مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (41) العدد (2) 2019
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (41) No. (2) 2019

Analysis of Exergy Losses in Refrigeration and Heat Cycles

Dr. Atef Amer*

(Received 14 / 2 / 2019. Accepted 4 / 4 / 2019)

□ ABSTRACT □

The main objectives of this research is to put together a general method in calculating exergy losses in each component in either heat or refrigeration cycles. The exergy will specify the worst component in the cycle. Based on flow chart that we have obtained from these matrices, we have been able to obtain the exergy losses. We have verified the flow chart by using a simplified refrigeration cycle and showed the effect of different parameters on exergy in each component. This method mentioned above is effective especially when we analyze the exergy losses in refrigeration and heating cycles with many components.

Keywords: Exergy, Exergy losses, Flow chart, Algorithms, refrigeration cycle, Cycles.

* **Associate Professor، Department of Power Engineering، Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University**

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (41) العدد (2) 2019
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (41) No. (2) 2019

تحليل الإكسرجي الضائع في الدورات التبريدية والحرارية

د. عاطف عامر*

(تاريخ الإيداع 14 / 2 / 2019. قُبِل للنشر في 4/ 4 / 2019)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث وضع طريقة سريعة وسهلة تعتمد أسلوب المصفوفات في حساب وتحليل الإكسرجي الضائع في كل عنصر من عناصر الدورات التبريدية أو الحرارية، وتحديد العناصر ذات الهدر الأكبر. تتألف عناصر هذه المصفوفات من الطاقات الداخلة والخارجة من كل عنصر من عناصر الدورة. تم وضع مخطط عام لحساب الإكسرجي الضائع باستخدام الخوارزميات بالاعتماد على معطيات المصفوفات، وتم التحقق من صحة هذه الطريقة من خلال مثال تطبيقي على دورة تبريدية بسيطة وتأثير تغيير بارامترات الدورة على الإكسرجي الضائع في العناصر. يبين البحث أن طريقة المصفوفات في حساب الإكسرجي الضائع هي طريقة فعالة وخصوصاً عند دراسة الدورات التبريدية والحرارية المؤلفة من عدد كبير من العناصر.

الكلمات المفتاحية: الإكسرجي، الإكسرجي الضائع، المصفوفات، الخوارزميات، دورة تبريدية، دورة حرارية، دورات.

* أستاذ مساعد– قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق– سورية

مقدمة

يستخدم في الوقت الحالي مفهوم معامل الأداء (COP) لتقييم فعالية دارات التبريد، وهو يعطينا فكرة عامة عن أداء دارة التبريد ولا يمكن من خلاله تقييم أداء كل عنصر من عناصر دارة التبريد والدارة ككل.

تقدر الكفاءة بنسبة الطاقة المفيدة إلى الطاقة المصروفة في النظام، ولكن مفهوم الكفاءة هذا لا يستطيع الإجابة عن التساؤل التالي: "هل يمكن أن نستفيد أكثر من الطاقة المصروفة على هذه الأنظمة؟".

تستخدم معادلةالإكسرجي Exergy في معرفة الطاقة الأعظمية التي يمكن استجرارها من المصدر الحراري.

يعرف الإكسرجي بالطاقة المتوفرة (availability) أو العمل النظري الأعظمي $\left(\dot{W}_{\text{rev}}\right)$ الذي يمكن الحصول عليه عندما يصل النظام المدروس إلى التوازن الحراري والميكانيكي مع الوسط المحيط. تعرف الحالة التي يصل النظام فيها إلى التوازن مع الوسط المحيط بالحالة الميتة Dead State للنظام، حيث تستنفذ كل الطاقة الموجودة ضمن النظام.

يزودنا التحليل من خلال مفهوم الإكسرجي (مردود القانون الثاني في الترموديناميك) بأداة نافعة في المحاكاة والتحليل الترموديناميكي لأنظمة الطاقة، وبكلمات أخرى: تلقى الإكسرجي في الآونة الأخيرة استخدامات واسعة في تصميم ومحاكاة وتقييم أنظمة الطاقة، سواء كانت مستهلكة للطاقة أو منتجة لها.

تم عرض التشابه بين الطاقة والإكسرجي، وبين الطاقة والبيئة، وبين الطاقة والتطور المستدام، وعرض مفهوم الإكسرجي وكيفية استخدامه في المجالات التالية:

1) في تصميم وتحليل أنظمة الطاقة باستخدام مبادئ حفظ الطاقة والكتلة مع القانون الثاني في الترموديناميك.
2) تقنية مناسبة للتسريع في الوصول إلى منابع الطاقة من حيث إمكانيتها وتوضعها ونوعيتها.
3) اكتشاف فيما إذا كان بالإمكان تصميم أنظمة طاقة أكثر فعالية من خلال تقليل ضياعات الطاقة المطروحة من النظام.

يمكن تطبيق طريقة التحليل الترموديناميكي من خلال الاكسيرجي في المحطات الحرارية ومحطات الطاقة ومحطات التبريد والتكييف. وعلى عكس الطريقة التقليدية في التحليل الترموديناميكي، فإن التحليل من خلال الاكسيرجي يأخذ بعين الاعتبار نوعية وكمية تدفق الطاقة، وغالبا ما تكون نوعية الطاقة ذات أهمية أكبر من حيث المواصفات بالمقارنة مع كمية الطاقة في التحليل الطاقي للنظام.

يسمح استخدام الإكسرجي باختيار المعيار المناسب من أجل تحليل واختبار الحلول المثلى للنظام [1، 2، 3، 4].

أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية البحث في وضع دراسة تحليلية لدارة تبريد انضغاطية مبسطة باستخدام التحليل الترموديناميكي من خلال الاكسيرجي وذلك بهدف تحديد العنصر الذي يحصل فيه أكبر قيمة للضياعات من أجل الوصول لنظام العمل الأمثل.

طرائق البحث ومواده

تم إجراء دراسة مرجعية عن مفهوم الاكسيرجي واستخداماته في تحليل دارات التبريد. ومن أجل الوصول إلى هدف البحث تم اتباع الخطوات التالية:

-وضع المعادلات اللازمة لحساب تغير الاكسيرجي.

-وضع خوارزمية لحساب الاكسيرجي الضائع

-استخدام برنامج ***REFPROP-NIST*** لحساب دارة التبريد.

-برمجة خوارزمية حساب الاكسيرجي الضائع باستخدام برنامج C++.

-الحصول على مخططات خوارزمية لحساب الاكسيرجي لعناصر الدارة، والدارة ككل.

الطريقة التقليدية في حساب الإكسرجي الضائع:

الاكسرجي في جميع المراجع تحدد قيمة الاكسرجي بطريقة واحدة في إيجاد التغير في الإكسرجي أو الإكسرجي الضائع [1، 2، 3]. ونبدأ من أجل حساب الاكسيرجي الضائع ($\dot{X}_{des}$) بتحديد إكسرجي الدخول $\dot{X}_{in}$ والخروج $\dot{X}_{out}$ للأنظمة المفتوحة في الحالة المستقرة والتي تعطى بالعلاقة:

$$\dot{X}_{out} - \dot{X}_{in} = \dot{X}_{des}$$

$$\dot{X} = \dot{m}\Delta\psi \qquad [\mathrm{kW}] \tag{1}$$

$$\Delta\psi = \psi_{\mathrm{out}} - \psi_{\mathrm{in}} \qquad [\mathrm{kJ/kg}]$$

حيث:

$$\Delta\psi = (h - h_o) - T_o (s - s_o)$$

حيث:

$(h - h_o)$: المحتوى الطاقي الأعظمي للنظام من الحالة الابتدائية إلى الحالة الميتة، وتسمى بالطاقة المحركة.

$T_o (s - s_o)$: الضياعات ضمن النظام من الحالة الابتدائية إلى الحالة الميتة، تسمى بالطاقة الضائعة أو العمليات غير العكوسة.

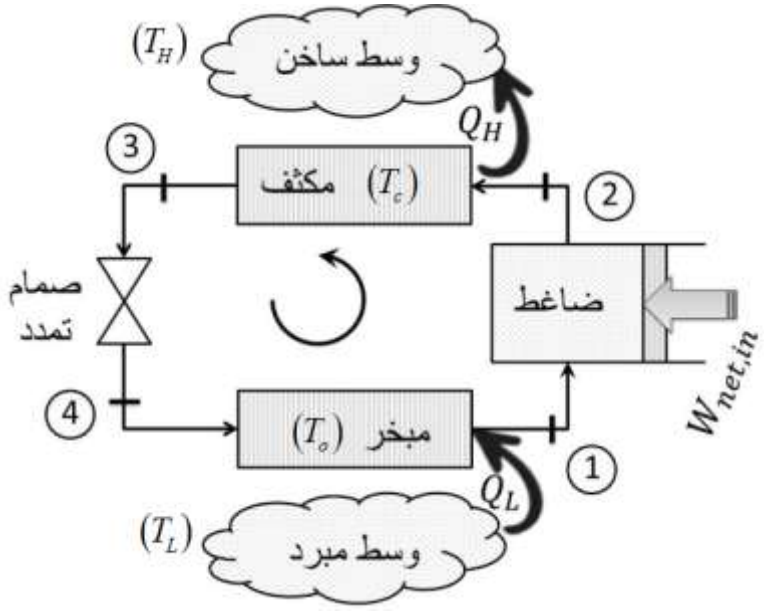
من أجل وضع خوارزمية لإيجاد الإكسرجي الضائع، يجب تحديد عناصر مصفوفة الطاقة، وذلك من خلال تحديد إكسرجي الدخول والخروج في الحالة المستقرة (تغير إكسرجي التدفق الكتلي للعنصر). هذه الطريقة في حساب الإكسرجي الضائع طويلة، وتعتمد على الكثير من الحسابات وبشكل خاص عندما تكون الدورة المدروسة تحتوي على الكثير من العناصر، ولمعالجة هذه المشكلة سنقوم بوضع خوارزمية لحساب الإكسرجي الضائع في كل عنصر أو في الدورة ككل بحيث يمكن تحويل هذه الخوارزمية بواسطة أي لغة برمجة إلى برنامج لحساب الإكسرجي. تتألف هذه الطريقة من الخطوات التالية:

1) إيجاد المصفوفة الواحدية ومصفوفة عناصر الطاقة لكل عنصر ضمن النظام المدروس.
2) تطبيق الخوارزمية المنشودة التي تقوم على حساب الإكسرجي الضائع.
3) تحديد العنصر الأكثر هدراً في الطاقة ضمن الدورة ووضع طرق لمعالجة هذا الهدر Waste.

إيجاد المصفوفة الواحدية ومصفوفة عناصر الطاقة:

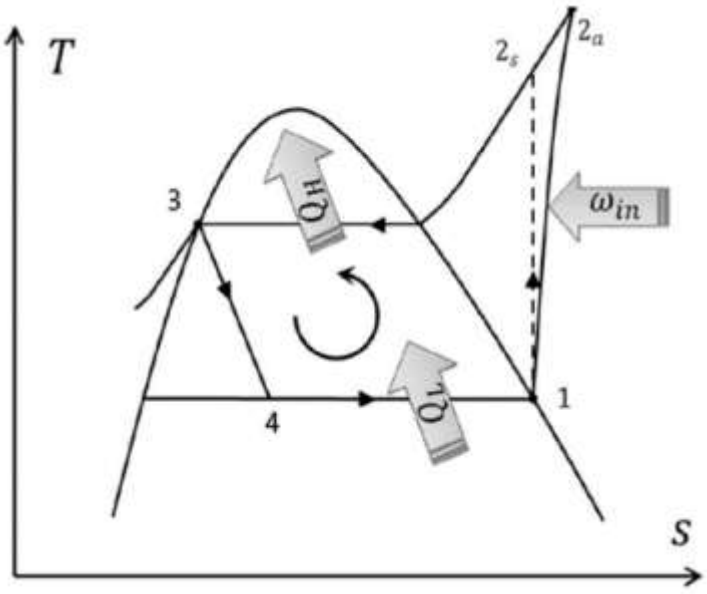
يتألف أي نظام تبريدي أو حراري من مجموعة من العناصر (I) يحدث في كل منها تبادل طاقي (طاقة داخلة أو خارجة).

نقوم أولاً بإنشاء مصفوفة عناصر الطاقة $\{[e]_{(I,J)}\}$، حيث يمثل الرمز (I) سطر المصفوفة ويعبر عن القيم الطاقية لأحد عناصر الدورة المدروسة، ويمثل الرمز (J) عمود المصفوفة ، ويعبر عن مكونات الدارة المدروسة.



الشكل (1) دورة تبريدية بسيطة.

بفرض أنه لدينا دورة تبريدية بسيطة تعمل على وسيط التبريد فريون $(134A)$ كما في الشكل(1). تتألف هذه الدورة التبريدية البسيطة من ضاغط بمردود إيزونتروبي مقداره80% ومكثف هوائي بدرجة حرارة تكاثف مقدارها $(T_c = 50\,^{o}\mathrm{c})$ وجهاز خنق (صمام تمدد أو أنبوب شعري) ومبخر هوائي يعمل على درجة حرارة تبخر مقدارها $(T_o = -10\,^{o}\mathrm{c})$ والحمل التبريدي هو $(Q_L = 10\ \mathrm{kW})$. يبين الشكل (2) العمليات التي تتألف منها هذه الدورة على مخطط $(T-s)$.



الشكل (2) مخطط (T–s) للدورة التبريدية البسيطة.

يوضح الجدول (1) القيم المكونة لمصفوفة عناصر الطاقة والتي تظهر القيم الطاقية لكافة عناصر الدورة.

الجدول (1) مصفوفة عناصر الطاقة $\{[e]_{(I,J)}\}$

العامودJ	السطرا			
	h_{out}	h_{in}	s_{out}	s_{in}
comp	h_2	h_1	s_2	s_1
cond	h_3	h_2	s_3	s_2
val	h_4	h_3	s_4	s_3
evap	h_1	h_4	s_1	s_4

أما المصفوفة الواحدية $\{[Unity]_{(J,1)}\}$ فتتكون من السطر (J) الذي يمثل إشارة دخول الطاقة إلى العنصر وهي إشارة موجبة أو خروج الطاقة من العنصر وهي إشارة سالبة. وبالتالي تأخذ المصفوفة الواحدية الشكل التالي:

$$Unity_{(J,1)} = \begin{bmatrix} (+\dot{m}) \\ (-\dot{m}) \\ (-\dot{m}T_o) \\ (\dot{m}T_o) \end{bmatrix}$$

خوارزمية حساب الإكسرجي الضائع:

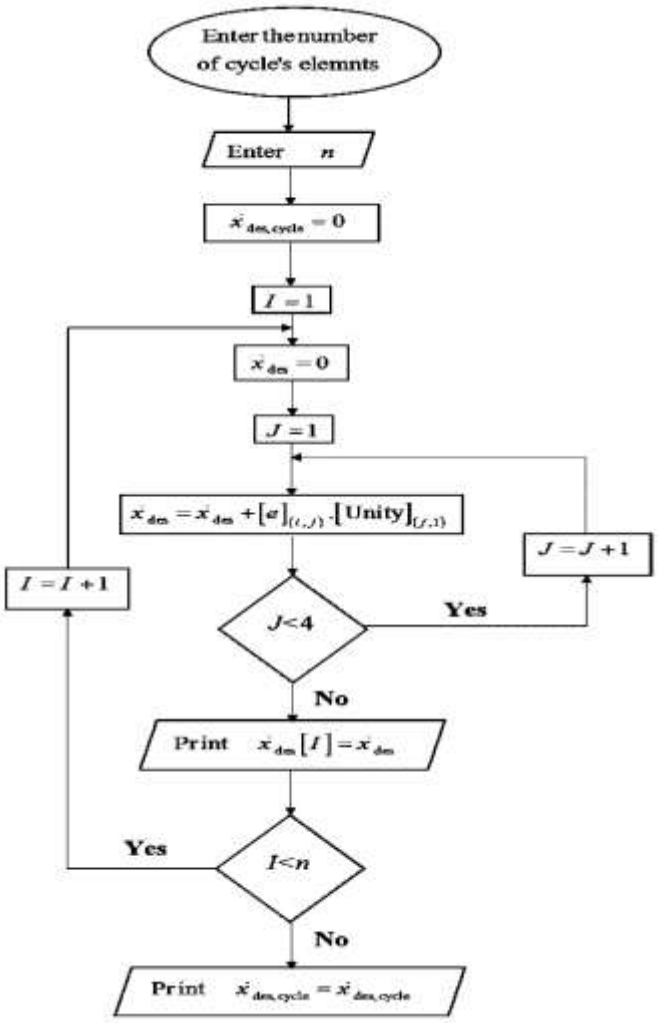
بعد وضع المصفوفة الواحدية ومصفوفة عناصر الطاقة للدورة المدروسة، نقوم بحساب الإكسرجي الضائع من خلال جداء المصفوفة الواحدية ومصفوفة عناصر الطاقة كما يلي:

$$\dot{x}_{des} = [\text{الطاقات}]_{(IJ)} * [\text{الواحدية}]_{(J,1)}$$

$$[\dot{x}_{\text{des}}]_{(I,1)} = [e]_{(I,J)} * [Unity]_{(J,1)} \qquad (2)$$

حيث: $\left[\dot{x}_{\text{des}}\right]_{(I,1)}$ هي مصفوفة الإكسرجي الضائع لكل عنصر في الدورة بحسب الجدول(1).

يبين الشكل (3) خوارزمية حساب الإكسرجي الضائع في الدورة.



الشكل (3) خوارزمية حساب الإكسرجي الضائع.

يكون الإكسرجي الضائع في الضاغط باستخدام الخوارزمية المستخرجة على الشكل التالي، عندما: $I = 1$ ($I = 1$ أي اختيار الضاغط)، وَ $J = 1$ (أي عناصر الطاقة)، يكون الثابت في المصفوفة الواحدية

$$e_{IJ} = e_{11} = h_2$$

بالتعويض في المعادلة (2) يكون:

$$\dot{x}_{\text{des}} = \dot{x}_{\text{des}} + e_{11} * Element_{12}$$

$$\dot{x}_{\text{des}} = \dot{m}\, h_2$$

بإضافة واحد إلى (J) وتكرار العملية السابقة، كما في الشكل (2) نجد:

$$e_{IJ} = e_{12} = h_1$$

$$\dot{x}_{\text{loss}} = \dot{x}_{\text{loss}} + e_{12}.Element_{12}$$

$$\dot{x}_{\text{loss}} = \dot{m}.h_2 - \dot{m}.h_1$$

$$\dot{x}_{\text{loss}} = \dot{m}.(h_2 - h_1)$$

نضيف واحد مرة أخرى إلى (J) ونعيد الكرة فنجد:

$$e_{IJ} = e_{13} = s_2$$

وبالتالي

$$\dot{x}_{\text{loss}} = \dot{x}_{\text{loss}} - \dot{m}.T_o.s_2$$

أو

$$\dot{x}_{\text{loss}} = \dot{m}.\left[(h_2 - h_1) - T_o\,(s_2 - s_1)\right]$$

وهذه النتيجة مطابقة للمعادلة (1).

التحليل الطاقي وحساب الإكسرجي الضائع في الدارة التبريدية البسيطة:

لإيضاح أهمية حساب الإكسرجي الضائع بشكل عملي تم إجراء التحليل الطاقي للمثال السابق (الدورة التبريدية البسيطة الموضحة في الشكل (1)). يبين الجدول (2) نتائج التحليل الطاقي للدورة باستخدام برنامج ***REFPROP***– الإصدار السابع، والصادر عن الجمعية الوطنية للمعايير والتكنولوجيا الأمريكية ***NIST National Institute of Standards and Technology (NIST)*** [8].

الجدول (2) بارامترات الدورة التبريدية البسيطة.

نقاط الدارة	*t* °C	*P* bar	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg.K
1	−10	0.2	392.66	1.7344
2	65.6	1.32	441.81	1.7628
3	50	1.32	271.62	1.2375
4	−10	0.2	271.62	1.2734

يبين الجدول (3) الطاقات في العناصر المكونة للدورة.

الجدول (3) طاقات العناصر في الدورة.

كمية الحرارة المطروحة من المكثف	$\dot{Q}_H = -14.06\ [\text{kW}]$
كمية الحرارة المكتسبة في المبخر	$\dot{Q}_L = 10\ [\text{kW}]$
عمل الضاغط	$\dot{W}_{\text{in}} = -4.061\ [\text{kW}]$
معامل الأداء	$COP_{\text{R}} = 2.46$
معامل أداء كارنو	$COP_{\text{R,rev}} = 3.078$
مردود القانون الثاني	$\eta_{II,R} = 79.92\%$

الإشارة السالبة تدل على أن الطاقة هي قيمة مقدمة (ضاغط) أو مطروحة (مكثف). يبين الجدول (4) نتائج حساب الإكسرجي الضائع بعد أن قمنا ببرمجة خوارزمية الحل باستخدام اللغة البرمجية C++.

الجدول (4) تحليل الإكسرجي لعناصر الدورة.

العنصر	الإكسرجي الضائع[kW]
الضاغط	−3.312524785
المكثف	−0.693787178
الصمام	−0.913516193
المبخر	−1.705221414
الدورة بالكامل	−6.62504957

6. النتائج التحليلية:

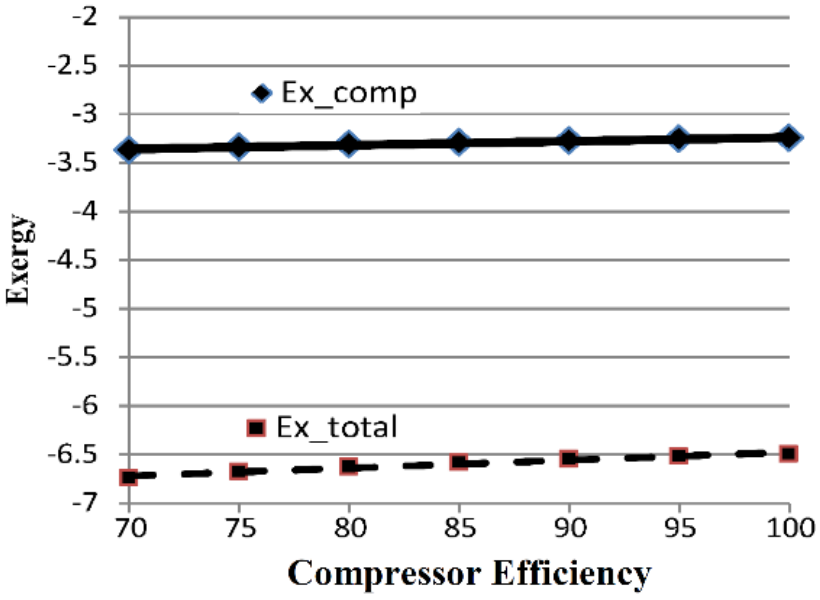
نلاحظ من الجدول (4) أن الهدر الأكبر يكون في الضاغط، وبالتالي يتوجب علينا البحث عن طرق للتقليل من هذا الضياع، وذلك من خلال تحسين تصميم الضاغط بما يؤمن الاستفادة من الطاقة المصروفة في الدورة بشكل أكبر.

تحسين مردود الضاغط:

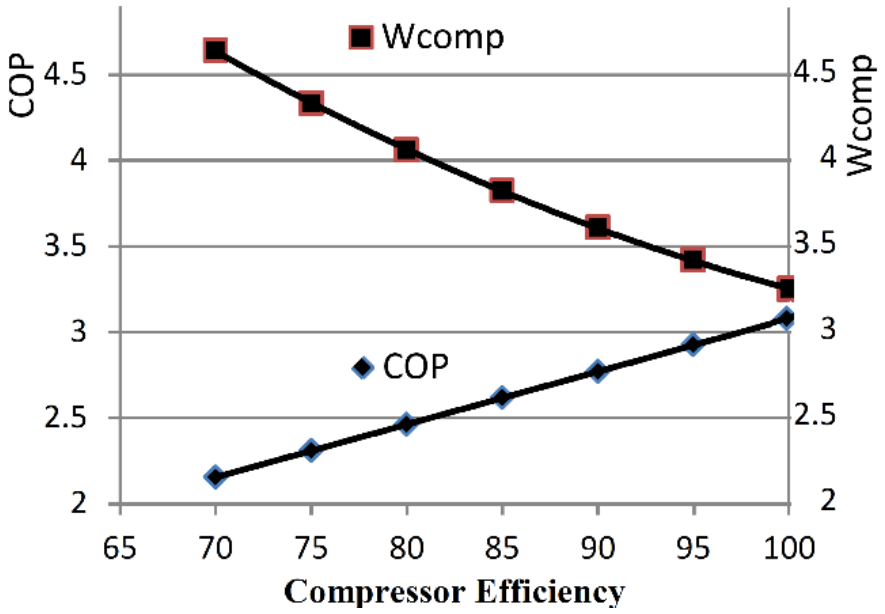
بفرض أننا ثبتنا كلاً من درجة حرارة التكاثف $(T_C = 50\,^{\circ}\mathrm{c})$ ودرجة حرارة التبخر $(T_O = -10\,^{\circ}\mathrm{c})$ ، وبفرض أن الحمل التبريدي يبقى نفسه $(Q_L = 10\,\mathrm{kW})$، نلاحظ أن الإكسرجي الضائع يتناقص بزيادة المردود الإيزونتروبي للضاغط، وبالتالي يتناقص الإكسرجي الضائع في الدورة ككل، كما في الشكل (4).

نستنتج مما سبق أن رفع مردود الضاغط يخفض الضياع في الإكسرجي ولكن هذا يحمل معه بعض القيود الاقتصادية لأن رفع المردود يتعلق بتصميم الضاغط لتكون الضياعات فيه أقل.

مع تحسين المردود الإيزونتروبي للضاغط يزداد معامل الأداء (COP) ويصل إلى القيمة العظمى عندما يكون المردود الإيزونتروبي للضاغط 100% كما في الشكل (5).



الشكل (4) العلاقة بين مردود الضاغط والإكسرجي.

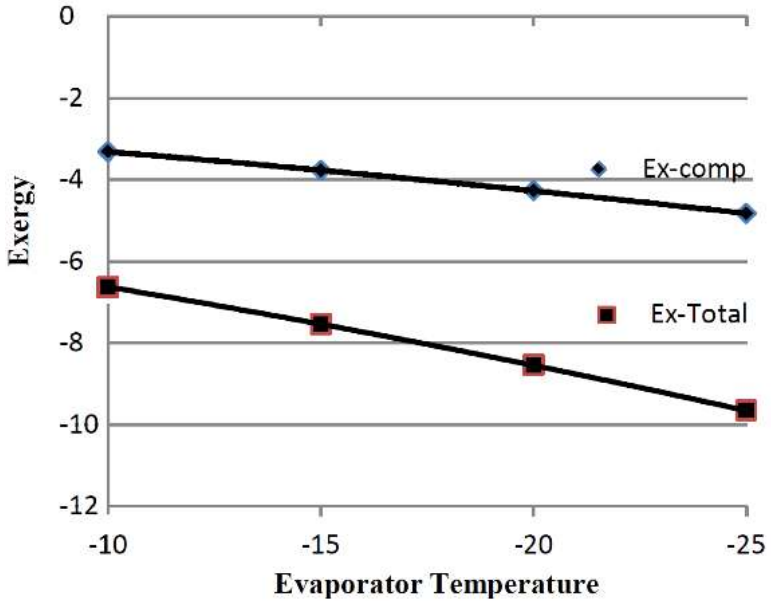


الشكل (5) العلاقة بين مردود الضاغط ومعامل الأداء وعمل الضاغط.

النتيجة منطقية لأننا كلما اتجهنا إلى ضاغط مثالي يكون الضياع في الدورة أقل وهذا يتناسب مع النتائج.

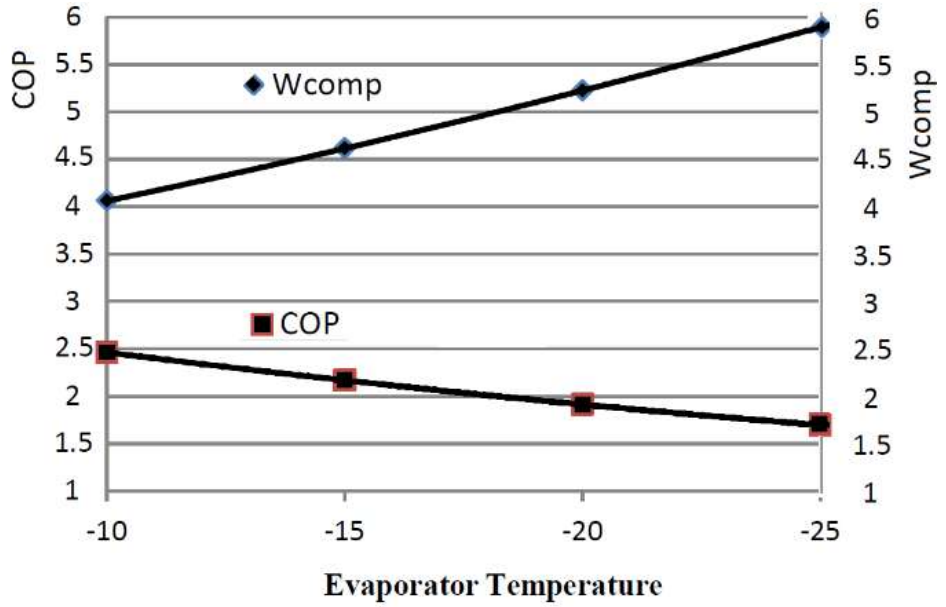
2.6. تأثير تغير درجة حرارة التبخر مع بقاء البارامترات ثابتة:

بتخفيض درجة حرارة التبخر فقط (الحمل ثابت) مع بقاء المردود الإيزونتروبي للضاغط (80%) ودرجة حرارة التكاثف $\left(T_C = 50\,^{\circ}\mathrm{c}\right)$ ثابتة فنلاحظ أن الإكسرجي الضائع يزداد في كل عنصر من عناصر الدورة بما في ذلك الضاغط كما في الشكل (6).



الشكل (6) العلاقة بين درجة حرارة الغليان والإكسرجي الضائع للضاغط والدورة.

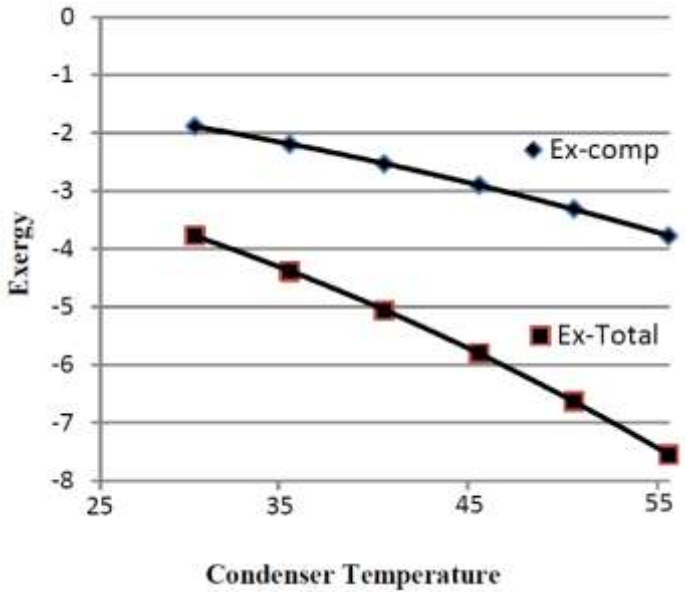
نلاحظ أيضاً مع تخفيض درجة حرارة الغليان فإن عمل الضاغط يزداد وينخفض معامل الأداء كما في الشكل (7).



الشكل (7) العلاقة بين درجة حرارة الغليان ومعامل الأداء وعمل الضاغط.

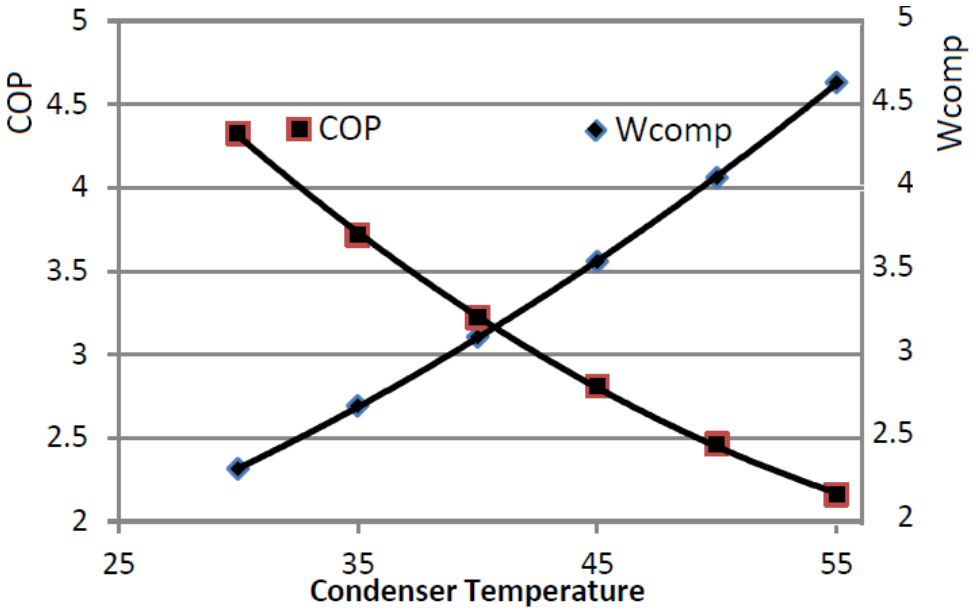
3.6. تأثير تغير درجة حرارة التكاثف مع بقاء البارامترات ثابتة:

إذا خفضنا درجة حرارة التكاثف (بثبات الحمل التبريدي)، مع بقاء المردود الإيزونتروبي للضاغط (80%) ودرجة حرارة الغليان $\left(T_O = -10\,^{\circ}\mathrm{c}\right)$ ثابتين، نلاحظ أن الإكسرجي الضائع في الضاغط يتناقص بتناقص درجة حرارة التكاثف، كما يتناقص الإكسرجي الضائع في الدورة ككل، كما هو واضح في الشكل (8). هنا يجب التذكير أن تخفيض درجة حرارة التكاثف يؤثر على تصميم المكثف وبالتالي قد يكون هذا التغير محدوداً.



الشكل (8) العلاقة بين درجة حرارة التكاثف والإكسرجي الضائع في الضاغط والدورة.

نلاحظ أيضاً أنه مع تخفيض درجة حرارة التكاثف فإن عمل الضاغط ينخفض ويزداد معامل الأداء، كما في الشكل (9). النتيجة هي أن تخفيض درجة حرارة التكاثف يخفض من الإكسرجي الضائع ضمن كافة عناصر الدورة.



الشكل (9) العلاقة بين درجة حرارة التكاثف ومعامل الأداء وعمل الضاغط.

برفع مردود الضاغط بمقدار 10% وتم تخفيض درجة حرارة التكاثف بمقدار 10 درجات في الدورة التبريدية البسيطة السابقة أي تحولت البارامترات من $(-10\,^{o}c, 80\%, 50\,^{o}c)$ إلى البارامترات $(-10\,^{o}c, 90\%, 40\,^{o}c)$، فنلاحظ من التحليل الطاقي أن الطاقة المصروفة على الضاغط انخفضت بمقدار 32% وانخفض الاكسرجي الضائع بمقدار 25% كما هو موضح في الجدولين (5) و (6).

الجدول (5) التحليل الطاقي للدورة عند تحسين مردود الضاغط وتخفيض درجة حرارة المكثف.

العنصر	الطاقة [kW]	
الضاغط	−4.06	−2.76
المكثف	−14.06	−12.76
المبخر	10	10
معامل الأداء	2.46	3.62

الجدول (6) مقارنة بين الإكسرجي الضائع

العنصر	الإكسرجي الضائع [kW]		النسبة%
الضاغط	−3.31	−2.51	25
المكثف	−0.7	−0.63	10
الصمام	−0.91	−0.55	40
المبخر	−1.71	−1.33	32
الدورة	−6.61	−5.01	25

الاستنتاجات والتوصيات:

I. الإكسرجي هو مفهوم مفيد في حساب الطاقة المهدورة وغير المستفاد منها في الأنظمة التبريدية والحرارية.

II. يمكن استخدام الإكسرجي في تحديد العناصر الأكثر هدراً للطاقة.

III. الطريقة المقترحة في حساب الإكسرجي الضائع هي طريقة مناسبة يمكن استخدامها عندما تكون عناصر الدورة كثيرة ومتنوعة، حيث يمكن تحديد كافة الطاقات الداخلة والخارجة ضمن المصفوفة الواحدية ومصفوفة عناصر الطاقة وحساب الإكسرجي الضائع للعناصر وللدورة.

IV. الإكسرجي الضائع في الضاغط هو الأكبر.

V. رفع مردود الضاغط يقلل من الإكسرجي الضائع ضمن الدورة.

VI. تخفيض درجة حرارة التبخر مع بقاء البارامترات الأخرى ثابتة يزيد من الإكسرجي الضائع في الدورة.

VII. تخفيض درجة حرارة التكاثف مع بقاء البارامترات الأخرى ثابتة يقلل من الإكسرجي الضائع في الدورة.

جدول الرموز			
$\dot{x}$	تغير الإكسرجي [kW]	s	الإنتروبي [kJ/kg°C]
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي [kg/s]	P	الضغط [bar]
ψ	المحتوى الطاقي [kJ/kg]	$\dot{Q}$	كمية الحرار ة[kW]
h	الإنتالبي [kJ/kg]	W	العمل [kW]
T_o	درجة حرارة التبخر[°C]	COP	معامل الأداء
T_c	درجة حرارة التكاثف [°C]	η	المردود
T_L	درجة حرارة الوسط المبرد [°C]	E	الإكسرجي [kW]
T_H	درجة حرارة الوسط الخارجي [°C]	n	عدد العناصر المكونة للدارة

المراجع

[1] Dincer, I., 2002, "The Role of Exergy in Energy Policy Making", Energy Policy Journal, Volume 30, Issue 2, Pages 137-149.

[2] Hirs, G., 1998, "Exergy Loses; A Basic for Energy Taxing", Proceeding NATO, ASI Workshop on Thermodynamics and optimization of Complex Energy System, Constance, Romania, pp. 195-208.

[3] Graveland, A.J.G.G., Gisolf, E., 1998, "Exergy Analysis; AN Efficient Tool for Process Optimization and understanding", Computers and Chemical Engineering, Vol. 22, May 24-27. p. S545-552.

[4] Huang, F., Naumovicz, T., 2004, "Energy Well as Exergy Evaluation of Overall Performance of Combined Gas-Steam Power Plants", Proceedings, International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy and Process Systems, The Netherlands, Str. 435-437.

[5] Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2006, "Thermodynamics an Engineering Approach" Fifth Edition, McGraw Hill.

[6] Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2006, "Fundamental of Engineering Thermodynamics", Fifth Edition, Wiley & Sons, Inc.

[7] Sonntag, R.E., Borgnakke, C., 2009, "Fundamental of Thermodynamics", Seventh Edition, Wiley & Sons, Inc.

[8] Lemmon, E.W., McLinden, M.O., Huber, M.L., 2002, "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP)", NIST Standard Reference Database 23, Version 7, Beta Version. USA.