

# تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه حرارتی شهید مفتاح همدان

پوریا عروجی، علی محمد میرشمس، علی قاسمی نژاد

دکتری سیستم های انرژی، شرکت مهندسی آسیاوت

کارشناس ارشد برق قدرت، شرکت مهندسی آسیاوت

کارشناس ارشد مکانیک، سازمان بهره وری انرژی ایران سابا

## چکیده

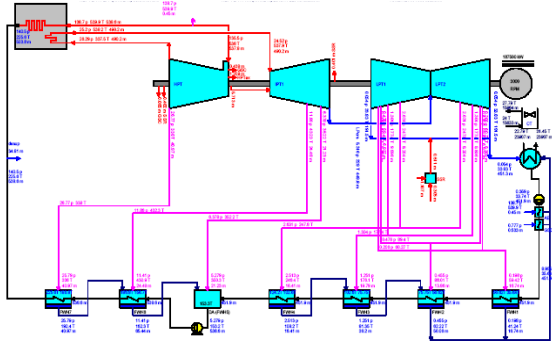
سبب افت متوسط راندمان به میزان ۱.۵۸٪ در واحدهای مختلف نیروگاه نسبت به حالت عملکردی می گردند. واژه های کلیدی: نیروگاه، انرژی، انرژی، سیکل حرارتی، تحلیل کارایی

تحلیل کارایی نیروگاهها موضوعی است که می تواند ضمن پیامدهای اقتصادی فراوانی که بدنبال خواهد داشت موجب کاهش آلودگی محیط زیست و امنیت در تامین انرژی شود. در این راستا با نظر به تامین نزدیک به ۴۵ درصد از برق کشور توسط نیروگاههای حرارتی، توجه به این بخش و افزایش کارایی آن ضروری بنظر می رسد. در این تحقیق نتایج ممیزی انرژی در نیروگاه حرارتی ۱۰۰۰ مگاواتی شهید مفتاح همدان ارائه شده است. در ابتدا، مدل سازی سیکل حرارتی نیروگاه توسط نرم افزار Thermo Flow انجام گردیده و سپس تحلیل انرژی و انرژی در اجزای سیکل نیروگاه انجام و میزان تلفات انرژی و راندمان انرژی و انرژی کلید اجزاء سیکل محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از آنالیز حساسیت به بررسی تاثیر پارامترهای عملکردی و ساختاری اجزاء سیکل بر روی عملکرد نیروگاه پرداخته شده است. در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده از آنالیز انرژی و انرژی، تجهیزات بویلر و کندانسور نیروگاه بعنوان بخشهای اصلی تلف کننده انرژی شناخته شدند که

## ۱- مقدمه

وابستگی بشر امروزی و جنبه های مختلف زندگی آن به انرژی برق بر کسی پوشیده نیست. علاوه بر آن مزایایی چون انتقال ساده و تمیزی آن نیز مزیت نسبی انرژی برق نسبت به سایر انواع انرژی می باشد. از این رو نیروگاههای برق در زندگی انسان نقش مهمی را پیدا کرده و صنعت برق به عنوان یکی از صنایع مادر از نظر سیاسی، اقتصادی، میزان سرمایه گذاری، پیچیدگی تکنولوژی در مقایسه با سایر صنایع از اولویت خاصی برخوردار است. بنابراین بهره برداری صحیح و اقتصادی از واحدهای موجود در کشور در مقایسه با سایر مسائل صنعت برق حائز اهمیت بوده و بدین منظور بهینه سازی نیروگاه های

مرحله بخار پس از عبور از توربین فشار متوسط وارد توربین فشار ضعیف شده و از آنجا وارد کندانسور می شود. در شکل (۱) دیاگرام سیکل تولید توان نیروگاه نشان داده شده است.



شکل (۱): دیاگرام سیکل تولید توان نیروگاه

### ۳- روابط حاکم بر سیکل حرارتی

قانون اول ترمودینامیک مبین انرژی و قانون دوم مبین انرژی می باشد. انرژی مبین کیفیت انرژی است و تحلیل جریان انرژی کمک شایانی برای افزایش بازده و کاهش تلفات انرژی انجام می دهد و در واقع با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک می توان جهت بیان نمودن کارکرد دقیق و بهینه سیستم و تحلیل عوامل بازگشت ناپذیری که منجر به نابودی انرژی و کاهش بازده می شود استفاده کرد. برای بیان انرژی و مفهوم قانون دوم ترمودینامیک به ذکر روابط ترمودینامیکی مقدماتی می پردازیم.

معادله بقای جرم :

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad (1)$$

بقای انرژی :

$$\sum_i \dot{E}_i + \dot{Q}_{cv} = \sum_e \dot{E}_e + \dot{W}_{cv} \quad (2)$$

مبدلهای حرارتی :

$$\dot{Q}_{cv} = \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (3)$$

بویلر:

$$\dot{Q}_B = \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_f \times HHV \quad (5)$$

راندمان بویلر با رابطه (۶) قابل محاسبه می باشد.

$$\epsilon_b = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{in}} \quad (6)$$

حرارتی از سالهای پیش مورد توجه خاص قرار گرفته است. از سویی دیگر نیروگاه حرارتی از مصرف کننده های عمده سوخت فسیلی بوده و لذا تلاش برای کاهش مصرف سوخت این نیروگاهها موضوعی است که اگر میسر شود، ضمن پیامدهای اقتصادی فراوانی که به دنبال خواهد داشت، موجب کاهش آلودگی محیط زیست و امنیت در تامین انرژی نیز خواهد شد. بخشی از افت بازده و کارایی تجهیزات به خاطر افزایش عمر واحد طبیعی و اجتناب ناپذیر بوده، ولی بخش دیگر را در صورت بررسی های فنی و بهینه سازی میتوان به حداقل رساند.

نیروگاه حرارتی شهید مفتاح به عنوان یکی از طرحهای مهم و زیر بنایی جمهوری اسلامی ایران در دشت فامنین در کیلومتر ۴۵ جاده همدان- تهران در زمینی به وسعت ۲۷۰ هکتار بنا گردیده است. این نیروگاه از نوع بخاری با برج خنک کننده ی تر و سوخت گاز طبیعی و مازوت طراحی شده و دارای چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی می باشد. انرژی تولیدی نیروگاه از طریق ایستگاه برق ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلو ولت نیروگاه به شبکه سراسری انتقال داده می شود. سیکل رانکین تولید توان نیروگاه دارای ۴ واحد توربین بخار با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات میباشد.

### ۲- شرح سیکل حرارتی نیروگاه

مطابق شکل (۱) آب خروجی از کندانسور پس از عبور از پمپهای کندانس، وارد اجکتور بخاری می شود و سپس آب خروجی از اجکتور به گلند کندانسور می رود. در مرحله بعد سیال وارد گرمکن فشار ضعیف شماره ۱ و ۲ و ۳ و ۴ می شود که بخار لازم برای گرمایش آب تغذیه در این گرمکن از توربین فشار ضعیف تامین می گردد. آب تغذیه پس از عبور از گرمکن فشار ضعیف شماره ۴ وارد گرمکن شماره ۵ یا دی اریتور می شود. آب ورودی پس از گرم شدن بوسیله بخار تامین شده از توربین فشار متوسط وارد بوستر پمپهای آب تغذیه شده و بعد از تامین فشار لازم، وارد پمپهای آب تغذیه بویلر می شود. بعد از خروج آب تغذیه از این پمپها، گرمکنهای فشار قوی شماره ۶ و ۷ به وسیله بخار تامین شده از توربین فشار متوسط و خط ری هیت سرد، آب را گرم کرده و آنرا از نظر دما و فشار برای ورود به بویلر آماده می کنند. بخار تامین شده از بویلر به توربین فشار بالایی رود، پس از خروج بوسیله ری هیت سرد جهت گرمایش مجدد و جذب انرژی، وارد توربین فشار متوسط میشود. در این

توربین :

$$\dot{w}_t = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e \quad (7)$$

قانون دوم ترمودینامیک به کیفیت انرژی می‌پردازد و برای طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی به کار گرفته می‌شود. این روش بیشتر به تجزیه انرژی در خلال یک تحول، آنتروپی تولید شده و هدر رفتن فرصت‌های بهره‌وری انرژی می‌پردازد و میدان وسیع‌تری در مقایسه با آنالیز انرژی را مطرح می‌نماید. انرژی حداکثر کار با قابلیت مفید قابل‌استحصال از یک سیستم ترمودینامیکی طی یک فرایند برگشت‌پذیر بین یک حالت مشخص سیستم و حالت سیستم در شرایط تعادل ترمودینامیکی با محیط است. موازنه انرژی برای سیستم با یک ورودی و یک خروجی و با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در آن به صورت زیر می‌باشد [۱]:

$$Ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

$$Ex_1 = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0) \quad (9)$$

$$Ex_2 = (h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0) \quad (10)$$

$$w_{rev} = m_1 Ex_1 - m_2 Ex_2 \quad (11)$$

جمله دوم در تعریف انرژی کار برگشت‌پذیر مفید قابل حصول از سیستم طی فرایند برگشت‌پذیر بین دو حالت مشخص با آنتالپی و آنتروپی  $h_1, s_1$  و  $h_2, s_2$  است. همیشه تفاوت بین انرژی واقعی قابل حصول از یک سیستم در یک حالت مشخص و انرژی وجود دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که مهندسان تا چه حد می‌توانند طرح خود را اصلاح کنند و معیاری از میزان ناکاملی ترمودینامیکی می‌باشد. هدف اصلی آنالیز انرژی یافتن راه‌حلهایی برای از بین بردن یا کاهش ناکاملی ترمودینامیکی در فرآیندهاست. این آنالیز قادر است اطلاعاتی در مورد امکان بهبود و اصلاح فرآیندهای حرارتی ارائه کند و سبب استفاده کارا از حامل‌های انرژی در سیستم‌های حرارتی مصرف‌کننده سوخت‌ها شود.

با آنالیز انرژی محل و نوع و مقدار تلفات و هدر رفت انرژی را می‌توان تعیین کرد و پیشنهاداتی را هم جهت بهینه‌سازی و افزایش بهره‌وری ارائه نمود. انرژی برخلاف انرژی بقا نداشته و توسط برگشت‌ناپذیری‌های ناشی از اختلاط، اصطکاک، انبساط و انقباض ناگهانی، هدررفت حرارت، توربولانس، شوک و غیره که

همواره در سیستم ترمودینامیکی واقعی موجود هستند، از بین می‌رود. با شناسایی عوامل برگشت‌ناپذیری، مقدار و محل و اولویت‌بندی آنها می‌توان از نابودی انرژی کاست. راندمان انرژی از اندازه‌گیری دقیقی از عملکرد یک سیستم و میزان انحراف از عملکرد ایده‌آل از نظر ترمودینامیکی را بیان می‌کند.

$$Ex_{Inlet} = Ex_{Outlet} + Ex_{Destructed} + Ex_{Loss} \quad (12)$$

$$\eta_{Exergy} = \frac{Ex_{Outlet}}{Ex_{Inlet}} = 1 - \frac{Ex_{Destructed} + Ex_{Loss}}{Ex_{Inlet}} \quad (13)$$

در شکل (۲) میزان راندمان انرژی در اجزای مختلف نیروگاه محاسبه و نشان داده شده است. همانطوریکه دیده می‌شود کندانسور و بویلر برج خنک کن و پمپ گردش سیکل خنک کن نیروگاه راندمان انرژی پایین تر و توربین و هیترها مقادیر بالاتر راندمان انرژی را بخود اختصاص داده اند.



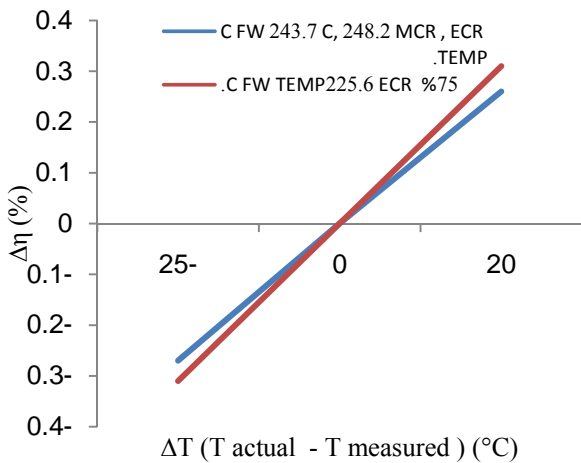
شکل (۲): راندمان انرژی در اجزای نیروگاه

باشد. در این تحقیق سعی شده تا اثر تعدادی از این پارامترها بر روی راندمان تجهیزات و در نهایت راندمان کل سیکل نشان داده شود.

#### ۴-۱- بویلر

از بررسی اشکال (۳) و (۴) چنین بر می آید که بویلر نیروگاه سهم بسیار بالایی از تلفات انرژی را بخود اختصاص داده است.

بررسی ماهیت و علت این میزان از بازگشت ناپذیری با توجه به دو فرآیند مهم احتراق و انتقال حرارت داخل بویلر که از جمله عوامل موثر در بازگشت ناپذیری فرایندها می باشند، قابل بررسی می باشد. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته [۱] روی عوامل اصلی بازگشت ناپذیری می توان نشان داد که در بازده انرژی فرآیند انتقال حرارت نامطلوبتر از احتراق می باشد و باعث تلفات بیشتری می گردد.

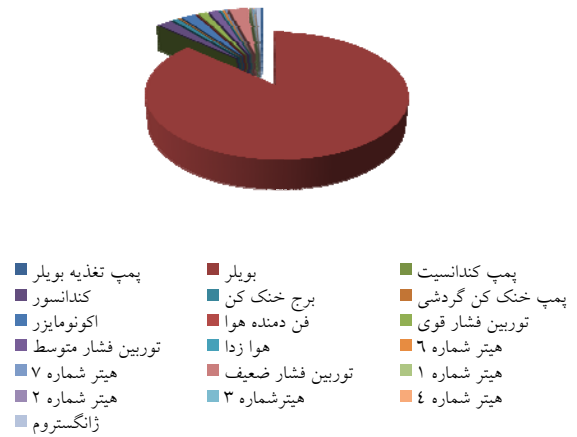


شکل (۵): تاثیر دمای آب تغذیه خروجی از هیتر ۷ بر راندمان بویلر

در شکل (۵) چگونگی تاثیر دمای آب تغذیه خروجی از هیتر ۷ بر راندمان بویلر نشان داده شده است. بهینه سازی انتقال حرارت در این زمینه می تواند بعنوان راهکاری موثر، مورد توجه قرار گیرد.

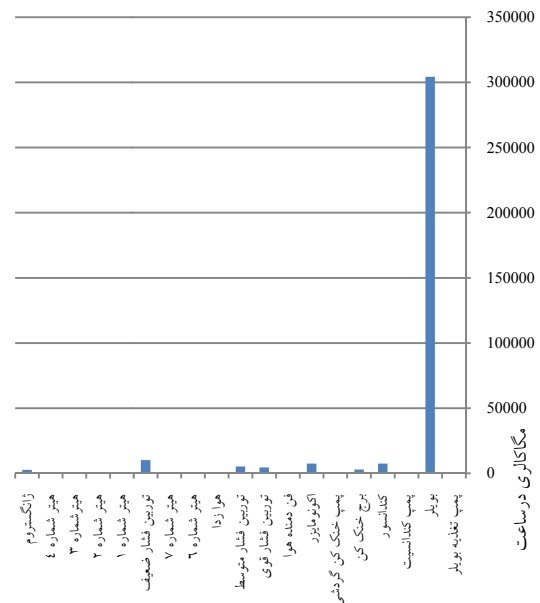
در شکل (۳) درصد اتلاف انرژی در اجزای نیروگاه نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل دیده می شود بویلر نیروگاه بیشترین سهم را بخود اختصاص داده است.

#### درصد اتلاف انرژی



شکل (۳): درصد تلفات انرژی در اجزای نیروگاه

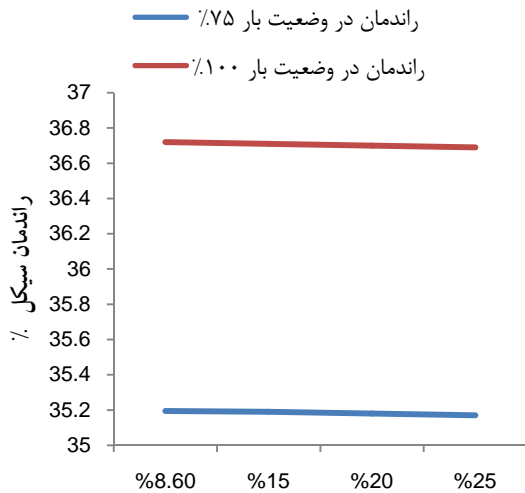
در شکل (۴) میزان اتلاف انرژی در اجزای مختلف نیروگاه نشان داده شده است و همانطوریکه دیده می شود میزان تلفات انرژی در بویلر بسیار بالاتر از سایر تجهیزات می باشد.



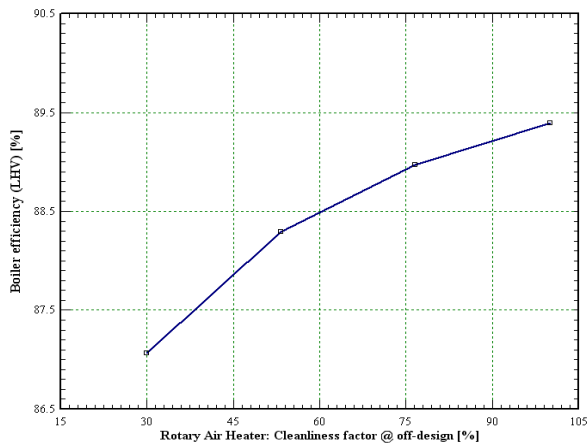
شکل (۴): میزان تلفات انرژی در اجزای نیروگاه

#### ۴-۲- آنالیز حساسیت

بررسی تاثیر پارامترهای مهم در سیکل حرارتی نیروگاه می تواند کمک بسیاری در بهینه سازی سیکل نیروگاهی داشته



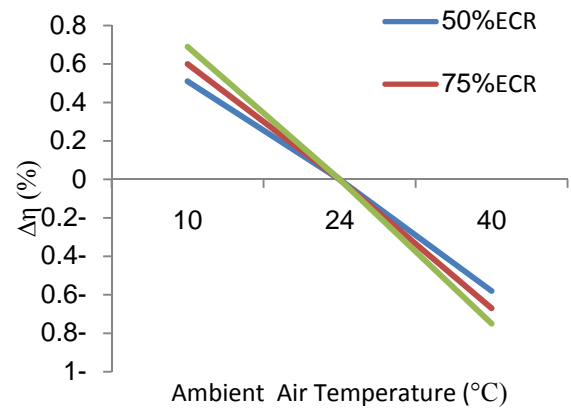
شکل (۸): تاثیر میزان نشتی ژانگستروم در راندمان سیکل حرارتی نیروگاه



کل (۹): تاثیر فاکتور تمیزی ژانگستروم در بویلر نیروگاه

#### ۴-۲ - کندانسور

نکته دیگری که در بررسی قانون دوم ملاحظه شد پایین بودن راندمان آگزورژی در کندانسور نیروگاه می باشد. که در اشکال (۳) و (۴) نیز مشاهده می شود. مقدار تلفات بالای آگزورژی بطور کلی با توجه به انتقال حرارت که از جمله عوامل موثر بر بازگشت ناپذیری می باشد تا حدود زیادی غیر قابل اجتناب است. ولی عوامل دیگری نیز در افزایش مقدار بازگشت ناپذیری دخالت داشته و تا حدودی قابل کنترل می باشند. در بررسی بعمل آمده یکی از مشکلاتی که سهم بسزایی در کاهش راندمان در نیروگاه همدان داشته، افزایش قابل توجه فشار کندانسور و یا به عبارتی پایین بودن مقدار خلاء کندانسور در واحدهای نیروگاه همدان می باشد. در حالت طراحی مقدار خلاء کندانسور برابر با ۷۱۰- میلیمتر جیوه و یا برابر با ۰.۰۶



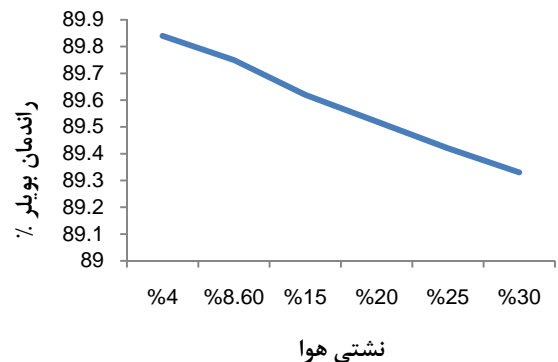
شکل (۶): تاثیر دمای محیط بر روی راندمان بویلر در حالت عملکرد نیروگاه با سوخت مازوت

در شکل (۶) تاثیر دمای محیط بر روی راندمان بویلر در حالت عملکرد نیروگاه با سوخت مازوت نشان داده شده است. این تاثیر در حالت عملکردی با سوخت مازوت به مراتب بیشتر از حالت عملکردی در حالت گاز است.

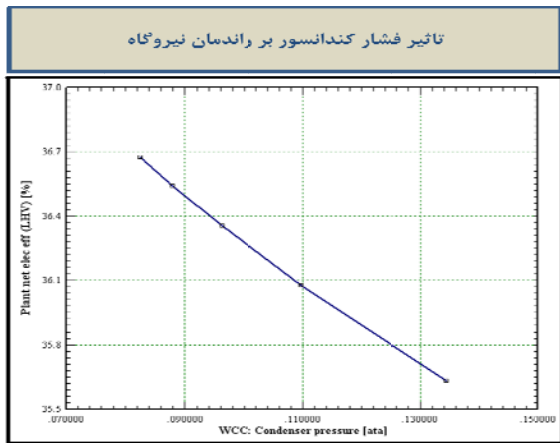
از دیگر پارامترهای مهم جهت بهینه سازی بویلر توجه به مقدار هوای اضافه می باشد. افزایش هوا در فرایند احتراق دمای ادیاباتیک شعله را کاهش می دهد. بنابراین آگزورژی ادیاباتیک محصولات احتراق کاهش یافته و نابودی آگزورژی احتراق با سرعت کمتری افزایش می یابد از طرف دیگر محصولات احتراق با دمای پایینتر و دبی جرمی بیشتر در بویلر جریان می یابند و نابودی آگزورژی انتقال حرارت را کاهش می دهد.

در شکل (۷) تاثیر افزایش نشتی هوای سرد ژانگستروم بر روی راندمان بویلر نیروگاه نشان داده شده است. میزان کاهش راندمان بویلر با افزایش نشتی همواره افزایش می یابد و تاثیر افزایش مقدار نشتی بر روی راندمان حرارتی نیروگاه و همچنین ضریب تمیزی سطح حرارتی ژانگستروم بر روی راندمان بویلر در شکلهای (۸) و (۹) نشان داده شده است.

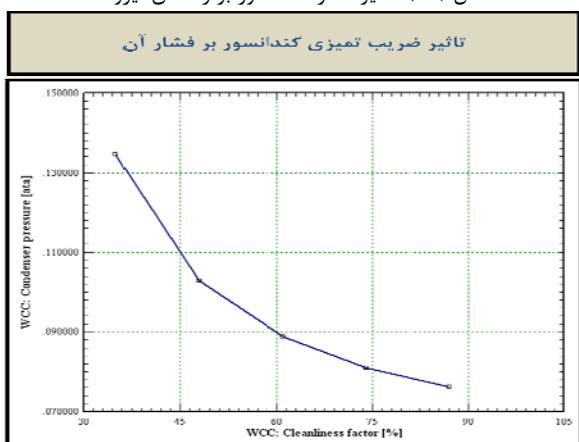
تاثیر افزایش نشتی هوا در کاهش راندمان بویلر



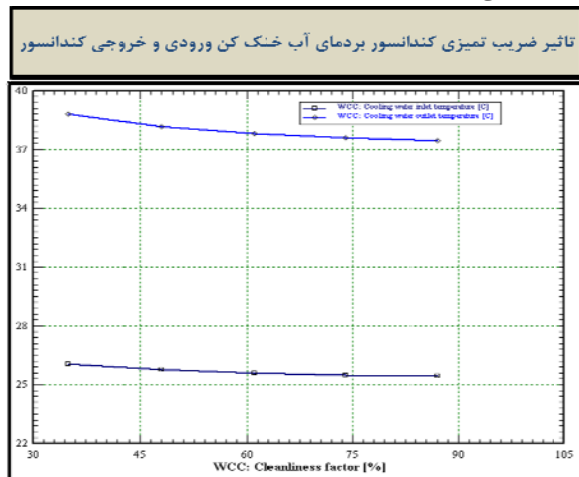
شکل (۷): تاثیر نشتی هوا در ژانگستروم در راندمان بویلر



شکل (۱۰): تأثیر فشار کندانسور بر راندمان نیروگاه



شکل (۱۱): تأثیر فاکتور تمیزی کندانسور در راندمان خالص الکتریکی سیکل حرارتی نیروگاه



شکل (۱۲): تأثیر فاکتور تمیزی کندانسور در دمای آب ورودی و خروجی کندانسور

بار می باشد، در حالیکه مقادیر ثبت شده برای فشار کندانسور برای واحدهای مختلف نیروگاه در حالت کارکرد با سوخت مازوت در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول (۱): مقدار فشار کندانسور برای واحدهای مختلف در حالت کارکرد با سوخت مازوت (mmHg)

شماره واحد	بار ۱۲۵ مگاوات	بار ۱۸۸ مگاوات	بار ۲۵۰ مگاوات
۱	-۵۷۴.۸	-۵۶۱.۵	-۵۴۶.۳
۳	-۵۷۷.۶	-۵۶۹	-۵۶۶.۲
۴	-۵۷۱.۹	-۵۶۷.۲	-۵۴۲
متوسط	۵۷۴.۷	-۵۶۷	-۵۵۱.۵

نتایج بدست آمده از مدل نیز حاکی از افزایش تقریباً ۲ برابری در مقدار فشار کندانسور برای واحدهای مختلف نیروگاه می باشد که این افزایش فشار در کندانسور سبب می گردد تا مقدار راندمان بطور متوسط به میزان ۱.۰۶ نسبت به مقادیر طراحی افت نماید. عوامل مختلفی بر افزایش فشار کندانسور در نیروگاه همدان موثر می باشد که تعدادی از این دلایل عبارتند از:

- افزایش دما آب ورودی به کندانسور بدلیل عدم کنترل مناسب بر در مدار قرار گرفتن سلهای برج خنک کن
- گرفتگی مسیر لوله های مبدل
- تشکیل رسوب در سطوح مبدلها
- وجود گازهای غیر قابل کندانس در بخار آب و کاهش ضریب انتقال حرارت لوله ها بدلیل وجود عایق هوایی
- عملکرد نامطلوب توربین فشار ضعیف که موجب افزایش کیفیت بخار آب و فشار کندانسور می شود.

در نمودارهای شکل زیر سعی شده است تا به بررسی تأثیر تعدادی از این پارامترها بر راندمان نیروگاه همدان پرداخته شود. آنچه از نمودارهای ذیل مشهود می باشد اینست افزایش مقدار خلا کندانسور و کاهش مقدار رسوب لوله ها تأثیر قابل توجهی بر راندمان نیروگاه دارد.

اگر ژرژتیک مربوط به بویلر میباشد و ضرورت اجرای راهکارهای بهبود کارایی در این تجهیز الزامی می باشد با مقایسه راندمان عملکردی بویلر واحدهای نیروگاه با راندمان طراحی پتانسیل صرفه جویی در این بخش بدست می آید. با توجه به کارکرد نیروگاه با دو سوخت مازوت و گاز طبیعی در مدت زمان متفاوت برآورد پتانسیل صرفه جویی در این دو بخش محاسبه گردیده است و در جدول (۲) ارایه شده است.

جدول (۲): پتانسیل صرفه جویی با دو نوع سوخت در بویلر

درصد بار	مازوت			گاز طبیعی		
	%۵۰	%۷۵	%۱۰۰	%۵۰	%۷۵	%۱۰۰
راندمان طراحی (%)	۹۴.۶	۹۴.۳۸	۹۴.۱۰	۹۶.۴۰	۹۵.۹۹	۹۵.۵۴
راندمان عملکردی (%)	۸۹.۷۴	۹۰.۳۰	۸۹.۹۹	۹۱.۲۹	۹۱.۴۹	۹۰.۴۰
پتانسیل صرفه جویی	۱۵۶۳.۵ Ton/year	۳۰۸۸.۲۹ Ton/year	۲۲۴۲.۲۶ Ton/year	۲۳۹۳.۲۸ Nm <sup>۳</sup> /year	۴۹۹۸.۹۵ Nm <sup>۳</sup> /year	۴۳۹۷.۱۹ Nm <sup>۳</sup> /year
صرفه جویی مالی	۱۳۷۸۸۰۸۷۶۱			۹۴۳۱۵۳۸۴۱.۶		
مجموع	۲۳۲۱۹۶۳۶.۳					

## مراجع

[۱] Bejan, "Advanced Engineering Thermodynamics", John Wiley, 1998

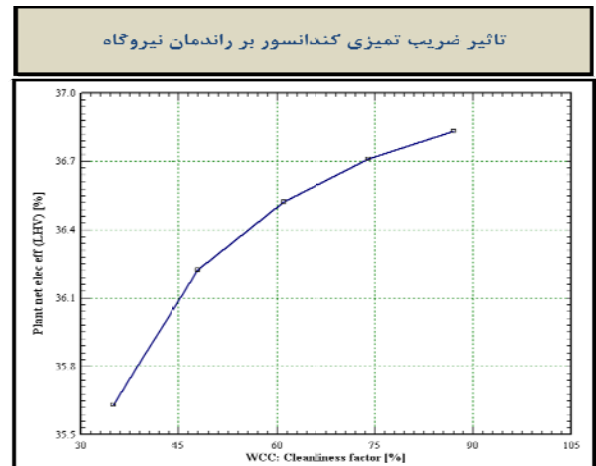
[۲] M. M. El-wakil, "Powerplant Technology". McGraw Hill, 1998.

[۳] T.J.Kotas, "the exergy method of thermal plant analysis". krieger publishing company, 1995

[۴] شرکت مهندسی موندکو ایران، آشنایی با اصول طراحی نیروگاه های حرارتی، انتشارات شیوه، ۱۳۸۹

[۵] آرشیو اسناد و مدارک فنی نیروگاه حرارتی شهید مفتاح همدان

[۶] گزارش شرکت مهندسی آسیاوات در خصوص ممیزی انرژی نیروگاه حرارتی شهید مفتاح همدان

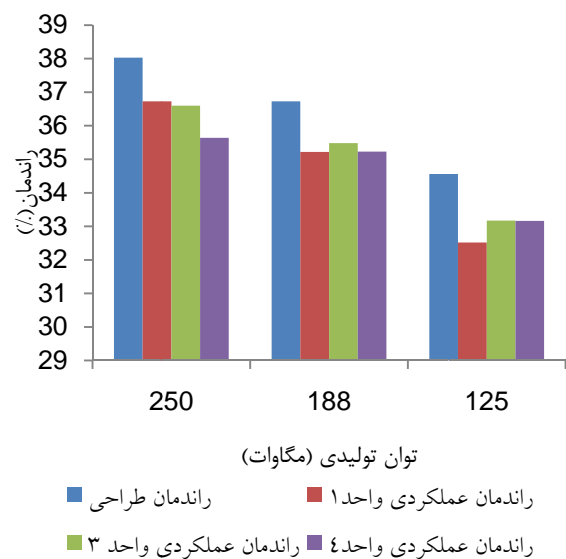


شکل (۱۳): تاثیر فاکتور تمیزی کندانسور در فشار کندانسور سیکل حرارتی نیروگاه

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در شکل (۱۴) به مقایسه راندمان الکتریکی خالص واحدهای مختلف نیروگاه در حالت طراحی و عملکردی پرداخته شده است.

مقایسه راندمان طراحی و عملکردی واحدهای مختلف نیروگاه در حالت کارکرد با سوخت مازوت



شکل (۱۴) مقایسه راندمان طراحی و عملکردی واحدهای مختلف نیروگاه در حالت طراحی و عملکردی با سوخت مازوت

در بین واحدهای مورد بررسی قرار گرفته در نیروگاه همدان بیشترین میزان افت راندمان مربوط به واحدهای ۳ و ۴ نیروگاه می باشد که در این میان واحد ۴ نیروگاه دارای وضعیت نامناسبتری بوده و ضرورت اجرای روشهای بهبود کارایی در این واحد از نیروگاه بیشتر از سایر واحدها احساس می شود و در میان تجهیزات نیروگاه بیشترین مقدار افت راندمان انرژی است.