

تأثير نوع الوقود المستخدم على كمية انبعاثات الاحتراق في محطة جنوب طرابلس الغازية

أحمد محمد الجدال^(*) ، علي محمد التهامي

قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية التقنية الهندسية - جنزور - طرابلس - ليبيا

المخلص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير انبعاثات احتراق أنواع مختلفة من الوقود بوحدة توربين غازي بمحطة جنوب طرابلس الغازية، وذلك للحصول على الأداء المطلوب عند ظروف تشغيل مختلفة، ثم للتعرف على ما يصدر عنها من ملوثات مختلفة ذات التأثير السلبي على البيئة [1, 2, 3].

(*) Email: aljedo2000@yahoo.com

و قد تم اختيار ثلاثة أنواع من الوقود التي يمكن استخدامها في المحطات الغازية بليبيا، و هي: الميثان، الأوكتان و الديزل.

ومن خلال هذه الأنواع الثلاثة تم الحصول على نتائج ومخططات، بناءً على متغيرات أساسية للدورة الغازية، مثل درجة حرارة الاحتراق، نسبة الانضغاط و شدة تركيز الخليط. و قد تم حساب المتغيرات لنوع الوقود المحدد، و الحصول على النتائج المطلوبة، و من ثم الحصول على كمية الانبعاثات المختلفة (أول أكسيد الكربون، ثاني أكسيد الكربون، أكسيد النيتروجين) عند ظروف التشغيل المختلفة، بالإضافة إلى عوامل الأداء الأخرى مثل كمية الحرارة، الشغل و الكفاءة. وذلك للحصول على الوقود الأمثل الذي يُعطي أقل مشاكل تلوثٍ للبيئة.

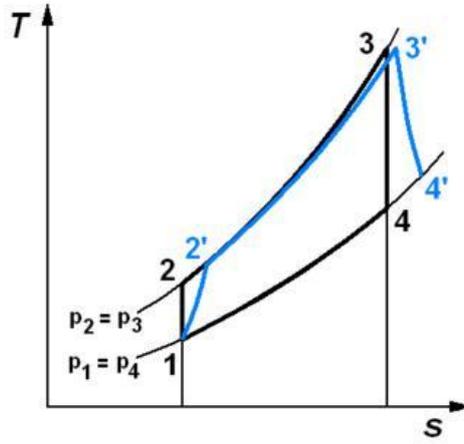
الكلمات المفتاحية: التوربين الغازي، انبعاثات احتراق الوقود، الميثان، الأوكتان، الديزل، كمية الحرارة، الشغل، الكفاءة.

1- المقدمة:

تتألف محطة جنوب طرابلس الغازية لكل وحدة من وحداتها، من الأجزاء الرئيسية التالية: (نظام مصفيات الهواء - ممر الهواء - الضاغط - منظومة الوقود الغازي - منظومة الوقود السائل - منظومة زيت التزييت - غرفة التحكم - التوربينة الغازية - ممر العادم - نظام توجيه العادم - المدخنة - المولد - محولات نظام بدء الحركة - و نظام تحريض المولد). و خلال الفترة التشغيلية للمحطة، تم تسجيل القراءات التشغيلية الفعلية للمحطة ولعدة أحمال خارجية مختلفة عند تشغيل المحطة بكلٍ من الوقود الغازي و الوقود السائل، حيث شملت هذه البيانات كلاً من:

نسبة الانضغاط عبر الضاغط ، نسبة الضغط عبر التوربين، درجات حرارة مائع التشغيل عند نقاط مختلفة لكل حمل (درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط، درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط، درجة حرارة الغاز الخارج من حيز الاحتراق، درجة حرارة الغاز الخارج من التوربين، معدّل تدفق الوقود).

حيث اعتمدت نتائج الحسابات التي أجريت في هذه الورقة على هذه البيانات التشغيلية الفعلية بعد أخذها بشكل مباشر من غرفة التحكم بالمحطة و عند الأحمال الخارجة المختلفة. كما تعمل المحطة الغازية وفق دورة برايتون الحرارية التي تتكون من ثلاثة إجراءات رئيسية وهي الانضغاط وإضافة الحرارة والتمدد، كما في الشكل (1). في هذه الحالة يتم سحب الهواء من المحيط بدرجة حرارة T_1 وضغط P_1 وضغطه عبر الضاغط بنسبة CPR وإدخاله إلى حجرة الاحتراق ومن ثم تمدده داخل التوربين للحصول على شغل. حيث تم تطبيق المعادلات الرياضية المبينة أدناه على المحطة و الحصول على النتائج المبينة في هذا البحث [4, 5, 6].



الشكل (1) - الدورة الحرارية المثالية و الحقيقية للمحطة الغازية على منحنى (T-S)

2 - التحليل الرياضي للمحطة الغازية :

التحليل الحراري للمحطة الغازية يتم لكل مكون أساسي للمحطة على حدة باعتبار أن الدورة حقيقية، وأن الحرارة النوعية تتغير مع درجة الحرارة، وأن عملية الاحتراق داخل الحجرة تتم على شكل تفاعل كيميائي بين الوقود الهيدروكربوني والهواء.

1.2 الضاغط [7]:

كما تم الإشارة سابقاً، فإن الضاغط يعمل على سحب الهواء وضغطه إلى مستوى ضغط الاحتراق بنسبة ضغط معينة، فإذا كانت كفاءة الضاغط η_c معلومة، فإن الشغل الحقيقي للضاغط W_{ca} هو:

$$W_{ca} = \frac{W_{cs}}{\eta_c} \quad (1)$$

حيث إن W_{CS} تمثل الشغل المثالي للضاغط أو الشغل الأيزنتروبي، وهو يساوي كما يلي حسب القانون الأول للديناميكا الحرارية:

$$W_{ca} = h_{2a} - h_1 = \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_c} \quad (2)$$

ولإجراء أيزونتروبي فإن نسبة الضغط CPR:

$$CPR = \frac{P_2}{P_1} = \frac{Pr_{2s}}{Pr_1} \quad (3)$$

حيث إن P_r هي الضغط النسبي، وعلاقته بالانتروبي القياسية حسب درجة الحرارة كما

يلي:

$$P_{r_1} = \left(\frac{S^{\circ} - T_0}{R} \right)_{T_1} \quad (4)$$

وبالتالي فإن:

$$P_{r_{2s}} = P_{r_1} \times CPR \quad (5)$$

إذا كانت CPR ودرجة حرارة الهواء عند الدخول إلى الضاغط معلومة يمكن حساب P_{r1} من المعادلة (4)، وبالتالي حساب P_{r2} من المعادلة (5)، علماً أن الإنتروبي القياسي $\overline{ST^0}$ يمكن حسابها للعنصر من المعادلة التالية:

$$\overline{ST^0} = \bar{R}[\alpha_1 \ln T - \alpha_2 T - \frac{\alpha_3}{2} T^2 - \frac{\alpha_4}{3} T^3 - \frac{\alpha_5}{4} T^4 + \alpha_6] \quad (6)$$

حيث إن $(\alpha_6 \dots \dots \alpha_1)$ هي معادلات درجة الحرارة وتختلف حسب العنصر الكيميائي، وتعطى عن طريق الجداول [7].

2.2 غرفة الاحتراق [7]:

داخل حجرة الاحتراق تتم عملية التفاعل الكيميائي بين الوقود والهواء حيث نحصل على غازات ساخنة بدرجة حرارة عالية T_3 . عملياً يحصل هنالك انخفاض في الضغط داخل حجرة الاحتراق إضافةً إلى التسرب الحراري المحيط، ولكن بشكل مثالي يمكن اعتبار أن عملية الاحتراق تتم عند ضغط ثابت، كما أن كمية الحرارة المضافة خلال الدورة الحرارية هي نفسها الناتجة عن عملية الاحتراق، وكما يلي:

$$Q_{in} = Q_{add} = H_p - H_r \quad (7)$$

حيث إن H_p هي المحتوى الحراري للغازات الناتجة عن عملية الاحتراق، و H_r هي المحتوى الحراري للمتفاعلات، وهما الوقود والهواء.

ويمكن حسابها كما يلي:

$$H_p = \sum n_e \bar{h}_e \quad (8)$$

حيث إن n_e هو عدد مولات عناصر نواتج الاحتراق و \bar{h}_e هي الإنثالبي للعنصر عند درجة حرارة الاحتراق.

أيضاً يمكن كتابة المعادلة (8) بالصيغة الآتية:

$$H_P = \sum_P n_e \bar{h}_e = \sum_P n_e (\bar{h}^o f + \Delta \bar{h}) e$$

$$H_r = \sum n_i \bar{h}_i \quad (9)$$

وكذلك فإن n_i هو عدد مولات المتفاعلات، و \bar{h}_i هي الإنثالبي للمتفاعلات عند درجة

حرارة الدخول إلى حجرة الاحتراق (درجة حرارة الخروج من الضاغط).

كما يمكن كتابة المعادلة (9) بالصيغة الآتية:

$$H_r = \sum_r n_i \bar{h}_i = \sum_r n_i (\bar{h}^o f + \Delta \bar{h}) i$$

وحسب الدورة الحارية في الشكل (1)، فإن كمية الحرارة النوعية تصبح:

$$q_{in} = h_3 - h_{2a} \quad (10)$$

3.2 التوربين [7]:

للتمدد الايسنتروبي في التوربين فإن:

$$\frac{P_{r4s}}{P_{r3}} = \frac{P_4}{P_3} \quad (11)$$

$$P_{r4s} = P_{r3} \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_{r2}}{CPR} \quad (12)$$

حسب الشكل (1) فإن الشغل الايسنتروبي هو:

$$W_{ts} = h_3 - h_{4s} \quad (13)$$

وبالتالي فإن الشغل الحقيقي هو:

$$W_{ta} = \eta_r \times W_{ts} = h_3 - h_{4a} \quad (14)$$

وبالتالي فإن:

$$h_{4a} = h_3 - W_{ta} \quad (15)$$

بعد إيجاد الشغل الحقيقي للضاغط وللتوربين وكمية الحرارة، يمكن إيجاد الكفاءة الحرارية

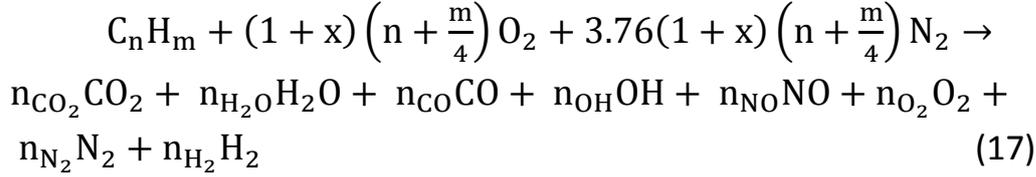
كالآتي:

$$\eta_{th} = \frac{W_{ta} - W_{ca}}{q_{in}} \quad (16)$$

4.2 عملية الاحتراق [7, 8]:

لاحتراق وقود هيدروكربوني مع الهواء يمكن كتابة معادلة التفاعل بالصيغة العامة

التالية [7]:



حيث إن x في هذه المعادلة تشير إلى نسبة الهواء الزائد في التفاعل، وهو بدلالة شدة

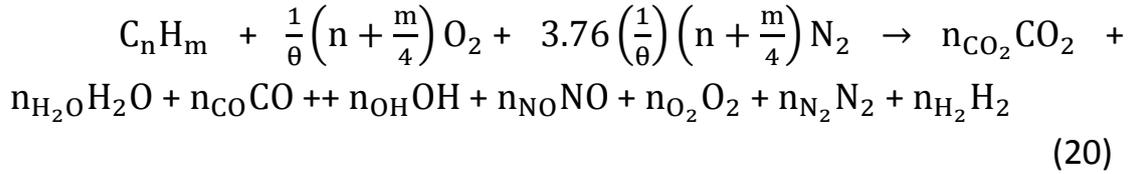
الخليط θ يساوي:

$$x = \frac{1}{\theta} - 1 \quad (18)$$

حيث إن θ هي النسبة بين نسبة الهواء إلى الوقود المثالية والحقيقية، أي:

$$\theta = \frac{(A/F)_{stoc}}{(A/F)_{act}} \quad (19)$$

وبالتالي تصبح معادلة التفاعل الكيميائي بدلالة شدة الخليط على النحو التالي:



3- النتائج والمناقشة:

تم حساب قيم المتغيرات الأساسية (درجة حرارة الاحتراق، نسبة الانضغاط، شدة

الخليط) باستخدام المعادلات الرياضية السابقة، لمعرفة تأثيرها على كل من (الكسر الكتلي

لأول أكسيد الكربون، الكسر الكتلي لثاني أكسيد الكربون، الكسر الكتلي لأكسيد النيتروجين،

الشغل الحقيقي للضاغط، الشغل الحقيقي للتوربين، الكفاءة الحرارية للدورة).

وقد تم توضيح نتائج هذه المتغيرات، من خلال المنحنيات المبينة في الأشكال من (2) - (12)، و لوحظ الآتي:

1- الكفاءة الحرارية لدورة التوربين الغازي البسيطة تزداد مع زيادة نسبة الضغط و زيادة درجة حرارة الاحتراق لأنواع الوقود الثلاثة، في حين تنخفض عند زيادة شدة الخليط. كما أن الكفاءة الحرارية في حالة استعمال كلٍ من وقود الأوكتان و الميثان كانت أعلى منها في وقود الديزل؛

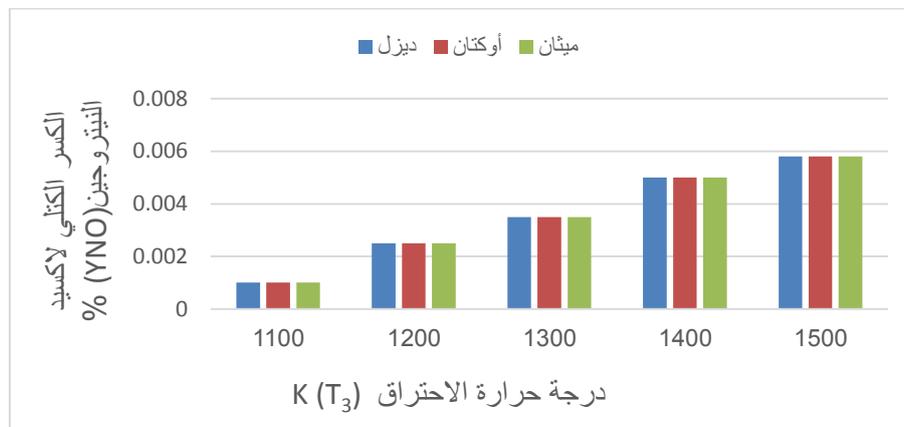
2- الشغل الحقيقي للضاغط يبقى ثابتاً عند تغير درجة حرارة الاحتراق و شدة الخليط، في حين انه يزداد عند تغير نسبة الانضغاط ؛

3- الشغل الحقيقي للتوربين في حالة تغير درجة حرارة الاحتراق و نسبة الضغط يزداد بالنسبة لأنواع الوقود الثلاثة المستعملة، إلا انه عند تغير شدة الخليط يزداد حتى يصل أقصى قيمة له عند $(\theta = 1)$ ، ثم يعود للانخفاض: أي أن أقصى قيمة للشغل الحقيقي للتوربين تكون عند شدة الخليط $(\theta = 1)$ ؛

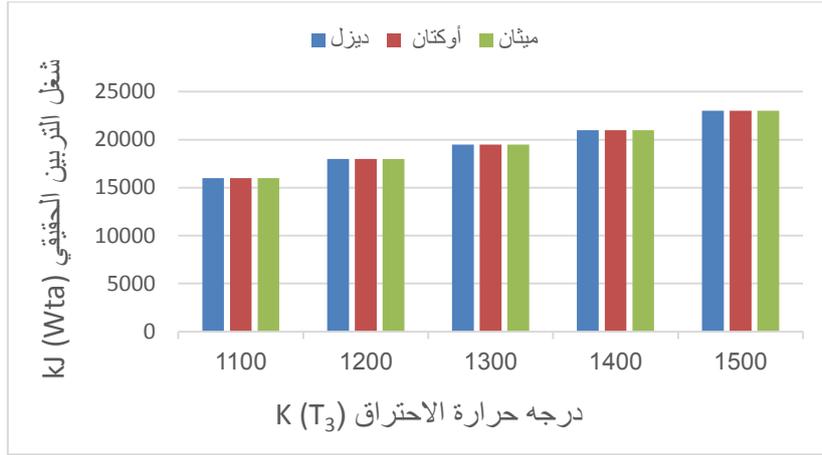
4- الكسر الكتلي يكون ثابتاً عند تغير نسبة الانضغاط، أما في حالة تغير شدة الخليط، فإنه يُلاحظ انخفاضاً في قيمة الكسر لـ NO، و زيادة واضحة لـ CO، أما CO₂ فيصل إلى أقصى قيمة له عند $(\theta = 1.1)$ ، ثم تعود للهبوط، وكان وقود الديزل دائماً الأعلى في هذه الزيادة، من كلٍ من الأوكتان و الميثان . و في حال تغير درجة الحرارة فيلاحظ نقصان طفيف في CO₂، N₂، و زيادة خفيفة أيضاً لـ CO .



الشكل (2) - العلاقة بين درجة حرارة الاحتراق و الكسر الكتلي لثاني أكسيد الكربون



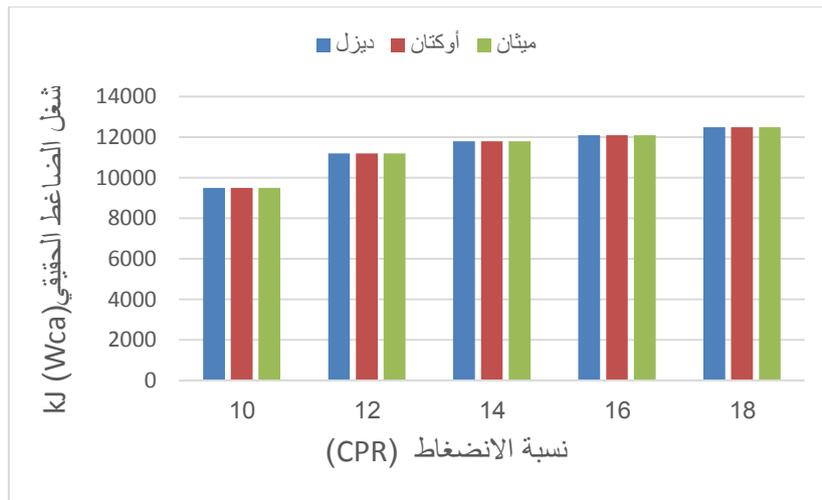
الشكل (3) - العلاقة بين درجة حرارة الاحتراق والكسر الكتلي لأكسيد النيتروجين



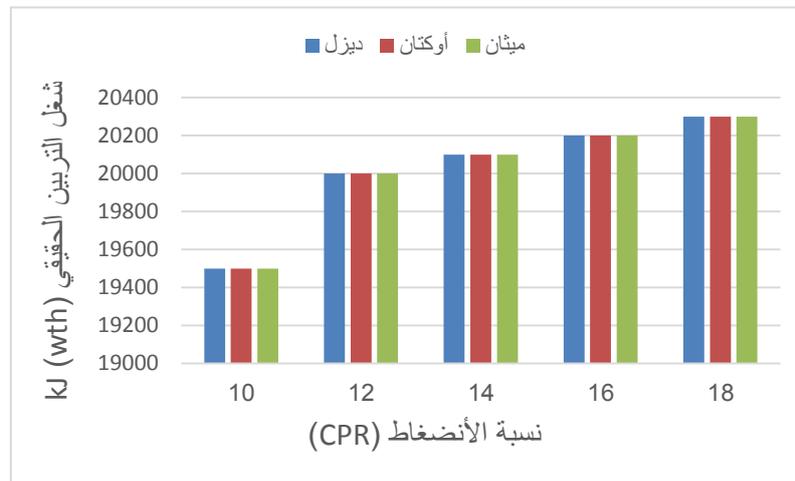
الشكل (4) - العلاقة بين درجة حرارة الاحتراق و الشغل الحقيقي للتربين



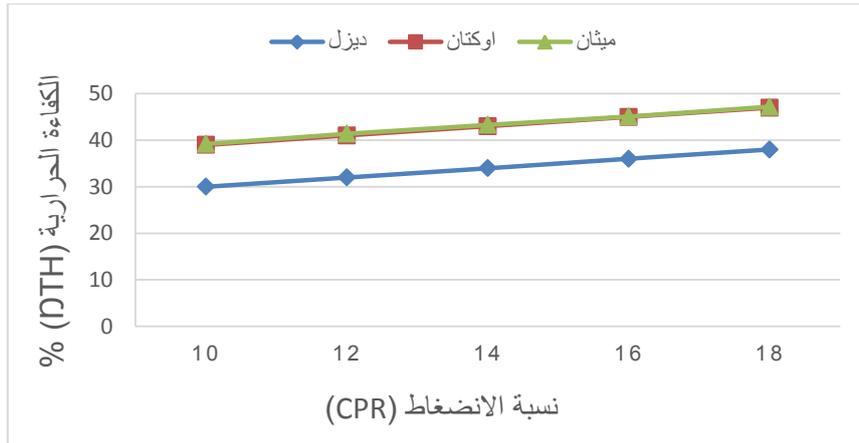
الشكل (5) - العلاقة بين درجة حرارة الاحتراق والكفاءة الحرارية



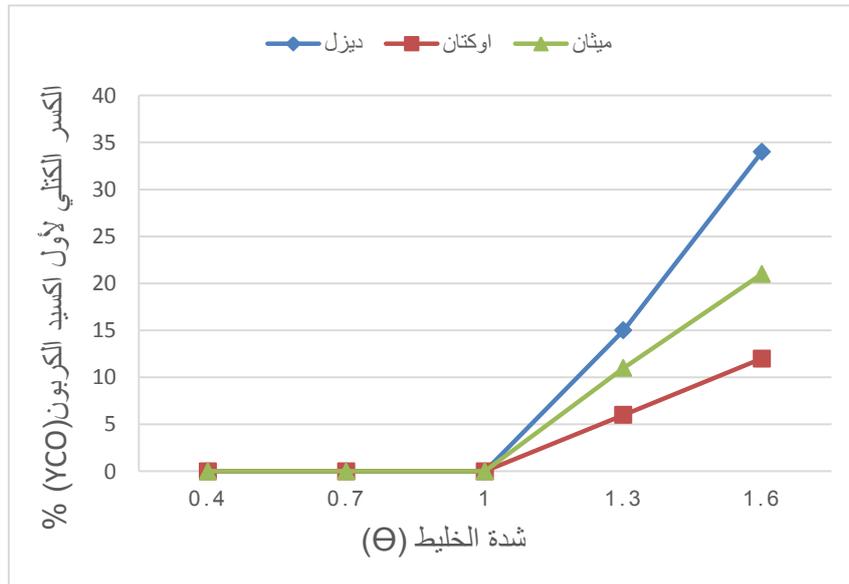
الشكل (6) - العلاقة بين نسبة الانضغاط والشغل الحقيقي للضاغط



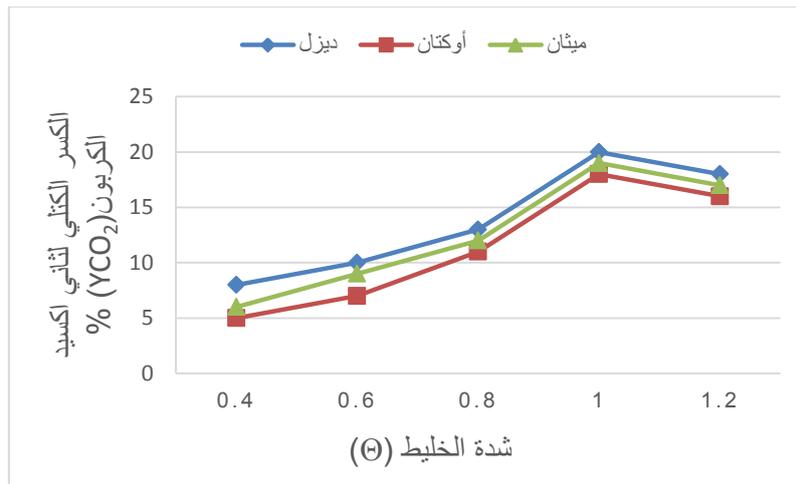
الشكل (7) - العلاقة بين نسبة الانضغاط والشغل الحقيقي للتوربين



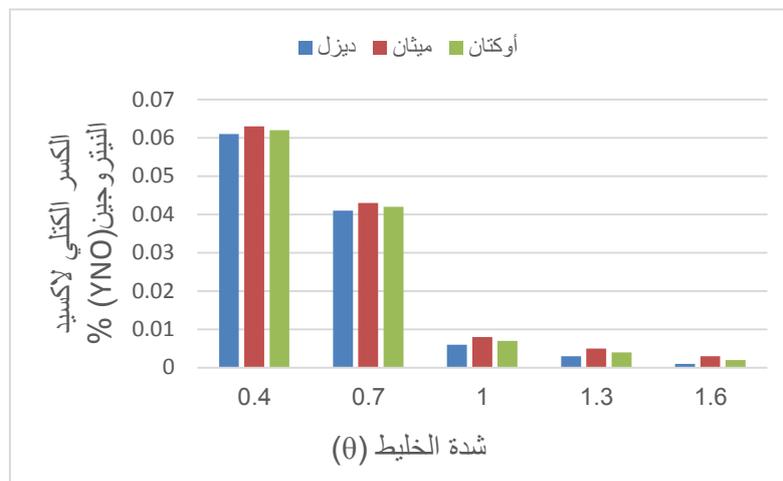
الشكل (8) - العلاقة بين نسبة الانضغاط والكفاءة الحرارية



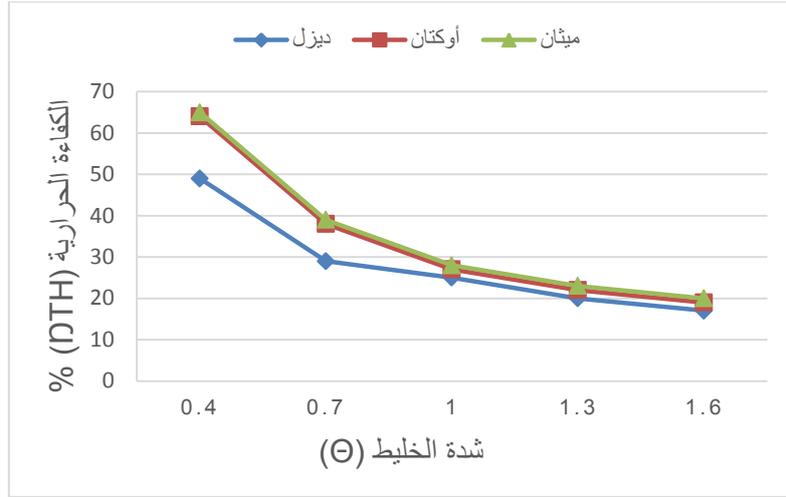
الشكل (9) - العلاقة بين شدة الخليط والكسر الكتلي لأول أكسيد الكربون



الشكل (10) - العلاقة بين شدة الخليط والكسر الكتلي لثاني أكسيد للكربون



الشكل (11) - العلاقة بين شدة الخليط والكسر الكتلي لأكسيد النيتروجين



الشكل (12) - العلاقة بين شدة الخليط والكفاءة الحرارية

4 - الخلاصة:

- 1- الكفاءة الحرارية لدورة التوربين الغازي البسيطة تزداد مع زيادة نسبة الانضغاط و زيادة درجة حرارة الاحتراق لأنواع الوقود الثلاثة.
- 2- الكفاءة الحرارية للدورة تتخفض عند زيادة شدة الخليط.
- 3- الكفاءة الحرارية للدورة في حالة استعمال كل من وقود الأوكتان و الميثان كانت أعلى منها في وقود الديزل.
- 4- الشغل الحقيقي للضاغط يزداد عند زيادة نسبة الانضغاط.
- 5- الشغل الحقيقي للتوربين يزداد عند زيادة درجة حرارة الاحتراق و نسبة الضغط.
- 6- الشغل الحقيقي للتوربين، عند تغير شدة الخليط يزداد حتى يصل أقصى قيمة له عند ($\theta = 1$)، ثم يعود للانخفاض.

7- يزداد الكسر الكتلي لكلٍ من غاز أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون مع زيادة شدة الخليط إلى أقصى قيمة عند $(\theta = 1.1)$ ، ثم يعود للهبوط، وكان وقود الديزل دائماً الأعلى في هذه الزيادة، من كلٍ من الأوكتان و الميثان.

8- بعد هذه الدراسة على الأنواع الثلاثة من الوقود (الأوكتان، الميثان، الديزل)، فقد وُجِدَ أن أفضلها هو وقود الأوكتان يليه الميثان، ومن ثم الديزل، من حيث انبعاثات غازات أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون وأكسيد النيتروجين الضارة للبيئة عند الاحتراق.

5-التوصيات :

1- يُوصى بأفضلية استعمال وقود الأوكتان ومن ثم الميثان، فضلاً عن وقود الديزل، في محطات التوربين الغازي لتوليد الكهرباء.

2- يمكن استعمال دورة مركبة لوحدة التوربين الغازي، ودراستها بنفس نمط هذه الدراسة.

3- استخدام الأساليب العلمية والعملية في الاستفادة من انبعاثات الغازات من المحطة الغازية.

4- رصد تلوث الهواء على مدار الساعة ومقارنتها بالنتائج النظرية التي يمكن الحصول عليها حسابياً.

5- يمكن استعمال أنواع أخرى من الوقود مثل (الغاز الطبيعي، الهيدروجين)، ودراسة تأثيرها في وحدة التوربين الغازي وأدائها.

6- استخدام أحد برامج الحاسوب لحساب نقاط أكثر من النقاط الخمس التي تم إجراء الدراسة عليها، وذلك للحصول على نتائج أشمل و أدق.

الرموز :

الرمز	المصطلح	الوحدة
T_1	درجة حرارة المحيط	K
T_3	درجة حرارة الاحتراق	K
P	الضغط	kPa
CPR	نسبة الانضغاط	%
η_c	كفاءة الضاغط	%
Wca	الشغل الحقيقي للضاغط	kJ
Wcs	الشغل المثالي للضاغط	kJ
H	الإنتالبي	kJ
Q	كمية الحرارة	kJ
N	عدد المولات	-
q	كمية الحرارة النوعية	kJ/kg
Wts	الشغل الأيسنتروبي للتوربين	kJ
Wta	الشغل الحقيقي للتوربين	kJ
η_{th}	الكفاءة الحرارية للتوربين	%

x	نسبة الهواء الزائد في التفاعل	%
θ	شدة تركيز الخليط	-
Pc	ضغط الاحتراق	kPa
R	ثابت الغاز	kJ/kmol.K
YCO ₂	الكسر الكتلي لثاني أكسيد الكربون	%
YCO	الكسر الكتلي لأول أكسيد الكربون	%
YNO	الكسر الكتلي لأكسيد النيتروجين	%

المراجع :

- 1- فتحى الأمين، عوض زليح، "تلوث الهواء والمخاطر البيئية الناتجة عن عوادم المركبات الآلية"، المجلة الدولية المُحكّمة للعلوم الهندسية وتقنية المعلومات، 2015.
- 2- محمد صابر، "الإنسان وتلوث البيئة"، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، 2000.
- 3- منصور محمد عبد الله الفريح، "التلوث البيئي الناجم عن محطات توليد الطاقة الكهربائية وأثره على الأمن البيئي"، جامعة نايف العربية للعلوم الأمنية، الرياض، 2002.
- 4- أسامة محمد المرضي سليمان، "التوربينات الغازية"، جامعة وادي النيل، السودان، 2019.
- 5- م. صالح سعيد بوحليقة، "مكونات التوربينة الغازية"، <http://download-engineering-pdf-ebooks.com>

- 6- البيانات و القراءات المأخوذة من محطة جنوب طرابلس الغازية لتوليد الكهرباء، 2021.
- 7- T. D. Eastop and A. McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineers and Technologists", Longman Singapore Publishers, 1994.
- 8- Eastop T. D. and Craft D. R., "Energy Efficiency", Longman, 1990.