

## مدل‌سازی احتراق بویلر در طرح بازتوانی شده نیروگاه طرشت به روش جعبه هوای داغ

حسن محقق نژاد  
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی  
دانشگاه شهید بهشتی  
تهران، ایران  
mohagheghnejad@yahoo.com

رامین حقیقی خوشخو

دانشگاه شهید بهشتی،

شرکت مهندسین مشاور مونکو ایران<sup>۲</sup>

Shahid Beheshti University<sup>۱</sup>, Monenco Iran<sup>۲</sup>

تهران، ایران

[r\\_haghighi@sbu.ac.ir](mailto:r_haghighi@sbu.ac.ir)

واژه‌های کلیدی — بازتوانی، نیروگاه بخار، جعبه هوای داغ، بویلر،

توربین بخار، توربین گاز، مدل‌سازی، احتراق، سیکل

### ۱. مقدمه

بازتوانی<sup>۱</sup> به مجموعه‌ای از عملیات جهت افزایش کارایی واحدهای موجود نیروگاهی، به‌خصوص واحدهای بخاری گفته می‌شود. به عبارت دیگر بازتوانی به عنوان اضافه کردن یا جایگزینی تجهیزات یک نیروگاه موجود برای بهبود تولید اقتصادی، افزایش عمر مفید، بهبود عملکرد زیست محیطی، افزایش قابلیت عملیاتی و تعمیر و نگهداری و استفاده کارتر از واحد تعریف می‌گردد.

از اوایل دهه ۸۰ میلادی به دلیل افزایش قیمت سوخت، گرایش زیادی به بازتوانی در کشورهای صنعتی مشاهده شد. علاوه بر این افزایش ظرفیت و کارایی توربین‌های گازی تأثیر عمیقی بر فن‌آوری تولید الکتریسیته داشته است. بازتوانی در کشورهای نظیر ژاپن، ایتالیا، بلژیک، هلند و آمریکا به نیروگاه‌های بخار مورد توجه بوده است. بررسی متدولوژی این کشورها در انجام این عملیات می‌تواند روش مؤثری در بالا بردن توان ناوگان بخار و تأمین نیاز برق کشور باشد [۲]. نمونه باتوانی‌های انجام شده در جهان در جدول زیر نشان داده شده است [۳-۴]. تمامی این بازتوانی‌ها به روش جعبه هوای داغ انجام شده اند.

چکیده — هدف از این مقاله بررسی بازتوانی نیروگاه بخار طرشت به روش جعبه هوای داغ است. این روش بازتوانی نسبت به سایر روش‌ها پیچیده تر بوده و از لحاظ اجرایی مشکل‌تر می‌باشد. نیروگاه بخاری طرشت دارای چهار بویلر و چهار توربین بخار با توان ۱۲ مگاوات می‌باشد. دو بویلر آن جهت بازتوانی مورد مطالعه قرار گرفته است. بازتوانی با استفاده از یک توربین گاز کارکرده Hitachi/GE MS 5001 ساخته شده در سال ۱۹۷۶ انجام شده است. به این ترتیب که نصف دبی گازهای داغ خروجی از توربین گاز وارد دو بویلر از چهار بویلر موجود در نیروگاه می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائل در بازتوانی به روش جعبه هوای داغ مدل‌سازی احتراق در کوره بویلر است. جهت مدل‌سازی احتراق در بویلر در ابتدا باید ترکیب و دمای گازهای داغ توربین گاز که به‌عنوان هوای احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین شود. به این ترتیب در ابتدا مدل‌سازی احتراق در محفظه احتراق توربین گاز با استفاده از نرم‌افزار CHEMKIN-PRO انجام شده است. سپس مدل‌سازی احتراق در بویلر با این نرم‌افزار انجام شده و اطلاعاتی همچون دمای شعله و ترکیبات تولیدی ناشی از احتراق بیان گردیده است. در نهایت سیکل توربین گاز مورد استفاده، سیکل توربین بخار موجود و سیکل ترکیبی در حالت بازتوانی، با استفاده از نرم‌افزار EES مدل‌سازی شده و نتایج بدست آمده با اطلاعات موجود مقایسه شده است.

<sup>۱</sup> Repowering

می‌باشد. غالباً نیروگاه‌هایی برای انجام این عملیات مدنظر قرار می‌گیرند که دارای عمر بالای ۲۵ سال باشند [۲].

## ۲.۲. روش بویلر کمکی

این روش شامل اضافه کردن مجموعه توربین‌های (های) گاز و بویلر کمکی به واحد موجود بدون برداشتن بویلر موجود می‌باشد. بویلر بازیاب حرارت می‌تواند به شکل‌های مختلفی به سیکل موجود اضافه شود. انواع حالت‌های ممکن با توجه به مسیر گازهای خروجی از بویلر بازیاب و مسیر بخار خروجی از بویلر بازیاب قابل دسته بندی است [۲].

مجرى طرح	سال	نوع و توان توربین گاز نصب شده	توان قبل و بعد از بازتوانی	افزایش توان	افزایش راندمان
MHPS (Mitsubishi Hitachi Power Systems)	۱۹۹۵	Hitachi 154 MW	۳۷۵ ۵۲۹	۴۱٪	۱۰٪
Tokyo Electric Power Company (Goi Unit No.6 JAPAN)	۱۹۹۴/۷	Hitachi 126 MW	۳۵۰ ۴۷۶	۳۶٪	۳٪
Chubu Electric Power Co., Inc. (Chita Unit No.5,6, JAPAN)	۱۹۹۵/۶ ۱۹۹۴/۹	Hitachi F7FA 154 MW	۷۰۰ ۸۵۴	۲۲٪	۳۷٪

جدول ۱: نمونه بازتوانی‌های انجام شده به روش جعبه هوای داغ

## ۲.۳. روش گرمایش آب تغذیه

در این روش از هوای خروجی از توربین گاز برای گرمایش آب تغذیه بویلر موجود استفاده می‌شود. نیروگاه‌های مناسب برای انجام این روش همان نیروگاه‌های مناسب برای روش جعبه هوای داغ می‌باشند. برای بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه دو گزینه وجود دارد. در گزینه اول تنها گرمکن‌های فشار قوی حذف می‌شوند و به جای آن‌ها از گرمکن‌های آب تغذیه گازی<sup>۶</sup> (GFWH) که با دود خروجی از توربین گاز گرم می‌شوند استفاده می‌گردد. در گزینه دوم علاوه بر گرمکن‌های فشار قوی گرمکن‌های فشار ضعیف نیز حذف می‌شوند [۵].

## ۲.۴. روش جعبه هوای داغ

در این روش گاز خروجی واحد گازی نصب شده که دارای ۱۴ تا ۱۵ درصد اکسیژن، آنتالپی و دمای بالا (۵۴۰ درجه سانتی گراد) می‌باشد [۶] به عنوان هوای احتراقی به درون جعبه هوای بویلر واحد بخاری موجود دمیده شده تا احتراق را بهبود بخشیده و به تولید بخار کمک کنند. این روش از متنوع‌ترین روش‌های بازتوانی است که برای واحدهای نیروگاهی نسبتاً جدیدتر و بزرگ‌تر مناسب است. اصلاحات بسیار و همچنین تغییرات تجهیزات، اجرای این روش را با پیچیدگی‌های افزاینده‌ای همراه می‌کند. معمولاً در بازتوانی به روش جعبه هوای داغ راندمان ۳ تا ۶ درصد افزایش یافته و آلودگی ناشی از NO<sub>x</sub> نیز ۵۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد [۷].

از آنجایی که گازهای داغ خروجی توربین گاز مستقیماً وارد محفظه احتراق بویلر موجود می‌شوند، در جعبه هوای داغ و مشعل‌ها برای

<sup>6</sup> Gas Feed Water Heater

## ۲. انواع روش‌های بازتوانی

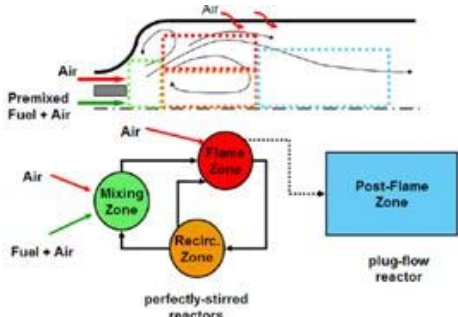
روش‌های انجام بازتوانی به‌طور کلی به دو دسته بازتوانی کامل<sup>۱</sup> و بازتوانی جزئی<sup>۲</sup> تقسیم شده و همگی با اضافه نمودن یک یا چند توربین گاز به سیکل بخار موجود انجام می‌گیرند. روش بازتوانی جزئی خود به سه دسته تقسیم می‌گردد: ۱- بویلر کمکی<sup>۳</sup> ۲- گرمایش آب تغذیه<sup>۴</sup> ۳- جعبه هوای داغ<sup>۵</sup> [۲].

### ۲.۱. بازتوانی کامل

بازتوانی بوسیله جایگزینی بویلر موجود با یک بویلر بازیاب حرارت (HRSG) و تبدیل سیکل بخار به سیکل ترکیبی، متداول‌ترین روش بازتوانی

<sup>1</sup> Heat Recovery Boiler Repowering  
<sup>2</sup> Partial Repowering  
<sup>3</sup> Supplementary Boiler Repowering  
<sup>4</sup> Feed Water Heating Repowering  
<sup>5</sup> Hot Windbox Repowering

می‌باشد. یک ناحیه شعله از راکتور PSR به‌طور مستقیم به ناحیه آمیختگی متصل شده که توسط ناحیه چرخشی برگشت گازهای گرم محترق شده، دنبال شده است. خروجی‌های جریان عبوری از ناحیه شعله به‌طور خودکار به ناحیه بعد شعله وارد شده و با خط چین در شکل ۴ مشخص شده است [۱۰].



شکل ۴: شماتیک شبکه یک برنر ساده مدلسازی شده

### ۳.۱. مدلسازی محفظه احتراق توربین گاز

توجه به آن‌که در بازتوانی به روش جعبه هوای داغ، گاز خروجی توربین گاز به‌عنوان هوای احتراقی وارد بویلر می‌گردد، لذا برای مدلسازی احتراق در بویلر باید دما و ترکیب این گاز معلوم باشد. جهت تعیین دما و ترکیبات گازهای خروجی از توربین گاز، در ابتدا مدلسازی محفظه احتراق<sup>۱۱</sup> توربین گاز با استفاده از نرم‌افزار کمکین- پرو انجام گرفته است. مشخصات سیکل توربین گاز Hitachi/GE MS 5001 در جداول زیر نوشته شده است. به‌دلیل فرسودگی کمپرسور، توربین گاز و ژنراتور، یک راندمان مکانیکی برای آن‌ها در نظر گرفته شده و نسبت فشار کمپرسور نیز برابر ۷/۴ در محاسبات در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: مشخصات کمپرسور

دمای هوای ورودی	$T_0$ (°C)	۱۰
فشار هوای ورودی	$P_0$ (bar)	۰/۸۷۹
دبی هوا	$\dot{V}_{air}$ (kg/s)	۱۰۶/۰۹۸
نسبت فشار	$\Gamma_p$	۷/۴
راندمان ایزنتروپیک	$\eta_{is}$ (%)	۸۶
راندمان مکانیکی	$\eta_{mech}$ (%)	۹۸

<sup>11</sup> Combustion Chamber

مواجه با شرایط جدید (جریان بیشتر و دمای بالاتر هوای ورودی)، نیاز به اعمال یک سری تغییرات است.

به دلیل درصد پایین اکسیژن تولید شده در توربین‌های گازی، ممکن است مشکلاتی در اثر این کمبود در بویلر به‌وجود آید. از جمله: ۱- به‌دلیل کمبود اکسیژن دمای شعله مسلماً از مقدار طراحی کمتر خواهد بود. لذا سهم تشعشع کمتر شده و جذب حرارت به قسمت‌های کنوکسیونی منتقل می‌شود که در نهایت ممکن است آب قبل از رسیدن به اکتونومایزر و درام به نقطه جوش برسد. ۲- به‌خاطر کمبود اکسیژن امکان ناپایداری شعله در احتراق در بویلر به‌وجود می‌آید. بررسی‌های انجام شده بر روی مدل‌های آزمایشگاهی کوره بویلرهای گازسوز نشان می‌دهد که کاهش درصد مولی اکسیژن در هوای ورودی، احتراق پایدار را با مشکل مواجه می‌کند [۸]. لذا انتخاب تعداد و نوع توربین گاز و تعداد واحدها جهت تطابق بویلر با دود خروجی توربین گاز ضروری است. تزریق نامناسب گاز خروجی باعث می‌شود که برای جبران اکسیژن مورد نیاز احتراق، نیاز به فن دمنده اجباری<sup>۹</sup> (FDF) جهت ورود هوای تازه باشد که راندمان نیروگاه را پایین می‌آورد [۶].

### ۳. مدلسازی احتراق

آنچه که مدلسازی فرآیندهای احتراقی را از مدلسازی فرآیندهای جریان سیال آشفته متمایز می‌کند، در واقع تقابل دو پدیده آشفستگی و شیمی واکنش<sup>۸</sup> است. تقابل این دو پدیده در یک مشعل یا دستگاه احتراقی یک سناریو پیچیده می‌سازد، ولی شبکه‌ای از راکتورها در نرم‌افزار کمکین- پرو<sup>۹</sup> توانایی شبیه‌سازی این فرآیند را ایجاد خواهد کرد. نشان داده شده است که برای تخمین مقادیر  $NO_x$  از یک برنر معمولی جهت تعیین راندمان احتراق می‌توان از شبکه‌ای شامل راکتورهای کاملاً هم‌زده<sup>۱۰</sup> (PSR) و راکتور جریان<sup>۱۱</sup> (PFR) استفاده نمود.

در این مدلسازی، احتراق در یک مشعل ساده به چهار ناحیه اختلاط<sup>۱۲</sup>، شعله<sup>۱۳</sup>، چرخش<sup>۱۴</sup> و بعد از شعله<sup>۱۵</sup> تقسیم می‌گردد. به‌دلیل آن‌که خط سوخت به‌طور محلی آمیخته<sup>۱۶</sup> است، راکتور PSR اول ناحیه اختلاط

<sup>1</sup> Forced Draft Fan

<sup>2</sup> Turbulence-Chemistry Interaction

<sup>3</sup> Chemkin-Pro

<sup>4</sup> Perfectly Stirred Reactor

<sup>5</sup> Plug flow Reactor

<sup>6</sup> Mixing Zone

<sup>7</sup> Flame

<sup>8</sup> Recirculation

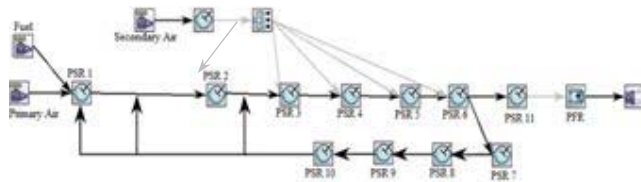
<sup>9</sup> Post Flame

<sup>10</sup> Local Premixed

دمای هوای ورودی	$T_{air}(^{\circ}C)$	۲۶۱
دمای سوخت ورودی	$T_{fuel}(^{\circ}C)$	۱۰
نسبت دبی هوای اولیه به ثانویه	$\alpha$ (%)	۲/۳
فشار محفظه احتراق	$P_{comb}(bar)$	۶/۵

شبکه راکتورها جهت مدلسازی احتراق در محفظه احتراق توربین گاز شامل راکتورهای PSR و PFR می‌باشد (شکل ۶). این شبکه، از کار انجام شده توسط Levy و همکاران [۱۱] الهام گرفته است.

زمان اقامت<sup>۱۸</sup> برای راکتورهای ناحیه اختلاط، ناحیه شعله و ناحیه بازگردشی به ترتیب برابر ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱۸ ثانیه در نظر گرفته شده است. زمان اقامت محفظه احتراق اگر خیلی کوچک باشد سبب افزایش زیاد CO در ناحیه احتراق خواهد شد و احتراق ناقص خواهد بود. از طرف دیگر اگر زمان اقامت بزرگ باشد، به دلیل پایین بودن سرعت نسبی تشکیل NO<sub>x</sub> حرارتی، تولید افزایش می‌یابد [۱۱].



شکل ۶: شماتیک شبکه راکتورهای شیمیایی جهت مدلسازی احتراق در محفظه احتراق توربین گاز

مکانیزم شیمیایی استفاده شده در مدلسازی، مکانیزم GRI-Mech 3.0 است. این مکانیزم واکنش‌های مربوط به C<sub>1</sub> تا C<sub>3</sub> را شامل می‌شود. تعداد اجزاء در آن ۵۳ عدد (به همراه Ar و 2N و واکنش‌های NO<sub>x</sub>) و ۳۲۵ واکنش است [۱۲]. ترکیب هوای ورودی شامل ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن و سوخت ورودی به محفظه احتراق، گاز طبیعی است.

جدول ۷: ترکیب سوخت ورودی

گونه	کسر مولی (%)
CH <sub>4</sub>	۸۶/۳۵
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	۵/۱۱۲
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	۱/۴۲۸
CO <sub>2</sub>	۱/۱۲۹
N <sub>2</sub>	۵/۳۵۲۷

جدول ۳: مشخصات محفظه احتراق

دبی سوخت ورودی	$\dot{m}_{fuel}$ (kg/s)	۱/۷۶۰۸
ارزش حرارتی پایینی سوخت <sup>الف</sup>	LHV(kj/kg)	۴۱۸۸۰

الف. Low Heat Value

جدول ۴: مشخصات توربین گاز

راندمان ایزنتروپیک	$\eta_{is}$ (%)	۸۴/۳۹
راندمان مکانیکی	$\eta_{mech}$ (%)	۹۸

راندمان مکانیکی ژنراتور سیکل گازی برابر ۹۸/۱ درصد می‌باشد.

توربین گاز Hitachi/GE MS 5001 دارای ۱۰ محفظه احتراق [۱۱] است. با توجه به یکسان بودن محفظه‌ها، یک محفظه برای مدلسازی احتراق مورد توجه قرار گرفته است. شرایط محیطی نیروگاه طرشت مطابق جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵: شرایط محیطی نیروگاه طرشت

رطوبت نسبی (%)	دما (°C)	فشار (bar)	ارتفاع از سطح دریا (m)
۶۰	۱۰	۰/۸۷۹	۱۱۶۰

دمای هوای ورودی به محفظه احتراق با توجه به شرایط محیطی نیروگاه طرشت، اطلاعات مکانیکی کمپرسور و با استفاده از روابط ترمودینامیکی توسط نرم‌افزار EES محاسبه می‌گردد.

$$\tau_p = \sqrt{P_2/P_1} \quad \tau_p = P_2/P_1 \quad s_{r2} = s_1$$

فشار و آنترپی در ورودی کمپرسور (نقطه ۱) که مطابق شرایط محیط است، در ابتدا توسط نرم‌افزار تعیین می‌گردد. آنترپی ایده‌آل در خروجی کمپرسور ( $s_{r2}$ ) برابر آنترپی هوای ورودی است و فشار هوای خروجی با توجه به رابطه نسبت فشار کمپرسور، برابر ۶/۵ بار بدست می‌آید. به این ترتیب آنتالپی ایده‌آل در خروجی کمپرسور ( $h_{r2}$ ) با معلوم بودن آنترپی و فشار هوای خروجی محاسبه می‌گردد. با توجه به راندمان ایزنتروپیک توربین گاز، آنتالپی واقعی خروجی در کمپرسور تعیین می‌گردد.

$$\eta_{is} = (h_{r2} - h_1) / (h_{r2a} - h_1)$$

با استفاده از آنتالپی بدست آمده، دمای هوای خروجی توسط نرم‌افزار برابر ۲۶۱ درجه سانتی‌گراد بدست می‌آید.

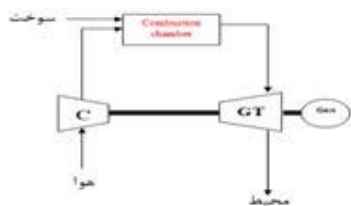
اطلاعات ورودی جهت شبیه‌سازی محفظه احتراق در نرم‌افزار کمکین مطابق جداول زیر می‌باشد.

جدول ۶- اطلاعات ورودی در مدلسازی محفظه احتراق توربین گاز

دبی هوای ورودی	$\dot{m}_{air}$ (kg/s)	۱۰۶/۰۹۸
دبی سوخت ورودی	$\dot{m}_{fuel}$ (kg/s)	۱/۷۶۰۸

<sup>1</sup> Residence Time

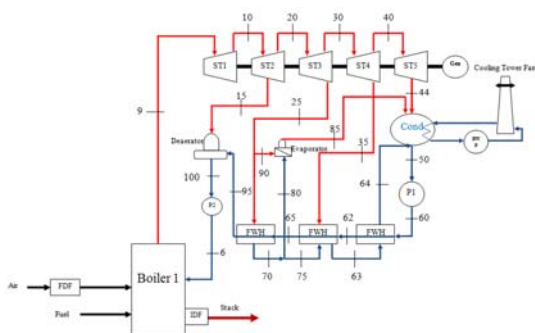
مدل شده است. اطلاعات سیکل گازی و شرایط محیطی نیروگاه طرشت در جداول ۲ تا ۷ بیان شده است.



شکل ۸: شماتیک سیکل گازی مورد استفاده در بازتوانی نیروگاه طرشت

## ۴، ۲. مدل‌سازی سیکل بخار

شماتیک سیکل بخار نیروگاه طرشت در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۹: شماتیک سیکل بخار نیروگاه طرشت

اطلاعات سیکل بخار نیروگاه طرشت در جداول زیر بیان شده است.

جدول ۹: اطلاعات بویلر نیروگاه طرشت

دبی بخار تولیدی	$\dot{Q}_{\text{steam}}$ (kg/s)	۱۶/۸۳۴۸
دمای بخار تولیدی	$T_{\text{steam}}$ (°C)	۴۲۰
دمای آب تغذیه	$T_{\text{feed water}}$ (°C)	۱۷۰
فشار آب تغذیه	$P_{\text{feed water}}$ (bar)	۵۵
دبی سوخت ورودی	$\dot{Q}_{\text{fuel}}$ (kg/s)	۱/۱۵۹

اطلاعات توربین بخار در جدول زیر بیان شده است. راندمان مکانیکی

ژنراتور سیکل بخار برابر ۰/۹۷۵ است.

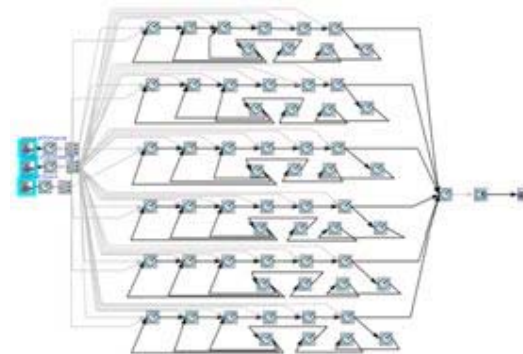
جدول ۱۰: اطلاعات توربین بخار نیروگاه طرشت

مرحله توربین	۱	۲	۳	۴	۵
راندمان ایزنتروپیک (%)	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۶۲
راندمان مکانیکی (%)	۰/۹۸۵	۰/۹۸۵	۰/۹۸۵	۰/۹۸۵	۰/۹۸۵
افت فشار (%)	۵۰	۵۰	۶۰	۵۰	۹۳/۸

## ۳، ۲. مدل‌سازی محفظه احتراق بویلر در حالت

### بازتوانی

روش کلی به کار گرفته شده در مدل‌سازی احتراق در مشعل بویلر نیز همانند مدل‌سازی محفظه احتراق توربین گاز می‌باشد. با توجه به این‌که تعداد مشعل‌های بویلر نیروگاه طرشت ۶ عدد می‌باشد، شماتیک شبکه راکتورهای شیمیایی جهت مدل‌سازی می‌تواند همانند شکل ۷ رسم می‌گردد.



شکل ۷: شماتیک شبکه راکتورهای شیمیایی جهت مدل‌سازی احتراق در بویلر نیروگاه طرشت

اطلاعات ورودی در مدل‌سازی احتراق بویلر در جدول ۸ بیان شده است. ترکیب گازهای ورودی مطابق جدول ۱۱ می‌باشد. مکانیزم شیمیایی استفاده شده، مکانیزم GRI-Mech 3.0 است. حجم بویلر و جعبه هوای آن برابر ۱۶۳/۴۷۳ و ۲۰ متر مکعب می‌باشد. با مشخص بودن دبی و حجم، نیاز به تعیین زمان اقامت در نرم‌افزار نمی‌باشد.

جدول ۸: اطلاعات ورودی در مدل‌سازی احتراق بویلر

دبی گازهای ورودی	$\dot{Q}_{\text{exhaust}}$ (kg/s)	۵۳/۹۲۵
دبی سوخت ورودی	$\dot{Q}_{\text{fuel}}$ (kg/s)	۰/۷۲۸۴
دمای گازهای ورودی	$T_{\text{exhaust}}$ (°C)	۴۶۱
دمای سوخت ورودی	$T_{\text{fuel}}$ (°C)	۱۰
نسبت دبی هوای اولیه به ثانویه	$\alpha$ (%)	۲/۳
فشار کوره	$P_{\text{furnace}}$ (bar)	۰/۸۷۹

## ۴، ۱. مدل‌سازی سیکل نیروگاه

### ۴، ۱. مدل‌سازی سیکل گازی

در ابتدا سیکل توربین گاز با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مدل‌سازی محفظه احتراق توربین گاز و اطلاعات موجود از سیکل گازی

جریان جرمی (kg/s)	--	۱/۰۸۷۳	۱/۴۵۹	۱/۰۹	--
-------------------	----	--------	-------	------	----

### ۴.۳. مدل‌سازی سیکل بازتوانی شده

سیکل بازتوانی شده شامل دو توربین بخار و یک توربین گاز است. مدل‌سازی این سیکل همانند سیکل بخار انجام می‌گیرد با این تفاوت که توان فن نصب شده درون کانال انتقال گازهای داغ توربین گاز به بویلر که جهت جبران افت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز در محاسبات وارد می‌شود. همچنین به دلیل استفاده از گازهای حاصل از توربین گاز در بویلر، به ورود هوای تازه نیازی نبوده و فن دمش اجباری<sup>۱۹</sup> از سیکل کنار می‌رود.

## ۵. نتایج

نتایج حاصل از مدل‌سازی محفظه احتراق توربین گاز در نرم‌افزار Chemkin-Pro، شامل دمای احتراق و ترکیب گازهای تولیدی، در جدول زیر بیان شده است.

جدول ۱۱: نتایج مدل‌سازی محفظه احتراق توربین گاز

دمای احتراق (°C)	۸۴۱
درصد مولی O <sub>2</sub>	۱۵/۴۹۶
درصد مولی H <sub>2</sub> O	۵/۰۱۵
درصد مولی CO <sub>2</sub>	۲/۱۷۷
درصد مولی N <sub>2</sub>	۷۶/۸۲۷
درصد مولی H <sub>2</sub>	۰/۰۰۳
درصد مولی CO	۰/۴۶۳

با استفاده از اطلاعات توربین گاز و با توجه به روابط ترمودینامیکی، محاسبه دمای خروجی توربین گاز در نرم‌افزار EES به این صورت نوشته می‌شود.

$$C_{p,4} = C_{p,Steam}(T_4, P_4) * mf_{H_2O} + C_{p,O_2}(T_4) * mf_{O_2} + C_{p,N_2}(T_4) * mf_{N_2} + C_{p,CO_2}(T_4) * mf_{CO_2}$$

$$C_{v,4} = C_{v,Steam}(T_4, P_4) * mf_{H_2O} + C_{v,O_2}(T_4) * mf_{O_2} + C_{v,N_2}(T_4) * mf_{N_2} + C_{v,CO_2}(T_4) * mf_{CO_2}$$

$$K_{gas} = C_{p,4} / C_{v,4}$$

$$Expansion\ ratio = P_4 / P_3$$

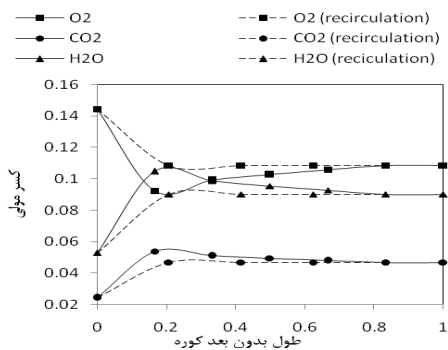
$$T_{4s} + 273.15 = (T_3 + 273.15) * (Expansion\ ratio)^{(K_{gas} - 1) / K_{gas}}$$

$$\Delta T_{4s} = T_3 - T_{4s} \quad \Delta T_4 = \eta_{is,GT} * \Delta T_{4s}$$

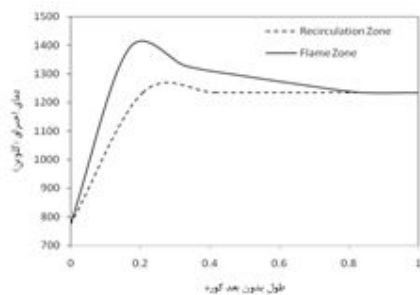
$$T_4 = T_3 - \Delta T_4 \quad \eta_{is,GT} = 0.8439$$

با اجرای برنامه، دمای گازهای خروجی برابر ۴۶۱ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. فرض می‌شود ترکیب گازهای داغ تولیدی محفظه احتراق در حین عبور از توربین گاز تغییر نمی‌کند. به این ترتیب ترکیب

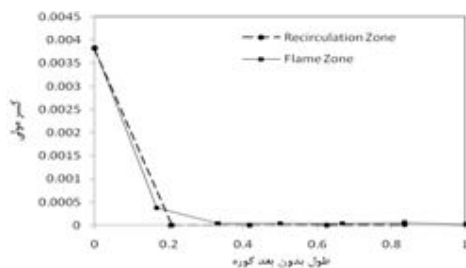
گازهای خروجی توربین گاز مطابق جدول ۱۱ خواهد بود. تغییرات غلظت O<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>O و CO<sub>2</sub> در طول کوره (که با طول بدون بعد در طول کوره بیان شده است)، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. خط ممتد بیانگر ناحیه اصلی احتراق و خط چین نشانگر ناحیه چرخشی است. در ناحیه اولیه احتراق، O<sub>2</sub> بیشتری وارد احتراق شده و کسر مولی آن کمترین مقدار خود را دارد. به این ترتیب تولید محصولات احتراق، O<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O در این ناحیه به بالاترین حد خود رسیده و بیشترین کسر مولی را در این ناحیه دارند. تولید CO نیز به کمترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۱۲). به عبارت دیگر در این ناحیه احتراق به سمت احتراق کامل پیش رفته و دمای احتراق نیز ماکزیمم است (شکل ۱۱).



شکل ۱۰: نمودار کونه‌های تولیدی احتراق در طول کوره



شکل ۱۱: نمودار دما در طول کوره



شکل ۱۲: نمودار CO تولیدی احتراق در طول کوره

<sup>1</sup> Forced Draft Fan

جدول ۱۵: نتایج مدل‌سازی سیکل بخار نیروگاه طرشت

اطلاعات موجود [۲۳]	نتایج مدل‌سازی با EES	کمیت (واحد)	پارامتر
۱۰۲۲۳/۷	۱۰۴۱۰	P (kw)	توان
۲۱/۰۶	۲۱/۴۴	$\eta_{\text{electrical}}$ (%)	راندمان

نتایج مدل‌سازی سیکل بازتوانی شده به این ترتیب است.

جدول ۱۶: نتایج مدل‌سازی سیکل بازتوانی شده نیروگاه طرشت

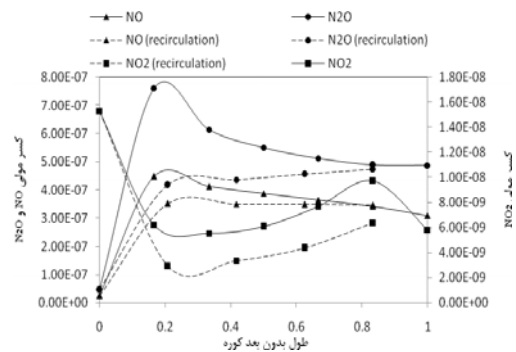
مصرف سوخت بویلر (kg/s)	راندمان حرارتی (%)	توان (KW)	نتایج مدل‌سازی
۰/۷۲۸۴	۲۷/۶۳	۳۷۲۴۵	

## ۶. نتیجه گیری

با مدل‌سازی انجام دمای گازهای داغ خروجی توربین گاز و کسر مولی اکسیژن موجود در آن به ترتیب ۴۶۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۵/۴۹۶ درصد به دست آمده است. این گازهای داغ به عنوان هوای احتراقی در بویلر موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند. توزیع دما در طول بدون بعد کوره مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. طبق نمودار، دمای گازهای داغ بعد از شعله برابر ۷۷/۱۵۵۷/۹۶۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. راندمان و توان تولیدی سیکل بخار موجود برابر ۲۱/۴۴ درصد و ۱۰۴۱۰ کیلووات محاسبه گردیده است. راندمان و توان سیکل گازی نیز به ترتیب ۲۳/۴۹ درصد و ۱۷۳۲۳ کیلووات به دست آمده است. بیشترین تخریب اکزرتژی در سیکل گازی، در مرحله خروج گازهای توربین گاز به محیط (در حالت عملکرد مستقل سیکل توربین گازی) رخ می‌دهد. راندمان و توان سیکل بخار بازتوانی شده به روش جعبه هوای داغ، به ترتیب ۲۷/۶۳ درصد و ۳۷۲۴۵ کیلووات نتیجه شده است. به این ترتیب با بازتوانی نیروگاه طرشت به روش جعبه هوای داغ با استفاده از توربین گاز کارکرده Hitachi/GE MS 5001، می‌توان راندمان و توان تولیدی دو واحد از چهار واحد نیروگاه را به ترتیب ۲۸/۸۷ و ۷۸/۸۹ درصد افزایش داد. این در حالی است که مصرف سوخت هر بویلر نیز از ۱/۱۵۹ کیلوگرم بر ثانیه به ۰/۷۲۸۴ کیلوگرم بر ثانیه کاهش یافته و ۳۷/۱۵ درصد کاهش مصرف سوخت قابل دستیابی است.

## منابع

- [۱] م. تساناس، ر. حقیقی خوشخو، بررسی فنی بازتوانی (Repowering) واحدهای نیروگاهی بخار و انجام مطالعات موردی در نیروگاه بعثت، ۱۳۸۸.
- [۲] م. حسینی پور، ع. مهرپناهی، بررسی اقتصادی بازتوانی نیروگاه‌های بخار در مقایسه با احداث نیروگاه گازی، هفتمین همایش ملی انرژی، ۲ دی‌ماه ۱۳۸۸.



شکل ۱۳: نمودار NO، N<sub>2</sub>O و NO<sub>2</sub> تولیدی احتراق در طول کوره

سایر نتایج حاصل از مدل‌سازی احتراق در بویلر به این ترتیب است.

جدول ۱۲: نتایج مدل‌سازی احتراق در بویلر

دمای گازهای تولیدی (°C)	۹۶۱/۵۵۷
تولیدی NO <sub>x</sub> (ppm)	۰/۸۸۳۱
تولیدی CO (ppm)	۱۵/۰۳۰۵
تولیدی NO (ppm)	۰/۳۴۱۲

نتایج نرم‌افزاری مدل‌سازی سیکل گازی با استفاده از نرم‌افزار EES به این ترتیب است.

جدول ۱۳: نتایج مدل‌سازی سیکل توربین گاز

اطلاعات موجود	نتایج مدل‌سازی با EES	کمیت (واحد)	پارامتر
۱۷۰۰۹/۷	۱۷۳۲۳	P (kw)	توان
۱۵۶۰۷	۱۵۳۲۸	HR (kj/kwh)	نرخ حرارتی
۲۳/۰۷	۲۳/۴۹	$\eta_{\text{electrical}}$ (%)	راندمان
۸۴۲	۸۴۰	T <sub>combustion</sub> (°C)	دمای گاز ورودی به توربین گاز (مدلسازی با کمکین)
۴۷۷	۴۶۱	T <sub>exhaust</sub> (°C)	دمای گاز خروجی توربین گاز

جدول ۱۴: نتایج مدل‌سازی قانون دوم ترمودینامیک برای سیکل توربین گاز

۹۴/۹۱	$\eta_{\text{II,GT}}$ (%)	راندمان قانون دوم توربین گاز
۹۲/۳۴	$\eta_{\text{II,Compressor}}$ (%)	راندمان قانون دوم کمپرسور
۷۱/۲۰	$\eta_{\text{II,Combustion chamber}}$ (%)	راندمان قانون دوم محفظه احتراق
۴۸/۴۸	$\eta_{\text{II,Stack}}$ (%)	راندمان قانون دوم گازهای خروجی
۶۸۹۸۶	X <sub>destroyed</sub> (kw)	تخریب اکزرتژی

نتایج مدل‌سازی سیکل بخار مطابق جدول زیر می‌باشد.

[3] Mita, T., et al. "Trial Operation Results of the Fully-Fired Combined Cycle Generating Plants in Chita." *ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 1995.

[4] <https://www.mhps.com/en/technology/business/power/service/repowering/index.html>

[5] Stenzel, W., D. M. Sopocy, and S. Pace. "Repowering existing fossil steam plants." *Proceedings of POWER-GEN*. 1997.

[6] CADDET Energy Efficiency, Repowering of thermal power plant to use exhaust reburning, Result 254.

[۷] م. فراهانی، ف. رحمانی، ح. آبروشن، بررسی فنی اقتصادی بازتوانی یک نیروگاه قدیمی در ایران، هفتمین همایش ملی انرژی، دی‌ماه ۱۳۸۸.

[۸] ف. پارس‌مهر، بررسی انتخاب شیوه مناسب از روش جعبه هوای داغ در بازتوانی نیروگاه‌های بخار، شرکت مدیریت برق بیستون.

[9] [www.thermoflow.com/convsteamcycle\\_REM.html](http://www.thermoflow.com/convsteamcycle_REM.html)

[10] [http://www.reactiondesign.com/design\\_areas/burners-boilers/](http://www.reactiondesign.com/design_areas/burners-boilers/)

[11] Brandt, Donald E., and R. R. Wesorick. "GE gas turbine design philosophy." *GER-3434, General Electric* (1994).

[12] Levy, Yeshayahou, G. Arvind Rao, and Valery Sherbaum. "Chemical kinetic and thermodynamics of flameless combustion methodology for gas turbine combustors." *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati*. 2007.

[13] <http://combustion.berkeley.edu/grimech/version30/text30.html>