به داده های جمع آوری شده از منابع فوق الذکر می توان یک برنامه مدون تهیه و اجرای آن مستند سازی گردد. مستند سازی یاد شده در کنار داده های رسیده در مورد حوادث، خرابی ها، شات دان ها، خارج از خط شدن ها، بریدگی های قطعات و ... کمک قابل توجهی در راستای بهینه سازی واحد می نماید. (اجرای بهینه این مرحله بهتر است با کمک یک نرم افزار انجام پذیرد)

۲-۵- پرسنل اجرا کننده PM

جهت کاهش هزینه ها و اجرای بهتر مدیریت تعمیرات پیشگیرانه می توان با آموزشی مدون و محدود به هر قسمت از بهره برداران تجهیزات و تعمیرکاران واحد در راستای اجرای بهینه PM کمک گرفت که تاثیر این فرآیند از نظر اقتصادی و بالا رفتن روحیه مشارکت در پرسنل در دراز مدت نمایان می گردد. البته باید از افراد متخصص در اجرای PM جهت پایش شاخصه های راهبردی تجهیزات و مدیریت عالی استفاده کرد. میزان و نحوه اجرای نقش کاربران و بهره برداران و تعمیرکاران در این زمینه منوط به نظر و مهارت و توانایی مجری PM می باشد. (نیکجو، ۱۳۸۴)

۲-۶- حل مشکل عدم همکاری کاربران و تعمیرکاران با PM



یکی از مشکلاتی که در راستای اجرای تعمیرات پیشگیرانه به چشم می خورد عدم همکاری لازم و حتی کارشکنی کاربران، بهره برداران و تعمیرکاران با اجرای این سیستم مدیریتی جدید می باشد که به چند دلیل زیر می باشد:

۱. عدم احساس امنیت شغلی با اجرای این برنامه برای پرسنل
 ۲. عدم آشنایی آنها با برنامه جدید و به تبع آن ضدیت با آن
 ۳. عدم مشارکت دهی صحیح پرسنل توسط مجری برنامه
 ۴. احساس عدم تناسب کارها با روال قبلی تعمیرات در واحد
 ۵. زمان ببری بیشتر و نیاز به کارکرد بیشتر کارکنان در ابتدای اجرای برنامه PM
 ۶. حذف بعضی از مزایا و استفاده های مقطعی پرسنل به دلیل اجرای برنامه PM
- هر یک از موارد ذکر شده و موارد دیگری که بیان نشده اند، همگی باعث کندی، ناکارآمدی و حتی شکست برنامه PM می گردد. لذا مهمترین قسمت در اجرای PM بالا بودن توان مجری برنامه در ایجاد مقبولیت و احساس اطمینان در پرسنل می باشد. توجیح کاربران و مشارکت آنها در اجرای PM و برنامه ریزی و تقسیم بندی کارها بین پرسنل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

۲-۷- گام های بهینه سازی مدیریت تعمیرات پیشگیرانه

گام نخست: بهینه سازی مدیریت PM

۱. مدیریت PM در بر گیرنده تمام کارکردهای مورد لزوم در راستای قسمت های مختلف تجهیزات و عدوات در حال بهره برداری و راه اندازی می باشد. ضمناً مواردی چون بررسی مصرف قطعات یدکی، ساعات کارکرد انجام هر تعمیر، مدیریت انبار، کاهش پرسنل، بالابری راندمان واحد ها با هزینه کمتر تعمیرات را شامل می شود.
۲. کنترل مدیریت PM مشتمل بر بررسی همه شاخصه های راهبردی موثر مورد نیاز جهت اجرای مدیریت پایش تعمیرات را دارا می باشد.
۳. کنترل هزینه: مشتمل بر همه داده های هزینه مربوط به فعالیت های تعمیرات است که مواردی چون هزینه قطعات مصرفی، هزینه پیمانکاران و هزینه نفر ساعت کارکنان می باشد.
۴. کنترل تجهیزات نمونه برداری: برای مشخص نمودن وضعیت تجهیزات، واحد نیازمند انجام آزمایشات کنترل کیفیت و پایش قطعات می باشد.
۵. گردآوری داده ها: برای بررسی مقایسه ای وضعیت موجود و برآورد بهینه سازی تجهیزات واحد در حال بهره برداری نیازمند جمع آوری دادهها از قسمت های مختلف واحد می باشیم که با ایجاد یک Data Base و مرتبط نمودن آن با نرم افزارهای بهینه سازی واحد می توان حالت های مختلف را بررسی و مورد ارزیابی قرار داد. موارد زیر میتوانند در تهیه یک Base Data کمک نمایند:

- کنترل وضعیت کارکرد تجهیزات در هنگام بروز خرابی
- دسته بندی تجهیزات مشابه
- مقایسه و تعیین کارآمدی تجهیزات و لوازم یدکی تهیه شده از تولید کنندگان مختلف
- مقایسه وضعیت تجهیزات مورد بهره برداری با تجهیزات جدید و ...

موارد گفته شده فوق اصول بهینه سازی مدیریت PM را شامل می شوند ولی در کنار آن باید از آنالیز نقاط ضعف تجهیزات با بکارگیری محاسبه شاخصهای راهبردی بر اساس آمار و داده های جمع آوری شده در Data Base استفاده نموده، شاخصهای



راهبردی مواردی چون کل هزینه های نگهداری، هزینه های توقف تجهیزات و هزینه های راه اندازی مجدد واحد را شامل می شود.

از این شاخصه ها در جهت تعیین تجهیزات با عملکرد ضعیف استفاده می شود. بخش های مذکور شامل مواردی چون سیستم هایی که بالاترین هزینه تعمیرات را دارند و سیستم هایی که بیشترین زمان توقف را دارند، می گردد. (نیکجو، ۱۳۸۳)

انجام آنالیز تعیین نقاط ضعف و پاسخ به سوالاتی نظیر سوالات ذیل، می تواند در تعیین راهکارهای بهینه سازی مدیریت PM کمک کند:

- چه قسمت هایی باعث ناکارآمدی تجهیزات می شود؟
- آیا در تجهیزات مشابه نیز این ناکارآمدی ها مشاهده می شود؟
- تجهیزات تولید کنندگان دیگر نیز مشکلات اینچنینی دارند؟ و ...

گام دوم: برنامه ریزی بهینه مدیریت PM

برنامه ریزی بهینه هنگامی قابل اجراست که امکان تخصیص منابع زمانی کافی برای بهینه شدن تجهیزات در آینده موجود باشد. بخش اصلی این برنامه ریزی معین نمودن دقیق جزئیات اجرایی فعالیت های مختلف قابل اجرا می باشد که موارد ذیل را در بر می گیرد:

- تعیین مدت زمان مورد نیاز جهت هر فعالیت
- مهارت های مورد نیاز
- ابزارهای مورد نیاز
- قطعات یدکی مورد نیاز
- راهکارهای تامین قطعات یدکی
- هماهنگی و توزیع فعالیت های مختلف بین پرسنل
- کاهش توقفات غیر ضروری در فعالیت ها
- بالابردن در صد فعالیت های برنامه ریزی شده به درصد فعالیت های اضطراری

نتیجه گیری:

روشهای مختلف گفته شده در بالا همگی در بالا رفتن راندمان و کارکرد ماشین آلات و سیستم های مختلف موجود بسیار موثر بوده و در صورتی که اجرای آنها بر طبق گامی پیشنهادی باشد می تواند نقش عمده ای در بهره بری بهینه در کشور داشته باشد. البته اجرای این برنامه های تعمیر و نگهداری همان گونه که بیان شد وابستگی شدیدی به همکاری تمام قسمتهای مرتبط به تعمیرات و نگهداری دارد و تا همکاری بهره برداران حاصل نگردد به سختی میشود یک برنامه تعمیر و نگهداری موفق را اجرا نمود.

مراجع:

- عبدالحسین نیکجو، احداث نیروگاه یا احیاء واحدهای فرسوده، ۱۳۸۳، شانزدهمین کنفرانس بین المللی برق
- عبدالحسین نیکجو، قابلیت اطمینان توصیفی، ۱۳۸۳،
- نوری، ع، روش های نگهداری و تعمیرات در صنعت، آذر ۱۳۸۴، ماهنامه بین المللی نفت و انرژی



- رزومه شرکت ثبت شده در سیستم مکانیزه نت "نگهدار" در شرکت سیمان خوزستان، ۱۳۸۴.

- تجربیات بخش برنامه ریزی نت شرکت داده پردازان احداث، ۱۸۴، "مدیریت تعمیرات پیشگیرانه".

- Pool, n., "PM Management and Effect", ۲۰۰۴, Management Center

- Nicole, O., "PM Analiz", AIM, ۲۰۰۵, Management Centre



مفهوم اکسرژی و بررسی آن برای سیکل رانکین نیروگاه

پوریا احمدی - شعیب خانمحمدی

دانشکده انرژی - دانشگاه صنعت آب و برق

@gmail.com ۸۱pouryaAhmadi

@yahoo.com ۲۷۰shoaib_

چکیده

در این مقاله ابتدا به بررسی مفهوم اکسرژی می پردازیم و اکسرژی را در فرایندهای مختلف بدست می آوریم سپس به بررسی آنالیز اکسرژی برای سیکل رانکین نیروگاه همراه هیتر آب تغذیه می پردازیم و نقش استفاده از هیتر آب تغذیه در افزایش راندمان نیروگاه و کاهش بازگشت ناپذیرها را بررسی میکنیم.

لغات کلیدی: " آنالیز اکسرژی " - "قانون اول و دوم ترمودینامیک " - "سیکل رانکین " - "نسبت دمای بخار زیر کش "

مقدمه:

عملکرد سیستم های مهندسی با وجود بازگشت ناپذیری ها تنزل پیدا می کند و تولید آنتروپی برای اندازه گیری بازگشت ناپذیری ایجاد شده در طول پروسه مهندسی یک معیار ایده ال است. اکنون ساخت وسیله ای که نه تنها از نظر کمیت انرژی (قانون اول) باید ایده آل باشد بلکه باید قانون دوم را هم ارضا کند و به وسیله مینیمم کردن تولید آنتروپی بهینه شود.

آگاهی اکسرژیکی از منابع انرژی می تواند به توسعه تکنولوژی با استفاده از بهبود طراحی پروسه ها کمک کند.

اکسرژی (Exergy)

حد اکثر کار محوری که میتواند در یک مجموعه از ماشین های ایده ال از مقدار انرژی دریافت کرد اکسرژی آن انرژی نامیده می شود. همان گونه که مشخص است در طول یک پروسه اکسرژی ذخیره نمی شود. ولی به دلیل بازگشت ناپذیری ها می تواند از بین برود.

گرما دارای کیفیت انرژی پایین تری در مقایسه با کار می باشد به همین دلیل است که نمی توان به طور صد در صد به کار تبدیل شود اکسرژی می تواند به وسیله تولید انرژی و کیفیت بیان شود

$$\text{Exergy} = \text{Energy} * \text{Quality}$$

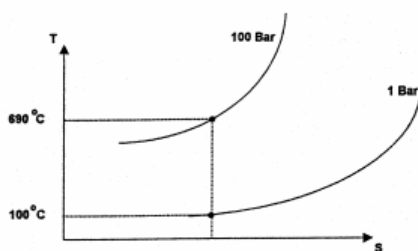
که طبق قانون اول ترمودینامیک کیفیت به صورت زیر تعریف می شود.



که طبق قانون اول ترمودینامیک کیفیت به صورت زیر تعریف می شود.

$$\text{Quality} = \left| 1 - \frac{T_0}{T_s} \right|$$

می خواهیم بدانیم که آیا انترپی تفاوت بین شکل های مختلف انرژی را نشان می دهد یا نه از نمودار زیر مشخص است که انترپی بخار 100 bar و 100°C با انترپی بخار 100 bar و 690°C که مربوط به سیکل بخار است یکسان است در حالی که کیفیت این دو جریان بسیار متفاوت است.



با توجه به این مطالب می توان فهمید که خاصیت انترپی به تنهایی برای ارزیابی فرایندها کافی نیست و تفاوت بین انواع مختلف انرژی را بیان می کند.

مفهوم اکسرژی برای آنالیز حجم کنترل

معمولا در آنالیز حجم کنترل 3 نوع انرژی عبوری از سطح کنترل جهت موازنه انرژی در نظر گرفته می شود

(1) کار عبوری

(2) گرمای عبوری

(3) انتقال انرژی همراه با انتقال جرم

اکسرژی مربوط به تبادل حرارت:

حرارت یک انرژی نامنظم است بنابراین اکسرژی معادل آن برابر ماکزیمم کار قابل دریافت از سیستم در تبادل گرما با محیط است. از آنجایی که ماکزیمم کار در یک فرایند با استفاده از راندمان کارنو بین دو منبع بدست می آید:

$$E_x^Q = \dot{W}_{Max} = \dot{Q}_r \eta_{carnot}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_0}{T_r} \Rightarrow E_x^Q = \dot{Q}_r \left[1 - \frac{T_0}{T_r} \right]$$

اکسرژی جریان مواد برابر ماکزیمم مقدار کار قابل دریافت است وقتی که از حالت اولیه به حالت محیط می رسد.

اکسرژی مربوط به انرژی جنبشی و پتانسیل :

از آنجا که انرژی جنبشی و پتانسیل انرژی های منظم هستند بنابراین مقدار آن با اکسرژی آن برابر است .

$$E_x)_K = m \frac{C_0^2}{2}$$

$$E_x)_P = mgz$$



در زیر روابط اکسرژی برای حجم کنترل را مشاهده می کنیم :

$$\varepsilon = \frac{E_x}{M}$$

$$q_{rev} = T_0 (S_0 - S_1)$$

$$q_{rev} - W_{rev} = h_0 - h_1 \quad (\text{Energy balance})$$

با قرار دادن q در رابطه خواهیم داشت:

$$\varepsilon_1 = W_{rev} = h_1 - h_0 + T_0 (S_0 - S_1) = (h_1 - T_0 S_1) - (h_0 - T_0 S_0)$$

مشخص خواهد بود که ε_1 برابر اختلاف $(h - T_0 S)$ حالت اولیه با شرایط محیط است که مقدار $(h - T_0 S)$ یک خاصیت ترمودینامیکی است که به آن قابلیت کاردهی می گویند .

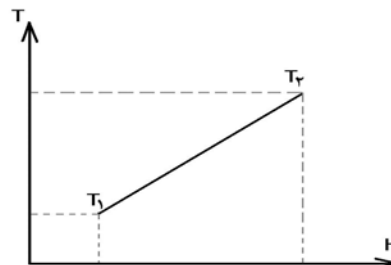
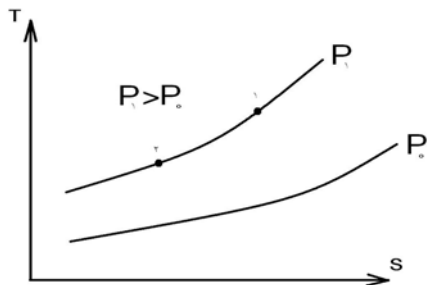
$$\beta = H - T_0 S$$

با استفاده از روابط فوق خواهیم دید که اکسرژی برابر قابلیت کار دهی سیستم و محیط است.

$$\Delta\varepsilon = \Delta h - T_0 \Delta S$$

بررسی آنالیز اکسرژی برای حالات های خاص:

الف) فرایند فشار ثابت :



در این حالت برای مایعات و گازهای ایده آل رابطه $\Delta s, \Delta h$ به صورت زیر است :

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \& \quad \Delta S = S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T}$$

برای مایعات و گازهای ایده آل با یک تقریب خوب می توان C_p را ثابت در نظر گرفت.

$$\frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T}}{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT} = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{T_2 - T_1} \Rightarrow \Delta S = \Delta h \left[\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{T_2 - T_1} \right]$$



با قرار دادن رابطه فوق در رابطه اکسرژی خواهیم داشت:

$$\Delta \varepsilon^P = \Delta h - T_0 \Delta S = \Delta h - T_0 \Delta h \left[\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{T_2 - T_1} \right]$$

$$\Delta \varepsilon^P = \Delta h \left[1 - T_0 \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{T_2 - T_1} \right] = \Delta h \left[1 - \frac{T_0}{T_{LM,1,2}} \right] \quad \& \quad T_{LM,1,2} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

رابطه فوق شباهت زیادی با اکسرژی گرمایی دارد که به صورت زیر تعریف شد

$$\varepsilon^Q = Q \left[1 - \frac{T_0}{T} \right]$$

ب) فرایند دما ثابت

همان گونه که از مفاهیم ترمودینامیک به یاد داریم وقتی می خواستیم که کار پمپ را محاسبه کنیم از رابطه مقابل استفاده می کردیم

$$W_{\text{exp}} = \int \delta W = - \int_{P_1}^{P_2} V dp$$

$$W_{\text{Net}} = W_{\text{exp}} \frac{T_0}{T} \Rightarrow \Delta \varepsilon = W_{\text{Net}} = W_{\text{exp}} \frac{T_0}{T}$$

در رابطه فوق W_{exp} برابر کار انبساطی است و W_{Net} کار خالص ناشی از انبساط است پس در فرایند دما ثابت خواهیم داشت :

$$Q = W_{\text{exp}} \Rightarrow \varepsilon^Q = Q \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] = W_{\text{exp}} \left[1 - \frac{T_0}{T} \right]$$

$$\Delta \varepsilon^T = W_{\text{Net}} = W_{\text{exp}} - \varepsilon^Q = W_{\text{exp}} - W_{\text{exp}} \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] = W_{\text{exp}} \frac{T_0}{T}$$

برای گاز های ایده آل رابطه $\Delta \varepsilon^T$ به صورت زیر بیان می شود

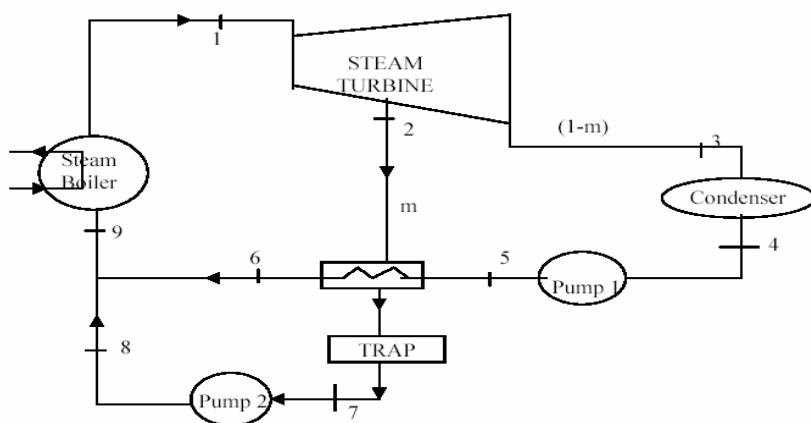
$$\Delta \varepsilon^T = W_{\text{exp}} \frac{T_0}{T} = - \frac{T_0}{T} \int V dp = - \frac{T_0}{T} \int_{P_1}^{P_2} \frac{RT}{P} dP = RT \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

آنالیز اکسرژی برای سیکل رانکین با هیتر آب تغذیه

همان گونه که می دانیم سیکل پایه رانکین یک سیکل ایده آل برای نیروگاه می باشد. استفاده از سیکل کارنو به خاطر وجود بازگشت ناپذیری ها امکان پذیر نیست. بعد از سیکل کارنو بیشترین بازده از نیروگاه را می توان از طریق سیکل رانکین بدست آورد. آنالیز های ترمودینامیکی (هر دو قانون ترمودینامیک) در رابطه با تعداد هیتر های آب تغذیه، فشار ورودی به توربین و دمای ورودی به توربین برای بررسی راندمان انجام شده است.



یکی از روشهای بهبود راندمان سیکل رانکین نیروگاه افزایش مقدار گرمای اضافه شده به آب تغذیه با استفاده از ریزکش های بخار از توربین می باشد که با استفاده از هیتر های آب تغذیه صورت می گیرد. اگر بتوان آب را در حالت اشباع وارد بویلر کرد. با استفاده از این روش بازگشت ناپذیری های موجود در بویلر به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد در شکل شماره ۱ اجزای یک سیکل رانکین با یک عدد هیتر آب تغذیه در نظر گرفته شده است که در این حالت بررسی برای دبی $1 \frac{Kg}{s}$ انجام شده است. در زیر با شماتیک سیکل رانکین همراه یک عدد آب تغذیه آشنا می شویم.



شکل ۱: شماتیک سیکل بخار همراه با یک عدد هیتر آب تغذیه

۱) دمای توده گاز های ورودی به بویلر برای تولید بخار $T_a = 1000^0 C$

۲) دمای توده گاز های خروجی از بویلر $T_b = 300$

۳) TTX برای هیتر آب تغذیه برابر $6^0 C$

۴) فشار کندانسور $P_{Cond} = 0.085 \text{ bar}$

۵) بازده توربین بخار $\eta_T = 0.85$

$$TTD = T_2 - T_6$$

بالانس انرژی برای هیتر آب تغذیه

$$m(h_2 - h_7) = (1-m)(h_6 - h_5)$$

دبی توده گازهای مورد نیاز برای تولید بخار (m_g) و گرمای ویژه آن (C_{Pg}) است اگر بالانس انرژی را بنویسیم خواهیم

$$m_g C_{Pg} (T_a - T_b) = (h_1 - h_2) \quad \text{داشت.}$$

اگر بالانس انرژی را برای کندانسور بنویسیم داشت:

$$(1-m)(h_3 - h_4) = m_w C_{PW} (T_{out} - T_{in})$$

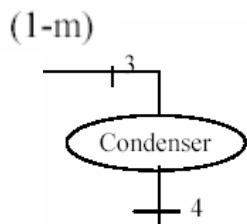
که در معادله بالا m_w دبی جرمی آب خنک مورد نیاز در کندانسور است.

کار خروجی از توربین بخار از فرمول زیر بدست می آید:

$$W_{ST} = (h_1 - h_2) + (1-m)(h_2 - h_3)$$

$$Q_{in} = (h_1 - h_9)$$

مقدار گرمای مورد نیاز بویلر





آنالیز اکسرژی :

بازگشت ناپذیری های تولید شده در هر یک از اجزای برای تقریب و آنالیز سیکل بر اساس قانون دوم ترمودینامیک مورد استفاده قرار می گیرد. اکسرژی نشان می دهد که کیفیت انرژی بستگی شرایط دارد و در حین فرایند در تجهیزات از بین می رود.

$$I_{Boiler} = T_0 (m_g C_{Pg} \ln(\frac{T_d}{T_a}) + (S_9 - S_1)) \quad (1) \text{ بازگشت ناپذیریهای موجود در بویلر}$$

$$I_{exhaust} = m_g C_{pg} ((T_b - T_0) - T_0 \ln(\frac{T_b}{T_0})) \quad (2) \text{ بازگشت ناپذیریهای ناشی از خروج گازها}$$

$$I_{St} = T_0 ((S_2 - S_1) + (1-m)(S_3 - S_2)) \quad (3) \text{ بازگشت ناپذیریهای توربین بخار}$$

$$I_{fwh} = T_0 (m(S_7 - S_2) + (1-m)(S_6 - S_5)) \quad (4) \text{ بازگشت ناپذیریهای هیتر آب تغذیه}$$

$$I_{Con} = T_0 (m_w C_{Pw} \ln(\frac{T_{out}}{T_{in}}) + (1-m)(S_4 - S_3)) \quad (5) \text{ بازگشت ناپذیریهای کندانسور}$$

$$I_{pump} = T_0 (S_5 - S_4) \quad (6) \text{ بازگشت ناپذیریهای پمپ}$$

$$I_{total} = I_{boiler} + I_{St} + I_{fwh} + I_{con} + I_{pumps} \quad (7) \text{ بازگشت ناپذیریهای کلی}$$

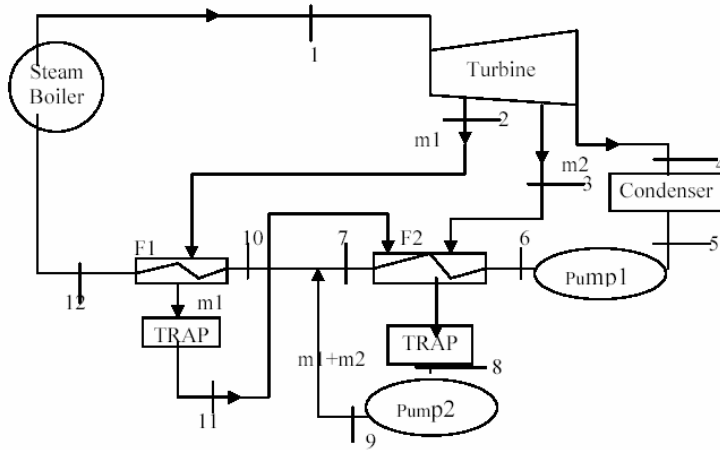
$$A_{fg} = m_g C_{pg} ((T_a - T_0) - T_0 \ln(\frac{T_a}{T_0}))$$

$$\eta_{II} = \left(\frac{A_{fg} - I_{tot}}{A_{fg}} \right) \times 100 \quad \text{بازده قانون دوم ترمودینامیک}$$

$$Exergy \text{ loss} = \left(\frac{I_{com}}{A_{fg}} \right) \times 100 \quad \text{تلفات اکسرژی در هریک از اجزاء سیکل}$$

سیکل رانکین همراه با دو عدد هیتر آب تغذیه :

برای بررسی بازدهی قانون اول و دوم ترمودینامیک در یک سیکل رانکین همراه با دو عدد هیتر آب تغذیه به شکل زیر مراجعه می کنیم.

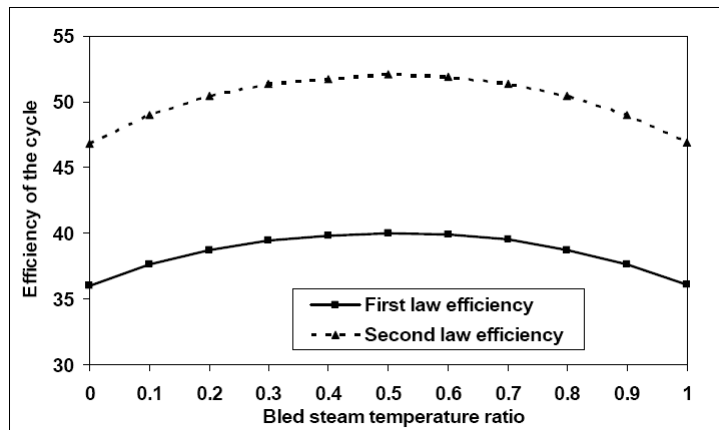


شکل ۲- شماتیک سیکل رانکین همراه دو عدد هیتر آب تغذیه

معادلات بالانس انرژی حاکم بر سیکل با دو عدد هیتر آب تغذیه همانند سیکل رانکین با یک عدد هیتر می باشد با اندکی تفاوت که برای جلوگیری از تکرار مکررات از آن صرف نظر می کنیم.

اثر نسبت دمای بخار زیر کش بر راندمان سیکل:

پارامترهای کلیدی که بر راندمان سیکل تاثیر اساسی دارند یکی فشار ورودی به توربین و دیگری دما می باشد. در این قسمت تاثیر این پارامترها را بوسیله تغییر در تعداد هیترهای آب تغذیه بر عملکرد سیکل بررسی می کنیم. اثر نسبت دمای بخار زیر کش در نمودار زیر نشان داده شده است که بر اساس بازده قانون اول و دوم است با توجه به نمودار مشخص است که با افزایش نسبت دمای بخار زیر کش کارایی سیکل افزایش می یابد تا حدود ۰.۵ که نشان دهنده اپتیمم این مقدار است.



شکل ۳- اثر نسبت دمای بخار زیر کش بر راندمان قانون اول ترمودینامیک



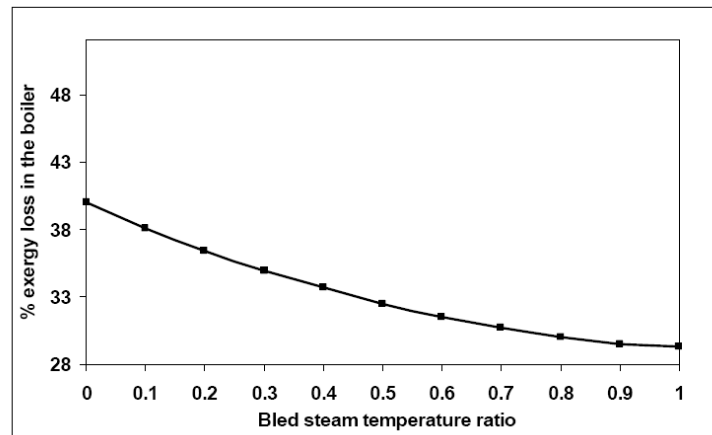
اثرات افزایش دمای بخار زیرکش بر بازگشت ناپذیری ها در بویلر:

با افزایش دمای بخار زیرکش بازگشت ناپذیری در بویلر کاهش می یابد زیرا با افزایش نسبت دمای بخار زیرکش کار تولیدی توربین کاهش می یابد و به طور مشابه در این زمان بازگشت ناپذیری بویلر کاهش می یابد که در این حالت یک شرایط بهینه وجود دارد.

با افزایش نسبت دمای زیرکش بازگشت ناپذیری ها در بویلر کم می شود (شکل ۸) همزمان که بازگشت ناپذیری ها کم می شود کار خروجی توربین هم کم می گردد.

بنابراین ممکن است که یک نقطه ایتیمم که در آن کار توربین ماکزیمم و بازگشت ناپذیری ها مینیمم موجود باشد که همان طور که گفته شد در ۰.۵ رخ می دهد.

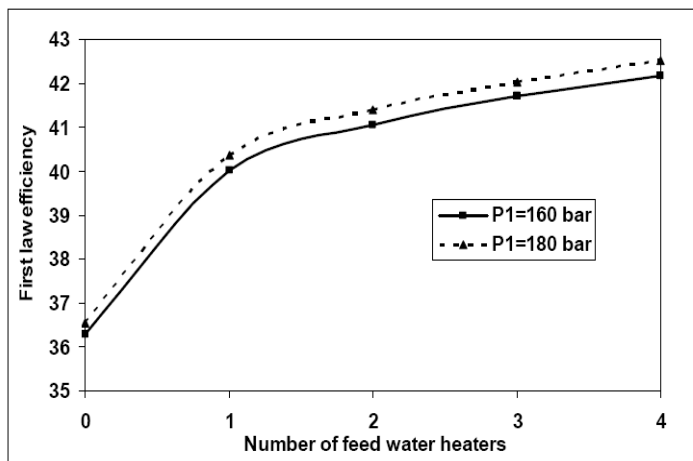
چون بیشترین بازگشت ناپذیری ها در بویلر رخ می دهد بیشترین تاکید بر روی بازگشت ناپذیری های بویلر است. حدود ۳۵٪ بازگشت ناپذیری ها در بویلر رخ می دهد. درصد بازگشت ناپذیری ها در بویلر با افزایش نسبت دمای بخار زیرکش در حالت یک هیتر آب تغذیه در (شکل ۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- تغییرات درصد بازگشت ناپذیری ها با تغییر نسبت دمای زیرکش

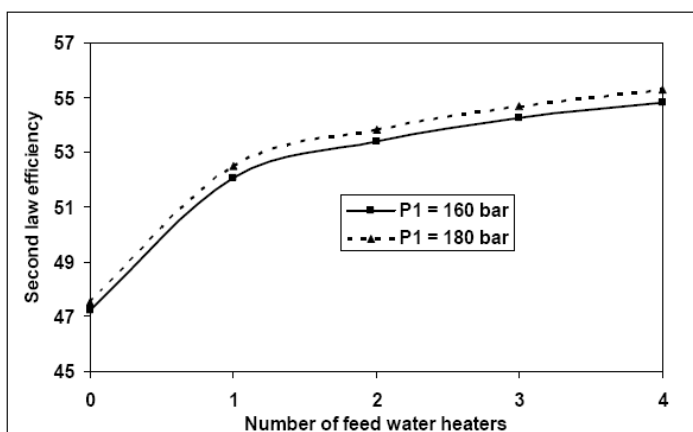
اثرات تعداد هیتر های آب تغذیه بر روی عملکرد سیکل:

افزایش تعداد هیتر های آب تغذیه تا حدودی باعث افزایش کارایی قانون اول و دوم ترمودینامیک می شود می شود و با افزایش بیش از حد هیتر ها کارایی تغییر چندانی نخواهد داشت. و هزینه اضافی مصرف خواهد شد. و همچنان که از نمودارها پیداست با افزایش تعداد هیتر ها کارایی قانون اول افزایش می یابد. علت آن جلوگیری از اتلاف گرما و گرم کردن آب تغذیه قبل از ورود به بویلر است. همانگونه که از نمودار دیده می شود هرچه فشار بالاتر باشد راندمان بالاتر می باشد و این به علت این است که بخار قابلیت حمل مقدار انتالپی بیشتری را دارد و می تواند کار بیشتری را انجام دهد که نتیجه آن افزایش راندمان حرارتی است.



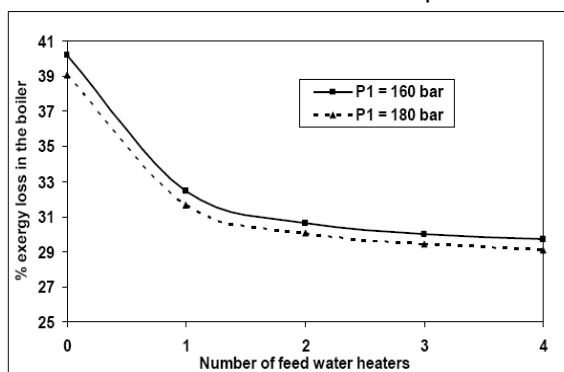
شکل ۵- اثر تعداد هیتر های آب تغذیه بر راندمان قانون اول سیکل در بویلر های با فشار مختلف

تغییرات راندمان قانون دوم بر حسب تعداد هیتر های آب تغذیه برای دو فشار مختلف بویلر در (شکل ۶) نشان داده شده است. راندمان قانون دوم با افزایش تعداد هیتر های آب تغذیه افزایش می یابد. که به دلیل کاهش بازگشت ناپذیری های بویلر است. در ابتدا با افزایش تعداد هیتر های آب تغذیه راندمان قانون دوم به شدت زیاد می شود ولی بعد از آن این افزایش کم می گردد.



شکل ۶- اثر تعداد هیتر های آب تغذیه بر راندمان قانون دوم برای بویلر های با فشار مختلف

اتلاف اکسرژی در بویلر برای فشار های مختلف در (شکل ۷) نشان داده شده است. درصد بازگشت ناپذیری ها در بویلر زمانی که از هیچ هیتری استفاده نمی شود خیلی بالا است که این مقدار با اضافه نمودن هیتر ها کم می گردد. برای یک فشار معین اگر تعداد هیتر ها اضافه شود اختلاف دمای بخار وتوده گاز کم می گردد و این به معنی کاهش بازگشت ناپذیری هاست.

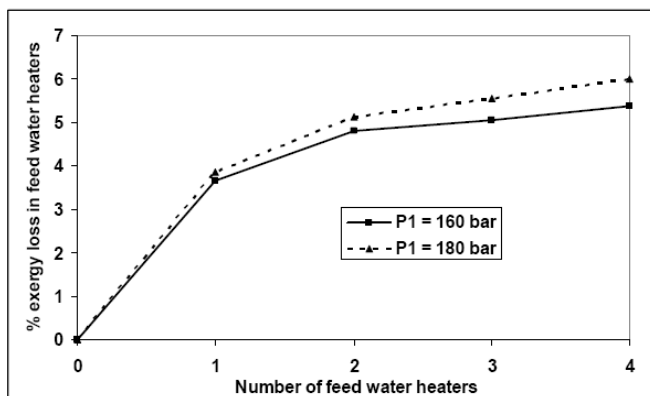


شکل ۷- اثر تعداد هیتر های آب تغذیه بر اتلاف اکسرژی در فشار های مختلف بویلر



شکل ۸ درصد تغییرات اتلاف اکسرژی را در هیترهای آب تغذیه بر حسب تعداد هیترها برای فشارهای مختلف ورودی به توربین نشان می دهد. چنانکه دیده می شود با افزایش تعداد هیترها اتلاف اکسرژی در هیترها هم زیاد می شود. واضح است که هرالمان برای انجام هر کاری مقداری از کیفیت انرژی یا همان اکسرژی را تلف می کند که به عنوان بازگشت ناپذیری شناخته می شود.

بنابراین درصد بازگشت ناپذیریها به تعداد المانها بستگی داشته و برای تعداد المان های بیشتر مقدار بزرگتری است. اغلب با افزایش تعداد هیترها کاهش بازگشت پذیری ها در بویلر بیشتر از افزایش بازگشت ناپذیریهای هیترها است. که نتیجه آن افزایش راندمان قانون دوم می باشد.



شکل ۸- تغییرات درصد اتلاف اکسرژی در هیترهای آب تغذیه نسبت به تعداد هیترها در فشارهای مختلف ورودی به توربین

نتیجه گیری:

در این مقاله آنالیزهای ترمو دینامیکی انجام گرفته برای افزایش راندمان سیکل رانکین توسط افزایش تعداد هیترها صورت گرفت. می توان نتیجه گرفت که راندمان قانون اول و دوم با افزایش نسبت دمای بخار زیرکش ابتدا افزایش میابد و سپس کاهش میابد که در این حالت یک شرایط بهینه وجود دارد.

بازده قانون اول و دوم با افزایش تعداد هیترهای آب تغذیه افزایش می یابد. همانگونه که میدانیم بیشترین افت اکسرژی در بویلر وجود دارد که با استفاده از هیتر آب تغذیه کاهش می یابد.

بازده سیکل با افزایش فشار و دمای ورودی به توربین بر طبق کاهش بازگشت ناپذیری های بویلر افزایش می یابد.

مراجع:

Moran, M.J., and Shapiro, H.N., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley, New York, 1988

Ahmet Z. Sahin, "Exergy Analysis in Design and Development of Sustainable Processes"
Deng-Chern Sue, Chia-Chin Chuang, "Engineering design and exergy analysis for combustion gas turbine based power generation system"

J.H. Horlock, "Combined power plants"

P.J. Ploumen and F.J.J.G. Janssen, Kema Nederland B.V. "Through Exergy Approach to More Efficient Processes"



T.srinivas,A.V.S.S.K.S. Gupta and P.Ravindra Babu.,”Exergy Analysis of Rankine cycle
Bhatt,M.S and Rajkumar,N.”Performance Enhancement in coal fired thermal power plant , Part
II:Steam turbine”,Int. J of Enrgy Res.,Vol.۲۳,pp۴۸۹-۵۱۵,۱۹۹۹

Haywood,R.W.,”Analysis of Engineering Cycle”,Pergamon press,Oxford,۱۹۷۵

ون واپلن, زونتاگ ”ترموديناميك كلاسيك ”ويرايش پنجم, فصل دهم,



تعمیرات دوره ای در واحد های صنعتی

عبدالحسین نیکجو، عضو هیئت علمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
سعید عبدالملکی، کارشناس واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
حسین میسمی، کارشناس ارشد واحد تخصصی تعمیرات پیشگیرانه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

چکیده

هر ماشینی در مدت کارکرد دچار فرسایش میشود. علم نگهداری و تعمیرات سعی در شناسایی و کنترل خرابی ها یا تعمیر و تعویض قطعات خراب با قطعات یدکی موجود میباشد. نگهداری بهتری تواند در بهره برداری با قابلیت اطمینان و دسترسی بالا راهگشا باشد. هر ماشینی با قابلیت اطمینان و دسترسی بالا نیاز مند بازرسی های منظم اجزاء میباشد. اذا در این مقاله سعی شده به اصول حاکم بر تعمیرات دوره ای پرداخته شود و نتایج حاصل از اجرای تعمیرات دوره ای بهینه که مواردی نظیر افزایش عمر اجزای اصلی دستگاه و تشخیص میزان فرسایش اجزاء می باشد تشریح گردد.

کلمات کلیدی: تعمیرات دوره ای، نگهداری پیشگیرانه، قابلیت اطمینان،

مقدمه

در صنعت کلیه تجهیزات و ماشین آلات صنعتی در اثر استهلاك دچار بروز خرابی، و مشکلات عدیده ی دیگری می شوند در این زمان است که علم تعمیر و نگهداری (نت) به کمک این تجهیزات آمده و با اجرای برنامه های مختلف تعمیر و نگهداری سعی در حذف و کاهش خرابی و یا تعمیر و وارد خط کردن تجهیزات دارد. لذا جهت انجام بهتر موارد محوله هر ماشینی با قابلیت اطمینان و دسترسی بالا نیاز مند بازرسی های منظم اجزاء میباشد. بازرسی های لیست شده تجهیزات واحد به معنی کامل بودن بازرسی ها نمی باشد و باید هر بازرسی با توجه به شرایط بازرسی و شرایط بازرسی و تجربیات نسبی اش تغییراتی را در اساس بازرسی قرار دهد. خرابی هزینه ایست که برای کارکرد ماشین پرداخت میشود. بدون دانستن خرابی های یک ماشین نمی تواند بصورت مطمئن بهره برداری شود و این کار با توجه به شرایط ماشین و نیاز به شرایط صحیح کارکرد و تعمیرات دارد. بدین ترتیب بازرسی ها بهره برداری را در مقابل مدت از کار افتادگی های مشخص شده و ضررهای همانند آن بر روی سایر اجزاء و قدرت خروجی حفاظت میکند.



ساعت بهره برداری معادل (EOH):

ساعت بهره برداری معادل برای ارزیابی واحد در بهره برداری با بار پایه در تمام سال کمترین تعداد توقف بجز زمان از کار افتادگی واحد برای تعمیرات بر نامه ریزی شده میباشد. برای تعمیرات عادی فاصله زمانی بازرسی ها به صورت زیر است:

• هر ۱۰۰ EOH (اما در کمترین مقدار در ماه)

• هر ۲۰۰۰ EOH

• هر ۴۰۰۰ EOH

• بعد از مدت از کار افتادگی بیش از یک ماه

اگر دستگاه در بهره برداری باریپوسته قرار دارد فاصله این بازرسی ها معین میباشد. در این مدت بازرسی هایی که در حین بهره برداری از دستگاه قابل انجام می باشد قابل اجرا است.

بازرسی های قابل اجرا در حین بهره برداری نرمال ارزیابی فرسایش سیستم تحت شرایط بهره برداری می باشد.

تعمیرات و بازرسی ها بعد از توقف متفاوت و مخصوص به همین حالت است.

اجرا بازرسی ها در دستگاه در حین توقف باید طبق زمان برنامه ریزی شده در فاصله چند هفته باشد.

برنامه ریزی فاصله زمانی فعالیت های تعمیراتی مطابق زیر است.

هر ۸۰۰۰ EOH بازرسی های کوتاه:

این بازرسی قسمتی شامل دسترسی به اجزاء ماشین و بازرسی بصری میباشد.

هر ۳۳۰۰۰ EOH یک بازرسی کلی و بزرگ باید صورت گیرد

بازرسی های کلی در هر ۶۶۰۰۰ EOH:

این بازرسی ها شامل:

۱. باز کردن کامل قسمت های ورودی و خروجی

۲. تست کامل همه طبقات

۳. تست غیر مخرب و تخمین تعمیرات وابسته به شرایط

۴. چک لیست و ارزیابی نتایج

برای تمام فعالیت های بازرسی و تعمیراتی پر کردن چک لیست های آزمایش و عکسبرداری جزء اهداف اصلی میباشد تا با بازرسی یا فعالیتها و تعمیرات بعدی مقایسه شود و گزارشی از تمام اجزاء توربین گاز و تجهیزات جانبی آن تهیه شود.

از مقایسه گزارش فعالیتها و نتایج اغلب برای فهرست کردن زمان خرابی ها استفاده میشود.



ارزیابی نمودارها و ارائه اسناد بازرسی و فعالیتهای تعمیراتی قبلی به ما این امکان را میدهد تا نقص برنامه ها و ناگزیر بودن به تغییرات زود هنگام را به ما میدهد. اندازه گیری ها و اصلاح اشکالات به صورت پیوسته میتواند منجر به کم شدن مدت توقف واحد و هزینه های تعمیرات و افزایش قابلیت های بهره برداری از دستگاه میشود.

تعمیرات عمومی:

تمام فعالیتهای تعمیرات عادی که بتوانند برای یک دستگاه و سیستمهای کمکی اجراء شوند شامل فعالیتهایی است که در هر دو حالت کارکرد و توقف میتواند بدون وجود مانع به تجهیزات دسترسی پیدا کرد. نگهداری شامل در نظر گرفتن شرایط ویژه واحد برای تعمیرات مطابق توضیحات بدست آمده از بازرسی و بدست آوردن فاصله بازرسی ها که عبارتند از:

• هر ۱۰۰ EOH اما حداقل ماهی یکبار

• هر ۲۰۰۰ EOH

• هر ۴۰۰۰ EOH

بازرسی های تعمیر و نگهداری :

بازرسی و تعمیرات دستگاه ه به سه گروه کلی تقسیم می شود :

- بازرسی های دوره ای
- بازرسی های مسیر گاز داغ
- بازرسی های اساسی
- که عموماً با "m" نمایش داده می شود
- که عموماً با "HGPI" نمایش داده می شود
- که عموماً با "M" نمایش داده می شود

در نظر گرفتن وضعیت دستگاه و بازرسی دوره ای قبل از اولین تعمیرات کلی می تواند با موافقت مشتری تصمیم صحیحی باشد .

در زمان فعالیتهای نگهداری و بازرسی جزئی دستگاه نیازی به تعویض آیتیم های اصلی نمی باشد.

در بازرسی ها به دنبال یافتن عیوبی مانند ترکها در فلزاتی که در مرز ها و سطوح صاف قرار دارد می باشیم .

این تعمیرات در کاتالوگهای بازرسی مطرح شده است . در این مورد بهره برداری با حداکثر بار و یا بارهای متوسط دوره های زمانی مکرر بخصوص در پایان هفته ها وجود دارد که دستگاه بیش از یک روز متوقف شود این توقف برای بازرسی های منظم این امکان را به ما میدهد که بهره برداری بدون اشکال انجام شود. فاصله بازرسی ها برای ماشینها هر ۴۰۰۰ EOH توصیه شده است . اگر واحد فقط برای تولید برق باشد بازرسی ها در



فاصله هر EOH ۲۰۰۰ توصیه شده است. اگر واحد فقط برای تولید برق نباشد و یا کارخانه‌هایی که با تولید پیوسته بهره‌برداری می‌شوند حالت ایده‌آل برای تعمیرات ثابت می‌باشد
این شیوه بهره‌برداری شامل خرابی کمتر آیت‌های با کمتر شدن فاکتور خرابی سیکل خواهد شد. در این مورد فاصله بازرسی‌ها می‌تواند بعد از مشورت بین بهره‌بردار و سازنده به یک سال یا EOH ۸۰۰۰ برسد.
برای افزایش فاصله بین بازرسی‌ها باید برای یک بهره‌برداری مطمئن بهره‌بردار و سازنده‌دستگاه با تجربیات در این زمینه به توافق می‌رسند.

برای افزایش فاصله بازرسی‌ها بیش از EOH ۸۰۰۰ باید شرایط زیر برقرار باشد:

- موجود بودن اطلاعات تعویض شامل گزارشات ماهانه عملکرد دستگاه، گزارشات بهره‌برداری و رخ ندادن اشکال در مدت بهره‌برداری

شرط لازم برای ایجاد گزارشات تکنیکی اصلاح شده (TISL); بدست آوردن نتایج مفید از بازرسی‌های بصری و بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز و توضیحات بهره‌بردارهای ماهرمیباشد. (نیکجو، ۸۱)

بازرسی اجزا و قسمت‌های اصلی:

برای انجام بازرسی اجزا و قسمت‌های اصلی باید تمام فعالیت‌های بازرسی‌های جزئی اجرا شود بعلاوه:

- جدا کردن قطعات جدا شونده در صورت نیاز، لوله‌های اتصالات محوری
- چک کردن سالانه لقی‌ها و چک کردن لقی‌های محوری در صورت نیاز
- باز کردن پوسته اصلی دستگاه و بازرسی‌های بصری سطوح اتصال
- بازرسی مشعلها، محفظه احتراق «آه» [در صورت وجود]
- دمونتاز ماشینهای اندازه‌گیری و تنظیم بازرسی دمونتاز اتصالات، دمونتاز اتاچک‌های بازرسی
- انجام تمام چک‌های قبل از راه‌اندازی
- راه‌اندازی دستگاه، چک کردن تمام پارامترهای بهره‌برداری و مقایسه جزئیات با مقادیر ثبت شده در شرایط بهره‌برداری (شرایط بهره‌برداری)

بازرسی کلی:

تعمیرات و بازرسی شامل تمام فعالیت‌های بازرسی‌های جزئی و علاوه بر آنها فعالیت‌های زیر نیز انجام می‌گردد:

- خاموش کردن دستگاه و خنک کردن آن (در صورت نیاز و با توجه به چگونگی راه‌اندازی)
- آنالیز فیزیکی، شیمیایی و روغن‌روغنکاری
- کالیبراسیون تجهیزات
- ثبت عملکرد پارامترها



- چک کردن لقی های محوری
- باز کردن خروجی های پوسته اصلیه محافظه احتراق بازرسی تجهیزات محوری و سطوح اتصال
- بازرسی آبنده ها و یاتاقانها و سطوح تماس
- برداشتن نیمه بالایی حلقه مرکزی بازرسی تمام سطوح و چک کردن لقی ها
- ودمونتاژ اجزای فرعی (در صورت نیاز)
- بازرسی Vane ها و پره های توربین کمپرسور (روکش دادن مجدد غیر مستقیم)
- بازرسی (در صورت نیاز) دیسکها و پله های محور و کوپلینگها و مسیر هوای خنک کن
- بازرسی سطوح یاتاقان ها
- بازرسی محافظه احتراق
- بازرسی پوسته داخل یدستگاه
- بازرسی مرکزیت محور
- بازرسی مسیرهای ورود و خروج روغن،واشرها، محافظ ها وهمراستا بودن شیارها و مسیر روغن
- بازرسی چرخش روان چرخ دنده ها
- بازرسی سیستم روغن، کنترل پمپ ها و فیلترها
- بازرسی شیرها و محرکها
- بازرسی تجهیزات کنترل و حفاظت
- بازرسی اجزا الکتریکی
- اندازه گیری و تنظیم و هم محوری اتصالات، لوله ها و عایقها
- ثبت تمام تنظیمات و تجهیزات یدکی استفاده شده
- راه اندازی ماشین
- چک کردن و ثبت عملکرد پارامترها بعد از بازرسی و آنالیز نتایج

اطلاعات عمومی بازرسی اساسی:

طبق توضیحات گفته در زمان برنامه ریزی تعمیرات دستگاه جزء مهمترین مسائل می باشد. موضوع اساسی بعدی اجزای فلزی است که برای عمر محدودی طراحی شده اند می باشد. در طراحی خزش یک راندمان مورد قبول می دهد که در طراحی مکانیکی این اجزا یک تنش خزش پایه را می دهد.

در شکل ۳ منحنی تنشهای خزش را برحسب ساعات بهره برداری همراه با توضیحات برای بازسازی می دهد.



اندازه گیری های محافظتی اضافی برای اطمینان از تحمل قطعات یدکی این اجزا در شرایط بهره برداری ضروری است. از لایه های محافظ نیز به عنوان لایه فدا شونده در برابر عامل حفاظت شده استفاده می شود و همچنین باید عمر قطعه در نظر گرفته شده ترمیم شود.

عموما فاصله زمانی بازرسی اجزای اصلی هر EOH ۲۵۰۰۰ برای دستگاه هایی است که اطمینان از خراب نبودن آن داریم می باشد. با این معیار زمان بازرسی بعدی نامعلوم خواهد بود. در اتصالات با قابلیت انبساط فاصله بازرسی ها EOH ۳۳۰۰۰ می باشد. که معیار قطعی در این مورد کم نشدن قابلیت اطمینان بهره برداری در فاصله زمانی ذکر شده می باشد. اجزای متحرک ردیف اول و دوم نیاز به بازسازی زیادی ندارند و جزء قطعات تعویض شونده می باشد. در واقع قبول کردن استراتژی های تعمیرات وابسته به کاهش هزینه های تعمیرات و افزایش قابلیت اطمینان می باشد.

(بازرسی های اورهال بعد از دوره های EOH ۱۰۰۰۰۰ انجام می گردد)

خستگی و خزش هر دو خرابی هایی هستند که توسط جریان گاز داغ افزایش می یابند در بازرسی کلی هدف کمترین تنش در آیتم هار می باشد تا بازرسی بهینه باشد. تمام آیتم های اگر تا فاصله بازرسی کلی بعدی فراتر از ۳۰۰۰ مرتبه استارت شود توسط تستهای غیر مخرب باید بررسی شوند.

در زمان بازرسی های اساسی تمام آیتم های دستگاه برای عدم وجود تغییر شکل و فرسایش و ترک و رسوب و خوردگی چک می شوند. اگر این خرابی ها به سرعت شناخته و حذف نشوند می توانند خرابی زیادی ایجاد کنند. بعلاوه در زمان بازرسی اجزای اصلی یا بازرسی اساسی، بعضی از اجزا آسیب می بینند که برای افزایش قدرت و راندمان باید این اجزا بادقت کنترل شوند.

فاصله بازرسی های اجزای اصلی و بازرسی های اساسی :

اولین بازرسی اجزای اصلی بعد از هر EOH ۳۳۰۰۰ اجرا می شود. حتی برای یک واحد که خیلی کم بهره برداری می شود فاصله بازرسی اجزای اصلی نمی تواند از ۸_۶ سال فراتر رود. بازرسی اساسی در دو برابر فاصله زمانی بازرسی اجزای اصلی یعنی هر EOH ۶۶۰۰۰ انجام می شود.

واحد هایی که همیشه در حال بهره برداری هستند هر ۸ سال بازرسی کلی می شوند. فاصله بازرسی اساسی واحد هایی که بندرت بهره برداری می شوند می تواند هر ۱۶_۱۲ سال انجام شود.

فراهم کردن اندازه گیری های مناسب می تواند از خوردگی پیشگیری کند. در اولین بازرسی کلی که هر EOH ۶۶۰۰۰ انجام می شود پره های کمپرسور روکش مجدد می شوند.



تعمیرات قطعات اصلی :

برنامه تعمیر و تعویض آیتم های دستگاه با هدف آسان کردن بودجه بستن برای تعویض برای تعویض قطعات داده شده است. توجه کنید که این ارقام تقریبی و براساس ارزیابی های مهندسی رفتار تجهیزات در زمان بهره برداری واحد می باشد. (نیکجو، ۱۳۷۹)

شرایط لازم برای ثبت و ارزیابی در حین نگهداری و بهره برداری مطابق زیر است :

- خصوصیات طراحی ورودی و خروجی سوخت
- بهره برداری مطابق دستورات سازنده
- نگهداری ROUTINE و بازرسی ها و اجرا و بازرسی های اساسی براساس خطوط راهنما و دستورات سازنده

فقط اطلاعات واقعی از بازرسی ها و بازرسی های اساسی همراه با آزمایشات بهره برداری برای پیش بینی فاصله زمانی تعمیرات و تعویض بدست می آید .

عموما بازسازی واحد با تعویض آیتم های اصلی سبب افزایش راندمان و خروجی و سایر تواناییهای بهره برداری واحد می شود .

- یافته های بازرسی های قبلی
- تغییرات تکنیکی مورد نیاز
- در دسترس بودن قطعات یدکی
- احتیاجات پرسنل ویژه
- تمرینات مناسب و تعلیم دادن تکنسین ها و پرسنل بدون مهارت
- جرثقیل با قدرت کافی
- وسایل , وسایل ویژه , تجهیزات و تجهیزات ویژه ضروری
- برنامه ریزی کاری

اگر این شرایط حاصل شد و اگر تعویض روکش پره های توربین به عنوان یک تمرین روزانه برای کم کردن زمان بازسازی انجام شود زمان از کار افتادگی واحد برای بازرسی های اساسی به هشت هفته و برای بازرسی مسیر گاز داغ به پنج هفته و نیم دست یافت .

افزایش عمر اجزای اصلی دستگاه :

فاکتورهایی که برای افزایش عمر دستگاه باید در نظر گرفته شود از دو نشانه مختلف شناخته می شود :

۱. ابتدا تشخیص میزان فرسایش اجزاء
۲. ثانیاً تشخیص میزان کاهش کیفیت پارامترها



تشخیص میزان فرسایش اجزاء :

همراه با جدول بندی فعالیتهای نرمال برای بازرسی اساسی در EOH ۱۰۰۰۰۰ (ساعات بهره برداری معادل) که در زمان سومین بازرسی اساسی واقع می شود . در مدت عمر دستگاه باید جداول گوناگونی که کاهش عمر اجزاء ناشی از فرسایش خوردگی دمای بالا ، اکسیداسیون خزش و خستگی که در طراحی محدوده مجازی دارند (نیکجو، ۱۳۸۱).

شاخص های کاهش کیفیت :

شاخص های کاهش کیفیت تاثیر به سزایی در کاهش راندمان و مطلوبیت محصول واحدهای صنعتی دارا می باشند که عمده ترین آنها در اثر بروز موارد زیر رخ می دهد:

- کاهش کیفیت روغن کاری،
- کنترل نکردن دما،

نقش برنامه ریزی در تعمیرات اساسی:

برنامه زیری در پروژه های تعمیراتی عبارت است از تعیین و رعایت اجرای فعالیتهای مورد لزوم وزمانبندی هر یک از آنها با رعایت تقدم و تأخر منطقی بین آنها به نحوی که با حداکثر بهره برداری از منابع موجود شامل نیروی انسانی ابزار و ماشین آلات و منابع مالی بتوان در زمان تعیین شده وبا کمترین هزینه به هدف نهایی دست یافت قبل از شروع تعمیرات تجزیه تحلیلها و پیش بین های لازم را باید بعمل آورد که اهم موارد عبارتند از :

- ۱- تعیین وتأمین لوازم یدکی و مصرفی مورد نیاز
 - ۲- بررسی نیروهای متخصص مورد نیاز
 - ۳- تعیین و تأمین ابزار و لوازم مخصوص کار
 - ۴- برنامه زمانبندی اجرای کار
 - ۵- تهیه و ارائه بموقع فرمهای مربوطه و صورت وضعیتها در طول اجرای پروژه
- تعمیرات اساسی (Major Overhaul) یکی از تعمیرات دوره ای توربین های گازی میباشد که بر اساس دستورالعمل سازنده پس از ۴۸۰۰۰ ساعت کار معادل واحد انجام می گیرد.

نتیجه گیری:

با توجه به مطالب گفته شده اجرای میریت تعمیرات دوره ای در واحدهای صنعتی و شبکه های توزیع برق ، آب و جمع آوری فاضلاب می تواند نتایج زیر را به دنبال داشته باشد:



- حذف و یا کاهش تاثیر شاخصه های کاهش کیفیت
- افزایش عمر اجزای اصلی دستگاه
- تشخیص میزان فرسایش اجزاء

مراجع:

- نیکجو.ع، پروژه قابلیت اطمینان تاسیسات ثابت نیروگاه بعثت، ۱۳۸۱
- نوری،ع، روش های نگهداری و تعمیرات در صنعت، آذر ۱۳۸۴، ماهنامه بین المللی نفت و انرژی
- عبدالحسین نیکجو، احداث نیروگاه یا احیاء واحدهای فرسوده، ۱۳۸۳، شانزدهمین کنفرانس بین المللی برق
- عبدالحسین نیکجو، قابلیت اطمینان توصیفی، ۱۳۸۳،
- قابلیت اطمینان توصیفی مولدها، ۱۳۷۹، ع. نیکجو

John M., Gross, Fundamentals of Preventive Maintenance , ۲۰۰۲, Business & Economics,

Jae K Shim, Joel G Siegel, Operations Management , 1999 ,Business & Economics



مطالعه موردی و متدولوژی تعیین وضعیت و برآورد عمر باقیمانده اجزاء یک بویلر ۴۴۰ مگاواتی

اسماعیل پورسعیدی^۸ - علی احمدی^۹ - علیرضا رضوی^{۱۰}

Email: epsaeidi@mail.znu.ac.ir

۱- زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی

۱، ۲ و ۳- کرج- کیلومتر ۷ جاده ملارد- شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها- ص- پ ۱۱۳۷-۳۱۵۸۵

واژه های کلیدی: عمر باقیمانده، تجهیزات نیروگاهی و متدولوژی

چکیده

امروزه بهره برداری مطمئن و پایدار از نیروگاهها نیازمند داشتن تصویری روشن از وضعیت و عمر باقیمانده قطعات می باشد. محققین و دانشمندان بسیاری در کشورهای مختلف جهان در مراکز تحقیقاتی شرکت های بزرگ سازنده تجهیزات نیروگاهی یا دانشگاهی مشغول فعالیت در این زمینه می باشند و حساسیت و پیچیدگی آن به قدری است که از آن به عنوان موضوع فناوری عمر باقیمانده یاد می کنند. اهمیت تخمین عمر باقیمانده به خاطر مسائل اقتصادی، طولانی بودن زمان ساخت نیروگاههای جدید، مباحث زیست محیطی و افزایش دانش و آگاهی درباره رفتار و خواص مواد می باشد که برای انجام آن اطلاعات، پارامترها و ابزارهای مختلفی مورد نیاز می باشد. برآورد عمر باقیمانده تجهیزات نیروگاهی بر اساس روشهای آزمایشگاهی و محاسباتی انجام می شود که در این مقاله عوامل کاهش عمر شامل خزش، خستگی (سیکل بالادپایین)، اندرکنش خزش - خستگی، تردی تمپر، تردی هیدروژنی و خوردگی مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین فلوجارت روشهای آزمایشگاهی و محاسباتی ارائه شده است. در آخر مقاله مطالعه موردی برآورد عمر باقیمانده یک واحد نیروگاهی ۴۴۰ مگاواتی ارائه شده است.

۱- مقدمه

از آنجا که بخش مهمی از تاسیسات صنعت برق کشور، در شرف رسیدن به عمر طراحی و یا حتی فراتر از آن می باشند، جهت بهره برداری مطمئن و پایدار از این تاسیسات، داشتن تصویری از عمر مفید آنها ضروری به نظر می رسد. امروزه در کشورهای صنعتی جهان بویژه آمریکا، انگلیس، کانادا، آلمان و ایتالیا فناوری ارزیابی عمر باقیمانده از اهمیت بسزائی برخوردار می باشد. بحث عمر باقیمانده تجهیزات نیروگاهی به عنوان یک محور در برنامه ریزی کلان این کشورها به دلیل جنبه های اقتصادی و سیاسی آن مطرح می باشد و محققین و دانشمندان بسیاری در کشورهای مختلف جهان در مراکز تحقیقاتی شرکت های بزرگ سازنده تجهیزات نیروگاهی یا مراکز تحقیقات دانشگاهی مشغول فعالیت در این زمینه می باشند و حساسیت و پیچیدگی آن به قدری است که از آن به عنوان یک موضوع فناوری برآورد عمر باقیمانده نه یک موضوع آکادمیک و یا یک فعالیت تعمیراتی محض یاد می کنند [۱].

۲- پارامترهای ارزیابی عمر باقیمانده

هدف از تخمین عمر باقیمانده حداکثر استفاده ممکن از عمر مفید قطعه می باشد، که در واقع:

عمر باقیمانده = عمر طراحی - عمر مفید

^۸ - دکترای مکانیک

^۹ - کارشناس ارشد مکانیک

^{۱۰} - کارشناس ارشد متالورژی



اهمیت تخمین عمر باقیمانده به خاطر مسائل اقتصادی، طولانی بودن زمان ساخت نیروگاههای جدید، مباحث زیست محیطی و افزایش دانش و آگاهی درباره رفتار و خواص مواد می باشد. با مطالعه منابع مختلف، کارهای انجام شده و متدولوژیهای استفاده شده توسط برخی سازندگان و مراکز تحقیقاتی پارامترها و ابزارهای زیر برای انجام دقیق و موفقیت آمیز برآورد عمر باقیمانده لازم و اساسی می باشد [۱].

- امکان وجود بانکهای اطلاعاتی قوی (تاریخچه عملکرد واحد، اطلاعات طراحی، مشخصات مکانیکی و متالورژی اجزاء)
- امکان دسترسی به دستگاههای آزمایشگاهی و نرم افزارها و کدهای محاسباتی قوی
- امکان انجام آزمایشهای مخرب و غیرمخرب (کشش، ضربه، خزش، خستگی، شکست، رپلیکا، متالوگرافی، سختی سنجی، ضخامت سنجی، اندازه گیری ابعادی، R.T و U.T، M.T، P.T)
- نیروی انسانی متخصص

۳ - عوامل تخریب قطعات نیروگاهی

عدم توان قطعه یا واحد در انجام وظیفه ای که براساس طراحی بعهده دارد را تخریب یا از کارافتادگی می گویند. عوامل از کار افتادگی قطعات نیروگاهی شامل خزش، خستگی (سیکل بالاوپایین)، اندرکنش خزش-خستگی، تردی تمپر، تردی هیدروژنی و خوردگی می باشند [۲].

۳-۱- خزش

شکل منحنی خزش به وسیله چند عامل شامل سخت شوندگی کرنشی، فرآیندهای نرم شدن قطعه نظیر بازبلوری، نرم شوندگی کرنشی، رسوب زایی بعد از مدت زمان طولانی کارکرد و همچنین فرآیندهای آسیب نظیر وجود حفره، ترک و پدیده لاغری در قطعه تعیین می گردد. از این پارامترها سخت شوندگی کرنشی، نرخ کرنش را کاهش ولی بقیه سعی دارند نرخ کرنش را افزایش دهند. خزش در سه مرحله اتفاق می افتد که در مرحله اول سخت شوندگی کرنشی صورت گرفته و مقاومت ماده در برابر تغییر شکل با گذشت زمان افزایش می یابد و در نتیجه نرخ کرنش در این مرحله به طور پیوسته کاهش می یابد تا اینکه به کمترین مقدار خود در انتهای مرحله اول می رسد. در مرحله دوم خزش بین سخت شوندگی کرنشی و نرم شدن حرارتی، توازن ایجاد می شود و در نتیجه نرخ کرنش در طول این مرحله ثابت باقی می ماند و به عنوان نرخ کرنشی مینیمم شناخته می شود. در نهایت مرحله سوم، کاهش مؤثری در سطح مقطع به علت پدیده لاغری یا تشکیل حفره های داخلی بوجود می آید. این مرحله اغلب با تغییرات متالورژیکی مانند درشت شدن ذرات رسوب، باز بلوری یا تغییرات نفوذی در فازهای موجود همراه است (شکل ۱).

هر گاه تست خزش در دمای پائین انجام شود، فرآیندهای نرم شوندگی و بازیابی تأثیری نخواهند داشت و در واقع مرحله دوم حذف خواهد شد. در این حالت توازن بین سخت شوندگی و فرآیند آسیب شکل منحنی خزش را تعیین می کنند. تحت بار ثابت هر سه مرحله خزش صورت می گیرد ولی تحت تنش ثابت، احتمال دارد مرحله دوم خزش ایجاد نشود و کل عمر قطعه در مرحله اول خزش صرف شود و نهایتاً شکست بین دانه ای روی دهد. در مواد نرم، نرخ کرنشی مرحله دوم خیلی بالا بوده و بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی گسیختگی روی می دهد در حالت دما بالا مقدار نرمی در هنگام گسیختگی خیلی بیشتر می باشد. مواد ترد معمولاً استحکام خزشی بالایی دارند و نرخ کرنش در مرحله دوم خیلی کم بوده و مقدار کرنش کمی بعد از شروع مرحله سوم تا شکست ایجاد می شود. شکل منحنی آن مشابه منحنی هایی است که در دما و تنش پائین بوجود می آیند. برای چنین موادی منحنی های خزشی حاصل از آزمایش تحت بار ثابت و تحت تنش ثابت تقریباً مشابه می باشند (شکل ۲).



خزش دمای بالا در بویلر معمولاً از نقاط با جریان نامناسب خنک کننده یا نقاطی که به انحاء مختلف دمای لوله ها بیش از حد معمول افزایش می یابد و یا محل‌هایی که خواص ماده پائین تر از شرایط کاری است، آغاز می شود. این شرایط نامناسب می تواند در اثر مواردی مانند اختلال در جریان خنک کننده موجود در لوله در اثر رسوب ذرات ناخواسته، کاهش قابلیت انتقال حرارت در اثر رسوبات اکسیدی یا رسوبات شیمیایی ایجاد شده در سطح داخلی لوله، احتراق نامنظم مشعل ها، بند آمدن یا مجرای شدن جریان گاز داخل بویلر، عملکرد لوله در دمایی بالاتر از دمای مجاز و افزایش تنش در اثر باریک شدن جداره بوجود آید. برای جلوگیری از اینچنین تخریبهای خزشی دمای بالا حفظ مقدار تنش و درجه حرارت کار لوله و حد توانایی فلز ضروری می باشد.

۳ - ۲ - خستگی

اجزائی که در دماهای بالا کار می کنند، تحت تغییر شرایط در ابتداء و انتهای کارکرد یا در طول کارکرد باعث ایجاد گرادیانهای حرارتی گذرا می شوند. اگر این حالت‌های گذرا تکرار شوند، انبساط حرارتی در طول این حالت‌های گذرا (ناپایدار) باعث ایجاد تنش سیکی می گردد. مقدار آسیب خستگی به طبیعت و فرکانس حالت گذرا و گرادیان حرارتی در اجزاء بستگی دارد. همچنین اجزایی که تحت تنشهای حرارتی قرار دارند، عموماً در محدوده خزش کار می کنند، بنابر این آسیب حاصل از خزش و خستگی هر دو با هم در نظر گرفته می شوند.

۳ - ۳ - پدیده تردی تمپر

تردی تمپر غالباً در فولادهای آلیاژی به هنگام حرارت دادن یا سرد شدن آهسته در پروسه تولید و قرار گرفتن در شرایط سرویس دهی در محدوده دمایی خاص ۳۵۰-۵۵۰ درجه سانتیگراد رخ می دهد. این پدیده که با حضور ناخالصیهایی همچون قلع، آرسنیک، آنتیموان، گوگرد و ئیدروژن ترغیب می شود باعث افزایش دمای تبدیل نرمی به تردی (FATT) می گردد که به تبع آن مدل شکست را به حالت ترد سوق می دهد.

۳ - ۴ - پدیده تردی هیدروژنی

هیدروژن که عامل تردی و در نتیجه اثرات مخرب بر خواص مکانیکی فولادها می گردد ممکن است در حین پروسه تولید و یا در محیط سرویس دهی در اثر تماس با عواملی همچون رطوبت، روانکارها، چربیها و مواد هیدروکربنی بداخل فولاد نفوذ کرده و با تبدیل آن از حالت انمی به مولکولی و اعمال فشار قابل توجه ناشی از این استحال، منجر به کاهش استحکام ماده و در نهایت ایجاد ترک و اشاعه آن می شود. از مهمترین عوارض این پدیده، کاهش استحکام کششی و ضربه ای می باشد که منجر به تخریب قطعه می گردد.

۳ - ۵ - پدیده خوردگی

بطور کلی خوردگی به دو صورت خوردگی سمت آتش (خارج لوله) و خوردگی سمت آب یا بخار (داخل لوله) دیده می شود. خوردگی سمت آتش ناشی از خاکستر سوخته‌های نفتی (مازوت - گازوئیل) بدلیل حضور عواملی مانند وانادیم، سدیم و گوگرد در سوخت می باشد، که با تشکیل اکسید وانادیم، گوگرد و سدیم ترکیباتی با دمای ذوب کم را به وجود می آورند. در شرایط کاری لوله های سوپر هیترو ری هیترو در اثر واکنش ترکیبات سدیم و وانادیم مذاب با لایه اکسیدی حفاظت کننده سطح فولادی لوله ها، خوردگی شدیدی آغاز می شود و می تواند لایه ی مگنتیتی ایجاد شده در سطح را از بین ببرد. خوردگی خاکستر سوخت را می توان با روشهایی مانند کاهش هوای اضافی احتراق، استفاده از افزودنیهای سوخت و دود زداها و همچنین استفاده از لوله های آلیاژی با کرم بیشتر کاهش داد. خوردگی سمت بخار درنواحی سوپر هیترو ری هیترو نیز با تشکیل یا تخریب لایه محافظ اکسیدی اتفاق می افتد.



خوردگی سمت آب در واتروالها و اکونومایزرها با رسوب گذاری از سمت داخل لوله ها باعث فعال شدن مکانیزمهای مختلف خوردگی و کاهش راندمان بویلر می شود. منشاء اکثر از کارافتادگیهای بویلر همین رسوبگذاری از سمت داخلی در نواحی اکونومایزر و واتروال است. تنها عامل که سبب محافظت لوله های واتروال از سمت آب می شود. مقاومت به خوردگی لوله های واتروال به PH آب، لایه محافظ Fe_3O_4 و مقدار آلودگیها آب تغذیه بستگی دارد. خوردگیهای داخلی لوله های واتروالها در سمت شعله بیشتر از سمت آب یا بخار می باشد. آگاهی از تخریبهای ایجاد شده در بویلر می تواند نقش مهمی در کارایی، راندمان و قابلیت اعتماد یک نیروگاه داشته باشد. شناسایی و تشریح عوامل تخریب باعث می شود راه حلهای اصلاحی آنها و روند کارآینده نیروگاه بخوبی مشخص شده و تعداد تخریب ها کاهش یابد. مکانیزمهای تخریب در اجزای مختلف توربین و بویلر در جدول ۱ ارائه شده است.

۴ - مبانی روشهای برآورد عمر باقیمانده

عوامل تخریب (خزش، خستگی و...) باعث ایجاد ترک در قطعه می گردند و حضور ترک یا رشد آن باعث از کار افتادگی یا شکست قطعه خواهد شد. پارامترهای مهم در این زمینه شامل جوانه زنی، رشد و اندازه بحرانی ترک می باشند. جوانه زنی ترکهای میکروسکوپی در طول زمان بهم پیوسته شده و تولید ترکهای ماکروسکوپی می نماید. تغییرات زیاد دما، تنش و مواد نامناسب از عوامل موثر رشد ترکهای ایجاد شده تا رسیدن به مقدار طول بحرانی و در پی آن شکست قطعه می باشد. استفاده از تجربیات شرکتیهای بزرگ مانند EPRI, BABCOCK, ALSTHOM, ABB و STEIN در برآورد عمر باقیمانده انجام این مهم را آسان می کند. از نیازمندیهای اولیه می توان به تحلیل سیستم و تعیین موقعیتهای بحرانی (بازدید از محل) و تهیه اطلاعات (بهره برداری، خواص مواد و مشخصات طراحی) اشاره نمود. برآورد عمر باقیمانده براساس آزمایشها و محاسبات که تحت عنوان روشهای آزمایشگاهی و محاسباتی شناخته می شوند، انجام می گردد. اطلاعات ضروری مورد نیاز جهت برآورد عمر باقیمانده شامل اطلاعات ذیل می باشند.

- اطلاعات و مشخصات فنی طراحی
- دما و فشار طراحی و کاری و همچنین تعداد ساعات کارکرد
- تعداد استارت داغ، گرم و سرد و همچنین تعداد تریپها و توقفهای عادی
- ثبت اطلاعات از کارافتادگی ها و اطلاعات و موقعیتهای تعمیرات
- اطلاعات خستگی LCF، HCF، چقرمگی و مشخصات رشد ترک خزشی و خستگی
- اطلاعات Stress Rupture و Creep و همچنین اطلاعات برهمکنش خزش و خستگی

۴ - ۱ - روشهای آزمایشگاهی

روشهای آزمایشگاهی به دو روش آزمایشهای سایتی غیرمخرب در محل نیروگاه و آزمایشهای مخرب در محل آزمایشگاه می باشند. آزمایشهای سایتی شامل بازرسی چشمی، ضخامت سنجی، اندازه گیری ابعادی، سختی سنجی، رپلیکا و آنالیز شیمیایی می باشند. آزمایشهای مخرب با تهیه نمونه از نقاط مورد نظر و حساس جهت انجام آزمایشهای مورد نیاز آزمایشگاهی شامل آنالیز شیمیایی، سختی سنجی (ماکرو و میکرو)، متالوگرافی و در مواردی آزمایشهای کشش، خزش و خستگی انجام می شود. شکل ۳ فلوچارت روشهای آزمایشگاهی عمر باقیمانده را نشان می دهد.

۴ - ۲ - روشهای محاسباتی



از روشهای محاسباتی به منظور محاسبه عمر باقیمانده اجزاء استفاده می شود. اساس بیشتر روشهای محاسباتی استفاده از محاسبات تنش در تخمین عمر می باشد که برای محاسبه تنش از روشهای تحلیلی برای قطعات با شکل هندسی ساده استفاده می شود. برای محاسبات تنش قطعات با شکل هندسی پیچیده از نرم افزارهای اجزاء محدود نظیر Abaqus, NASTARAN, Ansys استفاده می شود. همچنین از روشهای ساده شده مانند Gloss Method و R5 برای محاسبه تنش خزشی متوسط و سپس استفاده از روشهایی نظیر Time Temperature عمر باقیمانده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. شکل ۴ فلوجارت بر آورد عمر باقیمانده بر اساس روشهای محاسباتی را نشان می دهد.

۳-۴- مطالعه موردی

یک مطالعه موردی به منظور ارزیابی وضعیت اجزای مهم و بحرانی بویلر یک واحد ۴۴۰ مگاواتی با قریب به ۱۵۰ هزار ساعت کار کرد که تحت بررسیها و آزمایشات مختلف قرار گرفته است ارائه گردیده است. برخی از این فعالیتهای آزمایشگاهی صرفاً در محل نیروگاه (نظیر رپلیکا، ضخامت سنجی و سختی سنجی غیر مخرب) و برخی از آنها در آزمایشگاه (متالوگرافی، ضخامت سنجی و سختی سنجی بر روی لوله های اخذ شده از بویلر) انجام گرفته است. در این مقاله خلاصه ای از نتایج بررسیهای انجام شده بر روی لوله بخار اصلی و نمونه لوله های واتروال همراه با توضیحات و نتایج سایر اجزاء همراه با پیشنهادات مربوط در جداول ۳ و ۲ بطور خلاصه ارائه می گردد [۳].

۳-۴-۱- بررسی لوله بخار اصلی

نتایج حاصل از بررسیهای ساختاری به روش رپلیکا بر روی لوله بخار اصلی (Main steam pipe) در نواحی مستقیم لوله از لحاظ کیفیت ساختاری از وضعیت زوال یافته ای برخوردار است. مشاهده زوال نسبی در مورفولوژی تیغه ای مارتنزیتی، رویت توزیع تجمعی و گلبولی شکل ذرات کاربیدی بصورت پیوسته در مرزدانه ها دلایل بارزی از زوال وضعیت متالورژیکی قطعه از جنبه های ساختاری می باشد. لکن کیفیت این وضعیت در ناحیه خم و بویژه در محل جوشکاری شده در سطح نازلتری قرار دارد. بعنوان مثال محدوده سختی اندازه گیری شده در ناحیه خم بین ۲۲۵-۱۹۸HV متغیر بوده که در مقایسه با محدوده سختی ارائه شده در استانداردهای مربوطه (۲۶۵-۲۱۵HV) در حد پائین قرار دارد. این میزان کاهش ناچیز سختی را می توان در محل جوش نیز رویت نمود (جدول ۲). بدیهی است کاهش سختی را با عنایت به مشاهده ساختاری (بویژه در محل جوش) می توان به فعال بودن پدیده نرم شوندگی حرارتی (Thermal Softening) در طی مدت زمان سرویس دهی مرتبط نمود که بصورت توزیع تجمعی ذرات کاربیدی گلبولی شکل بویژه در مرزدانه ها بروز داده شده است (شکل ۵). همچنین تاثیر گذاری سیکل حرارتی جوش در نقاط یاد شده نیز یکی دیگر از دلایل کاهش سختی است.

لذا با توجه به ارزیابی حاصل از یافته های آزمایشگاهی فوق و با در نظر گرفتن ضرایب محافظه کارانه در محاسبات عمر باقیمانده که شامل در نظر گرفتن شرایط حاد سرویس دهی قطعه، در نظر گرفتن نواحی غیر تعادلی یا ناپایستار نظیر نواحی خم و جوشکاری شده که دارای پتانسیل بالقوه عیوب متالورژیکی (حفره دار شدن، تغییر فرم یا کشیدگی دانه ها و به تبع آن وجود تنشهای پسماند داخلی، رخداد پدیده کارسختی در حین خمکاری یا متاثر از سیکل حرارتی جوش، عوارض ناشی از نازک شدن جداره یا Thinning در نواحی خم شده، مستعد شدن به تردی ئیدروژنی و ترغیب ترکیدگی و...) می باشد، عمر باقیمانده این قطعه بیش از ۱۰۰۰۰ hr بر آورد می شود. لکن بدلیل انجام آزمایش بطور موضعی و عدم اطلاع کافی از وضعیت کلیه نقاط قطعه و از طرفی بدلیل اعمال بارهای خمشی ناشی از عدم تنظیم احتمالی ساپورتینگها ضروری است وضعیت پیشرفت زوال لوله مزبور در نقاط مختلف از نظر ضخامت، سختی و ساختاری در طی اورهال بعدی تحت آزمایش های کنترل کیفی لازم (رپلیکا - سختی سنجی و ضخامت سنجی) قرار گیرد. همچنین اکیدا توصیه می شود با توجه به شرایط سرویس دهی نسبتا حاد، این منطقه در نقاط مختلف



بویژه در نواحی جوشکاری شده (بدلیل مشاهده اثرات زوال بیشتر) تحت تستهای ترک یابی نظیر MPT یا PT قرا گیرد تا در صورت وجود ترکهای احتمالی نسبت به مرمت آن تصمیم گیری شود.

۴-۳-۲- بررسی لوله واتروال

بررسیهای متالوگرافی بر روی نمونه های اخذ شده از ناحیه واتروال که از دو قسمت فلز جوش و فلز پایه تهیه شده اند، بطور کلی حاکی از وجود آثار انعقاد نسبی مؤلفه های ساختاری بصورت تجزیه لایه های پرلیتی می باشد که شدت این زوال در نمونه های مربوط به ناحیه جوش بیشتر مشهود است. تشکیل لایه های اکسیدی کوهرننت در سطوح داخلی و لایه های نسبتاً غیر کوهرننت همراه با آثار محصولات احتراق در سطوح خارجی لوله ها (مقادیر کمی در جداول مربوطه بطور ارایه شده است) بوضوح قابل رویت است.

لکن تنها موارد قابل توجه در تصاویر مزبور وجود حفرات متعدد همراه باریزترکهایی در زیر لایه های اکسیدی (Sub-scale microcrack) می باشد که بصورت بین دانه ای در سطح داخلی نمونه های تهیه شده از قسمت جوش می باشد که بصورت بین دانه ای اشاعه یافته است. در مورد علل تشکیل ترکهای مزبور و اشاعه آن بصورت بین دانه ای اساساً می توان به پدیده گرافیت زایی در دماهای بیشتر از ۴۲۵ درجه سانتیگراد اشاره کرد (شکل ۶). رخداد این پدیده با وجود شواهدی همچون کارکرد لوله های مزبور بویژه در نواحی جوش در دماهای فراتر از ۴۲۵ درجه سانتی گراد برای مدت زمانهای طولانی و باتوجه به جنس متریال که از نوع فولادهای ساده کربنی میباشد کاملاً محرز است. البته به عوامل ترغیب کننده دیگری نظیر حضور تنشهای پسماند ناشی از سیکل حرارتی جوش، حضور تنشهای ناشی از گرادیان حرارتی در دو طرف لوله و تاثیر گذاری توام عوامل خوردنده نیز می توان اشاره کرد. بدیهی است پیشرفت پدیده گرافیت زایی بطور قابل توجهی منجر به تنزل کیفی خواص متالورژیکی و مکانیکی (سختی، استحکام، زوال ساختاری و...) و در نهایت باعث تسریع از کارافتادگی قطعه از طریق اشاعه سریع ترکها بویژه در مرزدانه ها می گردد. این امر لزوم کنترل کیفی این نواحی را بطور متوالی (بدلیل آسیب پذیری لوله ها) ضروری می سازد. همچنین رویت پدیده دکربورگی (زدودن کربن) با عمق ۶۵-۶۰ میکرون در نواحی خارجی و داخلی (در موقعیت پشت به شعله) بصورت توده های سفید رنگ بروز داده شده است. بدیهی است توده های سفید رنگ نمایانگر فقیر بودن این نواحی از کربن می باشد. این پدیده در محیطهای هیدروژن دار، بخار آب و اتمسفرهای اکسید کننده در دماهای بالا تشکیل و ترغیب می شود. شایان ذکر است تشکیل حفرات خوردگی متعدد با ابعاد متفاوت در نواحی داخلی و خارجی و پیشروی لایه های اکسیدی در داخل زمینه در سطح خارجی که نشان دهنده رخداد پدیده خوردگی باشد همراه با علائم ذکر شده در فوق (بویژه دکربورگی) حاکی از وضعیت رو به زوال لوله های مزبور از جنبه های خواص مکانیکی و متالورژیکی (سختی، استحکام و...) می باشد. از طرفی نتایج بررسیهای محاسباتی مبتنی بر ضخامت لایه اکسیدی که دال بر وجود رسوبات مزبور به میزان حداکثر ۱۴۰ میکرون می باشد که جرم رسوبات داخلی به مقدار 39.76 mg/Cm^2 می رسد. این مقدار بیانگر نزدیک بودن میزان رسوبات داخلی به حد بحرانی لازم جهت انجام عملیات اسیدشویی می باشد. بعنوان یک ارزیابی کلی می توان گفت که وضعیت لوله های واتروال بویژه در نمونه های اخذ شده از نواحی جوش به دلایل مطروحه فوق از وضعیت مطلوبی برخوردار نبوده لذا بر این اساس توصیه می شود در اولین فرصت ممکن با تکرار اندازه گیریها ترجیحاً در نقاط مختلف و انجام ارزیابیهای تحلیلی و آزمایشگاهی (و مقایسه آنها بانتهای قبلی) علاوه بر کنترل کیفی و کمی فاکتورهای زوال (نظیر میزان خوردگی های شیمیایی، سایش و بویژه روند اشاعه ریز ترکهای مزبور یا Subscale-microcracks، میزان افزایش رسوبات مزبور در سطح داخلی لوله ها نیز اندازه گیری شده و تصمیم جدی در ارتباط با وضعیت لوله ها اتخاذ شود.

۴-۴- نقاط ضعف روشهای برآورد عمر باقیمانده



از مهمترین نقاط ضعف روشهای برآورد عمر باقیمانده می توان به کمبود اطلاعات بهره برداری، کمبود اطلاعات فنی و متریالی، عدم ثبت حوادث رخ داده شده و روش رفع عیب آنها، مشکلات مربوط به تهیه نمونه از روی قطعه، ضعفهای مربوط در انجام آزمایشهای مخرب و غیر مخرب و در نهایت عدم اطمینان کامل از رفتار پیش بینی شده مواد بر مبنای اطلاعات آزمایشگاهی و همچنین ناهمگنی در خواص ماده اشاره نمود.

۵ - نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱- ضروری است مبحث برآورد عمر باقیمانده بعنوان یک محور اصلی در برنامه ریزی استراتژیک صنعت برق گنجانده شود.
- ۲- ضرورت تشکیل واحدهای تخصصی خصوصی یا دولتی جهت جمع آوری کلیه اطلاعات مربوط به عملکرد تجهیزات نیروگاهها در راستای برآورد عمر باقیمانده.
- ۳ - برگزاری سمینارهای آموزشی و تهیه جزوات لازم با هدف آشنا نمودن مسئولین نیروگاهها به اهمیت و حساس بودن نقش آنها در برآورد دقیق عمر باقیمانده.
- ۴- ایجاد ساختارهای مناسب بنحویکه بکارگیری توان علمی کشور در صورت نیاز خارج از کشور در راستای ایجاد شرایط لازم جهت بدست آوردن تکنولوژی عمر باقیمانده تجهیزات نیروگاهی در کشور مسیر گردد.

مراجع

۱ - اسماعیل پورسعیدی، علی احمدی، علیرضا رضوی " سمینار روشهای عمر باقیمانده قطعات نیروگاهی"، شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، خرداد ۱۳۸۴.

۲-Viswanathan R., "Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components" ASM International pub., ۱۹۸۳.

۳ - اسماعیل پورسعیدی، علی احمدی، علیرضا رضوی " گزارش نهایی عمر باقیمانده واحد چهار نیروگاه شهید سلیمی(نکا) "، شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، اسفند ۱۳۸۳.

جدول ۱ : مکانیزمهای تخریب در اجزای مختلف توربین و بویلر

مکانیزم تخریب	خزش	خستگی	خوردگی	سایش	شوک حرارتی	تشکیل رسوب	تردی
اجزای بویلر و توربین							
اجزای بویلر و توربین	-	×	×	-	×	×	-
هدر ورودی	-	×	×	-	×	×	-
هدر خروجی	-	×	×	×	-	×	-
درام	-	×	×	-	-	×	-
سوپر هیتر اولیه							
هدر ورودی	-	×	×	-	×	-	-
هدر خروجی	×	×	×	-	-	-	-
لوله های اتصالی	-	×	×	-	×	-	-
سوپر هیتر ثانویه							
هدر ورودی و خروجی	×	×	×	-	-	-	-
دی سوپر هیتر	×	×	-	-	×	-	-
سوپر هیتر نهایی / ری هیتر نهایی							
هدر ورودی و خروجی	×	×	×	-	-	-	-
توربین							



-	-	-	-	x	x	x	لوله های بخار اصلی
-	-	x	-	x	x	x	والوها و پوسته
x	-	x	-	x	x	x	روتور IP/LP
x	-	-	-	x	x	-	روتور HP

جدول ۲: بخشی از نتایج ارزیابی (آزمایش رپلیکاو محاسباتی) برای یک واحد ۴۴۰ مگاواتی

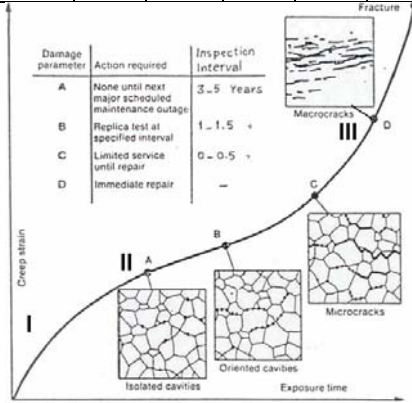
نام قطعه	موقعیت نمونه برداری (رپلیکا)	مشخصات اسمی و مکانی اجزای	مشخصات استاندارد اجزا		ارزیابی وضعیت از جنبه سختی			ارزیابی وضعیت از جنبه ساختاری			ارزیابی عمر باقیمانده از پارامترهای محاسباتی و متالوگرافیکی (خزشی)					
			کد استاندارد فولاد	سختی مرجع (HV)	نتایج اندازه گیری شده	ارزیابی نتایج سختی سنجی	ساختار مشاهده شده	کلاس زوال ساختاری	ارزیابی کیفی ساختاری	کسر عمر خزشی	عمر باقیمانده براساس تنش کاری (hr)					
Main steam pipe	before second bend	Xy-CrMo V1۲-۱	۲۱۵-۲۶۲	۲۱۵-۲۲۸	در محدوده استاندارد	M+C	B-C	نسبتا زوال یافته	۰.۴	۱۸۰۴۲۷						
	Bend area										۲۱۵-۲۶۲	۱۹۸-۲۲۵	انطباق	M+C	B-C	زوال یافته
	After bend(Weld)										۲۱۵-۲۶۲	۲۰۵-۲۵۸ ۲۰۳-۲۲۶	معقول سختی	M+C	C-D	زوال یافته
HTRH pipe	First bend	۱۰-CrMo۹-۱۰	۱۴-۱۸۷	۱۱۳-۱۶۳	کاهش ناچیز سختی	F+B+C	۲	زوال یافته	۰.۴	۱۴۳۳۱۸						
	After first bend										۱۴-۱۸۷	۱۳۰-۱۶۰ ۲۰۳-۲۲۶	معقول سختی	F+B+C B+GF+AF	۲ ۱-۲	زوال یافته
	After yth bend										۱۴-۱۸۷	۱۵۲-۱۷۲ ۱۴۱-۱۷۱	در محدوده استاندارد	F+B+C B+GF+C	۱-۲	نسبتا زوال یافته
RHY-inlet HDR	East side	۱۳CrMo۴۴	۱۳۸-۱۸۴	۱۳۹-۱۴۸	در محدوده استاندارد	F+P+C	۱-۲	نسبتا زوال یافته	۰.۴	۴۵۳۲۱۳						
RHY-outlet header	Left side	Xy-CrMoV ۱۲-۱	۲۱۵-۲۶۲	۲۱۲-۲۲۹	در محدوده استاندارد	M+C	B-C	نسبتا زوال یافته	۰.۴	۱۸۰۴۲۷۴						
	Middle point										۲۱۴-۲۲۰	انطباق معقول سختی	M+C	B-C	نسبتا زوال یافته	
	Right side										۱۹۷-۲۲۲	انطباق معقول سختی	M+C	B-C	نسبتا زوال یافته	
SH۴-outlet header	Left side	Xy-CrMoV ۱۲-۱	۲۱۵-۲۶۲	۲۰۵-۲۱۸	انطباق معقول سختی	M+C	C	زوال یافته	۰.۵	۷۵۳۵۶						
	middle point										۲۰۶-۲۳۳	انطباق معقول سختی	M+C	C	زوال یافته	
	Right side										۲۱۵-۲۲۵	در محدوده استاندارد	M+C	B-C	زوال یافته	
	Middle point										۲۱۸-۲۲۶	در محدوده استاندارد	M+C	B-C	زوال یافته	

جدول ۳: بخشی از نتایج ارزیابی نمونه لوله های بویلر یک واحد ۴۴۰ مگاواتی

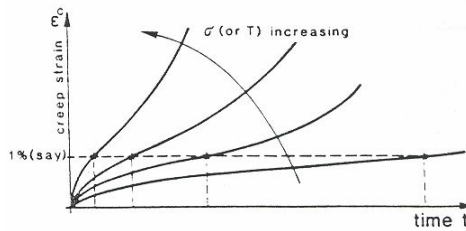
نام قطعه	موقعیت نمونه برداری	جنس نمونه	سختی سنجی (HV)			ساختار			حداقل ضخامت		کسر عمر خزشی	ملاحظات فنی/پیشنهادات	
			مرجع	اندازه گیری شده	ارزیابی نتایج	مشاهده شده	زوال ساختاری	ارزیابی کیفی	اندازه گیری شده	مورد نیاز			
SH۴(B.F.S)	Upper Se-inlet No.۲۵	Xy-CrMo V1۲-۱	۲۱۵-۲۶۲	۲۱۰-	نرمال	M+C	B-C	زوال یافته	۴.۲۴	۵.۲۸	۰.۴-۰.۵	It must be checked in the first major overhaul because of critical service condition	
				۲۲۵		M+C	B-C						
	Lower Se. - No.۲۵			۲۱۹-		M+C	B-C						
				۲۲۹		M+C	B-C						
				۲۱۸-		M+C	B-C						
Upper Se.-inlet No.۲۲	۲۲۵	M+C	B-C	زوال یافته	۵.۲۴	-	۰.۴-۰.۵						
	۲۲۲-	M+C	B-C										
SH۴(F.S)	۲۳۱	M+C	B-C	زوال یافته	۴.۴۸	۵.۲۸	۰.۴-۰.۵						
RHY (B.F.S)	Top of bundle - No.۲۴	۱۰-Cr Mo۹-۱۰	۱۴۰-۱۸۷	۱۴۳-۱۴۸	نرمال	F+B+C	۲	زوال یافته	۵.۵۰	-	۰.۴		It must be checked in next major overhaul.
RHY(B.F.S)	Reheater- No.۲۳	Xy-CrMo V1۲-۱	۲۱۵-۲۶۲	۲۴۴-۲۵۵	نرمال	M+C	B-C	زوال یافته	۳.۳	۱.۹۳	۰.۴		It must be checked in next major overhaul.
							B-C						



RHY (B.F.S)	Top of bundle - No.۲۶			۲۳-۲۶	نرمال	M+C	B-C	نسبتا زوال یافته	۳,۰۸	۲,۸۸	۰,۴	It must be checked in next major overhaul.
RHY(F.S)						M+C	۱-۲					
Water wall (Weld)	Evaporator of phase NO.۱	۱۵ Mo۳	۱۴-۱۸۷	۱۴۸-۱۷۷	-	F+P	-	زوال یافته حاد	۴,۶۶	۳,۷۹	-	It must be checked in the first possible opportunity because of critical condition (including: cracks Graphitization and degradation)



شکل ۱: منحنی خزشی



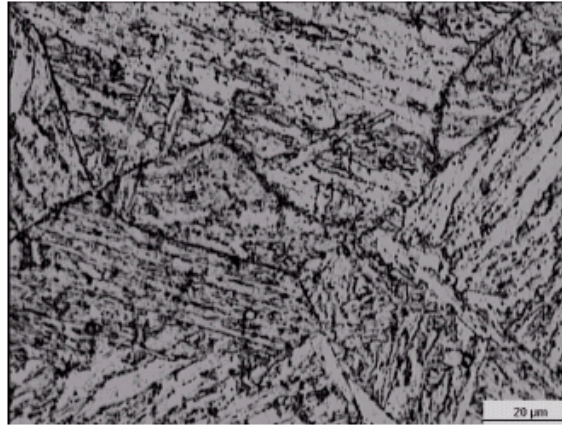
شکل ۲: تاثیر دما و تنش روی منحنی خزشی



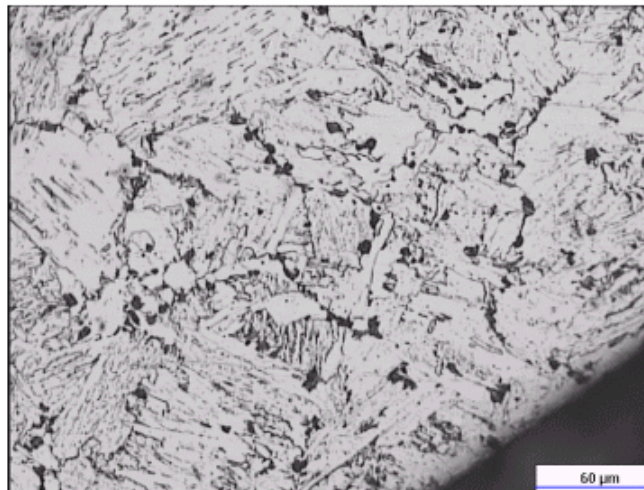
شکل ۳: فلوچارت روشهای آزمایشگاهی بر آورد عمر باقیمانده



شکل ۴: فلوچارت روشهای محاسباتی بر آورد عمر باقیمانده



شکل ۵: اثرات پدیده نرم شوندگی حرارتی بصورت توزیع ذرات کاربیدی گلوبولی شکل در مرز دانه ها



شکل ۶ پدیده گرافیت شدن در نواحی جوش لوله های واتر وال



نگهداری و مراقبت از وضعیت ماشین آلات با استفاده از آنالیز روغن (OIL CONDITION MONITORING)

یه و تنظیم :

سید مهدی اعرابی

کارشناسی ارشد مدیریت انرژی

مقدمه:

امروزه روشهای مختلف CM (Condition Monitoring) یا به عبارتی کنترل و پیشگیری به منظور مراقبت از وضعیت تجهیزات به کار می رود. این Monitoring از طریق کنترل دما، فشار، ارتعاشات، شدت صوت، و کنترل روغن ... صورت می پذیرد. در این میان مانیتورینگ وضعیت روغن در تجهیزات از روشهای نوین ساده و کارآمد و مطرح می باشد که در این مقاله سعی در بررسی این روش و پارامترهای مورد نظر در این روش شده است. پدیده فرسایش در سیستمهای مکانیکی می تواند به دو صورت وجود داشته باشد.

الف- فرسایش عادی

ب- فرسایش غیر عادی

که حالت دوم آن نیاز به بررسی و انجام اقدامات اصلاحی دارد و می تواند از عواملی چون بهره برداری نامناسب، تنظیمات و تلورانسها روغن، مواد مصرفی و نیز طراحی و ساخت ناشی شود.

به منظور انجام اقدامات اصلاحی و نیز کنترل و پیش گیری خرابی نیاز به اطلاعات کافی در این زمینه می باشد. اطلاعات جمع آوری شده از سیستم راهبر اعم از اپراتور، تعمیرکار، سرویسکار و ناظر در کنار اطلاعاتی که از آنالیز روغن و انجام آزمایشات متعدد بر روی آن بدست می آید به کارشناس CM در تشخیص وضعیت تجهیزات کمک می کند.

آنالیز روغن با نمونه گیری از تجهیزات مورد نظر آغاز می گردد. سپس با انجام دهها آزمایش بیش از ۱۰۰ قلم اطلاعات مفید راجع به روغن (مشخصات فیزیکی، شیمیایی، آلودگی ها و تغییرات خواص و ...) و نیز راجع به دستگاه (قطعات تحت فرسایش و روند فرسایش) بدست می آید.

نمونه گیری می تواند به صورت اتفاقی یا (Random Oil Sampling) ROS یا به صورت منظم

(Scheduled Oil Sampling) SOS صورت گیرد. شرایط خاص جهت ظرف نمونه گیری، محل نمونه گیری و شرایط نمونه گیری وجود دارد.

مسئله مراقبت صحیح و بهینه از وضعیت تجهیزات و شناخت عوامل مخرب و پارامترهای موثر بسیار مفید و ضروری می باشد که در ادامه انواع آلودگی ها را مورد بحث و بررسی قرار می دهیم.

در بررسی و مانیتورینگ وضعیت روانکارها معمولا ۱۰ نوع آلودگی مهم به شرح زیر مدنظر قرار می گیرد.

۱- آلودگی ذرات جامد Particulate Contaminant

۲- آلودگی حباب Air Contaminant

۳- آلودگی آب Water Contaminant

۴- آلودگی میکروبی Microbial Contaminant

۵- آلودگی حرارتی Thermal Contaminant



۶- آلودگی شیمیایی Chemical Contaminant

۷- آلودگی مکانیکی Mechanical Contaminant

۸- آلودگی الکتریکی Electrical Contaminant

۹- آلودگی مغناطیسی Magnetic Contaminant

۱۰- آلودگی تشعشی Radiation Contaminant

که به ترتیب گسترده‌تر شده‌اند.

۱- آلودگی ذرات جامد:

منشا این ذرات می‌تواند از داخل سیستم بوده و بواسطه عوامل فرسایشی از سطح قطعات جدا شده و وارد روغن شوند و باعث تخریب سیستم گردند. همچنین می‌تواند این ذرات از خارج سیستم از طریق ذرات همراه هوا یا غیره به روغن وارد شوند که بدون اغراق از عمده‌ترین علل بروز مشکل در وضعیت روانکار می‌باشد. در بررسی وضعیت روغن آزمایش‌های زیر جهت شناسایی نوع و مقدار این ذرات انجام می‌پذیرد:

- اسپکتروسکوپی: ذرات مورد بررسی در این آزمایش عبارتند از آهن، کرم، مس، آلومینیوم، قلع، سرب، نقره.

- آزمایش PQ جهت شناسایی ذرات آهن به صورت می‌گیرد (Particle quantifier)

- آزمایش DRF نیز جهت شناسایی ذرات آهن به کار می‌رود (Direct reading)
(Ferrography)

- آزمایش AF یا فروگرافی مشاهداتی که جهت شناسایی ذرات آهن، آلومینیوم، مس، سرب و قلع می‌باشد (Analytical Ferrography).

با توجه به تخریب سیستم بواسطه عوامل فوق اجرای برنامه مراقبت مستمر و موثر جهت شناسایی نوع و مقدار این عوامل لازم و ضروری می‌باشد. تاثیر این ذرات جامد علاوه بر شدت دادن به فرسایش مکانیکی تجهیز باعث گرفتگی زود هنگام فیلترهای روغن شده و عملکرد سیستم را دچار مشکل می‌کند. از ذرات با منشا بیرونی می‌توان ترکیبات سیلیسیم (یا بلورهای کوارتز) را نام برد که به میزان فراوان در محیط و اتمسفر اطراف تجهیزات پراکنده هستند و سختی نسبی بالاتر از اکثر فلزات به کار رفته در ماشین آلات را داشته و در صورت قرار گرفتن بین قطعات متحرک فرسایش شدید آنها را به دنبال دارد رطوبت در مجاور فلزات نیز می‌تواند منجر به تشکیل اکسید آهن قرمز گردیده که علاوه بر تخریب سطح فلز موجب آلودگی روغن و گرفتگی سریعتر فیلترها می‌گردد.

آزمایش شمارش ذرات: Particle Counting

در این آزمایش با استفاده از نور لیزر تعداد ذرات جامد معلق در روغن شمارش می‌گردد. سپس براساس یک استاندارد مشخص کد گذاری می‌شود. که آشنایی با مفاهیم و اعداد به کار رفته در این استاندارد جهت اطلاع از وضعیت تجهیز و انجام مراقبت بهینه ضروری می‌باشد. آزمایش شمارش ذرات فقط تعداد ذرات در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد و برای شناسایی نوع ذرات نیاز به انجام به آزمایش‌های دیگر است. اما نکته مهم اینکه میزان آلودگی روغن را با چه میزان مناسبی باید مقایسه کرد یا به عبارت دیگر حد تمیزی قابل قبول روغن چقدر است. این حد به عوامل مختلفی بستگی دارد که عمده‌ترین آنها را می‌توان فشار روغن در سیستم و میزان آسیب پذیری سطوح از ذرات سخت معلق در روغن (آلیاژ قطعات) دانست. در تعیین سطح مجاز آلودگی می‌توان از نمودار زیر که توسط شرکت ویکرز تهیه شده کمک گرفت.

اشاره به چند نکته ضروری به نظر می‌رسد:

۱- هر چه فشار روغن در سیستم بالاتر باشد کد مجاز آلودگی پایین تر است.

۲- در استاندارد ISO افزایش یک واحد به کد تمیزی (Cleanliness Code) به معنی دو برابر شدن آلودگی می‌باشد.



۳- اعداد مربوط به میزان آلودگی نباید به طور مطلق ملاک ارزیابی قرار گیرند بلکه میزان و رشد آلودگی و فرسایش ایجاد شده نسبت به قبل باید بررسی شود.

۲- آلودگی حباب :

این نوع آلودگی از طریق جذب هوا توسط روغن وارد سیستم می گردد. در فشار اتمسفر چنانچه یک لیتر روغن در معرض تماس با هوای محیط قرار گیرد پس از چند روز حدود 100°C هوا را در خود حل می کنند. اما نکته قابل توجه اینکه قابلیت حل شدن اکسیژن خالص در مایعات بیش از قابلیت حل شدن هوا در آنها می باشد و بنابراین در هوای حل شده در روغن درصد حجمی اکسیژن بیشتری از هوای معمولی وجود دارد که این امر به اکسیداسیون روغن شدت می بخشد. ورود هوا به روغن همچنین سبب تشکیل حباب در آن می گردد که حبابها بواسطه تراکم پذیری بالا در مقایسه با مایعات معایب زیر را بدنبال دارد.

۱- میزان صدا در سیستم افزایش می یابد.

۲- میزان اکسیداسیون در روغن و همچنین قطعات در تماس با روغن افزایش می یابد.

۳- بواسطه تراکم پذیری حبابهای هوا میزانی از انرژی مفید سیستم می رود.

۴- بعضی عملکردهای ناصحیح و غیر عادی در سیستم بوجود می آید .

۵- میزان کف روغن افزایش می یابد که ممکن است سبب سر ریز شدن روغن شود.

۶- احتمال بروز پدیده کاویتاسیون را افزایش می دهد .

۷- توانایی روغن در دمپ نمودن ارتعاشات سیستم کاهش می یابد.

به همین منظور معمولاً اقداماتی جهت خارج نمودن حبابها انجام می پذیرد که اقدامات زیر نمونه هایی از آنها می باشند:

۱- استفاده از مواد افزودنی که مانع تشکیل حباب و جذب اکسیژن شوند.

۲- استفاده از صفحات مایل یا سیدهایی با منافذ ریز جهت خارج شدن یا ترکیدن حبابها در ورودی روغن به مخزن.

۳- استفاده از فن های مکند و ایجاد و کیوم بر روی مخازن روغن.

و ...

۳- آلودگی آب :

توزیع آب در داخل روغن به دو صورت ممکن است انجام شود.

الف: آب به صورت قطرات ریز در داخل روغن گسترده شده باشد. که به دلیل اختلاف چگالی ، آب و روغن از یکدیگر جدا می شوند . با توجه به اینکه اکثر روغنهای چگالی کمتر از آب دارند معمولاً آب در ته مخزن جمع می شود و روغن روی سطح آب قرار می گیرد که در این حالت می توان با باز نمودن شیرهایی که معمولاً در ته مخازن تعبیه می شود آب را خارج نمود. همچنین در بسیاری تجهیزات از دستگاه سانتریفوژ جهت جدا نمودن آب از روغن استفاده می گردد .

ب: آب به صورت مولکولی در داخل روغن توزیع شده باشد. در این صورت حالت امولسیون ایجاد می گردد. وجود مواردی مانند ذرات جامد معلق در روغن ، محصولات ناشی از اکسیداسیون قطعات یا وجود دوده های ناشی از احتراق و نیز وجود برخی مواد افزودنی در روغن در وقوع این حالت و پایداری امولسیون موثر می باشند. میزان پایداری امولسیون را معمولاً بر حسب میزان کشش سطحی می سنجند هر چه کشش سطحی بالاتر باشد جدایی آب و روغن راحتتر و سریعتر انجام می شود و به عبارتی پایداری امولسیون پایین تر خواهد بود اما آب از چه طریق می تواند وارد سیستم گردد.

الف : حالت جذبی Absorbtion :

در این حالت اگر چه ممکن است هیچ منفذی برای ورود آب به روغن وجود نداشته باشد ولی بواسطه وجود رطوبت هوای محیط آب جذب روغن می شود . میزان حل شدن آب در روغن در هر درجه حرارت خاص یک حدا شباع دارد که این حد با افزایش درجه حرارت روغن افزایش می یابد. مثلاً چنانچه در درجه حرارت 60°C میزان 20 ppm از یک روغن در آب حل شود با افزایش دما به



۸۰c این میزان به ۶۰۰ppm می رسد. و بر عکس اگر دما را از ۸۰ به ۲۰ کاهش دهیم ۴۰۰ppm آب اضافی به صورت قطرات آب از روغن جدا می شود.

ب: حالت تهاجمی Ingression

که آب به صورت مستقیم وارد روغن شود که می تواند از محیط خارجی یا از طریق بخشی از سیستم انجام شود. وجود آب در روغن عوارض زیر را می تواند به دنبال داشته باشد.

۱- تشدید میزان خوردگی در فلزات و ایجاد زنگ آهن

۲- واکنش آب با مواد افزودنی روغن و کاهش خاصیت آنها و ایجاد رسوب که خود می تواند سبب گرفتگی مسیرها و کثیفی زود رس فیلترها گردد.

۳- واکنش آب با برخی مواد افزودنی می تواند سبب اسیدی شدن روغن گردد .

۴- تبخیر آب در نقاط کم فشار سیستم سبب بروز پدیده کاویتاسیون و متعاقب آن تخریب سطوح فلزی می گردد.

۵- تحقیقات نشان داده که روغن آلوده به آب بیش از روغن آلوده به ذرات جامد سبب خوردگی سایشی قطعات می گردد .

۴- آلودگی میکروبی :

تاثیر میکروبیها بر روغن از عوامل آلوده شدن آن می باشد نتیجه تاثیر میکروبیها بر روغن تشکیل محیطهای اسیدی قوی می باشد که سطوح قطعات فلزی را مورد حمله شیمیایی قرار داده و عواقب دیگری نیز مانند انسداد سریع فیلترها را نیز در برخواهد داشت . از آنجا که میکروبیها برای رشد و نمو به آب نیاز دارند روغنهای حاوی آب یا امولسیونهای آب و روغن که در صنایعی نظیر ماشین کاری به کار می روند به طور جدی تری در معرض خطر این نوع آلودگی هستند.

وجود این نوع آلودگی در روغن را می توان از بوی بسیار بد آن و حتی تغییر رنگ روغن تشخیص داد. در روغنهای روانکاری تا قبل از آلوده شدن به آب رشد میکرو ارگانیزمها بسیار کم می باشد و با پدید آمدن آلودگی آب محیط مناسبی برای تکثیر آنها فراهم می شود . انتشار آلودگی میکروبی در حضور آلودگی آب بسیار سریع می باشد. یکی از انواع میکروبیها ، باکتریها هستند که اندازه ای بین ۱۰۰-۱ میکرون دارند اما در شرایط مساعد می توانند ظرف ۸ ساعت به اندازه ۴۰۰۰ برابر جرم زمین رشد نمایند.

۵- آلودگی حرارتی :

با گذشت زمان و نسبت به نیم قرن گذشته با بهبود خواص روغن ها درجه حرارت مجاز آنها افزایش یافته است و اکنون دمای مجاز روغن در برخی سیستمها حتی به ۱۲۰c نیز می رسد و در حقیقت این افزایش دما مقدار جریان حرارت مجاز در سیستم را نشان می دهد. یک نکته قابل توجه اینکه نه تنها افزایش دمای روغن مضر است کاهش آن نیز می تواند عواقب زیانباری به دنبال داشته باشد که شناخت این صدمات بسیار موثر بوده و کمک بزرگی به اجرای بهتر برنامه های Monitoring وضعیت تجهیزات خواهد بود. تاثیر درجه حرارت را می توان بر میزان انبساط و انقباض اجزا سیستم و میزان فرسایش ، تغییرات فشار و کاهش عملکرد روغن بیان نمود. از عمده ترین اثرات سوء افزایش درجه حرارت روغن در سیستم ها می توان به موارد زیر اشاره نمود :

الف: تخریب سریع روغن در اثر کاهش اثر مواد افزودنی روغن و کاهش عمر مفید آن.

ب : کاهش ویسکوزیته روغن .

ج : آسیب دیدن سیلهای الاستومریک : این سیلها در دمای بالا شکننده شده و ذرات ریز از آنها جدا شده و وارد روغن شده و میزان آلودگی افزایش می یابد.



د : شدت اکسیداسیون روغن در دمای بالا قابل ملاحظه است . به دلایل فوق و پاره ای عواقب دیگر به منظور حفاظت روغن بانصب ترکومولها و ترمومترها بویره در نقاط داغ سیستم دمای روغن را کنترل می کنند . همچنین می توان با انجام آزمایشهایی مختلف تاثیر درجه حرارت بر روغن و سیستم را بررسی نمود به عنوان مثال می توان از تغییر ویسکوزیته روغن تغییر اسیدیته روغن ، تاثیر روغن بر میزان سایش سطوح، وجود ذرات ساییده شده از قطعات در روغن نتایجی اخذ نمود .

۶- آلودگی شیمیایی :

در بحث آلودگی شیمیایی روغن نوع خاصی از خوردگی شیمیایی مطرح است که مشکل آن بویژه در فیلتراسیون مشخص می شود .

موادی نظیر برخی شوینده ها (Detergents) و یا حتی برخی مواد افزودنی روغن دارای زنجیره های بلند هیدروکربن قطبی هستند که یک سر آنها جاذب آب بوده و سر دیگر آنها جاذب چربی می باشد. و با ورود به روغن آب و ذرات جامد را از سطوح فلزات جدا نموده و در داخل روغن شناور می سازند. با توجه به اینکه این مواد همانند اثر شوینده بر آب سبب کاهش میزان کشش سطحی آب می گردد میزان چسبندگی ذرات آب موجود در روغن به یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگتر کاهش می یابد . از سوی دیگر چون اساس کار بسیاری از فیلترهای جاذب آب کشش سطحی ذرات آب می باشد عملکرد این فیلترها دچار مشکل گردیده و علاوه بر مشکل فیلتراسیون، آلودگی آب را نیز به دنبال خواهد داشت .

۷- آلودگی مکانیکی :

اعمال نیروهای متناوب ، تغییرات متناوب درجه حرارت و تغییرات فشار می توانند سبب ایجاد تغییر در برخی خواص روغن گردد .

۸- آلودگی الکتریکی

۹- آلودگی مغناطیسی

۱۰- آلودگی تشعشعی

درباره سه مورد آلودگی فوق می توان گفت در اثر جریان الکتریکی ، مغناطیسی یا تابش اشعه های مختلف می توانند سبب تجزیه روغن یا برخی مواد موجود در آن ، اکسید شدن برخی مواد، قطبی شدن آنها و متعاقب آن جذب آب و مواد چربی و ذرات فلزی از سطوح قطعات و غیره می گردند.

Email: mj_montazer@yahoo.com

چکیده

در عملکرد نیروگاههای معمولی تولید توان الکتریکی، مقادیر بسیار زیادی حرارت توسط خطوط سرمایشی کندانسورها و گازهای داغ خروجی از بویلر توربین های بخار و یا محفظه احتراق توربین های گاز به هدر می رود. بخش زیادی از این انرژی می تواند بازیافت شود و در مصارف تامین بار حرارتی مورد نیاز شهرها و صنایع اطراف نیروگاهها مورد استفاده قرار گیرد.

نیروگاههایی که ضمن تولید توان الکتریکی، توان حرارتی مفید نیز تولید می نمایند به نیروگاههای تولید همزمان^۱ حرارت و توان معروف هستند. کاربرد تکنولوژی تولید همزمان، بازده حرارتی کلی نیروگاههای معمول را از ۴۰-۳۰ درصد به ۹۰-۸۰ درصد افزایش خواهد داد و مصرف سوخت کلی کشور را به طور چشمگیری کاهش خواهد داد.

در این مقاله پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور از دو دیدگاه تامین بار حرارتی گرمایشی و بار حرارتی آب گرم مصرفی مناطق مسکونی اطراف نیروگاه (دیدگاه مسکونی)، و دیدگاه تامین بخار مورد نیاز صنایع اطراف نیروگاه (دیدگاه صنعتی) مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در انتهای مبحث مربوط به هر دیدگاه، تعدادی از نیروگاههای کشور که دارای پتانسیل بیشتری برای بکارگیری سیستم های تولید همزمان می باشند معرفی خواهد شد.

در دیدگاه مسکونی، شدت نیاز به گرمایش مناطق مسکونی اطراف نیروگاهها با محاسبه جمعیت شهری اطراف هر نیروگاه به کمک نرم افزار *EI GIS* تا شعاع اقتصادی انتقال آب گرم^۲، و ضرب این مقدار در تعداد ماههای مورد نیاز برای گرمایش هر منطقه با توجه به شرایط اقلیمی آن منطقه، تعیین شده و نیروگاههای کشور بر این اساس طبقه بندی شده اند. در دیدگاه صنعتی نیز توسط نرم افزار بانک اطلاعاتی صنایع کشور که توسط وزارت صنایع و معادن تهیه شده است، ابتدا صنایع اطراف نیروگاهها تا شعاع اقتصادی انتقال بخار تعیین و سپس میزان مصرف بخار این صنایع مشخص شده اند و نیروگاههای کشور بر حسب شدت نیاز بخار صنایع اطراف نیز طبقه بندی شده اند.

واژه های کلیدی: تولید همزمان، شدت نیاز به گرمایش، شدت نیاز به بخار، شعاع اقتصادی

^۱ Cogeneration

[] km

km

مقدمه

استفاده از سیستم های تولید همزمان به دلایل متعددی از جمله افزایش راندمان حرارتی کلی واحدهای تولید الکتریسیته، کاهش مصرف سوخت کلی کشور، کاهش آلودگی محیط زیست و کاهش هزینه های تولید، امروزه به عنوان یک ضرورت ملی قابل مطرح شدن می باشد.

در این مقاله ابتدا میزان صرفه جویی در مصرف سوخت کلی نیروگاههای کشور در صورت بکارگیری سیستم های تولید همزمان محاسبه شده و سپس نیروگاههایی که پتانسیل کافی ناشی از میزان بار حرارتی مناطق اطراف خود برای بکارگیری سیستم های تولید همزمان را دارا می باشند، از دو دیدگاه مسکونی و صنعتی بررسی شده اند.

۱- میزان صرفه جویی در مصرف سوخت در نیروگاههای کشور در صورت بکارگیری سیستم های تولید همزمان

جدول ۱ که توسط نگارنده تهیه شده است، میزان صرفه جویی در مصرف سوخت در هر یک از نیروگاههای کشور را در صورت بکارگیری سیستم های تولید همزمان نشان می دهد. مراحل تعیین میزان صرفه جویی به این شرح بوده است که ابتدا میزان سوخت مصرفی در یک سال نیروگاههای کشور و توان عملی قابل تولید نیروگاهها از منابع مربوطه تعیین [۲] و سپس با توجه به نوع سیکل هر نیروگاه، نسبت توان قابل برداشت به حرارت قابل برداشت مشخص شده است [۳]. در مرحله بعدی با توجه به میزان توان و حرارت قابل برداشت از نیروگاههای کشور، با فرض راندمان الکتریکی نیروگاهها در تولید مجزای ۴۰ درصد و فرض راندمان بویلرهای صنعتی و خانگی ۹۰ درصد، میزان سوخت مصرفی در حالت تولید مجزا تعیین شده است و در پایان مقایسه بین تولید مجزا و تولید همزمان انجام شده است. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

۲- دیدگاه مسکونی بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور

در این بخش با اعمال فرضیاتی، پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور از دیدگاه مسکونی با تخمین شدت نیاز بار حرارتی مناطق مسکونی واقع در شعاع اقتصادی انتقال آب گرم، شامل بار حرارتی مورد نیاز برای گرمایش و بار حرارتی مورد نیاز برای آب گرم مصرفی بررسی خواهد شد. بررسی انجام شده به این شرح می باشد که ابتدا تعداد و جمعیت شهرهایی که در شعاع اقتصادی انتقال آب گرم اطراف نیروگاه بوده اند توسط بکارگیری نرم افزار EI GIS بررسی شده و سپس با بررسی شرایط اقلیمی مناطق اطراف نیروگاهها [۴]، و با فرض اینکه حد دمایی پایین برای آسایش انسان 18°C می باشد، تعداد ماههای مورد نیاز برای گرمایش مناطق تعیین شدند. سپس در مرحله بعدی با ضرب نمودن جمعیت شهری اطراف نیروگاهها در تعداد ماههای مورد نیاز برای گرمایش، شدت نیاز به گرمایش هر منطقه بدست آمده و نیروگاههای کشور بر این اساس طبقه بندی شده اند. اطلاعات بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده می توان نیروگاههایی که دارای پتانسیل بیشتری برای مصرف آب گرم جهت مصارف مسکونی در اطراف خود می باشند تعیین نمود. لازم به ذکر است نیروگاههایی که در داخل شهر تهران

واقع می باشند، هم در دیدگاه مسکونی و هم دیدگاه صنعتی، به دلیل کثرت مناطق مسکونی اطراف و صنایع اطراف آنها و عدم امکان محاسبه، مورد بررسی قرار نگرفته اند.

۳- دیدگاه صنعتی بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور

با در نظر گرفتن دیدگاه مسکونی برای کاربرد سیستم های تولید همزمان در نیروگاهها، ۱۵ نیروگاه برتر از دیدگاه گرمایشی انتخاب شده اند. در این بخش دیدگاه صنعتی بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاهها مورد بررسی قرار می گیرد. اطلاعات لازم درباره انواع صنایع کشور از نرم افزار بانک اطلاعاتی صنایع کشور که توسط وزارت صنایع تهیه شده است بدست آمده است و یک نمونه از اطلاعات خروجی آن برای شهرستان مشهد در جدول ۳ نشان داده شده است. اطلاعات جدول ۳ شامل نوع محصول کارخانه صنعتی، تعداد نفرات شاغل در آن و گروه صنعتی مربوطه می باشد. بررسی به این شرح می باشد که ابتدا تعداد و انواع صنایع اطراف نیروگاههای کشور از نرم افزار مربوطه تعیین و سپس میزان مصرف بخار این صنایع با انجام فرضیاتی تخمین زده شده است. در این گزارش جهت بدست آوردن معیاری برای مقایسه میزان مصرف بخار در صنایع اطراف نیروگاههای مختلف از اطلاعات سایتهای اینترنتی در کشورهای گوناگون استفاده شده است [۵] و نمودارها و جداولی برای تخمین میزان مصرف بخار صنایع مختلف بدست آمده است. یک نمونه از این نمودارها که در آن درصدی از مصرف انرژی صنایع مختلف که صرف تولید بخار می شود در آن نشان داده شده است و معیار مورد استفاده در تخمین بخار مصرفی صنایع کشور در این مقاله می باشد، در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۴ نیز عدد معیاری را برای مقایسه انواع صنایع مصرف کننده بخار با توجه به نمودار شکل ۱ ارائه می دهد که مقدار این عدد از ۱۰۰ برای بیشترین صنعتی که مصرف بخار دارد یعنی صنعت محصولات جنگلی و مشتقات تا عدد ۱۰ برای کمترین صنعتی که مصرف بخار دارد یعنی صنعت سیمان می باشد. به دلایل متعددی چون کثرت صنایع اطراف نیروگاهها، اهمیت مقدار مصرف بخار سمت مصرف برای تبدیل نیروگاههای معمولی به سیستم های تولید همزمان (به دلیل قیمت بالای تجهیزات مورد نیاز برای تبدیل)، اهمیت یکنواختی مصرف (ضریب بار بالا) در سمت مصرف و غیره، نگارنده مقاله برای اینکه با کمترین خطای ممکن بتواند پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور را برای تامین بخار مورد نیاز صنایع اطراف نیروگاهها بررسی نماید، با در نظر گرفتن این فرض که صنایعی که دارای کارگران کمتر از ۲۰۰ نفر می باشند به دبی قابل قبول بخار برای بکارگیری سیستم تولید همزمان نیاز ندارند، تنها صنایعی که در اطراف نیروگاهها در شهر های مختلف دارای کارخانه های با تعداد افراد شاغل بیش از ۲۰۰ نفر بوده اند را مورد بررسی قرار داده است.

در مراحل بعدی بررسی، اطلاعات تمامی شهرهایی که دارای نیروگاه بودند همانند جدول ۳ بررسی شده و صنایع مختلف شهرها با توجه به تعداد صنایع مصرف کننده بخار و نوع صنایع مصرف کننده بخار توسط جدول ۴ رتبه بندی شدند. سپس رتبه انواع مختلف صنایع هر شهر با یکدیگر جمع شده و یک رتبه صنعتی کلی برای هر شهر تعیین شده است. نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ یازده نیروگاهی را که از دیدگاه صنعتی دارای پتانسیل بیشتری برای بکارگیری سیستم های تولید همزمان در آنها می باشند را معرفی می نماید. لازم به ذکر است اطلاعات صنعتی شهر تهران به دلیل کثرت کارخانجات به طور دقیق قابل محاسبه نموده و در جدول به شکل تقریبی ارائه شده است.

یکی دیگر از دیدگاه هایی که جهت بررسی پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در یک نیروگاه از دیدگاه صنعتی می بایست مورد بررسی قرار گیرد، دیدگاه موردی بکارگیری این سیستم ها می باشد به این معنی که نیروگاههایی که در شعاع انتقال بخار یا آب داغ آنها مصرف کننده ای خاص مانند پالایشگاههای مواد نفتی یا گازی، کارخانجات تولید کننده مواد قندی و یا کارخانجات تولید چوب یا کاغذ وجود دارند، متمایز شده و به عنوان نیروگاهی با مورد خاص به شمار آید. جدول ۶، نیروگاههایی که در شعاع اقتصادی آنها پالایشگاه یا کارخانه تولید کننده قند و شکر و یا کارخانجات تولید کننده کاغذ که هر یک از بیشترین مصرف کننده های بخار مداوم و با ضریب بار مناسب می باشند را نشان می دهد که در کنار مابقی جدول های ارائه شده در این گزارش می تواند به عنوان معیاری برای بکارگیری سیستم های تولید همزمان در یک نیروگاه باشد.

نتایج

در این مقاله، پتانسیل سنجی بکارگیری سیستم های تولید همزمان از دو دیدگاه مسکونی و صنعتی مورد بررسی قرار گرفتند و بهترین نیروگاهها از هر دیدگاه مشخص شدند. همچنین در مطالعه موردی صنایع اطراف نیروگاههای کشور، نیروگاههایی که دارای مواردی خاص برای بکارگیری سیستم های تولید همزمان می باشند مشخص شدند. نتایج ارائه شده با انجام فرضیاتی که در مقاله به آنها اشاره شده است بدست آمده و این نتایج تنها یک دید کلی از پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در هر منطقه را ارائه می دهد و برای داشتن نتایج جزئی تر، یقیناً نیاز به مطالعات وسیعتر و مطالعات موردی نسبت به نوع نیروگاه، منطقه ای که نیروگاه در آن واقع شده است، تعیین میزان مصرف دقیق بخار کارخانجات صنعتی اطراف و غیره می باشد. با اطلاعات ارائه شده در این گزارش، بسته به این مطلب که کدام یک از دو دیدگاه مسکونی یا صنعتی از نظر خواننده دارای اهمیت بیشتری می باشد، می توان تخمین اولیه ای را برای بکارگیری سیستم تولید همزمان در یک نیروگاه انجام داد.

مراجع

- ۱- www.Rochester.edu
- ۲- آمار تفصیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۳، تولید نیرو، وزارت نیرو.
- ۳- J.H. Horlock, "Cogeneration: Combined Heat and Power- Thermodynamics and Economics", ۱۹۸۷, Pergamon Books Ltd.
- ۴- www.Weather.ir
- ۵- www.Cogen۳.net
- ۶- J. Marecki, "Combined Heat and Power Generating Systems", ۱۹۸۸, Peter Peregrinus Ltd.

جدول ۱: میزان صرفه جویی در مصرف سوخت نیروگاهها در صورت بکارگیری سیستم های تولید همزمان

میزان صرفه جویی در مصرف سوخت در صورت بکارگیری تولید همزمان	مقدار سوخت مصرفی نیروگاه ⁺	نوع سیکل	نام نیروگاه
۲۰۶۹۶۴۷۳۵	۸۸۰۷۰۱۰۰۰	بخاری	شهید فیروزی (طرشت)
۱۰۳۵۰۳۷۹۵۸	۴۴۰۴۳۷۴۲۸۸	بخاری	بعثت
۳۲۰۸۲۲۴۱۲۲	۱۳۶۵۲۰۱۷۵۴۲	بخاری	اسلام آباد (اصفهان)
۱۹۹۹۴۴۹۶۵۴	۸۵۰۸۲۹۶۳۹۸	بخاری	شهید منتظر قائم
۸۰۶۱۶۹۱۲۷,۱	۳۴۳۰۵۰۶۹۲۴	بخاری	شهید بهشتی
۲۸۹۴۲۱۷۷۰	۱۲۳۱۵۸۲۰۰۰	بخاری	زرند
۴۸۴۴۱۹۷۴۱	۲۰۶۱۳۶۰۶۰۰	بخاری	مشهد
۵۲۹۵۵۲۰۷۸,۵	۲۲۵۳۴۱۳۱۰۰	بخاری	شهید مدحج (زرگان)
۶۴۴۵۴۴۴۸۶۶	۲۷۴۲۷۴۲۴۹۶۰	بخاری	شهید سلیمی
۵۴۴۷۸۱۹۳۹۲	۲۳۱۸۲۲۱۰۱۷۸	بخاری	رامین
۴۲۶۵۵۷۹۴۵۴	۱۸۱۵۱۴۰۱۹۳۰	بخاری	بندر عباس
۶۳۱۴۱۹۶۶۶۸	۲۶۸۶۸۹۲۱۹۹۲	بخاری	شهید محمد منتظری
۲۲۴۲۸۰۶۹۷۱	۹۵۴۳۸۵۹۴۵۲	بخاری	توس
۲۴۸۴۵۴۷۰۴۲	۱۰۵۷۲۵۴۰۶۰۴	بخاری	تبریز
۳۳۰۴۳۹۲۴۵۳	۱۴۰۶۱۲۴۴۴۸۲	بخاری	شهید رجایی
۲۳۱۵۹۷۳۲۳۷	۹۸۵۵۲۰۵۲۶۲	بخاری	بیستون
۲۷۷۶۱۸۴۹۹۵	۱۱۸۱۳۵۵۳۱۷۰	بخاری	مفتح غرب
۱۰۳۲۹۸۹۳۱۰	۴۳۹۵۶۹۹۱۹۰	بخاری	ایرانشهر
۳۵۸۰۸۷۹۶۳۴	۱۵۲۳۷۷۸۵۶۷۸	بخاری	شازند
۱۶۱۰۹۲۸۷۳,۲	۶۸۵۵۰۱۵۸۸	بخاری	سهند
۷۹۰۶۳۹۲۷۰,۲	۲۹۸۳۵۴۴۴۱۶	گازی	شیراز
۶۲۸۱۵۳۸۲۸,۱	۲۳۷۰۳۹۱۸۰۴	گازی	مشهد(شهید رضایی)
۱۱۴۵۰۹۹۴۲,۹	۴۳۲۱۱۲۹۹۲	گازی	بوشهر

۲۳۶۰۰۲۴۳۳,۳	۸۹۰۵۷۵۲۲۰	گازی	شهید بهشتی(لوشان)
۵۲۸۵۳۷۵۳,۹۲	۱۹۹۴۴۸۱۲۸	گازی	دورود
۳۱۹۸۵۹۵۲۹۸	۱۲۰۷۰۱۷۰۹۳۶	گازی	ری
۶۳۲۹۳۲۷۸,۶۴	۲۳۵۰۶۸۹۷۶	گازی	تبریز(جدید)
۴۹۰۴۳۸۵۰۶,۲	۱۸۵۰۷۱۱۳۴۴	گازی	چابهار(کنارک)
۳۵۰۵۱۸۹۹۸	۱۳۲۲۷۱۳۲۰۰	گازی	شهید مدحج(زرکان)
۱۳۱۳۲۰۶۰۶,۱	۴۵۷۸۱۳۶۰۸	گازی	ارومیه
۲۰۸۷۱۵۲۷۲	۷۸۷۶۰۴۸۰۰	گازی	شیروان
۱۹۵۹۵۹۰۳۰,۶	۷۳۹۴۶۸۰۴۰	گازی	شریعتی
۱۵۸۷۸۲۸۲۶,۱	۵۹۹۱۸۰۴۷۶	گازی	صوفیان
۳۰۰۸۹۲۵۷۵,۲	۱۱۳۵۴۴۳۶۸۰	گازی	زاهدان
۶۶۴۴۸۸۴۳,۲۸	۲۵۰۷۵۰۳۵۲	گازی	قائن
۳۹۹۳۶۷۳۹,۱۴	۱۵۰۷۰۴۶۷۶	گازی	هسائ
۸۶۳۲۰۹۱۷۱,۵	۳۲۵۷۳۹۳۱۰۰	گازی	چرخه ترکیبی شهید سلیمی*
۳۰۷۰۶۶۹۹۳۶	۱۱۵۸۷۴۳۳۷۲۰	گازی	چرخه ترکیبی کازرون*
۸۳۳۵۶۴۴۶۵,۵	۳۱۴۱۷۵۲۷۰۰	گازی	کنگان
۱۶۷۸۴۲۹۳۸,۷	۶۳۳۳۶۹۵۸۰	گازی	شهیدزنبق یزد
۳۰۱۴۹۰۶۲۴	۱۱۳۷۷۰۰۴۶۸	گازی	یزد
۸۵۷۴۱۵۴,۵	۳۲۳۵۵۳۰۰	گازی	سمنان
۶۹۴۸۰۰,۳۲	۲۶۲۱۸۸۸	گازی	فرگ داراب
۷۰۹۴۶۵۴۷۰,۹	۲۶۷۷۲۲۸۱۹۲	گازی	چرخه ترکیبی یزد*
۳۴۴۱۶۳۰۵۳۷	۱۲۹۸۷۲۸۵۰۴۴	گازی	چرخه ترکیبی کرمان*
۸۱۰۹۵۹۶۲,۵	۳۰۶۰۲۲۵۰۰	گازی	بندر عباس
۱۴۲۹۹۵۴۹۴۸	۵۳۹۶۰۵۶۴۰۸	گازی	چرخه ترکیبی آبادان*
۱۱۳۸۸۱۶۱۳۷	۴۲۹۷۴۱۹۳۸۴	گازی	چرخه ترکیبی دماوند*
۶۸۰۰۲۳۲۹۸,۸	۲۵۶۶۱۲۵۶۵۶	گازی	هرمزگان
۳۶۱۶۹۰۰۴۹,۷	۱۳۶۴۸۶۸۱۱۲	گازی	کیش
۲۶۷۲۹۲۰۶۷۰	۸۴۰۵۴۱۰۹۱۲	ترکیبی	منتظر قائم
۴۳۹۹۳۱۷۸۷	۱۳۸۳۴۰۶۲۲۲۴	ترکیبی	گیلان
۲۵۳۶۶۰۹۷۱۲	۷۹۷۶۷۶۰۱۰۰	ترکیبی	قم
۲۹۶۵۰۸۱۷۱۶	۹۳۲۴۱۵۶۳۴۰	ترکیبی	شهید رجایی
۳۲۲۵۳۰۶۳۸۲	۱۰۱۴۲۴۷۲۹۰۰	ترکیبی	فارس
۱۱۱۷۴۳۰۴۷۹	۳۵۱۳۹۳۲۳۲۴	ترکیبی	خوی
۳۳۸۰۹۵۵۰۵۳	۱۰۶۳۱۹۳۴۱۲۸	ترکیبی	نیشابور
۱۳۵۸۵۸۴۷۶۹	۴۲۷۲۲۷۹۱۴۸	ترکیبی	شریعتی

+ واحد سوخت به هزار کیلوکالری در یک سال می باشد.

* در حال حاضر بخش گازی این نیروگاهها فعال می باشد.

جدول ۲؛ پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در نیروگاههای کشور از دیدگاه مسکونی

اولویت	نام نیروگاه	جمعیت شهری اطراف تا شعاع ۲۰ کیلومتر	تعداد ماههای گرمایش	شدت نیاز به گرمایش
۱	مشهد	۱.۸۸۷.۴۰۵	۷	۱۳.۲۱۱.۸۳۵
۲	اسلام آباد اصفهان	۱.۸۴۰.۷۷۸	۵	۹.۲۰۳.۸۹۰
۳	تبریز	۱.۲۴۳.۱۲۸	۷	۸.۷۰۱.۸۹۶
۴	شهید منتظر قائم	۱.۵۰۵.۸۸۳	۵	۷.۵۲۹.۴۱۵
۵	پرند	۱.۱۱۹.۳۰۴	۵	۵.۵۹۶.۵۲۰
۶	شیراز	۱.۰۵۳.۰۲۵	۵	۵.۲۶۵.۱۲۵
۷	چرخه ترکیبی قم	۷۷۷.۶۷۷	۵	۳.۸۸۸.۳۸۵
۸	زرگان	۸۰۴.۹۸۰	۳	۲.۴۱۴.۹۴۰
۹	چرخه ترکیبی گیلان	۴۳۵.۲۹۵	۵	۲.۱۷۶.۴۷۵
۱۰	ری	۴۰۸.۱۴۰	۵	۲.۰۴۰.۷۰۰
۱۱	یزد	۳۴۹.۳۰۴	۵	۱.۷۴۶.۵۲۰
۱۲	زاهدان	۴۱۹.۵۱۸	۴	۱.۶۷۸.۰۷۲
۱۳	سندج	۲۷۷.۸۰۸	۶	۱.۶۶۶.۸۴۸
۱۴	چرخه ترکیبی خوی	۱۴۸.۹۴۴	۷	۱.۰۴۲.۶۰۸
۱۵	چرخه ترکیبی نیشابور	۱۶۳.۰۹۳	۶	۹۷۸.۵۵۸

جدول ۳؛ بخشی از خروجی برنامه بانک اطلاعاتی صنایع کشور برای شهرستان مشهد

نام واحد	اشتغال	گروه صنعتی
کاشی طوس	۲۶۳	ساخت محصولات سفالی و سرامیکی ساختمانی
چین چین	۴۷۶	عمل اوری و حفاظت از فسادمیوه و سبزیجات
فرآورده های غذایی مشهد	۴۱۳	عمل اوری و حفاظت از فسادمیوه و سبزیجات
خوشگوارمشهد	۲۵۰	تولید موادشیمیایی اساسی
داروسازی ثامن	۲۱۱	محصولات داروئی
نیسان شرق	۲۰۴	تولیدنوشابه های غیرالکلی
قندفردوس	۴۱۲	تولید قندوشکر
قندشیرین	۳۰۲	تولید قندوشکر
زمزم مشهد	۲۷۹	تولیدنوشابه های غیرالکلی

جدول ۴: عدد معیار صنایع مصرف کننده بخار

عدد معیار	نوع صنعت
۱۰۰	محصولات جنگلی و مشتقات
۷۰	تولید مواد غذایی
۵۸	تولید مواد شیمیایی
۴۱	پالایشگاه نفت
۱۵	کاشی
۱۵	تجهیزات حمل و نقل
۱۵	آسیاب های آهن و فولاد
۱۵	پلاستیک و لاستیک
۱۰	آلومینیوم
۱۰	ساخت فلزات
۱۰	ریخته گری
۱۰	شیشه سازی
۱۰	معدن
۱۰	سیمان

جدول ۵: پتانسیل بکارگیری سیستم های تولید همزمان در

نیروگاههای کشور از دیدگاه صنعتی

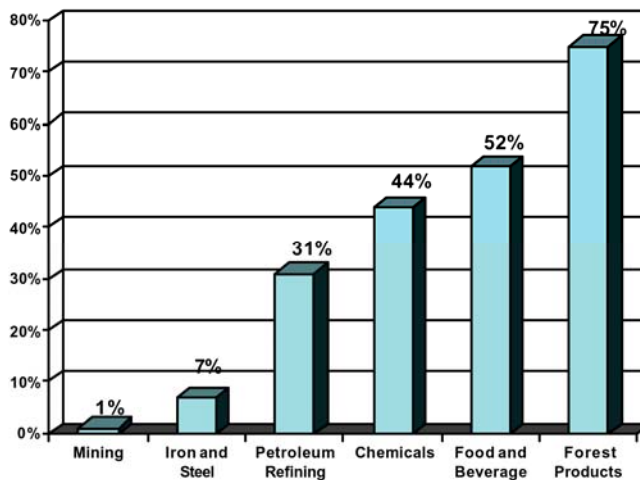
اولویت	نام نیروگاه	تعداد صنایع	شدت نیاز به بخار
۱	شهید منتظر قائم	۱۰۰	۲۵۰۰
۲	مشهد، طوس و شریعتی	۶۰	۲۲۳۱
۳	شیراز	۵۴	۱۷۴۳
۴	زرگان	۳۲	۱۵۴۶
۵	تبریز و صوفیان	۴۵	۱۴۲۸
۶	اسلام آباد اصفهان	۴۳	۹۵۰
۷	یزد	۷۳	۸۲۰
۸	چرخه ترکیبی گیلان	۵۰	۶۹۰

جدول ۶: موارد خاص مصرف کننده بخار در صنایع اطراف نیروگاهها

نام نیروگاه	پالایشگاه و پتروشیمی	صنعت تولید قند و شکر	صنایع چوبی و تولید کاغذ
کنکان	*		
بندرعباس	*		
زرگان		*****	*****
نیشابور		*	
خوی		**	
شیراز		*	
اسلام آباد اصفهان	*	***	*
تبریز	*		

تعداد علامت (*) نشان دهنده تعداد صنعت موجود در اطراف یک

نیروگاه می باشد.



شکل ۱: درصد مصرف بخار در صنایع مختلف

مقایسه و بررسی انواع سطوح انتقال حرارت و مواد مورد استفاده در صنعت ساخت ریکوپراتورها

مجید منتظر بارفروش

دانشگاه صنعت آب و برق- دانشکده انرژی- صندوق پستی ۱۷۹۱-۱۶۷۶۵

Email: mj_montazer@yahoo.com

چکیده

یکی از روش های افزایش راندمان توربین های گاز، استفاده از مبدل های حرارتی برای بازیافت حرارت گازهای داغ خروجی از توربین گاز می باشد. برای بازیافت حرارت در صنعت توربین گاز از انواع بازیاب ها استفاده می شوند که در این مقاله نوع ریکوپراتور این بازیاب ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ریکوپراتورها به طور پیوسته عمل انتقال حرارت را از گازهای داغ خروجی از توربین به هوای سرد و متراکم ورودی به محفظه احتراق انجام میدهند. در میکروتوربین های کوچک امروزی مورد بحث این مقاله، استفاده از ریکوپراتورها برای دستیابی به راندمان بیش از ۳۰ درصد اجتناب ناپذیر شده است.

در این مقاله به دسته بندی انواع ریکوپراتورها و بررسی مواد مورد استفاده در صنعت ساخت ریکوپراتورها پرداخته شده است و در آن انواع مختلف ریکوپراتورهای قدیمی و امروزی مورد استفاده در صنعت توربین گاز شامل ریکوپراتورهای پوسته و لوله ای، ریکوپراتورهای پره صفحه ای و ریکوپراتورهای سطح اصلی، انواع سطوح انتقال حرارت مورد استفاده در صنعت ساخت ریکوپراتور و مزایا و معایب هر نوع، مقایسه انواع سطوح انتقال حرارت ارائه شده از دیدگاه های انتقال حرارت، افت فشار، وزن، حجم ماتریس ریکوپراتور و قیمت و در پایان دسته بندی انواع ریکوپراتورها از جنبه موادی که در صنعت ساخت ریکوپراتورها بکار می رود و تعیین تاثیر مواد ریکوپراتور بر پارامترهایی چون بیشینه راندمان قابل دستیابی سیکل و بازده ریکوپراتور مورد بحث قرار خواهد گرفت.

واژه های کلیدی: ریکوپراتور، سطح پره صفحه ای، سطح اصلی، ریکوپراتور دوفلزی

مقدمه

در این مقاله دیدگاه ساخت ریکوپراتورها مورد بررسی قرار خواهد گرفت و ابتدا انواع ریکوپراتورهای فلزی مورد استفاده در گذشته و امروزی و سطوح انتقال حرارت هر یک معرفی شده و بیشینه راندمان سیکل قابل دستیابی و راندمان سطح انتقال حرارت قابل دستیابی در هر نوع معرفی می گردد و در انتها نتایج مقایسه انواع

سطوح انتقال حرارت ریکوپراتورها ارائه خواهد شد. سپس در بخش دوم، انواع مواد مورد استفاده در صنعت ساخت ریکوپراتورها شامل مواد امروزی مورد استفاده، انواع آلیاژهای مورد استفاده برای دستیابی به راندمان حرارتی بالاتر و مواد با کاربرد در دماهای بالا مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱- بررسی انواع ریکوپراتورها

ریکوپراتورها، به خصوص ریکوپراتورهای فلزی، از دیدگاه روش ساخت به سه دسته کلی تقسیم بندی می شوند: ریکوپراتورهای پوسته و لوله ای^۱، پره صفحه ای^۲ و ریکوپراتورهای با سطح اصلی^۳. در ادامه به بررسی هر یک از سه دسته مذکور پرداخته خواهد شد.

۱-۱ ریکوپراتورهای پوسته لوله ای

این ریکوپراتورها شامل یک دسته لوله در داخل یک پوسته خارجی می باشند. یک سیال از داخل لوله ها جریان یافته و سیال دیگر مابین پوسته و لوله ها جریان می یابد و از این طریق حرارت از یک سیال به سیال دیگر مبادله می شود. این ریکوپراتورها برای دهها سال در صنعت فرآیند^۴ در کاربردهای بازیافت حرارت از گرمای خروجی از کوره ها^۵ و در توربین های گازی بزرگ استفاده می شده است و اطلاعات بسیاری درباره طراحی، عملکرد و فرآیندهای ساخت این نوع ریکوپراتورها موجود است. ریکوپراتورهای پوسته لوله ای به طور ذاتی دارای حجم و وزن بالایی (و در نتیجه قیمت بالاتری) نسبت به انواع ریکوپراتورهای امروزی می باشند و در میکروتوربین ها کاربردی ندارند و مورد بحث این مقاله نمی باشند. بازده سطح این نوع ریکوپراتورها در حالت پیشینه ۷۵ درصد می باشد.

۱-۲ سطوح نوع پره صفحه ای

این نوع سطوح مبدلهای حرارتی در ابتدا جهت برآورد نیاز وزن و اندازه کم مبدل در سیستمهای هواپیمایی مورد استفاده قرار گرفتند. انواع دسته بندی های سطوح پره صفحه ای در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. یک ریکوپراتور پره صفحه ای شامل پره هایی جوش شده یا لحیم شده به ورق های جدا کننده دو سمت جریان می باشد. گازهای مبادله کننده حرارت از میان پره های هر سمت جریان دارد. بازده انتقال حرارت بستگی به ضخامت ورق های فلزی جدا کننده سطوح ثانویه، نوع پره ها، ارتفاع پره، رسانایی گرمایی مواد تشکیل دهنده پره و غیره دارد. اتصال حرارتی خوب بین ساختار پره و ورق فلزی جدا کننده عموماً با روش های لحیم کاری^۶ تامین می شود و افزایش وزن ناشی از وزن مواد لحیم کاری و قیمت بالای آلیاژهای لحیم کاری باعث افزایش

Shell & Tube

Plate-Fin

^۲ Primary Surface (PS)

^۴ Process Industry

(> °C)

Brazing

قیمت این سطوح خواهد شد. افزایش فشردگی و بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت در مقایسه با هندسه های لوله ای، موجب بسیار کوچک شدن اندازه ریکوپراتورهای استفاده کننده از این سطوح شده است. Campbell & Rohsenow در مطالعه ای نشان داده اند که بهترین سطح پره صفحه ای از فهرست سطوح بررسی شده توسط Kays & London از دیدگاه انتقال حرارت بهتر و حجم و وزن در واحد کمتر (و در نتیجه قیمت، که از مهمترین پارامترهای انتخاب نوع ریکوپراتور می باشد، کمتر)، سطح انتقال حرارت پره صفحه ای Offset Strip Fin با مشخصه سطح^۱ ۱۹,۷۴-۱/۱۰ می باشد (شکل ۲) [۲]. از آنجا که هدف این مقاله معرفی بهترین ریکوپراتوری که با تکنولوژی امروزی قابل دستیابی باشد می باشد، لذا در پایان این بخش از مقاله جهت مقایسه انواع مختلف سطوح انتقال حرارت رایج در صنعت ساخت ریکوپراتورها سطح انتقال حرارت پره صفحه ای مذکور با سه نوع از سطوح انتقال حرارت اصلی، از دیدگاه انتقال حرارت و خصوصیات فیزیکی مقایسه خواهد شد. ریکوپراتورهای پره صفحه ای، همانند ریکوپراتورهای پوسته و لوله دارای دامنه کاربرد وسیعی در سیستم های توربین گاز می باشند. بازده سطح این نوع ریکوپراتورها ۹۰-۸۵ درصد در حالت پیشینه و مقدار بازدهی سیکل قابل دستیابی آنها در حدود ۴۰ درصد می باشد.

۳-۱ سطوح اصلی

هدف نهایی برای طراحان ریکوپراتور، یافتن یک پیکربندی مناسب بر پایه روی هم گذاشتن ورقهای شکل داده شده می باشد که وظیفه ماتریس انتقال حرارت، هدایت جریان اصلی و چند شاخه نمودن جریان را همزمان تامین نمایند. این هدف وجود سطوح ثانویه (مانند پره) و روش های لحیم کاری کوره ای را غیر ضروری می نماید. این دسته از هندسه های مبدل های حرارتی به عنوان مبدل های حرارتی با سطوح اصلی شناخته می شوند. از مشخصات ریکوپراتورهای سطح اصلی می توان از حجم کوچک و وزن کم آنها که باعث صرفه جویی در فضای نصب، راحتی حمل و نقل و جابجایی راحت این نوع ریکوپراتورها می شود نام برد. سطوح انتقال حرارت اصلی، به طور غیر فعال^۲ باعث بالا رفتن میزان انتقال حرارت می شوند و در اینجا از تکنیک های سطح فعال که از روشهای ارتعاشات، حوزة های الکتریکی و غیره باعث بالا رفتن نرخ انتقال حرارت می شوند سخن به میان نخواهد آمد. در سطوح غیر فعال، ساختارهای جریان ثانویه توسط انحنای مجاری و مقطع بودن مسیرهای جریان به وجود می آیند. ساختارهای جریان ثانویه گاز و هوا در مبدل های حرارتی باعث برهم زدن لایه های جریان ساکن در نزدیکی سطح شده و با این عمل باعث بالا رفتن عملکرد حرارتی مجرای عبور جریان خواهند شد [۳]. بدلیل اینکه میزان افت فشار در ریکوپراتورهای مورد استفاده در توربین های گاز بسیار مهم است، سطحی که خواص خوب انتقال حرارت به همراه افت فشار کمتری را نشان دهد، در طراحی ریکوپراتورها در ارجحیت قرار می گیرد. سه دسته سطوح انتقال حرارتی که در شکل ۳ نشان داده شده اند و بیشترین کاربرد را در ساخت ریکوپراتورهای امروزی دارند، این احتیاجات را برآورده می سازند.

Ward یک مقایسه بین سه دسته ریکوپراتورهای نامبرده انجام داده و نشان داده است که در ظرفیت ها و شرایط کاری برابر، حجم یک واحد ریکوپراتور پره صفحه ای فشرده ۲,۸ برابر، یک ریکوپراتور پره صفحه ای

ساده ۷,۶ برابر و یک ریکوپراتور پوسته و لوله ۱۱,۸ برابر یک ریکوپراتور سطح اصلی می باشد [۴]. ریکوپراتورهای سطح اصلی، نسبت سطح انتقال حرارت به حجم بیشتری نسبت به انواع دیگر ریکوپراتورها داشته و دارای بازده بالاتری می باشند. مقدار بازدهی این سطوح در حدود ۹۵-۹۰ درصد می باشد و بیشینه راندمان سیکل قابل دستیابی با کاربرد این نوع ریکوپراتورها در حدود ۵۰ درصد در کاربرد ریکوپراتورهای سرامیکی می باشد.

در پایان این بخش بعنوان یک نتیجه گیری کلی، نتایج اندازه گیری ها و تحقیقات Esa Utriainen که در آن یازده سطح انتقال حرارت از چهار دسته از سطوح انتقال حرارت مطرح شده در بخش اول، یعنی سطح پره صفحه ای Offset Strip Fin با مشخصات ذکر شده و سه نوع سطح اصلی نشان داده شده در شکل ۳، از دیدگاه وزن و حجم کمتر، خواص انتقال حرارت بهتر، افت فشار کمتر و قابلیت ساخت با یکدیگر مقایسه شدند ارائه خواهد شد [۵]. نتیجه محاسبات و آزمایشات Esa Utriainen به این صورت می باشد که دو سطح انتقال حرارت Cross Corrugated (CC) و سطح انتقال حرارت Cross Wavy از بین سطوح نامبرده شده با در نظر گرفتن پارامترهای وزن و حجم کمتر، خواص انتقال حرارت بهتر، افت فشار کمتر دارای بهترین خواص می باشند اما با در نظر گرفتن قابلیت ساخت با تکنولوژی امروزی، بهترین انتخاب سطح Cross Corrugated (CC) خواهد بود [۵].

۲- مواد امروزی مورد استفاده در ساخت ریکوپراتورها

بیش از شش دهه است که برای بالاتر بردن بازدهی میکروتوربین ها تلاش می شود. بازدهی احتراق، بازدهی قطعات مکانیکی مانند توربین و کمپرسور و همچنین ژنراتور میکروتوربین ها بسیار مورد مطالعه قرار گرفته اند و امروزه دارای مقادیر کاملاً قابل قبولی می باشند. حال این سوال مطرح می شود که برای بالاتر بردن بازدهی میکروتوربین ها در کدام زمینه می بایست کار شود؟ دو پارامتری که هنوز پتانسیل لازم برای افزایش راندمان سیکل را دارند یکی افزایش مقدار دمای ورودی به توربین و دیگری افزایش بازدهی ریکوپراتورها می باشند. بر خلاف توربین های بزرگ با جریان محوری، سرمایش توربین های فلزی کوچک با جریان محوری بسیار مشکل می باشد و افزایش دمای گاز ورودی به توربین در میکروتوربین ها می بایست همگام با تکنولوژی مواد پیش رود که آن نیز منجر به استفاده از روتورهای سرامیکی خواهد شد. با کمی افزایش در نسبت فشار کمپرسور، افزایش دمای ورودی به توربین به معنی افزایش دمای ورودی به ریکوپراتور نیز خواهد بود و لازمه این امر استفاده از سوپر آلیاژهای با قیمت بالاتر برای اجزای ریکوپراتور که خود یکی از قسمت های بسیار گران سیکل به شمار می آید، می باشد. افزایش بازدهی ریکوپراتور روش بسیار راحتی می باشد، اما نتیجه آن افزایش وزن و حجم و در نتیجه بالا رفتن هزینه ها و همچنین نصب می باشد [۶]. در بخش قبلی انواع ریکوپراتورهایی که دارای بازده قابل قبولی در صنعت توربین گاز می باشند بررسی شدند و در این بخش ملاحظات مربوط به مواد بکار رفته در ریکوپراتورهای امروزی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و ابتدا ریکوپراتورهای امروزی، سپس ریکوپراتورهای آلیاژی و در انتها ریکوپراتورهای با دمای کارکرد بالا مورد بحث قرار خواهد گرفت.

تأثیر دمای ورودی به توربین بر روی راندمان حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل دو پارامتر دمای گازهای ورودی به توربین و بازدهی حرارتی بر حسب پارامترهایی چون دمای گازهای داغ ورودی به ریکوپراتور، رژیم های مختلف سیکل میکروتوربین های گازی که شامل رژیم ریکوپراتورهای سرامیکی، رژیم توربین های سرامیکی و رژیم توربین های کوچک جریان شعاعی و فلزی می باشد، نسبت فشار کمپرسور و مواد مختلف مورد استفاده در ساخت ریکوپراتورها که در بخش بعدی به آن پرداخته خواهد شد، رسم شده است. از ویژگی های بسیار مهم این نمودار آنست که به وسیله آن می توان با داشتن دو پارامتر دمای گازهای داغ ورودی به توربین که از محدودیت های متالورژیکی سیستم می باشد و پارامتر نسبت فشار کمپرسور (RC)، می توان به پارامترهای مهمی چون دمای گازهای داغ ورودی به ریکوپراتور و بازده حرارتی سیکل دست یافت و همچنین موادی که در ساخت ریکوپراتور در آن بازه دمایی قابل استفاده می باشند را تعیین نمود.

در اولین مولدهای میکروتوربین، انتخاب مواد بکار رفته در ساخت ریکوپراتور وابسته به شرایط سیکل و اولویت های استفاده کننده بود. استنلس استیل آستنیتیک ۳۴۷^۱ به طور وسیعی به دلیل خواص خوب و قیمت پایین آن استفاده می شد. هنگامی که دمای ورودی به توربین ها در موتورهای با نسبت فشار پایین افزایش پیدا نمود، به تبع آن دمای گاز ورودی به ریکوپراتورها نیز افزایش پیدا کرد و تا آنجا پیش رفت که دیگر استفاده از استنلس استیل های ۳۴۷ با عمر پیش بینی شده ۴۰۰۰۰ ساعت قابل توجیح نبود. محدودیت های دمایی ریکوپراتورها وابسته به میزان مقاومت کششی و مقاومت به خوردگی، اکسید شدن و تغییر شکل های تحت خزش دارد. تمامی ویژگی هایموادی فلزی مورد استفاده در ساخت ریکوپراتورهای امروزی در شکل ۴ داده شده اند. نوع استنلس استیل ۳۴۷ در بسیاری از ریکوپراتورهای میکروتوربین های امروزی استفاده می شود اما محدودیت دمایی آنها در حدود ۶۷۵ درجه سانتیگراد می باشد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با استفاده از این ماده، بیشینه راندمان حرارتی قابل دستیابی میکروتوربین ها ۳۰ درصد خواهد بود. برای افزایش دمای گازهای ورودی به ریکوپراتور، نیاز به استفاده از آلیاژی با نیکل بالاتر می باشد. با افزایش دمای ورودی به ریکوپراتور تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد، به وسیله بکارگیری موادی مانند سوپر استنلس استیل ۳۴۷ می توان به بازدهی در حدود ۳۳ درصد رسید. با اندکی افزایش نسبت فشار کمپرسور و فرض بازدهی ریکوپراتور ۹۱ درصد، می توان با بکارگیری موادی چون اینکونل ۶۲۵ به بازدهی حرارتی ۳۵ درصد رسید. لازم به ذکر است بیشترین بازدهی که در میکروتوربین های فلزی در رنج ۱۰۰kW-۱۰۰۰kW می توان دست یافت، ۳۵ درصد می باشد. سیر تکاملی طراحی توربین های گازی برای افزایش راندمان آنها بر پایه افزایش دمای ورودی توربین استوار است. این مهم با بهبود خواص حرارتی مواد بکار رفته در ساختمان توربین گاز و دیگر تجهیزات امکان پذیر می باشد [۶].

افزایش دمای ورودی به توربین، باعث افزایش در دمای گاز خروجی توربین نیز خواهد شد و این امر لزوم استفاده از موادی با مقاومت حرارتی بالا را در ریکوپراتورها اجتناب ناپذیر می کند. دمای ورودی توربین در محدوده ۱۴۰۰-۱۵۰۰K، دمای خروجی گاز ۷۰۰-۱۰۰۰K را باعث می شود (که وابسته به نسبت فشار توربین تغییر می کند) و این دما در محدوده آلیاژهای پیشرفته حاوی نیکل می باشد. موادی که در ساخت

۳۴۷ austenitic stainless steel

ریکوپراتورها استفاده میشوند باید قابلیت تحمل دماهای بالا را برای مدت زمان طولانی داشته باشند. ماده بکار رفته باید برای شرایط جوشکاری یا لحیم کاری مناسب باشد، قابلیت شکل گیری با روشهای معمول ساخت مانند قالب گیری، پرس و خمکاری را داشته باشد و آخر همه ارزان باشد. طول عمر عملکردی^۱ یک ریکوپراتور عمدتاً توسط مقاومت ماده بکار رفته در برابر خزش^۲ یا به طریقه شگفت آوری برای فولادهای استنلس استیل در بعضی کاربردهای خاص، مقاومت ضعیف در برابر خوردگی^۳، محدود می شود.

مواد فلزی با دمای کارکرد بالا که پس از فولاد ضد زنگ ۳۴۷ که به طور وسیعی در کاربردهای امروزی و دما پایین ریکوپراتورها بکار می رود، در کاربرد های دما بالای ریکوپراتورها بکار می روند عبارتند از:

۱. فولاد ضد زنگ نوع ۳۲۱ که شامل ۱۷ درصد Cr، ۱۱ درصد Ni، ۰.۳ درصد Ti و Fe می باشد و در

کاربردهای فولادهای ضد زنگ برای ریکوپراتورها محدوده انتهایی^۴ می باشد.

۲. Inconel ۶۲۵ که شامل ۲۱ درصد Cr، ۹ درصد Mo، ۴ درصد Fe، ۴ درصد Nb و Ni می باشد.

۳. آلیاژ ۲۱۴ Haynes که شامل ۱۶ درصد Cr، ۴ درصد Al، ۳ درصد Fe و Ni می باشد و در ردیف

آلیاژهای Al_2O_3 قرار می گیرد.

کوشش در زمینه بالا بردن دمای بیشینه توربین های گاز، منجر به استفاده از مواد سرامیکی و کربنی در ساختار توربین های گاز خواهد شد. افزایش دمای بیشینه سیکل از حدود ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس در یک میکروتوربین ۲۵-۷۵kW باعث افزایش راندمان از ۳۲ درصد به ۳۷ درصد خواهد شد. همانگونه که قبلاً در نمودارها بیان شد، جهت بالا بردن دمای ورودی به توربین نیاز به استفاده از مواد سرامیکی می باشد. ویژگی اصلی سرامیکها مقاومت آنها در برابر شوکهای حرارتی و اشکال اصلی سرامیکها در شکنندگی مکانیکی و مشکلات آب بندی سیستمهایی که از این تکنولوژی استفاده می کنند می باشد.

موادی که بجز سرامیک ها در کاربردهای ریکوپراتورهایی که در دماهای بالا عمل می کنند بکار می روند عبارتند از:

۱. خانواده لیتیم-آلومینوسیلیکاتها (LAS): موادی هستند که به دلیل پایین بودن ضریب انبساط حرارتی

شان، مقاومت بالایی در برابر شوکهای حرارتی دارند.

۲. آلومینوسیلیکات منیزیم (MAS) : با فرمول $2MgO:2Al_2O_3:5SiO_2$ ، این ماده یکی از پایین ترین

ضرایب انبساط حرارتی را دارد $[16 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-1} \text{ K}^{-1}]$.

۳. Mullite-Aluminum Titanate (MAT)

۴. فسفات های زیر کونیوم (NZP)

جدول ۱ به عنوان یک نتیجه گیری، اطلاعات کاملی درباره مقایسه مواد بکار رفته در ریکوپراتورها و ویژگی های اقتصادی، متالورژی، مکانیکی و فیزیکی سیستم هایی که از این مواد استفاده می نمایند را در یک مطالعه موردی بر روی میکروتوربین ۱۰۰kW ارائه می دهد [۵].

Operational Life Time

Creep

Corrosion

Baseline

نتایج

در این مقاله انواع ریکوپراتورهای امروزی مورد استفاده در صنعت میکروتوربین های گاز از دیدگاه ساخت معرفی شدند و نتایج زیر از موارد ارائه شده بدست آمده است:

۱. پس از بررسی انواع ریکوپراتورها شامل ریکوپراتورهای پوسته و لوله ای، پره صفحه ای و سطح اصلی و تعیین مقدار بازدهی سیکل قابل دستیابی برای هر یک از انواع ریکوپراتورها، بهترین انتخاب ریکوپراتور با سطح اصلی و نوع Cross Corrugated(CC) معرفی شده است.

۲. بررسی انواع مواد بکار رفته در ریکوپراتورهای فلزی امروزی، منجر به این نتیجه شد که برای رسیدن به بازدهی سیکل بیش از ۳۰ درصد نیاز به استفاده از آلیاژهای مخصوص می باشد که توانایی تحمل دماهای بالاتر از 675°C را که حد دمایی ریکوپراتورهای با فولاد ضدزنگ می باشد را داشته باشند. مشکل اصلی استفاده از آلیاژها، قیمت بالای آنها نسبت به فلز استنلس استیل ۳۴۷ که امروزه و در ریکوپراتورهای امروزی بکار می رود می باشد و برای رفع این مشکل با مطالب ارائه شده در جدول ۱،

استفاده از تکنولوژی دو فلزی ها^۱ پیشنهاد شده است. در تحقیقاتی که توسط C.F. McDonald بر روی یک سیکل 100 kW میکروتوربین گاز انجام داده شده است [۵]، نشان داده شده که در صورتی که از یک ریکوپراتور که به طور کامل از Inconel۶۲۵ که امروزه به طور وسیعی به دلیل خواص مقاومت حرارتی خوب آن در ساخت ریکوپراتورها استفاده می گردد، ساخته شده باشد استفاده گردد، قیمت ماتریس در حدود $5600\text{ \$}$ خواهد بود و در صورتی که از دو فلزی ها به همراه Inconel۶۲۵ در انتهای داغ ریکوپراتور استفاده گردد، قیمت ماتریس در حدود $2070\text{ \$}$ خواهد شد. این امر موجب صرفه جویی در قیمت حدود ۶۰ درصد خواهد شد.

مراجع

۱. W.M. Kays, A.L. London, Compact heat exchangers (۳rd ed), Krieger Publishing Company, Florida (۱۹۸۴).
۲. Campbell J. F., Rohsenow W. M., ۱۹۹۲; "Gas Turbine Regenerators: A Method For Selecting The Optimum Plate-Finned Surface Pair For Minimum Core Volume", International Journal of Heat and Mass Transfer, ۳۵, No. ۱۲, pp. ۳۴۴۱-۳۴۵۰.
۳. Jacobi A. M. and Shah R. K., ۱۹۹۵, "Heat Transfer Surface Enhancement through the Use of Longitudinal Vortices: A Review of Recent Progress", Experimental Thermal and Fluid Science, ۱۱, pp. ۲۹۵-۳۰۹.
۴. M. E. Ward, "Primary Surface Recuperator Durability and Applications," Turbo machinery Technology Seminar, TTS ۰۰۶/۳۹۵, Solar Turbines, Inc., San Diego, CA (۱۹۹۵).

multi-pass cross counter flow modular)

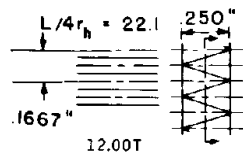
F.E. Faulkener

(recuperator

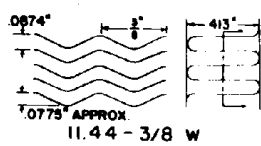
۵. Colin F. McDonald, Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines, Applied Thermal Engineering, ۲۳ (۲۰۰۳) ۱۴۶۳-۱۴۸۷.
۶. Esa Utriainen, "Investigation of some Heat Transfer Surfaces for Gas Turbine Recuperators", Doctoral Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund Institute of Technology, ۲۰۰۱.

جدول ۱؛ مقایسه مواد بکار رفته در ساخت ریکوپراتورها برای یک میکروتوربین ۱۰۰KW

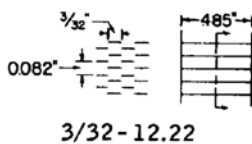
نوع ماده بکار رفته در ریکوپراتور	۳۴۷ Stainless Steel*	Super ۳۴۷ Stainless Steel**	Inconel ۶۲۵***	Haynes ۲۳۰****	Haynes ۲۱۴*****	Bi-metallic ۷۷٪ ۳۴۷, ۲۳٪ Inconel ۶۲۵
بازده سیکل دارای ریکوپراتور	۲۹.۵	۳۳	۳۵	۳۶.۵	۳۸	۳۵
بازده ریکوپراتور	۰.۸۷	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱
دمای گازهای ورودی به توربین	۹۵۴	۱۰۷۰	۱۱۵۰	۱۲۰۵	۱۲۷۱	۱۱۵۰
دمای ماکزیمم قابل تحمل فلز	۶۷۵	۷۵۰	۸۰۰	۸۵۰	۹۰۰	مانند فلزات تشکیل دهنده
قیمت ماتریس، \$/kg	۱۲	۱۸	۶۰	۸۴	۱۰۸	۲۳
ماده بکار رفته در ریکوپراتورهای امروزی *						توضیحات:
آلیاژی از استنلس استیل در مرحله پژوهشی **						
این آلیاژ محدوده بالایی ریکوپراتورهای فلزی می باشد ***						
سیکل های استفاده کننده از این نوع ریکوپراتور دارای توربین های سرامیکی می باشند ****						
این سوپرآلیاژ محدوده بالایی ریکوپراتورهای با توربین سرامیکی می باشد *****						



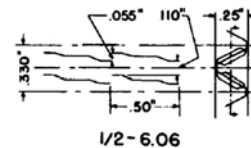
پره ساده



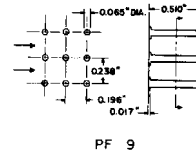
پره موج دار



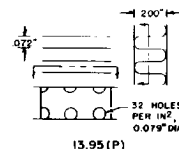
پره نواری



پره کرکره ای

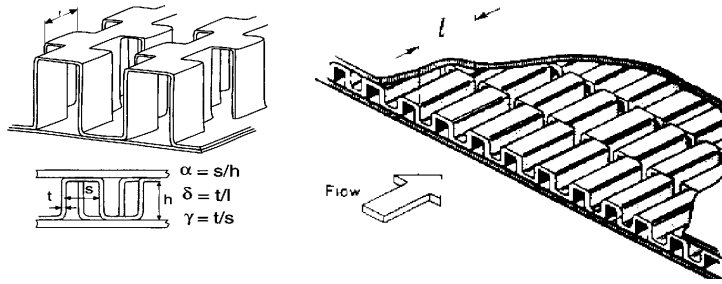


پره میله ای

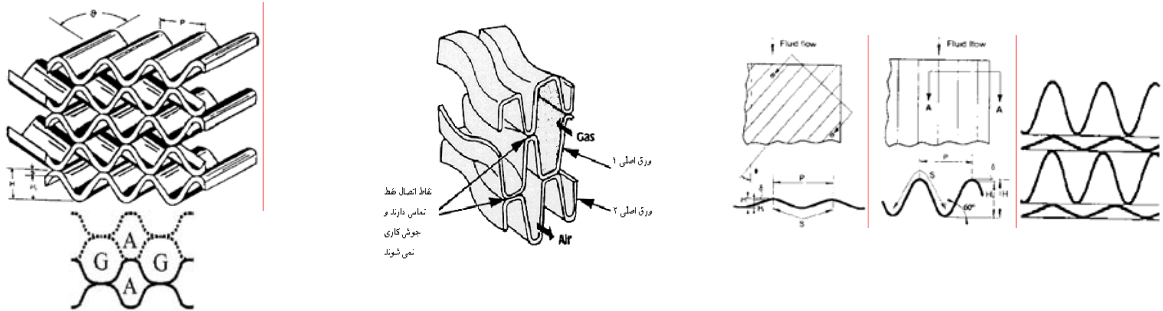


پره سوراخ دار

شکل ۱؛ انواع سطوح انتقال حرارت پره صفحه ای



شکل ۲: سطح انتقال حرارت Offset Strip Fin

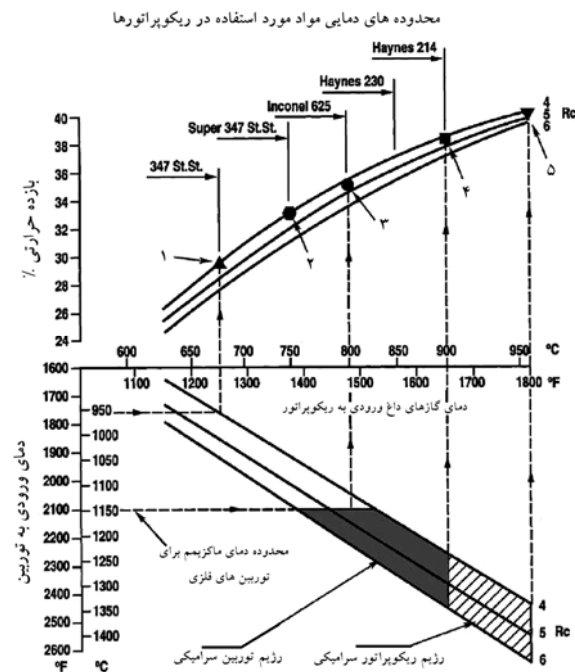


سطح Cross Corrugated

سطح Cross Wavy(CW)

سطح Corrugated Undulated(CU)

شکل ۳: انواع سطوح انتقال حرارت اصلی



شکل ۴: تاثیر محدوده دمایی ریکوپراتورها بر عملکرد میکروتوربین؛ ۱. میکروتوربین های امروزی با ریکوپراتور فولاد ضد زنگ، ۲. هدف نهایی با ریکوپراتورهای آلیاژی فولاد ضد زنگ، ۳. پتانسیل قابل دستیابی برای میکروتوربین های تمام فلزی، ۴. محدوده بازده با ریکوپراتورهای سوپرآلیاژ، ۵. اهداف بلند مدت بازده برای میکروتوربین های سرامیکی