

## تحليل سلوك نظام دورة كالينا للاستفادة من

### الحرارة الضائعة في معمل اسمنت طرطوس

طالبة دكتوراه): م.ديما نعمان احمد: معيدة موفدة داخلياً إلى

قسم المعدات والآليات - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس

أ.د.م موسى المحمد: رئيس قسم المعدات والآليات - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

د.م محمد باكير: أستاذ مساعد في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهك - جامعة البعث.

#### ملخص

في هذا العمل تم إجراء نمذجة ترموديناميكية، وتحليل بارامتري للنظام المقترح لدورة كالينا بغرض الاستفادة من الحرارة المهدورة في غازات عادم التسخين المسبق للمواد الأولية في معمل اسمنت طرطوس بإنتاجية 1300 طن من الكلنكر يومياً للفرن، بهدف تقييم سلوك الدورة الحراري تبعاً لتأثير البارامترات الرئيسية في الدورة، وتحسين هذه البارامترات فيما يتعلق بالاستطاعة الكهربائية الناتجة والكفاءة الحرارية.

وقد تبين عند بارامترات محددة لمنطقة الفاصل وجود قيم عظمى وقيم دنيا لتركيز الأمونيا ضمن الخليط فيما يتعلق بالاستطاعة الكهربائية الناتجة، وتستطيع هذه الدورة توليد  $2724 \text{ [kW]}$  من الطاقة الكهربائية بكفاءة حرارية قدرها  $23.89\%$ .

كلمات مفتاحية: دورة كالينا، استعادة الحرارة المهدورة، توليد الطاقة، تركيز الأمونيا،

صناعة الاسمنت

# **Analysis of the behavior of the Kalina cycle system to benefit from the wast heat at the Tartous cement plant**

## **Abstract**

In this work, thermodynamic modeling and parametric analysis of the proposed system for the Kalina cycle were carried to benefit from the wast heat at the exhaust gases of preheating the raw materials in the Tartous cement plant, which a production capacity of 1300 tons of clinker per day per kiln, with the aim of evaluating the behavior of the thermal cycle according to the influence of the main parameters of the cycle. And optime these parameters in terms of the output electrical power and thermal efficiency.

In specific parameters of the separator, optimum and minimum values of the ammonia concentration within the working fluid were found in relation to the electrical output power, and this cycle could generate 2724 [kW] of electrical energy with a thermal efficiency of 23.89%.

**Keywords:** Kalina cycle, Waste heat recovery, Power generation, Ammonia concentration, Cement industry.

## 1- مقدمة:

يركز الباحثون على تقنيات جديدة لتسخير موارد الطاقة المتجددة، إلى جانب تطوير أنظمة تحويل طاقة أكثر كفاءة، وقد تم بذل جهود كبيرة لتوليد الطاقة من خلال استخدام مصادر الحرارة ذات درجة الحرارة المنخفضة والمتوسطة مثل عادم التوربينات الغازية، ومحركات الاحتراق الداخلي، والمحاليل الملحية الجوفية، والحرارة المهذورة الناتجة عن العمليات الصناعية... إلخ، إذ تتطلب درجة حرارة هذه المصادر دورات ترموديناميكية أخرى غير الدورة التقليدية .

تعد صناعة الإسمنت واحدة من أقوى الصناعات المرشحة لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام الحرارة المهذورة فيها، إذ إن حوالي 40% من الحرارة المستخدمة في عملية إنتاج الكلنكر تطرح في الجو دون استخدام [1].

تعتبر دورة كالينا مناسبة بشكل خاص لدرجة الحرارة المتوسطة المتوفرة في عادم التسخين الأولي الناتج عن الأفران في مصنع الاسمنت، وهي تعتمد على استخدام خليط من الماء والامونيا كجسم عامل فيها، حيث أن الخصائص الترموديناميكية لهذا الخليط وتغير درجة حرارته أثناء عملية الغليان والتكثيف، إلى جانب القدرة على تغيير تركيز الأمونيا والمياه في نقاط مختلفة من الدورة، يحسن من فعالية اكتساب الحرارة وطرحها ونقلها، حيث أن تحسين عمليات نقل الحرارة تزيد من كفاءة محطة توليد الطاقة مما يؤدي إلى إنتاج كمية أكبر من الكهرباء من مصدر حراري ثابت.

ما يجعل من دورة كالينا خياراً مثيراً للاهتمام في مجال محطات الطاقة لتحويل الحرارة المهذورة في صناعة الإسمنت إلى طاقة كهربائية.

## 2- دراسة مرجعية:

تمت دراسة دورة كالينا منذ أن حصلت على براءة اختراع في عام 1984، و تم اقتراح العديد من إصدارات نظام دورة كالينا القابلة للتطبيق على أنواع مختلفة من مصادر الحرارة لإنتاج الطاقة [1.2.3.4]، من بينها تطبيقات استعادة الحرارة المهدورة في صناعة الصلب ومصفاة النفط وغازات العادم في محركات الاحتراق الداخلي والتوربينات الغازية.

وركزت بعض الدراسات على مقارنة الأداء مع دورات الطاقة الأخرى، حيث حققت دورة كالينا كفاءة حرارية أعلى من دورة رانكن عند درجة حرارة المصدر من  $135-200^{\circ}\text{C}$  [5] ، وقد أظهرت أداء أفضل من دورة رانكن العضوية (ORC) عند  $180^{\circ}\text{C}$  [6] ، وحققت دورة كالينا لاستعادة الحرارة عند  $300^{\circ}\text{C}$ ، وحرارة مياه التبريد  $25^{\circ}\text{C}$ ، كفاءة حرارية تبلغ 21%، وكفاءة اكسيرجي 48% [7] .

قام الباحثون بتحديد البارامترات الرئيسية المؤثرة على أداء الدورة وتحسينها، وتوصلوا إلى قيم مثلى لتركيز الامونيا تحت شروط تشغيلية معينة [8.9] .

أجرى الباحثون [10] مقارنة بين دورة كالينا ودورة ORC ودورة SRC أحادية ومزدوجة الضغط لاستعادة الحرارة من عادم التسخين المسبق وهواء تبريد الكلنكر في مصنع للاسمنت، وقد حققت دورة كالينا أفضل أداء، وكفاءة إكسيرجي أعلى من الدورات المدروسة.

تم دراسة نظام دورة كالينا البسيط (KCS34) [11] لاسترداد الحرارة المهدورة من عادم التسخين المسبق في معمل للاسمنت، ودراسة البارامترات الرئيسية في الدورة مثل تركيز الامونيا، وضغط مدخل التوربين، ضمن مجال واسع للحصول على مجموعة البارامترات

التي تحقق أقصى أداء للدورة من حيث الاستطاعة الكهربائية المنتجة، والكفاءة الحرارية والأكسيريحية، والتكلفة، وتبين أن اختلاف الضغط له تأثير كبير على أداء الدورة مقارنة بتركيز الامونيا في مدخل التوربين .

عمل الباحثون [12] على إجراء التحليل الاقتصادي الحراري لدورة كالينا نظام (KCS1) لاستعادة الحرارة من عادم أجهزة التسخين الإعصارية لمصنع للاسمنت، بتطوير نموذج حاسوبي في برنامج EES لمحاكاة الدورة، وتقدير تكلفة توليد الكهرباء، والوصول إلى بارامترات الحالة الأفضل للحصول على أقصى طاقة بأقل تكلفة ممكنة، وتم اعتبار دورة كالينا دورة تنافسية في قطاع توليد الكهرباء البرازيلي .

قام الباحثون [13] بدراسة نظام دورة كالينا (KCS11) لدرجات الحرارة المنخفضة مع استبدال الصمام الخانق بموسع ثنائي الطور، وتحسين البارامترات، وقد أظهرت هذه الدورة كفاءة حرارية تراوحت بين 7.9-10.5% .

وقد أشارت الأبحاث إلى أن دورة كالينا تعتبر دورة تنافسية من حيث تكلفة الاستثمار، وتكلفة توليد الكهرباء، في تطبيقات متعددة [14,15] ومنها مجال صناعة الاسمنت [11,12,16].

يعتمد النظام المناسب وشروطه التشغيلية لتوليد الطاقة من الحرارة المهدورة في صناعة الاسمنت، على شروط المصدر الحراري لهذا المصنع وبالتالي لايمكن تطبيق تجارب مصنع معين على مصنع آخر.

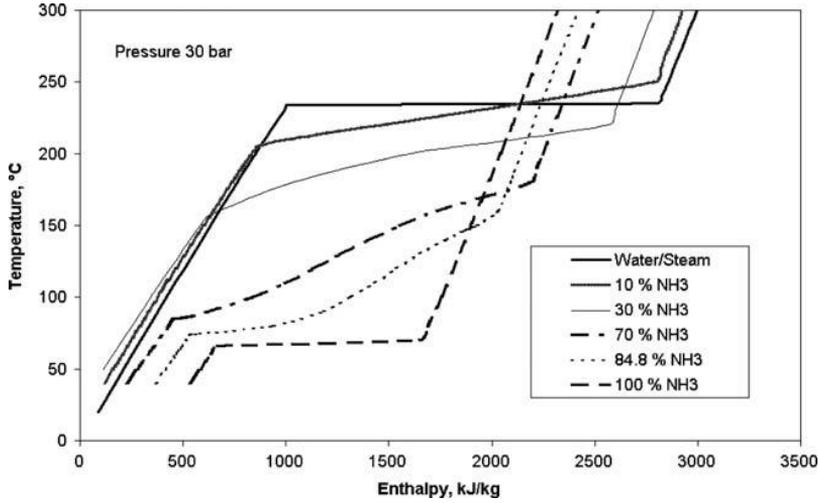
### 3- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير البارامترات الرئيسية في دورة كالينا المقترحة على سلوك الدورة من الناحية الترموديناميكية، وذلك بغرض تحديد الظروف الأفضل لعمل

الدورة فيما يتعلق بالاستطاعة الكهربائية الناتجة، والكفاءة الحرارية، وفق شروط غازات العادم للتسخين المسبق في مصنع إنتاج الاسمنت بطرطوس.

#### 4- دورة كالينا:

في دورة كالينا يتم نقل الحرارة من المصدر ذو درجة الحرارة المنخفضة إلى الجسم العامل، وهو عبارة عن خليط من الامونيا والماء، وتعد الميزة الكبرى لجسم عامل ثنائي من هذا النوع هو أن كلاً من عمليتي التبخر والتكثيف تحدثان في مدى من درجات الحرارة المختلفة، حيث تتغير نسبة الخليط الثنائي أثناء عملية التبخر بسبب تبخر الأمونيا أولاً نتيجة انخفاض درجة حرارة غليانها (إذ كلما زاد تركيز الأمونيا في الخليط انخفضت درجة حرارة الغليان)، وبالتالي فإن الخليط يغلي عند درجة حرارة متغيرة حسب تغير نسبة الخليط (كذلك الأمر في عملية التكثيف). نتيجة لذلك يحدث تطابق أفضل بكثير مع مصدر الحرارة مما يمكن تحقيقه في دورة رانكن التقليدية حيث تظل درجة الحرارة ثابتة أثناء الغليان حتى يتم تحويل كل الماء إلى بخار، وتوضح المنحنيات المختلفة في الشكل (1) [17]، درجة حرارة الغليان المتغيرة لتركيبات مختلفة من خليط الأمونيا والماء مقارنة مع درجة حرارة الغليان الثابتة للماء.



الشكل (1) مقارنة بين غليان الماء وتركيبات مختلفة من خليط (ماء-أمونيا) عند الضغط [30 bar]

#### 5- منهجية البحث:

تم في هذا البحث تطوير نموذج حاسوبي يحاكي عمل الدورة رياضياً، اعتماداً على المبادئ الأساسية في الترموديناميك، ومعادلات توازن الكتلة والطاقة والتركيز والانتروبي لكل مكون من مكونات الدورة، باستخدام البرنامج الحراري (EES) Engineering Equation Solver، الذي يمكن من التعامل مع الجداول الترموديناميكية بكل مرونة، بالإضافة لاحتوائه على قاعدة بيانات كبيرة من الخصائص الفيزيائية الحرارية للسوائل المختلفة مما يسمح بالحساب السريع والدقيق لخصائص خليط الأمونيا مع الماء عند حالات مختلفة في الدورة، ويعتمد (EES) على صيغة ابراهيم وكلين [18] لحساب خصائص الخليط، كما تم تحسين البارامترات اعتماداً على الخوارزمية الجينية المتاحة في هذا البرنامج.

#### 5-1 وصف الدورة المقترحة:



بالأمونيا(النقطة 11)، بعد ذلك يدخل خليط البخار إلى المحمص (Super Heater) ثم يتمدد في التوربين البخاري (turbine1)، بينما يتمدد خليط السائل في الموسع ثنائي الطور (Tow phase expander,turbin2)، ويلتقي التياران عند الضغط المنخفض ذاته في (النقطة 3) (Absorber)، يتكثف الخليط في المكثف (Condenser) ثم يزداد ضغطه في المضخة (Pump)، ويمر عبر المبادل الحراري (Heat Exchanger) قبل العودة إلى الموفر وإغلاق الدورة.

تكمّن السمة الرئيسية لهذه الدورة باستبدال الصمام الخانق ومبادل درجة الحرارة العالية في نظام (kcs34) بالموسع ثنائي الطور، لاستعادة عمل التمدد في الصمام الخانق، واستخدام الطاقة الحرارية للسائل الساخن عند مخرج الفاصل (النقطة 11) في توليد الطاقة الميكانيكية مباشرة عبر تمدد السائل ضمن الموسع.

ويعد الموسع ثنائي الطور أحد المعدات المبتكرة لاستعادة عمل التمدد أثناء عملية الخنق، واستعادة الطاقة من مصادر ذات درجة حرارة منخفضة، ويستخدم عادة في دورة الفلاش الثلاثية (TFC, Trilateral Flash cycle) حيث يبدأ التوسع فيها من السائل المشبع بدلاً من البخار المشبع أو المحمص [19]، كما تعتبر تكلفة الموسع غير عالية عند استخدامه في أنظمة استعادة الحرارة المهدورة [13]

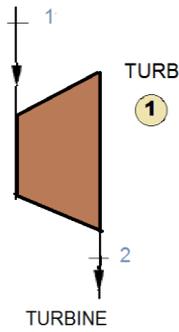
## 5-2 النمذجة الترموديناميكية :

تم إجراء النمذجة اعتماداً على تطبيق معادلات توازن الكتلة، والطاقة، والتركيز، والانتروبي في كل مكون من مكونات الدورة باستخدام برنامج (EES)، وتم الحصول على خصائص خليط الماء والأمونيا من خلال روتين داخلي في (EES).

عند تحليل الدورة تؤخذ بالحسبان الاعتبارات التالية [8,13,20]:

- تصل جميع العمليات في الدورة إلى حالة مستقرة.
- يهمل هبوط الضغط في الأنابيب والمبادلات الحرارية.
- يعتبر النظام معزولاً تماماً وخسائر الحرارة مهملة.
- تسلك غازات العادم من عملية إنتاج الاسمنت سلوك الغازات المثالية.
- لا تقل نسبة البخار عند مخرج التوربين عن 90%.
- تعتبر عملية التكثيف ايزوبارية، وعملية الفصل أديباتية.
- يكون خليط البخار عند مخرج الفاصل مشبعاً جافاً.
- يكون خليط السائل عند مخرج الفاصل مشبعاً رطباً.

يوضح الجدول (1) معادلات توازن الكتلة والطاقة والانتروبي لكل من مكونات الدورة:



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_1 \cdot X_1 = \dot{m}_2 \cdot X_2$$

توازن الكتلة

والتركيز

$$\dot{W}_{\text{turb-1}} = \dot{m}_1 (h_1 - h_2)$$

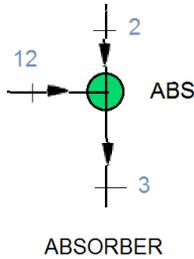
توازن الطاقة

$$\dot{S}_{\text{turb-1}} = \dot{m}_1 (s_2 - s_1)$$

توازن الانتروبي

$$\eta_{\text{s-turb-1}} = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2s})$$

الكفاءة الايزونترابية



$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{12}$$

$$\dot{m}_3 \cdot X_3 = \dot{m}_2 \cdot X_2 + \dot{m}_{12} \cdot X_{12}$$

توازن الكتلة

والتركيز

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_{12} \cdot h_{12}$$

توازن الطاقة

$$\dot{S}_{\text{abs}} = \dot{m}_3 \cdot s_3 - \dot{m}_2 \cdot s_2 - \dot{m}_{12} \cdot s_{12}$$

توازن

الانتروبي



PUMP

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

توازن الكتلة

$$\dot{m}_5 \cdot X_5 = \dot{m}_6 \cdot X_6$$

والتركيز

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}_5 (h_6 - h_5)$$

توازن الطاقة

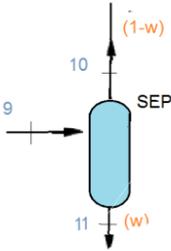
$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}_5 \cdot v_5 \cdot (p_6 - p_5) / \eta_{s-\text{pump}}$$

$$\dot{S}_{\text{pump}} = \dot{m}_5 (s_6 - s_5)$$

توازن الانتروبي

$$\eta_{s-\text{pump}} = (h_{6s} - h_5) / (h_6 - h_5)$$

الكفاءة الايزونتروبية



SEPARATOR

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11}$$

توازن الكتلة

$$\dot{m}_9 \cdot X_9 = \dot{m}_{10} \cdot X_{10} + \dot{m}_{11} \cdot X_{11}$$

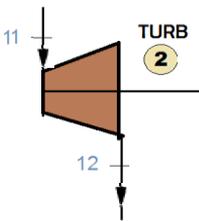
والتركيز

$$\dot{m}_9 \cdot h_9 = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11}$$

توازن الطاقة

$$\dot{S}_{\text{sep}} = \dot{m}_{10} \cdot s_{10} + \dot{m}_{11} \cdot s_{11} - \dot{m}_9 \cdot s_9$$

توازن الانتروبي



TWO-PHASE EXPANDER

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$$

توازن الكتلة

$$\dot{m}_{11} \cdot X_{11} = \dot{m}_{12} \cdot X_{12}$$

والتركيز

$$\dot{W}_{\text{turb-2}} = \dot{m}_{11} (h_{11} - h_{12})$$

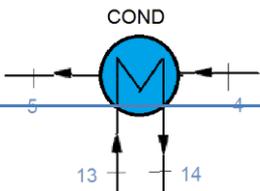
توازن الطاقة

$$\dot{S}_{\text{turb-2}} = \dot{m}_{11} (s_{12} - s_{11})$$

توازن الانتروبي

$$\eta_{s-\text{turb-2}} = (h_{11} - h_{12}) / (h_{11} - h_{12s})$$

الكفاءة الايزونتروبية



CONDENSER

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5, \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$$

توازن الكتلة

$$\dot{m}_4 \cdot X_4 = \dot{m}_5 \cdot X_5$$

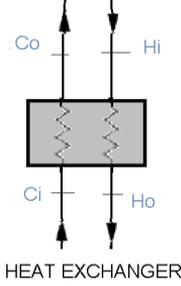
والتركيز

$$\dot{m}_{13} (h_{14} - h_{13}) = \dot{m}_4 (h_4 - h_5)$$

توازن الطاقة

$$\dot{S}_{\text{cond}} = \dot{m}_{13}(s_{14}-s_{13}) + \dot{m}_4(s_5-s_4)$$

توازن الانتروبي



$$\dot{m}_{Hi} = \dot{m}_{Ho}, \dot{m}_{Ci} = \dot{m}_{Co}$$

توازن الكتلة

$$\dot{m}_i \cdot X_i = \dot{m}_o \cdot X_o$$

والتركيز

$$\dot{m}_H(h_{Hi} - h_{Ho}) = \dot{m}_C(h_{Co} - h_{Ci})$$

توازن الطاقة

$$\dot{S}_{HE} = \dot{m}_H(s_{Ho}-s_{Hi}) + \dot{m}_C(s_{Co}-s_{Ci})$$

توازن الانتروبي

وتعطى كل من الاستطاعة الصافية ( $\dot{W}_{\text{net}}$ ) والكفاءة الحرارية ( $\eta_{\text{th}}$ ) وكمية الحرارة الداخلة إلى الدورة ( $Q_{\text{in}}$ ) بالمعادلات:

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{turb-1}} + \dot{W}_{\text{turb-2}} - \dot{W}_{\text{pump}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{in}} = \dot{m}_7 (h_9 - h_7) + \dot{m}_{10} (h_1 - h_{10}) \quad (3)$$

الجدول (2) المدخلات البيانية لنموذج الدورة:

$\eta_{s-\text{turb-1}} = 0.85$	الكفاءة الايزونتروبية للتوربين
$\eta_{s-\text{pump}} = 0.8$	الكفاءة الايزونتروبية للمضخة
$\eta_{s-\text{turb-2}} = 0.75$	الكفاءة الايزونتروبية للموسع ثنائي الطور
$\eta_e = 0.98$	كفاءة المولد الكهربائي
1.013[bar]	ضغط الوسط المحيط
2.5[bar]	ضغط مياه التبريد

297.15 k	درجة الحرارة المحيطة
$\Delta T_{13-14} = 8k$	الازدياد في درجة حرارة ماء التبريد
$\Delta T_{13-5} = 5k$	فرق درجة الحرارة الأدنى بين الوسيط العامل ومياه التبريد
$\Delta T_{3-7} = 5k$	الفرق الأدنى في درجات الحرارة بين التيارين المارين في المسترجع

يمكن حساب بارامترات الحالة لخليط الغازات مع الاخذ بعين الاعتبار تكوين وضغط ودرجة حرارة الخليط، بناء على نموذج الغاز المثالي باستخدام المعادلات التالية [23] :

$$h_{gases} = \sum_i \left( \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu} \right) h_i$$

$$S_{gases} = \sum_i \left( \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu} \right) s_i - \frac{\bar{R}}{\mu_i} \ln \left( \frac{p_i}{p_{atm}} \right)$$

$$\rho_{gases} = \sum_i \left( \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu} \right) \rho_i$$

حيث:

$h_{gases}$ : الانتالبي النوعي لخليط الغازات [kJ/kg].

$r_i$ : الحصة الحجمية (أو المولية) للمكون "i" في خليط الغازات [%].

$\mu_i$ : الكتلة المولية للمكون "i" في خليط الغازات [kg / kmol]

$\mu$ : الكتلة المولية الكلية لخليط الغازات [kg / kmol]

$h_i$ : الانتالبي النوعي للمكون "i" في خليط الغازات [kJ/kg].

$S_{gases}$ : الانتروبي النوعي لخليط الغازات [kJ/kg-k].

$s_i$ : الانتروبي النوعي للمكون "i" في خليط الغازات [kJ/kg-k].

$\bar{R}$ : الثابت العام لخليط الغازات [kJ/kg-k].

$p_i$ : الضغط الجزئي للمكون "i" في خليط الغازات [MPa].

$p_{atm}$ : الضغط الجوي [MPa].

$\rho_{gases}$ : الكتلة النوعية لخليط الغازات [kg/ m<sup>3</sup>].

$\rho_i$ : الكتلة النوعية للمكون "i" في خليط الغازات [kg/ m<sup>3</sup>].

الجدول (3) بيانات غازات العادم في عملية انتاج الإسمنت:

بيانات غازات عادم التسخين المسبق في معمل اسمنت طرطوس		
		التركيب المولي:
%	65.2	N2
%	4	O2
%	22.5	CO2
%	8.3	H2O
Nm <sup>3</sup> /h	320000	التدفق
°C	340	درجة الحرارة
g/ Nm <sup>3</sup>	100	محتوى الغبار

3-5 تصديق النموذج:

تم التحقق من صحة النموذج الترموديناميكي لدورة كاليينا في هذه الدراسة بالمقارنة مع البيانات التي حصل عليها الباحثون [16] عند دراسة نموذج دورة كاليينا نظام (KCS34) نظراً لوجود نقاط حالة مشتركة بين الدورتين. عند تطبيق ظروف التشغيل وبيانات الغازات الواردة في [16] على النموذج الحالي، نحصل على بارامترات الحالة لنقاط الدورة المختلفة المعروضة في الجدول (4).

الجدول (4) التحقق من صحة النموذج العددي مع البيانات المنشورة [16] :

x [-]	h[kJ/kg]		T[k]		p [bar]		ṁ [kg/s]			
	نموذج الدراسة [16]	المرجع [16]	نموذج الدراسة [16]	المرجع [16]	نموذج الدراسة [16]	المرجع [16]	نموذج الدراسة [16]	المرجع [16]		
0.96	<b>0.96</b>	2179	<b>2179</b>	644.6	<b>644.6</b>	77.4	<b>77.4</b>	5.734	<b>5.67</b>	1
0.96	<b>0.96</b>	1736	<b>1736</b>	459.3	<b>459</b>	9.6	<b>9.56</b>	5.734	<b>5.67</b>	2
0.89	<b>0.89</b>	1383	<b>1431</b>	364.3	<b>368.3</b>	9.6	<b>9.56</b>	7.569	<b>7.49</b>	3
0.89	<b>0.89</b>	1097	<b>1122</b>	332.6	<b>335.5</b>	9.6	<b>9.56</b>	7.569	<b>7.49</b>	4
0.89	<b>0.89</b>	46.9	<b>46.2</b>	300.1	<b>300</b>	9.6	<b>9.56</b>	7.569	<b>7.49</b>	5
0.89	<b>0.89</b>	59.13	<b>58.43</b>	302.0	<b>301.9</b>	77.4	<b>77.4</b>	7.569	<b>7.49</b>	6
0.89	<b>0.89</b>	345.3	<b>366.7</b>	359.3	<b>363.3</b>	77.4	<b>77.4</b>	7.569	<b>7.49</b>	7
0.89	<b>0.89</b>	502.8	<b>502.9</b>	387.4	<b>387.4</b>	77.4	<b>77.4</b>	7.569	<b>7.49</b>	8
0.89	<b>0.89</b>	1212	<b>1215</b>	422.7	<b>423</b>	77.4	<b>77.4</b>	7.569	<b>7.49</b>	9
0.96	<b>0.96</b>	1432	<b>1433</b>	422.7	<b>423</b>	77.4	<b>77.4</b>	5.734	<b>5.67</b>	10
0.64	<b>0.64</b>	523.6	<b>533.2</b>	422.7	<b>423</b>	77.4	<b>77.4</b>	1.836	<b>1.82</b>	11
0.64	<b>0.64</b>	279.2	<b>478.6</b>	326.6	<b>337.3</b>	9.6	<b>9.56</b>	1.836	<b>1.82</b>	12
--	--	92.43	<b>92.43</b>	295.1	<b>295</b>	2.5	<b>2.5</b>	237.5	<b>241.1</b>	13
--	--	125.8	<b>125.9</b>	303.1	<b>303</b>	2.5	<b>2.5</b>	237.5	<b>241.1</b>	14
--	--	-2599	<b>-2599</b>	663.1	<b>663.2</b>	1.01	<b>1.01</b>	55.92	<b>55.92</b>	15
--	--	-2675	<b>-2675</b>	594.9	<b>594.9</b>	1.01	<b>1.01</b>	55.92	<b>55.92</b>	16
--	--	-2772	<b>-2772</b>	507.5	<b>507.4</b>	1.01	<b>1.01</b>	55.92	<b>55.92</b>	17
--	--	-2785	<b>-2789</b>	495.1	<b>492.4</b>	1.01	<b>1.01</b>	55.92	<b>55.92</b>	18

نلاحظ من الجدول توافق النتائج في جميع نقاط الحالة باستثناء النقاط (3-4-7-12-18) حيث أدى استبدال المبادل الحراري والصمام الخانق في (KCS34) بالموسع ثنائي الطور إلى اختلاف البارامترات عند النقطة (3) مما أدى بدوره إلى سريان الاختلاف في بعض النقاط.

#### 6- الدراسة البارامترية:

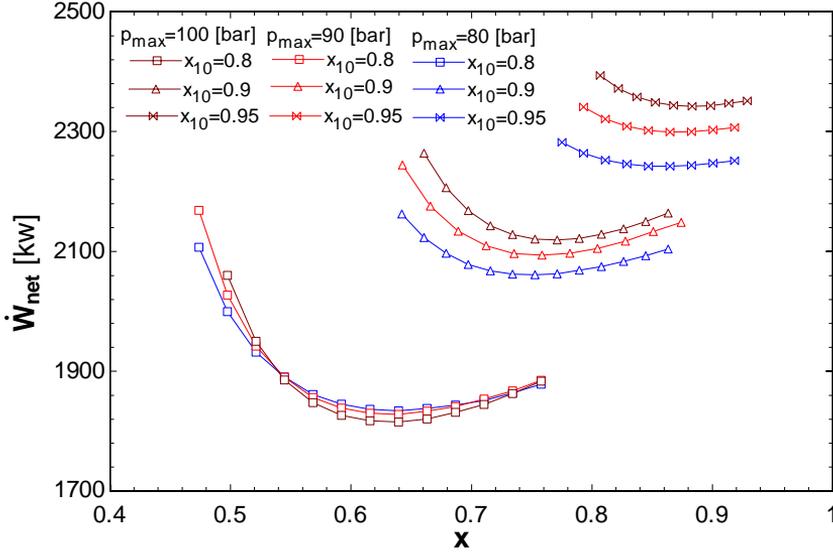
تم تحليل تأثير عدة متغيرات على سلوك الدورة ومجال تأثيرها، بهدف الوصول إلى بارامترات التشغيل الأفضل للدورة من حيث الاستطاعة الكهربائية المولدة، والكفاءة الحرارية للدورة.

هناك أربعة من المتغيرات المستقلة في الدورة والتي تؤثر على أداء النظام بشكل كبير وهي: الضغط الأعظمي للجسم العامل (الضغط عند مدخل التوربين  $p_{max}$ )، تركيز الأمونيا في الخليط الأساسي ( التركيز عند مدخل الفاصل  $x$ )، تركيز الأمونيا في خليط البخار عند مخرج الفاصل (تركيز مدخل التوربين  $x_{10}$ )، الفرق الأدنى في درجات الحرارة ضمن المبخر (the pinch point,  $\Delta t_{8-17}$ )

يعد ضغط الجسم العامل عند مخرج التوربين ( $p_2$ ) معلمة تعتمد على حالة التبريد. لذلك فهو ليس متغيراً مستقلاً في ظل حالة تبريد معينة وتركيز معين للأمونيا ضمن الخليط الأساسي في النظام ( $x$ ).

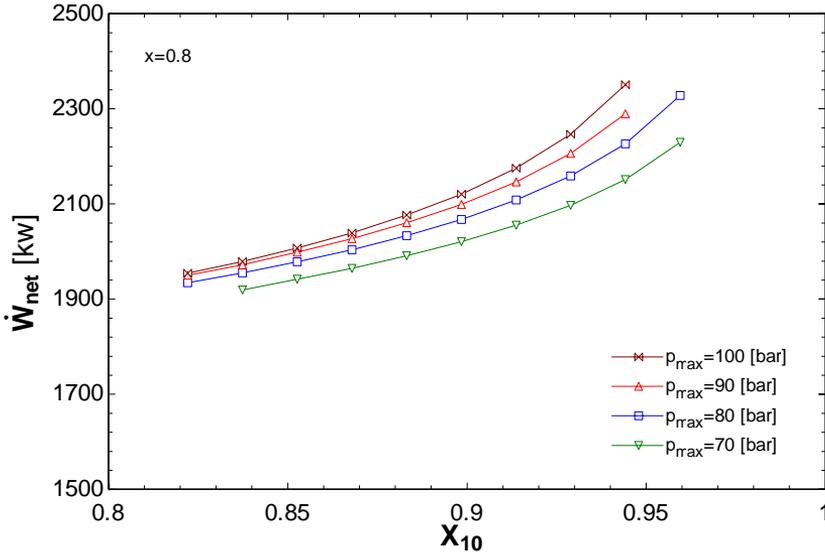
## 1-6 الاستطاعة الصافية:

يعرض الشكل (3) مجموعة من المنحنيات البيانية التي تصف سلوك الاستطاعة الصافية للدورة كتابع للمتغيرات المستقلة الثلاثة الأولى التي ذكرت سابقاً ( $X, X_{10}, p_{max}$ )



الشكل (3) تغيير الاستطاعة الصافية تبعاً لتغير البارامترات ( $x, x_{10}, p_{max}$ )

لوحظ أنه بالنسبة لتركيز أمونيا معين عند مخرج الفاصل ( $x_{10}$ ) تتخفض الاستطاعة الصافية ( $W_{net}$ ) بشكل حاد مع زيادة التركيز في الخليط الأساسي ( $x$ ) لتصل إلى قيمة دنيا ومن ثم تعود لترتفع قليلاً، بينما تستمر الاستطاعة الصافية بالازدياد مع زيادة الضغط الاعظمي في الدورة ( $p_{max}$ )، ومع زيادة تركيز مخرج الفاصل ( $x_{10}$ )، وهذا ما يوضحه أيضاً الشكل (4) عند قيمة معينة لتركيز الخليط الأساسي ( $x=0.8$ ).



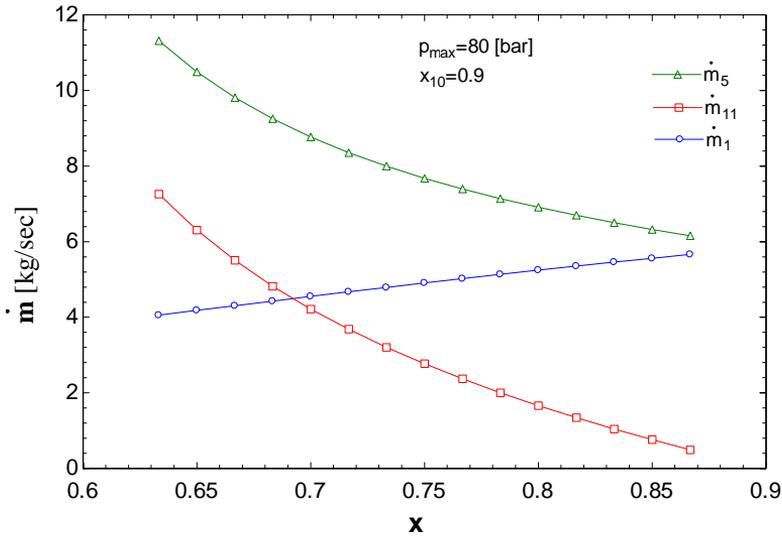
الشكل (4) تغير الاستطاعة الصافية عند  $x=0.8$

ويتبين من الشكل (3) أيضاً أن قيمة  $(x)$  الموافقة للاستطاعة الدنيا عند مختلف الضغوط تزداد بزيادة  $(x_{10})$  ، حيث تزداد قيم تركيز الامونيا ضمن المجالات الصالحة لتركيز الخليط الأساسي في الدورة مع زيادة  $(x_{10})$ ، على سبيل المثال عند الضغط 100 bar وتركيز  $(x_{10}=0.8)$  فإن قيمة تركيز الخليط الأساسي الموافقة لأدنى استطاعة ناتجة هي  $(x=0.63)$  تقريباً، بينما تزداد هذه القيمة إلى  $(x=0.88)$  عند ازدياد تركيز خليط البخار إلى  $(x_{10}=0.95)$ . وتتوافق القيمة القصوى للاستطاعة الصافية في الدورة مع أدنى قيمة لتركيز الخليط الأساسي  $(x)$  ضمن المجال الصالح لعمل الدورة.

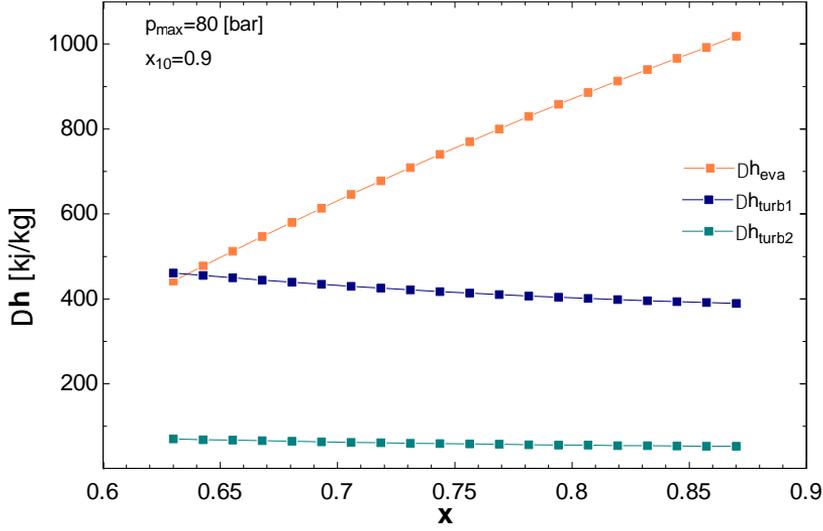
وتجدر الإشارة إلى أن القيم الأدنى لـ  $(x)$  ضمن هذه المجالات مقيدة بدرجة حرارة مخرج الغازات الساخنة ( $t_{18} > 423$  [k]) لمنع ترسب الأحماض على أسطح المبادلات الحرارية عند درجة حرارة أقل.

يعطي الجدول (5) تباين البارامترات المختلفة مثل فرق الانتالبي في المبخر ( $\Delta h_{EVA}$ )، فرق الانتالبي في التوربين البخاري ( $\Delta h_{turb-1}$ )، فرق الانتالبي في الموسع ثنائي الطور ( $\Delta h_{turb-2}$ )، معدلات التدفق الكتلي، الاستطاعة المولدة عبر كل من التوربين البخاري ( $W_{turb-1}$ )، والموسع ثنائي الطور ( $W_{turb-2}$ )، والاستطاعة التي تتطلبها المضخة ( $W_{pump}$ )، والاستطاعة الصافية ( $W_{net}$ )، والكفاءة الحرارية للدورة ( $\eta_{th}$ ) مع اختلاف تركيز الأمونيا في الخليط الأساسي (وذلك عند الضغط  $p_{max}=80$  bar، وتركيز خليط البخار  $x_{10}=0.9$ ).

هذه الاختلافات تم رسمها بيانياً في الشكلين (5)، (6) وبمساعدة هذه البيانات والأرقام، يمكن تفسير الاتجاه التنازلي ثم المتزايد للاستطاعة الصافية.



الشكل (5) تغير التدفقات في الدورة تبعاً لتغير x



الشكل (6) تغير فرق الانتالبي تبعاً لتغير x

الجدول (5) تغير البارامترات المختلفة في الدورة تبعاً لتغير x:

x	$\Delta h_{EVA}$ [kJ/kg]	$\Delta h_{turb-1}$ [kJ/kg]	$\Delta h_{turb-2}$ [kJ/kg]	$QU_9$	$\dot{m}_1$ [kg/s]	$\dot{m}_{11}$ [kg/s]	$\dot{m}_5$ [kg/s]	$W_{turb-1}$ [kw]	$W_{turb-2}$ [kw]	$W_{pump}$ [kw]	$W_{net}$ [kw]
0.65	497.8	451.7	67.8	0.39	4.18	6.30	10.49	1851	419	126.3	2144
0.67	558	442.3	65.41	0.45	4.34	5.26	9.61	1884	337.6	116.5	2105
0.69	616.5	433.6	63.27	0.50	4.51	4.40	8.92	1917	273.4	108.9	2081
0.71	673.3	425.7	61.37	0.55	4.67	3.68	8.35	1948	221.6	102.8	2067
0.73	728.2	418.6	59.7	0.61	4.82	3.05	7.88	1981	178.7	97.9	2062
0.76	781.5	412	58.06	0.66	4.98	2.5	7.48	2012	142.3	93.82	2061
0.78	833.5	406.3	56.62	0.71	5.13	2	7.14	2045	111.2	90.42	2066
0.80	882.9	401.1	55.52	0.77	5.28	1.55	6.83	2076	84.52	87.52	2073
0.82	930.6	396.6	54.42	0.82	5.42	1.14	6.56	2108	60.86	85.04	2084
0.85	977	392.4	53.45	0.87	5.56	0.76	6.32	2139	39.87	82.91	2096

من الجدول (5) والشكلين (5)، (6) نلاحظ أن زيادة تركيز الأمونيا في الخليط الأساسي (x) تؤدي إلى:

- زيادة فرق الانتالبي في المبخر ( $\Delta h_{EVA}$ ).
- انخفاض فرق الانتالبي في كل من التوربين البخاري ( $\Delta h_{turb-1}$ )، والموسع ثنائي الطور ( $\Delta h_{turb-2}$ ) بشكل طفيف.

- زيادة جودة البخار عند مدخل الفاصل (مخرج المبخر) ( $QU_0$ )
- زيادة معدل التدفق الكتلي للبخار عبر التوربين البخاري ( $\dot{m}_1$ ).
- انخفاض معدل التدفق الكتلي للسائل عبر الموسع ثنائي الطور ( $\dot{m}_{11}$ ).
- انخفاض في إجمالي معدل التدفق الكتلي للخليط عبر المضخة ( $\dot{m}_5$ ).

إن زيادة تركيز الأمونيا في الخليط الأساسي تؤدي إلى انخفاض درجة حرارة الاشباع للخليط وبالتالي تزداد ( $\Delta t$ ) في المبخر، كذلك تسبب انتقال كمية أكبر من الحرارة النوعية نتيجة زيادة السعة الحرارية للخليط، وبالتالي يزداد فرق الانتالبي في المبخر ( $\Delta h_{EVA}$ ) مما يؤدي إلى انخفاض معدل التدفق الاجمالي للخليط العامل ( $\dot{m}_5$ ).

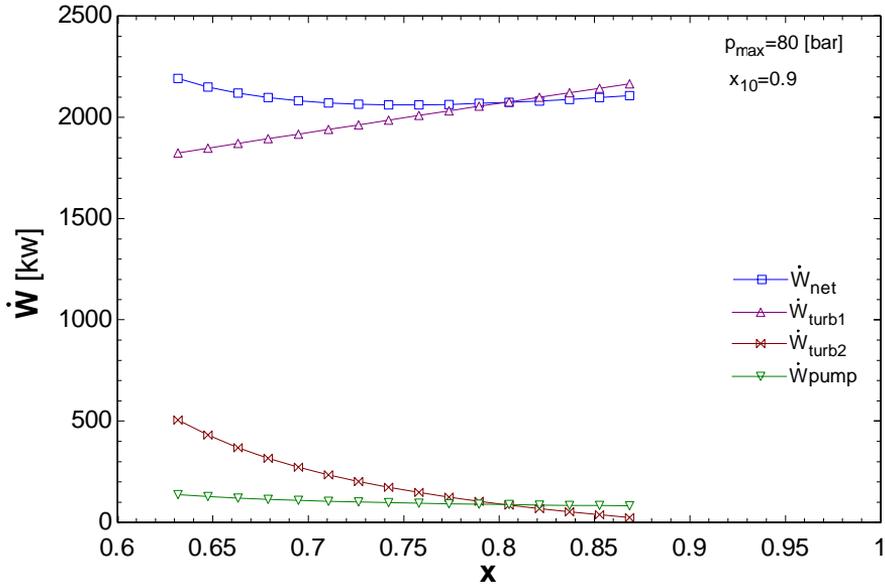
ينخفض فرق الانتالبي في كل من التوربين البخاري والموسع ثنائي الطور نتيجة زيادة ضغط الاشباع في المكثف بزيادة ( $X$ ) (وهو ضغط مخرج التوربينات  $p_2$ ).

على الرغم من أن الانخفاض البسيط في فرق الانتالبي ضمن التوربين البخاري يميل إلى تخفيض استطاعته من جهة، إلا أن الزيادة الحاصلة في معدل التدفق الكتلي للبخار عند مخرج الفاصل والناجمة عن زيادة جودة البخار في مخرج المبخر، تؤدي إلى زيادة استطاعة التوربين البخاري من جهة أخرى، وبالمقابل ينخفض معدل التدفق الكتلي للسائل عبر الموسع ثنائي الطور مؤدياً إلى انخفاض استطاعته.

ويؤدي الانخفاض في معدل التدفق الكتلي الاجمالي للخليط، وزيادة الضغط الأصغري في الدورة بالتالي انخفاض ( $\Delta p$ )، إلى انخفاض الطاقة التي تتطلبها المضخة ( $W_{pump}$ ).

بما أن الاستطاعة الصافية الناتجة تتعلق بالاستطاعة المولدة عبر كل من التوربين البخاري، والموسع ثنائي الطور، وباستطاعة المضخة وفق المعادلة (1).

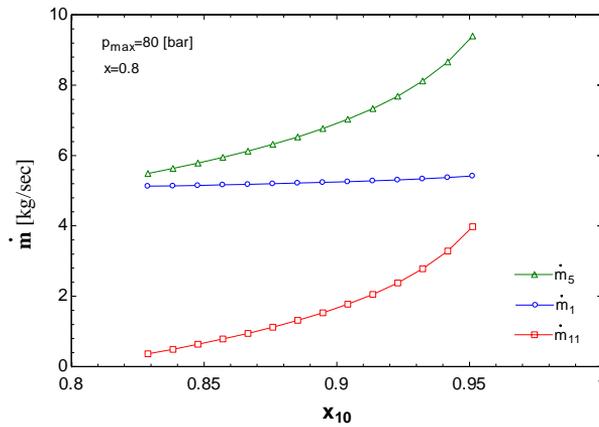
فإنها تتخفف في البداية مع زيادة ( $x$ ) نتيجة الانخفاض الكبير في استطاعة الموسع بالمقارنة مع الزيادة الحاصلة في استطاعة التوربين البخاري، والانخفاض الطفيف في استطاعة المضخة (الشكل 7)، وتستمر الطاقة الصافية بالانخفاض مع زيادة ( $x$ ) إلى أن تصل إلى قيمة دنيا عند ( $x=0.76$ )، وعند تجاوز هذه القيمة فإن الاتجاهات المتزايدة والمتناقصة لفرق الانتالبي والتدفق الكتلي تظل كما هي لكن معدل تغيرها يتناقص، وتأخذ الاستطاعة الصافية بالتزايد ببطء حيث يرجع ذلك بشكل أساسي إلى أن معدل انخفاض التدفق الكتلي عبر الموسع يصبح أقل، ويتضح ذلك بتناقص انحدار هذا المنحني في الشكل (5).



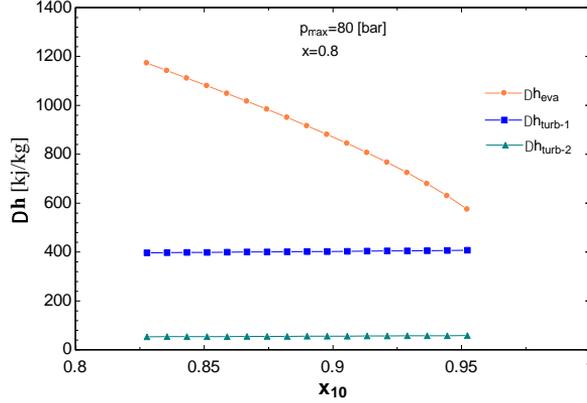
الشكل (7) تغير الاستطاعات في الدورة تبعاً لتغير  $x$

الجدول (6) تغيير البارامترات المختلفة تبعاً لتغير التركيز في خليط البخار :

$x_{10}$	$\Delta h_{EVA}$ [kJ/kg]	$\Delta h_{turb-1}$ [kJ/kg]	$\Delta h_{turb-2}$ [kJ/kg]	$QU_9$	$\dot{m}_1$ [kg/s]	$\dot{m}_{11}$ [kg/s]	$\dot{m}_5$ [kg/s]	$W_{turb-1}$ [kw]	$W_{turb-2}$ [kw]	$W_{pump}$ [kw]	$W_{net}$ [kw]
0.83	1164	397.2	53.29	0.93	5.12	0.37	5.50	1996	19.76	70.3	1946
0.845	1105	398.3	53.89	0.89	5.14	0.59	5.74	2009	31.34	73.29	1967
0.86	1044	399.2	54.35	0.86	5.16	0.83	6.00	2022	44.36	76.63	1990
0.875	981.4	400.3	54.88	0.82	5.19	1.10	6.29	2038	59.38	80.42	2017
0.89	916.2	401.6	55.44	0.78	5.22	1.41	6.64	2056	77.09	84.81	2048
0.905	847.2	402.9	55.96	0.74	5.25	1.79	7.05	2076	98.52	90.07	2085
0.92	772.6	404.1	56.56	0.7	5.29	2.27	7.56	2099	125.9	96.64	2128
0.935	689.2	405.4	57.35	0.64	5.34	2.90	8.25	2125	163.5	105.4	2183
0.95	591.2	406.7	58.04	0.58	5.41	3.87	9.28	2157	220.5	118.6	2259



الشكل (8) تغيير التدفقات في الدورة تبعاً لتغير التركيز في خليط البخار



الشكل (9) تغير فرق الانتالبي تبعاً لتغير التركيز في خليط البخار

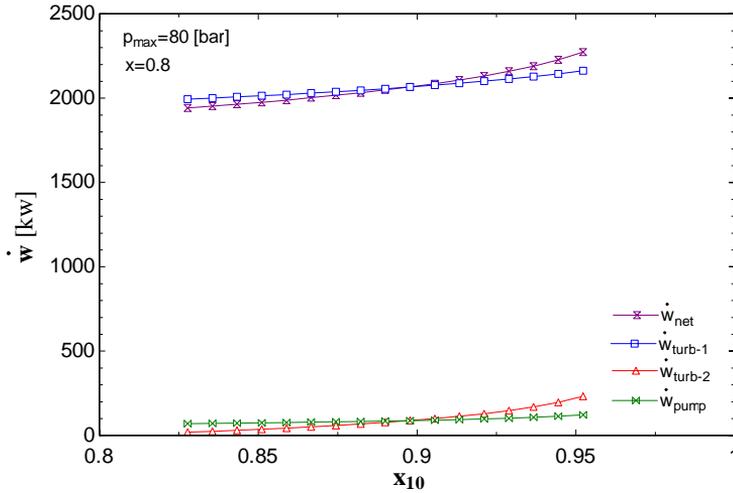
ويبين الجدول (6) أيضاً تباين البارامترات المختلفة مع زيادة تركيز الأمونيا في خليط البخار عند مخرج الفاصل ( $x_{10}$ ) (كذلك عند الضغط  $p_{max}=80$  bar، وتركيز الخليط الأساسي  $x=0.8$ )، وهو موضح بيانياً في الشكلين (8)، (9)، ومنها نجد أن زيادة ( $x_{10}$ ) تحت ضغط ثابت تؤدي إلى:

- انخفاض درجة الحرارة في منطقة الفاصل، وبالتالي تتناقص جودة البخار عند مخرج المبخر ( $\downarrow Q_{U_0}$ ).
- انخفاض فرق الانتالبي في المبخر ( $\downarrow \Delta h_{EVA}$ ). الناتج عن انخفاض درجة حرارة الفاصل (أي انخفاض  $\Delta t$  في المبخر).
- زيادة معدل التدفق الاجمالي للخليط العامل ( $\uparrow \dot{m}_5$ ) الناتج عن انخفاض فرق الانتالبي في المبخر.
- زيادة معدل التدفق الكتلي للسائل عبر الموسع ثنائي الطور ( $\uparrow \dot{m}_{11}$ ) نتيجة انخفاض جودة البخار عند مدخل الفاصل.
- ازدياد استطاعة المضخة نتيجة الزيادة في معدل التدفق الاجمالي للخليط العامل.

إن انخفاض جودة البخار عند مدخل الفاصل يعمل على تقليل التدفق الكتلي للبخار عند مخرج الفاصل ( $\dot{m}_1$ ) من جهة، لكن بالمقابل فإن الزيادة الكبيرة في معدل التدفق الإجمالي للخليط العامل ضمن المبخر تعمل على إنتاج المزيد من البخار من جهة أخرى، لذلك نرى أن ( $\dot{m}_1$ ) تزداد بشكل طفيف جداً.

تزداد أيضاً استطاعة التوربين البخاري بشكل طفيف نتيجة الزيادة الطفيفة في كل من التدفق الكتلي للبخار ( $\dot{m}_1$ )، وفرق الانتالبي ضمن التوربين البخاري  $(\Delta h_{turb-1})$ .

تزداد استطاعة الموسع ثنائي الطور بشكل أساسي بسبب ازدياد معدل التدفق الكتلي للسائل عبره ( $\dot{m}_{11}$ ).



الشكل (10) تغير الاستطاعات في الدورة تبعاً لتغير  $x_{10}$

ونلاحظ من الشكل (10) أنه عند زيادة تركيز خليط البخار تزداد الاستطاعة الصافية الناتجة ببطء حيث تكون الاستطاعة التي تتطلبها المضخة أكبر من استطاعة الموسع ثنائي الطور. وبعد تجاوز قيمة معينة تصبح عندها استطاعة

الموسع أكبر من استطاعة المضخة، وتزداد استطاعة الموسع وبالتالي الاستطاعة الصافية بمعدل أعلى.

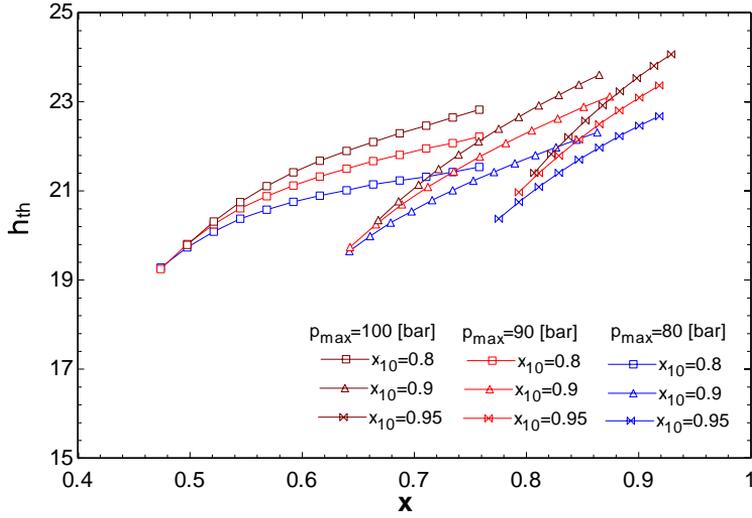
اتفق أغلب الباحثين الذين حللو دورة كاليينا لأنظمة درجة الحرارة المنخفضة والمرتفعة بالنسبة لمصادر حرارية مختلفة الشروط [8,9,12,21] على أن زيادة كل من الضغط و تركيز الأمونيا عند مدخل التوربين تؤدي إلى زيادة في الاستطاعة الكهربائية الصافية .

وأنه عند بارامترات محددة لمنطقة الفاصل يمكن تحديد تركيز الخليط الأساسي الذي ينتج أقصى قدر من الاستطاعة الصافية، إلا أن منحنى تغير الاستطاعة مع تغير التركيز في الأنظمة المدروسة يأخذ شكلاً تصاعدياً في البداية مع زيادة التركيز حتى الوصول إلى قيمة قصوى ثم يتنازل من جديد.

مما يبين الأثر الكبير للتغير المقترح في هذه الدورة (استبدال الصمام الخانق ومبادل الحرارة العالية بموسع ثنائي الطور) على سلوك الاستطاعة الصافية في الدورة تبعاً لتغير البارامترات المؤثرة.

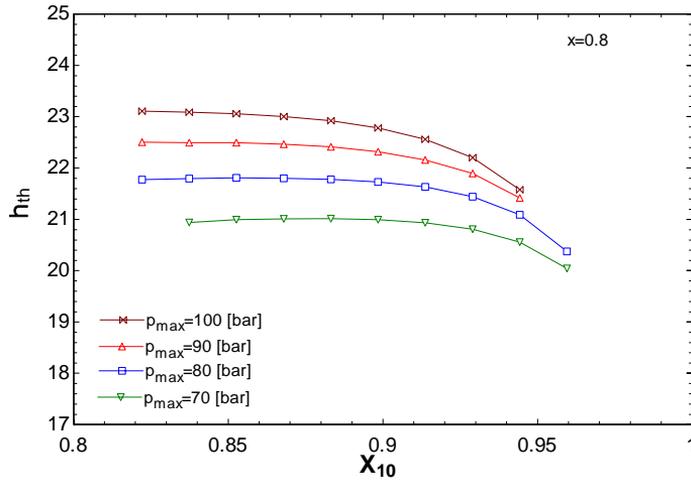
## 2-6 الكفاءة الحرارية:

يوضح الشكل (11) تغير الكفاءة الحرارية للدورة بتغير البارامترات المختلفة ( $X, X_{10}, P_{max}$ )



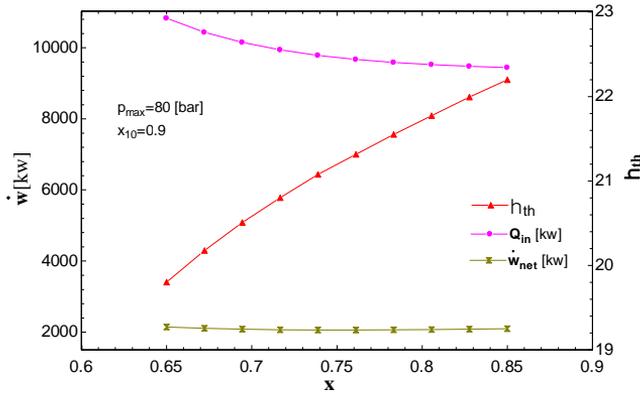
الشكل (11) تغير الكفاءة الحرارية للدورة بتغير البارامترات المختلفة  $(x, x_{10}, p_{max})$

حيث نلاحظ أنه عند قيمة معينة لتركيز خليط البخار  $(x_{10})$  تزداد الكفاءة الحرارية للدورة مع زيادة كل من تركيز الخليط الأساسي  $(x)$ ، وضغط مدخل التوربين  $(p_{max})$ ، بينما تنخفض الكفاءة الحرارية للدورة مع زيادة تركيز خليط البخار عند قيمة معينة لتركيز الخليط الأساسي، يتضح ذلك أيضاً في الشكل (12).



الشكل (12) تغير الكفاءة الحرارية تبعاً لتغير  $x_{10}$  عند  $x=0.8$

نلاحظ من الشكل (13) أنه بزيادة تركيز الخليط الأساسي ( $x$ ) فإن المدخلات الحرارية في الدورة تتناقص بمعدل عال مقارنة بالتغيرات الحاصلة في الاستطاعة الصافية التي تنتجها الدورة وبالتالي فإن الكفاءة الحرارية للدورة تتخفض مع زيادة قيمة ( $x$ ). ويعزى انخفاض المدخلات الحرارية إلى أن الطاقة التي يحتاجها الموفر للوصول إلى درجة حرارة الاشباع تتخفض بشكل كبير، حيث أن زيادة ( $x$ ) تؤدي إلى انخفاض كل من التدفق الاجمالي للخليط العامل ( $\dot{m}_5$ )، وفرق الانتالبي في الموفر ( $\Delta h_{Eco}$ )، نتيجة انخفاض ( $\Delta t_{Eco}$ ).

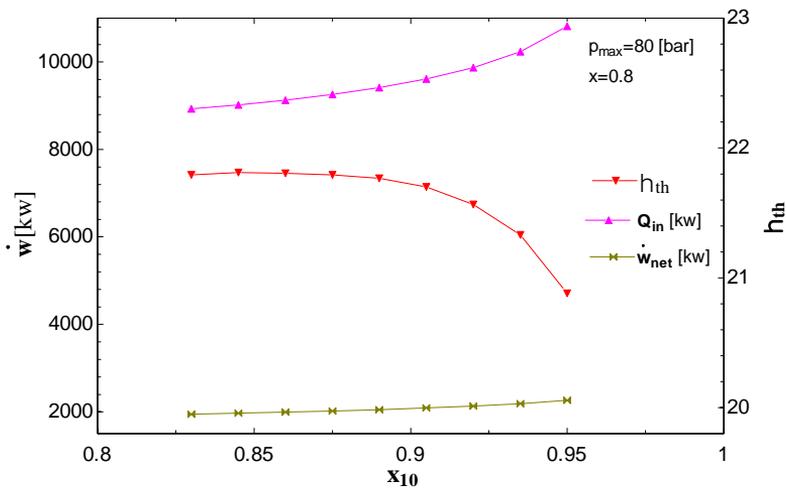


الشكل (13) تغير كل من الكفاءة والمدخلات الحرارية والاستطاعة الصافية تبعاً لتغير ( $x$ )

عند ازدياد تركيز خليط البخار ( $x_{10}$ ) تزداد المدخلات الحرارية في الدورة بمعدل عالي بالنسبة للزيادة الحاصلة في الاستطاعة الصافية مما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة الحرارية للدورة، ويتضح ذلك في الشكل (14).

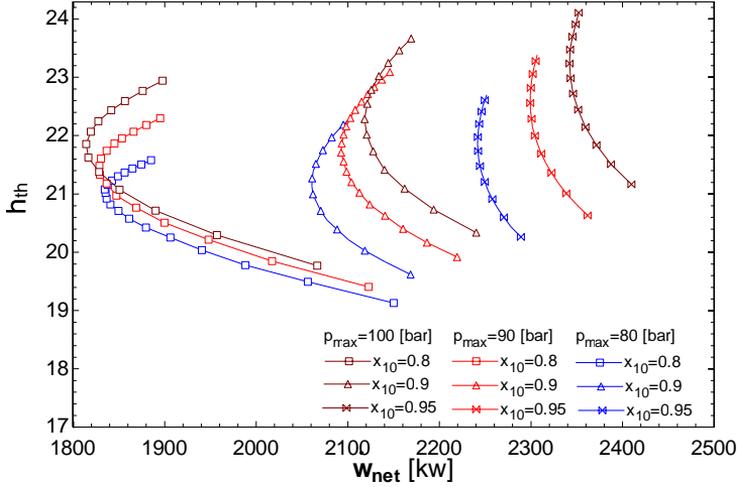
وترجع هذه الزيادة في المدخلات الحرارية إلى زيادة الطاقة الحرارية التي يستهلكها الموفر نتيجة الزيادة في ( $\Delta t_{Eco}$ ) حيث تتخفض درجة حرارة الفاصل مع زيادة ( $x_{10}$ ) مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة الخليط عند مدخل الموفر.

بالمقارنة مع ما توصل إليه الباحثون [8,9,21] عند تحليل دورة كالينا(KCS34) مع المحاليل الملحية الأرضية كمصدر حراري، حيث توصلو إلى أن الكفاءة الحرارية تزداد بزيادة ضغط مدخل التوربين، كذلك تزداد الكفاءة الحرارية بازدياد درجة حرارة الفاصل (عند تراكيز ثابتة للأمونيا في كل من الخليط الاساسي وخليط البخار وذلك نتيجة زيادة الضغط)، وهذا يتوافق مع ما توصلنا إليه عند زيادة تركيز خليط البخار تحت ضغط ثابت (بالتالي انخفاض حرارة الفاصل وانخفاض الكفاءة الحرارية).



الشكل (14) تغير كل من الكفاءة والمدخلات الحرارية والاستطاعة الصافية تبعاً لتغير ( $X_{10}$ )

يتبين مما سبق أن سلوك تغير الكفاءة الحرارية للدورة تبعاً للبارامترات المختلفة يختلف عن تغير الاستطاعة الصافية التي تنتجها الدورة، ويمكن معاينة هذا الاختلاف من الشكل (15)، حيث يظهر تغير كل من الاستطاعة الصافية والكفاءة الحرارية للدورة مع تغير تركيز الخليط الأساسي، عند قيم مختلفة لتركيز خليط البخار وضغط مدخل التوربين.



الشكل (15) تغير الاستطاعة الصافية والكفاءة الحرارية تبعاً لتغير البارامترات ( $X, X_{10}, P_{max}$ )

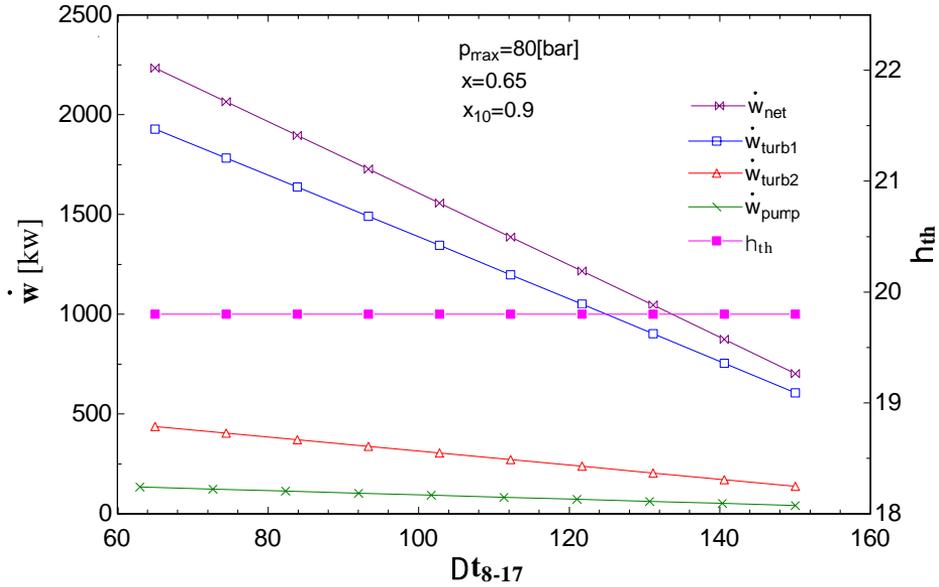
تراوحت الكفاءة الحرارية للدورة عند مختلف الشروط بين (19-24%) تقريباً، بينما اختلفت مجالات تغير الاستطاعة الصافية تبعاً لتغير شروط العمل (خصوصاً في منطقة الفاصل).

ويتبين أنه عند شروط محددة لمنطقة الفاصل (تركيز وضغط) يختلف تركيز  $x$  الموافق لتحقيق الكفاءة القصوى عنها لتحقيق الاستطاعة القصوى. وهذا مماثل لما توصل إليه [8,22]، إذ يمكن تحقيق أقصى استطاعة عند القيم المنخفضة لـ  $x$  إلا أنها تقابل الكفاءة الأدنى للدورة.

بالمقابل فإن قيم ( $x$ ) التي تحقق الكفاءة القصوى تعطي قيم متوسطة تقريباً من الاستطاعة الصافية التي يمكن تحقيقها عند شروط محددة لضغط وتركيز خليط البخار.

### 3-6 تأثير فرق درجات الحرارة في المبخر:

ويوضح الشكل (16) تأثير الفرق الأدنى في درجات الحرارة ضمن المبخر (فرق درجات الحرارة بين النقطة 17 والنقطة 8) على الاستطاعة الصافية في الدورة، واستطاعة كل من التوربين البخاري، والموسع ثنائي الطور، والمضخة.



الشكل (16) تغير الاستطاعات في الدورة تبعاً لتغير  $\Delta t_{8-17}$

نجد من الشكل أن جميع الاستطاعات تتخفف مع زيادة  $\Delta t_{8-17}$  حيث تتخفف جميع التدفقات ضمن الدورة بسبب انخفاض المدخلات الحرارية، وهذا يتوافق مع [12,16]، ونلاحظ أن الكفاءة الحرارية تبقى ثابتة نتيجة انخفاض كل من الاستطاعة الصافية والمدخلات الحرارية في الدورة بمعدل ثابت.

### 7- التحسين:

بعد إجراء النمذجة الترموديناميكية والتحليل البارامتري تم إجراء التحسين باستخدام الخوارزمية الجينية المتاحة في برنامج EES، وقد تم إدراج المتغيرات المختارة للتحسين

ومجالات تغييرها في الجدول (7)، يهدف هذا التحسين إلى الحصول على أقصى استطاعة كهربائية يمكن للدورة تحقيقها تحت ظروف التشغيل في معمل اسمنت طرطوس، وتحديد بارامترات التشغيل الموافقة لهذه الاستطاعة.

الجدول (7) متغيرات عملية التحسين ونتائجها:

المتغير	أدنى قيمة	أعلى قيمة	$\max \dot{W}_{net}$
$p_{max}$	80 [bar]	100 [bar]	100 [bar]
X	0.7	0.95	0.93
$X_{10}$	0.8	0.99	0.96
$\Delta t_{8-17}$	20	80	50
$\eta_{th}=23.89\%$		$\max \dot{W}_{net}=2724$ [kW]	

وقد توصل الباحثون [16] نتيجة التحسين في بارامترات الدورة (KCS34) بالنسبة لمعمل اسمنت ذو قدرة إنتاجية تبلغ 2100 طن من الكلنكر يومياً، ودرجة حرارة الغازات  $390^{\circ}\text{C}$ ، ومياه التبريد  $22^{\circ}\text{C}$ ، إلى استطاعة صافية عظمى تبلغ  $2429$  [kW]، عند تركيز أمونيا في الخليط الأساسي قدره  $x=0.89$ ، و  $x_{10}=0.968$  بكفاءة حرارية قدرها  $23.3\%$ .

بينما وصلت أقصى استطاعة في نظام (KCS1) لغازات معمل اسمنت بقدرة 3500 طن يومياً من الكلنكر ودرجة حرارة  $310^{\circ}\text{C}$  إلى  $2776$ [kW] بكفاءة حرارية  $20.2\%$ .

ولا تعتبر هذه القيمة من الاستطاعة الناتجة عالية بالمقارنة مع ناتج الدورة المقترحة، إذ بالنسبة للإنتاجية العالية لهذا المصنع والتدفق الكبير لغازات العادم فيه ( $88$  [kg/s]) فمن المتوقع أن تحقق الدورة المقترحة قيمة استطاعة صافية أعلى من ذلك بكثير.

## 8- الاستنتاجات والتوصيات:

عند تقييم الاستطاعة الصافية والكفاءة الحرارية بالنسبة للمتغيرات المستقلة الأربعة وتحليل اتجاهات التباين يتضح مايلي:

- بالنسبة لبارامترات محددة في منطقة الفاصل ( $p_{max, X_{10}}$ ) يوجد قيمة معينة لتركيز الخليط الأساسي تكون عندها الاستطاعة الصافية أقل ما يمكن، بينما تتوافق أقصى قيمة للاستطاعة الصافية مع أدنى قيمة لتركيز الخليط الأساسي ( $X$ ) ضمن المجال المتاح.
- تزداد قيمة ( $X$ ) التي تحقق أدنى استطاعة، أو أقصى استطاعة مع زيادة تركيز خليط البخار ( $X_{10}$ )
- تزداد الكفاءة الحرارية للدورة مع زيادة تركيز الخليط الأساسي، بينما تتخفض الكفاءة الحرارية للدورة بزيادة تركيز خليط البخار (عند قيم معينة لبارامترات الفاصل).
- تزداد الاستطاعة الصافية للدورة بزيادة تركيز خليط البخار عند مخرج الفاصل ( $X_{10}$ ).
- تزداد كل من الاستطاعة الصافية والكفاءة الحرارية بزيادة الضغط الاعظمي في الدورة ضمن مجالات البارامترات المدروسة.
- لا تؤدي كفاءة الدورة القصوى بالضرورة إلى ظروف التشغيل الأفضل للنظام.
- تؤثر بارامترات الفاصل على أداء الدورة الحراري بشكل كبير.
- يمكن تحقيق أعلى ناتج من الطاقة الكهربائية لهذا النظام إذا تم تطبيقه في معمل اسمنت طرطوس باستخدام خليط أساسي بتركيز أمونيا %89، وضغط أعظمي قدره [bar] 100، وتركيز خليط البخار %96.

- بالإضافة إلى غازات عادم التسخين المسبق في مصنع الاسمنت، يعتبر هواء تبريد الكلنكر أيضاً من المصادر الحرارية الرئيسية لأنظمة استعادة الحرارة، ومن الممكن استخدامه في زيادة نجاعة عمل الدورة.
- تستطيع هذه الدورة إنتاج استطاعة أكبر بكثير من الاستطاعة المذكورة في حال تم معالجة غازات العادم لمنع ترسب الاحماض، أو باستخدامها لتطبيقات استعادة الحرارة المهدورة من مصادر حرارية غير غازات الاحتراق.

### المراجع العلمية

- [1] MIROLLI M.D, 2005- The Kalina cycle for cement kiln waste heat recovery power plants, IEEE Cement Industry Technical Conference Record, pp. 330-336.

- [2] LOLOS A, ROGDAKIS D, 2009- A Kalina power cycle driven by renewable energy sources, Energy, vol. 34, pp. 457-464.
- [3] OGRISECK S, 2009- Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant a case study, Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 2843-2848.
- [4] SHANKAR N, SRINIVAS T, 2012- Design and modeling of low temperature solar thermal power station, Applied energy, vol. 9, No. 1, pp. 180 – 187.
- [5] LIN D, ZHU Q, 2015- Thermodynamic Comparative Analyses between (organic) Rankine Cycle and Kalina Cycle, Energy Procedia, 75, 1618–1623.
- [6] WANG Y, TANG Q, WANG M, FENG X, 2017- Thermodynamic performance comparison between ORC and Kalina cycles for multi-stream waste heat recovery, Energy Conversion and Management, 143, 482–492.
- [7] HUA J, LI G, CHEN Y, ZHAO X, 2015- Optimization of thermal parameters of boiler in triple-pressure Kalina cycle for waste heat recovery. Applied Thermal Engineering, 91, 1026–1031.
- [8] GUPTA A, DEEPAK K, SRINIVAS T, VENKAT S, 2014- Thermodynamic modelling and analysis of low temperature Kalina cycle system for geothermal sources of India, International Conference on Heat Transfer, HEFAT2014, Orlando, Florida.
- [9] GUPTA A, DEEPAK K, 2016- modeling and analysis of low temperature Kalina cycle system, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Issue 2, 35-39.
- [10] WANG J, DAI Y, GAO L, 2009- Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, Applied Energy, v 86, 941-948.

- [11] MAYRA a, FELIPE A, 2018- KCS34 evaluation for WHR in cement industry, International Journal of Advanced Engineering Research and Science, v5, 190-196.
- [12] ELVIRO J, FELIPE A, GUSTAVO H, LUIZ M, 2016- análise e otimização termoeconômica do ciclo Kalina kcs1 para a recuperação de calor residual em uma fábrica de cimento, CILAMCE , CEP 30535-901, Minas Gerais, Brasil.
- [13] HE J, LIU C, XU X, LI Y, WU S, XU J, 2014- Performance research on modified KCS (Kalina cycle system) 11 without throttle valve, Energy, 64, 389–397.
- [14] SHOKATI N, RANJBAR F, YARI M, 2015- Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. Renewable Energy, 83, 527–542.
- [15] ELLER T, HEBERLE F, BRÜGGEMANN D, 2017- Second law analysis of novel working fluid pairs for waste heat recovery by the Kalina cycle. Energy, 119, 188–198.
- [16] ELVIRO J, FELIPE A, MAYRA A, 2019- Assessment of a kalina cycle for waste heat recovery in the cement industry, Applied Thermal Engineering, vol(147), 421-437.
- [17] SIRKO O, 2009- integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study, Applied Thermal Engineering, v29, 2843-2848.
- [18] Klein A, 2010- Engineering Equation Solver (EES), McGraw-Hill.
- [19] PAPADOPOULOS AI, STIJEPOVIC M, LINKE P, 2010- On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. Appl Therm Eng, 30, 760-769.
- [20] KYOUNG K, HYUNG K, CHUL H, 2020- exergy analysis of Kalina and Kalina flash cycles driven by renewable energy, applied science, 10, 1813-1829.

- [21] Kolar D, 2018- Thermodynamic analysis of Kalina cycle configurations for utilisation of geothermal energy, Progress in Industrial Ecology – An International Journal, Vol 12, 164–179.
- [22] GANESH N, SRINIVAS T, 2012- Design and modeling of low temperature solar thermal power station, Applied Energy, 91, 180–186.
- [23] SANTOS B. 2011- Cement industry in Brazil: origins, consolidation and internationalization, Uberlândia, v 23, p 77-94 .

