

## تحلیل یک سیکل تولید همزمان توان و تبرید بر اساس یک تقاضای مشخص

### در یک ساختمان با شرایط اقلیمی خاص

آرین بوی‌افراز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، aryan\_boyafraz@hotmail.com

شیوا صادقی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، shiva\_sadeghi@outlook.com

\* عبدالکریم فخاری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، farnamfakhari@yahoo.com

ابوالقاسم اسماعیلی، مدیر گروه دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، kea1504874@yahoo.com

ساناز مشهدی‌زاده کیوج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، sanaz.msh.k@gmail.com

### چکیده

با توجه به اهمیت روزافزون منابع انرژی و بالا رفتن تقاضا در بخش سرمایه‌گذاری، لزوم به‌کارگیری سیستم‌های با راندمان بالاتر بیش از پیش احساس می‌شود. سیستم‌های تولید همزمان توان و تبرید می‌تواند نقش موثری در کنترل مصرف انرژی داشته باشد. در کار حاضر یک سیستم تولید همزمان توان و تبرید برای تامین یک تقاضای سرمایه‌گذاری مشخص ارائه شده است. با تحلیل انرژی‌تیک و انرژی‌تیک سیستم به طور پویا و بر اساس تقاضای تعریف شده در طول روز و ارائه یک تحلیل کامل در مورد امکان به‌کارگیری سیستم مورد بحث برای تامین تقاضای تعریف شده تصمیم‌گیری می‌شود. نتایج نشان داد که سیستم ارائه شده قابلیت تامین نیاز سرمایه‌گذاری و توان الکتریکی با راندمان تولید همزمان نه چندان مناسب در طول روز (به طور میانگین ۰.۲۱ در طول روز) و راندمان انرژی بالا (به طور میانگین ۰.۶۸ در طول روز) را دارد.

**کلمات کلیدی:** تولید همزمان، تبرید افشانکی، تحلیل انرژی، تقاضای سرمایه‌گذاری

### مقدمه

با توجه به محدود بودن منابع انرژی فسیلی و اهمیت روز افزون انرژی در کشور، سیستم‌های تولید همزمان<sup>۱</sup> با هدف استفاده حداکثری از سوخت مصرف شده، مورد توجه قرار گرفته است. پس از ارائه سیستم‌های تولید همزمان توان و گرمایش و ورود آن‌ها به بازار، سیستم‌های تولید همزمان توان و سرمایه‌گذاری هم با پیشرفت‌هایی که داشته‌اند می‌توانند در صورت به‌کارگیری درست، نقش مهمی در بهبود توزیع و مصرف انرژی الکتریکی ایفا کنند.

در سال ۲۰۰۰ یک چرخه ترکیبی توان و تبرید، توسط ژو و همکارانش [۱] ارائه شد و تحقیقات بیشتری توسط افراد مختلفی چون حسن و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۲، گوسوامی و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۴، تام و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۴، ایدال و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۶، ویجایارقوان و گوسوامی [۶] در سال ۲۰۰۶، مارتین و گوسوامی [۷] در سال ۲۰۰۶، صدرعاملی و گوسوامی [۸] در سال ۲۰۰۷ انجام شد. ژنگ و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۶ یک چرخه ترکیبی توان و تبرید بر پایه چرخه کالینا<sup>۲</sup> ارائه کردند. فلاش تانک چرخه کالینا با یک همسوکننده<sup>۳</sup>

جایگزین شده بود که باعث بالا رفتن بیشتر تمرکز بخار آب-آمونیاک چرخه تبرید می‌شد. یک چگالنده و یک تبخیرکننده بین همسوکننده و جاذب دوم تعبیه شد. لیو و ژانگ [۱۰] در سال ۲۰۰۷ یک چرخه جدید آب-آمونیاک برای سیستم تولید همزمان توان و تبرید ارائه کردند. تفاوت سیستم ارائه شده توسط آنها با انواع قبلی در یک واحد تفکیک/جذب جدید بود. ژانگ و لیو [۱۱] در سال ۲۰۰۷ یک سیستم آب-آمونیاک جدید را نیز برای سیستم تولید همزمان توان و تبرید معرفی کردند. در این سیستم یک چرخه رنگین آب-آمونیاک و یک چرخه تبرید آمونیاک به طور موازی توسط جاذب، تفکیک‌کننده و تجهیزات انتقال حرارت متصل شده‌اند. ژانگ و لیو [۱۲] همچنین چندین سیستم ترکیبی توان و تبرید با سیال عامل آب-آمونیاک را ارائه کردند و برای نحوه اتصال سیستم‌های تولید همزمان توان و تبرید، با هدف بالا بردن راندمان انرژی و انرژی به ارائه راهکارهایی پرداختند. وانگ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۸ یک چرخه تولید همزمان توان و تبرید که چرخه رنگین و تبرید جذبی ترکیب شده بود را معرفی کردند. پس از آن نیز تحقیقات زیادی در مورد چرخه‌های تولید همزمان توان و تبرید انجام شد که اغلب آنها ترکیب چرخه رنگین یا کالینا با چرخه جذبی بوده است و کمتر پژوهش‌هایی در مورد ترکیب چرخه‌های رنگین و تبرید افشانکی انجام شد. الکسیز [۱۴] در سال ۲۰۰۷ در مورد سیستم‌های تولید همزمان توان و تبرید با چرخه تبرید افشانکی مطالعاتی انجام داد. این چرخه از بخار استخراجی از توربین بخار برای گرم کردن سیال عامل چرخه تبرید افشانکی در یک چرخه مستقل استفاده کرد. چرخه تبرید افشانکی که پژوهش‌های متعددی در مورد آن انجام شده است [۱۵-۲۲]، راندمان پایین‌تر آن نسبت به انواع دیگر در مقابل مزایای مهمی چون اعضای متحرک کمتر و سادگی طرح، هزینه نصب و نگهداری پایین قابل چشم‌پوشی است. همچنین چرخه تبرید افشانکی امکان استفاده از سیال‌های عامل مختلفی را دارد. استفاده از انرژی گرمایی به طور مستقیم برای راه‌اندازی چرخه تبرید افشانکی به جای انرژی الکتریکی در چرخه‌های دیگر، این چرخه را گزینه مناسبی برای به‌کارگیری در سیستم‌های تولید همزمان کرده است.

همان‌طور که توضیح داده شد بررسی‌های گوناگونی روی سیکل‌های تولید همزمان توان و تبرید متنوعی انجام شده است. نکته‌ای که آن‌چنان مورد توجه نبوده است، اهمیت تقاضای توان و تبرید به عنوان مبنای تحلیل یک

<sup>1</sup> Cogeneration

<sup>2</sup> Kalina Cycle

<sup>3</sup> Rectifier

جدول ۱ مشخصات تجهیزات و مفروضات

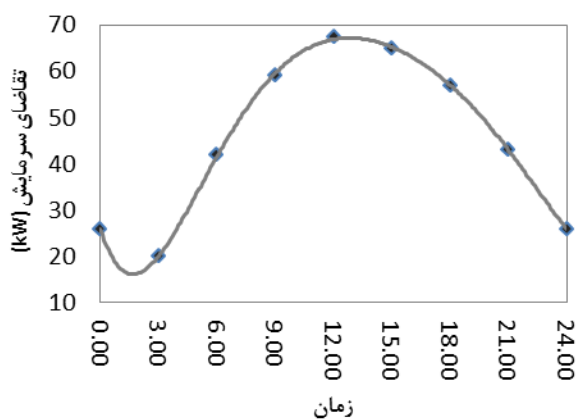
۰,۱۰۱۳۵	فشار ورودی توربین بخار (MPa)
۱۳۰	دمای ورودی توربین بخار (°C)
۰,۲۸۳	فشار در خروجی میانی توربین بخار (MPa)
۳۶	دمای چگالنده (°C)
۸	دمای تبخیرکننده (°C)
۹۰	راندمان نازل افشانک (%)
۸۵	راندمان محفظه اختلاط افشانک (%)
۸۵	راندمان دیفیوزر افشانک (%)

تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم مورد نظر بر اساس تقاضای تعریف شده در شکل ۲ به صورت پویا، در طول یک شبانه روز انجام می‌شود. همچنین توان مورد نیاز حداقل ۷۵ kW بوده که امکان فروش توان اضافی به شبکه وجود دارد. تحلیل بر مبنای تقاضای سرمایه‌ی تعریف شده صورت می‌گیرد و با توجه به ظرفیت توربین به کار رفته توان تولیدی تابع تقاضای سرمایه‌ی می‌باشد.

### تئوری مساله و معادلات

روابط مربوط به تحلیل چرخه تبرید افشانکی در ادامه آورده شده است. پایستگی انرژی در قسمت اختلاط افشانک طبق رابطه (۵) ارائه شده است.

$$(m_2 + m_{10})h_4 = m_{10}h_{10} + m_2h_2 \quad (1)$$



شکل ۲ نمودار تقاضای تبرید در طول روز

پایستگی تکانه در قسمت اختلاط افشانک طبق رابطه (۲) آورده شده است.

$$(m_2 + m_{10})c_m = m_{10}c_e + m_2c_2 \quad (2)$$

نسبت دبی جرمی در افشانک از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد [۲۳].

$$\omega = \frac{m_{10}}{m_2} = \sqrt{\eta_n \eta_m \eta_d \frac{h_2 - h_{n,s}}{h_{d,s} - h_m}} - 1 \quad (3)$$

از پایستگی انرژی، روابط (۴) تا (۸) برای اجزای مختلف سیستم شامل تبخیرکننده، توربین بخار و دیگر اجزا به دست می‌آید.

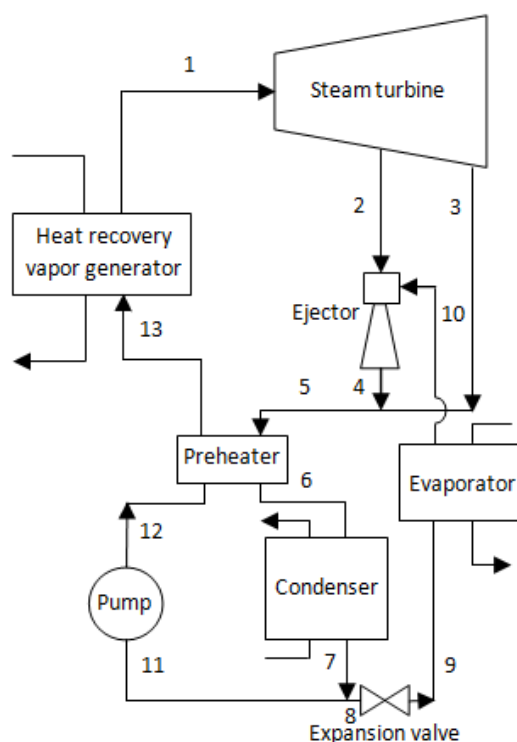
$$Q_e = m_{10}(h_{10} - h_9) \quad (4)$$

$$W_{st} = m_1(h_1 - h_2) + (m_1 - m_2)(h_2 - h_3) \quad (5)$$

سیستم تولید همزمان است. در کار حاضر پس از تشریح یک سیستم تولید همزمان توان و تبرید، با به کارگیری توربین بخار و سیکل تبرید افشانکی در کنار یکدیگر، تحلیل دینامیک سیستم مورد نظر بر اساس یک تقاضای تعریف شده در طول ۲۴ ساعت صورت گیرد تا با ارائه یک تحلیل کامل بتوان در مورد امکان به کارگیری سیستم مورد بحث برای تامین تقاضای تعریف شده به درستی تصمیم‌گیری نمود.

### توصیف سیستم و اهداف کار حاضر

سیستم مورد نظر یک سیستم تولید همزمان توان و تبرید است که توان الکتریکی مورد نیاز در توربین بخار تولید شده و سرمایه‌ی مورد نیاز هم در سیکل تبرید افشانکی مطابق شکل ۱ تامین می‌شود.

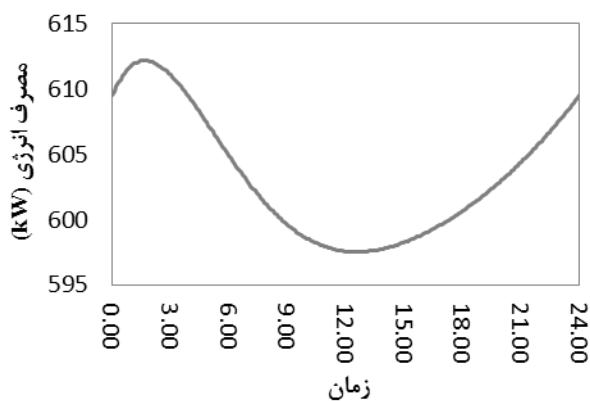


شکل ۱ طرح سیستم تولید همزمان توان و تبرید مورد بحث

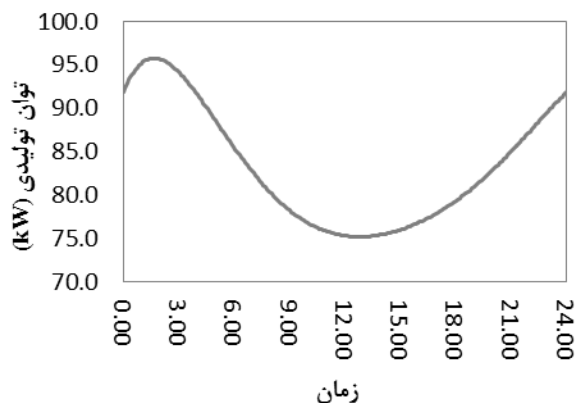
همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود انرژی گرمایی مورد نیاز برای راه‌اندازی سیکل از طریق یک جریان سیال گرم در یک ژنراتور بازیاب حرارتی تامین می‌شود. در سیکل از سیال عامل R141 استفاده شده است. سیال عامل پس از جذب گرمای مورد نیاز وارد توربین بخار می‌شود. قسمتی از این جریان در میانه توربین خارج شده و وارد افشانک می‌شود و قسمتی دیگر از انتهای توربین خارج می‌شود. جریان خروجی از تبخیرکننده با جریان خروجی از میانه توربین در افشانک ترکیب شده و پس از خروج از آن با جریان خروجی از انتهای توربین ترکیب شده و پس از پیش‌گرم کردن جریان ورودی به ژنراتور به کندانسور می‌رود و در انتها با تقسیم به دو شاخه مطابق شکل ۱ سیکل کامل می‌شود.

مشخصات تجهیزات سیستم و مفروضات در نظر گرفته شده، در جدول ۱ ارائه شده است.

روز ثابت نیست و با توجه به تغییر نسبت استخراج تغییر می‌کند. وقتی که سیستم توان بیشتری تولید می‌کند، به دلیل پایین بودن دمای سیال عامل در خروجی توربین بخار، مصرف سوخت بیشتر است. در شکل ۵ میزان توان تولیدی در طول بازه زمانی مورد نظر ارائه شده است. در واقع این مقدار تابع سرمایه‌ش تولیدی در سیستم است که نسبت عکس با آن دارد به طوری که وقتی سرمایه‌ش تولیدی بالاست به دلیل خروج میزان بیشتری از سیال عامل از میانه توربین بخار توان تولیدی کم می‌شود. راندمان تولید همزمان توان و تبرید بر حسب زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ماکزیمم راندمان، زمانی حاصل می‌شود که تولید سرمایه‌ش بیشتری داریم که مربوط به ساعات میانه روز می‌باشد. این موضوع در واقع بیانگر اهمیت به کارگیری سیستم‌های تولید همزمان برای مصرف بهینه انرژی می‌باشد.



شکل ۴) نمودار مصرف انرژی در بازه زمانی مورد نظر



شکل ۵) نمودار توان تولیدی در بازه زمانی مورد نظر

راندمان انرژی سیستم در بازه زمانی مورد نظر مطابق نمودار شکل ۷ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در بازه زمانی مورد نظر راندمان انرژی تغییراتی مواجه می‌شود. زمانی که سیستم، تولید توان الکتریکی بیشتری دارد راندمان انرژی بالاتر و در ساعات گرم روز که تولید سرمایه‌ش بیشتری داریم به دلیل تلفات انرژی بالاتر سیکل تبرید افشانکی، راندمان انرژی سیستم کمی پایین تر است.

$$W_p = m_p (h_{12} - h_{11}) \quad (6)$$

$$W_{net} = W_{st} - W_p \quad (7)$$

$$Q_{in} = m_1 (h_1 - h_{13}) \quad (8)$$

راندمان حرارتی سیستم تولید همزمان توان و تبرید برابر نسبت مجموع توان و تبرید تولیدی به انرژی ورودی می‌باشد که در رابطه (۹) ارائه شده است.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net} + Q_e}{Q_{in}} \quad (9)$$

انرژی فیزیکی طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$E = m((h_{in} - h_{out}) - T_0(s_{in} - s_{out})) \quad (10)$$

راندمان انرژی چرخه به صورت نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی چرخه تعریف می‌شود که با رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. انرژی خروجی مجموع انرژی خروجی توربین و تبخیرکننده می‌باشد.

$$\eta_{ex} = \frac{W_{net} + E_e}{E_{in}} \quad (11)$$

انرژی خروجی از تبخیرکننده و انرژی ورودی در ژنراتور طبق روابط (۱۲) و (۱۳) تعریف می‌شود.

$$E_e = m_e((h_9 - h_{10}) - T_0(s_9 - s_{10})) \quad (12)$$

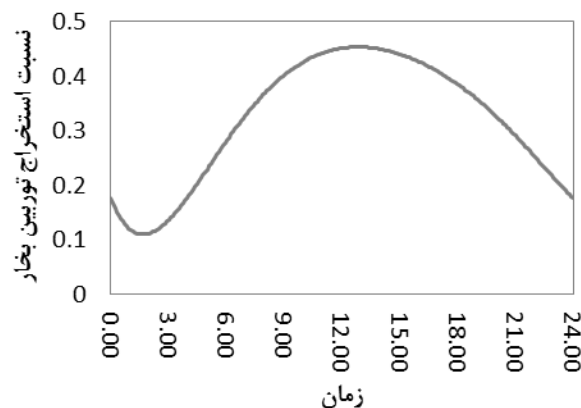
$$E_{in} = m_{13}((h_{14} - h_{13}) - T_0(s_{14} - s_{13})) \quad (13)$$

لازم به ذکر است که با توجه به ثابت بودن ترکیب سیال عامل سیکل، انرژی شیمیایی ثابت بوده و همان طور که در روابط (۱۲) و (۱۳) اشاره شد، تنها انرژی فیزیکی در نظر گرفته شده است. همچنین برای تشریح بهتر روش تحلیل، در شکل ۳ مراحل انجام کار در قالب دیاگرامی به تصویر کشیده شده است.

### نتایج و بحث

با توجه به تقاضای سرمایه‌ش تعریف شده نسبت استخراج از خروجی میانه توربین بخار مطابق شکل ۳ می‌باشد.

ملاحظه می‌شود که برای تامین سرمایه‌ش بیشتر در ساعات میانه روز، نیاز به نسبت استخراج بالاتری وجود دارد و در ساعاتی که تقاضای سرمایه‌ش کمتری وجود دارد نسبت استخراج پایین تری مورد نیاز است.



شکل ۳ نمودار نسبت استخراج سیال عامل از میانه توربین بخار

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود مصرف سوخت نیز در طول شبانه

مشخص و به طور پویا در بررسی‌ها سیستم‌نگاهی ویژه به تقاضای متغیر و تغییرات عملکرد سیکل با زمان صورت گرفته است. توان و سرمایه‌گذاری تولیدی و همچنین راندمان‌های تولید همزمان و اگزرژی در هر لحظه از بازه زمانی مورد نظر بررسی شده و از آنها به عنوان ابزارهایی برای ارزیابی عملکرد سیستم استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد که عملکرد سیستم از نظر راندمان اگزرژی و انعطاف‌پذیری با توجه به میزان تقاضای سرمایه‌گذاری، مناسب بوده و ضعف سیستم در پایین بودن توان تولیدی و در نتیجه راندمان تولید همزمان آن می‌باشد. بنابراین به‌کارگیری سیکل در تقاضاهای با نسبت بالاتر سرمایه‌گذاری به توان مفیدتر خواهد بود.

### فهرست علائم و نشانه‌ها

فهرست علائم انگلیسی، یونانی و زیرنویس‌ها در ۳ جدول در این قسمت ارائه شده است.

#### فهرست علائم انگلیسی

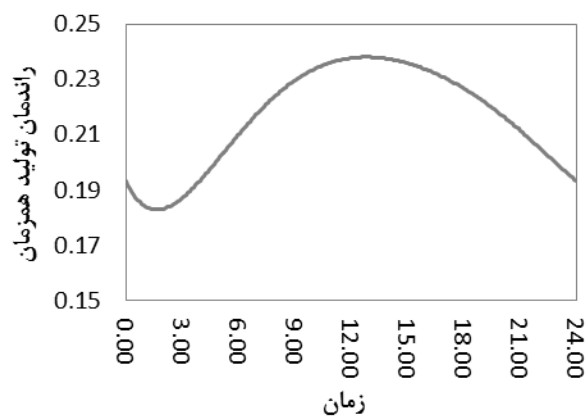
اگزرژی (kW)	$E$
آنتالپی ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )	$h$
دبی جرمی ( $\text{kg s}^{-1}$ )	$m$
نرخ انتقال حرارت (kW)	$Q$
آنتروپی ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$s$
دما (K)	$T$
توان (kW)	$W$

#### فهرست علائم یونانی

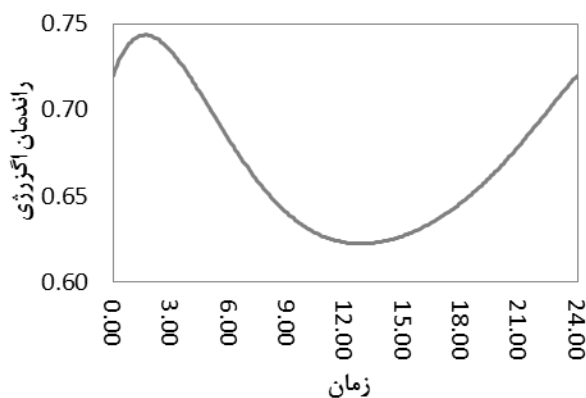
راندمان	$\eta$
نسبت دبی	$\omega$

#### فهرست زیرنویس‌ها

دیفیوزر	$d$
تبخیرکننده	$e$
ورودی	$in$
محفظه اختلاط	$m$
نازل	$n$
خالص	$net$
خروجی	$out$
پمپ	$p$
آنتروپی	$s$



شکل ۶) نمودار تغییرات راندمان تولید همزمان سیستم



شکل ۷) نمودار تغییرات راندمان اگزرژی سیستم

در جدول ۲ مشخصات ترمودینامیکی سیستم در طول روز ارائه شده است. در این جدول مقادیر محاسبه شده برای نسبت استخراج، سرمایه‌گذاری و توان تولیدی، مصرف سوخت، راندمان تولید همزمان و اگزرژی سیستم بر اساس تقاضای سرمایه‌گذاری تعریف شده و در ساعات مختلف شبانه روز آورده شده است.

جدول ۲) مشخصات ترمودینامیکی سیستم در بازه زمانی مورد نظر

زمان	۳:۰۰	۹:۰۰	۱۵:۰۰	۲۱:۰۰
تقاضای سرمایه‌گذاری (kW)	۲۰	۵۹	۶۵	۴۳
نسبت استخراج	۰,۱۴	۰,۴۰	۰,۴۴	۰,۲۹
سرمایش تولیدی (kW)	۲۰	۵۹	۶۵	۴۳
توان الکتریکی تولیدی (kW)	۹۴,۲	۷۸,۵	۷۶,۱	۸۴,۹
مصرف سوخت (kW)	۶۱۱	۶۰۰	۵۹۹	۶۰۵
راندمان تولید همزمان	۰,۴۷	۰,۵۱	۰,۵۲	۰,۴۹
راندمان اگزرژی	۰,۷۳	۰,۶۴	۰,۶۳	۰,۶۸

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با تحلیل یک سیکل تولید همزمان بر اساس یک تقاضای

Int. J. Refrigeration 28, 766–773.

- [16] Yapıcı, R., 2005, *Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model*, *Energ. Convers. Manag.* 46, 3117–3135.
- [17] Pianthong, K., Seehanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T., Aphornratana, S., 2007, *Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique*, *Energ. Convers. Manag.* 48, 2556–2564.
- [18] Sankarlal, T., Mani, A., 2007, *Experimental investigation on ejector refrigeration system with ammonia*, *Renew. Energ.* 32, 1403–1413.
- [19] Yapıcı, R., 2007, *Experimental investigation of performance of vapor ejector refrigeration system using refrigerant R123*, *Energ. Convers. Manag.* 49, 953–961.
- [20] Yapıcı, R., Yetisen, 2007, *Experimental study on ejector refrigeration system powered by low grade heat*, *Energ. Convers. Manag.* 48, 1560–1568.
- [21] Wang, J.F., Dai, Y.P., Sun, Z., 2009, *A theoretical study on a novel combined power and ejector refrigeration cycle*, *International journal of refrigeration* 32, 1186–1194.
- [22] Ameri, M., Behbahaninia, A., Tanha, A., 2010, *Thermodynamic analysis of a tri-generation system based on micro-gas turbine with a steam ejector refrigeration system*, *Energy.* 35, 2203–2209.
- [23] Pridasawas, W., Lundqvist, P., 2004, *An exergy analysis of a solar-driven ejector refrigeration system*, *Solar Energy* 76 369–37

توربین بخار

st

حرارتی

th

### مراجع

- [1] Xu, F., Goswami, D.Y., Bhagwat, S.S., 2000, *A combined power/ cooling cycle*. *Energy* 25, 233–246.
- [2] Hasan, A.A., Goswami, G.Y., Vijayaraghavan, S., 2002, *First and second law analysis of a new power and refrigeration thermodynamic cycle using a solar heat source*, *Solar Energy* 73, 385–393.
- [3] Goswami, D.Y., Vijayaraghavan, S., Lu, S., Tamn, G., 2004, *New and emerging developments in solar energy*, *Solar Energy* 76, 33–43.
- [4] Tamm, G., Goswami, D.Y., Lu, S., Hasan, A.A., 2004, *Theoretical and experimental investigation of an ammonia-water power and refrigeration thermodynamic cycle*, *Solar Energy* 76, 217–228.
- [5] Yidal, A., Best, R., Rivero, R., Cervantes, J., 2006, *Analysis of a combined power and refrigeration cycle by the exergy method*, *Energy* 31, 3401–3414.
- [6] Vijayaraghavan, S., Goswami, D.Y., 2006, *A combined power and cooling cycle modified to improve resource utilization efficiency using a distillation stage*, *Energy* 31, 1177–1196.
- [7] Martin, C., Goswami, D.Y., 2006, *Effectiveness of cooling production with a combined power and cooling thermodynamic cycle*, *Applied Thermal Engineering* 26, 576–582.
- [8] Sadrameli, S.M., Goswami, D.Y., 2007, *Optimum operating conditions for a combined power and cooling thermodynamic cycle*, *Applied Energy* 84, 254–265.
- [9] Zheng, D., Chen, B., Qi, Y., Jin, H., 2006, *Thermodynamic analysis of a novel absorption power/cooling combined-cycle*, *Applied Energy* 83, 311–323.
- [10] Liu, M., Zhang, N., 2007, *Proposal and analysis of a novel ammonia-water cycle for power and refrigeration cogeneration*, *Energy* 32, 961–970.
- [11] Zhang, N., Lior, N., 2007, *Methodology for thermal design of novel combined refrigeration/power binary fluid systems*, *International Journal of Refrigeration* 30, 1072–1085.
- [12] Zhang, N., Lior, N., 2007, *Development of a novel combined absorption cycle for power generation and refrigeration*, *ASME Journal of Energy Resources Technology* 129, 254–265.
- [13] Wang, J.F., Dai, Y.P., Gao, L., 2008, *Parametric analysis and optimization for a combined power and refrigeration cycle*, *Applied energy* 85, 1071–1085.
- [14] Alexis, G.K., 2007, *Performance parameters for the design of a combined refrigeration and electrical power cogeneration system*, *International Journal of Refrigeration* 30, 1097–1103.
- [15] Li, D., Groll, E.A., 2005, *Transcritical CO2 refrigeration cycle with ejector-expansion device*,