

نمذجة وموازنة أداء دارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة مع الدارة أحادية المرحلة

د. علي كرنو*
د. جابر ديبية**
رنا احسان***

(تاريخ الإيداع 7 / 7 / 2011. قُبل للنشر في 19 / 9 / 2011)

□ ملخص □

إن العمل الأساسي لرفع أداء الدارة الأحادية يكون عند توافر مصدر بدرجات حرارة أعلى لتشغيل دارة التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير بغية إنتاج الماء البارد. يتناول هذا البحث إجراء تحليل ترموديناميكي لنظام التبريد الامتصاصي أحادي التأثير، وثنائي التأثير عند محلول عمل (ماء- بروميد الليثيوم)، وإجراء موازنة بين كلا النظامين؛ من خلال وضع برنامج نمذجة رياضي لكل من الدارتين باستخدام برنامج (EES)، واختباره عند شروط حدية مختلفة لكل من المولد والمكثف والمبخر، ثم استخدام نتائج النمذجة لدراسة تأثير بارامترات عمل مختلفة في معامل الأداء .COP

أظهرت النتائج أن معامل أداء الدارة ثنائية التأثير يعادل تقريباً ضعف معامل أداء الدارة أحادية التأثير باستخدام محلول العمل نفسه، والشروط الحرارية ذاتها. فعندما تتغير درجة حرارة المبخر بين [°C] (4-10)، وتراوح درجة حرارة مولد الضغط العالي بين [°C] (55-155)، ودرجة حرارة المكثف بين [°C] (25-47)، تراوح القيم العظمى لـCOP لدارة التبريد الامتصاصية أحادية التأثير بين (0.75 - 0.85)، وللدارة ثنائية التأثير عند الشروط نفسها بين (1.5 - 1.75).

الكلمات المفتاحية: الدارة الامتصاصية، التبريد، ماء/ بروميد الليثيوم، الدارة ثنائية التأثير، الدارة أحادية التأثير.

* مدرس - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالبة ماجستير - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Simulation and comparative double stage absorption refrigeration cycle with single stage cycle

Dr. Ali Karno^{*}
Dr. Jaber Deba^{**}
Rana Ehsan^{***}

(Received 7 / 7 / 2011. Accepted 19 / 9 / 2011)

□ ABSTRACT □

The main objective to increasing single cycle performance is that when high temperature heat source is available to operate double effect absorption cooling cycle for production chilled water. In this paper, a thermodynamic analysis of a single and double-effect (LiBr-H₂O) absorption refrigeration system was performed, then studying the differences between two systems by using EES program to put Simulation program for two cycles, and testing it at different limited conditions for generator, condenser and evaporator. Simulation results were used to study the influence of the different operating parameters on the performance coefficient. The results showed that the COP of double effect system is approximately twice the COP of single effect system by using same solution and same conditions.

In this study and when the evaporation temperature is varied from (4 -10) [°C], and generator (HPG) temperature is varied from (55 -155)[°C], condenser temperatures are varied from (25 – 47) [°C], the maximum COP values of the single effect refrigeration systems are in the range of (0.75 – 0.85) and for double effect refrigeration systems are in the range of (1.5 – 1.75).

Keywords: absorption cycle, refrigeration, lithium bromide, single effect cycle, double effect cycle.

* Lecturer, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Master Student, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria

مقدمة:

يعرف التبريد بأنه عملية تخفيض درجة حرارة المكان، أو المادة المراد تبريدها إلى درجة حرارة مناسبة مع المحافظة على هذه الدرجة، وهذه العملية لا يمكن أن تتم إلا باستهلاك مقدار من الطاقة هي طاقة ميكانيكية في دارة التبريد الانضغاطية، وطاقة حرارية في دارة التبريد الامتصاصية. إن تقنيات التبريد معروفة منذ القرن التاسع عشر، ويزداد الاهتمام بها في السنوات الأخيرة، إلا أن استخدام آلة التبريد بالامتصاص التي تحتاج إلى مصدر حراري يتم توفيره من خلال الطاقة الحرارية الشمسية، قد نال الاهتمام الأكبر، وتركزت الجهود عليه في استخدامات الطاقة الشمسية لغايات التبريد؛ ذلك أن الطلب على التبريد يزداد مع ارتفاع درجات الحرارة، وهذا ما يحدث صيفاً حيث تزداد شدة الإشعاع الشمسي؛ فعندما تبلغ درجة الحرارة الشمسية $[^{\circ}\text{C}] (90-140)$ تقدر درجة التبريد التي يمكن الوصول إليها ب $[^{\circ}\text{C}] (-30)$. وإن المبردات الامتصاصية الحالية يمكن أن تغطي مجالاً واسعاً من استطاعة التبريد؛ وذلك من $[kW] (10-5000)$ [1]. وإن أنظمة التبريد العاملة على محلول $(\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O})$ مألوفة الاستخدام في عمليات تكييف الهواء والتبريد بفضل أدائها الجيد، وكونها تعمل عند مستوى طاقة حرارية أقل، وكلفة منخفضة قياساً بأنظمة $(\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O})$ ، فيكون معامل أداء هذا النوع من الدارات أعلى من معامل أداء دارات الأمونيا عند شروط التشغيل نفسها [2]. أدت الحاجة إلى معامل أداء أعلى، في المبردات الامتصاصية، أدت إلى تطوير دارة التبريد الامتصاصية أحادية المرحلة إلى دارة امتصاصية بمرحلتين تبريد، وهذه تختلف عن الدارات الأحادية في وجود مولدين حراريين لتحقيق غليان أكبر لوسيط التبريد عن المادة الماصة، وتحسين حمل التبريد، ورفع المردود الحراري للدارة؛ ذلك أن الاستخدام الواسع للمبردات الامتصاصية تم على وجه الخصوص في الولايات المتحدة بهدف إجراء الدراسات والمشاريع الجديدة [3].

وثمة تصنيف لدارات التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير من حيث تدفق محلول العمل فيها؛ فمنها ذات التدفق التسلسلي، وفيها يتدفق المحلول الغني الناتج عن مرحلة التبريد الثانية مباشرة إلى مولد الضغط العالي العامل عند الضغط ودرجة الحرارة الأعلى، أما ذات التدفق التفرعي ففيها يتدفق المحلول الغني على مرحلتين انضغاط؛ الأولى إلى مولد الضغط المنخفض، والثانية منه إلى مولد الضغط العالي، والنموذج الثالث ذات التدفق العكسي، وهذه تشبه في مبدأ عملها التدفق على التفرع من حيث تدفق المحلول الغني، إلا أن تدفق المحلول الفقير يتم على مرحلة واحدة من مولد الضغط العالي إلى الماص [4].

ومن الأبحاث والدراسات العلمية التي استخدمت النموذج التسلسلي أجريت في تايلاند دراسة لدارة تبريد امتصاصية ثنائية التأثير باستخدام محلول عمل $(\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr})$ ، ودرجة حرارة المبخر $[^{\circ}\text{C}] 7$ ، فكان معامل الأداء $\text{COP}=1.3$ [4]. كما أجريت في إسبانيا دراسة نمذجية أخرى عند محلول العمل نفسه $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ ، والتدفق على التسلسل، وعند استطاعة تبريد $Q_{ev} [kW] 1000$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط العالي $[^{\circ}\text{C}] 107.9$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض $[kW] 67.8$ ، ودرجة تبخير $[^{\circ}\text{C}] 7$ ، ودرجة تكثيف $[^{\circ}\text{C}] 32.2$ ، فكانت قيمة $\text{COP}=1.655$ [5]. وفي الهند عند محلول العمل السابق نفسه، وإجراء دراسة نمذجية على برنامج EES عند درجة حرارة مبخر $[^{\circ}\text{C}] 7.2$ ، ودرجة حرارة مكثف $[^{\circ}\text{C}] 37.8$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط العالي $[^{\circ}\text{C}] 140.6$ ، وفعالية المبادل الحراري 70% ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض $[^{\circ}\text{C}] 96$ ، فكانت قيم $\text{COP} = 1.268$ [6].

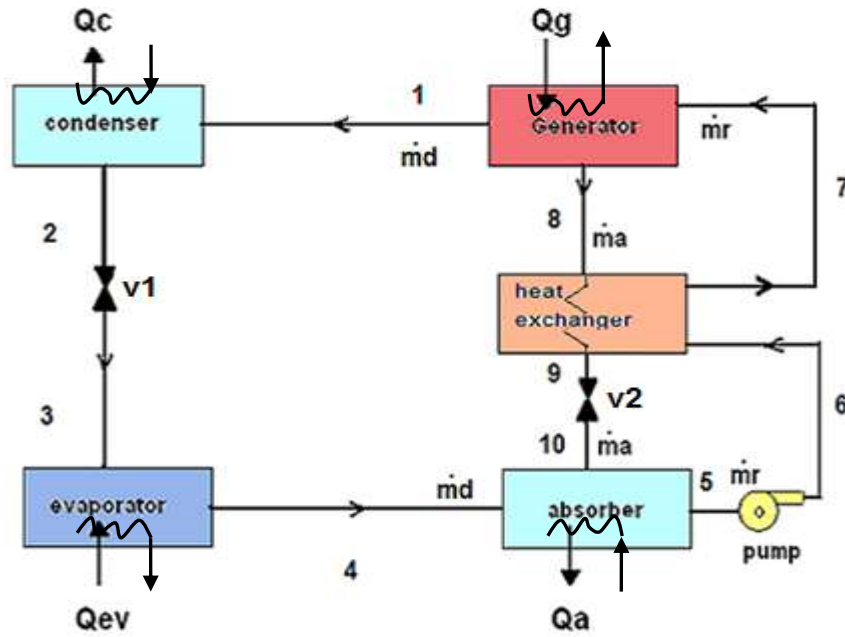
أهمية البحث، وأهدافه:

نلاحظ من الدراسات والمراجعات العلمية كافة عدم وجود موازنة واضحة عند شروط حرارية واسعة بين كلتا الدائرتين الامتصاصيتين أحادية، وثنائية المرحلة، لذلك سنعمد في هذا البحث إلى إجراء موازنة بينهما عند الشروط الحرارية نفسها؛ بهدف تحسين معامل أداء الدارة الامتصاصية، وزيادة استطاعتها واقتصاديتها؛ ذلك أنّ معامل أداء الدارة أحادية المرحلة منخفض، وهناك العديد من آليات التبريد ذات الاستطاعة المرتفعة، وهذا ما تحقّقه دارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة، وسنحاول في أبحاث لاحقة دراسة إمكانية الاستفادة من الطاقة الشمسية في تغذية المولد الحراري في هذه الدارة الثنائية بهدف خفض الكلفة، وتخفيف التلوث.

طرائق البحث ومواده:

1- دارة التبريد الامتصاصية أحادية المرحلة:

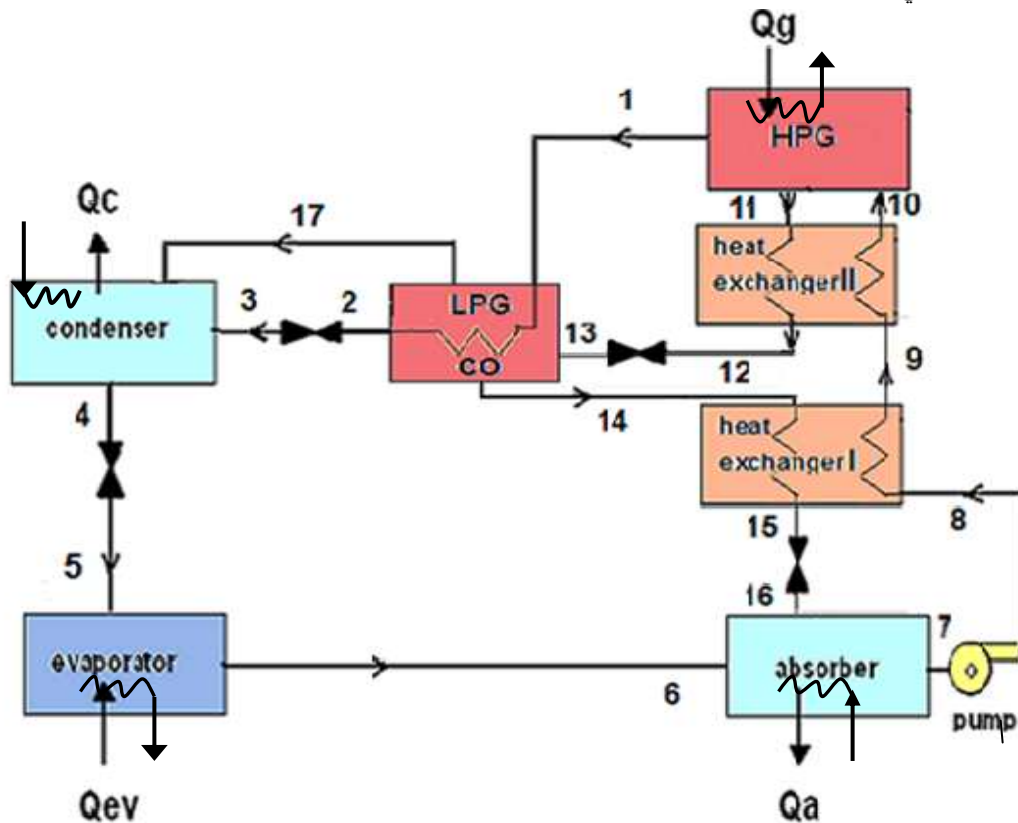
من أهم مزايا هذا النوع من الدارات إمكانية الاستفادة من الطاقة الحرارية؛ كالتغذية الشمسية، مباشرة دون الحاجة إلى تحويلها إلى شكل آخر ويمتاز النظام العامل على محلول $H_2O-LiBr$ ببساطة تجهيزاته. والشكل (1) يبين مبدأ عمل هذه الدارة المكونة من أربعة مكونات أساسية؛ وهي: المولد، والمكثف، والمبخر، وأخيراً الماص، إضافة إلى صمامي تمدد $V1$ و $V2$ ، ومضخة، يستخدم فيها محلول متجانس من مادتين؛ هما: وسيط التبريد، والمادة الماصة، تشكلان ما يسمى المحلول الغني الموضوع في المولد، يتبخر وسيط التبريد بدءاً من المحلول الغني بفعل مصدر حراري متجهاً إلى المكثف، وعندئذ يتكاثف بخار وسيط التبريد متحولاً إلى سائل، ليمر بعدئذٍ عبر صمام تمدد، فينخفض ضغطه وصولاً إلى ضغط المبخر، وهناك يمتص الحرارة من المكان المراد تبريده؛ متحولاً ثانيةً إلى بخار ينتقل إلى الماص؛ ليتم امتصاصه من قبل المادة الماصة الموجودة ضمن المحلول الفقير، متحولاً ثانيةً إلى محلول غني يضخ إلى المولد ثانيةً ماراً عبر المبادل الحراري، مستفيداً من حرارة المحلول الفقير؛ لتعود الدورة ثانيةً [7]



الشكل (1) : مخطط لدارة تبريد امتصاصية أحادية المرحلة

2- دارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة:

لنظام دارة التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير تملك مرحلتا توليد للبخار لفصل وسيط التبريد عن المادة الماصة، وتقدر درجات حرارة الدخول لهذه الأنظمة بـ $[120-150]^{\circ}\text{C}$ ، وتعد ذات منافسة قوية لدارة التبريد الامتصاصية أحادية التأثير [8]. وقد عمدنا إلى اختيار نموذج الربط التسلسلي؛ لأنه الأكثر انتشاراً، والأقل كلفةً من ناحية تجهيزاته. والشكل (2) يبين مبدأ عمل هذه الدارة المكونة من مولدين حراريين؛ أحدهما يعمل عند درجات حرارة مرتفعة (مولد الضغط العالي (HPG)، والآخر يعمل عند درجات حرارة منخفضة (مولد الضغط المنخفض (LPG)). وإن أهم ما تختلف به دارة التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير عن الدارة الأحادية أنها تعمل عند ثلاثة ضغوط؛ وهي: ضغط HPG (الضغط العالي)، ثم ضغط LPG (الضغط الوسطي)، وضغط المبخر P_{ev} (الضغط المنخفض)، وعند مرحلتي ضغط. أما في دارة التبريد الأحادية فهناك مرحلة ضغط واحدة من ضغط المبخر إلى ضغط المولد؛ ويوضح الشكل أن البخار الناتج عن المولد؛ ذي درجات الحرارة الأعلى يعود ويمر عبر المولد ذي درجات الحرارة المنخفضة الذي يعمل عمل مكثف للبخار الأولي الناتج عن مولد الضغط العالي، إضافة إلى عمله بوصفه مولداً حرارياً، وهذا ما يميز هذا النوع من دارات التبريد الامتصاصية الثنائية؛ ذلك أن الحرارة المنتجة في المكثف تستخدم لتسخين وسيط التبريد في LPG، وتحقيق توفير في المصدر الحراري؛ ليخرج بعدها البخار من كلا المولدين إلى مكثف مشترك، ويتابع وسيط التبريد طريقه إلى المبخر، يليه الماص، ليمر بعده على مبادلين حراريين بدلاً من مبادل واحد في حالة الدارة الأحادية؛ كما في الشكل الآتي [9].



الشكل (2): مخطط لدارة تبريد امتصاصية ثنائية المرحلة

3- التحليل الترموديناميكي

تعتمد دراسة التوازن الحراري لعناصر دارة التبريد الامتصاصية بنوعها أحادية المرحلة، وثنائية المرحلة على معادلتين أساسيتين تمثلان توازن الطاقة، والكتلة لكل عنصر من عناصرها [9]:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1) \quad \text{توازن الكتلة}$$

$$\sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} = 0 \quad (2) \quad \text{توازن الطاقة}$$

أما معامل أداء الدارة لدارة التبريد الامتصاصية فهو:

$$\text{cop} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{(\dot{Q}_{gn} + W_p)} \quad (3)$$

$$\text{cop} = \dot{Q}_{ev} / \dot{Q}_{gn} \quad (4) \quad \text{وبإهمال عمل المضخة لصغره } (W_p = 0)$$

- بإجراء الدراسة الترموديناميكية للدارة الأحادية وفق الشكل (1) في كل جزء نجد:
في المولد الحراري:

$$\dot{m}_r = \dot{m}_d + \dot{m}_a \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{gen} = h_1 \cdot \dot{m}_d + h_8 \cdot \dot{m}_a - h_7 \cdot \dot{m}_r \quad (6)$$

في المبادل الحراري: حيث تعطى كفاءة المبادل الحراري بالعلاقة:

$$\eta = \frac{h_7 - h_6}{h_8 - h_6} \quad (7)$$

أما معادلة التوازن الحراري لكلا المحلولين الغني والفقير فهي:

$$\dot{m}_r \cdot (h_7 - h_6) = \dot{m}_a \cdot (h_8 - h_9) \quad (8)$$

في المبخر: تعطى استطاعة التبريد بالعلاقة:

$$Q_{ev} = \dot{m}_d \cdot (h_4 - h_3) \quad (9)$$

في المكثف: تعطى استطاعة التكثيف بالعلاقة:

$$Q_{cd} = \dot{m}_d \cdot (h_1 - h_2) \quad (10)$$

$$Q_a + \dot{m}_r \cdot h_5 = \dot{m}_d \cdot h_4 + \dot{m}_a \cdot h_{10} \quad (11) \quad \text{في الماص:}$$

أما معامل التدوير: الذي يعرف بأنه نسبة تدفق المحلول الغني إلى تدفق وسيط التبريد فهو:

$$f = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_d} \quad (12)$$

- وبالطريقة نفسها يمكن إجراء الدراسة الترموديناميكية للدارة الثنائية وفق الشكل (2)، فنجد في كل جزء:
في مولد الضغط العالي:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{10} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{gen} = h_1 \cdot \dot{m}_1 + h_{11} \cdot \dot{m}_{11} - h_{10} \cdot \dot{m}_{10} \quad (14)$$

في مولد الضغط المنخفض:

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{17} + \dot{m}_{14} \quad (15)$$

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_1 \cdot h_2 - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{17} \cdot h_{17} = 0 \quad (16)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{17} \quad (17)$$

في المكثف: وعلى افتراض أن $\dot{m}_3 = \dot{m}_1$

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_{17} \cdot h_{17} - \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (18)$$

في المبخر:

$$h_5 = h_4 \quad (19)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_4 \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_4 \cdot (h_6 - h_5) \quad (21)$$

في الماص:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (22)$$

في المبادلات الحرارية:

$$etal = \frac{h_9 - h_8}{h_{14} - h_8} \quad (23)$$

$$etall = \frac{h_{10} - h_9}{h_{11} - h_9} \quad (24)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_{10} \quad (25)$$

$$\dot{m}_7 \cdot (h_9 - h_8) = \dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{15}) \quad (26)$$

$$\dot{m}_7 \cdot (h_{10} - h_9) = \dot{m}_{11} \cdot (h_{11} - h_{12}) \quad (27)$$

ومعامل التدوير:

$$f = \frac{\dot{m}_{10}}{\dot{m}_1} \quad (28)$$

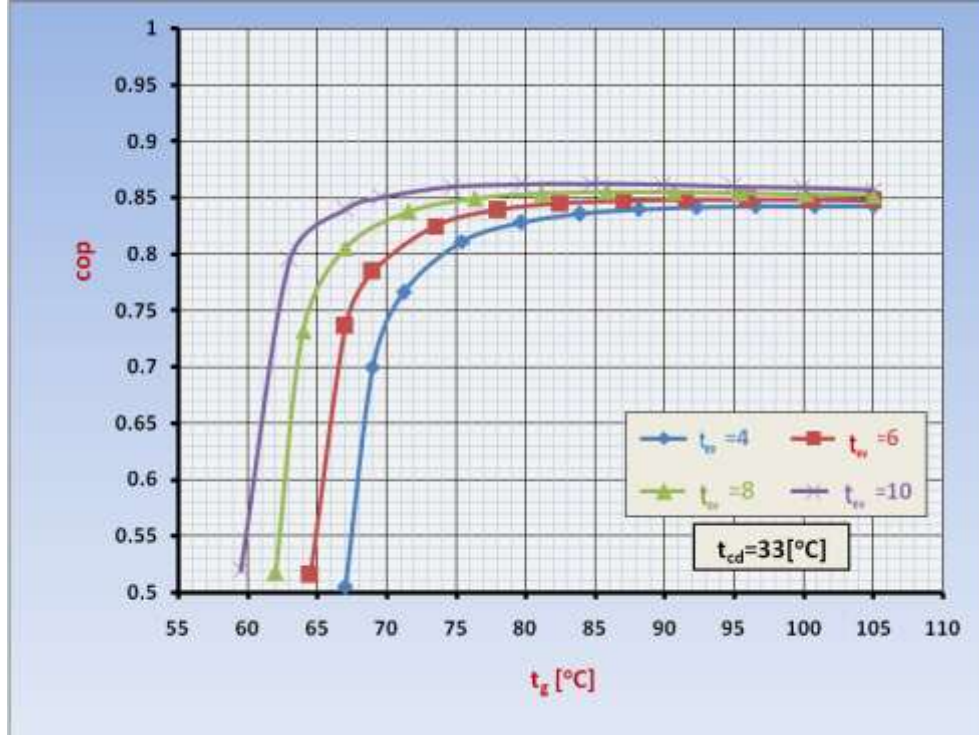
وقد عمدنا في هذا البحث إلى توحيد الشروط الحرارية في كلتا الدارتين لإجراء موازنة واسعة بينهما، وعليه سنعمل على دراسة الدارتين عند المعطيات الآتية: استطاعة التبريد $Q_{ev}=300$ [kW]، ودرجة حرارة الماص $t_a=t_{cd}$ ، ودرجة حرارة التبخر $t_{ev}=(4-10)$ [°C]، درجة حرارة مولد الضغط العالي $t_{gh}=(55-155)$ [°C]، درجة حرارة مولد الضغط المنخفض $t_{gl}=(75-105)$ [°C]، أما مردود المبادل الحراري فيساوي $etal=0.7 / etal=0.7$ ، مع مجال واسع من درجات حرارة التكثيف $t_{cd}=(25-47)$ [°C].

النتائج، والمناقشة:

لتحديد ظروف التشغيل المثلى لدارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة، ورفع كفاءتها الحرارية، واستطاعتها، قمنا بدراستها عند شروط عمل مختلفة وصولاً إلى أفضل القيم باستخدام برنامج (EES Engineerin Equation Solver) برنامج النمذجة الرياضي لحل المسائل الحرارية، وهو مزود بالخواص الحرارية والفيزيائية للكثير من وسائط العمل في دارة التبريد الامتصاصية، ومنها محلول $H_2O-LiBr$ المعتمد في دراستنا هذه. ومن خلال هذا البرنامج قمنا بكتابة نموذج رياضي لكلتا الدارتين الأحادية والثنائية، ثم استثماره وصولاً إلى النتائج الآتية:

1 - نتائج دارة التبريد الامتصاصية أحادية المرحلة:

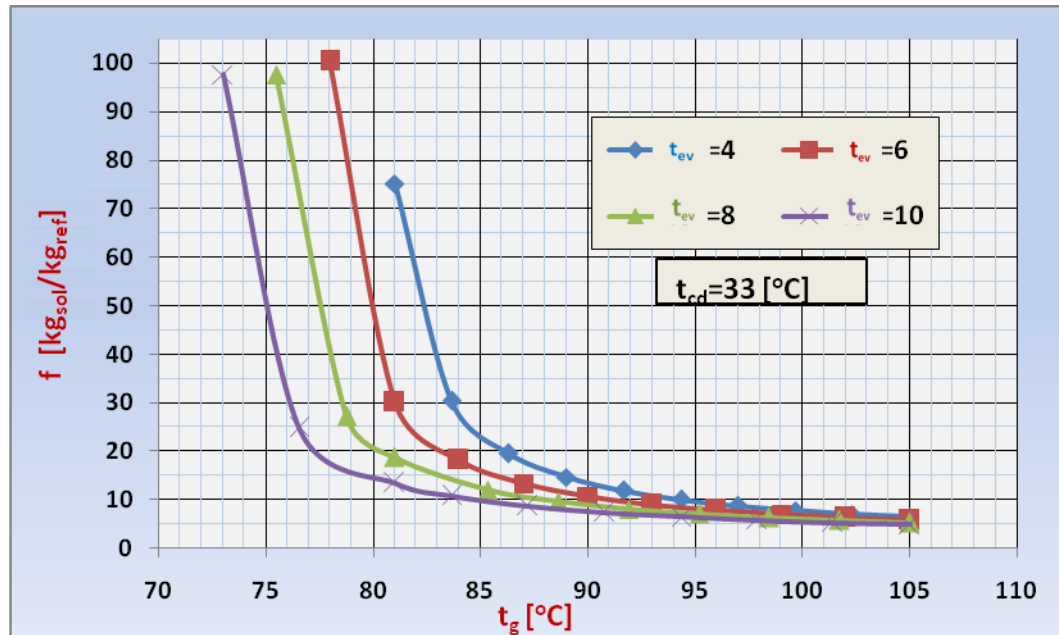
يبين الشكل (3) علاقة معامل أداء الدارة (COP) للدارة الأحادية مع درجة حرارة المولد (t_g) عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd}=33$ [°C]، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (3): علاقة معامل أداء الدارة COP للدارة الأحادية بدرجة حرارة المولد t_g

نلاحظ من الشكل زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة المولد الحراري t_g وصولاً إلى درجة مساوية لـ $85[^\circ\text{C}]$ ، ليحافظ بعدها على قيمة ثابتة لـ COP، وتراوح القيم العظمى لـ COP بين (0.75-0.85)

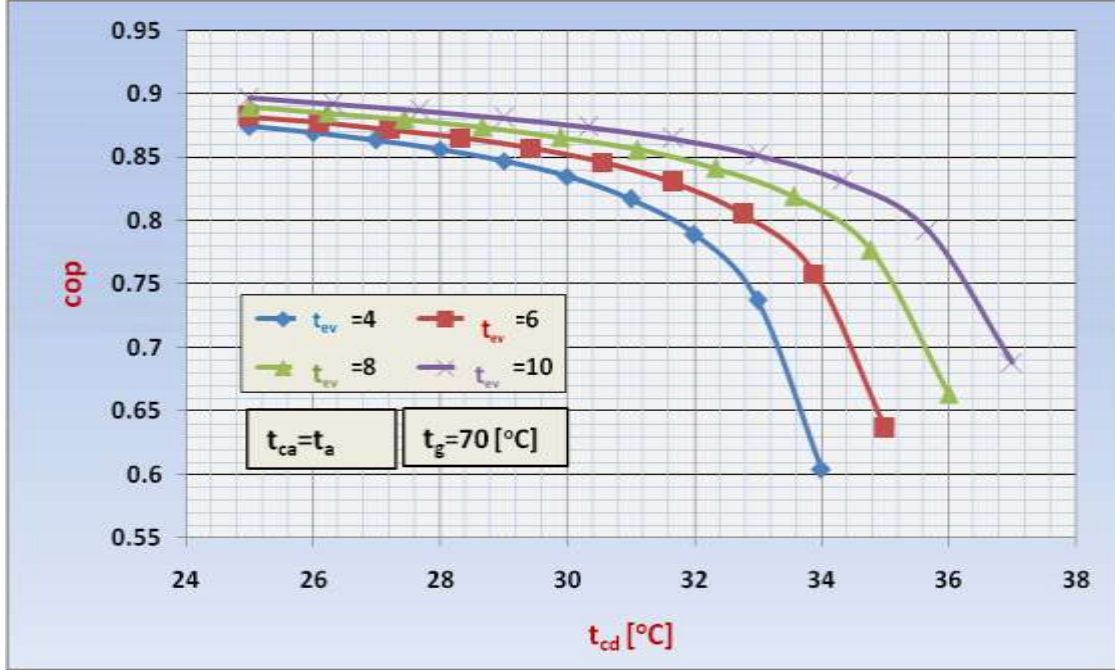
يبين الشكل (4) علاقة درجة حرارة المولد (t_g) بمعامل التدوير (f) للدارة الأحادية عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd}=33[^\circ\text{C}]$ وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (4): علاقة معامل التدوير في الدارة الأحادية f حرارة المولد t_g

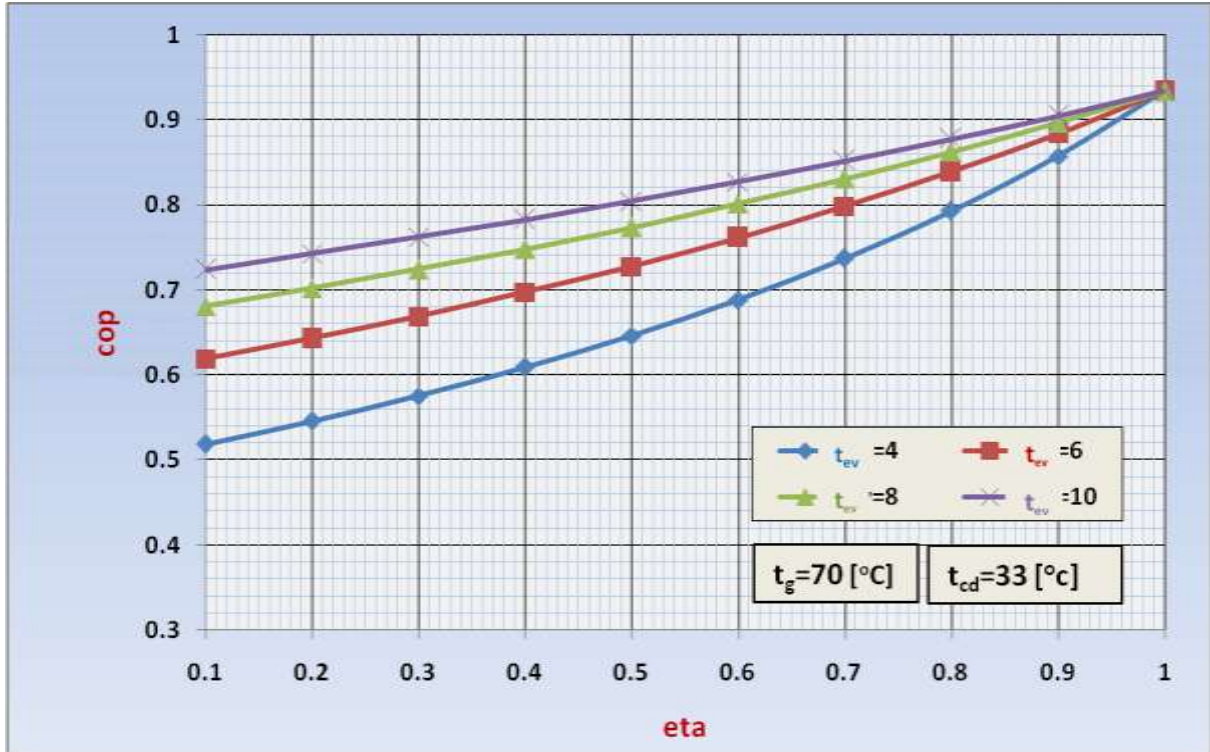
نلاحظ من الشكل أن معامل التدوير في الدارة ينخفض مع زيادة درجة حرارة المولد، ليثبت عند قيمة وسطية ($f=6$)، وذلك عند درجات تبخر مختلفة؛ كما هو موضح، مع ملاحظة أن تغير قيم معامل التدوير يبدأ عند درجات حرارية أقل للمولد كلما ازدادت درجة حرارة المبخر.

يبين الشكل (5) علاقة معامل أداء الدارة (COP) للدارة الأحادية بدرجة حرارة المكثف (t_{cd}) عند درجة حرارة مولد $t_g=70[^\circ\text{C}]$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (5): علاقة معامل أداء الدارة الأحادية COP بدرجة حرارة المكثف t_{cd}

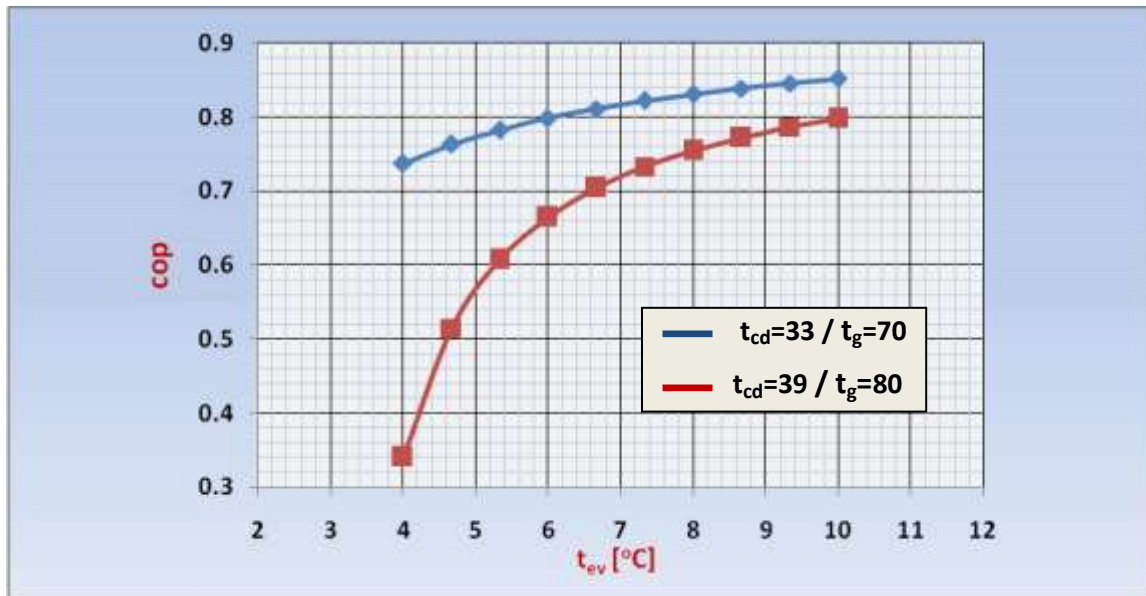
نلاحظ من الشكل (5) تناقص معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة المكثف t_{cd} ، وذلك عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر بين $[4-10]$ °C، وبثبات درجة حرارة المولد على الدرجة $t_g = 70$ °C. يبين الشكل (6) علاقة معامل أداء الدارة (COP) للدارة الأحادية بفعالية المبادل الحراري (η) عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd} = 33$ °C ودرجة حرارة المولد $t_g = 70$ °C وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (6): علاقة معامل أداء الدارة الأحادية COP بفعالية المبادل الحراري η

نلاحظ من الشكل زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة مردود المبادل الحراري eta، وذلك عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر بين $[4-10]^{\circ}\text{C}$ ، وبثبات درجة حرارة المكثف على قيمة وسطية $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجة حرارة ثابتة للمولد $t_g=70^{\circ}\text{C}$.

يبين الشكل (7) علاقة معامل أداء الدارة (COP) للدارة الأحادية بدرجة حرارة المبخر (t_{ev}) عند درجتى حرارة للمكثف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، $t_{cd}=39^{\circ}\text{C}$ ، ودرجتى حرارة للمولد $t_g=80^{\circ}\text{C}$ ، $t_g=70^{\circ}\text{C}$.

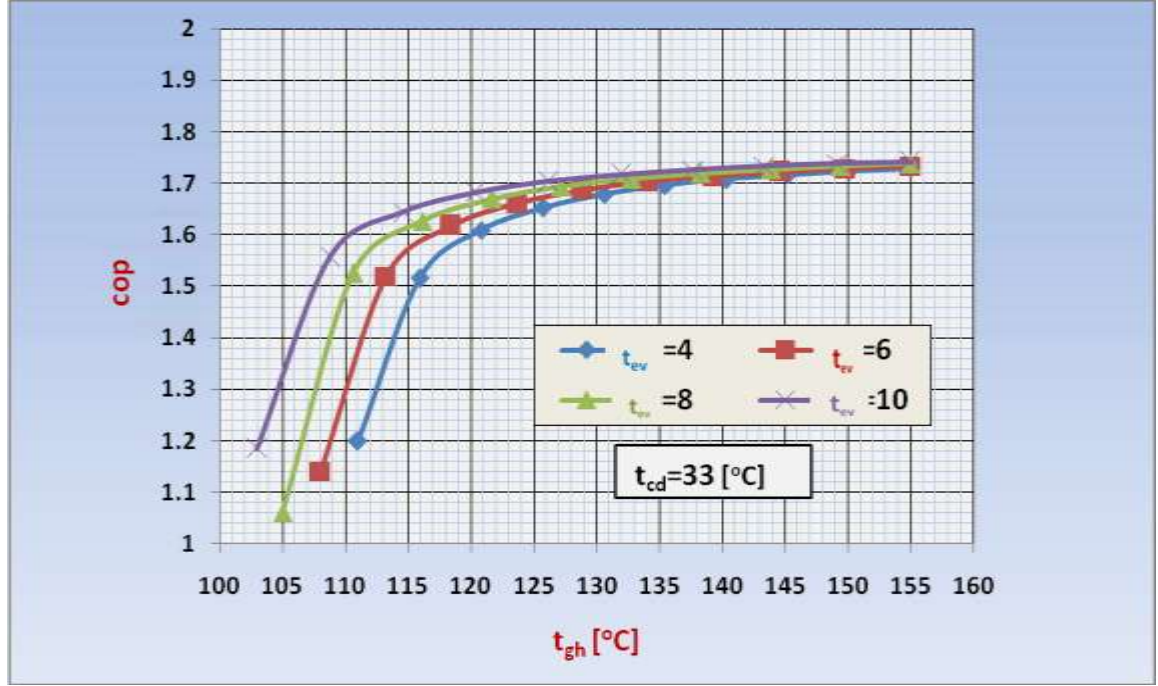


الشكل (7): علاقة معامل أداء الدارة COP بدرجة حرارة المبخر t_{ev}

نلاحظ من الشكل (7) زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة المبخر بين $[4-10]^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجتى حرارة للمكثف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، $t_{cd}=39^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجتى حرارة للمولد $t_g=70^{\circ}\text{C}$ ، $t_g=80^{\circ}\text{C}$ ، مع ملاحظة أن COP يأخذ قيمة أكبر عند $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، $t_g=70^{\circ}\text{C}$.

4-2- نتائج دارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة:

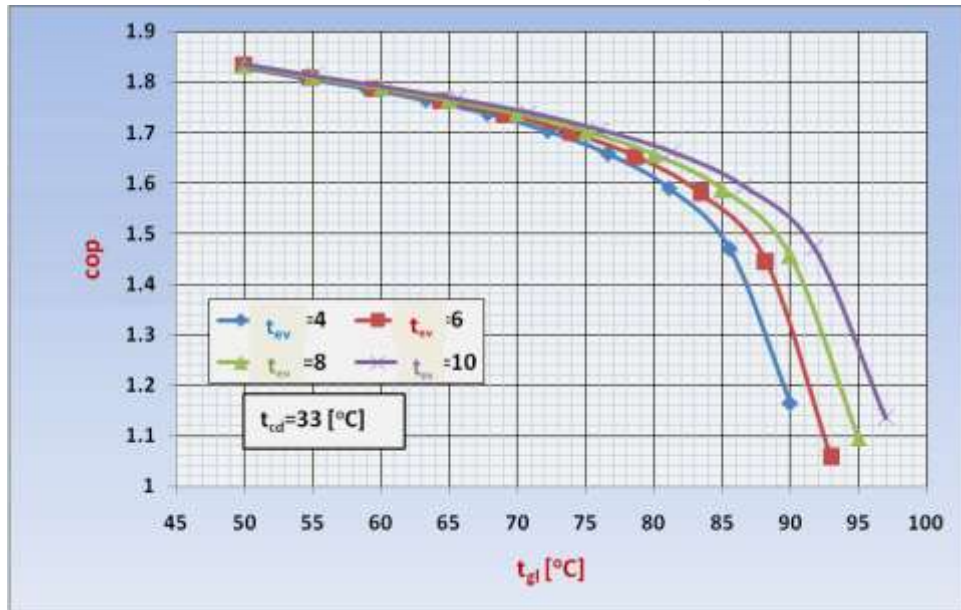
يبين الشكل (8) علاقة معامل أداء الدارة (COP) للدارة الثنائية بدرجة حرارة مولد الضغط العالي (t_{gh}) عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (8): علاقة معامل أداء الدارة الثنائية COP بدرجة حرارة المولد t_{gh}

نلاحظ من الشكل (8) زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة مولد الضغط العالي t_{gh} وصولاً إلى درجة مساوية لـ $155[^\circ\text{C}]$ ؛ ليحافظ بعدها على قيمة ثابتة لـ COP، وتراوح القيم العظمى لـ COP بين (1.5-1.75)، وذلك عند قيم متنوعة لدرجة حرارة المبخر بين $[4-10] [^\circ\text{C}]$ ، ويثبت درجة حرارة المكثف على قيمة وسطية للمجال المفروض سابقاً $[t_{cd}=33 [^\circ\text{C}]$.

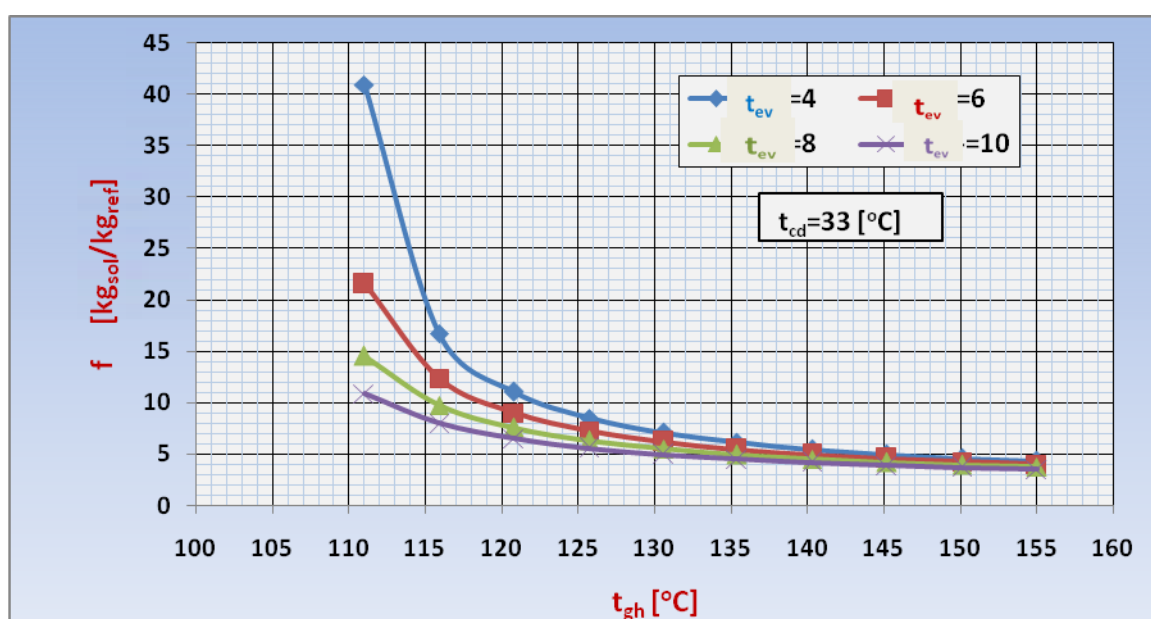
ويبين الشكل (9) علاقة معامل أداء الدارة COP للدارة الثنائية بدرجة حرارة مولد الضغط المنخفض t_{gl} عند درجة حرارة تكثيف $[t_{cd}=33 [^\circ\text{C}]$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (9): علاقة معامل أداء الدارة COP بدرجة حرارة مولد الضغط المنخفض t_{gl}

نلاحظ من الشكل (9) تناقص معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة مولد الضغط المنخفض t_{g1} ، ويعود ذلك إلى أن مولد الضغط المنخفض LPG يعمل مكثفاً للبخار الأولي لوسيط التبريد الخارج من مولد الضغط العالي HPG، إضافة إلى عمله مولداً حراري من خلال سحب الحرارة من البخار الأولي وبالتالي تبريده وهذا ما يوافق عمل المكثف، وتقديم الحرارة المسحوبة لمحلول العمل الداخل إلى LPG خارجاً من HPG، ليتم توليد البخار الثانوي، وهكذا يتفوق عمل LPG مكثفاً على عمله مولداً حرارياً، وذلك عند قيم متنوعة لدرجة حرارة المبخر بين $[10-4]^{\circ}\text{C}$ ، وبثبات درجة حرارة مكثف مرحلة التبريد الثانية (مكثف البخار الثانوي) على قيمة وسطية للمجال المفروض سابقاً $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$.

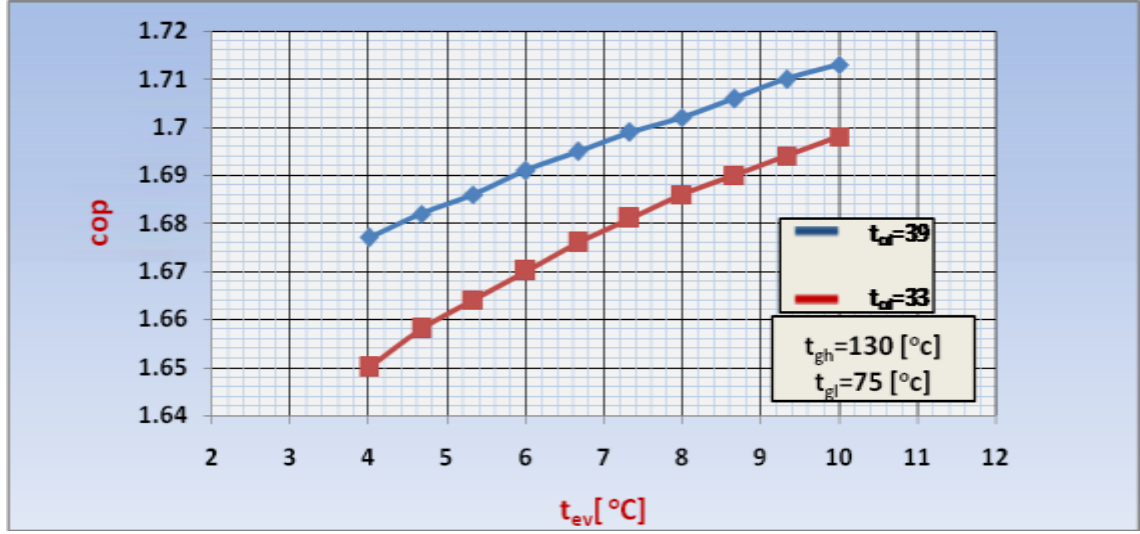
يبين الشكل (10) علاقة عامل التدوير f في الدارة الثنائية بدرجة حرارة مولد الضغط العالي t_{gh} ، وذلك عند درجة تكثيف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (10): علاقة عامل التدوير f للدارة الثنائية مع درجة حرارة مولد الضغط العالي t_{gh}

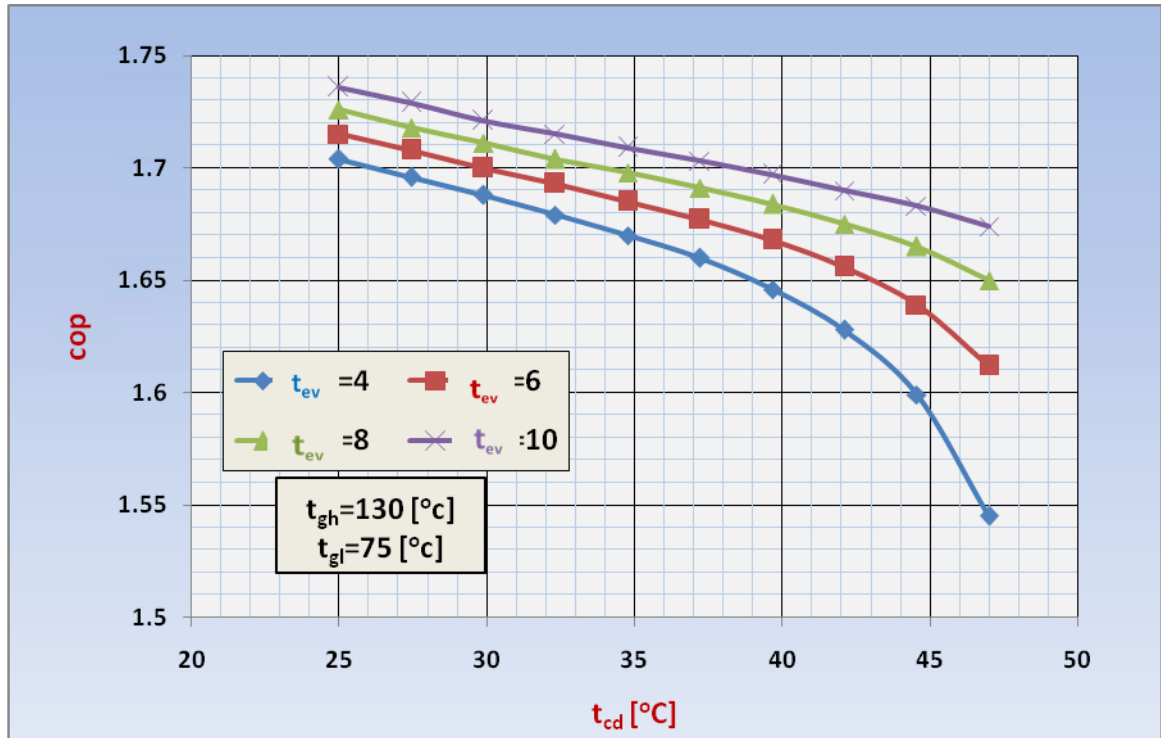
نلاحظ من الشكل (10) أن معامل التدوير في الدارة ينخفض مع زيادة درجة حرارة المولد، ليثبت عند قيمة وسطية ($f=4$)، وذلك عند درجات تبخر مختلفة؛ كما هو موضح، مع ملاحظة أن تغير قيم معامل التدوير يبدأ وينتهي عند مجال درجات الحرارة نفسه للمولد مهما ازدادت درجة حرارة المبخر.

وفيما يأتي يبين الشكل علاقة معامل أداء الدارة COP للدارة الثنائية بدرجة حرارة التبخر t_{ev} عند درجتي حرارة للمكثف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، $t_{cd}=39^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط العالي $t_{gh}=130^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض $t_{g1}=75^{\circ}\text{C}$.



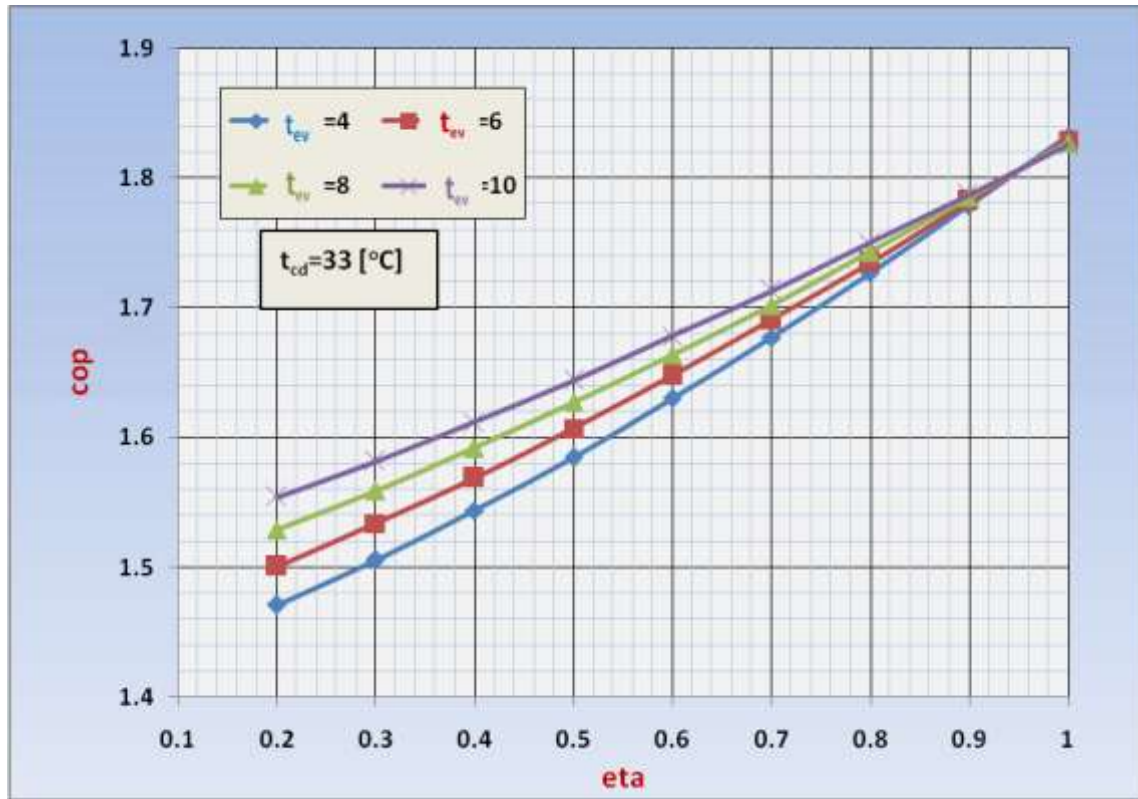
الشكل (11): علاقة معامل أداء الدارة COP للدارة الثنائية بدرجة حرارة التبخر t_{ev}

نلاحظ من الشكل (11) زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة المبخر بين $[4-10]$ $^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجتي حرارة للمكثف $[33-39]$ $^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجة حرارة مولد الضغط العالي $t_{gh}=130$ $^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض $t_{gl}=75$ $^{\circ}\text{C}$ ، مع ملاحظة أن COP يأخذ قيمة أكبر عند $t_{cd}=33$ $^{\circ}\text{C}$. يبين الشكل علاقة معامل أداء الدارة للدارة الثنائية COP بدرجة حرارة التكثيف t_{cd} ، وذلك عند درجة حرارة $t_{gh}=130$ $^{\circ}\text{C}$ لمولد الضغط العالي، ودرجة حرارة $t_{gl}=75$ $^{\circ}\text{C}$ لمولد الضغط المنخفض، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (12): علاقة معامل أداء الدارة للدارة الثنائية COP بدرجة حرارة المكثف t_{cd}

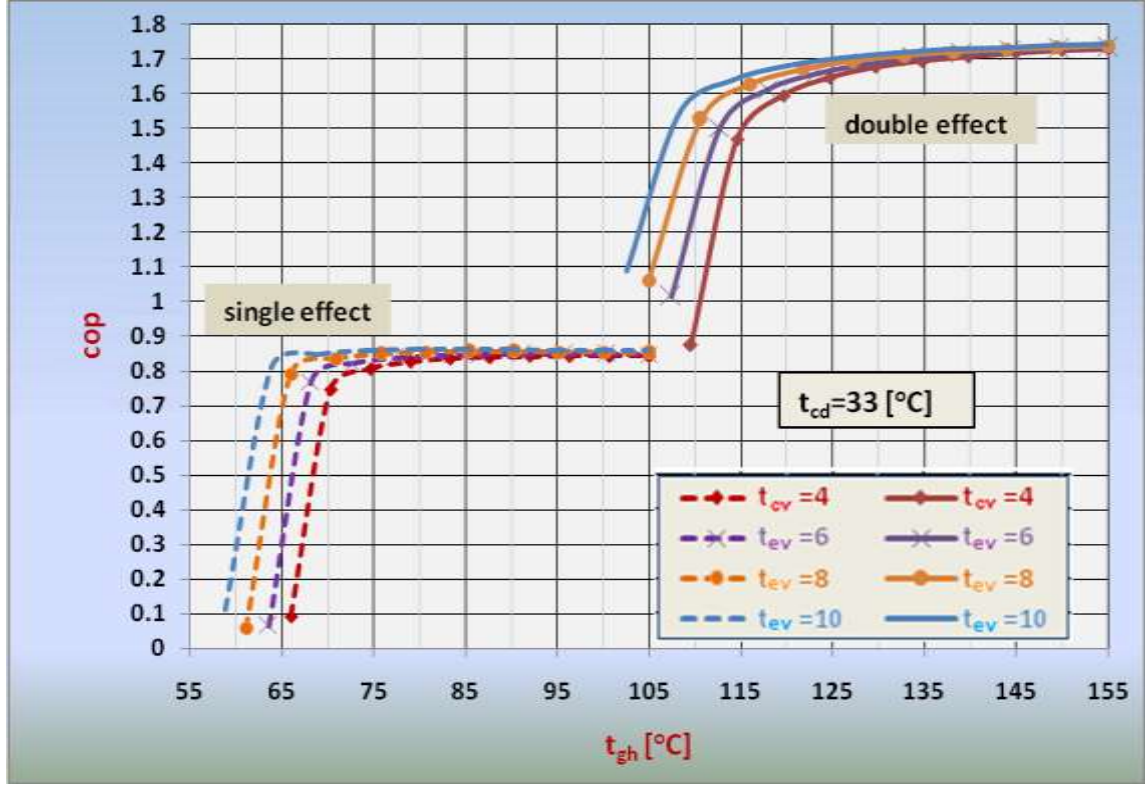
نلاحظ من الشكل (12) تناقص معامل أداء الدارة COP مع زيادة درجة حرارة المكثف t_{cd} ، وذلك عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر بين $[10-4]^{\circ}\text{C}$ ، وبثبات درجة حرارة مولد الضغط العالي على الدرجة $t_{gh}=130^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض على $t_{gl}=75^{\circ}\text{C}$.
 ويبين الشكل الآتي علاقة معامل أداء الدارة COP للدارة الثنائية بكفاءة المبادل الحراري η عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (13): علاقة معامل أداء الدارة للدارة الثنائية COP بفعالية المبادل الحراري η

نلاحظ من الشكل (13) زيادة معامل أداء الدارة COP مع زيادة مردود المبادل الحراري η وصولاً إلى قيمة واحدة عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر بين $[10-4]^{\circ}\text{C}$ ، وبثبات درجة حرارة المكثف على قيمة وسطية $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند درجة حرارة مولد الضغط العالي $t_{gh}=130^{\circ}\text{C}$ ، ودرجة حرارة مولد الضغط المنخفض $t_{gl}=75^{\circ}\text{C}$.

ويبين الشكل الآتي تمثيلاً لنتائج كلتا دارتي التبريد الامتصاصيتين أحادية التأثير، وثنائية بغية الموازنة بين قيم معامل أداء الدارة COP لكلتيهما عند تغييرها مع درجة حرارة المولد، وذلك عند درجة حرارة تكثيف $t_{cd}=33^{\circ}\text{C}$ ، وعند قيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر.



الشكل (14): موازنة معامل أداء الدارة COP مع درجة حرارة المولد t_g في كل من الدارتين الأحادية والثنائية

نلاحظ من الشكل (14) ارتفاع معامل أداء الدارة الثنائية قياساً بمعامل أداء الدارة الأحادية، ليعادل تقريباً ضعفه عند شروط العمل نفسها، وذلك مع ازدياد درجة حرارة المولد وصولاً إلى قيمة أعظمية تبقى ثابتة عندها مهما ازدادت درجة حرارة المولد، مع ملاحظة ارتفاع قيم معامل أداء كلتا الدارتين مع ارتفاع درجة حرارة المبخر. وعند التحقق من قانون مصونية الطاقة؛ وهو:

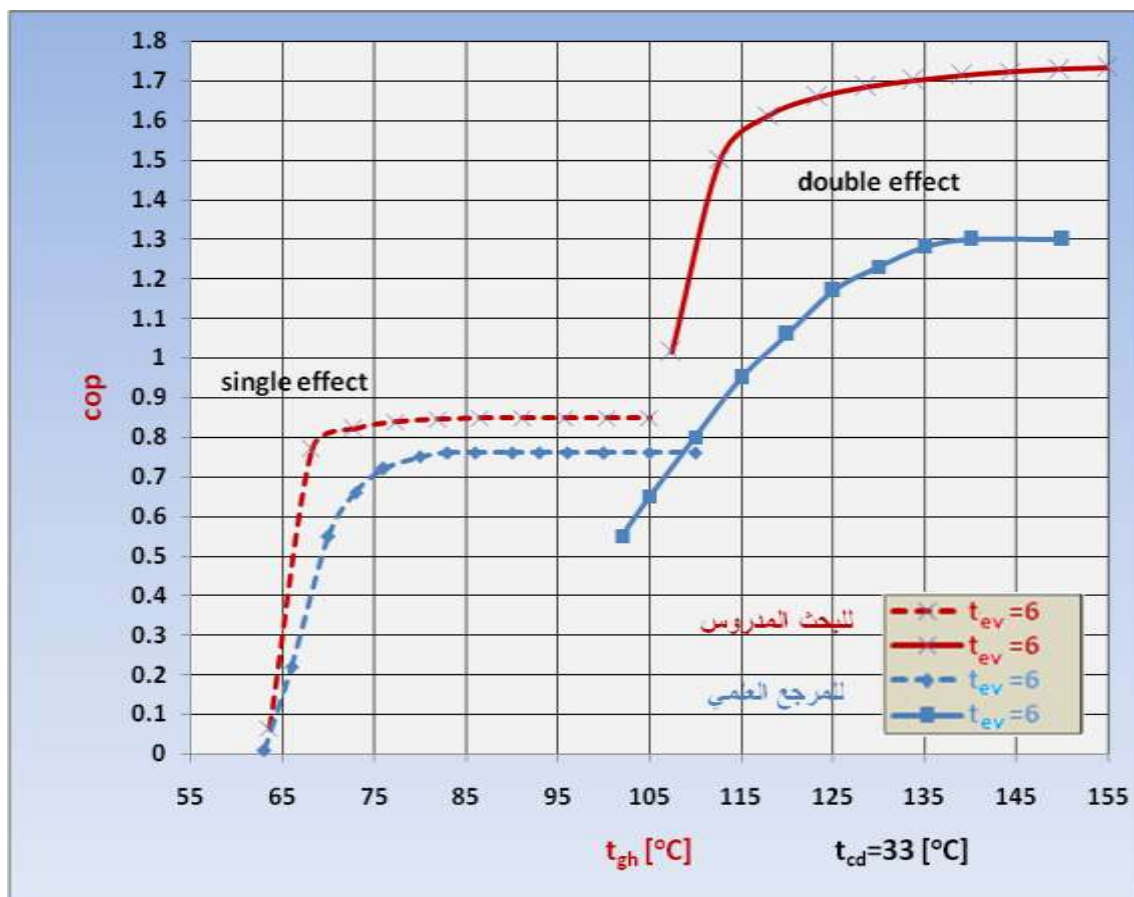
$$Q_g + Q_{ev} = Q_a + Q_c$$

$$Q_g + Q_{ev} = 478.9 [kw] \quad \text{نجد أن}$$

$$Q_a + Q_c = 479 [kw]$$

نلاحظ وجود تقارب كبير بين قيم طرفي العلاقة، وعليه تبلغ نسبة الخطأ (0.18)

وفيما يأتي سنجري موازنة بين نتائج هذا البحث، ونتائج أحد المراجع العلمية [10]. للتأكد من وثوقية دارستنا عند المعطيات الآتية: استطاعة التبريد $Q_{ev}=300 [kW]$ ، ودرجة حرارة المكثف $t_{cd}=33[°C]$ ، ومردود المبادل الحراري $\eta=0.7$ ، درجة حرارة المبخر $6 [°C]$.



الشكل (15): موازنة النتائج في كل من الدارتين الأحادية والثنائية بين البحث المدروس ومرجع علمي آخر
 نلاحظ من الشكل (15) ارتفاع قيم معامل أداء الدارة لكنتا الدارتين الأحادية والثنائية للبحث المدروس عن قيمه في أحد المراجع العلمية بشكل واضح، وعند شروط العمل نفسها تماماً، وهذا ماتم التوصل إليه من خلال استثمار برنامج النمذجة الرياضي الذي تم وضعه لكنتا الدارتين باستخدام برنامج EES.

الاستنتاجات، والتوصيات:

- قمنا في هذا البحث برسم المخططات البيانية التفصيلية باستخدام محلول عمل ماء- بروميد الليثيوم، وعند شروط عمل مختلفة، ولكنها موحدة لكل من دارتي التبريد الامتصاصية أحادية التأثير، وثنائية التأثير، ثم تمثيل النتائج على مخطط مشترك لكنتا الدارتين بهدف الموازنة بينهما، وتم التوصل إلى النتائج الآتية:
- يزداد معامل الأداء لدارة التبريد الامتصاصية أحادية التأثير مع ازدياد درجة حرارة كل من المولد، والمبخر، وفعالية المبادل الحراري، ويتناقص مع ازدياد درجة حرارة المكثف.
 - يزداد معامل أداء الدارة الثنائية مع ازدياد درجة حرارة كل من مولد الضغط العالي، والمبخر، وفعالية المبادل الحراري، ويتناقص مع ازدياد درجة حرارة مكثف مرحلة التبريد الثانية، ويتناقص مع زيادة درجة حرارة مولد الضغط المنخفض؛ كون هذا الأخير يعمل مكثفاً أيضاً لمرحلة التبريد الأولى.
 - ينخفض معامل التدوير لكنتا الدارتين أحادية التأثير، وثنائية التأثير مع ازدياد درجة حرارة كل من المولد والمبخر.

- تعمل دارة التبريد الامتصاصية أحادية التأثير ضمن المجالات $t_{cd}=(25-37)[^{\circ}C]$ ، $t_{g}=(55-105)[^{\circ}C]$ أما الدارة ثنائية التأثير ذات التدفق التسلسلي فتعمل ضمن $t_{cd}=(25-47)[^{\circ}C]$ ، $t_{gn}=(100-155)[^{\circ}C]$
- تعمل دارة التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير عند درجات تشغيل أعلى من الدارة أحادية التأثير، لنحصل على معامل أداء أعلى، ويمكننا استخدام الطاقة الشمسية من خلال اللواقط ذات الأنابيب المفرغة؛ لتغطية القسم الأكبر من الحرارة اللازمة، وتحقيق وفر اقتصادي.
- إن ارتفاع معامل الأداء للدارة ثنائية التأثير يسهم في إمكانية استخدامها عند استطاعات تبريد مرتفعة، وهذا ما تحتاج إليه العديد من آلات التبريد.
- وبالنتيجة يمكن استخدام نتائج هذه الدراسة لاختيار ظروف التشغيل الملائمة لدارة التبريد الامتصاصية ثنائية التأثير، كما يمكن أن تُعدّ مصدراً مرجعياً لتطوير الدارة أحادية التأثير، واستخدام محاليل عمل أخرى غير محلول (ماء - بروميد الليثيوم).

المصطلحات:

\dot{Q}_{gen} : كمية الحرارة المقدمة إلى المولد [kW]	f : معامل التدوير (kgSol/kg ref)
W_p : عمل المضخة [kW]	h : الإنثالبي النوعي (J/kg)
\dot{Q}_a : كمية الحرارة المنتجة في الماص [kW]	\dot{m} : التدفق الكتلي (kg/s)
\dot{Q}_{cd} : كمية الحرارة المنتجة في المكثف [kW]	eta : مردود المبادل الحراري
\dot{Q}_{ev} : كمية الحرارة المسحوبة بالمبخر (حمل التبريد) [kW]	t : درجة الحرارة المئوية [°C]
η : مردود المبادل الحراري	\dot{m}_a : تدفق المحلول الفقير المتجه إلى الماص
\dot{m}_d : تدفق بخار وسيط التبريد الخارج من المولد.	عبر المبادل الحراري.
\dot{m}_r : تدفق المحلول الغني الخارج من الماص إلى المولد.	

المراجع:

- [1] EICKER, U. *Solar Technologies For Buildings*. 1st ed, John Willey & Sons Ltd, Australia & Asia & Canada, 2003, 341.
- [2] Mazloumi, M.; Naghashzadegan, M.; Javaherdeh, K. Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system with parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management* 49. (2008): 2820–2832.
- [3] Wang, S. K; Lavan, Z. Air-Conditioning and Refrigeration. *Mechanical Engineering Handbook* .(1999): 161.
- [4] Jaruwongwittaya, Tawatchai; Chen, Guangming. Renewable energy with absorption chillers in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14. (2010): 1437-1444.
- [5] Gebreslassie, Berhane H.; Medrano, Marc; Boer, Dieter. Exergy analysis of multi-effect water–LiBr absorption systems: From half to triple effect. *Renewable Energy* xxx. (2010): 1–10.
- [6] Kaushik, S. C.; Arora, Akhilesh. Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water–lithium bromide absorption refrigeration systems. *international journal of refrigeration* 32. (2009): 1247–1258.

- [7] Gomri, Rabah. Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management* 50. (2009): 1279–1287.
- [8] Bereche, R. P, Palomino, R. G, Nebra, S. A. Thermo-economic Analysis of a Single and Double-Effect LiBr/H₂O Absorption Refrigeration System. *Int. Centre for Applied Thermodynamics (ICAT)* Vol. 12 (No. 2, June 2009). pp. 89-96
- [9] Gomri, Rabah; Hakimi, Riad. Second law analysis of double effect vapour absorption cooler system. *Energy Conversion and Management* 49. (2008): 3343–3348.
- [10] Gomri, Rabah. Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems. *Energy Conversion and Management* 51. (2010): 1629–1636.