

تقييم أداء الوحدات التوليدية المركبة باستخدام تقنية حقن البخار

د. عبد الرحمن حبو

شهد سالم ابراهيم

قسم الهندسة الميكانيكية
جامعة الموصل

الخلاصة

تم إجراء البحث الحالي على وحدة غازية تعمل بنظام الدورة البسيطة لها قدرة إنتاجية للطاقة الكهربائية تصل إلى 123 MW. شملت هذه الدراسة على جزئين رئيسيين، الجزء الأول تركز على دراسة تأثير درجة حرارة المحيط الخارجي في أداء الوحدة الغازية، أما الجزء الثاني فقد تركز على حساب القدرة التوليدية الإضافية والتي يمكن الحصول عليها من تطبيق نظام الوحدات التوليدية المركبة عند عدم استخدام واستخدام نظام حقن البخار إلى غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة. فيما يخص الوحدة الغازية البسيطة، فقد بينت النتائج التي تم الحصول عليها أن كمية الهواء الداخل إلى الضاغطة والقدرة المتولدة والكفاءة للوحدة الغازية تقل بنسبة تقدر بحوالي (9.43%)، (22.657%)، (5.7%) على التوالي عندما ترتفع درجة حرارة المحيط الخارجي من 15 إلى 45. في حين وجد أن كمية الاستهلاك النوعي للوقود تزداد بنسبة قدرها (8%) عندما ترتفع درجة حرارة المحيط الخارجي من 15 إلى 45. في حالة تطبيق نظام الوحدات التوليدية المركبة، فقد بينت النتائج إن القدرة التوليدية للوحدة المركبة ارتفعت بنسبة قدرها (59.195%) عن تلك الناتجة من الوحدة الغازية البسيطة، كما بينت النتائج أنه عند تطبيق نظام الوحدات التوليدية المركبة المستخدم فيها تقنية حقن البخار ازدادت القدرة التوليدية بنسبة (13.931%) عن القدرة التوليدية المركبة التي لا تستخدم هذه التقنية وعند نفس الظروف التشغيلية. :- محطات التوليد الغازية-محطات التوليد المركبة-تقنية حقن البخار.

Evaluation of Performance of Combined Gas Units Using Steam Injection Technique

Dr. A. Haboo

Sh. S. Ibrahim

Mechanical Engineering Department
University of Mosul

Abstract

The present work has been carried out on a gas turbine unit of a power output of 123MW operates on a simple cycle mode. The study involves two main parts. The first part has been focused on the effect of the ambient temperature rise on the performance of simple gas turbine unit, while the second part was concentrated to evaluate the extra power output that can be obtained, "with and without steam injection technique", was applied to the combustion chamber of the simple gas turbine unit. Regarding the simple gas turbine, results show that the compressor mass flow rate of air power output, and thermal efficiency decreases, nearly by (9.43%), (22.627%) and (5.7%) respectively, as the ambient temperature increases from 15 to 45. While, the specific fuel consumption increases by nearly (8%), as the ambient temperature rises from 15 to 45. However, when the combined cycle mode is applied, results show that the generated power output for the combined unit, has been increased nearly by (59.195%) over that one generated from simple cycle unit. Results also showed that when steam injection is used, in the combined power units, the power generated was increased by (13.931%) over that one which is generated when steam injection was not used at the same operating condition. Key words:-Gas turbine, combined power plant, steam injection technique.

الرموز السفلية الدلييلة

الحالة عند النقطة	1,2,.	الضغط (bar)	P
مضخة سائل التشغيل	Pum	نسبة الانضغاط	r_{pc}
الضاغطة	C	درجة الحرارة ($^{\circ}C$)	T
التوربين الغازي.	GT	الحرارة النوعية بثبوت الضغط (kJ/kg.K)	C_p
التوربين البخاري.	ST	معدل جريان الكتلة (kg/s)	m
الصافي الكلي للوحدة الغازية البسيطة.	net	نسبة الانخفاض في ضغط غرفة الاحتراق	P_{cc}
غرفة الاحتراق.	cc	القيمة الحرارية الصغرى للوقود (kJ/kg)	LCV
الهواء	a	درجة حرارة التضايق ($^{\circ}C$)	t_{pp}
الوقود	f	درجة حرارة الاقتراب ($^{\circ}C$)	t_{appr}
البخار	s	المساحة (m^2)	A
الغازات	g	السرعة (m / s)	V
المزيج	m	المحتوى الحراري (kJ/kg)	H
الكلي	tot	نسبة الخسارة الحرارية في منظومة توليد البخار	h_1
التوربين	t	الاختلاف بين درجة حرارة غازات العادم ودرجة حرارة البخار المحمص ($^{\circ}C$)	TTD
المستوى الوسطي	I	الطاقة الحرارية (kJ)	Q
مثالي	is	الشغل (kJ)	W
الحقن	inj	القدرة kW	p
		الاستهلاك النوعي للوقود kg/kW.hr	SFC
		الوحدة الغازية المركبة بدون استخدام نظام الحقن	CCGTni
		الوحدة الغازية المركبة المطبق عليها نظام الحقن	CCGTwi

النسبة بين معدل جريان كتلة البخار إلى معدل جريان كتلة الهواء

j

الرموز اللاتينية

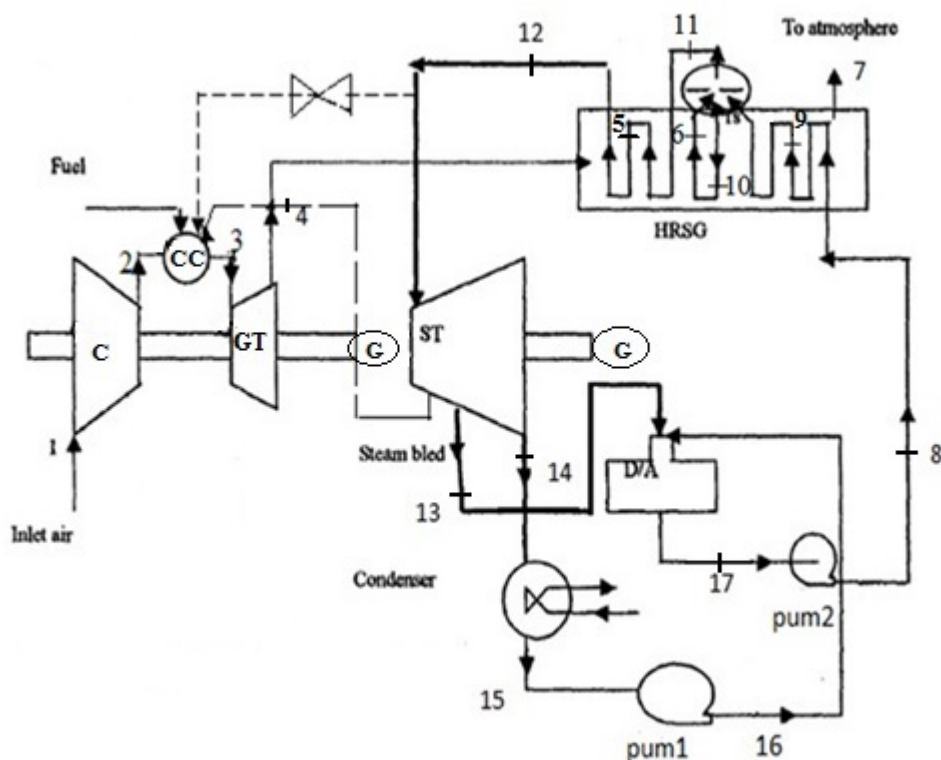
نسبة الوقود إلى الهواء عند الحقن قبل دخول البخار إلى التوربين البخاري	λ
الكفاءة	η
الكفاءة الميكانيكية	η_m
الكثافة (kg/m^3)	ρ
نسبة الحرارة النوعية	γ

ملاحظة: أما بالنسبة لبقية الرموز الواردة في متن البحث والمشار فوقها ب(-) فهي تدل على المتغيرات بعد حقن للبخار المتولد من منظومة توليد البخار.

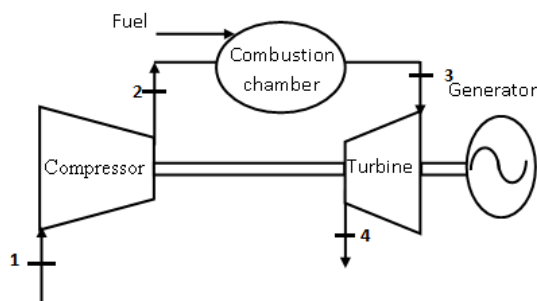
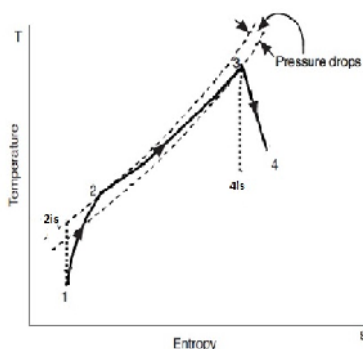
نتيجة للتطور العلمي والتكنولوجي الذي يشهده العالم منذ بداية القرن الماضي وحتى يومنا هذا. وما صاحب هذا التطور من زيادة عدد سكان العالم بشكل ملحوظ وارتفاع المستوى المعاشي للفرد في معظم الدول الصناعية وحتى الدول النامية وما رافق هذا النمو السكاني من زيادة في الاستهلاك اليومي بشكل عام وارتفاع الطلب على استهلاك الطاقة الكهربائية والتي أصبحت الشريان الرئيسي لديمومة الحياة المعاصرة [1]. كل هذه الأسباب دفعت العاملين في مجال توليد الطاقة الكهربائية إلى إنشاء محطات توليدية ذات قدرات عالية وكفاءة مقبولة من ناحية كلف الوقود المتزايدة من جهة وتقليل الانبعاثات الملوثة للبيئة من جهة أخرى.

ينتج عن عمل الوحدات الغازية ضمن نظام الدورة البسيطة هدرا كبيرا في الطاقة الحرارية التي تطرح مع غازات العادم إلى المحيط الخارجي والتي يمكن أن تقدر بحدود 60% من الطاقة الحرارية الناتجة عن استخدام الوقود الهيدروكربوني. ونتيجة لارتفاع أسعار الوقود عالميا، دأب الباحثون في مجال الوحدات الغازية إلى البحث عن أساليب جديدة لتقليل من كمية الطاقة الحرارية المهدورة والارتقاء بأداء الوحدات الغازية. ينتج عن ذلك عدة تطويرات أدخلت على نظام الدورة البسيطة لرفع كفاءتها، منها استخدام طريقة استرجاع الحرارة (regeneration) وإعادة التسخين (reheating) واستخدام التبريد الداخلي لعدة مراحل انضغاط (intercooling). إن هذه الطرق ساهمت برفع كفاءة وقدرة الوحدة الغازية بشكل ملحوظ، إلا أنه لازال مقدار كبير من الطاقة يهدر إلى المحيط الخارجي. وعلى ضوء ذلك، قام الباحثون بالاستفادة من هذه الطاقة الحرارية العالية نسبيا في توليد قدرة إضافية باستخدام نظام الوحدات التوليدية المركبة حيث أن الطاقة التوليدية التي يمكن الحصول عليها باستخدام هذا النظام أكبر من الطاقة الكهربائية التي تولدها الوحدتين الغازية والبخارية كلا على انفراد وذلك عن طريق استخدام منظومة لتوليد بخار بدرجات حرارية عالية وضغوط عالية لتشغيل وحدات بخارية تتناسب قدرتها التوليدية مع كمية البخار الذي يمكن توليده [2-3].

تتكون الوحدات التوليدية المركبة (combined cycle power plant) وكما هو موضح في الشكل (1) من منظومتين: الأولى هي الوحدة الغازية البسيطة والتي تعمل بنظام دورة برايتين وتسمى الدورة العليا، والأخرى هي الوحدة البخارية والتي تعمل بنظام دورة رانكن والتي تسمى الدورة السفلى. إن العمود الفقري للدورات المركبة هو منظومة توليد البخار (HRSG) والتي تمثل وحدة الربط بين الوحدة الغازية والوحدة البخارية كما إنها تتألف من المقصد، المبخر، خزان البخار، المحمص التي توضح من خلال شكل(2). يلعب أداء وكفاءة وحدة توليد البخار دورا مهما في مقدار القدرة التوليدية للوحدة البخارية [4,5]. لوحظ في الأونة الأخيرة الإقبال المتزايد على استخدام تقنية حقن البخار للوحدات الغازية البسيطة فإن الاستفادة منها ليس في تحسين الأداء من ناحية القدرة والكفاءة فقط وإنما ليققل توليد أكاسيد النيتروجين (NOx) أيضا [6]. سيتم في البحث الحالي دراسة تأثير حقن البخار إلى غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة على أداء الوحدة التوليدية المركبة كما موضح في شكل(1) ومقارنة أداء الوحدة الغازية البسيطة مع أداء الوحدة التوليدية المركبة في حالتها استخدام تقنية حقن البخار من عدمه. كما سيتم أيضا ملاحظة تأثير تغيير درجة حرارة المحيط الخارجي على أداء هذه الوحدات جميعا. قام الباحث Rahman وجماعته [7] (2011) بدراسة نظرية على وحدة غازية بسيطة من خلال دراسة تأثير نسبة الانضغاط ودرجة حرارة المحيط الخارجي ونسبة الهواء إلى الوقود في أداء هذه الوحدة. حيث لوحظ انخفاض كل من الكفاءة الحرارية والقدرة المتولدة مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي. بينما ازداد الاستهلاك النوعي للوقود وبشكل خطي مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي ونسبة الهواء إلى الوقود. وقام الباحث Bouam وجماعته [2] (2008) بدراسة على وحدة غازية بسيطة مستخدمين طريقة حقن البخار إلى غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة ومقارنتها مع حالة الدورة الاعتيادية التي لا يطبق فيها تقنية حقن البخار. وذلك بدراسة تأثير ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي من 0 °C وصولا إلى 50 °C في كلا حالتها حقن البخار وعدم حقنه في أداء الوحدة الغازية البسيطة. حيث استنتج أن القدرة المتولدة عند حقن البخار تكون أعلى من القدرة المتولدة عند عدم حقنه كما إن القدرة المتولدة تنخفض في كلا الحالتين مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي. كما وقام الباحث srinivas وجماعته [8] (2008) بدراسة نظرية على وحدة توليدية مركبة باستخدام تقنية حقن البخار من مرحلة الضغط العالي للتوربين البخاري (HPST) للوحدة التوليدية المركبة ذات منظومة توليد بخار ثنائية الضغط. توصل الباحث إلى أنه عند حقن البخار بنسب مختلفة ازدادت قدرة الدورة الغازية في حين لاحظوا أن قدرة الدورة البخارية تنخفض وبالتالي فإن القدرة الكلية للوحدة المركبة تزداد بوجود عملية الحقن. كما قام الباحثان Reddy و [9] Low (2007) بدراسة نظرية على وحدة توليدية مركبة استخدمها فيها تقنية حقن البخار في الوحدة الغازية البسيطة. وحاول الباحثان دراسة تأثير كل من نسبة الانضغاط ونسبة البخار المحقون في أداء التوربين الغازي والبخاري وكفاءة الوحدة المركبة وكذلك انبعاثات CO₂ وعند نسب حقن مختلفة. توصل الباحثان بأنه مع زيادة نسبة الانضغاط ونسب الحقن تزداد القدرة المتولدة من الوحدة التوليدية المركبة والكفاءة الحرارية. أما بخصوص الملوثات CO₂ نخفض مع زيا



(1): الوحدة التوليدية المركبة في حالتها استخدام تقنية حقن البخار وعدم استخدامها



(2): المكونات الرئيسية وعلاقة درجة الحرارة مع الانتروبي للوحدة الغازية البسيطة

تحليل

تم نمذجة المعادلات الرياضية لجميع المنظومات الحرارية المستخدمة في وحدات التوليد المركبة سواء التي تحتوي على تقنية حقن البخار أو عدم احتوائه عليها والتي تشمل كل من الوحدة الغازية البسيطة، منظومة توليد البخار أحادية الضغط وأخيرا الوحدة البخارية. تمت الحسابات بالاعتماد على بيانات وحدة دهورك الغازية التي تعمل بنظام الدورة البسيطة وهي من نوع (PG9171E) أحادية المحور وكما مبين في الجدول (1) [10]. وتم اعتماد بعض الفرضيات ضمن الدراسة الحالية من أجل تسهيل محاكاة المنظومات الحرارية :-

1- أداء النظام يكون مستقرا

2-

تقييم أداء الوحدات التوليدية المركبة باستخدام تقنية حقن البخار :

- 3- الكفاءة البوليتروبية لكل من الضاغطة والتوربين الغازي $\eta_{cp} = 0.85$ [11]
- 4- الخسارة الحرارية في منظومة توليد البخار تتراوح بين (1-2%) [12]
- 5- الوقود المستخدم هو الغاز الطبيعي وذات قيمة حرارية مقدارها 50000 kJ/kg [13]
- من اجل إجراء محاكاة لأية منظومة لابد من تمثيل السلوك الحقيقي للمنظومة بشكل رياضي إذ يتم تمثيل النظام بمجموعة نماذج رياضيته تفصيلية لكل جزء من أجزاء النظام وتحتوي هذه النماذج على المعادلات التخصصية للوحدة التوليدية المركبة وتم الاستعانة ببرنامج حل المعادلات الهندسية (EES) للمحاكاة للمنظومات جميعا.

(1): مواصفات الوحدة الغازية البسيطة

نوع التوربين الغازي	PG9171E
ضغط المحيط الخارجي	100% ميثان 1.031 bar
	12.6
	420.5(kg/s)
	8(kg/s)
سرعة التوربين	3000 rpm

1- الوحدة الغازية البسيطة

تتكون الوحدات الغازية والتي تعمل بنظام الدورة البسيطة من ثلاثة أجزاء رئيسية: الضاغطة، غرفة الاحتراق والتوربين الغازي وكما موضح في الشكل رقم (2). يشمل مبدأ عمل الوحدات الغازية البسيطة عملية سحب الهواء من المحيط الخارجي ويتم ضغطه إلى ضغط أعلى بواسطة الضاغطة ليدخل غرفة الاحتراق ويمتزج مع الوقود حيث تتم عملية الاحتراق عند ضغط غرفة الاحتراق بينما ترتفع درجة حرارة الغازات الخارجة منها لتدخل إلى التوربين الغازي والذي يسمح لها بالتقدم وينتج عن هذه العملية شغل ميكانيكي يتم تحويله إلى طاقة كهربائية بواسطة المولد وتطرح غازات العادم إلى المحيط الخارجي [1].

يتم حساب ضغط الهواء بعد خروجه من الضاغطة من المعادلة التالية :

$$P_2 = r_{pc} * P_1 \quad \text{---(1)}$$

وان درجة الحرارة المثالية الخارجة من الضاغطة يمكن حسابها من المعادلة أدناه:

$$T_{2is} = T_1 (r_{pc})^{\gamma_a - 1 / \gamma_a} \quad \text{---(2)}$$

أما درجة الحرارة الحقيقية الخارجة من الضاغطة فنحصل عليها من خلال استخدام المعادلة التالية:

$$T_2 = T_1 + \frac{(T_{2is} - T_1)}{\eta_c} \quad \text{---(3)}$$

(isentropic efficiency) الخاصة بالضاغطة فنحسب من المعادلة التالية [10]:

$$c = \frac{r_{pc}^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1}{r_{pc}^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a * \eta_{cp}}} - 1} \quad \text{---(4)}$$

(isentropic efficiency) الخاصة بالتوربين الغازي فيمكن الحصول عليها من المعادلة التالية [10]:

$$t = \frac{1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\eta_{tp}(\gamma_g - 1)}{\gamma_g}}}{1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}} \quad \text{---(5)}$$

وكذلك لحساب معدل جريان كتلة الهواء فقد تم استخدام المعادلة التالية:

$$\dot{m}_a = \rho_a * A * V \quad \text{---(6)}$$

يمكن حساب شغل الضاغطة من المعادلة التالية:

$$W_c = m_a C_{Pa} (T_2 - T_1) \quad \text{---(7)}$$

إن ضغط الغازات الخارجة من غرفة الاحتراق نحصل عليه من خلال المعادلة التالية [1]:

$$P_3 = (1 - P_{cc}) * P_2 \quad \text{---(8)}$$

بينما يتم حساب درجة حرارة غازات العادم المثالية الخارجة من التوربين الغازي من خلال المعادلة التالية:

$$T_{4is} = T_3 \left[\frac{P_4}{P_3} \right]^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \quad \text{---(9)}$$

دلة التالية:

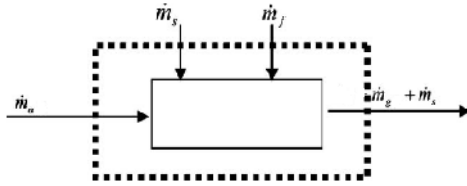
ولحساب درجة حرارة غازات العادم الحقيقية الخارجة من التوربين الغازي يتم

$$T_4 = T_3 - \eta_t (T_3 - T_{4is}) \quad \text{---(10)}$$

2- الوحدات التوليدية المركبة المطبق عليها

إن تقنية حقن البخار تطبق من خلال انتزاع جزء من البخار المتولد في منظومة توليد البخار أما قبل دخوله للتوربين البخاري أو بعد خروجه منه ومن ثم حقنه إلى غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة أو بعدها وملاحظة تأثير ذلك على أداء الوحدات التوليدية المركبة. في هذا البحث تم اعتماد تقنية حقن البخار قبل مروره خلال التوربين البخاري إلى غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة مباشرة.

لتحليل النظام وكما في الشكل (1) فإن الهواء سيدخل إلى الضاغطة عند نقطة (1) ويخرج منها عند النقطة (2) ثم يدخل إلى غرفة الاحتراق ليمتزج مع الوقود الطبيعي هناك فضلا عن البخار الداخل إليها. إن درجة الحرارة العالية للغازات الداخلة إلى التوربين الغازي عند النقطة (3) تتمدد خلاله منتجا شغل وان درجة الحرارة العلية للغازات الداخلة إلى التوربين الغازي عند النقطة (4) ستدخل إلى منظومة توليد البخار منتجة بخار للدورة السفلية في حين تطرح غازات العادم إلى المحيط الخارجي عند النقطة (7). أما البخار المغادر من منظومة توليد البخار سوف يؤخذ جزء منه ليحقن إلى غرفة الاحتراق والمتبقي يتمدد خلال التوربين البخاري منتجا شغلا إضافيا ليخرج بعدها البخار وينخفض إلى ضغط المكثف ثم يضاف الماء إلى المكثف ويضخ عن طريق المضخة إلى منظومة توليد البخار.



(3): غرفة احتراق الوحدة الغازية البسيطة

إن الفرق الرئيسي بين محاكاة الوحدات التوليدية المركبة التي لا يطبق فيها نظام الحقن عن التي يطبق فيها تقنية حقن البخار قبل دخوله إلى التوربين البخاري تكمن في العملية الحرارية التي تحصل في غرفة الاحتراق الداخلي للوحدة الغازية البسيطة.

إذ تم إيجاد نسبة الوقود إلى الهواء من خلال تطبيق معادلة اتزان الطاقة والمبينة بالشكل (3) خلال غرفة الاحتراق وكما مبين في المعادلة التالية [2]

$$m_a h_2 + m_f LCV_{cc} + m_s h_{inj} = (m_a + m_f) h_{3g} + m_s h_{3s}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{(h_{3g}) - (h_2) + j (h_{3s} - h_{inj})}{LCV_{cc} - (h_{3g})} \quad \text{---(11)}$$

وبالنسبة لكتلة الوقود الداخل إلى غرفة الاحتراق فقد تم حسابه من المعادلة التالية:

$$m_f = \bar{\lambda} * \quad \text{---(12)}$$

أما الكتلة الكلية المارة خلال غرفة الاحتراق فيمكن إيجادها من المعادلة أدناه:

$$m_{\text{tot}} = m_a + m_f + m_s \quad \text{---(13)}$$

وعليه فإن كمية البخار المحقون يمكن إيجادها من خلال المعادلة التالية:

$$m_s = j m_a \quad \text{---(14)}$$

في حين تم حساب المحتوى الحراري للغازات المغادرة غرفة الاحتراق والداخلة إلى التوربين الغازي من خلال العلاقة الآتية:

$$h_{3g} = C_{pg} T_3 \quad \text{---(15)}$$

وأما المحتوى الحراري للبخار المغادر غرفة الاحتراق فيتم إيجادها من العلاقة الآتية:

$$h_{3s} = h(T_3, P_3) \quad \text{---(16)}$$

وفيما يخص المحتوى الحراري للبخار المحقون فيحسب من خلال العلاقة الآتية:

$$h_{inj} = h_{12} \quad \text{---(17)}$$

بينما تم حساب شغل التوربين الغازي من خلال المعادلة الآتية:

$$W_{\text{net}} = m_{\text{tot}} C_{pm} (T_3 - T_4) - W_C \quad \text{---(18)}$$

أما كمية الحرارة المضافة نتيجة عملية احتراق الوقود الهيدروكربوني في غرفة الاحتراق فقد تم حسابها كما يلي:

تقييم أداء الوحدات التوليدية المركبة باستخدام تقنية حقن البخار :

$$Q_{\bar{f}} = m_{\text{tot}} \cdot C_{Pm} \cdot (T_3 - T_2) \cdot CC \quad \text{---(19)}$$

علما أن الحرارة النوعية للمزيج تم حسابها باستخدام المعادلة التالية: [14]

$$C_{Pm} = C_{Pg} + j * C_{Ps} \quad \text{---(20)}$$

وفيما يخص منظومة توليد البخار فقد تم حساب درجة التضايق (pinch point) ودرجة الاقتراب (approach point) واللذان يمكن تعريفهما كما موضح في الشكل (4) كما يتم الحصول عليها من خلال استخدام المعادلتين التاليتين:

$$t_{pp} = T_6 - T_{10} \quad \text{---(21)}$$

$$\Delta t_{appr} = T_{10} - T_9 \quad \text{---(22)}$$

وان درجة حرارة البخار المحمص تحسب من العلاقة أدناه بعد اخذ بنظر الاعتبار الفرق ثابت بين درجة حرارة البخار المحمص ودرجة حرارة غازات العادم هي 10 [15].

$$T_{12} = T_4 - TTD \quad \text{---(23)}$$

في حين تم حساب كمية البخار المتولدة من منظومة توليد البخار من خلال تطبيق معادلة اتران الطاقة بين منطقتي

$$m_{ST} = \frac{m_{\text{tot}} C_{Pm} (T_4 - T_6) (1 - h_1)}{h_{12} - h_9} \quad \text{---(24)}$$

وان درجة حرارة الغازات المطروحة إلى المحيط الخارجي ستتأثر بتقنية الحقن وستحسب من المعادلة الآتية:

$$T_7 = T_4 - \left[\frac{m_{ST} * (h_9 - h_8)}{m_{\text{tot}} C_{Pm} (1 - h_1)} \right] \quad \text{---(25)}$$

أما فيما يخص الوحدة البخارية والتي تمثل الدورة السفلية للوحدة التوليدية المركبة والموضحة في الشكل (5) فإن أدائها سيتأثر بكمية البخار المتولدة من منظومة توليد البخار وكذلك بكمية البخار الضئيلة المنتزعة. إن كتلة البخار المنتزعة من التوربين البخاري لتدخل إلى محررة الغازات deaerator التي تمتزج مع الكتلة المتبقية المارة خلال المكثف ستتأثر بكتلة من منظومة توليد البخار الجديدة عند الحقن وتحسب من خلال استخدام المعادلة التالية:

$$m_{\bar{f}} = \frac{(h_{17} - h_{15}) \cdot m_{ST}}{h_{13} - h_{16}} \quad \text{---(26)}$$

وباستخدام المعادلة التالية سيتم حساب شغل التوربين البخاري:

$$W_{ST} = (m_{ST} - m_s) (h_{12} - h_{13}) + (m_{ST} - m_{\bar{f}} - m_s) (h_{13} - h_{14}) \quad \text{---(27)}$$

كما إن الشغل المبذول خلال المضختين يحسب من المعادلة التالية:

$$W_{pumptot} = (m_{ST} - m_s) (h_8 - h_{17}) + (m_{ST} - m_{\bar{f}} - m_s) (h_{15} - h_{16}) \quad \text{---(28)}$$

وعليه فإن القدرة الكلية للوحدة التوليدية المركبة يمكن إيجادها من المعادلة التالية :

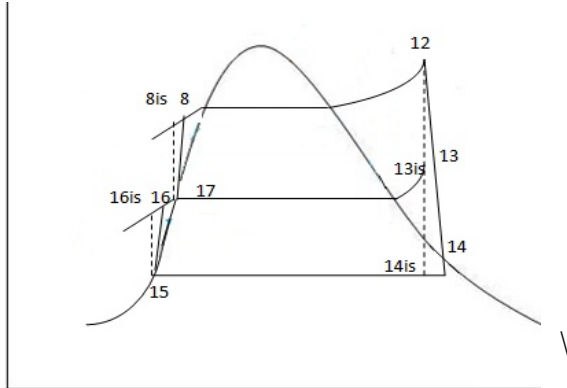
$$P_{CCGT} = (W_{net} * \eta_{mGT}) + ((W_{ST} * \eta_{mST}) - (W_{pumptot} * \eta_{mpum})) \quad \text{---(29)}$$

في حين يتم حساب الاستهلاك النوعي للوقود للوحدة التوليدية المركبة من المعادلة التالية:

$$SFC_{CCGT} = \frac{m_f * 3600}{P_{CCGT}} \quad \text{---(30)}$$

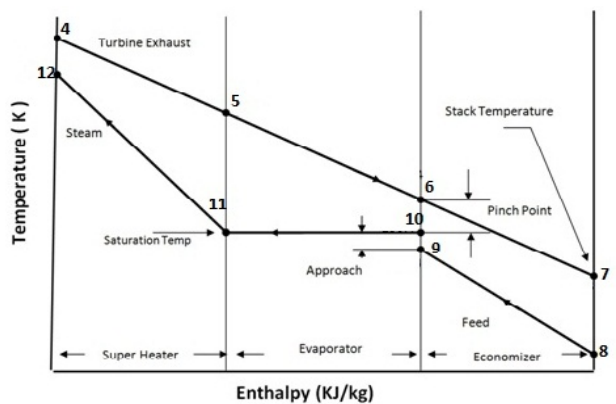
وتم إيجاد الكفاءة الحرارية للوحدة التوليدية المركبة من المعادلة التالية:

$$\overline{CCGT} = \frac{P_{CCGT}}{Q_{\bar{f}}} \quad \text{---(31)}$$



(5):

للوحة البخارية



(4): توزيع درجات الحرارة خلال منظومة توليد البخار أحادية الضغط

تمت برمجة معادلات الوحدة البخارية ومن ثم دمجها مع معادلات الوحدة الغازية البسيطة ومنظومة توليد البخار وبعد الحصول على منظومة متكاملة تم تطبيق تقنية حقن البخار عليها من خلال إعطاء (j) نسبة تتراوح بين (1-6%) لمشاكل تحدث في غرفة الاحتراق مسببة في انطفاء اللهب عند تجاوز هذا الحد [8] ومن ثم مشاهدة تأثير هذه الكمية من البخار المحقون على أداء الوحدة التوليدية المركبة.

النتائج ومناقشتها:

يبين الشكل (6) العلاقة بين تغير درجة حرارة المحيط الخارجي وكتلة الهواء الداخل إلى الضاغطة للوحدة الغازية البسيطة يتضح من الشكل أن كتلة الهواء تنخفض مع ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي ويعزى سبب ذلك إلى انخفاض كثافة الهواء والتي تتأثر بشكل كبير مع ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي. الشكل (7) يبين العلاقة بين القدرة التوليدية للوحدة الغازية البسيطة ودرجة حرارة المحيط الخارجي حيث يلاحظ من هذا الشكل انخفاض القدرة بسبب علاقتها الطردية بكتلة الهواء التي تنخفض مع ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي وان هذا الانخفاض في القدرة سيؤدي بدوره إلى انخفاض الكفاءة الحرارية للوحدة الغازية البسيطة وكما مبين ذلك في الشكل (8).

النوعي للوقود يزداد مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي بسبب نقصان القدرة المتولدة من الوحدة الغازية البسيطة. (10) يبين العلاقة بين كتلة البخار المتولدة من منظومة توليد البخار أحادية الضغط ودرجة حرارة المحيط

الخارجي في حالة عدم استخدام تقنية حقن البخار وفي حالة استخدامها. يتبين من الشكل أن كتلة البخار المتولدة تزداد مع زيادة نسبة الحقن ضمن حدود (0-6%) بسبب زيادة الكتلة الكلية المتدفقة من التوربين الغازي من جهة وازدياد قيمة الحرارة النوعية للمزيج (بخار+نواتج الاحتراق) من جهة أخرى. ويصور (11) تصور العلاقة بين القدرة

التوليدية للوحدة المركبة في حالة عدم استخدام تقنية الحقن وعدم استخدامها مع تغير درجات حرارة المحيط الخارجي (°C 15-45) يلاحظ من الشكل المذكور أن القدرة التوليدية في حالة استخدام الحقن هي أكبر مما عليه في حالة عدم

استخدامها ولجميع نسب الحقن وبينما تنخفض مع ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي لتسلك نفس السلوك لكل الحالات ويعزى سبب ذلك إلى انخفاض القدرة التوليدية من الوحدة الغازية والتي تؤثر سلباً في القدرة التوليدية للوحدة البخارية

نتيجة انخفاض كتلة البخار المار خلالها. (12) يوضح علاقة القدرة المتولدة من الوحدة الغازية البسيطة والوحدة التوليدية المركبة في حالتها حقن البخار وعدم حقنه مع درجة حرارة المحيط الخارجي. حيث يمكن ملاحظة الانخفاض

ارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي (°C 15 45).

استخدام تقنية حقن البخار لزيادة كتلة البخار المتولدة من منظومة توليد البخار مقارنة بمثيلاتها التي لا تستخدم هذه

التقنية. أما الشكل (13) فإنه يوضح العلاقة بين الكفاءة الحرارية لكل من الوحدة الغازية البسيطة والمركبة باستخدام وعدم

استخدام تقنية الحقن. حيث يتبين من الشكل المذكور أعلاه إن الكفاءة الحرارية للوحدة التوليدية المركبة المطبق عليها نظام

حقن البخار هي أكبر بكثير من تلك الكفاءة لكل من الوحدتين التوليدية المركبة والغازية البسيطة. ويعود سبب ذلك إلى تقليل

الطاقة الحرارية المهذورة إلى المحيط الخارجي نتيجة استغلالها في منظومة توليد البخار لإنتاج بخار محمص يستخدم بعد

ذلك في الوحدة البخارية لإنتاج قدرة إضافية. أما الشكل (14) فيبين العلاقة بين الاستهلاك النوعي للوقود لكلا الوحدتين

الغازية البسيطة والمركبة بالإضافة إلى الوحدة المركبة المطبق عليها نظام حقن البخار مع درجة حرارة المحيط الخارجي

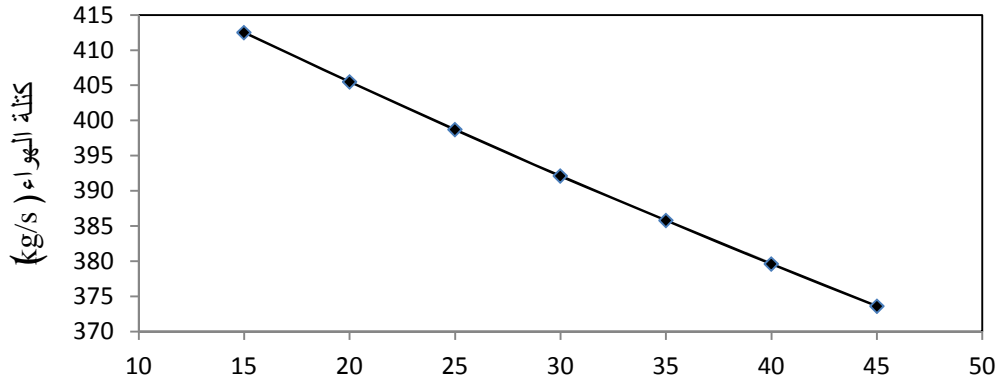
. ويتبين من الشكل إن الاستهلاك النوعي للوقود بالنسبة للوحدة الغازية البسيطة هو أعلى منه للوحدة التوليدية

كلا حالتها حقن البخار وعدمه. ويعزى ذلك إلى الهدر الكبير في الطاقة الحرارية مع غازات العادم للوحدة البسيطة، هذا من

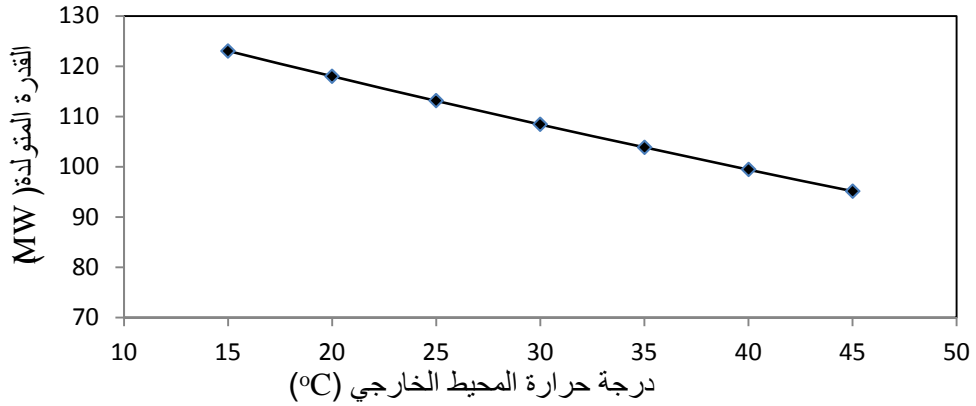
جهة ومن جهة أخرى فإن الاستهلاك النوعي للوقود يزداد مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي بسبب الانخفاض في

اع درجة حرارة المحيط الخارجي .

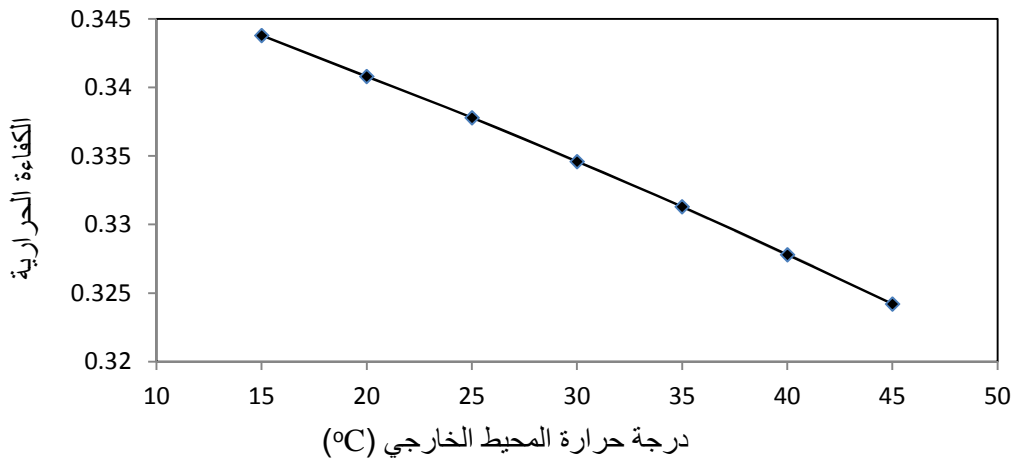
تقييم أداء الوحدات التوليدية المركبة باستخدام تقنية حقن البخار



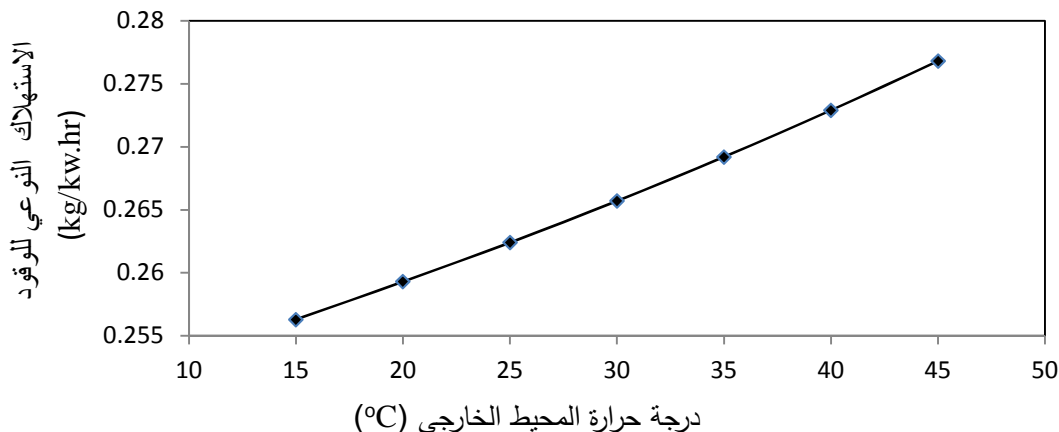
شكل(6):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في كتلة الهواء للوحدة الغازية البسيطة



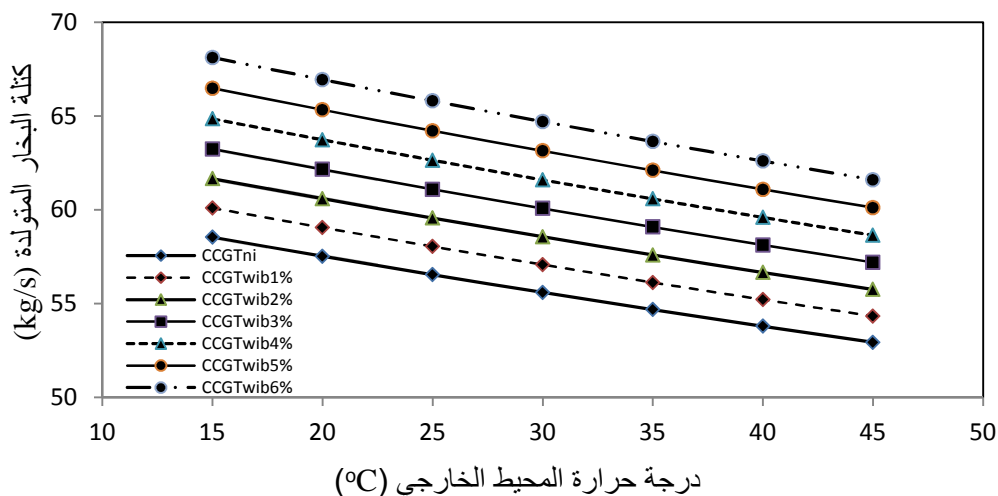
شكل(7):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في القدرة المتولدة للوحدة الغازية البسيطة



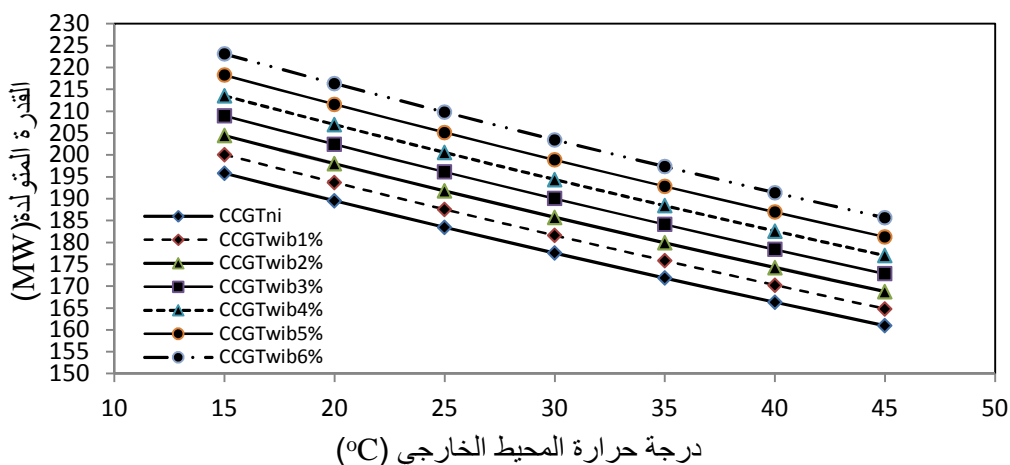
شكل(8):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في الكفاءة الحرارية



شكل(9):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في الاستهلاك النوعي للوقود للوحدة الغازية البسيطة

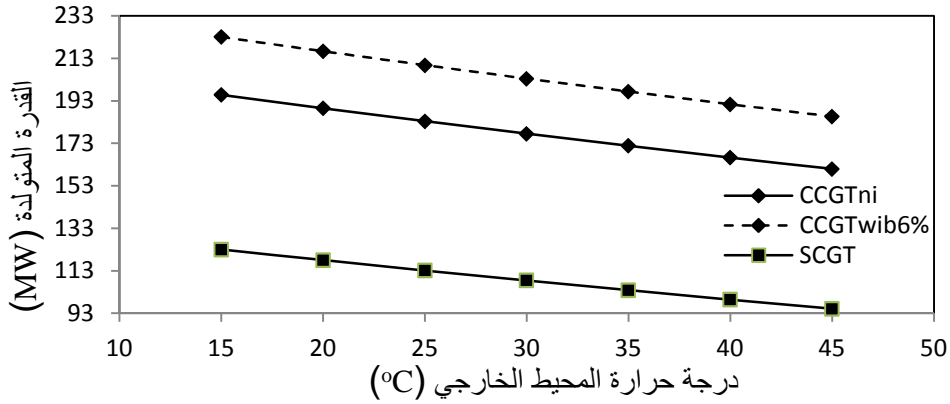


شكل(10):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في كتلة البخار المتولدة عند حقن البخار قبل دخوله الى التوربين البخاري

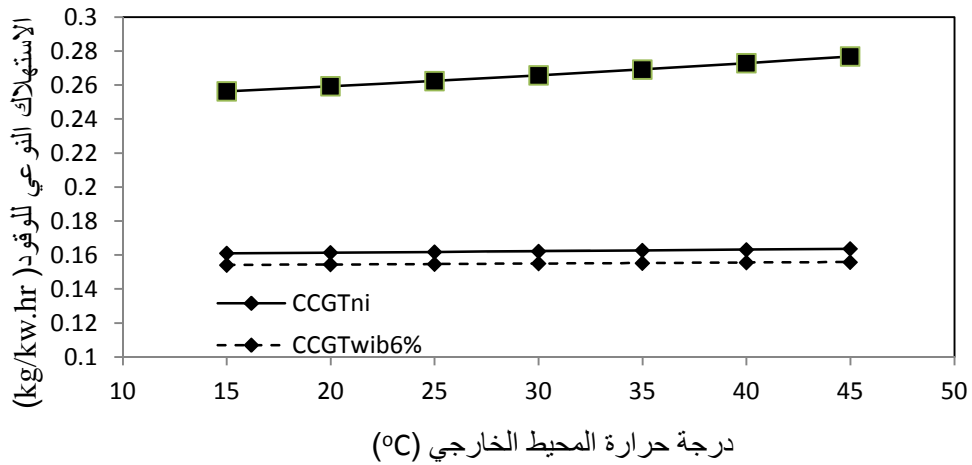


شكل(11):تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في القدرة المتولدة عند حقن البخار قبل دخوله الى التوربين البخاري

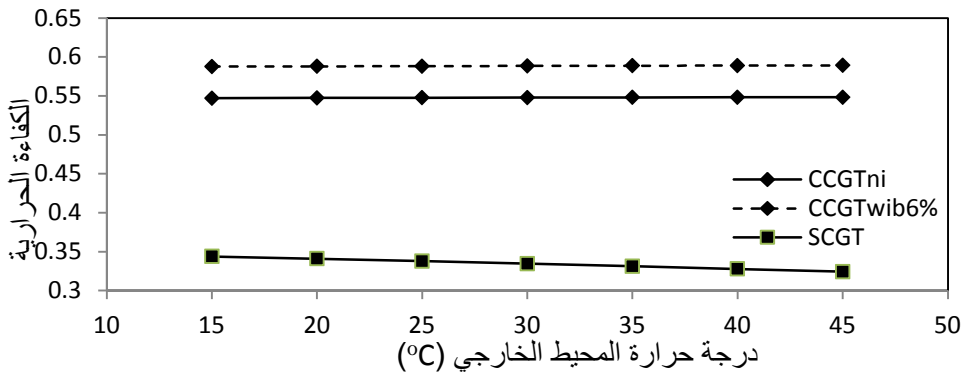
تقييم أداء الوحدات التوليدية المركبة باستخدام تقنية حقن البخار :



شكل (12): تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في القدرة المتولدة



شكل (14): تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في الاستهلاك النوعي للوقود



شكل (13): تأثير تغير درجة حرارة المحيط الخارجي في الكفاءة الحرارية

1- تم ملاحظة إن كلا من كتلة الهواء و القدرة المتولدة والكفاءة الحرارية تنحدر وبشكل خطي مع ازدياد درجة حرارة المحيط الخارجي عن 15°C. أما الاستهلاك النوعي للوقود فإنه يزداد مع زيادة درجة حرارة المحيط 15 °C لكل من الوحدة الغازية البسيطة والوحدات التوليدية المركبة وكذلك الوحدات التوليدية المركبة في حالة حقن البخار قبل مروره في التوربين البخاري .

- 2- وجد إن تطبيق نظام الوحدات التوليدية الحرارية على الوحدة الغازية البسيطة يؤدي إلى زيادة واضحة في القدرة التوليدية وان مقدار هذه الزيادة في البحث الحالي هي (59.195%) عن مثيلاتها في الوحدة الغازية البسيطة وعند درجة حرارة للمحيط الخارجي وقدرها 15°C.
- 3- في حالة استخدام تقنية حقن 6%، لوحظ إن كلا من القدرة التوليدية والكفاءة الحرارية للوحدة المركبة تزداد بنسبة قدرها (13.931%) (7.421) على التوالي إن تلك الناتجة من الوحدة الغازية البسيطة وعند عند درجة حرارة للمحيط الخارجي قدرها 15 .
- 4- أخيرا يمكن أن نستنتج من هذه الدراسة إن تطبيق الوحدات التوليدية المركبة بحال استخدام تقنية حقن البخار بدلا من الوحدات الغازية البسيطة تؤدي إلى رفع أداء هذه حطة أكثر من تطبيق نظام الوحدات التوليدية المركبة على الوحدات الغازية البسيطة.

- [1] Kumer , N.R., Krishna ,K. R. and Rama ,A.V., “ Thermodynamic analysis of heat recovery steam generator in combined cycle power plants “ ,Thermal science ,Vol. 11,No.4,pp. 143-156,2007.
- [2] Bouam ., Aissani ,S. and Kadi ,R.,” Combustion chamber steam injection for gas turbine performance improvement operations “ ,Journal of engineering for gas turbine and power ,Vol.130,pp.041701-1,2008.
- [3] Horlock,J.H.,”Advanced gas turbine cycle”, Whittle laboratory Combringe, J.K.,1edition,2003.
- [4] Carapellucci ,R.,”A unfired approach to assess performance of different techniques for recovering exhaust heat from gas turbine”, Energy conversion and management, Vol.50,pp.1218-1226,2009.
- [5] Korakianitis,T., Grantstrom ,J ., Wassingbo ,P., and Massardo ,F.A. ,”Parametric performance of combined-cogeneration power plant with various power and efficiency enhancements”, Journal of engineering for gas turbine and power,Vol.127,pp.65-72,2005.
- [6]Al Doori ,W.H.,” Influence of steam injection on the performance of combined cycle power plant “ ,Journal of engineering and science , Vol.6,pp.390-396,2011.
- [7] Rahman ,M.M., Ibrahim ,T.K., and Abdulla ,A.N.,” Thermodynamic performance analysis of gas turbine power plant” , International journal of the physical sciences, Vol.6,No.14,pp.3539-3550,2011.
- [8] Srinivas ,T., Gupta ,S.V ., and ready ,V.B.,” Sensitivity and analysis of SITG based combined cycle with dual pressure HRSG “ International journal of thermal science , Vol.47,pp.1226-1234, 2008.
- [9] Low ,B .Reddy, B, V., ”Performance simulation of a combined cycle power generation system with steam injection in the gas turbine combustion chamber”, proceedings of ES2007,pp.27-30,2007.
- [10] General electric model PG9171E UP rate gas turbine Manual 2008.
- [11] Srinivas ,T., ”Study of a dearator location in triple pressure reheat combined powercycle“,Energy,vol.34,pp.1364-137,2009.
- [12] Butcher, C.J, Reddey ,B.V.,” Second low analysis of a waste heat recovery based power generation system”, International Journal of heat and mass transfer vol.50,pp.2355-2363,(2007). [13] Colin R., Ferguson., Allain T. and Kirkpatrick,” Internal combustion engine”, John Wiley a sons,Inc.,2001.
- [14] Kenneth C. Weston., ”Energy conversion” chapter 9,pp.333-394,Advance system ,2000.
- [15] Cogeneration and combined cycle principles <http://www.hrsdesign.com/design .htm>.

تم اجراء البحث في كلية الهندسة = جامعة الموصل