

دراسة تأثير محاليل عمل مختلفة على فعالية آلة تبريد امتصاصية شمسية أحادية المرحلة

الدكتور صلاح داوود*

رامي زيود**

(تاريخ الإيداع 24 / 6 / 2010. قُبِلَ للنشر في 5 / 10 / 2010)

□ ملخص □

يتناول البحث دراسة تأثير محاليل عمل مختلفة (أسيون- بروميد الزنك، ماء - بروميد الليثيوم، أمونيا - ثيوسينات الصوديوم، أمونيا - ماء) على فعالية آلة تبريد امتصاصية أحادية المرحلة تعمل بالطاقة الشمسية باستخدام برنامج حاسوبي EES. تم الاعتماد على الخصائص الترموديناميكية لهذه المحاليل وعلى معادلات توازن الطاقة والحرارة وانتقال الكتلة لكل من مكونات الدارة، كما تم إجراء مقارنة لأداء هذه الدارات عند شروط حرارية مختلفة لكل من المولد والمبخر والمكثف.

بينت النتائج أن دارة أسيون- بروميد الزنك تعطي أداء أفضل من دارة ماء - بروميد الليثيوم ، بينما تعطي دارة أمونيا - ثيوسينات الصوديوم أداءً أفضل من دارة أمونيا - ماء. يزداد معامل الأداء لكل دارة مع ازدياد كل من درجة حرارة المولد والمبخر. يسبب ازدياد درجة حرارة المكثف انخفاضاً في أداء النظام لجميع الدارات. تساعد هذه النتائج في اختيار ظروف التشغيل للنظم القائمة وتحقيق التشغيل الأمثل لها.

الكلمات المفتاحية: امتصاصية - تبريد - طاقة شمسية - معامل الأداء - محاليل عمل

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
**طالب دراسات عليا(ماجستير) - قسم هندسة القوى الميكانيكية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية- سورية.

Study the Effect of Different Working Solutions on the Efficiency of Single Stage Solar Absorption Refrigeration Machine

Dr. Salah Dawood*
Rami zayoud**

(Received 24 / 6 / 2010. Accepted 5 / 10 / 2010)

□ ABSTRACT □

This study discusses the effect of different working solutions (acetone–zinc bromide, water- lithium bromide, ammonia-sodium thiocyanate, ammonia- water) on the efficiency of single stage solar absorption refrigeration machine using a computer simulation model EES. The model is based on thermodynamic properties for these working fluids and on detailed mass and energy balance and heat and mass transfer for the cycle components. The performances of these four cycles against various generator, evaporator, and condenser temperatures are compared.

The results show that the acetone–zinc bromide cycle gives better performance than the water- lithium bromide cycle. The ammonia-sodium thiocyanate cycle gives better performance than the ammonia- water. Increasing generator temperatures and evaporator cause are increasing in system performance for each cycle. Increasing condenser temperatures cause a decrease in system performance for each cycle.

These results can be used in selecting operating conditions for existing systems and for maintain optimum operation of the system.

Keywords: absorption; refrigeration; solar energy; coefficient of performance (COP) ; working fluids.

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

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

مقدمة:

تركزت الأبحاث خلال العقود القليلة الماضية على الاستفادة من مصادر الطاقات المتجددة وتبؤات الطاقة الشمسية مكاناً مهماً ضمن البدائل المتعلقة بالطاقات المتجددة، وتأتي أهميتها باعتبارها طاقة هائلة من حيث مخزونها وكميتها إضافةً لكونها طاقة مجانية، يعتمد استخدامها على الكلفة التأسيسية فقط. تتوزع الطاقة الشمسية على سطح الكرة الأرضية، وتصل إلى الجميع دون حاجة لنقلها وتوزيعها، وهي عملية من ناحية استخدامها، وقابلة للتحويل إلى أنواع أخرى من الطاقة، كالطاقة الحرارية، والميكانيكية، والكهربائية. كما تعد مصدرًا نظيفاً للطاقة من حيث تأثيرها على البيئة، وهي طاقة مباشرة وسهلة الاستخدام، متجددة ومستمرة الحفاظ على نفس الجودة، ولا تخضع لاحتكار الشركات أو المستثمرين بل يمكن أن يستفيد منها جميع سكان الأرض.

واستخدمت الطاقة الشمسية كمصدرٍ للطاقة في مختلف تطبيقات التبريد وخاصة في آلات التبريد الامتصاصية. فقد تم إجراء تجارب على نموذج مخبري لآلة تبريد امتصاصية عاملة على محلول NH₃-H₂O وقد أعطت الآلة درجة حرارة تبريد أقل من [°C] 2- عند درجة حرارة للمولد [°C] 73 ، أما معامل الأداء الذي تم التوصل إليه للآلة COP فتراوح بين قيمة % (28 ÷ 24) [1]، و تم التحقق مما سبق بتطبيق بحث تجريبي على وحدات تبريد امتصاصية صغيرة عاملة على محلول NH₃-H₂O [2]. كما بنيت العديد من الوحدات التبريدية العاملة بمحلول H₂O-LiBr في جامعة ماريلاند وقد اختبرت هذه الوحدات باعتماد درجة حرارة للمولد [°C] (95 ÷ 75) وبينت النتائج أن درجة التبريد التي تم الحصول عليها [°C] (16 ÷ 12) ومعامل الأداء cop بين % (75 ÷ 60) [3]. و بالنسبة لوحدات التبريد العاملة بمحلول (acetone/ZnBr₂) فقد تبين إمكانية قيادتها بدرجة حرارة للمولد تصل حتى [°C] 55 عند درجة حرارة مبخر مساوية لـ [°C] 13 ودرجة حرارة تكثيف [°C] 27 و تغيرت قيمة معامل الأداء cop بالمجال % (70 ÷ 40) [4]. أما بالنسبة لوحدات التبريد العاملة بمحلول (NH₃-NaSCN) فقد تبين أن معامل أدائها يصل تقريباً إلى 55% عند درجة حرارة للمولد تتراوح بين [°C] (95 ÷ 90) ودرجة حرارة تكثيف مساوية لـ [°C] 25 ودرجة حرارة مبخر [°C] 10- [5].

من خلال العرض السابق للأبحاث العلمية والمراجع الخاصة بآلات التبريد الامتصاصية نلاحظ عدم وجود مقارنة واضحة بين وسائط العمل السابقة عند نفس الشروط الحدية لذلك سنقوم في بحثنا بإجراء مقارنة لمحاليل العمل المذكورة عند نفس الشروط الحدية و التي توافقت الشروط المتوفرة في بلادنا.

أهمية البحث وأهدافه:

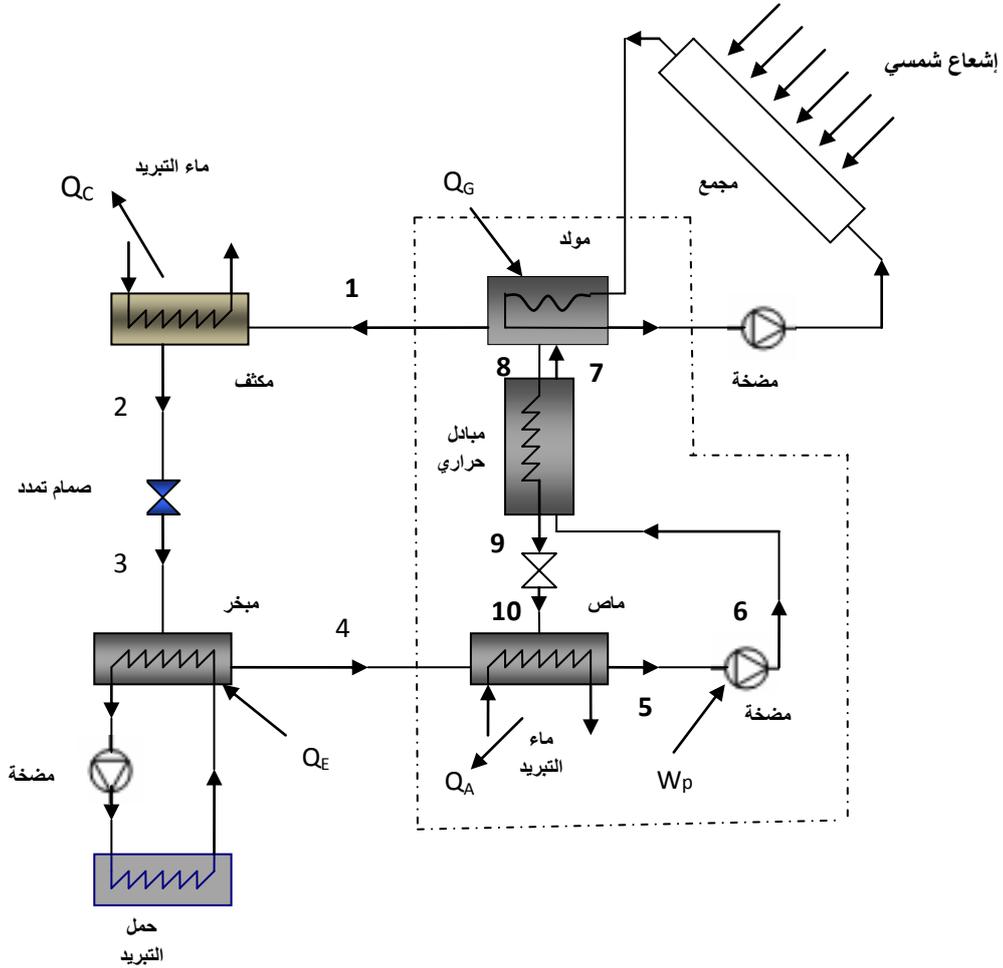
إن هدف البحث هو الاستفادة من الطاقة الشمسية في عمليات التبريد والتكييف وذلك عن طريق اختيار محلول التبريد المناسب، والذي يؤمن أعلى فعالية ممكنة في حال استثمار الطاقة الحرارية الشمسية المتوفرة لتشغيل آلة تبريد امتصاصية. حيث قمنا في الدراسة الحالية بمقارنة معامل الأداء لكل من دارات الامتصاص أحادية المرحلة العاملة بالطاقة الشمسية التي تستخدم محاليل العمل التالية: acetone/ZnBr₂ ، NH₃-NaSCN ، NH₃-H₂O ، H₂O-LiBr. كما يساعد البحث في اختيار ظروف التشغيل المناسبة لأنظمة التبريد وتحقيق التشغيل الأمثل لها.

طرائق البحث ومواده:

- نظام التبريد الامتصاصي:

يتميز نظام التبريد الامتصاصي عن أنظمة التبريد التقليدية بما يلي: نظام تشغيل هادئ، موثوقية عالية، قدرة أبسط وأسهل للتحكم بالآلية، صيانة أقل، ومرشح كنظام تشغيل مستقبلي فعال واقتصادي يستخدم الطاقة الشمسية في تطبيقات التبريد. تعتبر دارة التبريد الامتصاصية البديل الأفضل نظراً لأنها تستخدم الطاقة الحرارية المجمعة من الشمس دون الحاجة إلى تحويلها إلى طاقة ميكانيكية كما هو الحال في دارة انضغاط البخار.

يوضح الشكل (1) رسماً تخطيطياً لدارة تبريد امتصاصية عاملة بالطاقة الشمسية. تستخدم الدارة محلولاً متجانساً من مادتين يتم فصل إحدى المادتين من المحلول على شكل بخار يعمل كوسيط تبريد. يتم في الدارة الامتصاصية استخدام ثلاث وحدات وهي مولد وماص ومضخة ميكانيكية، عوضاً عن الضاغط الميكانيكي المستخدم في دارة التبريد التقليدية ذات الأبخرة المضغوطة ويضاف إلى هذه الوحدات الثلاث مبادل حراري من أجل تحسين أداء الدارة، وتعمل دارة التبريد بالامتصاص عند ضغطين مختلفين.



الشكل (1) رسم تخطيطي لنظام بسيط لدورة تبريد بالامتصاص تعمل بالطاقة الشمسية

الضغط العالي في الدارة هو ضغط المكثف الذي يتساوى مع ضغط المولد، بينما يمثل ضغط المبخر الضغط المنخفض الذي يتساوى مع ضغط الماص. تعمل المضخة على رفع ضغط المحلول من الضغط المنخفض إلى الضغط المرتفع. يتم تسخين المحلول في المولد بواسطة الحرارة الناتجة عن الطاقة الشمسية لبدء بخار وسيط التبريد بالانفصال عن المحلول متجهاً إلى المكثف حيث يتم تكاثفه، ثم ينخفض ضغط وسيط التبريد قبل دخوله المبخر عن طريق تمريره عبر صمام تمدد. يتم الحصول على حمل التبريد في المبرد نتيجة تبخير وسيط التبريد عند ضغط منخفض. أما في الماص فيتم امتصاص بخار وسيط التبريد القادم من المبخر بواسطة المحلول العائد من المولد (بعد خفض الضغط خلال صمام التمدد)، و ينتج عن عملية الامتصاص حرارة مما يتطلب تبريد الماص [6]. ويتضح من الشرح السابق أن تشغيل دارة التبريد بالامتصاص يحتاج إلى حرارة تضاف للمولد بدلاً من العمل اللازم للضاغط في حال استعمال دارة التبريد الانضغاطية، كما أن قيمة عمل المضخة ضئيلة بالمقارنة مع كمية الحرارة المضافة إلى المولد، حيث يمكن إهماله نظراً لأن العمل المطلوب لرفع ضغط السوائل يقل كثيراً عن العمل اللازم لضغط غاز أو بخار بين نفس قيمتي الضغط. يعرف معامل الأداء لدارة التبريد بالامتصاص كما يلي:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G + W_P} \quad (1)$$

تحسب عناصر المعادلة (1) من التحليل الترموديناميكي للدارة الموضح فيما يلي:

- التحليل الترموديناميكي للدارة:

تبين المعادلات التالية توازن الطاقة و الكتلة لكل عنصر من عناصر الدارة [7]:

في المولد:

$$\dot{Q}_G + \dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_8 \cdot h_8 = 0 \quad (2)$$

$$= 0 \quad (3) \quad \dot{m}_7 - \dot{m}_1 - \dot{m}_8$$

في المكثف:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{Q}_C - \dot{m}_2 \cdot h_2 = 0 \quad (4)$$

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0 \quad (5)$$

صمام التمدد:

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_3 \cdot h_3 = 0 \quad (6)$$

$$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 \quad (7)$$

$$h_3 = h_2 \quad (8)$$

المبخر:

$$\dot{Q}_E + \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_4 \cdot h_4 = 0 \quad (9)$$

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0 \quad (10)$$

الماص:

$$\dot{m}_4.h_4 + \dot{m}_{10}.h_{10} - \dot{Q}_A - \dot{m}_5.h_5 = 0 \quad (11)$$

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_{10} - \dot{m}_5 = 0 \quad (12)$$

صمام التمدد:

$$\dot{m}_9.h_9 - \dot{m}_{10}.h_{10} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0 \quad (14)$$

$$h_9 = h_{10} \quad (15)$$

المبادل الحراري للمحلول:

$$\dot{m}_6.h_6 - \dot{m}_7.h_7 + \dot{m}_8.h_8 - \dot{m}_9.h_9 = 0 \quad (16)$$

$$\dot{m}_6 - \dot{m}_7 = 0 \quad (17)$$

$$\dot{m}_8 - \dot{m}_9 = 0 \quad (18)$$

ويعطى مردود المبادل الحراري بالعلاقة التالية:

$$\eta_{SHE} = \frac{h_8 - h_9}{h_8 - h_6} \quad (19)$$

$$h_9 = h_8 - \eta_{SHE}(h_8 - h_6) \quad (20)$$

مضخة المحلول:

$$W_p = \dot{m}_5 (h_6 - h_5) = \dot{m}_5 \cdot v_6 \cdot (p_6 - p_5) = \dot{m}_5 \cdot v_6 \cdot (p_c - p_E) \quad (21)$$

$$\dot{m}_5 - \dot{m}_6 = 0 \quad (22)$$

وبإهمال عمل المضخة ينتج:

$$h_6 = h_5 \quad (23)$$

معامل التدوير ويعرف: بأنه نسبة كمية المحلول الخارج من الماص إلى كمية البخار الداخلة إلى المكثف:

$$f = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_1} \left(\frac{kg_{sol}}{kg_{ref}} \right) \quad (24)$$

معامل أداء الدارة:

$$(25) COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G + W_P}$$

وبإهمال عمل المضخة:

$$(26) COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G}$$

موازنة كتلة وسيط التبريد:

$$\dot{m}_7 X_7 = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_8 X_8 \quad (27)$$

معادلة توازن الطاقة للدارة:

$$\dot{Q}_G + \dot{Q}_E + W_P = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C \quad (28)$$

قمنا في الدراسة باستخدام محاليل العمل التالية:

أ- ماء - بروميد الليثيوم (H₂O-LiBr): الماء هو وسيط التبريد وبروميد الليثيوم هو المادة الماصة.

ب- أمونيا - ماء (NH₃-H₂O): الأمونيا هي وسيط التبريد والماء هو المادة الماصة.

ت- أمونيا - ثيوسينات الصوديوم (NH₃-NaSCN): الأمونيا هي وسيط التبريد وثيوسينات الصوديوم هي المادة الماصة.

ث- أسيتون - بروميد الزنك (acetone/ZnBr₂): الأسيتون هو وسيط التبريد وبروميد الزنك هو المادة الماصة. والجدير ذكره أنه في الآونة الأخيرة تم البدء باستخدام المحلول العامل أسيتون- بروميد الزنك في الدول المتقدمة لذلك كان لابد من اختياره في هذا البحث لاختباره بما يتوافق مع معطيات الطاقة الشمسية في سورية.

إن الخصائص الحرارية للمحاليل من ضغط ودرجة حرارة وتركيز وانتالبي وكثافة يعتمد بعضها على بعض وهي ضرورية للنمذجة الرياضية لأنظمة التبريد الامتصاصية، حيث تم استخدام الخصائص الحرارية لوسيط التبريد من مخرج المولد إلى مدخل الماص، وفي باقي أجزاء الدارة تم استخدام الخصائص الحرارية للمحلول. ونبين فيما يلي الخصائص الحرارية لمحاليل العمل التي سيتم استخدامها:

1- وسيط التبريد NH₃:

في مجالات درجة الحرارة والضغط المعتادة في تطبيقات التبريد $-40 \leq t \leq 220$ [°C] ، $1 \leq P \leq 30$ bar ، فإن الضغط ودرجة الحرارة لوسيط التبريد يرتبطان بالعلاقة التالية [6]:

$$P_{NH_3} = 10^3 \sum_{i=0}^6 a_i (T-273.15)^i \quad (29)$$

كما يتم التعبير عن الانتالبي النوعي للسائل والبخار المشبع لـ NH₃ من حيث درجة الحرارة على النحو التالي [6]:

$$h_{l(NH_3)} = \sum_{i=0}^6 b_i (T-273.15)^i \quad (30)$$

$$h_{v(NH_3)} = \sum_{i=0}^6 c_i (T-273.15)^i \quad (31)$$

حيث يبين الجدول (1) قيم الثوابت للمعادلات السابقة.

جدول (1) قيم الثوابت للمعادلات (29) و (30) و (31)

i	ai معادلة (29)	bi معادلة (30)	ci معادلة (31)
0	$4,2871 \cdot 10^{-1}$	$1,9879 \cdot 10^2$	$1,4633 \cdot 10^3$
1	$1,6001 \cdot 10^{-2}$	$4,4644 \cdot 10^0$	$1,2839 \cdot 10^0$
2	$2,3652 \cdot 10^{-4}$	$6,2790 \cdot 10^{-3}$	$-1,1501 \cdot 10^{-2}$
3	$1,6132 \cdot 10^{-6}$	$1,4591 \cdot 10^{-4}$	$-2,1523 \cdot 10^{-4}$
4	$2,4303 \cdot 10^{-9}$	$-1,5262 \cdot 10^{-6}$	$1,9055 \cdot 10^{-6}$
5	$-1,2494 \cdot 10^{-11}$	$-1,8069 \cdot 10^{-8}$	$2,5608 \cdot 10^{-8}$
6	$1,2741 \cdot 10^{-13}$	$1,9054 \cdot 10^{-10}$	$-2,5964 \cdot 10^{-10}$

2- محلول NH₃-H₂O :

تعطى العلاقة بين الضغط ودرجة حرارة الإشباع لخليط الأمونيا و الماء بالعلاقة التالية [8]:

$$\log P = A - \frac{B}{T} \quad (32)$$

حيث إن A, B معاملان يتعلقان بتركيز المحلول X .

العلاقة بين درجة الحرارة والتركيز والانتالي هي كما يلي [8]:

$$h_{(NH_3-H_2O)} = 100 \sum_{i=1}^{16} a_i \left(\frac{T}{273.15} - 1 \right)^{m_i} \bar{X}^{n_i} \quad (33)$$

حيث إن \bar{X} كسر مول الأمونيا وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\bar{X} = \frac{17.03X}{17.03X + 18.015(1-X)} \quad (34)$$

أما قيم الثوابت للعلاقة (33) فهي معطاة بالجدول (2).

جدول (2) قيم الثوابت للمعادلة (33)

i	m _i	n _i	a _i	i	m _i	n _i	a _i
1	0	1	-7,61080.10 ⁰	9	2	1	2,84179.10 ⁰
2	0	4	2,56905.10 ¹	10	3	3	7,41609.10 ⁰
3	0	8	-2,47092.10 ²	11	5	3	8,91844.10 ²
4	0	9	3,25952.10 ²	12	5	4	-1,61309.10 ³
5	0	12	-1,58854.10 ⁰	13	5	5	6,22106.10 ²
6	0	14	6,19084.10 ¹	14	6	2	-2,07588.10 ²
7	1	0	1,14314.10 ¹	15	6	4	-6,87393.10 ⁰
8	1	1	1,18157.10 ¹	16	6	0	3,50716.10 ⁰

3- محلول NH₃-NaSCN :

العلاقة بين الضغط ودرجة حرارة الإشباع لخليط الأمونيا- ثيوسينات الصوديوم تعطى بالعلاقة [6]:

$$\log P = A - \frac{B}{T} \quad (35)$$

حيث إن A, B معاملات تتعلق بتركيز المحلول X .

العلاقة بين الانتالي ودرجة الحرارة والتركيز هي [6]:

$$h_{(NH_3-NaSCN)} = A + B(T-273.15) + C(T-273.15)^2 + D(T-273.15)^3 \quad (36)$$

حيث إن A, B, C, D معاملات تتعلق بتركيز المحلول X .

4- وسيط التبريد H₂O :

ضغط الإشباع للماء الصافي P [pa] عند درجة الحرارة T [K] يعطى بالعلاقة التالية [9]:

$$\log P = 10.04999 - 1603.541/T - 104095.51/T^2 \quad (37)$$

يعطى انتالي الماء الصافي (kJ/kg) عند درجة الحرارة (K) بالعلاقة التالية [9]:

$$h_{w(H_2O)} = 4.19(T-273.15) \quad (38)$$

وبشكل مماثل يعطى الانتالي كتابع لدرجة الحرارة (K) بالعلاقة [9]:

$$h_{v(H_2O)} = 2.326[(0.004932T - 2.2493008) P / 6894.76 + (0.80895T - 854.2151086)] \quad (39)$$

5- محلول H₂O-LiBr :

يحدد انتالي محلول بروميد الليثيوم عند التركيز X ودرجة الحرارة T بالعلاقة التالية [9]:

$$h_{(H_2O-LiBr)} = 2.326 \left[\sum_{n=0}^4 A_n X^n + (1.8T-459.67) \sum_{n=0}^4 B_n X^n + (1.8T-459.67)^n \sum_{n=0}^4 C_n X^n \right] \quad (40)$$

حيث يوضح الجدول (3) قيم ثوابت المعادلة:

جدول (3) قيم الثوابت للمعادلة (40)

$A_0 = -1015,7$	$B_0 = 4,68108$	$C_0 = -4,9107.10^{-3}$
$A_1 = 79,5387$	$B_1 = -0,3037766$	$C_1 = 3,83184.10^{-4}$
$A_2 = -2,358016$	$B_2 = 8,44845.10^{-3}$	$C_2 = -1,078963.10^{-5}$
$A_3 = 0,03031583$	$B_3 = -1,047721.10^{-4}$	$C_3 = 1,3152.10^{-7}$
$A_4 = -1,400261.10^{-4}$	$B_4 = 4,80097.10^{-7}$	$C_4 = -5,897.10^{-10}$

يحدد الضغط P والتركيز X ودرجة الحرارة T لبروميد الليثيوم بالعلاقة [9]:

$$\log P = A + B/T + C/T^2 \quad (41)$$

حيث إن A, B, C معاملات تتعلق بتركيز المحلول X.

6- وسيط التبريد الأسيتون:

انتالبي السائل المشبع [10]:

$$h' = 177.185 + 2.145T_s + (1.06e-5)T_s^3 \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (42)$$

انتالبي البخار المشبع [10]:

$$h'' = 1/[0.001336 - (2.172e-6)T_s + (2e-11)T_s^3] \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (43)$$

انتالبي التبخير [10]:

$$\Delta h = 575.5 - 1.048T_s - (7.833e-5)T_s^{2.5} \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (44)$$

تعطي المعادلات التالية الانتالبي والحجم النوعي في منطقة البخار المشبع والمحمص بمجال درجات الحرارة من $[-80 \div 280] [^{\circ}\text{C}]$ والضغط من $(0.0001 \div 100)$ (bar)

$$h = e^{6.62 + 0.0017T - 0.003P} \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (45)$$

$$v = e^{-0.917 + 0.0026T - \ln P} \quad (\text{m}^3/\text{Kg}) \quad (46)$$

تعطي العلاقة بين ضغط البخار ودرجة الحرارة بالعلاقة التالية [11]:

$$\ln \frac{P_s}{P_c} = (1-y)^{-1} (ay + by^{1.5} + cy^3 + dy^6) \quad (47)$$

حيث إن:

$$y = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (48)$$

حيث إن معاملات المعادلات (47) و(48) للأسيتون معطاة في المرجع [12].

7- محلول (acetone/ZnBr2):

العلاقة التجريبية التالية تعبر عن ضغط البخار كتابع لدرجة الحرارة والتركيز بالمجال $0 \leq x \leq 70\%$ و $13 \leq T \leq 100$ [°C]:

$$P_{S_{\text{acetone-zinc bromid}}} = \exp \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} \cdot T^i \cdot X^j \quad (\text{bar}) \quad (49)$$

واحدة درجة الحرارة T هي (°C) و X (Kg zinc-bromide/ Kg solution) %
أما ثوابت هذه العلاقة فهي معطاة في الجدول (4).

جدول (4) ثوابت المعادلة (49)

a_{00}	-2,41 E+0	a_{10}	5,35 E-2	a_{20}	-2,13 E-4
a_{01}	1,72 E-2	a_{11}	-1,16 E-4	a_{21}	3,66 E-6
a_{02}	-5,58 E-4	a_{12}	2,38 E-6	a_{22}	-4,61 E-8

تعطي المعادلة التالية الانتالبي النوعي للمحلول كتابع لدرجة الحرارة والتركيز وبناتج مقبولة بالمجال $0 \leq x \leq 70\%$ و $10 \leq T \leq 100$ [°C]:

$$h_{\text{Ac-ZiBr}_2} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^4 a_{ij} \cdot X^i \cdot T^j \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (50)$$

واحدة درجة الحرارة هي (°C) و X (Kg zinc-bromide/ Kg solution) %
الجدول (5) يعطي ثوابت المعادلة (50).

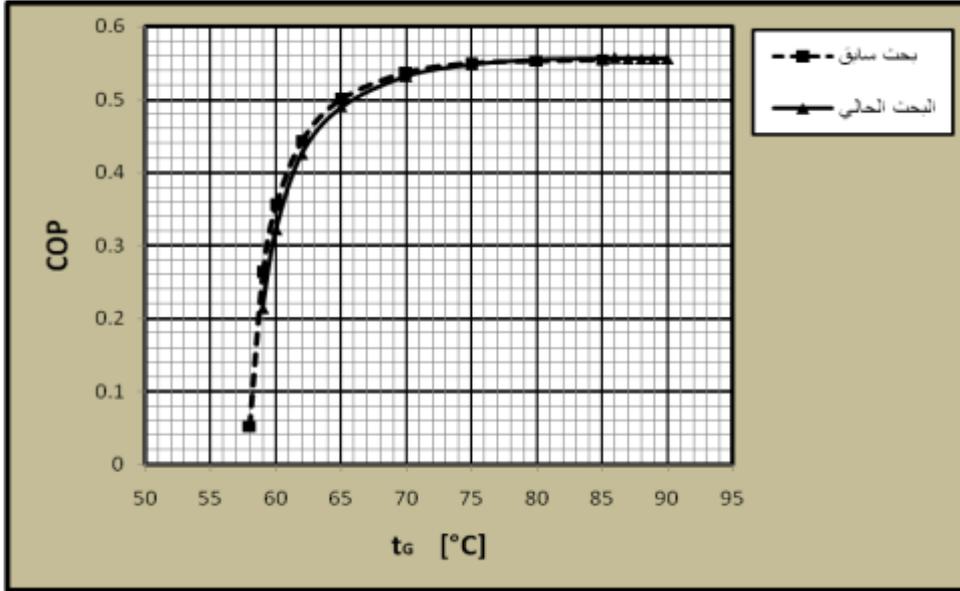
جدول (5) ثوابت المعادلة (50)

a_{00}	176,64 E+0	a_{10}	-2,95 E+0
a_{01}	1,892 E+0	a_{11}	-1,31 E-2
a_{02}	-1,616 E-4	a_{12}	2,8735 E-5
a_{03}	1,486 E-5	a_{13}	-5,02 E-7
a_{04}	-2,439 E-8	a_{14}	1,755 E-9

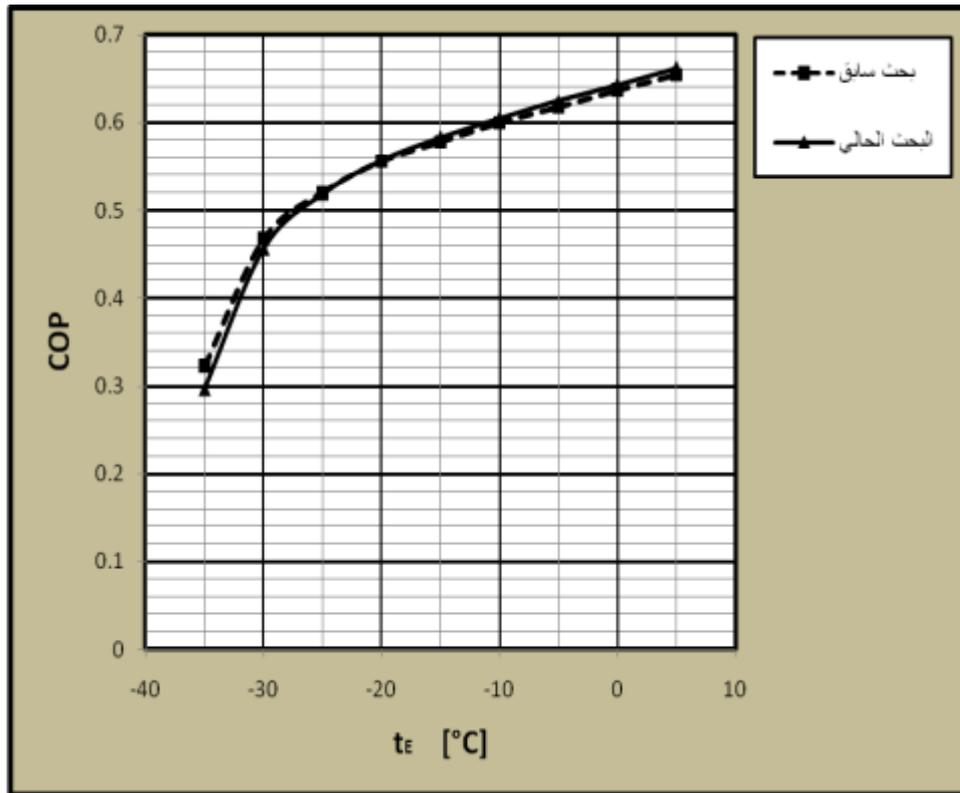
النتائج والمناقشة:

من أجل تحديد ظروف التشغيل المثلى لأنظمة التبريد الامتصاصية الشمسية. فقد تم استخدام برنامج EES عند شروط عمل مختلفة بحيث تحقق دارة الامتصاص أكبر معامل أداء ممكن. ويستخدم برنامج (EES Engineering Equation Solver) للنمذجة الرياضية في المسائل الحرارية حيث يقوم البرنامج بحل المعادلات الرياضية الخطية و غير الخطية و رسم المخططات البيانية، كما يحتوي البرنامج قاعدة بيانات تتضمن الخواص الحرارية والفيزيائية لعدد ضخم من المواد والموائع المستخدمة كوسيلة للبحث العلمي وإنجاز رسائل الدكتوراه والماجستير.

للتأكد من صحة ودقة نتائج البرنامج المنجز قمنا بمقارنة نتائجه مع نتائج من أبحاث منشورة مسبقاً [14]، فحصلنا باستخدام المحلول NH3-NaSCN على المخططات:



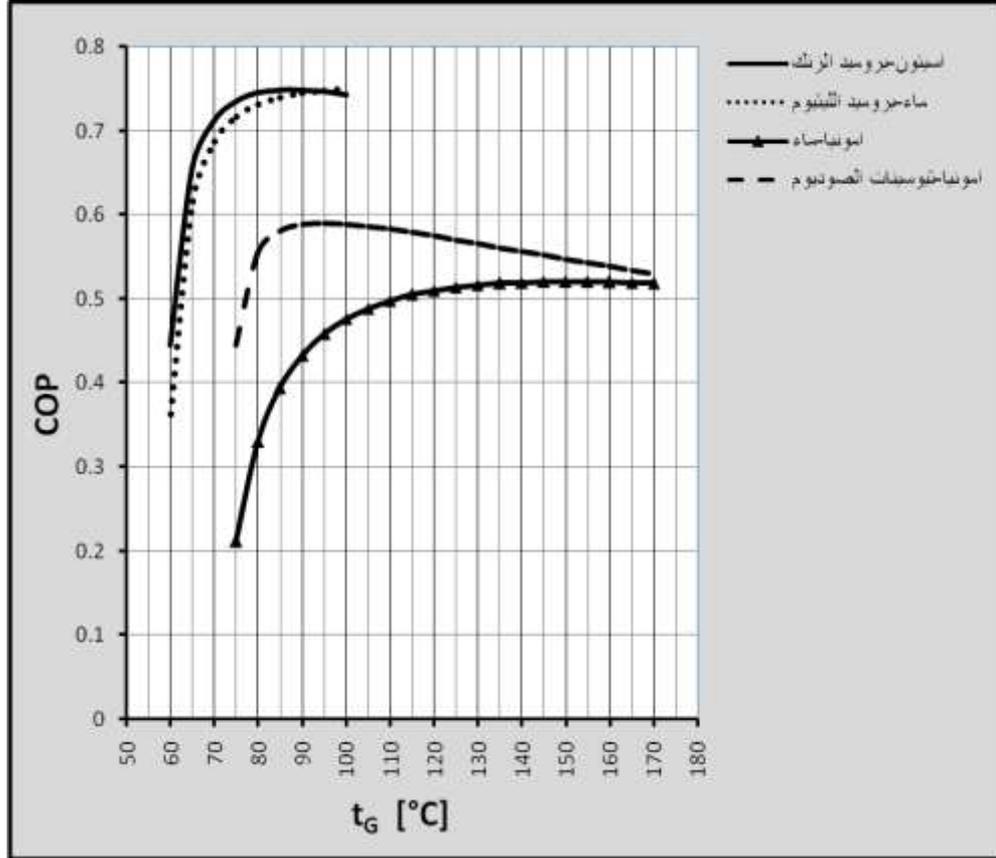
الشكل (2) تغير معامل الأداء مع درجة حرارة المولد



الشكل (3) تغير معامل الأداء مع درجة حرارة المبخر

نلاحظ، من المخططات السابقة أن المقارنة بين الطريقتين طريقة EES المتبعة من قبلنا والمنهجية المتبعة في البحث [14]، أن هناك تقارباً كبيراً في النتائج وهذا ما يؤكد وثوقية البرنامج المنجز وبالتالي نستطيع استخدامه للمقارنة بين باقي المحاليل. وللمقارنة بين محاليل العمل المستخدمة في دراستنا قمنا بتقسيمها إلى مجموعتين اعتماداً على خواصها الترموديناميكية:

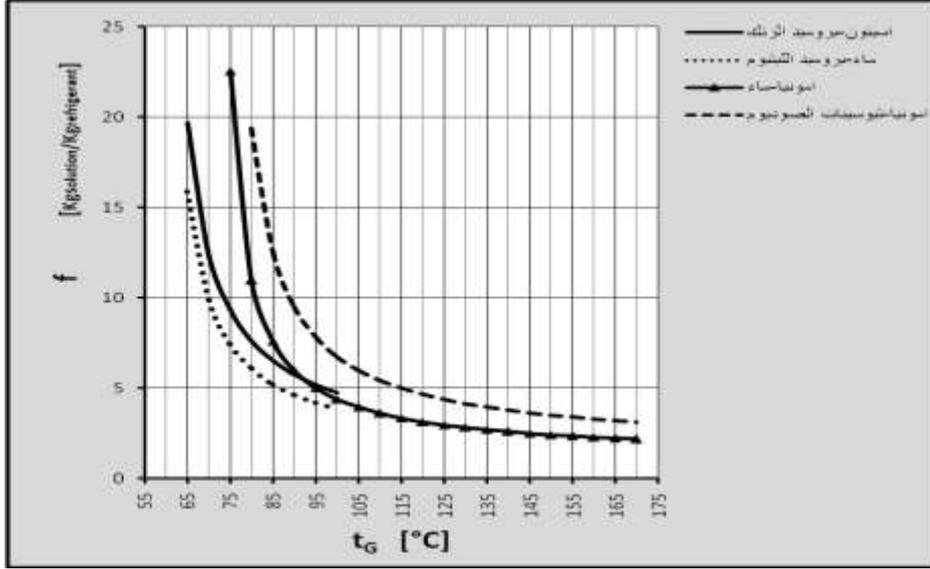
- 1- المجموعة الأولى: H₂O-LiBr ، acetone/ZnBr₂ التي تعمل بدرجة حرارة للمبخر أعلى من +4[°C] ودرجة حرارة للمولد ابتداءً من 60[°C] (وهي مناسبة للعمل في مجال التكثيف) وقد تمت دراستها عند الشروط الحرارية التالية: t_c=30[°C] , t_E=+5[°C] , t_G=65[°C] .
- 2- المجموعة الثانية: NH₃-H₂O ، NH₃-NaScN التي تعمل بدرجة حرارة للمبخر أعلى من 10[°C] - ودرجة حرارة للمولد ابتداءً من 75 [°C] (وهي مناسبة للعمل في مجال التبريد) وقد تمت دراستها عند الشروط الحرارية التالية: t_c=30[°C] , t_E=-5[°C] , t_G=90[°C] .



الشكل (4) تغير معامل الأداء مع درجة حرارة المولد

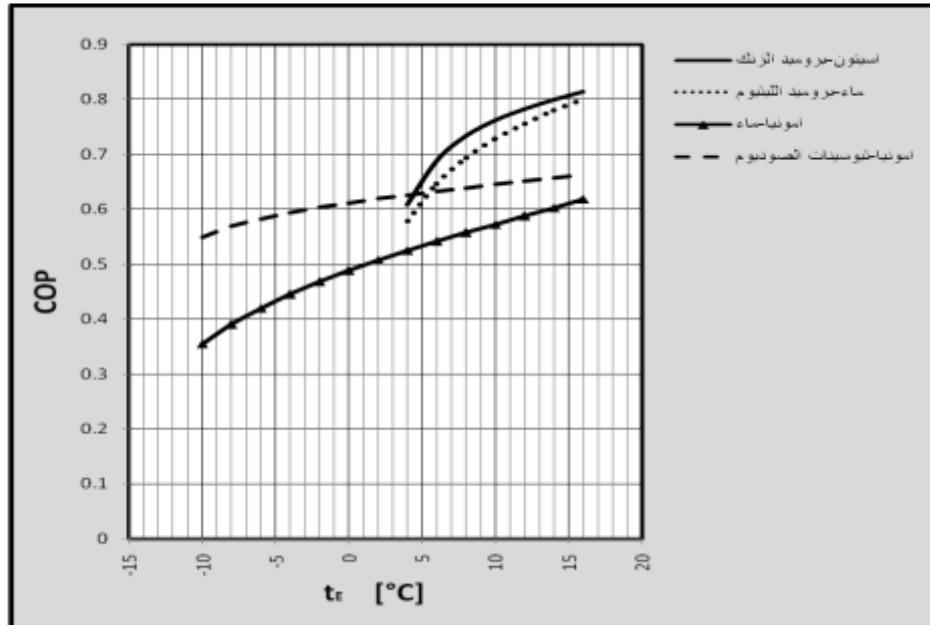
يبين الشكل (4) تغير قيم معامل أداء لدارة التبريد الامتصاصية تبعاً لدرجة حرارة المولد باستخدام كل من المحاليل: H₂O-LiBr ، acetone/ZnBr₂ عند درجة حرارة تبخير t_E=+5[°C] ودرجة حرارة تكثيف t_c=30[°C]. والمحاليل NH₃-H₂O ، NH₃-NaScN عند درجة حرارة تبخير t_E=-5[°C] ودرجة حرارة تكثيف t_c=30[°C]. يتضح من المخطط أنه باستخدام المحلول acetone/ZnBr₂ يتزايد معامل الأداء حتى يصل إلى القيمة العظمى له عند درجة حرارة للمولد مساوية لـ 85[°C] ثم يبدأ بالتناقص بسبب سلوك المحلول تبعاً لخواصه الترموديناميكية عند هذا المجال، بينما تبقى قيم معامل الأداء عند استخدام المحلول H₂O-LiBr متزايدة مع ازدياد درجة حرارة المولد، كما يلاحظ أن قيم معامل الأداء لدارة acetone/ZnBr₂ أعلى منها لدارة H₂O-LiBr عندما تكون درجة حرارة المولد أقل من 95 [°C] وبعد هذه الدرجة تصبح قيم معامل الأداء لدارة H₂O-LiBr أكبر علماً أن قيم معامل الأداء لكلا الدارتين متقارب.

أما بالنسبة للمحلول NH₃-NaScN فيلاحظ تزايد معامل الأداء حتى يصل إلى قيمته العظمى عند درجة حرارة للمولد مساوية لـ [95°C] ثم يبدأ بالتناقص، بينما تبقى قيم معامل الأداء باستخدام المحلول NH₃-H₂O متزايدة مع ازدياد درجة حرارة المولد، و قيم معامل الأداء للمحلول NH₃-NaScN أعلى منها لمحلول NH₃-H₂O و يتناقص الفارق بارتفاع درجة حرارة المولد.



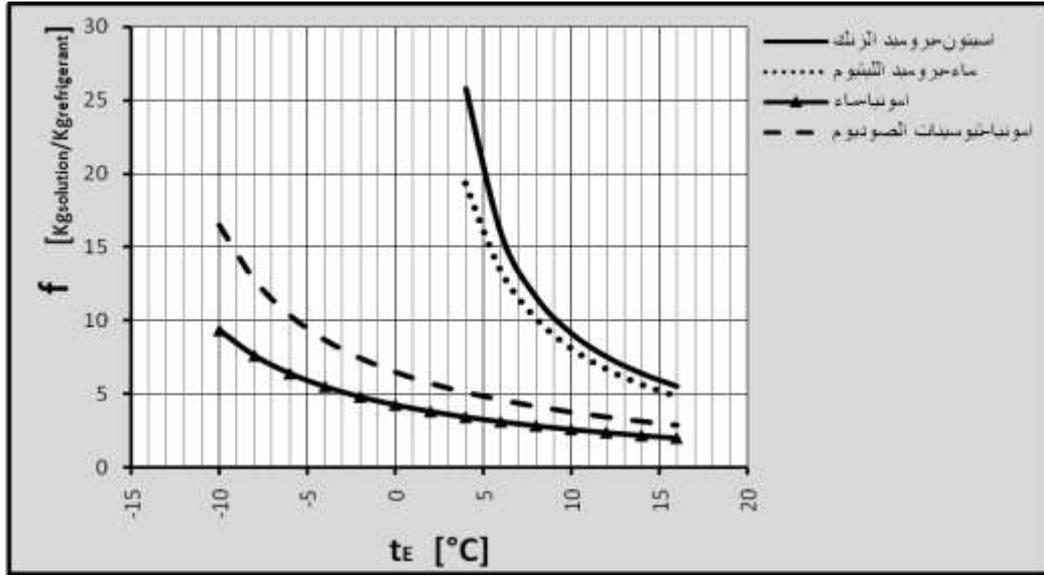
الشكل (5) تغير معامل التدوير مع درجة حرارة المولد

يبين الشكل (5) مقارنة معامل التدوير تبعاً لدرجة حرارة المولد للمحاليل المذكورة عند نفس الشروط الحدية السابقة t_c ، t_E كل حسب المجموعة التي ينتمي إليها. و كما هو واضح إن معامل التدوير لدارة acetone/ZnBr₂ أعلى منها لدارة H₂O-LiBr و معامل التدوير لدارة NH₃-NaScN أعلى منها لدارة NH₃-H₂O، هذا يعني أن المحلول يحتاج إلى تشغيل أسرع أو مضخة أكبر لنقوم بما هو مطلوب للدارات التي تملك معامل التدوير الأكبر، كما أن معامل التدوير لدارة H₂O-LiBr هو الأقل بين الدارات الأربع المبينة كل في مجال عمله.



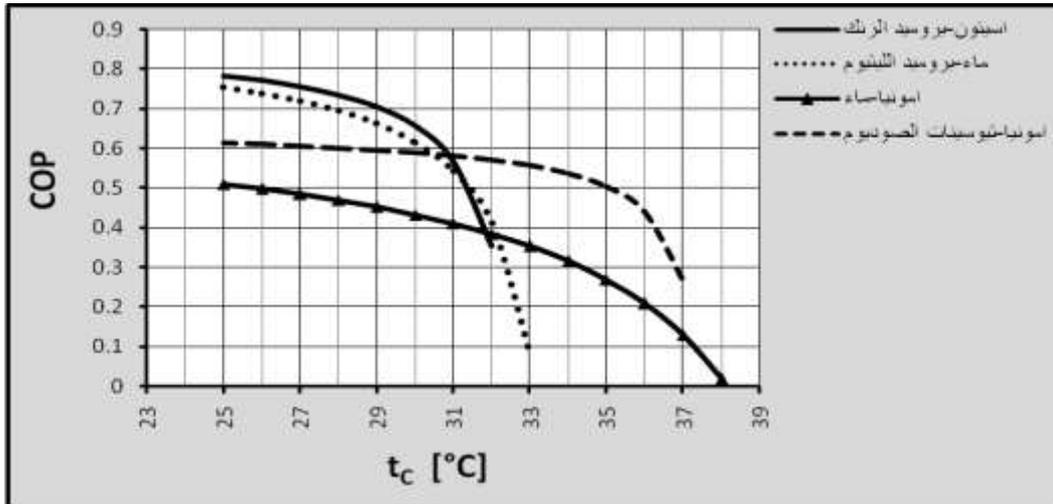
الشكل (6) تغير معامل الأداء مع درجة حرارة المبخر

يبين الشكل (6) مقارنة بين قيم معامل الأداء تبعاً لدرجة حرارة المبخر للمحلولين acetone/ZnBr₂، H₂O-LiBr عند درجة حرارة ثابتة للمولد $t_G=65[^\circ\text{C}]$ ودرجة حرارة تكثيف $t_C=30[^\circ\text{C}]$ وللمحلولين NH₃-NaScN، NH₃-H₂O عند درجة حرارة ثابتة للمولد $t_G=90[^\circ\text{C}]$ ودرجة حرارة تكثيف $t_C=30[^\circ\text{C}]$. فعند درجات حرارة مختلفة للمبخر ابتداءً من $+4[^\circ\text{C}]$ هناك تقارب بمعامل الأداء للدائرتين acetone/ZnBr₂ و H₂O-LiBr وهو أعلى لدائرة acetone/ZnBr₂. إن قيم معامل الأداء لدائرة NH₃-NaScN أعلى منها لدائرة NH₃-H₂O ويتقلص الفارق كلما ارتفعت درجة حرارة المبخر بدءاً من $-10[^\circ\text{C}]$.



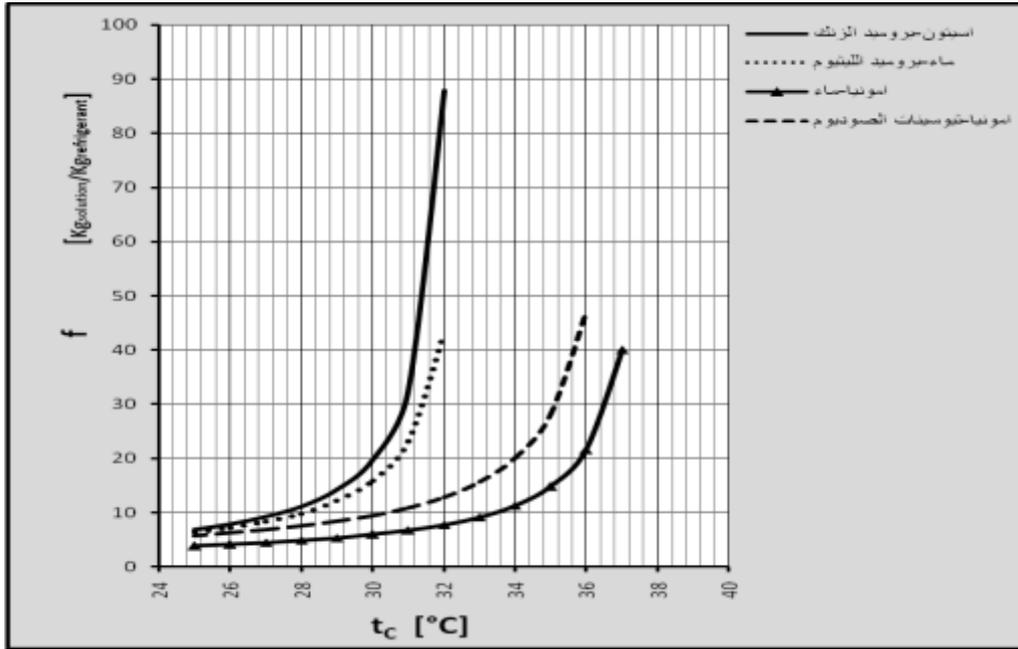
الشكل (7) تغير معامل التدوير مع درجة حرارة المبخر

يبين الشكل (7) مقارنة معامل التدوير تبعاً لدرجة حرارة المبخر عند نفس الشروط الحدية السابقة t_G ، t_C لكل مجموعة، وكما هو واضح إن معامل التدوير لدائرة NH₃-NaScN أعلى منه لدائرة NH₃-H₂O ومعامل التدوير لدائرة acetone/ZnBr₂ أعلى منه لدائرة H₂O-LiBr وبالتالي فإن كلتا الدائرتين NH₃-NaScN، acetone/ZnBr₂ تحتاجان إلى مضخة محلول أكبر أو إلى تشغيل أسرع للمضخة لتقوم بما هو مطلوب وأقل قيمة لمعامل التدوير في كلتا المجموعتين هي لدائرة NH₃-H₂O.



الشكل (8) تغير معامل الأداء مع درجة حرارة المكثف

يوضح الشكل (8) مقارنة بين قيم معامل الأداء تبعاً لدرجة حرارة المكثف للمحاليل المذكورة عند الشروط الحدية $t_E = +5 [^{\circ}\text{C}]$, $t_G = 65 [^{\circ}\text{C}]$ لمجموعة المحاليل الأولى و $t_E = -5 [^{\circ}\text{C}]$, $t_G = 90 [^{\circ}\text{C}]$ للمجموعة الثانية، وكما هو ملاحظ فإن تزايد درجة حرارة المكثف يسبب تناقص في معامل الأداء لكل دارة، و معامل الأداء لدارة acetone/ZnBr2 أعلى منه لدارة H2O-LiBr والحد الأقصى لدرجة حرارة المكثف الذي يمكن أن تعمل عنده الدارة هو $32 [^{\circ}\text{C}]$ لـ acetone/ZnBr2 و $33 [^{\circ}\text{C}]$ لـ H2O-LiBr، والسبب في ذلك هو إمكانية عمل الدارة عند درجة حرارة مولد منخفضة نسبياً الذي يتطلب بدوره درجات تكثيف منخفضة توافق ضغط المولد، أما بالنسبة لمعامل الأداء لدارة NH3-NaScN فإنه أعلى من دارة NH3-H2O والحد الأقصى لدرجة حرارة المكثف هو $37 [^{\circ}\text{C}]$ لـ NH3-NaScN و $38 [^{\circ}\text{C}]$ لـ NH3-H2O.



الشكل (9) تغير معامل التدوير مع درجة حرارة المكثف

يوضح الشكل (9) مقارنة معامل التدوير تبعاً لدرجة حرارة المكثف عند نفس الشروط الحدية السابقة t_E ، كل t_G حسب المجموعة التي ينتمي إليها، إن تزايد درجة حرارة المكثف يؤدي إلى تزايد قيم معامل التدوير لكل دارة وكما هو واضح إن معامل التدوير لدارة NH3-NaScN أعلى منه لدارة NH3-H2O و معامل التدوير لدارة acetone/ZnBr2 أعلى منه لدارة H2O-LiBr وبالتالي فإن كلتا الدارتين NH3-NaScN و acetone/ZnBr2 تحتاجان إلى مضخة محلول أكبر أو إلى تشغيل أسرع للمضخة لتقوم بما هو مطلوب و أقل قيمة لمعامل التدوير في كلتا المجموعتين هي لدارة NH3-H2O.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث تمثيل المخططات التصميمية الحرارية التفصيلية لدارات التبريد الامتصاصية الشمسية ومقارنة أدائها عند استخدام محاليل عمل مختلفة مثل acetone/ZnBr2 ، NH3-NaScN ، H2O-BrLi ، NH3-H2O ، و H2O. وتحديد شروط التشغيل المثلى لكل دارة باستخدام برنامج EES على أساس الخصائص الحرارية لكل محلول وقد تم التوصل إلى النتائج التالية:

- يزداد معامل الأداء لكل دارة مع ازدياد كل من درجة حرارة المولد والمبخر ويسبب ازدياد درجة حرارة المكثف انخفاضاً في أداء النظام لجميع الدارات.
- ينخفض معامل التدوير لكل دارة مع ازدياد كل من درجة حرارة المولد والمبخر ويسبب ازدياد درجة حرارة المكثف ارتفاعاً في معامل التدوير لجميع الدارات.
- تعمل دارتا الامتصاص H₂O-LiBr و acetone/ZnBr₂ في درجات حرارة أعلى من [°C] +4 وبالتالي إمكانية استخدام هذه المحاليل في دارات التبريد الامتصاصية المستخدمة لأغراض تكييف الهواء، مع ملاحظة أن أداء دارة acetone/ZnBr₂ أفضل قليلاً من الدارة الأولى.
- بداية العمل لدارة acetone/ZnBr₂ تتم بمعامل أداء جيد عند درجة حرارة [°C] 60 مما يمكننا من الحصول على الحرارة اللازمة لتشغيلها عن طريق الطاقة الشمسية الحرارية باستخدام المجمعات الشمسية المسطحة رخيصة الثمن.
- استخدام دارتي الامتصاص NH₃-H₂O و NH₃-NaSCN بشكل رئيسي لدرجات تبريد أقل من [°C] 0 ولكنهما تحتاجان إلى درجة حرارة عالية في المولد تتطلب مجمعات شمسية مفرغة ذات التكلفة العالية.
- يلاحظ أن دارة NH₃-NaSCN لا تستطيع العمل تحت درجة الحرارة [°C] -10 للمبخر عند الشروط الحدية المستخدمة في البحث لاحتمال التبلور، و لكن معامل أدائها أفضل من دارة NH₃-H₂O كما هو مبين بالشكل (6).
- يوصى باستخدام نتائج الدراسة لاختيار ظروف التشغيل الملائمة لهذه الدارات، كما يمكن أن تكون مصدراً مرجعياً للمقارنة في تطوير دارات جديدة واستخدام محاليل عمل جديدة.

الملحق

الرموز المستخدمة:	
C_p : السعة الحرارية النوعية عند ضغط ثابت (J/kg K)	\dot{Q}_E : معدل الحرارة المسحوبة بالمبخر (أي حمل التبريد) (Kw)
f : معامل التدوير (kg _{Solution} /kg refrigerant)	\dot{Q}_G : معدل الحرارة المضافة إلى المولد (Kw)
h : الانتالبي النوعي (J/kg)	W_p : العمل المقدم إلى المضخة (Kw)
\dot{m} : التدفق الكتلي (kg/s)	\dot{Q}_A : معدل الحرارة المطروحة في الماص (Kw)
P : الضغط (N/m ²)	\dot{Q}_C : معدل الحرارة المطروحة في المكثف (Kw)
T : درجة الحرارة المطلقة (K)	الدلائل:
t : درجة الحرارة المثوية [°C]	A الماص
X : تركيز المحلول (%)	G المولد
V : الحجم النوعي (m ³ /kg)	C المكثف
ρ : الكثافة (kg/m ³)	E المبخر
η_{SHE} : مردود المبادل الحراري	S الإشباع

المراجع:

- 1- SIERRA,Fz; BEST,R; HOLLAND,Fa. *Experiments on an absorption refrigeration system powered by a solar pond*. Heat Recovery Syst, 1993, CHP 13(5):401–408.
- 2- KUNZE, G. *Efficient solar cooling with an improved ammonia-absorption system*. Renewable Energy World, 3. Jahrgang, 2000, Nr.6, S:111–112, ISSN 1462-6381.
- 3- LIAO, X . *The development of an air-cooled absorption chiller concept and its integration in chp systems*. Ph.D, Thesis,University of Maryland , 2004,154.
- 4- AJIB, S; GU'N'THER, W; KARNO, A. *Optimisation potential of solar thermal driven absorption refrigeration machine under using of a new work solution*. World Renewable Energy, 2006, 19–25 August, Florence, Italy (A5-ST89).
- 5- LINGHUI, Zhu; JUNJIE, Gu. *Second law-based thermodynamic analysis of ammonia/sodium thiocyanate absorption system*. Renewable Energy 35 ,2010, 1940–1946.
- 6- أ.د.مصطفى محمد السيد؛ أ.د.قذري أحمد فتحي؛ د. إبراهيم السعدي. *النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية*. الطبعة الأولى، جامعة الملك عبد العزيز، المملكة العربية السعودية، 1994، 676ص.
- 7- KARNO, Ali; AJIB, S. *Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration machine with new working fluid for solar applications*. Heat Mass Transfer, Vol.45, No.1, 2008, 71–81.
- 8- ARZU, S. *Artificial intelligent methods for thermodynamic evaluation of ammonia–water refrigeration systems*. Energy Conversion and Management 47 ,2006, 3319–3332.
- 9- LIU, Y.L; WANGR.Z. *Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr–H₂O absorption system*. Renewable Energy, Volume 29, Issue 10, August 2004, 1677-1695.
- 10-AJIB, S; KARNO, Ali. *Thermo physical properties of acetone–zinc bromide for using in a low temperature driven absorption refrigeration machine*. Heat Mass Transfer, Germany, Vol.45, No.1, 2008, 61–70.
- 11- LUCAS, K; LUCKAS, M. *Berechnungsmethoden für Stoffeigenschaften*. In VDI-Wärmeatlas. VDI- Verlag, Du'sseldorf, S: Da,1993.
- (طرق حساب الخواص الترموديناميكية. في أطلس الحراري VDI . دار نشر VDI , دسلدورف 1994)
- 12-REID, Rc; PRAUSNITZ, Jm; POLING, Be. *The properties of gases and liquids*. McGraw Hill, New York ,1987,741.
- 13- Al-NAJJAR, S. *Untersuchung geeigneter Arbeitsstoffpaare für Absorptionskältemaschinen unter Berücksichtigung der Wärmeprozessoptimierung*. TU Ilmenau, PhD thesis, 2002.
- (البحث عن وسائط عمل مسموحة لآلات التبريد الامتصاصية بعد الأخذ بعين الاعتبار أمثلة التبادل الحراري . 2002، جامعة ألميناو – ألمانيا، أطروحة دكتوراه ،)
- 14- LINGHUI, Zhu; JUNJIE, Gu. *Thermodynamic Analysis of a Novel Thermal Driven Refrigeration System*. World Academy of Science, Engineering and Technology 56, 2009.351-355.