

## بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل یک نیروگاه بخار قدیمی به سیکل ترکیبی با استفاده از بویلرهای بازیاب حرارت

### تک فشاره و دوفشاره به وسیله الگوریتم ژنتیک\*

(یادداشت پژوهشی)

صادق نیک‌بخت ناصرآباد<sup>(۱)</sup> عبدالله مهرپناهی<sup>(۲)</sup> غلامحسین پایگانه<sup>(۳)</sup> محمدرضا ارباب تفتی<sup>(۴)</sup>

**چکیده** در تحقیق حاضر باتوجه به اهمیت نیروگاه بخار بندرعباس از لحاظ موقعیت و حجم برق تولیدی، به بررسی انجام بازتوانی کامل بر روی آن پرداخته شده است. روند کار به این صورت است که بعد از انجام مدل‌سازی و انطباق داده‌های مدل‌سازی با سیکل واقعی و راستی‌آزمایی مدل به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی حالت‌های مورد نظر در انجام بازتوانی پرداخته شده است. بهینه‌سازی با استفاده از توابع راندمان آگزرژی و هزینه برق تولیدی و به وسیله روش الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. در نهایت نمودار به دست آمده (منحنی پارتو) نمایشی از روند تغییرات هزینه براساس تغییرات راندمان (آگزرژی) را ارائه خواهد داد که در تصمیم‌سازی و انتخاب حالت مد نظر و مطلوب سرمایه‌گذاری مؤثر خواهد بود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه بازتوانی نیروگاه بخار با دو بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره و دوفشاره، نشان‌دهنده ارتقای راندمان آگزرژی نیروگاه تا مقداری بالاتر از ۴۶ درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** سیکل ترکیبی؛ نیروگاه بخار؛ بویلر بازیاب حرارت؛ هزینه برق تولیدی؛ راندمان آگزرژی.

## Multi Objective Optimization of Converting an Old Steam Power Plant to Combined Cycle Power Plant (CCPP) using Double and Single Pressure Heat Recovery Steam Generator (HRSG) via Genetic Algorithm

S. Nikbakht Naserabad  
Gh. Payganeh

A. Mehrpanahi  
M.R. Arbab Tafti

**Abstract** In this study, Given the importance of Bandar Abbas steam power plant in terms of Location and its electricity generating, it has been considered for applying the repowering method. After reference cycle modeling and assessing results accuracy, the applied repowering method has been implemented and it's results reported in four main scenarios. Exergy efficiency and electricity generation cost (per kWh) have been considered as objective functions. Based on the six independent variables and four different scenario multi objective optimization has been done. The final reported results can be implemented by the energy managements for making the best decision and choosing the adequate option. Multi objective optimization of proposed combined cycles with single and double pressure heat recovery boilers indicate that the exergy efficiency upgrades up to 46%.

**Key Words** Combined Cycle; Steam Power Plant; Heat Recovery Steam Generator (HRSG); Electricity Generation Cost; Exergy efficiency.

\*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. mehrpanahi@srutu.edu

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۴) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

## مقدمه

تجهیزات، به بهینه‌یابی سیستم بخار الحاقی با توجه به فلسفه کنترلی بهینه قابل دست‌یابی اقدام شده است. به این منظور در نظر داشتن محدودیت‌های سیکل موجود نظیر دبی بخار قابل پذیرش کندانسور و دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب حرارت در فرآیند مدل‌سازی سیکل جدید ضروری به نظر می‌رسد.

در زمینه بازتوانی نیروگاه‌های بخار علی‌رغم اهمیت این روش‌ها مقالات تحقیقی قابل ارجاع اندکی انتشار یافته است. از جمله موارد بررسی شده توسط براندر و همکاران است که موارد کلی در تغییر سیکل-های بخار به سیکل‌های ترکیبی حاصل از اعمال بازتوانی کامل را بیان نموده و نتایج حاصل نشان می‌دهد که تعدادی از نیروگاه‌های تحت بررسی به لحاظ اقتصادی قابلیت بازتوانی ندارند [3].

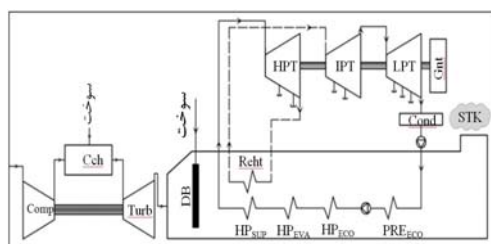
در این تحقیق برای بهینه‌یابی چندهدفه از دو تابع هدف فنی و اقتصادی استفاده شده است. به منظور ارائه نتایج ملموس‌تر، با وجود تنوع بالا در ارائه توابع هدف اقتصادی از تابع واحد هزینه برق تولیدی استفاده شده است. تابع هدف راندمان آگزرژی نیز به‌عنوان تابع هدف فنی سیستم انتخاب شده است. این پژوهش با اعمال محدودیت حداکثر هزینه برق تولیدی، راندمان آگزرژی بهینه را در هر حالت برای مقادیر متفاوت هزینه برق تولیدی به‌دست آورده و به‌صورت نمودارهای موسوم به نمودارهای پارتو ارائه نموده است. در انتها با توجه به رابطه رقابتی بین کاهش هزینه برق تولیدی و افزایش راندمان آگزرژی، نقطه کارکرد بهینه فنی-اقتصادی در هر حالت، و مشخصات سیکل بازتوانی در این نقطه مشخص شده است.

باتوجه به اهمیت موضوع تولید برق در کشور، نتایج تحقیق، دستاوردی مفید در راستای برنامه‌های اقتصادی کشور به‌خصوص برنامه پنج ساله پنجم توسعه اقتصادی-اجتماعی و سیاسی کشور می‌باشد، که مطابق این برنامه می‌بایست راندمان تولید برق در

هدف کلی از اجرای روش‌های بازتوانی احیای سیستم با استفاده از بازیاب حرارت خروجی از توربین‌های (های) گاز به‌وسیله بخش بخاری موجود است. یکی از روش‌های متداول بازتوانی، که برای نیروگاه‌های بخار با عمر بالای ۲۵ سال مناسب هستند، بازتوانی کامل گفته می‌شود. هزینه تأسیس چنین نیروگاه‌هایی ۷۰ تا ۸۰ درصد یک نیروگاه سیکل ترکیبی با توان مشابه است که اثر قابل ملاحظه‌ای در مدت زمان بازگشت سرمایه خواهد داشت. در صورت برنامه‌ریزی متولیان بخش تولید انرژی در کشور، روش‌های بازتوانی کامل پتانسیل افزایش توان تا ۱۳ گیگاوات نسبت به حالت موجود را داراست [1].

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن امکان تولید تجهیزات بازتوانی در کشور انجام شده است به همین دلیل مبنای تولید مدل، استفاده از تجهیزات داخلی متداول در ساخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بوده است. تجهیزات اصلی در تبدیل نیروگاه بخار به نیروگاه سیکل ترکیبی بویلر بازیاب حرارت و توربین گاز است. با توجه به توانایی و تجربه ساخت بویلرهای بازیاب تک‌فشاره و دوفشاره در کشور، این نوع از بویلرها برای بازیاب حرارت در نیروگاه بازتوانی‌شده استفاده می‌شود. از مهم‌ترین محدودیت‌های موجود در استفاده از بویلرهای بازیاب حرارت، تأمین فشار لازم در بخش فشار بالای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است که با وجود پیشرفت‌های سال‌های اخیر، امکان تولید بخار با فشار تا ۲۰ مگاپاسکال فراهم شده است [2].

با توجه به تولید توربین‌های گاز صنعتی توان بالای V94.2 در کشور و استفاده گسترده از این توربین‌ها در ایجاد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، از این توربین‌ها در تولید انرژی ورودی به سیکل بازتوانی استفاده شده است. در نهایت و با انتخاب این



شکل ۲ شکل تغییر ساختار یافته نیروگاه بخار بندرعباس پس از بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره

### توابع هدف

**راندمان اگزرژی.** با نادیده گرفتن انرژی هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی و تأثیرکشش سطحی، در یک سیستم حرارتی، اگزرژی شامل چهار جزء است که به شرح زیر می‌باشد [5, 6]:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (1)$$

اجزای تشکیل‌دهنده اگزرژی کل در معادله بالا به ترتیب اگزرژی فیزیکی، اگزرژی جنبشی، اگزرژی پتانسیل و اگزرژی شیمیایی می‌باشند. بنابراین اگزرژی مخصوص یک سیستم از رابطه زیر پیروی می‌نماید:

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (2)$$

برای یک فرآیند پایا مقادیر اگزرژی جنبشی و پتانسیل نادیده در نظر گرفته می‌شود [7]. اگزرژی فیزیکی برای بخار به صورت زیر تعریف می‌گردد [8]:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

به طور کلی برای گازها اگزرژی فیزیکی به صورت زیر تعریف می‌شود [8]:

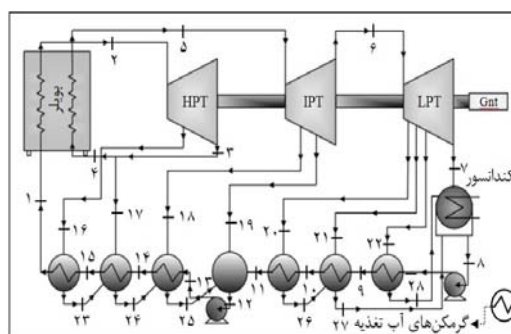
$$e^{PH} = C_{p(T)} \left[ T - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (4)$$

اگزرژی شیمیایی گازهای سوخته شده و هوا نسبت به اگزرژی فیزیکی آنها مقادیری قابل صرف نظر

کشور تا پایان سال ۹۳ به ۴۱ درصد برسد [۴] و نیروگاه بخار بندرعباس با راندمان حرارتی ۲۵ درصد (راندمان کنونی)، مشمول این قانون می‌باشد.

### معرفی نیروگاه بخار بندرعباس

این نیروگاه در کنار دریا احداث شده است و از آب دریا با دمای میانگین ۲۷ درجه سانتی‌گراد برای چگالش بخار استفاده می‌نماید. در حالت طراحی راندمان حرارتی نیروگاه معادل ۳۸/۷ درصد و حداکثر درجه حرارت محیط ۴۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مطابق شکل (۱) هر واحد نیروگاه بخار متشکل از بویلر، مجموعه توربین‌های بخار، کندانسور و گرمکن‌های آب تغذیه می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک اصلی نیروگاه بخار بندرعباس

### بازتوانی نیروگاه بخار

راندمان کنونی نیروگاه بخار بندرعباس ۲۲ تا ۲۵ درصد می‌باشد. همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، از بویلرهای بازیاب حرارت دوفشاره متداول در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی برای مدل‌سازی بازتوانی نیروگاه استفاده شده است. در این پژوهش بازتوانی برای دو ساختار تک‌فشاره و دوفشاره ارائه شده است (شکل ۲ و ۳). با در نظر گرفتن چنین روندی، در چهار سناریو و از ۲ تا ۵ توربین گاز در بازتوانی انتخاب و در هر حالت به بهینه‌یابی سیکل پرداخته شده است.

توان خالص خروجی از سیکل بازتوانی شده برابر مجموع توان خالص خروجی از توربین (های) گاز ( $\dot{W}_{net,GT}$ ) و توربین بخار ( $\dot{W}_{net,ST}$ ) می باشد.

$$\sum_i \dot{W}_i = \dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} = (N \cdot \dot{m}_{f,Ch} + \dot{m}_{f,DB}) \cdot \gamma_f \cdot LHV \quad (9)$$

### تابع هزینه برق تولیدی

پارامتر هدف در مدل سازی اقتصادی هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی می باشد. هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه به صورت تابعی از هزینه سرمایه گذاری اولیه برای خرید تجهیزات ( $Z_c$ )، هزینه تعمیر و نگهداری ( $Z_{OM}$ ) و هزینه سوخت ( $Z_f$ ) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Z_E = Z_c + Z_{OM} + Z_f \quad (10)$$

تجهیزات مورد نیاز شامل توربین گاز، بویلر بازیاب حرارت، داکت برنر و مبدل های آب-گاز می باشد. هزینه خرید هر کدام از این تجهیزات با واحد دلار در مرجع [12-15] ارائه شده است. قیمت هر کیلووات ساعت برق تولیدی در نهایت با ترکیب روابط به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Z_E = \left( \frac{TCL.CRF.\phi}{\dot{W}.H} \right) + C_f . HR_{pp} [\$ / Kwh] \quad (11)$$

را به خود اختصاص می دهد، ولی در سوخت ها این اگزرژی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد [9].

اگزرژی شیمیایی سوخت های هیدروکربنی با فرمول شیمیایی  $C_aH_b$  با استفاده از روابط (۶ و ۵) محاسبه می گردد [10]:

$$e_f^{CH} = LHV \cdot \gamma_f \quad (5)$$

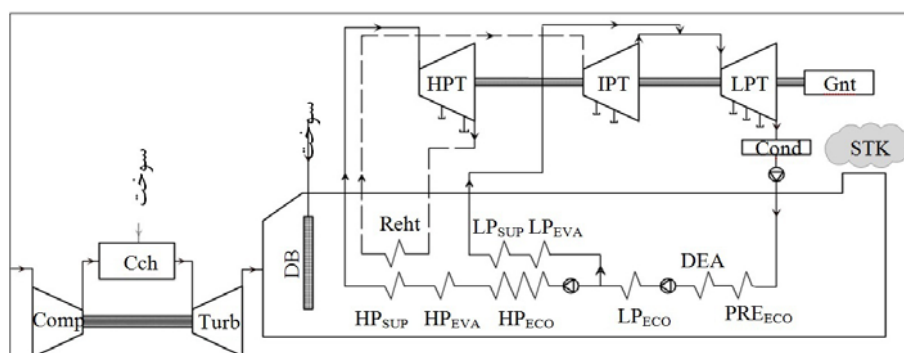
$$\gamma_f = 1.033 + 0.0169 \frac{b}{a} - \frac{0.0698}{a} \quad (6)$$

در روابط بالا  $\gamma_f$  به عنوان ضریب درجه اگزرژی سوخت و LHV به عنوان ارزش حرارتی پایین سوخت تعریف شده است [8, 11]. رابطه (۷) معرف تابع هدف راندمان اگزرژی سیستم می باشد.

$$\eta_{ex,RC} = \frac{\sum_i \dot{W}_i}{\sum_i \dot{E}_f} \quad (7)$$

در این معادله  $\dot{E}_f$  اگزرژی سوخت ورودی به نیروگاه است که در برگرفته سوخت مصرفی محفظه احتراق توربین های گاز ( $\dot{E}_{f,Ch}$ ) و داکت برنر ( $\dot{E}_{f,DB}$ ) می باشد.

$$\sum_i \dot{E}_f = \dot{E}_{f,Ch} + \dot{E}_{f,DB} \quad (8)$$



شکل ۳ شکل تغییر ساختار یافته نیروگاه بخار بندرعباس پس از بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت دوفشاره

### بهینه‌سازی سیکل جدید

در پژوهش حاضر از روش تکاملی الگوریتم ژنتیک برای انجام فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل هم‌گرایی به کمینه‌های عمومی، با وجود عدم دستیابی به دقیق‌ترین جواب مسئله، با فاصله ناچیزی به مقدار بهینه کلی سیستم تحت بررسی همگرا خواهد شد. در انجام بهینه‌سازی شش متغیر مستقل در نظر گرفته شده است که مشخصات این متغیرها در جدول (۱) معرفی شده‌اند.

اعمال برخی محدودیت‌ها نیز در برنامه مدلسازی از موارد لازم برای انطباق واقعی‌تر سیکل مدلسازی با سیکل واقعی است. دمای خروجی از بویلر بازیاب حرارت از محدودیت‌های موجود در بهینه‌سازی سیکل بازتوانی است، که به دلیل جلوگیری از ایجاد نقطه شبنم حداقل این دما برابر با ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است [16]. برخی محدودیت‌های موجود در سیکل بخار به‌عنوان متغیر مستقل مورد توجه قرار گرفته‌اند و محدوده مجاز این متغیرها با توجه به حدود موجود در سیکل بخار تعیین شده است.

### نتایج و تحلیل

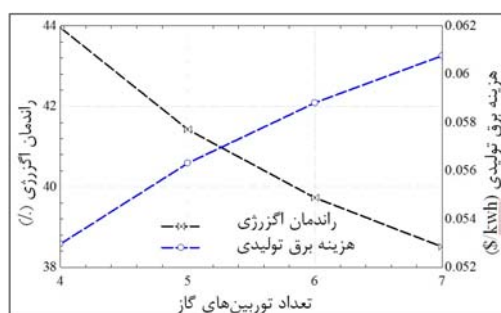
در این بخش به منظور تحلیل سیکل بهینه‌سازی به تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل بر توابع هدف سیستم پرداخته شده است. این متغیرها به دلیل اهمیت و نقش تعیین‌کننده آنها در عملکرد بویلر مورد توجه قرار

گرفته‌اند. متغیر اول تعداد توربین‌های گاز مورد استفاده در بازتوانی است. همان‌گونه که از شکل‌های (۵ و ۴) نیز قابل مشاهده است، با افزایش تعداد توربین‌های گاز راندمان آگزرژی سیستم کاهش و هزینه برق تولیدی سیستم افزایش می‌یابد. این حالت به دلیل راندمان نسبتاً کم توربین‌های گاز قابل پیش‌بینی است زیرا با افزایش تعداد توربین‌های گاز اثر راندمان آنها در برآیند راندمان کلی سیکل بازتوانی اثر گذاشته و راندمان سیکل کلی کاهش یافته است. احتراق اضافی معمولاً برای بالا بردن پایداری سیستم در تولید توان در شرایط ایجاد تغییرات محیطی در سیکل‌های ترکیبی مورد توجه قرار می‌گیرد. احتراق سوخت اضافی چون در جهت بالا بردن توان تولیدی سیکل ترکیبی نیست، باعث کاهش راندمان کلی سیکل ترکیبی می‌شود. در نمودار شکل-۷ (۶ و ۷) اثر احتراق اضافی بر راندمان و هزینه دبی سوخت داکت برنر راندمان در حال کاهش و هزینه برق تولیدی سیستم افزایش یافته است. محدوده معرفی شده برای سوخت مصرفی داکت برنر باعث کاهش راندمان بیش از ۲ درصد نیروگاه بازتوانی شده است.

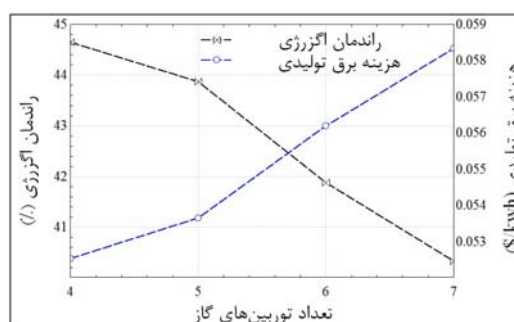
نسبت دبی بخار خروجی از بخش فشار بالا به کل بخار خروجی از بویلر بازیاب حرارت بر میزان جذب حرارت در بویلر، توان کلی سیستم و در نهایت بر راندمان سیکل بازتوانی مؤثر است.

جدول ۱ مشخصات و محدودیت‌های متغیرهای مستقل

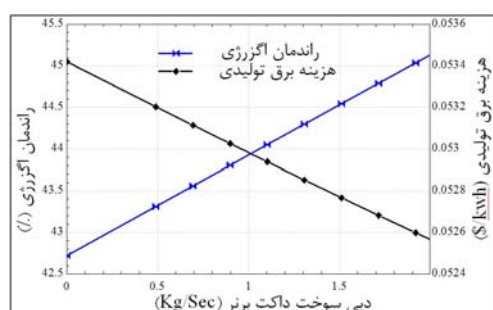
متغیر مستقل	نماد	محدوده بهینه‌یابی	دلیل بازه مورد توجه
دبی خروجی از توربین‌های بخار	L	۰/۳۵ تا ۱/۳۷۳	حداکثر دبی قابل پذیرش کندانسور
نسبت دبی بخار فشار بالا به دبی بخار تولیدی بویلر	y	۰/۸ تا ۰/۶۴	حدود دبی مجاز برای تولید در تولید بویلرهای بازیاب داخلی
محدوده دمای پینچ در سطوح فشاری مختلف بویلر	$T_{hp, pinch}, T_{lp, pinch}, T_{pre, pinch}$	۵ تا ۱۵ (oC)	در نظر داشتن راندمان سیستم و سایز مبدل (بحث هزینه)
دبی سوخت داکت برنر (احتراق کمکی)	$\dot{m}_{f, DB}$	۰ تا ۲ (kg.sec-1)	سوختن سطوح حرارتی بویلر



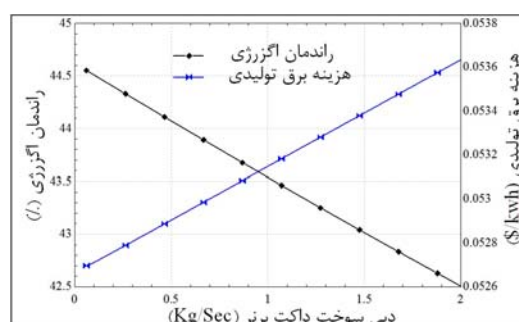
شکل ۵ بررسی تأثیر تعداد توربین‌های گاز بر راندمان آگرژی و هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه در حالت بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت دوفشاره



شکل ۴ بررسی تأثیر تعداد توربین‌های گاز بر راندمان آگرژی و هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه در حالت بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره

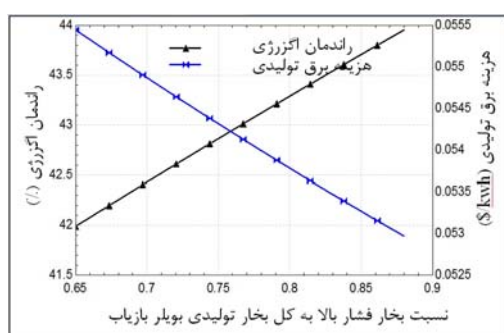


شکل ۷ نمودار تغییرات راندمان آگرژی و هزینه برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی سوخت داکت برنر در بازتوانی با استفاده از بویلر بازیاب دوفشاره.



شکل ۶ نمودار تغییرات راندمان آگرژی و هزینه برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی سوخت داکت برنر در بازتوانی با استفاده از بویلر بازیاب تک‌فشاره.

سیستم و از یک نقطه به بعد در جهت کاهش راندمان سیستم خواهد بود (شکل ۹ و ۱۰).



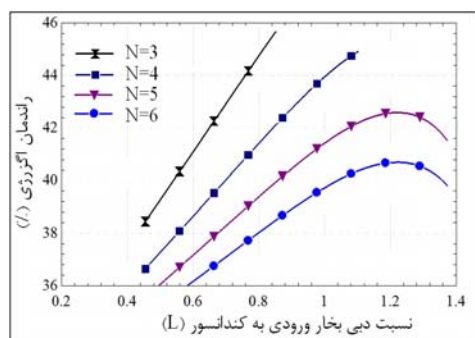
شکل ۸ نمودار تغییرات راندمان آگرژی و هزینه برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی بخار ورودی به توربین فشار بالا

همان‌گونه که در نمودار شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت، راندمان سیکل بازتوانی به دلیل اثر افزایش توان بخش بخار نیروگاه، باعث افزایش راندمان نهایی سیکل ترکیبی شده است. روند افزایش این نسبت در جهت کاهش هزینه برق تولیدی نیروگاه است.

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، افزایش تعداد توربین‌های گاز در جهت کاهش راندمان کلی سیکل بازتوانی است. اما با توجه به نمودار خروجی برنامه مدل‌سازی، افزایش و بالا رفتن دبی کلی بخار خروجی از توربین‌های بخار (در محدوده مجاز ظرفیت کندانسور) در یک محدوده باعث افزایش راندمان

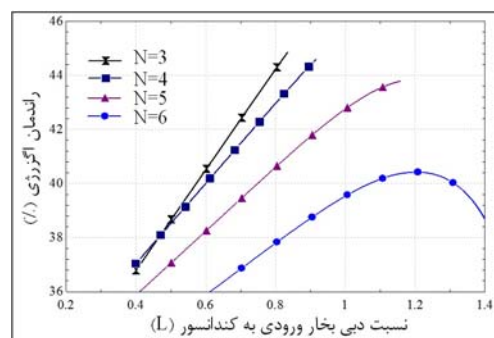
از بویلر بازیاب حرارت، راندمان نیروگاه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. افت پله‌ای راندمان در شکل (۱۲) به دلیل افزایش تعداد توربین‌های گاز می‌باشد. هم‌چنین اولین تصادف پینچ در بویلر بازیاب حرارت مربوط به اوپراتور خط فشار بالا می‌باشد. اهمیت این بخش به دلیل تأثیر آن بر سایر پینچ‌ها در بویلر بازیاب حرارت می‌باشد.

در این نمودار دیده می‌شود که در تمام حالات بازتوانی با تعداد توربین گاز متفاوت، افزایش اختلاف دمای پینچ اوپراتور فشار بالا، کاهش راندمان آگزرژی سیستم را در پی دارد.

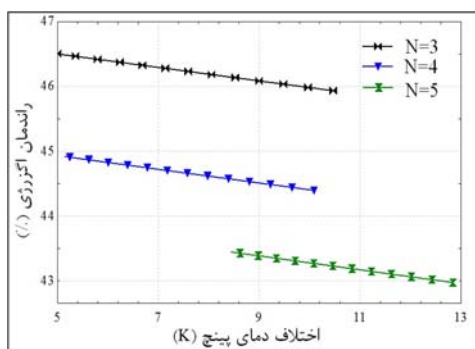


شکل ۱۰ بررسی اثر تغییرات نسبت دبی بخار ورودی به کندانسور (L) بر راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده با بویلر دوفشاره، در تعداد توربین‌های گاز متفاوت

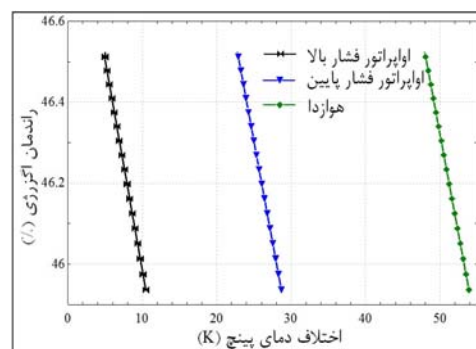
نمودار شکل (۱۱) نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اختلاف دمای پینچ بر راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده با سه توربین گاز می‌باشد. در این نمودار دیده می‌شود که افزایش اختلاف دمای پینچ برای هر اوپراتور موجب کاهش راندمان کلی نیروگاه شده است. در واقع افزایش دمای پینچ به معنای کاهش جذب حرارت گاز توسط آب تغذیه و در نتیجه اتلافات حرارتی بیشتر از طریق دودکش نیروگاه می‌باشد و این دلیل مستدل برای رویه ارائه شده در شکل (۱۱) می‌باشد. با استفاده از توربین گاز بیشتر، بدون اعمال تغییراتی در دبی آب تغذیه و دما و فشار بخار خروجی



شکل ۹ بررسی اثر تغییرات نسبت دبی بخار ورودی به کندانسور (L) بر راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده با بویلر تک‌فشاره، در تعداد توربین‌های گاز متفاوت



شکل ۱۲ بررسی اثر اختلاف دمای پینچ تبخیرکننده فشار بالا بر راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده در تعداد توربین گاز متفاوت



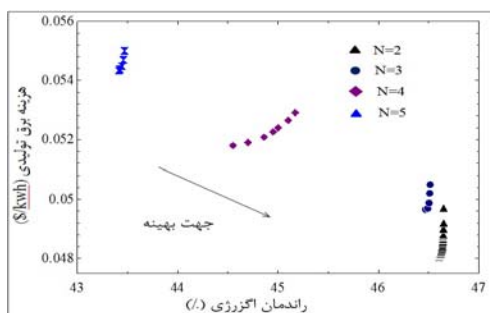
شکل ۱۱ بررسی اثر تغییرات اختلاف دمای پینچ بر راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده با سه توربین گاز

به آن امکان پذیر نمی باشد، در این جا در حالت های بهینه سازی انجام شده، نزدیک ترین نقطه به نقطه تعادل در منحنی پارتو، به عنوان نقطه بهینه فنی و اقتصادی سیستم در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۴) نمونه ای از انتخاب این نقطه می باشد که در سایر حالات نیز چنین رویه ای به کار گرفته می شود. روش تعیین نقطه بهینه فنی و اقتصادی براساس پژوهش صیادی و مهربانی پور [17] انتخاب شده است که حالتی بهینه از راندمان آگزرژی و زمان بازگشت سرمایه را برای یک سیکل گازی بررسی نموده اند [17]. در نهایت خصوصیات نقاط بهینه فنی و اقتصادی سیستم در جدول (۲) به تفکیک حالت های مورد نظر بیان شده است.

با در نظر گرفتن این خصوصیات به ترتیب حالت های بازتوانی با دو، سه، چهار و پنج توربین گاز در بازتوانی سیکل مزیت نسبی خواهند داشت. رنج بهینه یابی شده برای هر کدام از حالت ها و نسبت این رنج ها در مقایسه با سایر حالت های بررسی شده در نمودار شکل های (۱۴ و ۱۳) بیان شده است.

استفاده از بویلر بازیاب حرارت تک فشاره در بازتوانی نیروگاه مطابقت بیشتری با سیکل اصلی دارد (شکل ۱ و ۳) ولی همان گونه که در داده های جدول (۲) دیده می شود، محدودیت اختلاف دمای پینچ در تبخیرکننده فشار بالا (حداقل مقدار پینچ برابر ۵ درجه کلونین [18]) مانع از افزایش بخار ورودی به بویلر بازیاب (L) و در نتیجه موجب تولید بخار کمتر، کاهش توان و افزایش هزینه برق تولیدی می گردد.



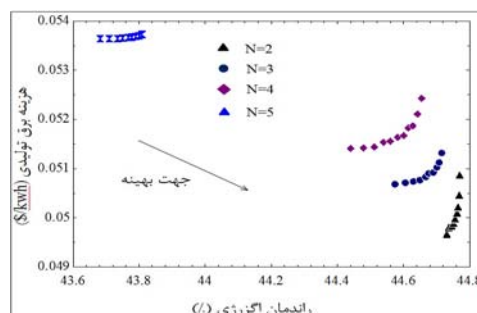
شکل ۱۴ نمودار پارتو برای ۲، ۳، ۴ و ۵ توربین های گاز در حالت استفاده از بویلر بازیاب حرارت دوفشاره

## نتایج بهینه سازی

نتایج بهینه سازی با در نظر گرفتن چهار سناریوی مختلف و با توجه به تعداد توربین های گاز متناسب با توان هر بخش انجام شده است. نتایج بهینه سازی دوهدفه در نمودارهای شکل های (۱۴ و ۱۳) نشان داده شده است. با اضافه شدن توربین های گاز در سیکل بازتوانی اثر راندمان این سیستم ها بر راندمان کلی سیکل تاثیر گذاشته است و میانگین راندمان به دست آمده در طی فرآیند بهینه یابی با افزایش تعداد توربین های گازی در حال کاهش و هم چنین هزینه تمام شده برق تولیدی نیز روندی صعودی دارد.

اساس کار و تولید این منحنی بدین گونه است که برای هر نقطه هزینه حداکثر را مشخص کرده و فرآیند بهینه سازی حداکثر راندمان آگزرژی را در این نقطه جستجو می نماید. در این جستجو راندمان آگزرژی با محدودیت هزینه به عنوان تابع هدف جهت به حداکثر رساندن انتخاب شده و با تغییر پارامترهای مستقل ارائه شده در جدول (۱) (در محدوده تغییرات مشخص شده)، مقدار حداکثر راندمان آگزرژی تعیین می گردد.

هدف از بهینه سازی دوهدفه در تحقیق حاضر، یافتن نقطه ای است که در آن سیستم با صرف حداقل هزینه برق تولیدی، حداکثر راندمان آگزرژی را به خود اختصاص دهد. مختصات این نقطه که با عنوان نقطه تعادل مشخص شده است، معرف هم زمان حداقل هزینه برق تولیدی و حداکثر راندمان آگزرژی می باشد. اگرچه این نقطه یک حالت ایده آل است و دست یابی



شکل ۱۳ نمودار پارتو برای ۲، ۳، ۴ و ۵ توربین های گاز در حالت استفاده از بویلر بازیاب حرارت تک فشاره



جدول ۲ مشخصات فنی و اقتصادی سیستم در نقاط بهینه

نام متغیر	واحد	بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره			
		۲ توربین	۳ توربین	۴ توربین	۵ توربین
دبی سوخت	Kg/sec	۱/۹۹۱	۱/۵۲۸	۰/۰۶۴	۰
L	---	۰/۶۰۱۶	۰/۷۵۵۸	۰/۹۲۰۱	۱/۱۶۶
اختلاف دمای پینچ در اکونومایزر فشار بالا	K	۵/۰۴۲	۵/۰۲	۵/۰۲۸	۵/۰۱۳
اختلاف دمای پینچ در اکونومایزر فشار پایین	K	---	---	---	---
اختلاف دمای پینچ در هوازدا	K	---	---	---	---
Y	---	---	---	---	---
راندمان	%	۴۴/۶۸۴	۴۴/۶۹۱۱	۴۴/۶۲۲	۴۳/۷۷۴۶
هزینه برق تولیدی	\$/kWh	۰/۰۵۰۸۹	۰/۰۵۰۹۲	۰/۰۵۱۸۱	۰/۰۵۳۶۶
توان کل سیکل	MW	۵۰۴/۱	۷۱۰/۳	۹۱۶/۹	۱۱۲۲
انهدام آگزردی نیروگاه	MW	۶۲۴/۷	۸۸۲/۵	۱۱۴۲	۱۴۴۶
نرخ حرارت کل	kJ/kW.h	۷۸۰۲	۷۷۱۰	۷۸۲۰	۷۹۷۱
دمای دود خروجی از بویلر بازیاب حرارت	K	۴۷۳	۴۹۸/۵	۵۰۹/۶	۵۰۷/۹

می‌باشد. در بخش صنعت نیز به دلیل وابستگی این بخش به نیازهای روز کشور در جهت تأمین برق مورد نیاز شبکه، علاوه بر دو پارامتر راندمان آگزردی و هزینه برق تولیدی، پارامتر توان تولیدی نیروگاه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو نتایج جدول (۲) امکان انتخاب سیکل مورد نظر توسط پیمانکاران و صاحبان صنایع تولیدی برق را فراهم می‌نماید.

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده اعمال بازتوانی کامل (با استفاده از تجهیزات متداول در احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ایران)، قابلیت ارتقای راندمان آگزردی نیروگاه بندرعباس را تا بیش از ۴۶٪ فراهم می‌نماید. با توجه به سناریوهای ارائه شده، صرف‌نظر از میزان توان تولیدی، خصوصیات مطلوب سیکل بازتوانی (ارتقای راندمان و کاهش هزینه برق تولیدی) با استفاده از دو عدد توربین گاز بیشتر از سه توربین گاز می‌باشد و این روند با افزایش تعداد توربین‌های گاز ادامه می‌یابد. در نهایت به نظر می‌رسد که با اجرایی شدن قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و لزوم ارتقای

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان گردید با افزایش تعداد توربین‌های گاز در خصوصیات مطلوب فنی و اقتصادی سیکل بازتوانی کاهش می‌یابد. چنین روندی در نمودار شکل‌های (۱۴ و ۱۳) نشان داده شده است. جدول (۲) نشان می‌دهد که استفاده از هر بویلر در شرایط مختلف نتایج متفاوتی از شرایط فنی و اقتصادی نیروگاه بازتوانی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی در تعداد توربین‌های کم (۲ و ۳ توربین گاز)، بهترین حالت فنی و اقتصادی (حداقل هزینه برق تولیدی و حداکثر راندمان آگزردی) مربوط به استفاده از بویلر بازیاب دوفشاره می‌باشد.

به‌طور کلی میانگین هزینه تولید برق با سوخت یارانه‌ای و غیریارانه‌ای به ترتیب برابر ۴/۸۹ و ۱۰/۷۸ سنت به‌ازای هرکیلووات ساعت برق تولیدی محاسبه شده است [۴]. با فرض ۳۰ درصد هزینه‌های جانبی مانند هزینه توزیع و...، هزینه تمام‌شده برق تولیدی در نیروگاه، برابر ۷/۵۵ سنت (۰/۰۷۵۵ دلار) می‌باشد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) برای هزینه برق تولیدی نیروگاه نشان می‌دهد که تغییر ساختار نیروگاه موجب ایجاد هزینه‌ای کمتر از میانگین هزینه‌ها شده است و این به معنای بهبود عملکرد نیروگاه در این حالت

افزایش راندمان و کاهش هزینه برق تولیدی نیروگاه را در پی خواهد داشت، ولی به دلیل دارا بودن شرایط فنی-اقتصادی بهینه و همچنین توان تولیدی مناسب در بازتوانی با استفاده از بویلرهای بازیاب دوفشاره، به کارگیری این نوع از بویلرها در بازتوانی نیروگاه بخار بندرعباس پیشنهاد می گردد.

راندمان نیروگاه های حرارتی، استفاده از چنین روش هایی در بالا بردن کیفیت تولید برق در کشور از موارد ضروری خواهد بود، که انتخاب روش بازتوانی مناسب بر پایه توجه به میزان اهمیت سه تابع راندمان انرژی، هزینه برق تولیدی و توان خالص نیروگاه، صورت می گیرد. اگرچه استفاده از بویلرهای بازیاب تک فشاره در بازتوانی نیروگاه نسبت به سیکل مرجع

## مراجع

- Mehrpanahi, A., Hossienalipour, S.M. and Mobini, k., "Investigation of the effects of repowering options on electricity generation cost on Iran steam power plants", *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 32, No. 4, pp. 229-243, (2013).
- Rackley, S., "Carbon Capture and Storage", Gulf Professional Publishing, (2009).
- Brander, J.A. and Chase, D.L. "Repowering Application Considerations", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 114, pp. 643-652, (1992).
- ترازنامه انرژی ایران، شرکت توانیر، ۱۳۸۹.
- Dincer, I. and Rosen, M.A., "Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development", Elsevier, 1<sup>st</sup> Edition, June (2007).
- Bilgen, S. and Kaygusuz, K., "Second Law (Exergy) Analysis of Cogeneration System", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 30, No. 13, pp. 1267-1280, (2008).
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., "Thermal design and optimization", New York: John wiley & Sons, (1996).
- Balli, O., Aras, H. and Hepbasli, A., "Exergetic performance evaluation of a combined heat and power (CHP) system in Turkey", *International Journal of energy research*, Vol. 31, pp. 849-866, (2007).
- Szargut, J., Morris, D.R. and Steward, F.R., "Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes", New York: Hemisphere, (1988).
- Aljundi, I., "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 324-328, (2009).
- Dincer, I. and Cengel, Y.A., "Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering", *Entropy*, Vol. 3, pp. 116-149, (2001).
- حسینعلی پور، سید مصطفی، مهرپناهی، عبدالله و مبینی، کامران، "بررسی اثر انجام بازتوانی کامل بر ارتقاء خصوصیات فنی-اقتصادی یک نیروگاه بخار"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۱، شماره ۱، صص. ۱-۱۸، (۱۳۹۰).
- Ahmadi, P. and Dincer, i., "Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)", *Energy*, Vol. 35, pp. 5161-5172, (2010).
- حسینعلی پور، سید مصطفی و مهرپناهی، عبدالله، "بررسی اقتصادی بازتوانی نیروگاه های بخار در مقایسه با احداث نیروگاه های گازی"، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۲، شماره ۴، صص. ۴۱-۶۲، (۱۳۸۸).

15. Dixon, S.I., "*Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*", 4<sup>TH</sup> Edition, pergamon press, (1998).
16. Escosa, J.M. and Romeo, L.M. "Optimizing CO<sub>2</sub> avoided cost by means of repowering", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2351–2358, (2009).
17. Sayyaadi, H. and Mehrabipour, R., "Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger", *Energy*, Vol. 38, pp. 362-375, (2012).
18. Godoy, E., Benz, S.J. and Scenna, N.J., "A strategy for the economic optimization of combined cycle gas turbine power plants by taking advantage of useful thermodynamic relationships", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 852-871, (2011).