

محاسبه اتلاف اکسرژی در صنایع فرایندی با استفاده از نمودار امگا-آنتالپی

نسیم طاهونی^{۱*}، فرید آل عزیز^۲، محمدمهدی قاسمی علی آبادی^۳، روح انگیز شیوایی گاریز^۴

۱- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۴- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

پیام نگار: ntahuni@ut.ac.ir

چکیده

با محاسبه مقدار اتلاف اکسرژی در تجهیزات یک واحد فرایندی می‌توان میزان بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی را کمی کرد و در راستای اصلاح و بهینه‌سازی صنایع فرایندی گام‌هایی متقن برداشت. در این تحقیق از نمودارهای مرکب امگا به‌عنوان جدیدترین ابزار گرافیکی برای محاسبه اتلاف اکسرژی در شبکه‌های مبدل حرارتی استفاده شده است؛ این نمودار برخلاف نمودارهای رایج دیگر خطی است و محاسبه اتلاف اکسرژی به وسیله آن با کمک سطوح مستطیلی شکل، بسیار ساده است. برای محاسبه اتلاف اکسرژی سایر تجهیزات فرایندی نیز از نمودار امگا-آنتالپی استفاده شده است. ابتدا نحوه رسم این نمودارها توضیح داده شده، سپس در محاسبه اتلاف اکسرژی دو نمونه مطالعاتی استفاده شده‌اند. در مطالعه اول هر یک از تجهیزات فرایند پریکو به محوریت مبدل حرارتی چندجریانه بررسی شدند. نتایج نشان داد که در کل فرایند ۲۷/۶۶ مگاوات اکسرژی تلف می‌شود. در مطالعه دوم، شبکه مبدل حرارتی نیروگاه شازند بررسی و اتلاف اکسرژی آن ۸/۱۴ مگاوات حساب شد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۵

شماره صفحات: ۴۷ تا ۶۱

کلیدواژه‌ها: اتلاف کسرژی،

تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی،

منحنی‌های مرکب امگا، نمودار

امگا-آنتالپی، فرایند پریکو،

نیروگاه حرارتی شازند

۱. مقدمه

روش‌های گرافیکی متعددی برای محاسبه اتلاف اکسرژی بوده است؛ از جمله این ابزارهای گرافیکی می‌توان به نمودارهای منحنی‌های مرکب اکسرژی^۲، منحنی مرکب کل اکسرژی^۳، منحنی امگا-آنتالپی، منحنی‌های مرکب امگا^۴ و منحنی مرکب کل امگا^۵، اشاره کرد. مهم‌ترین برتری نمودار امگا-آنتالپی، توانایی نمایش

تحلیل اکسرژی ابزاری کارآمد برای اصلاح و بهینه‌سازی فرایندها است و محاسبه اتلاف اکسرژی تجهیزات فرایندی این ایده را به طراح می‌دهد که برای افزایش بازده ترمودینامیکی کدام یک از واحدهای فرایندی اقدام کند. تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی^۱، مولد

2. Exergy Composite Curves
3. Exergy Grand Composite Curve
4. Omega Composite Curves (OCC)
5. Omega Grand Composite Curve (OGCC)

* تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی
1. Combined Pinch and Exergy Analysis

بهبود بخشیدند. آن‌ها با تعریف یک مدل ریاضی، دو نوع پیکربندی متداول برای چرخه‌ی رانکین آلی را بررسی و مقادیر مؤلفه‌های عملیاتی و تعداد سطوح فشار را بهینه کردند [۶]. آرئولامیدلین^۸ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ از منحنی‌های مرکب اکسرژی برای بازطراحی و عیب‌یابی در نیروگاه‌های حرارتی بخاری تولید برق کمک گرفتند. آن‌ها با تعیین میزان اتلاف اکسرژی قابل اجتناب و غیر قابل اجتناب، ظرفیت بهبود را تخمین زدند؛ همچنین نشان دادند که یکپارچه‌سازی حرارتی صحیح و اصلاح مبدل‌هایی که از مرز پینچ حرارت عبور می‌دهند بازده را افزایش خواهد داد [۷]. انجوکو^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۹ نتایج تحلیل منفرد اکسرژی و پینچ و تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی را در یک شبکه مبدل حرارتی بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از داده‌های نیروگاه حرارتی گازی تولید برق اگبین^{۱۰} واقع در نیجریه استفاده کردند و نشان دادند که تحلیل ترکیبی، میزان اتلافات اکسرژی را با دقت بیشتری نشان می‌دهد [۸]. مهدی‌زاده‌فرد و همکاران در سال ۲۰۱۸ با کمک منحنی‌های مرکب اکسرژی، تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی و مقایسه هزینه انرژی مصرفی و سرمایه‌گذاری، شبکه مبدل حرارتی پالایشگاه گاز طبیعی (واقع در پارس جنوبی) را بهینه کردند؛ آن‌ها با تقسیم کل پالایشگاه به پنج ناحیه روشی مدون برای افزایش بازده انرژی و اکسرژی به کمک کاهش اتلافات اکسرژی قابل اجتناب ارائه دادند [۹].

همچنین نمودارهایی که بر پایه امگا (سطح انرژی^{۱۱}) ترسیم می‌شوند در تحقیقات متعددی به کار رفته‌اند؛ در سال ۱۹۹۷ فنگ و زو^{۱۲} برای نخستین بار نمودار امگا-آنتالپی را ارائه کردند؛ آن‌ها توانستند با استفاده از این نمودار و جداسازی دو اتلاف اکسرژی قابل اجتناب و اجتناب‌ناپذیر، یک چرخه ترکیبی تولید برق (متشکل از توربین گازی و توربین بخار) را اصلاح کنند [۱۰]. کیم^{۱۳} و همکارانش در سال ۲۰۰۲ عملکرد چرخه‌های سرماساز یک و سه مرحله‌ای را با سیال سرماساز آمونیاک بررسی کردند. نمودار امگا-آنتالپی نشان داد که چرخه سرماساز سه مرحله‌ای اتلاف اکسرژی کمتری دارد و کار محوری کمتری مصرف می‌کند [۱۱].

هم‌زمان اتلاف اکسرژی ناشی از تغییرات فشار، دما و درصد ترکیب است؛ در حالی که عملکرد سایر نمودارها محدود به فرایندهای فشار ثابت و محاسبه اتلاف اکسرژی حرارتی است. به‌طور کلی در این روش‌های گرافیکی، سطح محصور بین دو منحنی منبع و چاله، میزان اتلاف اکسرژی را تعیین می‌کند [۱]. در ادامه به ذکر تعدادی از مهم‌ترین تحقیقاتی که در آن‌ها از ابزارهای تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی بهره گرفته شده است، می‌پردازیم.

در سال ۲۰۱۲ بندیک^۱ و همکارانش با استفاده از منحنی‌های مرکب اکسرژی و منحنی مرکب کل اکسرژی، روشی را برای شناسایی فرصت استفاده از حرارت‌های اتلافی قابل استفاده در صنایع فرایندی ارائه دادند. بدین ترتیب می‌توان با تبدیل این حرارت‌ها به شکل‌های مفید انرژی، مانند برق یا تولید حرارت محلی، مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داد [۲]. قربانی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ با بهره‌گیری از منحنی مرکب کل اکسرژی، به بهبود عملکرد سامانه سرماساز یک کارخانه صنعتی گاز مایع^۲ پرداختند. تحلیل آن‌ها نشان داد که تبخیرکننده و خنک‌کننده هوایی بیشترین میزان اتلاف اکسرژی را دارند. سپس با تلفیق روش مفهومی ترکیبی پینچ و اکسرژی با روش ریاضی، بازده کل اکسرژی چرخه را بهبود دادند و کار کمپرسور را کم کردند. این نتیجه با کاهش اختلاف دما بین جریان‌های فرایند و جریان سیال سرماساز و نیز استفاده از یک سیال سرماساز جایگزین به دست آمد [۳]. هکل^۳ و هاروی^۴ در سال ۲۰۱۳ با مطالعه یک مجتمع فرایندی^۵ زیر دمای محیط و رسم منحنی مرکب کل اکسرژی برای تمامی فرایندهای آن، روشی برای هدف‌گذاری میزان کاهش کار کمپرسور و صرفه‌جویی در سرویس‌های جانبی ارائه دادند [۴]. مافی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۳ با تلفیق منحنی‌های مرکب اکسرژی و روش بهینه‌سازی ریاضی، روشی مدون برای طراحی یک چرخه سرماساز چندجزئی ارائه دادند. آن‌ها این روش را در یک واحد اولفین به کار بردند و مؤلفه‌های عملیاتی، درصد ترکیب اجزاء سیال سرماساز و پیکربندی چرخه را بهینه کردند [۵]. در سال ۲۰۱۴، استیپوویچ^۶ و همکاران با استفاده از منحنی‌های مرکب اکسرژی، چرخه رانکین آلی^۷ را

8. Arriola-Medellin
9. Njoku
10. Egbin
11. Energy Level
12. Feng and Zhu
13. Kim

1. Bendig
2. NGL
3. Hackl
4. Harvey
5. Total Site
6. Stijepovic
7. Organic Rankine Cycle

مبدل حرارتی در یک نیروگاه حرارتی حساب شده است. بدین منظور از منحنی‌های مرکب امگا در محاسبات اتلاف در مبدل چندجریانه پریکو و شبکه مبدل حرارتی نیروگاه استفاده شده است. این منحنی‌ها جدیدترین ابزار گرافیکی برای محاسبه اتلاف اکسرژی هستند که در مقاله حاضر کاربردشان بررسی شده است. برای سایر تجهیزات اعم از کمپرسور، خنک‌کننده، شیرفشارشکن و غیره از منحنی امگا-آنتالپی استفاده شده است.

۲. اصول نظری

در این مطالعه از نمودار امگا-آنتالپی برای محاسبه اتلاف اکسرژی استفاده می‌شود؛ امگا کمیتی بدون بعد است که مطابق با رابطه (۱) به شکل کلی از تقسیم تغییرات اکسرژی بر تغییرات آنتالپی حاصل می‌شود و در شرایط مختلف می‌تواند به روابط ساده‌تری تبدیل شود. رابطه (۲) تغییرات اکسرژی را در دو بخش دمایی و فشاری نشان می‌دهد. مطابق با این رابطه در جریانی با افت فشار ناچیز (مانند جریان عبوری از یک مبدل)، امگا برابر با ضریب کارنوی متوسط خواهد بود که از متوسط لگاریتمی دمایی ابتدایی و انتهایی جریان حساب می‌شود (رابطه (۳)). اگر فشار و دما در یک جریان ثابت باشند، رابطه (۳) به ضریب کارنوی ساده طبق رابطه (۴) تبدیل می‌شود.

$$\Omega = \frac{\text{Exergy}}{\text{Enthalpy}} = \frac{\Delta H - T_0 \Delta S}{\Delta H} \quad (1)$$

$$\Delta Ex = \Delta H \left(1 - \frac{T_0}{T_{LM T_1, T_2}} \right) + nRT_0 \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

$$\Omega = \eta_{c,ave} = 1 - \frac{T_0}{T_{LM T_1, T_2}} \quad (3)$$

$$\Omega = \eta = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (4)$$

شکل (۱) نمودار امگا-آنتالپی را برای برخی از تجهیزات نمونه فرایندی نشان می‌دهد. برای رسم، نمودار امگا برای منبع و چاله اکسرژی رسم می‌شود. سطح محصور بین این نمودار میزان اتلاف اکسرژی است. در یک مبدل حرارتی که بالای دمایی محیط

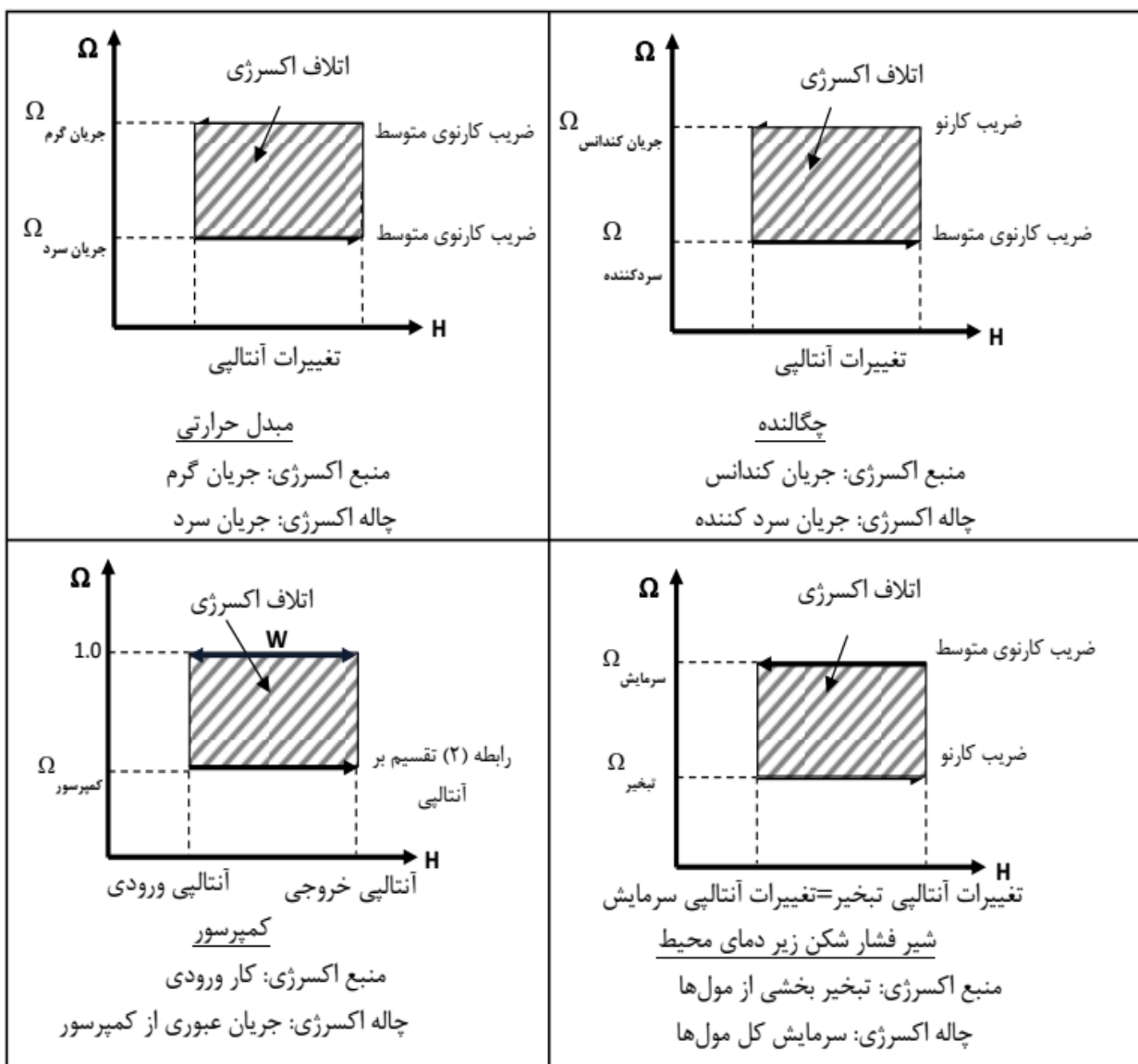
در سال ۲۰۰۶ آنانتارامن^۱ و همکارانش، روش فنگ و زو (۱۹۹۷) را توسعه دادند و نمودار جدیدی را به نام «منحنی‌های مرکب سطح انرژی» معرفی کردند. با کمک این ابزار گرافیکی فرصت‌های یکپارچه‌سازی انرژی^۲ ناشی از تغییرات فشار، حرارت و درصد ترکیب در تجهیزات یک فرایند مشخص می‌شود. واحد تولید متانول به‌عنوان فرایندی به شدت انرژی‌بر، به‌عنوان نمونه مورد مطالعه و کاهش مصرف انرژی در آن گزارش شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۳ مارمولئوکوریا و گاندیرسین^۳ ابزار گرافیکی جدیدی را با استفاده از یک مؤلفه مبتنی بر اکسرژی تحت عنوان دمای اکسژتیک^۴ ابداع کردند. با رسم منحنی دمای اکسژتیک بر حسب مقدار اکسرژی دمایی، مقادیر حداقل اکسرژی مورد نیاز، حداقل مقدار اکسرژی خروجی و میزان اتلاف اکسرژی در یک شبکه مبدل حرارتی معین می‌شود. این منحنی مشابه منحنی‌های مرکب در مطالعات پینچ است و در همان مراحل اولیه طراحی مقادیر اکسرژی را هدف‌گذاری می‌کند. در این تحقیق فرایند معکوس برایتون^۵ برای مایع‌سازی گاز طبیعی به‌عنوان مورد مطالعاتی بررسی شده است. مشکل اصلی این روش سختی رسم و محاسبات نمودار مربوطه است [۱۳]. لی^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ روش آنانتارامن (۲۰۰۶) را ارتقا دادند و از آن برای یکپارچه‌سازی حرارتی در واحد کک‌سازی تأخیری^۷ واقع در یک پالایشگاه چینی بهره گرفتند. تحلیل نمودار پیشرفته جدید موجب شناسایی ظرفیت‌های قابل ارتقا در فرایند شد [۱۴].

پنجه‌شاهی و طاهونی در سال ۲۰۱۹، منحنی‌های مرکب امگا و منحنی مرکب کل امگا را برای محاسبه اتلاف اکسرژی در شبکه‌های مبدل حرارتی ابداع کردند. این منحنی‌ها خطی است و محاسبه اتلاف اکسرژی با آن‌ها بسیار ساده انجام می‌شود و بر خلاف روش مارمولئوکوریا و گاندیرسین (۲۰۱۳)، رسم آن‌ها نیز بسیار ساده است [۱]. شیوایی و همکاران در سال ۲۰۲۰ این منحنی را با یک روش ریاضی تلفیق کردند و برای بهینه‌سازی واحدهای مختلف فرایندی به کار بردند [۱۵]. در تحقیق حاضر دو مطالعه انجام شده است: در مطالعه نخست، اتلاف اکسرژی برای تمامی تجهیزات یک فرایند نمونه پریکو و در مطالعه دوم اتلاف اکسرژی برای شبکه

1. Anantharaman
2. Energy Level Composite Curves
3. Energy Integration
4. Marmolejo-Correa and Gundersen
5. Exergetic Temperature
6. Reverse Brayton Process
7. Yang
8. Delayed Coking Unit

متوسط) حساب می‌شود. از نو با استفاده از معادله (۱) مقدار امگا برای منبع و چاله به دست می‌آید و منحنی مانند شکل (۱) رسم می‌شود. در یک کمپرسور منبع اکسرژی کار محوری ورودی است که عیناً مساوی با اکسرژی است و چاله اکسرژی، تغییرات اکسرژی جریان ورودی و خروجی از کمپرسور است که از رابطه (۲) قابل محاسبه است. در یک شیر فشارشکن همراه با تغییر فاز در زیر دمای محیط، منبع و چاله اکسرژی به ترتیب تبخیر بخشی از مول‌های ورودی به شیر در دما و فشار ثابت (رابطه (۴)) و کاهش دمای کل مول‌ها در فشار ثابت (رابطه (۳)) است.

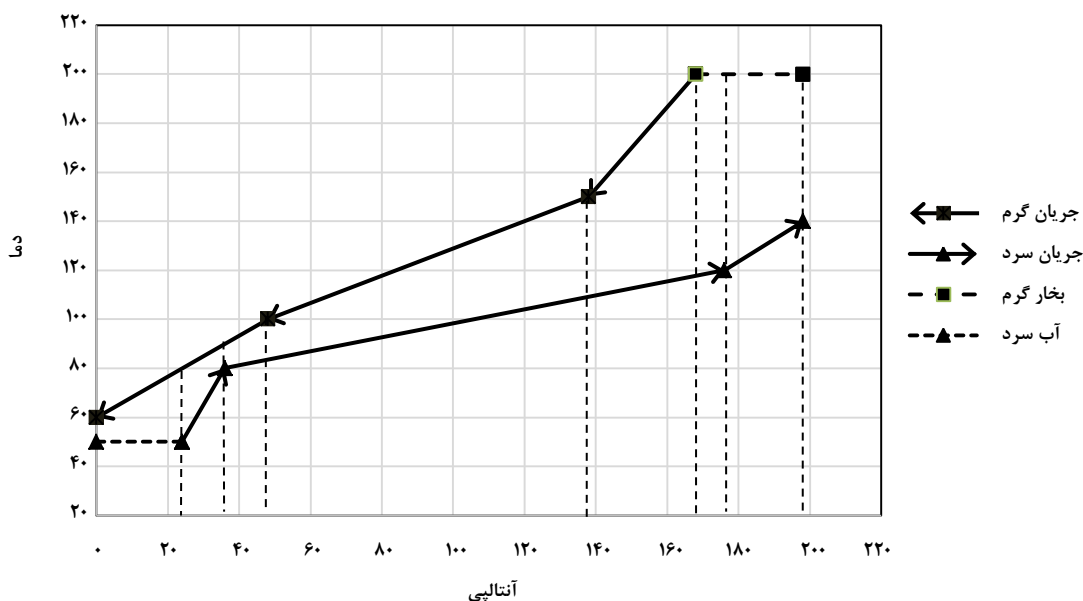
کار می‌کند، منبع و چاله اکسرژی به ترتیب تغییرات اکسرژی در جریان گرم و سرد است. در این حالت منبع و چاله انرژی و اکسرژی یکسان هستند؛ از آنجایی که تغییرات فشار در مبدل ناچیز است، تغییرات اکسرژی هر کدام از این دو جریان با کمک بخش اول رابطه (۲) به دست می‌آید. مقدار امگا برای منبع و چاله با استفاده از معادله (۱) به دست می‌آید و نمودار امگا-آنتالپی مانند شکل (۱) برای مبدل رسم می‌شود. در یک چگالنده، منبع و چاله اکسرژی به ترتیب تغییرات اکسرژی جریان گرم (همراه با تغییر فاز) و جریان سرد است که از روابط (۴) (ضریب کارنو) و (۳) (ضریب کارنوی



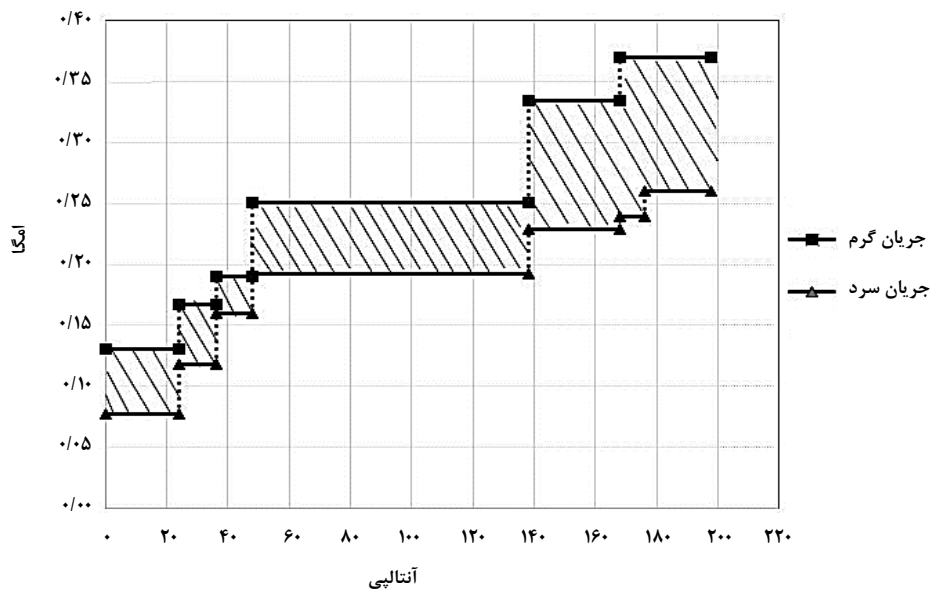
شکل ۱. منحنی امگا-آنتالپی برای مبدل حرارتی، چگالنده، شیر فشارشکن و کمپرسور.

۳. بررسی فرایند پریکو (تولید گاز طبیعی مایع شده)^۱
 در این مطالعه اتلاف اکسرژی یک فرایند پریکو بررسی خواهد شد. هسته اصلی فرایند پریکو و به طور کلی فرایندهای سردسازی، مبدل حرارتی چندجریانه است. در این مبدل، حرارت به وسیله جریان کم فشار مبرد (جریان خروجی از شیر فشارشکن) دریافت می شود تا برودت لازم برای میعان گاز طبیعی و مبرد پرفشار تأمین شود؛ به این معنی که چگالنده و تبخیرکننده چرخه سرماساز با یکدیگر ادغام شده اند. مبرد طی عبور از دو کمپرسور به حداکثر دما و فشار می رسد. در این فرایند یک سیال سرماساز آمیخته^۲ استفاده شده و برای خنک سازی آن از خنک کن هوایی استفاده شده است [۱۸]. در شکل (۴) طرحی از فرایند نشان داده شده و همچنین در جدول های (۱) و (۲) اطلاعات فرایندی آن بیان شده است. در این طراحی کمینه اختلاف دما^۳ در مبدل حرارتی 3°C است. همچنین سیال سرماساز 4 kgmole/s و شامل متان، اتان، پروپان، نورمال بوتان و نیتروژن با درصدهای مولی ۴۲، ۳۱، ۸، ۱ و ۱۸ است. دمای هوای ورودی به خنک کن های هوایی 25°C است.

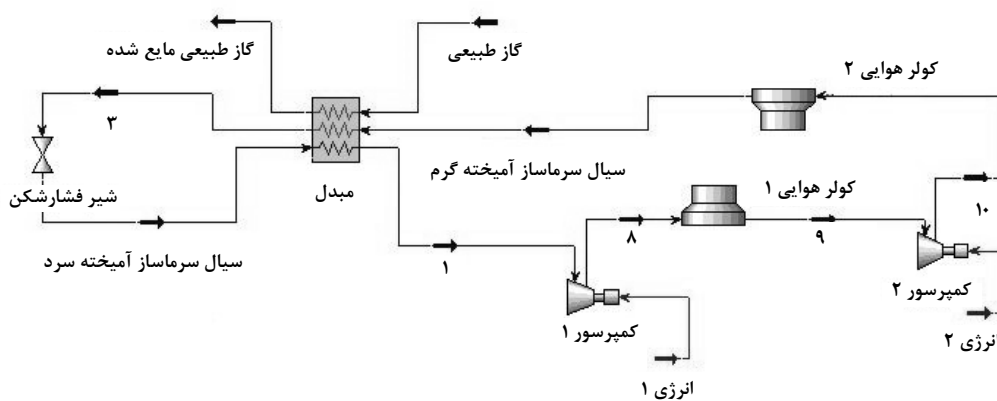
برای یک شبکه مبدل حرارتی برآیند تمامی جریان های گرم و برآیند تمامی جریان های سرد موجود، منحنی های مرکب را مانند شکل (۲) تشکیل می دهد [۱۶]. در این حالت منحنی مرکب گرم و سرد به ترتیب منبع و چاله اکسرژی هستند که تغییرات اکسرژی هر کدام از رابطه (۳) به دست می آید. بدین ترتیب منحنی امگا - آنتالپی برای یک شبکه مبدل حرارتی به صورت منحنی کارنو- آنتالپی (منحنی های مرکب اکسرژی) در می آید. سطح محصور در این نمودار اتلاف اکسرژی را نشان می دهد [۱۷]. پنجه شاهی و طاهونی (۲۰۱۹) نشان دادند که سطح محصور بین منحنی های مرکب اکسرژی که غیرخطی هستند با سطح محصور در منحنی های مرکب امگا دقیقاً برابر است [۱]. برای دستیابی به نمودار منحنی های مرکب امگا باید مطابق شکل (۲) منحنی های مرکب را به ازای هر شکستگی به یک بازه مجزا تقسیم بندی کرد و در هر بازه با استفاده از رابطه (۳) مقدار امگا را تعیین کرد. سپس امگای هر بازه با تغییرات آنتالپی نظیر آن ترسیم شود تا نمودار منحنی های مرکب امگا مطابق شکل (۳) به دست آید. همان طور که پیداست، سطح زیر نمودار امگا- آنتالپی شامل تعدادی مستطیل است و به سادگی قابل محاسبه است.



شکل ۲. نمودار منحنی های مرکب به همراه خطوط سرویس های جانبی^۴.



شکل ۳. منحنی‌های مرکب امگا.



شکل ۴. طرحواره کلی فرایند پریکو.

جدول ۱. اطلاعات فرایندی جریان گاز طبیعی.

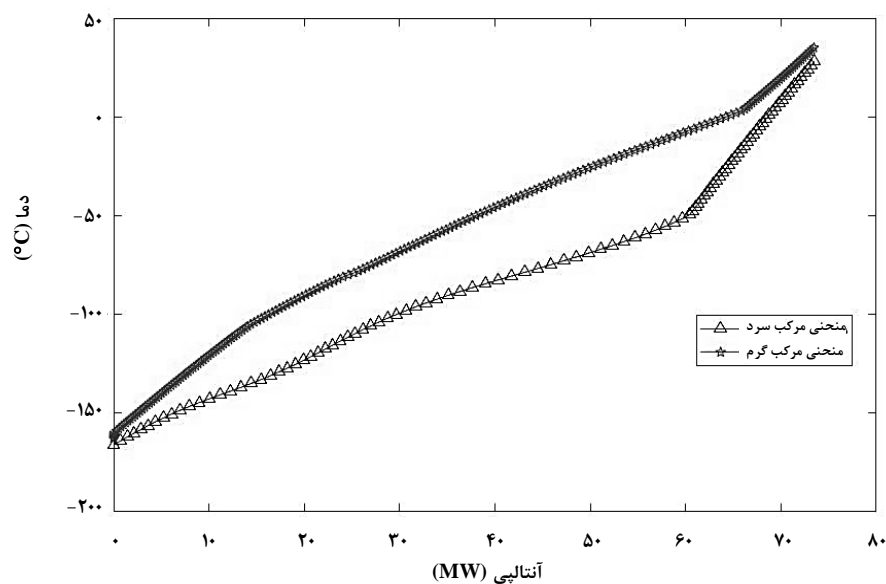
ترکیب	دبی مولی (kgmole/s)	فشار (bar)	دما (°C)	جریان
متان	۰/۳	۵۵	۲۵	گاز طبیعی
متان	۰/۳	۵۵	-۱۶۳	گاز طبیعی مایع شده

جدول ۲. اطلاعات فرایندی تجهیزات موجود در فرایند پریکو.

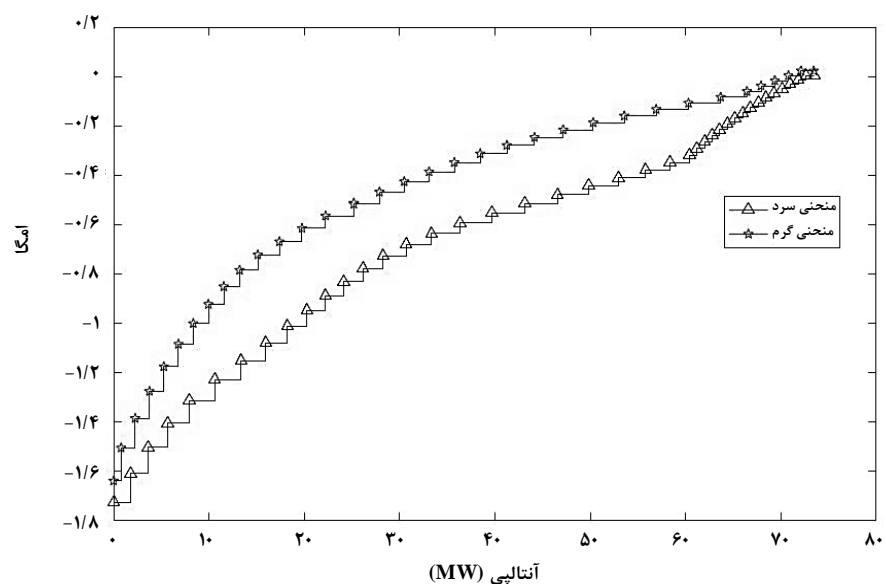
بازده	فشار خروجی (bar)	فشار ورودی (bar)	دمای خروجی (°C)	دمای ورودی (°C)	تجهیزات
---	۴	۴۶	-۱۶۶	-۱۶۰	شیر فشار شکن
%۷۵	۱۳/۵۶	۴	---	۲۷/۵	کمپرسور ۱
%۷۵	۴۶	۱۳/۵۶	---	۳۵	کمپرسور ۲

بازه بندی دما برای دستیابی به این دو شکل به گونه ای انجام شده است که در آن محدوده ظرفیت گرمایی تقریباً ثابت مانده باشد. بدین ترتیب منحنی های مرکب در بازه های دمایی کوچک خطی هستند. حال می توان با محاسبه متوسط لگاریتمی دمای دو سر هر خط در هر بازه دمایی، منحنی شکل (۶) را رسم کرد. بدین ترتیب در شکل (۶) شاهد پله های کوچکی خواهیم بود.

با بررسی جریان های مبدل حرارتی مشخص است که مبدل دارای دو جریان گرم (گاز طبیعی و مبرد پرفشار) و یک جریان سرد (مبرد کم فشار) است که به علت کارکردن زیر دمای محیط، جریان گرم چاله و جریان سرد منبع اکسرژی محسوب می شود. شکل های (۵) و (۶) به ترتیب نشان دهنده نمودار منحنی های مرکب و منحنی های مرکب امگا هستند. نحوه رسم منحنی های مرکب امگا در بخش اصول نظری توضیح داده شده است.



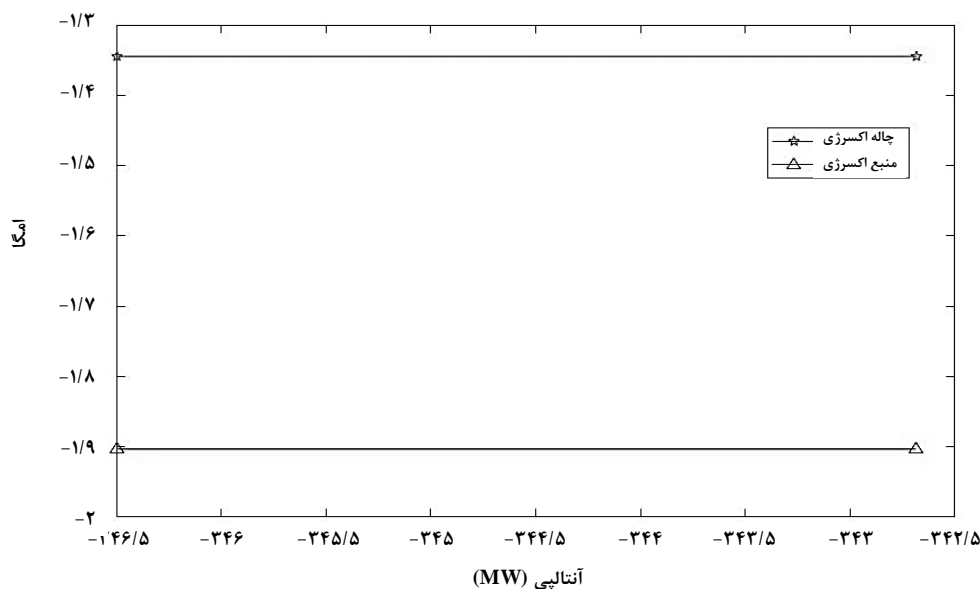
شکل ۵. نمودار منحنی های مرکب در مبدل چندجریانه.



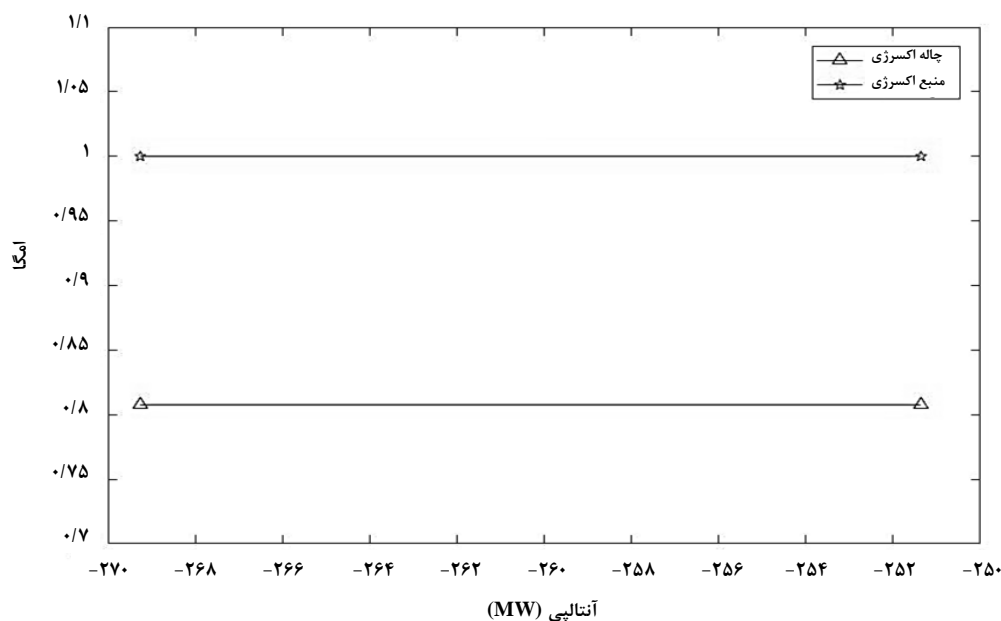
شکل ۶. نمودار منحنی های مرکب امگا برای مبدل چندجریانه.

در قسمت بعدی مطالعه، با استخراج چاله و منبع اکسرژی سایر تجهیزات نمودار امگا- آنتالپی آن‌ها را رسم می‌کنیم و به بررسی اتلاف اکسرژی با روش گرافیکی می‌پردازیم (شکل‌های (۷) تا (۱۱)).

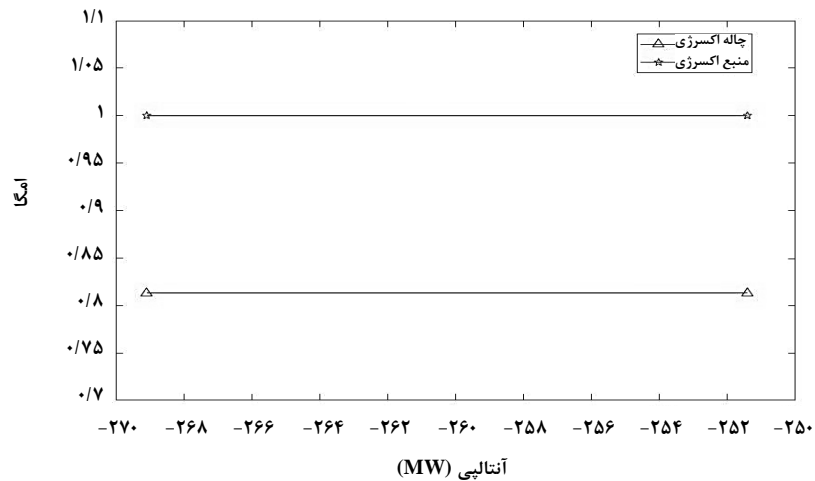
در جدول (۳) اتلاف اکسرژی هر یک از تجهیزات، به وسیله محاسبه سطح محصور بین دو منحنی در نمودار امگا- آنتالپی گزارش شده است. بیشترین میزان اتلاف مربوط به مبدل چندجریانه است.



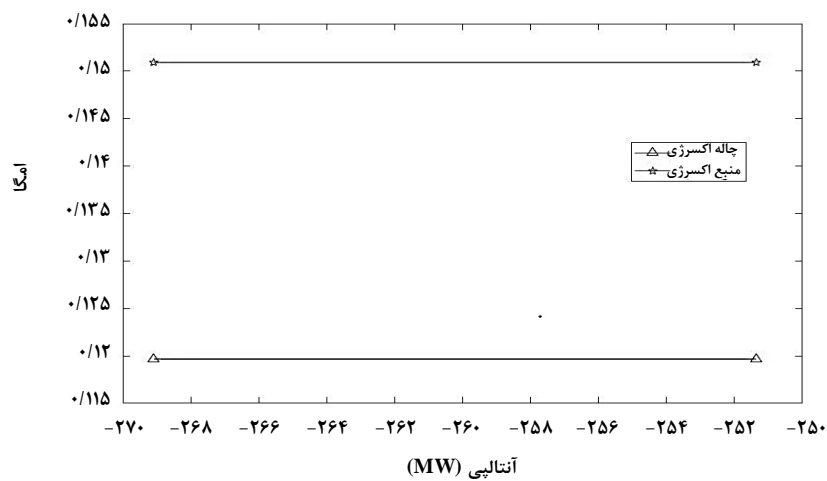
شکل ۷. نمودار امگا- آنتالپی شیر فشارشکن.



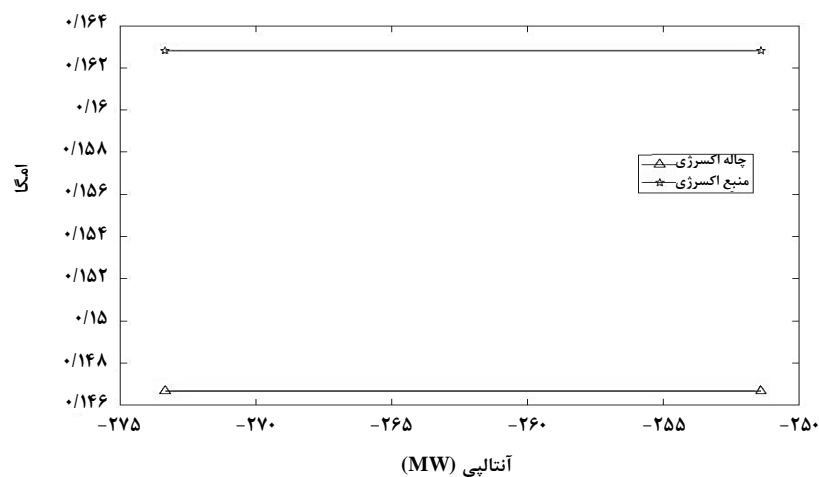
شکل ۸. نمودار امگا- آنتالپی کمپرسور ۱.



شکل ۹. نمودار امگا-آنتالپی کمپرسور ۲.



شکل ۱۰. نمودار امگا-آنتالپی خنککن هوایی ۱.



شکل ۱۱. نمودار امگا-آنتالپی خنککن هوایی ۲.

جدول ۳. اتلاف اکسرژی تجهیزات فرایند پریکو.

درصد	اتلاف اکسرژی (MW)	نام تجهیز
۶۴/۷۱	۱۷/۹۰	مبدل حرارتی
۷/۶۶	۲/۱۲	شیر فشارشکن
۱۲/۴۴	۳/۴۴	کمپرسور ۱
۱۱/۹۳	۳/۳۰	کمپرسور ۲
۱/۹۹	۰/۵۵	خنک کن هوایی ۱
۱/۲۷	۰/۳۵	خنک کن هوایی ۲
۱۰۰/۰۰	۲۷/۶۶	مجموع

در دیگ بخار این نیروگاه حرارتی، $278/6 \text{ kg/s}$ بخار فوق گرم تولید می شود که دارای فشار $168/7 \text{ bar}$ و دمای 536°C است. بازگرم کن دمای بخار را که در اثر عبور از توربین کاهش پیدا کرده است، تا $533/4^\circ \text{C}$ بالا می برد. در پمپ های ۱ و ۲ فشار آب تا حدود $8/3 \text{ bar}$ و در پمپ ۳ این مقدار تا $186/7 \text{ bar}$ افزایش می یابد. در مجموع سیال با عبور از دیگ بخار و بازگرم کن، $732/4 \text{ MW}$ انرژی دریافت می کند و به طور خالص با کم کردن توان پمپ ها، $315/5 \text{ MW}$ انرژی تولید می کند؛ در نتیجه بازده حرارتی نیروگاه شانزد $42/1$ درصد است. بار حرارتی تجهیزات انتقال حرارت این نیروگاه در جدول (۴) نمایش داده شده است.

به لحاظ انتقال حرارت، این نیروگاه دارای ۱۵ جریان فرایندی است که در جدول (۵) نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود از این ۱۵ جریان فرایندی، ۱۱ جریان گرم و باقی آن ها سرد هستند. زیرکش های توربین ها و جریان های عبوری از چگالنده ها، جریان های گرم را تشکیل می دهند و جریان های سرد، شامل جریان های عبوری از گرم کن ها، بازگرم کن و دیگ بخار هستند. نقاط ابتدایی و انتهایی جریان ها مطابق با شکل (۱۲) در ستون اول جدول (۵) مشخص شده است.

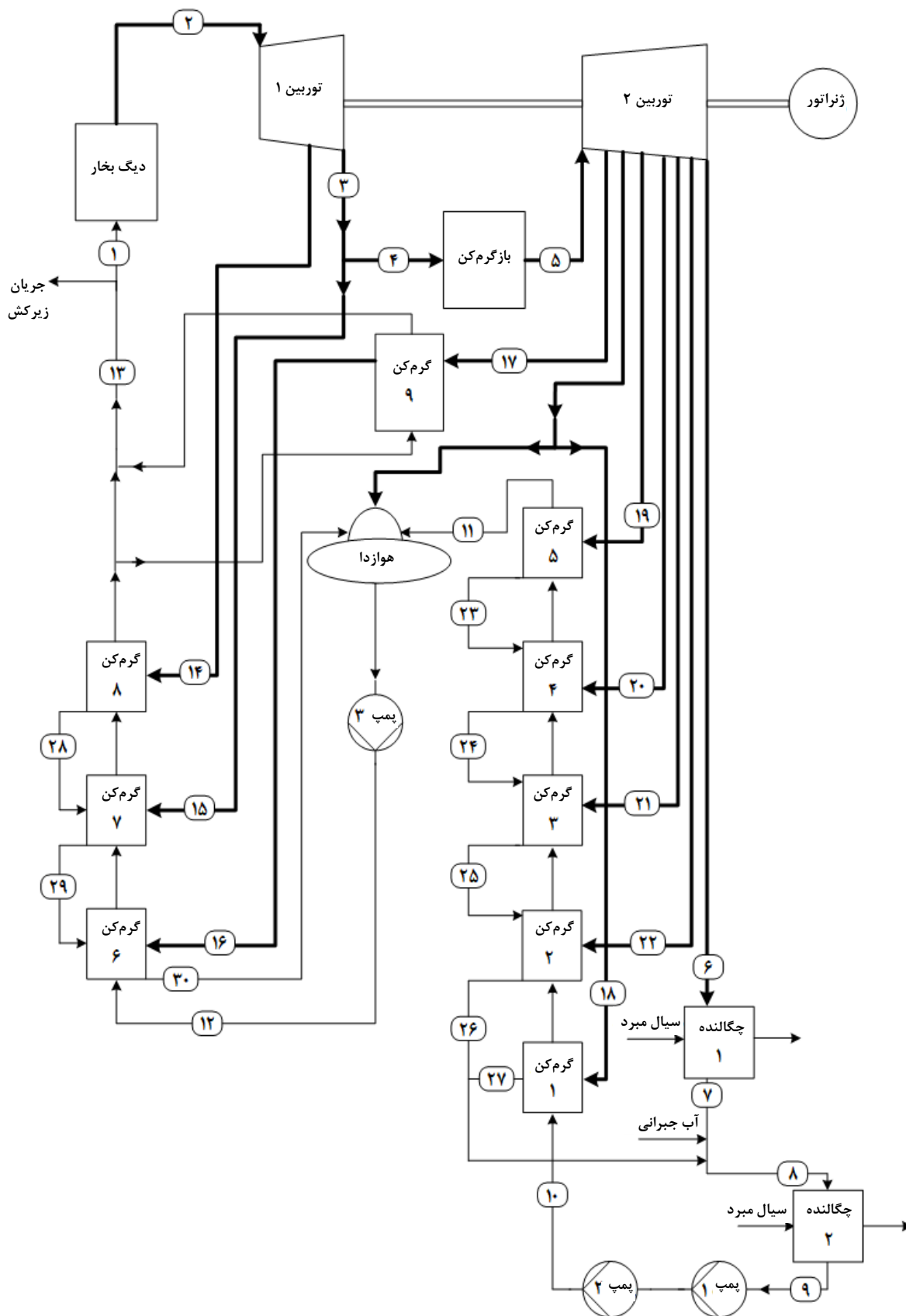
سرویس های جانبی گرم و سرد این واحد، به ترتیب برابر $732/4$ و $420/9$ مگاوات هستند. با توجه به این مقادیر و همچنین داده های جدول (۴)، کمینه اختلاف دما برابر $6/4^\circ \text{C}$ حساب شده است. در نتیجه منحنی های مرکب برای شبکه مبدل حرارتی این نیروگاه حرارتی، مطابق شکل (۱۳) ترسیم می شود. با استفاده از شکل (۱۳) نمودار منحنی های مرکب امگا برای شبکه مبدل های حرارتی نیروگاه، مطابق شکل (۱۴) رسم می شود.

با توجه به این که تمام جریان های فرایندی بالای دمای محیط هستند، جریان های گرم منبع و جریان های سرد چاله اکسرژی خواهند بود. مجموع تغییرات اکسرژی جریان های گرم برابر $72/42$ مگاوات و مجموع تغییرات اکسرژی جریان های سرد برابر $64/28$ مگاوات حساب شده است. همان طور که پیش تر گفته شد، سطح محصور بین منبع و چاله اکسرژی در نمودار امگا- آنتالپی، همان اتلاف اکسرژی است. بنابراین در شبکه مبدل های حرارتی این نیروگاه، $8/14$ مگاوات اکسرژی تلف می شود.

۴. بررسی نیروگاه حرارتی شانزد اراک

نیروگاه حرارتی شانزد شامل ۴ واحد بخار است که هر یک دارای ظرفیت اسمی 325 مگاوات هستند. واحدهای بخار زیر ظرفیت کار می کنند و توان واقعی هر کدام از آن ها $323/2$ مگاوات است. طرحواره نیروگاه شانزد در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بخار فوق گرم^۱ تولید شده در دیگ بخار، به پشت سر توربین بخار زیرکش دار^۲ شماره ۱ ارسال می شود. در ادامه بخشی از زیرکش دوم این توربین در بازگرم کن انرژی دریافت کرده، وارد توربین ۲ می شود. توربین ۱ و ۲ به ترتیب دارای دو و شش زیرکش برای پیش گرم سازی آب و بازیافت انرژی هستند. جریان خروجی از توربین ۲ پس از عبور از چگالنده ها به وسیله پمپ ۱ و ۲ به سمت گرم کن ها ارسال می شود. پنج گرم کن اول در فشار پایین کار می کنند و از زیرکش های توربین ۲، برای گرمایش آب استفاده می کنند. چهار گرم کن بعدی دارای فشار بالایی هستند که به وسیله پمپ ۳ ایجاد شده است و زیرکش های هر دو توربین، منبع انرژی این گرم کن ها هستند.

1. Superheated Steam
2. Steam Extraction Turbine



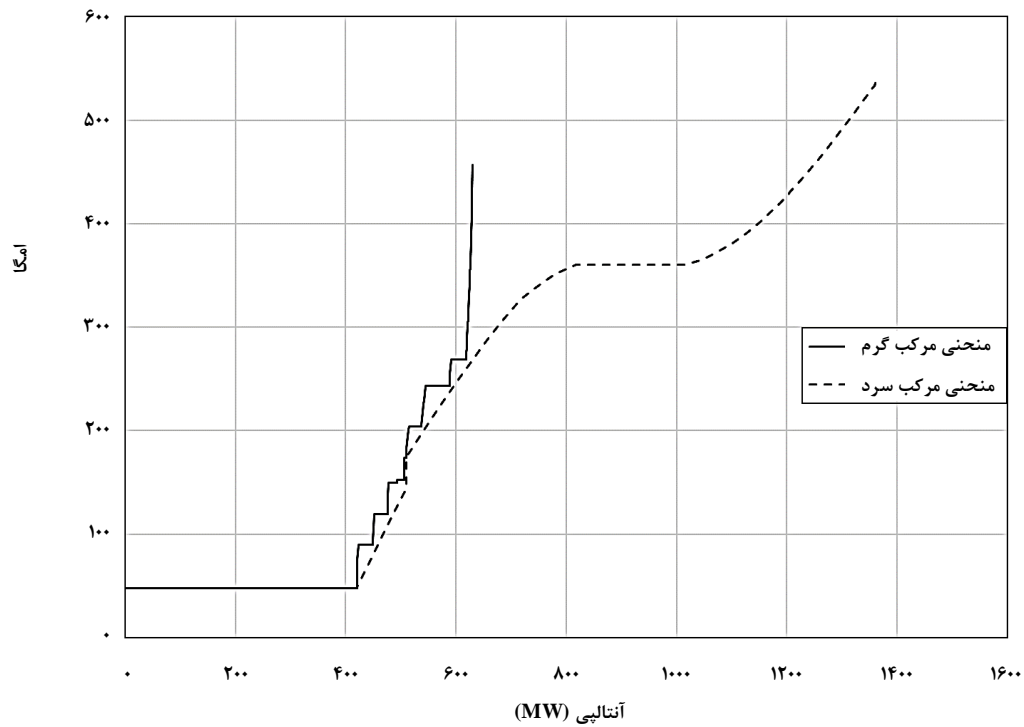
شکل ۱۲. طرح کلی نیروگاه حرارتی شازند اراک [۱۹].

جدول ۴. بار حرارتی تجهیزات انتقال حرارت نیروگاه شازند اراک.

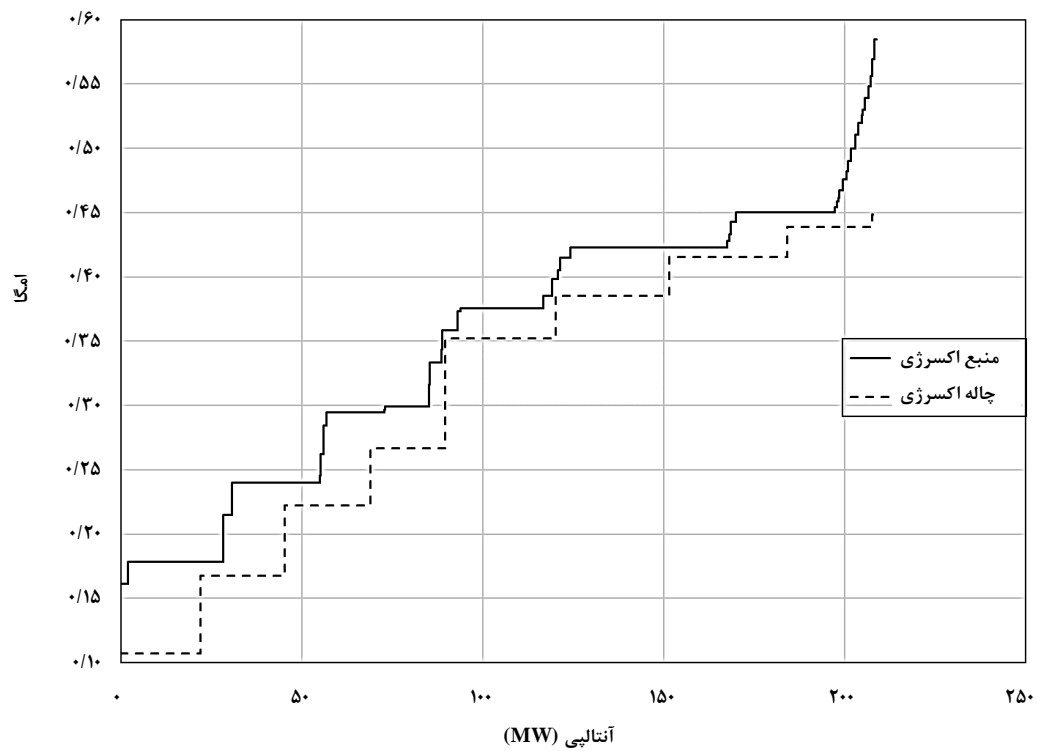
نام تجهیز	بار حرارتی (MW)	نام تجهیز	بار حرارتی (MW)
گرم کن ۱	۳/۷۶	گرم کن ۸	۳۵/۶۱
گرم کن ۲	۲۸/۲۵	گرم کن ۹	۴/۴۶
گرم کن ۳	۲۶/۷۹	بازگرم کن	۱۱۳/۴۹
گرم کن ۴	۱۷/۵۹	دیگ بخار	۶۱۸/۸۸
گرم کن ۵	۱۴/۴۵	چگالنده ۱	۴۰۹/۴۱
گرم کن ۶	۲۷/۶۳	چگالنده ۲	۱۱/۴۷
گرم کن ۷	۵۰/۲۵	-	-

جدول ۵. جریان‌های فرایندی نیروگاه حرارتی شازند اراک.

شماره جریان‌ها	نوع جریان	دبی جرمی (kg/s)	دمای اولیه (°C)	دمای نهایی (°C)	دمای اشباع (°C)	فشار ورودی (bar)	گرمای نهان (MW)	تغییر آنتالپی کل (MW)
۱۴ تا ۲۸	گرم	۱۶/۹۲	۳۹۱	۲۴۵/۶	۲۶۹/۰۷	۵۴/۲۶	-۲۷/۲۵	-۳۵/۶۱
۱۵ تا ۲۹	گرم	۳۸/۵۶	۲۴۳/۴۷	۲۰۵/۶	۲۴۳/۴۷	۳۵/۵۷	-۴۳/۴۶	-۵۰/۲۵
۱۶ تا ۳۰	گرم	۴۹/۳۵	۲۰۴/۳۷	۱۸۲/۵۵	۲۰۴/۳۷	۱۷/۰۲	-۲۲/۸۱	-۲۷/۶۳
۱۷ تا ۱۶	گرم	۱۰/۷۹	۴۵۷	۲۷۰	۲۰۴/۳۷	۱۷/۰۲	۰	-۴/۴۶
۱۹ تا ۲۳	گرم	۵/۸۱	۳۰۱	۱۳۷/۷۸	۱۵۲/۳۴	۵/۰۷	-۱۲/۲۳	-۱۴/۴۵
۲۰ تا ۲۴	گرم	۱۲/۵۴	۱۴۹/۵۳	۱۱۹/۷۱	۱۴۹/۵۳	۴/۷	-۱۵/۹۹	-۱۷/۵۹
۲۱ تا ۲۵	گرم	۲۲/۸۵	۱۱۹/۲۸	۹۲/۵۹	۱۱۹/۲۸	۱/۹۴	-۲۴/۲۱	-۲۶/۷۹
۲۲ تا ۲۶	گرم	۳۴/۱۲	۸۹/۶۴	۷۵/۳۷	۸۹/۶۴	۰/۶۹	-۲۶/۲۰	-۲۸/۲۵
۱۸ تا ۲۷	گرم	۱/۵۴	۳۵۴/۸۶	۱۷۴/۰۶	۱۷۴/۰۶	۸/۷۳	-۳/۱۴	-۳/۷۶
۶ تا ۷	گرم	۱۸۴/۲۲	۴۷/۷۱	۴۷/۷۱	۴۷/۷۱	۰/۱۱	-۴۰۹/۴۱	-۴۰۹/۴۱
۸ تا ۹	گرم	۲۲۲/۶۹	۴۷/۷۱	۴۷/۷۱	۴۷/۷۱	۰/۱۱	-۱۱/۴۷	-۱۱/۴۷
۱۲ تا ۱۳	سرد	۲۸۱/۴۰	۱۷۴/۷	۲۶۷/۱۷	۳۵۹/۹۸	۱۸۶/۷	۰	۱۱۷/۹۴
۱ تا ۲	سرد	۲۷۸/۵۹	۲۶۷/۱۷	۵۳۶	۳۶۰/۴۲	۱۸۷/۷	۱۹۸/۶۴	۶۱۸/۸۸
۴ تا ۵	سرد	۲۴۰/۰۴	۳۲۹/۵۳	۵۳۳/۳۸	۲۴۳/۴۷	۳۵/۵۷	۰	۱۱۳/۴۹
۱۰ تا ۱۱	سرد	۲۲۲/۶۹	۴۷/۸۰	۱۴۴/۴۶	۱۷۲/۰۲	۸/۳۱	۰	۹۰/۸۳



شکل ۱۳. نمودار منحنی‌های مرکب شبکه مبدل حرارتی نیروگاه حرارتی شانزند.



شکل ۱۴. نمودار منحنی‌های مرکب امگا برای شبکه مبدل‌های حرارتی نیروگاه شانزند.

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش محاسبه اتلاف اکسرژی با استفاده از ابزار گرافیکی امگا-آنتالپی بررسی شد. برتری این روش نداشتن محدودیت برای فرایندهایی است که در آن‌ها تغییرات فشار و ترکیب درصد رخ می‌دهد. برای شبکه مبدل حرارتی نیز از منحنی‌های مرکب امگا استفاده شد. برتری این نمودار نسبت به منحنی‌های مرکب اکسرژی آن است که محاسبه سطح زیر نمودار به دلیل پله‌ای بودن، آسان‌تر است. در فرایند پریکو اتلاف اکسرژی در مبدل حرارتی چندجریانه، شیر فشارشکن، کمپرسورها و خنک‌کن‌های هوایی بررسی شدند. نتایج نشان داد که اتلاف اکسرژی در این تجهیزات به ترتیب برابر ۱۷/۹۰، ۲/۱۲، ۶/۷۴ و ۰/۹۰ مگاوات است و بخش اعظم اکسرژی معادل با ۶۴/۷۱ درصد در مبدل حرارتی تلف می‌شود. همچنین شبکه مبدل‌های حرارتی نیروگاه شازند اراک با ظرفیت اسمی ۳۲۵ مگاوات بررسی شد. نتایج نمودار امگا-آنتالپی نشان داد که اتلاف اکسرژی در کل این شبکه ۸/۱۴ مگاوات است.

فهرست علائم

- مراجع
- [1] Panjeshahi, M. H., Tahouni, N., "Development of a new graphical tool for calculation of exergy losses in sub-ambient processes", Chemical Engineering Transactions, 76, pp. 433-438, (2019).
- [2] Bendig, M., Maréchal, F., Favrat, D., "Defining the potential of usable waste heat in industrial processes with the help of pinch and exergy analysis", Chemical Engineering Transaction, 29, pp. 103-108, (2012).
- [3] Ghorbani, B., Salehi, G. R., Ghaemmaleki, H., Amidpour, M., Hamed, M. H., "Simulation and optimization of refrigeration cycle in NGL recovery plants with exergy-pinch analysis", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 7, pp. 35-43, (2012).
- [4] Hackel, R., Harvey, S., "Applying exergy and total site analysis for targeting refrigeration shaft power in industrial clusters", Energy, pp. 55, 5-14, (2013).
- [5] Mafi, M., Ghorbani, B., Amidpour, M., Mousavi Naynian, S. M., "Design of Mafmixed refrigerant cycle for low temperature processes using a thermodynamic approach", Scientia Iranica, 20, pp. 1254-1268, (2013).
- [6] Stijepovic, M. Z., Papadopoulos, A. I., Linke, P., Gruzic, A., Seferlis, P., "An exergy composite curves approach for the design of optimum multi-pressure organic Rankine cycle process" Energy, 69, pp. 285-298, (2014).
- [7] Arriola-Medellin, A., Manzanares-Papayanopoulos, E., Romo-Millares, C., "Diagnosis and redesign of power plants using combined pinch and exergy analysis", energy, 72, pp. 643-651, (2014).
- [8] Njoku, H. O., Egbuhuzor, L. C., Eke, M. N., Enibe, S. O., Akinlabi, E. A., "Combined pinch and exergy evaluation for fault analysis in a steam power plant heat exchanger network", Journal of Energy Resources Technology, 141, pp. 1-10, (2019).
- [9] Mehdizadeh Fard, M., Pourfayaz, F., Mehrpooya, M., Kasaeian, A., "Improving energy efficiency in a complex natural gas refinery using combined pinch and advanced exergy analyses", Applied Thermal Engineering, 137, pp. 341-355, (2018).
- [10] Feng, X., Zhu, X. X., "Combining pinch and exergy analysis for process modifications", Applied Thermal Engineering, 17(3), pp. 249-261, (1997).
- [11] Kim, J. K., Lee, G. C., Zhu, F. X. X., Smith, R., "Cooling system design" heat transfer engineering, 23(6), pp. 49-61, (2002).
- [12] Anantharaman, R., Abbas, O. S., Gundersen, T., "Energy level composite curves-a new graphical methodology for the integration of energy intensive processes", Applied Thermal Engineering, 26, pp. 1378-1384, (2006).

R	ثابت گازها
T	دما
T _{C1}	دمای اولیه جریان سرد
T _{C2}	دمای ثانویه جریان سرد
T _{H1}	دمای اولیه جریان گرم
T _{H2}	دمای ثانویه جریان گرم
T ₀	دمای محیط
W	کار کمپرسور
Ω	امگا - تعریف شده در معادله (۱)
η _c	ضریب کارنو
η _{c, ave}	ضریب کارنوی متوسط
T _{LM, T₁, T₂}	متوسط لگاریتمی دما بین دو دمای اولیه و ثانویه
ΔEx	تغییرات اکسرژی
ΔH	تغییرات آنتالپی
ΔS	تغییرات آنتروپی
n	تعداد مول‌ها
p	فشار

- [13] Marmolejo-Correa, D., Gundersen, T., "New graphical representation of exergy applied to low temperature process design", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, pp. 7145-7156, (2013).
- [14] Lei, Y., Zeng, D., Wang, G., "Improvement potential analysis for integrated fractionating and heat exchange processes in delayed coking units", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24, pp. 1047-1055, (2016).
- [15] Shivaee-Gariz, R., Tahouni, N., Panjeshahi, M. H., Abbasi, M., "Development of a New Graphical Tool for Calculation of Exergy Losses to Design and Optimisation of Sub-Ambient Processes", *Journal of Cleaner Production*, 275, pp. 123161, (2020).
- [16] Smith, R., *Chemical Process Design and Integration*, Second Edition, UK, John Wiley and Sons, (2016).
- [17] Kim, J.-K., Lee, G.C., Zhu, F.X., Smith, R., "Cooling system design. *Heat Transfer Engineering*", 23(6), pp. 49-61, (2002).
- [۱۸] احمدی، س.، جعفری نصر، م. ر.، "بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل اکسرژی فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی با مبرد آمیخته"، پژوهش نفت، ۲۹(۶)، ص ۵۱-۳۷، (۱۳۹۸).
- [۱۹] مبصری، آ.، طاهونی، ن.، سبزی اصل، س.، "مروری بر روش‌های افزایش بازده در نیروگاه‌های حرارتی و مطالعه نیروگاه شازند"، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۱۸(۱۰۲)، ص ۴۰-۲۷، (۱۳۹۸).