

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره یازده، بهمن ماه ۹۹

## شبیه سازی و تحلیل ترمودینامیکی و زیست محیطی نیروگاه تولید برق و بخار

### پالایشگاه نفت تهران

محمدحسن خوشگفتارمنش<sup>۱\*</sup>

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

محمد تولمی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۵

#### چکیده

**زمینه و هدف:** پالایشگاههای نفت از جمله انرژی برترین صنایع موجود می‌باشند و آلاینده های زیادی تولید می‌کنند. لذا شبیه سازی ترمودینامیکی به منظور بررسی عملکرد تجهیزات، تخمین آلاینده ها و اثرات زیست محیطی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله شبیه سازی و تحلیل ترمودینامیکی و زیست محیطی واحد تولید برق و بخار پالایشگاه تهران مورد بررسی قرار گرفته است. **روش بررسی:** در این خصوص دو سناریو برای بهبود عملکرد سامانه تولید همزمان توان و بخار پالایشگاه تهران پیشنهاد شده است. شبیه سازی ترمودینامیکی تجهیزات اصلی سامانه تولید توان و بخار در محیط Matlab انجام شده است. به منظور ارزیابی جوابهای شبیه سازی، از نرم افزار Thermoflex و Star استفاده گردیده است. همچنین برای تخمین اثرات زیست محیطی بر اساس تحلیل چرخه زندگی از نرم افزار Sima Pro استفاده شده است.

**یافته ها:** نتایج نشان می‌دهد دقت شبیه سازی ترمودینامیکی بسیار بالا می‌باشد. میزان توان توربین های بخار در سناریو دو و سه ۸/۸۷ درصد افزایش یافته است. همچنین اثرات زیست محیطی در سناریو دوم ۱۶ درصد و در سناریو سوم حدود ۶۰ درصد کاهش یافته است. **بحث و نتیجه گیری:** با توجه به سناریوهای پیشنهادی و بهینه سازی شبکه بخار پالایشگاه تهران، راندمان شبکه افزایش مصرف انرژی و تولید آلاینده ها کاهش چشمگیری می‌یابد.

**واژه های کلیدی:** نیروگاه برق و بخار، شبیه سازی ترمودینامیکی، اثرات زیست محیطی، پالایشگاه نفت.

۱- استادیار، آزمایشگاه پژوهشی سیستمهای انرژی، محیط زیست و بیولوژیک، بخش علوم حرارتی و سیستمهای انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

۲- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

# **Thermodynamic and Environmental Simulation and Analysis of Tehran Petroleum Refinery Power and Steam Plant**

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

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

**Mohammad Tolami <sup>2</sup>**

Admission Date: May 1, 2019

Date Received: July 6, 2017

## **Abstract**

**Background and Objectives:** Oil refineries are the most energy-intensive industries and produce a lot of pollutions. So, thermodynamic simulation is important for performance analysis of equipment, estimation of emissions and environmental impacts. In this paper, simulation and thermodynamic and environmental analysis of Tehran refinery power and steam plant have been studied.

**Method:** In this regards, two scenarios for performance improvement of steam and power system have been proposed for Tehran refinery. Thermodynamic simulation of each main component has been performed in Matlab Environment. To verification of simulation results, Thermoflex and Star software have been employed. Also, Sima Pro software has been used for estimation of environmental impacts based on Life Cycle Assessment (LCA).

**Findings:** Results show the accuracy of the thermodynamic simulation is very high. The power of steam turbines has been increased by 8.87 % in the second and third scenarios. Also, the environmental impacts have been reduced 16 % in second and 60% in third scenarios.

**Discussion and Conclusion:** According to the proposed scenarios and optimization of Tehran Refinery steam network, the efficiency of the network increases energy consumption and production of pollutants is significantly reduced.

**Keywords:** Power and Steam Power Plant, Thermodynamic Simulation, Environmental Impacts, Petroleum Refinery.

---

1- Assistant Professor, Energy, Environment and Biological Systems Research Lab (EEBRlab), Division of Thermal Sciences and Energy Systems, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology & Engineering, University of Qom, Qom, Iran. \*( Corresponding author)

2- Instructor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology & Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

## مقدمه

بازیافت حرارتی و هزینه کمینه کردن هزینه شبکه بدست می آیند.

در حوزه شبیه سازی و بهینه سازی تجهیزات اصلی شبکه بخار، ایبر و گراسمن در سال ۱۹۹۸ عملکرد چند پرودی را در یک سیستم یوتیلیتی مدل کردند. آنها از یک ابر ساختار مبتنی بر روش طراحی که تمام اتصالات ممکن را در سیستم یوتیلیتی بررسی میکرد استفاده کرده و پارامترهای ابر ساختار را بهینه کردند. یک روش قویتر برای ارزیابی توان تولیدی توسط توربین های بخار توسط ماوراماتیس در سال ۱۹۹۶ و ماوراماتیس و کوکوسیس (۱۶) در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. این روش برای طراحی شبکه توربین های بخار کار رفته است (۱۶).

مدل توربین بخار ابتدا توسط ماوراماتیس در سال ۱۹۹۶ و ماوراماتیس و کوکوسیس در سال ۱۹۹۸ (۱۶) ارائه شد. این مدل ها مجدداً توسط شانگ در سال ۲۰۰۰ ارائه گردید. ولی به هر حال دچار برخی نواقص بود. اولاً مدل های توربین همه فاکتورهای تاثیر گذار بروی عملکرد را محاسبه نمی کردند. دوماً فرضیات مدل سازی در حالت بار جزئی خیلی ساده بودند. شانگ همچنین مدل های را برای توربین گازی و بویلر معرفی کرد. او همچنین یک روشی را برای انتخاب بهینه فشارهای هدر بخار و طراحی شبکه بخار ارائه داد (۱۷).

مدل سازی ریاضی برای انواع تجهیزات لازم است تا عملکرد هر واحد در سیستم تعیین شود. مدل های مرسوم عملکرد تجهیزات را به عنوان تابعی از بار (ظرفیت را ثابت می گیرند) یا ظرفیت (بار را ثابت می گیرند) و حالت بار کامل را در نظر می گیرند. به هر حال به منظور این که شبیه سازی ساختار و بهینه سازی عملیاتی دقت کافی لحاظ شود، لازم است که مدلی که معرفی شود که تابعی از هر دو متغیر سایز و بار واحد عملیاتی باشد. مدل های معروف عبارتند از: مدل شانگ و کوکوسیس (۱۸) و مدل واربانوف و همکاران (۴). اما این نتیجه در بیان های غیر خطی برای مسایل طراحی منجر به روش های بهینه سازی پیچیده می شود. در مقابل آگویلار مدل های کلی جدیدی را برای تجهیزات موجود در سیستم های یوتیلیتی ارائه می دهد،

بیش از نیمی از سوخت مصرفی برای تأمین نیازهای انرژی در صنعت، در تولید بخار استفاده می شود. سامانه های تولید توان و بخار در صنایع شیمیایی بخش مهمی از کارخانه را شامل می شوند. این سامانه ها، الکتریسیته و نیروی لازم برای به حرکت درآوردن واحدهای فرآیندی، نیازهای گرمایشی برای شبکه بازیافت حرارتی و بخار در سطوح مختلف فشاری را تأمین می کنند. در کل بخار نقش اصلی را در سامانه های تولید توان و بخار ایفا می کند؛ بنابراین در سامانه های تولید توان و بخار با حجم عظیمی از بخار مواجه هستیم که باید در چگونگی تولید و بهینه سازی آن تحقیق کنیم. در خصوص مدلسازی و شبیه سازی نیروگاه برق و بخار فرآیندی تحقیقات مختلفی انجام شده است (۱). نیشو و همکاران (۲) در سال ۱۹۸۰ یک شیوه طراحی برای سیستم های برق و بخار پیشنهاد کرده اند که بر اساس تخمین تلفات ترمودینامیکی و باز پشت ناپذیری ها در سیستم است. آنها به منظور حداقل کردن تلفات اکسرژی در سیستم از روش های ابتکاری استفاده کردند. و برای انتخاب توربین ها از روش برنامه ریزی خطی استفاده شده است (۲-۴). رکلاتیس و پترولاس (۵) برای سنتز نیروگاه های تولید برق بخار از استراتژی تجزیه استفاده کرده اند. گراسمن و پایپلاس (۶) در سال ۱۹۸۳ برای یک نمونه مطالعاتی با یک میزان حرارت و کار در شبکه، یک روش برنامه ریزی خطی ترکیبی ارائه نمودند. برای فهم بهتر سیستم های انرژی در مجتمع فرآیندی، یک روش گرافیکی بر اساس مفهوم پروفیل های چشمه و چاه حرارتی برای اولین بار توسط و دهول و لینهوف در سال ۱۹۹۲ ارائه گردید (۴). این شیوه بعد ها توسط رئیس (۷، ۸)، کلمش و همکاران (۸)، ۱۹۹۷، الحلواجی و همکاران (۹)، ۲۰۰۹، باندوادیای و همکاران (۱۰)، ۲۰۱۰، قناد زاده و همکاران (۱۱) ۲۰۱۲، کاپیل و همکاران (۱۲) ۲۰۱۳ و خوش گفتارمنش و همکاران (۱۳-۱۵) ۲۰۱۳ توسعه یافت. استفاده از پروفیل های فرایند کل و منحنی های ترکیبی سایت اجازه میدهد که برای تولید همزمان حرارت و کار و صرف سوخت هدف گذاری کنیم. این مقادیر با بهینه کردن

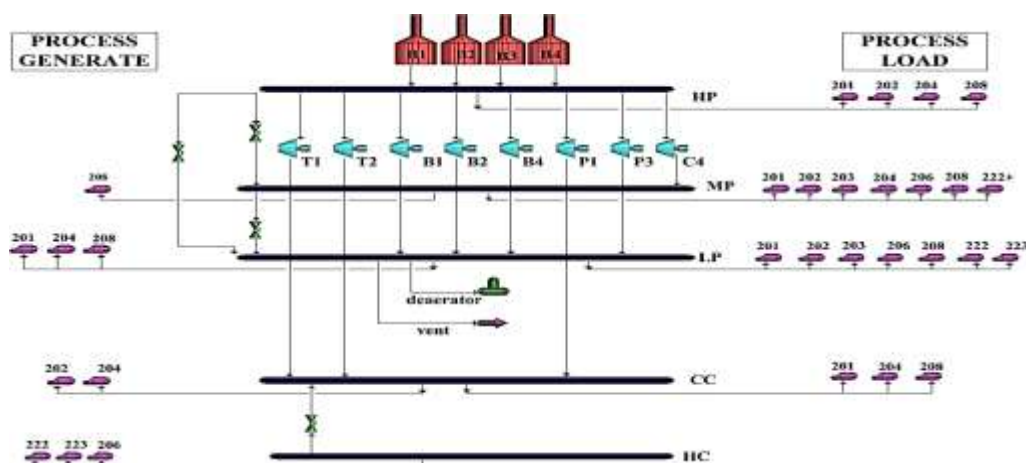
در واحد شمالی پالایشگاه تهران، چهار دیگ بخار وجود دارد که وظیفه تامین بخار با فشار  $650 \text{ psi}$  را بر عهده دارند. هدرهای شبکه بخار شامل هدر فشار بالای  $650 \text{ psi}$ ، هدر فشار متوسط  $300 \text{ psi}$  و یک هدر فشار پایین  $60 \text{ psi}$  است. سیستم توزیع بخار فشار بالا دارای شیرهای فشارشکن برای فراهم آوردن بخار  $300 \text{ psi}$  و  $60 \text{ psi}$  می باشد. بخار  $650 \text{ psi}$  در اصل یک منبع انرژی برای به حرکت درآوردن ۳ توربین بخار کاندنسینگ با ظرفیت  $7/5$  مگاوات است. این سه توربین به ژنراتور متصل می باشند و فقط برای تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرند. بخار  $650 \text{ Psi}$  علاوه بر این ۳ توربین بخار، باعث به حرکت درآوردن ۲۲ عدد توربین دیگر نیز، بین هدرهای HP و MP و همچنین بین هدرهای MP و LP می شود که این توربین ها فقط توربین های درایوری هستند و فقط توان مورد نیاز پمپها و کمپرسورها را تأمین می کنند. همچنین دو هدر کندانس شده سرد و گرم با دماهای  $212 \text{ F}$  و  $257 \text{ F}$  نیز در شبکه موجود است. در واحد شمالی پالایشگاه ۲۱ فرآیند مصرف کننده بخار و ۹ فرآیند تولید کننده بخار وجود دارد که بخار را در سطوح مختلفی تولید یا مصرف می کنند و به هدرهای مختلف متصل هستند. قابل ذکر است که در این مقاله، فقط سه توربین فعال موجود در شبکه شبیه سازی شده اند که عبارتند از سه توربین کندانسی و پنج توربین فشاری که در آنها توربین های بزرگتر  $T_1$  و  $T_2$  به ژنراتور، مطابق شکل ۱ متصل شده اند.

این مدل ها خطی هستند که به ما اجازه می دهند سیستم های سرویس جانبی صنعتی پیچیده را بصورت نیرومندی بهینه کنیم. روابط ارائه شده توسط شانگ و کوکسیس، در واقع همان مدل هایی هستند که توسط ماوروماتیس ارائه شدند. همچنین آنها روابطی را برای توربین های کندانسی بسط دادند (۱۶). از روابط آگیلار در نرم افزار Star استفاده شده است. جعفری نصر و همکاران بهینه سازی شبکه بخار پالایشگاه را با توجه به تولید آلاینده  $\text{CO}_2$  مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از نرم افزار Star به منظور مدل سازی و شبیه سازی شبکه بخار استفاده شده است (۱).

در تحقیق حاضر مدل سازی و شبیه سازی نیروگاه برق و بخار پالایشگاه تهران در حالت بار کامل و بار جزئی براساس روابط آگیلار در محیط Matlab انجام شده است. همچنین به منظور صحت سنجی شبیه سازی در محیط Thermoflex 23 و Star انجام شده است. در ادامه علاوه بر محاسبه میزان آلاینده ها، اثرات زیست محیطی بر اساس ارزیابی چرخه زندگی مورد بررسی قرار می گیرد.

### نیروگاه برق و بخار پالایشگاه تهران

توان و بخار اساسی ترین رکن در تامین انرژی در هر مجتمع فرآیندی است. اجزای یک شبکه بخار به طور کلی به دو گروه عمده تولید کننده و مصرف کننده بخار تقسیم می شوند و هر یک با استفاده از این بخار نیازهای مورد نیاز شبکه را تأمین می کنند.



شکل ۱- شبکه بخار پالایشگاه تهران با در نظر گرفتن توربین های فعال (۱)

Figure 1. Steam network of Tehran refinery with considering active turbine

دبی جریان‌ها می‌توان با استفاده از آنتالپی، آنتروپی و سایر پارامترهای ترمودینامیکی به تحلیل سیستم پرداخت و اطلاعات موردنیاز را استخراج کرد.

### دیگ بخار

در موازنه دبی دیگ بخار، این نکته ضروری است که مقدار ۵٪ بخار تولیدی صرف تخلیه آب لجن می‌شود. در واقع مقدار بخار تولیدشده در هر دیگ بخار کمتر از مقدار آب تغذیه ورودی به دیگ بخار است. آب موردنیاز دیگ‌های بخار از رابطه (۱) به دست می‌آید.

روابط استفاده‌شده برای دیگ بخار از مرجع (۳) استخراج شده است بدین منظور برای دیگ بخار از رابطه (۲) استفاده می‌کنیم.

$$\dot{Q}_{steam}^{boi} = \frac{\dot{Q}_{fuel}}{B} - D \quad (2)$$

ثابت‌های  $B$  و  $D$  ضرایب رگرسیون بوده که مقادیر آن‌ها در منبع (۳) برای دو سوخت گاز طبیعی و نفت سوختی آورده شده‌است.

$$\dot{Q}_{steam}^{boi} = \left( \frac{\dot{Q}_{f1}^{boi}}{B_{f1}^{boi}} + \frac{\dot{Q}_{f2}^{boi}}{B_{f2}^{boi}} + \dots + \frac{\dot{Q}_{fm}^{boi}}{B_{fm}^{boi}} \right) - D_{avg}^{boi} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{steam}^{boi} = \Delta h_T^{boi} \cdot M_{st}^{boi} + \Delta h_{eco}^{boi} \cdot F_{bid}^{boi} \cdot M_{stm}^{boi} \quad (4)$$

برای هوزدا، میزان آب تغذیه موردنیاز از رابطه (۵) به دست می‌آید (۲-۴).

$$\dot{m}_{tw} = \dot{m}_{bfiw} + \dot{m}_{vent} - \dot{m}_{cr} - \dot{m}_{dsteam} \quad (7)$$

به منظور به دست آوردن دمای آب تغذیه ورودی به دیگ بخار نیاز است که از موازنه انرژی برای هوزدا استفاده کنیم. با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به پالایشگاه در بعضی از قسمت‌ها به صورت ناقص موجود بوده، دمای برخی از جریان‌ها مانند دمای بخار برگشتی و آب تغذیه هوزدا مفروض در نظر گرفته شده است. البته سعی شده است اعداد در نظر گرفته شده اعدادی معقول باشند. به همین دلیل از اعداد برخی دیگر از پالایشگاه‌های ایران نظیر پالایشگاه شیراز استفاده شده است. به عنوان مثال دمای بخار کندانس شده برگشتی به هوزدا ۸۰

در این مقاله شبکه بخار پالایشگاه تهران مورد مطالعه قرار گرفته شده است. بدین منظور سه نمونه مطالعاتی پیرامون آن مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه مطالعاتی اول (مبنا)، شبکه بخار پالایشگاه در شرایط کنونی است که در آن راندمان دیگ‌های بخار ۶۷٪ می‌باشد. نمونه مطالعاتی دوم مانند نمونه مطالعاتی اول است با این تفاوت که راندمان دیگ‌های بخار، همان راندمان دیگ‌های بخار در دو سال اول عملکرد آن‌ها - یعنی راندمان ۸۵٪ می‌باشد و همچنین شیرهای فشار شکن حذف شده‌اند. نمونه مطالعاتی سوم نیز مانند نمونه مطالعاتی

$$\dot{m}_{bfiw} = 4 \times \frac{\dot{m}_{boi steam}}{0.95} \quad (1)$$

مبنا است با این تفاوت که یکی از دیگ‌های بخار از شبکه حذف شده و به جای آن دوتوربین گاز با بازیاب حرارتی قرار داده شده است. مجموع بخار تولیدشده توسط این دو بازیاب، معادل بخار تولیدی توسط دیگ بخار حذف شده است.

### مدل سازی ترمودینامیکی

در تحلیل ترمودینامیکی از معادلات موازنه جرم و انرژی در هر یک از اجزای سیستم استفاده می‌شود. با مشخص بودن دما و

با به دست آوردن حرارت سوخت، به وسیله روابط (۳) و (۴) دبی سوخت و راندمان دیگ بخار محاسبه می‌شود (۳، ۴).

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{fuel}}{NHV} \quad (5)$$

$$\eta_{boi} = \frac{\dot{Q}_{steam}^{boi}}{\dot{Q}_{fuel}} \quad (6)$$

ارزش حرارتی خالص سوخت، که در این جا نفت سوختی برای دیگ بخار استفاده شده است،  $41000 \text{ kJ.kg}^{-1}$  می‌باشد (۳).

### هوزدا

میزان بخار برگشتی در هوزدا برابر ۷۰٪ بخار مصرف شده در واحدهای فرایندی است. همچنین ۵٪ بخار ورودی به هوای محیط بیرون داده می‌شود. در نتیجه با نوشتن موازنه جرمی

دمای آن به دست می‌آید. رابطه (۶) موازنه انرژی برای هوازدا است. در شکل (۲) جریان‌های ورودی و خروجی از هوازدا نشان داده شده‌است.

$$\dot{m}_{tw}h_{tw} + \dot{m}_{d\text{steam}}h_{d\text{steam}} + \dot{m}_{CR}h_{CR} = \dot{m}_{b\text{fw}}h_{b\text{fw}} + \dot{m}_{vent}h_{vent} \quad (۸)$$

نمودار تغییرات توان برحسب دبی یک نمودار غیرخطی است که می‌توان آن را با خط راست، که به خط ویلان معروف است، تقریب زد.  $n$  شیب خط ویلان،  $W_{int}$  عرض از مبدأ و  $\Delta H_{is}$  تغییرات آیزنتروپیک آنتالپی است. مقدار  $L$  در روابط بالا نسبت عرض از مبدأ می‌باشد که معمولاً عددی در بازه  $0.5$  تا  $0.2$  است و  $a, b$  ضرایبی ثابت، برحسب دمای اشباع می‌باشند که مقادیر آن برای توربین‌های بک پریشر و کاندنسینگ در جدول ۲ آورده شده است.

درجه سانتی‌گراد و آب تغذیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌است. با استفاده از این اعداد و نوشتن رابطه موازنه انرژی برای هوازدا، آنتالپی آب خروجی از هوازدا و در نتیجه

### روابط مربوط به توربین بخار

به منظور به دست آوردن توان تولیدی توربین‌ها، از نرم‌افزار «استار» استفاده شده‌است (۶). نمایی از این شبیه‌سازی را می‌توان در شکل (۳) مشاهده کرد. در این نرم‌افزار نیز از روابط منابع (۲-۴) استفاده شده‌است.

$$W = n.m - W_{int} \quad (۹)$$

$$n = \frac{L + 1}{b} \Delta H_{is} \quad (۱۰)$$

$$W_{int} = \frac{L}{b} (\Delta H_{is} \cdot m_{max} - a) \quad (۱۱)$$

$$W = n.m - W_{int} \quad (۱۲)$$

$$A = a_0 + a_1 * \Delta T_{sat}^{st} \quad (۱۳)$$

$$B = a_2 + a_3 * \Delta T_{sat}^{st} \quad (۱۴)$$

جدول ۱- ضرایب مربوط به معادله (۱۳) و (۱۴) (۳)

Table 1. Coefficient related to equations (13) and (14)

		Backpressure turbines		Condensing turbines
		$W_{max} < 8 \text{ MW}$	$W_{max} > 8 \text{ MW}$	$W_{max}$ : a single range
$a_0$	MW	0.0250	0.0900	-2.080E-08
$a_1$	MW °C <sup>-1</sup>	0.00463	0.0130	0.000297
$a_2$		1.39	1.22	1.602
$a_3$	°C <sup>-1</sup>	-0.000940	-0.000570	-0.00160
$a_L$		0.248	0.190	-0.0100
$b_L$	°C <sup>-1</sup>	-0.00126	-0.000790	0.000326
$a_{total}$	MW	0.0741	0.1376	0.1422
$b_{total}$	MW °C <sup>-1</sup>	0.00101	0.001015	0.001017

### مدلسازی زیست محیطی

#### تخمین میزان آلاینده‌ها

به منظور تخمین آلاینده‌ها، فرآیند احتراق را می‌بایست بررسی نمود. فرآیند احتراق در صنعت همواره واکنش ناقصی بوده است. عمده‌ی گازهای حاصل از احتراق را دی‌اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ )، بخار ( $\text{H}_2\text{O}$ )، اکسیژن اضافی ( $\text{O}_2$ ) و نیتروژن ( $\text{N}_2$ ) تشکیل می‌دهند. دی‌اکسید کربن و بخار آب همیشه به عنوان آلاینده‌ها محسوب نمی‌شوند؛ زیرا با وجودی که آن‌ها با گرم

شدن زمین ارتباط دارند، ولی از محصولات طبیعی واکنش احتراق محسوب می‌شوند. در نتیجه با کم کردن مصرف سوخت می‌توان تولید آن‌ها را کاهش داد (۸). مقدار تولید آلاینده‌های هیدروکربن نسوخته (UHC) و سولفور ( $\text{SO}_x$ ) در احتراق توربین گازی بسیار ناچیز است. در نتیجه سهم عمده‌ی آلاینده‌ی برای اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) و منواکسید کربن ( $\text{CO}$ ) می‌باشد که هم برای سلامتی موجودات و هم برای

چرخه زندگی معرفی شده است. ارزیابی چرخه زندگی یک برآورد شروع تا پایان برای سیستم‌های صنعتی می‌باشد. عبارت شروع تا پایان از زمان جمع‌آوری مواد خام از زمین برای ساخت محصول تا پایان زمان بازگردانی تمامی مواد به زمین گفته می‌شود. ارزیابی چرخه‌ی زندگی می‌تواند اثرات زیست‌محیطی در تمامی چرخه حیات تجهیزات را تخمین بزند. این مراحل نظیر جمع‌آوری مواد خام، حمل‌ونقل مواد، بازیافت نهایی مواد و غیره با در نظر گرفتن این اثرات در طول چرخه حیات، ارزیابی چرخه زندگی دید جامع و کامل‌تری از لحاظ جنبه‌های زیست‌محیطی برای محصولات و فرآیند تولید ارائه می‌دهد، تا برای انتخاب مواد و نحوه تولید بتوان تصمیم بهتری گرفت. اصطلاح چرخه حیات به فاصله حیات محصولات از زمان تعمیر، استفاده و بازیافت نهایی گفته می‌شود. ارزیابی چرخه زندگی می‌تواند به مهندسان در مورد انتخاب محصول و یا نحوه‌ی تولید آن از نظر اثرات زیست‌محیطی را کمک کند با کمک ارزیابی چرخه زندگی می‌توان اثرات زیست‌محیطی که از یک‌شکل به شکل دیگر تبدیل می‌شوند، شناسایی کرد. مثل اثرات هوای آلوده بر روی آب‌ها و یا تغییر چرخه حیات از یک سطح به سطح دیگر و یا اثراتی که بر اثر فرآیندهای مختلف بر روی مواد به وجود می‌آید (۲۰). اهداف ارزیابی چرخه زندگی مقایسه محدوده کاملی از تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با محصولات و خدمات و کمی سازی تمامی نهاده‌ها و خروجی‌های جریان مواد و ارزیابی این مسئله است که چگونه جریان این مواد می‌تواند بر محیط تأثیر گذارد. این اطلاعات برای بهبود فرایندها، پشتیبانی از سیاست‌ها و ارائه مبانی مناسب برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه ارائه شده است (۲۱).

#### Eco-Indicator99

این شاخص یک شاخص جهانی است که برای ارزیابی چرخه زندگی استفاده می‌شود. این شاخص مخصوصاً برای کمک به تصمیم‌گیری طراحی از نظر زیست‌محیطی کمک می‌کند. در این شاخص می‌توان جنبه‌های زیست‌محیطی را به سه بخش مخرب برای محیط‌زیست تقسیم نمود، بخش اول برای سلامتی انسان‌ها، بخش دوم برای اکوسیستم و بخش سوم برای منابع

محیط زیست ضرر دارد (۸). دمای شعله‌ی آدیاباتیک در محفظه احتراق مطابق با رابطه (۱۵) حاصل می‌شود (۱۹).

$$T_{pz} = A\sigma^{\alpha}\exp(\beta(\sigma + \lambda)^2)\pi^x\theta^y\psi^z \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)  $\pi$  فشار بی‌بعد  $\frac{p}{p_{ref}}$  است که در آن  $p$  فشار ورودی به محفظه احتراق و  $p_{ref}$  برابر با  $101325 \text{ Pa}$  می‌باشد.  $\theta$  دمای بی‌بعد  $\frac{T}{T_{ref}}$  است که  $T$  دمای ورودی به محفظه احتراق و  $T_{ref}$  برابر با  $300 \text{ K}$  می‌باشد.  $\psi$  نسبت اتمی هیدروژن به کربن ( $H/C$ ) می‌باشد که برای سوخت خالص متان برابر با ۴ است. برای  $\phi$  کوچکتر از یک  $\sigma = \phi$  و برای  $\phi$  بزرگتر از یک  $\sigma = \phi - 0.7$  می‌باشد.  $\phi$  نسبت تعادلی سوخت به هوا می‌باشد که در با توجه به سوخت انتخابی برابر  $0.64$  می‌باشد. پارامترهای  $\alpha, \lambda, z, y, x$  در مرجع (۱۹) ذکر شده است.

برای محاسبه میزان آلاینده‌ی بر حسب گرم بر کیلوگرم سوخت مصرفی، ریزک و مونگیا در روشی نیمه تحلیلی با استفاده از دمای شعله آدیاباتیک روابط (۱۶) و (۱۷) را ارائه نمودند.

$$NO_x = \frac{0.15E16\tau^{0.5}e^{(-71100/T_{pz})}}{p^{0.05}(\Delta p/p)^{0.5}} \quad (16)$$

$$CO = \frac{0.179E9e^{(7800/T_{pz})}}{p^2\tau(\Delta p/p)^{0.5}} \quad (17)$$

$\tau$  زمان ماندگاری در محفظه احتراق است که ثابت و معادل  $0.02$  ثانیه فرض شده است.  $\Delta p/p$  افت فشار بی‌بعد در محفظه احتراق می‌باشد. ( $\Delta p/p=0.05$ )

#### تخمین اثرات زیست محیطی

##### تحلیل چرخه زندگی

با توجه به افزایش آلاینده‌ها، دانشمندان بر روی میزان و محاسبه مقدار اثر آلاینده‌ی و زیست‌محیطی با حساسیت بیشتری متمرکز شده‌اند. مسئله تولید محصولات و یا فرآیند تولید با آلاینده‌ی و اثر زیست‌محیطی کمتر به یک موضوع کلیدی تبدیل شده که بسیاری از کارخانه‌ها به تولید محصولات با آلاینده‌ی کمتر روی آورده‌اند. برای این کار ابزاری مانند

پالایشگاه یکسان می‌باشد. در واقع به منظور اعتبار سنجی نتایج، سناریو پایه با داده های مدارک پالایشگاه و در سایر سناریوها با نتایج حاصل از STAR و Thermoflex مقایسه شده است.

پس از حذف شیرهای فشارشکن، دبی بخار عبوری از شیرها، فقط به توربین های  $B_1, B_2, C_4$  اختصاص داده شده است. در نتیجه تنها مقادیر مربوط به این توربین ها در جدول ۳ الف با مقادیر متناظر در جدول ۳ ب، باهم تفاوت دارند. با توجه به ثابت بودن مقدار بخار تولید شده در هر نمونه، مقادیر مربوطه در جداول نیز برای تمامی نمونه های مطالعاتی یکسان می باشد. میزان خطای محاسبات توان توربین ها با استفاده از کد تهیه شده و نتایج STAR و Thermoflex بسیار پایین است. با توجه به مقادیر جدول (۴) ملاحظه می شود که اگر مقدار دبی عبوری از شیرهای فشارشکن به توربین های متناظر با آن شیرها تخصیص داده شود، توان تولیدی در شبکه تقریباً ۳٪ که معادل ۱/۵ مگاوات توان است، افزایش خواهد یافت. همچنین میزان توان تولیدی کل توربین های بخار در سناریو دوم و سوم نسبت به سناریو اول حد ۳٪ افزایش یافته است. علت این افزایش در واقع افزایش راندمان بویلرها و همچنین مهمترین عامل حذف شیرهای فشار شکن می باشد که از اتلافات انرژی در شیرهای فشار شکن برای تولید توان استفاده شده است. در سناریو سوم با توجه به اضافه شدن توربین های گازی ۲۵/۴۶ مگاوات توان اضافی تولید شده است.

طبیعی می باشد. نتایج برای هرکدام از این تقسیمات توسط شاخص پوینت (Pts) بیان می شود که میزان شاخص بیشتر نشان دهنده اثر تخریبی بیشتر است (۲۲). به منظور محاسبه اثرات زیست محیطی به روش Eco-99 می توان از نرم افزار Sima Pro استفاده نمود. از این نرم افزار برای ارزیابی چرخه زندگی استفاده می شود. در این تحقیق به منظور تخمین اثرات زیست محیطی از شاخص ECO-99 استفاده شده است. برای این منظور از نرم افزار Sima Pro استفاده شده است. ساختار کلی و شاخص ECO-99 در شکل ۲ نشان داده شده است. مراحل الگوریتم شبیه سازی ترمودینامیکی و تخمین اثرات زیست محیطی در شکل (۳) مشخص شده است (۲۲). به منظور محاسبه شاخص اثرات زیست محیطی در ابتدا واحد برق و بخار پالایشگاه در محیط Matlab و Thermoflex شبیه سازی می گردد. در ادامه اطلاعات خروجی شبیه ساز براساس ظرفیت تجهیزات مربوطه، وزن و جنس تجهیزات و همچنین سوخت مصرفی به عنوان ورودی به نرم افزار Sima Pro وارد می شود و اثرات زیست محیطی بر اساس چرخه زندگی و شاخص ECO-99 محاسبه می شود.

### نتایج

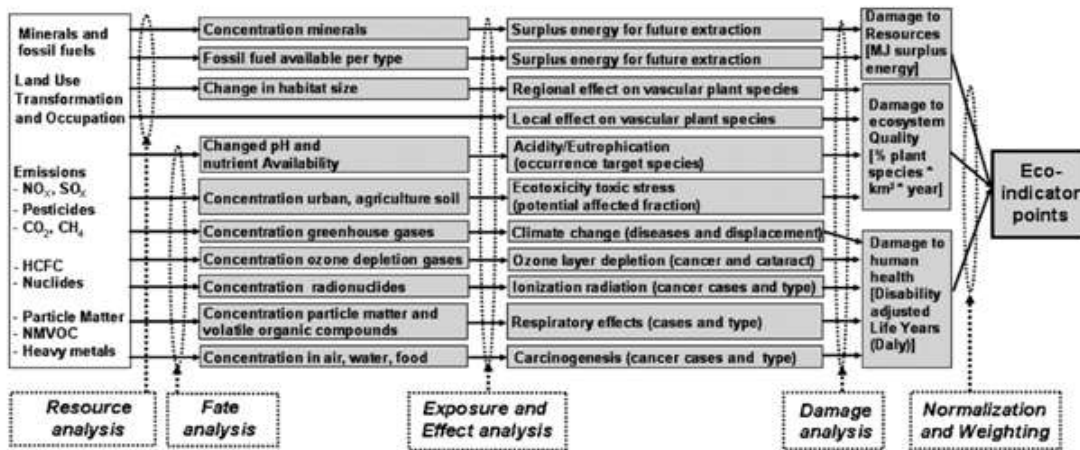
در این بخش پس از مدل سازی اجزا و استفاده از روابط ترمودینامیکی استخراج شده، به نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی، تخمین آلاینده ها و اثرات زیست محیطی هر یک از اجزا و موردهای مطالعاتی پیشنهادی پرداخته شده و نتایج حاصله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند.

### نتایج به دست آمده از تحلیل ترمودینامیکی

#### نتایج مربوط به دیگ بخار

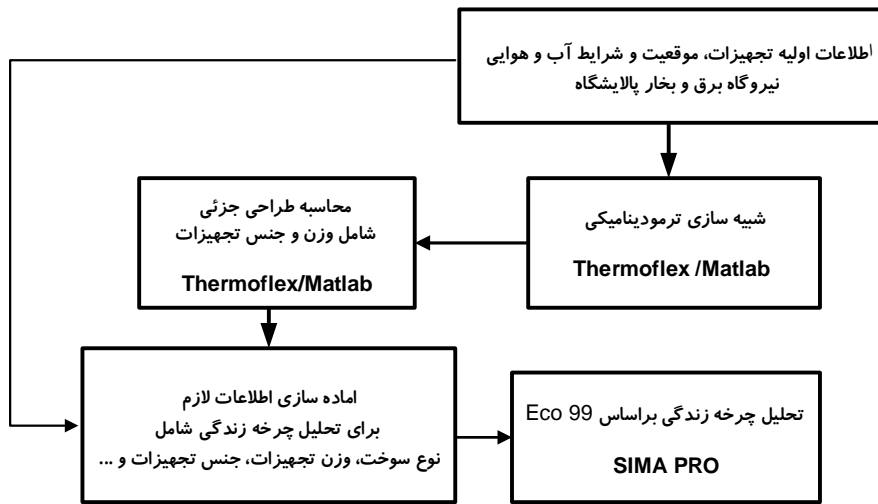
سوختی که برای ۴ دیگ بخار موجود در پالایشگاه در نظر گرفته شده، مطابق جدول ۲، نفت سوختی درجه ۴ است که ارزش حرارتی خالص آن  $41 \text{ Mj.kg}^{-1}$  است. همان طور که مشاهده می شود دقت محاسبات ترمودینامیکی برای دیگ بخار با نتایج حاصل از شبیه سازی Thermoflex و داده های





شکل ۲- ساختار کلی و شاخص ECO-99 در روش ارزیابی چرخه حیات (۲۱)

Figure 2. Overall structure and ECO-99 indicator in Life Cycle Assessment



شکل ۳- الگوریتم شبیه سازی ترمودینامیکی و زیست محیطی

Figure 3. Algorithm for Thermodynamic and environmental simulation

جدول ۲- نتایج شبیه سازی ترمودینامیکی برای دیگ بخار

Table 2. Thermodynamic simulation results for boiler

نمونه مطالعاتی	بازدهی هر دیگ بخار %	میزان بخار تولیدی هر دیگ بخار	میزان بخار تولیدی هر دیگ بخار	میزان بخار تولیدی هر دیگ بخار	سوخت مصرفی هر دیگ بخار	سوخت مصرفی هر دیگ بخار	سوخت مصرفی هر دیگ بخار
		(Kg.s <sup>-1</sup> ) موجود	Thermoflex	Matlab	(Kg.s <sup>-1</sup> )	Thermoflex	Matlab
پایه	۶۶	۱۸/۵	۱۸/۴۳	۱۸/۴۰	۱/۸۷	۱/۸۷	۱/۸۷
۲	۸۵	-	۱۸/۴۳	۱۸/۳۹	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰
۳	۸۵	-	۱۸/۴۳	۱۸/۳۷	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰

جدول ۳ الف- توان و بازده توربین‌ها با در نظر گرفتن شیر فشارشکن

Table 3a. Power and efficiencies of turbines with considering valves

توربین	راندمان آیزنتروپیک	توان تولیدی (MW) Star	توان تولیدی (MW) Thermoflex	توان تولیدی (MW) Matlab
T1	۰/۸۳	۵/۴۸	۵/۴۸	۵/۴۸
T2	۰/۸۳	۵/۴۸	۵/۴۸	۵/۴۸
B1	۰/۷۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵
B2	۰/۷۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵
B4	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹
P1	۰/۷۷	۱/۸۶	۱/۸۶	۱/۸۶
P3	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۳۷
C4	۰/۸۳	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵

جدول ۳ ب- توان و بازده توربین‌ها بدون در نظر گرفتن شیر فشارشکن

Table 3b. Power and efficiencies of turbines without considering valves

توربین	راندمان آیزنتروپیک	توان (MW) Star	توان (MW) Thermoflex	توان (MW) Matlab
T1	۰/۸۳	۵/۴۸	۵/۴۵	۵/۴۸
T2	۰/۸۳	۵/۴۸	۵/۴۵	۵/۴۸
B1	۰/۷۷	۱/۲۳	۱/۲۵	۱/۲۸
B2	۰/۷۷	۱/۲۳	۱/۲۵	۱/۲۸
B4	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۸۱
P1	۰/۷۷	۱/۸۶	۱/۸۸	۱/۹۱
P3	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۳۷
C4	۰/۸۳	۲/۲۲	۲/۵۴	۲/۵۴

جدول ۴- مقایسه توان تولیدی در سناریوهای مختلف

Table 4. Comparison of power production in each scenarios

حالت	توان تولید بخار (MW)	توان توربین گاز (MW)	مجموع توان (MW)
اول	۱۷/۱۳	۰	۱۷/۱۳
دوم	۱۸/۶۵	۰	۱۸/۶۵
سوم	۱۸/۶۵	۴۶/۲۵	۶۴/۹۱

## نتایج تحلیل محیط زیستی

آلاینده‌ها به صورت چشمگیری افزایش یافته‌اند. در جدول ۵، میزان تولید آلاینده‌ها بر حسب یک مگاوات توان تولیدی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان آلاینده CO در سناریو دوم کمتر از سایر سناریوها است که نسبت به سناریو اول ۲۸ درصد کاهش یافته است. میزان آلاینده‌های مربوط به CO<sub>2</sub> که بیشترین آلاینده تولیدی است به ازای هر مگاوات توان تولیدی در سناریو سوم حدود ۶۱/۸ درصد و در سناریو دوم به میزان ۲۸/۴ درصد نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است. میزان تولید آلاینده SO<sub>2</sub>، در سناریو دوم ۲۸/۴۳ درصد و در سناریو سوم ۸۰/۲ به ازای هر مگاوات نسبت به سناریو اول کاهش یافته است. میزان آلاینده‌های مرتبط با NO<sub>x</sub> به ازای هر مگاوات توان تولیدی در سناریو دوم ۳۱/۳ درصد و در سناریو سوم ۶۰/۲ درصد نسبت به سناریو اول کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از محاسبه اثرات زیست محیطی در جدول ۶ نشان داده شده است.

به منظور محاسبه میزان آلاینده‌های محیط‌زیستی تولیدشده توسط تجهیزاتی که سوخت مصرف می‌کنند از استاندارد AP-42 که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست منتشرشده، استفاده شده است. در این استاندارد می‌توان برحسب نوع و ویژگی سوخت مصرفی و همچنین نوع تجهیزاتی که سوخت در آن محترق می‌شود، به ازای آلاینده‌های مختلف، یک ضریب انتشار به دست آورد. با استفاده از این ضریب انتشار می‌توان مقدار انتشار هر یک از آلاینده‌ها را به ازای دبی سوخت مصرفی به دست آورد. میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای سه نمونه مطالعاتی در جدول ۴ آورده شده است. به دلیل بیشتر بودن راندمان دیگ‌های بخار در نمونه مطالعاتی ۲ نسبت به نمونه مطالعاتی مبنا، میزان سوخت مصرفی در نمونه مطالعاتی ۲ نسبت به نمونه مطالعاتی مبنا کمتر خواهد بود و این امر باعث کاهش میزان انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی می‌شود. در نمونه مطالعاتی ۳ به دلیل افزودن دو توربین گاز، میزان

## جدول ۵- میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای نمونه‌های مطالعاتی

Table 5. Values of different environmental pollution in each scenarios

میزان انتشار (kg.hr <sup>-1</sup> )/MW	نمونه مطالعاتی ۱	نمونه مطالعاتی ۲	نمونه مطالعاتی ۳
CO	۱۶/۸۸	۱۳/۱۴۸	۶۱/۶۵
CO <sub>2</sub>	۷۹۸۹۳	۶۲۲۴۲	۱۱۵۵۲۸
SO <sub>2</sub>	۱۷۷۲	۱۳۸۰/۶	۱۳۲۹
NO <sub>x</sub>	۱۵۸/۶۴	۱۲۳/۶	۲۳۸

## جدول ۶- میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای نمونه‌های مطالعاتی بر حسب یک مگاوات توان تولیدی

Table 6. Values of different environmental pollution in each scenarios per one MW electricity production

میزان انتشار (kg.hr <sup>-1</sup> )/MW	نمونه مطالعاتی ۱	نمونه مطالعاتی ۲	نمونه مطالعاتی ۳
CO	۰/۹۸	۰/۷۰	۰/۹۴
CO <sub>2</sub>	۴۶۶۳/۹۳	۳۳۳۷/۳۷	۱۷۷۹/۸۲
SO <sub>2</sub>	۱۰۳/۴۴	۷۴,۰۳	۲۰/۴۷
NO <sub>x</sub>	۹/۲۰	۶/۶۳	۳/۶۶

سناریوها کمتر می‌باشد. اما همان‌طور که در نتایج نشان می‌دهد به ازای هر مگاوات توان تولیدی، میزان اثرات زیست محیطی در سناریو دوم ۱۶/۳۷ درصد و در سناریو سوم ۶۱/۶۶ درصد نسبت به سناریو مبنا کاهش یافته است. لذا با توجه به نتیجه گیری کلی میتوان گفت که به ازای هر مگاوات تولیدی کم ترین میزان آلاینده ها و همچنین اثرات زیست محیطی بطور چشمگیر مربوط به سناریو سوم است.

مقایسه اثرات زیست محیطی مربوط به تجهیزات مختلف در جدول ۷ نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه اول مطالعاتی نسبت به سایر نمونه ها اثرات زیست محیطی تجهیزات پایین تر است. در جدول ۸ اثرات زیست محیطی سوخت نشان داده شده است. میزان اثرات زیست محیطی سوخت در سناریو دوم نسبت به سایر سناریوها پایین تر است زیرا میزان مصرف سوخت در سناریو نسبت به سایر

جدول ۷- مقایسه اثرات زیست محیطی مربوط به تجهیزات

Table 7. Comparison of environmental impacts related to each component

اثرات زیست محیطی (mPts)	نمونه مطالعاتی ۱	نمونه مطالعاتی ۲	نمونه مطالعاتی ۳
دیگ های بخار	۳۶۹/۶۸	۳۷۱/۶۸	۲۸۴/۷۴
توربین های گاز	۰	۰	۳۳۲۸/۲۴
توربین های بخار	۱۵۷/۴۰	۱۶۷/۴۸	۱۶۷/۴۸
مجموع تجهیزات	۵۲۷/۰۸	۵۳۹/۱۶	۳۷۸۰/۴۶

جدول ۸- مقایسه اثرات زیست محیطی مربوط به سوخت مصرفی

Table 8. Comparison of environmental impacts related to fuel consumption

اثرات زیست محیطی	نمونه مطالعاتی مبنا	نمونه مطالعاتی ۲	نمونه مطالعاتی ۳
سوخت (Gpts/h)	۵/۱۹	۴/۸۸	۷/۹۵
سوخت به ازای توان (MPts/MJ)	۰/۰۸۶	۰/۰۷۲	۰/۰۳۳

#### فهرست علائم

سوخت	$F$
سرمایه گذاری	$Cl$
عملکرد و نگهداری	$OM$
جرم در واحد زمان ( $kg.s^{-1}$ )	$\dot{m}$
آنتالپی ویژه ( $kJ.kg^{-1}$ )	$h$
راندمان	$\eta$
توان (MW)	$W$
اگرژی در واحد زمان ( $Kj.s^{-1}$ )	$E$
هزینه در واحد زمان ( $$.s^{-1}$ )	$C$
دما (k)	$T$

زیر نویس ها	
آب تغذیه بویلر	$b_{fw}$
بخار تولیدی توسط بویلر	$boi\ steam$
بخار تزریقی به هوازدا	$d\ steam$
بخار کاندنس شده ی برگشتی	$cr$
بخار ونت شده	$vent$
آب تصفیه شده ی تزریقی به هوازدا	$Tw$
بویلر	$Boi$
عرض از مبدأ	$Int$
آیزنتروپیک	$is$
ماکزیمم	$max$
محصولات	$p$

9. El-Halwagi, M., D. Harell ,and H. Dennis Spriggs, *Targeting cogeneration and waste utilization through process integration*. Applied Energy, 2009. 86(6): p. 880-887.
10. Bandyopadhyay, S., J. Varghese, and V. Bansal, *Targeting for cogeneration potential through total site integration*. Applied Thermal Engineering, 2010. 30(1): p. 6-14.
11. Ghannadzadeh, A., S. Perry, and R. Smith, *Cogeneration targeting for site utility systems*. Applied Thermal Engineering, 2012. 43: p. 60-66.
12. Kapil, A., et al., *Site-wide low-grade heat recovery with a new cogeneration targeting method*. Chemical Engineering Research and Design, 2012. 90(5): p. 677-689.
13. Khoshgoftar Manesh, M.H., et al., *A new cogeneration targeting procedure for total site utility system*. Applied Thermal Engineering, 2013. 5 (1)؛ p. 272-280.
14. Khoshgoftar Manesh, M.H., et al., *A new targeting method for estimation of cogeneration potential and total annualized cost in process industries*. Chemical Engineering Research and Design, 2013. 91(6): p. 1039-1049.
15. Manesh, M.H.K ,et al., *New emissions targeting strategy for site utility of process industries*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013. 30(4): p. 796-812.
16. Mavromatis, S.P. and A.C. Kokossis, *Conceptual optimisation of utility networks for operational variations— I. targets and level optimisation*. Chemical Engineering Science, 1998. 53(8): p. 1585-1608.

## Reference

1. Jafari Nasr, M.R., *AN OPTIMIZATION APPROACH TO REFINERY STEAM MANAGEMENT WITH CONSIDERATION OF CO2 EMISSION*. Journal of Petroleum Science and Technology, 2014. 4(1): p. 73-84.
2. Nishio, M., et al., *A Thermodynamic Approach to Steam-Power System Design*. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1980. 19(2): p. 306-312.
3. Aguilar, O., et al., *Design and Optimization of Flexible Utility Systems Subject to Variable Conditions: Part 1: Modelling Framework*. Chemical Engineering Research and Design, 2007. 85(8): p. 1136-1148.
4. Varbanov, P.S., S. Doyle, and R. Smith, *Modelling and Optimization of Utility Systems*. Chemical Engineering Research and Design, 2004. 82(5): p. 561-578.
5. Petroulas, T. and G.V. Reklaitis, *Computer-aided synthesis and design of plant utility systems*. AIChE Journal, 1984. 30(1): p. 69-78.
6. Papoulias, S.A. and I.E. Grossmann, *A structural optimization approach in process synthesis—I: Utility systems*. Computers & Chemical Engineering, 1983. 7(6): p. 695-706.
7. K., R., *Total site integration*. 1994, Manchester (UMIST).
8. Klemeš, J., et al., *Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO2 on total sites*. Applied Thermal Engineering, 1997. 17(8): p. 993-1003.

- International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011. 5(3): p. 457-466.
21. Meyer, L., et al., *Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems*. Energy, 2009. 34(1): p. 75-89.
22. Goedkoop, M. and r. spriensma, *Eco-indicator 99 Methodology report*. 2001.
17. Shang, Z., *Analysis and optimisation of total site utility systems*. 2000, Manchester.
18. Shang, Z. and A. Kokossis, *A Transshipment Model for the Optimisation of Steam Levels of Total Site Utility System for Multiperiod Operation*. Vol. 28. 2004. 1673-1688.
19. Rizk, N.K. and H.C. Mongia, *Semianalytical Correlations for NOx, CO, and UHC Emissions*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993. 115:(3) p. 612-619.
20. Singh, B., A.H. Strømman, and E. Hertwich, *Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage*.