

Modeling of a Turbine Operating According to the Rankine Cycle and the Selection of the Optimal Working Fluid for it

Dr. Jaber Diba*
Oula Jalkama**

(Received 27 / 12 / 2021. Accepted 5 / 6 / 2022)

□ ABSTRACT □

This study was conducted in order to generate electric power with small capacities based on solar energy, especially in remote places far from the electricity grid. Where this study includes an analytical study of a small steam turbine that operates on environmentally friendly low-temperature liquid vapor generated by solar energy. The theoretical performance as well as the thermodynamic and environmental properties of a few coolant fluids have been evaluated for use in low-temperature solar organic Rankine cycle systems. The effect of entry pressure, entry angle and entry temperature to the circuit was studied. R22-R134a-R513A environmentally friendly working fluids of type A1 were selected, then we mathematically modeled these fluids using the EES program, and it was found that the R513A working fluid has a higher efficiency compared to R134a and R22 and so that it is the most suitable for small solar energy applications.

Keywords: cooling fluid - Organic Rankine cycle - EES program - Reaction turbine.

*Professor; Department of the Mechanical Power Engineering; Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ; Tishreen University ; Lattakia; Syria. Jaber59@hotmail.com

**Master student; Department of the Mechanical Power Engineering; Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ; Tishreen University; Lattakia; Syriaolaj16641@gmail.com

نمذجة لعمل عنفة تعمل وفق دائرة رانكن واختيار مائع العمل الأمثل لها

د. جابر ديبية*

علا جلقمة**

(تاريخ الإيداع 27 / 12 / 2021. قُبِلَ للنشر في 5 / 6 / 2022)

□ ملخص □

تم إجراء هذه الدراسة من أجل توليد الطاقة الكهربائية باستطاعات صغيرة اعتماداً على الطاقة الشمسية وخصوصاً في الأماكن النائية البعيدة عن شبكة الكهرباء. حيث تشتمل هذه الدراسة على دراسة التحليلية لعنفة بخارية صغيرة تعمل على بخار سائل درجة حرارة تبخرها منخفضة صديقة للبيئة مولدة بالطاقة الشمسية. تم تقييم الأداء النظري بالإضافة إلى الخصائص الديناميكية الحرارية والبيئية لعدة موائع التبريد للاستخدام في أنظمة دورة رانكن العضوية الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة. تم دراسة تأثير كل من ضغط الدخول وزاوية الدخول ودرجة حرارة الدخول إلى الدارة.

تم اختيار موائع عمل R22-R134a-R513A صديقة للبيئة ذات النوع A1 ثم قمنا بالنمذجة الرياضية لهذه الموائع باستخدام برنامج EES فتبين لنا إن مائع العمل R513A ذو كفاءة أعلى بالمقارنة مع R134a و R22 وبالتالي R513A هو الأنسب لتطبيقات الطاقة الشمسية الصغيرة.

الكلمات المفتاحية: موائع التبريد - دائرة رانكن العضوية - برنامج EES - عنفة رد فعل

* أستاذ ، قسم هندسة القوى الميكانيكية ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة تشرين ، اللاذقية ، سورية.

Jaber59@hotmail.com

** طالبة ماجستير ، قسم هندسة القوى الميكانيكية ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة تشرين ، اللاذقية ، سورية.

Olaj16641@gmail.com

مقدمة:

يبحث الانسان دوماً عن مصادر جديدة للطاقة لتغطية احتياجاته المتزايدة في تطبيقات الحياة المتطورة التي نعيشها ويعيب الكثير من مصادر الطاقة نظوبها وتكلفة استغلالها المرتفعة و التأثير السلبي لاستخدامها على البيئة وقد تنبه الانسان في العصر الحديث إلى إمكانية الاستفادة من حرارة الشمس والتي تتصف بأنها طاقة متجددة ودائمة لا تتضب، وأدرك الانسان جلياً الخطر الكبير الذي يسببه استخدام مصادر الطاقة الأخرى و الشائعة (وخاصة النفط والغاز الطبيعي) في تلوث البيئة وتدميرها ، مما يجعل الطاقة الشمسية الخيار الأفضل على الاطلاق .

ويعتبر الوطن العربي غني بالطاقة الشمسية حيث أن المعدل السنوي للأشهر المشمسة يبلغ حوالي عشرة أشهر في السنة ويعتبر استخدام الطاقة الشمسية في الوطن العربي بما يتوجب الاهتمام فيها ، وتحويلها إلى اشكال أخرى من الطاقة كالتاقة الحرارية و الطاقة الميكانيكية و الكهربائية .

في السنوات الأخيرة أصبحت دارة رانكن العضوية 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. دارة رانكن العضوية (ORC) تتيح الاستفادة من موائع درجة حرارة التبخر منخفضة لتوليد الطاقة الكهربائية كما اقترحه [1-2] والعديد من المؤلفين الآخرين.

ينص البحث على اختيار أنسب موائع لدارة رانكن العضوية الشمسية ذات درجة حرارة تبخر المنخفضة. يتم إنتاج الماء الساخن كمصدر للحرارة عن طريق تحويل الإشعاع الشمسي إلى حرارة بواسطة اللاقط الطاقة الشمسية. حيث تستخدم أبخرة لموائع منخفضة درجة حرارة التبخر لتدوير عنفة صغيرة والتي تشكل جزء من دارة رانكن العضوية ومن ثم الحصول على الطاقة الكهربائية لتشغيل معدات كهربائية بسيطة في الأماكن النائية البعيدة عن الشبكة .

أهمية البحث وأهدافه:

- الاستفادة من مصادر الطاقات المتجددة في تأمين الحرارة المناسبة لعمل الدارة.
- تأمين الحملات الكهربائية لأغراض تجارية ومنزلية.
- العمل على رفع كفاءة الدارة.
- اختيار مائع العمل الأنسب للدارة وأن يكون صديق للبيئة.

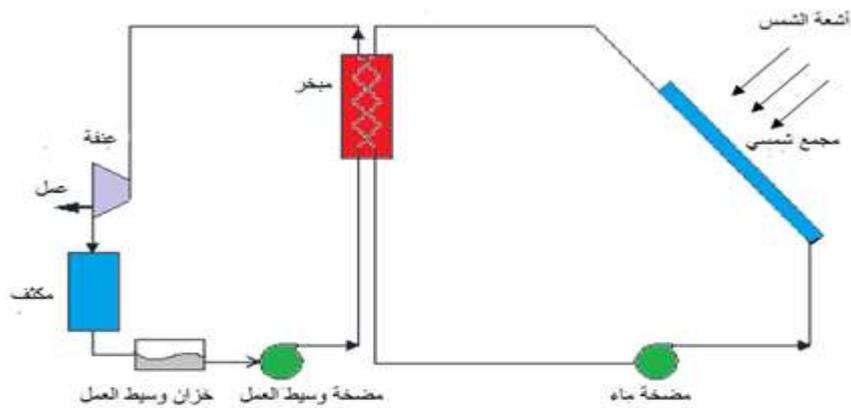
طرائق البحث ومواده:

سقوم بإجراء نمذجة رياضية باستخدام برنامج EES للمقارنة بين خواص موائع التبريد ذات درجات حرارة تبخر منخفضة الفيزيائية و التروديناميكية ، سنقترح مائع التبريد الأنسب للحصول على الاستطاعة اللازمة لتدوير العنفة ذات عوامل أمان عالية مما يسمح بتصنيع هذا النظام محلياً دون الحاجة إلى استيراده.

1. دارة رانكن العضوية (ORC):

تتكون دارة رانكن العضوية ORC الحالية من توربين صغير ومكثف ومضخة وخزان مائع التبريد ، تقوم المضخة بضخ مائع العمل إلى المبخر حيث يتم تسخينه وتبخيره بواسطة الماء الساخن ثم يتدفق البخار ذو الضغط العالي إلى

العنفة لإنجاز العمل. يعاد البخار ذو الضغط المنخفض إلى المكثف حيث يتم تكثيفه بالهواء. ومن ثم يتم ضخ السائل إلى المبخر وتبدأ دورة جديدة. كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1) دورة رانكن العضوية

2. موانع التشغيل المستخدمة في دورة رانكن:

تصنف موانع التبريد ضمن ثلاث مجموعات تبعاً لدرجة الأمان [5]:

-المجموعة الأولى (A1): وهي الموانع الأكثر أماناً (الهيدروكربونات - عائلة الفريون)، مثال: R134a, R513A

-المجموعة الثانية (A2): سامة ولحد ما قابلة للاشتعال، مثال ذلك R-40 , R-764

-المجموعة الثالثة (A3): وهي مجموعة موانع التبريد القابلة للاشتعال، مثال R-170 , R-290

إن المائع المناسب للدورة هو R513A ثم يليه R134a ثم R22 لكونها صديقة للبيئة و أكثر أماناً يبين الجدول (1)

خصائص موانع التبريد و يبين الجدول (2) مواصفات مائع مزيج التبريد R513A:

الجدول (1) : خصائص موانع التبريد [3]

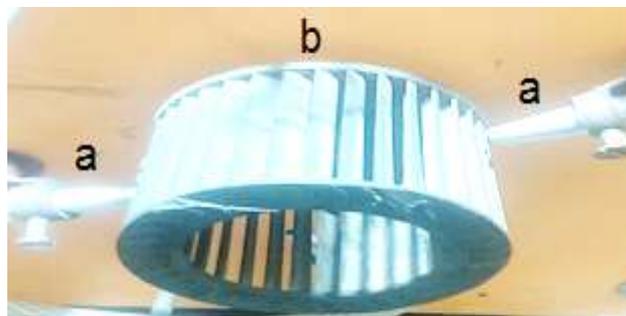
Refrigerant Number	Chemical Name	Chemical Formula	Molecular Mass	Normal Boiling Point		Safety Group
				[°C]	[°F]	
R134a	1,1,1,2-fluoroethane	CH ₂ FCF ₃	102	-26	-15	A1
R22	chlorodifluoromethane	CHClF ₂	86.5	-41	-41	A1

الجدول (2) خواص R513A [9]

Refrigerant Number	Composition (mass %)	Normal Boiling Point		Safety Group
		[°C]	[°F]	
R513A	R-1234yf/134a (56.0/44.0)	-29.2	-20.6	A1

3. اختيار العنفة:

تم اختبار عنفة صغيرة قطرية أحادية المرحلة رد فعلية . كما هو وموضح على الشكل (2):



الشكل (2): a: فوهة متقاربة ، b: دوار العنفة

يوضح الجدول مواصفات دوار العنفة [8]:

جدول (3): مواصفات دوار العنفة

$D_1 = 75$ [mm]	القطر الخارجي للدوار:
$D_2 = 59$ [mm]	القطر الداخلي للدوار:
$\beta_1 = 60$ [deg]	زاوية ميل الشفرة عند الدخول:
$\beta_2 = 50$ [deg]	زاوية ميل الشفرة عند الخروج:
$A_1 = 250$ [mm ²]	مساحة الدخول:
$A_2 = 200$ [mm ²]	مساحة الخروج:
35	عدد الشفرات:

تتكون العنفة من جزئين:

الجزء الثابت: هو عبارة عن فوهة متقاربة كما موضح في الشكل (2-a)، يحصل فيها زيادة في السرعة على حساب انخفاض الضغط من أجل إيجاد تيار سريع من بخار السائل ذو درجة حرارة التبخر المنخفضة. يوافق انخفاض في الضغط في الجزء الثابت، وبالتالي هبوط في الانتالبي (Δh_1).

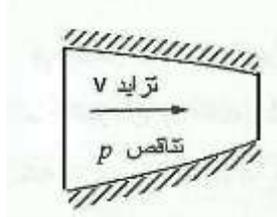
الجزء المتحرك (الدوار): هو عبارة عن دولاب، ينتج عند دورانه عملاً على محوره كما موضح في الشكل (2-b)، و تشكل المسافة بين شفراته فوهات متقاربة أيضاً. فيحدث في هذا الجزء أيضاً انخفاض في الضغط، وبالتالي هبوط في الانتالبي (Δh_2).

يكون الهبوط الكلي للانتالبي في العنفة (Δh). يحدد من المعادلة:

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

1.3. الجزء الثابت:

وفيه ينساب خلاله البخار 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، فإن مهمة الفوهة هي توليد الطاقة الحركية حيث تزداد السرعة من V_0 عند المدخل إلى V_{1th} عند المخرج [4]. الفوهة المتقاربة موضحة بالشكل (3).



الشكل (3): الفوهة المتقاربة

بارامترات الدخول إلى الفوهة المتقاربة:

P_0 : ضغط الدخول إلى الفوهة، T_0 : درجة حرارة الدخول إلى الفوهة \dot{m} : التدفق الكتلي، V_0 : السرعة عند مدخل الفوهة. من معادلة الاستمرار عند مخرج الفوهة:

$$\dot{m} = \rho_a \cdot V_{1th} \cdot A_1 \quad (2)$$

ρ_a : الكثافة النوعية النظرية للمائع عند الخروج من الفوهة، A_1 : مقطع الخروج للفوهة المتقاربة.

تحدد السرعة v_{1th} من معادلة القدرة في الجريان الأديباتي [7] بتطبيق هذه المعادلة بين طرفي الفوهة:

$$v_{1th} = \sqrt{2(h_0 - h_a)} \\ = \sqrt{2C_p(T_0 - T_a)}$$

حيث: h_0 : الانتالبي عند مدخل الفوهة، h_a : الانتالبي النظري عند مخرج الفوهة.

حيث T_a : درجة الحرارة النظرية عند مخرج الفوهة و T_0 : درجة حرارة الدخول إلى الفوهة و أيضا من علاقات الجريان الأيزوانتروبي:

$$\frac{T_a}{T_0} = \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4)$$

γ : الأس الأديباتي

ونتيجة للضياعات في الفوهة الثابتة نتيجة احتكاك جزيئات المائع مع مع جدران الفوهة؛ لا بد من ادخال عامل التمهّل ϕ في الحسابات. أن عامل التمهّل يأخذ في الحسبان مقدار انخفاض سرعة الجريان بسبب قوى الاحتكاك. أي أن وبالتالي السرعة الفعلية V_1 هي:

$$V_1 = \phi V_{1th} \quad (5)$$

2.3. الجزء المتحرك:

تتم في الفوهات المتحركة تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية تتم بتوجيه البخار ذي السرعة العالية إلى الشفرات المتحركة فيقوم بتدويرها [4].

مثلاث السرعة عند الدخول وعند الخروج موضحة في الشكل (4)، يبين هذا الشكل الفوهة الثابتة و الشفرات المتحركة للعنفة.

السرعة المحيطة عند الدخول u_1 تساوي:

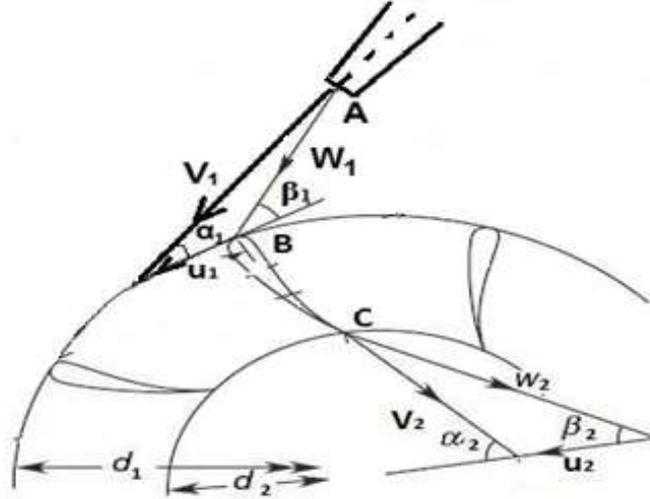
$$u_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (6)$$

حيث D_1 : القطر الخارجي للدولاب. n : عدد دوارت الدولاب (r.p.m) (دورة في الدقيقة).
و السرعة المحيطة عند الخروج u_2 تساوي:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} \quad (7)$$

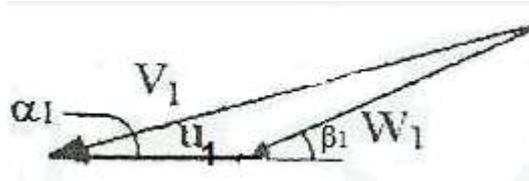
حيث D_2 : القطر الداخلي للدولاب.

حيث أنه لرسم مثلثات السرعة نستعين بالنقاط A و B و C الموضحة في الشكل (4).



الشكل (4): العنفة القطرية

V_1 : السرعة المطلقة لخروج البخار من الفوهة الثابتة ، α_1 : الزاوية التي تصنعها السرعة V_1 مع اتجاه السرعة المحيطة وهنا ينطبق منحني السرعة V_1 على خط التناظر للفوهة الثابتة.
 W_1 : السرعة النسبية للدخول إلى الفوهات المتحركة ، β_1 : الزاوية التي تصنعها السرعة W_1 مع اتجاه u وهي زاوية ميل شفرة الدولاب عند المدخل.
يوضح (5) الشكل مثلث السرعة عند الدخول:

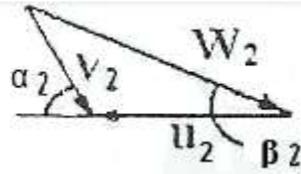


الشكل (5): مثلث السرعة عند الدخول

من مثلث السرعة عند الدخول:

$$W_1 \cdot \sin \beta_1 = V_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (8)$$

يوضح الشكل (6) مثلث السرعة عند الخروج:



الشكل (6): مثلث السرعة عند الخروج

من مثلث السرعة عند الخروج:

$$V_2 \cdot \sin \alpha_2 = W_2 \cdot \sin \beta_2 \quad (9)$$

W_2 : هي السرعة النسبية الحقيقية لخروج البخار من الفوهات المتحركة و هي أصغر من السرعة النظرية W_{2th} . يتم تحديد السرعة النسبية النظرية لخروج البخار من الفوهات المتحركة W_{2th} من تطبيق قانون انحفاظ الطاقة (قانون زونر) على طرفي الفوهات المتحركة:

$$W_{2th} = \sqrt{2(h_b - h_{a1}) + w_1^2} \quad (10)$$

h_b : الانتالبي الحقيقي عند مدخل الفوهات المتحركة. h_{a1} : الانتالبي النظري عند مخرج الفوهات المتحركة.

يخرج بخار من الفوهات المتحركة بسرعة نظرية W_{2th} ، لكن بسبب تحاك جزيئات البخار مع بعضها ومع سطوح الشفرات فإن أي $W_2 < W_{2th}$. يعبر عن ضياعات الاحتكاك في الفوهات المتحركة بعامل التمهّل ψ حيث

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

و منه السرعة النسبية الفعلية W_2 :

$$W_2 = \psi \cdot W_{2th} \quad (11)$$

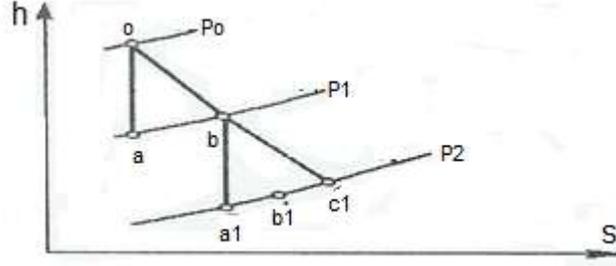
3.3. عمليات تحول الطاقة في مرحلة رد الفعل - ضياعات الطاقة:

العنفة الصغيرة المختارة هي عنفة رد فعل. يتمدد بخار المائع لدى مروره في الفوهة الثابتة مما يؤدي إلى زيادة السرعة من V_0 إلى V_1 ، وانخفاض الضغط من P_0 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 هو موضح في الشكل (7). تعين النقطة b الواقعة على نفس خط الضغط المار بالنقطة a [4].

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 بتقسيم 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-a₁، ونتيجة الضياع في الشفرات المتحركة للدولاب يصبح وضع بخار المائع في النقطة b₁، ويتم تحديد النقطة b₁ الواقعة على نفس خط الضغط المار بالنقطة a₁.

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 للبخار. يشير الواقع العملي إلى أن البخار يخرج بسرعة معينة لم نستفد منها فتذهب على شكل ضياعات، وبالتالي يصبح وضع بخار المائع في النقطة c₁ وهي تقع أيضا على نفس خط الضغط المار بالنقطة a₁، وتسمى هذه الضياعات بضياع السرعة المتبقية. هناك

ضبايع آخر هو ضبايع التسرب والاحتكاك، حيث أن قسم من المائع يتسرب وبالتالي هذا البخار لا يمر في الفوهات ولا ينجز عملا [4].



الشكل (7): عمليات التمدد في العنفة الصغيرة على المخطط h-s

يمكن حساب ضبايع التسرب و الاحتكاك كما يلي [4]:

-ضبايعات الطاقة في الفوهة الثابتة بسبب الاحتكاك:

$$\xi_{\varphi} = h_b - h_a = \frac{V_{1th}^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} = \frac{1}{2} (1 - \varphi^2) V_{1th}^2 \quad (12)$$

-الضبايعات في الفوهات المتحركة:

$$\xi_{\psi} = h_{b1} - h_{a1} = \frac{1}{2} (1 - \psi^2) W_{1th}^2 \quad (13)$$

-تعطى ضبايعات السرعة المتبقية بالعلاقة:

$$\xi_{V_2} = h_{c1} - h_{b1} = \frac{1}{2} V_2^2 \quad (14)$$

4.3. العمل والمردود في مرحلة رد فعل:

يكتب العمل النظري W_{th} على الشكل التالي [4]:

$$W_{th} = (h_0 - h_a) + (h_b - h_{a1}) \quad (15)$$

أما العمل الفعلي W_i يأخذ في الحسبان ضبايعات في الفوهة الثابتة وفي الفوهات المتحركة و ضبايعات السرعة المتبقية. وعليه فهو [4]:

ضبايعات الفوهة الثابتة و الفوهات المتحركة و السرعة المتبقية $W_i = W_{th} -$

$$W_i = W_{th} - [(h_b - h_a) + (h_{b1} - h_{a1}) + (h_{c1} - h_{b1})] \quad (16)$$

أما المردود الفعلي η_i فهو معطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_i = \frac{W_i}{W_{th}}, \quad W_i < W_{th} \quad (17)$$

و نتيجة ضبايعات تسرب البخار و الاحتكاك ، يكون العمل المفيد الذي تنتجه العنفة والذي نرسم له بالرمز W_u يكون أصغر من العمل التخطيطي بسبب ضبايعات التسرب و التحاك. ويحسب من العلاقة [4]:

$$W_u = W_i - \text{ضبايعات التسرب و التحاك} \quad (18)$$

يكون المردود المفيد η_u أصغر من المردود الفعلي η_i ، وهو يأخذ بعين الاعتبار كافة الضبايعات

المذكورة أعلاه. و يحسب من العلاقة [4]:

$$\eta_u = \frac{W_u}{W_{th}} = \frac{P_u}{P_{th}}, \quad W_u < W_i \quad (19)$$

P_{th} : الاستطاعة النظرية، وتعطى بالعلاقة التالية [4]:

$$P_{th} = \dot{m} \cdot W_{th} \quad (20)$$

و P_u : الاستطاعة المفيدة، وتعطى بالعلاقة التالية [4]:

$$P_u = \dot{m} \cdot W_u \quad (21)$$

النتائج والمناقشة:

تم ادخال جميع المعادلات السابقة إلى برنامج EES وتم دراسة تأثير كل من ضغط الدخول و درجة حرارة الدخول و زاوية الدخول وذلك باستخدام موائع ذات النوع A1 وهي R513A و R22 و R134a .

إن قيمة التدفق الكتلي قيمة ثابتة لا تتغير خلال مرور المائع بجميع مراحل العنفة لذلك تم أخذ قيمة التدفق الحجمي في نقطة معينة وهي عند الخروج من الفوهة وتم حساب التدفق الكتلي اعتماداً على العلاقة التالية:

$$\dot{m} = \rho_b \cdot Q \quad (22)$$

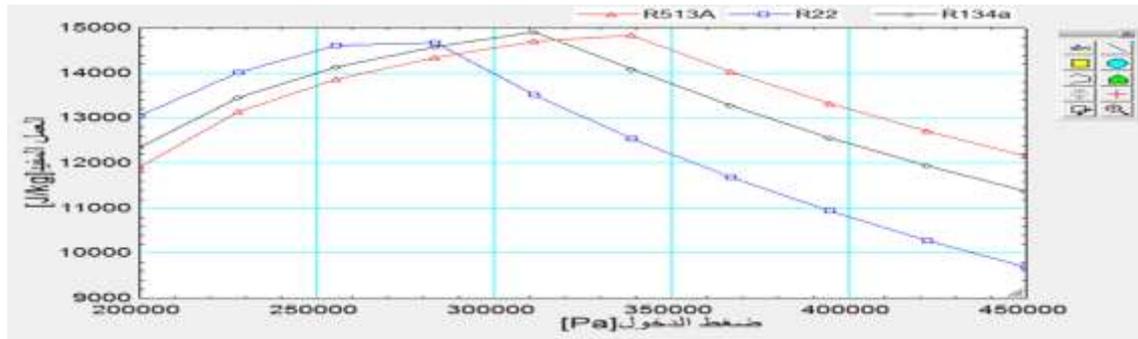
الكتلة النوعية الفعلية للمائع عند الخروج من الفوهة في النقطة b موضحة في الشكل (7).

تم بالقياس عند تنفيذ الدارة تجريبياً أخذ عدة قراءات ل ضغط الدخول إلى الفوهة P_0 و زاوية الدخول إلى الفوهة α_1 درجة حرارة الدخول إلى الفوهة T_0 .

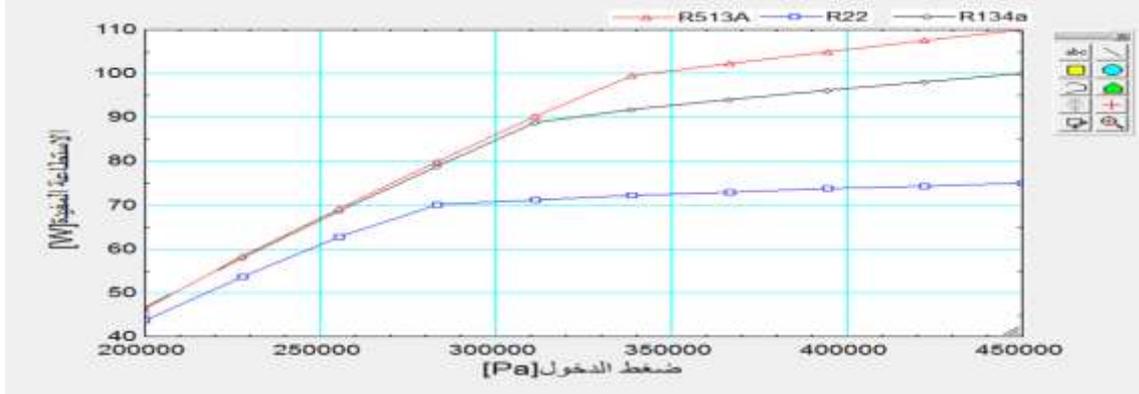
1.4. دراسة تأثير ضغط الدخول إلى الفوهة :

ضمن المجال $P_0 = (200000 \div 450000) (Pa)$ وذلك بثبات القيم الآتية: درجة حرارة الدخول إلى الفوهة $T_0 = 40 (^\circ C)$ و التدفق الحجمي $Q = 0.0007 (\frac{m^3}{s})$ و زاوية الدخول إلى الفوهة $\alpha_1 = 10^\circ$ و ضغط خروج من الفوهة المتحركة $P_2 = 110000 (Pa)$.

يبين الشكل (8) العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد أما الشكل (9) فهو يبين ضغط الدخول إلى الفوهة و الاستطاعة المفيدة.

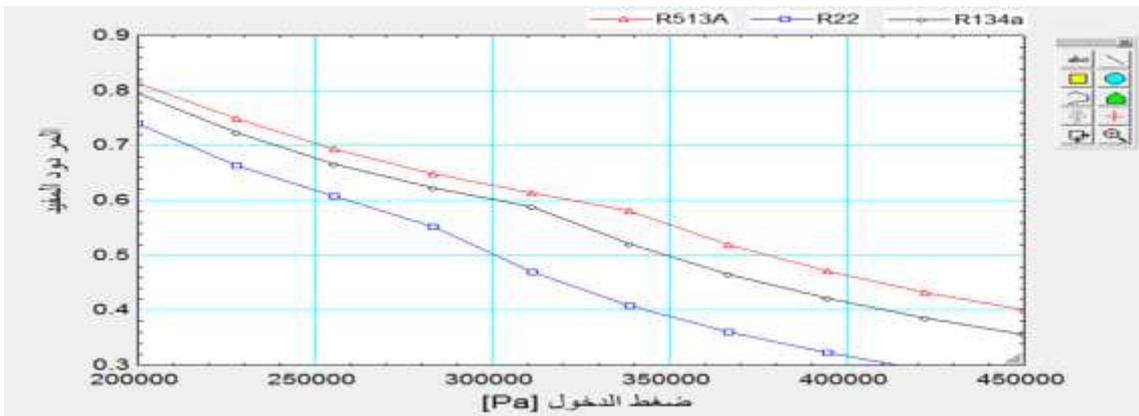


الشكل (8) العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد



الشكل (9) العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة و الاستطاعة المفيدة

من الشكل (8) نلاحظ أنه يتزايد عمل كل من الموائع R134a و R513A حتى يصبح (J/kg) 15000 عند ضغط مقداره (Pa) 320000 و (Pa) 340000 على التوالي ثم بعد هذه القيمة يبدأ بالانخفاض ، بينما يتزايد عمل المائع R22 حتى يصبح (J/kg) 14600 عند الضغط (Pa) 270000 وبعدها يبدأ بالانخفاض. يؤثر زيادة ضغط الدخول إلى الفوهة P_0 على فرق الضغط في الجزء الثابت $(P_0 - P_1)$ و المتحرك ولكن إمكانية هذه الفوهة الصغيرة على خفض الضغط محدود ، أي أن فرق الضغط في الجزء المتحرك $(P_1 - P_2)$ أكبر من فرق الضغط في الجزء الثابت أي زيادة في فرق الضغط في الجزء المتحرك يقابله زيادة في فرق الأنتالبي وعليه ، زيادة السرعة النسبية النظرية اعتماداً على العلاقة (10) و السرعة النسبية الفعلية عند الخروج اعتماداً على العلاقة (9) من الفوهات المتحركة وعليه ، تزداد سرعة المطلقة عند الخروج من الفوهات المتحركة وعليه ، يزداد العمل المفيد. يبين الشكل (9) أنه بزيادة ضغط الدخول إلى الفوهة (الدولاب) تزداد الاستطاعة المفيدة حيث إن الاستطاعة المفيدة تتعلق بالتدفق الكتلي و بالعمل المفيد وإن زيادة كل منهما سيزيد من قيمة الاستطاعة المفيدة . فعند استخدام المائع R513A فإن الاستطاعة المفيدة تفوق (W) 100 عند قيمة للضغط (Pa) 400000 بينما إن استخدام R22-R134a تتراوح قيمة استطاعتها (W) $(75 \div 100)$.

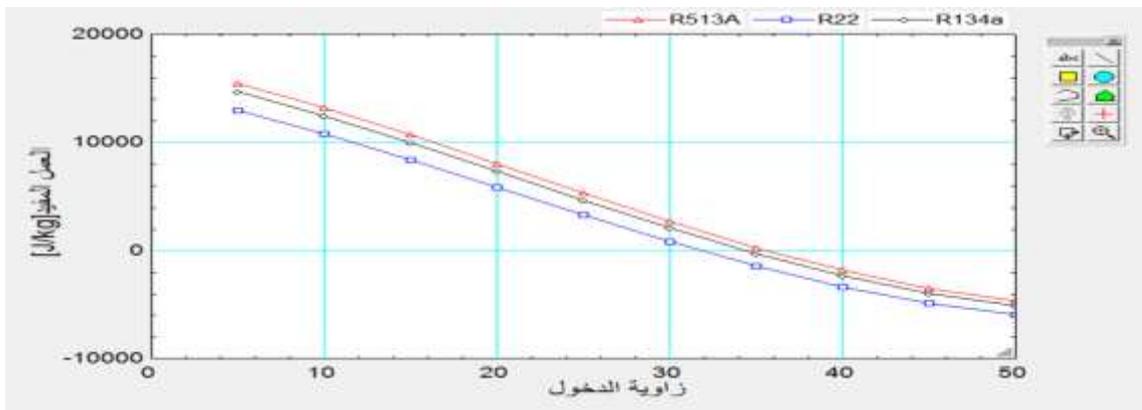


الشكل (10) العلاقة بين ضغط الدخول إلى الفوهة و المردود المفيد

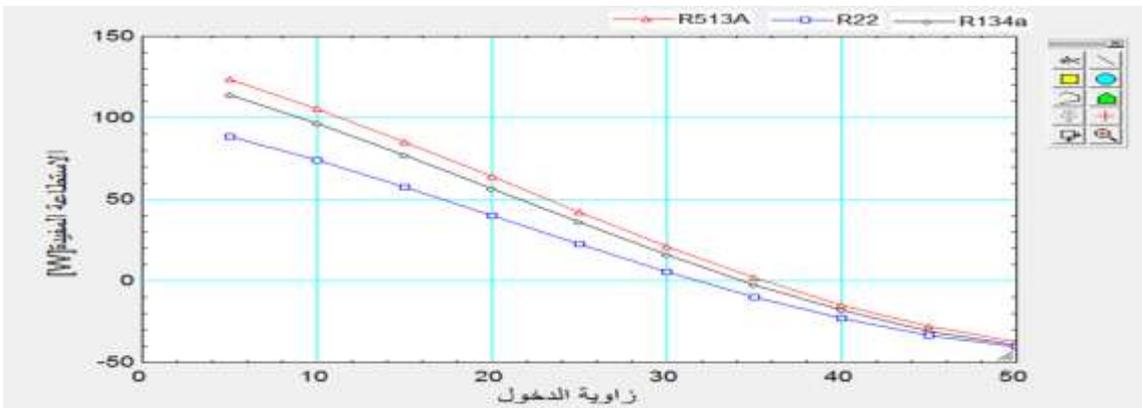
نلاحظ من الشكل (10) أنه كلما انخفض قيمة ضغط الدخول إلى الفوهة (دولاب) يزداد قيمة المردود المفيد . فعند استخدام المائع R513A فإن المردود المفيد يبلغ %56 عند قيمة للضغط (Pa) 400000 بينما إن استخدام R22-R134a تتراوح قيمة المردود المفيد % (32 ÷ 42).

2.4. دراسة تأثير زاوية الدخول إلى الفوهة:

ضمن المجال $\alpha_1 = (0 \div 50)^\circ$ وذلك بثبات القيم الآتية: درجة حرارة الدخول إلى الفوهة $T_0 = 40^\circ\text{C}$ التدفق الحجمي $Q = 0.0007 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$ و ضغط الدخول إلى الفوهة $P_0 = 400000 \text{ (Pa)}$.
يبين الشكل (11) العلاقة بين زاوية الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد أما الشكل (12) فهو يبين زاوية الدخول إلى الفوهة و الاستطاعة المفيدة.



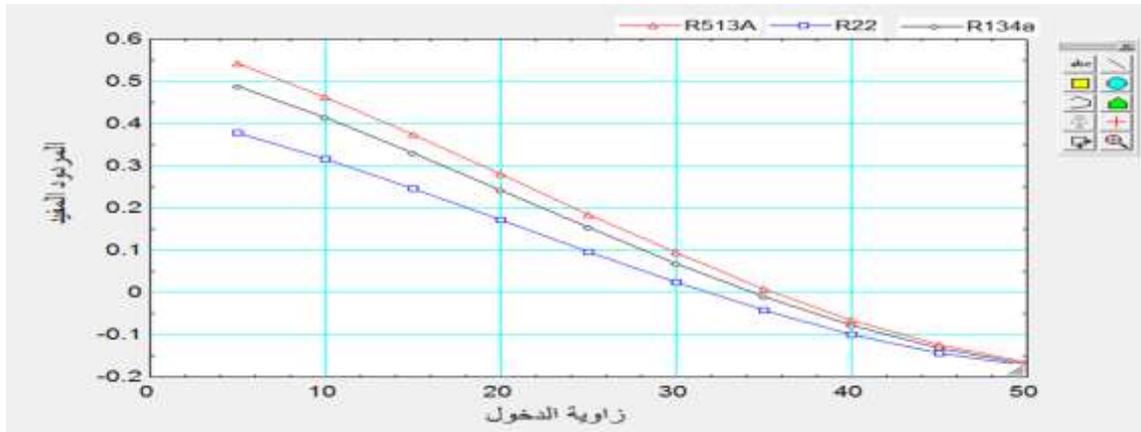
الشكل (11) العلاقة بين زاوية الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد



الشكل (12) العلاقة بين زاوية الدخول إلى الفوهة و الاستطاعة المفيدة

من الشكل (11) نلاحظ أنه بزيادة قيمة زاوية الدخول إلى الفوهة ينخفض قيمة العمل المفيد وذلك لأن عند زيادة زاوية الدخول سينخفض كل من جيب تمام الزاوية بناءً على العلاقة (8) والسرعة المحيطية للدخول ويزداد جيب الزاوية والسرعة النسبية لذلك يسبب انخفاض في قيمة العمل المفيد .
نلاحظ أيضاً أن العمل أصبح سالباً بعد تجاوز زاوية 30° وبالتالي أصبحت العنفة تعمل كمحرك وليس كمولد لذلك نختار قيمة زاوية الدخول اقل من 30° .

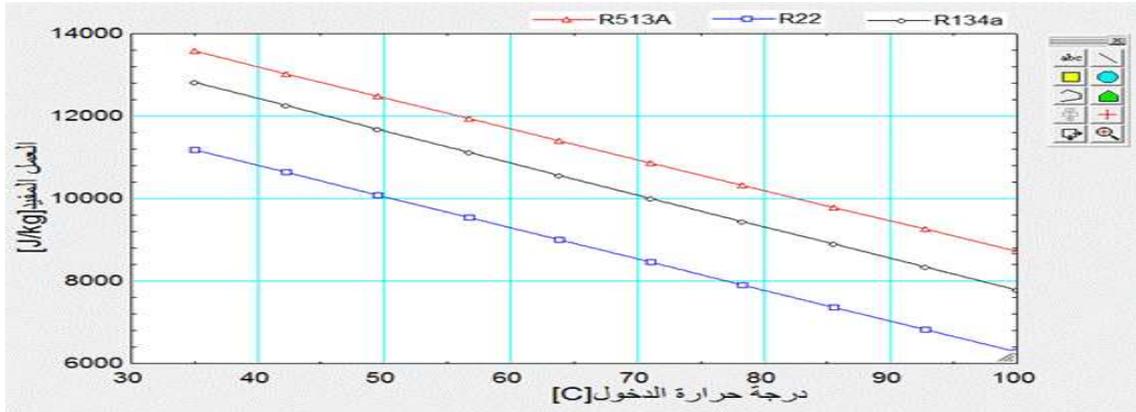
تتراوح قيمة العمل R513A, R134a, R22 $(\frac{J}{kg})$ $W_u = (10000 \div 20000)$ عند زاوية دخول 10° . من الشكل (12) نلاحظ أنه بزيادة زاوية الدخول إلى الفوهة تنخفض قيمة الاستطاعة المفيدة وذلك بسبب انخفاض قيمة العمل المفيد. إن قيمة الاستطاعة المفيدة للموائع R513A-R134a تساوي تقريباً (W) 100 عند زاوية دخول 10° بينما الاستطاعة باستخدام R22 تكون أقل من (W) 100. نلاحظ من الشكل (13) أنه بزيادة زاوية الدخول إلى الفوهة ينخفض المردود المفيد. فعند استخدام المائع R513A فإن المردود المفيد يساوي 55% عند زاوية دخول إلى الفوهة 10° بينما إن المردود عند استخدام R22-R134a عند نفس زاوية الدخول تكون 40% و 35% على التوالي.



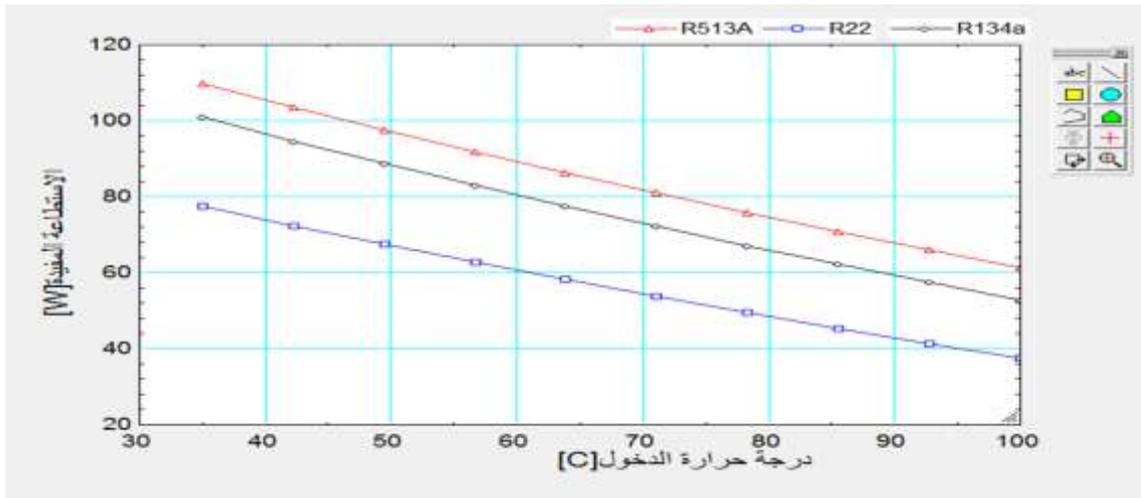
الشكل (13) العلاقة بين زاوية الدخول إلى الفوهة و المردود المفيد

3.4. دراسة تأثير درجة حرارة الدخول إلى الفوهة:

ضمن المجال $T_o = (35 \div 100) (^\circ C)$ وذلك بثبات القيم الآتية: زاوية الدخول إلى الفوهة $\alpha_1 = 10^\circ$ و التدفق الحجمي $Q = 0.0007 (\frac{m^3}{s})$ ضغط الدخول إلى الفوهة $P_o = 400000 (Pa)$. يبين الشكل (14) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد أما الشكل (15) فهو يبين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة و الاستطاعة المفيدة.



الشكل (14) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة و العمل المفيد

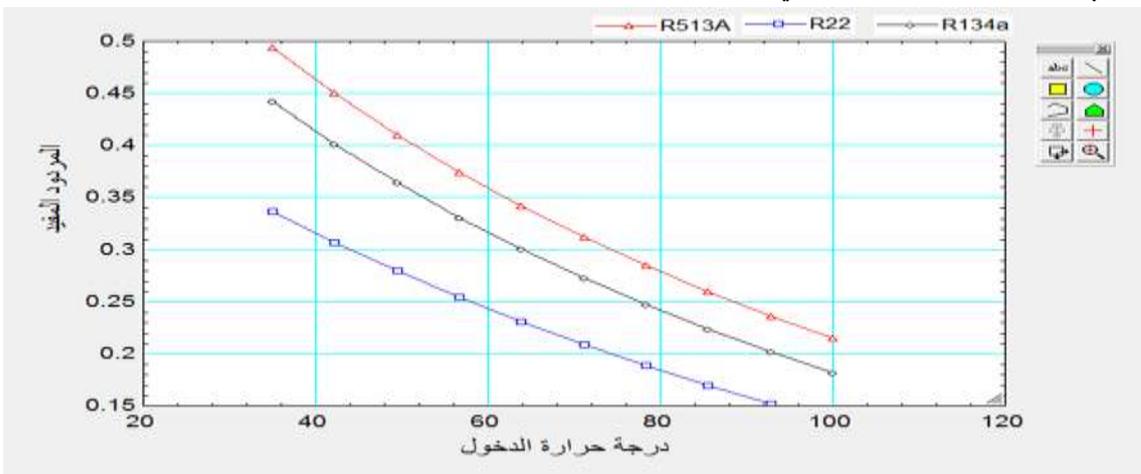


الشكل (15) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة والاستطاعة المفيدة

من الشكل (14) نلاحظ أنه بزيادة درجة الحرارة إلى الفوهة ينخفض العمل المفيد . إذ يؤثر زيادة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة T_0 في فرق الأنتالبي في الجزء الثابت و المتحرك و من المعلوم الأنتالبي يتعلق بدرجة الحرارة و الضغط ولكن إمكانية هذه الفوهة الصغيرة على خفض الضغط محدود ، يزداد فرق الأنتالبي في الجزء المتحرك بزيادة درجة حرارة الدخول إلى الفوهة وعليه ، يؤدي إلى زيادة السرعة النسبية النظرية W_{2th} و السرعة النسبية الفعلية W_2 عند الخروج من الفوهات المتحركة وعليه ، تزداد سرعة المطلق V_2 عند الخروج من الفوهات وبالتالي انخفاض العمل المفيد . عند استخدام الموائع R513A و R134a العمل المفيد يفوق 12000 (J/kg) عند درجة حرارة 40°C بينما عند استخدام المائع R22 يكون العمل المفيد عند درجة الحرارة هذه أقل من 12000 (J/kg) .

من الشكل (15) نلاحظ أنه بزيادة درجة الحرارة تتخفض قيمة الاستطاعة المفيدة وتكون الاستطاعة المفيدة عند استخدام المائع R513A تفوق 100 (W) عند درجة حرارة 40°C بينما باستخدام موائع R134a و R22 وتكون الاستطاعة المفيدة عند درجة الحرارة هذه تساوي 90 (W) و 78 (W) على التوالي.

من الشكل (16) نلاحظ أنه بزيادة درجة الحرارة ينخفض المردود المفيد. عند استخدام المائع R513A تكون قيمة المردود المفيد تساوي 46% عند درجة حرارة 40°C بينما باستخدام موائع R134a و R22 تكون قيمة المردود المفيد تساوي 41% و 31% على التوالي.



الشكل (16) العلاقة بين درجة حرارة الدخول إلى الفوهة و المردود المفيد

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- إن تخفيض قيمة ضغط الدخول إلى الفوهة سيؤدي إلى انخفاض العمل المفيد بالتالي ستزداد الاستطاعة المفيدة لكن يزداد المردود المفيد.
- 2- إن زيادة زاوية الدخول إلى الفوهة، أو درجة حرارة الدخول إلى الفوهة ستؤدي إلى انخفاض العمل المفيد والاستطاعة المفيدة والمردود المفيد.
- 3- إن مائع العمل R513A ذو كفاءة أعلى بالمقارنة مع R134a و R22.
- 4- تطوير هذه الدراسة مستقبلاً من أجل تطبيقها للحصول على ضياعات أقل واستطاعات أكبر.

References:

- 1-Hung, T. C. Shai, T. Y. and Wang, S. K. *A review of organic Rankine cycles (ORC`s) for the recovery of low-grade waste heat*. Energy, vol. 22(7), pp. 661-667, 1997.
<[http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(96\)00165-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(96)00165-X)>
- 2-Tchange, B.F. Papadakis, G. Lambrinos, G. and Frangoudakis, A. *Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle*. Applied Thermal Engineering, 29(1), pp. 2468-2476, 2009.
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>>
- 3-ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 1997-1998.
<https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/34-1997_addendum-a-p.pdf>
4. Yakhour, Dr. M. Batal, Mohamed Atta. Thermal machines/1/ (steam turbines). Tishreen University, Syrian Arab Republic, 2014-2015.
- 5-Refrigerant of book, Al-Bukhari Library.
<<https://www.makktaba.com/2011/05/Book-of-Refrigerants.html>>
- 6-Ferro, L. M. C; Gato, L. M. C; Falcão; A. F.O. *Design of the rotor blades of a mini hydraulic bulb-turbine*. Renewable Energy. 36, 2011, 2395-2403.
7. Dr. Mahmoud, Habib. Mohammed. Gas dynamics. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 2007-2006.
8. M. Bakour, Razan Abdel Qader. A study of some factors affecting the output of a small radial turbine using several working fluids and using the (EES) program. Tishreen University Journal, 2016.
- 9-ASHRAE Refrigerant factsheet .*REFRIGERATION CLASSIFICATION, PROPERTIES, AND SELECTION*, PUBLISHED BY DTC ENGINEERS, January 2020.
<https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/refrigeration/factsheet_ashrae_english_20200424.pdf>