



شبیه‌سازی فرآیند تولید همزمان برق و حرارت برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در کارخانه سیمان

مهران علیپور^۱، زهرا بنی عامریان^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، صندوق پستی ۳۹۵۱۸-۷۹۶۱۱، amerian@tafreshu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به تحلیل دو سیکل رانکین و برایتون به منظور تولید توان، که متداول‌ترین سیکل‌های تولید توان می‌باشند، با استفاده از نرم افزار حل کننده معادلات مهندسی پرداخته می‌شود. ارزیابی این سیکل‌ها با توجه به بررسی میزان بازده به ازای دریافت حرارت در دماهای مختلف از کوره دوار که نوع شعله Gorgo است، جهت پخت سیمان صورت می‌پذیرد. براساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود استفاده از سیستم CHP در صنعت سیمان کاملاً موجه بوده و علاوه بر افزایش بازده تاثیر منفی بر روی پخت مواد اولیه نخواهد داشت، همچنین به دلیل پایین بودن دمای محصولات احتراق، آسیب‌های زیست محیطی کمتری به محیط زیست وارد می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و بازه‌های دمایی در نظر گرفته شده، سیکل تولید توان با محرک بخار(سیکل رانکین) دارای بازده بیشتری می‌باشد. در بررسی بازده سیکل‌های مورد نظر، میزان تفاوت ۵-۲۰ درصد در دماهای یکسان مشاهده می‌شود. کلیدواژگان: CHP، شبیه‌سازی، کوره دوار، سیکل گازی برایتون، کاهش مصرف انرژی.

Analysis of CHP plant in cement production industries for optimization of energy consumption

Mehran Alipour¹, Zahra Baniamerian^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

2- 1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

* P.O.B. 39518-79611 Tafresh, Iran, amerian@tafreshu.ac.ir

Received: September 2018 Accepted: December 2018

Abstract

In this study, two of the most popular power generation cycles are analyzed using EES (Engineering Equation Solver). Cycles are evaluated by their efficiencies based on receiving different gas temperatures extracted from a Gorgo-flame cement rotary kiln. Results show that employing CHP technology in cement production plants will efficiently optimizes energy consumptions beside its effectiveness in decreasing environmental pollutions. Based on the obtained results, the steam cycle was more efficient and saves more amounts of energy. In study the efficiency of the cycles, the difference is observed between 5-20% at the same temperature.

Keywords: CHP, Simulation, Rotary Kiln, Brayton gas cycle



۱- مقدمه

تولید سیمان یک فرآیند به شدت انرژی بر می‌باشد؛ به طوری که به منظور تولید هر تن سیمان، حدود ۴ گیگا ژول انرژی مصرف می‌شود [۱]. بازیابی گرمای اتلافی از گازهای داغ و سطح داغ کوره در یک سامانه‌ی کوره به عنوان راه‌هایی برای به‌سازی بازدهی کلی کوره شناخته می‌شوند. روش‌هایی از قبیل استفاده از تکنولوژی تولید همزمان گرما و برق در سال‌های اخیر روش مناسب و بهینه برای صرفه جویی در مصرف انرژی و افزایش بازده می‌باشد.

افشار باقری و همکاران [۲] طی مقاله خود در سال ۲۰۰۷ در بررسی تولید همزمان در کارخانه سیمان به این نتایج رسیدند که با استفاده از تلفات حرارت خروجی از پیش‌گرمکن و خنک‌کن گیتی کوره‌های سیمان، می‌توان انرژی الکتریکی تولید نمود. با این روش ۳۰٪ از انرژی الکتریکی مورد نیاز و حدود ۱۰٪ از کل انرژی اولیه مورد نیاز کارخانه‌های سیمان بدست می‌آید. با استفاده از تکنولوژی ژنراتورهای جانبی در ۲ کوره‌ی (۲۱۰۰ تنی و ۴۰۰۰ تنی) سیمان تهران حدوداً ۹ مگا وات انرژی الکتریکی تولید خواهد شد.

اکبر زاده [۳] در سال ۲۰۱۳ به بررسی و تشریح عملکرد میکرو توربین‌های تولید همزمان پرداخت. در شبیه‌سازی ایشان، مدل میکروتوربین در شبیه‌ساز نرم افزار متلب جهت تولید برق به منظور اتصال به شبکه و نیز ارائه ی برق و حرارت جهت مصرف کارخانه سیمان ارائه شده است. بر مبنای مشاهده‌های ایشان، استفاده از این تکنولوژی باعث افزایش بازده شده است. واتقی و امیری [۴] به بررسی بازیابی هدر رفت حرارت با استفاده از سیستم‌های بازیابی پرداختند و امکان سنجی برای فرآیند تولید سیمان با بررسی چهار چرخه تولید برق مشترک، سیکل رانکین بخار، سیکل رانکین آلی و سیکل کربن دی اکسید بحرانی را انجام دادند. بر مبنای مطالعات انجام شده، بازده سیکل رانکین آلی ۴۳،۴۹٪، سیکل عادی رانکین ۲۹٪، گازی ۴۲،۲۲٪ و برایتون پایه ۴۳،۳۱٪ می‌باشد.

با استفاده از مطالب ذکر شده توسط نویسندگان مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که با به‌کارگیری از حرارت تولید شده یا حرارت مازاد سیستم پخت به تولید توان و کاهش هزینه‌ها در راستای مصارف الکتریکی برآمده‌اند و علاوه بر این موضوع به مقایسه‌ی بین عملکرد سیستم‌های تولید توان در این فرآیند پرداخته‌اند، تمایز کار انجام شده در این مقاله این است که علاوه بر انتخاب یک کوره با ویژگی‌های متفاوت از کارهای قبلی، به بررسی تأثیر حرارت گرفته شده از کوره بر فرآیند پخت و محصول نهایی خارج شده از کوره توجه خاصی صورت گرفته است.

۲- تحلیل انرژی پخت سیمان

۲-۱- بررسی ترمودینامیکی

تولید سیمان یک فرآیند به شدت انرژی بر می‌باشد و شامل گرمادهی، کلسینه کردن و زینترینگ ترکیبات شیمیایی مخلوط کربنات کلسیم (سنگ آهک)، سیلیکا، آلومینا، سنگ آهن و مقادیر کمی از مواد دیگر می‌باشد که به لحاظ شیمیایی در گرمای بسیار زیاد تغییر می‌یابند تا یک ترکیب با خواص چسبندگی را تشکیل دهند. معادله‌ی موازنه‌ی انرژی می‌تواند به صورت معادله ۱ نوشته شود. طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد.

$$Q_{IK} = Q_{OK} + LK \quad (1)$$

که Q_{IK} گرمای ورودی به سامانه‌ی کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر، Q_{OK} گرمای خروجی از سامانه‌ی کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر و LK اتلاف از سامانه‌ی کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر می‌باشد. گرماهای ورودی به سامانه کوره عبارت است از گرمای ناشی از احتراق سوخت، گرمای محسوس سوخت، گرمای محسوس مواد خام خشک، گرمای محسوس رطوبت در مواد خام خشک، گرمای محسوس رطوبت در مواد خام، گرمای محسوس هوای اولیه و گرمای محسوس هوای خنک کننده. رابطه‌ی ریاضی برخی از آن‌ها به شرح زیر است [۵].

گرمای ناشی از احتراق سوخت:

$$Q_1 = W_f + LCV \quad (2)$$

گرمای محسوس سوخت که در کوره‌های دوار به طور معمول زغال سنگ و گازوئیل می‌باشد:

$$Q_2 = W_f \times C_f \times (T_f - T_a) \quad (3)$$

گرمای محسوس مواد خام خشک:

$$Q_3 = W_m \times C_f \times (T_m - T_a) \quad (4)$$

گرمای محسوس رطوبت در مواد خام:

$$Q_4 = W_r \times (T_m - T_a) \quad (5)$$

گرمای محسوس هوای اولیه که جهت احتراق با سوخت وارد محفظه می‌شود:

$$Q_5 = A_1 \times C_a \times (T_{a1} - T_a) \quad (6)$$

گرمای محسوس هوای خنک کننده:

$$Q_6 = A_c \times C_a \times (T_{ac} - T_a) \quad (7)$$

گرمای خروجی از کوره، مجموع چند بخش از انتقال حرارت است که هر جزء در ادامه تشریح می‌شود.

$$Q_{ik} = \sum_{i=7}^{12} Q_i \quad (8)$$

گرمای محسوس مواد خام برای گرمادهی دارای شش بخش است که در ادامه آورده شده‌اند:

$$Q_7 = Q_a + Q_b + Q_c - Q_d - Q_e - Q_f \quad (9)$$

گرمای محسوس کلینکر در خروجی خنک‌کن، میزان گرمایی است که از گزینه‌های اتلاف حرارتی حاصل از پخت می‌باشد:

$$Q_8 = C_{cl} \times (T_{cl1} - T_{ca}) \quad (10)$$

گرمای محسوس گاز خروجی خنک‌کن، حرارتی که می‌توان جهت تکنولوژی تولید همزمان بکار برد:

$$Q_9 = A_s \times C_a (T_s - T_a) \quad (11)$$

گرمای نهان رطوبت در مواد خام که وارد سیکل پخت می‌شوند:

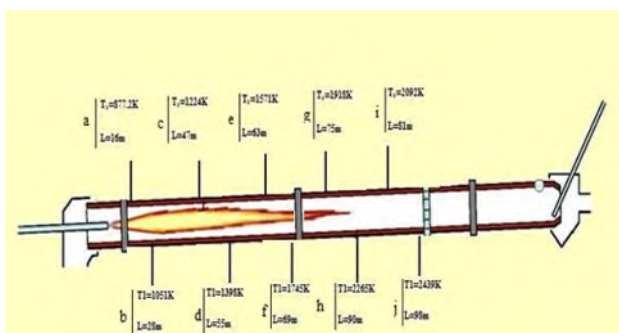


علمی معتبر قرار گرفته است. کار عمده‌ای که نرم افزار انجام می‌دهد، حل مجموعه معادلات جبری می‌باشد. همچنین این نرم افزار، قادر به حل معادلات دیفرانسیل، معادلات دارای متغیرهای مختلط، معادلات انتگرالی بوده و امکان حل مسایل بهینه‌سازی، رگرسیون خطی و غیر خطی و ترسیم نمودارها و جداول در آن وجود دارد.

اصول کار در نرم افزار به این نحو است که ابتدا بایستی مسأله مورد نظر به طور کامل تحلیل گردیده و معادلات لازم استخراج گردد. پس از استخراج معادلات بایستی آن‌ها را به زبان نرم افزار تبدیل نمود. سپس در بخش فهرست متغیرها، اسامی متغیرها و واحدهای احتمالی آنها را مرتب نمود. در صورتی که اقدامات اولیه به شکل صحیح صورت گیرد و مسأله از نظر ریاضی قابل حل باشد، برنامه قابل اجرا می‌باشد. در صورتی که برنامه در حین اجرای مسایل پیچیده به مشکل برخورد کند، بایستی مقادیری برای برخی متغیرها حدس زد و مسأله را به روش سعی و خطا حل نمود.

۲-۳ معادلات برداشت حرارت از کوره

با استحصال گاز از بخش‌های مختلف کوره و اعمال آن به سیکل تولید همزمان به تولید توان پرداخته می‌شود. آنچه در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد تأثیر برداشت گاز از کوره بر فرآیند پخت سیمان می‌باشد. آنتالپی گازهای خروجی از نقاط مختلف کوره محاسبه شده و تأثیر حذف این بخش از آنتالپی از فرآیند پخت مورد تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل ۱ شماتیک کوره جهت نقاط برداشت حرارت و کسب دمای لازم برای بکارگیری در سیستم تولید همزمان

۳-۲-۱ گرمای همراه با گازهای کوره

گرمای محاسبه شده برای نقاط مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. طبق بررسی‌ها فشار موجود در کوره در رنج مورد نیاز برای به کارگیری در سیکل تولید توان نمی‌باشد و این فشار به میزان ۵۰ میلی‌متر آب است و بسته به ویژگی‌های فیزیکی کوره معتبر می‌باشد به همین دلیل برای سیکل بخار، فشار سیال ورودی به توربین مد نظر قرار گرفته است که در تحلیل‌های انجام گرفته در شرایط مختلف بازه سیکل بررسی شده است [۷].

جدول ۱ گرمای محاسبه شده برای گازهای کوره بر مبنای دمای نقاط مختلف کوره

نقطه	فاصله از ابتدای کوره (m)	دما (K)	گرمای موجود (kJ/kg)

$$Q_{10} = W_r * r \quad (12)$$

گرمای محسوس گاز خروجی از پیش گرم کن سیکلونی که دو عامل اصلی آن بخار و گاز دی اکسید کربن می‌باشد:

$$Q_{11} = 1.24(W_r + W_{steam})C_{steam}(T_g - T_a)W_{co2}(T_g - T_a) \quad (13)$$

T_a : دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس، T_g : دمای گاز بر حسب درجه سلسیوس، W_r : محتوای رطوبت خوراک خام در طول ۲۴ ساعت، W_{steam} : جرم بخار حاصل از کائولن در طول ۲۴ ساعت، C_{steam} : گرمای ویژه بخار W_{co2} : جرم دی اکسید کربن (kg).

گرمای محسوس غبار خروجی از کوره که بسته به میزان حجم و نوع کوره مقدارش متغیر خواهد بود:

$$Q_{12} = C_d(T_g - T_a) * W_d \quad (14)$$

گرمای محسوس مواد خام برای گرمادهی تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، که برای انواع سیستم پخت می‌توان دما را بالاتر در نظر گرفت [۵]:

$$Q_a = W_m * C_m * 900 \quad (15)$$

گرما به منظور واکنش تخریب MgO ، $CaCO_3$ و کائولن:

$$Q_b = 714(CaO) + 588(MgO) + 56400Q_r \quad (16)$$

گرمای تشکیل کلینکر که در هند بوک‌های مختلف طراحی سیکل پخت ذکر شده است و گرمای به عمل آمدن کلینکر در کوره پخت می‌باشد [۵]:

$$Q_d = 418.68 \text{ kJ/kg}$$

گرمای محسوس هوای کلینکر در ۱۴۵۰:

$$Q_f = 1.11 \times 1450 \text{ kJ/kg}$$

از معادلات ذکر شده جهت تعیین میزان مصرف انرژی و تولید حرارت هر بخش و میزان اتلاف هر بخش استفاده شده و با قرار دادن دما و ویژگی‌های کوره و بخش‌های دیگر می‌توان به میزان مصرف انرژی آن دست یافت و می‌توان گفت که این معادلات به گونه‌ای موازنه انرژی در بخش‌های مختلف کوره را بیان می‌کنند.

۳-۱ مدل‌سازی

در این مقاله با در دست داشتن توزیع حرارت در کوره پخت سیمان، از نوع کوره دوار، که از منابع مورد مطالعه استخراج شده است، به بررسی و ارزیابی سیستم ترکیب حرارت و توان با دو سیکل رانکین و برایتون پرداخته می‌شود. در این مقاله به شبیه‌سازی دو سیکل ترکیب حرارت و توان یکی با محرک توربین گاز و دیگری با محرک توربین بخار پرداخته شده است. اجزای سیکل‌های مورد بررسی در ادامه نشان داده شده است. گازهای موجود در کوره با توزیع دما و فشار معلوم از سه منطقه مختلف کوره وارد سیستم می‌شود و با استفاده از نرم افزار EES، هر دو سیستم پیشنهادی تحلیل و ارزیابی ترمودینامیکی شده اند.

۳-۱-۱ نرم افزار حل کننده ی معادلات مهندسی

نرم افزار حل کننده‌ی معادلات مهندسی یک نرم افزار برنامه نویسی قوی در زمینه علوم حرارت و سیالات است که در سال‌های اخیر مورد توجه مجامع

شکل ۲ شمای نقاط برداشت حرارت از کوره به همراه ویژگی‌های نقاط جهت بررسی پختگی مواد

۱	۱۰۲	۲۷۷۰	۵۶۴۳
۲	۱۰۷	۲۶۰۰	۵۲۵۶
۳	۱۱۳	۲۳۷۰	۴۷۳۲
۴	۱۲۰	۲۰۰۰	۳۸۸۹

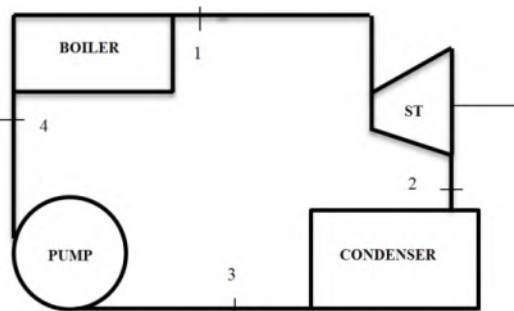
در این بخش به تحلیل اثرات برداشت گاز از نقاط تعریف شده بر پخت سیمان پرداخته می‌شود. بر این اساس، میزان انرژی برداشت شده از گاز در نقاط مختلف که در جدول ۱ نشان داده شده است از انرژی موجود برای پخت سیمان کسر شده و با انرژی لازم برای پخت مقایسه می‌شود. میزان دبی برداشت شده در هر نقطه یک چهارم دبی کل گازهای موجود فرض شده است. انرژی باقیمانده در کوره پس از استخراج یک چهارم از دبی گاز داخل کوره از نقاط نشان داده شده در شکل ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. انتخاب نقاط برای دریافت انرژی به صورت فواصل یکسان با توجه به دماهای متفاوت در طول کوره می‌باشد تا در دماهای مختلف میزان دریافت انرژی و اثر گذاری بر پخت بیشتر ملموس باشد [۷].

جدول ۳ گرمای محاسبه شده برای گازهای کوره بر مبنای دمای نقاط مختلف کوره

نقاط برداشت شده	میزان انرژی کل (kJ/kg)	انرژی باقیمانده (kJ/kg)
۱	۵۶۴۳	۴۲۳۲
۲	۵۲۵۶	۳۹۴۲
۳	۴۷۳۲	۳۵۴۹
۴	۳۸۸۹	۲۹۱۶

با توجه به نوع کوره که از دسته کوره‌های بلند و دوار می‌باشد ویژگی‌های دبی گازهای موجود در کوره ۱،۱۴۳ متر مکعب بر ثانیه و گرمای ویژه $1,495 \text{ kJ/k}^3\text{Nm}^3$ است.

۴- سیکل با توربین بخار



شکل ۳ طرحواره سیکل تولید همزمان با محرک بخار

در این بخش از معادلات پایه‌ی مربوط به یک سیکل توربین بخار به منظور تولید توان استفاده شده است. در ابتدای امر یک مرحله پردازش با شرایط اولیه که در ادامه قابل مشاهده می‌باشد صورت گرفته است، سپس با تغییر شرایط، پردازش‌های مختلفی انجام گرفته است، از قبیل این تغییرات، تغییر دمای ورودی و تاثیر آن بر بازده سیکل می‌باشد که می‌توان میزان تغییرات را در نمودارهایی که در ادامه ارائه شده است مشاهده کرد، نتایج بدست آمده نشان دهنده تطابق با نتایج کارهای صورت گرفته پیشین می‌باشد. در شکل ۳ شماتیک بخش‌های مختلف یک سیکل بخار نشان داده شده است که شامل بویلر، توربین بخار، کندانسور و پمپ بوده که در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته اند.

با داشتن دو خاصیت ترمودینامیکی از یک سیال سایر خصوصیات آن

۲-۲-۳ مصرف حرارتی تئوری لازم برای پخت کلینکر:

به منظور محاسبه مصرف حرارتی تئوری لازم جهت پخت کلینکر با استفاده از رابطه تجربی ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$q''_{theor,1} = 4.187(4.11AL_r O_r + 6.48 MgO + 7.646 CaO - 5.116 SiO_r - 0.59 Fe_r O_r)_{CL} \quad (17)$$

در این معادله ضریب ۴،۱۸۷ جهت تبدیل کالری به ژول می‌باشد و دیگر ضرایب انرژی موجود در واحد وزن می‌باشد و علامت‌های منفی نشان‌دهنده‌ی حضور این مواد در بخش واکنش‌دهنده‌های واکنش پخت است. در این رابطه، درصد جرمی اجزای مختلف کلینکر وارد شده است که در جدول ۲ برای یک آنالیز شیمیایی انجام شده، نتایج درصد‌های جرمی ارائه شده است [۷].

جدول ۲ آنالیز شیمیایی کلینکر از روی نمونه‌های متعدد [۷]

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO
6.47%	3.31%	20.89%	62.84%	2.76%

$q''_{theor,1}$ گرمای مصرفی برای تبدیل قلیایی‌ها به سولفات، که می‌توان آن را با براساس میزان قلیا یا گوگرد محاسبه نمود (در اینجا: گوگرد) اضافه می‌شود:

$$q''_{theor,2,s} = -83.74(SO_r - SO_r \times m) \quad (18)$$

$SO_r = 1.19\%, SO_r = 25\%$

گرمای داده شده سوخت به مواد:

$$q'_{Br,Chem} = m_{Br} \times Q_i \quad (19)$$

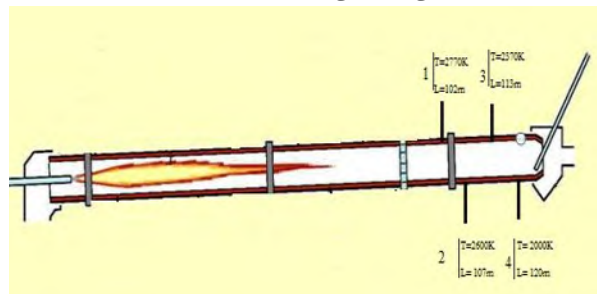
ارزش حرارتی سوخت: $Q_i = 41188 \text{ kJ/kg}$

حجم گازهای عبوری از هر قسمت از کوره که با دماهای مختلفی هستند می‌توان با رابطه ۲۰ محاسبه کرد:

$$V_{gas} = \frac{V_{n,gas} \times P_n \times (273.15 + T_{gas})}{(273.15 \times (P_{amb} - P_{gas}))} \quad (20)$$

در رابطه ۲۰:

$V_{n,gas}$: حجم گازهای خروجی از دودکش (نرمال متر مکعب در ساعت)،
 V_{gas} : حجم گاز در شرایط مورد نظر (متر مکعب در ساعت)، P_n : فشار نرمال (۱۰۳۳۲،۳۲۷ میلیمتر آب)، P_{amb} : فشار محیط (۸۶۶۶،۹۱۹ میلیمتر آب)، P_{gas} : فشار مکش گاز (میلیمتر آب)، T_{gas} : دمای گاز در نقطه مورد نظر (درجه سانتی گراد) می‌باشد.



به همین ترتیب ویژگی‌های نقاط مختلف سیکل بدست آمده است. سپس با استفاده از معادلات ۲۷ تا ۳۹ به محاسبه‌ی میزان حرارت دفع شده و بازده سیکل پرداخته شده است و در ازای ورودی‌های مختلف بازده سیکل مورد بررسی قرار می‌گیرد [۸]. فشار اعمالی از طرف کمپرسور به سیال در پردازش اولیه شش برابر اتمسفر در نظر گرفته شده است و نسبت فشار متناسب با مراجع معتبر تغییر کرده تا تاثیرات آن روی بازده نشان داده شود.

$$R_p = \frac{P_r}{P_1} \quad (27)$$

$$T_r = T_1 \times R_p^{2.857} \quad (28)$$

$$T_f = T_r \div R_p^{2.857} \quad (29)$$

$$P_f = R_r \div R_p \quad (30)$$

$$W_{com} = H_r - H_1 \quad (31)$$

$$W_{tur} = H_f - H_r \quad (32)$$

$$Q_H = H_r - H_f \quad (33)$$

$$Q_L = H_f - H_d \quad (34)$$

$$\eta = (W_{tur} - W_{com}) \div Q_H \quad (35)$$

$$\eta_{E-Elec} = \frac{W_{Elec}}{Q_{Fuel}} \quad (36)$$

$$\eta_{generator} = \frac{W_{Elec}}{Q_{Fuel}} \quad (37)$$

$$W_{GT} = m_G \int_{T_4}^{T_5} C_{PG}(T) dT \quad (38)$$

از جداول ترمودینامیکی قابل استخراج است. این امر توسط بانک اطلاعاتی نرم افزار انجام می‌شود. به همین ترتیب ویژگی‌های نقاط مختلف سیکل بدست آمده است. سپس با استفاده از معادلات ۲۱ تا ۲۶ به محاسبه‌ی میزان حرارت دفع شده و بازده سیکل پرداخته و در ازای ورودی‌های مختلف بازده سیکل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\eta = (W_T - W_P) / Q_H \quad (21)$$

$$Q_{Fuel} = \sum_j Q_{Fuel,j} \quad (22)$$

$$Q_H = H_1 - H_f \quad (23)$$

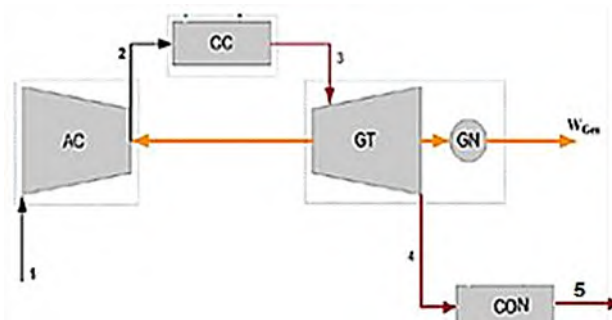
$$W_T = H_1 - H_r \quad (24)$$

$$Q_L = H_r - H_f \quad (25)$$

$$W_P = H_f - H_r \quad (26)$$

۵- سیکل با توربین گازی

در این بخش از معادلات پایه‌ی مربوط به یک سیکل توربین گاز جهت تولید توان توسط حرارت دریافتی از کوره استفاده شده است. ابتدای امر یک پردازش با شرایط نشان داده شده در شکل ۱ نقطه a صورت گرفته است و سپس با تغییر شرایط و استفاده از نقاط مختلف کوره که به منظور دریافت حرارت مورد نیاز سیکل انتخاب شده اند، پردازش‌های بعدی صورت گرفته اند، از قبیل این تغییرات، تغییر دمای ورودی و فشار و تاثیر آن بر بازده سیکل می‌باشد که می‌توان میزان تغییرات را در نمودارهایی که ارائه شده است مشاهده کرد، در ادامه نشان داده می‌شود که نتایج بدست آمده با نتایج حاصل شده از کارهای پیشین تقارب خوبی را دارا می‌باشد.



شکل ۴ طرحواره سیکل تولید همزمان با محرک گاز

در شکل ۴ طرحواره سیکل تولید همزمان با محرک گاز نشان داده شده است که شامل کمپرسور، مبدل حرارتی، توربین گازی، کندانسور و ژنراتور می‌باشد و در نرم افزار، مورد بررسی قرار گرفته است.

نقطه ورودی کمپرسور، نقطه‌ی اول (اولین مرحله از سیکل که پردازش اطلاعات از بخش مذکور شروع می‌شود) سیکل مورد بررسی می‌باشد که دلیل انتخاب این نقطه، تطابق و شباهت با کار تحقیقاتی انجام شده پیشین می‌باشد و وارد سیکل گازی شده است.

با داشتن دو خاصیت ترمودینامیکی از یک سیال خاصیت‌های دیگر آن را از جداول ترمودینامیکی می‌توان استخراج کرد که این عمل و محاسبات آن را نرم افزار معرفی شده انجام می‌دهد.



(۳۹)

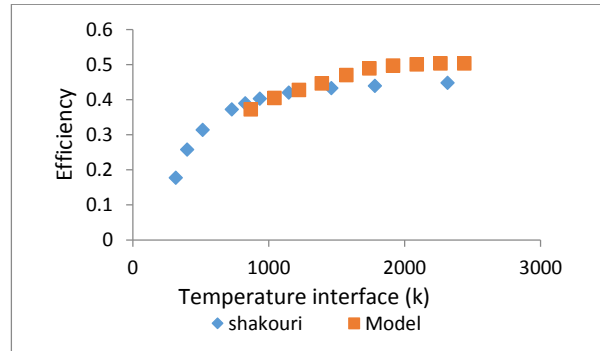
$$W_{AC} = m_{air} \int_{T_1}^{T_2} C_{Pair}(T) dT$$

تغییر می کند.

در جدول ۵ میزان خطای میانگین مدل حاضر با نتایج مدل نجار محاسبه شده است.

۶- اعتبارسنجی

در مقاله علی شکوری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳، می توان تأثیر دمای ورودی توربین را در بازده توربین و کل سیکل مشاهده کرد که شکل ۵ بازگو کننده این نتیجه است و تقارب مناسبی با نتایج بدست آمده دارد.

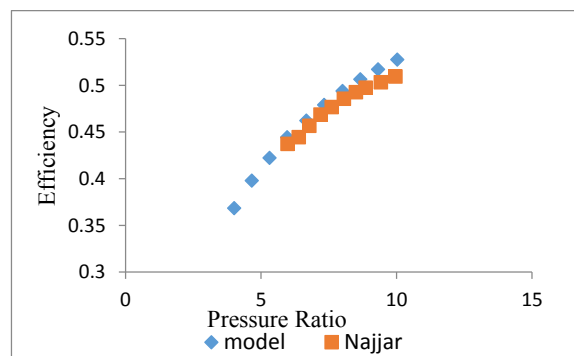


شکل ۵ نمایش تقارب بازدهها در دماهای مورد نظر با سیکل بخار شکوری [۱۰]

در شکل ۵ مشاهده می شود که مدل مورد تحقیق که بازده دمایی آن بر اساس کمترین و بیشترین دمای گازهای داخل کوره است، تطابق نسبی با مدل شکوری دارد و در جدول ۴ میزان خطا محاسبه شده است.

جدول ۴ محاسبه بیشینه خطا در فشار یکسان کاری سیستم ها

فشار ورودی	مقدار بازده مدل شکوری	مقدار بازده مدل	میزان خطا
۳۰۰ کیلوپاسکال	۰/۴۶	۰/۵	۸/۱۶



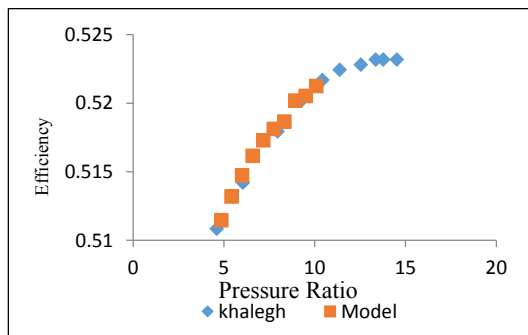
شکل ۶ نمایش تقارب بازده های مدل حاضر در نسبت های فشار مختلف با مدل نجار [۸]

در مقاله شکوری نیز توان تولیدی توسط سیکل رانکین ایجاد می شود و بیشترین دمای موجود در سیکل ۹۰۰ درجه کلوین می باشد که بیشترین بازده در ۷۰۰ درجه کلوین صورت می گیرد. برای اعتبارسنجی تکنولوژی ترکیب حرارت و توان با بکارگیری از توربین گاز نیز شکل ۶ نشان دهنده صحت بررسی های انجام گرفته می باشد که آقای نجار [۸] در مقاله خود در سال ۱۹۹۵ نشان داده است که با افزایش نسبت تراکم، بازده حرارتی چگونه

جدول ۵ محاسبه بیشینه خطا در دمای یکسان کاری سیستم ها (بین مدل حاضر و مدل نجار [۸])

دما	مقدار مدل نجار	مقدار مدل حاضر	میزان خطا
۱۴۰۰ کلوین	۰/۵۳	۰/۵۱	۴٪

در سیستم نجار سیکل تولید توان، سیکل برایتون است که ماکسیمم دمای ایجاد شده ۱۴۰۰ درجه کلوین است و همچنین از حرارت اتلافی برای تولید حرارت مورد نیاز چیلرهای جذبی در سیستم تهویه مطبوع استفاده می شود.



شکل ۷ نمایش تقارب بازده های مدل حاضر در نسبت های فشار مختلف با مدل عبدالخالق و همکاران [۱۱]

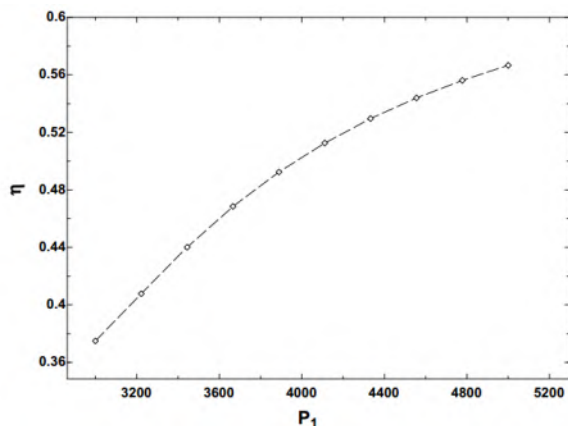
در ادامه بررسی عبدالخالق و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۱ پس از تولید توان توسط توربین گاز حرارت بازممانده برای تولید خوراک چیلرهای جذبی مورد استفاده قرار می گیرد و همچنین هوای ورودی را نیز پیش گرم می کند، برای یک سیکل با توربین گازی در دمای ۱۵۰۰ درجه کلوین بازده سیکل در شکل ۷ نمایش داده شده است که با نتایج بدست آمده مطابقت دارد. در جدول ۶ میزان خطای میانگین مدل حاضر با نتایج مدل عبدالخالق و همکاران محاسبه شده است [۱۱].

جدول ۶ محاسبه بیشینه خطا در دمای یکسان کاری سیستم ها (بین مدل حاضر و مدل عبدالخالق و همکاران [۱۱])

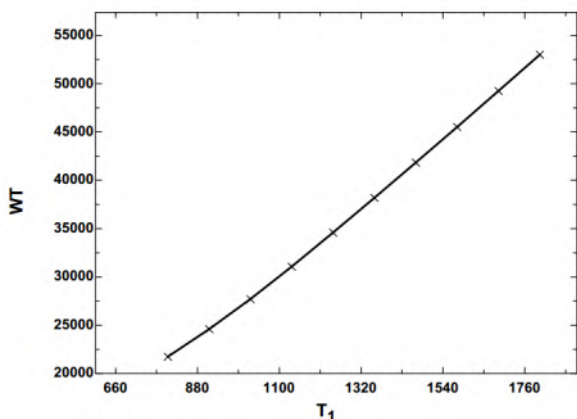
دما	مقدار مدل خالق	مقدار مدل حاضر	میزان خطا
۱۵۰۰ کلوین	۰/۵۱۵	۰/۵۱۳	۳/۵٪

در مقاله عبدالخالق سیستم تولید توان سیکل برایتون بوده و علاوه بر تولید توان توسط مولد (ژنراتور) حرارت اتلافی توسط یک بازیاب، بازیابی شده و برای تولید خوراک سیستم به کار برده می شود. بررسی ها نشان می دهد عملکرد سیستم تا حد زیادی به دو پارامتر نسبت فشار کمپرسور و دمای ورودی توربین بستگی دارد. آنالیز انرژی نشان داد افزایش دمای ورودی





شکل ۹ تغییرات بازده با تغییرات فشار در دمای ورودی ۷۲۳ درجه کلونین با توجه به شکل ۹ که بر حسب بازده و فشار ورودی به توربین مد نظر است، کمترین دمای کوره در نقاط ابتدایی ۷۲۳ درجه کلونین، که دمای مد نظر تحقیق در خصوص تغییرات بازده با فشار است، تغییرات صورت گرفته تحت تأثیر افزایش دما در کوره است و با توجه به حداقل دما، سیال سوپرهیت می‌باشد، مشاهده می‌شود که بازه فشاری مربوطه بین ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد که با شیب بیشتری نسبت به انتهای نمودار شروع شده و بازده رابطه مستقیمی با فشار ورودی داشته است. به دلیل این که در این سیکل سیال مورد نظر بخار است، افزایش فشار باعث تحرک بیشتر و در نتیجه افزایش کار و بازده می‌شود.



شکل ۱۰ تأثیرات دما بر کار توربین

در شکل ۱۰ سیستم مورد نظر سیکل بخار است و در بخش ورودی به توربین، سیال مورد نظر بخار است که در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، براساس سیکل بخار میزان کار توربین با تغییرات دما را در فشار ورودی ۳۰۰ کیلو پاسکال می‌توان مشاهده کرد که تقریباً با شیب ثابتی با افزایش دما، افزایش می‌یابد و نشان دهنده‌ی رابطه مستقیم دمای ورودی و کار تولیدی است. دمای مورد نیاز از کوره بدست می‌آید که دماهای بالاتری نیز در کوره دیده می‌شود.

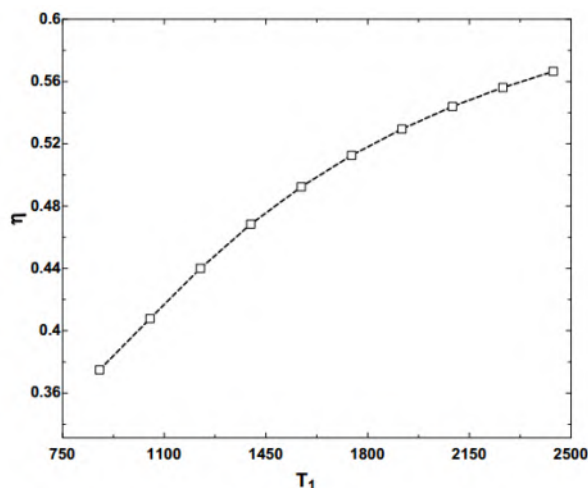
۷-۲- سیکل با توربین گازی

در اشکال ۱۱ تا ۱۷ تغییرات سایر پارامترها را در این سیکل و تأثیرشان در بازده کلی سیکل را نشان می‌دهند.

توربین تا حد مجاز برای عملکرد سیکل مناسب است، بدین گونه که افزایش دمای ورودی توربین راندمان الکتریکی، انرژی و حرارتی سیکل را افزایش می‌دهد (برای هر دو سیکل) ولی برای نسبت فشار کمپرسور متفاوت است. بدین گونه که بسته به نوع نیاز ما از سیکل می‌توان آن را تغییر داد، بدین صورت که اگر نیاز سیکل به تولید برق بیشتری باشد می‌توان با کاهش نسبت فشار کمپرسور راندمان الکتریکی سیکل را افزایش داد ولی اگر نیاز ما از سیکل به تولید گرمای بیشتر و مصارف حرارتی باشد برای بالا بردن راندمان حرارتی، نسبت فشار کمپرسور را افزایش داد (توربین گازی)، همچنین وجه تمایز بررسی صورت گرفته، مقایسه دو سیستم با هم در صنعت سیمان است و امکان‌سنجی برداشت حرارت برای خوراک سیستم تولید توان انجام شده است که از جمله نوآوری‌های صورت گرفته در این مقاله می‌باشد.

۷- بحث و بررسی نتایج

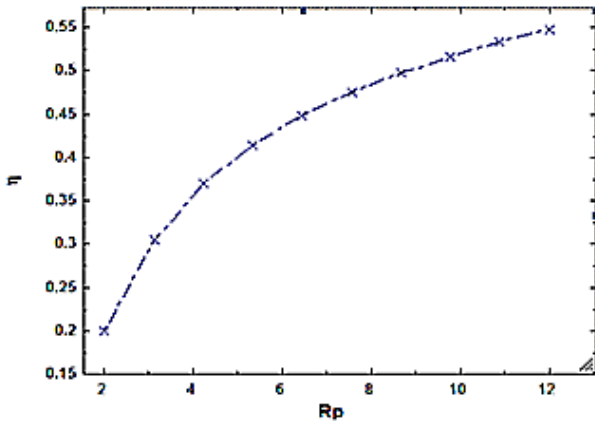
۷-۱- سیکل با توربین بخار



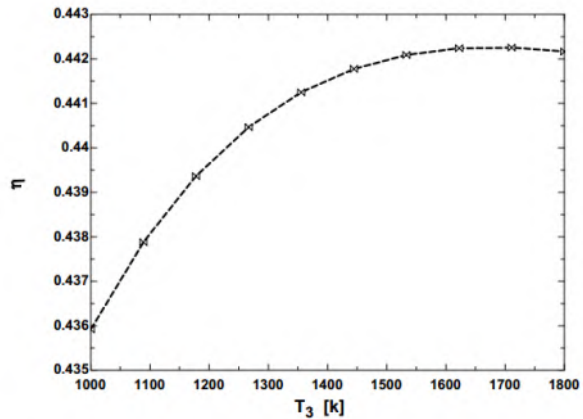
شکل ۸ نمودار تأثیرات دمای ورودی بر بازده سیکل بخار در فشار ورودی ۳۰۰ کیلو پاسکال

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بازه دمایی تحلیل سیکل از ۷۲۳ درجه کلونین تا ۲۵۰۰ درجه کلونین می‌باشد که با افزایش دما مشاهده می‌شود که بازده سیکل افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در ابتدا شیب زیادی داشته و بعد از دمای ۱۸۰۰ درجه کلونین کمی از این شیب کاسته می‌شود و دلیل این امر افزایش آنتالپی در اثر افزایش دما و در نتیجه افزایش کار، که این روند تا حد معلومی ادامه دارد و از آن به بعد هر چقدر دما افزایش پیدا کند آنتالپی تغییر زیادی نخواهد کرد.

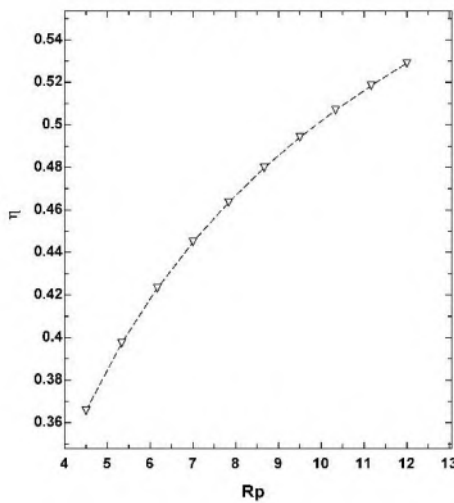




شکل ۱۳ تأثیر تغییرات نسبت فشار بروی بازده در دمای ورودی توربین ۱۰۰۰ کلوین

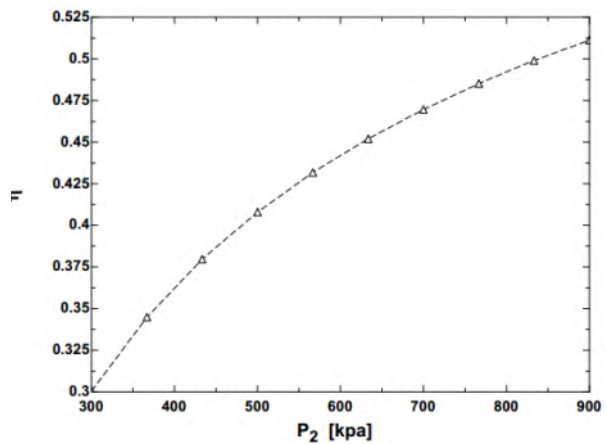


شکل ۱۱ تأثیرات دما بر روی بازده در فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال در ورودی کمپرسور (ورودی سیکل تولید توان) با نسبت فشار ۶

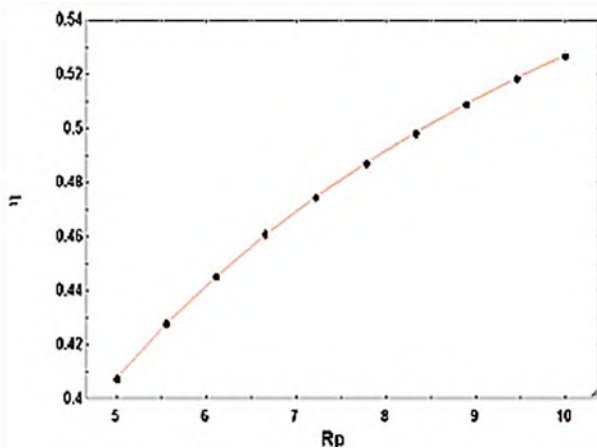


شکل ۱۴ تأثیر تغییرات نسبت فشار بروی بازده در دمای ورودی توربین ۱۴۰۰ کلوین

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود T_3 بیانگر دمای سیال ورودی به توربین است، میزان دماهای ران گرفته شده با توجه به نوع سیکل بیشتر از سیکل بخار است و حتی بازده‌های بدست آمده نیز بالاتر است که در عمل هم این نوع نتایج معقول است. دلیل بالا بودن بازده سیکل تولید توان با محرک بخار آن است که ضریب انبساط بخار بیشتر از هوا است و توربین‌های گازی در بازه دمایی پایین تری نسبت به توربین‌های گازی می‌توانند فعالیت کنند که باعث می‌شود در بازه دمایی کوره ما سیکل بخار ما شرایط بهتری داشته باشد.



شکل ۱۲ تأثیرات فشار ورودی (کیلو پاسکال) بر روی بازده سیکل همچنین شکل ۱۲ نشان‌دهنده‌ی افزایش بازده سیکل تحت تأثیر فشار ورودی به محفظه احتراق یا همان مبدل حرارتی که باعث افزایش دمای سیال سیکل که هوا است، می‌شود و این تغییرات در دمای ۸۷۷ درجه‌ی کلوین صورت گرفته است که دمای اولین نقطه در بین نقاطی است که برای برداشت حرارت استفاده شده است و دلیل انتخاب این نقطه آن است که میانگینی از دماهای اولیه است که در کارهای انجام شده پیشین برای تولید توان در این نوع سیکل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۵ تأثیر تغییرات نسبت فشار بروی بازده در دمای ورودی توربین ۱۵۰۰ کلوین

در اشکال ۱۳، ۱۴، ۱۵، تحلیل‌هایی براساس نسبت فشار صورت گرفته است. R_p بیانگر نسبت فشار است، دمای ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ دمای ورودی به



دریافت می‌شود کمتر است و مزیت دیگر اضافه شدن بازیاب به این سیستم آن است که دمای سیال خروجی از سیستم در بهترین حالت، دمای محیط است.

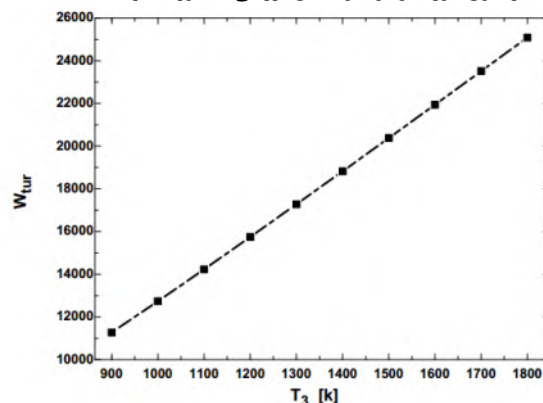
۸- جمع بندی

پس از انجام مطالعات گسترده و یافتن ترم‌های ورودی و خروجی به سیستم کوره در حجم کنترل مشخص شده و با به‌کارگیری معادلات حرارتی در سیستم پخت نتایج جدول ۷ بدست آمد:

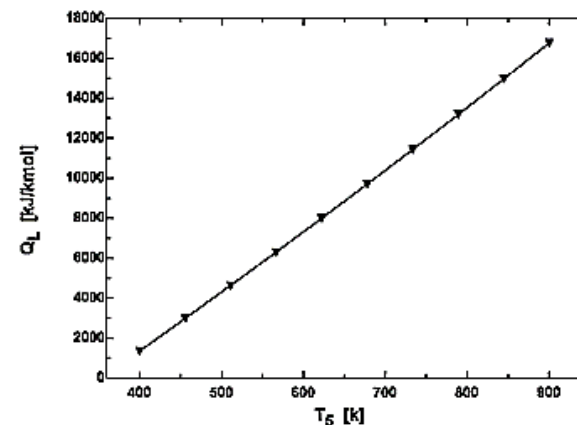
جدول ۷ محاسبات انرژی‌های ورودی و خروجی به کوره مورد بررسی		
انرژی خروجی KJ/Kg.cl	انرژی ورودی KJ/Kg.cl	مواد مختلف اندازه گیری
	۳۰۵	انرژی هوای اولیه مشعل کوره
	۳۲۹۵	انرژی ناشی از احتراق کوره
۵۵۶,۴		انرژی محسوس موجود در کلینکر
۱۶۷۴		انرژی پخت کلینکر (Reaction)
۳۸۸۹		گاز خروجی کوره

با مشاهده نمودارهای تغییرات بازده در اثر تغییرات دما و تغییرات کار تولیدی در اثر افزایش دمای ورودی توربین به این نتیجه می‌توان رسید که دمای ۲۷۷۰ درجه‌ی کلین بیشترین بازده را برای سیکل تولید توان ما با محرک بخار ایجاد می‌کند و با قرار دادن این دما در معادله میزان گرمای گاز در نقطه مورد نظر، میزان کاهش انرژی برای پخته شدن مواد کوره را محاسبه کرد که با محاسبه گرمای گاز خروجی به مقدار ۴۲۳۲ kJ/kg کلینکر بدست می‌آید و با برداشت پنجاه درصد این مقدار با توجه به جدول بدست آمده در بالا، هم مواد مورد نظر در کوره به میزان پخت رسیده شده‌اند و هم حرارت دریافتی برای سیستم تولید همزمان استفاده می‌شود. زیرا در این دما طبق توزیع حرارتی گازهای داخل کوره، در این نقطه از طول کوره محصولات حرارت لازم برای فرآوری را دریافت کرده‌اند و در بخش کولر گرمای کمتری اتلاف می‌شود که این مبحث هم از اهداف کاهش اتلاف انرژی بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده شد که به‌کارگیری سیکل بخار نسبت به سیکل گازی عملکرد بهتری در استفاده از حرارت اتلافی در طول کوره پخت سیمان داشته است، دلیل برتری به‌کارگیری سیکل بخار می‌توان بیان کرد این است که طبق نتایج بدست آمده کار توربین بخار با توجه به دمای گازهای خروجی یکسان از کوره، بیشتر از توربین گازی است و این امر باعث می‌شود که سیکل مورد نظر در دمای پایین تری کار کرده و بازده بیشتری از خود نشان دهد و احتمال ناقص شدن مرحله پخت کمتر می‌شود. در این بررسی محدودیت‌ها عبارتند از دمای خروجی، دمای ورودی به توربین، نسبت فشار کمپرسور، بازده آیزنتروپیک کمپرسور و بازده آیزنتروپیک توربین که دمای خروجی باید به گونه‌ای باشد که مراحل پخت سیمان به طور کامل صورت گرفته باشد و دمای ورودی توربین نیز باید به گونه‌ای باشد که بازده معمول سیکل ترکیب حرارت و توان را تأمین نماید و مقدار کمپرسور نیز باید به نحوی باشد که بازده کل سیکل قابل قبول باشد.

توربین بعد از محفظه احتراق یا همان میدل حرارتی است که باعث گرم شدن سیال کاری که هوا است، می‌شود. تحلیل سیکل گازی به این صورت بوده که به دلیل فشار کم خروجی از کوره یک کمپرسور در سیکل قرار گرفته است و همچنین در بیشتر مطالعات پژوهشی از این پارامتر برای سنجش عملکرد سیکل استفاده شده است، بنا به همین دلایل در سه دمای اصلی که در طول کوره موجود بوده این بررسی‌ها صورت گرفت.



شکل ۱۶ تأثیر دمای ورودی بر کار توربین



شکل ۱۷ تأثیر دمای سیال خروجی بر روی گرمای خارج شده از کندانسور

از اشکال ۱۶ و ۱۷ می‌توان میزان کار انجام شده به ازای تغییرات دما و میزان گرمای خارج شده از کندانسور سیکل گازی که می‌توان جهت مصرف-های تهویه مطبوع استفاده کرد را مشاهده نمود. با استفاده از نرم افزار دمای ده نقطه از کوره پخت سیمان استخراج شده است و با نسبت‌های فشار مختلف برای توربین گازی و توزیع فشار مختلف برای توربین بخار اعمال شده و این دماها برگرفته از خود کوره سیمان است. در تولید توان با محرک گازی (برایتون) با توجه به این که بازه دمایی ورودی به سیستم گسترده است سیال خروجی نیز تحت تأثیر این مهم قرار گرفته و دمای خروجی متفاوتی را می‌توان مشاهده کرد که در کندانسور فرض شده است فشار تقریباً ثابت باشد و در شرایطی سیال با کمترین و بیشترین دمای خود وارد شود با بازه مشخص شده در شکل ۱۷ خارج می‌شود. حال با قرار دادن بازیاب حرارتی به گونه‌ای که سیال ورودی به محفظه احتراق همان مبدلی است که سیال مورد نظر توسط گازهای حاصل از احتراق درون کوره گرم می‌شود، پیش گرم شود، می‌توان مشاهده کرد که بازده سیکل ۴ الی ۱۰ درصد بنابر میزان دمایی که سیال پس از خروجی از توربین خواهد داشت (که این مهم هم وابسته به گازهای دریافتی از کوره است) قابل افزایش می‌باشد و این مقدار نیز از حداکثر بازده توربین بخار در شرایط دمایی یکسان که از کوره



[4] A. Amiri and M. R. Vaseghi, *Waste heat recovery power generation systems for cement production process*, Cement Industry Technical Conference (CIC), Shiraz, 2013.

[5] M.G. Rasul, W. Widianto, B. Mohanty; *Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia*, Applied Thermal Engineering 25, pp. 2950-2965, 2005

[6] H. SPANG., *A Dynamic Model of a Cement Kiln*, ELSEVIER, vol. 8, pp. 309-323, 1972.

[7] [۷] بکایی، هند بوک کوره دوار پخت سیمان.

[8] Y. S. Najjar, *Enhancement of performance of gas turbine engines by inlet air cooling and cogeneration system*, Applied Thermal Engineering, vol. 16, pp. 163-173, 1996.

[9] EES Lbrary.

[10] K. Yazawa, Y. Rui Koh and A. Shakouri, *Optimization of thermoelectric topping combined steam turbine cycles for energy economy*, Applied Energy, vol. 109, pp. 1-9, 2013

[11] A. Khaliq and I. Dincer, *Energetic and exergetic performance analyses of a combined heat and power plant with absorption inlet cooling and evaporative aftercooling*, Energy, vol. 36, pp. 2662-2670, 2011.

[12] F. Rossi and D. Velázquez, *A methodology for energy savings verification in industry with application for a CHP (combined heat and power) plant*, Energy, vol. 89, pp. 528-544, 2015.

نتایج نشان می‌دهد که با توجه به صرف نظر از افت‌ها و بازگشت ناپذیری‌ها در سیکل، مقدار بدست آمده از بازده نزدیک به انتظارات بوده است.

۹- فهرست علائم

C_{cl}	گرمای ویژه ی کلینکر (kJ/kg K)
T_{cl1}	دمای کلینکر در ورودی خنک کن (°C)
A_s	حجم گاز خروجی از خنک‌کن (m ³)
m_d	تولید کلینکر در ساعت (t/h)
T_{ks}	دمای سطح کوره (°C)
w_f	مصرف سوخت به ازای یک کیلوگرم کلینکر (kg)
w_m	جرم خوراک خام خشک به ازای یک کیلوگرم کلینکر (kg)
w_r	محتوای رطوبت خوراک خام (kg)
LCV	ارزش کالری پایین تر (kJ/kg)
C_f	گرمای ویژه سوخت (kJ/kg K)
T_f	دمای سوخت (°C)
T_a	دمای محیط (°C)
T_m	دمای مواد خام (°C)
T_{a1}	دمای هوای اولیه‌ی پیش گرم شده (°C)
T_{ac}	دمای هوای پیش گرم شده (°C)
A_1	هوای اولیه ی ورودی به ازای یک کیلوگرم کلینکر (kg)
A_c	جرم هوای خنک کننده به ازای یک کیلوگرم کلینکر (kg)
p	فشار (kgm ⁻¹ s ⁻²)
p_r	عدد پراتل
u_j	سرعت (ms ⁻¹)
T	دما (K)

۱۰- مراجع

[1] E. Tahsin and V. Ari, "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems," ELSEVIER, vol. 46, no. Energy Conversion and Management, pp. 551-562, 2005.

[۲] حسین افشار باقری، طاهره رحیمی، آرمان کاظمی، بازیافت حرارتی گازهای خروجی، کوره های سیمان و تولید انرژی الکتریکی، ششمین همایش ملی انرژی، خرداد ۱۳۸۶.

[۳] سعید اکبرزاده عمران، کارشناس مکانیک جامدات، کارشناس برق الکترونیک، کارشناس ارشد برق قدرت، کارشناس ارشد پژوهش منطقه ۹ عملیات انتقال گاز ایران، بهینه سازی مصرف انرژی و بازیافت انرژی در صنعت سیمان با استفاده از میکروتوربین های CHP، دومین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست، آبان سال ۱۳۹۲.

