

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره نه، آذر ماه ۹۸

## کاربرد آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی در بهینه‌سازی انرژی و آلاینده‌ها در نیروگاه‌های حرارتی بخار

محمدحسن خوشگفتارمنش<sup>۱</sup>  
[m.khoshgoftar@qom.ac.ir](mailto:m.khoshgoftar@qom.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۱۶

### چکیده

**زمینه و هدف:** توانایی تکنولوژی پینچ در ارزیابی یک روش کلی در طراحی و تحلیل فرایندها می‌باشد، ولی این تکنولوژی در تحلیل سیستم‌هایی که علاوه بر حرارت شامل توان نیز هستند ناتوان است. از طرف دیگر، آنالیز اگزرژی علاوه بر توانایی تحلیل سیستم‌های شامل حرارت و توان، این توانایی را دارد که قسمت‌های غیرموثر سیستم را شناسایی و بیش‌ترین اصلاحات ممکن سیستم را تعیین کند. **روش بررسی:** محدودیت اصلی آنالیز اگزرژی عدم ارزیابی یک روش جامع در طراحی سیستم است. آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی<sup>۲</sup>، که از ترکیب دو روش ذکر شده به‌دست می‌آید با استفاده از توانایی هر دو روش، محدودیت‌های هر دو روش را رفع می‌کند. در این مقاله سعی شده است، با معرفی نیروگاه رامین اهواز به‌عنوان نیروگاه مورد مطالعه، با استفاده از روش CPEA اصلاحات موثر شناسایی و مورد بررسی قرار گیرد.

**یافته‌ها:** سه سناریو اصلاحی پیشنهادی به‌منظور بهینه‌سازی نیروگاه مورد نظر استفاده شده است که عبارتند از: ۱- نزدیک کردن پینچ‌ها، ۲- افزایش بخار در بویلر ۳- کاهش فشار کندانسور.

**بحث و نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد امکان افزایش بازده نیروگاه مورد مطالعه در حدود ۱/۷ درصد افزایش با به‌کار بردن این روش وجود دارد. هم‌چنین میزان مصرف سوخت ۱۵۶۹ متر مکعب در ساعت و تولید گازهای خروجی در حدود ۱/۷ درصد (معادل ۲۰ تن بر ساعت) کاهش می‌یابد. لذا تولید آلاینده‌ها به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابد. برای شبیه‌سازی نیروگاه از نرم افزار (Steam Pro) و Thermoflow و برای تحلیل CPEA از نرم افزار Aspen Pinch استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل ترکیبی پینچ و اگزرژی، بهینه‌سازی، نیروگاه بخار، آلاینده‌ها.

۱- استادیار، بخش علوم حرارتی و سیستم‌های انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران\* (مسئول مکاتبات)  
2- Combined pinch and Exergy Analysis (CPEA)

## Application of Combined Pinch and Exergy Analysis for Energy and Emissions Optimization of Steam Power Plants

Mohammad Hasan Khoshgoftar Manesh <sup>1\*</sup>

[m.khoshgoftar@qom.ac.ir](mailto:m.khoshgoftar@qom.ac.ir)

Admission Date: January 10, 2018

Date Received: April 5, 2017

### Abstract

**Background and Objective:** The ability of Pinch Technology is related to design and analysis of processes; however, it can't be used individually for heat and power system. In the other words, exergy analysis can apply for evaluation of heat and power systems. It can determine unavoidable parts of energy systems and specify the maximum potential of optimization.

**Method:** The main limitation of exergy analysis is the lack of general and clear method for design of system. The combined pinch and exergy analysis that using the advantages of both methods satisfy the limitations. In this paper, the RAMIN Ahvaz thermal power plant as a case study is defined. Furthermore, using CPEA the potential of optimization has been determined and evaluated.

**Findings:** Three proposed modification scenarios have been used for optimization of Power Plant as follows: 1. approaching pinch temperatures 2. Increasing steam in boiler and 3. Decreasing pressure of condenser.

**Discussion and Conclusion:** With employing both methods the efficiency of power plant has been increased by 1.7%. In addition, the fuel consumption is about 1569 m<sup>3</sup>/h and flue gases have been reduced by 1.7% (20t/h). So, the emissions have been reduced by 1.7%. The Thermoflow (Steam Pro) software has been applied for simulation of case study. In addition, Aspen Pinch Software has been employed for CPEA.

**Keywords:** Combined Pinch & Exergy Analysis, Optimization, Steam Power Plant, Emission.

---

1- Assistant Professor, Division of Thermal Sciences & Energy Systems, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology & Engineering, University of Qom, Qom, Iran

## مقدمه

به راحتی قابل مشاهده است. مساحت محصور بین خطوط جریان‌های سرد و گرم میزان اتلافات اگزرژی ناشی از انتقال حرارت بین جریان‌های سرد و گرم را نشان می‌دهد، در ادامه با معرفی نیروگاه مورد مطالعه نحوه استفاده از این نمودارها و توسعه آن‌ها برای تشریح دقیق مشخصه‌های ترمودینامیکی نیروگاه توضیح داده خواهد شد (۴). لینهف و دهل<sup>۵</sup> (۵) (۱۹۹۱) از آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی برای تحلیل سیستم-های خنک‌کاری دما پایین استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این روش، کار محوری مورد نیاز را  $3/831$  مگاوات کاهش دادند. همچنین این دو نفر (۱۹۹۵) روش ترکیبی پینچ و اگزرژی را برای طراحی یک سیکل بسته توربین گازی مورد بررسی قرار دادند (۶). ژنگ و دهل<sup>۶</sup> (۱۹۹۵) (۶) تحلیل توسعه یافته ترکیبی پینچ و اگزرژی را در مورد سیکل ترکیبی توربین بخار و توربین گازی سیکل بسته اعمال کردند و به افزایش بازده سیکل در حدود  $0/82$  درصد دست پیدا کردند. همچنین ژنگ و دهل (۱۹۹۵)، (۱۹۹۶) (۶)، (۷) از این روش برای تحلیل و بهبود راندمان چند نمونه نیروگاه‌های حرارتی دیگر استفاده کردند. همچنین ژنگ و دهل (۱۹۹۶) رویکردی مفهومی برای طراحی نیروگاه‌های حرارتی ارائه نمودند (۷). فاورات و استاین<sup>۷</sup> (۱۹۹۶) (۸) تکنولوژی پینچ را با استفاده از فاکتورهای اگزرژی توسعه دادند و از آن در تحلیل سیستم‌های تولید هم‌زمان و پمپ‌های حرارتی استفاده نمودند. لاواریک و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۳) (۹) به کمک تکنولوژی پینچ کاهش تولید آنتروپی را در یک فرآیند تولید متانول مورد بررسی قرار دادند. مانین و ژو<sup>۹</sup> (۱۹۹۸) (۱۰)، (۱۱) بررسی‌های اقتصادی را همراه با آنالیز ترکیبی پینچ و اگزرژی در مورد یک سیکل ترکیبی تولید توان اعمال کردند. نتیجه بهینه‌سازی آن‌ها افزایش بازده سیکل مورد مطالعه از  $45/02$  درصد تا  $49/85$  درصد با در نظر

آنالیز اگزرژی بر پایه قانون اول و دوم ترمودینامیک این امکان را فراهم می‌آورد که روش مطلوب تحلیل سیستم‌های انرژی و همچنین شناخت واضح سطوح انرژی و فرایندهای نامطلوب ترمودینامیکی یک سیستم مشخص گردد. آنالیز اگزرژی شامل دو مرحله اساسی می‌باشد: مرحله اول، شناسایی و بررسی فرایندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم بر پایه تعیین اتلافات اگزرژی، مرحله دوم، تعیین بیش‌ترین اصلاحات ممکن در سیستم بر پایه مفاهیم اگزرژی اجتناب‌ناپذیر و اگزرژی اجتناب‌ناپذیر (۱). در ادامه تکنولوژی پینچ می‌تواند اطلاعات سیستم را به صورت دیاگرام‌های ساده، نمودار ترکیبی<sup>۱</sup>، و نمودار ترکیبی جامع<sup>۲</sup>، نمایش دهد (۲). نمودار CC میزان انرژی خارجی مورد نیاز (بار حرارتی) و هزینه سرمایه‌گذاری را هدف گذاری می‌کند و از نمودار GCC برای انتخاب مناسب، تعیین میزان و دمای مناسب بار حرارتی استفاده می‌شود. در نمودارهای GCC, CC محور افقی آنتالپی و محور عمودی دما می‌باشد. تکنولوژی پینچ با استفاده از مفهوم انتگراسیون فرایند و هدف‌گذاری قبل از طراحی، یک نمای کلی ترمودینامیکی از جریان‌های درون فرایند را ارائه می‌دهد (۳). با استفاده از مفهوم آنالیز اگزرژی در تکنولوژی پینچ، روش جدید CPEA، توسعه داده شده است. ابزارهای پایه که در CPEA به کار می‌روند و اهمیت زیادی دارند عبارتند از: نمودار ترکیبی اگزرژی<sup>۳</sup>، و نمودار دوم و مهم دیگر نمودار ترکیبی جامع اگزرژی<sup>۴</sup> است. در این نمودار محور عمودی ضریب کارنو و محور افقی آنتالپی می‌باشد. نمودارهای EGCC, ECC تغییرات در شرایط اجزا و تاثیر این تغییرات را بر روی کل سیستم، به صورت گرافیکی نمایش می‌دهند. نمودارهای ECC, EGCC هنوز توانایی نمودارهای GCC, CC در تشریح تاثیرات متقابل بین اجزا مختلف سیستم را دارا می‌باشند و تاثیر هر تغییری در اجزا سیستم بر روی کل سیستم در نمودارهای EGCC, ECC

5- Linnhoff & Dhole  
6- Zheng & Dhole  
7- Favrat & Staine  
8- Vasile Lavric  
9- Manninen & Zhu

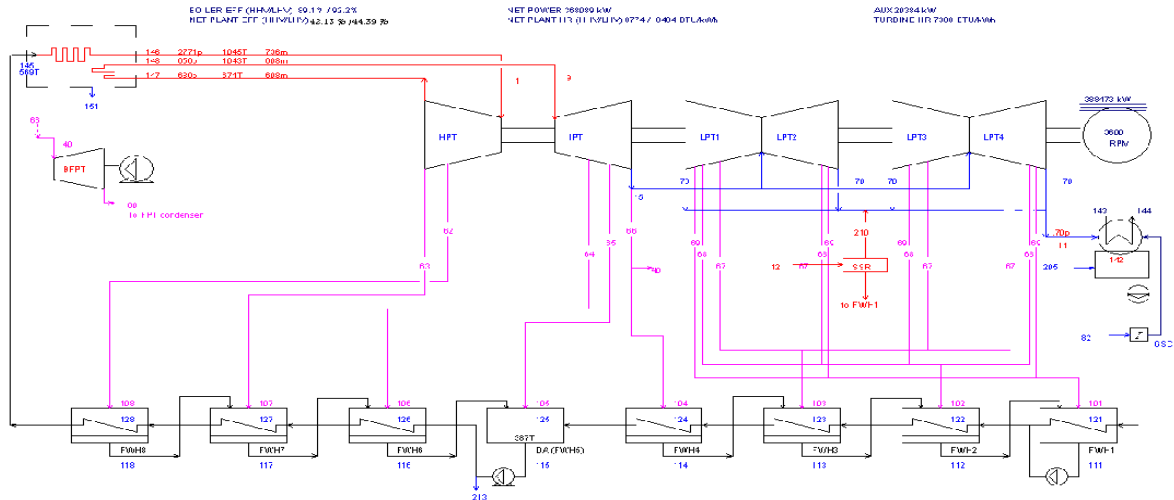
1- Composite Curve(CC)  
2- Grand Composite Curve(GCC)  
3- Exergy Composite Curve(EGCC)  
4- Composite Curve (EGCC)

### معرفی نیروگاه مورد مطالعه

شکل ۱ مدل شبیه‌سازی شده نیروگاه رامین اهواز رانشان می‌دهد که به‌عنوان نیروگاه مورد مطالعه انتخاب شده است. سیکل نیروگاه رامین اهواز سیکل توربین بخار می‌باشد. این نیروگاه شامل یک واحد بازگرمایش با هشت مرحله زیرکش از توربین می‌باشد. این هشت زیرکش، بخار مورد نیاز برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه را فراهم می‌آورند. هشت مرحله پیش‌گرم کردن آب تغذیه شامل یک هوازدا، چهار عدد پیش‌گرم‌کن فشار ضعیف، یک عدد پیش‌گرم‌کن فشار متوسط و دو عدد پیش‌گرم‌کن فشار قوی می‌باشد. سوخت اصلی نیروگاه، نفت کوره می‌باشد. شبیه‌سازی نیروگاه رامین اهواز با استفاده از نرم‌افزار Thermoflow (Steam Pro) 13.0 که یک نرم‌افزار تخصصی در زمینه شبیه‌سازی نیروگاه‌ها می‌باشد، صورت گرفته است. اطلاعات و مشخصات اصلی نیروگاه شبیه‌سازی شده در جدول ۱ آمده است. نوع بویلر، نوع و چیدمان شبکه توربین‌های بخار و همچنین شبکه مبدل‌های حرارتی و کندانسور مربوطه به عنوان ورودی تجهیزات در نرم‌افزار Steam Pro وارد می‌شود. همچنین شرایط آب و هوایی، نوع سوخت و میزان توان به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده است.

گرفتن ملاحظات اقتصادی بود. سورین و پاریس<sup>۱</sup> (۱۲) (۱۹۹۹) از آنالیز ترکیبی پینچ و اگسرژی جهت مطالعه و شناسایی پتانسیل‌های بهینه‌سازی در یک واحد تولید هیدروژن استفاده کردند و توانستند بازده واحد را از ۵۵/۷ درصد تا ۵۶/۶ درصد افزایش دهند. آن‌ها نشان دادند که آنالیز اگسرژی با کمک پینچ می‌تواند تغییرات مطلوب را با کم‌ترین تغییر در فرآیند، کم‌ترین اصلاح تجهیزات و با حجم محاسبات کم‌تر پیدا کند. آنانترامن و گاندرشن<sup>۲</sup> (۱۴) (۲۰۰۶) با استفاده از ترکیب آنالیز اگسرژی و پینچ یک واحد متانول را بررسی و فرصت‌های بهینه‌سازی آن‌را شناسایی کردند. آن‌ها در این پژوهش رویکردی جدید برای بررسی واحدهای فرآیندی با استفاده از روش توسعه یافته پینچ و اگسرژی ارائه نمودند. گاندرشن و همکاران (۲۰۰۷) (۱۵) تحلیل توسعه یافته پینچ-اگسرژی با در نظر گرفتن اگسرژی فشاری برای طراحی بهینه سیستم‌های تبرید پیشنهاد دادند. در این روش قواعد ابتکاری و مفهوم جدیدی از پینچ به‌منظور بهینه‌سازی ارائه شده است. خوش‌گفتارمنش و همکاران (۲۰۰۷) (۱۶) با ارائه ضرایب EDL و ECDL تحلیل ترموآکونمیک را به‌صورت شماتیک به‌منظور بررسی عملکرد یک نیروگاه اتمی ۱۰۰۰ مگاواتی نمایش داده‌اند. همچنین در این مقاله ضرایبی جدید به‌منظور ترسیم نمودارهای ترکیبی پینچ و اگسرژی ارائه گردید. آتایی و یو<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) (۱۷) به‌کمک تحلیل ترکیبی پینچ و اگسرژی یک نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی را تحلیل و بهینه‌سازی نمودند. قناد زاده صادق زاده<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) (۱۹، ۱۸) از تکنیک پینچ و اگسرژی به‌منظور بهبود راندمان و کاهش آلاینده‌ها در فرآیند تولید اکسید اتیلن استفاده کردند.

- 1- Sorin & Paris
- 2- Anantharaman & Gundersen
- 3- Ataei & You
- 4- Ghanadzadeh & Sadeghzadeh



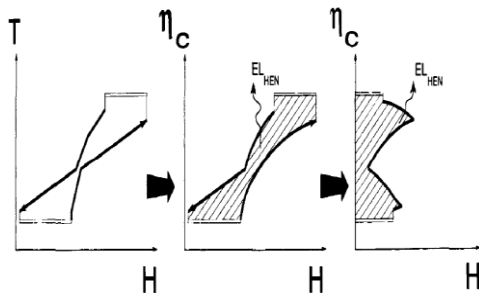
شکل ۱- شماتیک سیکل نیروگاه مشابه با رامین اهواز شبیه سازی شده در محیط (Steam Pro) Thermoflow  
 Figure 1. Schematic of Power Plant Cycle same as RAMIN Ahwaz simulation in (Steam Pro) Thermoflow

جدول ۱- مشخصات اصلی نیروگاه شبیه سازی شده

Table 1. Main specification of simulation power plant

پارامتر	اطلاعات نیروگاه	نتایج شبیه سازی
توان خالص خروجی	۳۱۵ MW	۳۱۵ MW
دمای بخار سوپر هیت شده	۵۶۰ C	۵۶۰ C
فشار بخار سوپر هیت شده	۱۷۸/۵ bar	۱۷۸/۵ bar
دبی بخار سوپر هیت شده	۳۱۵/۱ kg/s	۳۱۵/۱ kg/s
تعداد بازگرمایش بخار	۱	۱
تعداد پیش گرم کن ها (با دیاراتور)	۸	۸
فشار کندانسور	۰/۰۵ bar	۰/۰۵ bar
اختلاف دمای اولیه پیش گرم کن ها	۵/۶ c	۵/۶ c
افت فشار در زیرکش ها	۰/۰۵ %	۰/۰۵ %
افت فشار در زیرکش به دیاراتور	۰/۰۸۵۱ %	۰/۰۸۵۱ %
افت فشار در بازگرمایش	۹/۹ %	۹/۹ %
مصرف سوخت	۱۴/۹ kg/s	۱۴/۹ kg/s
بازده آیزونتروپیک توربین فشار قوی ۱	۸۱ %	۸۱ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار قوی ۲	۸۸ %	۸۸ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار متوسط ۱	۸۶ %	۸۶ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار متوسط ۲	۸۷ %	۸۷ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار ضعیف ۱	۸۸ %	۸۸ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار ضعیف ۲	۸۹ %	۸۹ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار ضعیف ۳	۸۷ %	۸۷ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار ضعیف ۴	۸۷ %	۸۷ %
بازده آیزونتروپیک توربین فشار ضعیف ۵	۸۷ %	۸۷ %

دما رسم می‌شود. انرژی‌های بررسی شده در دو نمودار CC و GCC فقط بارهای حرارتی هستند. این نمودارها نمی‌توانند برای تحلیل نیروگاه‌های حرارتی استفاده شود. برای بحث درباره سیستم‌هایی که حرارت و توان را در برمی‌گیرند، مفاهیم CC و GCC بسط داده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، منحنی CC برای یک سیستم انتقال حرارت به منحنی-های ECC و EGCC تبدیل شده است.



شکل ۲- انتقال اگسرژی از CC به ECC و EGCC (2)

Figure 2. Exergy transfer from CC to ECC and EGCC (2)

سطوح هاشور خورده اتلاف اگسرژی فرآیند انتقال حرارت را نشان می‌دهد. با ترکیب تحلیل پینچ و اگسرژی، پیش‌بینی کار محوری تولیدی برای سیستم‌های توان با دقت خوبی ممکن می‌شود. این روش ترکیبی به منظور هدف‌گذاری کار محوری توسعه داده می‌شود. این روش فقط تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت که روی نمودار  $H-\eta$  ترسیم می‌شوند در برمی‌گیرد و فرآیندهایی که با تغییرات فشار یا ترکیب همراه است توسط این روش قابل تحلیل نیست. به عبارت دیگر نمودار  $H-\eta$  فرآیندهای اصلی نیروگاه مانند توربین و کمپرسور را نمی‌تواند تحلیل کند. جهت بر طرف کردن این محدودیت، تحلیل ترکیبی پینچ و اگسرژی با مطرح کردن نمودار جدیدی با نام  $H-\eta$  توسعه یافته معرفی می‌شود. این روش تمام سیستم را در بر گرفته و اطلاعات هدف‌گذاری برای اصلاحات را فراهم می‌نماید. ضمن این‌که جهت‌های اصلی و اصلاحات و بهبود بخش احتمالی جهت توسعه سیستم به‌طور موثری مشخص می‌شود. برای به‌دست آوردن پتانسیل حداکثر صرفه‌جویی که برای هر اصلاحی قابل محاسبه است، اتلافات اگسرژی به دو قسمت اجتناب‌پذیر و قابل جلوگیری تقسیم می‌شوند. اتلافات اگسرژی

سوخت منبع اولیه انرژی در نیروگاه بخار بوده که پس از احتراق در کوره، اگسرژی شیمیایی سوخت آزاد می‌شود. قسمتی از این اگسرژی اولیه، به علت ناقص بودن فرایند احتراق، پیش-گرم‌کن هوا و اتلافات دودکش تلف می‌شود. اگسرژی باقی‌مانده به سیکل بخار داده می‌شود، مقداری از این اگسرژی نیز حین فرایند انتقال حرارت بین محصولات احتراق و بخار تلف می‌گردد. در درون سیکل بخار، سیستم پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه که وظیفه بالا بردن دمای آب تغذیه ورودی به بویلر با استفاده از بخار زیرکش شده از توربین‌ها را بر عهده دارند نیز مقداری اگسرژی را حین انتقال حرارت تلف می‌کنند. در کندانسور نیز به علت تبادل حرارت با یک منبع خارجی مقداری اتلافات اگسرژی داریم (۵). کوره، سیستم پیش‌گرم‌کن‌ها و کندانسور، شبکه مبدل‌های حرارتی<sup>۱</sup> نیروگاه بخار را تشکیل می‌دهند. باقی‌مانده اگسرژی داده شده به سیکل پس از اتلاف اگسرژی در HEN تحویل سیستم توربین برای تولید توان می‌گردد. بر طبق رابطه ۱ مصرف سوخت، HEN و سیستم توربین به هم مربوط می‌گردند و تغییر در هر کدام باعث تغییر در دوتای دیگر می‌شود (۳).

$$\Delta EX_{FUEL} = EX_{Poewr} + \sigma T_{OHEN} \quad (1)$$

$$\sigma T_{OHEN} = \sigma T_{OF} + \sigma T_{OP} + \sigma T_{OC} \quad (2)$$

$\Delta EX_{FUEL}$  اگسرژی سوخت،  $EX_{Poewr}$  اگسرژی تحویلی به سیستم توربین،  $\sigma T_{OHEN}$  اتلافات اگسرژی در HEN در  $\sigma T_{OF}$  اتلافات اگسرژی در کوره،  $\sigma T_{OP}$  اتلافات اگسرژی در پیش‌گرم‌کن‌ها،  $\sigma T_{OC}$  اتلافات اگسرژی در کندانسور برای رسیدن به تشریح ترمودینامیکی نیروگاه و تعیین تاثیرات بین این سه قسمت اصلی بر روی هم‌دیگر یک نمودار جدید به نام نمودار ترکیبی پینچ و اگسرژی، معرفی می‌گردد. این نمودار در بخش بعدی مورد بررسی بیش‌تر قرار خواهد گرفت.

### روش بررسی

تحلیل پینچ روش عامی برای هدف‌گذاری و طراحی فرآیندهای شیمیایی و حرارتی می‌باشد. منحنی‌های CC و GCC دو ابزار اساسی در تحلیل پینچ می‌باشند، که در آن آنتالپی نسبت به

1- Heat Exchanger Network(HEN)

بخار جریان‌های گرم عبارتند از: جریان‌های زیرکش و بخار عبوری از کندانسور و جریان‌های سرد عبارتند از: جریان‌های آب تغذیه که نیاز به گرم شدن دارند و بخار عبوری از ری‌هیتر می‌باشند. اطلاعات جریان‌های گرم و سرد نیروگاه مورد مطالعه شامل دماهی ورودی و خروجی به همراه تغییرات آنتالپی آن‌ها در جدول ۲ آمده است. با توجه به این که بار حرارتی گرم خارجی مورد نیاز سیکل برابر ۸۱۷۵۲۵ کیلووات است کم‌ترین اختلاف دمای مجاز محاسبه شده برای سیستم برابر ۳/۲۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با در دست داشتن اطلاعات جریان‌ها و کم‌ترین اختلاف دمای مجاز، نمودارهای GCC, CC نیروگاه رسم می‌شود که به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. میزان بار حرارتی گرم و سرد مورد نیاز در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است.

اجتناب‌ناپذیر به‌عنوان حداقل اتلاف آگرزژی که نمی‌توان با در نظر گرفتن محدودیت‌های تکنیکی و اقتصادی از آن در یک فرآیند جلوگیری به‌عمل آورد تعریف می‌شود. اتلاف قابل جلوگیری حداکثر پتانسیل عملی برای توسعه فرآیند را ارایه می‌دهد. با کمک این روش سیستم تحلیل شده و دلایل عمده معایب آن مشخص می‌شود. سپس اصلاحات احتمالی و حداکثر پتانسیل عملی این اصلاحات با تحلیل اتلافات قابل جلوگیری به‌وجود آمده در تجهیزات و فرآیندهای مختلف به‌دست می‌آید (۲، ۱۵).

#### یافته‌ها

#### CPER نیروگاه مورد مطالعه

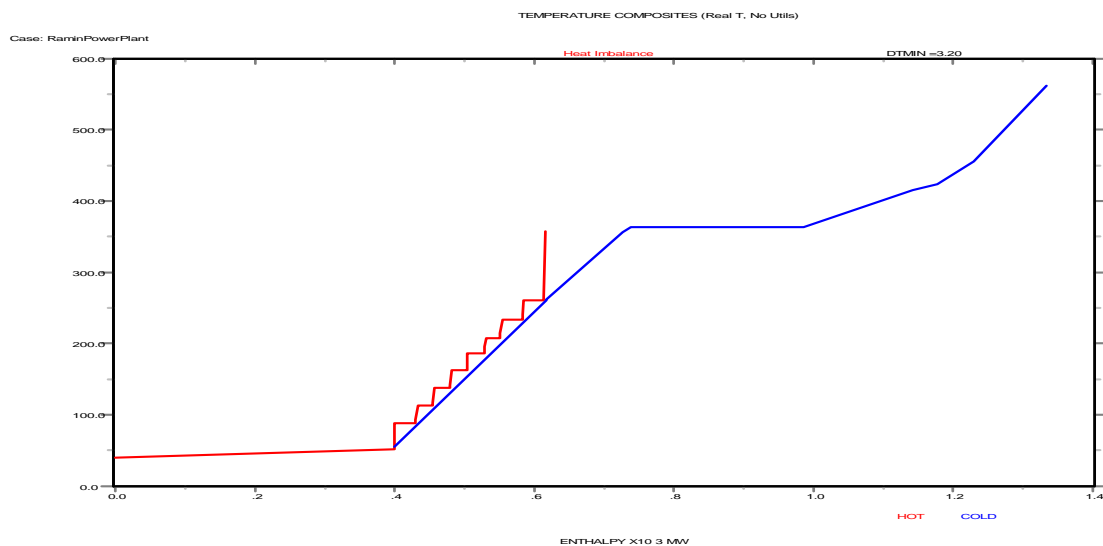
برای رسم CPER نیروگاه مورد مطالعه، اطلاعات پایه برای جریان‌های سرد و گرم نیروگاه استخراج می‌گردد. در سیکل

جدول ۲- جریان‌های گرم و سرد نیروگاه مورد مطالعه

Table 2. Hot and cold stream related to Power Plant study

Tsupp (C)	Ttarg (C)	Duty (Kw)	نام جریان
۳۹۵/۱۶	۲۸۱/۳۸	۹۴۹۱/۳۱۴	Stream ۱
۲۸۱/۳۸	۲۸۰/۳۸	۳۸۵۲۳/۹۸	Stream ۲
۲۸۰/۳۸	۱۶۳/۲۴	۱۳۸۳۲/۹۱	Stream ۳
۳۲۱/۹۴	۲۷۴/۶۵	۶۸۶۹/۳۱۳	Stream ۴
۲۴۷/۶۵	۲۴۶/۶۵	۵۲۳۱۸/۱	Stream ۵
۲۴۶/۶۵	۱۶۳/۲۴	۱۱۶۰۴/۲۹	Stream ۶
۴۱۵/۳۸	۱۹۶/۲	۶۳۵۶/۸۳۹	Stream ۷
۱۹۶/۲	۱۹۵/۲	۲۴۷۲۹/۴۱	Stream ۸
۱۹۵/۲	۱۶۳/۲۴	۱۸۳۷/۹۷۹	Stream ۹
۳۲۳/۶۵	۱۶۳/۲۴	۴۰۳۲/۱۵۶	Stream ۱۰
۱۶۳/۲۴	۱۶۲/۲۴	۲۳۸۷۴/۴۸	Stream ۱۱
۲۴۴/۳۹	۱۳۸/۴	۲۳۱۳/۶۱	Stream ۱۲
۱۳۸/۴	۱۳۷/۴	۲۲۱۹۷/۱	Stream ۱۳
۱۳۷/۴	۳۳/۱	۴۵۷۸/۲۵۶	Stream ۱۴
۱۶۴/۹۳	۱۱۲/۵	۱۰۸۱/۹۱۲	Stream ۱۵
۱۱۲/۵	۱۱۱/۵	۲۲۴۵۲/۳	Stream ۱۶
۱۱۱/۵	۳۳/۱	۳۳۶۶/۳۳	Stream ۱۷

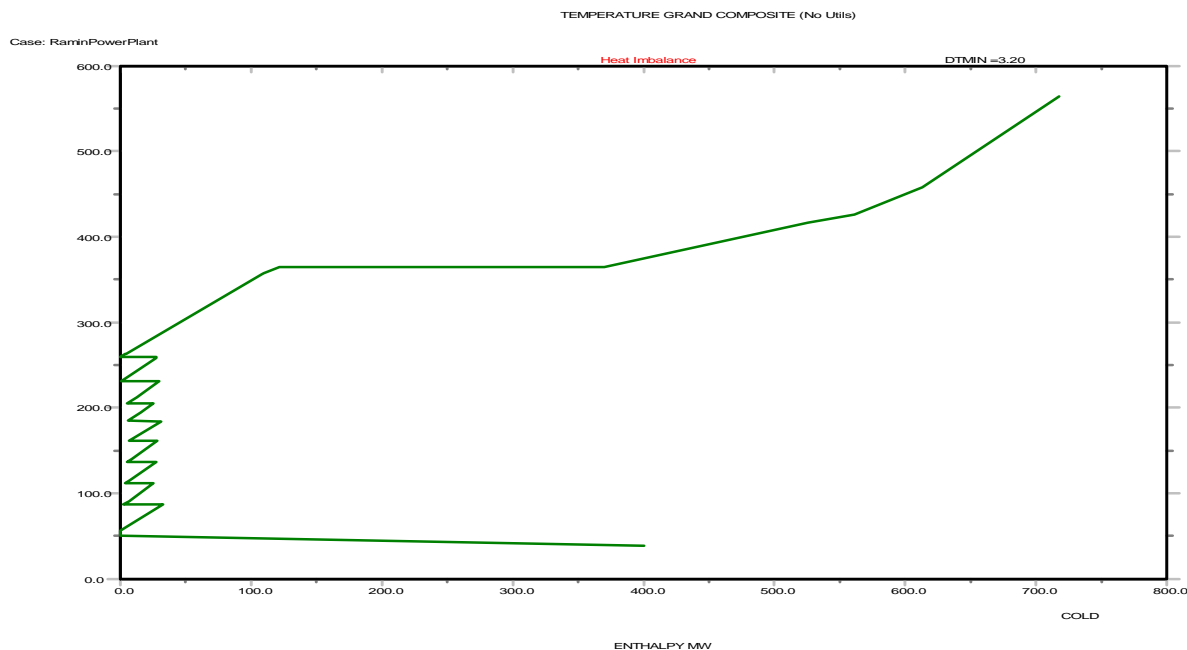
۸۷/۳۸	۸۶/۳۸	۲۱۱۱۳/۴۵	Stream ۱۸
۸۶/۳۸	۳۳/۱	۲۰۴۹/۳۹۲	Stream ۱۹
۶۱/۰۴	۶۰/۰۴	۱۹۵۲۲/۶۲	Stream ۲۰
۶۰/۰۴	۳۳/۱	۱۰۱۰/۷۵۳	Stream ۲۱
۳۳/۱	۱۶۳/۲۴	۱۲۹۵۸۲/۳	Stream ۲۲
۱۶۶/۹۴	۲۸۰/۴۷	۱۶۲۹۳۵/۱	Stream ۲۳
۲۸۰/۴۷	۳۵۶/۳	۱۵۵۸۰۴/۳	Stream ۲۴
۳۵۶/۳	۳۵۷/۳	۲۴۹۳۹۸/۵	Stream ۲۵
۳۷۵/۳	۵۳۸	۲۷۲۲۲۱/۲	Stream ۲۶
۳۲۳/۲	۵۳۸	۱۳۱۹۴۰/۶	Stream ۲۷
۳۴/۱	۳۳/۱	۴۳۳۷۵۰/۲	Stream ۲۸



شکل ۳- نمودار CC نیروگاه رامین اهواز در حالت مبنا

Figure 3. CC curve of RAMIN Power Plant in base case





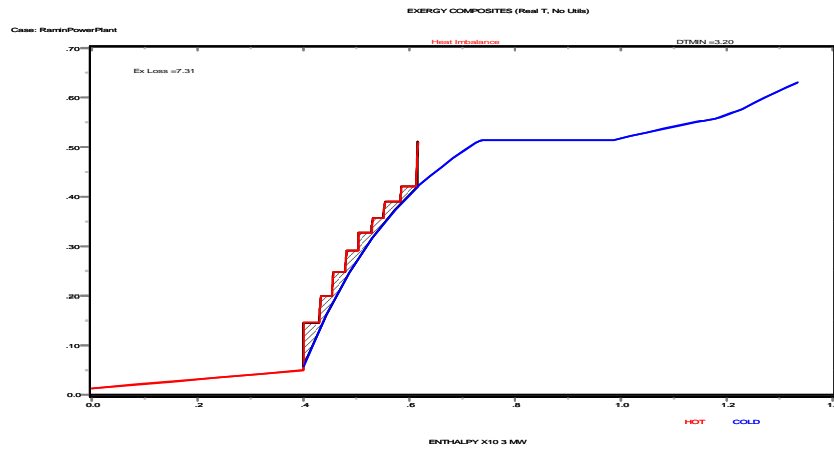
شکل ۴- نمودار GCC نیروگاه رامین اهواز در حالت مبنا

Figure 4. GCC curve of RAMIN Power Plant in base case

جریان‌های حرارتی و نیروهای محرکه دما را نشان می‌دهد، علاوه بر آن جریان‌های آگرزژی و کار محوری را نیز مشخص می‌کند. نمودار جدید، CPER نامیده می‌شود. نمودار CPER نیروگاه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است، سطح کل هاشور خورده در شکل ۷ آگرزژی سوخت را توسط FGECC به سیکل داده می‌شود را نشان می‌دهد. سطح هاشور خورده مورب اتلاف کل آگرزژی در شبکه مبدل‌های حرارتی را نشان می‌دهد و سطح هاشور خورده عمودی آگرزژی رسیده به سیستم توربین توسط بخار برای تولید توان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است اگر تغییری در مصرف سوخت اتفاق بیافتد اتلافات آگرزژی در HEN و آگرزژی رسیده به سیستم توربین EX\_Power شاهد تغییرات خواهیم بود. بنابراین انتگراسیون ترمودینامیکی بین مصرف سوخت، HEN و سیستم توربین در یک نمودار نشان داده می‌شود. در CPER می‌توان تاثیرات متقابل بین اجزا مختلف نیروگاه را نشان داده و یک نمای مفهومی از نیروگاه به دست می‌آید.

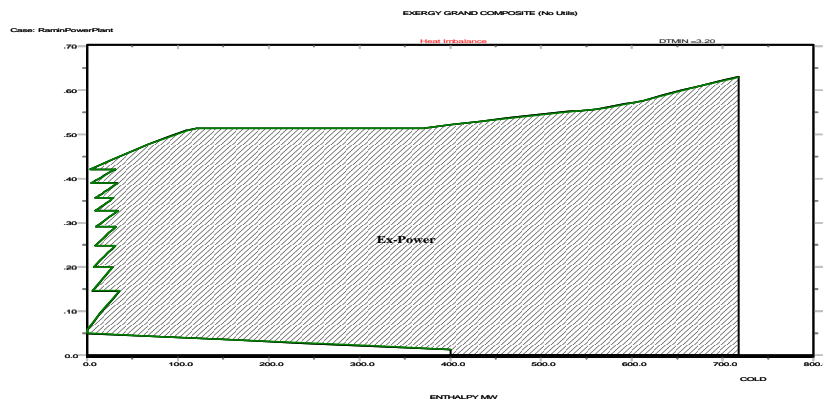
با استفاده از نمودارهای GCC,CC می‌توانیم نمودارهای EGCC,ECC را رسم کنیم. شکل ۵، نمودار ECC نیروگاه در حالت مبنا را نشان می‌دهد. در شکل ۵ سطح هاشور خورده اتلافات آگرزژی ناشی از انتقال حرارت در پیش‌گرم‌کن‌های آب تغذیه را نشان می‌دهد که برابر ۵۵۶۰ کیلووات می‌باشد. شکل ۶، نمودار EGCC نیروگاه در حالت مبنا را نشان می‌دهد. در شکل ۶ سطح هاشور خورده، آگرزژی که توسط بخار سوپرهیت‌شده تحویل سیستم توربین می‌شود را مشخص می‌کند، که برابر ۳۶۰۵۱۰ کیلووات می‌باشد. ولی این نمودارها نحوه رسیدن آگرزژی سوخت و توزیع کامل آگرزژی در درون سیستم را نشان نمی‌دهند پس به توسعه این نمودارها می‌پردازیم. بار حرارتی گرم مورد استفاده در نیروگاه محصولات احتراق و بار حرارتی سرد مورد استفاده در نیروگاه محصولات احتراق و بار حرارتی سرد مورد استفاده در نیروگاه، آب خنک-کن می‌باشد. با وارد کردن نمودار ترکیبی آگرزژی محصولات احتراق<sup>۱</sup> و همچنین نمودار ترکیبی آگرزژی آب‌خنک‌کن<sup>۲</sup> در نمودار EGCC به یک نمودار جدید می‌رسیم که نه تنها

1- Flue Gas Exergy Composite Curve(FGECC)  
2- Cooling Water Exergy Composite Curve(CWECC)



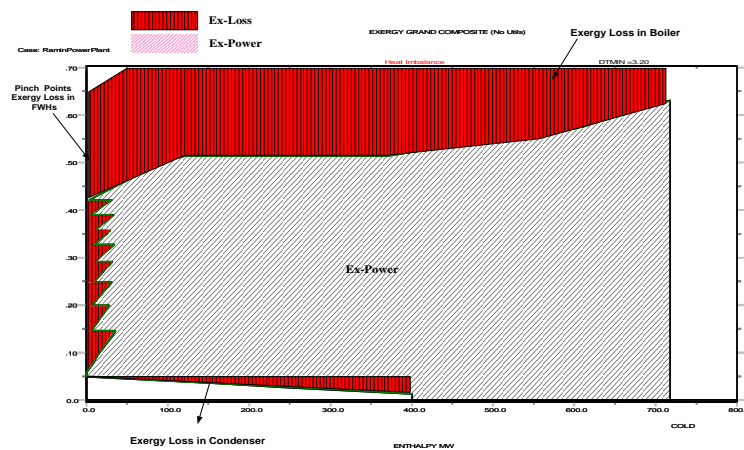
شکل ۵- نمودار ترکیبی اگزرژی در حالت مینا

Figure 5. Exergy Composite Curve in base case



شکل ۶- نمودار ترکیبی جامع اگزرژی نیروگاه در حالت مینا

Figure 6. Exergy Composite Curve in base case



شکل ۷- نمودار ترکیبی پینچ-اگزرژی نیروگاه در حالت مینا

Figure 7. Combined Pinch- Exergy Composite Curve of Power Plant in base case

## بحث و نتیجه‌گیری

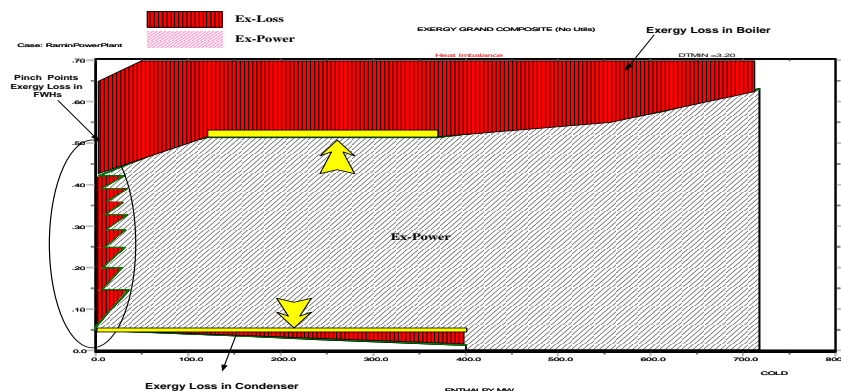
## بررسی روش‌های بهبود عملکرد

دوباره شکل ۷ را در نظر می‌گیریم، همان‌گونه که در شکل مشخص است، اگزرژی ورودی، اگزرژی سوخت می‌باشد که توسط محصولات احتراق به سیکل تحویل داده می‌شود. پس از تلف شدن اگزرژی در کوره، پیش‌گرم‌کن‌ها و کندانسور، اگزرژی باقی‌مانده تحویل سیستم توربین برای تولید توان می‌شود. اتلافات کل اگزرژی (اتلافات اگزرژی کوره+ اتلافات اگزرژی پیش‌گرم‌کن‌ها+ اتلافات اگزرژی کندانسور) حالت مینا، ۴۰۰۱۴۵ کیلووات می‌باشد و اگزرژی تحویل شده به سیستم توربین برای تولید توان (Ex-Process) در حالت مینا برابر ۴۱۸۰۰۰ کیلووات می‌باشد. در شکل ۷ سطح هاشورزده مورب نشان‌دهنده کل اتلافات اگزرژی و سطح هاشور زده عمودی نشان‌دهنده اگزرژی تحویلی به سیستم توربین می‌باشد. با توجه به شکل ۷ هرگونه کاهش در اتلافات اگزرژی کوره، پیش‌گرم‌کن‌ها و کندانسور، باعث افزایش توان خروجی و کاهش مصرف سوخت خواهد شد. بازده حرارتی نیروگاه در حالت مینا ۴۴/۳۹ درصد و مصرف سوخت ۲۱/۹ کیلووات در ثانیه می‌باشد. حال با استفاده از شکل ۷ راه‌های کاهش اتلافات اگزرژی، شناسایی و تاثیر این تغییرات بر روی کل سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## اصلاح اول: نزدیک کردن پینچ‌ها

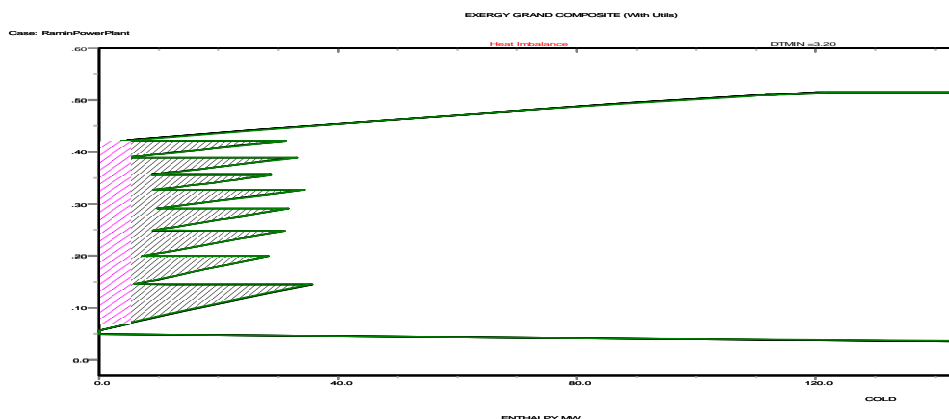
برای کاهش اتلافات اگزرژی در پیش‌گرم‌کن‌ها، به بررسی نحوه توزیع نیروهای محرکه دما در سیستم پیش‌گرم‌کن‌ها (شکل ۸)

می‌پردازیم. شکل ۹ نمای بزرگ شده سیستم پیش‌گرم‌کن‌ها در CPER (شکل ۸) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که کم‌ترین اختلاف دمای مجاز که ۳/۳۲ درجه سانتی-گراد می‌باشد، فقط در نقطه A رخ می‌دهد و سیستم تنها در یک نقطه پینچ دارد. از آنجا که در دمای چگالش هر زیرکس بخار، امکان ایجاد پینچ دیگری وجود دارد، می‌توان گفت که نیروهای محرکه دما در این سیستم توزیع یکنواختی ندارند. طبق اصول ترمودینامیک، کاهش نیروی محرکه حین فرایند انتقال حرارت، یکی از عوامل کاهش بازگشت‌ناپذیری می‌باشد. بنابراین در صورت کاهش نیروهای محرکه در دیگر پله‌های چگالش و رساندن آن به میزان کم‌ترین اختلاف دمای مجاز موجود در سیستم، راندمان حرارتی نیروگاه بهبود می‌یابد که دلیل آن کاهش بار حرارتی گرم مورد نیاز نیروگاه می‌باشد. برای نزدیک کردن تفاوت دمایی پله‌های چگالش دیگر، دبی زیرکس‌ها را باید تغییر داد. برای این کار، رابطه انرژی بین هر دو دمای اشباع نزدیک هم نوشته می‌شود. اتلافات کل اگزرژی به  $210445/2$  کیلووات کاهش می‌یابد. بازده نیروگاه با افزایش  $0/4$  درصدی به  $44/56$  درصد و مصرف سوخت با کاهش  $0/46$  درصدی به  $21/8$  کیلوگرم در ثانیه می‌رسد. همچنین میزان آلاینده‌های ناشی از مصرف سوخت نیز به میزان  $0/46$  درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تعیین اصلاحات بر روی نمودار ترکیبی پینچ و اگزرژی

Figure 8. Identification of improvement in combined pinch-exergy representation



شکل ۹- توزیع غیر یکنواخت نیروهای محرکه دما در سیستم پیش گرمکن ها

Figure 9. Non uniform distribution of driving forces in feed water heaters system

### اصلاح دوم: افزایش بخار در بویلر

نزدیک شده و سطح محصور بین این دو خط که اتلاف انرژی کندانسور را نشان می‌دهد، کم می‌شود. کاهش فشار کندانسور از ۰/۰۵ بار به ۰/۰۴۵ بار باعث می‌شود که اتلافات کل انرژی به ۲۰۴۷۴۲/۹ کیلووات برسد. بازده سیکل با افزایش ۱/۷ درصدی به ۴۵/۱۵ درصد می‌رسد. افزایش بازده به علت افزایش انرژی تحویلی به سیستم توربین می‌باشد و انرژی ورودی سوخت ثابت است. سطح هاشور خورده مورب اتلافات کل انرژی را پس از اعمال سه اصلاح ذکر شده نشان می‌دهد و ناحیه پررنگ‌تر انرژی رسیده به سیستم توربین را نشان می‌دهد که تا ۴۲۲۴۳۸ کیلووات افزایش یافته است. مقایسه اتلافات کل انرژی، انرژی رسیده به سیستم توربین، بازده و مصرف سوخت بین حالت مبنا و حالت بهینه شده در جدول ۳ آمده است.

پس از نزدیک کردن پینچ‌ها برای کاهش اتلافات انرژی در کوره همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است، می‌توان فشار آب تغذیه ورودی به کوره را افزایش داد. افزایش فشار آب تغذیه از ۱۷۸/۵ بار تا ۱۹۳/۵ بار باعث می‌شود که اتلافات کل انرژی تا ۲۰۶۶۷۰/۱ کیلووات کاهش یابد. بازده نیروگاه با افزایش ۰/۸۹ درصدی (نسبت به حالت مبنا) به ۴۴/۷۹ درصد می‌رسد و مصرف سوخت با کاهش ۱/۱۳ درصدی به ۲۱/۶۷ کیلوگرم در ثانیه می‌رسد. البته امکان تغییر فشار یک بویلر موجود از نظر عملی مقدور نیست و از ابتدا بویلر می‌بایست برای فشار مورد نظر طراحی گردد. همچنین میزان تولید آلاینده‌ها نیز به میزان ۱/۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

### اصلاح سوم: کاهش فشار کندانسور

پس از اعمال اصلاحات اول و دوم، برای کاهش اتلافات انرژی در کندانسور، با توجه به شکل ۸ می‌توان فشار کندانسور را کاهش داد. با کاهش فشار کندانسور، خط دمای اشباع کندانسور به CWEEC بار حرارتی سرد (آب‌خنک‌کن)،

### جدول ۳- مقایسه بین حالت مبنا و حالت بهینه شده

Table 3. Comparison of base and optimum case

حالت بهینه شده	حالت مبنا	
۲۰۴۷۴۲/۹ kw	۲۱۲۸۱۹/۵ kw	اتلافات کل انرژی
۴۲۲۴۳۸ kw	۴۲۰۰۳۰/۲ kw	انرژی تحویلی به سیستم توربین
۴۵/۱۵ %	۴۴/۳۹ %	بازده
۱۴/۶ kg/s	۱۴/۹ kg/s	مصرف سوخت

قسمت‌های داخل نیروگاه، برای تعیین اصلاحات ممکن را فراهم می‌آورد.

## Reference

1. Dincer, I. and M.A. Rosen, EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development. 2007: Elsevier Science.
2. X. Feng and X. X. Zho, Combining pinch and exergy analysis for process modifications, *Applied Thermal Engineering*, 17(3), 249-261, 1997.
3. Klemes, J., et al., *Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization: Integration and Optimization*. 2010: McGraw-Hill Education.
4. V. R. Dhole and J.P. Zheng, applying combined and exergy analysis to closed cycle gas turbine system design, 117, 47-52, 1995.
5. B. Linnhoff, V.R. Dhole, "Shaftwork targets for low temperature process design" *Chemical Engineering Science Journal*, 1991
6. V. R. Dohle, J. P. Zheng, "Applying combined pinch and exergy analysis to closed-cycle gas turbine system design", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 117, PP. 47-52, 1995
7. J. P. Zheng, X. X. Zhu, V. R. Dhole and J. Rennie, Conceptual design of commercial power plants using the combined pinch and exergy approach. Accepted for presentation at the 5th World Congress of Chemical Engineering, San Diego, California, July 1996.
8. F. Staine, D. Favart, "Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors",

به‌کارگیری هم‌زمان تکنولوژی پینچ و آنالیز آگزرژی در بهینه‌سازی نیروگاه بخار نه‌تنها باعث افزایش بازده حرارتی نیروگاه می‌شود بلکه باعث کاهش مصرف سوخت می‌گردد. افزایش راندمان نیروگاه به میزان ۱/۷ درصد تاثیر زیادی در میزان مصرف سوخت به‌ازای هر کیلووات توان تولیدی دارد. به‌طوری‌که میزان ۸۰۷۶/۶ کیلووات از تلفات آگزرژی در سیستم کاهش یافته است. یعنی میزان توان تحویلی به توربین ۲۰۴۷/۸ کیلووات افزایش یافته است. لذا به‌ازای توان تولیدی مشخص، میزان مصرف سوخت به میزان ۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه معادل ۱/۰۸ تن بر ساعت کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان گازهای خروجی نیروگاه حدود ۲۰ تن بر ساعت معادل ۴۸۰ تن در روز کاهش می‌یابد؛ لذا تولید آلاینده‌ها نیز به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

با کاهش مصرف سوخت به‌ازای توان مشخص هزینه عملکردی نیروگاه پایین می‌آید و هم‌چنین آلودگی حرارتی و آلودگی‌های گازهای مخرب زیست محیطی کاهش می‌یابد. در این مقاله ما سعی کردیم که نشان دهیم چگونه با استفاده از یک نمودار ساده، می‌توان اصلاحات موثر را شناسایی و قبل از وارد شدن به جزئیات طراحی، آن اصلاحات را هدف‌گذاری کرد. طراحی و بهینه‌سازی سنتی نیروگاه‌ها بر پایه تجربه مهندسی و شبیه‌سازی کامپیوتری استوار است که هم زمان و هم تلاش فراوانی را نیاز دارد، درحالی‌که در آنالیز ترکیبی پینچ و آگزرژی که برای تحلیل نیروگاه به‌کار برده شد، از CPER که یک نمودار ساده می‌باشد استفاده شده است. در CPER قسمت‌های مختلف سیستم به صورت مجزا مشخص می‌گردد. اصلاحات ممکن به‌راحتی بر روی نمودار قابل تعیین است. پس از تعیین اصلاحات، CPER این توانایی را دارد که تاثیر تغییرات در قسمت‌های مختلف سیستم بر روی هم‌دیگر و همچنین بر روی سیستم کل به‌وضوح به‌صورت گرافیکی نمایش دهد. بنابراین انتگراسیون ترمودینامیکی بین قسمت‌های مختلف نیروگاه در یک نمودار نشان داده می‌شود و یک نمای مفهومی از نیروگاه به‌دست می‌آید. CPER به مهندس، یک نگرش فیزیکی عمیق و درک مهندسی بالاتر از روابط بین

- Conference on Nuclear Engineering ICONE16 ,May 11-15, (2008), Orlando, Florida, USA.
16. T. Gundersen, D.O. Berstad and A. Aspelund. Extended pinch analysis and process integration into pressure and fluid phase consideration, Proceeding of 12<sup>th</sup> Conference of Process Integration, Modeling and Optimization for Energy saving and Pollution Reduction - PRES 2009, (2009)10-13 May Rome Italy.
17. A. Ataei and C.K. Yoo, Combined pinch and exergy analysis for energy efficiency optimization in a steam power plant, International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(7), pp. 1110-1123, July 2010
18. Ghannadzadeh, A. and M. Sadeqzadeh, Combined pinch and exergy analysis of an ethylene oxide production process to boost energy efficiency toward environmental sustainability. Clean Technologies and Environmental Policy, 2017. 19(8): p. 2145-2160.
19. Ghannadzadeh, A. and M. Sadeqzadeh, Exergy aided pinch analysis to enhance energy integration towards environmental sustainability in a chlorine-caustic soda production process. Applied Thermal Engineering, 2017. 125(Supplement C): p. 1518-1529.
- Applied Thermal Engineering, Vol. 16, PP. 497-507, 1996
9. V Lavric, D. Baetens, V. Plesu, J. De Ruyck. Entropy generation reduction through chemical pinch analysis, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1837–1845.
10. J. Manninen, X. X. Zhu, “Thermodynamic analysis and mathematical optimization of power plant”, Computers and Chemical Engineering, Vol. 22, PP. S537-S544, 1998.
11. J. Manninen, X. X. Zhu, Optimal flowsheeting synthesis for power station design considering overall integration, Energy 24 (1999) 451–478
12. M. Sorin, J. Paris, “ Integrated exergy load distribution method and pinch analysis”, Computer & Chemical Engineering Journal, 1999
13. R. Anantharaman, O. Abbas, T. Gundersen,” Energy level composite curves- a new graphical methodology for the integration of energy intensive processes”, Applied Thermal Engineering Journal, 2006.
14. A. Aspelund, D. Berstad, T. Gundersen,”An Extended Pinch Analysis and Design procedure utilizing pressure based exergy for subambient cooling”, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2633–2649.
15. M. H. Khoshgoftar Manesh, M. Amidpour, M. H. Hamedi, Analysis of pressurized water reactor with pinch, exergy and thermoeconomic method, Proceedings of the 16th International