

بررسی اثرات رسوب بر عملکرد حرارتی بویلرهای بازیاب نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

علی اکبر گلنشان^۱ نوید دلگرم^۲ سعید دلگرم^۳

^۱استاد دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ایران Golneshan110@yahoo.com

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه تهران، ایران Navid.delgarm@ut.ac.ir

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت، دانشگاه تهران، ایران Saeed.delgarm@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی الکتریکی از یک سو و نیز کاهش منابع انرژی فسیلی در جهان از سوی دیگر، نیاز به استفاده بهینه از منابع انرژی مورد توجه جدی قرار گرفته است. در این راستا یکی از موثرترین سیستم‌های تبدیل انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشند. از آنجا که بویلر بازیاب حرارت (H.R.S.G.) نقشی کلیدی در عملکرد کلی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ایفا می‌کند، لذا بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی بویلر بازیاب یکی از مهم‌ترین اقدامات در جهت افزایش راندمان حرارتی سیکل ترکیبی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نرم-افزار MATLAB به بررسی معادلات پایستگی جرم و انرژی در اجزای مختلف بویلر بازیاب حرارت و نیز اثر رسوب‌زایی لوله‌های بویلر در کاهش ضریب کلی انتقال حرارت و کاهش راندمان بویلر بازیاب پرداخته شد و در نهایت، هزینه و میزان انرژی تلف شده در مدت یک سال کارکرد نیروگاه برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد رفتار و عملکرد حرارتی بویلرهای بازیاب، بستگی شدیدی به میزان رسوب ایجاد شده ناشی از سیال گرم و سرد بر روی سطوح لوله‌ها دارد لذا با توجه به داده‌های نیروگاه، نگهداری و تعمیر منظم می‌تواند نقشی اساسی در افزایش راندمان بویلرهای بازیاب داشته و آنها را در شرایط کاری مناسب‌تری قرار دهد.

واژه‌های کلیدی: بویلر بازیاب حرارت، راندمان حرارتی، رسوب گذاری، سیکل ترکیبی، MATLAB

جدول ۱: فهرست علائم

\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت، (kW)		علائم و اختصارات
R_f	مقاومت رسوب	A	سطح کلی انتقال حرارت، m^2
R_w	مقاومت دیوار لوله	A_c	سطح انتقال حرارت برای شرایط تمیز، m^2
T_g	دمای گاز، (K)	A_f	سطح انتقال حرارت برای شرایط کثیف، m^2
T_t	دمای کلی لوله، (K)	A_w	سطح انتقال حرارت دیوار لوله، m^2
T_f	دمای پره، (K)	$C_{p,g}$	ظرفیت گرمای ویژه فشار ثابت گاز، $(J/kg \cdot K)$
T_∞	دمای محیط، (K)	$C_{p,w}$	ظرفیت گرمای ویژه فشار ثابت آب، $(J/kg \cdot K)$
T_d	دمای خروجی توربین، (K)	d_i	قطر داخلی لوله، (m)
U	ضریب انتقال حرارت کلی، $(W/m^2 \cdot K)$	G	نرخ دبی حجمی، $(kg/m^3 \cdot s)$
U_c	ضریب انتقال حرارت کلی برای شرایط تمیز، $(W/m^2 \cdot K)$	$HRSG$	بویلر بازیاب حرارت
U_f	ضریب انتقال حرارت کلی برای شرایط کثیف، $(W/m^2 \cdot K)$	H_{LHV}	ارزش حرارتی پایین سوخت، (kJ/kg)
\dot{W}_{net}	توان خالص خروجی از ژنراتور، (kW)	HP	فشار بالا
	علائم یونانی	h	انتالپی، (kJ/kg)
δ_w	ضخامت دیوار	h_i	ضریب انتقال حرارت داخلی لوله، $(W/m^2 \cdot K)$
ε_g	ضریب تشعشع گاز	h_o	ضریب انتقال حرارت خارجی لوله، $(W/m^2 \cdot K)$
η	بازده	h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشع، $(W/m^2 \cdot K)$
μ	گرانروی	h_c	ضریب انتقال حرارت جابه جایی، $(W/m^2 \cdot K)$
σ	ثابت استفان - بولتزمن	IP	فشار متوسط
	زیرنویس ها	K_w	ضریب انتقال حرارت رسانش دیوار $(W/m \cdot K)$
cc	محفظه‌ی احتراق	L_f	ارتفاع پره، (m)
$conv$	جابه جایی	$LMTD$	اختلاف دمای متوسط لگاریتمی
gen	ژنراتور	LP	فشار پایین
i	داخلی	\dot{M}_g	نرخ دبی جرمی گاز، (kg/s)
o	خارجی	\dot{M}_w	نرخ دبی جرمی آب، (kg/s)
rad	تشعشع	\dot{M}_{DA}	نرخ دبی جرمی دی اریاتور، (kg/s)
s	بخار	$\Delta \dot{m}$	نرخ دبی جرمی سوخت اضافی اتلافی، (kg/s)
tot	کل	Nu	عدد ناسلت
		Pr	عدد پرانتل

۱- مقدمه

حرارتی بالاتر نسبت به سیکل بخار و یا سیکل گاز، افزایش یافته است. در این میان از جمله مهم‌ترین تجهیزات نیروگاه سیکل ترکیبی که نقشی کلیدی و بسیار مهم بر عملکرد کلی نیروگاه ایفا می‌کند، بویلر بازیاب حرارت (H.R.S.G.) می‌باشد. بویلر بازیاب حرارت نوعی مبدل حرارتی است که رابط سیکل گازی و سیکل بخار بوده و به عنوان قلب سیکل بخار عمل می‌کند و با استفاده از گازهای گرم خروجی از توربین گاز، بخار مورد نیاز سیکل بخار را جهت تولید الکتریسیته فراهم می‌کند. بنابراین برای مبادله بیشترین مقدار انرژی حرارتی که منجر به افزایش عملکرد کلی سیکل ترکیبی می‌شود، بویلر بازیاب

با بروز بحران انرژی در نیمه دوم دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی ناشی از افزایش قیمت محصولات نفتی کشورهای صادر کننده و نیز با افزایش مصرف انرژی به دلیل رشد جمعیت و توسعه‌ی صنایع، ضرورت صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد توجه جدی قرار گرفت. از این رو کشورهای صنعتی ضمن صرف هزینه‌های زیاد و تحقیقات گسترده، مقررات و استانداردهای ویژه‌ای را جهت کاهش مصرف انرژی در بخش‌های مختلف تدوین و به کار گرفتند.

امروزه از جمله موثرترین سیستم‌های تبدیل انرژی برای تولید الکتریسیته، استفاده از فناوری سیکل ترکیبی می‌باشد. در چند دهه اخیر، شمار نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل راندمان

¹ Heat Recovery Steam Generator

حرارت می‌بایست به طور بسیار دقیق محاسبه و طراحی گردد و مورد بهره‌برداری و نگهداری قرار گیرد.

فرایند انتقال حرارت، میان گازهای داغ حاصل از احتراق (دود) و جریان آب درون لوله‌های بویلر بازیاب اتفاق می‌افتد. در گذر زمان به علت تجمع و نشست ذرات معلق موجود در گازهای داغ و نیز جریان سیال درون لوله، بر روی سطوح داخلی و خارجی لوله‌های بویلر بازیاب رسوب^۲ تشکیل می‌گردد که اثر قابل توجهی بر فرایند انتقال حرارت می‌گذارد.

رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت تا به امروز نیز از جمله جدی‌ترین و مهم‌ترین مشکلات در تجهیزات انتقال حرارت به شمار می‌رود که در نتیجه آن، کاهش قابل توجه در سرعت جریان سیال، کاهش قابلیت اطمینان تجهیزات، کاهش دوره عمر، کاهش راندمان حرارتی و همچنین افزایش تلفات حرارتی، افزایش هزینه قیمت تمام شده محصولات و افزایش دمای سطح لوله را در پی خواهد داشت. لایه رسوب خاصیت هدایت حرارتی کمی دارد لذا مقاومت در برابر انتقال حرارت را افزایش داده و بازده مبدل‌های حرارتی را کاهش می‌دهد. همچنین در نتیجه ایجاد رسوب داخلی، سطح مقطع لوله کاهش یافته و منجر به افزایش افت فشار درون لوله می‌شود، بنابراین برنامه‌ریزی جهت نگهداری و تعمیرات و نیز شست‌وشوی منظم بویلرهای بازیاب حرارت، یکی از مهم‌ترین اقدامات در جهت افزایش بهره‌وری بویلرهای بازیاب می‌باشد.

در سال‌های اخیر، بهبود عملکرد بویلرهای بازیاب حرارت مورد توجه پژوهشگران زیادی در سراسر دنیا قرار گرفته است و تا کنون چندین گزارش از اثر پدیده رسوب‌زایی بر لوله‌های بویلرهای بازیاب، منتشر شده است.

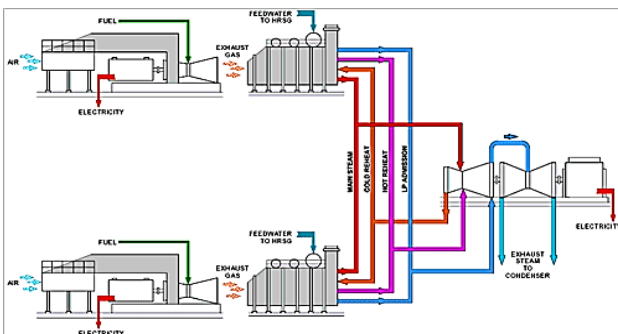
مکبث و همکاران، اثر رسوب به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر از جنس مگنتیت متخلخل را بر روی لوله‌های بویلر بازیاب مورد مطالعه قرار دادند و در مقایسه با لوله تمیز، کاهش ۵ تا ۱۰ درصد شار حرارتی را مشاهده کردند [۱]. همچنین وی در مطالعه‌ای دیگر اثر رسوبات خام بر افت فشار اصطکاکی در لوله‌های با سطح مقطع حلقوی را مورد بررسی قرار داد و مشاهده کرد که رسوبات خام اثرات قابل توجهی در افت فشار جریان آب تک‌فاز دارد [۲]. گلیبف و همکاران، به مطالعه اثرات رسوب دی‌اکسید آهن بر روی ضریب هدایت دیواره‌های لوله بویلر نیروگاه مرکزی کوناکو پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ ضخامت رسوب از ۲۰ تا ۸۰ درصد، ضریب انتقال حرارت هدایت رسوبات از ۰/۷ به ۰/۵۵ کاهش می‌یابد [۳]. میزونو و همکاران،

به بررسی رسوب ذرات هماتیت تشکیل شده بر روی فولاد ضد زنگ و تاثیر آن بر غلظت، شار گرما و فشار پرداختند [۴]. کیتو، نشان داد که رسوب نازک و یکنواخت ایجاد شده در لوله‌های بویلر بازیاب با قطر بزرگ، در فشارهای زیر بحرانی اثر کمی در افت فشار اصطکاکی دارد در حالی که در فشارهای فوق‌بحرانی، رسوب به طرز چشمگیری افزایش افت فشار را ایجاد می‌کند [۵]. گاناپاسی، اثر رسوب در هر دو طرف لوله بویلر بازیاب را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که رسوب ایجاد شده سبب کاهش ضریب انتقال حرارت هدایت و در نتیجه کاهش تولید بخار و افزایش دمای گاز خروجی خواهد شد. همچنین درجه حرارت دیوار لوله به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که منجر به شکست لوله می‌شود [۶].

از بررسی تحقیقات انجام گرفته چنین بر می‌آید که علی‌رغم پژوهش‌های علمی فراوان بر روی جنبه‌های مختلف اثرات رسوب بر عملکرد بویلرهای بازیاب حرارت، در زمینه اثرات رسوب بر کاهش راندمان حرارتی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، به ندرت مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی اثرات رسوب بر لوله‌های بویلر بازیاب و نیز اثر آن بر افزایش سوخت مصرفی و کاهش راندمان حرارتی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشد.

۲- تحلیل ترمودینامیکی نیروگاه سیکل ترکیبی

شکل (۱) نمای شماتیک نیروگاه سیکل ترکیبی را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱)، گازهای داغ خروجی از هر توربین گاز، وارد یک بویلر بازیاب حرارت شده و پس از فرایند انتقال حرارت، از بویلر خارج گردیده و وارد محیط می‌شوند. حرارت گرفته شده از گازهای گرم موجب تولید بخار در هارپ‌های HP و IP می‌گردد و سپس به سمت توربین بخار هدایت شده و پس از خروج از توربین بخار در چکاننده تقطیر گشته و در نهایت توسط پمپ مجدداً به بویلر بازیاب حرارت برگشت داده می‌شود.



شکل ۱: شماتیک نیروگاه سیکل ترکیبی

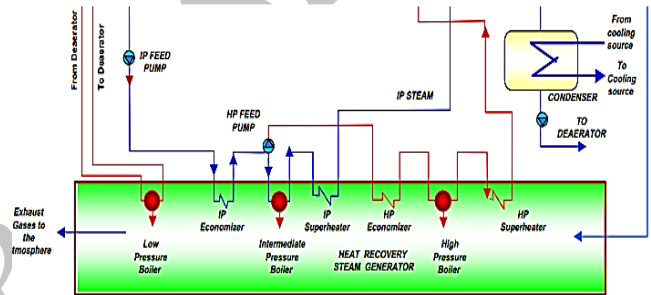
^۲ Fouling

۱-۲- معرفی نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، در ۱۹ کیلومتری جنوب شرق شهر شیراز، در نزدیکی بخش اکبرآباد و در مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی و ۲۹ درجه شمالی قرار دارد. این نیروگاه مشتمل بر ۶ واحد گازی هر یک با توان ۲۳/۴ مگاوات، ۳ واحد بخار هر یک با توان ۹۸/۲ مگاوات، ۶ واحد H.R.S.G. و ۳ واحد برج خنک کن هلر بوده و نوع سوخت آن نیز گاز طبیعی و گازوئیل می‌باشد. ظرفیت اسمی کل این نیروگاه، ۱۰۳۵/۳ مگاوات و ظرفیت عملیاتی آن نیز ۸۲۵/۷۵ مگاوات می‌باشد.

۲-۲- مدل‌سازی بویلرهای بازیاب حرارت

شکل (۲) نمای شماتیک بویلر بازیاب حرارت را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۲)، بویلرهای بازیاب حرارت شامل سه قسمت IP، HP و LP بوده که قسمت‌های HP و IP خود نیز شامل سه قسمت اکونومایزر^۳، اواپراتور^۴، سوپرهیتر^۵ می‌باشد.



شکل ۲: شماتیک بویلر بازیاب حرارت

با توجه به شکل (۲)، با استفاده از قوانین پایستگی جرم و انرژی در بویلرهای بازیاب حرارت، مقادیر آنتالپی، دما، فشار، ضریب انتقال حرارت کلی، بازده و در نهایت هزینه و میزان انرژی حرارتی تلف شده در تمامی قسمت‌های بویلر بازیاب حرارت، در مدت یک سال کارکرد نیروگاه برآورد شده است. فرضیات به کار گرفته شده در مدل‌سازی بویلرهای بازیاب حرارت عبارتند از:

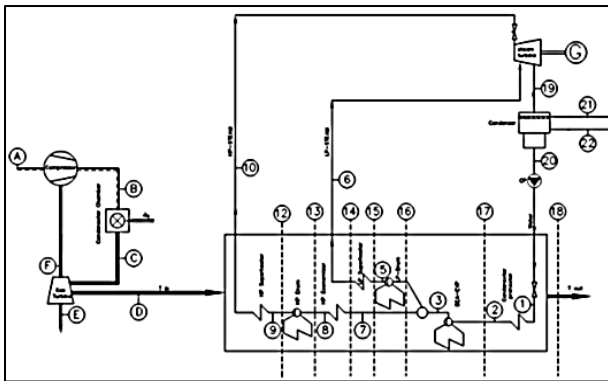
(۱) توربین، کمپرسور و پمپ آدیباتیک عمل می‌کنند.

(۲) هوا و گازهای ناشی از احتراق به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند.

(۳) جریان سیال پایا و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز فرض شده‌اند.

(۴) به علت وجود اتلافاتی که در محفظه احتراق و ژنراتور وجود دارد، بازده محفظه احتراق و ژنراتور، به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

(۵) با توجه به این که قسمت عمده سوخت مصرفی را متان تشکیل می‌دهد، مقدار ارزش حرارتی پایین سوخت H_{LHV} را برابر با مقدار (Kj/Kg) ۵۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نمای شماتیک نیروگاه سیکل ترکیبی فارس را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۳)، مدل‌سازی و معادلات حاکم بر قسمت‌های بویلر بازیاب حرارت از روابط (۱) الی (۸) بدست می‌آیند.



شکل ۳: شماتیک نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

سوپر هیتر فشار بالا:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{d1} - T_{1r}) = \dot{M}_{s,HP} \times (h_{11} - h_{1r}) \quad (1)$$

اواپراتور فشار بالا:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1r} - T_{1s}) = \dot{M}_{s,HP} \times (h_{1s} - h_{1r}) \quad (2)$$

اکونومایزر فشار بالا:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1r} - T_{1e}) = \dot{M}_{s,HP} \times (h_{1e} - h_{1r}) \quad (3)$$

سوپر هیتر فشار پایین:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1e} - T_{1d}) = \dot{M}_{s,LP} \times (h_{1d} - h_{1e}) \quad (4)$$

اواپراتور فشار پایین:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1d} - T_{1e}) = \dot{M}_{s,LP} \times (h_{1e} - h_{1d}) \quad (5)$$

دی اریتور:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1e} - T_{1v}) = \dot{M}_{s,LP} \times (h_{1v} - h_{1e}) \quad (6)$$

پیش گرمکن:

$$\dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{1v} - T_{1s}) = \dot{M}_{s,LP} \times (h_{1s} - h_{1v}) \quad (7)$$

دبی جرمی بخار:

$$\dot{M}_s = \dot{M}_{s,LP} + \dot{M}_{s,HP} \quad (8)$$

برای بدست آوردن میزان دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور و دبی جرمی گازهای حاصل از احتراق ورودی به بویلر بازیاب حرارتی، ابتدا با استفاده از حجم کنترل برای سیکل گازی، معادله پایستگی جرم و انرژی را به صورت معادلات (۹) و (۱۰) می‌نویسیم:

پایستگی جرم:

$$\dot{M}_{air} + \dot{M}_{fuel} = \dot{M}_{Gas} \quad (9)$$

^۳ Economizer

^۴ Evaporator

^۵ Super heater

پایستگی انرژی:

$$\dot{M}_{air} \times h_{air} + \eta_{cc} \times \dot{M}_{fuel} \times H_{LHV} = \dot{M}_g \times h_g + \dot{W}_{net} / \eta_{gen} \quad (10)$$

با جایگزینی معادله موازنه‌ی جرم (۹) در معادله انرژی (۱۰)، میزان دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور را بدست آورده و سپس با جمع دبی جرمی هوای ورودی با دبی جرمی سوخت ورودی، دبی جرمی ورودی گازهای حاصل از احتراق به بویلر بازیاب حرارت بدست می‌آید.

۲-۳- گرمای مبادله شده در بویلر بازیاب حرارت

موازنه انرژی، در همه سطوح انتقال حرارت میان سیال گرم (گازهای داغ حاصل از احتراق) و سیال سرد (آب درون لوله‌ها) به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شود:

$$\dot{Q} = \dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{g,i} - T_{g,o}) \quad (11)$$

$$\dot{Q} = \dot{M}_w \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (12)$$

در این پژوهش، برای بدست آوردن گرمای مبادله شده بین گازهای داغ حاصل از احتراق و آب درون لوله‌ها، از روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (LMTD) استفاده شده است، بنابراین انتقال حرارت سطوح از رابطه (۱۳) بدست می‌آید:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{LMTD} \quad (13)$$

اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب کلی انتقال حرارت به ترتیب از معادلات (۱۴) و (۱۵) بدست می‌آیند:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{g,i} - T_{w,i}) - (T_{g,o} - T_{w,o})}{\ln \left[\frac{T_{g,i} - T_{w,i}}{T_{g,o} - T_{w,o}} \right]} \quad (14)$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + R_{f,i} + R_{f,o} \times \frac{A_i}{A_o} + \frac{\delta_w}{K_w} \times \frac{A_i}{A_w} + \frac{1}{h_o} \times \frac{A_i}{A_o} \quad (15)$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + R_f + R_w \times \frac{A_i}{A_w} + \frac{1}{h_o} \times \frac{A_i}{A_o} \quad (16)$$

$$R_f = R_{f,i} + R_{f,o} \times \frac{A_i}{A_o} \quad (17)$$

$$h_i = \frac{Nu \times K_w}{d_i} \quad (18)$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (19)$$

$$h_c = h_r + h_e \quad (20)$$

$$h_r = \sigma \times \epsilon_g \times \frac{T_g^4 - T_t^4}{T_g - T_t} \quad (21)$$

$$h_c = C_1 C_r C_\delta \times \left(\frac{d_o + r L_f}{d_o} \right)^{0.5} \times \left(\frac{T_g}{T_f} \right)^{0.25} \times G \times C_{p,g} \times \left(\frac{K}{C_{p,g} \times \mu} \right)^{0.67} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) ضرایب C_1 ، C_r و C_δ از [۷] بدست می‌آیند. بر اساس معادله (۱۵)، رابطه میان ضرایب انتقال حرارت کلی و مقاومت گرمایی برای سطوح انتقال حرارت تمیز و کثیف، به ترتیب از روابط (۲۳) و (۲۴) بدست می‌آیند:

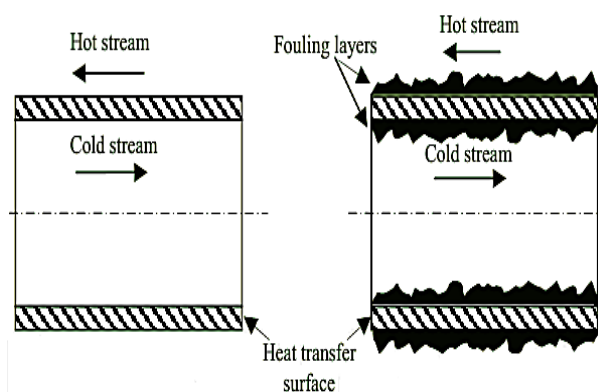
$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{o,f}} + R_w \times \frac{A_i}{A_w} + \frac{1}{h_{i,f}} \times \frac{A_o}{A_i} \quad (23)$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_{o,f}} + R_f + R_w \times \frac{A_i}{A_w} + \frac{1}{h_{i,f}} \times \frac{A_o}{A_i} \quad (24)$$

در شرایط ایده‌آل شاهد برقراری روابط (۲۵) خواهیم بود که در این حالت، مقاومت رسوب از معادله (۲۶) بدست خواهد آمد:

$$h_{o,f} = h_{o,c}, \quad h_{i,f} = h_{i,c}, \quad A_{o,f} = A_{o,c}, \quad A_{i,f} = A_{i,c} \quad (25)$$

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (26)$$



شکل ۴: لوله تمیز (سمت چپ) و لوله رسوب گرفته شده (سمت راست)

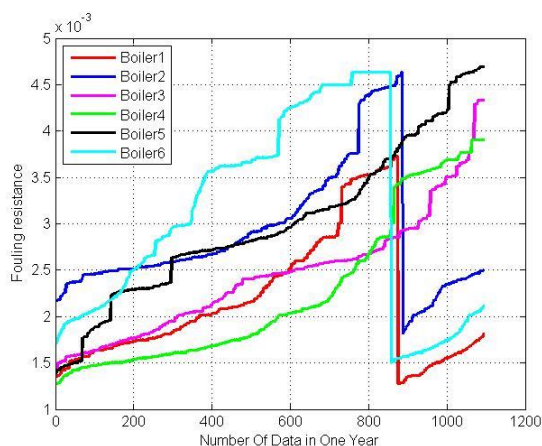


شکل ۵: لوله رسوب گرفته شده

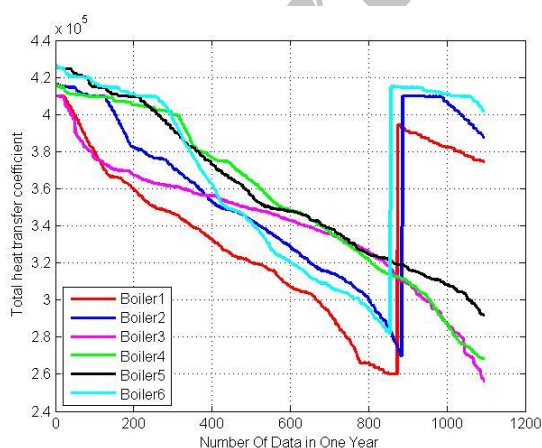
۳- نتایج و بحث

به دلیل اینکه داده‌های نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، به صورت لحظه‌ای بر روی یک Hard Disk ذخیره می‌شوند، برای دقت کافی جهت تحلیل عملکرد حرارتی بویلرهای بازیاب (H.R.S.G.)، اطلاعات مورد نیاز مربوط به کارکرد شش واحد گازی، شش واحد H.R.S.G. و سه واحد بخار در ساعات ۱۵، ۶ و ۲۱ در طی یک سال جمع‌آوری نمودیم.

در این مطالعه، از بین شش واحد H.R.S.G.، بویلرهای شماره ۱، ۲ و ۶ مورد شست‌وشوی و رسوب‌زدایی قرار گرفتند. در ادامه، نمودارهای تغییرات مقاومت رسوب، ضریب انتقال حرارت کلی، تغییرات سوخت مصرفی، تغییرات دمای خروجی H.R.S.G.، تغییرات مقدار هوای ورودی به کمپرسور و نیز بازده بر حسب زمان بررسی شده است. نتایج حاصل در شکل‌های (۳) تا (۸) ارائه شده‌اند:



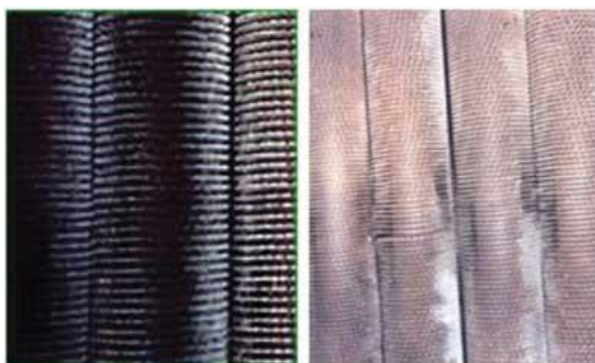
شکل ۳: تغییرات مقاومت رسوب بر حسب زمان



شکل ۴: تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب زمان



شکل ۶-الف: لوله کثیف و رسوب گرفته شده (قبل از شست‌وشوی)



شکل ۶-ب: لوله تمیز و رسوب زدایی شده (بعد از شست‌وشوی)

۲-۴- حرارت اتلافی از بویلر بازیاب حرارت

حرارت اتلافی از بویلر بازیاب حرارت از رابطه (۲۷) بدست می‌آید:

$$\dot{Q}_{loss} = (\dot{M}_g \times h_g)_{in} - (\dot{M}_g \times h_g)_{out} - (\dot{M}_{HP} \times h_{HP} + \dot{M}_{IP} \times h_{IP}) + (\dot{m}_{LP} \times h_{LP}) \quad (27)$$

این حرارت اتلافی از بویلر بازیاب به صورت تشعشع، جابه‌جایی و انرژي ناشی از جرم سیال خروجی از دی‌اریتور^۶ ظاهر می‌شود، بنابراین می‌توان حرارت اتلافی از بویلر بازیاب را نیز از رابطه (۲۸) بدست آورد:

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{m}_{DA} \times h_g + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} \quad (28)$$

۲-۵- راندمان حرارتی بویلر بازیاب

راندمان حرارتی بویلر بازیاب از رابطه (۲۹) بدست می‌آید:

$$\eta_{HRSG} = \frac{\dot{Q}_{steam}}{\dot{Q}_{HRSG, supplied}} \quad (29)$$

$$\dot{Q}_{steam} = (\dot{M}_{HP} \times h_{HP} + \dot{M}_{IP} \times h_{IP}) - (\dot{M}_{LP} \times h_{LP}) \quad (30)$$

$$\dot{Q}_{HRSG, supplied} = \dot{M}_g \times C_{p,g} \times (T_{g,i} - T_{\infty}) \quad (31)$$

^۶ Deaerator

همان‌گونه که از نمودار شکل (۳) مشاهده می‌شود بر اثر رسوب‌گذاری در لوله‌های بویلر بازیاب، ضریب کلی انتقال حرارت، شکل (۴)، و راندمان حرارتی بویلر بازیاب، شکل (۵)، کاهش یافته است. شکل (۶) میزان هوای ورودی به کمپرسور هر واحد گازی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. به خوبی می‌توان از شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده کرد که برای تولید انرژی الکتریکی یکسان، از واحدهای بویلر شستشو نشده (واحدهای ۳، ۴ و ۵) در مقایسه با واحدهای بویلر شستشو شده (۱، ۲ و ۶)، لازم است میزان بیشتری سوخت مصرف و به تبع آن میزان بیشتری هوا وارد کمپرسور گردد. با توجه به آن‌که بویلرهای شماره ۱، ۲ و ۶ مورد شست‌وشوی قرار گرفته‌اند، تاثیر شست‌وشوی منظم لوله‌ها، نگهداری و تعمیر بویلر بر افزایش ضریب کلی انتقال حرارت و نیز افزایش راندمان حرارتی بویلر بازیاب کاملاً مشهود است.

میزان انرژی حرارتی اضافی مصرف شده سالانه برای تولید گرمای مورد نیاز جهت تولید بخار در بویلرهای شست‌وشو نشده در مقایسه با تولید همان حجم بخار در بویلرهای شست‌وشو شده از رابطه‌ی (۳۲) بدست می‌آید:

$$Q_{excess} = \Delta m_{cc-tot} \times \text{سال} \times \text{روز} \times \text{ساعت} \times \text{ثانیه} \times H_{LHV} \times \eta_{cc} \quad (32)$$

$$\Delta m_{cc-tot} = \sum_{i=1}^6 \Delta m_{cci} = \Delta m_{cc1} + \Delta m_{cc2} + \Delta m_{cc3} + \Delta m_{cc4} + \Delta m_{cc5} + \Delta m_{cc6} = 5/71 \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (33)$$

در رابطه‌ی (۳۳)، Δm_{cc-tot} مجموع سوخت مصرفی اضافی در واحدهای محفظه احتراق می‌باشد که برای هر واحد، سوخت اضافی مصرف شده به قرار زیر می‌باشد:

$$\Delta m_{cc1} = 0/6 \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \Delta m_{cc2} = 0/79 \left(\frac{kg}{s} \right)$$

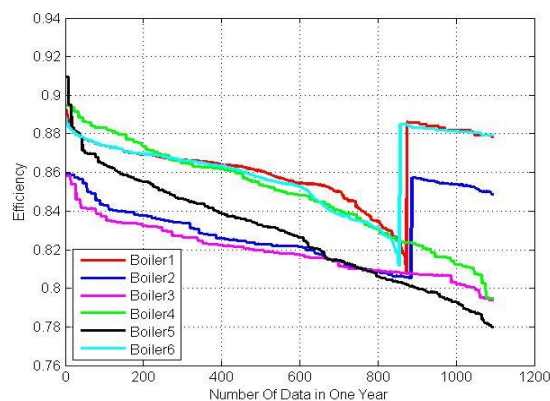
$$\Delta m_{cc3} = 1/46 \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \Delta m_{cc4} = 0/56 \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$\Delta m_{cc5} = 1/34 \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \Delta m_{cc6} = 0/95 \left(\frac{kg}{s} \right)$$

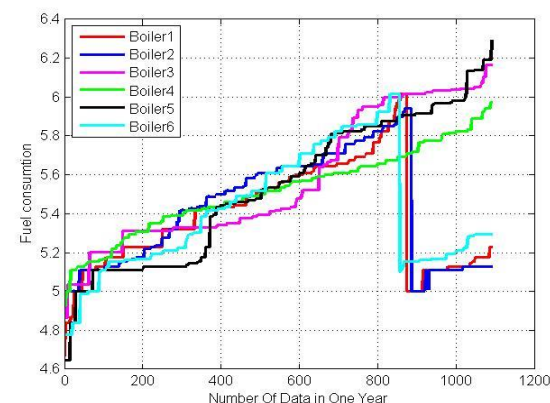
با جایگذاری مقادیر فوق در معادله (۳۲)، مقدار انرژی حرارتی تلف شده‌ی سالانه را به صورت رابطه (۳۴) خواهیم داشت:

$$Q_{excess} = 5/71 \left(\frac{kg}{s} \right) \times 5000 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \times 1 \times 12 \times 30 \times 24 \times 3600 \times 0/98 = 1/74 \times 10^{12} (kJ) \quad (34)$$

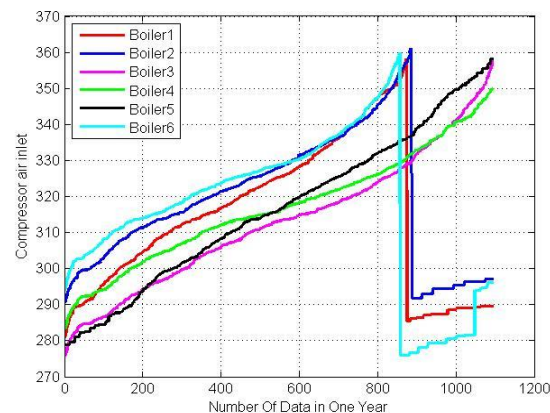
همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت مجموع دبی اضافی سوخت مصرفی به مجموع کل دبی میانگین ۶ واحد بویلر در حدود ۰/۱۶ می‌شود و این بیانگر آن است که پدیده رسوب‌زایی



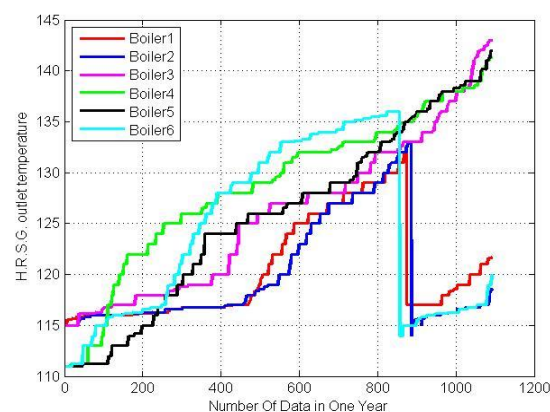
شکل ۵: تغییرات بازده (efficiency) بر حسب زمان



شکل ۶: تغییرات میزان سوخت مصرفی بر حسب زمان



شکل ۷: تغییرات میزان هوای ورودی به کمپرسور بر حسب زمان



شکل ۸: تغییرات میزان دمای خروجی H.R.S.G. بر حسب زمان

تشکر و قدردانی

لازم می‌دانیم از زحمات و حمایت‌های مدیریت محترم نیروگاه سیکل ترکیبی فارس که ما را در انجام این پژوهش یاری نموده و اطلاعات فنی مورد نیاز را در اختیارمان قرار داده است، تشکر و قدردانی نماییم.

مراجع

- [۱] Macbeth R. V., R. Trenberth, and R. W. Wood, "An Investigation into Effect of Crud Deposits on Surface Temperature Dry-out and Pressure Drop, with Forced Convection Boiling of Water at 69 Bar", Rep. No. AEEW-R ۷۰۵, ۱۹۷۱.
- [۲] Macbeth, R. V., "The Effect of Crud Deposits on the Frictional Pressure Drop in Boiling Channel", Rep. No. AEEW-R ۷۶۷, ۱۹۷۲.
- [۳] Gelbov V. P., N. B. Esten, V. M. Zusman, and A. L. Luby, "Heat Conduction of Iron Oxide Deposits in Tubes Radiant Heating Surfaces in Supercritical Steam Generators", Thermal Engineering, Vol. ۲۵, No. ۴, pp. ۳۶-۴۴, ۱۹۷۸.
- [۴] Minzo T., K. Wada, and T. Iwahori, "Deposition Rate of Suspended Hematite in a Boiling Water System under BWR Conditions", Corrosion NACE, Vol. ۳۸, No. ۱, pp. ۱۵-۱۹, ۱۹۸۲.
- [۵] Kitto J. B., and M. J. Alberech, "Elements of Two-Phase Flow in Fossil Boilers", Two-Phase Flow Heat Exchangers, Vol. ۱۴۳, ۱۹۸۸.
- [۶] Ganapathy V., "Fouling in Waste Heat Boilers", Internet, publication, ۱۹۹۸.
- [۷] V. Ganapathy, Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators, Marcel Dekker ۲۰۰۳
- [۸] A.K.Tiwari, Mohd Islam and M.N.Khan, "Thermodynamic Analysis of Combined Cycle Power Plant", International Journal of Engineering Science and Technology Vol. ۲(۴), ۴۸۰-۴۹۱, ۲۰۱۰.
- [۹] Ramesh K. Shah and Dušan P. Sekulic, "fundamentals of heat exchanger design", John Wiley and sons, New York, ۲۰۰۳
- [۱۰] Rasool. Bharampoury and Ali. Behbahaninia, "Thermodynamic Comparison of ۲ Arrangements of Pressure Parts in a Double Pressure Heat Recovery Steam Generator", Electric power generation Conference, ۲۰۰۹

سبب شده است که برای تولید انرژی الکتریکی یکسان از واحدهای بویلر، سالانه در حدود ۱۶ درصد سوخت اضافی مصرف گردد. با محاسبه مقدار سوخت اضافی مصرف شده‌ی سالانه ناشی از پدیده رسوب‌زایی در بویلرهای بازیاب، به میزان $(kg) ۱۷۶۴۶۹۱۴۸.۸$ ، برابر $m^3 ۳۹۲۱۵۳.۶۶۴$ سوخت که معادل هدر رفت $(kj) ۸.۷۴ \times 10^{12}$ انرژی حرارتی می‌باشد، تلف شده است. با فرض هزینه سوخت گاز مصرفی ۸۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب، با شست‌وشوی سطوح لوله‌های بویلر بازیاب حرارت (اسید شویی)، به میزان ۳۱۳۷۲۲۹۳۱.۲ ریال در هزینه سوخت صرفه‌جویی خواهد شد.

بنابراین مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه و پایدار جهت نگهداری و تعمیرات بویلرهای بازیاب حرارت در طی دوره عمر آنها می‌تواند بویلرها را در شرایط عملکردی بهینه قرار داده و از تلفات انرژی به میزان قابل توجه‌ای جلوگیری نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از قوانین ترمودینامیکی پایستگی جرم و انرژی، بویلرهای شش‌گانه‌ی نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به کمک نرم‌افزار MATLAB، مدل گردید و به بررسی دبی جرمی گازهای داغ حاصل از احتراق ورودی به هر بویلر بازیاب حرارت (H.R.S.G.)، نحوه‌ی تغییرات دمای گاز از ورودی تا خروجی (H.R.S.G.)، محاسبه‌ی انتقال حرارت بین گازهای حاصل از احتراق و آب ورودی به H.R.S.G. جهت تولید بخار، تعیین اختلاف دمای میانگین لگاریتمی (ΔT_{LMTD}) ، محاسبه‌ی مقدار ضریب انتقال حرارت کلی برای هر کدام از هارپ‌های H.R.S.G. پرداخته شد و در نهایت راندمان کلی H.R.S.G. محاسبه گردید.

نتایج نشان داد که کاهش راندمان حرارتی بویلرهای بازیاب نیروگاه سیکل ترکیبی فارس در نتیجه‌ی رسوب‌زایی لوله‌ها بوده است. بنابراین رفتار و عملکرد حرارتی بویلرهای بازیاب، بستگی شدید به میزان رسوب ایجاد شده ناشی از سیال گرم و سرد بر روی سطوح لوله‌ها دارد و در شرایط تمیز، H.R.S.G. به طور موثرتری عمل می‌کند. لذا با توجه به داده‌های نیروگاه، نگهداری و تعمیر به موقع و دوره‌ای بویلرهای بازیاب می‌تواند نقشی اساسی در افزایش راندمان آنها داشته باشد و بویلرهای بازیاب را در شرایط کاری مناسب‌تری قرار دهد.