

## نمذجة ومحاكاة دارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة باستخدام برنامج TRNSYS

الدكتور نبهان خياطة\*  
الدكتور عامر حاج طالب\*\*  
محمد عتابة\*\*\*

(تاريخ الإيداع 7 / 3 / 2010. قُبِلَ للنشر في 3 / 5 / 2010)

### □ ملخص □

يتزايد الطلب على الطاقة الكهربائية بشكل كبير خلال الصيف نتيجة الاستخدام الواسع لأنظمة تكييف الهواء. من ناحية أخرى تُحدث وسائط التبريد الهيدروكربونية المستخدمة في الأنظمة الانضغاطية التقليدية أضراراً كبيرة على طبقة الأوزون الجوية. لهذا فإن استخدام دارات التبريد الامتصاصية التي تستخدم الطاقة الحرارية (الشمسية أو الجيوحرارية أو أي مصدر حراري آخر) يُعدُّ أمراً مهماً في مجال التقليل من الاعتماد على الطاقة الكهربائية في أوقات الذروة والتخفيف من التلوث البيئي.

يقدم هذا البحث نمذجة ومحاكاة لدارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة وتستخدم محلول بروميد الليثيوم ماء كزوج عامل. تم توظيف معادلات انتقال الحرارة والكتلة ومعادلات تصف خواص الموائع العاملة في برمجة وتطوير برنامج TRNSYS من خلال إضافة عنصر Type210 إلى مكتبة البرنامج بهدف تشكيل نموذج للدارة وتحليل الحساسية. تمت دراسة تأثير تغيرات درجات حرارة المبخر والمولد ودرجات تركيز المحلول وفعالية المبادل الحراري والأحمال الحرارية على معامل أداء الدارة.

أظهرت النتائج التأثير الواضح للمبادل الحراري في تحسين معامل الأداء، كما أظهرت مقارنة نتائج المحاكاة بالنتائج التجريبية تقارباً كبيراً.

**الكلمات المفتاحية:** تكييف الهواء، بروميد الليثيوم-ماء، دارة التبريد الامتصاصية، نمذجة، برنامج TRNSYS.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.

\*\* مدرس - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.

\*\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الطاقة - قائم بالأعمال - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - سورية.

## Simulation and Modeling Single Effect Absorption Refrigeration Cycle By Using TRNSYS

Dr. Nabhan Khayata\*

Dr. Amer Hajtaleb\*\*

Mohamed Ataba\*\*\*

(Received 7 / 3 / 2010. Accepted 3 / 5 / 2010)

### □ ABSTRACT □

During the summer, the demand for electricity greatly increases because of the extensive use of the Air-conditioning systems. On the other hand, vapor compression systems have many impacts on stratospheric ozone depletion because of the (CFC) and (HCFC) refrigerants. Absorption Refrigeration Cycles powered by solar, geothermal or any thermal energy source becomes attractive to reduce the dependence on electricity in the periods of peak and to attenuate the environmental pollution.

This study presents modeling and simulation of a single stage water/Lithium Bromide absorption refrigeration cycle. The adequate equations of heat and mass transfer, and appropriate equations describing the properties of working fluids are specified and employed in developing and programming the TRNSYS program. A new type (type210) was added to the TRNSYS library enabling users to complete modeling and sensitivity analysis of ARC. The performance coefficient of the cycle related to generator, evaporator temperatures, percentage ratio of LiBr solution, solution heat exchanger efficiency and thermal loads are all examined.

As a result, it is found that the solution heat exchanger has a distinct effect in increasing the coefficient of performance. The simulation results are compared with the practical experiments, and it was satisfied.

**Key words:** Air-conditioning, Lithium Bromide, Absorption Refrigeration Cycle(ARC), Modeling, TRNSYS.

---

\* Associate Professor, the faculty of mechanical engineering, Aleppo University.

\*\* Assistant Professor, the faculty of mechanical engineering, Aleppo University.

\*\*\* postgraduate student, the faculty of mechanical engineering, Aleppo University.

E-mail: [engataba@yahoo.com](mailto:engataba@yahoo.com).

**مقدمة:**

على الرغم من انتشار طرائق التبريد بالدارات الانضغاطية التقليدية، بدأت أنظمة التبريد الامتصاصية تلقى قبولاً واسعاً كونها تستخدم وسائط تبريد صديقة للبيئة وتعمل على مصادر طاقة بديلة متوفرة وغير مكلفة كالطاقة الشمسية أو الطاقة الجيوحرارية أو أي مصدرٍ للحرارة الضائعة.

تؤكد الأبحاث أن ازدياد الطلب على التبريد في أوقات الصيف يتوافق وبشكلٍ كبير مع الأوقات والأماكن التي يزداد فيها الإشعاع الشمسي [1] ونظراً لتوفر ظروف الإشعاع الشمسي الجيد في فترات صيف بلادنا، فإن أنظمة التبريد الامتصاصية تكتسب أهمية كبيرة في التقليل من الاعتماد على الطاقة الكهربائية من جهة وتقليل التلوث البيئي من جهة أخرى، تُعدّ عملية نمذجة الدارة الامتصاصية الخطوة الأولى والأهم في محاكاة نظام تبريد امتصاصي شمسي ودراسة إمكانية تطبيقه في بلادنا وفق ظروف الإشعاع الشمسي، ونظراً لأن برنامج TRNSYS من أقوى برامج المحاكاة الخاصة بالأنظمة الحرارية العابرة (المتغيرة مع الزمن) قمنا باستخدامه وتطويره كخطوة أولية لمشروع التبريد بالطاقة الشمسية.

لقد كُرسَت الكثير من الأبحاث والدراسات لتطوير أنظمة التبريد الامتصاصية، حيث ناقش الباحث [1] إمكانية مساهمة الطاقة الشمسية في أنظمة تكييف المباني السكنية في سورية من حيث ظروف الإشعاع الشمسي في بلادنا واعتمد على دارات التبريد الامتصاصية ومجمعات مسطحة مستوية، توصل الباحث إلى نتيجة تؤكد إمكانية استخدام الدارة الامتصاصية في أنظمة التكييف، أبحاث أخرى حاولت تحليل ودراسة الدارة الامتصاصية عن طريق تحليل ترموديناميكي شامل ودراسة تأثير إضافة مبادل حراري بين المكثف والمبخر لتحسين أداء الدارة [2]، أو نمذجة الخواص الترموديناميكية لوسائط وأزواج عاملة مختلفة وإمكانية تشغيلها في الدارات الامتصاصية [3]، كما تمت دراسة تجريبية على وحدات تبريد امتصاصية مصغرة تستخدم بروميد الليثيوم ماء [4].

تمّ إجراء هذا البحث في قسم هندسة الطاقة في كلية الهندسة الميكانيكية -جامعة حلب خلال العام 2010/2009 والآن نحن في صدد محاكاة نظام تبريد شمسي بعد نمذجة الدارة الامتصاصية كخطوة أساسية وتمهيدية.

**أهمية البحث و أهدافه:**

مع تزايد الطلب على التبريد لأغراضٍ صناعية و تجارية و منزلية فإن الحاجة إلى تطوير أنظمة تبريد تُقلل من استهلاك الطاقة الكهربائية ولا تسببُ تلوثاً بيئياً أصبح أمراً ملحاً و تحدياً كبيراً.

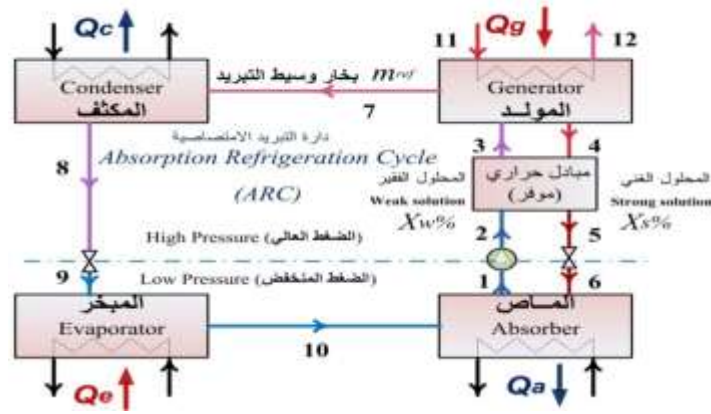
من هنا فإن البحث يهدف إلى دراسة وتحليل حساسية نظام تبريد امتصاصي بمرحلة واحدة يستخدم محلول(ماء/بروميد الليثيوم) كزوج عامل ويزود حرارياً بماء ساخن ضمن مجال درجات حرارة [°C] (80 – 100) من خلال مجمعات شمسية أو من أي مصدر آخر، مجال درجات حرارة المبخر [°C] (5 - 15) من خلال محاكاة عمل عناصر الدارة الرئيسية وإيجاد مجالات عملها، ومناقشة تأثير درجات الحرارة العاملة وظروف التشغيل والمتغيرات المختلفة على معامل الأداء ومن ثم تقديم اقتراحات وتوصيات لدعم وتطوير هذا النوع من الأنظمة.

**طرائق البحث ومواده:**

إن طريقة البحث والحسابات اعتمدت على نمذجة دارة التبريد الامتصاصية على برنامج TRNSYS الخاص بمحاكاة الأنظمة الحرارية المتغيرة مع الزمن (العابرة)، حيث تم إضافة عنصر Type 210 إلى مكتبة البرنامج عن طريق برمجة النموذج الرياضي للدارة بلغة الفورتران وفق قالب خاص بالبرنامج ومن ثم ربطه بمحرك المحاكاة. إن إضافة هذا العنصر إلى البرنامج تفيد في استخدامه في تحليل الحساسية ومعرفة التغيرات البارامترية ودرجات الحرارة والتراكيز والأحمال الحرارية للعناصر المختلفة على معامل الأداء، كما أنه من الممكن استخدامه وربطه مع عناصر أخرى وتشكيل نموذج محاكي لأنظمة التبريد بالطاقة الشمسية مثلاً عند استخدام هذا النوع من الدارات.

#### -تحليل ترموديناميكي وتوصيف لنظام التبريد الامتصاصي:

يتكون النظام من دارة تبريد امتصاصية بمرحلة واحدة تعمل على الزوج العامل (ماء- بروميد الليثيوم)، وتزود حرارياً عبر ماء ساخن (يتم تأمينه عن طريق مجمعات شمسية ونظام تخزين حراري أو أي مصدر حراري آخر)، المخطط بالشكل (1) فإنه يوضح المكونات والنقاط الأساسية لدارة التبريد الامتصاصية.

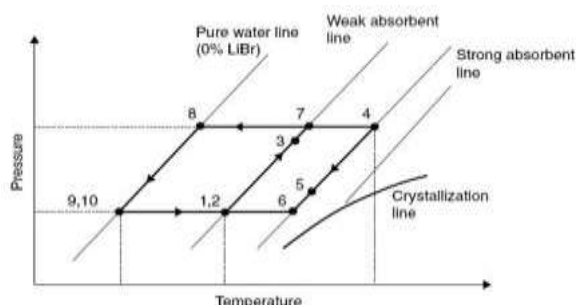


الشكل (1) يوضح مخطط ترميزي للمكونات والنقاط الرئيسية في دارة التبريد الامتصاصية بمرحلة واحدة ومحلول بروميد الليثيوم-ماء كزوج عامل

يقوم الماء في محلول بروميد الليثيوم-ماء بدور وسيط التبريد أما ملح بروميد الليثيوم فإنه يقوم بدور العنصر الماص، تتكون الدارة الامتصاصية من المولد، المبخر، الماص، المكثف، مبادل حراري للمحلول، مضخة للمحلول السائل وصمامات تمدد. في الماص يقوم المحلول الغني (العالي التركيز) بامتصاص بخار الماء القادم من المبخر مشكلاً محلولاً فقيراً (بالمح) وي طرح الحرارة إلى ماء التبريد، يعاد ضخ هذا المحلول الفقير إلى المولد عبر مبادل حراري، وفيه تنتقل الحرارة من المحلول الغني المُسخّن والخارج من المولد إلى المحلول الفقير قبل دخوله المولد، مما يساعد على توفير جزء كبير من الطاقة الحرارية كما ويساعد على تخفيض الحرارة الواصلة إلى الماص.

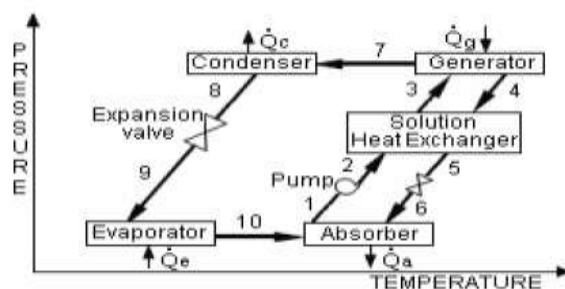
من الضروري تبريد الماص بصورة كافية للحصول على أقل درجة ممكنة عند خط السحب مما يضمن عدم وجود بخار ماء في خط السحب للمضخة ويساعد أيضاً على تصميم المبخر لدرجة حرارة أقل منها في حالة ما إذا تم تبريد الماص بالهواء، عادةً يستخدم ماء تبريد الماص في تبريد المكثف ويعاد تبريده بوساطة برج تبريد قبل أن يعود إلى الماص مرة أخرى، أيضاً يجب أخذ الاحتياطات اللازمة لتفادي إمكانية تبلور المحلول عند النقطة 6 في الدارة (نقطة دخول المحلول الغني بالملح إلى الماص)، وهذا يحدث عند ارتفاع درجة حرارة المولد بصورة كبيرة بحيث تصل درجة تركيز بروميد الليثيوم في المحلول إلى الحد الذي يسبب التبلور عندما ينخفض ضغط المحلول قبل الدخول إلى

الماص. المخطط [10,5] بالشكل (2) يوضح خطوط التركيز الثابتة لمحلول بروميد الليثيوم- ماء على مخطط داورنغ للعلاقة بين درجة الحرارة والضغط في الدارة، حيث يلاحظ على الخط المائل على اليسار يشير إلى خط الماء النقي بينما يشير الخط على اليمين إلى خط التبلور (crystallization line).



الشكل (2) يوضح دارة التبريد الامتصاصية (بروميد الليثيوم - ماء) بمرحلة واحدة على مخطط داورنغ

أما الشكل (3) فإنه يوضح تمثيل الدارة الامتصاصية على مخطط الضغط - درجة الحرارة.



الشكل (3) يوضح مخطط لدارة بروميد الليثيوم- ماء الامتصاصية بمرحلة واحدة

إن كثرة المتغيرات التصميمية في دارة التبريد الامتصاصية تجعل من عملية تحديد معامل الأداء عند ظروف التشغيل المختلفة أمراً صعباً، خاصة أن ثمة الكثير من العوامل والمتغيرات التي تؤثر مباشرة على معامل الأداء. لهذا ومن أجل تبسيط عملية النمذجة تم اعتماد عدد من الفرضيات الأساسية [6,10]:

- المضخة ايزونتروبية وقيمة العمل اللازم لتشغيلها مهمل مقارنة بكمية الحرارة المضافة للمولد .
- حالة وسيط التبريد (الماء النقي) ثابتة ومستقرة.
- الضياعات الحرارية وهبوطات الضغط في العناصر أو الأنابيب مهملة.
- صمامات التمدد أديباتية .
- بخار الماء الذي ينفصل عن المحلول ويغادر المولد لا يحمل معه أي نسبة من الملح (بروميد الليثيوم).
- عند النقاط (1) و(4) و(8) يكون السائل مشبعاً.
- عند النقطة (10) يكون بخار الماء مشبعاً.

أما المُدخلات الأساسية المعتمدة في حسابات الدارة الامتصاصية بمرحلة واحدة مع بروميد الليثيوم:

- استطاعة التبريد المطلوبة (cooling capacity)  $[\dot{Q}_c]$  [W]

-درجة حرارة وسيط التبريد عند مخرج المبخر  $T_{10}$  [°C]

-درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد  $T_4$  [°C]

-تركيز المحلول الغني  $X_s$  % BrLi

-تركيز المحلول الفقير  $X_w$  % BrLi

مع الافتراض أن درجة حرارة بخار المار والمحلول متساويان عند خروجهما من المولد أي أن  $T_4 = T_7$  أما مواصفات المبادل الحراري الخاص بالمحلول من حيث الجداء  $U.A$  فيتم اعتباره متغيراً تصميماً.

يتألف [6] النموذج الرياضي لدارة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة والتي تستخدم الزوج العامل (ماء - بروميد الليثيوم) من أربعة أنواع من المعادلات الترموديناميكية: معادلات توازن الكتلة ومعادلات توازن الطاقة، وعلاقات تصف انتقال الحرارة والكتلة ومعادلات تصف الخواص الترموديناميكية للموائع العاملة .

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

$$(2) \sum (\dot{m}.h)_{in} - \sum (\dot{m}.h)_{out} = 0$$

$$(3) \sum (\dot{m}.h)_{in} - \sum (\dot{m}.h)_{out} + [\sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out}] + \dot{W} = 0$$

$$(4) \dot{Q}_a + \dot{Q}_c = \dot{Q}_g + \dot{Q}_e$$

-تحليل المبخر : معادلة توازن الكتلة على طرفي المبخر ومعادلة التوازن الطاقي.

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

(5)

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10} \cdot (h_{10} - h_9)$$

(6)

$$h_8 = h_9 \quad \& \quad h_5 = h_6 \quad (7)$$

- صمامات التمدد أديباتية:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad (8)$$

- تحليل الماص :

$$(9) \dot{Q}_a = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_1 \cdot h_1$$

$$X_1 \cdot \dot{m}_1 = X_6 \cdot \dot{m}_6 \quad (10)$$

- معادلات توازن الكتلة :

$$(11) \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{ref}$$

$$(12) \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{ss} \quad (13) \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ws}$$

$$(14) \dot{m}_{ss} = \dot{m}_{ws} - \dot{m}_{ref}$$

$$(15) X_w = X_1 = X_2 = X_3 \quad (16) X_s = X_4 = X_5 = X_6$$

-تحليل المبادل الحراري للمحلول : المبادل الحراري ذو جريان متعاكس ومنفصل بمدخلين ومخرجين ، الطرف

الساخن محلول غني بالملح والطرف البارد محلول فقير

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{ph} = \dot{m}_6 \cdot C_{p6} \quad (17) \quad \text{السعة الحرارية للمحلول في الطرف الساخن}$$

أما السعة الحرارية [7] لمحلول بروميد الليثيوم فإنه يتعلق بالتركيز وفق المعادلات:

$$(18) \quad C_{ph} = 2.01 \left( \frac{X_s}{100} \right)^2 - 5.15 \left( \frac{X_s}{100} \right) + 4.23$$

$$C_{pc} = 2.01 \left( \frac{X_w}{100} \right)^2 - 5.15 \left( \frac{X_w}{100} \right) + 4.23 \quad (19)$$

$$\dot{w} = \dot{m}_2 \cdot v_2 (P_2 - P_1) \cdot 10^3 = \dot{m}_{ws} \cdot \frac{1}{\rho_2} (P_{high} - P_{low}) \cdot 10^3 [W] \quad (20)$$

$$P_{high} = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_7 = P_8 \quad (21)$$

$$(22) P_{low} = P_1 = P_6 = P_9 = P_{10}$$

أما الكتلة النوعية لمحلول بروميد الليثيوم - ماء [4] فهي:

$$\rho_x = 1145.36 + 470.84X_o + 1374X_o^2 - (0.333393 + 0.571749X_o)(273 + T) \quad (23)$$

حيث :  $20\% < X < 60\%$  ،  $X_o = X/100$  ،  $\rho_x$  : كثافة محلول بروميد الليثيوم - ماء

$$[kg/m^3]$$

درجة حرارة المحلول ضمن المجال  $0 < T < 200$  [°C]

$$C_c = \dot{m}_{ws} \cdot C_{pc} , \quad C_h = \dot{m}_{ss} \cdot C_{ph} \quad (24)$$

$$(25) NTU = \frac{U.A}{C_{min}}$$

$$\varepsilon_{HX} = \frac{1 - e^{-(1 - \frac{C_h}{C_c})NTU}}{1 - \frac{C_h}{C_c} e^{-(1 - \frac{C_h}{C_c})NTU}} \quad (26) \quad \text{فعالية المبادل الحراري الخاص بالمحلول:}$$

$$\dot{Q}_{HX} = \varepsilon_{HX} \cdot C_{min} \cdot (T_4 - T_2)_{in} \quad (27) \quad \text{استطاعة المبادل الحراري:}$$

$$T_3 = T_2 + \frac{\dot{Q}_{HX}}{C_c} \text{ [}^\circ\text{C]} \& T_5 = T_4 - \frac{\dot{Q}_{HX}}{C_h} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (28) \quad \text{درجات الحرارة عند الخروج من المبادل الحراري:}$$

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (29) \quad \text{- تحليل المولد:}$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_8) \quad (30) \quad \text{- المكثف:}$$

- معامل الأداء للدارة يمثل نسبة حمل التبريد (معدل الحرارة المسحوبة بالمبخر) إلى معدل الحرارة المقدمة إلى

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (31) \quad \text{المولد:}$$

أما المعادلات الخاصة بالخواص الترموديناميكية من درجة حرارة وتركيز وضغط وانتالبي لمحلول بروميد

الليثيوم - ماء [9] فهي :

- معادلة إنتالبي المحلول بدلالة درجة حرارته وتركيزه :

$$; x: [BrLi]\% ; t: [^\circ C] \quad (32) h = \sum_0^4 A_n X^n + t \sum_0^4 B_n X^n + t^2 \sum_0^4 C_n X^n ; [kJ/kg]$$

$$A_0 = -2024.33$$

$$B_0 = 18.2829$$

$$C_0 = -3.7008214 \cdot 10^{-2}$$

$$A_1 = 163.309$$

$$B_1 = -1.1691757$$

$$C_1 = 2.8877666 \cdot 10^{-3}$$

$$A_2 = -4.88161$$

$$B_2 = 3.248041 \cdot 10^{-2}$$

$$C_2 = -8.1313015 \cdot 10^{-5}$$

$$A_3 = 6.302948 \cdot 10^{-2}$$

$$B_3 = -4.034184 \cdot 10^{-4}$$

$$C_3 = 9.9116628 \cdot 10^{-7}$$

$$A_4 = -2.913705 \cdot 10^{-4}$$

$$B_4 = 1.8520569 \cdot 10^{-6}$$

$$C_4 = -4.4441207 \cdot 10^{-9}$$

معادلة درجة حرارة المحلول بدلالة التركيز ودرجة حرارة وسيط التبريد:

$$t = \sum_0^3 B_n X^n + t_{ref} \sum_0^3 A_n X^n \quad ; t: [^\circ C] \quad (33)$$

$$t_{ref} = (t - \sum_0^3 B_n X^n) / \sum_0^3 A_n X^n \quad ; t_{ref}: [^\circ C] \quad (34)$$

$$\log P = c + \frac{D}{t_{ref} + 273.15} + \frac{E}{(t_{ref} + 273.15)^2} \quad ; P [kPa] \quad (35)$$

- حيث مجالات درجات الحرارة والتركيز كما يأتي:

$$-15 < t_{ref} < 110^{\circ}C$$

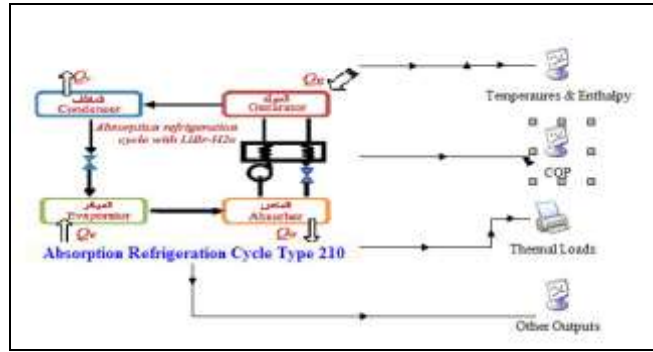
$$5 < t < 175^{\circ}C$$

$$45 < X < 70\% BrLi$$

$A_0 = -2.00755$	$B_0 = 124.937$	$C = 7.05$	أما الثوابت فهي كما يأتي:
$A_1 = 0.16976$	$B_1 = -7.71649$	$D = -1596.49$	
$A_2 = -3.133362 \cdot 10^{-3}$	$B_2 = 0.152286$	$E = -104095.5$	
$A_3 = 1.97668 \cdot 10^{-5}$	$B_3 = -7.95090 \cdot 10^{-4}$		

- نمذجة الدارة باستخدام برنامج TRNSYS :

تم استخدام وتطوير برنامج TRNSYS من أجل نمذجة عنصر الدارة الامتصاصية Type 210 بلغة الفورتران وإضافته إلى مكتبة البرنامج الأساسية كما تمت برمجة تابع فرعي يحسب الخواص الترموديناميكية لمحلل بروميد الليثيوم-ماء وتم ربط هذا العناصر في مكتبة البرنامج الشكل (4) يوضح عنصر الدارة الامتصاصية واستخراج النتائج.



الشكل (4) عنصر الدارة الامتصاصية type 210 المبرمج على TRNSYS

### النتائج والمناقشة:

إن كثرة المتغيرات وتعقيد عملية التحليل تحتم علينا أخذ نموذج أو حالة للدراسة تُمكن من إجراء مقارنة وتحليل كافيين. ضمن الفرضيات الأساسية المعتمدة في التحليل الترموديناميكي سنحدد القيم المدخلة التالية كمثال حسابي بهدف عرض النتائج:

- استطاعة التبريد المطلوبة:  $\dot{Q}_e = 10 \text{ [kW]}$

- درجة حرارة المبخّر:  $T_{10} = 6 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$

- درجة حرارة المولد:  $T_4 = 90 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$

- تركيز المحلول الغني:  $X_S = 60 \%$

- تركيز المحلول الفقير:  $X_w = 55 \%$

- جداء عامل انتقال الحرارة بمساحة المبادل الحراري (الموفر):  $U.A = 150 \text{ [W/K]}$

الجدول (1) النتائج الحسابية للخواص الترموديناميكية من حرارة وضغط وتركيز ومعدل التدفق في كل نقاط الدارة الامتصاصية



Point	T [°C]	h [kJ/kg]	P [kPa]	X [%BrLi]	$\dot{m}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	Remarks
1	34.84024	82.99004	0.935369	55	0.051667	Saturated liquid
2	34.84024	82.99725	9.657128	55	0.051667	
3	65.80383	145.0955	9.657128	55	0.051667	
4	90	212.205	9.657128	60	0.047361	
5	53.64909	144.4614	9.657128	60	0.047361	
6	53.64909	144.4614	0.935369	60	0.047361	
7	86	2667.968	9.657128	0	0.004306	Superheated Steam
8	45.1362	188.9855	9.657128	0	0.004306	Sat liquid water
9	6	188.9855	0.935369	0	0.004306	
10	6	2511.548	0.935369	0	0.004306	Saturated vapour

الجدول (2) النتائج الحسابية لمعامل الأداء والأحمال الحرارية لمكونات الدارة الامتصاصية

معامل الأداء Coefficient of Performance	C.O.P	0.7122 [-]
كمية الحرارة المقدمة للمولد Heat input to the generator	$Q_g$	14040.86 [W]
كمية الحرارة المسحوبة في المكثف Condenser heat, rejected to the environment	$Q_c$	10673.48 [W]
كمية الحرارة المسحوبة في الماص Absorber heat, rejected to the environment	$Q_a$	13367.75 [W]
استطاعة التبريد Capacity (evaporator output power)	$Q_e$	10000 [W]
عمل المضخة Pump work input	$w$	0.3725 [W]
كمية الحرارة في المبادل الحراري للمحلول Heat Exchanger Power	$Q_{hex}$	3208.43 [W]
فعالية المبادل الحراري للمحلول Effectiveness of Heat Exchanger	$\epsilon_{hex}$	0.659 [-]

من أجل التأكد من النتائج وتحديد مدى اعتماد type 210 في المشاريع التي تستخدم دارة التبريد الامتصاصية قمنا بالاستعانة بالبحث التجريبي المشترك بين جامعة برونل في المملكة المتحدة والمعهد التقني العالي في قبرص [8]، حيث يركز البحث على تصميم وتنفيذ وحدة تبريد امتصاصية صغيرة باستطاعة تبريد 1 kW بمرحلة واحدة تستخدم محلول بروميد الليثيوم - ماء كزوج عامل ودراسة خصائص عناصر الدارة وتقييم أدائها ضمن الظروف التالية: تمت تغذية المولد بالماء الساخن عن طريق سخان كهربائي بدرجة حرارة [°C] 75، تركيز المحلول الغني 60%، تركيز المحلول الفقير 55%، المبادل الحراري للمحلول صغير نسبياً حيث بلغت الناقلية الحرارية الإجمالية [W/°C] 11.1،

ودرجة حرارة المبخر [°C] 6. تم إجراء القياسات والحصول على النتائج التجريبية الموضحة بالجدول (3). من أجل المقارنة تم إدخال القيم في النموذج الحسابي نفسها على TRNSYS وحصلنا على النتائج الحسابية الموضحة.

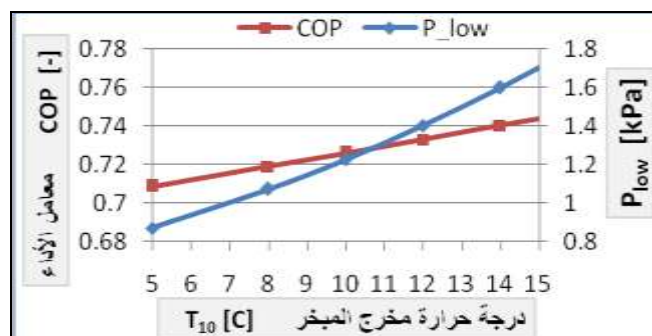
الجدول(3) مقارنة بين النتائج الحسابية والنتائج التجريبية للخواص في دارة التبريد الامتصاصية

العنصر Component	المتغير Parameter	الوحدة Unit	النتائج التجريبية Experimental Results	النتائج الحسابية computational Results	نسبة الخطأ Error Ratio/%
المكثف Condenser	$T_7$	°C	70	71	1.41
	$T_8$	°C	31.5	32.25	2.33
	$P_{high}$	kPa	4.82	4.825	0.1
	$\dot{m}_{ref}$	kg/s	0.000431	0.0004208	2.4
	$Q_c$	W	1080	1054	2.47
المولد Generator	$T_3$	°C	55	54.9	0.18
	$X_W$	%[-]	55	55	-
	$T_4$	°C	75	75	-
	$X_S$	%[-]	60	60	-
	$Q_g$	W	1360	1337	1.72
المبادل الحراري (الموفر) Heat Exchanger of solution	$T_2$	°C	36	34.84	3.33
	$T_5$	°C	52.8	51.45	2.6
	$\dot{m}_{ws}$	kg/s	0.00517	0.005049	2.4
	$\dot{m}_{ss}$	kg/s	0.00474	0.004629	2.4
الماص Absorber	$T_6$	°C	45.6	51.45	11.37
	$T_1$	°C	36	34.84	3.33
	$P_{low}$	kPa	0.9346	0.9354	0.086
	$Q_a$	W	1280	1283	0.23
المبخر Evaporator	$\dot{m}_{ref}$	kg/s	0.000431	0.0004208	2.43
	$Q_e$	W	1000	1000	-
	$T_{10}$	°C	6	6	-
معامل الأداء	$cop$	[-]	0.735	0.748	1.74

نلاحظ التقارب الكبير بين النتائج التجريبية والنتائج الحسابية، مما يؤكد على إمكانية الاعتماد على هذا الكود المبرمج عند استخدام الدارة الامتصاصية في مشاريع التبريد أو التكييف.

#### 1- تأثير تغيير درجة حرارة المبخر: Effect of evaporator temperature

يؤدي تغيير درجة حرارة المبخر - مع ثبات باقي ظروف التشغيل- إلى تغيير ضغط المبخر والماص عند ارتفاع درجة حرارة المبخر يرتفع الضغط المنخفض ويحسن معامل الأداء للدائرة، المخطط بالشكل (5) يوضح تغير معامل الأداء للدائرة الامتصاصية وضغط المبخر مع تغير درجة حرارة المبخر .



الشكل (5) تأثير تغير درجة حرارة المبخر على معامل الأداء وضغط المبخر من أجل القيم التالية للحالة المدروسة :

$$. X_s=60 \% , X_w=55 \% , T_4=90 [^{\circ}C] , Q_e=10 [kW]$$

إضافة إلى أن انخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط المبخر) قد يؤدي إلى تبلور المحلول المركز عند مدخل الماص، كما أن انخفاض درجة حرارة المبخر عن حد معين قد يسبب خروج محلول بروميد الليثيوم ماء من الماص عند درجة حرارة أعلى من درجة الاتزان الحراري للمحلول مما يسبب وجود بخار ماء في خط السحب للمضخة وبالتالي توقفها عن العمل وتلفها لهذا يجب ألا تقل درجة حرارة المبخر عن درجة حرارة التجمد للماء وإلا أدى تجمد الماء داخل أنابيب المبخر إلى تلفه [11].

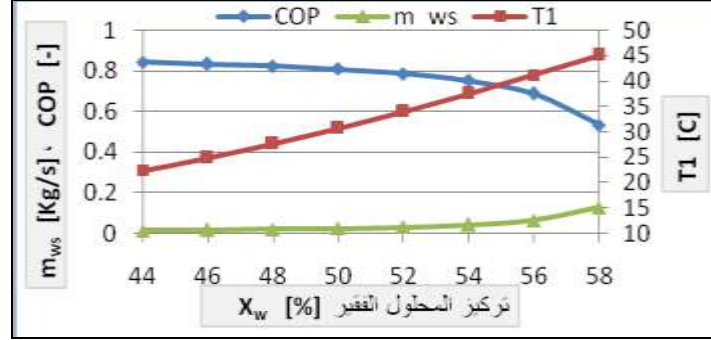
## 2- تأثير ضغط المكثف : Effect of condenser pressure

إن دارة التبريد الامتصاصية تتعرض أثناء التشغيل إلى تغيير درجة حرارة ماء التبريد في المكثف أو الماص تبعاً لظروف الجو المحيط الذي يؤدي بدوره إلى تغيير ضغط المكثف ارتفاعاً أو انخفاضاً و تغيير معامل الأداء ، حيث يؤدي انخفاض ضغط المكثف (الضغط المرتفع بالدائرة) إلى تحسّن معامل الأداء لكن مع احتمال تعرض الدارة لخطر التبلور إذا انخفضت قيمة الضغط عن الحد الحرج ، هذا الحد يمكن استنتاجه من خلال مخطط العلاقة بين درجة حرارة المحلول والضغط عند قيم تركيز مختلفة، في حالتنا من أجل درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد  $90 [^{\circ}C]$  فإن انخفاض الضغط من  $10 [kPa]$  إلى  $4 [kPa]$  سوف يرفع تركيز المحلول الخارج من المولد إلى حوالي  $70\%$  عندها تعاني الدارة من التبلور، من أجل تفادي حالات انخفاض الضغط في المكثف الناتج عن التغيرات في درجة حرارة ماء التبريد سنفترض أن درجة حرارة ماء التبريد ثابتة عند قيمة حوالي  $30 [^{\circ}C]$  .

## 3- تأثير تغيير تركيز بروميد الليثيوم في المحلول:

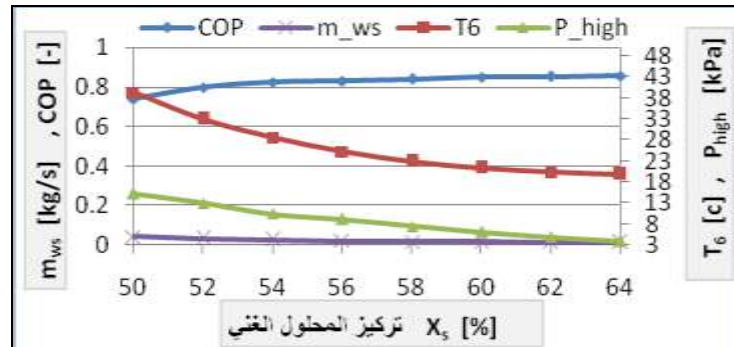
من أجل معرفة تأثير التغير في تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند مدخل الماص  $X_w$  على أداء الدارة سنغير قيم  $X_w$  ضمن المجال  $(58 - 45) \%$  ونراقب تغير قيم كل من معامل الأداء ودرجة حرارة المحلول ومعدل

التدفق عند مخرج الماص. المخطط بالشكل (6) يظهر أنه من أجل فرق كبير في تركيز المحلول بين المولد والماص، فإن معدل التدفق عند مخرج الماص يأخذ أقل قيمة ويزداد مع تناقص الفرق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير، أما معامل الأداء فإنه يتناقص مع ازدياد معدل التدفق.



الشكل (6) تأثير تغير تركيز المحلول الفقير على كل من معامل الأداء ومعدل تدفق المضخة ودرجة حرارة المحلول عن كخرج الماص مع تثبيت القيم التالية:  $\dot{Q}_e = 10$  [kW] ،  $T_4 = 80$  [°C] ،  $T_{10} = 10$  [°C] ،  $X_s = 60$  % .

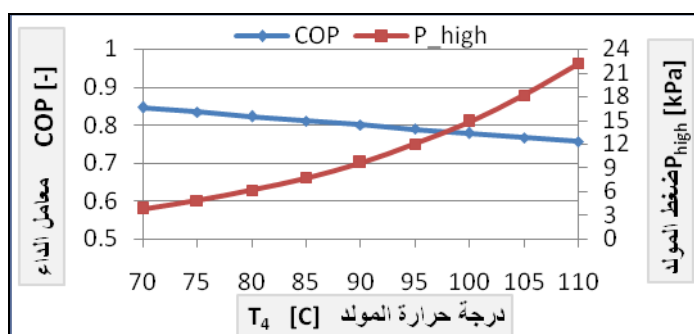
من الناحية الثانية من أجل مراقبة تأثير التركيز القوي للمحلول  $X_s$  تم تغيير القيم ضمن المجال % (50 – 65) وراقبنا تأثير ذلك على كل من معامل الأداء ومعدل التدفق من جهة وعلى درجة حرارة المحلول الفقير عند مدخل الماص والضغط المرتفع من جهة ثانية. تظهر النتائج الممثلة بالمخطط (7) أنه مع ازدياد الفارق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير يتناقص معدل التدفق في المضخة وينخفض الضغط في المولد أما معامل الأداء فإنه يتحسن، ولكن يجب الانتباه إلى أنه عند ارتفاع تركيز المحلول الغني إلى قيمة تزيد عن 68% من أجل الشروط السابقة نفسها فإنه سيجعل الدارة تعاني من مشاكل التبلور.



الشكل (7) تأثير تغير تركيز المحلول الغني على كل من معامل الأداء ومعدل تدفق المضخة ودرجة حرارة المحلول عن مدخل الماص والضغط المرتفع مع تثبيت القيم التالية:  $\dot{Q}_e = 10$  [kW] ،  $T_4 = 80$  [°C] ،  $T_{10} = 6$  [°C] ،  $X_w = 45$  % .

#### 4- تأثير درجة حرارة المولد: Effect of generator temperature

يُعدّ هذا العامل من المتغيرات المهمة المؤثرة على عامل أداء الدارة الامتصاصية، من أجل مراقبة تأثير تغير درجة حرارة المولد على معامل الأداء ضمن شروط درجة حرارة مبخّر ثابتة وحمل تبريد ثابت، فإننا سنغير قيم درجة الحرارة  $T_4$  ضمن المجال  $[70 - 110 \text{ }^\circ\text{C}]$  وملاحظة تغيير كُلاً من معامل الأداء وضغط المولد. المخطط بالشكل (8) يوضح أنه مع ارتفاع درجة حرارة المولد فإن الضغط في المولد سيزداد أيضاً، ولكن من أجل قيمة ثابتة لحمل التبريد، فإن ارتفاع درجة حرارة المولد وضغطه سيزيدان من كمية الحرارة المقدمة في المولد وبالتالي معامل الأداء سيتناقص على اعتبار أن التركيز ودرجات الحرارة في النقاط الأخرى تبقى ثابتة.



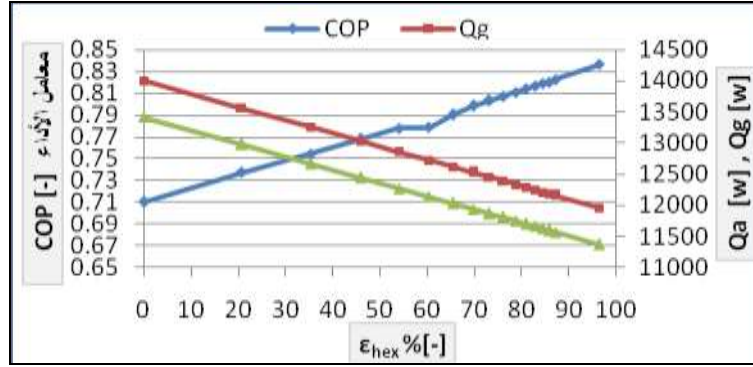
الشكل (8) تأثير درجة حرارة المحلول عند مخرج المولد على كل من معامل الأداء والضغط المرتفع بالدارة عند تثبيت القيم التالية:

$$X_s=60\% , X_w=50\% , T_{10}=6[^\circ\text{C}] , \dot{Q}_e=10 [\text{kW}]$$

أما في حالات دراسة تأثير تغير درجة حرارة المولد على معامل الأداء عند تغير حمل التبريد فإن المناقشة تختلف حيث إنّه مع انخفاض درجة حرارة المولد تتخفّف درجة تركيز بروميد الليثيوم الخارج من المولد نتيجة انخفاض معدل البخار المتولد ويؤدي انخفاض مقدار مائع التبريد الساري في المبخّر إلى انخفاض قيمة التبريد التي يمكن الحصول عليها من الدارة أما مع زيادة درجة حرارة المولد يرتفع تركيز بروميد الليثيوم في المحلول عند مخرج المولد ويزداد معها مقدار التبريد في المبخّر نتيجة زيادة بخار الماء المتشكل وبالتالي يزداد معامل الأداء.

##### 5- تأثير فعالية المبادل الحراري للمحلول: Effect of solution heat exchanger's effectiveness:

في المبادل الحراري الخاص بمحلول بروميد الليثيوم ماء تنتقل الحرارة من المحلول الغني المسخن والخارج من المولد إلى المحلول الفقير قبل دخوله المولد مما يساعد على توفير جزء من كبير من الطاقة الحرارية ويساعد على تخفيض الحرارة الواصلة إلى الماص وبالتالي يتحسن معامل الأداء للدارة، يمكن التأكد من هذا التأثير إذا راقبنا تغير كلاً من معامل الأداء والاستطاعات الحرارية لكل من المولد والماص مع تغيير فعالية المبادل الحراري الممثلة من خلال المتغير  $U.A$  ضمن المجال من  $\varepsilon_{\text{hex}}=0$  (عدم وجود مبادل حراري) إلى القيمة  $\varepsilon_{\text{hex}}=97\%$  (تقابل  $UA=300$  W/K)، المخطط التالي (9) يوضح تحسّن معامل الأداء مع ازدياد مساحة التبادل الحراري أي مع ازدياد فعاليته .



الشكل (9) تأثير المبادل الحراري للمحلل على معامل الأداء والأحمال الحرارية في المولد والماص عند تثبيت القيم التالية:

$$X_s=60\% , X_w=50\% , T_4=80[^\circ\text{C}] , T_{10}=6[^\circ\text{C}] , \dot{Q}_e=10\text{ [kW]}$$

### الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذه الدراسة تقييم خصائص أداء دارة التبريد الامتصاصية ذات المرحلة الواحدة مع بروميد الليثيوم- ماء كزوج عامل، حيث تبين أنه مع ازدياد الفارق في التركيز بين المحلولين الغني والفقير فإن معدل التدفق يتناقص وينخفض الضغط في المولد أما معامل الأداء فإنه يتحسن (ارتفاع الفارق في التركيز بين المحلولين بمقدار 10% يسهم في تحسن معامل الأداء بمقدار 9%). مع الانتباه إلى ضرورة ألا يزيد تركيز المحلول الغني عن 70% لحالتنا المدروسة من أجل تفادي مشاكل تبلور المحلول عند مدخل الماص وذلك عن طريق المحافظة على تبريد الماص.
- يظهر هذا التحليل أيضاً أهمية المبادل الحراري (الموَقَّر) في تحسين معامل الأداء حيث تبين أن معامل الأداء يتحسن بنسبة 11% عند إضافة مبادل حراري فعاليته 80%، كما أظهر التحليل أن معامل الأداء يتحسن عند ارتفاع درجة حرارة المبخر.
- تعمل دارة التبريد الامتصاصية بمرودود جيد COP=0.8 من أجل درجة حرارة المولد [°C] 90 وفارق في التركيز مقداره 10% عند حمل تبريد [kW] 10 ودرجة حرارة مبخر قدرها [°C] 6 ومن الممكن تغذية الدارة الامتصاصية بمجمعات شمسية ذات مرودود عالي (الأنبوبية المفرغة Evacuated tubes أو مجمعات القطع المكافئ المركزة الثابتة compound parabolic concentrators).
- إن مقارنة النتائج التجريبية لخواص دارة التبريد الامتصاصية و النتائج الحسابية المعتمدة على عنصر الدارة الامتصاصية المبرمج على برنامج TRNSYS تظهر تقارب كبير وتؤكد إمكانية اعتماده في الأبحاث أو التصاميم المستقبلية التي تعتمد على دارة الامتصاصية بمرحلة واحدة وتستخدم بروميد الليثيوم-ماء.

جدول الرموز					
الرمز	الواحدة	توصيف الرمز	الرمز	الواحدة	توصيف الرمز
COP	[-]	معامل الأداء	U.A	W/K	الناقلية الحرارية الإجمالية
$\dot{Q}_a$	[W]	استطاعة الماص	$P_{low}$	[kPa]	الضغط المنخفض بالدارة
$\dot{Q}_c$	[W]	استطاعة المكثف	$P_{high}$	[kPa]	الضغط المرتفع بالدارة
$\dot{Q}_g$	[W]	استطاعة المولد	$P_i$	[kPa]	الضغط بالنقطة i
$\dot{Q}_e$	[W]	استطاعة المبخر	$T_i$	[°C]	درجة الحرارة عند النقطة i
$\dot{Q}_{hex}$	[W]	استطاعة الموفر	$h_i$	[kJ/kg]	الانتالبي بالنقطة i
$\epsilon_{hex}$	[-]	فعالية المبادل الحراري	$X_i$	[-]	التركيز بالنقطة i
$\dot{m}_{ref}$	[kg/s]	تدفق وسيط التبريد	$m_i$	[kg/s]	التدفق بالنقطة i
$\dot{m}_{ws}$	[kg/s]	تدفق المحلول الفقير	$C_{pi}$	[kJ/kg.K]	السعة الحرارية النوعية بالنقطة i
$\dot{m}_{gs}$	[kg/s]	تدفق المحلول الغني	$C_h$	[W/K]	السعة الحرارية للمائع الساخن
$X_s$	[%]	تركيز المحلول الغني	$C_c$	[W/K]	السعة الحرارية للمائع البارد
$X_w$	[%]	تركيز المحلول الفقير			
جدول المصطلحات					
الرمز	توصيف المصطلح	الرمز	توصيف المصطلح		
ARC	دارة التبريد الامتصاصية	Type 210	عنصر الدارة الامتصاصية المبرمج على TRNSYS		

## المراجع:

1. SAYEGH, M.A. *The solar contribution to air conditioning systems for residential buildings*. Desalination, 2007, Vol. 209, 171–176.
2. KAYNAKLI, O.; KILIC, M. *Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system*. Energy Conversion and Management, 2006, Vol. 48, 599–607.
3. SENCAN, A. *Modeling of thermodynamic properties of refrigerant/absorbent couples using data mining process*. Energy Conversion and Management, Vol. 48, 2007, 470-480.
4. FLORIDES, G. A.; KALOGIROU, S. A.; TASSOU, S.A.; WROBEL, L.C. *Design and construction of a LiBr–water absorption machine*, Energy Conversion and Management; Vol. 44, 2003, 2483–2508.
5. ASHRAE handbook, Fundamentals. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, chapter 19, 1997, 851 pages.
6. KALOGIROU, S. *Solar Energy Engineering: processes and systems*. Elsevier, 1<sup>st</sup> ed, USA, 2009, 756 pages.
7. ELSAYED, M.; MOSTAFA and ASABBAGH. *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdul Aziz University, Jeddah ,1994 . (330-375).
8. KALOGIROU, S.; FLORIDES, G.; TASSOU, S. ; WROBEL, L. *Design and Construction of a Lithium Bromide Water Absorption Refrigerator*. CLIMA 2000/Napoli 2001 World Congress – Napoli (I), 15-18 September 2001

9. ASHRAE handbook, Fundamentals,. Atlanta, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, chapter 20, 2001, 70
10. ASHRAE handbook, Fundamentals,. Atlanta, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, chapter 1, 2005, 21
11. السيد، محمد. مصطفى ; فتحي، قدرى.أحمد ;مجاهد ،إبراهيم.سعيد. النماذج الحسائية للنظم الحرارية الشمسية، مركز النشر العلمي، جامعة الملك عبد العزيز، جدة 1994، الطبعة الأولى، 776.