

تحليل أداء دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية

محمد صلاح الاحمد¹، وجيه محمد خير ناعمة²

¹ طالب ماجستير، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق. mohammad.h707@damascusuniversity.edu.sy

² أستاذ، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق. wajih.naimeh1948@damascusuniversity.edu.sy

المخلص

تم في هذا البحث دراسة أداء دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية، ورسم مخططات الأداء لسهولة تقييم الكفاءة ومقارنة النتائج مع دارة التكييف التقليدية. تبين أن 22.48KW إلى 10.94KW أي بمقدار 51.3% وينخفض الحمل التبريدي على وشيعة التبريد من 63.157KW إلى 20.409KW أي بمقدار 67.7%، كما يزداد معامل الكفاءة EER من 0.826 إلى 1.695 أي بمقدار 105.2%.

تاريخ الإبداع: 2022/8/28
تاريخ القبول: 2022/10/20



الكلمات المفتاحية: دولاب التجفيف، التبريد التجفيفي، التجفيف ثنائي المرحلة،

معامل الكفاءة EER.

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية،
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
الترخيص CC BY-NC-SA 04

Performance analysis of hybrid Two-Stage Desiccant Cooling Cycle

**Mohammad Salah Alahmad¹,
Wajih MHD Kaur Naimeh²**

¹ Master Student, General Mechanical Engineering Dep, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, mohammad.h707@damascusuniversity.edu.sy.

² Professor, General Mechanical Engineering Dep, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

Abstract

This research has studied hybrid two-stage desiccant cooling cycle, performance map of this cycle were drawn to compare this cycle and evaluate it with the conventional cycle easily. For the regeneration temperature equal to 60 °C, the energy consumption reduces from 22.48kw to 10.94kw, that's equivalent to 51.3% and the cooling load on the cooling coil reduces from 63.157kw to 20.409kw, that's equivalent to 67.7%. Moreover, EER increase from 0.826 to 1.695, that's equivalent to 105.2%.

Keywords: Desiccant Wheel, Desiccant Cooling, Two Stage Desiccant, Energy Efficiency Ratio EER.

Received: 28/8/2022
Accepted: 20/10/2022



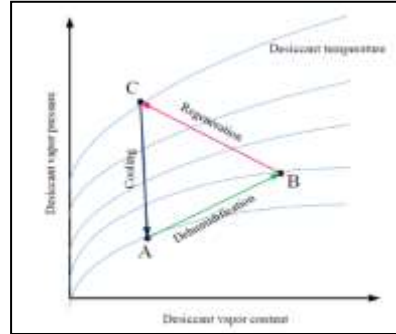
Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

المقدمة:

إن استهلاك الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف المنزلي أو التجاري في المكاتب والدوائر الرسمية يقدر ب 55% (المركز الوطني لبحوث الطاقة) من إنتاج الطاقة الكهربائية الكلي، ولغرض توفير الطاقة الكهربائية يتم الاتجاه نحو تطوير أنظمة التكييف، ومن أنظمة التكييف التي يتم تطويرها أنظمة التبريد التجفيفية التبخرية ولكن انخفاض معامل أدائها وعدم إمكانية استخدامها لبعض الأماكن (الطبية ومراكز البيانات...) أدى إلى ضعف انتشار هذه الأنظمة، ولتلافي عيوب الدارات التجفيفية التبخرية تم استبدال المبرد التبخيري بوشية تبريد المضخة الحرارية التقليدية وظهر ما يعرف بنظام التكييف الهجين، ومن أهم ميزاته:

- تنوع مصادر الطاقة اللازمة لتشغيل دارة التبريد (طاقة شمسية، حرارة ضائعة... الخ).
 - تحسين مواصفات الهواء بسبب إمكانية التحكم المنفصل بالرطوبة.
 - التوفير باستهلاك الطاقة مقارنة مع عمل دارة التكييف الانضغاطية لوحدها.
- يهدف البحث الى:

- تقييم أداء الدارة التجفيفية الثنائية الهجينة وفق للشروط المناخية للمدن الساحلية السورية.
- تحديد درجة حرارة إعادة التنشيط المناسبة لعمل المجففات.
- مقارنة أداء دارة التكييف التجفيفية الثنائية الهجينة مع دارة التكييف الانضغاطية التقليدية.

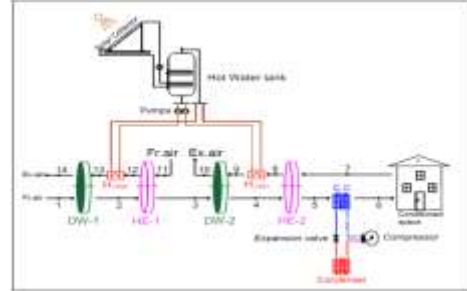
آلية عمل المجففات:

الشكل (1) دورة المجفف.

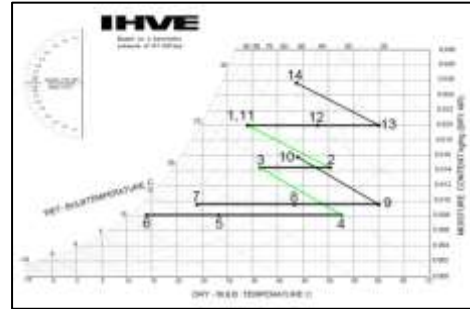
يوضح الشكل (1) دورة عمل المجفف عندما يكون الضغط الجزئي لبخار الماء على سطح المادة المجففة أخفض منه في الهواء المحيط (A) تنتقل الرطوبة من الهواء المحيط إلى المادة المجففة ومع ازدياد محتوى المادة المجففة من الماء يزداد الضغط الجزئي لبخار الماء على سطحها فتتناقص قدرتها على امتصاص أو ادمصاص الرطوبة حتى الوصول إلى (B) ثم يتم تسخين المادة المجففة من (B) إلى (C) فيزيد الضغط الجزئي لبخار الماء على سطحها على الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء المحيط فتنتقل الرطوبة من المادة المجففة إلى الهواء المحيط، وتدعى هذه العملية إعادة التنشيط وبعد أن تتم عملية إعادة تنشيط المادة المجففة بواسطة الحرارة يبقى الضغط الجزئي لبخار الماء على سطحها مرتفعاً (C) وهذا يعني أنها تمتلك قدرة محدودة على امتصاص أو ادمصاص الرطوبة لذلك يتم تبريد المادة المجففة من

(C) حتى (A) من أجل خفض الضغط الجزئي لبخار الماء على سطحها فتستعيد بذلك قدرتها على امتصاص أو ادمصاص الرطوبة من جديد [1].

تمثيل دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية على المخطط السايكومتري:



الشكل (2) نموذج دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية المقترحة.



الشكل (3) تمثيل دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية على المخطط السايكومتري.

العملية 1-2: تجفيف مع تسخين ضمن المجفف DW-1

العملية 2-3: تبريد محسوس ضمن المبادل الحراري HE-1

العملية 3-4: تجفيف مع تسخين ضمن المجفف DW-2

العملية 4-5: تبريد محسوس ضمن المبادل الحراري HE-2

العملية 5-6: تبريد محسوس ضمن مبخر المضخة الحرارية C.C

العملية 6-7: تسخين محسوس ضمن المبادل الحراري HE-2

العملية 7-8: تسخين محسوس ضمن وشيعة التسخين Hreg-1

العملية 8-9: تنشيط المجفف DW-2 (باننتقال الرطوبة لهواء الطرد)

العملية 9-10: تسخين محسوس ضمن المبادل الحراري HE-1

العملية 10-11: تسخين محسوس ضمن وشيعة التسخين Hreg-2

العملية 11-12: تنشيط المجفف DW-1 (باننتقال الرطوبة لهواء الطرد)

يدخل الهواء الجديد (1) الى المجفف الدوار الاول ليتم

عملية نزع الرطوبة من الهواء وانتقالها الى المواد المجففة الصلبة بسبب فرق ضغط البخار الجزئي بين الهواء الخارجي و سطح المواد المجففة ليخرج الهواء من المجفف عند النقطة (2)، وتكون العملية (1-2) هي عملية تجفيف مع تسخين، ثم

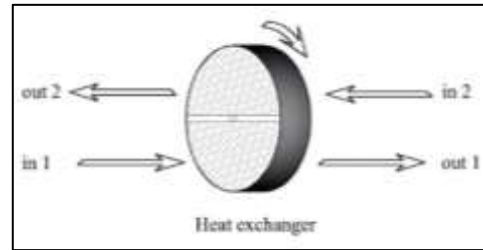
يدخل الهواء الى المبادل الحراري الدوار الاول ليتم الاستفادة من الهواء الخارجي الداخل الى الطرف الاخر للمبادل الحراري، وبالتالي تخفيض درجة حرارة الهواء الخارج من المبادل الحراري عند النقطة (3)، وتكون العملية (2-3) هي عملية تبريد محسوس، ثم يدخل الهواء عند النقطة (3) الى المجفف الدوار الثاني ليتم عملية نزع الرطوبة من الهواء وانتقالها الى المواد المجففة الصلبة بسبب فرق ضغط البخار الجزئي بين الهواء وسطح المواد المجففة ليخرج الهواء من المجفف عند النقطة (4)، وتكون العملية (3-4) هي عملية تجفيف مع تسخين، ثم يدخل الهواء الى المبادل الحراري الدوار الثاني ليتم الاستفادة من هواء الطرد الداخل الى الطرف الاخر للمبادل الحراري، وبالتالي تخفيض درجة حرارة الهواء الخارج من المبادل الحراري عند النقطة (5)، وتكون العملية (4-5) هي عملية تبريد محسوس، ثم يدخل الهواء عند النقطة (5) الى مبخر دارة التبريد الانضغاطية ليتم تخفيض درجة حرارته، ليخرج الهواء من المبخر عند النقطة (6)، وتكون العملية (5-6) هي عملية تبريد محسوس، وبعدها يكون الهواء جاهز لإرساله للفراغ المراد تكييفه، اما هواء الطرد فيتم سحب

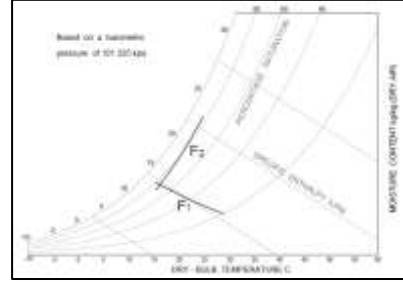
الهواء الفاسد عند النقطة (7) الى المبادل الحراري الدوار الثاني وذلك للاستفادة من حرارته المنخفضة لتبريد هواء العملية الخارج من المجفف الثاني، وتكون العملية (7-8) هي عملية تسخين محسوس، ثم يدخل الهواء الى وشيعة التسخين الإضافية الاولى ليتم تسخين الهواء لدرجة حرارة إعادة التنشيط المطلوبة، وتكون العملية (8-9) هي عملية تسخين محسوس، ثم يدخل الهواء الساخن الى المجفف الدوار ليقوم بسحب الرطوبة من المواد المجففة بسبب فرق الضغط الجزئي لبخار الماء بين الهواء الساخن وسطح المواد المجففة الصلبة، ثم يطرد الهواء المحمل بالرطوبة الى الخارج عند النقطة (10)، اما الهواء اللازم لإعادة تنشيط المجفف الأول فيتم ادخال الهواء الخارجي عند النقطة (11) الى المبادل الحراري الدوار الاول وذلك للاستفادة من حرارته المنخفضة لتبريد الهواء الخارج من المجفف الاول، وتكون العملية (11-12) هي عملية تسخين محسوس، ثم يدخل الهواء الى وشيعة التسخين الإضافية الثانية ليتم تسخين الهواء لدرجة حرارة إعادة التنشيط المطلوبة، وتكون العملية (12-13) هي عملية تسخين محسوس، ثم يدخل الهواء الساخن الى المجفف الدوار ليقوم بسحب الرطوبة من المواد المجففة

بسبب فرق الضغط الجزئي لبخار الماء بين الهواء الساخن وسطح المواد المجففة الصلبة، ثم يطرد الهواء المحمل بالرطوبة الى الخارج عند النقطة (14).

الموديول الرياضي لعناصر دارة التكييف:

• المبادل الحراري الدوار:





الشكل (4) المبادل الحراري الدوار.

يعبر عن فعالية المبادل بالعلاقة التالية [2]:

$$\varepsilon = \frac{t_{in1} - t_{out1}}{t_{in1} - t_{in2}} \quad (1)$$

ومن علاقة التوازن الطاقى (باعتبار الضياعات معدومة):

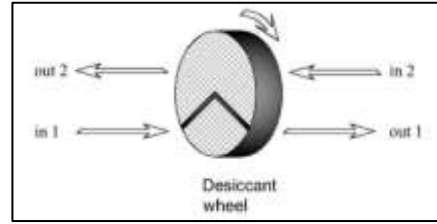
$$m_1(h_{in1} - h_{out1}) = m_2(h_{out2} - h_{in2}) \quad (2)$$

$$m_1 = m_2 \quad (3)$$

$$W_{in1} = W_{out1} \quad (4)$$

$$W_{in2} = W_{out2} \quad (5)$$

• **المجفف الدوار:**



الشكل (5) المجفف الدوار.

وللتعبير عن أداء العجلة الدوارة يتم كتابة توابع الكمون لهذه العجلة ويعبر عنها بالعلاقات التالية [2]:

$$F_{1,i} = \frac{-2865}{(t_i + 273.15)^{1.49}} + 4.344 \left(\frac{w_i}{1000} \right)^{0.8624} \quad (6)$$

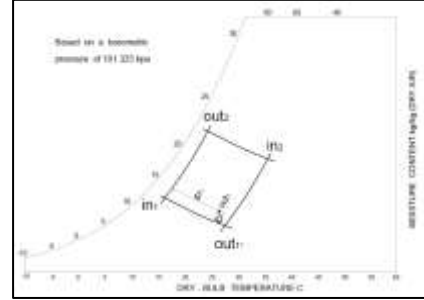
$$F_{2,i} = \frac{(t_i + 273.15)^{1.49}}{6360} - 1.127 \left(\frac{w_i}{1000} \right)^{0.07969} \quad (7)$$

الشكل (6) تمثيل خطوط الكمون على المخطط السايكومترى.

وتحدد كفاءة المجفف بقدرته على إزالة الرطوبة ويعبر عن ذلك بالعلاقات التالية [2]:

$$\varepsilon_{F1} = \frac{F_{1,out1} - F_{1,in1}}{F_{1,in2} - F_{1,in1}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{F2} = \frac{F_{2,out1} - F_{2,in1}}{F_{2,in2} - F_{2,in1}} \quad (9)$$



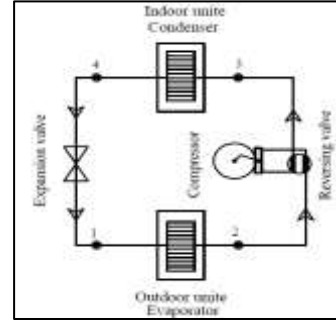
الشكل () العلاقة بين خطوط الكمون و معاملات الفعالية.

ومن علاقة التوازن الطاقى (باعتبار الضياعات معدومة):

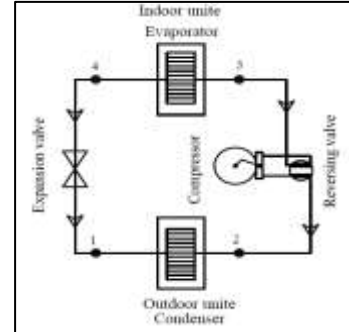
$$t_{out1} - t_{in1} = t_{in2} - t_{out2} \quad (10)$$

$$W_{in1} - W_{out1} = W_{out2} - W_{in2} \quad (11)$$

• المضخة الحرارية (الانضغاطية):



الشكل (8) آلية عمل المضخة الحرارية - حالة التدفئة.



الشكل (9) آلية عمل المضخة الحرارية - حالة التبريد.

يعطى معامل أداء دارة المضخة الحرارية بالعلاقة الآتية [3]:

$$COP_{ev} = \eta * COP_{Carnot} \quad (12)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_o}{T_1 - T_o} \quad (13)$$

حيث:

T_o : درجة حرارة المنبع الحراري.

T_1 : درجة حرارة المصدر الحراري.

استطاعة وشيعة التبريد (evaporator):

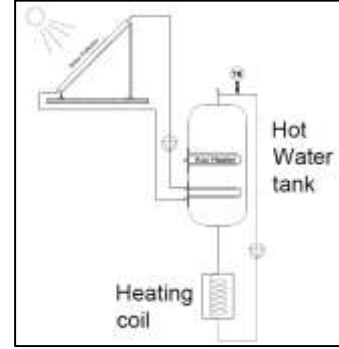
$$Q_{cc} = m_p (h_5 - h_6) \quad (14)$$

يعبر عن عمل الضاغط بالعلاقة التالية:

$$W_c = \frac{Q_{cc}}{COP_{ev}}$$

• **وشيعة التسخين الإضافية وملحقاتها:**

يتم رفع درجة حرارة الهواء الخارج من المبادل الحراري الدوار الى درجة الحرارة المطلوبة لإعادة التنشيط بواسطة وشيعة تسخين إضافية موصولة الى خزان ماء ساخن (يتم تسخين المياه بواسطة نظام تسخين شمسي ووشيعة كهربائية). وبما أن خرج المجمعات الشمسية غير مستقر وذلك لأنه يتبع للإشعاع الشمسي المتغير مع ساعات النهار وهذا لا يتناسب مع الحمل الحراري المطلوب لوشيعة التسخين الإضافية، لذلك تم وضع الخزان الحراري بين المجمعات الشمسية ووشيعة التسخين الإضافية بالتالي ستكون وظيفته تأمين سوية طاقة ثابتة وفصل التدفق الكتلي للحمل الحراري عن التدفق الكتلي للمجمعات الشمسية [4].



الشكل (10) وشيعة التسخين الإضافية وملحقاتها.

الحرارة المطلوبة لإعادة تنشيط المجفف:

$$Q_{reg} = m_p (h_{out2} - h_{in2}) \quad (16)$$

الطاقة الإضافية المطلوبة لإعادة تنشيط المجفف:

$$Q_{AUX} = Q_{reg} - Q_{solar} \quad (17)$$

يعبر عن مردود المجمع الشمسي بالعلاقة التالية [4]:

$$\eta = \frac{Q_U}{A I_T} \quad (18)$$

مؤشرات أداء نظام التبريد:

• معامل الكفاءة (EER):

$$EER = \frac{Q_{RP}}{W_C + Q_{Aux} + E_{FAN} + E_{Pump} + E_{HE} + E_{DES}} \quad (19)$$

• استهلاك الطاقة الكهربائية الكلي:

$$E = W_C + E_{Aux} + E_{Fan} + E_{Pump} + E_{HE} + E_{Des} \quad (20)$$

- نسبة التوفير بالطاقة للدارة الهجينة مقارنة مع الدارة الانضغاطية:

$$E_s = \frac{E_{vcr} - E}{E_{vcr}} \quad (21)$$

البارامترات المستخدمة في البحث:

بارامترات المكان المكيف

الجدول (1) بارامترات المكان المكيف بعد دراسة الاحمال الحرارية وشروط التهوية للمكان المدروس.

13.76	حمل المكان المحسوس (kW)
4.8	حمل المكان الكامن (kW)
0.74	نسبة الحرارة المحسوسة SHR
34	درجة الحرارة الخارجية (C°)
60	الرطوبة النسبية الخارجية (%)
24	درجة الحرارة الداخلية (C°)
50	الرطوبة النسبية الداخلية (%)
4050	تدفق هواء العملية المطلوب (m3/h)
0.4	الاستهلاك الكهربائي لتوربين الهواء (kW)

بارامترات المجفف الدوار المدروس

الجدول (2) بارامترات المجفف الدوار المدروس بعد معرفة تدفق الهواء المطلوب.

0.8	القطر الخارجي للمجفف الدوار (m)
0.3	عرض المجفف الدوار (m)
silca gel	المادة المجففة الصلبة
0.95 0.05	معاملات الفعالية
0.3	استهلاك الطاقة الكهربائي للمجفف (kW)

بارامترات المبادل الحراري المحسوس الدوار

الجدول (3) بارامترات المبادل الحراري المحسوس الدوار بعد معرفة تدفق الهواء المطلوب.

0.8	القطر الخارجي للمبادل (m)
0.3	عرض المبادل (m)
الألمنيوم	المادة الفعالة
85	معامل الفعالية (%)
0.3	استهلاك الطاقة الكهربائي للمبادل (kW)

بارامترات وشيعة التسخين وملحقاتها

الجدول (4) بارامترات وشيعة التسخين وملحقاتها.

بارامترات المضخة الحرارية

الجدول (5) بارامترات المضخة الحرارية بعد معرفة الشروط الداخلية للمكان المكيف وشروط المناخ الخارجي.

1.026	الحرارة النوعية للهواء (kJ/kg. K)
4.18	الحرارة النوعية للماء (kJ/kg. K)
0.8	مردود المبادل الحراري (ماء - هواء)
0.75	مردود المجمع الشمسي

6590	معدل الاشعاع الشمسي الكلي على سطح أفقي (w/ m2. day)
0.3	استهلاك الطاقة الكهربائي للمضخة (kW)
9	درجة حرارة المنبع الحراري (C°)
50	درجة حرارة المصرف الحراري (C°)
85	معامل نقل الطاقة بين المحرك الكهربائي والضاغط (%)
2.9	معامل أداء الدارة الانضغاطية

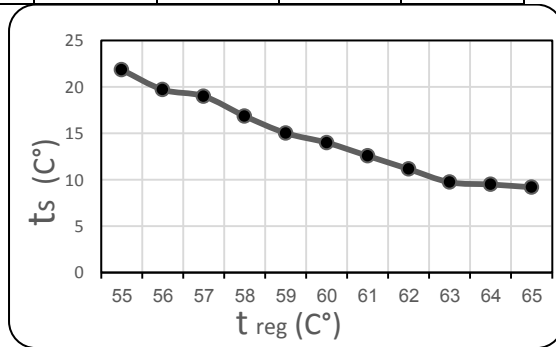
الدراسة التحليلية لنظام التكييف المدروس:

• تحديد درجة حرارة إعادة تنشيط المجففات:

لتحديد درجة حرارة إعادة تنشيط المجففات المناسبة تمت دراسة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير درجات حرارة إعادة تنشيط من 55 °C إلى 65 °C، وموضحة النتائج بالجدول (6) والاشكال (11-12-13) وذلك بثبات الظروف الخارجية ($t_{out} = 34^{\circ}C$, $\phi_{out} = 60\%$).

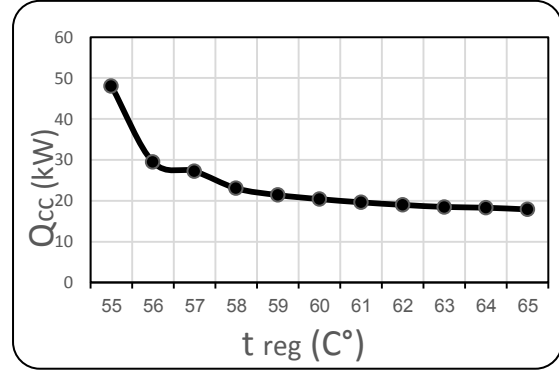
الجدول (6) بارامترات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغيير درجة حرارة إعادة التنشيط.

$t_{reg}(C^{\circ})$	Q_{rp} (kW)	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	Q_{reg} (kW)	E (kW)	EER	$t_s(C^{\circ})$
55	18.56	48.07	16.58	137.2	25.64	0.724	21.86
56	18.56	29.48	10.16	65.79	15.65	1.186	19.72
57	18.56	27.21	9.38	60.37	14.60	1.271	19.01
58	18.56	23.04	7.95	43.38	12.31	1.507	16.87
59	18.56	21.40	7.38	36.67	11.41	1.626	15.04
60	18.56	20.41	7.04	34.19	10.95	1.695	14.01
61	18.56	19.62	6.77	31.43	10.54	1.761	12.58
62	18.56	18.99	6.55	29.27	10.21	1.817	11.16
63	18.56	18.49	6.38	27.57	9.95	1.864	9.74
64	18.56	18.30	6.31	28.38	9.93	1.869	9.50
65	18.56	17.89	6.17	28.44	9.79	0.724	9.20

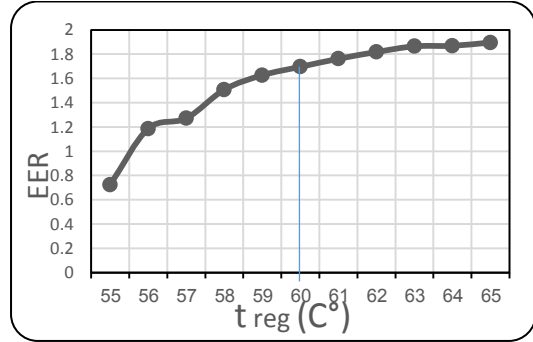


الشكل (11) العلاقة بين درجة حرارة إعادة التنشيط t_{reg} ودرجة حرارة هواء التغذية t_s .

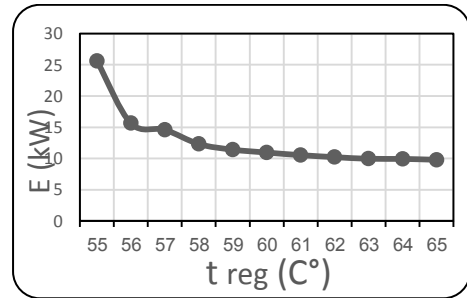
مع ارتفاع درجة حرارة إعادة التنشيط تنخفض درجة حرارة تغذية الهواء.



الشكل (12) العلاقة بين درجة حرارة إعادة التنشيط t_{reg} واستطاعة مبخر الدارة الانضغاطية المطلوبة Q_{cc} . مع ارتفاع درجة حرارة إعادة التنشيط تنخفض استطاعة مبخر المضخة الحرارية حتى نقطة معينة بعدها يصبح شبه ثابت.



الشكل (13) العلاقة بين درجة حرارة إعادة التنشيط t_{reg} ومعامل الكفاءة EER. مع ارتفاع درجة حرارة إعادة التنشيط يزداد معامل الكفاءة حتى نقطة معينة بعدها يصبح شبه ثابت.



الشكل (14) العلاقة بين درجة حرارة إعادة التنشيط t_{reg} والاستهلاك الطاقي اللازم E. مع ارتفاع درجة حرارة إعادة التنشيط ينخفض استهلاك الطاقة حتى نقطة معينة بعدها يصبح شبه ثابت. من الاشكال السابقة نستنتج ان درجة حرارة إعادة التنشيط المثالية هي $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، ويوضح الجدول (7) بارامترات ومؤشرات دارة التكييف المدروسة عند درجة حرارة إعادة التنشيط المثالية $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

الجدول (7) بارامترات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند درجة حرارة إعادة التنشيط $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

COP _{ev}	ε	ε_{F2}	ε_{F1}	m_p (kg/s)	m_r (kg/s)
2.9	0.85	0.95	0.05	1.401	1.401

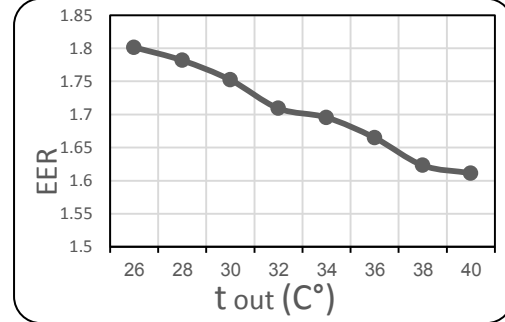
Q_{cc} (kW)	Q_{reg} (kW)	Q_{aux} (kW)	W_c (kW)	E (kW)	EER
20.409	34.19	1.710	7.038	10.947	1.695

- تأثير تغير درجة الحرارة الخارجية على بارامترات دارة التكييف المقترحة.

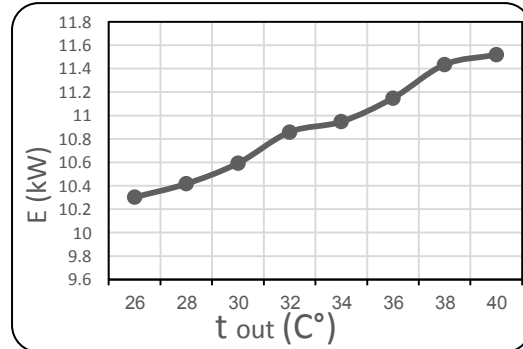
تمت دراسة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير درجات الحرارة الخارجية من $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ الى $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، وموضحة النتائج بالجدول (8) والاشكال (15-16)، حيث انه مع ارتفاع درجة الحرارة الخارجية ترتفع درجة حرارة إعادة التنشيط، وترتفع استطاعة مبخر المضخة الحرارية، ويرتفع الاستهلاك الطاقى، اما معامل الكفاءة فانه ينخفض مع ارتفاع درجة الحرارة الخارجية.

الجدول (8) بارامترات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير درجات الحرارة الخارجية.

t_{out} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	E (kW)	Q_{reg} (kW)	t_{reg} ($^{\circ}\text{C}$)	EER
26	18.64	6.43	10.30	33.48	51.7	1.801
28	19.04	6.56	10.42	33.05	53.4	1.782
30	19.46	6.71	10.59	33.66	55.5	1.752
32	19.97	6.89	10.86	35.42	58.0	1.709
34	20.41	7.04	10.95	34.19	60.0	1.695
36	20.79	7.17	11.15	35.61	61.8	1.665
38	21.29	7.34	11.43	37.86	64.5	1.623
40	21.67	7.47	11.52	36.92	66.0	1.611



الشكل (15) العلاقة بين درجة الحرارة الخارجية t_{out} ومعامل الكفاءة EER.



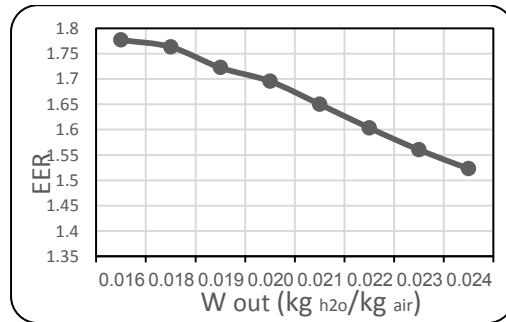
الشكل (16) العلاقة بين درجة الحرارة الخارجية t_{out} والاستهلاك الطاقى E.

- تأثير تغير محتوى الرطوبة الخارجية على بارامترات دارة التكييف المقترحة.

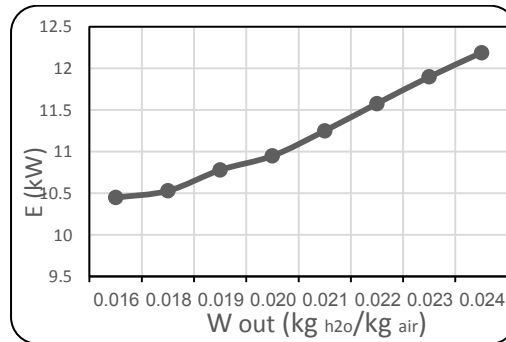
تمت دراسة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير محتوى الرطوبة الخارجية من 0.016 إلى $\frac{kg_{h_2o}}{kg_{air}}$ 0.024، وموضحة النتائج بالجدول (9) والاشكال (17-18)، حيث انه مع ارتفاع محتوى الرطوبة الخارجية ترتفع درجة حرارة إعادة التنشيط، وترتفع استطاعة مبخر المضخة الحرارية، ويرتفع الاستهلاك الطاقى، اما معامل الكفاءة فانه ينخفض مع ارتفاع الرطوبة النوعية الخارجية.

الجدول (9) بارامترات دارة التكييف الهجينة الثنائية عند تغير محتوى الرطوبة الخارجية.

$\frac{W_{out}}{kg_{air}}$	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	E (kW)	Q_{reg} (kW)	t_{reg} (C°)	EER
0.016	19.19	6.62	10.45	32.58	52.8	1.777
0.018	19.71	6.80	10.53	30.63	55.7	1.763
0.019	20.07	6.92	10.78	33.12	57.8	1.722
0.020	20.41	7.04	10.95	34.19	60.0	1.695
0.021	20.70	7.14	11.25	38.18	62.1	1.650
0.022	21.07	7.26	11.58	42.22	64.8	1.603
0.023	21.42	7.39	11.90	46.21	67.4	1.560
0.024	21.75	7.50	12.19	49.72	70.0	1.523



الشكل (17) العلاقة بين محتوى الرطوبة الخارجية W_{out} ومعامل الكفاءة EER.



الشكل (18) العلاقة بين محتوى الرطوبة الخارجية W_{out} والاستهلاك الطاقى اللازم E.

- تأثير تغير معامل فعالية المجفف على بارامترات دارة التكييف المقترحة.

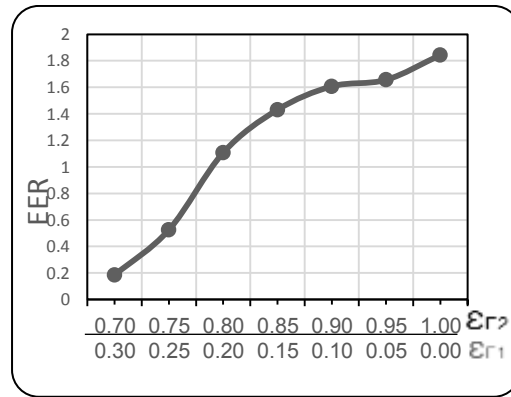
تمت دراسة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير قيم معامل فعالية المجفف الدوار من (0.3، 0.7) الى (1، 0)، وموضحة النتائج بالجدول (10) والاشكال (19-20)، حيث انه مع ارتفاع قيم معامل الفعالية

تنخفض درجة حرارة إعادة التثييط وتنخفض استطاعة مبخر المضخة الحرارية وينخفض الاستهلاك الطاقى، اما معامل الكفاءة فانه يرتفع مع ارتفاع فعالية المجفف.

الجدول (10) بارمترات دارة التكييف الهجينة الثنائية عند تغير معامل فعالية المجفف الدوار.

$\varepsilon_{F2}, \varepsilon_{F1}$	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	E (kW)	Q_{reg} (kW)	$t_{reg}(C^\circ)$	EER
0.70 , 0.30	49.44	17.05	100.39	1622.85	156.80	0.185
0.75 , 0.25	28.15	9.71	35.33	468.59	128.00	0.525
0.80 , 0.20	22.59	7.79	16.76	135.46	86.20	1.107
0.85 , 0.15	20.92	7.21	12.97	71.15	71.00	1.431
0.90 , 0.10	20.31	7.00	11.55	46.87	63.90	1.607
0.95 , 0.05	20.70	7.14	11.20	37.29	60.00	1.657
1 , 0	19.71	6.80	10.07	21.46	54.80	1.843

الشكل (20) العلاقة بين معاملا فعالية المجفف الدوار $\varepsilon_{F2}, \varepsilon_{F1}$ والاستهلاك الطاقى اللازم E.



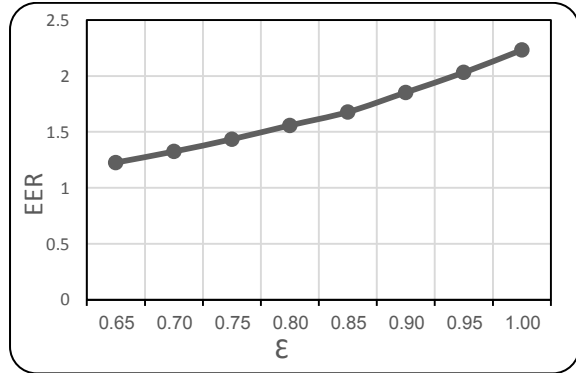
الشكل (19) العلاقة بين معاملا فعالية المجفف الدوار $\varepsilon_{F2}, \varepsilon_{F1}$ ومعامل الكفاءة EER.

• تأثير تغير معامل فعالية المبادل الحرارى الدوار على بارمترات دارة التكييف المقترحة.

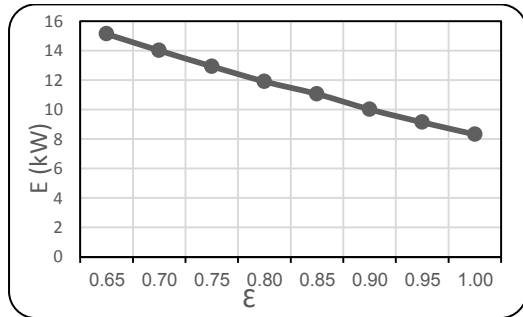
تمت دراسة بارمترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية عند تغير قيم معامل فعالية المبادل الحرارى الدوار من 0.65 الى 1، وموضحة النتائج بالجدول (11) والاشكال (21-22)، حيث انه مع ارتفاع قيم معامل فعالية المبادل الحرارى تنخفض درجة حرارة إعادة التثييط وتنخفض استطاعة مبخر المضخة الحرارية وينخفض الاستهلاك الطاقى، اما معامل الكفاءة فانه يرتفع مع ارتفاع فعالية المبادل الحرارى.

الجدول (11) بارمترات دارة التكييف الهجينة الثنائية عند تغير معامل فعالية المبادل الحرارى الدوار.

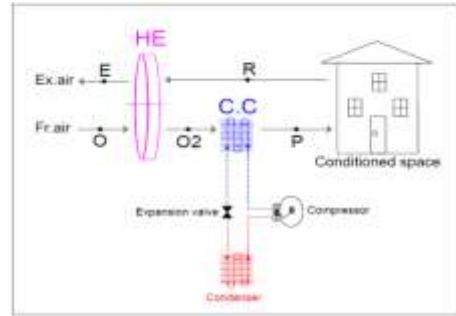
ε	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	E (kW)	Q_{reg} (kW)	$t_{reg}(C^\circ)$	EER
0.65	30.31	10.45	15.14	49.68	64.0	1.226
0.70	27.65	9.53	14.01	45.56	63.0	1.325
0.75	25.10	8.66	12.94	41.66	62.0	1.434
0.80	22.68	7.82	11.91	37.83	61.0	1.558
0.85	20.70	7.14	11.06	34.49	60.0	1.678
0.90	18.24	6.29	10.02	30.58	59.0	1.853
0.95	16.19	5.58	9.14	27.13	58.0	2.031
1.00	14.29	4.93	8.32	23.82	57.0	2.231



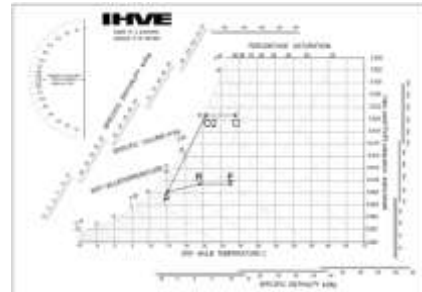
الشكل (21) العلاقة بين معامل فعالية المبادل الحراري الدوار ϵ ومعامل الكفاءة EER.



الشكل (22) العلاقة بين معامل فعالية المبادل الحراري الدوار ϵ والاستهلاك الطاقى اللازم E. دورة التكييف الانضغاطية (التقليدية):



الشكل (23) دورة التكييف الانضغاطية التقليدية.



الشكل (24) تمثيل دورة التكييف الانضغاطية التقليدية على المخطط السايكومتري.

تمت دراسة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التقليدية عند ظروف خارجية ثابتة ($t_{out} = 34^\circ \text{C}$, $\phi_{out} = 60\%$)، وموضحة النتائج بالجدول (12).

الجدول (12) بارامترات دارة التكييف الانضغاطية (التقليدية)

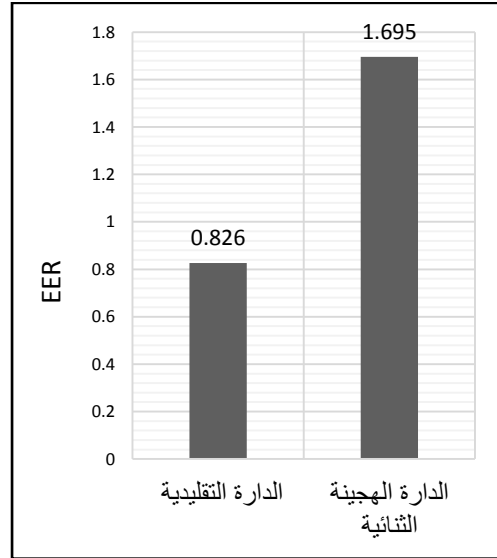
ε	COP_{ev}	Q_{RP} (kW)	t_s (C°)	EER
0.85	2.9	18.56	15	0.826
m_p (kg/s)	m_R (kg/s)	Q_{cc} (kW)	W_c (kW)	E (kW)
1.548	1.548	63.157	21.778	22.48

مقارنة دارة التكييف المدروسة مع دارة التكييف الانضغاطية التقليدية:

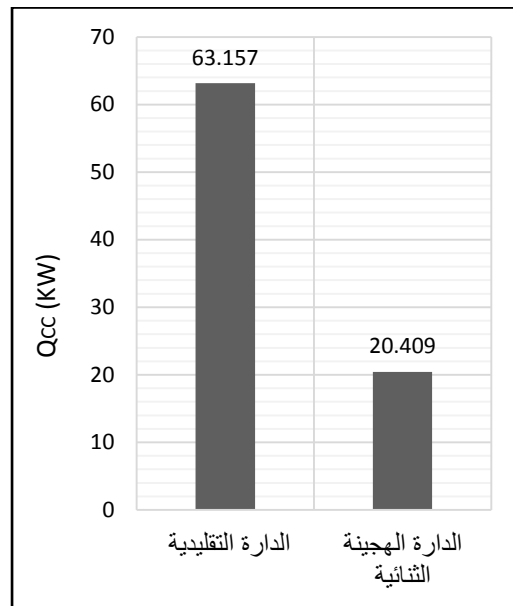
تمت مقارنة بارامترات ومؤشرات دارة التكييف الانضغاطية التقليدية مع بارامترات ومؤشرات دارة التكييف التجفيفية الهجينة الثنائية، عند ظروف خارجية ثابتة ($t_{out} = 34^\circ \text{C}$, $\phi_{out} = 60\%$)، وموضحة المقارنة بالجدول (13) والاشكال (25-26-27).

الجدول (13) مقارنة بارامترات دارة التكييف المدروسة مع دارة التكييف الانضغاطية التقليدية.

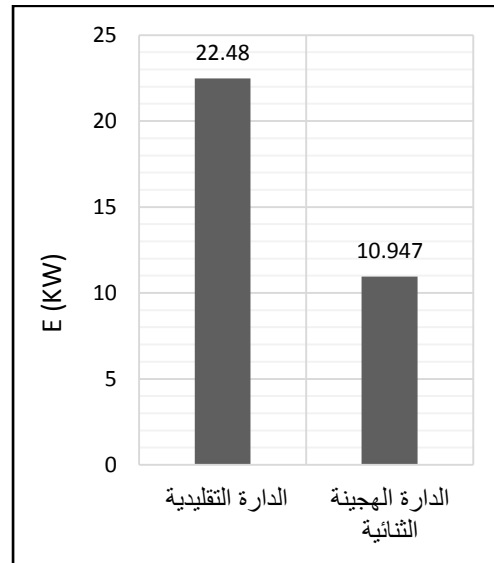
	الدارة التقليدية	الدارة الهجينة الثنائية
ε_{F1}	-	0.05
ε_{F2}	-	0.95
ε	0.85	0.85
COP_{ev}	2.9	2.9
Q_{RP} (kW)	18.56	18.56
t_s (C°)	15	14.01
m_p (kg/s)	1.548	1.401
m_R (kg/s)	1.548	1.401
Q_{cc} (kW)	63.157	20.409
W_c (kW)	21.778	7.038
EER	0.826	1.695
E (kW)	22.48	10.947
Q_{req} (kW)	-	34.19
t_{req} (C°)	-	60



الشكل (25) مقارنة معامل الكفاءة EER للدارات المدروسة.

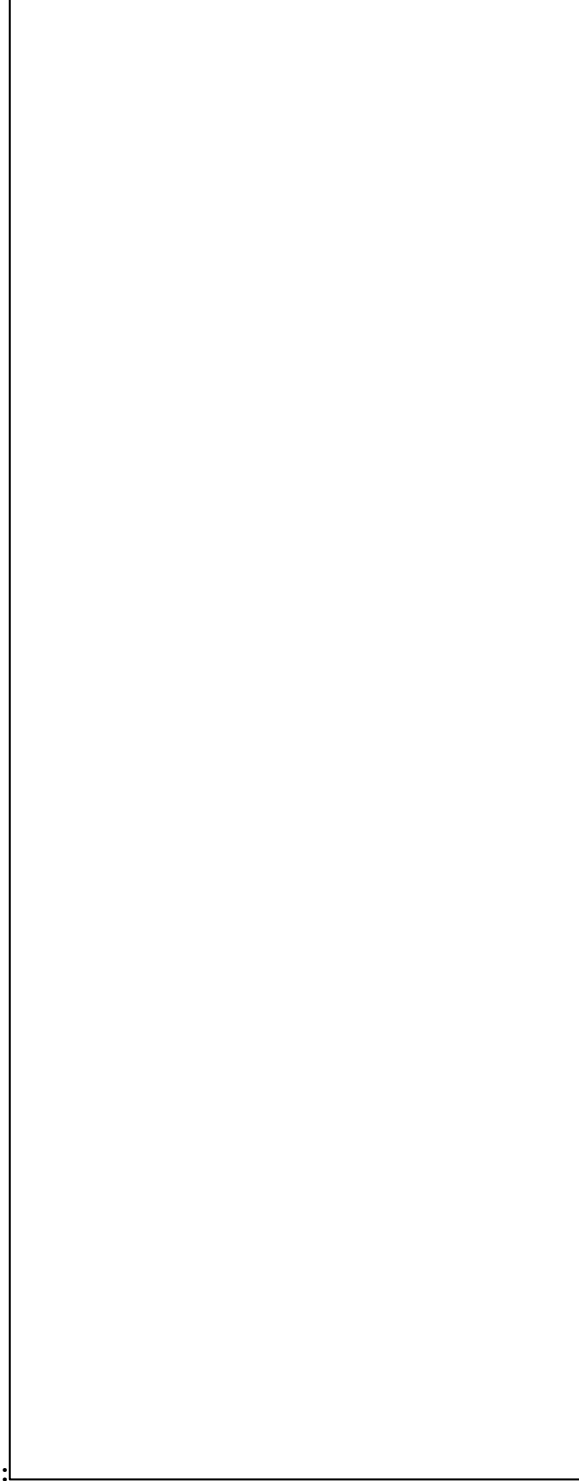


الشكل (26) مقارنة استطاعة مبخر المضخة الحرارية Q_{cc} للدارات المدروسة.



الشكل (27) مقارنة الاستهلاك الطاقي E للدارات المدروسة.

يلاحظ انخفاض الاستهلاك الكهربائي لدارة التكييف التجفيفية الثنائية الهجينة من 22.48KW الى 10.947KW أي بمقدار 51.3% مقارنة بدارة التكييف التقليدية (الانضغاطية)، كما يلاحظ انخفاض استطاعة مبخر المضخة الحرارية من 63.157KW الى 20.409KW أي بمقدار 67.7%، كما يلاحظ ازدياد معامل الكفاءة من 0.826 الى 1.695 أي بمقدار 105.2%.



الرموز والمصطلحات

DW: المجفف الدوار.

HE: المبادل الحراري الدوار.

- H.reg: وشيعة تسخين الهواء الاضافية.
- C.C: وشيعة تبريد المضخة الحرارية (المبخر).
- Ex.air: هواء الطرد.
- Fr.air: الهواء الجديد.
- ϵ : معامل فعالية المبادل الحراري الدوار.
- $\epsilon_{F1}, \epsilon_{F2}$: معاملا فعالية عجلة المجفف الدوار.
- F1, F2: توابع الكمون لعجلة المجفف الدوار.
- Wc : عمل ضاغط دارة التبريد الانضغاطية (kW).
- Q_{cc}: استطاعة وشيعة تبريد الدارة الانضغاطية (kW).
- Q_{reg}: الحرارة اللازمة لإعادة التنشيط (kW).
- Q_{AUX}: الحرارة المقدمة من السخان المساعد (kW).
- Q_{solar}: الحرارة المقدمة من المجمع الشمسي (kW).
- Q_{RP}: الحمل الحراري للفراغ المدروس (kW).
- E: استهلاك الطاقة الكهربائية الكلي لدارة التبريد (kW).
- E_{Aux}: الاستهلاك الكهربائي للسخان المساعد (kW).
- E_{pump}: الاستهلاك الكهربائي للمضخات (kW).
- E_{Fan}: الاستهلاك الكهربائي لمراوح الهواء (kW).
- E_{Des}: الاستهلاك الكهربائي للمجفف الدوار (kW).
- E_{HE}: الاستهلاك الكهربائي للمبادل الحراري (kW).
- E_{vcr}: الاستهلاك الكهربائي لدارة التبريد الانضغاطية (kW).
- E_s: نسبة التوفير في الطاقة مقارنة بالدارة الانضغاطية.
- COPEv: معامل أداء دارة التبريد الانضغاطية.
- EER: معامل الكفاءة.
- η : مردود المجمع الشمسي.
- Q_U: الحرارة المقدمة من اللواقط (kW).
- A: مساحة اللواقط الشمسية (m²).
- I_T: الاشعاع الشمسي (kw.h/m²).

- t: درجة الحرارة (C°) .
- w: محتوى الرطوبة $\left(\frac{\text{kg}_{\text{h}_2\text{o}}}{\text{kg}_{\text{air}}}\right)$.
- h: الانتالبي (kJ/kg. K) .
- m: التدفق الكتلي (kg/s) .
- m_p : تدفق هواء التغذية (kg/s) .
- m_r : تدفق هواء الطرد (kg/s) .
- t_s : درجة حرارة التغذية (C°) .
- t_{reg} : درجة حرارة إعادة تنشيط المجففات (C°) .
- t_{out} : درجة حرارة الهواء الخارجي (C°) .
- w_{out} : محتوى رطوبة الهواء الخارجي $\left(\frac{\text{kg}_{\text{h}_2\text{o}}}{\text{kg}_{\text{air}}}\right)$.

المراجع:

[1] ر جورج، و ناعمة، ط قاسم، م صايغ، ر المصري، س عجيب، (2008)، "مبادئ الطاقة الشمسية وتطبيقاتها". جامعة البعث.

[2] Tavakol, Behbahaninia, (2018), "Presentation of two new two-stage desiccant cooling cycles based on heat recovery and evaluation of performance based on energy and exergy analysis". Building Engineering

[3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (2012). "ASHRAE handbook-2012 Fundamentals".

[4] Mathematical Reference, TRNSYS 16, (2006), University of Wisconsin Madison.

[5] Akbari, Kouravand, Chegini, (2018), "Experimental Analysis of a Rotary Heat Exchanger for Waste Heat Recovery from the Exhaust Gas of Dryer". Applied Thermal Engineering.

[6] Lee, Park, Kan, (2020), "Performance analysis of a solid desiccant cooling system for a residential air conditioning system". Applied Thermal Engineering.