



دراسة نظرية للمنظومة الحرارية المقترحة المركبة من مبدل طاقة التأين الحراري والدورة الغازية البسيطة

*هناء عبدالسلام أسويسي و محمد أبو القاسم البشير عبدالدائم

قسم الفيزياء- كلية العلوم- جامعة سبها، ليبيا

*للمراسلة: han.salem@sebhau.edu.ly

المخلص ضاعف الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية من جهود المختصين للبحث عن أنظمة قدرة فاعلة، وكنتيجة ظهرت الأنظمة الحرارية المركبة التي اعتمدت على استثمار الطاقة الحرارية المحررة من عملية الاحتراق إلى أقصى حد ممكن مما زاد القدرة الكهربائية المنتجة منها وحسن كفاءتها الحرارية، إن استمرار تطوير مجال الأنظمة الحرارية المركبة ساهم في إيجاد أنظمة حرارية جديدة عالية الأداء، إن ربط منظومة تحويل مباشر مثل مبدل طاقة التأين الحراري بأخرى تقليدية مثل الدورة الغازية البسيطة يُشكل منظومة حرارية مركبة جديدة لها قدرة إنتاجية كبيرة عن طريق استثمار الطاقة الحرارية المحررة من عملية الاحتراق الوحيدة بالدورة الغازية البسيطة لأقصى حد ممكن مما أدى في الحفاظ على المخزون المحدود للطاقة الاحفورية، وساعد على الحد من كميات غازات العادم المنبعثة في الجو. وتم تكوين نموذج أساسي للمنظومة حرارية المركبة حيث عملية تغذية الباعث بمبدل طاقة التأين الحراري بواسطة جزء من نواتج الاحتراق الناتجة من عملية حرق الوقود بالدورة الغازية البسيطة، وبرد المُجمَع بمبدل طاقة التأين الحراري بجزء من غازات العادم الخارجة من التربيننة الغازية المنبعثة في الهواء. أيضا صمم نموذج معدل للنموذج الأساسي للمنظومة الحرارية المقترحة، النموذج المعدل له نفس مكونات النموذج الأساسي، وعملية تغذية الباعث بالنموذج المعدل تتم بنفس كيفية النموذج الأساسي له، الاختلاف بين النموذجين تكمن في آلية تبريد المُجمَع، النتائج المتحصل عليها أشارت إلى تميز أداء النموذج الأساسي للمنظومة الحرارية المقترحة عن النموذج المعدل له عند رفع نسبة الضغط بالدورة الغازية البسيطة حُققت أعلى كفاءة حرارية عند اختيار النموذج الأساسي وتشغيله بنسب الضغط عالية حيث وصلت الكفاءة الحرارية (42.5%)، أفضل قيمة لقدرة الكلية تم الحصول عليها عند تشغيل النموذج المعدل بنسب ضغط منخفضة.

الكلمات المفتاحية: الدورة الغازية البسيطة، مبدل طاقة التأين الحراري.

Combined of Thermionic Converter and Brayton Cycle

*H. A. Swissi , M. A. Alabdoadaim

Physics department, Faculty of Science, Sebha University, Libya

*Corresponding Author: han.salem@sebhau.edu.ly

Abstract The increasing demand for electric power doubled the efforts of specialists to search for efficient power systems, and as a result of composite thermal systems, which relied on the investment of thermal energy released from the process of combustion to the maximum extent, which increased the electrical capacity produced and improved thermal efficiency, the continued development of the field of thermal systems Connecting a direct conversion system such as Thermionic Energy Convertors thermal ionizer to a conventional one such Brayton Cycle as a simple gas cycle forms a new composite thermal system with a large productive capacity by investing in thermal energy. The release of the single combustion process in a simple gas cycle to the maximum extent possible, which maintained a limited stock of fossil energy, and helped to reduce the amount of exhaust gases emitted into the atmosphere. A basic model of the composite thermal system was formed where the emitter is fed Thermionic Energy Convertors by part of the combustion products from the simple gas cycle fuel combustion process, and the collector cooled by the Thermionic Energy Convertors with part of the exhaust gases from the gas turbine emitted into the air. Also, a modified model was designed for the basic model of the proposed thermal system, the modified model has the same components as the basic model, and the process of feeding the emitter with the modified model is done in the same way as the basic model, the difference between the two models lies in the mechanism of cooling the pool, the results obtained indicate the performance of the basic model of the thermal system The proposed vehicle of the modified model when raising the pressure ratio simple gas cycle achieved the highest thermal efficiency when selecting the basic model and operating at high pressure ratios where the thermal efficiency(42.5%), the best value of the total power obtained when Gail modified model with low pressure ratios.

Keywords: Brayton Cycle , aThermionic Energy Convertors.

المقدمة

الطاقة الكهربائية يسبب استنزاف لمصادر الطاقة الاعتمادية المحدودة بباطن الأرض (الوقود الاحفوري) و يضاعف كميات غازات العادم الملوثة المنبعثة في الجو، بذلت جهود بحثية كثيرة

يقاس تقدم الأمم بمعدل استهلاك الطاقة الكهربائية، حيث تدل زيادة الاستهلاك على إدخال الآلات و المعدات المتطورة بشكل اساسي في التطبيقات المختلفة لتلك المجتمعات، ان زيادة الطلب على

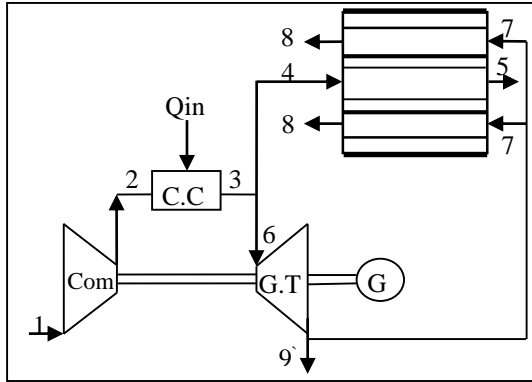
يساهم في الحفاظ على مصادر الوقود الاحفوري المحدودة و يقلل من كميات العادم الملوثة المنبعثة في الجو.

المواد وطرق العمل

تصميم وتركيب النموذجين المقترحين للمنظومة الحرارية المشتركة المركبة من مبدل طاقة التأين الحراري ودورة بريتون.

أولاً: وصف النموذج الأساسي المقترح.

تتكون المنظومة الحرارية المركبة المقترحة الأساسية من الدورة الغازية البسيطة التي تشمل (ضاغط، غرفة احتراق، تربيننة. ومن مبدل طاقة التأين الحراري الذي يتركب من الباعث والمُجمَع والمسافة الفاصلة بينهما. في هذه المنظومة الحرارية المركبة المقترحة يدخل الهواء الجوي للضاغط ويغادره بضغط مرتفع إلى غرفة الاحتراق حيث تتم عملية حرق الوقود عند ثبوت الضغط، كمية الحرارة المحررة التي تحتويها نواتج الاحتراق تنقسم إلى جزئين متوازيين، تتجه الكمية الأولى من نواتج الاحتراق إلى التربيننة الغازية بالدورة الغازية البسيطة وتتمدد خلالها منتجة الشغل المطلوب، وتتجه الكمية المتبقية من نواتج الاحتراق لتغذي الباعث بمبدل طاقة التأين الحراري المستخدم، وكنتيجة تتحرر الإلكترونات من الباعث وتوجه عبر الفاصل وترسب على المُجمَع المبرد بجزء من غازات العادم الخارجة من التربيننة الغازية باتجاه الجو، وأخيراً يتم إخراج الإلكترونات من المُجمَع على هيئة تيار كهربي وإعادتها للباعث بواسطة حمل خارجي.



الشكل 1: النموذج الأساسي للمنظومة الحرارية المقترحة المركبة من مبدل طاقة التأين الحراري و الدورة الغازية البسيطة.

ثانياً: وصف النموذج المعدل.

يتكون النموذج المعدل للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة من نفس مكونات النموذج الأساسي لها، الاختلاف بينهما يكمن في طريقة تبريد المُجمَع بمبدل طاقة التأين الحراري المستخدم، حيث يبرد بجزء من هواء الاحتراق الخارج من الضاغط كما بالشكل (2)، عملية تغذية الباعث بمبدل طاقة التأين الحراري تتم بنفس

من قبل المختصين و تركز اغلبها على إيجاد أنظمة حرارية قادرة على توفير القدرة الكهربائية المطلوبة بكفاءة عالية، تتنوع الأنظمة الحرارية لإنتاج القدرة الكهربائية و تُصنف أساساً الى أنظمة تحويل مباشر و غير مباشر[1]، مبدل طاقة التأين الحراري هو احد أنظمة التحويل المباشر للطاقة الحرارية الى كهرباء، وهو عبارة عن جهاز حراري يعمل بين مستويين حراريين مختلفين، ويتكون في الأساس من قطبين (الباعث والمُجمَع) يفصل بينهما وسط، يُغذى الباعث بطاقة حرارية مرتفعة المستوى، وكنتيجة تتحرر الإلكترونات بعد اكتسابها الطاقة الحرارية الكافية للتغلب على دالة الشغل لمعدن الباعث، تمر هذه الإلكترونات المحررة عبر الوسط الفاصل وترسب على القطب البارد (المُجمَع)، ثم تعود الإلكترونات إلى الباعث بعد إخراجها عن طريق حمل خارجي على هيئة تيار كهربي ليتم تحريرها من جديد، وهكذا يستمر عمل المبدل[2]. مبدل طاقة التأين الحراري لا يحتوي على أجزاء متحركة، خفيف الوزن وهادئ، ولا يحتاج إلى إجراءات صيانة معقدة ومكلفة، ويتأثر أدائه بمستوى دالة الشغل التي تعتمد على نوع المعدن المستخدم (للباعث والمُجمَع)، ويعتمد أيضاً على نوع الوسط الفاصل بين القطبين ومدى إعاقته لحركة الإلكترونات المتحررة في اتجاه المُجمَع بالإضافة لطول المسافة الفاصلة[3].

أثمرت الجهود البحثية عن طرق وتقنيات ساهمت في التغلب على جُل التحديات السالفة الذكر، وحسنت هذه التطويرات من أداء مبدل طاقة التأين الحراري وزادت من إمكانية استخدامه في تطبيقات مختلفة[4].

من جانب اخر تعد الدورة الغازية البسيطة من أهم أنظمة التحويل الغير مباشر للطاقة الحرارية، تطرد الدورة الغازية البسيطة في الجو غازات عادم تحتوي على طاقة حرارية مرتفعة المستوى[5]، إن زيادة استغلال هذه الكميات الكبيرة من الطاقة الحرارية المهدورة في الجو كان ولا يزال مجال اهتمام المختصين و اثمرت جهودهم عن ظهور منظومات حرارية مشتركة مختلفة كان للدورة الغازية البسيطة الدور الاساسي فيها، و تهدف فكرة ربط الى استثمار الطاقة الحرارية المحررة من عملية الاحتراق الوحيدة بالدورة الغازية البسيطة الى أقصى حد ممكن، الأمر الذي يساهم في الحفاظ على مصادر الطاقة الاعتمادية المحدودة و يساعد في الحد من التلوث الحراري[6]. إن الاستغلال الأمثل للطاقة الحرارية المحررة من عملية الاحتراق الوحيدة بالدورة الغازية البسيطة يمكن تحقيقه باستخدام جزء منها في تغذية الباعث بمبدل طاقة التأين الحراري و بشكل متوازي مع التربيننة الغازية، الأمر الذي قد يساعد على زيادة القدرة الكهربائية المنتجة، و

الرمز	المعنى
\emptyset	دالة الشغل (J)
η	الكفاءة (%)
σ	ثابت ستيفان ($5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$)
ϵ	الانبعاثية الحرارية
ϵ_e	فاعلية المبادل
ϵ_0	سماحية الفراغ ($F/m8.85 \times 10^{-12}$)

1. معدل الشغل بواسطة الضاغط اللازم بحسب من العلاقة:

$$W_c = \frac{m_1 c_p (T_2 - T_1)}{\eta_c} \quad [7]$$

2. درجة حرارة هواء الاحتراق الخارج من الضاغط تحسب:

$$T_2 = T_1 r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [7]$$

3. تمدد النواتج الاحتراق التي تتم داخل التربيننة وينتج عنها معدل شغل بحسب من العلاقة:

$$W_t = m_6 c_p (T_6 - T_9) \times \eta_t \quad [7]$$

5. درجة حرارة العادم الخارج من التربيننة تحسب من العلاقة:

$$T_9 = \frac{T_6}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad [7]$$

6. الشغل الفعلي المنتج من دورة بريتون بحسب من العلاقة

$$W_a = W_t - W_c \quad [7]$$

7. كثافة الإلكترونات المتدفقة خلال الوسط الفاصل بين الباعث والمجمّع بمعدل طاقة التأين الحراري المقترح تحسب وفق

قانون (Child-Langmuir) كالتالي: $J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e V^3}{m d^2}}$ [8]

8. فرق الجهد الناشئ بين القطبين بمعدل طاقة التأين الحراري

يحسب من المعادلة: $V = \frac{(\phi_E - \phi_C)}{e}$ [8]

9. القدرة الكهربائية المنتجة من معدل طاقة التأين الحراري

يحسب من المعادلة: $P_e = A \times J \times V$ [8]

10. القدرة الكلية للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة بحسب

كالتالي: $W_T = W_a + P_e$

11. الكفاءة الحرارية للمنظومة تحسب من المعادلة: $\eta_{th} = \frac{W_T}{Q_{in}}$

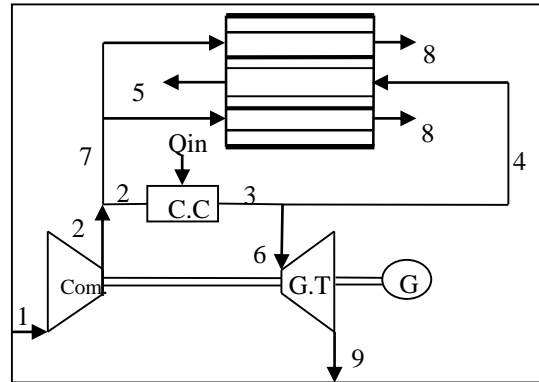
• إعداد الفرضيات المناسبة.

أجريت الدراسة باختيار البرنامج الحاسوبي

"MATLAB" ماتلاب، بالاعتماد على الفرضيات التالية:

1. نسبة الضغط لدورة بريتون متغيرة.
2. درجة الحرارة المغذية للباعث مساوية لدرجة الحرارة القصوى بدورة بريتون.
3. دالة الشغل لمعدن الباعث تعتمد على درجة الحرارة المغذية له $\phi_E = \frac{T_E}{750}$ [9]
4. الفراغ هو الوسط الفاصل بين القطبين بمعدل طاقة التأين الحراري.

الكيفية المستعملة في النموذج الأساسي حيث يزود بجزء من نواتج الاحتراق الخارجة من غرفة الاحتراق بالمنظومة المقترحة.



الشكل 2: النموذج المعدل للمنظومة الحرارية المقترحة المركبة من مبدل طاقة التأين الحراري و الدورة الغازية البسيطة.

• تحديد العلاقات المناسبة لوصف المنظومة الحرارية المركبة المقترحة.

أولاً: الرموز العلوية

الرمز	المعدل الفيزيائي
c_p	السعة الحرارية النوعية ($\frac{kJ}{kg.K}$)
d	المسافة الفاصلة (m)
e	شحنة الإلكترون (C)
J	كثافة التيار الكهربائي ($A.m^{-2}$)
K_B	ثابت بولتزمان ($1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$)
m	كتلة الإلكترون (kg)
r_p	نسبة الضغط
P_e	القدرة الكهربائية المنتجة (kW)
Q	كمية الحرارة (kW)
T	درجة الحرارة (K)
V	فرق الجهد بين القطبين الباعث والمجمّع
W	معدل الشغل (kW)

ثانياً: الرموز السفلية

الرمز	المعنى
A	الفعلي
C	الضاغط
C	المجمّع
E	الباعث
H	علوي
I	التأين
In	المعطاءة
T	الكلبي
T	التربيننة
Th	المنظومة الحرارية المركبة المقترحة

ثالثاً: الرموز الاتينية

%	90	كفاءة التربيننة	η_t
---	----	-----------------	----------

النتائج والمناقشة

النتائج الموضحة في الجدول (2) تبين تأثير رفع نسبة الضغط (r_p) على أداء النموذجين الأساسي للمنظومة الحرارية المقترحة.

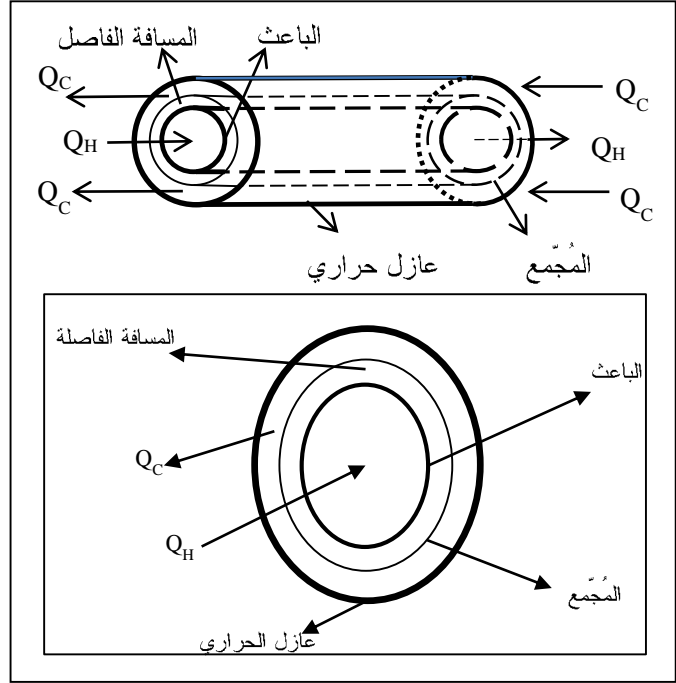
جدول 2: النتائج المتحصل عليها للنموذج الأساسي عند

$(T_3=1800K, d = 1.6\mu m)$

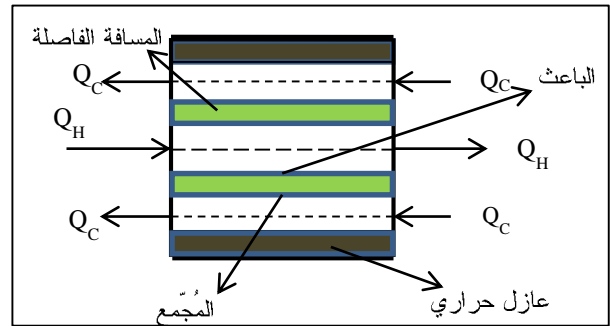
$\eta(\%)$	$Q_{in} (kW)$	Output (kW)				r_p
		W_T	P_e	W_a		
31	12696	3909	204	3705		8
39	10777	4221	622	3599		20
42.5	9340	3965	937	3028		35

نلاحظ من الجدول (2) تندي كميات معدل الشغل الفعلي للنموذج الأساسي، ويعزي ذلك لزيادة الشغل المستهلك داخلياً في تدوير الضاغط للمنظومة الحرارية الأساسية المقترحة، نلاحظ أيضاً تصرف مغاير للقدرة الكهربائية المنتجة من مبدل طاقة التآين الحراري للنموذج الأساسي، حيث تتحسن القدرة الكهربائية المنتجة من مبدل طاقة التآين الحراري مع رفع نسبة الضغط لدورة بريتون، ويعود ذلك لتوسع الفارق بين دالتي الشغل لمعدني الباعث والمجمع، بسبب انخفاض درجة حرارة التبريد المستعملة لتبريد المجمع مع نسبة الضغط (درجة حرارة العادم لدورة بريتون). نلاحظ من الجدول (2) تغير محدود في كميات القدرة الكلية للنموذج الأساسي مع نسبة الضغط لدورة بريتون، الزيادة في كميات القدرة الكهربائية المنتجة من مبدل طاقة التآين الحراري تعوض الفقد في كميات معدل الشغل الفعلي لدورة بريتون، زيادة على ذلك نلاحظ انخفاض مستمر في كميات الحرارة المعطاة بغرفة الاحتراق لدورة بريتون، نتيجة ارتفاع درجة حرارة هواء الاحتراق، يوضح الجدول تحسن الكفاءة الحرارية للنموذج الأساسي مع رفع نسبة الضغط، بسبب معدل التندي في كميات الحرارة المعطاة الذي فاق معدل التندي في كميات القدرة الكلية للمنظومة الحرارية المقترحة. نلاحظ من الجدول (3) تأثير نسبة الضغط على أداء النموذج المعدل للمنظومة المقترحة، هناك تندي واضح في كميات معدل الشغل الفعلي المنتج من دورة بريتون للنموذج المعدل وكذلك انخفاض كبير في كميات القدرة الكهربائية المنتجة من مبدل طاقة التآين الحراري مع زيادة نسبة الضغط لدورة بريتون، ويعود السبب في ذلك على الترتيب لزيادة كميات معدل الشغل المطلوب لتدوير الضاغط والنقلص الكبير في الفارق بين دالتي الشغل للباعث والمجمع بسبب ارتفاع درجة حرارة هواء الاحتراق المبرد.

5. دالة الشغل لمعدن المجمع تعتمد على درجة حرارة المبرد المستخدم في تبريده $\phi_c = \frac{T_c}{600}$ [9].
 6. مبدل طاقة التآين الحراري هو مبادل حراري حلقي على شكل أنبوب معزول حرارياً.



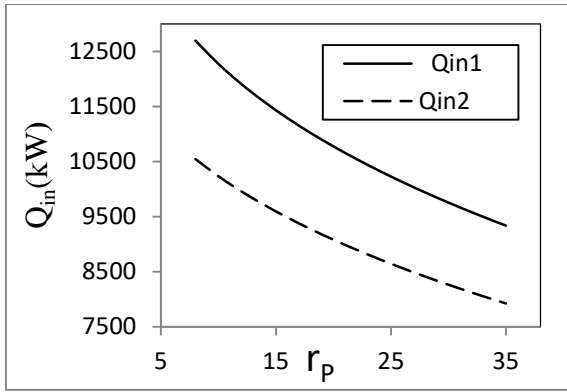
الشكل 3: مبدل طاقة التآين الحراري المقترح



الشكل 4: مقطع لمبدل طاقة التآين الحراري المقترح

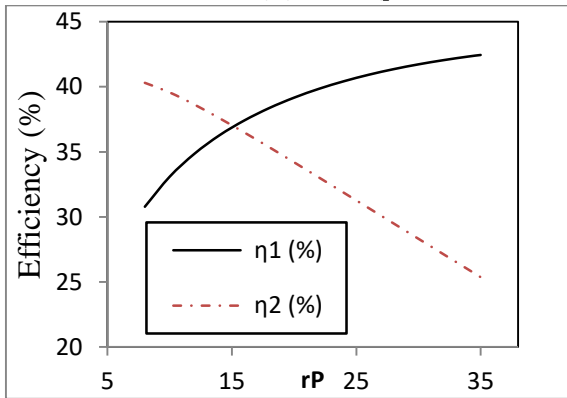
➤ بالإضافة للمعايير التشغيلية المختارة والموضحة بالجدول 1.

الرمز	المعنى	القيمة	الوحدة
A	مساحة التبادل الحراري لمبدل طاقة التآين الحراري	1	m ²
D	المسافة الفاصلة بين قطبي المبدل	1.6	μm
\dot{m}_1	كتلة الهواء الداخل للضاغط	10	kg/s
P_1	ضغط الهواء الداخل للضاغط	1	bar
T_1	درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط	15	°C
T_3	درجة الحرارة القصوى للمنظومة المقترحة	1800	K
ϵ	فاعلية المبادل (لمبدل طاقة التآين الحراري)	0.65	-
η_c	كفاءة الضاغط	85	%



الشكل 6: كمية الحرارة المعطاة للنموذج الأساسي (Q_{in1}) و المعدل للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة (Q_{in2}) مع نسبة الضغط عند ($T_3=1800K$, $d = 1.6\mu m$).

كنتيجة لما سبق تحسن مستمر في الكفاءة الحرارية للنموذج الأساسي وتدني الكفاءة الحرارية للنموذج المعدل مع ارتفاع نسبة الضغط كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل 7: الكفاءة الحرارية للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة الأساسية (η_1) والمعدلة (η_2) مع نسبة الضغط عند ($d = 1.6\mu m, T_3=1800K$).

الاستنتاجات

أجريت هذه الدراسة النظرية على النموذجين الأساسي والمعدل باستخدام نسبة ضغط متغيرة لتحديد المعايير التشغيلية المثلى. كانت أهم الاستنتاجات المتحصلة عليها تميز أداء النموذج الأساسي للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة عن النموذج المعدل له عند رفع نسبة الضغط، بذلك تتحقق أعلى كفاءة حرارية عند اختيار النموذج الأساسي وتشغيله بنسب ضغط عالية حيث بلغت (42.5%)، ولكن تم الحصول على أفضل قيمة للخروج الكلي عند تشغيل النموذج المعدل بنسب ضغط منخفضة ويعود ذلك لمساهمة القدرة الكهربائية المنتجة في القدرة الكلية للنموذج بنسبة (43%).

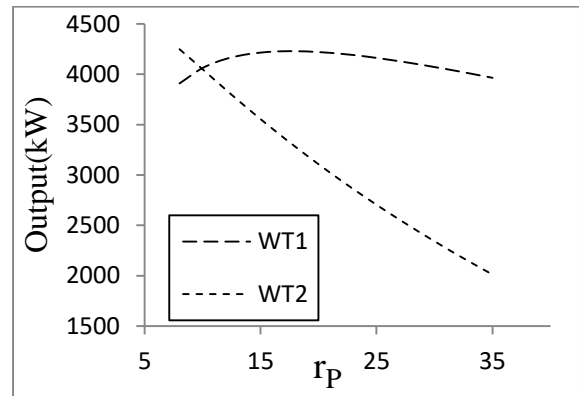
المراجع

- [1]- Eastop. T. D, and McConkey. 1993. A, Applied Thermodynamic for Engineering Technologists, Published by Longman UK, 5th Edition.
- [2]- K.A.A. Khaild, T.J. Leong and K. Mohamed . 2016. Review On Thermionic Energy

جدول 3: النتائج المتحصلة عليها للنموذج المعدل عند ($T_3=1800K$, $d = 1.6\mu m$).

النموذج الأساسي					
η (%)	Q_{in} (kW)	Output (kW)			
		W_T	P_e	W_a	r_p
40	10546	4251	1814	2437	8
34	9082	3106	1008	2098	20
25	7926	2011	578	1433	35

زيادة على ما سبق نلاحظ من الجدول (3) تدني واضح في كميات القدرة الكلية وانخفاض بكميات أقل من كميات الحرارة المعطاة الأمر الذي نتج عنه تدني في الكفاءة الحرارية للمنظومة الحرارية المقترحة. كما نلاحظ أن مساهمة مبدل طاقة التآين الحراري المستخدم في القدرة الكلية كانت أقل في حالة النموذج الأساسي وهي تتحسن مع رفع نسبة الضغط، بينما مساهمتها في القدرة الكلية للنموذج المعدل كانت كبيرة وواضحة في بداية التشغيل وتقلص بمقادير كبيرة مع زيادة نسبة الضغط، من جهة أخرى نلاحظ أن كميات الشغل الفعلي المنتجة من النموذج الأساسي كانت أكبر من تلك المنتجة من النموذج المعدل، بسبب نقص كتلة نواتج الاحتراق الداخلة للتربينات الغازية من النموذج المعدل، نتيجة استخدام جزء من هواء الاحتراق الخارج من الضاغط في تبريد المجمع. كخلاصة يوضح الشكل (5) تغير طفيف في كميات القدرة الكلية للنموذج الأساسي على عكس النموذج المعدل للمنظومة الحرارية يكون انخفاض كبير في القدرة الكلية مع زيادة نسبة الضغط.



الشكل 5: خرج القدرة الكلية الناتج من النموذج الأساسي (W_{T1}) والمعدل (W_{T2}) للمنظومة الحرارية المركبة المقترحة مع نسبة الانضغاط عند ($d = 1.6\mu m, T_3=1800K$).

كمحصلة هناك تدني واضح في كميات الحرارة المعطاة للنموذجين الأساسي والمعدل مع رفع نسبة الضغط كما هو موضح بالشكل (4). حيث نلاحظ من الشكل (5) كميات الحرارة المعطاة للنموذج المعدل أقل كميات الحرارة المعطاة للنموذج الأساسي، بسبب نقص كمية هواء الاحتراق للنموذج المعدل.

- Converters .IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol.63,NO 6.
- [3]- N .S. Rasor. 1991. Thermionic Energy Conversion Plasmas. IEEE Transactions Of Plasma Science, VOL. 19, NO. 6.
- [4]- P .D. SWartzentruber.2014. Microstruct Ure And Work Function Of Dispenser Cathode Coatings :Effects On Thermionic Emission .,University Of Kentucky.
- [5]- Giovanni Cerri , Ambra Giovannelli , L. Battisti and R. Fedrizzi. 2007. Advanced in Effusive Cooling Techniques Of Gas Turbine . Applied Thermal Engineering, Vol.27,pp. 692-698.
- [6]- Walsh. P. P. and Fletcher. P, 2004 . Gas Turbine Performance.Second Edition, Blackwell Publishing Company .
- [7]- Bathie W. W. 1984. Fundamentals of Gas Turbines . John Wiley & Sons.
- [8]- J .-H .Lee,I .Bargatin, B .K .Vanicl, T. O. Gwinn, R. Mobondian, N. A.Melosh, R .T . Howr. J, 2014. Microfabricated Thermally Isolated Low Work Function emitter. Microelectromech.. Syst.Vol.23,no. 5, pp. 1182-1187,Oct.
- [9]- J . H. Lee , L. Bargatin, Nicholas A. Melosh, R. T. Howe. 2012. [Optimal emitter-collector gap for thermionic energy converters](#).Received 21 February 2012, accepted 11 April 2012, published online 27 April 2012.