بررسی منابع در نقش بویلر در بازگشت ناپذیری های صنایع و راه کارهای افزایش بهره وری و راندمان اگزرژی آن

فراس لطیف حسانی[1]، محسن قاضی خانی[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، firaslattef16@gmail.com

[2] استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ghazikhani@um.ac.ir

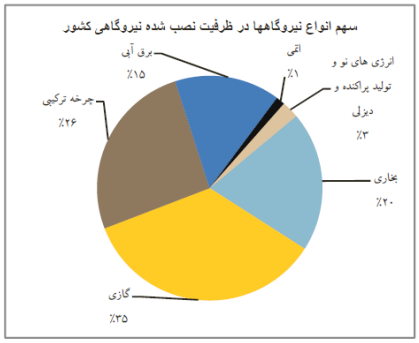
خلاصه

امروزه بویلر های نقش کلیدی در صنایع مختلف بالخصوص نیروگاه های تولید برق ایفا می کنند و با توجه به حجم مصرف انرژی آن ها، پتانسیل بهبود عملکرد بالایی دارند. تحلیل اگزرژی یک ابزار کارآمد جهت بررسی کیفیت انرژی و شناسایی بخش های ناکارآمد و عوامل تخریب اگزرژی در سیستم های تبدیل انرژی است. تحقیقات انجام شده نشان داد بویلر ها عامل اصلی بازگشت ناپذیری های ایجاد شده در نیروگاه ها هستند و علت آن واکنش احتراق و گرادیان های دمای بالای ایجاد شده ناشی از آن است و در نهایت مشخص شد می توان با کنترل پارامترهای پدیده احتراق از جمله درصد هوای اضافه و راندمان فرآیند احتراق، بازگشت ناپذیری های سیستم را کاهش داد و عملکرد سیستم را بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: بویلر ، تحلیل اگزرژی ، بهینه سازی، احتراق، نیروگاه

1. مقدمه

بویلر به معنای جوشاننده، وظیفه تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به حرارت و انتقال آن به آب را دارد که منجر به تولید بخار می شود. بویلر ها از حدود قرن هجدهم در طی انقلاب صنعتی گسترش پیدا کردند و تا امروز تغییرات زیادی از حیث اندازه، تنوع، انعطاف پذیری و پیچیده گی کرده اند. بویلر در صنایع تولید انرژی و نیروگاه ها، صنایع تبدیلی غذایی و دارویی و البته گرمایش و تهویه مطبوع بخار نقش مهمی را به عهده دارد و صنایع مذکور از بویلر برای تامین بخار مورد احتیاج خود استفاده می کنند. یکی از روش های تولید برق، استفاده از سیکل رانکین است در در سیکل مذکور سیال(عمدتا آب) فشرده شده تبخیر می شود و توربین با تغذیه بخار کار مکانیکی تولید نموده و توسط ژنراتور های برق به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. یکی از آمار های جهانی نشان می دهد که در آمریکا صنایع سهم بزرگی از مصرف سوخت خود را صرف تولید بخار می کنند که از آن جمله می توان به 57 درصد مصرف سوخت در صنایع غذایی، 81٪ در صنعت کاغذ، 42٪ در صنایع شیمیایی، 23 ٪ در صنایع پتروشیمی و نهایتا 10٪ در صنایع تولید فولاد اشاره کرد و این حجم مصرف پتانسیل 10 الی 15 درصد کاهش را دارد.[1]



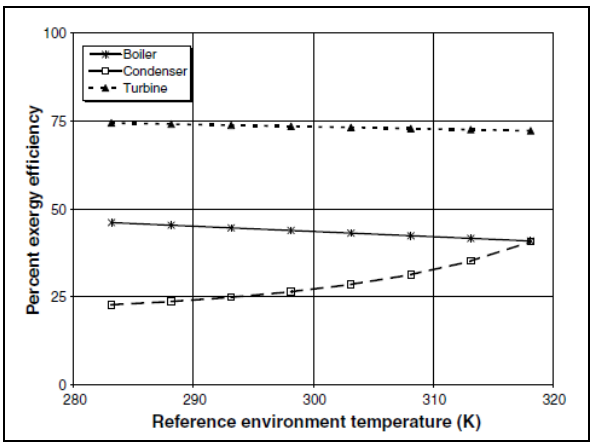
شکل 1- سهم انواع نیروگاه ها در ظرفیت نصب شده نیروگاه های کشور[2]

همانطور که در شکل (1) توضیح داده شده است طبق آمار وزارت نیرو حدود 20 درصد از تولید برق کشور از طریق نیروگاه های بخار انجام می شود که برای تولید بخار از بویلر استفاده می کنند. بنابراین بهینه سازی بویلر تاثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی خواهد گذاشت.
یکی از مهمترین روش های بررسی عملکرد سیستم ها تحلیل ترمودینامیکی است. عموم تحقیقات به روش بررسی قانون اول ترمودینامیک که پایستگی انرژی است پرداخته اند. در این روش به عوامل هدر رفت انرژی پرداخته می شود و تلاشها در جهت بهبود راندمان حرارتی انجام می شود. در حالی که قانون دوم ترمودینامیک به بررسی کارایی فرآیند ها پرداخته میزان کیفیت انرژی را مورد سنجش قرار می دهد. تحلیل قانون دوم ترمودینامیک از مفهومی به نام "اگزرژی" جهت مدلسازی سیستم بهره می برد که به معنای ماکزیمم کار مفیدی است که از یک جریان ماده و یا انرژی قابل حصول است، کار مفید در صورتی ماکزیمم خواهد شد که فرآیند بازگشت پذیر باشد. در محاسبه اگزرژی فرض می شود که همه فرآیندها ایده آل و برگشت پذیرند و این فرآیند تا وقتی ادامه می یابد که انرژی به حالت مرده برسد [3].

از این رو می توان نتیجه گرفت با توجه به اهمیت بهینه سازی سیستم‌های بویلر و نقش بزرگ آن در صنایع و حجم مصرف انرژی آن، نیازمند تحلیل و بررسی آن وجود دارد و بهترین ابزار برای رسیدن به این هدف استفاده از تحلیل اگزرژی یا قانون دوم ترمودینامیک است.

2. نقش بویلرها در بازگشت ناپذیری نیروگاه‌ها

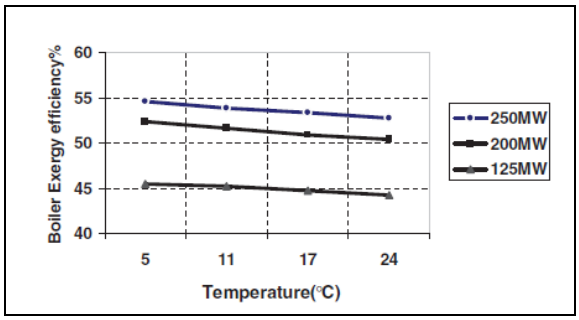
از جمله تحقیقاتی که برای بررسی ترمودینامیکی عملکرد نیروگاه پرداخته است، تحقیق الجندی[3] به تحلیل انرژی و اگزرژی نیروگاه الحسین واقع در کشور اردن پرداخته که از سوخت مازوت(Heavy Fuel Oil) استفاده می کند پرداخته است. تحلیل انرژی نشان داد که بیشترین هدررفت در بخش کندانسور و کمترین میزان افت انرژی در بخش بویلر نیروگاه اتفاق می افتد. با این وجود تحلیل اگزرژی نشان داد که میزان درصد افت اگزرژی در بخش بویلر و کندانسور 77٪ و 9٪ است. و این نشان دهنده این است که عامل اصلی تخریب اگزرژی فرآیند احتراق در بویلر است و حجم انرژی بالایی که از کندانسور خارج می شود کیفیت کمی دارد و لذا درصد افت اگزرژی آن کمتر است.
میزان بازگشت ناپذیری محفظه احتراق وابسته به میزان هوای اضافی و دمای هوای ورودی به بویلر است. بویلر نیروگاه از سوخت مازوت استفاده می کند و راندمان قانون اول و دوم آن با دمای رفرنس 25 درجه سانتی گراد برابر با 88٪ و 43.5٪ است. و با توجه به شکل زیر تغییرات دمای حالت مرده نشان داد که راندمان اگزرژی اجزا بجز کندانسور تغییرات چندانی ندارند و بطور کل بویلر عامل اصلی بازگشت ناپذیری سیستم به شمار می رود.



شکل 2- تغییرات راندمان اگزرژی بخش های مختلف نیروگاه با تغییر دمای مرجع [3]

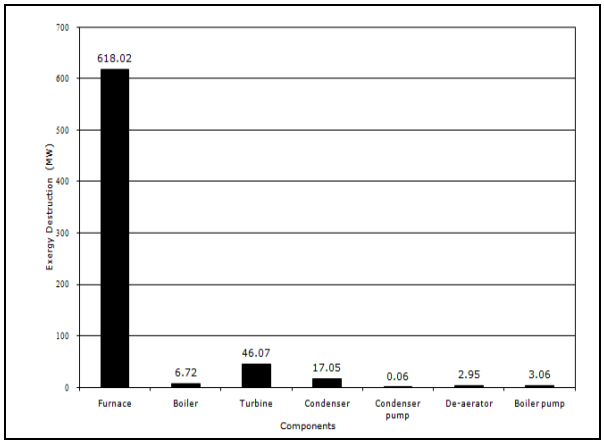
در مطالعه دیگر عامری و همکارنش[4] به بررسی نیروگاه بخار 1000 مگاواتی همدان و عملکرد بخش های مختلف آن از دید قانون دوم ترمودینامیک پرداختند و تاثیر تغییرات دمای محیط و بار نیروگاه را در عملکرد سیستم مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نهایتا مشخص شد که از نظر اگزرژی محفظه احتراق به دلیل گرادیان دمای بالا و فرآیند احتراق بیشترین نقش را در بازگشت ناپذیری سیستم نیروگاه دارد که میتوان با پیش گرم نمودن دمای هوای احتراق و کاهش نسبت هوا به سوخت از میزان این بازگشت ناپذیری کاست.

با افزایش میزان دمای محیط، میزان بازگشت ناپذیری اجزای نیروگاه من جمله توربین، پمپ و بویلر افزایش یافت و از جهتی دیگر با افزایش دما همانطور که در شکل (3) نشان داده شده است، بار با توجه به اینکه نیروگاه برای حداکثر توان طراحی شده است، راندمان اگزرژی اجزا افزایش پیدا کرد.



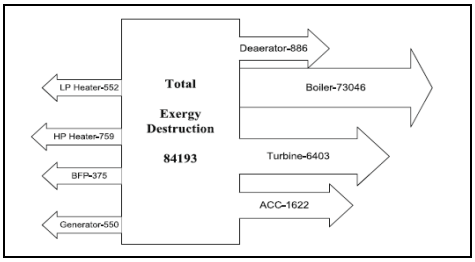
شکل 3- تغییرات راندمان قانون دوم بویلر در بارها و دما های محیط مختلف [4]

هاستی و همکارانش [5] به تحلیل اگزرژی یک نیروگاه با تولید کننده بخار در فشار فوق بحرانی پرداختند که در رنج دمای 600 تا 700 درجه سانتی گراد و فشار 254-357 بار با سوخت ذغال سنگ که مجهز به پیش گرم کن هواست عمل می کند. در نهایت مطالعه خود با ارائه شکل(4) در مورد بخش تولید بخار به این نتیجه رسیدند که نزدیک به 86 ٪ تخریب اگزرژی در بخش احتراق رخ می دهد.



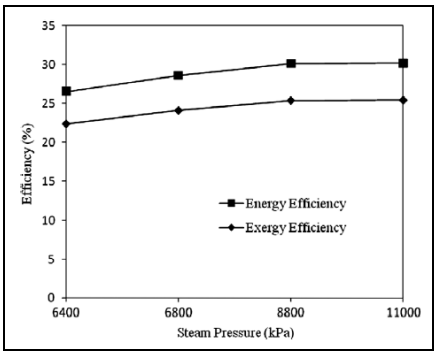
شکل 4- مقایسه میزان تخریب اگزرژی در بخش های مختلف نیروگاه

رگولاگدا و همکارانش[6] نیز یک نیروگاه بخار زیر فشار بحرانی واقع در کشور هند را مورد بررسی قرار دادند که از سوخت ذغال سنگ استفاده می کند. خروجی بویلر در این نیروگاه دارای دمای 520 درجه سانتیگراد و فشار 8.8 مگاپاسکال است. در این تحقیق نیز بیشترین میزان تخریب اگزرژی وابسته به عملکرد بویلر و توربین است(شکل 5).



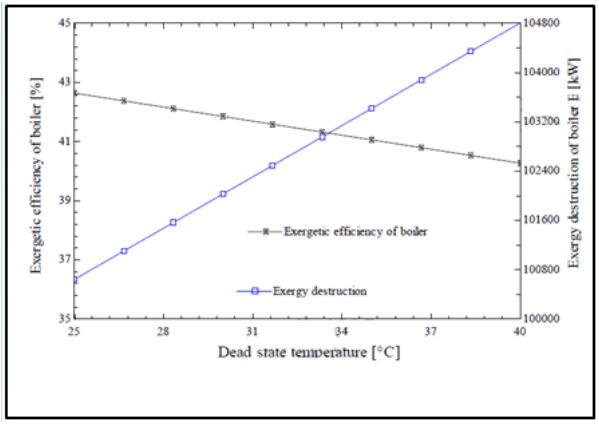
شکل 5- شماتیک میزان تخریب اگزرژی بخش های مختلف نیروگاه [6]

از جمله مهمترین نتایج این مقاله آن است که افزایش دما و فشار بخار آب خروجی از بویلر راندمان ترمودینامیکی سیستم را افزایش می دهد(شکل 6) چرا که ورودی توربین دارای اگزرژی و انتالپی بیشتر است.



شکل 6- نمودار تغییرات راندمان قانون اول و دوم نیروگاه با افزایش فشار خروجی بویلر [6]

کومار و همکارانش[7] به تحلیل اگزرژی یک نیروگاه بخار 82 مگاواتی واقع در یک مجتمع پتروشیمی در هند که برای تامین بخار از 4 بویلر تولید بخاربا سوخت ذغال سنگ استفاده می کند، پرداختند. دما و فشار مرجع در این تحقیق برابر با 25 درجه سانتی گراد و فشار یک اتمسفر در نظر گرفته شده است. آنها در نهایت نتیجه گرفتند که بیشترین میزان تخریب اگزرژی در بویلر رخ می دهد. علت این پدیده ناشی از اختلاف دمای زیاد در هنگام انتقال حرارت و احتراق ناقص سوخت ذغال سنگ است. اگر بویلر به دو بخش محفظه احتراق و مبدل حرارتی تقسیم بشود، بیشترین بازگشت ناپذیری در محفظه احتراق اتفاق افتاد که راندمان قانون اول بویلرها به ترتیب دارای راندمان قانون اول 80.53٪، 84.76٪ و91.03٪ و راندمان اگزرژی 41.13٪، 42.64٪ و 42.78٪ است. راندمان اگزرژی و تخریب اگزرژی در بویلر با افزایش دماهای مرجع همانطور که شکل (7) زیر نشاده داده شده است، افزوده می شود.



شکل 7- تغییرات میزان تخریب اگزرژی و راندمان قانون دوم به ازای تغییر دمای مرجع [7]

3. تحلیل ترمودینامیکی عملکرد بویلرها

مقالات مشابه دیگر نیز نتایج مشابه بدست آوردند که در آن بویلر مهمترین نقش در افت عملکرد سیستم از دیدگاه اگزرژی دارد و برای تحقیقات بیشتر بویلر ها به صورت خاص و با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار گرفتند. از جمله این تحقیقات می توان به مطالعه سیدور و همکارانش[8] اشاره نمود که به بررسی اثر استفاده از یک فن با سرعت متغیر و نانو سیال به منظور افزایش بهره وری یک بویلر پرداختند. همچنین بازیابی گرمای گاز خروجی از دودکش که در رده دمایی بین 150 تا 250 درجه سانتی گراد قرار دارد را راه حلی مناسب برای جلوگیری از 10 تا 30 درصدی حرارتی در این بخش هدر می‌رود مورد نظر دادند. نتیجه تحلیل آن ها بر روی بویلر مورد مطالعه قرار گرفته این بود که عمده بازگشت ناپذیری ها و افت اگزرژی ناشی از فرآیند احتراق و دمای بالای آن ناشی می شود و میتوان با استفاده از فن و پمپ با سرعت متغیر و بازیافت حرارت خروجی از دودکش میزان مصرف انرژی آن را کاهش داد و محاسبات نشان داده که سرمایه در بخش بازیافت حرارت دودکش در طی یکسال بازخواهد گشت. راندمان اگزرژی محفظه احتراق 45.18٪ ،راندمان حرارتی و قانون دوم مبدل حرارتی 72.13٪ و 48٪ ، راندمان حرارتی و قانون دوم کلی بویلر 72.46٪ ، 24.89٪ محاسبه کردند.

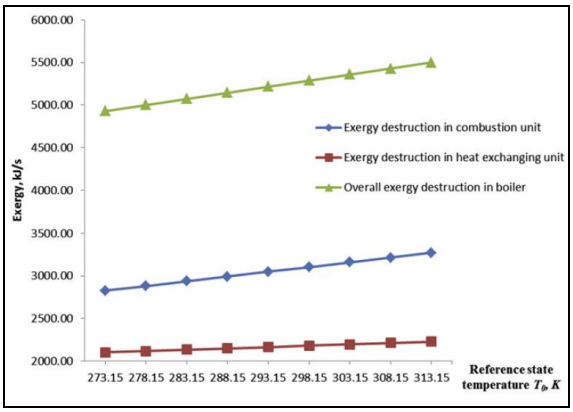
ترهان و کمکلی[9] تحلیل انرژی و اگزرژی یک بویلر با سوخت گاز طبیعی برای تامین حرارت گرمایش ساختمان یک دانشگاه در شهر ازروم را انجام دادند که بویلر مذکور آب گرم مصرفی و بخار سوپر هیت لازم برای گرمایش را فراهم می کند. برای ارزیابی بهتر مساله، بویلر به دو بخش محفظه احتراق و مبدل حرارتی تقسیم شد و نتایج تحلیل ترمودینامیکی بویلر که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته مطابق جدول (1) ارائه گردید.

جدول 1- عملکرد ترمودینامیکی بخش های مختلف بویلر [9]

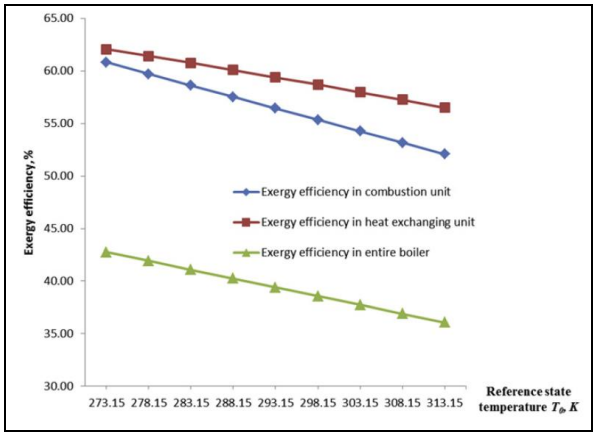
Summary of exergy analysis of combustion chamber, heat exchanger and entire boilers.

Combustion chamber		
Energy input	kJ/s	13,344.0
Energy efficiency	%	100
Exergy destruction	kJ/s	4,395.9
Exergy efficiency	%	68.89
Heat exchanger		
Heat losses	kJ/s	2,376.6
Energy efficiency	%	82.21
Exergy destruction	kJ/s	4,226.1
Exergy efficiency	%	70.09
Entire boiler		
Energy efficiency	%	82.21
Overall exergy destruction	kJ/s	9,500.7
Overall exergy efficiency	%	32.77

اوهیجگابون و همکارانش[10] نیز به تحلیل اگزرژی یک بویلر تولید بخار که از سوخت مازوت استفاده می کند (fuel oil LPFO) با در نظر گرفتن اگزرژی شیمیایی پرداختند. در این تحقیق با استفاده از محاسبات احتراق کامل در نسبت هم ارزی معلوم، دمای محصولات احتراق و ترکیبات آن محاسبه گردید. دما و فشار مرجع 25 درجه سانتی گراد و یک اتمسفر تعیین شد و اگزرژی شیمیایی نسبت به هوای دارای 70٪ رطوبت نسبی محاسبه گردید. از جمله نتایج آن ها می توان به محاسبه راندمان حرارتی و اگزرژی بویلر بخار به ترتیب برابر 69.56٪ و 38.57٪ اشاره کرد. همچنین بر طبق این تحقیق میزان تخریب اگزرژی با افزایش دمای مرجع افزایش می یابد(شکل 8) و راندمان قانون دوم کاهش پیدا می کند (شکل 9).



شکل 8- نمودار تغییرات بازگشت ناپذیری اجزاء بویلر و بازگشت ناپذیری کلی بویلر با تغییر دمای مرجع [10]

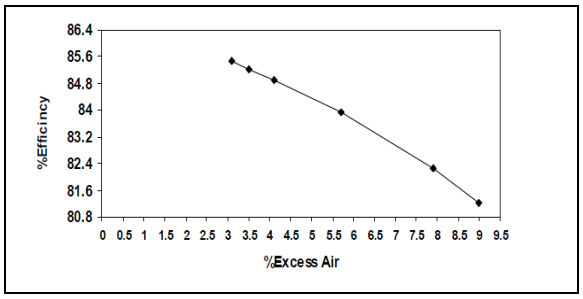


شکل 9 - نمودار تغییرات تاثیر پذیری اجزاء بویلر و تاثیر پذیری کلی بویلر با تغییر دمای مرجع [10]

4. تحلیل تاثیر پارامترهای احتراق بر عملکرد بویلر

از بعد تاثیر پارامترهای عملکردی بویلر نیز تحقیقاتی انجام شده است. از آنجا که بخش موثر بر عملکرد بویلر فرآیند احتراق است، تحقیقاتی نیز برای بررسی تاثیر میزان هوای اضافه (یا همان نسبت هم ارزی) بر راندمان حرارتی بویلر انجام شده است. از جمله مطالعه شیروانی و صدیقی[11] که به تحلیل انرژی یک بویلرلوله آتشی که به طور متداول در صنایع برای تولید بخار فرآیندی مورد استفاده می گیرد، پرداختند. این بویلر از سوخت گاز طبیعی شهری استفاده می کند و در فشار 11 بار بخار با ظرفیت 22.7 تن بر ساعت تولید می کند.

در طی این آنالیز درصد هوای اضافه مشعل بویلر تغییر داده شد و یک میزان بهینه معین گردید. در نهایت نشان داده شد که با افزایش درصد هوای اضافه راندمان حرارتی بویلر و میزان تولید بخار به ازای سوخت مصرف شده کاهش پیدا می کند(شکل 10). در حقیقت نسبت هم ارزی هوا وسوخت نزدیک به استوکیومتریک، راندمان بویلر را افزایش می دهد و از طرف دیگر کاهش میزان هوای اضافه به دلیل احتراق ناقص موجب کاهش راندمان بویلر می شود.

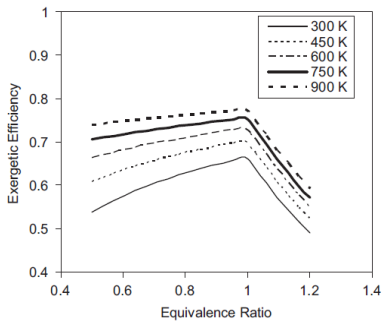


شکل 10- تاثیر تغییر درصد هوای اضافه بر راندمان بویلر [11]

مقاله هایی از جمله تحقیق سوم و داتاب[12] به بررسی جزئی تر فرآیند احتراق و دید قانون دوم نسبت به پدیده یاد شده پرداختند و از دو دیدگاه ترمودینامیکی و سیالات محاسباتی عوامل موثر در بازگشت ناپذیری احتراق را معرفی کردند. از جمله مهم ترین عوامل موثر در بازگشت ناپذیری احتراق گرادیان بالای دمای ایجاد شده در حین احتراق معرفی شده است.

با افزایش میزان هوای اضافه، دمای نهایی محصولات احتراق کاهش می یابد که این باعث کاهش میزان پتانسیل گاز برای تولید کار و در نتیجه بازگشت ناپذیری می شود و از طرفی دیگر احتراق ناقص باعث آزاد نشدن کامل انرژی شیمیایی سوخت می شود و لذا باید بین این دو عامل حالت بهینه ای را در کاربردهایی که از فرایند احتراق بهره می برند ایجاد نمود.

تاثیر تغییرات هم ارزی و راندمان اگزرژی احتراق به صورت نمودار شکل (11) نشان داده شده است که نشان می دهد افزایش دمای هوای ورودی، موجب افزایش راندمان اگزرژی احتراق می شود.



شکل 11- تغییرات راندمان اگزرژی با تغییر دمای ورودی و نسبت هم ارزی [12]

5. نتیجه‌گیری

بویلرها در سیستم های نیروگاهی بیشترین تخریب اگزرژی را در سیستم ایجاد می کند که این افت ناشی از فرآیند احتراق و انتقال حرارت در دمای بالا است. تحقیقات عنوان شده این الزام را ایجاد کرد که بر روی پارامترهای فرآیند احتراق تحقیقات بیشتری انجام گردد و اثر آن ها بر روی عملکرد بویلرها مشخص گردد از جمله میزان درصد هوای اضافه، پیش گرم کردن هوا و بهبود راندمان احتراق.

تغییر در درصد هوای اضافه از دو جهت دارای تاثیر مهم بر عملکرد بویلر است، از جهتی افزایش درصد هوای اضافه موجب افـزایش رانـدمان احتراق می شود و از طرف دیگر موجب افت دمای گاز های محترق گردیده و راندمان بویلر را کاهش می‌دهد و پتانسیل اسـتفاده از انـرژی سـوخت را کاهش داده و موجب افت تاثیر پذیری سیستم خواهد شد، بنابراین یک نقطه بهینه در این میان وجود خواهد داشت.

بنا بردید ایده آل تحلیل اگزرژی باید اختلاف دمای بین سیال گرم و سرد به حداقل رسیده (تبخیر سیال)، هوای احتراق پیشگرم شود، رانـدمان احتراق در حداکثر مقدار ممکن و نسبت هم ارزی برابر با یک باشد و در نهایت راندمان مبدل حرارتی بویلر بالا و گرمای خروجی از بویلر بازیابی شود تا بویلر حداکثر کارایی خود را داشته باشد.

6. مراجع

1. Einstein, D. Worrell, E. and Khrushch, M.(2001),"Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, US.

2. خلاصه وضعیت آماری صنعت برق کشور 1396، http://amar.tavanir.org.ir

3. Aljundi, I.H.(2009),"Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan," Applied Thermal Engineering, **29** (2), pp 324-328.

4. Ameri, M. Ahmadi, P. and Hamidi, A.(2009),"Energy ,exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: a case study," International Journal of Energy Research, **33** (5), pp 499-512.

5. Hasti, S. Aroonwilas, A. and Veawab A.,(2013)"Exergy analysis of ultra super-critical power plant," Energy Procedia, **37** (1), pp 2544-2551.

6. P. Regulagadda, P. Dincer, I. and Naterer, G.(2010),"Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses," Applied Thermal Engineering, **30** (8), pp 970-976.

7. Kumar, V. Pandya, B. and Matawala, V.(2017), "Thermodynamic studies and parametric effects on exergetic performance of a steam power plant," International Journal of Ambient Energy, pp. 1-11.

8. Saidur R., Ahamed, J. and Masjuki, H.(2010),"Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers," Energy policy, **38** (5), pp 2188-2197.

9. Terhan M. and Comakli K.(2017),"Energy and exergy analyses of natural gas-fired boilers in a district heating system," Applied Thermal Engineering, **121** (1), pp 380-387.

10. Ohijeagbon, I.O. Waheed, M.A. and Jekayinfa, S.(2013)"Methodology for the physical and chemical exergetic analysis of steam boilers," Energy, **53** (1), pp 153-164.

11. م. شیروانی و س. صدیقی (1383), "بررسی اقتصادی کاربرد آنالیزور گازهای احتراق در دیـگ هـای بخـار",ارائـه شـده در نهمـین کنگـره ملـی مهندسی شیمی ایران.

12. Som S. and Datta A.(2008),"Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes," Progress in energy and combustion science, **34** (3), pp 351-376.