

## دراسة بعض العوامل المؤثرة على خرج عنفة قطرية صغيرة باستخدام عدة موائع عمل وباستخدام البرنامج (EES)

رزان بكور \*

(تاريخ الإيداع 29 / 5 / 2016. قُبل للنشر في 3 / 8 / 2016)

### □ ملخص □

تم إجراء هذا البحث من أجل توليد الطاقة الكهربائية باستطاعات صغيرة وخصوصاً في الأماكن النائية البعيدة عن شبكة الكهرباء. يتضمن البحث دراسة تحليلية حرارية لعنفة قطرية صغيرة (mini radial turbine) التي تمثل جهاز التمدد (Expander) في دارة رانكن العضوية (Organic Rankine Cycle) (ORC). تم في هذا البحث اختيار عدة بارامترات ودراسة تأثير كل بارامتر على حدة على خرج العنفة الصغيرة باستخدام البرنامج EES (Engineering Equation Solver) (برنامج حل المعادلات الهندسية) وتم ذلك باستخدام عدة موائع عمل لتشغيل العنفة الصغيرة، وقمنا بإجراء المقارنة فيما بينها لتحديد أفضلها تأثيراً على خرج العنفة الصغيرة.

الكلمات المفتاحية: عنفة قطرية صغيرة، مائع العمل (الوسيط العامل)، دارة رانكن العضوية.

\* قائم بالأعمال - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Study some of the factors affecting on the outlet of mini radial turbine using several working fluids and using the program (EES)

Razan Bakowr\*

(Received 29 / 5 / 2016. Accepted 3 / 8 / 2016)

### □ ABSTRACT □

This search was carried out in order to generate electricity small capacities especially in remote locations far from the electricity grid. the search includes a thermal analytical study of mini radial turbine which represents the Expander in Organic Rankine Organic Cycle (EES).

In this search, the selection multiple parameters and study the effect of each parameter on the outlet of the mini turbine using the program EES (Engineering Equation Solver) was done using several working fluids to drive a mini turbine, and We have conducted a comparison between them and determine the best impact on the outlet of the mini turbine.

**Key words:** mini radial turbine, working fluid, Organic Rankine Cycle.

---

\* Academic Assistant – Department of the Mechanical Power Engineering - Faculty Of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University – Lattakia – Syria.

## مقدمة:

إن حوالي 2 مليار شخص حول العالم لا يحصلون على الكهرباء. هؤلاء السكان يعيشون في مناطق نائية بعيدة عن شبكة الكهرباء المركزية وهم عادة من ذوي الدخل المنخفض جداً، و تمديد شبكة الكهرباء لا ينظر إليه على أنه ذو جدوى اقتصادية لشركات الكهرباء التي تفضل تركيز أنشطتها في المناطق الحضرية [1].

في السنوات الأخيرة أصبحت دارة رانكن العضوية (Organic Rankine Cycle) (ORC) حقل بحوث مكثفة، وتظهر على شكل تكنولوجيا واعدة لتحويل الحرارة إلى عمل مفيد أو كهرباء. يمكن لمصدر الحرارة أن يكون من مصادر مختلفة من أهمها الإشعاع الشمسي. وخلافاً لدارة البخار التقليدية - حيث بخار الماء هو مائع العمل (الوسيط العامل) - تشغل دارات رانكن العضوية وسائط تبريد (refrigerants) أو مواد هيدروكربونية (hydrocarbons) [1]. تستعمل العنفة الصغيرة (mini turbine) عالمياً بشكل ملحوظ، ويمكن الاستفادة من هذه الفكرة في تصميم عنفة بخارية صغيرة (mini steam turbine) تتكون من فوهة واحدة تمثل الجزء الثابت ومن دولاب صغير يمثل الجزء المتحرك، واستخدام أبخرة لسوائل منخفضة درجة حرارة التبخر لتدوير هذه العنفة البخارية الصغيرة التي تشكل جزء من دارة رانكن العضوية (ORC). ومن ثم الحصول على طاقة كهربائية تستعمل لتأمين احتياجات كهربائية بسيطة، وخاصة في الأماكن التي يكون فيها إيصال الطاقة الكهربائية التقليدية ذو كلفة عالية.

## أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في الحصول على استطاعة صغيرة للعنفة الصغيرة يمكن استخدامها في تطبيقات منزلية وتجارية بكلفة مقبولة في متناول الجميع. حيث يركز محور البحث على دراسة العوامل المؤثرة على التصميم الحراري لعنفة قطرية صغيرة mini radial turbine من خلال استخدام برنامج حاسوبي (EES). هناك العديد من العوامل التي تؤثر على التصميم الحراري للعنفة الصغيرة إلا أن من أهم العوامل الجديرة بالاهتمام هي زاوية الدخول، التدفق الكتلي، درجة حرارة الدخول إلى الفوهة وضغط الدخول إلى الفوهة، والتي تؤثر بشكل كبير على استخدام العنفة من خلال علاقتها مع العمل المفيد والمردود المفيد للعنفة الصغيرة المدروسة.

## طرائق البحث ومواده:

إجراء دراسة حرارية للعنفة القطرية الصغيرة والتي تتكون من قسم ثابت (فوهة متقاربة) وقسم متحرك (دولاب صغير).

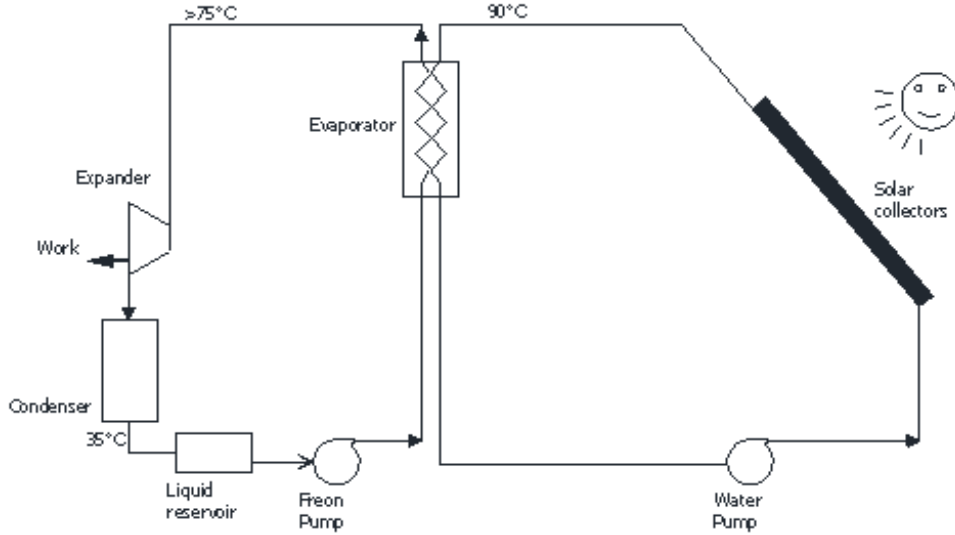
ومن ثم استخدام البرنامج (EES) لدراسة تأثير البارامترات المدروسة باستخدام مجموعة موائع عمل ودراسة تأثير كل بارامتر على حدة ومن ثم مقارنة الموائع المدروسة، وفي النهاية تم تقديم مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات.

## 4. دارة رانكن:

دارة رانكن العضوية هي دارة مشابهة لدارة رانكن وسميت "العضوية" لأنها تستخدم مادة كيميائية بدلاً من الماء كما هو الحال في دورة رانكن التقليدية. إن دارة رانكن العضوية مشابهة لدارة عنفة بخارية تقليدية، باستثناء المائع الذي يدور العنفة، الذي هو المائع العضوي عالي الكتلة الجزيئية، عادة الفريون (Freon) أو مائع آخر منخفض درجة حرارة

الغليان [2]. المواد الكيميائية المستخدمة في دورة رانكن العضوية تشمل الفريون، غاز البوتان، البروبان، الأمونيا ووسائط التبريد (Refrigerants) الجديدة الصديقة للبيئة.

يمكن أن يكون مصدر الحرارة شمسياً فمثلاً يوضح الشكل (1) دورة رانكن العضوية الشمسية منخفضة درجة الحرارة [1]. والتي تتكون كما هو موضح بالشكل من دارتين: الدارة الأولى هي دارة مائع انتقال الحرارة (والذي يكون عادة الماء). الدارة الثانية هي دارة مائع العمل (الوسيط العامل) (السائل منخفض درجة حرارة التبخر). يتم الربط بين الدارتين بواسطة مبادل حراري.



الشكل (1): دورة رانكن العضوية الشمسية منخفضة درجة الحرارة

##### 5. الموائع المستخدمة في دورة رانكن العضوية (ORC):

إن اختيار الوسيط العامل وظروف العمل لدورة رانكن العضوية له تأثير كبير على نظام التشغيل وكفاءته في استخدام الطاقة والتأثير على البيئة [3]. إن السوائل منخفضة درجة حرارة التبخر المستخدمة في دورة رانكن العضوية (ORC) هي عادة وسائط التبريد (Refrigerants)، وهي مركبات كيميائية تتركب من أكثر من عنصر وتستخدم كوسيط عمل في دورة رانكن العضوية (ORC).

قسمت وسائط التبريد حسب مواصفات الأمان الدولية (National Refrigeration Safety Code, NRSC) إلى ثلاث مجموعات:

- ❖ المجموعة الأولى (Safest of Refrigerants), A1 Group one: وهي وسائط تبريد آمنة الاستخدام.
- ❖ المجموعة الثانية (Toxic and somewhat flammable Refrigerants), A2 Group two: وهي وسائط تبريد سامة وبعضها قابل للاشتعال والانفجار.
- ❖ المجموعة الثالثة (Flammable refrigerants), A3 Group three: وهي وسائط قابلة للاشتعال والانفجار. [4].

إن الوسيط الأمثل لدارة رانكن العضوية هو R134a يليه R152a، R600، R600a و R290، وهي الموائع الأنسب من أجل تطبيقات درجة الحرارة المنخفضة المقادة بواسطة درجة حرارة لمصدر حرارة أقل من  $90 [^{\circ}\text{C}]$  [1] وندرج في الجدول (1) بيانات وسائط التبريد ومجموعات الأمان للوسائط المفضلة المذكورة آنفاً [5].

الجدول (1): بيانات وسائط التبريد ومجموعات الأمان

Refrigerant Number	Chemical Name	Chemical Formula	Molecular Mass	Normal Boiling Point		Safety Group
				[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[ $^{\circ}\text{F}$ ]	
134a	Ethane Series 1,1,1,2-tetrafluoroethane	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	102.0	-26	-15	A1
152a	Ethane Series 1,1-difluoroethane	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	66.0	-25	-13	A2
600	butane	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	58.1	0	31	A3
600a	isobutane	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	58.1	-12	11	A3
290	propane	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	44.0	-42	-44	A3

### 6. اختيار العنفة الصغيرة:

تم اختيار عنفة صغيرة قطرية وحيدة المرحلة رد فعلية. مكونة من قسمين: القسم الأول هو القسم ثابت: هو عبارة عن فوهة متقاربة، يحصل فيها زيادة السرعة على حساب الضغط من أجل إيجاد تيار سريع من بخار السائل منخفض درجة حرارة التبخر. وبالتالي نحصل على انخفاض في الضغط في القسم الثابت؛ وبالتالي نحصل على هبوط في الانتالبي في الفوهة الثابتة هو  $\Delta h_1$ . القسم الثاني هو القسم المتحرك (الدوار): هو عبارة عن دولاب، يتحرك لينتج عملاً على محوره. والمسافة بين شفراته تشكل فوهات متقاربة أيضاً. وبالتالي يحدث في هذا القسم أيضاً انخفاض في الضغط، وبالتالي نحصل على هبوط في الانتالبي في الفوهات المتحركة هو  $\Delta h_2$ . وبالتالي يكون الهبوط الكلي للانتالبي في العنفة الصغيرة هو  $\Delta h$ . يحدد من المعادلة [6]:

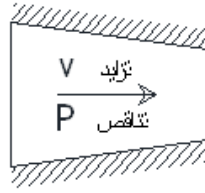
$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (1)$$

والعنفة هنا هي عنفة رد فعل. وتحدد درجة رد الفعل  $\bar{\sigma}$  من المعادلة [7]:

$$\bar{\sigma} = \Delta h_2 / \Delta h \quad (2)$$

### 6-1 القسم الثابت:

وفيه ينساب المائع (في حالة غازية) تحت تأثير فرق الضغط بين المدخل والمخرج؛ ونتيجة تناقص مقطع الجريان يتسارع المائع وينخفض ضغطه من  $P_0$  عند المدخل إلى  $P_1$  عند المخرج، ويزداد الحجم النوعي  $\theta$ ، تنخفض كذلك درجة الحرارة  $T$  نتيجة لتمدد المائع وهذا يعني تحول جزء من طاقة بخار المائع الكامنة على شكل ضغط وحرارة إلى طاقة حركية. وهكذا فإن مهمة الفوهة هي توليد الطاقة الحركية حيث تزداد السرعة من  $V_0$  عند المدخل إلى  $V_{1th}$  عند المخرج [6]. الفوهة المتقاربة موضحة بالشكل (2).



الشكل (2): الفوهة المتقاربة

الفوهة المتقاربة لها مقطع دخول و مقطع خروج و طول. الشروط عند مدخلها هي:  $P_o$  : ضغط الدخول إلى الفوهة،  $T_o$ : درجة حرارة الدخول إلى الفوهة،  $\dot{m}$ : التدفق الكتلي،  $V_o$ : السرعة عند مدخل الفوهة.

**ملاحظة** : في حال كان هناك زيادة في السرعة في الأنبوب الواصل بين الخزان (المبادل الحراري) والفوهة أكثر من 5% نعتبر أن السرعة  $V_o$  لا تساوي الصفر. وفي حال كانت الزيادة أقل من ذلك نعتبر أن السرعة على مدخل الفوهة صفر. سنعتبر هنا أن:  $V_o = 0$ .

من معادلة الاستمرار عند مخرج الفوهة [8,9]:

$$\dot{m} = \rho_a \cdot V_{1th} \cdot A_1 \quad (3)$$

حيث  $\rho_a$ : الكتلة النوعية النظرية للمائع عند الخروج من الفوهة،  $V_{1th}$ : السرعة النظرية المطلقة عند مخرج الفوهة،

$A_1$ : مقطع الخروج للفوهة المتقاربة.

تحدد السرعة  $V_{1th}$  من معادلة القدرة في الجريان الأديباتي (وتسمى أيضا معادلة انحفاظ الطاقة - قانون زونر -) بتطبيق هذه المعادلة بين طرفي الفوهة [8]:

$$h_{oo} = h_o + \frac{V_o^2}{2} = h_a + \frac{V_{1th}^2}{2} \quad (4)$$

مع إهمال السرعة الابتدائية  $V_o$ :

$$V_{1th} = \sqrt{2 \cdot (h_o - h_a)} \quad (5)$$

حيث  $h_{oo}$ : انتالبي التوقف،  $h_o$ : الانتالبي عند مدخل الفوهة،  $h_a$ : الانتالبي النظري عند مخرج الفوهة. تعطى  $h_o$  و  $h_a$  بالعلاقتين [8]:

$$h_o = C_p \cdot T_o \quad (6)$$

$$h_a = C_p \cdot T_a \quad (7)$$

حيث  $T_a$ : درجة الحرارة النظرية عند مخرج الفوهة.

و أيضا من علاقات الجريان الايزوانتروبي [9]:

$$\frac{T_a}{T_o} = \left( \frac{P_a}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (8)$$

حيث  $\gamma$ : الأس الأديباتي يعطى بالعلاقة [10]:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (9)$$

حيث  $C_p$ : السعة الحرارية عند ضغط ثابت، و  $C_v$ : السعة الحرارية عند حجم ثابت. و من معادلة الحالة

[8]:

$$P_1 = \rho_a \cdot R \cdot T_a \quad (10)$$

تعطى  $C_p$  بالعلاقة [10]:

$$C_p = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot R \quad (11)$$

بناءً على ما سبق؛ التدفق الكتلي يعطى بالعلاقة [9]:

$$\dot{m} = \frac{A_1}{R} \sqrt{2 \cdot C_p} \cdot \frac{P_0^{2 \cdot \gamma}}{T_0^{\frac{1}{2}}} \cdot \left[ P_1^{\frac{2}{\gamma}} - P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - P_1^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

ونتيجة للضياعات في الفوهة الثابتة نتيجة احتكاك جزيئات المائع مع بعضها من جهة، واحتكاك المائع مع جدران الفوهة؛ لا بد من ادخال عامل التمهّل  $\phi$  في الحسابات. حيث أن عامل التمهّل هو نسبة السرعة الفعلية عند مخرج الفوهة إلى السرعة النظرية. وهو يأخذ في الحسبان مقدار انخفاض سرعة الجريان بسبب قوى الاحتكاك. أي أن

$$\phi = \frac{V_1}{V_{1th}} \quad [6]$$

و بالتالي السرعة الفعلية  $V_1$  هي:

$$V_1 = \phi \cdot V_{1th} \quad (13)$$

## 2-6 القسم المتحرك:

في الفوهات المتحركة تتم عملية تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية؛ وذلك نتيجة لانعطاف الجريان ولفرق الضغط على السطحين المحدب والمقعر للشفرة بسبب عدم تناظرها (نظرية الجناح). إن عملية تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية تتم بتوجيه البخار ذي السرعة العالية إلى الشفرات المتحركة فيقوم بتدويرها [6]. العنفة الصغيرة المدروسة هي من النوع القطري، وفيها ينساب المائع بشكل عمودي على محور الدوران حيث يدخل المائع من المحيط ويخرج من المركز، و تدعى أحيانا عنفة جاذبة. مثلثات السرعة عند الدخول وعند الخروج موضحة في الشكل (3)، يبين هذا الشكل الفوهة الثابتة والشفرات المتحركة للعنفة الصغيرة.

نميز هنا بين السرعة النسبية  $W$  والسرعة المحيطية  $u$  والسرعة المطلقة  $V$ . ويكون لدينا:

$$\vec{V} = \vec{u} + \vec{W} \quad (14)$$

نرمز بالرمز (1) لمثلث الدخول. ونرمز بالرمز (2) لمثلث الخروج.

وهنا السرعة المحيطية عند الدخول  $u_1$ :

$$u_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (15)$$

حيث  $D_1$ : القطر الخارجي للدولاب.  $n$ : عدد دورات الدولاب (r.p.m) (دورة في الدقيقة).

والسرعة المحيطية عند الخروج  $u_2$ :

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} \quad (16)$$

حيث  $D_2$ : القطر الداخلي للدولاب.

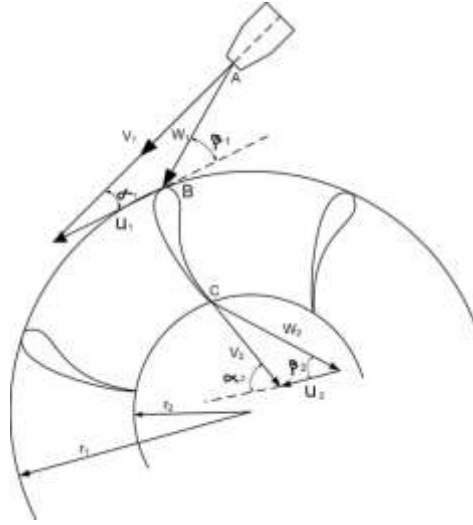
حيث أنه لرسم مثلثات السرعة نستعين بالنقاط A و B و C الموضحة في الشكل (3).

النقطة A تنطبق على حافة الخروج من الفوهة الثابتة، النقطة B تنطبق على حافة الدخول للشفرات المتحركة، النقطة C تنطبق على حافة الخروج للشفرات المتحركة.

يبدأ مثلث الدخول من النقطة A :

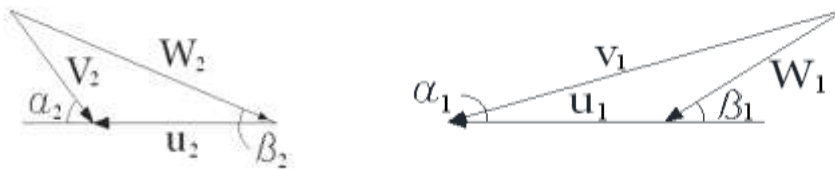
$V_1$  : السرعة المطلقة لخروج البخار من الفوهة الثابتة وتم حسابها من المعادلة (13)،  $\alpha_1$ : الزاوية التي تصنعها السرعة  $V_1$  مع اتجاه السرعة المحيطة  $u_1$ ، وهنا ينطبق منحني السرعة  $V_1$  على خط التناظر للفوهة الثابتة.  
 $W_1$  : السرعة النسبية للدخول إلى الفوهات المتحركة،  $\beta_1$ : الزاوية التي تصنعها السرعة  $W_1$  مع اتجاه  $u_1$  وهي زاوية ميل شفرة الدولاب عند المدخل.  
 يبدأ مثلث الخروج من النقطة C :

$V_2$  : السرعة المطلقة لخروج البخار من الفوهات المتحركة،  $\alpha_2$ : الزاوية التي تصنعها السرعة  $V_2$  مع اتجاه السرعة المحيطة  $u_2$ .  $W_2$  : السرعة النسبية لخروج البخار من الفوهات المتحركة،  $\beta_2$ : الزاوية التي تصنعها السرعة  $W_2$  مع اتجاه  $u_2$  وهي زاوية ميل شفرة الدولاب عند المخرج.



الشكل (3): العنفة القطرية

مثلث السرعة عند الدخول موضح بالشكل (4). ومثلث السرعة عند الخروج موضح بالشكل (5).



الشكل (5): مثلث السرعة عند الخروج

الشكل (4): مثلث السرعة عند الدخول

من مثلث السرعة عند الدخول: بالإسقاط على الأفق للمعادلة:

$$\vec{V}_1 = \vec{u}_1 + \vec{W}_1 \quad (17)$$

$$V_1 \cdot \cos \alpha_1 = u_1 + W_1 \cdot \cos \beta_1 \quad (18)$$

$$W_1 \cdot \cos \beta_1 = V_1 \cdot \cos \alpha_1 - u_1$$

وبالتالي:

$$V_1 \cdot \sin \alpha_1 = 0 + W_1 \cdot \sin \beta_1$$

بالإسقاط على الشاقول:

وبالتالي:



$$W_1 \cdot \sin \beta_1 = V_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (19)$$

من مثلث السرعة عند الخروج: بالإسقاط على الأفق للمعادلة:

$$\vec{V}_2 = \vec{u}_2 + \vec{W}_2 \quad (20)$$

$$V_2 \cdot \cos \alpha_2 = W_2 \cdot \cos \beta_2 - u_2 \quad (21)$$

$$V_2 \cdot \sin \alpha_2 = 0 + W_2 \cdot \sin \beta_2 \quad \text{بالإسقاط على الشاقول:}$$

وبالتالي:

$$V_2 \cdot \sin \alpha_2 = W_2 \cdot \sin \beta_2 \quad (22)$$

هنا  $W_2$ : هي السرعة النسبية الحقيقية لخروج البخار من الفوهات المتحركة و هي أصغر من السرعة النظرية  $W_{2th}$ . حيث تحدد السرعة النسبية النظرية لخروج البخار من الفوهات المتحركة  $W_{2th}$  بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة (قانون زونر) على طرفي الفوهات المتحركة:

$$h_b + \frac{W_1^2}{2} = h_{a_1} + \frac{W_{2th}^2}{2}$$

و بالتالي:

$$W_{2th} = \sqrt{2 \cdot (h_b - h_{a_1}) + W_1^2} \quad (23)$$

يخرج بخار المائع من الفوهات المتحركة بسرعة نظرية  $W_{2th}$ ، لكن بسبب تحاك جزيئات البخار مع بعضها ومع سطوح الشفرات فإن قيمة السرعة النسبية الفعلية  $W_2$  تكون فعليا أصغر من السرعة النظرية أي  $W_2 < W_{2th}$ . يعبر عن ضياعات التحاك في الفوهات المتحركة بعامل التمهّل  $\psi$  حيث:

$$\psi = \frac{W_2}{W_{2th}}$$

و منه السرعة الفعلية  $W_2$ :

$$W_2 = \psi \cdot W_{2th} \quad (24)$$

حيث  $h_b$ : الانتالبي الحقيقي عند مدخل الفوهات المتحركة،  $h_{a_1}$ : الانتالبي النظري عند مخرج الفوهات المتحركة. [6].

أما العمل المبذول على الشفرات من قبل المائع: (العمل المبذول =  $\frac{\text{الاستطاعة}}{\text{التدفق}}$ ):

$$W_i = \frac{N_i}{\dot{m}} = u_1 \cdot V_1 \cdot \cos \alpha_1 + u_2 \cdot V_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (25)$$

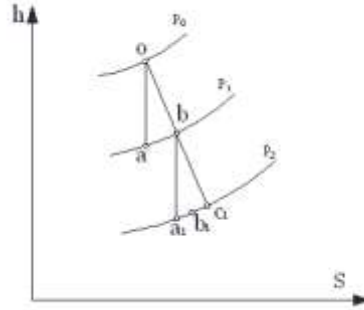
حيث تشير  $u_1$  و  $u_2$  إلى السرعتين المحيطتين للدولاب عند المدخل والمخرج على الدوائر التي أنصاف أقطارها  $r_1$  و  $r_2$ . يسمى هذا العمل بالعمل التخطيطي  $W_i$  [6].

### 3-6 عمليات تحول الطاقة في مرحلة رد الفعل - ضياعات الطاقة:

العنفة الصغيرة المختارة هي عنفة رد فعل. يتمدد بخار المائع لدى مروره في الفوهة الثابتة مما يؤدي إلى زيادة السرعة من  $V_o$  إلى  $V_1$ ، وانخفاض الضغط من  $P_o$  إلى  $P_1$ . تمثل عملية التمدد الفعلية هذه على المخطط h-s بالخط o-b، أما عملية التمدد الايزوانتروبي النظرية فتتم وفق الخط o-a، كما يظهر في الشكل (6). تعيين النقطة b الواقعة على منحنى تساوي الضغط المار بالنقطة a.

بعد خروج بخار المائع من الفوهة الثابتة يتوجه نحو الفوهات المتحركة فيدخلها بسرعة نسبية  $W_1$  مماسية لحواف الدخول. وبما أن العنفة رد فعلية فإن قنوات الفوهات المتحركة تكون متقاربة؛ لذلك فإن سرعة البخار النسبية

لدى مروره خلالها تزداد من  $W_1$  إلى  $W_2$ ؛ وبذلك ينخفض الضغط من  $P_1$  إلى  $P_2$ . وبما أن البخار يقوم بتقديم جزء من طاقته الحركية (المتولدة في الفوهة الثابتة) من أجل تدوير الشفرات المتحركة؛ لذلك تنخفض السرعة المطلقة من  $V_1$  إلى  $V_2$ . عملية التمدد الايزوانتروبي النظرية تتم وفق الخط  $b-a_1$ ؛ ونتيجة الضياع في الشفرات المتحركة للدولاب يصبح وضع بخار المائع في النقطة  $b_1$ ، ويتم تحديد النقطة  $b_1$  الواقعة على منحنى تساوي الضغط المار بالنقطة  $a_1$ . إن مهمة الفوهات المتحركة هي تحويل الطاقة الحركية إلى عمل. وعندما تكون سرعة الخروج من العنفة تساوي الصفر (وهذا مستحيل) فهذا يعني أننا استفدنا من كامل الطاقة الحركية لبخار المائع. يشير الواقع العملي إلى أن البخار يخرج بسرعة معينة لم نستفد منها فتذهب على شكل ضياعات؛ وبالتالي يصبح وضع بخار المائع في النقطة  $c_1$  وهي تقع أيضا على منحنى تساوي الضغط المار بالنقطة  $a_1$ ، وتسمى هذه الضياعات بضياع السرعة المتبقية. هناك ضياع آخر هو ضياع التسرب والاحتكاك، حيث أن قسم من المائع يتسرب وبالتالي هذا البخار لا يمر في الفوهات ولا ينجز عملا [6].



الشكل (6): عمليات التمدد في العنفة الصغيرة على المخطط h-s

يكتب العمل النظري  $W_{th}$  على الشكل التالي [6]:

$$W_{th} = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (26)$$

حيث:

$$\Delta h_1 = h_0 - h_a \quad (27)$$

$$\Delta h_2 = h_b - h_{a1} \quad (28)$$

$$W_{th} = (h_0 - h_a) + (h_b - h_{a1})$$

أما العمل التخطيطي  $W_i$  فهو العمل الفعلي الذي تنتجه العنفة، وهو أصغر من العمل النظري بسبب

الضياعات في الفوهة الثابتة وفي الفوهات المتحركة و ضياعات السرعة المتبقية. وعليه فهو [6]:

$$W_i = W_{th} - \text{الضياعات الفوهة الثابتة و الفوهات المتحركة و السرعة المتبقية}$$

$$W_i = W_{th} - [(h_b - h_a) + (h_{b1} - h_{a1}) + (h_{c1} - h_{b1})] \quad (29)$$

والعمل التخطيطي  $W_i$  معطى سابقا بالعلاقة (25) أيضا. أما المردود التخطيطي  $\eta_i$  ويسمى أيضا بالمردود

الايوانتروبي فهو معطى بالعلاقة التالية [6]:

$$\eta_i = \frac{W_i}{W_{th}} \quad (30)$$

$$W_i < W_{th} \quad \text{و بالتالي:}$$

ونتيجة ضياعات تسرب بخار المائع و التحاك؛ فإن العمل المفيد الذي تنتجه العنفة والذي نرزم له بالرمز

$W_u$  يكون أصغر من العمل التخطيطي بسبب ضياعات التسرب و التحاك. وعليه فهو [6]:

$$W_u = W_i - \text{ضياعات التسرب و التحاك} \quad (31)$$

أما المردود المفيد  $\eta_u$  فهو أصغر من المردود الايزوانتروبي  $\eta_i$ ، وهو يأخذ بعين الاعتبار كافة الضياعات

المذكورة أعلاه. و يعطى على النحو التالي [6]:

$$\eta_u = \frac{W_u}{W_{th}} = \frac{N_u}{N_{th}} \quad (32)$$

$$W_u < W_i \quad \text{وبالتالي:}$$

**ملاحظة هامة:** في بعض المراجع يتم اهمال ضياعات التسرب والتحاك؛ فيصبح العمل المفيد يساوي العمل

التخطيطي  $W_u = W_i$  ، والمردود المفيد يساوي المردود المفيد  $\eta_u = \eta_i$  [6].

### 7. العنفة الصغيرة المستخدمة في الدراسة:

العنفة الصغيرة المدروسة تتكون من جزء ثابت عبارة عن فوهة يتم فيها زيادة سرعة البخار على حساب تخفيض ضغطه، ومن جزء متحرك عبارة عن دوار مركب على محور. ونتيجة اصطدام البخار بشفرات الدوار يتم دوران الدوار ومن ثم تدوير المحور الذي يركب عليه منوبة صغيرة. في دراستنا تم استخدام فوهة متقاربة (التي تمثل القسم الثابت للعنفة) الموضحة في الشكل (7). وهي مصنوعة من الألمنيوم. ولها الأبعاد التالية: القطر الداخلي للفوهة عند الدخول [mm] 5، القطر الداخلي للفوهة عند الخروج [mm] 2.5، طول الفوهة [mm] 50. علماً أن قطر الفوهة الخارجي هو [in] 1/4 عند المدخل ويتم تركيب هذا الجزء من الفوهة داخل الأنبوب الذي يغذي الفوهة بالمائع المستخدم (الأنبوب المستخدم قطره قياسي بوحدة ال in).

أما الدوار (الذي يمثل الجزء المتحرك للعنفة) فهو موضح في الشكل (8). وهو دوار بلاستيكي له الأبعاد التالية:

القطر الخارجي للدوار:  $D_1 = 140$  [mm]، القطر الداخلي للدوار:  $D_2 = 120$  [mm].

زاوية ميل الشفرة عند الدخول:  $\beta_1 = 83$  [deg]، زاوية ميل الشفرة عند الخروج:  $\beta_2 = 65$  [deg].

مساحة الدخول:  $A_1 = 114$  [mm<sup>2</sup>]، مساحة الخروج:  $A_2 = 416.5$  [mm<sup>2</sup>]، عدد الشفرات: 40.



الشكل (8): دوار العنفة الصغيرة



الشكل (7): الفوهة المتقاربة المستخدمة

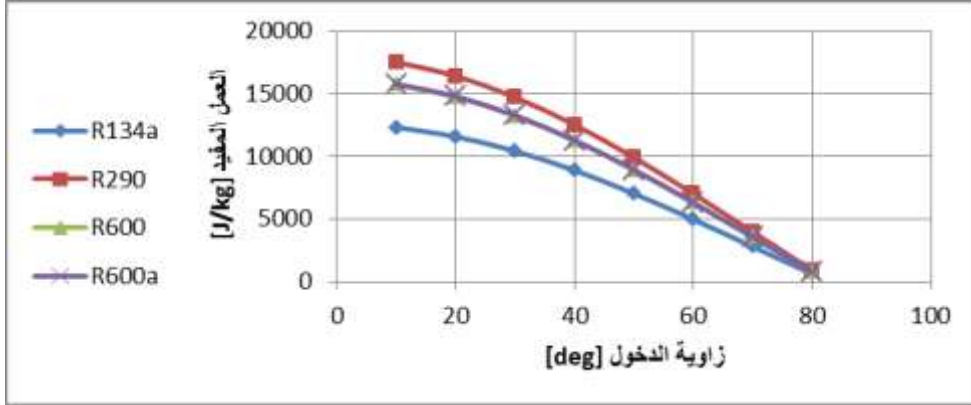
### النتائج والمناقشة:

تمت الدراسة باستخدام البرنامج EES حيث تم استخدام العلاقات الحرارية الواردة في الفقرة 6. وتم دراسة تأثير كل بارامتر على حدة وذلك باستخدام الموائع R290، R600a، R600، R134a. وتم الحصول على المخططات التي سيتم توضيحها ودراستها .

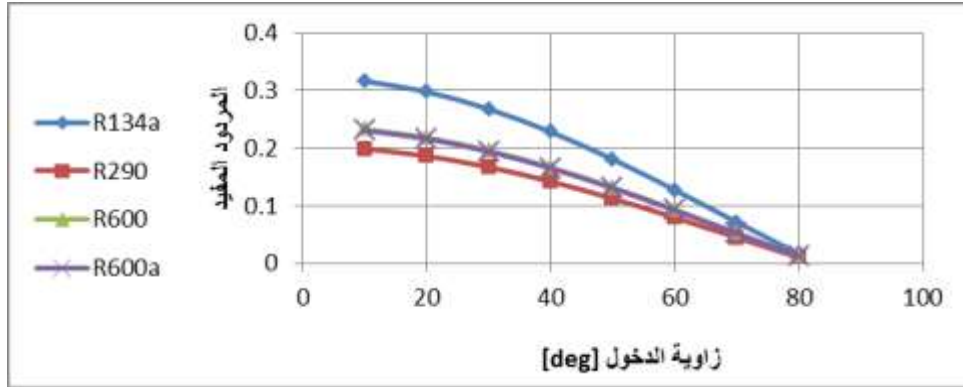
1 دراسة تأثير زاوية الدخول  $\alpha_1$ :

وذلك في المجال  $\alpha_1 = (10 \div 80)$  [deg] وبثبات القيم التالية: التدفق الحجمي الخارج من الفوهة  $Q = 0.00055$  [m<sup>3</sup>/s]، درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o = 51$  [°C]، ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o = 500000$  [Pa].

يبين الشكل (9) العلاقة بين زاوية الدخول  $\alpha_1$  والعمل المفيد  $W_u$ . أما الشكل (10) فهو يبين العلاقة بين زاوية الدخول  $\alpha_1$  والمردود المفيد  $\eta_u$ .



الشكل (9): العلاقة بين زاوية الدخول والعمل المفيد

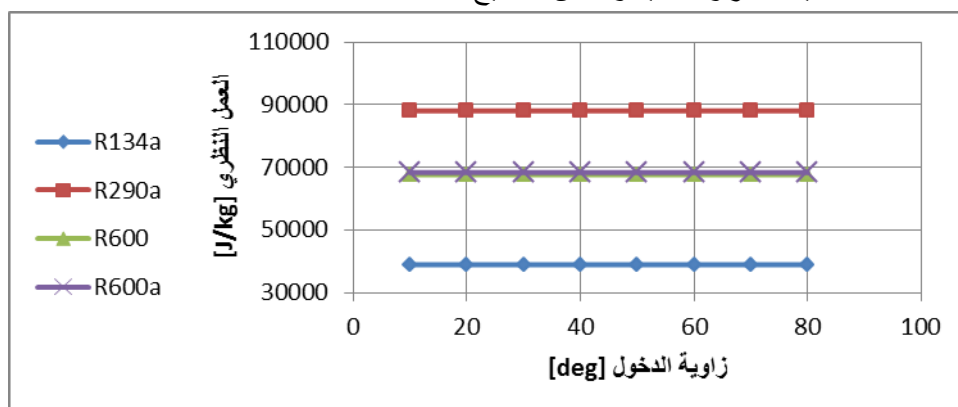


الشكل (10): العلاقة بين زاوية الدخول والمردود المفيد

في الشكل (9) نلاحظ أنه بزيادة زاوية الدخول يتناقص العمل المفيد بشكل كبير. وعند مناقشة هذه النتيجة بناءً على الدراسة التحليلية؛ نجد من العلاقة (25) أن العمل التخطيطي  $W_i$  الذي هو بناءً على الملاحظة الموجودة في الفقرة (3-6) يعد مساوياً للعمل المفيد  $W_u$  وهو ما تم اعتماده في دراستنا (حيث تم إهمال ضياعات التسرب والتحاك) ينخفض بانخفاض قيمة جيب تمام زاوية الدخول  $\cos \alpha_1$  وهذه القيمة تنخفض بزيادة قيمة زاوية الدخول  $\alpha_1$ ؛ وبالتالي قيمة العمل المفيد  $W_u$  تنخفض بزيادة قيمة زاوية الدخول  $\alpha_1$ . ومن ناحية أخرى تلعب قيم السرعة المحيطية عند الدخول والخروج  $u_1$  و  $u_2$  دوراً في علاقة العمل المفيد  $W_u$  ويمكن أن نحلل هذا الدور اعتماداً على الدراسة التحليلية؛ فحسب العلاقة (19) بزيادة زاوية الدخول  $\alpha_1$  يزداد جيب زاوية الدخول  $\sin \alpha_1$  وبالتالي تزداد السرعة النسبية عند الدخول  $W_1$ ، وبزيادة هذه السرعة ( $W_1$ ) بناءً على العلاقة (18) تنخفض قيمة السرعة المحيطية عند الدخول  $u_1$ . وبانخفاض السرعة المحيطية عند الدخول  $u_1$  تنخفض قيمة عدد الدورات  $n$  بناءً على العلاقة (15)، وبانخفاض عدد الدورات  $n$  تنخفض السرعة المحيطية عند الخروج  $u_2$  بناءً على العلاقة (16)؛ وبالتالي بالعودة إلى العلاقة (25) انخفاض قيم

السرع المحيطية عند الدخول والخروج  $u_1$  و  $u_2$  مع انخفاض جيب تمام زاوية الدخول  $\cos \alpha_1$  يعمل على انخفاض العمل المفيد  $W_u$ . ونلاحظ أن فرق الضغط بين السطح المقعر والمحدب للشفرة يؤدي إلى نشوء قوة تسعى إلى تحريك الشفرات. كما نلاحظ في الشكل (9) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a.

أما في الشكل (10) نلاحظ أنه بزيادة زاوية الدخول يتناقص المردود المفيد بشكل كبير. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد من الشكل (11) أن قيمة العمل النظري  $W_{th}$  ثابتة؛ وبالتالي نجد من العلاقة (32) أنه عند ثبات قيمة العمل النظري  $W_{th}$  فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تتخفف بانخفاض قيمة العمل المفيد  $W_u$ ، وكما رأينا فإن قيمة العمل المفيد  $W_u$  تتخفف بزيادة زاوية الدخول  $\alpha_1$ ؛ وبالتالي فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تتخفف بزيادة زاوية الدخول  $\alpha_1$ . كما نلاحظ في الشكل (10) أن R290 يعطي قيم أصغر للمردود المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأكبر كانت من نصيب R134a؛ ويعود السبب في ذلك إلى أن قيمة العمل النظري التي يعطيها R134a صغيرة بشكل كبير بالنسبة لقيمة العمل النظري التي يعطيها R290 بينما الفروقات في قيم العمل المفيد عند استخدام الموائع المدروسة هو فرق بسيط- بالرغم من أنه كما نلاحظ في الشكل (11) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل النظري ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a- وبالتالي بالعودة إلى العلاقة (32) كلما ازدادت قيمة العمل النظري كلما انخفضت قيمة المردود المفيد والعكس صحيح.



الشكل (11): العلاقة بين زاوية الدخول والعمل النظري

## 2 دراسة تأثير التدفق الحجمي الخارج من الفوهة Q:

وذلك في المجال  $Q = (0.0004 \div 0.00055) [m^3/s]$  وبثبات القيم التالية: زاوية الدخول  $\alpha_1 = 15 [deg]$ ,

درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o = 51 [^{\circ}C]$ ، ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o = 500000 [Pa]$ .

إن قيمة التدفق الكتلي قيمة ثابتة لا تتغير خلال عملية مرور المائع بجميع مراحل العنفة الصغيرة؛ ولذلك تم

اعتماد هذه القيمة خلال دراسة تأثير التدفق. حيث تم أخذ قيمة التدفق الحجمي في نقطة محددة وهي عند الخروج من

الفوهة، وتم حساب التدفق الكتلي  $\dot{m}$  اعتماداً على العلاقة التالية:

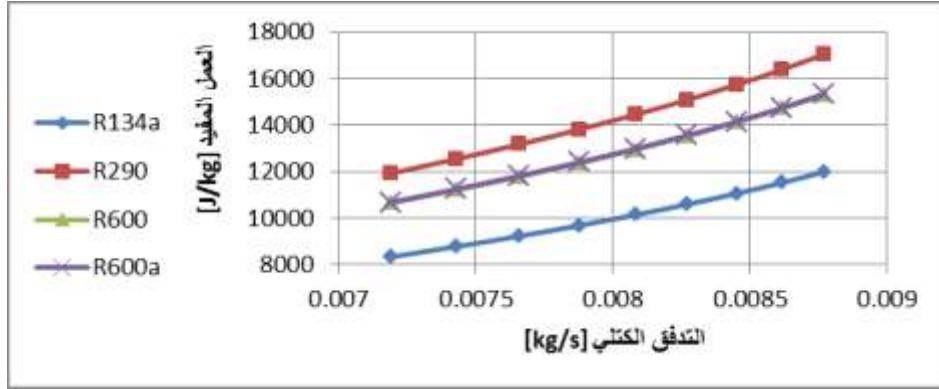
$$\dot{m} = \rho_b \cdot Q \quad (33)$$

حيث  $\rho_b$ : الكتلة النوعية الفعلية للمائع عند الخروج من الفوهة (في النقطة b الموضحة في الشكل (6)). ومن

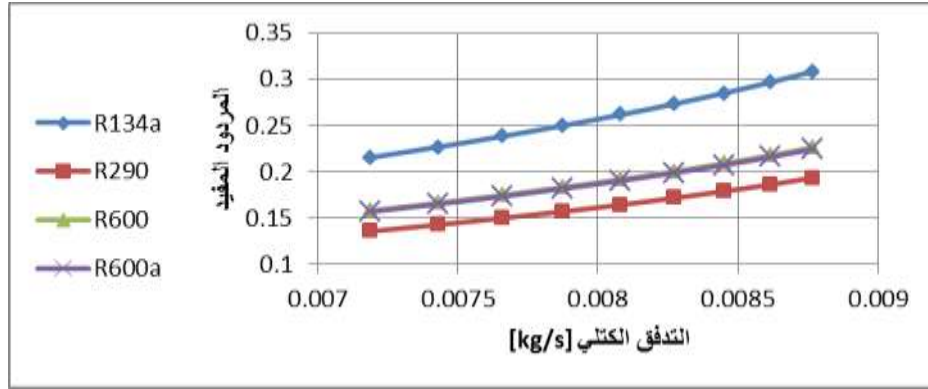
ثم تمت دراسة تأثير هذه القيمة  $\dot{m}$ ، وبالتالي مجال تغير  $\dot{m}$  هو  $\dot{m} = (0.007189 \div 0.008769) [kg/s]$

يبين الشكل (12) العلاقة بين التدفق الكتلي  $\dot{m}$  والعمل المفيد  $W_u$ . أما الشكل (13) فهو يبين العلاقة بين

التدفق الكتلي  $\dot{m}$  والمردود المفيد  $\eta_u$ .



الشكل (12): العلاقة بين التدفق الكتلي والعمل المفيد

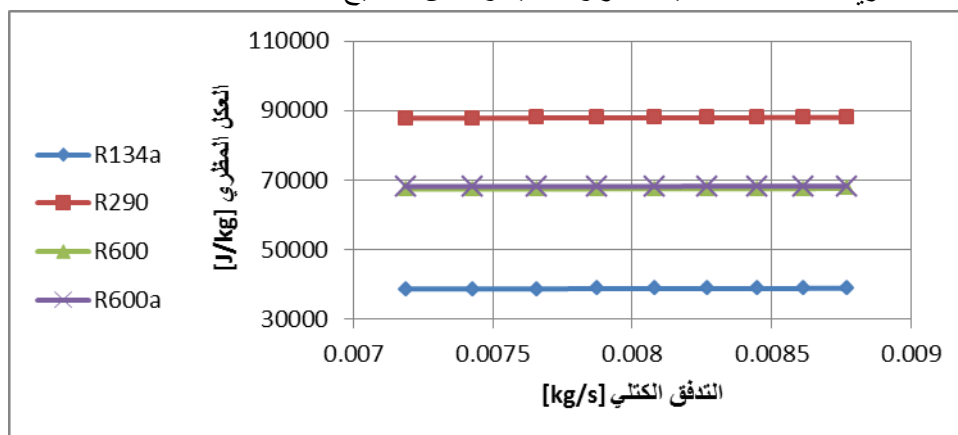


الشكل (13): العلاقة بين التدفق الكتلي والمردود المفيد

من الشكل (12) نلاحظ أنه بزيادة التدفق الكتلي يزداد العمل المفيد بشكل كبير. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد من العلاقة (3) أنه بزيادة قيمة التدفق الكتلي  $\dot{m}$  تزداد قيمة السرعة المطلقة النظرية عند الدخول إلى الدوالب (وهي السرعة عند مخرج الفوهة)  $V_{1th}$ ، وبزيادة هذه القيمة ( $V_{1th}$ ) تزداد قيمة السرعة المطلقة الفعلية عند الدخول  $V_1$  بناءً على العلاقة (13) حيث أن قيمة عامل التمهّل في الفوهة  $\phi$  ثابتة وقد تم أخذها مساوية 0.9، وبالعودة للعلاقة (25) فإن قيمة العمل المفيد  $W_u$  تزداد بزيادة قيمة السرعة الفعلية عند الدخول  $V_1$ ؛ وبالتالي قيمة العمل المفيد  $W_u$  تزداد بزيادة قيمة التدفق الكتلي  $\dot{m}$ . كما نلاحظ في الشكل (12) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a.

أما من الشكل (13) فنلاحظ أنه بزيادة التدفق الكتلي يزداد المردود المفيد بشكل كبير. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد بالعودة إلى الشكل (14) أن قيمة العمل النظري  $W_{th}$  تزداد بشكل طفيف جداً مقارنة بزيادة العمل المفيد المقابلة عند نفس قيم التدفق الكتلي  $\dot{m}$  وبالتالي نجد من العلاقة (32) أنه عند زيادة العمل المفيد  $W_u$  بشكل أكبر من زيادة العمل النظري  $W_{th}$  فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تزداد؛ وبالتالي فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تزداد بزيادة قيمة التدفق الكتلي  $\dot{m}$ . كما نلاحظ في الشكل (13) أن R290 يعطي قيم أصغر للمردود المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأكبر كانت من نصيب R134a؛ ويعود السبب في ذلك إلى أن قيمة العمل النظري التي يعطيها R134a صغيرة بشكل كبير بالنسبة لقيمة العمل النظري التي يعطيها R290 بينما الفروقات في قيم العمل المفيد عند استخدام الموائع المدروسة هو فرق بسيط— بالرغم من أنه كما نلاحظ في الشكل (14) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل

النظري ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a- وبالتالي بالعودة إلى العلاقة (32) كلما ازدادت قيمة العمل النظري كلما انخفضت قيمة المردود المفيد والعكس صحيح.

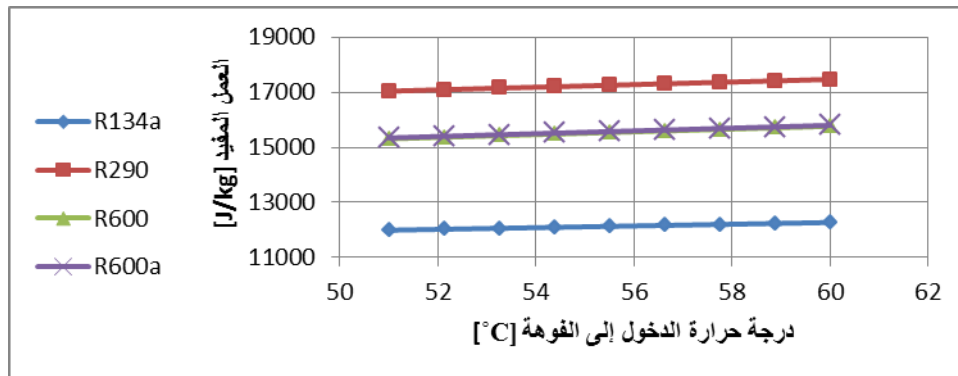


الشكل (14): العلاقة بين التدفق الكتلي والعمل النظري

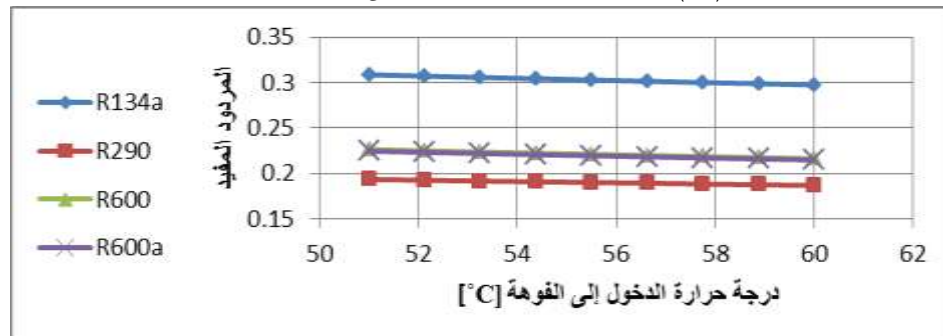
### 3- دراسة تأثير درجة حرارة الدخول إلى الفوهة $T_o$ :

وذلك في المجال  $T_o = (51 \div 60) [^{\circ}C]$  وبنبات القيم التالية: زاوية الدخول  $\alpha_1 = 15 [deg]$ ، التدفق الحجمي الخارج من الفوهة  $Q = 0.00055 [m^3/s]$ ، ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o = 500000 [Pa]$ .

يبين الشكل (15) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$  والعمل المفيد  $W_u$ . كما يبين الشكل (16) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$  والمردود المفيد  $\eta_u$ .



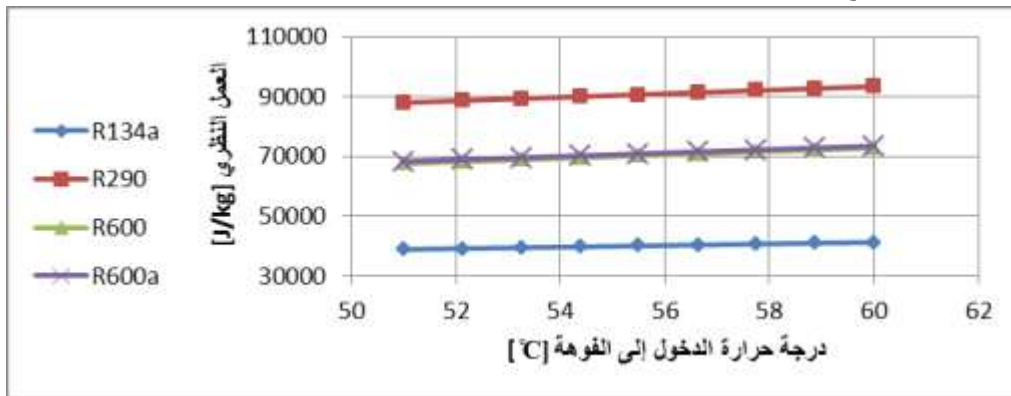
الشكل (15): العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة والعمل المفيد



الشكل (16): العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة والمردود المفيد

من الشكل (15) نلاحظ أنه بزيادة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة يزداد العمل المفيد بشكل طفيف. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد أنه بزيادة قيمة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$  سيتأثر الفرق في الانتالبي في القسم الثابت من العنفة  $(h_o - h_a)$  وكذلك الفرق في الانتالبي في القسم المتحرك من العنفة  $(h_b - h_{a1})$  (مع ملاحظة أن زيادة الفرق في درجة الحرارة يقابله زيادة بسيطة في الفرق في الانتالبي)، وبما أن ضغط الخروج من العنفة  $P_2$  اعتبر ثابتاً (بالعودة إلى الشكل (6))، والانتالبي كما هو معلوم يتعلق بالضغط ودرجة الحرارة، ولذلك فإن الفرق في الانتالبي في القسم الثابت من العنفة  $(h_o - h_a)$  يتعلق بالفوهة الثابتة؛ وبما أن إمكانية هذه الفوهة الصغيرة على خفض الضغط محدودة؛ لذلك من البديهي أن يكون تأثير هذا المقدار  $(h_o - h_a)$  محدود؛ وبالتالي يكون التأثير الأكبر لفرق الانتالبي في الدولاب (الدوار) والذي هو  $(h_b - h_{a1})$ ، والذي بزيادته تزداد السرعة النسبية النظرية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_{2th}$  حسب العلاقة (23)؛ وبالتالي تزداد السرعة النسبية الفعلية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_2$  اعتماداً على العلاقة (24) حيث قيمة عامل التمهل في الفوهات المتحركة  $\psi$  ثابتة وقد تم أخذها مساوية 0.9، وبزيادة السرعة النسبية الفعلية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_2$  تزداد السرعة المطلقة عند الخروج من الفوهات المتحركة  $V_2$  حسب العلاقة (22)، وبزيادة هذه القيمة الأخيرة  $(V_2)$  تزداد قيمة العمل المفيد  $W_u$  اعتماداً على العلاقة (25)؛ وبالتالي يزداد العمل المفيد  $W_u$  بزيادة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$ . كما نلاحظ في الشكل (15) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a.

أما في الشكل (16) فنلاحظ أنه بزيادة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة ينخفض المردود المفيد بشكل طفيف. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد بالعودة إلى الشكل (17) أن قيمة العمل النظري  $W_{th}$  تزداد زيادة كبيرة نسبياً مقارنة بزيادة العمل المفيد  $W_u$  المقابلة عند نفس قيم درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$ ؛ وبالتالي نجد من العلاقة (32) أنه عند زيادة قيمة العمل النظري  $W_{th}$  بشكل أكبر من زيادة قيمة العمل المفيد  $W_u$  فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تنخفض؛ وبالتالي فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تنخفض بزيادة قيمة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o$ . كما نلاحظ في الشكل (16) أن R290 يعطي قيم أصغر للمردود المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأكبر كانت من نصيب R134a؛ ويعود السبب في ذلك إلى أن قيمة العمل النظري التي يعطيها R134a صغيرة بشكل كبير بالنسبة لقيمة العمل النظري التي يعطيها R290 بينما الفروقات في قيم العمل المفيد عند استخدام الموائع المدروسة هو فرق بسيط- بالرغم من أنه كما نلاحظ في الشكل (17) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل النظري ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a- وبالتالي بالعودة إلى العلاقة (32) كلما ازدادت قيمة العمل النظري كلما انخفضت قيمة المردود المفيد والعكس صحيح.

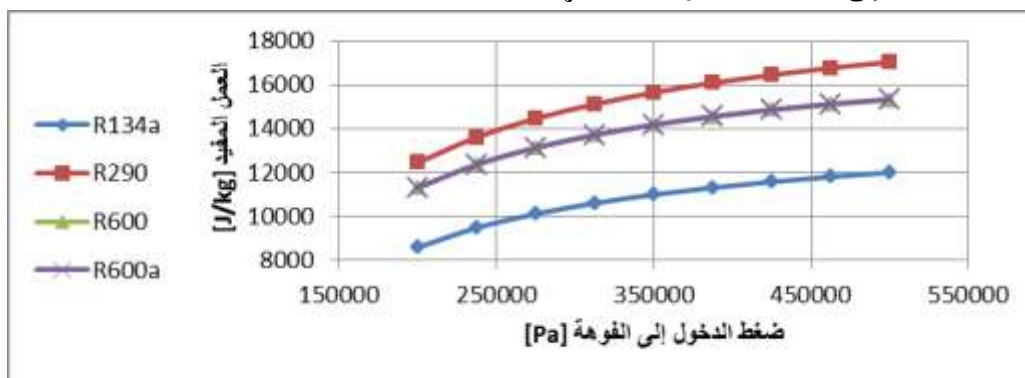


الشكل (17): العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة والعمل النظري

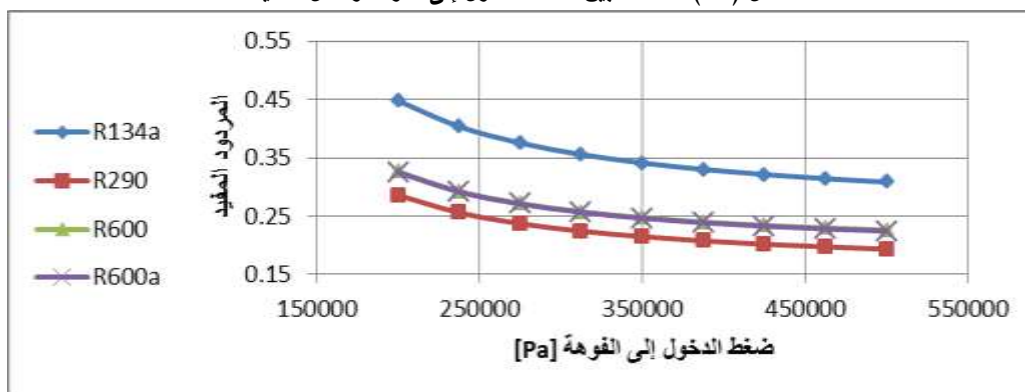


4- دراسة تأثير ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$ :

وذلك في المجال  $P_o = (200000 \div 500000)$  [Pa] وبثبات القيم التالية: زاوية الدخول  $\alpha_1 = 15$  [deg]، التدفق الحجمي الخارج من الفوهة  $Q = 0.00055$  [m<sup>3</sup>/s]، درجة حرارة الدخول إلى الفوهة  $T_o = 51$  [°C].  
يبين الشكل (18) العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$  والعمل المفيد  $W_u$ . أما الشكل (19) فهو يبين العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$  والمردود المفيد  $\eta_u$ .



الشكل (18): العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة والعمل المفيد

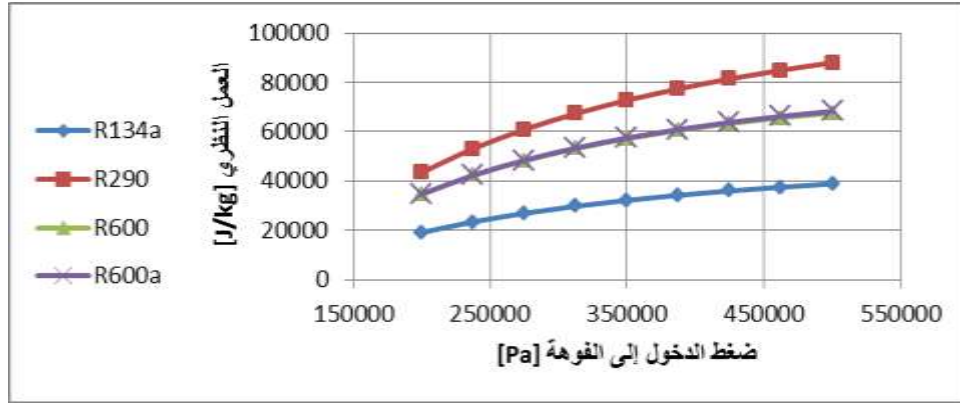


الشكل (19): العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة والمردود المفيد

في الشكل (18) نلاحظ أنه بزيادة ضغط الدخول إلى الفوهة يزداد العمل المفيد. وعند مناقشة هذه النتيجة نرى أنه بزيادة قيمة ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$  سيتأثر الفرق في الضغط في القسم الثابت من العنفة  $(P_o - P_1)$  وكذلك الفرق في الضغط في القسم المتحرك من العنفة  $(P_1 - P_2)$  وبما أن ضغط الخروج من العنفة  $P_2$  اعتبر ثابتاً (بالعودة إلى الشكل (6))، وكذلك إن الفرق  $(P_o - P_1)$  يتعلق بالفوهة الثابتة وبما أن إمكانية هذه الفوهة الصغيرة على خفض الضغط محدودة؛ لذلك من البديهي أن يكون تأثير المقدار  $(P_o - P_1)$  بزيادة ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$  محدود؛ وبالتالي تأثر فرق الانتالبي الموافق له في الفوهة الثابتة  $(h_o - h_a)$  يكون محدود أيضاً. ونتيجة لذلك فإن تأثر الفرق في الضغط في الدوالب  $(P_1 - P_2)$  سيكون كبير جداً، وبالتالي فإن الفرق في الانتالبي المقابل له سيكون كبير (مع ملاحظة أن زيادة الفرق في الضغط يقابله زيادة كبيرة في الفرق في الانتالبي) وهو حسب الدراسة التحليلية المقدار  $(h_b - h_{a_1})$ ، والذي بزيادته تزداد السرعة النسبية النظرية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_{2th}$  حسب العلاقة (23)، وبالتالي تزداد السرعة الفعلية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_2$  اعتماداً على العلاقة (24)، وبزيادة السرعة النسبية الفعلية عند الخروج من الفوهات المتحركة  $W_2$  تزداد السرعة المطلقة عند الخروج من الفوهات

المتحركة  $V_2$  حسب العلاقة (22)، ويزيادة هذه القيمة الأخيرة يزداد العمل المفيد  $W_u$  اعتماداً على العلاقة (25)؛ وبالتالي يزداد العمل المفيد  $W_u$  بزيادة ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$ . كما نلاحظ في الشكل (18) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a.

أما في الشكل (19) فنلاحظ أنه بزيادة ضغط الدخول إلى الفوهة ينخفض المردود المفيد  $\eta_u$  بشكل ملحوظ. وعند مناقشة هذه النتيجة نجد بالعودة إلى الشكل (20) أن قيمة العمل النظري  $W_{th}$  تزداد زيادة كبيرة نسبياً مقارنة بزيادة العمل المفيد  $W_u$  المقابلة عند نفس قيم ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$ ؛ وبالتالي نجد من العلاقة (32) أنه عند زيادة قيمة العمل النظري  $W_{th}$  بشكل أكبر من زيادة قيمة العمل المفيد  $W_u$  فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تنخفض؛ وبالتالي فإن قيمة المردود المفيد  $\eta_u$  تنخفض بزيادة قيمة ضغط الدخول إلى الفوهة  $P_o$ . كما نلاحظ في الشكل (19) أن R290 يعطي قيم أصغر للمردود المفيد ثم R600a يليه R600 والقيم الأكبر كانت من نصيب R134a؛ ويعود السبب في ذلك إلى أن قيمة العمل النظري التي يعطيها R134a صغيرة بشكل كبير بالنسبة لقيمة العمل النظري التي يعطيها R290 بينما الفروقات في قيم العمل المفيد عند استخدام الموائع المدروسة هو فرق بسيط- بالرغم من أنه كما نلاحظ في الشكل (20) أن R290 يعطي قيم أكبر للعمل النظري ثم R600a يليه R600 والقيم الأقل كانت من نصيب R134a- وبالتالي بالعودة إلى العلاقة (32) كلما ازدادت قيمة العمل النظري كلما انخفضت قيمة المردود المفيد والعكس صحيح.



الشكل (20): العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة والعمل النظري

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم التوصل إلى ما يلي:

- إن تخفيض قيمة زاوية الدخول ستؤدي إلى زيادة العمل المفيد. كما أن رفع قيمة التدفق الكتلي، أو درجة حرارة الدخول إلى الفوهة، أو ضغط الدخول إلى الفوهة ستؤدي إلى زيادة العمل المفيد.
- إن تخفيض قيمة زاوية الدخول، أو درجة حرارة الدخول إلى الفوهة، أو ضغط الدخول إلى الفوهة ستؤدي إلى زيادة المردود المفيد. كما أن رفع قيمة التدفق الكتلي ستؤدي إلى زيادة المردود المفيد.
- أظهر البحث أن استخدام عدة موائع يعطي وجهتي نظر؛ فيما يخص العمل المفيد كان المائع الأفضل هو R290، أما فيما يخص المردود المفيد كان المائع الأفضل هو R134a. أما من وجهة نظر علمية وعملية يفضل المائع الذي يعطي مردود أفضل ويكون أقل ضرراً للبيئة وبالتالي يفضل استخدام المائع R134a كونه من الموائع الصديقة للبيئة.

## المراجع:

- 1- TCHANCHE, B. F; PAPADAKIS,G; LAMBRINOS,G; FRANGOUDAKIS, A. *Fluid selection for a low- temperature solar organic Rankine cycle*. Applied Thermal Engineering. 29, 2009, 2468– 2476.
- 2- MIKIELEWICZ, J. *Micro Heat and Power Plants Working in Organic Rankine Cycle*. Polish J. of Environ. Stud.Vol.19,No. 3 (2010), 499-505.
- 3- RAYEGAN, R; TAO, Y. X. *A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)*. Renewable Energy. 36, 2011, 659-670.
- 4-  
<http://faculty.uoh.edu.sa/m.mousa/Books/Ref%20Tech2/Chapter%203%20Ref%20Tech2.pdf>
- 5- ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 1997-1998.  
<https://www.google.com/#q=ASHRAE+STANDARDS+COMMITTEE+1997-1998>
- 6- د. م. ياخور، يوسف ؛ د. م. بطل، محمد عطا. الآلات الحرارية العنقية/1/ (العنقات البخارية) . جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، 2014-2015.
- 7- د. تقلا، جوني. آلات حرارية عنقية (1). جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، 1994-1995.
- 8- د. محمود، حبيب. محمد. ديناميك الغازات. جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، 2006-2007.
- 9- د. كالوست، مكروجيان. ديناميك الغازات. جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، 2001.
- 10- د. عمران، عدنان. الترموديناميك الهندسي (1). جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، 1997-1996.