

## تأمين الكهرباء المنتجة من محطة توليد مشتركة

حميد حيدر هاشم \* ، غزلان محمد الزروق \*\*

### 1. المقدمة

تشتمل الدورات المشتركة في محطات توليد الطاقة على دورة حرارية "فوقية" أو "علوية" Topping Cycle منتجة للقدرة ، تذهب الحرارة المطرودة منها ، بصورة كلية أو جزئية ، إلى دورة أخرى "تحتية" أو "سفلية" . Lower Bottoming Cycle . الهدف الرئيسي من هذا التوليف هو السعي إلى تحقيق زيادة في الشغل المنتج من كمية حرارة محددة وارداة إلى المحطة (هي طاقة الوقود ) [1].

غالباً ما تكون المحطة الفوقية هي وحدة توربين غازي، حيث تصل درجة حرارتها  $1100^{\circ}\text{C}$  إلى  $1650^{\circ}\text{C}$  بينما تكون المحطة التحتية وحدة توربين بخاري.

تمتاز محطات القوى المشتركة أو المولفة بالكفاءة العالية و القدرة الخارجة العالية، بالإضافة إلى المرونة، وسرعة بدء التشغيل عند الأحمال الجزئية، و الكفاءة العالية لمدى واسع من الأحمال [2].

$$P_E = \beta * IC + F + (OM) \dots\dots\dots (1)$$

حيث تعني:

Pe التكلفة السنوية للكهرباء المنتجة (\$/year)

IC تكلفة رأس المال (\$)

$\beta$  معامل العمولة على رأس المال و يعتمد على سعر الخصم

(i) و سنوات عمر الخطة (n)

$\beta * IC$  الكلفة السنوية لرأس المال (\$/year).

F تكلفة الوقود المستهلك في السنة (\$/year)

(OM) التكلفة السنوية للتشغيل و الصيانة (\$/year)

و بحسب ثمن إنتاج الوحدة (\$/kWh) من محطة ما من

قسمة المعادلة (1) على الطاقة الكهربائية المنتجة سنوياً،

فتصبح المعادلة كالتالي:

إن أيسر طريقة لتقييم اقتصاديات محطة ما من محطات القوى، هي حساب تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء من هذه الخطة، ثم مقارنتها بالتكلفة المناظرة في محطة تقليدية . كما يمكن إتباع طرق أخرى تتضمن صافي القيم الحالية لدورة حياة الخطة Present life cycle cost [4.3].

### 2. حساب كلفة إنتاج وحدة الكهرباء [3,1]

تُبنى طريقة الحساب على الربط بين ثمن الكهرباء و كل من تكلفة رأس المال و تكلفة الإنتاج الجارية و التي تتضمن كلفة الوقود و تكلفة تشغيل و صيانة الخطة . و يمكن صياغتها بالمعادلة التالية :

## 5- كلفة الصيانة و التشغيل

يمكن التعبير عن تكلفة التشغيل والصيانة (OM) كمجموع لتكاليف التشغيل الثابتة (U) (\$/year) والتي تتضمن (أجور العاملين ، التأمين، الإيجار، و المصروفات الإدارية ... إلخ) و تكاليف التشغيل المتغيرة (V) (\$/kWh) والتي تتضمن أجور الصيانة و الأدوات الاحتياطية).

وبذلك يصبح ثمن إنتاج الوحدة الكهربائية:

$$C_e = \frac{P_E}{WH} = \frac{\beta C_o W}{WH} + \frac{QH}{WH} + \frac{U}{WH} + V \dots \dots \dots (6)$$

$$C_e = \frac{\beta C_o}{H} + \frac{\xi}{\eta_o} + \frac{U}{WH} + V \dots \dots \dots (7)$$

حيث  $o \eta = W/Q$  هي الكفاءة الإجمالية للمحطة.

## 6- محطة التوليد المشتركة- دراسة حالة

تتكون محطة التوليد المشتركة قيد الدراسة [1] من دائرة توربينية غازية مفتوحة ودورة ترينية بخارية مغلقة بدون حرق مكمل. تولد التوربينات الغازية (81MW) بينما تولد التوربينات البخارية (48MW) ، يمثل الشكل (1) مخططاً مبسطاً للمحطة، وقد وضعت عليه معدلات التدفق والضغط ودرجات الحرارة. تبلغ الكفاءة الإجمالية للمحطة (0.48) على أساس استعمال القيمة الحرارية الدنيا للوقود المستعمل (43100kJ/kg) ودرجة حرارة غازات الاحتراق (930C°). تبلغ الكفاءة الإجمالية للدائرة التوربينية الغازية 0.313 عند نفس القيمة الحرارية للوقود. الجدول (1) يلخص البيانات الاقتصادية و التي استُخدمت في حساب ثمن وحدة الكهرباء لخطّة التوليد المشتركة وللمحطة الغازية اعتماداً على المصادر [7-1].

$$C_e = \frac{P_E}{WH} = \frac{\beta IC}{WH} + \frac{F}{WH} + \frac{(OM)}{WH} \dots \dots (2)$$

حيث W القدرة المركبة للمحطة (kW)

H عدد ساعات التشغيل السنوية الفعلية (h /year)

## 3- التكلفة السنوية لرأس المال

تتضمن كلفة رأس المال (IC) كلفة محطة القوى ، ويمكن التعبير عنها بكلفة وحدة القدرة (Co) (\$/kW) مضروباً بالقدرة المركبة للمحطة (W) (kW) ، ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية :

$$IC = C_o W \dots \dots \dots (3)$$

أما معامل العمولة على رأس المال (β) فيحسب من العلاقة التالية [5,1].

$$\beta = \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \dots \dots (4)$$

يعتمد سعر الخصم على القيم النسبية لحقوق الملكية، وتمويل الديون، وعلى المعدلات والإعفاءات الضريبية التي تختلف من بلد إلى آخر وعلى معدلات التضخم (Inflation Rates).

## 4- كلفة الوقود السنوية

يمكن التعبير عن كلفة الوقود السنوية بالمعادلة التالية :

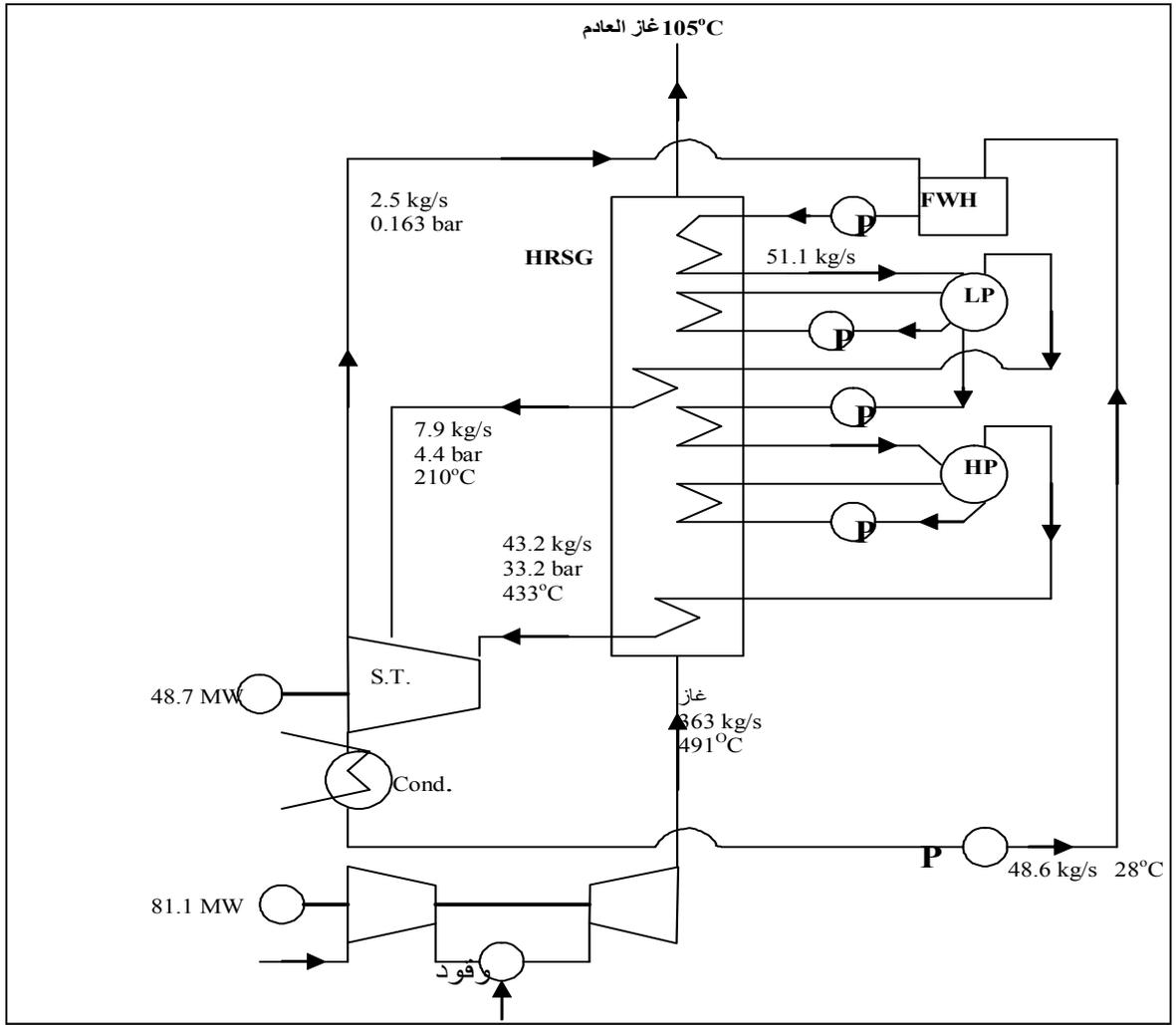
$$F = \zeta Q H \dots \dots \dots (5)$$

حيث ζ سعر وحدة الوقود (\$/kWh)

Q طاقة الوقود المستهلك (kW)

H ساعات التشغيل (h /year)

## إدارة الطاقة



الشكل (1) مخطط محطة التوليد المشتركة

جدول (1) بيانات الكلفة الاقتصادية

ت	الفترات	الوحدات	محطة التوليد المشتركة	المحطة الغازية
-1	كلفة رأس المال	\$/KW	350	250
-2	معامل العمولة	%	6	6
-3	ساعات التشغيل	h <sup>o</sup> year	8000	8000
-4	كلفة الوقود	\$/10 <sup>6</sup> Btu	4	4
-5	تكاليف التشغيل المتغيرة	\$/kWh	0.005	0.005
-6	تكاليف التشغيل الثابتة	% من رأس المال	1	1

## 7- النتائج والمناقشة

### 1.7 - مقارنة كلفة وحدة الكهرباء

اعتماداً على جدول البيانات (1) و المعادلة (7) ، يمكن حساب ثمن وحدة الكهرباء المنتجة من محطة التوليد المشتركة و محطة التوليد الغازية ، فكانت في محطة التوليد المشتركة تساوي (0.0375 \$/kWh) بينما في محطة التوليد الغازية فكانت (0.055 \$/kWh). الشكل (2) يفصل مفردات كلفة أو سعر وحدة الكهرباء المنتجة في كل من محطة التوليد المشتركة و الخطة الغازية . من الشكل يلاحظ أن تكلفة الوقود هي التكلفة المهيمنة ، و على هذا الأساس تصح كفاءة الخطة المشتركة - و هي الأعلى - السبب الرئيسي في هبوط سعر وحدة الكهرباء مقارنة مع الخطة الغازية بالرغم من ارتفاع كلفة رأسها .

إن لعدد ساعات التشغيل دوراً مهماً في تحديد سعر وحدة الكهرباء المنتجة . ففي الشكل (3) يلاحظ هبوط الكلفة بنسبة 45% في محطة التوليد المشتركة و بنسبة 30% لخطة التوليد الغازية . إذا زادت عدد ساعات التشغيل السنوية من 1000 hr- 8000 hr ومن الشكل

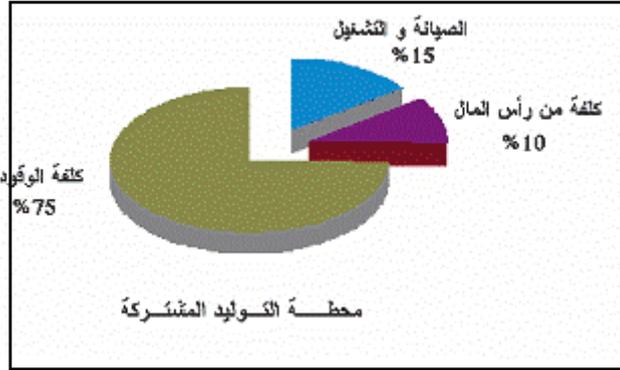
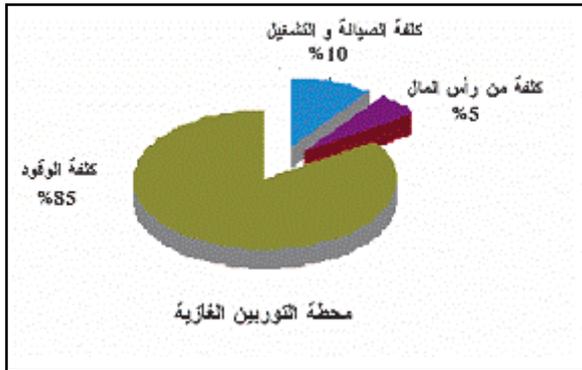
يمكن ملاحظة أن كلفة وحدة الكهرباء المنتجة من محطة التوليد المشتركة أعلى من الخطة الغازية عند ساعات التشغيل أقل من 600 hr .

الشكل (4) يوضح تأثير سعر الوقود المستهلك على سعر وحدة الكهرباء المنتجة لخطة التوليد المشتركة و التوليد الغازية و لفترة تشغيل مختلفة . يتضح من الشكل أن الخطة المشتركة لا تنتج الكهرباء بتكلفة أقل إلا إذا كان سعر الوقود مرتفعاً عند ساعات التشغيل السنوية القليلة . بينما إذا كانت عدد ساعات التشغيل السنوية عالية ( 8000hr ) على سبيل المثال فإن الصورة تصبح مختلفة تماماً .

### 2.7- تأثير مفردات كلفة الكهرباء المنتجة

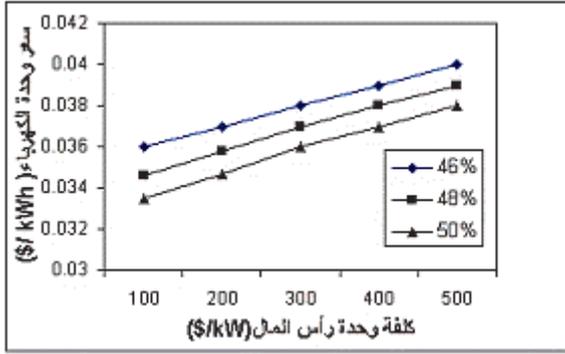
#### 1.2.7- الكفاءة الحرارية

الشكل (5) يوضح العلاقة بين سعر وحدة الكهرباء المنتجة في محطة التوليد المشتركة و كلفة وحدة رأس المال المستثمر عند مستويات مختلفة من الكفاءة الحرارية لخطة . فعند كفاءة حرارية معينة للمحطة يلاحظ أن سعر وحدة

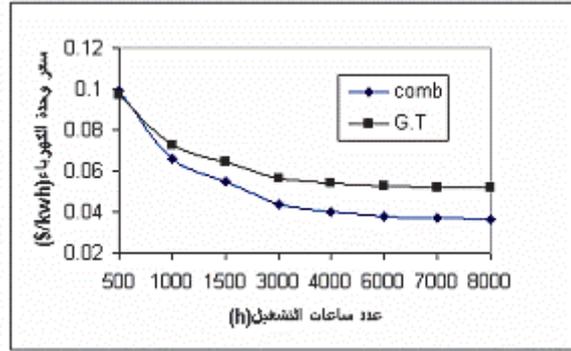


الشكل (2) مفردات كلفة سعر وحدة الكهرباء المنتجة في محطة التوليد المشتركة و وحدة التوربين الغازي

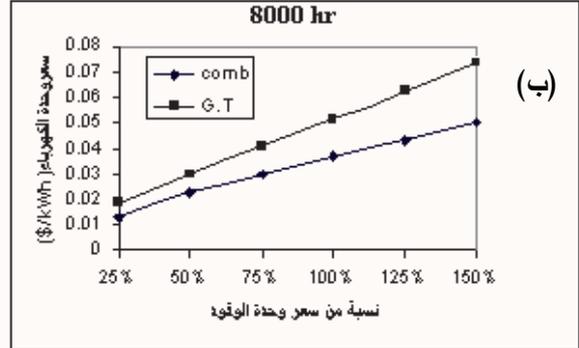
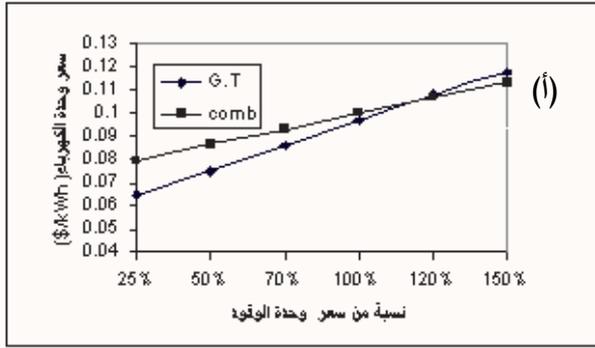
## إدارة الطاقة



شكل (5) تغير سعر وحدة الكهرباء مع كلفة وحدة رأس المال عند كفاءات مختلفة للمحطة المشتركة و وحدة التوربين الغازي



شكل (3) تغير سعر وحدة الكهرباء مع ساعات التشغيل السنوية لمحطة التوليد



شكل (4) مقارنة سعر وحدة الكهرباء المنتجة من محطة التوليد المشتركة و محطة التوربين الغازية عند أسعار وقود مختلفة

### 2.2.7 سعر وحدة الوقود

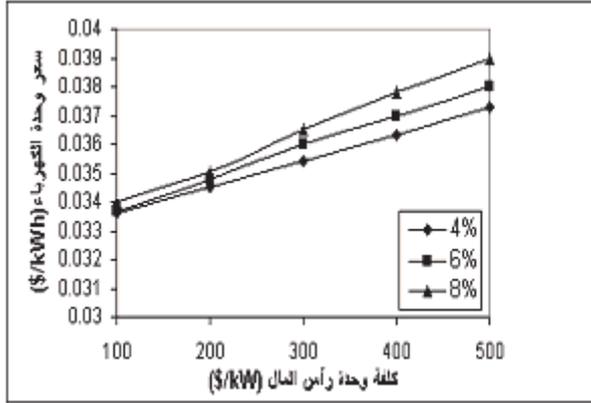
تأثير سعر وحدة الوقود مبينة في الشكل (6) يؤشر الشكل ، عند كلفة وحدة رأس المال الثابتة ، فإن زيادة أو نقصان كلفة وحدة الوقود بنسبة 25% فإن سعر وحدة الكهرباء المنتجة تزداد أو تقل بنسبة تتراوح ما بين (15%-25%).

### 3.2.7 سعر الخصم

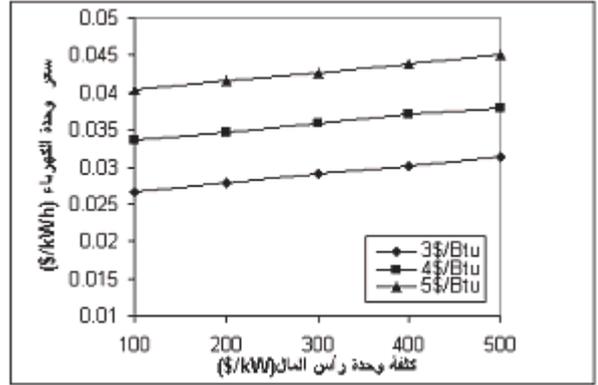
يظهر الشكل (7) أن تأثير سعر الخصم على كلفة وحدة الكهرباء المنتجة لا خطي و بسيط جداً ، حيث يتراوح بنسبة

الكهرباء المنتجة تزداد بنسبة 5.8% تقريباً عند مضاعفة كلفة وحدة رأس المال .

كما يُلاحظ أن زيادة كفاءة محطة التوليد المشتركة بنسبة 2% يكافئ تخفيض مقداره 100 \$/kW من كلفة وحدة رأس المال عند سعر ثابت لوحدة الكهرباء المنتجة . كما يظهر الشكل (5) أيضاً ، إذا كانت المحطة عند كفاءة 50% وكلفة رأس المال 300 \$/kW فسوف تنتج وحدة كهرباء بـ (kWh) بنفس الكلفة التي تنتجها المحطة عندما تكون كفاءتها 46% وكلفة رأس مالها 100 \$/kWh .



شكل (7) تغير سعر وحدة الكهرباء مع كلفة وحدة رأس المال عند أسعار خصم مختلفة



شكل (6) تغير سعر وحدة الكهرباء مع كلفة وحدة رأس المال عند أسعار مختلفة

التشغيل من 15 إلى 30 سنة فإن سعر وحدة الكهرباء المنتجة تقل بنسبة % عند كلف وحدة رأس المال 500 \$/kW . وعند مدى 100 \$/kW - 300 \$/kW من كلفة وحدة رأس المال فإن تقليل 5 سنوات من عدد سنوات التشغيل يكافئ تقريباً 50 \$/kW نقصان في كلفة وحدة رأس المال.

#### 5.2.7 كلفة الصيانة و التشغيل

من المعادلة (7) يمكن ملاحظة أن كلف الصيانة مفردة مؤثرة بشكل مباشر على سعر وحدة الكهرباء المنتجة من المحطة. فأي زيادة أو نقصان في كلفة الصيانة والتشغيل مباشرة (يرفع أو يخفض) مستوى سعر وحدة الكهرباء المنتجة .

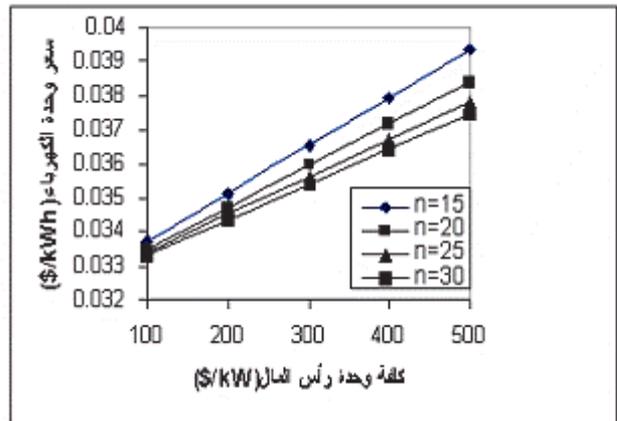
#### 8- الاستنتاجات

إن كلفة وحدة الكهرباء المنتجة في محطات التوليد المشتركة أقل منها في محطات التوربين الغازية عند ساعات تشغيل سنوية أعلى من 600h سنوياً.

0.5% عند زيادة سعر الخصم عند كلف رأس المال القليلة و بنسبة 2% عند زيادة سعر الخصم عند كلف رأس المال العالية .

#### 4.2.7 سنوات التشغيل

يظهر الشكل (8) علاقة لا خطية لعدد سنوات تشغيل المحطة عند كلف متغيرة لوحدة رأس المال . عند تغير سنوات



شكل (8) تغير سعر وحدة الكهرباء مع كلفة وحدة رأس المال لسنوات تشغيل مختلفة

- 4-Ayyash, S. & Hammoudeh, S. "Economic Analysis of Energy Management For cooling Systems in Kuwait ", *Energy*, vol.10, No.6, PP 721-725,1985.
- 5-Hashem,H.H. "Thermal-Economic Analysis of Industrial Gas Turbine Cogeneration plant", *Energy convers.Mgmt.vol.32,No.32,PP 419-424,1991.*
- 6-Baujart, V. " Comparison of MED and MSF Desalination Processes for Power and water combined plants ",*Int.conf- on Energy and water Desalination,Tripoli,Libya,20-21 June 2000.*

7-د.حسن البنا سعد فتح "تكنولوجيا تحلية المياه" اقتصاديات التحلية ص 428، الدار الجامعية ، جمهورية مصر العربية 2001 .

### الرموز ومصطلحات

- $e$  سعر وحدة الكهرباء (\$/kWh)
- $C_0$  كلفة وحدة رأس المال (\$/kW)
- $F$  كلفة الوقود المستهلك (\$/year)
- $H$  عدد ساعات التشغيل (hr)
- $I$  كلفة رأس المال المستثمر (\$)
- $i$  معامل العمولة (%)
- $n$  عدد سنوات التشغيل (year)
- $OM$  كلفة الصيانة السنوية (\$/year)
- $P_E$  الكلفة السنوية للكهرباء المنتجة (\$/year)
- $Q$  كلفة الوقود المستهلك
- $U$  تكاليف التشغيل الثابتة (\$/year)
- $W$  القدرة المركبة للمحطة (kW)
- $\beta$  معامل العمولة على رأس المال
- $\bar{c}$  سعر وحدة الوقود (\$/kWh)
- $\eta_0$  الكفاءة الحرارية الإجمالية للمحطة (%)

تحسين الكفاءة الحرارية للمحطة يقلل و بشكل مباشر وواضح سعر وحدة الكهرباء المنتجة .  
أن لكل من معامل العمولة و عدد سنوات التشغيل و كلف الصيانة تأثير على سعر وحدة الكهرباء المنتجة.

### 9- الخلاصة

إن الهدف الرئيسي من توليف محطات القوى هو السعي إلى تحقيق كفاءة أعلى للمحطة المشتركة بالإضافة إلى تخفيض تكلفة وحدة الكهرباء المنتجة من المحطة.

يتضمن هذا البحث حساب كلفة وحدة الكهرباء المنتجة من محطة توليد مشتركة و مقارنة هذه الكلفة مع كلفة وحدة الكهرباء المنتجة من محطة التوربين الغازي. حيث أظهرت النتائج أن سعر وحدة الكهرباء في محطة التوليد المشتركة أقل عند عدد ساعات التشغيل السنوية أعلى من 600 hr كما تضمن البحث دراسة تأثير بعض المفردات مثل الكفاءة الحرارية، سعر الوقود، سعر وحدة رأس المال، سعر الخضم، و عدد سنوات التشغيل على سعر وحدة الكهرباء المنتجة.

### المصادر

- 1-جون هـ . هورلوك "محطات القوى المولفة " ترجمة د. خليل محمود جامعة الملك سعود، العربية السعودية ، 1998 .
- 2- El.Wakil, M.M "Power plant Technology ",Mc Graw-Hill Book company ,Singapore,1984.
- 3-Spector,R.B."A Method of Evaluation Life Cycle Costs of Industrial Gas Turbines ", ASME J. of G.T and Power, vol.111, PP 637-641,1989.