الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكيّة والكهربائيّة
قسم هندسة الميكانيك العام
شعبة الطاقات المتجددة

# تحليل أداء منظومة شمسية لتدفئة وتكييف مبنى باستخدام آلة تبريد امتصاصية ذات التأثير المضاعف

دراسة أعدّت لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقات المتجددة

**إعداد**

**م. فراس الجوجو**

**إشراف**

**د.م. عيسى محمود**

أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام – كلية الهندسة المكيانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

العام الدراسي 2020-2021

# لجنة الحكم

اجتمعت لجنة الحكم في تمام الساعة 12 من يوم الثلاثاء تاريخ 2021/6/8 لمناقشة رسالة الماجستير التي تقدم بها الطالب فراس الجوجو بعنوان:

" تحليل أداء منظومة شمسية لتدفئة وتكييف مبنى باستخدام آلة تبريد امتصاصية ذات التأثير المضاعف"

بناءً على قرار مجلس الكلية رقم /3590/ تاريخ 2021/4/5 وقرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا بجامعة دمشق رقم /1889/ م.ب.د المتخذ بالجلسة رقم /14/ تاريخ 2021/4/26 القاضي بتأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير للطالب المهندس فراس الجوجو المؤلفة من السادة:

| | | |
|---|---|---|
| الأستاذ الدكتور وجيه ناعمة | (جامعة دمشق) | عضواً |
| الأستاذ المساعد الدكتورة امينة فارس | (جامعة دمشق) | عضواً |
| الأستاذ المساعد الدكتور عيسى محمود | (جامعة دمشق) | عضواً ومشرفاً |

وقد تمت التعديلات وفق ما طُلب من السادة أعضاء لجنة الحكم:

| | | |
|---|---|---|
| الدكتور وجيه ناعمة | الدكتورة امينة فارس | الدكتور عيسى محمود |

## كلمة شكر وتقدير

بدأت بفكرة صغيرة, وعانيت الكثير, وواجهتني العديد من الصعاب، وها أنا اليوم والحمدلله أطوي سهر الليالي وتعب الأيام وخلاصة طريقي بين دفتي هذا العمل المتواضع. ففي مثل هذه اللحظات يتوقف اليراع ليفكر قبل أن يخط الحروف ليجمعها في كلمات ... تتبعثر الأحرف وعبثاً يحاول تجميعها في سطور كثيرة تمر في الخيال، ولا يبقى لنا في نهاية المطاف إلا قليلٌ من الذكريات والصور التي تجمعني برفاق كانوا إلى جانبنا ... فواجب عليّ أن أشكرهم وأهديهم عملي هذا.

إلى من علمونا حروفاً من ذهب وكلمات من درر, إلى من صاغوا لنا علمهم حروفاً ومن فكرهم منارةً تنير لنا مسيرة العلم والنجاح, إلى جميع أساتذتنا الكرام في جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية أتقدم بالشكر الجزيل, وفي مقدمتهم:

## ***الدكتور المهندس عيسى محمود***

الذي تفضل بالإشراف على هذا المشروع، فأعطاه من علمه الكثير, فكان لي خير العون والسند، ووقف إلى جانبي عندما ضللت الطريق واستمرّ في دعمي إلى أن وصلت إلى هذه اللحظة فله مني كل التقدير والاحترام.

*أرض الحب والحرب .. الوطن الذي يحمل رائحة الجنة.. قبّتي ومحرابي..

شآم

* إلى أملي في الحياة، إلى نور عيوني، إلى مستقبلي، إلى هدفي، إلى من أعيش من أجلها، إلى من منحتني القوة، إلى ابنتي الغالية.

سيلين

* إلى نبع العطف والحنان، إلى من سخّرت حياتها في سبيل أن أعيش أفضل حياة، إلى من حرمت نفسها من ملذات الدنيا وقطعتها عن فمها كي أنعم بها.

أمي

*إلى شريكتي في الحياة، إلى من تمدني بالقوة، إلى من تؤازرني، إلى من تقف بجانبي في وقت المصاعب، إلى من تمدني بالتفاؤل، إلى زوجتي الغالية.

مرح

* إلى من كان سنداً لي ووقف إلى جانبي في حياتي.

أبي

* إلى سندي ومؤازري وتوءم روحي، إلى من كان لي أكثر من صديق.

فادي

* إلى ابني الروحي، إلى من ملأ حبه في قلبي، إلى ابن أخي.

ريان

* إلى أختي التي لم تلدها أمي.

سماح

## الفهرس


جدول الرموز ..... 10

دلائل الرموز السفلي ..... 12

جدول الأشكال ..... 13

الملخص ..... 18

مقدمة ..... 18

المشكلة العلمية في مشروع البحث ..... 19

هدف وأهمية البحث ..... 21

الدراسات المرجعية ..... 22

**الفصل الأول: الحمل الحراري**

1-1 مقدمة ..... 24

1-2 الموقع المدروس ..... 25

1-3 بيانات الموقع المدروس ..... 26

1-4 حساب حمل التكييف ..... 26

1-5 افتراضات طريقة RTS ومبادئها ..... 28

1-5 خوارزمية طريقة RTS ..... 28

1-6 خطوات حساب الحمل الحراري ..... 29

1-6-1 حساب الزوايا الشمسي ..... 29

1-6-2 حساب شدة الإشعاع الشمسي الوارد على السطح المدروس ..... 32

1-6-3 حساب درجة الحرارة $Tsol, air$ ..... 33

1-6-4 حساب الحمل الحراري الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل عبر العناصر الإنشائية للسطح المدروس ..... 34

1-6-5 حساب الحمل الحراري الناتج عن انتقال الحرارة عبر النوافذ ..... 41

1-6-6 حساب الحمل الحراري الناتج عن الأحمال الداخلية..... 44
1-6-6-1 الحمل الحراري الناتج عن الأشخاص ..... 44
1-6-6-2 الحمل الحراري الناتج عن أجهزة الإضاءة..... 45
1-6-6-3 الحمل الحراري الناتج عن المعدات الكهربائية ..... 47
1-7 حساب حمل التدفئة ..... 49

**الفصل الثاني: آلة التبريد الامتصاصية**

2-1 مقدمة..... 51
2-2 استهلاك الطاقة الكهربائية بوساطة آلات التبريد الانضغاطية..... 51
2-3 المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الانصغاطية ..... 52
2-4 المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الامتصاصية ..... 54
2-5 فرضيات البحث..... 58
2-6 المعادلات الناظمة لجميع مكونات الدارة..... 59
2-7 الدراسة التحليلية..... 60

**الفصل الثالث: حقل المجمعات الشمسية**

3-1 مقدمة..... 71
3-2 اعتبارات الدراسة ..... 72
3-3 المجمع الشمسي ..... 72
3-4 حساب معاملات انتقال الحرارة..... 67
3-5 حساب معامل الضياع الحراري الكلي $UL$ ..... 76

3-5-1 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{56.rad}$ ..... 76
3-5-2 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{67.\mathrm{cond}}$ ..... 77
3-5-3 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{78.con}$ ..... 78
3-5-4 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{7\mathrm{sky.rad}}$ ..... 80
3-5-5 حساب معامل الضياع الحراري الكلي $UL$ ..... 81
3-6 حساب معامل انتقال الحرارة الكلي ..... 82
3-6-1 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{54.\mathrm{cond}}$ ..... 82
3-6-2 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{43.\mathrm{rad}}$ ..... 82
3-6-3 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{32.\mathrm{cond}}$ ..... 83
3-6-4 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{21.\mathrm{con}}$ ..... 84
3-6-5 حساب معامل انتقال الحرارة الكلي $Uo$ ..... 85
3-7 حساب معامل مردود المجمع الشمسي $F'$ ..... 86
3-8 حساب معامل إزالة الحرارة $FR$ ..... 87
3-9 حساب مساحة المجمعات الشمسية ..... 87
3-9-1 تحديد زاوية ميلان حقل المجمعات الشمسية ..... 88
3-9-2 طريقة $\emptyset, f\ chart$ ..... 91
3-10 أثر التظليل في خرج المجمعات الشمسية ..... 96

**الفصل الرابع: الخزان الحراري**

4-1 مقدمة..... 102
4-1 وظائف الخزان في المنظومة الشمسية الحرارية ..... 102
4-2 حساب حجم الخزان (خزان المزج الكامل) ..... 103
4-3 تغير درجة حرارة الخزان الحراري – حالة المزج الكامل ..... 107

**الفصل الخامس: دراسة التبلور**

5-1 مقدمة..... 113
5-2 أسباب التبلور والاحتياطات ..... 114
5-2-1 انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط..... 116
5-2-2 زيادة التدفق الحراري في وعاء الفصل الرئيسي..... 117
5-2-3 انخفاض درجة حرارة التبخر..... 118
5-2-4 ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط ..... 119
5-2-5 حدوث تسرب للهواء في الدارة..... 119
5-3 معالجة مشكلة التبلور ..... 119
5-4 بارامترات محلول بروميد الليثيوم – ماء..... 121
5-4-1 الانتالبي ..... 121
5-4-2 اللزوجة التحريكية..... 121
5-4-3 الموصلية الحرارية ..... 122
5-4-4 الكثافة ..... 122
5-4-5 السعة الحرارية..... 123

**الفصل السادس: الأثر البيئي**

6-1 مقدمة..... 125

6-2 استهلاك الطاقة الكهربائية بوساطة آلات التبريد الانضغاطية..... 125

6-3 حساب كمية ال Co2 المنطلقة في حال استخدام الوقود الأحفوري لتغذية الدارة ..... 126

6-3-1 استخدام وقود الديزل $C12H26$..... 126

6-3-2 استخدام وقود الديزل $C12H26$..... 128

6-4 حساب كمية الماء المستهلكة في حال استخدام المكثف المائي في دارة التبريد الامتصاصي ..... 129

**الفصل السابع: النتائج والتوصيات**

7-1 نتائج البحث ..... 131

7-2 التوصيات ..... 132

**المراجع العلمية**

المراجع الأجنبية ..... 134

المراجع العربية ..... 136

Abstract ..... 137

## جدول المصطلحات والرموز

| الرمز | الدلالة | الواحدة |
|---|---|---|
| t | الزمن | $[hr]$ |
| T | درجة الحرارة | [°C] |
| AST | الوقت الشمسي | $[hr]$ |
| LST | الوقت في الموقع المدروس | $[hr]$ |
| ET | معادلة الوقت | $[min]$ |
| L | زاوية خط العرض | [ ° ] |
| LSM | زاوية خط الطول القياسي | [ ° ] |
| LON | زاوية خط الطول | [ ° ] |
| H | الزاوية الساعية | [ ° ] |
| $\theta_z$ | زاوية السمت الشمسي | [ ° ] |
| $\gamma$ | زاوية السمت الشمسي السطحي | [ ° ] |
| $\theta$ | زاوية الورود | [ ° ] |
| E | شدة الإشعاع الشمسي | $[W/m^2]$ |
| R | النسبة بين شدة الإشعاع الشمسي الوارد على سطح مائل إلى شدة الإشعاع الشمسي الوارد على سطح أفقي | - |
| $\rho$ | انعكاسية الأرض | - |
| $\alpha$ | امتصاصية السطح | - |
| $\varepsilon$ | انبعاثية السطح | - |
| U | معامل الانتقال الحراري الكلي | $[W/m^2°C]$ |
| q | معدل الحرارة المنتقلة بالتوصيل | $[W/m^2]$ |

| | | |
|---|---|---|
| $c_p$ | السعة الحرارية | $[\boldsymbol{kJ/kg}°\mathrm{C}]$ |
| V | الحجم | $[\mathbf{m^3}]$ |
| D | القطر | $[\boldsymbol{m}]$ |
| k | معامل انتقال الحرارة بالتوصيل | $[\boldsymbol{W/m}°\mathrm{C}]$ |
| $Nu$ | عدد نوسلت | - |
| $Re$ | عدد رينولدز | - |
| $Pr$ | عدد براندل | - |
| $F'$ | معامل مردود المجمع الشمسي | - |
| $F_R$ | معامل إزالة الحرارة | - |
| $\beta$ | زاوية ميلان السطح | $[\,°\,]$ |
| $h_s{}'$ | زاوية غروب الشمس على سطح مائل | **-** |
| S | المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الممتص من قبل المجمعات الشمسية | $[\boldsymbol{J/m^2}]$ |
| A | المساحة | $[\boldsymbol{m^2}]$ |
| f | معامل الفائدة الشمسية | - |
| V | حجم الخزان | $[\boldsymbol{m^3}]$ |
| $\dot{m}$ | التدفق الكتلي | $[\boldsymbol{kg/sec}]$ |
| m | الكتلة | $[\boldsymbol{kg}]$ |
| W | العمل | $[\boldsymbol{J}]$ |
| $\dot{Q}$ | التدفق الحراري | $[\boldsymbol{W}]$ |
| COP | معامل الأداء | - |
| $\dot{E}$ | الإكسيرجي | $[\boldsymbol{W}]$ |
| X | التركيز الكتلي | $[\boldsymbol{kg_{LiBr}/kg_{Sol}}]$ |
| η | المردود | - |

## دلائل الرموز السفلية

| الرمز | الدلالة |
|---|---|
| B | المباشر |
| D | المنتشر |
| T | الكلي |
| Sol,air | الهواء الخارجي |
| O | الوسط المحيط |
| Rc | الوسط الداخلي |
| Cond | توصيل |
| Con | حمل |
| Rad | إشعاع |
| C | مكثف |
| E | مبخر |
| Com | ضاغط |
| E.V | صمام تمدد |
| G | وعاء فصل |
| A | وعاء امتصاص |

# جدول الأشكال


| الفصل الأول | |
|---|---|
| الشكل (1-1) | الطابق الأول للموقع المدروس |
| الشكل (1-2) | الطابق الثاني للموقع المدروس |
| الشكل (1-3) | درجة حرارة الوسط المحيط لمدينة دمشق خلال شهر حزيران |
| الشكل (1-4) | خوارزمية طريقة RTS |
| الشكل (1-5) | الزوايا الشمسية |
| الشكل (1-6) | تغير درجة الحرارة الخارجية ودرجة الحرارة $T_{sol,air}$ مع الزمن |
| الشكل (1-7) | تغير معدّل التدفق الحراري والربح الحراري والحمل الحراري مع الزمن |
| الشكل (1-8) | حمل التكييف |
| الشكل (1-9) | حمل التدفئة |

| الفصل الثاني | |
|---|---|
| الشكل (2-1) | مخطط تمثيلي لدارة التبريد الانضغاطية |
| الشكل (2-2) | مخطط تمثيلي لدارة التبريد الانضغاطية يوضح الضياعات الناتجة عن تحويل الطاقة الأولية إلى طاقة ثانوية مستهلكة من قبل الضاغط |
| الشكل (2-3) | مخطط تمثيلي لدارة تبريد امتصاصية أحادية التأثير |
| الشكل (2-4) | مقارنة بين دارتي التبريد الامتصاصية والانضغاطية |
| الشكل (2-5) | مخطط تمثيلي لدارة تبريد امتصاصية مضاعفة التأثير المتسلسل العاملة على محلول بروميد الليثيوم – ماء |
| الشكل (2-6) | تغيّر معامل أداء دارة التبريد الامتصاصية مع تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي |
| الشكل (2-7) | تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي مع درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي |
| الشكل (2-8) | تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي مع تغيّر الخطأ في توازن الدارة |
| الشكل (2-9) | مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء |

| | (log(p)−X−T) |
|---|---|
| الشكل (2−10) | تغيّر معامل الأداء مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي |
| الشكل (2−11) | مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء (h−X−T) |
| الشكل (2−12) | تغيّر مردود الأكسيرجي مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي |
| الشكل (2−13) | تغيّر ضياع الأكسيرجي في وعاء الفصل الرئيسي مع تغيّر درجة حرارته |
| الشكل (2−14) | تغيّر ضياع الأكسيرجي في الدارة مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي |
| الشكل (2−15) | مقارنة ضياع الأكسيرجي بين أوعية دارة التبريد الامتصاصية |

| **الفصل الثالث** | |
|---|---|
| الشكل (3−1) | الوصل التسلسلي للأنابيب الماصة |
| الشكل (3−2) | مقطع عرضي للأنبوب الزجاجي |
| الشكل (3−3) | مقطع عرضي للأنبوب الماص في المجمع الشمسي |
| الشكل (3−4) | تغير المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل عند قيم مختلفة لزاوية ميلان المجمع الشمسي خلال فصل الصيف |
| الشكل (3−5) | تغير المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل عند قيم مختلفة لزاوية ميلان المجمع الشمسي خلال فصل الشتاء |
| الشكل (3−6) | المتوسط الشهري لمركبة الإشعاع المباشر والمنتشر والكلي لجداء نفاذية الغطاء الزجاجي بامتصاصية السطح الماص |
| الشكل (3−7) | تغير معامل الفائدة الشمسية f عند مساحات مختلفة |
| الشكل (3−8) | معامل الفائدة الشمسية خلال فصل الصيف |
| الشكل (3−9) | أثر التظليل |
| الشكل (3−10) | مقارنة بين خرج المجمعات الشمسية بوجود وعدم وجود تظليل |
| الشكل (3−11) | توزع حقل المجمعات الشمسية |
| الشكل (3−12) | توزع حقل المجمعات الشمسية على وتر مثلث – المسقط الجانبي لهيكل معدني |

| الفصل الرابع | |
|---|---|
| الشكل (4-1) | خزان مزج كامل |
| الشكل (4-2) | تغير الطاقة المفيدة في الخزان مع تغير الزمن |
| الشكل (4-3) | تغير معامل الفائدة الشمسية مع تغير حجم الخزان خلال فصل الصيف |
| الشكل (4-4) | تغير معامل الفائدة الشمسية مع تغير حجم الخزان خلال فصل الشتاء |
| الشكل (4-5) | مقارنة قيم معامل الفائدة الشمسية خلال أشهر الشتاء |
| الشكل (4-6) | التدفقات الطاقية والكتلية لخزان المزج الكامل |
| الشكل (4-7) | مقارنة تغير درجة حرارة الوسيط الخارج من المجمعات الشمسية ودرجة حرارة الخزان مع الزمن |
| الشكل (4-8) | مقارنة بين تغير درجة حرارة الوسيط الخارج من المجمعات الشمسية في حال كانت درجة حرارة الدخول ثابتة أم متغيرة |

| الفصل الخامس | |
|---|---|
| الشكل (5-1) | برج التبريد التبخيري في دارة التبريد الامتصاصية |
| الشكل (5-2) | تغير درجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن في دمشق خلال شهر حزيران |
| الشكل (5-3) | مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء |
| الشكل (5-4) | مقطع في دارة التبريد الامتصاصية لأكثر المواضع خطراً لحدوث التبلور |
| الشكل (5-5) | أثر انخفاض درجة الحرارة الجافة للهواء الخارجي في التبلور |
| الشكل (5-6) | أثر انخفاض درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي في التبلور |
| الشكل (5-7) | أثر انخفاض درجة حرارة التبخر في التبلور |
| الشكل (5-8) | واجهة البرنامج المصمم في بحثنا |

## الملخص

درسنا في هذا البحث تكييف الهواء لفيلا في مدينة دمشق باستخدام آلة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير والعاملة على المحلول بروميد الليثيوم – ماء. تتغذى آلة التبريد بالحرارة من خلال حقل شمسي يعتمد على المجمعات الشمسية الحرارية ذات الأنابيب المفرغة والتدفق المباشر (U–Pipe).

باستخدام البرنامج RTS تبين أنَّ حملي التكييف الصيفي والشتوي للفيلا هما [W] 17200 و[W] 9160، على التوالي. لدى إنجاز الحسابات الحرارية للآلة الامتصاصية, وجدنا أنَّ درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي ليست ثابتة, بل متغيرة, وتتعلق بدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي. لذلك قمنا بحساب معامل أداء الآلة كتابع لدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي ورسم العلاقة, ووجدنا أنَّ معامل الأداء يزداد بازديادها حتى يصل إلى قيمة أعظمية هي [ºC] 161 لينخفض بعدها. قمنا بإسقاط هذه القيمة على المخططات التيرموديناميكية للمحلول بروميد الليثيوم – ماء فلاحظنا حدوث تبلور في الآلة عندها. وجدنا أيضاً أنَّ القيمة الحدية الآمنة التي تضمن عدم حدوث تبلور هي [ºC] 144. لأجل تحديد القيمة التصميمية لدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي قمنا بحساب ضياع الأكسيرجي له ووجدنا أن أقل قيمة للضياع توافق درجة الحرارة [ºC] 140، وبالتالي تم اعتمادها. لدى إنجاز الحسابات الحرارية للمجمعات الشمسية وجدنا أن قيمة معامل الضياع الحراري الكلي $3.06[W/(m^2.°C)]$، وقيمة عامل إزالة الحرارة 0.79, بالإضافة إلى ذلك قمنا بالحسابات التفصيلية لتغير الطاقة الشمسية الواردة على سطح مائل كتابع لزاوية ميلان المجمع الشمسي لعدة أشهر في السنة, ووجدنا أن أفضل زاوية ميلان صيفاً هي 10° وشتاءً هي 50°. وقد استخدمنا الطريقة $\bar{\phi}, f\ chart$ لحساب مساحة المجمعات وحجم خزان الحرارة المحسوس؛ حيث كانت القيم لأجل الصيف [$m^2$] 100 و 5 [$m^3$]، على التوالي، والتي توافق نسبة مساهمة (فائدة) شمسية قدرها 92.5%. أخيراً قمنا بتحليل ظاهرة التبلور, واقترحنا حلاً لهذه المشكلة من خلال إعداد برنامج لمعادلة التبلور باستخدام برنامج الإكسيل. بالإضافة إلى ذلك قمنا بإعداد برنامج إكسيل لمعظم الخصائص الفيزيائية–الحرارية لمحلول بروميد الليثيوم–ماء مما يسهل إيجاد خصائص أية حالة للمحلول.



## كلمات مفتاحية

دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير– محلول بروميد الليثيوم–ماء – المجمعات الشمسية ذات الأنابيب المفرغة والتدفق المباشر –خزان الحرارة المحسوس – ظاهرة التبلور.

# مقدمة

# مقدمة

إنَّ المتتبع لموضوع الطاقة يدرك بأنَّ مصادر الحصول على الطاقة هي من أكثر المشكلات التي تعاني منها دول العالم، نظراً لاحتكار القوى الكبرى في العالم لمصادر الوقود التقليدية من نفط وغاز وفحم. لذا فإنَّ معظم الدول تلجأ إلى الاعتماد على مصادر طاقية متجددة، إن أمكن، كالطاقة الشمسية النظيفة والمجانية والمتوفرة في كل نقطة من العالم مع تغير شدتها حسب الموقع الجغرافي. بالإضافة إلى التلوث الهائل الذي يلحق بالبيئة نتيجة حرق الوقود الأحفوري لأجل النشاطات المتنوعة للإنسان.

إنَّ استهلاك الطاقة الكهربائية في المباني يشكل نسبة كبيرة تصل إلى ثلث الاستهلاك الكلي للكهرباء، والاعتماد بشكل رئيسي على مصادر الوقود الاحفوري التي تنضب باستمرار وتشكل مشاكل بيئية عديدة. فمثلاً وفق دراسة أقيمت في معهد شتوتغارت في ألمانيا بالتعاون مع مدينة دبي في الإمارات العربية المتحدة تبين أنَّ نسبة $50\%$ من استهلاك الطاقة الكهربائية في المناطق الحارة يذهب لصالح أجهزة التكييف العاملة على دارات التبريد الانضغاطية التقليدية. فإذا قمنا بأخذ وسطي الاستهلاك السنوي للطاقة وضربناها بنسبة استهلاك أجهزة التكييف نحصل على حصة أجهزة التكييف من الاستهلاك الطاقي، واذا افترضنا أن هذه النسبة هي نسبة الوقود المحترق (الميتان مثلاً) احتراقاً تاماً، فإنَّ نسبة الانبعاثات الغازية لغاز ثاني أوكسيد الكربون $CO_2$ تقدر بنسبة $4.125\ tone$ والتي سينعكس ذلك سلباً على البيئة والتي تؤدي إلى حدوث مشاكل بيئية عديدة. لذلك أصبح من الأهمية أن نبحث على بدائل عن دارات التبريد الانضغاطية التقليدية، وهنا تبرز آلات التبريد الامتصاصية التي تستغني عن الضاغط وتستعيض عنه بإجراءات حرارية تغلق الدارة تيرموديناميكياً.

## المشكلة العلمية في مشروع البحث

تتلخص المشكلة العلمية في بحثنا بأنَّ التبريد أصبح حاجة ماسة للإنسان سواء لتأمين الراحة الحرارية له أم لحفظ الأغذية (خضار وفواكه ولحوم على مختلف أنواعها) وللتطبيقات الطبية (حفظ الأدوية والدم وغيرها) ولتطبيقات عديدة بحيث لا يمكن أن نتخيل حياتنا من دون أجهزة التبريد. كما هو معلوم فإنَّه يتم تأمين التبريد باستخدام آلات التبريد الانضغاطية التي تستجر كميات هائلة من الطاقة الكهربائية لعمل الضاغط فيها بشكل أساسي. فدارات التبريد تُسمى تيرموديناميكياً بدارات عكسية لأن عملية انتقال الحرارة فيها تتم من المبخر ذي درجة الحرارة التصميمية المنخفضة إلى الوسط المحيط ذي درجة الحرارة الأعلى، وبالتالي هذه ليست عملية تلقائية لانتقال الحرارة مما يستلزم صرف طاقة. على مستوى العالم، وليس فقط سورية، يتم توليد الطاقة الكهربائية بنسبة ممتازة باستخدام المحطات الحرارية البخارية والتي تستلزم حرق كميات هائلة من الوقود الأحفوري مما يسبب تلوثاً خطيراً للبيئة.

كما ذكرنا أعلاه ففي دارة التبريد الامتصاصية يتم الاستغناء عن الضاغط، وتتألف هذه الدارة من عدة أوعية رئيسية يتدفق بداخلها محلول مكون من مادتين عنصر التبريد وعنصر الامتصاص، بحيث تكون درجة حرارة عنصر التبريد أقل من درجة حرارة غليان عنصر الامتصاص كي يتحرر قبل. تتألف الدارة من وعاء الفصل بحيث يتم تقديم حرارة إليه لتحرير بخار عنصر التبريد، الذي يتابع ويكمل دارة التبريد التقليدية بالمرور عبر الضاغط وصمام التمدد والمكثف، أما المحلول الخارج من وعاء الفصل والذي أصبح فقيراً بعنصر التبريد، فيتم تخفيض ضغطه إلى ضغط التبخر عبر صمام التمدد، ومن ثم توجيهه إلى وعاء الامتصاص حيث يقوم بامتصاص بخار عنصر التبريد القادم من المبخر، ونتيجة عملية الامتصاص تنطلق حرارة نحو الوسط المحيط، والمحلول المتشكل الذي يصبح غنياً بعنصر التبريد يتم رفع ضغطه عبر مضخة إلى وعاء الفصل لإغلاق الدارة. والجدير بالذكر أن استهلاك المضخة للكهرباء قليل جداً ولا يقارن باستهلاك الكهرباء في الضاغط نظراً لأن المضخة ترفع ضغط سائل أم الضاغط فيرفع ضغط البخار.

في الحقيقة فإن البخار الخارج من وعاء الفصل الرئيسي ذو درجة حرارة مرتفعة ومتساوية مع درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، والتي ستضيع في المكثف وتشكل عبئاً طاقياً كبيراً عليه. بالتالي تم ابتكار دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير، والتي تعتمد على إمرار البخار المتحرر من وعاء الفصل الرئيسي إلى وعاء فصل إضافي يتم وضعه على خط المحلول الفقير بعنصر التبريد، مما يؤدي إلى تسخينه وتحرير كميات

إضافية من البخار، تضاف إلى كمية البخار المتحررة من وعاء الفصل الرئيسي، مما يؤدي إلى زيادة الانتاجية التبريدية وزيادة معامل أداء الدارة.

في الحقيقية فإنَّه لا يوجد طريقة واضحة لتحديد قيمة درجة الحرارة العاملة في وعاء الفصل الرئيسي وهي المشكلة الأساسية في بحثنا، ولتحديدها بدقة سنعمل على توصيف مبنى معين لتأمين الحمل الحراري المطلوب له صيفاً وشتاءً، إضافة إلى توصيف منظومة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير، وتحديد مدخلات الدارة وتغذيتها عبر تصميم حقل المجمعات الشمسية الحرارية، إضافةً إلى توصيف الخزان الحراري.

## هدف البحث

كما ذكرنا سابقاً فإن هدف البحث يكمن في تحديد درجة الحرارة العاملة في وعاء الفصل الرئيسي بشكل دقيق، وبالتالي الدراسة الحرارية التفصيلية لدارة التبريد الامتصاصية التي تعمل بالحرارة حيث يمكن تأمينها من المجمعات الشمسية الحرارية. ومن أكبر المشاكل التي تتعرض لها الدارة أثناء عملها هي مشكلة التبلور، ولذلك سنعمل على دراسة وتحليل هذه المشكلة واقتراح حلاً لها. بالإضافة إلى برمجة المعادلات المسؤولة عن التبلور، إضافة إلى برمجة معظم البارامترات الفيزيائية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء.

## أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في المساهمة في حماية البيئة من خلال الاعتماد على الطاقة الشمسية لتغذية آلة التبريد الامتصاصية بالحرارة مما يخفض كميات الكهرباء المُستجرة، وبالتالي تخفيض كميات غاز ثاني أكسيد الكربون المنطلقة إلى الهواء المحيط بفعل توليد الكهرباء وفق مبدأ المحرك الحراري الذي يعتمد على حرق الوقود. بالإضافة إلى أنَّ وسائط التبريد في هذه الآلة لا تساهم في نضوب طبقة الأوزون ولا في الاحتباس الحراري. و النقطة الأكثر إغراءً في بحثنا هي أنَّ أحمال التبريد تكون أعظمية في فصل الصيف حيث يأخذ الإشعاع الشمسي قيمه الأعظمية، مما يجعل الاستثمار في هذا المجال أمر حيوي وضروري جداً.

## دراسات مرجعية

يوجد العديد من الدراسات تناولت موضوع دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير. منها البحث المنشور من قبل [3] Nasreldin Abdalla, Kamal فقد ركز على دراسة الأداء الحراري والتصميمي لمنظومة التبريد الامتصاصية عند قيم مختلفة لدرجة حرارة التكاثف، حيث تبين أنّ أعلى قيمة لمعامل أداء الدارة تكون عند قيمة منخفضة لدرجة حرارة التكاثف. وقد أجريت دراسة رياضية من قبل الباحثين [5] Hamzehpour, Azad. Badrang Bouyeh, Saman. Aghanajafi, Cyrus. Shokouhmand, Hossein. لدارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير وباستخدام المركز الشمسي ذو القطع المكافئ كمصدر للحرارة، حيث أجريت الدراسة في طهران باستخدام برنامج الماتلاب، وتبين أن معامل الأداء الحراري للدارة يزداد بإزدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي وبإزدياد درجة حرارة التبخر، وتبين أيضاً أن إزدياد أو تناقص معدّل التدفق الحراري في وعاء الفصل يؤثر على قيمة معامل الأداء. وقد عمل الباحثون [6] Al-Tahaineh, H. Frihat, M. Al-Rahdan, M. على دراسة تغير الإكسيرجي لدارة التبريد الامتصاصية أحادية التأثير حيث قامو بحساب مردود الإكسيرجي الكلي وحساب ضياعات الإكسيرجي في كل عنصر من عناصر الدارة، وتبين أن 40% من الضياعات تتم في وعاء الفصل وأقل ضياع للإكسيرجي في وعاء الامتصاص. أما الباحث [7] Karaali, Rabi فقد درس ضياع الإكسيرجي في دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير باستخدام برنامج fortran وتبين أن 74% من ضياعات الإكسيرجي في الدارة تكون في المبخر ووعاء الامتصاص، وبالتالي يجب تصميمهم بدقة لتقليل الضياعات الحرارية في الدارة. وقد عمل الباحث [15] Ani, Farid Nasir. على دراسة أداء دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير باستخدام المجمعات الشمسية حيث قام بدراسة ثلاث مجمعات شمسية (مجمع شمسي مسطح – مجمع شمسي مسطح ذو غطاء زجاجي مضاعف – مجمع شمسي ذو الأنابيب المفرغة) حبث تيبن أن استخدام المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة بعطي أعلى قيمة للأداء الحراري في الدارة. وفيما يخص ظاهرة التبلور في الدارة فقد درس الباحثون [16] Garousi Farshi, L. Seyed Mahmoudi,S.M. Rosen,M.A ظاهرة التبلور في دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير المتسلسل والمتوازي والمتعاكس. حيث ناقش أسباب حدوث المشكلة والحلول المقترحة لها. وتبين أن خطر حدوث التبلور في النوع المتعاكس والمتوازي أعلى من النوع المتسلسل. وقد ناقش البحث [17] Liao, Xiaohong. Radermacher, Reinhard. نظام التحكم في ظاهرة التبلور في دارة التبريد الامتصاصية وذلك عن طريق التحكم بدرجات الحرارة وذلك برفع درجة حرارة التبخر أو خفض درجة الحرارة العاملة في وعاء الفصل الرئيسي.

# الفصل الأول

## الحمل الحراري

# الفصل الأول: الحمل الحراري

## المخطط الإنسيابي للفصل:

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. الموقع المدروس.
3. بيانات الموقع المدروس.
4. حساب حمل التكييف.
5. افتراضات طريقة RTS ومبادئها.
6. خوارزمية طريقة RTS
7. خطوات حساب الحمل الحراري.
8. حساب حمل التدفئة.

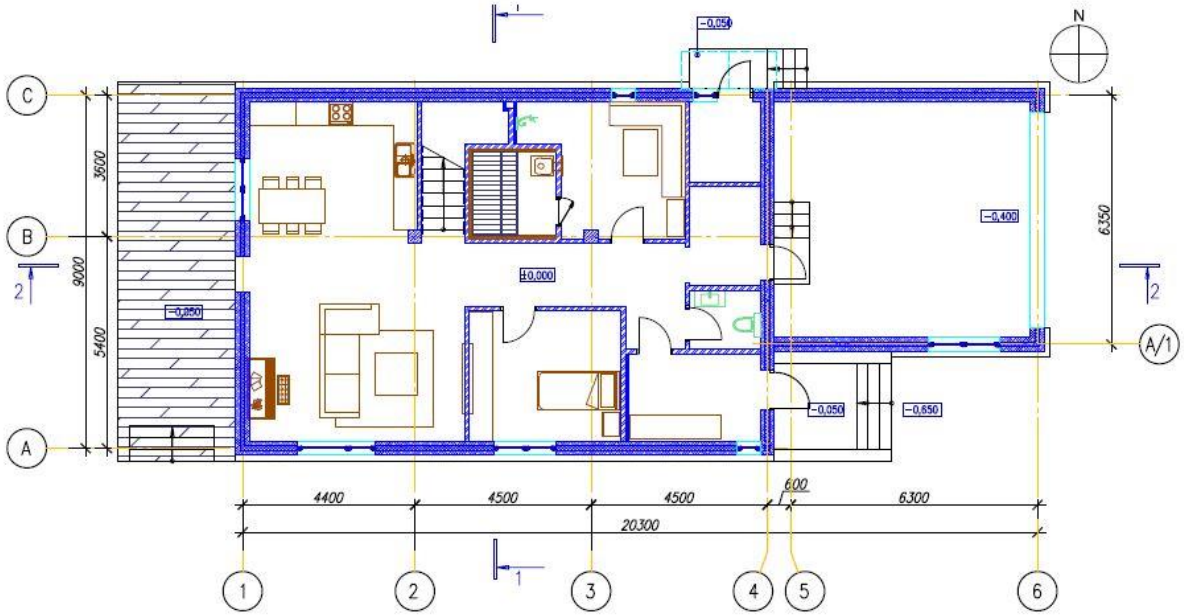
## 1-1 مقدمة

إن أي تطبيق هندسي حراري شمسي يتم توصيفه بثلاثة عناصر رئيسية في الدارة، ويجب تصميمها وفق الترتيب التالي: الحمل الحراري, المصدر الحراري, الخزان الحراري. سنقوم في هذا البحث بتأمين حملي التدفئة والتكييف لفيلا مفترضة في مدينة دمشق باستخدام آلة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير والتي يتم تزويدها بالحرارة من حقل مجمعات شمسية حرارية. قمنا بحساب حمل التكييف صيفاً باستخدام طريقة RTS والتي تعتمد بشكل أساسي على شدة الإشعاع الشمسي وفق الخطوات الآتية:

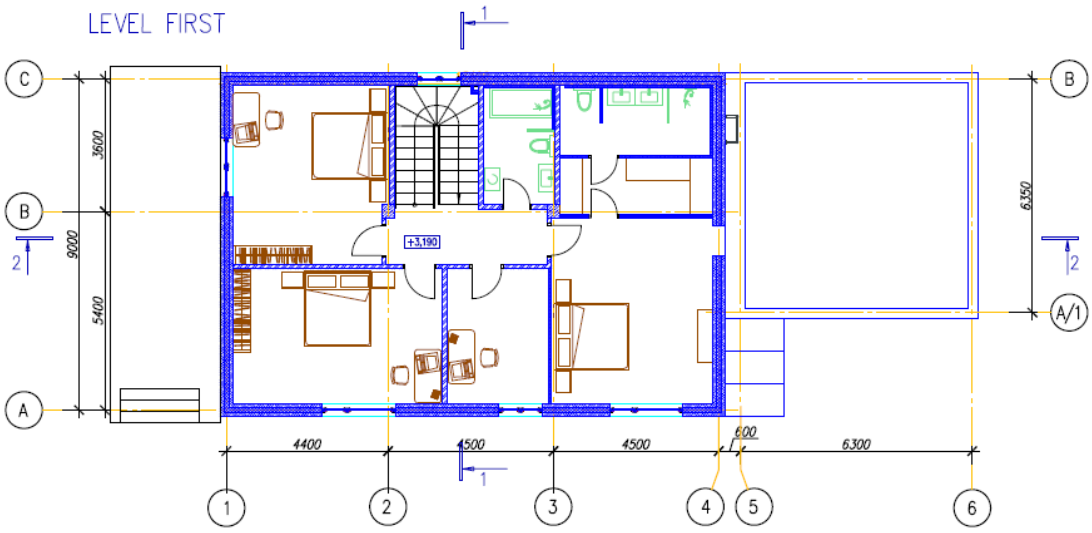
- تحديد الموقع المدروس.
- تحديد البيانات الجغرافية للموقع المدروس.
- حساب الحمل الحراري صيفاً وشتاءً.

## 2-1 الموقع المدروس

سيتم حساب الحمل الحراري لفيلا سكنية في دمشق مؤلفة من طابقين، الأول يقع فوق قبو، والثاني معرض للوسط المحيط، واتجاهات الجدران موضحة وفق الشكل(1-1) والشكل(1-2)




**الشكل(1-1) الطابق الأول للموقع المدروس**




**الشكل(1-2) الطابق الثاني للموقع المدروس**

## 1-3 بيانات الموقع المدروس

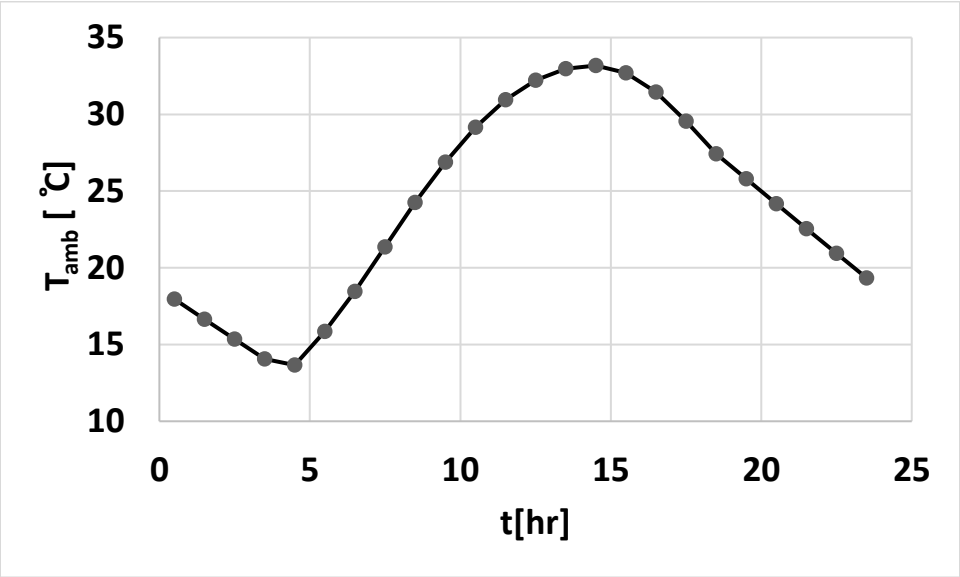
إن الموقع المدروس يقع في مدينة دمشق وفق الإحداثيات الجغرافية التالية: زاوية خط الطول $36.29°$ وزاوية خط عرض $33.5°$. وعدد الأشخاص الموجودة داخله 10. والأستطاعة الكهربائية الإجمالية لأجهزة الإنارة والأجهزة الكهربائية $[W]$ 11360 . والجدول التالي يبين البيانات الإنشائية والفيزيائية للفيلا المدروسة:

**الجدول(1-1) البيانات الإنشائي والفيزيائية للفيلا المدروسة**

| | المساحة $[m^2]$ | مساحة النوافذ $[m^2]$ | معامل انتقال الحرارة $[\frac{w}{m^2\,°C}]$ | |
|---|---|---|---|---|
| | | | جدران | نوافذ |
| السقف | 128.6 | - | 0.315 | - |
| الجدران الجنوبية | 77.1 | 18.8 | 0.383 | 3.18 |
| الجدران الشمالية | 39.1 | 0.73 | 0.383 | 3.18 |
| الجدران الشرقية | 21.9 | - | 0.383 | - |
| الجدران الغربية | 37.1 | 4.2 | 0.383 | 3.18 |

## 1-4 حساب حمل التكييف

يتم حساب حمل التكييف لأكثر أشهر السنة حرارةً (شهر حزيران). والشكل (1-3) يوضح تغير درجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن خلال الشهر المدروس، وحصلنا على البيانات باستخدام برنامج Dview ودرجة الحرارة التصميمية هي درجة حرارة الراحة الحرارية [°C] 23.9




**الشكل(1−3) درجة حرارة الوسط المحيط لمدينة دمشق خلال شهر حزيران**

يتم حساب حمل التكييف باستخدام طريقة (Radiant Time Series) RTS والسؤال المطروح: ما خطوات استخدام هذه الطريقة؟

إن طريقة RTS هي طريقة جديدة ومختصرة لحساب الحمل الحراري صيفاً (حمل التكييف)، وهي مشتقة من طريقة التوازن الحراري Heat Balance . تم الاعتماد على هذه الطريقة لأنها تعطي نتائج أكثر دقة من الطرق السابقة. وبسبب دقة النتائج التي نحصل عليها من هذه الطريقة اعتُمِد عليها واستعيض عن الطرق السابقة؛ طريقة (Transfer Function Method) TFM وطريقة (The cooling load) CLTD/CLF temperature difference / cooling load factor) وطريقة (The Total equivalent) TETD/TA temperature difference / time averaging) ثم طوّرت هذه الطريقة للحصول على نتائج دقيقة للحمل الحراري دون اللجوء إلى الطريقة التكرارية لحسابه، وبهذه الطريقة يمكننا تحديد أكثر العناصر فعالية لوضعها في مكونات البناء بالإضافة إلى معرفة الاتجاه الجيد للبناء.

إن طريقة RTS مناسبة لحساب ذروة الحمل الحراري، ولا ينبغي تطبيقها على مدار العام كله، ويمكن حساب الحمل الحراري بطريقة بسيطة بجدولة القيم على الحاسب والاستعانة ببرنامج حاسوبي كالإكسيل لإخراج النتائج.

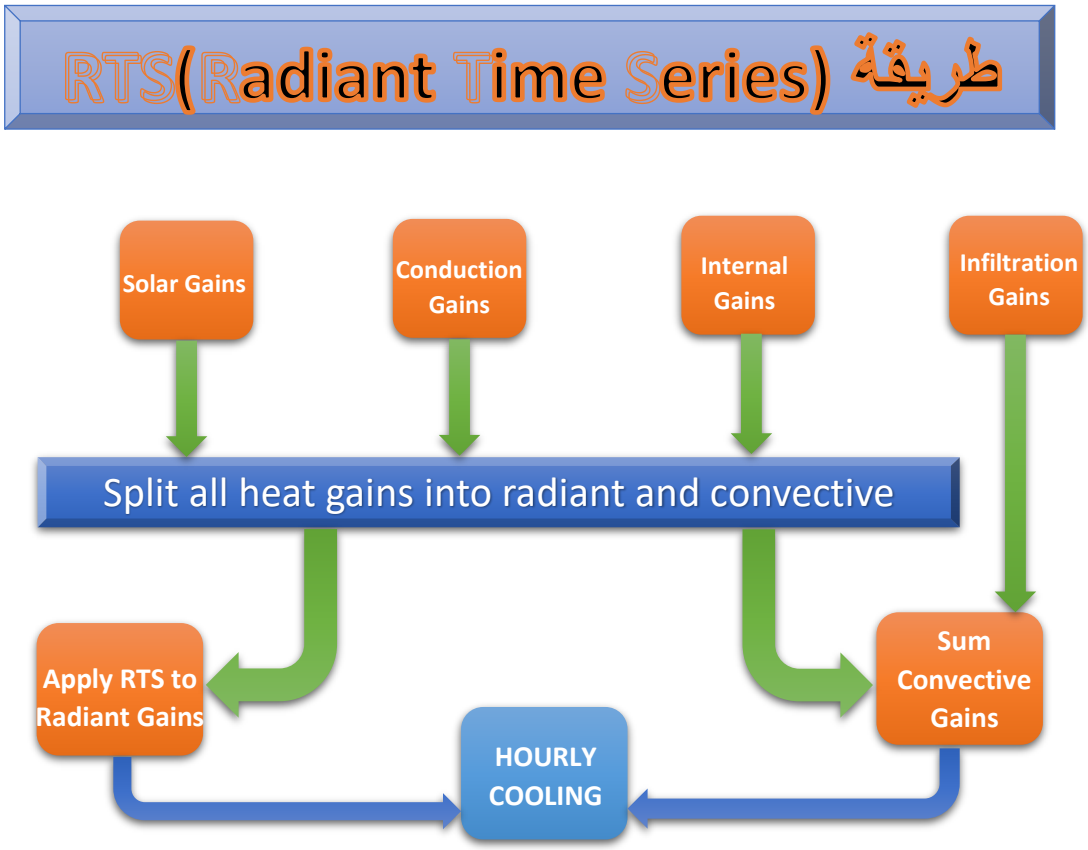
## 1-5 افتراضات طريقة RTS ومبادئها

- ❖ يجب تحديد اليوم المطلوب لحساب الحمل الحراري له.
- ❖ تحديد الموقع المدروس.
- ❖ الأخذ بعين الاعتبار أن اكتساب الحرارة خلال اليوم المدروس مساوٍ لليوم الذي قبله ولليوم الذي يليه؛ أي أن اكتساب الحرارة في ساعة معينة من النهار هو نفسه قبل 24 ساعة. وهذا الافتراض هو أساس اشتقاق طريقة RTS من طريقة HB
- ❖ يجب أن يعالج الحمل الحراري تحت تأثيرين من التأخر الزمني لعمليات انتقال الحرارة:

1. التأخر الزمني الناتج عن الكسب الحراري من انتقال الحرارة عبر العناصر الإنشائية للمبنى (جدران، سقف...) نتيجة لفرق درجات الحرارة بين الوسط الخارجي والداخلي، بمعنى آخر فإن الإشعاع الشمسي يتم امتصاصه عبر العناصر الإنشائية للمبنى لينفذ عبرها بالتوصيل وبتأخر زمني يتم انبعاثه إلى الحجم المدروس بآليتي الحمل والإشعاع. الجزء المنتقل بالحمل يضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما الجزء المنتقل بالإشعاع فيتم نقله بوقت لاحق إلى الحجم المدروس بالاعتماد على ثوابت سيتم شرحها لاحقاً.
2. التأخر الزمني الناتج عن تحويل الكسب الحراري الإشعاعي المفيد إلى حمل حراري.

## 1-6 خوارزمية طريقة RTS [1]

الشكل(1-4) يعطي نظرة عامة عن طريقة RTS حيث في البداية يتم حساب الزوايا الشمسية، بالإضافة إلى حساب شدة الإشعاع الشمسي بمركباته (المباشر، المنتشر، المنعكس) الواردة على السطح المدروس، ومن ثم يتم حساب درجة الحرارة تحت تأثير شدة الإشعاع الشمسي، ومن ثم حساب الحمل الحراري الناتج عن الكسب الحراري من العناصر الإنشائية للمبنى (الجدران، النوافذ، السقف)، بالإضافة إلى الكسب الحراري الناتج عن الأحمال الداخلية (الأشخاص، أجهزة الإنارة، الأجهزة الكهربائية). ومن ثم يتم تجزئة الكسب الحراري لكل عنصر إلى مركبتين؛ وهما الحمل والإشعاع، حيث إن المركبة الحملية تضاف إلى الحمل الحراري مباشرةً، أما المركبة الإشعاعية فتضاف لاحقاً بعد تطبيق معاملات خاصة بطريقة RTS، وتطلقه لاحقاً بتأخر زمني. ولحسابها يتم استخدام ثوابت متعلقة بالإشعاع الحراري تبعاً للعنصر الإنشائي المدروس. وبالنتيجة يتم جمع الكسب الحراري الحملي والإشعاعي للحصول على الحمل الحراري المطلوب وفي هذا البحث سيتم تفصيل خطوات الحساب لكل عنصر من العناصر.

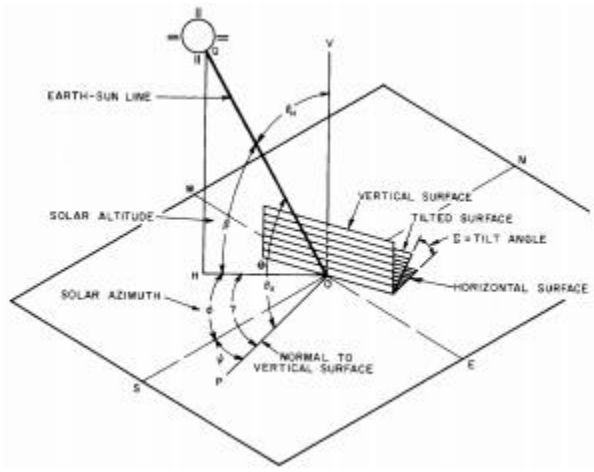



الشكل(1-4) خوارزمية طريقة RTS

## 1-6 خطوات حساب الحمل الحراري

### 1-6-1 حساب الزوايا الشمسي

يتم حساب جميع الزوايا الشمسية الموضحة بالشكل (1-5) بالدرجة المئوية




**الشكل(1−5) الزوايا الشمسية**

ويجب في البداية تحديد زاوية خط الطول LON وزاوية خط العرض L للموقع المدروس، ويتم استخدام الوقت الشمسي في حساب بقية الزوايا ويعطى بالمعادلة(1−1):

$$AST = LST + {}^{ET}/_{60} + (LON - LST)/15 \qquad (1-1)$$

يتم حساب الزاوية الساعية H من المعادلة(1−2):

$$H = 15\,(AST - 12) \qquad (2-1)$$

ويتم حساب ارتفاع الشمس $\alpha$ وتعرف هذه الزاوية بأنها الزاوية المحصورة بين الأفق والإشعاع الشمسي ويتم حسابها من المعادلة (1−3):

$$sin\alpha = cosL\ cos\delta\ cosH + sinL\ sin\delta \qquad (3-1)$$

ويتم حساب زاوية السمت الشمسي $\theta_z$ من المعادلة (1−4):

$$\cos\theta_z = \mathrm{sign(H)}\ |(sin\alpha\ \mathrm{sinL} - \sin\delta)/(cos\alpha\ \mathrm{cosL})| \qquad (4-1)$$

ويتم حساب زاوية السمت الشمسي السطحي $\Upsilon$ من المعادلة (1−5):

$$\Upsilon = \theta_z - \Psi \qquad (5-1)$$

ويتم حساب زاوية الورود $\theta$ من المعادلة (1−6):

$$cos\theta = cos\alpha\ cos\Upsilon\ \sin\beta + sin\alpha\ cos\beta \qquad (6-1)$$

حيث:

ET – معادلة الوقت تقدر بالدقائق ويتم الحصول عليها من الجدول (1−2)

LSM – زاوية السمت القياسي للموقع المدروس

$\delta$ – زاوية الانحراف ويتم الحصول عليها من الجدول (1−2)

Ψ – زاوية سمت السطح ويتم الحصول عليها من الجدول (1−3)

β – زاوية ميلان السطح عن الأفق.

**الجدول(1−2) زاوية الانحراف تبعاً لأشهر السنة**

**Table 7 Extraterrestrial Solar Irradiance and Related Data**

| | $E_o$, W/m² | Equation of Time, min | Declination, degrees | A W/m² | B (Dimensionless Ratios) | C (Dimensionless Ratios) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jan | 1416 | −11.2 | −20.0 | 1230 | 0.142 | 0.058 |
| Feb | 1401 | −13.9 | −10.8 | 1215 | 0.144 | 0.060 |
| Mar | 1381 | −7.5 | 0.0 | 1186 | 0.156 | 0.071 |
| Apr | 1356 | 1.1 | 11.6 | 1136 | 0.180 | 0.097 |
| May | 1336 | 3.3 | 20.0 | 1104 | 0.196 | 0.121 |
| June | 1336 | −1.4 | 23.45 | 1088 | 0.205 | 0.134 |
| July | 1336 | −6.2 | 20.6 | 1085 | 0.207 | 0.136 |
| Aug | 1338 | −2.4 | 12.3 | 1107 | 0.201 | 0.122 |
| Sep | 1359 | 7.5 | 0.0 | 1151 | 0.177 | 0.092 |
| Oct | 1380 | 15.4 | −10.5 | 1192 | 0.160 | 0.073 |
| Nov | 1405 | 13.8 | −19.8 | 1221 | 0.149 | 0.063 |
| Dec | 1417 | 1.6 | −23.45 | 1233 | 0.142 | 0.057 |

*Note*: Data are for 21st day of each month during the base year of 1964.

**الجدول(1−3) زاوية سمت السطح تبعاً للاتجاهات**

| Orientation | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Surface azimuth ψ | 180° | −135° | −90° | −45° | 0 | 45° | 90° | 135° |

### 1-6-2 حساب شدة الإشعاع الشمسي الوارد على السطح المدروس

في البداية يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي المباشر من المعادلة (1-7):

$$E_b = R_b \times I_b \qquad (7-1)$$

حيث:

$I_b \left[\frac{W}{m^2}\right]$ – شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح أفقي, ويتم الحصول عليه من بيانات الطقس تبعاً للموقع المدروس.

$R_b$ – النسبة بين شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح مائل إلى شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح أفقي, ويحسب من المعادلة (1-8):

$$R_b = \frac{I_{b\beta}}{I_b} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \qquad (8-1)$$

ويتم حساب شدة الإشعاع الشمسي المنتشر الوارد على سطح مائل, ويحسب من علاقة Bedescus المعادلة (1-9):

$$E_d = I_d \times \left(\frac{3+\cos(2\beta)}{4}\right) \qquad (9-1)$$

$I_d$ – شدة الإشعاع الشمسي المنتشر الوارد على سطح أفقي, ويتم الحصول عليه من بيانات الطقس تبعاً للموقع المدروس.

ويتم حساب شدة الإشعاع الشمسي المنعكس من الأرض من المعادلة (1-10):

$$E_r = \rho \times I \qquad (10-1)$$

$I \left[\frac{W}{m^2}\right]$ – شدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح أفقي, ويتم الحصول عليه من بيانات الطقس تبعاً للموقع المدروس.

ومنه فإن شدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على السطح المدروس يتم حسابها من المعادلة (1-11):

$$E_t = E_b + E_d + E_r \qquad (11-1)$$

### 1-6-3 حساب درجة الحرارة $T_{sol,air}$

وتعرف درجة الحرارة $T_{sol,air}$ على أنها درجة حرارة الهواء الخارجي تحت تأثير شدة الإشعاع الشمسي؛ أي: في حال غياب الأشعة الشمسية تكون مساوية لدرجة حرارة الوسط المحيط. وهو بارامتر مهم للتنبؤ بالتدفقات الحرارية عبر العناصر الإنشائية للمبنى في حالة الاستقرار الزمني, ويحسب من المعادلة (1-12):

$$T_{sol,air} = T_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \qquad (12-1)$$

$T_o$[°C] – درجة حرارة الوسط المحيط.

$\alpha$ – امتصاصية السطح.

$E_T \left[\frac{W}{m^2}\right]$ – شدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على السطح.

$h_o \left[\frac{W}{m^2 k}\right]$ – معامل انتقال الحرارة الحملي من الإشعاع الشمسي طويل الموجة إلى السطح الخارجي للسطح المدروس.

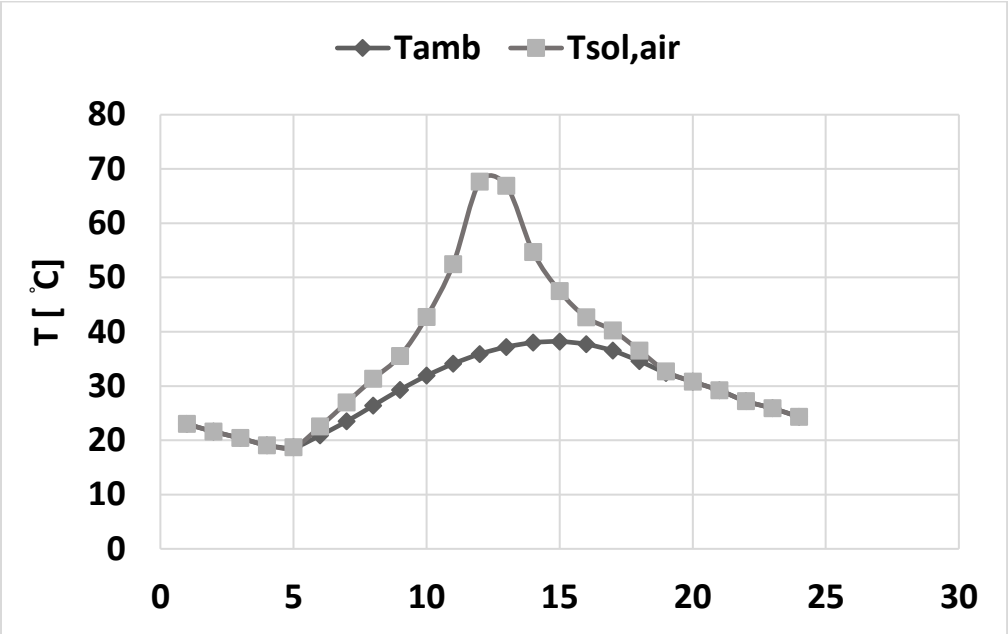
$\varepsilon$ – انبعاثية السطح.

$\Delta R \left[\frac{W}{m^2}\right]$ – الفرق بين الإشعاع الشمسي طويل الموجة الوارد من السماء والإشعاع الشمسي المنبعث من جسم أسود عند درجة حرارة الوسط المحيط.

في حالة السطوح الأفقية فإن هذه الأسطح تستقبل الإشعاع طويل الموجة الوارد من السماء فقط. وبالتالي تكون قيمة $\Delta R$ مساوية $63 \left[\frac{W}{m^2}\right]$ وتكون قيمة $h_o$ مساوية $17 \left[\frac{W}{m^2 k}\right]$

أما في حالة السطوح الشاقولية، وهي التي تستقبل الإشعاع طويل الموجة المنعكس من الأرض، ومن المباني المحيطة، بالإضافة إلى الإشعاع الشمسي الوارد من السماء. وبالتالي يصعب تحديد قيمة $\Delta R$ وعموما يتم اختيار قيمة $\varepsilon \Delta R = 0$ للسطوح الشاقولية.

لتوضيح الفرق بين قيمتي درجتي الحرارة. تم حساب قيمة درجة الحرارة $\boldsymbol{T_{sol,air}}$ لسطح شاقولي موجه نحو الجنوب مساحته $6\ [m^2]$ حيث نلاحظ من الشكل (1-6) أنه لحدود الساعة السادسة هناك تطابق بين المنحنيين لتبدأ بعدها درجة الحرارة $T_{sol,air}$ بالازدياد نظراً لازدياد شدة الإشعاع الشمسي، ليعود المنحنيان ويتطابقا عند الساعة الرابعة نظراً لانخفاض شدة الإشعاع الشمسي.




**الشكل(1−6) تغير درجة الحرارة الخارجية ودرجة الحرارة $T_{sol,air}$ مع الزمن**

## 1−6−4 حساب الحمل الحراري الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل عبر العناصر الإنشائية للسطح المدروس

في البداية يتم حساب الانتقال الحراري الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل عبر العناصر الإنشائية للجدار خلال 24 ساعة من اليوم المدروس من المعادلة (1−13):

$$q_{I,\theta-n} = UA(T_{solair,\theta-n} - T_{rc}) \qquad (13-1)$$

حيث

$q_{I,\theta-n}[W]$ – معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر السطح المدروس قبل $n$ ساعة من الوقت المدروس

$U\left[W/_{m^2k}\right]$ – معامل الانتقال الحرارة الكلي للسطح المدروس

$A[m^2]$ – مساحة السطح المدروس

$T_{solair,\theta-n}[°C]$ – درجة حرارة الوسط المحيط تحت تأثير الإشعاع الشمسي قبل $n$ ساعة من الوقت المدروس

$T_{rc}[°C]$ – درجة حرارة الوسط الداخلي

يتم تحويل الحرارة المنتقلة عبر السطح المدروس إلى كسب حراري بتأخر زمني يختلف من عنصر إنشائي إلى آخر، وبالتالي يتم استخدام معاملات خاصة تسمى معاملات السلسلة الزمنية بالتوصيل CTS يتم الحصول عليها للجدران من الجدول (1−4) والجدول(1−5) وللسقف من الجدول (1−6) ويتم حسابه الكسب الحراري بالتوصيل لكل ساعة زمنية من المعادلة (1−14):

$$q_\theta = c_o q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + c_3 q_{i,\theta-3} + \cdots + c_{23} q_{i,\theta-23} \qquad (14-1)$$

$q_\theta [W]$ – الربح الحراري الساعي بالتوصيل.

$q_{i,\theta} [W]$ – الحرارة المنتقلة بالتوصيل خلال الساعة المدروسة.

$q_{i,\theta-n} [W]$ – الحرارة المنتقلة بالتوصيل خلال $n$ ساعة ماضية.

$c_o , c_1 , etc$ – معاملات السلسلة الزمنية بالتوصيل.

**الجدول(1−4) معاملات CTS للجدران**

**Table 20 Wall Conduction Time Series (CTS)**

| | CURTAIN WALLS | | | STUD WALLS | | | | EIFS | | | BRICK WALLS | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Wall Number –** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
| **U-factor, W/(m²·K)** | 0.428 | 0.429 | 0.428 | 0.419 | 0.417 | 0.406 | 0.413 | 0.668 | 0.305 | 0.524 | 0.571 | 0.377 | 0.283 | 0.581 | 0.348 | 0.628 | 0.702 | 0.514 | 0.581 | 0.389 |
| **Total *R*** | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 2.5 | 2.4 | 1.5 | 3.3 | 1.9 | 1.7 | 2.7 | 3.5 | 1.7 | 2.9 | 1.6 | 1.4 | 1.9 | 1.7 | 2.6 |
| **Mass, kg/m²** | 31.0 | 20.9 | 80.0 | 25.5 | 84.6 | 25.6 | 66.7 | 36.6 | 38.3 | 130.9 | 214.1 | 214.7 | 215.8 | 290.6 | 304.0 | 371.7 | 391.5 | 469.3 | 892.2 | 665.1 |
| **Thermal Capacity, W/(m²·K)** | 8.5 | 5.4 | 19.0 | 7.0 | 20.5 | 9.3 | 17.1 | 10.2 | 10.6 | 33.2 | 49.2 | 49.3 | 49.7 | 66.6 | 70.6 | 89.1 | 86.7 | 108.0 | 218.4 | 161.5 |
| **Hour** | **Conduction Time Factors, %** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 18 | 25 | 8 | 19 | 6 | 7 | 5 | 11 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| 1 | 58 | 57 | 45 | 59 | 42 | 44 | 41 | 50 | 25 | 2 | 5 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| 2 | 20 | 15 | 32 | 18 | 33 | 32 | 34 | 26 | 31 | 6 | 14 | 13 | 7 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| 3 | 4 | 3 | 11 | 3 | 13 | 12 | 13 | 9 | 20 | 9 | 17 | 17 | 12 | 5 | 3 | 4 | 6 | 3 | 4 | 4 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 11 | 9 | 15 | 15 | 13 | 8 | 5 | 5 | 7 | 3 | 4 | 4 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 5 | 9 | 12 | 12 | 13 | 9 | 6 | 6 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 | 8 | 9 | 9 | 11 | 9 | 7 | 6 | 8 | 4 | 4 | 5 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 7 | 7 | 8 | 5 | 4 | 5 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 5 | 5 | 7 | 8 | 7 | 7 | 8 | 5 | 4 | 5 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 4 | 4 | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 5 | 4 | 5 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 3 | 3 | 5 | 7 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 5 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 | 2 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 3 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| **Total Percentage** | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Layer ID from outside to inside (see Table 22)** | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 |
| | F09 | F08 | F10 | F08 | F10 | F11 | F07 | F06 | F06 | F06 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 | M01 |
| | F04 | F04 | F04 | G03 | G03 | G02 | G03 | I01 | I01 | I01 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 | F04 |
| | I02 | I02 | I02 | I04 | I04 | I04 | I04 | G03 | G03 | G03 | I01 | G03 | I01 | I01 | M03 | I01 | I01 | I01 | I01 | M15 |
| | F04 | F04 | F04 | G01 | G01 | G04 | G01 | F04 | I04 | M03 | G03 | I04 | G03 | M03 | I04 | M05 | M01 | M13 | M16 | I04 |
| | G01 | G01 | G01 | F02 | F02 | F02 | F02 | G01 | G01 | F04 | F04 | G01 | I04 | F02 | G01 | G01 | F02 | F04 | F04 | G01 |
| | F02 | F02 | F02 | 0 | 0 | 0 | 0 | F02 | F02 | G01 | G01 | F02 | G01 | 0 | F02 | F02 | 0 | G01 | G01 | F02 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | F02 | F02 | 0 | F02 | 0 | 0 | 0 | 0 | F02 | F02 | 0 |

**Wall Number Descriptions**

1. Spandrel glass, insulation board, gyp board
2. Metal wall panel, insulation board, gyp board
3. 25 mm stone, insulation board, gyp board
4. Metal wall panel, sheathing, batt insulation, gyp board
5. 25 mm stone, sheathing, batt insulation, gyp board
6. Wood siding, sheathing, batt insulation, 13 mm wood
7. 25 mm stucco, sheathing, batt insulation, gyp board
8. EIFS finish, insulation board, sheathing, gyp board
9. EIFS finish, insulation board, sheathing, batt insulation, gyp board
10. EIFS finish, insulation board, sheathing, 200 mm LW CMU, gyp board
11. Brick, insulation board, sheathing, gyp board
12. Brick, sheathing, batt insulation, gyp board
13. Brick, insulation board, sheathing, batt insulation, gyp board
14. Brick, insulation board, 200 mm LW CMU
15. Brick, 200 mm LW CMU, batt insulation, gyp board
16. Brick, insulation board, 200 mm HW CMU, gyp board
17. Brick, insulation board, brick
18. Brick, insulation board, 200 mm LW concrete, gyp board
19. Brick, insulation board, 300 mm HW concrete, gyp board
20. Brick, 200 mm HW concrete, batt insulation, gyp board

**الجدول(1-5) معاملات CTS للجدران**

**Table 20 Wall Conduction Time Series (CTS) (*Concluded*)**

| | CONCRETE BLOCK WALL | | | | | | PRECAST AND CAST-IN-PLACE CONCRETE WALLS | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Wall Number =** | **21** | **22** | **23** | **24** | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** | **31** | **32** | **33** | **34** | **35** |
| **U-factor, W/(m²·K)** | 0.383 | 0.335 | 0.414 | 1.056 | 0.834 | 0.689 | 0.673 | 0.418 | 0.434 | 0.650 | 0.387 | 0.467 | 0.434 | 0.266 | 3.122 |
| **Total *R*** | 2.6 | 3.0 | 2.4 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 2.4 | 2.3 | 1.5 | 2.6 | 2.1 | 2.3 | 3.8 | 0.3 |
| **Mass, kg/m²** | 108.8 | 108.8 | 224.3 | 94.3 | 107.1 | 168.9 | 143.9 | 144.6 | 262.5 | 291.8 | 274.7 | 488.1 | 469.9 | 698.9 | 683.2 |
| **Thermal Capacity, W/(m²·K)** | 27.4 | 27.4 | 57.0 | 23.1 | 26.9 | 42.0 | 34.5 | 34.6 | 61.3 | 68.9 | 64.9 | 122.7 | 118.3 | 175.7 | 171.0 |
| **Hour** | **Conduction Time Factors, %** | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 2 | 11 | 3 | 1 | 10 | 8 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 11 |
| 2 | 8 | 21 | 12 | 2 | 20 | 18 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 8 | 21 |
| 3 | 12 | 20 | 16 | 5 | 18 | 18 | 6 | 5 | 6 | 5 | 8 | 3 | 7 | 12 | 20 |
| 4 | 12 | 15 | 15 | 7 | 14 | 14 | 8 | 6 | 7 | 6 | 9 | 5 | 8 | 12 | 15 |
| 5 | 11 | 10 | 12 | 9 | 10 | 11 | 9 | 6 | 8 | 6 | 9 | 5 | 8 | 11 | 10 |
| 6 | 9 | 7 | 10 | 9 | 7 | 8 | 9 | 6 | 8 | 6 | 8 | 6 | 8 | 9 | 7 |
| 7 | 8 | 5 | 8 | 8 | 5 | 6 | 9 | 6 | 7 | 5 | 7 | 6 | 8 | 8 | 5 |
| 8 | 7 | 3 | 6 | 8 | 4 | 4 | 8 | 6 | 7 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 3 |
| 9 | 6 | 2 | 4 | 7 | 3 | 3 | 7 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 2 |
| 10 | 5 | 2 | 3 | 6 | 2 | 2 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 5 | 2 |
| 11 | 4 | 1 | 3 | 6 | 2 | 2 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 |
| 12 | 3 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 1 |
| 13 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| 14 | 2 | 0 | 1 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| 15 | 2 | 0 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 0 |
| 16 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | 0 |
| 17 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 4 | 3 | 1 | 0 |
| 18 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 19 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 21 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 22 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| **Total Percentage** | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Layer ID from outside to inside (see Table 22** | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 |
| | F07 | M08 | M08 | M09 | M11 | M11 | M11 | F06 | M13 | F06 | M15 | M16 | M16 | F07 | M08 |
| | M05 | F02 | F04 | F04 | I01 | I04 | I02 | I01 | I04 | I02 | I04 | I05 | F02 | M05 | F02 |
| | I04 | — | G01 | G01 | F04 | G01 | M11 | M13 | G01 | M15 | G01 | G01 | — | I04 | — |
| | G01 | — | F02 | F02 | G01 | F02 | F02 | G01 | F02 | G01 | F02 | F02 | — | G01 | — |
| | F02 | — | — | — | F02 | — | — | F02 | — | F02 | — | — | — | F02 | — |

**Wall Number Descriptions**

21. 200 mm LW CMU, batt insulation, gyp board
22. 200 mm LW CMU with fill insulation, batt insulation, gyp board
23. 25 mm stucco, 200 mm HW CMU, batt insulation, gyp board
24. 200 mm LW CMU with fill insulation
25. 200 mm LW CMU with fill insulation, gyp board
26. 300 mm LW CMU with fill insulation, gyp board
27. 100 mm LW concrete, board insulation, gyp board
28. 100 mm LW concrete, batt insulation, gyp board
29. 100 mm LW concrete, board insulation, 100 mm LW concrete
30. EIFS finish, insulation board, 200 mm LW concrete, gyp board
31. 200 mm LW concrete, batt insulation, gyp board
32. EIFS finish, insulation board, 200 mm HW concrete, gyp board
33. 200 mm HW concrete, batt insulation, gyp board
34. 300 mm HW concrete, batt insulation, gyp board
35. 300 mm HW concrete

**الجدول(1−6) معاملات CTS للجدران**

**Table 21 Roof Conduction Time Series (CTS)**

| | SLOPED FRAME ROOFS | | | | | | WOOD DECK | | METAL DECK ROOFS | | | | | CONCRETE ROOFS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Roof Number** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** |
| **U-factor, W/(m²·K)** | 0.249 | 0.227 | 0.255 | 0.235 | 0.239 | 0.231 | 0.393 | 0.329 | 0.452 | 0.370 | 0.323 | 0.206 | 0.297 | 0.304 | 0.296 | 0.288 | 0.315 | 0.313 | 0.239 |
| **Total *R*** | 4.0 | 4.4 | 3.9 | 4.2 | 4.2 | 4.3 | 2.5 | 3.0 | 2.2 | 2.7 | 3.1 | 4.9 | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.2 | 3.2 | 4.2 |
| **Mass, kg/m²** | 26.7 | 21.0 | 14.0 | 34.7 | 55.5 | 34.9 | 48.9 | 55.9 | 23.9 | 30.9 | 25.0 | 27.2 | 57.6 | 149.2 | 214.3 | 279.3 | 360.7 | 474.5 | 362.3 |
| **Thermal Capacity, W/(m²·K)** | 7.3 | 4.6 | 3.5 | 12.9 | 20.2 | 13.0 | 21.0 | 22.1 | 7.8 | 8.9 | 8.1 | 8.9 | 15.7 | 37.6 | 52.8 | 67.9 | 92.8 | 121.3 | 91.8 |
| **Hour** | **Conduction Time Factors, %** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 6 | 10 | 27 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 18 | 4 | 8 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 1 | 45 | 57 | 62 | 17 | 17 | 12 | 7 | 3 | 61 | 41 | 53 | 23 | 10 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 2 | 33 | 27 | 10 | 31 | 34 | 25 | 18 | 8 | 18 | 35 | 30 | 38 | 22 | 8 | 3 | 3 | 5 | 3 | 6 |
| 3 | 11 | 5 | 1 | 24 | 25 | 22 | 18 | 10 | 3 | 14 | 7 | 22 | 20 | 11 | 6 | 4 | 6 | 5 | 8 |
| 4 | 3 | 1 | 0 | 14 | 13 | 15 | 15 | 10 | 0 | 4 | 2 | 10 | 14 | 11 | 7 | 5 | 7 | 6 | 8 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 7 | 6 | 10 | 11 | 9 | 0 | 1 | 0 | 4 | 10 | 10 | 8 | 6 | 7 | 6 | 8 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 4 | 3 | 6 | 8 | 8 | 0 | 1 | 0 | 2 | 7 | 9 | 8 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 4 | 6 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 5 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **Layer ID from outside to inside (see Table 22)** | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 | F01 |
| | F08 | F08 | F08 | F12 | F14 | F15 | F13 | F13 | F13 | F13 | F13 | F13 | M17 | F13 | F13 | F13 | F13 | F13 | F13 |
| | G03 | G03 | G03 | G05 | G05 | G05 | G03 | G03 | G03 | G03 | G03 | G03 | F13 | G03 | G03 | G03 | G03 | G03 | M14 |
| | F05 | F05 | F05 | F05 | F05 | F05 | I02 | I02 | I02 | I02 | I03 | I02 | G03 | I03 | I03 | I03 | I03 | I03 | F05 |
| | I05 | I05 | I05 | I05 | I05 | I05 | G06 | G06 | F08 | F08 | F08 | I03 | I03 | M11 | M12 | M13 | M14 | M15 | I05 |
| | G01 | F05 | F03 | F05 | F05 | F05 | F03 | F05 | F03 | F05 | F03 | F08 | F08 | F03 | F03 | F03 | F03 | F03 | F16 |
| | F03 | F16 | — | G01 | G01 | G01 | — | F16 | — | F16 | — | — | F03 | — | — | — | — | — | F03 |
| | — | F03 | — | F03 | F03 | F03 | — | F03 | — | F03 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

**Roof Number Descriptions**

1. Metal roof, batt insulation, gyp board
2. Metal roof, batt insulation, suspended acoustical ceiling
3. Metal roof, batt insulation
4. Asphalt shingles, wood sheathing, batt insulation, gyp board
5. Slate or tile, wood sheathing, batt insulation, gyp board
6. Wood shingles, wood sheathing, batt insulation, gyp board
7. Membrane, sheathing, insulation board, wood deck
8. Membrane, sheathing, insulation board, wood deck, suspended acoustical ceiling
9. Membrane, sheathing, insulation board, metal deck
10. Membrane, sheathing, insulation board, metal deck, suspended acoustical ceiling
11. Membrane, sheathing, insulation board, metal deck
12. Membrane, sheathing, plus insulation boards, metal deck
13. 50 mm concrete roof ballast, membrane, sheathing, insulation board, metal deck
14. Membrane, sheathing, insulation board, 100 mm LW concrete
15. Membrane, sheathing, insulation board, 150 mm LW concrete
16. Membrane, sheathing, insulation board, 200 mm LW concrete
17. Membrane, sheathing, insulation board, 150 mm HW concrete
18. Membrane, sheathing, insulation board, 200 mm HW concrete
19. Membrane, 150 mm HW concrete, batt insulation, suspended acoustical ceiling

يتم تقسيم الربح الحراري الناتج إلى مركبتين، حمل وإشعاع وفقاً لنسب معينة تؤخذ من الجدول(1−7). وكما ذكرنا سابقاً فإن المركبة الحملية تضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما المركبة الإشعاعية فيتم امتصاصها عبر الجدران والأثاث والأسقف ليتم إضافتها إلى الحمل الحراري بتأخر زمني، وبالتالي يتم حساب الحمل الحراري الناتج عن المركبة الإشعاعية بالاعتماد على معاملات الإشعاع الزمنية RTS المبينة في الجدول (1−8) والجدول (1−9). حيث نميز نوعين من المعاملات؛ منها الشمسية التي تشمل الحمل الحراري الناتج عن الإشعاع الشمسي المباشر، ومنها غير الشمسي التي تشمل الأحمال الحرارية التي تسببها باقي المكونات.

**الجدول(1-7) نسب تقسيم الربح الحراري إلى مركبتين الحمل والإشعاع**

| Heat Gain Source | Radiant Heat, % | Convective Heat, % |
|---|---|---|
| Transmitted solar, no inside shade | 100 | 0 |
| Window solar, with inside shade | 63 | 37 |
| Absorbed (by fenestration) solar | 63 | 37 |
| Fluorescent lights, suspended, unvented | 67 | 33 |
| Fluorescent lights, recessed, vented to return air | 59 | 41 |
| Fluorescent lights, recessed, vented to return air and supply air | 19 | 81 |
| Incandescent lights | 80 | 20 |
| People | See Table 1 | |
| Conduction, exterior walls | 63 | 37 |
| Conduction, exterior roofs | 84 | 16 |
| Infiltration and ventilation | 0 | 100 |
| Machinery and appliances (see Table 13) | 20 to 80 | 80 to 20 |

*Sources*: Pedersen et al. (1998), Hosni et al. (1999).

**الجدول(1-8) معاملات RTS**

**Table 24 Representative Nonsolar RTS Values for Light to Heavy Construction**

| | Light | | | | | | Medium | | | | | | Heavy | | | | | | Interior Zones | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Light | | Medium | | Heavy | |
| | With Carpet | | | No Carpet | | | With Carpet | | | No Carpet | | | With Carpet | | | No Carpet | | | | | | | | |
| % Glass | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | With Carpet | No Carpet | With Carpet | No Carpet | With Carpet | No Carpet |
| Hour | Radiant Time Factor, % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 47 | 50 | 53 | 41 | 43 | 46 | 46 | 49 | 52 | 31 | 33 | 35 | 34 | 38 | 42 | 22 | 25 | 28 | 46 | 40 | 46 | 31 | 33 | 21 |
| 1 | 19 | 18 | 17 | 20 | 19 | 19 | 18 | 17 | 16 | 17 | 16 | 15 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 19 | 20 | 18 | 17 | 9 | 9 |
| 2 | 11 | 10 | 9 | 12 | 11 | 11 | 10 | 9 | 8 | 11 | 10 | 10 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 11 | 12 | 10 | 11 | 6 | 6 |
| 3 | 6 | 6 | 5 | 8 | 7 | 7 | 6 | 5 | 5 | 8 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 8 | 6 | 8 | 5 | 5 |
| 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 | 6 | 4 | 5 |
| 5 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 6 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 |
| 7 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 13 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 15 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

**الجدول(1−9) معاملات RTS**

**Table 25 Representative Solar RTS Values for Light to Heavy Construction**

| % | Light | | | | | | Medium | | | | | | Heavy | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | With Carpet | | | No Carpet | | | With Carpet | | | No Carpet | | | With Carpet | | | No Carpet | | |
| Glass | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% | 10% | 50% | 90% |
| Hour | Radiant Time Factor, % | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 53 | 55 | 56 | 44 | 45 | 46 | 52 | 54 | 55 | 28 | 29 | 29 | 47 | 49 | 51 | 26 | 27 | 28 |
| 1 | 17 | 17 | 17 | 19 | 20 | 20 | 16 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 11 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 |
| 2 | 9 | 9 | 9 | 11 | 11 | 11 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 |
| 3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 5 | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 6 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 14 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

وبالتالي يتم حساب الحمل الحراري الناتج عن المركبة الإشعاعية بالاعتماد على المعادلة (1−15):

$$Q_{r,\theta} = r_o q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + r_3 q_{r,\theta-3} + \cdots + r_{23} q_{r,\theta-23} \qquad (15-1)$$

وبالنتيجة يتم إضافة القيم التي نحصل عليها إلى المركبة الحملية للحصول على الحمل الحراري لكل ساعة زمنية.

$Q_{r,\theta}[W]$ – الحمل الحراري الإشعاعي للساعة المدروسة.

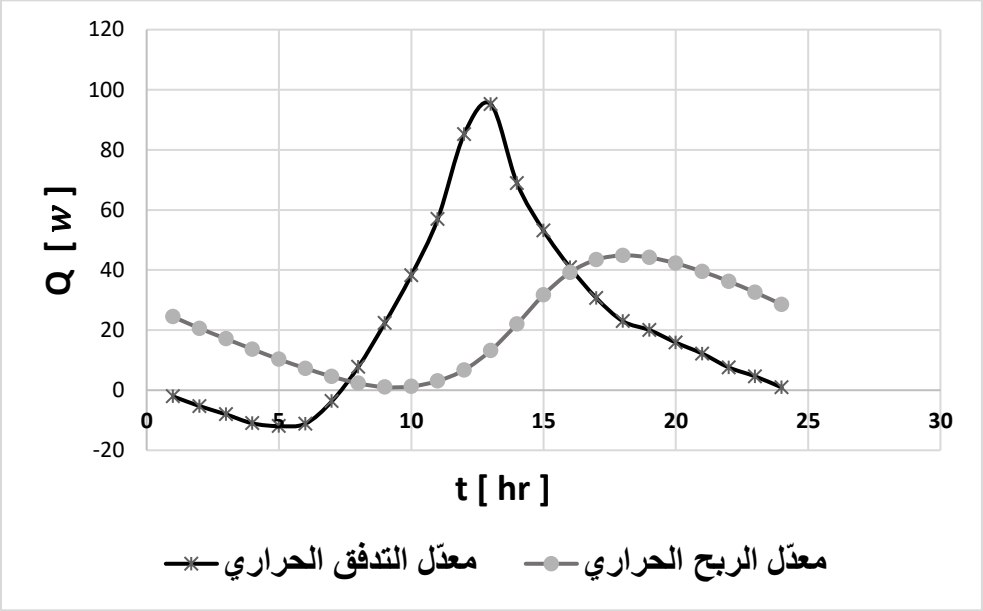
$q_{r,\theta}[W]$– الربح الحراري بالتوصيل خلال الساعة المدروسة.

$q_{r,\theta-n}[W]$– الربح الحراري بالتوصيل خلال $n$ ساعة ماضية.

$r_o\ ,r_1\ ,etc$ – معاملات الإشعاع الزمنية.

بحساب الحمل الحراري لجدار جنوبي مساحته $6m^2$ نجد أنّ هناك فرقاً بالسلوك الحراري لمنحني تغير الحمل الحراري وفق طريقي RTS مع معدل التدفق الحراري heat input المنتقل بالتوصيل عبر الجدار, وتأخذ سلوكاً مشابهاً للربح الحراري من الجدار heat gains (المكتسب من التدفق الحراري من الجدار كونه

أصبح خزاناً حرارياً تبث منه الحرارة إلى الوسط المحيط بمركبة حملية تضاف إلى الحمل الحراري ومركبة إشعاعية تضاف إلى الحمل بتأخر زمني) كما نلاحظ من الشكل (1−7)




**الشكل(1−7) تغير معدّل التدفق الحراري والربح الحراري والحمل الحراري مع الزمن**

### 1−6−5 حساب الحمل الحراري الناتج عن انتقال الحرارة عبر النوافذ

في البداية يجب حساب الربح الحراري (خلال 24 ساعة من اليوم المدروس) الناتج عن النوافذ, ويجب تحديد نوع التظليل (كالستائر) في حالة وجودها. وينقسم الربح الحراري إلى عدة مكونات: الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المباشر النافذ عبر النوافذ, ويعطى بالمعادلة (1−16):

$$q_b = A\, E_D\, SHGC(\theta) \qquad (16-1)$$

الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المنتشر والمنعكس من الأرض, يعطى بالمعادلة (1−17):

$$q_d = A\, (E_d + E_r) SHGC_D \qquad (17-1)$$

الربح الحراري الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل عبر النوافذ, ويعطى بالمعادلة (1−18):

$$q_c = U\, A\, (t_{out} - t_{in}) \qquad (18-1)$$

حيث:

$q_b$ $[W]$– الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المباشر.

$A$ $[m^2]$ – مساحة النافذة.

$U$ $\left[\frac{W}{m^2\,k}\right]$ – معامل انتقال الحرارة الكلي عبر النافذة.

$q_d$ $[W]$ – الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المنتشر والمنعكس من الأرض.

$q_c$ $[W]$ – الربح الحراري الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل عبر النوافذ.

$SHGC(\theta)$ – معامل الربح الحراري الشمسي تبعاً لزاوية الورود.

$SHGC_D$ – معامل الربح الحراري الشمسي تبعاً للإشعاع المنتشر.

يتم الحصول على قيم $SHGC(\theta)$ و $SHGC_D$ من الجداول تبعاً لنوع النافذة الموصّفة وقيم زوايا الورود ويتم الحصول عليها من الجدول (1–10)

**الجدول(1−10) قيم $SHGC(\theta)$ و $SHGC_D$ من الجداول تبعاً لنوع النافذة الموصّفة وقيم زوايا الورود**



Table 7-4 SI Visible Transmittance ($T_v$), Solar Heat Gain Coefficient (SHGC), Solar Transmittance ($T$), Front Reflectance ($R^f$), Back Reflectance ($R^b$), and Layer Absorptance $A_n^f$ for Glazing and Window Systems (*Continued*)

*(Table 10, Chapter 15, 2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals [SI])*

| Glazing System | | | | | Center-of-Glazing Properties | | | | | | | Total Window SHGC at Normal Incidence | | | | Total Window $T_v$ at Normal Incidence | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Incidence Angles | | | | | | | Aluminum | | Other Frames | | Aluminum | | Other Frames | |
| ID | Glass Thick., mm | | Center Glazing $T_v$ | | Normal 0.00 | 40.00 | 50.00 | 60.00 | 70.00 | 80.00 | Hemis., Diffuse | Operable | Fixed | Operable | Fixed | Operable | Fixed | Operable | Fixed |
| 5p | 6 | TI on CLR 30%, CLR | 0.27 | SHGC | 0.29 | 0.28 | 0.27 | 0.25 | 0.20 | 0.12 | 0.25 | 0.27 | 0.27 | 0.24 | 0.26 | 0.24 | 0.24 | 0.22 | 0.24 |
| | | | | $T$ | 0.18 | 0.17 | 0.16 | 0.14 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.20 | 0.29 | 0.51 | 0.19 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.31 | 0.40 | 0.58 | 0.31 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.64 | 0.64 | 0.63 | 0.62 | 0.58 | 0.43 | 0.61 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | | | | | | | | |
| ***Low-e Double Glazing, e = 0.2 on surface 2*** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17a | 3 | LE CLR | 0.76 | SHGC | 0.65 | 0.64 | 0.61 | 0.56 | 0.43 | 0.23 | 0.57 | 0.59 | 0.60 | 0.53 | 0.58 | 0.68 | 0.68 | 0.61 | 0.67 |
| | | | | $T$ | 0.59 | 0.56 | 0.54 | 0.48 | 0.36 | 0.18 | 0.50 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.24 | 0.37 | 0.61 | 0.22 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.17 | 0.18 | 0.20 | 0.26 | 0.38 | 0.61 | 0.24 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.20 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.20 | 0.16 | 0.20 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.07 | | | | | | | | |
| 17b | 6 | LE CLR | 0.73 | SHGC | 0.60 | 0.59 | 0.57 | 0.51 | 0.40 | 0.21 | 0.53 | 0.55 | 0.55 | 0.49 | 0.53 | 0.65 | 0.66 | 0.58 | 0.64 |
| | | | | $T$ | 0.51 | 0.48 | 0.46 | 0.41 | 0.30 | 0.14 | 0.43 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.22 | 0.35 | 0.59 | 0.21 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.23 | 0.35 | 0.57 | 0.22 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.25 | 0.19 | 0.25 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.10 | | | | | | | | |
| ***Low-e Double Glazing, e = 0.2 on surface 3*** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17c | 3 | CLR LE | 0.76 | SHGC | 0.70 | 0.68 | 0.65 | 0.59 | 0.46 | 0.24 | 0.61 | 0.64 | 0.64 | 0.57 | 0.62 | 0.68 | 0.68 | 0.1 | 0.67 |
| | | | | $T$ | 0.59 | 0.56 | 0.54 | 0.48 | 0.36 | 0.18 | 0.50 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.17 | 0.18 | 0.20 | 0.26 | 0.38 | 0.61 | 0.24 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.24 | 0.37 | 0.61 | 0.22 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.12 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.07 | 0.13 | | | | | | | | |
| 17d | 6 | CLR LE | 0.73 | SHGC | 0.65 | 0.63 | 0.60 | 0.54 | 0.42 | 0.21 | 0.56 | 0.59 | 0.60 | 0.53 | 0.58 | 0.65 | 0.66 | 0.58 | 0.64 |
| | | | | $T$ | 0.51 | 0.48 | 0.46 | 0.41 | 0.30 | 0.14 | 0.43 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.23 | 0.35 | 0.57 | 0.22 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.22 | 0.35 | 0.59 | 0.21 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.17 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.22 | 0.19 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.13 | 0.07 | 0.16 | | | | | | | | |
| 17e | 3 | BRZ LE | 0.58 | SHGC | 0.57 | 0.54 | 0.51 | 0.46 | 0.35 | 0.18 | 0.48 | 0.52 | 0.52 | 0.46 | 0.51 | 0.52 | 0.52 | 0.46 | 0.51 |
| | | | | $T$ | 0.46 | 0.43 | 0.41 | 0.36 | 0.26 | 0.12 | 0.38 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.18 | 0.28 | 0.50 | 0.17 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.23 | 0.35 | 0.60 | 0.21 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.31 | 0.34 | 0.35 | 0.37 | 0.38 | 0.35 | 0.34 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.04 | 0.10 | | | | | | | | |
| 17f | 6 | BRZ LE | 0.45 | SHGC | 0.45 | 0.42 | 0.40 | 0.35 | 0.27 | 0.14 | 0.38 | 0.42 | 0.42 | 0.37 | 0.40 | 0.40 | 0.41 | 0.36 | 0.40 |
| | | | | $T$ | 0.33 | 0.30 | 0.28 | 0.24 | 0.17 | 0.07 | 0.26 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.14 | 0.23 | 0.44 | 0.13 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.13 | 0.14 | 0.16 | 0.21 | 0.34 | 0.58 | 0.20 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.48 | 0.51 | 0.52 | 0.54 | 0.53 | 0.45 | 0.50 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.09 | | | | | | | | |
| 17g | 3 | GRN LE | 0.70 | SHGC | 0.55 | 0.52 | 0.50 | 0.44 | 0.34 | 0.17 | 0.46 | 0.50 | 0.51 | 0.45 | 0.49 | 0.62 | 0.63 | 0.56 | 0.62 |
| | | | | $T$ | 0.44 | 0.41 | 0.38 | 0.33 | 0.24 | 0.11 | 0.36 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.17 | 0.27 | 0.48 | 0.16 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.23 | 0.35 | 0.60 | 0.21 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.35 | 0.38 | 0.39 | 0.41 | 0.42 | 0.37 | 0.38 | | | | | | | | |
| | | | | $A_2^f$ | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.09 | | | | | | | | |
| 17h | 6 | GRN LE | 0.61 | SHGC | 0.41 | 0.39 | 0.36 | 0.32 | 0.25 | 0.13 | 0.34 | 0.38 | 0.38 | 0.34 | 0.36 | 0.54 | 0.55 | 0.49 | 0.54 |
| | | | | $T$ | 0.29 | 0.26 | 0.24 | 0.21 | 0.15 | 0.06 | 0.23 | | | | | | | | |
| | | | | $R^f$ | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.22 | 0.43 | 0.13 | | | | | | | | |
| | | | | $R^b$ | 0.13 | 0.14 | 0.16 | 0.21 | 0.34 | 0.58 | 0.20 | | | | | | | | |
| | | | | $A_1^f$ | 0.53 | 0.57 | 0.58 | 0.59 | 0.58 | 0.48 | 0.56 | | | | | | | | |

بعد حساب الربح الحراري بمكوناته، يتم تقسيم الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المنتشر إلى مركبتي الحمل والإشعاع، ويتم جمع الربح الحراري الناتج عن الإشعاع المنتشر والمنعكس من الأرض، بالإضافة إلى الربح الناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل، ويقسم الناتج أيضاً إلى مركبتي الحمل والإشعاع بالاعتماد على نسب التحويل المبينة في الجدول (1−7). وكما ذكرنا سابقاً فإن المركبة الحملية تضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما المركبة الإشعاعية فإنها تمتص من قبل العناصر الإنشائية في الفراغ المدروس ليتم تحريها بالحمل الحراري إلى الفراغ المحيط بتأخر زمني. وبالتالي يجب تحويل الربح الحراري الإشعاعي إلى حمل تبريدي باستخدام معاملات الإشعاع الزمنية RTS (الجزء الشمسي منها) والربح الحراري الناتج عن الإشعاع المنتشر والمنعكس والنافذ بالتوصيل باستخدام معاملات الإشعاع الزمنية RTS (الجزء غير الشمسي منها) وتحسب من المعادلة (1−15).

### 1−6−6 حساب الحمل الحراري الناتج عن الأحمال الداخلية

إن الأحمال الحرارية الداخلية تختلف من ساعة إلى أخرى, ويمكن تقديرها من منخفضة إلى متوسطة وعالية حسب المنطقة الحرارية المدروسة. ويقسم الحمل الحراري الداخلي إلى:

- الحمل الحراري الناتج عن الأشخاص.
- الحمل الحراري الناتج عن أجهزة الإنارة.
- الحمل الحراري الناتج عن الأجهزة الكهربائية

1−6−6−1 الحمل الحراري الناتج عن الأشخاص

إن الحمل الحراري الناتج عن الأشخاص يتقسم إلى حمل حراري محسوس $\dot{Q}_{ps}$ وكامن $\dot{Q}_{pl}$ :

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{ps} + \dot{Q}_{pl} \qquad (19-1)$$

حيث

$$\dot{Q}_{ps} = N_p \times F_u \times \dot{q}_s \qquad (20-1)$$

$$\dot{Q}_{pl} = N_p \times F_u \times \dot{q}_e \qquad (21-1)$$

$N_p$ – عدد الأشخاص

$F_u$ – عامل الأشغال, ويقع ضمن المجال $0 \rightarrow 1$ حسب إشغال المنطقة الحرارية.

$\dot{q}_s\ [W]$ – معدل الحمل الحراري المحسوس المكتسب من الأشخاص حسب نشاطه. ونحصل على قيمته من الجدول (1−11)

$\dot{q}_e\ [W]$ – معدل الحمل الحراري الكامن المكتسب من الأشخاص حسب نشاطه. ونحصل على قيمته من الجدول (1−11)

**الجدول(1−11) معدل الحمل الحراري المحسوس والكامن للأشخاص**

**Table 1 Representative Rates at Which Heat and Moisture Are Given Off by Human Beings in Different States of Activity**

| Degree of Activity | | Total Heat, W: Adult Male | Total Heat, W: Adjusted, M/F[a] | Sensible Heat, W | Latent Heat, W | % Sensible Heat that is Radiant[b]: Low *V* | % Sensible Heat that is Radiant[b]: High *V* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Seated at theater | Theater, matinee | 115 | 95 | 65 | 30 | | |
| Seated at theater, night | Theater, night | 115 | 105 | 70 | 35 | 60 | 27 |
| Seated, very light work | Offices, hotels, apartments | 130 | 115 | 70 | 45 | | |
| Moderately active office work | Offices, hotels, apartments | 140 | 130 | 75 | 55 | | |
| Standing, light work; walking | Department store; retail store | 160 | 130 | 75 | 55 | 58 | 38 |
| Walking, standing | Drug store, bank | 160 | 145 | 75 | 70 | | |
| Sedentary work | Restaurant[c] | 145 | 160 | 80 | 80 | | |
| Light bench work | Factory | 235 | 220 | 80 | 140 | | |
| Moderate dancing | Dance hall | 265 | 250 | 90 | 160 | 49 | 35 |
| Walking 4.8 km/h; light machine work | Factory | 295 | 295 | 110 | 185 | | |
| Bowling[d] | Bowling alley | 440 | 425 | 170 | 255 | | |
| Heavy work | Factory | 440 | 425 | 170 | 255 | 54 | 19 |
| Heavy machine work; lifting | Factory | 470 | 470 | 185 | 285 | | |
| Athletics | Gymnasium | 585 | 525 | 210 | 315 | | |

*Notes*:
1. Tabulated values are based on 24°C room dry-bulb temperature. For 27°C room dry bulb, the total heat remains the same, but the sensible heat values should be decreased by approximately 20%, and the latent heat values increased accordingly.
2. Also refer to Table 4, Chapter 8, for additional rates of metabolic heat generation.
3. All values are rounded to nearest 5 W.

[a] Adjusted heat gain is based on normal percentage of men, women, and children for the application listed, with the postulate that the gain from an adult female is 85% of that for an adult male, and that the gain from a child is 75% of that for an adult male.

[b] Values approximated from data in Table 6, Chapter 8, where is air velocity with limits shown in that table.

[c] Adjusted heat gain includes 18 W for food per individual (9 W sensible and 9 W latent).

[d] Figure one person per alley actually bowling, and all others as sitting (117 W) or standing or walking slowly (231 W).

بعد حساب الربح الحراري الناتج عن الأشخاص، يتم تقسيمه إلى مركبتي الحمل والإشعاع بالاعتماد على نسب التحويل المبينة في الجدول(1−7). وكما ذكرنا سابقاً، فإن المركبة الحملية تضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما المركبة الإشعاعية فإنها تمتص من قبل العناصر الإنشائية في الفراغ المدروس، ليتم تحريرها بالحمل الحراري إلى الفراغ المحيط بتأخر زمني. وبالتالي يجب تحويل الربح الحراري الإشعاعي إلى حمل تبريدي باستخدام معاملات الإشعاع الزمنية RTS (الجزء غير الشمسي منها) وتحسب من المعادلة (1−15).

### 1−6−6−2 الحمل الحراري الناتج عن أجهزة الإضاءة

بشكل عام فإن أي مبنى سواء تجاري أو سكني أو صناعي، فإنه يلجأ إلى استخدام أجهزة الإنارة من النوع fluorescent كونها أكثر كفاءة؛ حيث تحول ضعفي استطاعتها إلى ضوء، ولكن تحول 80% من

استطاعتها إلى حرارة تطلقها نحو الوسط المحيط. وبالتالي فإن معدل الحرارة المنبعثة من أجهزة الإنارة تشكل نسبة 1.2 من استطاعتها, ويعطى بالعلاقة:

$$\dot{Q}_l = w \times F_u \times F_s \qquad (22-1)$$

$w\ [W]$ – استطاعة أجهزة الإنارة.

$F_s$ – نسبة الحرارة المنبعثة من أجهزة الإنارة ويتم الحصول عليها من الجدول (1−12)

**الجدول(1−12) نسبة الحرارة المنبعثة من أجهزة الإنارة**

| Description | Ballast | Watts/Lamp | Lamps/Fixture | Lamp Watts | Fixture Watts | Special Allowance Factor | Description | Ballast | Watts/Lamp | Lamps/Fixture | Lamp Watts | Fixture Watts | Special Allowance Factor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (1) 96 in., T12 ES lamp | Electronic | 60 | 1 | 60 | 69 | 1.15 | (1) 96 in., T8 HO lamp | Electronic | 59 | 1 | 59 | 68 | 1.15 |
| (2) 96 in., T12 ES lamp | Electronic | 60 | 2 | 120 | 110 | 0.92 | (1) 96 in., T8 VHO lamp | Electronic | 59 | 1 | 59 | 71 | 1.20 |
| (3) 96 in., T12 ES lamp | Electronic | 60 | 3 | 180 | 179 | 0.99 | (2) 96 in., T8 lamp | Electronic | 59 | 2 | 118 | 109 | 0.92 |
| (4) 96 in., T12 ES lamp | Electronic | 60 | 4 | 240 | 220 | 0.92 | (3) 96 in., T8 lamp | Electronic | 59 | 3 | 177 | 167 | 0.94 |
| (1) 96 in., T12 ES HO lamp | Electronic | 95 | 1 | 95 | 80 | 0.84 | (4) 96 in., T8 lamp | Electronic | 59 | 4 | 236 | 219 | 0.93 |
| (2) 96 in., T12 ES HO lamp | Electronic | 95 | 2 | 190 | 173 | 0.91 | (2) 96 in., T8 HO lamp | Electronic | 86 | 2 | 172 | 160 | 0.93 |
| (4) 96 in., T12 ES HO lamp | Electronic | 95 | 4 | 380 | 346 | 0.91 | (4) 96 in., T8 HO lamp | Electronic | 86 | 4 | 344 | 320 | 0.93 |
| (1) 96 in., T8 lamp | Electronic | 59 | 1 | 59 | 58 | 0.98 | | | | | | | |
| **Circular Fluorescent Fixtures** | | | | | | | | | | | | | |
| Circlite, (1) 20 W lamp | Mag-PH | 20 | 1 | 20 | 20 | 1.00 | (2) 8 in. circular lamp | Mag-RS | 22 | 2 | 44 | 52 | 1.18 |
| Circlite, (1) 22 W lamp | Mag-PH | 22 | 1 | 22 | 20 | 0.91 | (1) 12 in. circular lamp | Mag-RS | 32 | 1 | 32 | 31 | 0.97 |
| Circline, (1) 32 W lamp | Mag-PH | 32 | 1 | 32 | 40 | 1.25 | (2) 12 in. circular lamp | Mag-RS | 32 | 2 | 64 | 62 | 0.97 |
| (1) 6 in. circular lamp | Mag-RS | 20 | 1 | 20 | 25 | 1.25 | (1) 16 in. circular lamp | Mag-Std | 40 | 1 | 40 | 35 | 0.88 |
| (1) 8 in. circular lamp | Mag-RS | 22 | 1 | 22 | 26 | 1.18 | | | | | | | |
| **High-Pressure Sodium Fixtures** | | | | | | | | | | | | | |
| (1) 35 W lamp | HID | 35 | 1 | 35 | 46 | 1.31 | (1) 250 W lamp | HID | 250 | 1 | 250 | 295 | 1.18 |
| (1) 50 W lamp | HID | 50 | 1 | 50 | 66 | 1.32 | (1) 310 W lamp | HID | 310 | 1 | 310 | 365 | 1.18 |
| (1) 70 W lamp | HID | 70 | 1 | 70 | 95 | 1.36 | (1) 360 W lamp | HID | 360 | 1 | 360 | 414 | 1.15 |
| (1) 100 W lamp | HID | 100 | 1 | 100 | 138 | 1.38 | (1) 400 W lamp | HID | 400 | 1 | 400 | 465 | 1.16 |
| (1) 150 W lamp | HID | 150 | 1 | 150 | 188 | 1.25 | (1) 1000 W lamp | HID | 1000 | 1 | 1000 | 1100 | 1.10 |
| (1) 200 W lamp | HID | 200 | 1 | 200 | 250 | 1.25 | | | | | | | |
| **Metal Halide Fixtures** | | | | | | | | | | | | | |
| (1) 32 W lamp | HID | 32 | 1 | 32 | 43 | 1.34 | (1) 250 W lamp | HID | 250 | 1 | 250 | 295 | 1.18 |
| (1) 50 W lamp | HID | 50 | 1 | 50 | 72 | 1.44 | (1) 400 W lamp | HID | 400 | 1 | 400 | 458 | 1.15 |
| (1) 70 W lamp | HID | 70 | 1 | 70 | 95 | 1.36 | (2) 400 W lamp | HID | 400 | 2 | 800 | 916 | 1.15 |
| (1) 100 W lamp | HID | 100 | 1 | 100 | 128 | 1.28 | (1) 750 W lamp | HID | 750 | 1 | 750 | 850 | 1.13 |
| (1) 150 W lamp | HID | 150 | 1 | 150 | 190 | 1.27 | (1) 1000 W lamp | HID | 1000 | 1 | 1000 | 1080 | 1.08 |
| (1) 175 W lamp | HID | 175 | 1 | 175 | 215 | 1.23 | (1) 1500 W lamp | HID | 1500 | 1 | 1500 | 1610 | 1.07 |
| **Mercury Vapor Fixtures** | | | | | | | | | | | | | |
| (1) 40 W lamp | HID | 40 | 1 | 40 | 50 | 1.25 | (1) 250 W lamp | HID | 250 | 1 | 250 | 290 | 1.16 |
| (1) 50 W lamp | HID | 50 | 1 | 50 | 74 | 1.48 | (1) 400 W lamp | HID | 400 | 1 | 400 | 455 | 1.14 |
| (1) 75 W lamp | HID | 75 | 1 | 75 | 93 | 1.24 | (2) 400 W lamp | HID | 400 | 2 | 800 | 910 | 1.14 |
| (1) 100 W lamp | HID | 100 | 1 | 100 | 125 | 1.25 | (1) 700 W lamp | HID | 700 | 1 | 700 | 780 | 1.11 |
| (1) 175 W lamp | HID | 175 | 1 | 175 | 205 | 1.17 | (1) 1000 W lamp | HID | 1000 | 1 | 1000 | 1075 | 1.08 |

Abbreviations: Mag = electromagnetic; ES = energy saver; Std = standard; HID = high-intensity discharge; HO = high output; VHO = very high output; PH = preheat; RS = rapid start

بعد حساب الربح الحراري الناتج عن أجهزة الإنارة، يتم تقسيمه إلى مركبتي الحمل والإشعاع بالاعتماد على نسب التحويل المبينة في الجدول (1−7). وكما ذكرنا سابقاً فإن المركبة الحملية تضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما المركبة الإشعاعية فإنها تمتص من قبل العناصر الإنشائية في الفراغ المدروس؛ ليتم تحريها بالحمل الحراري إلى الفراغ المحيط بتأخر زمني، وبالتالي يجب تحويل الربح الحراري الإشعاعي إلى حمل

تبريدي باستخدام معاملات الإشعاع الزمنية RTS (الجزء غير الشمسي منها) وتحسب من المعادلة (1-15).

## 1-6-6-3 الحمل الحراري الناتج عن المعدات الكهربائية

إن الحمل الحراري الناتج عن المعدات الكهربائية يحسب من المعادلة (1-23):

$$\dot{Q}_{es} = w \times F_u \times F_R \qquad (23-1)$$

$w\ [W]$ – استطاعة الأجهزة.

$F_R$ – نسبة الحرارة المنبعثة من الأجهزة الكهربائية (حسب مردود الجهاز) ويتم الحصول عليها من الجدول (1-13)

**الجدول (1-13) نسبة الحرارة المنبعثة من الأجهزة الكهربائية**

**Table 7-21A SI Recommended Rates of Radiant and Convective Heat Gain from Unhooded Electric Appliances During Idle (Ready-to-Cook) Conditions**

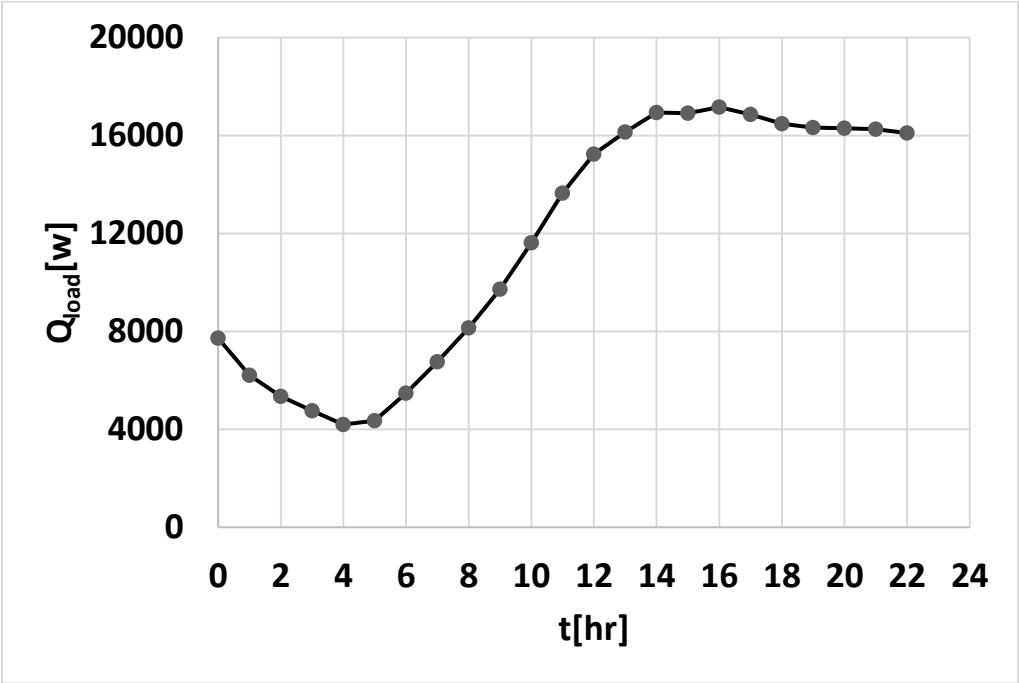
*(Table 5A, Chapter 18, 2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals [SI])*

| Appliance | Energy Rate, W | | Rate of Heat Gain, W | | | | Usage Factor $F_U$ | Radiation Factor $F_R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Rated | Standby | Sensible Radiant | Sensible Convective | Latent | Total | | |
| Cabinet: hot serving (large), insulated[a] | 1993 | 352 | 117 | 234 | 0 | 352 | 0.18 | 0.33 |
| hot serving (large), uninsulated | 1993 | 1026 | 205 | 821 | 0 | 1026 | 0.51 | 0.20 |
| proofing (large)[a] | 5099 | 410 | 352 | 0 | 59 | 410 | 0.08 | 0.86 |
| proofing (small-15 shelf) | 4191 | 1143 | 0 | 264 | 879 | 1143 | 0.27 | 0.00 |
| Cheesemelter[b] | 2400 | 976 | 443 | 533 | 0 | 976 | 0.41 | 0.45 |
| Coffee brewing urn | 3810 | 352 | 59 | 88 | 205 | 352 | 0.08 | 0.17 |
| Drawer warmers, 2-drawer (moist holding)[a] | 1202 | 147 | 0 | 0 | 59 | 59 | 0.12 | 0.00 |
| Egg cooker[b] | 2380 | 249 | 65 | 184 | 0 | 249 | 0.10 | 0.26 |
| Espresso machine[a] | 2403 | 352 | 117 | 234 | 0 | 352 | 0.15 | 0.33 |
| Food warmer: steam table (2-well-type) | 1495 | 1026 | 88 | 176 | 762 | 1026 | 0.69 | 0.08 |
| Freezer (small) | 791 | 322 | 147 | 176 | 0 | 322 | 0.41 | 0.45 |
| Fryer, countertop, open deep fat[b] | 4600 | 431 | 202 | 229 | 0 | 431 | 0.09 | 0.47 |
| Griddle, countertop[b] | 8000 | 1771 | 848 | 923 | 0 | 1771 | 0.22 | 0.48 |
| Hot dog roller[b] | 1600 | 1240 | 267 | 973 | 0 | 1240 | 0.77 | 0.22 |
| Hot plate: single element, high speed[b] | 1100 | 982 | 314 | 668 | 0 | 982 | 0.89 | 0.32 |
| Hot-food case (dry holding)[a] | 9115 | 733 | 264 | 469 | 0 | 733 | 0.08 | 0.36 |
| Hot-food case (moist holding)[a] | 9115 | 967 | 264 | 528 | 176 | 967 | 0.11 | 0.27 |
| Induction hob, countertop[b] | 5000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| Microwave oven: commercial[b] | 1700 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| Oven: countertop conveyorized bake/finishing[b] | 5000 | 3932 | 718 | 3214 | 0 | 3932 | 0.79 | 0.18 |
| Panini[b] | 1800 | 673 | 195 | 478 | 0 | 673 | 0.37 | 0.29 |
| Popcorn popper[b] | 850 | 115 | 28 | 87 | 0 | 115 | 0.14 | 0.24 |
| Rapid-cook oven (quartz-halogen)[a] | 12 016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| Rapid-cook oven (microwave/convection)[b] | 5700 | 1141 | 96 | 1045 | 0 | 1141 | 0.20 | 0.08 |
| Reach-in refrigerator[a] | 1407 | 352 | 88 | 264 | 0 | 352 | 0.25 | 0.25 |
| Refrigerated prep table[a] | 586 | 264 | 176 | 88 | 0 | 264 | 0.45 | 0.67 |
| Rice cooker[b] | 1550 | 82 | 14 | 68 | 0 | 82 | 0.05 | 0.17 |
| Soup warmer[b] | 800 | 390 | 0 | 53 | 337 | 390 | 0.49 | 0.00 |
| Steamer (bun)[b] | 1500 | 200 | 32 | 168 | 0 | 200 | 0.13 | 0.16 |
| Steamer, countertop[b] | 8300 | 344 | 0 | 248 | 96 | 344 | 0.04 | 0.00 |
| Toaster: 4-slice pop up (large): cooking | 1788 | 879 | 59 | 410 | 293 | 762 | 0.49 | 0.07 |
| contact (vertical)[b] | 2600 | 759 | 180 | 579 | 0 | 759 | 0.29 | 0.24 |
| conveyor (large) | 9613 | 3019 | 879 | 2139 | 0 | 3019 | 0.31 | 0.29 |
| small conveyor[b] | 1745 | 1702 | 358 | 1344 | 0 | 1702 | 0.98 | 0.21 |
| Tortilla grill[b] | 2200 | 1034 | 254 | 780 | 0 | 1034 | 0.47 | 0.25 |
| Waffle iron[b] | 2700 | 267 | 60 | 207 | 0 | 267 | 0.10 | 0.22 |

*Sources*: Swierczyna et al. (2008, 2009), with the following exceptions as noted.
[a]Swierczyna et al. (2009) only.
[b]Additions and updates from ASHRAE research project RP-1631 (Kong and Zhang 2016; Zhang et al. 2016).

بعد حساب الربح الحراري الناتج عن الأجهزة الكهربائية يتم تقسيمه إلى مركبتي الحمل والإشعاع بالاعتماد على نسب التحويل المبينة في الجدول (1−7). وكما ذكرنا سابقاً فإن المركبة الحملية تضاف مباشرة إلى الحمل الحراري، أما المركبة الإشعاعية فإنها تمتص من قبل العناصر الإنشائية في الفراغ المدروس؛ ليتم تحريها بالحمل الحراري إلى الفراغ المحيط بتأخر زمني، وبالتالي يجب تحويل الربح الحراري الإشعاعي إلى حمل تبريدي باستخدام معاملات الإشعاع الزمنية RTS (الجزء غير الشمسي منها) وتحسب من المعادلة (1−15).

والشكل(1−8) يوضح حمل التكييف المحسوس وفق طريقة RTS للموقع المدروس؛ حيث نلاحظ أن الحمل الحراري يتناقص في البداية من الساعة 12 إلى الساعة 4 ليعود ويزداد تدريجياً حتى الساعة الرابعة عصراً، ليتناقص بعدها ويثبت من الساعة السادسة حتى العاشرة مساءً، ونلاحظ أن أكبر حمل حراري $17200\ [W]$ عند الساعة الرابعة أي بعد الظهر الشمسي. والسبب يعود كما ذكر سابقاً إلى أن طريقة RTS تعتمد على تخزين الإشعاع الشمسي في الكتل الجدارية وإعادة ضخها بتأخر زمني نحو الداخل.




**الشكل(1−8) حمل التكييف**

## 1- 7 حساب حمل التدفئة

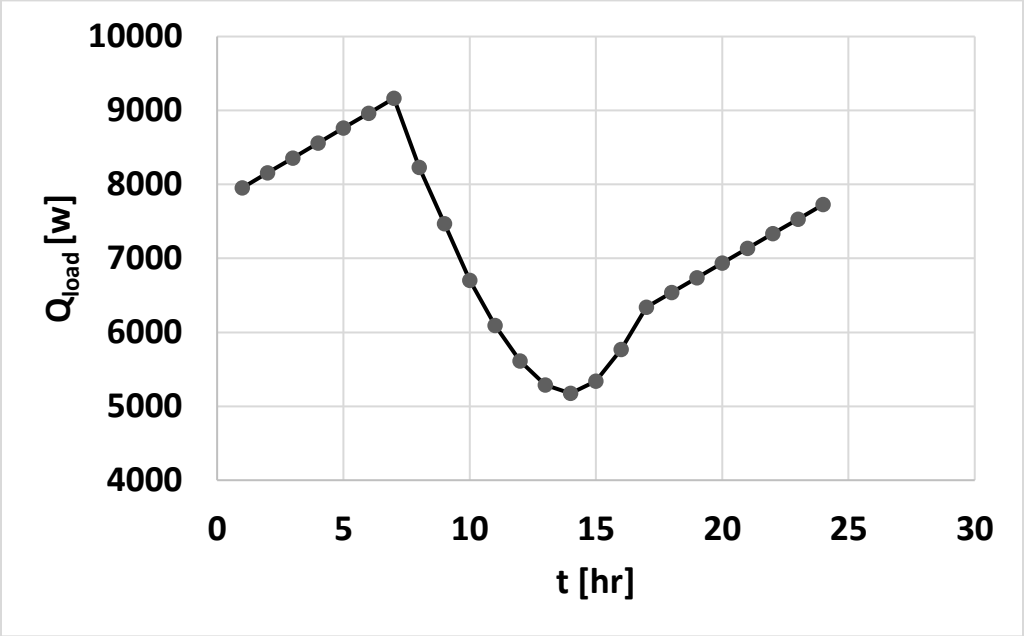
يتم حساب حمل التدفئة للموقع المدروس لأكثر أشهر السنة برودة وهو شهر كانون الأول. ويتم ذلك من خلال حساب التدفقات الحرارية عبر العناصر الإنشائية للمبنى من جدران ونوافذ وسقف وأرضية من المعادلة (1-24) ويتم اختيار درجة الحرارة الداخلية مساوية لدرجة حرارة الراحة الحرارية 23.9 [°C]

$$Q = U\,A\,(T_{in} - T_{amb}) \qquad (1\text{-}24)$$

بالإضافة إلى الحمل الحراري الناتج عن تسرب الهواء والذي يتم حسابه من المعادلة (1-25):

$$Q = \frac{\rho\, C_P\, V\, (T_{in} - T_{amb})\, n}{3600} \qquad (1\text{-}25)$$

والشكل (1-9) يوضح تغير حمل التدفئة مع الزمن حيث نلاحظ أن أعظم قيمة للحمل الحراري 9170 $[W]$ عند الساعة السابعة صباحاً، ليتناقص بعدها الحمل الحراري مع ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط حتى الساعة الثانية ظهراً، ليزداد بعدها الحمل الحراري مع انخفاض في درجة حرارة الوسط المحيط.




**الشكل(1-9) حمل التدفئة**

# الفصل الثاني

## آلة التبريد الامتصاصية

# الفصل الثاني: آلة التبريد الامتصاصية

المخطط الإنسيابي للفصل:

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. استهلاك الطاقة الكهربائية بواسطة آلات التبريد الانضغاطية.
3. المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الانصغاطية.
4. المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الامتصاصية.
5. فرضيات البحث.
6. المعادلات الناظمة لجميع مكونات الدارة.
7. الدراسة التحليلية.

## 2-1 مقدمة

في هذا الفصل سوف نبين حسابات الطاقة المرتبطة بدارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير المستخدمة لتأمين التكييف الصيفي للفيلا المفترضة، والتي تم شرح تفاصيلها المعمارية وحسابات حملها للتكييف الصيفي في الفصل (1) وصولاً إلى حساب قيمة معامل أداء الدارة.

## 2-2 استهلاك الطاقة الكهربائية بوساطة آلات التبريد الانضغاطية

إنّ الطلب المتزايد على الطاقة، أدّى إلى اضمحلال شديد في مصادر الوقود الأحفوري من جهة، ومن جهة أخرى فإنّ الاستهلاك الجائر لهذه المصادر أدّى إلى مشكلات بيئية متعدّدة، ممّا جعل العالم بأسره يبحث عن مصادر طاقيّة بديلة، نظيفة، ومتجددة باستمرار. ومن أهم هذه المصادر الطاقة الشمسية، والتي تتميّز بإمكانية استثمارها في تغطية الأحمال المختلفة سواءً الحرارية منها أم الكهربائية.

يتم تعريف التبريد على أنَّه: المحافظة على درجة حرارة مكان مغلق عند قيمة ثابتة أقل من درجة حرارة الوسط المحيط. بالتالي فالتبريد وفق هذا التعريف هو عملية غير تلقائية، فلا بد من صرف طاقة لأجل تحقيقها. إنَّ آلة التبريد الأكثر استخداماً على مستوى العالم هي العاملة على مبدأ دارة التبريد الانضغاطية. تعتبر هذه الآلات مستهلكة كبيرة للطاقة الكهربائية. وقد بينت دراسة أنجزت بين دبي في الإمارات العربية ومعهد شتوتكارت في ألمانيا أنَّ 50% من الخرج الكهربائية لمحطات توليد الطاقة الكهربائية في المناطق

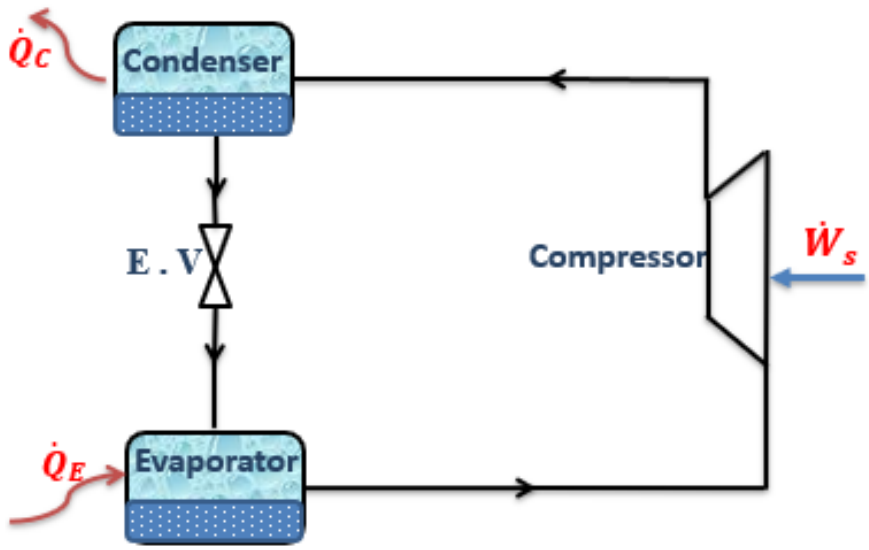
الحارَّة يتم استجراره من قبل أجهزة التكييف ذات مبدأ التبريد الانضغاطي. بالإضافة إلى ذلك فإنَّ وسائط التبريد العاملة ضمنها تملك تأثيراً ضاراً، وحتى وسائط التبريد الحديثة، التي لا تساهم في نضوب طبقة الأوزون، تساهم في الاحتباس الحراريّ.

## 2-3 المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الانصغاطية

إنَّ آلة التبريد الانضغاطية هي إحدى مخرجات علم التيرموديناميك, وتُنجز بدورة عكسية، بمعنى أنَّها تستهلك طاقة ولا تولدها على عكس المحرك الحراري ذي الدورة المباشرة، الذي يولد طاقة (عمل ميكانيكي ومنه كهرباء).

تدعى دارة التبريد الانضغاطية تيرموديناميكياً بأنَّها دارة تنجز بالعمل (work-operated cycle) في إشارة واضحة إلى إجراء الانضغاط الذي يتعرض له وسيط التبريد، وهو الإجراء الأكثر استهلاكاً للكهرباء في كل الدارة. الشكل (2-1) يبين البنية الهندسية لدارة التبريد الانضغاطية الأساسية، حيث تتألف من أربعة عناصر رئيسية هي كالتالي وفق اتجاه تدفق وسيط التبريد: الضاغط (Compressor)، المكثف (Condenser)، صمام التمدد (Expansion Valve)، والمبخر (Evaporator). تعمل الدارة عند مستويين للضغط هما: الضغط المنخفض (ضغط التبخر) والذي يتم تحديده وفق درجة حرارة التبخر اللازمة وماهية وسيط التبريد، والضغط المرتفع (ضغط التكاثف) والذي يتم تحديده وفق درجة الحرارة التصميمية لوسيط التكاثف (هواء أم ماء) وماهية وسيط التبريد.

ملحوظة: ثبات الضغط في كل جانب يستلزم فرض عدم ضياع الضغط نتيجة الاحتكاك بالجدران الداخلية للأنابيب في أثناء تدفق وسيط التبريد.




**الشكل (2−1) مخطط تمثيلي لدارة التبريد الانضغاطية**

يتم تقييم أداء دارات التبريد من خلال معامل الأداء:

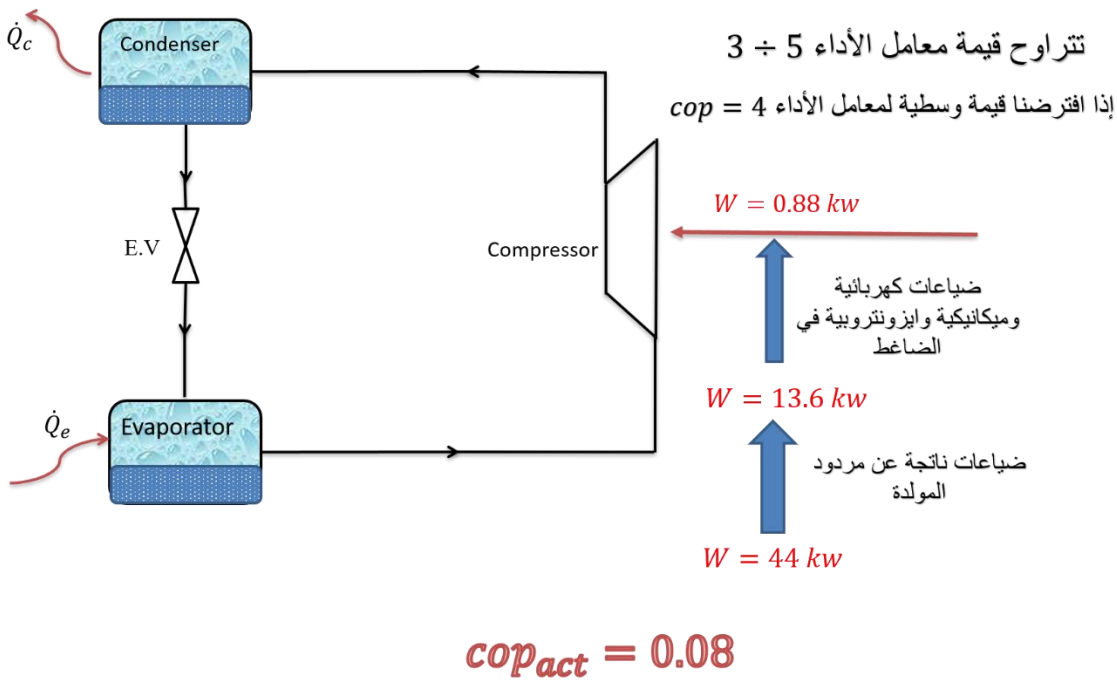
$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_{comp}} \qquad (1-2)$$

حيث:

$\dot{Q}_E[kW]$ − الإنتاجية التبريدية

$\dot{W}_{comp}[kW]$ − عمل المضخة

في دارة التبريد الانضغاطية تكون الطاقة المستهلكة هي الطاقة الكهربائية. والجدير بالذكر أنّ الطاقة الكهربائية هي طاقة ثانوية، وأنّ معامل الأداء لا يأخذ بعين الاعتبار المراديد العديدة المتراكمة جرّاء عملية تحويل الطاقة الأولية (الناتجة عن احتراق غاز الميتان مثلاً) إلى طاقة ثانوية (الطاقة الكهربائية). وبالتالي فإنّ القيمة المرتفعة لمعامل الأداء الحراري في الدارة لا تشكل أي إغراء ولا تعدّ نقطة مقارنة مقبولة بينها وبين دارات التبريد الأخرى. حيث نلاحظ من الشكل (2−2) أن قيمة العمل الحقيقية $44\ [kW]$ في حال افترضنا أن معامل أداء الدارة 4 والإنتاجية التبريدي طون تبريدي واحد وليست $0.88\ [kW]$ وبالتالي فإن قيمة معامل الأداء الحقيقي 0.08 وهي قيمة متدنية جداً.

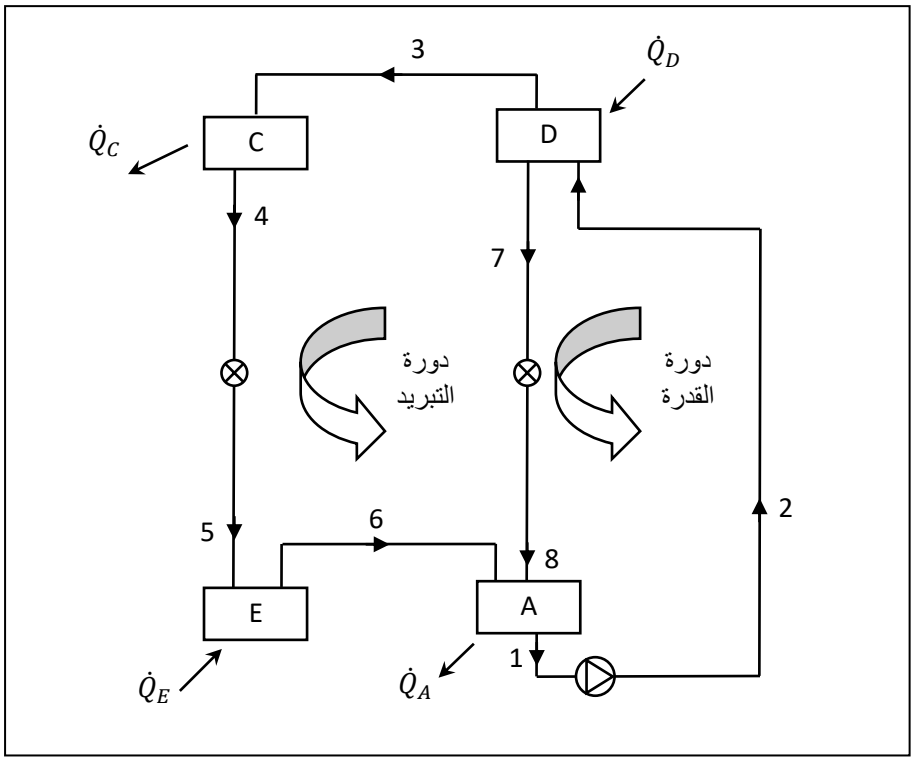



**الشكل (2–2) مخطط تمثيلي لدارة التبريد الانضغاطية يوضح الضياعات الناتجة عن تحويل الطاقة الأولية إلى طاقة ثانوية مستهلكة من قبل الضاغط**

## 2–4 المبدأ التيرموديناميكي لدارة التبريد الامتصاصية [3] [2]

تتطابق دارة التبريد الامتصاصية مع تلك الانضغاطية في العناصر التالية: المكثف، صمام التمدد، والمبخر، **ولكنَّها لا تحتوي على ضاغط**. لذلك يبرز السؤال التالي: طالما أنَّ الدارة الامتصاصية لا تحوي ضاغطاً فكيف يمكننا إغلاق الدارة بين بخار وسيط التبريد ذي الضغط المنخفض الخارج من المبخر إلى بخار وسيط التبريد ذي الضغط المرتفع الداخل إلى المكثف؟

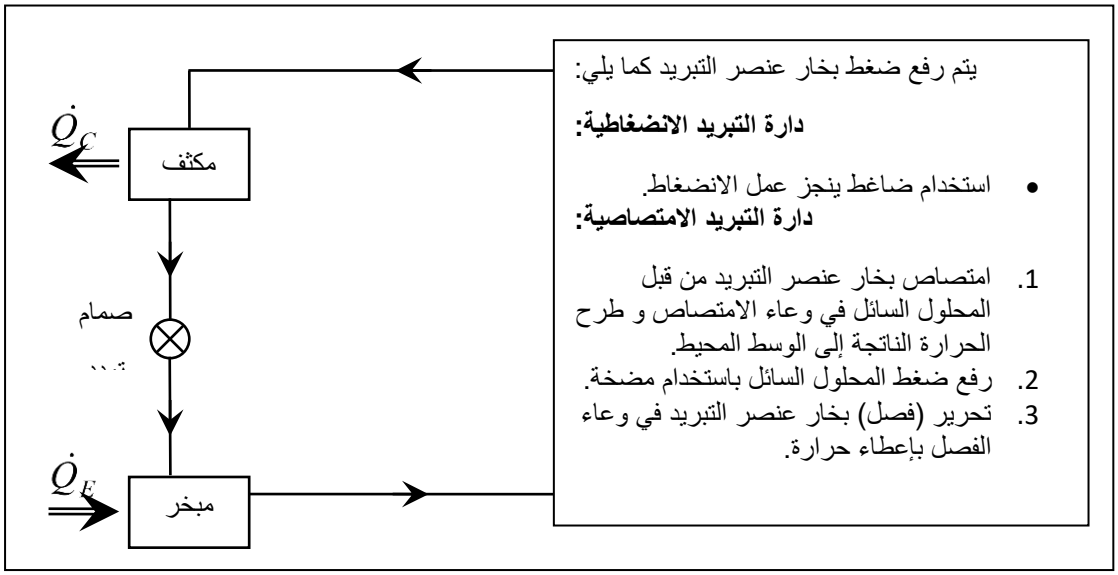
الشكل (2–3) يبين البنية الهندسية الأساسية لدارة التبريد الامتصاصية. نلاحظ من الشكل وجود دورتين داخل دارة التبريد الامتصاصية وهما: دورة القدرة ودورة التبريد. بالنسبة لدورة التبريد فهي تطابق تلك المحتواة ضمن دارة التبريد الانضغاطية، ولذلك يكمن الفرق بين الدارتين في دورة القدرة. ولنبدأ بشرحها: يتم الاستعاضة عن الضاغط بوعاء امتصاص ووعاء فصل إضافة إلى مضخة وصمام تمدد.




**الشكل (2−3) مخطط تمثيلي لدارة تبريد امتصاصية أحادية التأثير**

الشكل (2−4) يبين آلية رفع ضغط بخار عنصر التبريد من ضغط التبخر إلى ضغط التكاثف، وتتم هذه العملية بعد تحويله إلى سائل وذلك بامتصاصه عن طريق محلول مكون من مادتين مادة محلة (عنصر التبريد) ومادة منحلة (عنصر الامتصاص)، وتتم هذه العملية في وعاء الامتصاص ليتحول المحلول إلى غني بعنصر التبريد بالحالة السائلة، ويتم رفع الضغط عندها بوساطة مضخة (استهلاكها الكهربائي ضئيل جداً مقارنةً بالاستهلاك الكهربائي للضاغط)، ولتحرير بخار عنصر التبريد عند الضغط المرتفع وإرساله إلى الضاغط يتم استخدام وعاء الفصل، وتتم هذه العملية بتقديم حرارة إلى وعاء الفصل (يمكن استخدام مصادر حرارية متنوعة إما باستخدام مصادر تقليدية كحرق الوقود وإما بالاستفادة من الطاقة الشمسية) لتسخين المحلول ورفع درجة الحرارة إلى درجة حرارة بدء الغليان وتحرير بخار عنصر التبريد (وتتم هذه العملية بوجود اختلاف في درجة حرارة الغليان لكلا العنصرين ودرجة حرارة الغليان لعنصر التبريد تكون هي الأقل؛ لضمان عدم تحرير عنصر الامتصاص)، وبالتالي يصبح المحلول فقيراً بعنصر التبريد، وتتم إعادته إلى وعاء الامتصاص بعد تخفيض ضغط عبر صمام التمدد. تتميز هذه الدارة بفعالية استخدامها لا سيّما في أوقات

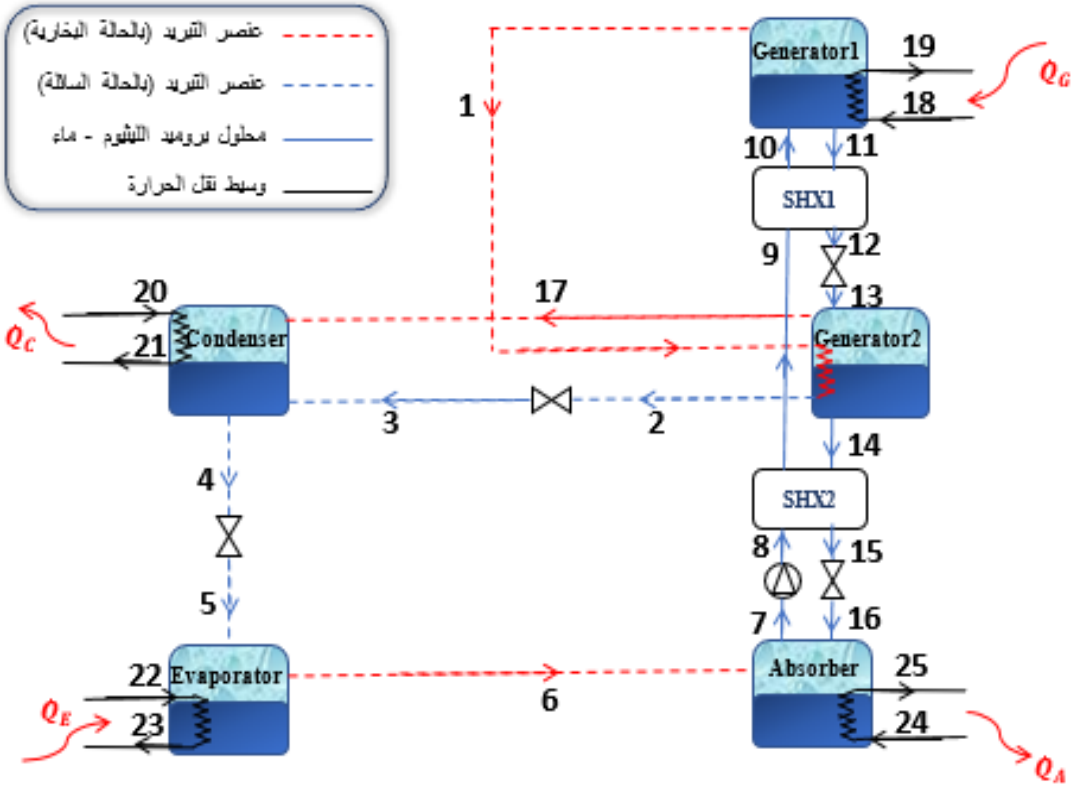
الظهر الشمسي ذات الإشعاع الشمسي الأعظمي وذات الحمل الحراري الأعظمي، ومن وجهة النظر هذه يكمن إغراء استخدام دارة التبريد الامتصاصية.




**الشكل (2–4) مقارنة بين دارتي التبريد الامتصاصية والانضغاطية**

الجدير بالذكر أنّ البخار الناتج من وعاء الفصل درجة حرارته مرتفعة ولا يتم الاستفادة منه، وبالتالي يوجد هدر حراري كبير في الدارة، حيث يتم الاستفادة منه بتمريره إلى وعاء فصل ثانٍ لتسخين المحلول العائد من وعاء الفصل الرئيسي، وبالتالي تحرير كميات إضافية من بخار وسيط التبريد والتي تساهم في زيادة في الإنتاجية التبريدية، وبالنتيجة زيادة في معامل الأداء الحراري للدارة .

تسمى هذه الدارة بدارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير العاملة على المحلول بروميد الليثيوم – ماء والتي سيتم اعتمادها في بحثنا هذا، ولهذه الدارة عدة أنواع حسب مكان وعاء الفصل الثانوي، فمنها المتسلسل حيث يوضع وعاء الفصل الثانوي على خط المحلول الفقير بعنصر التبريد، ومنها المتعاكس حيث يوضع وعاء الفصل الثانوي على خط المحلول الغني بعنصر التبريد. وفي بحثنا هذا سيتم دراسة دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير المتسلسل (كونها الأقل تعقيداً, ولا يوجد اختلاف كبير بمعامل الأداء مقارنةً ببقية الأنواع) كما في الشكل(2–5) :




**الشكل (2–5) مخطط تمثيلي لدارة تبريد امتصاصية مضاعفة التأثير المتسلسل العاملة على محلول بروميد الليثيوم – ماء**

الشكل(2–5) يوضح دارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير المتسلسل العاملة على المحلول بروميد الليثيوم – ماء، حيث نلاحظ أن الدارة عاملة على ثلاثة ضغوط في الدارة: الضغط المنخفض (ضغط التبخر عند درجة حرارة التبخر), والضغط المتوسط (ضغط التكاثف عند درجة حرارة التكاثف), والضغط المرتفع (ضغط وعاء الفصل الثانوي عند درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي).

تتألف الدارة بشكل رئيسي من عدة أوعية، يتم فيها عمليات مختلفة من تبادل للكتلة والطاقة, وهي: وعاء الفصل الرئيسي (Generator 1) والثانوي (Generator 2) ووعاء الامتصاص (Absorber) والمبخر (Evaporator) ومبادل حراري رئيسي (SHX1) وثانوي (SHX2)، بالإضافة إلى وجود مضخة (Pumps) وأوعية تمدد (E.V).

تُقدَّم كمية الحرارة والسوية الحرارية اللازمة لتسخين المحلول الغني بعنصر التبريد في وعاء الفصل الرئيسي، وبالتالي تحرير بخار عنصر التبريد عند النقطة (1) ذي السوية الحرارية المرتفعة، والذي يتم الاستفادة منه في تسخين المحلول العائد من وعاء الفصل الرئيسي عند النقطة (11) في وعاء الفصل الثانوي، وبالتالي تحرير كمية إضافية من بخار وسيط التبريد عند النقطة (17) حيث يتكاثف في المكثف، في حين أنّ البخار

الناتج من وعاء الفصل الرئيسي يتكاثف في وعاء الفصل الثانوي ليتم إضافته إلى الكمية المتحررة من وعاء الفصل الثانوي بعد تكاثفه عند النقطة (4)، ويتم توجيه سائل وسيط التبريد الناتج إلى المبخر للحصول على الإنتاجية التبريدية المطلوبة في الدارة عند النقطة (6).

يوجد في الدارة مبادلان حراريان رئيسي وثانوي، حيث إنّ المبادل الحراري الرئيسي مسؤول عن رفع درجة حرارة المحلول العائد من وعاء الامتصاص عند النقطة (7) وذلك بالاستفادة من درجة حرارة المحلول الفقير بوسيط التبريد العائد من وعاء الفصل الرئيسي عند النقطة (11)، أمّا المبادل الحراري الثانوي فوظيفته رفع درجة حرارة المحلول الغني بوسيط التبريد العائد من وعاء الامتصاص، بالاستفادة من درجة حرارة المحلول الفقير بوسيط التبريد العائد من وعاء الفصل الثانوي عند النقطة (14). وبالتالي نلاحظ أن المحلول العائد من وعاء الامتصاص باتجاه وعاء الفصل الرئيسي يُسَخَّنُ مرتين؛ للتقليل من الضياع الحراري في الدارة, ولرفع معامل الأداء الحراري الكلي للدارة.

كما نعلم فإنّ أي تطبيق هندسي حراري يتم توصيفه ببارامترين أساسيين هما: الكم (كمية الحرارة مقدرةً بالجول)، والسوية (درجة الحرارة مقدرةً بالدرجة المئوية ). ومن الصعب تحديدهما أو اختيارهما بصورة تقريبية لأن ذلك يؤدي إلى خلل في عمل الدارة، وخاصّة أنّ دارة التبريد الامتصاصية العاملة على محلول بروميد الليثيوم – ماء لها خصوصية يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار وهي ظاهرة التبلور، والتي ممكن أن تحدث في الدارة، وذلك لأنّ عنصر الامتصاص المستخدم هو عبارة عن بروميد الليثيوم وهو مادة صلبة (غير متطايرة)، وبالتالي من المهم معرفة الخطوات المطلوبة لتحديد درجة الحرارة المناسبة لعمل وعاء الفصل الرئيسي بدقة، والتي سنتطرق إليها في هذا البحث, والمحققة قيمة مرتفعة لمعامل الأداء ومردود الدارة ككل تحت شرط عدم حدوث التبلور في الدارة.

## 2-5 فرضيات البحث

- المنظومة تعمل في حالة النظام المستقر.
- إنّ المحلول الخارج من وعاء الفصل الرئيسي والثانوي ووعاء الامتصاص في حالة إشباع، وبخار وسيط التبريد الخارج من وعاء الفصل الرئيسي والثانوي والمبخر في حالة إشباع، ووسائل وسيط التبريد الخارج من وعاء المكثف في حالة إشباع.
- عمل المضخة مهمل مقارنة بقيم الاستطاعات الحرارية لباقي الأجهزة.
- جميع الأنابيب والأوعية معزولة بشكل جيد، وبالتالي فإنّ الضياعات الحرارية نحو الوسط المحيط مهملة.

- ❖ وسيط التبريد في الدارة هو ماء نقي.
- ❖ لا يوجد تغير في الضغط إلّا في المضخات وصمامات التمدد.
- ❖ عملية الخنق لوسيط التبريد أديباتية.
- ❖ عملية الضخ للمحلول أيزوترمية.
- ❖ فيما يخص تحليل الأكسيرجي للدارة يتم اعتماد درجة الحرارة المرجعية للمحلول عند الضغط الجوي النظامي$100\ [kpa]$ والتركيز $50\%$ هي $T_o = 25\ [°C]$ .
- ❖ فعالية المبادل الحراري الرئيسي والثانوي $0.7$ .
- ❖ الاستطاعة التبريدية المطلوبة (من دراسة حمل التكييف الصيفي للفيلا) $\dot{Q}_e = 17200\ [W]$
- ❖ درجة حرارة التبخر $T_e = 5\ [°C]$
- ❖ درجة حرارة التكاثف (المكثف مائي) $T_c = 40\ [°C]$ (مساوية لدرجة حرارة وعاء الامتصاص)

## 6-2 المعادلات الناظمة لجميع مكونات الدارة [5] [4]

جميع المعادلات مستنتجة من القانون الأول في التيرموديناميك (جميع أشكال الطاقة الداخلة إلى النظام مطروحاً منها جميع أشكال الطاقة الخارجة من النظام تساوي إلى التغير الطاقة الكلية للنظام)

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E} \qquad (2-2)$$

وقانون حفظ الكتلة (مجموع التدفقات الكتلية الداخلة إلى أي عنصر في الدارة تساوي مجموع التدفقات الكتلية الخارجة من العنصر)

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m} \qquad (3-2)$$

ويتم حساب الإكسيرجي لنقاط الدارة من المعادلة (2-4):

$$\dot{E}x = \dot{m}_i\left(h_i - h_o - T_o(s_i - s_o)\right) \qquad (4-2)$$

ويتم حساب تخريب ( تدمير) الأكسيرجي لكل عنصر من عناصر الدارة من المعادلة (2-5):

$$\Delta \dot{E}x = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \qquad (5-2)$$

ويتم حساب معامل الأداء الحراري للدارة من المعادلة (2-6):

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_{G1}} \qquad (6-2)$$

ومردود الإكسيرجي للدارة يتم حسابه من المعادلة (2-7):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_E}{\dot{E}x_{G1}} = \frac{\dot{Q}_E\left|1-\frac{T_O}{T_E}\right|}{\dot{Q}_{G1}\left|1-\frac{T_O}{T_{G1}}\right|} \qquad (7-2)$$

**الجدول (2−1) توصيف المعادلات الناظمة لكل عنصر من عناصر الدارة**

| | التوازن الكتلي | التوازن الحراري |
|---|---|---|
| **وعاء الفصل الرئيسي** | $\dot{m}_{10} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{11}$ | $\dot{Q}_{G1} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{10} h_{10}$ |
| **وعاء الفصل الثانوي** | $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{17} + \dot{m}_{14}$ | $\dot{Q}_{G2} = \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_{13} h_{13}$ |
| **وعاء الامتصاص** | $\dot{m}_7 = \dot{m}_{16} + \dot{m}_6$ | $\dot{Q}_A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{16} h_{16} - \dot{m}_7 h_7$ |
| **المكثف** | $\dot{m}_4 = \dot{m}_{17} + \dot{m}_3$ | $\dot{Q}_C = \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4$ |
| **المبخر** | $\dot{m}_6 = \dot{m}_5$ | $\dot{Q}_E = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_5 h_5$ |
| **SHX1المبادل الحراري** | $\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{12} h_{12}$ | |
| **SHX2المبادل الحراري** | $\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{15} h_{15}$ | |

ويتم حساب ضياع الإكسيرجي لوعاء الفصل الرئيسي كما في المعادلة (2−8) (يتم حساب الضياع لباقي الأوعية باستخدام الطريقة نفسها):

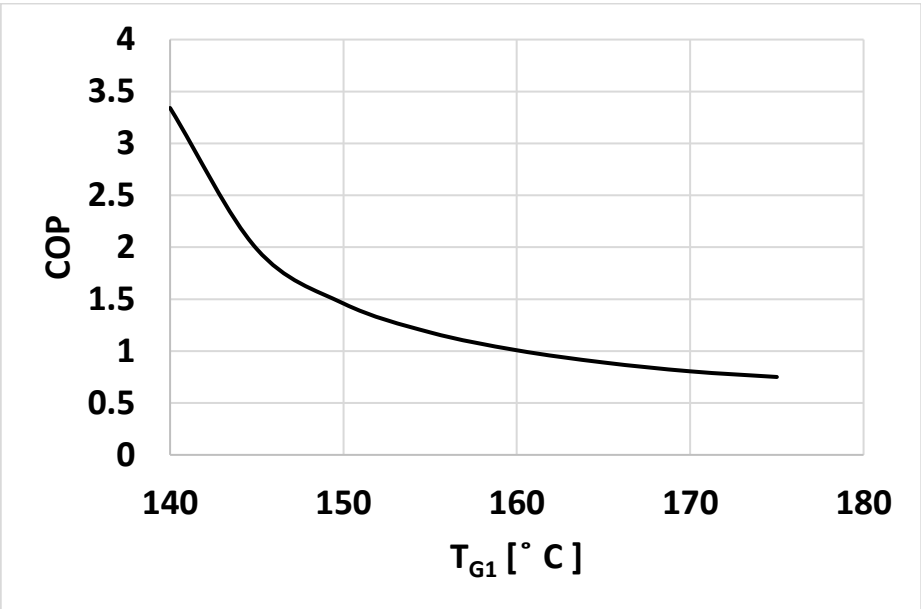
$$\Delta \dot{E}x_{G1} = (\dot{E}x_{18} + \dot{E}x_{10}) - (\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{19}) \qquad (8\text{-}2)$$

## 2−7 الدراسة التحليلية

عند دراسة الأداء الحراري لدارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير، أي دراسة تغيّر معامل أداء دارة التبريد عند درجات حرارة مختلفة لوعاء الفصل الرئيسي (مع ثبات درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي) تبيّن أنّه بازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي فإنّ معامل الأداء يتناقص كما في الشكل (2−6)، ولكنّ هذا الأمر غير منطقي وينافي السلوك الحراري للدارة، نظراً لأنّ زيادة درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي يؤدي إلى زيادة في كمية بخار وسيط التبريد المتحررة، وبالتالي زيادة في الإنتاجية التبريدية بنسبة أكبر من ازدياد التدفق الحراري المطلوب في وعاء الفصل الرئيسي، وبالتالي قيمة مرتفعة لمعامل الأداء الحراري، وهذا الأمر يعود إلى عدم

توازن الدارة حرارياً نتيجة لثبات درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي عند تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، والمقصود بالتوازن الحراري هو تساوي التدفقات الطاقية الداخلة إلى الدارة (وعاء الفصل الرئيسي $\dot{Q}_{G1}$– المبخر $\dot{Q}_E$) مع التدفقات الطاقية الخارجة من الدارة (وعاء الامتصاص $\dot{Q}_A$ و المكثف $\dot{Q}_C$) كما في المعادلة (9–2):

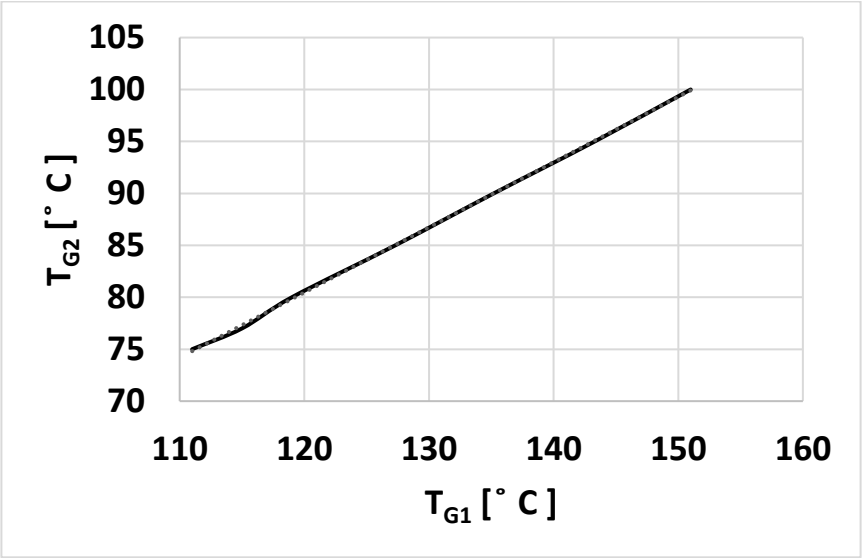
$$\dot{Q}_{G1} + \dot{Q}_E = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C \qquad (9-2)$$




**الشكل (2–6) تغيّر معامل أداء دارة التبريد الامتصاصية مع تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي**

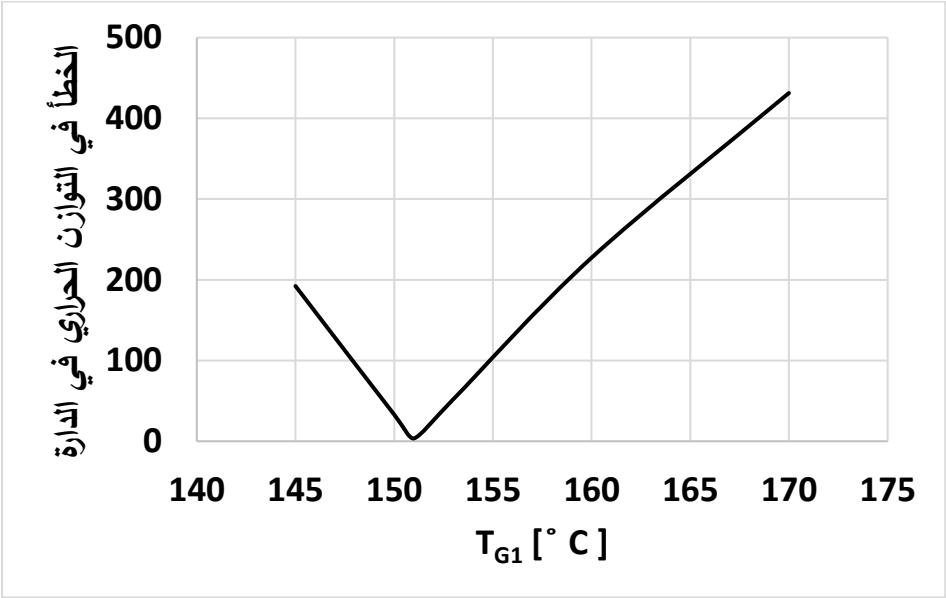
وبالتالي فإنّ درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي تتعلّق بشكل مباشر بدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، فعند تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي فإنّ درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي تتغير كما في الشكل(2–7) حيث نلاحظ أنّ العلاقة بين درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي والثانوي تأخذ شكلاً خطياً, وتتراوح النسبة بينهما بين 1.49 إلى 1.52 وتعطى بالشكل:

$$T_{g2} = 0.6277 \times T_{g1} + 5.1298 \qquad (10-2)$$




**الشكل (2−7) تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي مع درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي**

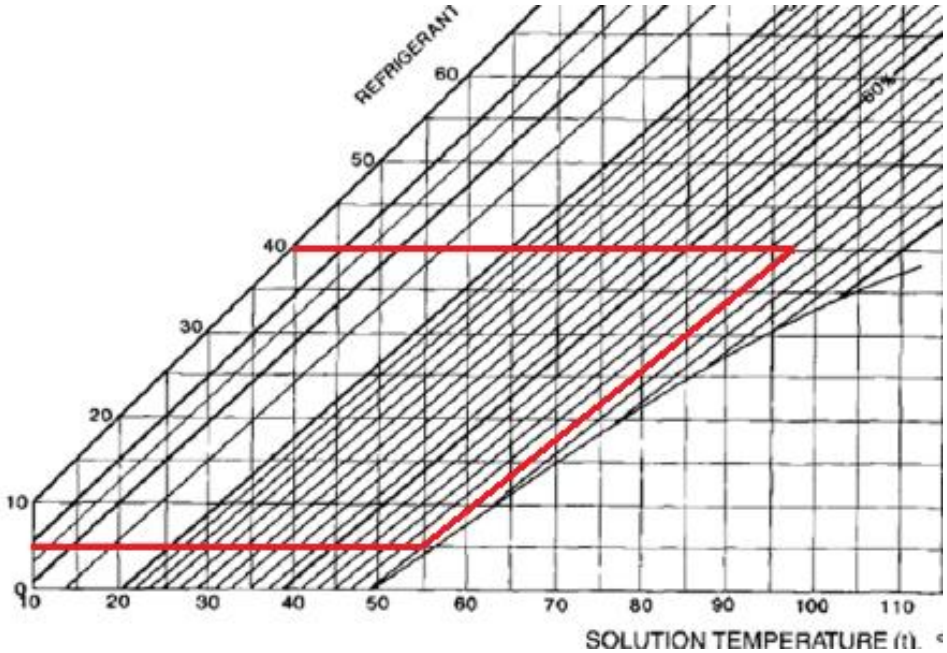
وبالتالي فإنّه لتحديد درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي يجب دراسة التوازن الحراري للدارة ككل كما ذكرنا سابقاً. عند رسم علاقة تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي مع الخطأ الناتج عن التوازن الحراري للدارة، نلاحظ أنّ المنحنى يتناقص في البداية حتّى الوصول إلى نقطة حدية (وهي درجة الحرارة المناسبة لوعاء الفصل الثانوي) لينعطف عندها ويزداد الخطأ بعدها، وعند هذه النقطة الحدية تكون درجة الحرارة المناسبة لعمل وعاء الفصل الثانوي كما في الشكل(2−8)، ومن هنا نتجت العلاقة بين تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي والثانوي.




**الشكل (2−8) تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي مع تغيّر الخطأ في توازن الدارة**

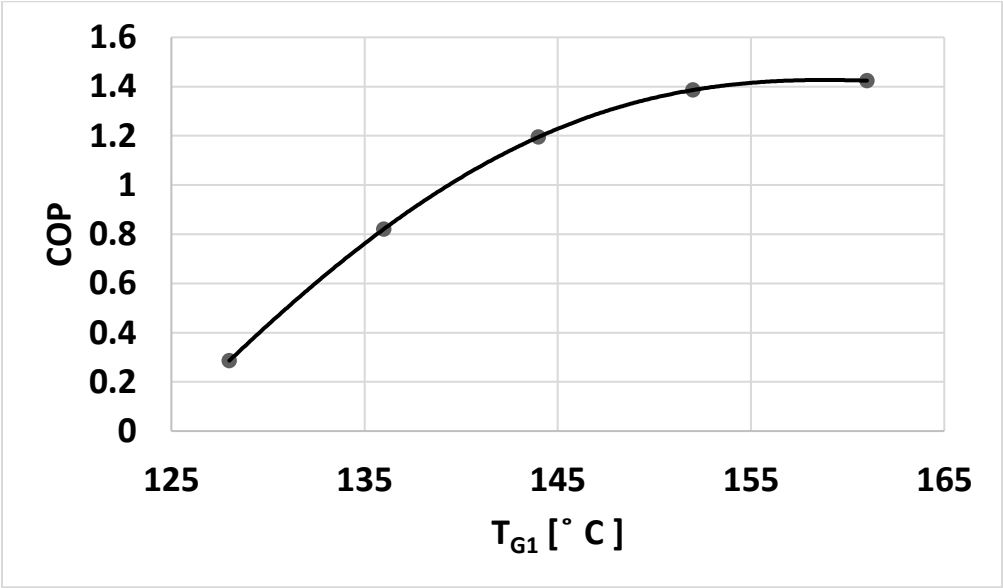
ومن هذه النقطة يبدأ التصميم الحراري للدارة، حيث في البداية يتم تحديد الضغوط العاملة في الدارة: ضغط التبخر المقابل لدرجة حرارة التبخر, وضغط التكاثف المقابل لدرجة حرارة التكاثف على مخطط محلول بروميد الليثيوم ماء log(p) − X − T كما في الشكل(2−9)، وعند ضغط التكاثف يتم اختيار نقطة تقع قبيل نقطة تقاطع خط ضغط التكاثف مع منحني التبلور (لضمان عدم حدوث تبلور في الدارة)، والتي تمثل درجة الحرارة الأعظمية لوعاء الفصل الثانوي. وبالتالي نستطيع تحديد تركيز المحلول الخارج من وعاء الفصل الثانوي بالإضافة إلى درجة حرارته, والذي بدوره يقودنا إلى تحديد الضغط العامل في وعاء الفصل الرئيسي.

وبهذا الشكل تتحدد الضغوط الثلاثة العاملة في الدارة، ويتم تحديد درجة الحرارة العاملة في وعاء الفصل الرئيسي باتّباع الطريقة السابقة (حساب التوازن الحراري عند كل نقطة).




**الشكل (2−9) مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء (log(p)−X−T)**

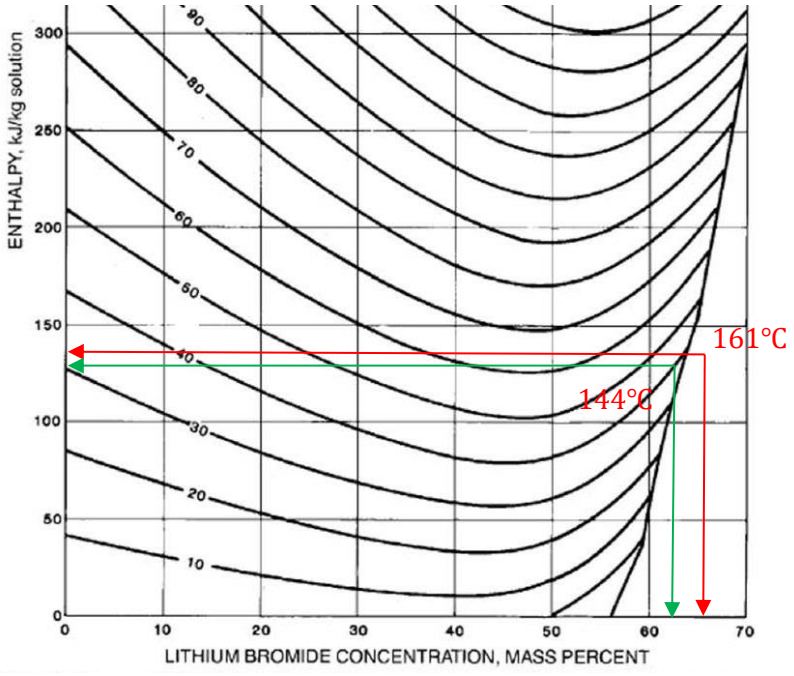
وعندها يتم حساب قيمة معامل الأداء الحراري للدارة عند قيم مختلفة لدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي. وبالتالي دراسة تغيّر معامل الأداء الحراري في الدارة ككل مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي, كما في الشكل(2−10) : [6]




**الشكل (2−10) تغيّر معامل الأداء مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي**

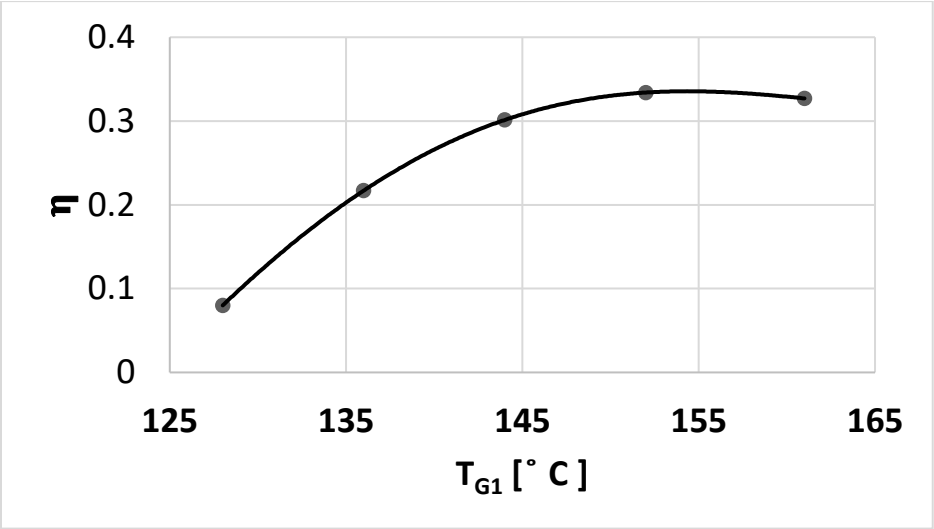
نلاحظ من الشكل (2−10) أنّه بازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، فإنّ معامل الأداء يزداد تدريجياً وبشكل كبير في البداية لتتناقص الزيادة تدريجياً مع ازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، ليبدأ بعدها بالثبات (أي لا فائدة من زيادة درجة الحرارة بعد هذه القيمة) حيث نلاحظ أنّ أعظم قيمة لمعامل الأداء 1.424 عند درجة حرارة [°C] 161. وكما ذكرنا فإنّ خصوصية دارة التبريد الامتصاصية العاملة على محلول بروميد الليثيوم – ماء تكمن في خطورة حدوث تبلور في الدارة، وبالتالي يجب التأكّد من سلامة الدارة عند هذه القيمة.

نلاحظ أنّ تركيز المحلول الخارج من وعاء الفصل الرئيسي 62 عند درجة الحرارة [°C] 161 وتركيز المحلول الخارج من وعاء الفصل الثانوي 66.14 وبالتالي هناك خطر حدوث تبلور في الدارة. ومن مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء (h−X−T) الموضح في الشكل(2−11) ونتيجة لوجود مبادل حراري عند خط المحلول الخارج من وعاء الفصل الثانوي فإنّ المحلول يقع في منطقة التبلور عند درجات الحرارة الأكبر من [°C] 144 لوعاء الفصل الرئيسي.



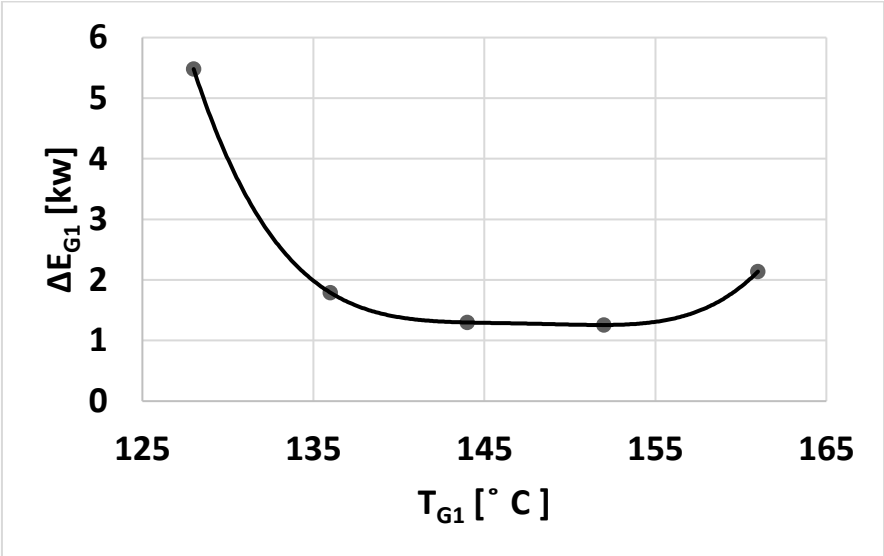

**الشكل (2−11) مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء (h−X−T)**

وبالتالي يجب تصميم الدارة عند درجة حرارة أقل من [°C] 144، ولتحديد درجة الحرارة الملائمة لعمل الدارة تم دراسة تغيّر مردود الأكسيرجي مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي, كما في الشكل (2−12) : [7]




**الشكل (2−12) تغيّر مردود الأكسيرجي مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي**

نلاحظ من الشكل(2−12) أنّه بازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، فإنّ مردود الأكسيرجي يزداد بشكل تدريجي مع ازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي ليثبت عند درجة الحرارة [°C] 152 والتي عندها تكون قيمة المردود 0.34 ولكن كما ذكرنا سابقاً، فإن الدارة تواجه خطر التبلور عند قيم أقل من [°C] 152 وبالتالي يجب دراسة بارامترات أخرى لاختيار قيمة مناسبة لدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي؛ لاختيار القيمة المنطقية والمحققة لقيمة مرتفعة لمعامل الأداء في الدارة وقيمة مناسبة للمردود, بحيث تكون بعيدة عن ظاهرة التبلور، تم حساب ضياع الإكسيرجي في الدارة لوعاء الفصل الرئيسي كما في الشكل(2−13)



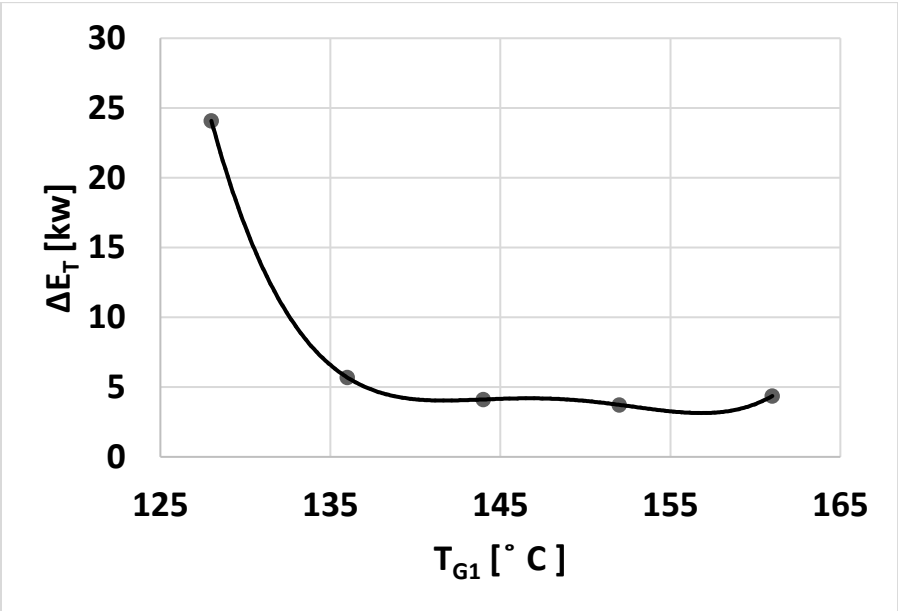

**الشكل (2−13) تغيّر ضياع الأكسيرجي في وعاء الفصل الرئيسي مع تغيّر درجة حرارته**

الشكل السابق يوضح علاقة تغير ضياع الأكسيرجي في وعاء الفصل الرئيسي مع تغير درجة حرارته، حيث نلاحظ أن الضياع يتناقص في البداية مع ازدياد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي حتى درجة الحرارة $140\ [°C]$، والتي عندها تكون قيمة ضياع الإكسيرجي في وعاء الفصل الرئيسي $1.4\ [kW]$ لتثبت قيمة الضياع مع ازدياد درجة الحرارة حتى القيمة $155\ [°C]$ ليزداد الضياع بعدها.

وبحساب ضياع الإكسيرجي الكلي في الدارة ودراسة تغيره مع تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي كما في الشكل(2−14)، نجد أن السلوك الذي يسلكه هذا المنحني مشابه للمنحني السابق، وأقل ضياعاً للأكسيرجي في الدارة $4.1\ [kW]$ عند درجة الحرارة $140\ [°C]$ حيث نلاحظ أن هذه القيمة بعيدة تماماً عن مشكلة التبلور، وتحقق قيمة مناسبة لمعامل الأداء $COP = 1.086$ وقيمة مناسبة لمردود الأكسيرجي $\eta = 0.26$ وبالتالي سيتم تصميم الدارة عند درجة الحرارة $140[°C]$ والجدول (2−2) يوضح قيم التدفقات الحرارية ومعامل الأداء وضياع الإكسيرجي في الدارة [8]

**الجدول (2−2) قيم التدفقات الحرارية ومعامل الأداء وضياع الإكسيرجي في الدارة**

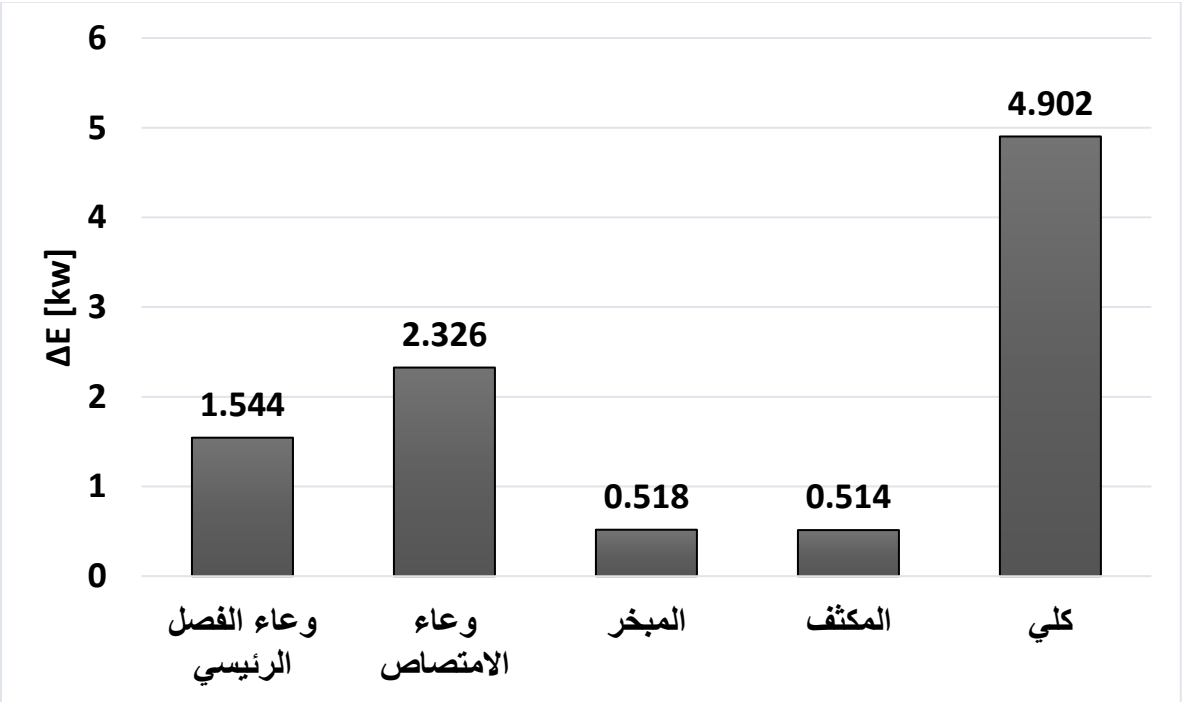
| $T_{g1} = 140℃$ | |
|---|---|
| **14391** | $\dot{Q}_{g1}[W]$ |
| **8827** | $\dot{Q}_{c}[W]$ |
| **17200** | $\dot{Q}_{e}[W]$ |
| **20535** | $\dot{Q}_{A}[W]$ |
| **1.086** | $COP$ |
| **0.26** | $\eta_{ex}$ |
| **4.1146** | $\Delta E[W]$ |




**الشكل (2−14) تغيّر ضياع الأكسيرجي في الدارة مع تغيّر درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي**

نلاحظ من المنحني السابق أن ضياع الأكسيرجي كبير نسبياً مقارنةً بالإنتاجية التبريدية المطلوبة $17200\ [W]$ والشكل(2−15) يوضح مقارنة ضياع الأكسيرجي بين وعاء الفصل الرئيسي ووعاء الامتصاص

والمبخر والمكثف وضياع الأكسيرجي الكلي. حيث نلاحظ أن أكبر ضياع للأكسيرجي في وعاء الامتصاص بقيمة $2.326\ [kW]$ والذي يشكل نسبة46.6% من الضياع الكلي، يليه وعاء الفصل بقيمة $1.544\ [kW]$ والذي يشكل نسبة 31.5% من الضياع الكلي، حيث نلاحظ أن كلا الوعائين يشكل نسبة 78.1% من الضياع الكلي، وبالتالي يجب تصميمهما بدقة لتفادي الضياعات الحرارية التي تؤثر سلباً في مردود الدارة، ونلاحظ أن أقل ضياع للأكسيرجي في المكثف بقيمة $0.518\ [kW]$ بنسبة 1.1% وبقيمة متقاربة في المبخر بقيمة $0.514\ [kW]$.




**الشكل (2−15) مقارنة ضياع الأكسيرجي بين أوعية دارة التبريد الامتصاصية**

# الفصل الثالث

## حقل المجمعات الشمسية

# الفصل الثالث: حقل المجمعات الشمسية

## المخطط الإنسيابي للفصل:

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. اعتبارات الدراسة.
3. المجمع الشمسي.
4. حساب معاملات انتقال الحرارة.
5. حساب معامل الضياع الحراري الكلي $UL$.
6. حساب معامل انتقال الحرارة الكلي $U_o$
7. حساب معامل مردود المجمع الشمسي $F'$
8. حساب معامل إزالة الحرارة FR
9. حساب مساحة حقل المجمعات الشمسية.
10. أثر التظليل على خرج المجمعات الشمسية.

## 3-1 مقدمة

إن كل تطبيق هندسي حراري يوصف ببارامترين أساسيين، هما: الكم –والذي يحدد بالتدفق الحراري المطلوب [kW]– والسوية الطاقية والتي تحدد بدرجة الحرارة [°C]. فقد يتشابه تطبيقان بالكم، ولكن لا يتشابهان بالسوية الطاقية التي بدورها تحدد المجمع الشمسي المختار، فالمجمع المسطح من غير الممكن أن يرفع درجة حرارة الوسيط الناقل للحرارة إلى قيمة أعلى من [°C] 100 وذلك نتيجة أن مساحة الربح الحراري الشمسي مساوية لمساحة الضياع الحراري نحو الوسط المحيط. والجدول التالي يوضح درجات الحرارة التي ممكن أن نحصل عليها من مجمعات شمسية مختلفة كما في الجدول(3-1)

**الجدول(3−1) درجة الحرارة الأعظمية لمجمعات شمسية مختلفة**

| المجمع الشمسي | مجال درجات الحرارة [ °C ] |
|---|---|
| **المجمع الشمسي المسطح** | 30 → 80 |
| **المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة** | 50 → 200 |
| **المركزات الشمسية الخطية ذات القطع المكافئ** | 60 → 300 |

## 3−2 اعتبارات الدراسة

- الاستطاعة الحرارية التي يتطلبها وعاء الفصل [kW] 14.391
- حمل التدفئة [kW] 9.2
- درجة الحرارة التي يتطلبها وعاء الفصل [°C] 140
- درجة حرارة دخول الوسيط الناقل للحرارة إلى وعاء الفصل [°C] 158
- درجة حرارة خروج الوسيط الناقل للحرارة من وعاء الفصل [°C] 150
- الوسيط الناقل للحرارة ماء بضغط عالٍ [bar] 6

## 3−3 المجمع الشمسي

بعد دراسة الأداء الحراري لدارة التبريد الامتصاصية مضاعفة التأثير للموقع المفروض، وبعد معرفة التدفقات الحرارية في الدارة ودرجات حرارة دخول وخروج الوسيط الناقل للحرارة في وعاء الفصل. نستطيع الآن القيام بالحسابات الحرارية والتصميمية لحقل المجمعات الشمسية، وفي بحثنا هذا سنختار المجمع الشمسي ذا الأنابيب المفرغة ذات التدفق المباشر (من النوع U pipe) ذي المواصفات الحرارية والفيزيائية الموضحة في الجدول(3−2) أدناه والذي صنعته شركة Ritter gruppe

**الجدول(3–2) المواصفات الفيزيائية والحرارية للمجمع الشمسي**

| Series | | CPC 6 INOX | CPC 12 INOX | CPC 18 INOX |
|---|---|---|---|---|
| Number of evacuated tubes | | 6 | 12 | 18 |
| $\eta_o$ in relation to aperture, EN 12975 | % | 64.2 | 64.2 | 64.2 |
| $a_1$ with wind, in relation to aperture | W/(m²K) | 0.885 | 0.885 | 0.885 |
| $a_2$ with wind, in relation to aperture | W/(m²K²) | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Yield forecast (location Würzburg, Germany, reference area 3 m²) | kWh(m²a) | 651 | 651 | 651 |
| Yield forecast (location Würzburg, Germany, reference area 5 m²) | kWh(m²a) | 589 | 589 | 589 |
| Grid dimensions (length x height x depth) | m | 0.70 x 1.64 x 0.1 | 1.39 x 1.64 x 0.1 | 2.08 x 1.64 x 0.1 |
| Gross surface area | m² | 1.15 | 2.28 | 3.41 |
| Aperture area | m² | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| Collector contents | l | 0.87 | 1.74 | 2.61 |
| Weight | kg | 18.7 | 35 | 49.3 |
| Max. working overpressure | bar | 10 | 10 | 10 |
| Max. stagnation temperature | °C | 272 | 272 | 272 |
| Connection diameter, compression fitting | mm | 15 | 15 | 15 |
| Sensor sleeve | mm | 6 | 6 | 6 |
| Collector material | | Al/brass/Cu/stainless steel/glass/silicone/PBT/EPDM/TPE | | |
| Glass tube material | | borosilicate glass 3.3 | | |
| Selective absorber coating material | | aluminium nitride | | |
| Glass tube (Ø ext./Ø int./wall thickness/tube len.) | mm | 47/36.2/1.6/1503 | | |
| Colour (aluminium frame profiles) | | RAL 7015 | | |
| Colour (plastic parts) | | black | | |
| Thermal shock test according to DIN EN 12975-2 | ITW-test no. | 06COL513/3 | | |
| Hailstone test according to DIN EN 12975-2 | TÜV-test no. | 435/142448 | | |
| Other tests and approvals | | EN 12975, RAL UZ 73, Solar Keymark · ISO 9001 | | |
| Type conformity according to 97/23/EG | | Z-IS-DD1-STG-11-04-100029919-002 | | |
| DIN CERTCO - registration number | | 011-7S134R | | |

الجدير بالذكر أن المجمع الشمسي الذي اخترناه يتألف من 12 أنبوباً زجاجياً خالياً تماماً من الهواء، وبالتالي فإن الضياع الحراري الحملي معدوم في الأنابيب. وإن الأنبوب الماص تم تصنيعه على شكل حرف **U** وذلك لزيادة طول الأنبوب الماص دون زيادة في طول المجمع الشمسي، ويتم وصل الأنابيب الماصة بين أنبوب وآخر بشكل متسلسل كما في الشكل (3–1).

**الشكل(3-1) الوصل التسلسلي للأنابيب الماصة**

أي أن الحرارة التي اكتسبها الوسيط الناقل للحرارة تصبح مدخلاً للأنبوب الزجاجي الذي يليه، ويتم إدخال الأنبوب الماص ضمن مقامط مثبتة على السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الداخلي، وبأخذ مقطع عرضي للأنبوب الزجاجي كما في الشكل(3-2)

**الشكل(3-2) مقطع عرضي للأنبوب الزجاجي**

نلاحظ أنه يتألف من أنبوب زجاجي خارجي، وأنبوب زجاجي داخلي مغطى بمادة انتقائية, وبالتالي سينتهي الإشعاع الشمسي عنده, ويصبح هو منبع الحرارة، وسينقسم عنده تدفق الحرارة إلى جزء مفيد ينفذ إلى الوسط الناقل للحرارة، وجزء يذهب إلى الوسط المحيط على شكل ضياع حراري. وبالتالي فإن معدل الطاقة المفيدة يعطى بالعلاقة التالية: [9]

$$\dot{Q}_u = FR \times A \times \left[\tau\alpha \times I_g - U_L \times (T_{cin} - T_{amb})\right] \qquad (1-3)$$

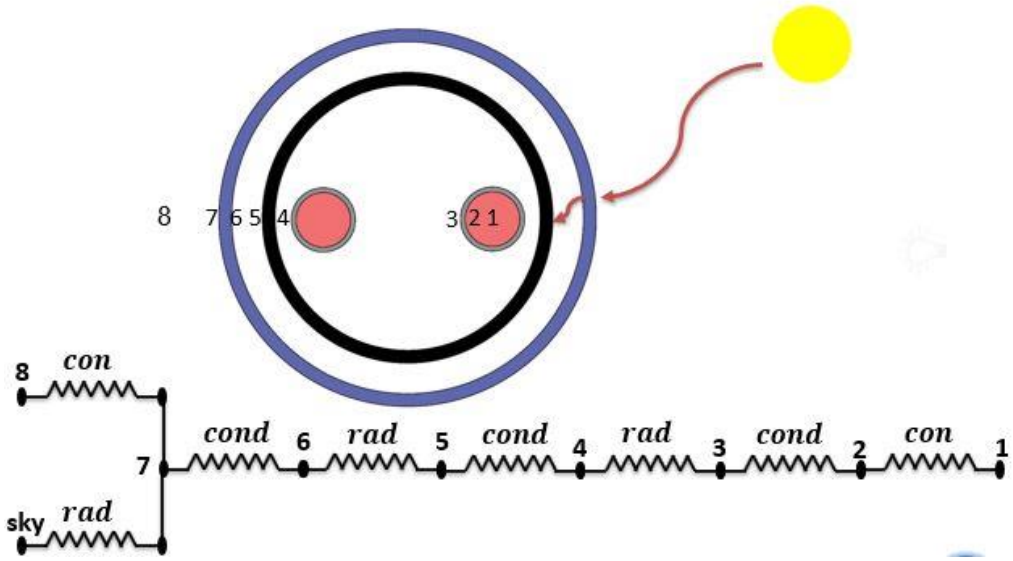
في الحقيقة إن هدفنا هو حساب مساحة حقل المجمعات الشمسية A وبالتالي يجب حساب البارامترات المجهولة في المعادلة, وهي معامل الضياع الحراري الكلي UL ومعامل إزالة الحرارة FR أما باقي البارامترات فيتم أخذها من بيانات الموقع المدروس والبيانات الفيزيائية للمجمع الشمسي المختار، وبالتالي لا بد من حساب معاملات انتقال الحرارة التي تدخل في حساب المعاملات المطلوبة.

## 3-4 حساب معاملات انتقال الحرارة [10] [11]

إن الأداء الحراري للمجمع الشمسي ذي الأنابيب المفرغة يعتمد على القانون الأول في الترموديناميك (التوازن الطاقي) بين وسيط نقل الحرارة (HTF) والوسط المحيط، ويتضمن هذا التوازن: أبعاد المجمع الشمسي، ونوع وسيط نقل الحرارة، والخواص البصرية للمجمع الشمسي، والوسط المحيط.

الشكل (3-3) يوضح انتقال الحرارة أحادي البعد بالحالة المستقرة لمقطع عرضي من الأنبوب الماص (وبوجود أنبوب زجاجي) وشبكة المقاومات الحرارية.

الإشعاع الشمسي الوارد على الأنبوب الزجاجي الخارجي $\dot{q}_{sol}$ ينفذ عبره ليصل إلى الأنبوب الزجاجي الداخلي حيث يمتصها ويصبح منبعاً للطاقة (نظراً لأنه مغطى بطلاء انتقائي)، تنقسم هذه الطاقة إلى قسمين أساسيين: قسم مفيد ينتقل بالتوصيل عبر الأنبوب الزجاجي الداخلي $\dot{q}_{54.cond}$ ومن ثم بالإشعاع من السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الخارجي للأنبوب الماص $\dot{q}_{43.con}$ ومن ثم بالتوصيل عبر الأنبوب الماص $\dot{q}_{32.cond}$ ومن ثم بالحمل القسري $\dot{q}_{12.con}$ إلى الوسيط الناقل للحرارة. وقسم ضياع حراري ينتقل بالإشعاع من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الخارجي $\dot{q}_{56.rad}$، ومن ثم بالتوصيل عبر الأنبوب الزجاجي الخارجي $\dot{q}_{67.cond}$ وبالحمل الطبيعي من الأنبوب الزجاجي إلى الوسط المحيط $\dot{q}_{78.con}$ وبالإشعاع نحو السماء $\dot{q}_{7sky.rad}$.




**الشكل (3-3) مقطع عرضي للأنبوب الماص في المجمع الشمسي**

## 3-5 حساب معامل الضياع الحراري الكلي $UL$

كما ذكرنا فإن الضياع الحراري يحدث عند السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي, ويمر نحو الوسط المحيط بعدة مقاومات حرارية بالإشعاع من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الخارجي $\mathbf{h_{56.rad}}$ وبالتوصيل عبر الأنبوب الزجاجي الخارجي $\boldsymbol{h_{67.cond}}$ وبالحمل $\boldsymbol{h_{78.con}}$ والإشعاع $\mathbf{h_{7sky.rad}}$ نحو الوسط المحيط.

### 3-5-1 حساب معامل انتقال الحرارة $\mathbf{h_{56.rad}}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالإشعاع من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الخارجي، حيث يعتمد هذا المعامل بشكل أساسي على درجة حرارة وانبعاثية كلٍ من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي والسطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الخارجي, ويمكن حسابه من المعادلة (3-2)

$$h_{56.rad} = \frac{6}{\frac{1}{\varepsilon_5}+(1-\varepsilon_6)\times\left(\frac{D_5}{\varepsilon_6 * D_6}\right)} \times (T_5^2 + T_6^2) \times (T_5 + T_6) \qquad (3-2)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3-3) حساب $h_{56.rad}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $\sigma$ | 5.67E-08 | $\left[\frac{w}{m^2k^4}\right]$ |
| $D_5$ | 0.0362 | $[m]$ |
| $D_6$ | 0.0438 | $[m]$ |
| $\varepsilon_5$ | 0.25 | (-) |
| $\varepsilon_6$ | 0.9 | (-) |
| $h_{56.rad}$ | 3.252 | $\left[\frac{w}{m^2°C}\right]$ |

### 3-5-2 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{67.cond}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالتوصيل من السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي إلى السطح الخارجي له ويعطى بالمعادلة(3-3)

$$h_{67.cond} = \frac{2\times k_{67}}{D_6\times \ln\left(\frac{D_7}{D_6}\right)} \qquad (3-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3-4) حساب $h_{78.cond}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $D_6$ | 0.0438 | $[m]$ |
| $D_7$ | 0.047 | $[m]$ |
| $K_{67}$ | 1.14 | $\left[\frac{W}{m°C}\right]$ |
| $h_{67.cond}$ | 687.96 | $\left[\frac{W}{m^2°C}\right]$ |

### 3-5-3 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{78.con}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الخارجي نحو الوسط المحيط, ويعطى بالمعادلة (3-4)

$$h_{78.con} = \frac{\mathrm{Nu} \times \mathrm{k}_{78}}{\mathrm{D}_7} \qquad (3-4)$$

نلاحظ من المعادلة (3-4) أنه يجب علينا حساب عدد نوسلت Nu، ولحساب هذا العدد نميز الحالتين التاليتين:

الحالة الأولى بوجود رياح بسرعة $(1\ m/sec)$ وما فوق, وعند هذه الحالة يمكننا حساب عدد نوسلت من المعادلة (3-5)

$$Nu = \mathrm{c} \times \mathrm{Re}^{\mathrm{m}} \times Pr_8^n \times \left(\frac{\mathrm{Pr}_8}{\mathrm{Pr}_7}\right)^{0.25} \qquad (3-5)$$

نلاحظ من المعادلة (3-5) أنه يجب علينا تحديد كلٍ من عدد براندل $\mathrm{Pr}_8$ عند درجة الحرارة $T_8$ و عدد براندل $\mathrm{Pr}_7$ عند درجة الحرارة $T_7$ ثم نقوم بحساب عدد رينولدز من المعادلة (3-6):

$$Re = \frac{\mathrm{V}_w \times \mathrm{D}_7}{\upsilon_8} \qquad (3-6)$$

ونحدد اللزوجة الحركية $\upsilon_8$ عند درجة الحرارة $T_8$

أما قيم الثوابت c ، m فتؤخذ من الجدول (3-5) بدلالة عدد رينولدز Re

**الجدول(3-5) قيم الثوابت m،c**

| Re | c | M |
|---|---|---|
| $1 \rightarrow 40$ | 0.75 | 0.4 |
| $40 \rightarrow 1000$ | 0.51 | 0.5 |
| $1000 \rightarrow 200000$ | 0.26 | 0.6 |
| $200000 \rightarrow 1000000$ | 0.076 | 0.7 |

وتحدد قيمة الثابت n تبعاً للاعتبار التالي:

$$n=0.37 \text{ for } Pr_7<=10$$

$$n=0.36 \text{ for } Pr_7>10$$

الحالة الثانية: من دون وجود رياح؛ أي: سرعة الرياح تكون معدومة, عندها يتم حساب عدد نوسلت Nu من المعادلة (3−7):

$$Nu=\left(0.6+\frac{0.387\times Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1+\left(\frac{0.559}{Pr_{89}}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \qquad (7-3)$$

لحساب عدد نوسلت يجب علينا أولاً حساب $Pr_{78}$ من المعادلة (3−8):

$$Pr_{78}=\frac{\upsilon_{78}}{\alpha_{78}} \qquad (8-3)$$

وتحدد كلٌ من الانتشارية الحرارية $\alpha_{78}$ , واللزوجة الحركية $\upsilon_{78}$ عند درجة الحرارة $\left(T_{78}=\frac{T_7+T_8}{2}\right)$

وبعد تحديد $Pr_{78}$ يتم حساب عدد ريليه Ra من المعادلة (3−9):

$$Ra=\frac{g\times\mathcal{B}\times(T_7-T_a)\times D_7^3}{\alpha_{78}\times\upsilon_{78}} \qquad (9-3)$$

نلاحظ من العلاقة (3−9) أنه يجب علينا حساب معامل التمدد الحجمي من المعادلة (3−10):

$$\mathcal{B}=\frac{1}{T_{78}} \qquad (10-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية وباعتبار سرعة الرياح لمدينة دمشق $(5\ m/sec)$ نجد:

**الجدول(3−6) حساب $h_{78.con}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $D_7$ | 0.047 | $[m]$ |
| $K_{78}$ | 0.0244 | $[W/m°C]$ |
| $Pr_7$ | 0.72 | (−) |
| $Pr_8$ | 0.726 | (−) |
| $V_w$ | 5 | $[m/sec]$ |
| $\upsilon_8$ | 1.7E−05 | $[m^2/sec]$ |
| Re | 17058.82 | (−) |
| c | 0.26 | (−) |
| m | 0.6 | (−) |
| n | 0.37 | (−) |
| Nu | 80.092 | (−) |
| $h_{78.con}$ | 36.65 | $[W/m^2°C]$ |

### 3−5−4 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{7sky.rad}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالإشعاع من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الخارجي نحو السماء ويعطى بالمعادلة (3−11):

$$h_{7sky.rad} = \sigma \times \varepsilon_7 \times \left(T_7^2 + T_{sky}^2\right) \times (T_7 + T_{sky}) \qquad (11-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−7) حساب حساب $h_{7\text{sky}.rad}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $\sigma$ | 5.67E−08 | $[\mathbf{W}/m^2\mathbf{k}^4]$ |
| $D_7$ | 0.047 | $[m]$ |
| $\varepsilon_7$ | 0.9 | (−) |
| $h_{7\text{sky}.rad}$ | 6.44 | $[\mathbf{W}/m^2°\text{C}]$ |

### 3−5−5 حساب معامل الضياع الحراري الكلي $U_L$

يعطى معامل الضياع الحراري الكلي بالمعادلة (3−12):

$$U_L = \left(\frac{1}{h_{56.rad}} + \frac{D_5}{D_7 \times h_{67.cond}} + \frac{D_3}{D_8 \times (h_{78.con} + h_{7\text{sky}.rad})}\right)^{-1} \qquad (12-3)$$

يتعلق معامل الضياع الحراري الكلي بما يلي:

1. انبعاثية الأنبوب الماص.
2. الضغط المطبق في الفراغ بين الأنبوبين الزجاجين الداخلي والخارجي (هل هو مخلى من الهواء بشكل تام أو يوجد هواء بضغط منخفض أو يوجد هواء بالضغط الجوي؟).
3. درجة الحرارة الخارجية للأنبوب الزجاجي.
4. سرعة الهواء المحيط.
5. درجة حرارة الهواء المحيط.

ملحوظة: بما أن الضياع الحراري يتم من السطح الخارجي الأنبوب الماص أي يتعلق بمساحته، ولكن الحد $(h_{78.con} + h_{7\text{sky}.rad})$ يتعلق بمساحة الأنبوب الزجاجي لذلك من الضروري الحفاظ على التجانس الفيزيائي للمساحات، وبالتالي لضمان هذا التجانس يجب ضرب الحد $(h_{78.con} + h_{7\text{sky}.rad})$ بالنسبة التالية

$\frac{A_7}{A_5} = \frac{D_7}{D_5} = \frac{\text{m}^2_{cover}}{\text{m}^2_{abs}}$ وكذلك الأمر بالنسبة للحد $h_{67.cond}$.

وبتعويض القيم المحسوبة في علاقة معامل الضياع الحراري الكلي نجد أنه يساوي:

**الجدول(3−8) حساب حساب $U_L$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $U_L$ | 3.0634 | $[\mathbf{W/m^2}°\mathrm{C}]$ |

## 3−6 حساب معامل انتقال الحرارة الكلي

إن هذا المعامل يشمل الضياع الحراري بالإضافة إلى الربح الحراري من المجمع الشمسي، ولحساب هذا المعامل سنعتمد الخوارزمية التالية:

### 3−6−1 حساب معامل انتقال الحرارة $\mathbf{h_{54.cond}}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالتوصيل من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الداخلي له, ويعطى بالمعادلة (3−13):

$$h_{54.cond} = \frac{2\times K_{54}}{D_5\times \ln\left(\frac{D_5}{D_4}\right)} \qquad (13-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−9) جدول حساب $h_{54.cond}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $D_4$ | 0.033 | $[\boldsymbol{m}]$ |
| $D_5$ | 0.0362 | $[\boldsymbol{m}]$ |
| $K_{54}$ | 1.14 | $[\mathbf{W/m}°\mathrm{C}]$ |
| $h_{54.cond}$ | 680.52 | $[\mathbf{W/m^2}°\mathrm{C}]$ |

### 3−6−2 حساب معامل انتقال الحرارة $\mathbf{h_{43.rad}}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالإشعاع من السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الخارجي للأنبوب الماص، حيث يعتمد هذا المعامل بشكل أساسي على درجة حرارة وانبعاثية كلٍ من السطح الخارجي للأنبوب الماص والسطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الداخلي, ويمكن حسابه بالمعادلة (3−14):

$$h_{43.rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_3}+(1-\varepsilon_4)\times\left(\frac{D_3}{\varepsilon_4 * D_4}\right)} \times (T_3^2 + T_4^2) \times (T_3 + T_4) \qquad (14-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−10) جدول حساب $h_{56.rad}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $\sigma$ | 5.67E−08 | $[\mathbf{W/m^2k^4}]$ |
| $D_3$ | 0.008 | $[\boldsymbol{m}]$ |
| $D_4$ | 0.033 | $[\boldsymbol{m}]$ |
| $\varepsilon_3$ | 0.9 | (−) |
| $\varepsilon_4$ | 0.9 | (−) |
| $h_{43.rad}$ | 11.89 | $[\mathbf{W/m^2}°\mathrm{C}]$ |

### 3−6−3 حساب معامل انتقال الحرارة $\mathbf{h_{32.cond}}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالتوصيل من السطح الخارجي للأنبوب الماص إلى السطح الداخلي له ويعطى بالمعادلة (3−15):

$$h_{32.cond} = \frac{2\times K_{32}}{D_5\times\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)} \qquad (15-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−11) جدول حساب $h_{23.cond}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $D_3$ | 0.008 | $[m]$ |
| $D_2$ | 0.0068 | $[m]$ |
| $K_{32}$ | 400 | $[W/m°C]$ |
| $h_{32.cond}$ | 615312.94 | $[W/m^2°C]$ |

### 3−6−4 حساب معامل انتقال الحرارة $h_{21.con}$

يصف هذا المعامل انتقال الحرارة بالحمل القسري من السطح الداخلي للأنبوب الماص نحو وسيط نقل الحرارة ويعطى بالمعادلة (3−16):

$$h_{21.con} = \frac{\mathrm{Nu}\times\mathrm{k}_1}{\mathrm{D}_2} \qquad (16-3)$$

نلاحظ أنه يجب علينا حساب عدد نوسلت Nu ويتم حسابه بالاعتماد على المعادلة (3−17):

$$Nu = \frac{\left(\frac{\mathrm{f}_2}{8}\right)\times(\mathrm{Re}-1000)\times Pr_1}{1+12.7\times\sqrt{\frac{f_2}{8}}\times(Pr_1^{\frac{2}{3}}-1)} \times \left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{0.11} \qquad (17-3)$$

لحساب عدد نوسلت لا بد لنا من حساب معامل الاحتكاك $f_2$ ويتم حسابه من المعادلة (3−18):

$$f_2 = [1.82 \times \log_{10}(Re) - 1.64]^{-2} \qquad (18-3)$$

ويمكننا حساب عدد رينولدز $Re$ من المعادلة (3−19):

$$Re = \frac{\mathrm{V}_1\times\mathrm{D}_2}{\upsilon_1} \qquad (19-3)$$

ويتم حساب سرعة وسيط نقل الحرارة من معادلة الاستمرار (3−20):

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1\times\frac{\pi*D_2^2}{4}} \qquad (20-3)$$

يتم تحديد كلٍ من $Pr_1$ و $Pr_2$ و $\rho_1$ و $\mathrm{k}_1$ من جدول الإشباع للماء عند درجة الحرارة $T_1$ حيث:

$$T_1 = \frac{T_{c.in}+T_{c.out}}{2} \qquad (21-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−12) جدول حساب $h_{21.con}$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $\dot{m}$ | 0.0236 | $[\mathbf{kg}/sec]$ |
| $D_2$ | 0.0068 | $[m]$ |
| $V_1$ | 0.7155 | $[\mathbf{m}/sec]$ |
| $\rho_1$ | 908.588 | $[\mathbf{kg}/m^3]$ |
| Re | 24455.18 | (−) |
| $f_2$ | 0.0296 | (−) |
| $Pr_1$ | 1.232 | (−) |
| $Pr_2$ | 1.095 | (−) |
| NU | 82.18 | (−) |
| $h_{12.con}$ | 8242.352 | $[w/m^2{}^\circ\mathrm{C}]$ |

### 3−6−5 حساب معامل انتقال الحرارة الكلي $U_o$

إن هذا المعامل لا يشمل فقط الضياع الحراري من الأنبوب الماص، بل يشمل الربح الحراري أيضاً, والذي يتم بأربع آليات: انتقال الحرارة بالتوصيل من السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الداخلي له $h_{54.cond}$, وبالإشعاع من السطح الداخلي للأنبوب الزجاجي الداخلي إلى السطح الخارجي للأنبوب الماص $h_{43.rad}$, وبالتوصيل من السطح الخارجي للأنبوب الماص إلى السطح الداخلي له $h_{32.cond}$, وبالحمل القسري من السطح الداخلي للأنبوب الماص إلى الوسيط الناقل للحرارة $h_{21.con}$, ويعطى بالمعادلة (3−22):

$$U_o = \left(\frac{1}{U_L} + \frac{1}{h_{54.cond}} + \frac{1}{h_{43.rad}} + \frac{D_5}{D_3 \times h_{32.cond}} + \frac{D_5}{D_3 \times h_{21.con}}\right)^{-1} \qquad (3-22)$$

نلاحظ من العلاقة (3−22) أن معامل الانتقال الحراري الكلي يتعلق بما يلي:

1. معامل الضياع الحراري الكلي $U_L$.
2. الموصلية الحرارية للأنبوب الماص وسماكته.

3. الموصلية الحرارية للأنبوب الزجاجي الداخلي وسماكته.
4. نوعية وسيط نقل الحرارة.

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−13) جدول حساب $U_o$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $U_o$ | 2.424124 | $[w/m^2°C]$ |

**ملحوظة:**

بما أن السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي هو مصدر الحرارة، يجب انتقال الحرارة من خلاله، وبالتالي إن معامل الانتقال الحراري الكلي $Uo$ يتعلق بمساحة السطح الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي، ولكن الحد $h_{21con}$ يتعلق بمساحة السطح الداخلي للأنبوب الماص, وكذلك الحد $h_{32.cond}$؛ لذا للمحافظة على التجانس الفيزيائي للمساحات ضربنا الحد $h_{12con}$ والحد $h_{32.cond}$ بالنسبة

$$\frac{A_3}{A_5} = \frac{D_3}{D_5} = \frac{m^2_{abs-out}}{m^2_{glass2-out}}$$

## 3−7 حساب معامل مردود المجمع الشمسي $F'$

المعنى الفيزيائي لهذا المعامل: هو النسبة بين معدّل الطاقة المفيدة الحقيقية إلى معدّل الطاقة المفيدة النظرية، عندما تكون درجة حرارة السطح الماص في أي نقطة منه مساوية لدرجة حرارة مائع نقل الحرارة. ويعطى بالمعادلة (3−23):

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \qquad (23-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−14) جدول حساب $F'$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $F'$ | 0.7913183 | (−) |

## 3−8 حساب معامل إزالة الحرارة $FR$

المعنى الفيزيائي لهذا المعامل هو النسبة بين معدّل الطاقة المفيدة الحقيقية إلى معدّل الطاقة المفيدة النظرية عندما تكون درجة حرارة السطح الماص مساوية لدرجة حرارة دخول مائع نقل الحرارة.

يتم حساب معامل إزالة الحرارة من المعادلة (3−24):

$$FR = \frac{\dot{m}Cp}{AU_L} \times \left[1 - e^{-\frac{AU_L F'}{\dot{m}Cp}}\right] \qquad (24-3)$$

بتعويض القيم وإجراء العمليات الحسابية نجد:

**الجدول(3−15) جدول حساب $FR$**

| الرمز | القيمة | الواحدة |
|---|---|---|
| $FR$ | 0.791318 | (−) |

## 3−9 حساب مساحة المجمعات الشمسية

إن الغاية الأساسية من هذا الفصل تحديد المساحة المناسبة لحقل المجمعات الشمسية، بالإضافة إلى حجم الخزان المناسب لعمل المنظومة، ويتم ذلك باستخدام طريقة $\overline{\emptyset}, f\ chart$ وذلك بحساب معامل الفائدة الشمسية عند مساحات مختلفة لحقل المجمعات الشمسية، وعند حجوم مختلفة للخزان الحراري.

إن هذه الطريقة تستخدم عندما تكون بيانات شدة الإشعاع الشمسي الوسطي خلال الشهر المدروس لموقع جغرافي معين معلومة، وهي طريقة مطورة عن طريقة $f\ chart$ والتي تقتصر فقط على الأنظمة التي تعمل عند درجات حرارة قريبة من [°C] 20 وبالتالي فإن هذه الطريقة مفيدة في تطبيقات دارة التبريد الامتصاصية بالإضافة إلى أنظمة التدفئة والتبريد.

### 3-9-1 تحديد زاوية ميلان حقل المجمعات الشمسية [12]

قبل البدء باستخدام هذه الطريقة، سيتم تحديد زاوية الميلان المناسبة لعمل المجمعات الشمسية، والتي لها أثر مباشر في الخرج الحراري المفيد لحقل المجمعات الشمسية. وبما أن محور الشمس مائل عن محور الأرض ينتج عن ذلك زاوية ورود للإشعاع الشمسي، وبالتالي يجب إمالة المجمع الشمسي لزيادة الطاقة المفيدة التي نحصل عليها من حقل المجمعات الشمسية، ولتقليل الضياعات الحرارية. ولتحديد زاوية الميلان المناسبة β قمنا بحساب المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل عند زوايا ميلان مختلفة.

سيتم اختيار اليوم 162 من شهر حزيران كونه أكثر أشهر السنة حرارةً بالإضافة إلى اختيار الموقع الجغرافي بمدينة دمشق أي تحديد زاوية خط الطول $LON = 36.29°$ وزاوية خط العرض $L = 33.49°$ ومن ثم سيتم حساب زاوية الانحراف من المعادلة (3-25):

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + n)\right] \qquad (3-25)$$

ومن ثم سيتم زاوية غروب الشمس على سطح مائل من المعادلة (3-26):

$$h'_s = \min\left[h_s\,, \cos^{-1}(-\tan(L-\beta)\ tan\delta)\right] \qquad (3-26)$$

إن قيمة $h'_s$ هي القيمة الصغرى بين قيمة $\cos^{-1}(-\tan(L-\beta)\,tan\delta\,)$ وقيمة الزاوية الساعية الشمسية $h_s$ والتي تعطى بالمعادلة (3-27):

$$h_s = \cos^{-1}(-tanL\ tan\delta) \qquad (3-27)$$

وكما نعلم إن الإشعاع الشمسي بعد نفوذه من الغلاف الجوي ينقسم إلى عدة مركبات: المباشر, والمنتشر, والمنعكس من الأرض. وإن كل هذه المكونات تدخل في حساب المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على المجمع الشمسي، وبالتالي يجب حساب كل مكون على حدة. بدايةً سيتم حساب المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي المباشر ويتم ذلك بحساب المعامل $\bar{R}_b$ والذي يعبر عن النسبة بين المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح مائل إلى المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح أفقي. ويتم حسابها من المعادلة (3-28):

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(L-\beta)cos\delta \sin h'_s + \frac{\pi}{180} h'_s\ \sin(L-\beta)sin\delta}{\cos L cos\delta \sin h_s + \frac{\pi}{180} h_s\ \sin L sin\delta} \qquad (3-28)$$

ومن ثم سيتم حساب النسبة $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ النسبة بين المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي المنتشر إلى المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الكلي ويتم حسابها من المعادلة (3−20) (3−30):

$for\ h_s \leq 81.4°\ and\ 0.3 \leq \bar{k}_t \leq 0.8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.56\,\bar{k}_t + 4.189\,\bar{k}_t^2 - 2.137\,\bar{k}_t^3 \qquad (29-3)$$

$for\ h_s > 81.4°\ and\ 0.3 \leq \bar{k}_t \leq 0.8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022\,\bar{k}_t + 3.427\,\bar{k}_t^2 - 1.821\,\bar{k}_t^3 \qquad (30-3)$$

حيث $\bar{k}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ معامل الوضح الشهري والذي يعبر عن النسبة بين المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح أفقي $\bar{H}$ (ويتم الحصول عليها من البيانات الجغرافية للموقع المدروس [13] ) إلى المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي خارج الغلاف الجوي $\bar{H}_o$ والتي يتم حسابها من المعادلة (3−31):

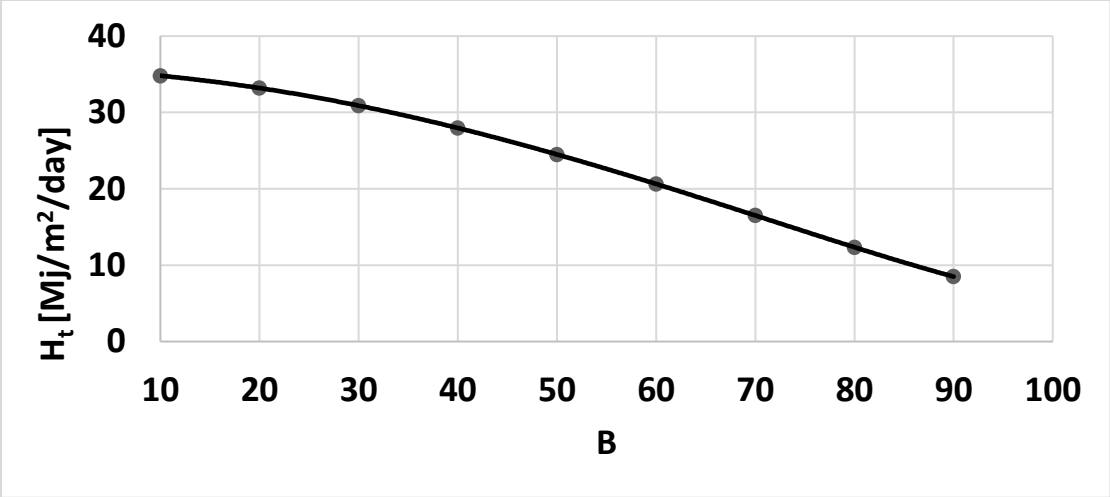
$$\bar{H}_o = \frac{24 \times 3600\, G_{sc}}{\pi}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right]\left[\cos L\, cos\delta \sin h_s + \frac{\pi}{180}\, h_s\, \sin L\, sin\delta\right] \qquad (31-3)$$

حيث $G_{sc}$ الثابت الشمسي وقيمته $1383\ \left[\frac{w}{m^2}\right]$

ومن ثم سيتم حساب المعامل $\bar{R}$, والذي يعبر عن النسبة بين المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل إلى المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح أفقي, ويتم حسابها من المعادلة (3−32):

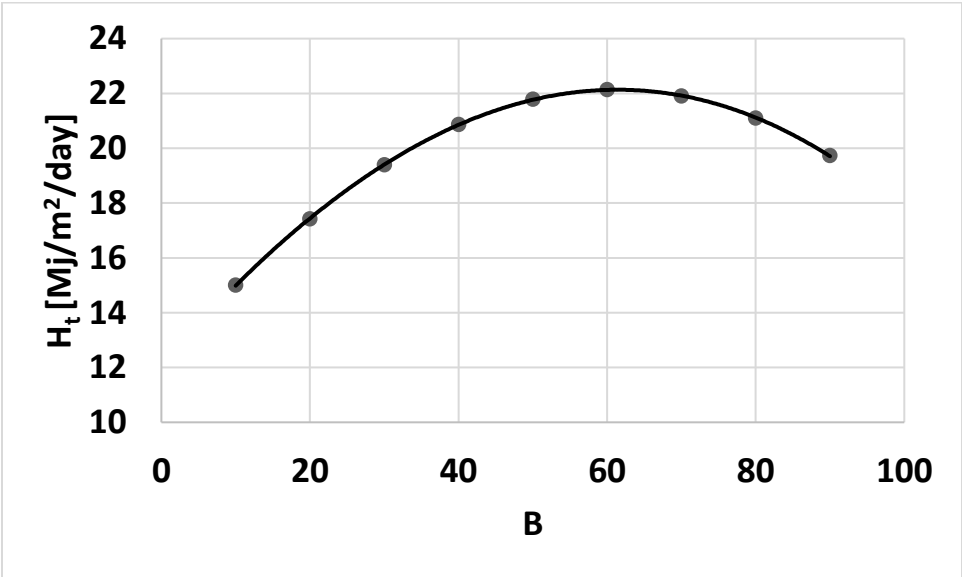
$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_t}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right)\bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_G\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad (32-3)$$

نلاحظ أن المتغير الوحيد من العلاقة السابقة هي الزاوية $\beta$ وبالتالي قمنا بدراسة تغير المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل خلال شهر حزيران (فصل الصيف) عند قيم مختلفة لزاوية ميلان المجمع الشمسي كما في الشكل(3−4)




**الشكل (3–4) تغير المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل عند قيم مختلفة لزاوية ميلان المجمع الشمسي خلال فصل الصيف**

نلاحظ من الشكل(3–4) أن متوسط شدة الإشعاع الشمسي يتناقص مع ازدياد زاوية ميلان المجمع الشمسي، وأن أعلى قيمة يأخذها هي عند الزاوية °10 وبالتالي سيتم تصميم حقل المجمعات الشمسية صيفاً عند الزاوية°10 أما شتاءً فقمنا بدراسة تغير متوسط شدة الإشعاع الشمسي الوارد على سطح مائل خلال شهر كانون الأول (فصل الشتاء) كما في الشكل(3–5)




**الشكل (3–5) تغير المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل عند قيم مختلفة لزاوية ميلان المجمع الشمسي خلال فصل الشتاء**

حيث نلاحظ أن متوسط شدة الإشعاع الشمسية تزداد بشكل كبير في البداية مع ازدياد زاوية الميلان، لتتناقص القيمة تدريجياً حتى تصل إلى نقطة تقعر، لتتناقص قيمتها بعدها حيث نلاحظ أن أعلى قيمة يبلغها المتوسط هي عند نقطة التقعر التي تبلغ عندها زاوية الميلان $50°$ والتي سنعتمد هذه القيمة خلال فصل الشتاء.

### 3-9-2 طريقة $\overline{\emptyset}, f\ chart$ [14] [19]

بعد تحديد زاوية الميلان المناسبة للمجمعات الشمسية، سنقوم الآن بتحديد مساحة المجمعات وفق طريقة $\overline{\emptyset}, f\ chart$ وذلك بحساب معامل الفائدة الشمسية عند قيم مختلفة لمساحة المجمعات الشمسة والتي تعطى بالمعادلة (3-33):

$$f = \overline{\emptyset}_{max} Y - 0.015\,[\exp(3.85f) - 1]\,[\,1 - \exp(-0.15X')]\ R_s^{0.76} \qquad (33-3)$$

حيث $R_s$ نسبة السعة الحرارية القياسية للتخزين لكل وحدة من مساحة المجمع وتقدر $350\left[\frac{kJ}{m^2\,°C}\right]$ إلى سعة التخزين الفعلية وتعطى بالمعادلة (3-34):

$$R_s = \frac{350}{\frac{M\,c_p}{A_c}} \qquad (34-3)$$

$M\ [kg]$ كتلة وسيط التخزين

نلاحظ من معادلة f أنها تحتوي على قيم لا بعدية $X'\ ,\ Y$ ويتم حسابها من العلاقات التالية, والتي تم تطويرها من قبل Klein and Beckman عند مساحات مختلفة لحقل المجمعات الشمسية وحجوم مختلفة للخزان الحراري، يتم حساب Y من المعادلة (3-35):

$$Y = \frac{A_c\,F_R\,(\overline{\tau\,\alpha})N\,\bar{H}_t}{L} \qquad (35-3)$$

ويتم حساب $X'$ من المعادلة (3-36):

$$X' = \frac{A_c\,F_R\,U_L\,(100)\,\Delta t}{L} \qquad (36-3)$$

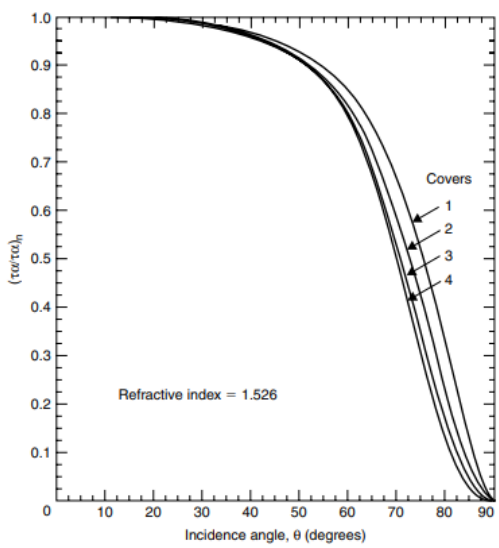
حيث $\overline{\tau\,\alpha}$ المتوسط الشهري لجداء نفاذية الغطاء الزجاجي بامتصاصية السطح الماص ويتم حسابها من المعادلة (3-37):

$$\overline{\tau\,\alpha} = \frac{\bar{S}}{\bar{H}_t} \qquad (37-3)$$

حيث إن $\bar{S}$ المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الممتص من قبل المجمعات الشمسية ويعطى بالمعادلة (38−3):

$$\bar{S} = \bar{H}_b \bar{R}_b (\overline{\tau\,\alpha})_b + \bar{H}_d (\overline{\tau\,\alpha})_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \bar{H}\,\rho_G\,(\overline{\tau\,\alpha})_G \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad (38-3)$$

يتم تحديد قيم $(\overline{\tau\,\alpha})_b$ $(\overline{\tau\,\alpha})_d$ $(\overline{\tau\,\alpha})_G$ (المتوسط الشهري لمركبة الإشعاع المباشر, والمنتشر, والكلي لجداء نفاذية الغطاء الزجاجي بامتصاصية السطح الماص) من الأشكال التالية بدلالة زاوية الورود حيث نلاحظ أنه نحصل من الشكل(6−3) على قيم $\frac{(\overline{\tau\,\alpha})_B}{(\tau\,\alpha)_n}$ $\frac{(\overline{\tau\,\alpha})_D (\overline{\tau\,\alpha})_G}{(\tau\,\alpha)_n (\tau\,\alpha)_n}$




**الشكل (3−6) المتوسط الشهري لمركبة الإشعاع المباشر والمنتشر والكلي لجداء نفاذية الغطاء الزجاجي بامتصاصية السطح الماص**

ويتم حساب زاوية الورود للإشعاع المنتشر والكلي من المعادلة (39−3)(40−3) بدلالة ميلان المجمع الشمسي:

$$\emptyset_d = 59.68 - 0.1388\,\beta + 0.001497\,\beta^2 \qquad (39-3)$$

$$\emptyset_G = 90 - 0.5788\,\beta + 0.002693\,\beta^2 \qquad (40-3)$$

ويتم حساب قيم $\bar{H}_b$ $\bar{H}_d$ من المعادلات (41−3)(42−3)

$$\bar{H}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\,\bar{H} \qquad (41-3)$$

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \qquad (42-3)$$

يتم حساب المعامل $\bar{\emptyset}_{max}$ من المعادلة (43-3)

$$\bar{\emptyset}_{max} = \exp\left[\left(A + B\ \frac{R_n}{\bar{R}}\right)(\bar{X}_c + C\bar{X}_c^2)\right] \qquad (43-3)$$

يتم حساب الثوابت $A, B, C$ من المعادلات (44-3) (45-3) (46-3)

$$A = 2.943 - 9.271\ \bar{K}_t + 4.031\ \bar{K}_t^2 \qquad (44-3)$$

$$B = -4.345 + 8.853\ \bar{K}_t - 3.602\ \bar{K}_t^2 \qquad (45-3)$$

$$A = -0.17 - 0.306\ \bar{K}_t + 2.936\ \bar{K}_t^2 \qquad (46-3)$$

يتم حساب المعامل $\bar{X}_c$ من المعادلة (47-3)

$$\bar{X}_c = \frac{\frac{F_R U_L (T_{min} - Ta)}{F_R\ (\tau\ \alpha)}}{r_n\ R_n\ \bar{K}_t\ \bar{H}_o} \qquad (47-3)$$

حيث إن $R_n$ نسبة المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الوارد على سطح مائل عند الظهر الشمسي إلى المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الوارد على سطح أفقي, ويتم حسابها من المعادلة (48-3)

$$R_n = \left[1 - \frac{r_{d,n}}{r_n}\ \frac{H_d}{H}\right] R_{B,n} + \frac{r_{d,n}}{r_n}\ \frac{H_d}{H}\left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) + \rho_G\left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \qquad (48-3)$$

حيث $r_n$ نسبة الإشعاع الشمسي الساعي الكلي إلى إجمالي الإشعاع اليومي, وتعطى بالمعادلة (49-3)

$$r_n = \frac{\pi}{24}\ [a + B\ cosh]\frac{cosh - \cos h_s}{\sin h_s - \frac{2\pi h_s}{360}\cos h_s} \qquad (49-3)$$

ويتم حساب الثوابت a,b من المعادلات (50-3) (51-3)

$$\mathrm{a} = 0.409 + 0.5016 \sin\ (h_s - 60) \qquad (50-3)$$

$$\mathrm{b} = 0.6609 - 0.4767 \sin\ (h_s - 60) \qquad (51-3)$$

ويتم حساب $r_d$ النسبة بين الإشعاع الشمسي الساعي المنتشر إلى إجمالي الإشعاع اليومي من المعادلة (52-3)

$$r_n = \frac{\pi}{24}\ \frac{cosh - \cos h_s}{\sin h_s - \frac{2\pi h_s}{360}\cos h_s} \qquad (52-3)$$

ويتم حساب النسبة $\frac{H_d}{H}$ النسبة بين الإشعاع الشمسي المنتشر إلى الإشعاع الشمسي الكلي, ويتم حسابها من المعادلات (3−53) (3−54) (3−55) (3−56)

$for\ h_s \leq 81.4°$

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 0.2727\ k_t + 2.449\ k_t^2 - 11.95\ k_t^3 + 9.3878\ k_t^4 \qquad \boldsymbol{for}\ K_t < 0.715 \quad (53-3)$$

$$\frac{H_d}{H} = 0.143 \qquad \boldsymbol{for}\ K_t \geq 0.715 \quad (54-3)$$

$for\ h_s > 81.4°$

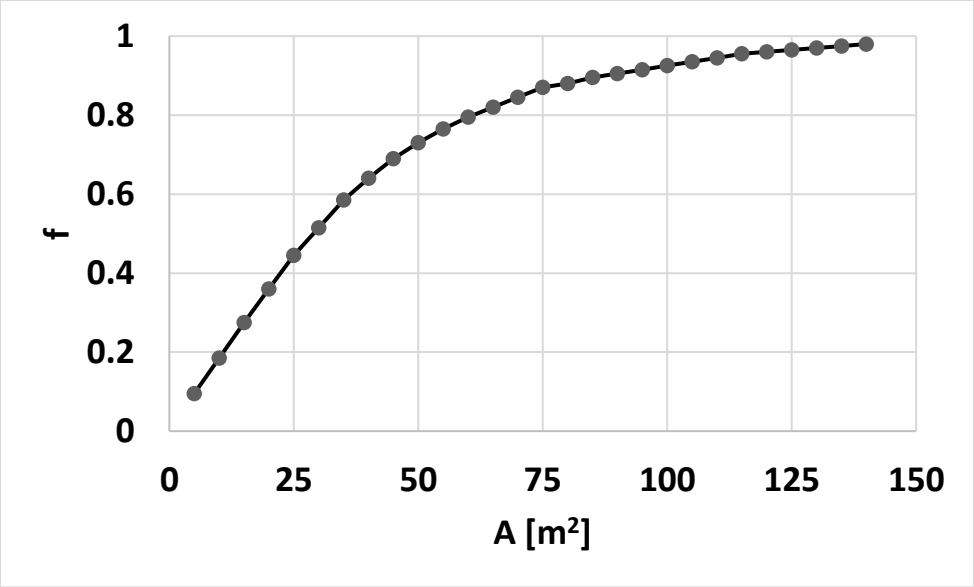
$$\frac{H_d}{H} = 1 + 0.2832\ k_t - 2.5557\ k_t^2 + 0.8448\ k_t^3 \qquad \boldsymbol{for}\ K_t < 0.715 \quad (55-3)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1 + 0.2832\ k_t - 2.5557\ k_t^2 + 0.8448\ k_t^3 \qquad \boldsymbol{for}\ K_t \geq 0.715 \quad (56-3)$$

ويتم حساب $R_{b,n}$ نسبة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح مائل عند الظهر الشمسي إلى شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد على سطح أفقي، ويتم حسابها من المعادلة (3−57)

$$R_{b,n} = \frac{\sin(\theta-\beta)sin\delta + \cos(\theta-\beta)cos\delta\ cosh}{\sin\theta sin\delta + \cos\theta cos\delta\ cosh} \qquad (57-3)$$

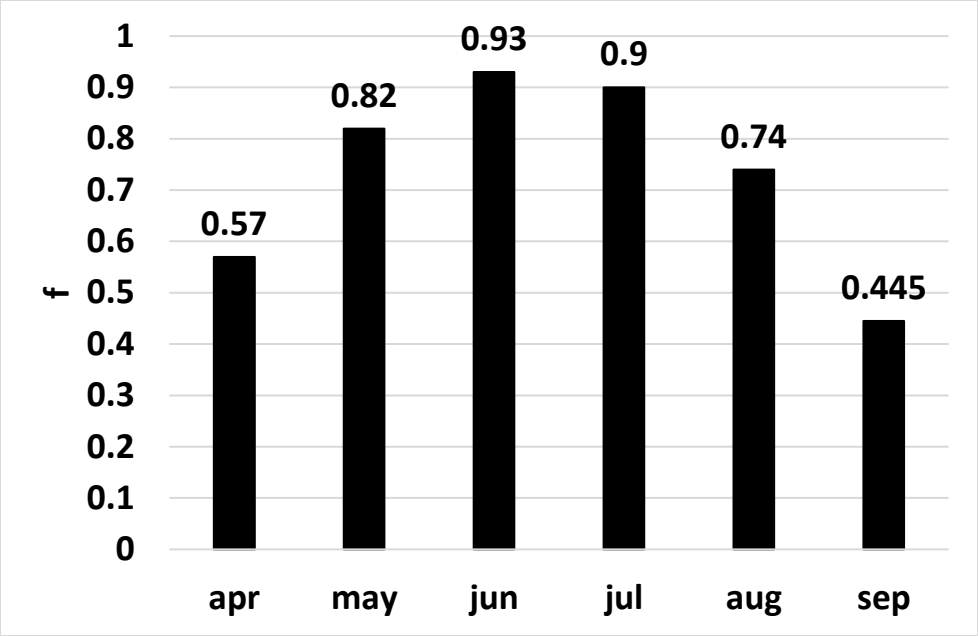
نكرر حل العلاقات السابقة عند قيم مختلفة لمساحة المجمعات الشمسية, وبالتالي دراسة تغير معامل الفائدة الشمسية f عند مساحات مختلفة كما في الشكل (3−7)




**الشكل (3−7) تغير معامل الفائدة الشمسية f عند مساحات مختلفة**

نلاحظ من الشكل السابق أن معامل الفائدة الشمسية يزداد بشكل أسي في البداية مع ازدياد مساحة حقل المجمعات الشمسية، أي بازدياد مساحة المجمعات الشمسية من القيمة $5\ [m^2]$ إلى القيمة $100\ [m^2]$ فإن معامل الفائدة الشمسية يزداد بنسبة $89.7\%$ ليتناقص بعدها هذا الازدياد بشكل تدريجي عند القيمة $A = 100\ [m^2]$ ليصبح التغير في معامل الفائدة الشمسية طفيفاً جداً، وبالتالي لا فائدة عندها من ازدياد مساحة حقل المجمعات الشمسية الذي ينعكس سلباً على ازدياد معدل الضياع الحراري والعامل الاقتصادي أيضاً، وبالتالي فإن القيمة التصميمية لمساحة المجمعات الشمسية $A = 100\ [m^2]$ والمحققة للقيمة f=0.925

بحساب قيمة معامل الفائدة الشمسية خلال فصل الصيف من شهر نيسان حتى شهر أيلول كما في الشكل(3−8) نلاحظ أن أعلى قيمة لمعامل الفائدة الشمسية في شهر حزيران $0.93$ نتيجة أن قيمة شدة الإشعاع الشمسية في هذا الشهر أكبر من باقي أشهر السنة، ويليها شهر تموز، وأقل قيمة في شهر أيلول حيث تبلغ $0.445$ وبأخذ قيمة وسطية بين قيم معامل الفائدة الشمسية، نجد أن متوسط معامل الفائدة خلال أشهر الصيف $0.734$.




**الشكل (3−8) معامل الفائدة الشمسية خلال فصل الصيف**

## 3−10 أثر التظليل في خرج المجمعات الشمسية

بما أن الإشعاع الشمسي يتغير مع الزمن، لا بد من اختيار قيمة تصميمية ثابتة لإنجاز الحسابات، وقد اخترنا أعظم قيمة للإشعاع الشمسي الوسطي وهي $I_g = 1070\ [W/m^2]$ وذلك تجنباً لتخصيص مساحة كبيرة من الأرض.

خطوات حساب المساحة:

1) نفرض عدد المجمعات المربوطة على التسلسل $N_{set} = 8$

2) حساب معدل الطاقة المفيدة من الوحدة ذات الوصل التسلسلي من العلاقة:

$$\dot{Q}_{u,set} = FR \times A \times \left[I_g \tau\alpha - UL\left(T_{c,i} - T_a\right)\right] \qquad (58-3)$$

$$= 0.79 * 8 * 2 * [0.95 * 0.92 * 1070 - 3.06 * (40 - 32)]$$

$$= 11534.7\ W$$

3) حساب تدفق الوسيط الناقل للحرارة

صُمّم التدفق عند الإشعاع الشمسي الأعظمي ودرجة الحرارة الموصولة من المجموعة الموصولة على التسلسل الأعظمية أي درجة الحرارة المطلوب تأمينها من المجمعات الشمسية لوعاء الفصل

$T_{cout} = 158$ [°C] وتم افتراض أن درجة حرارة الدخول للوسيط الناقل للحرارة $T_{cin} = 40$ [°C]

وبالتالي تم حساب معدل التدفق من علاقة الطاقة المفيدة المنسوبة لخصائص المائع:

$$\dot{m} = \frac{Q_{u,set,max}}{C_p(T_{cout,max} - T_{cin})} = \frac{11534.7}{4334 * (158 - 40)} = 0.0225 \left[\frac{kg}{sec}\right]$$

4) حساب عدد الوحدات الموصولة على التفرع

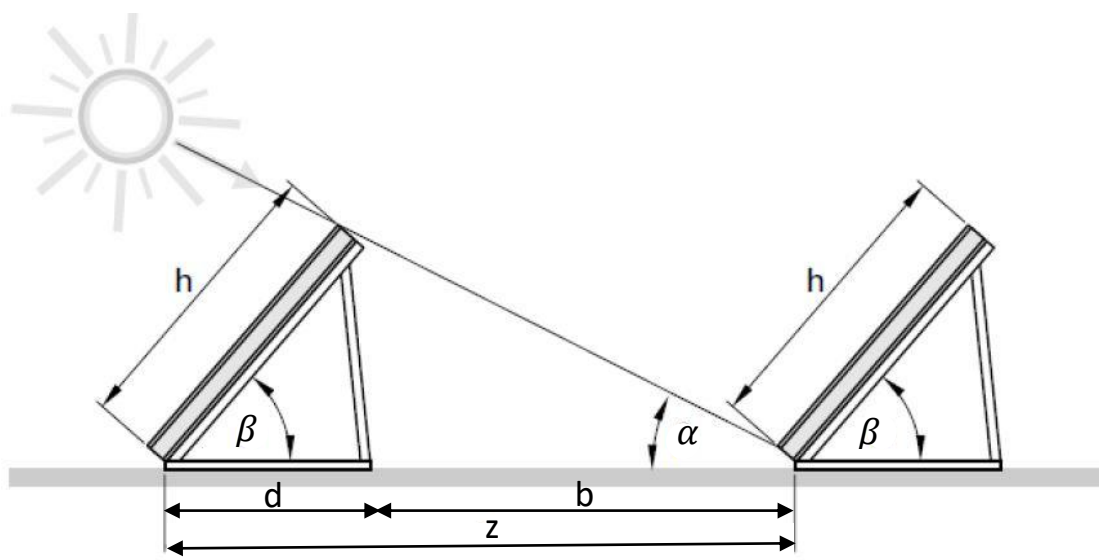
يتم حسابها من العلاقة:

$$N_{par} = \frac{A_{cal}}{A_{set}} = \frac{100}{8 * 2} = 6.25$$

ولحساب مساحة الأرض التي نحتاجها لتركيب حقل المجمعات الشمسية، يجب الأخذ بالحسبان التظليل الحاصل نتيجة تموضع المجمعات الشمسية خلف بعضها البعض، وذلك للاستفادة قدر الإمكان من كامل الطاقة المفيدة للحقل.

والشكل(3−9) يبين الموضع المناسب للمجمعات الشمسية وذلك لتجنب أثر التظليل حيث نلاحظ أن:

$$d = h \times \cos\beta = 1.64 * \cos 10 = 1.615\ [m]$$
$$a = h \times \sin\beta = 1.64 * \sin 10 = 0.285\ [m]$$
$$\beta = 90 - \varphi - 23.5 = 33.01°$$
$$b = \frac{a}{Tan\ \alpha} = \frac{0.285}{Tan\ (33.01)} = 0.44\ [m]$$
$$z = d + b = 1.615 + 0.44 = 2.053\ [m]$$




**الشكل(3−9) أثر التظليل**

فتكون مساحة الأرض اللازمة للمجمعات الموصولة على التسلسل:

$$A_{set} = z \times N_{set} \times W = 22.834\ [m^2]$$

وبالتالي تكون مساحة الأرض اللازمة لحقل المجمعات الشمسية:

$$A_{land} = N_{par} \times A_{set} = 159.84\ [m^2]$$

فتكون نسبة مساحة المجمعات إلى مساحة الأرض التي تشغلها:

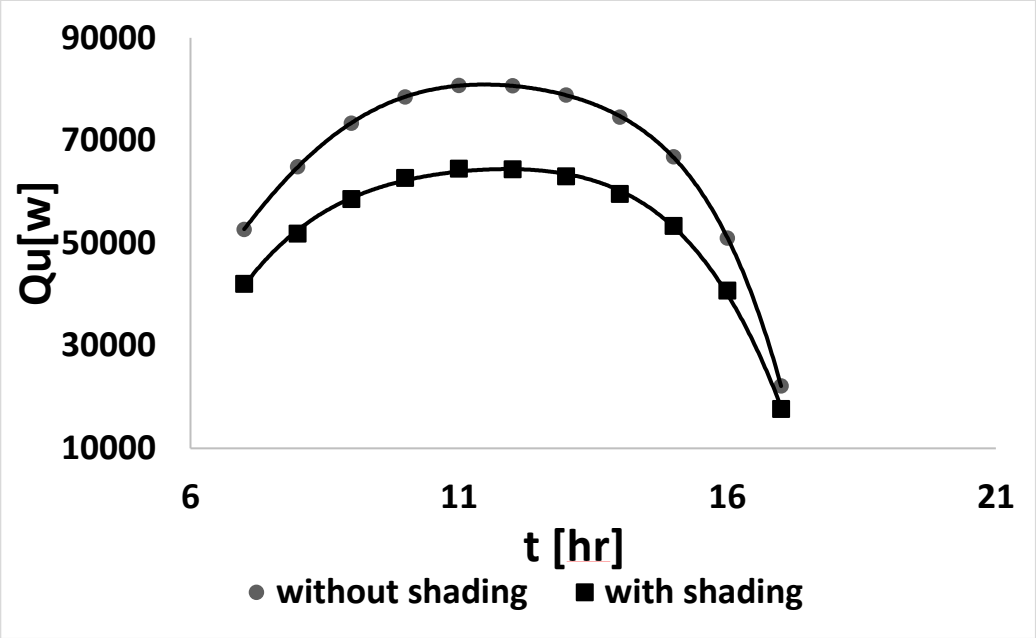
$$\frac{A_{study}}{A_{land}} = 0.798$$

5) حساب معدل الطاقة المفيدة لحقل المجمعات الشمسية وبيان أثر التظليل

يتم حساب معدل الطاقة المفيدة لحقل المجمعات الشمسية من علاقة الطاقة المفيدة المنسوبة لخصائص المجمع الشمسي, والتي تعطى بالشكل:

$$\mathrm{Q_u} = A * FR * \left(\tau\alpha\, I_G - U_L(T_{cin} - T_a)\right) \qquad (59-3)$$

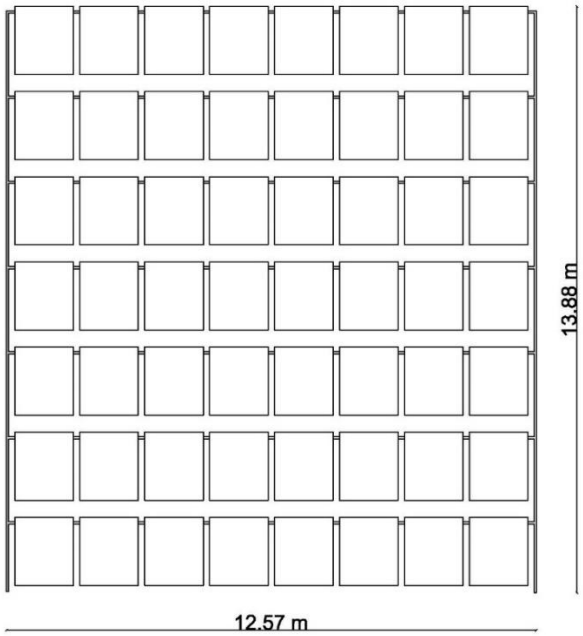
وبالنتيجة نلاحظ أن خرج المجمعات الشمسية يتناقص بمقدار 20% في حال عدم الأخذ بعين الاعتبار أثر التظليل، كما نلاحظ من الشكل (3−10) والذي يوضح مقارنة بين خرج المجمعات الشمسية بوجود تظليل كما في المؤشر المربع، وعدم وجود تظليل كما في المؤشر الدائري. حيث نلاحظ أنه عند الساعة 12 أن خرج المجمعات الشمسية عند عدم وجود التظليل $80000\ [W]$ أما عند وجود تظليل $65000\ [W]$ وبالتالي يجب توزيع حقل المجمعات الشمسية بصورة صحيحة نضمن خلالها عدم وجود تظليل في الحقل لضمان الاستفادة القصوى من الطاقة المفيدة.




**الشكل(3−10) مقارنة بين خرج المجمعات الشمسية بوجود وعدم وجود تظليل**

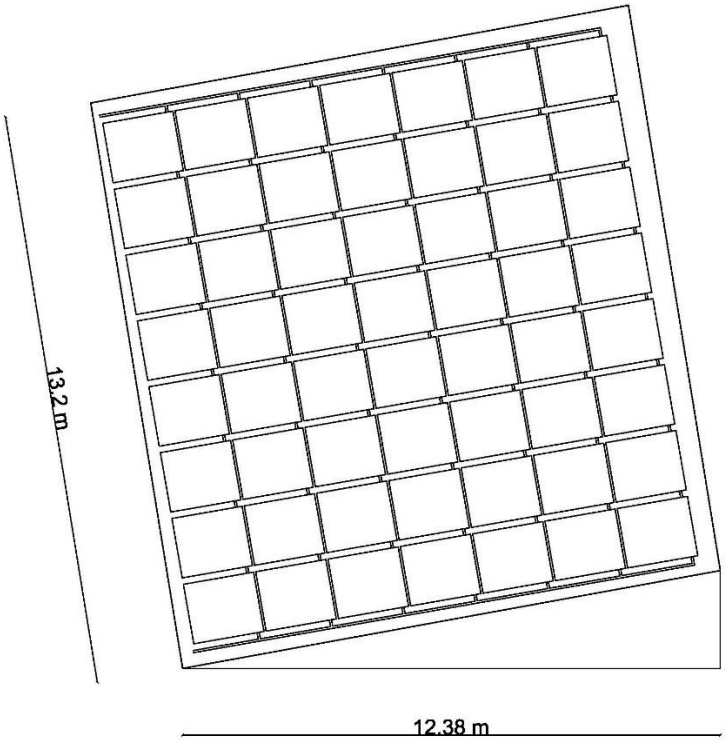
6) توزع حقل المجمعات الشمسية

كما ذكرنا سابقاً فإن عدد المجمعات الشمسية الموصولة على التسلسل 8 وعدد الوحدات التفرعية 7, وبالتالي فإن عدد المجمعات الشمسية الكلية 56 مجمعاً موصولة كما في الشكل (3−11) حيث نلاحظ أن مساحة الأرض الفعلية بعد إضافة الوصلات بين المجمعات $174.47\ [m^2]$




**الشكل(3−11) توزع حقل المجمعات الشمسية**

وهناك عدة مقترحات لتوزع الحقل، منها الاستفادة من مساحة الأرض الزراعية الموجودة في جوار الفيلا المدروسة، وفي حال عدم الرغبة في خسارة المساحة المزروعة يتم استخدام قواعد معدنية مرفوعة عن الأرض، وتحتوي على فتحات من الأعلى لضمان عبور أشعة الشمس إلى الأرض، ويتم تثبيت المجمعات عليها. وفي حالة عدم توفر مساحة مناسبة يتم تركيب المجمعات على سقف الموقع (وبهذه الحالة يجب التنسيق مع المهندس المعماري لتصميم السقف بزاوية ميلان مناسبة للمجمعات الشمسية) وبهذه الحال يتم توفير مساحة كبيرة من الحقل دون أي خسارة للطاقة المفيدة. كما في الشكل (3−12) حيث نلاحظ أن النسبة ستنخفض إلى القيمة $163.4\ [m^2]$ وبالتالي فإن نسبة التوفير في المساحة $7\%$




**الشكل(3−12) توزع حقل المجمعات الشمسية على وتر مثلث – المسقط الجانبي لهيكل معدني**

# الفصل الرابع

## الخزان الحراري

# الفصل الرابع: الخزان الحراري

## المخطط الانسيابي للفصل:

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. وظائف الخزان في المنظومة الشمسية الحرارية.
3. حساب حجم الخزان (خزان المزج الكامل).
4. تغير درجة حرارة الخزان الحراري.

## 4-1 مقدمة

إن شدة الإشعاع الشمسي – كما نعلم– خلال ساعات النهار ليست ثابتة، وبالتالي فإن مخرجات جميع التطبيقات الشمسية الحرارية غير ثابتة، والذي يؤثر سلباً في أداء المنظومة التي تتطلب ثباتاً في الخرج الحراري؛ لذلك يجب أن يرافق أي منظومة شمسية حرارية خزان حراري, والذي يشكل قلب المنظومة، وتكمن مهمته في تأمين الحمل الحراري في أوقات عجز المنظومة الشمسية عن تأمينه، ومن جهة أخرى تأمين مصدر طاقي ثابت.

يوجد نوعان أساسيان للتخزين الحراري:

- ❖ التخزين المحسوس (Sensible storage) وفيه تتغير درجة حرارة وسيط التخزين مع بقاء حالته الطورية ثابتة.
- ❖ التخزين الكامن (Latent storage) وفيه يتغير طور مادة التخزين عند درجة حرارة ثابتة.

وفي فصلنا هذا سندرس الأداء الحراري للتخزين المحسوس ذو المزج الكامل للمنظومة الشمسية، والتي تغذي دارة تبريد امتصاصية مضاعفة التأثير.

### 4-1 وظائف الخزان في المنظومة الشمسية الحرارية

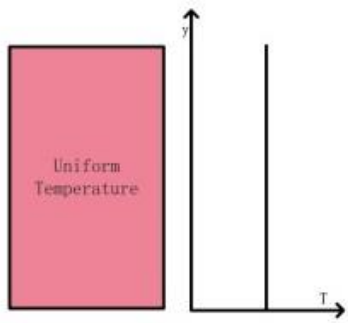
يجب على خزان الحرارة في المنظومات الشمسية أن يقوم بوظائف عديدة مهمة تتمحور بشكل أساسي على خاصية الإشعاع الشمسي المتغير زمنياً لموقع جغرافي محدد. فيما يلي هذه الوظائف:

1. تأمين طاقة كافية للحمل الحراري عند درجة حرارة وتدفق مستقرين زمنياً.
2. الفصل بين التدفق الكتلي لدارة الحمل الحراري ولدارة المجمعات الشمسية.

3. تخزين الطاقة الفائضة من المجمعات الشمسية من أوقات الفائض إلى أوقات الحاجة إليها.
4. المحافظة على التطبيق الحراري ومنع المزج وبالتالي تجنب ضياعات الإكسيرجي.
5. تقليل الطاقة اللازمة من المسخن المساعد التقليدي.

## 4−2 حساب حجم الخزان (خزان المزج الكامل) [15]

في هذا النوع من التخزين يستقبل الخزان تدفق وسيط دارة الشحن خلال زمن معين من المصدر الحراري المتغير مع الزمن، حيث يتم مزج الوسيط الناقل للحرارة مع وسيط التخزين ضمن الخزان الذي يتمتع بدرجة حرارة أولية للوصول إلى درجة حرارة جديدة لوسيط التخزين، ويصبح وسيط التخزين بعد فترة زمنية معينة ذا درجة حرارة واحدة متجانسة على طول الخزان كما في الشكل(4−1).




(c) the fully-mixed tank

**الشكل(4−1) خزان المزج الكامل.**

تتعلق عملية المزج في الخزان بعدة عوامل, وهي:

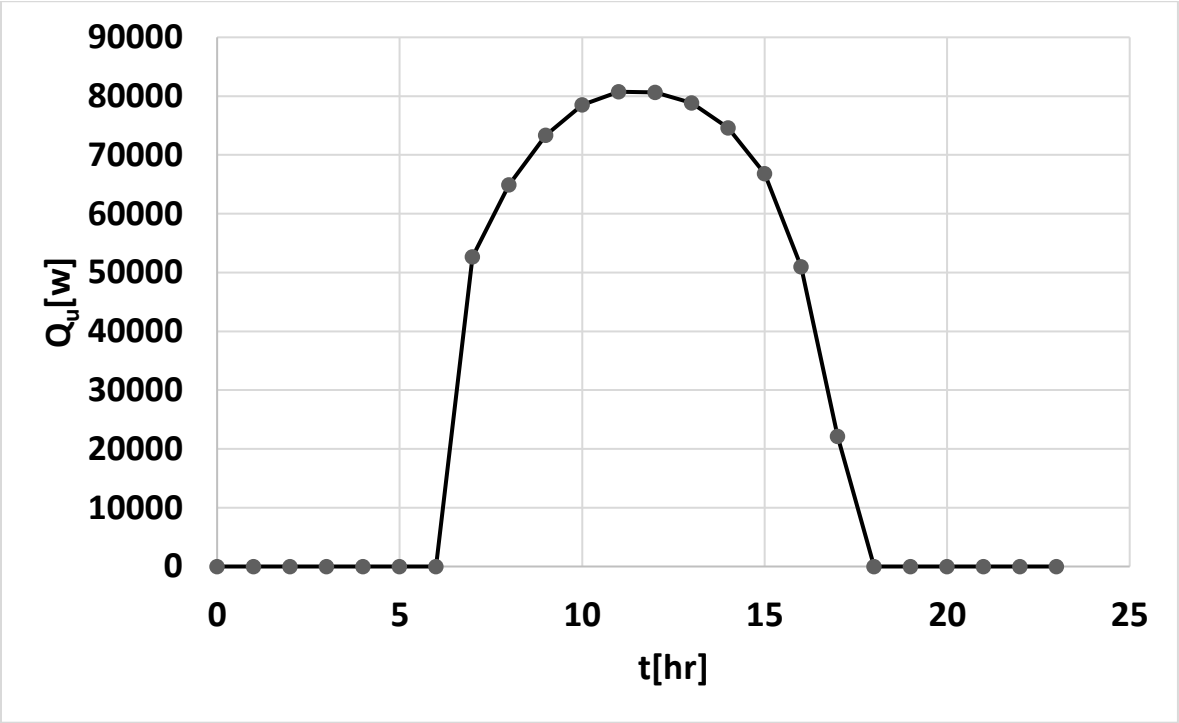
- طريقة شحن الخزان.
- تدفق الوسيط الناقل للحرارة الداخل إلى الخزان.
- توضع مداخل الشحن والتفريغ (بشكل شاقولي أو أفقي) وأقطارها.

يتم حساب حجم الخزان عددياً وفق طريقة التكامل العددي، بتقسيم المساحة المحصورة أسفل المجمعات الشمسية إلى عدة أشباه منحرفة كما في الشكل(4−2) وبحساب مساحة كل شكل وجمعها مع بعضها إلى بعض نحصل على معدل الربح الحراري مقدراً بالجول كما في المعادلة:

$$\boldsymbol{Q_u} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{Q}_{ui+1} + \dot{Q}_{ui}}{2} \times \Delta \boldsymbol{t} \qquad (1-4)$$

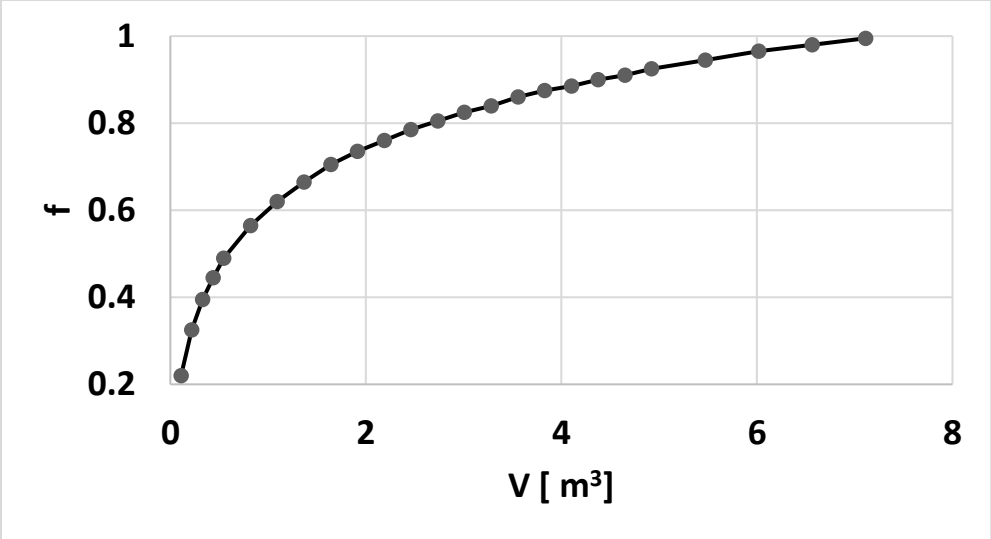
وبتطبيق معادلة الربح الحراري يتم حساب حجم الخزان حيث وجدنا أن حجم الخزان $5.7\ [m^3]$

$$\dot{Q}_u = \rho \times V \times C_P \times \left(T_{c,out,av} - T_{amb,av}\right) \qquad (2-4)$$




**الشكل(4−2) تغير الطاقة المفيدة في الخزان مع تغير الزمن**

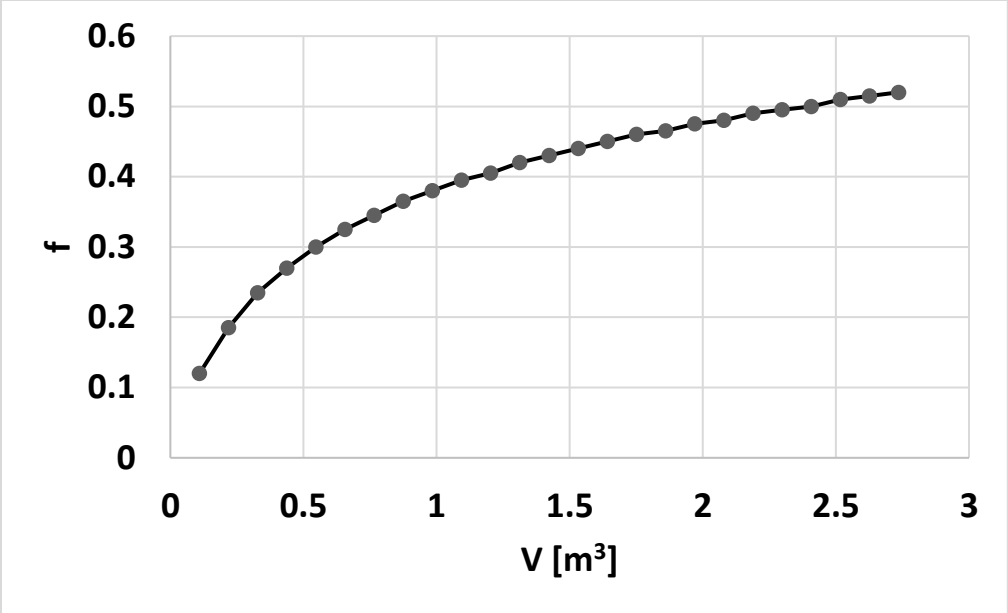
بالاعتماد على طريقة $\overline{\emptyset}, f\ chart$ تم في هذا البحث دراسة حجم الخزان المناسب لعمل المنظومة الحرارية الشمسية، حيث تم دراسة تغير معامل الفائدة الشمسية f عند قيم مختلفة لحجم الخزان الحراري كما في الشكل(4−3) [15]




**الشكل(4−3) تغير معامل الفائدة الشمسية مع تغير حجم الخزان خلال فصل الصيف**

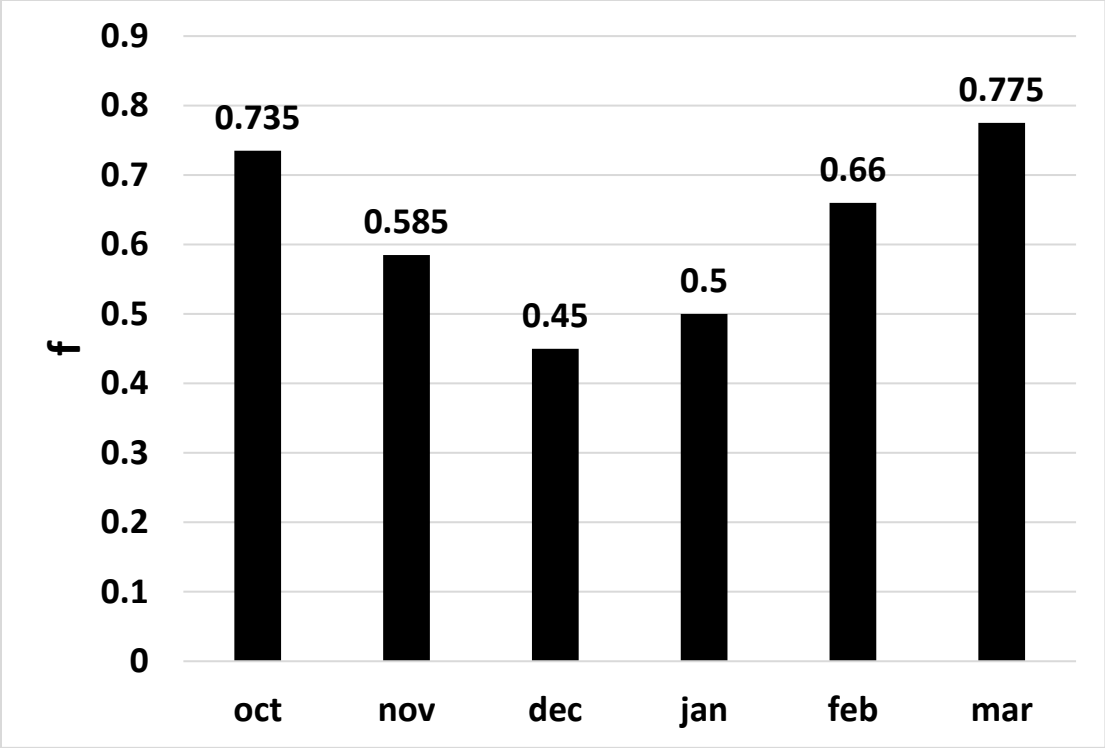
نلاحظ من الشكل السابق، أن معامل الفائدة الشمسية يزداد بشكل أسي كبير في البداية مع ازدياد الحجم للقيمة $5\ [m^3]$ التي يبدأ عندها المعامل بالتناقص تدريجياً وفق تغيرات صغيرة، وبالتالي لا فائدة من ازدياد حجم الخزان الحراري بعد هذه القيمة. ومنه سيتم اعتماد القيمة التصميمية للحجم خلال فصل الصيف $5\ [m^3]$ وتكون قيمة معامل الفائدة عندها $0.92$

باستخدام المنظومة نفسها لتغطية الحمل الحراري شتاءً نلاحظ –وكما في الشكل (4−4)– أن معامل الفائدة الشمسية يزداد بشكل أسي كبير في البداية مع ازدياد الحجم للقيمة $1.6\ [m^3]$ التي يبدأ عندها المعامل بالتناقص تدريجياً وفق تغيرات صغيرة، وبالتالي لا فائدة من ازدياد حجم الخزان الحراري بعد هذه القيمة، ومنه سيتم اعتماد القيمة التصميمية للحجم خلال فصل الشتاء $1.6\ [m^3]$ وتكون قيمة معامل الفائدة عندها $0.44$




**الشكل(4−4) تغير معامل الفائدة الشمسية مع تغير حجم الخزان خلال فصل الشتاء**

وبمقارنة قيم معامل الفائدة الشمسية خلال أشهر التدفئة من شهر تشرين الأول وحتى شهر آذار كما في الشكل(4−5)، نلاحظ أن أعلى قيمة لمعامل الفائدة الشمسية في شهر آذار 0.775 ويليها شهر تشرين الأول بقيمة 0.735 وأقل قيمة في شهر كانون الأول بقيمة 0.45 وبأخذ قيمة وسطية بين قيم معامل الفائدة الشمسية نجد أن متوسط معامل الفائدة خلال أشهر الشتاء 0.61 وبالتالي –وبهذه الطريقة– تم استثمار المنظومة طول أيام السنة مما يزيد من كفاءة استخدامها.




**الشكل(4-5) مقارنة قيم معامل الفائدة الشمسية خلال أشهر الشتاء**

### 4-3 تغير درجة حرارة الخزان الحراري – حالة المزج الكامل

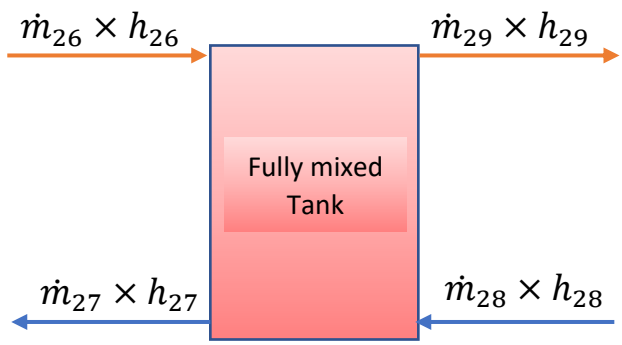
بعد حساب حجم الخزان، يتم الآن حساب درجة حرارة وسيط التخزين الحراري داخل الخزان كمتغير مع الزمن، لمعرفة مدة قدرة منظومة المجمعات الشمسية على تأمين درجة حرارة مستقرة إلى دارة التبريد الامتصاصية، وذلك انطلاقاً من القانون الأول في الترموديناميك (مجموع أشكال الطاقة الداخلة إلى الخزان الحراري – مجموع أشكال الطاقة الخارجة من الخزان الحراري = التغير الكلي في الطاقة الداخلية للخزان الحراري) وذلك باعتبار الجملة الترموديناميكية هي وسيط التخزين الحراري داخل الخزان، وكونه يوجد اختراق كتلي للخزان فيعتبر بذلك جملة مفتوحة.

حالة المزج الكامل تعني أن درجة الحرارة في أي نقطة من الخزان متساوية فيما بينها، ويتم حساب درجة حرارة الخزان بحالة المزج الكامل انطلاقا من القانون الأول في التيرموديناميك

$$\sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E \qquad (3-4)$$

وباعتبار أن الخزان الحراري ساكن؛ أي أن الطاقة الحركية للخزان معدومة, وباعتبار مركز الخزان هي نقطة انطلاق فإن الطاقة الكامنة معدومة وبالتالي

$$\sum E_{in} - \sum E_{out} = \frac{\Delta U}{\Delta t} \qquad (4-4)$$




**الشكل(4-6) التدفقات الطاقية والكتلية لخزان المزج الكامل**

$$\dot{m}_{26} \times h_{26} + \dot{m}_{28} \times h_{28} - \dot{m}_{27} \times h_{27} - \dot{m}_{29} \times h_{29} - \dot{Q}_{loss} = \frac{1}{\Delta t} \times (m \times c_p \times \Delta T)$$

وباعتبار $\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27}$ وأن $\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$ وأن الضياع الحراري في الخزان يعطى بالعلاقة

$$\dot{Q}_{loss} = U_t \times A \times (T_{tf} - T_a) \qquad (5-4)$$

$$\dot{m}_{26} \times (h_{26} - h_{27}) + \dot{m}_{28} \times (h_{28} - h_{29}) - U_t \times A \times (T_{ti} - T_a) = \frac{1}{\Delta t} \times \left(m_t \times c_p \times \left(T_{tf} - T_{ti}\right)\right)$$

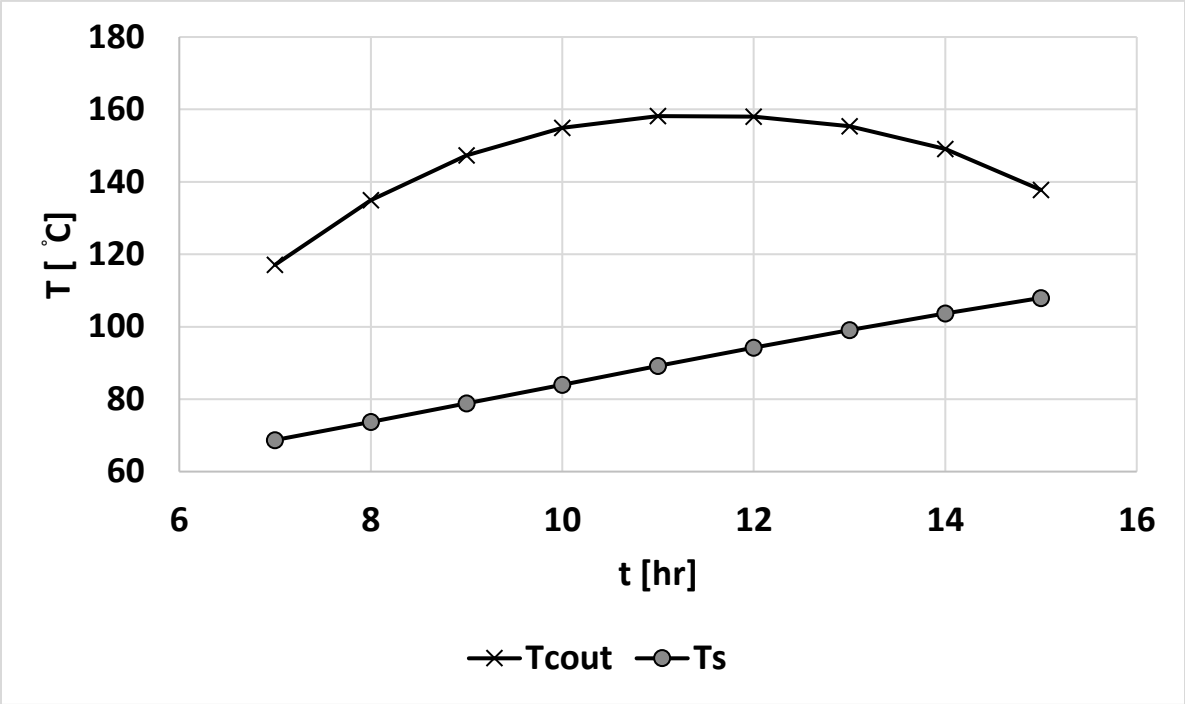
$$T_{tf} - T_{ti} = \frac{\Delta t}{m_t \times c_p} \times \left(\dot{m}_{26} \times (h_{26} - h_{27}) + \dot{m}_{28} \times (h_{28} - h_{29}) - U_t \times A \times (T_{ti} - T_a)\right)$$

$$T_{tf} = T_{ti} + \frac{\Delta t}{m_t \times c_p} \times \left(\dot{m}_{26} \times (h_{26} - h_{27}) + \dot{m}_{28} \times (h_{28} - h_{29}) - U_t \times A \times (T_{ti} - T_a)\right)$$

(6-4)

بتعويض الثوابت والمتغيرات في المعادلة السابقة، تم حساب تغير درجة حرارة الخزان كمتغير مع الزمن، ومقارنة القيم مع تغير درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة مخرج المجمعات الشمسية كما في

الشكل(4−7)، حيث نلاحظ انهياراً واضحاً في قيم درجة حرارة مخرج المجمعات الشمسية نتيجة مزجها مع وسيط التخزين، ونلاحظ أن درجة حرارة الخزان تزداد بشكل تدريجي مع الزمن، حيث تبلغ أعلى قيمة لها $102\ [°C]$ في حين أنّ أعلى قيمة لدرجة حرارة مخرج المجمعات الشمسية $140\ [°C]$ وهذا الانهيار نتيجة اختيار الخزان الحراري ذي المزج الكامل.

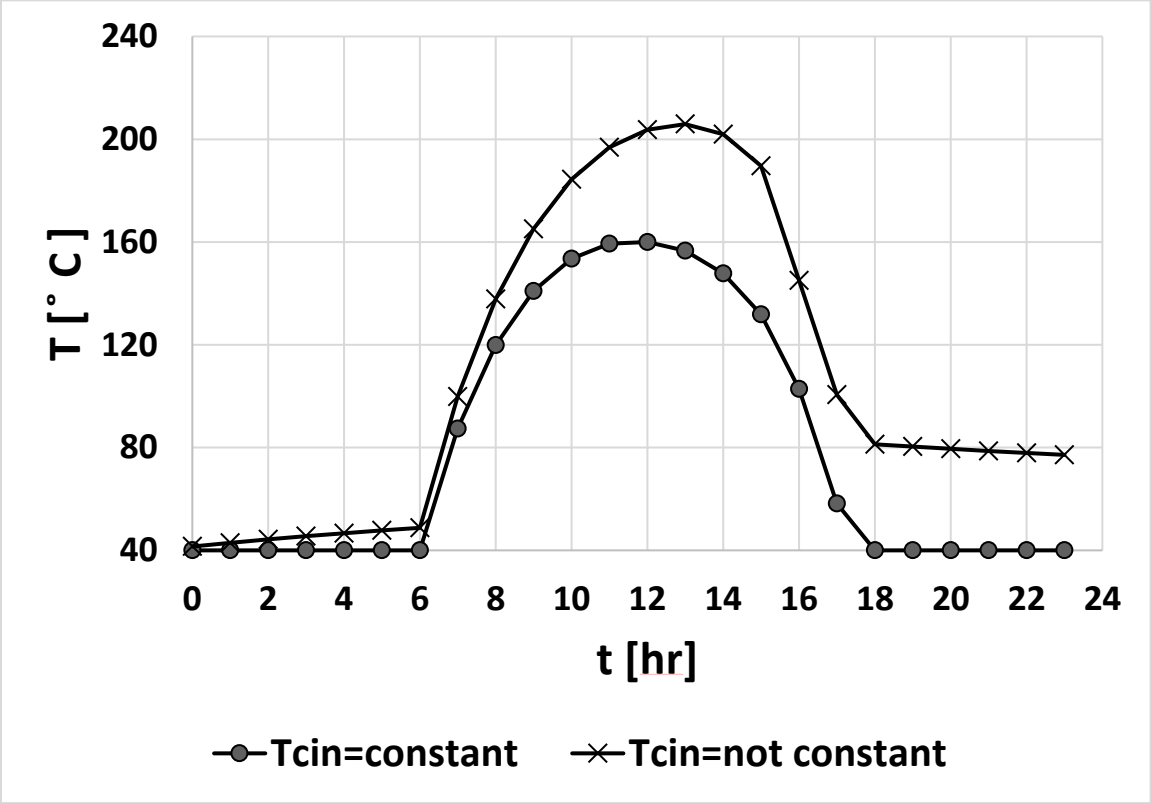



**الشكل(4−7) مقارنة تغير درجة حرارة الوسيط الخارج من المجمعات الشمسية ودرجة حرارة الخزان مع الزمن**

نلاحظ أن درجة حرارة خرج المجمعات قد ارتفعت من درجة حرارة الدخول للخزان عند درجة حرارتها الابتدائية $119\ [°C]$ حتى القيمة الأعظمية $158\ [°C]$ أي بفارق $\Delta T = 39\ [°C]$ بينما ترتفع درجة حرارة الخزان ككل من الدرجة الابتدائية $68\ [°C]$ لتصل إلى $102\ [°C]$ أي بفارق $\Delta T = 34\ [°C]$ وهذا يدل على الانهيار في السوية الطاقية نتيجة المزج الكامل في الخزان.

ولكن هذه النتائج صحيحة في حال كانت درجة حرارة الوسيط الراجع من الخزان الحراري إلى حقل المجمعات الشمسية ثابتة، ولكننا نلاحظ أن هذا الفرض غير صحيح لكون الخزان ممزوجاً بشكل كامل.
وبالتالي فإنّ درجة حرارة العائدة إلى الخزان مساوية لدرجة حرارة الخزان، وبإلغاء هذا الفرض نلاحظ كما في الشكل(4−8) أن درجة حرارة الوسيط الخارج من المجمعات الشمسية تزداد على الحالة القديمة، ونلاحظ أنه

في الفترة الزمنية من الساعة 9 إلى الساعة 4 فإن درجة الحرارة تزداد على درجة الحرارة التصميمية والتي تسبب في غليان الوسيط وخروج الدارة عن العمل.




**الشكل(4−8) مقارنة بين تغير درجة حرارة الوسيط الخارج من المجمعات الشمسية في حال كانت درجة حرارة الدخول ثابتة أم متغيرة**

لحل هذه المشكلة يجب تأمين خزان بدرجة حرارة ثابتة وذلك لتأمين مصدر بدرجة حرارة ثابتة لمدخل حقل المجمعات الشمسية.

# الفصل الخامس

## دراسة التبلور

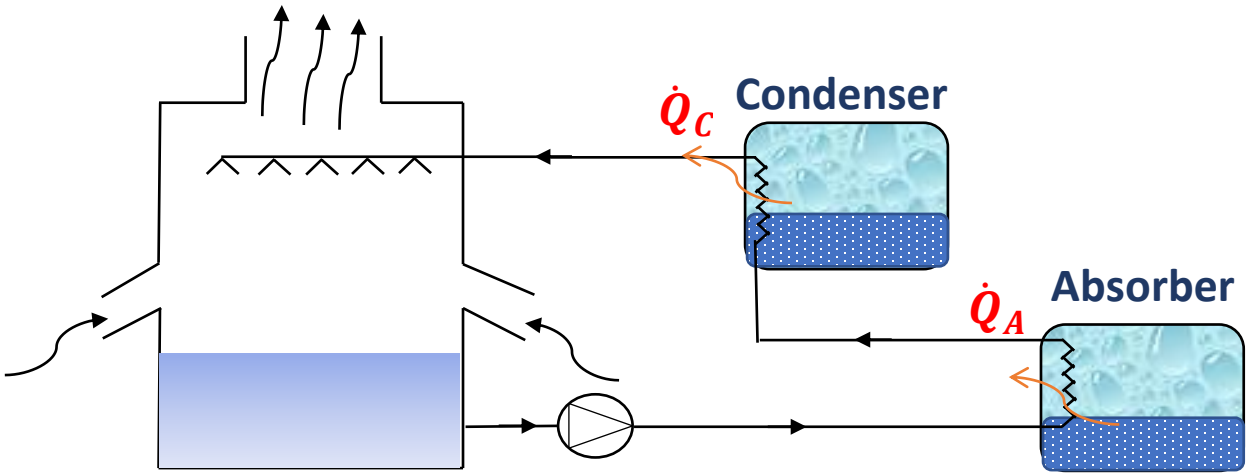
# الفصل الخامس: دراسة التبلور

## المخطط الإنسيابي للفصل:

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. أسباب التبلور والاحتياطات.
3. معالجة مشكلة التبلور.
4. البارامترات الفيزيائية لمحلول بروميد الليثيوم–ماء.

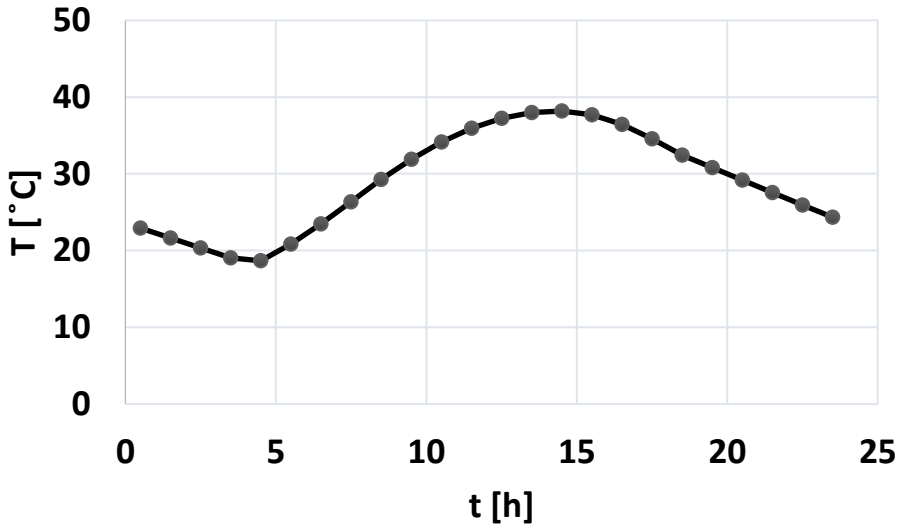
## 5–1 مقدمة

كما ذكرنا في فصل دارة التبريد الامتصاصية فإن المكثف من العناصر الأساسية للدارة، وكما نعلم فإنه يوجد نوعان للمكثف: مائي وهوائي. يعتمد المكثف المائي على درجة حرارة الهواء الرطبة المستقرة مع الزمن، وبالتالي فإنه يفضل استخدامه ترموديناميكية، ولكن بوجود المكثف المائي يتم استخدام برج تبريد تبخيري كما في الشكل (5–1) ومع مرور الزمن يتم هدر كمية مياه بمقدار 10 أطنان خلال ثلاثة شهور, وبالتالي فإنه لا يفضل استخدامه بيئياً.




**الشكل(5–1) برج التبريد التبخيري في دارة التبريد الامتصاصية**

أمّا المكثف الهوائي، فإنه لايحتاج إلى برج التبريد, وبالتالي يمنع الهدر الكبير الحاصل في ماء التغذية، ولكن يعتمد على درجة حرارة الهواء الجافة والمتغيرة مع الزمن كما في الشكل (5−2) والتي تعبر عن تغير درجة حرارة الوسط المحيط الجافة في دمشق خلال شهر حزيران.

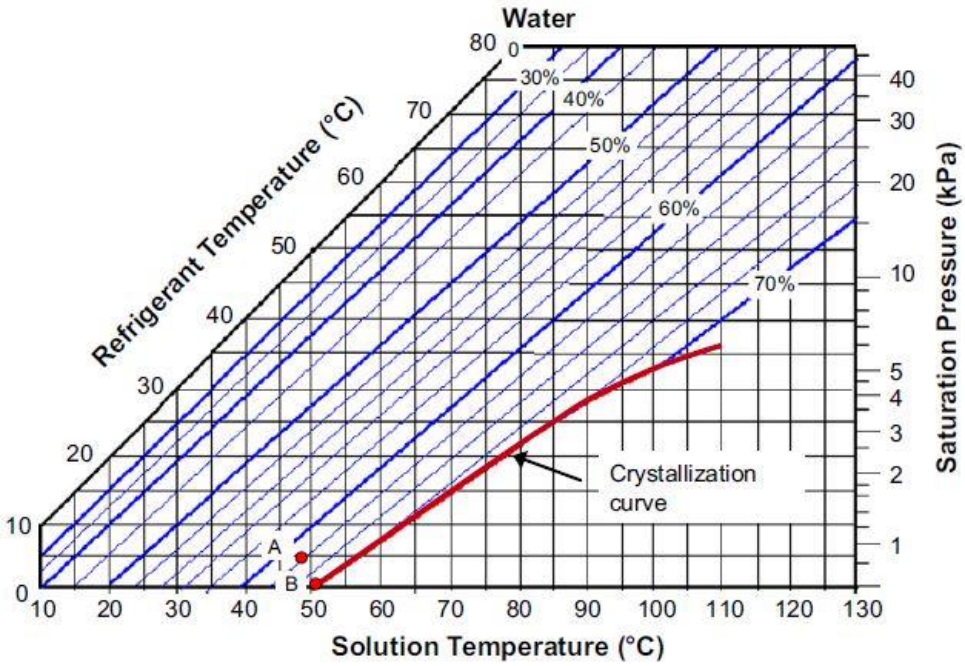



**الشكل(5−2) تغير درجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن في دمشق خلال شهر حزيران**

ولكن لدارة التبريد الامتاصاصية والتي تعمل بمحلول بروميد الليثيوم ماء خصوصية، وهي أن بروميد الليثيوم هو عبارة عن مادة صلبة، وبحالة ارتفاع تركيزه في المحلول يؤدي ذلك إلى تبلور المحلول, وبالتالي خروج الدارة عن العمل. ومن الأسباب الرئيسة والمسببة للتبلور هي استخدام المكثف الهوائي. وفي هذا الفصل سنتطرق إلى أسباب حدوث التبلور والطريقة المقترحة لعلاجها.

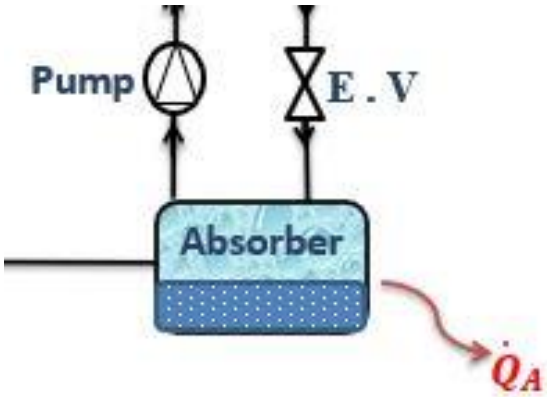
## 5−2 أسباب التبلور والاحتياطات[16] [17]

في دارة التبريد الامتصاصية إن خط التركيز للمحلول غالباً ما يكون قريباً جداً من خط التبلور, كما في الشكل (5−3) فمثلاً في حال كان تركيز المحلول مرتفعاً أو درجة حرارة المحلول انخفضت بشكل مفاجئ فإنّ النقطة A ستنتقل إلى B مما يؤدي إلى تشكل التبلور.




**الشكل(5−3) مخطط العلاقات التيرموديناميكية لمحلول بروميد الليثيوم − ماء**

وأكثر المناطق تعرضاً لخطر التبلور هي المنطقة قبيل دخول المحلول إلى وعاء الامتصاص كما في الشكل (5−4) ومن الضروري تجنب هذه المشكلة؛ لأن التبلور يؤدي إلى تحول المحلول إلى مادة صلبة تمنع تدفق المحلول في الدارة.

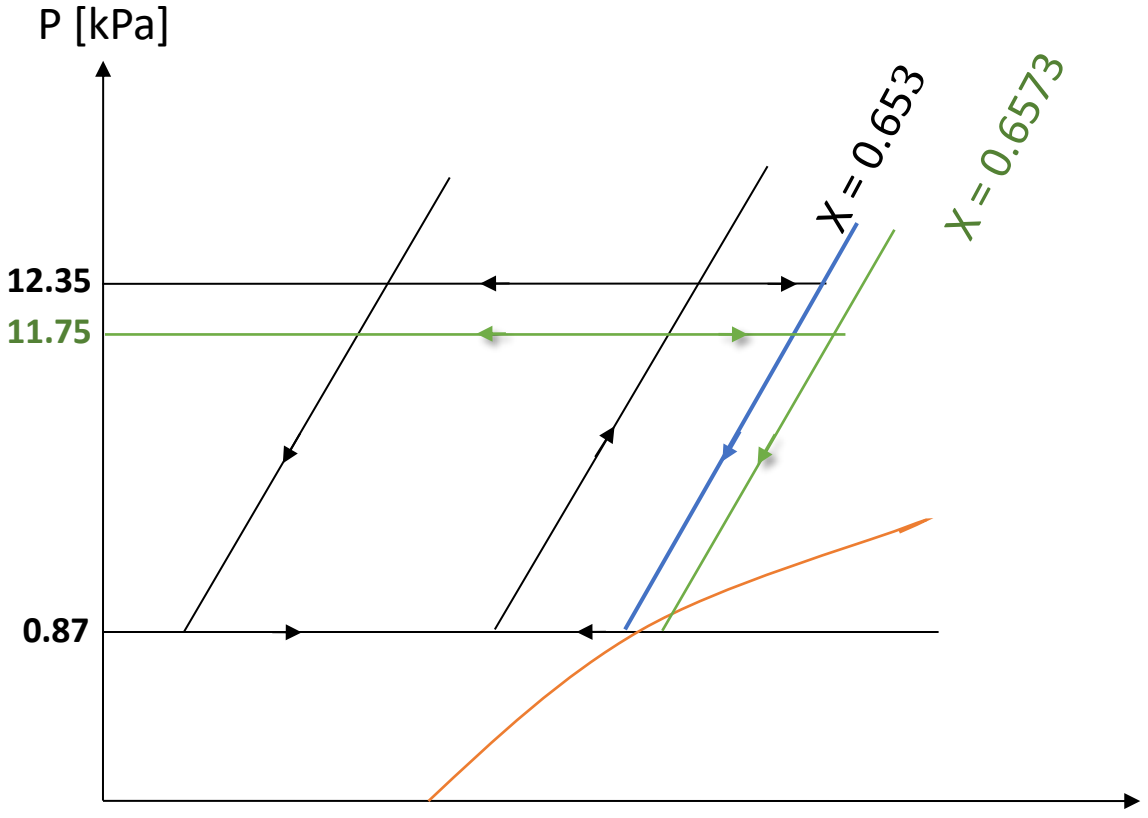



**الشكل(5−4) مقطع في دارة التبريد الامتصاصية لأكثر المناطق خطراً لحدوث التبلور**

في حال حدوث هذه المشكلة يجب رفع درجة حرارة المحلول بشكل كبير فوق نقطة الإشباع بحيث يتم إذابة المحلول في غضون مدة قصيرة. ويوجد خمسة أسباب لحدوث التبلور:

### 5-2-1 انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط

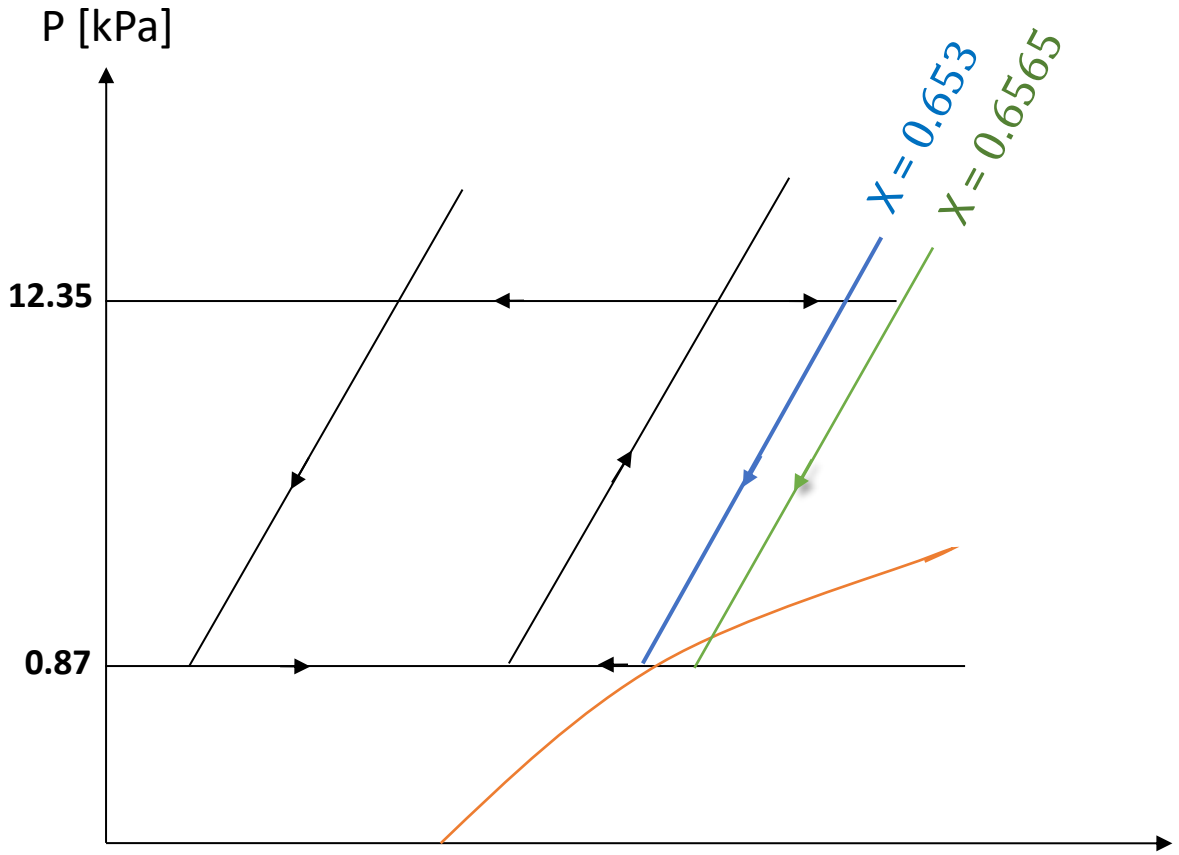
إن تبريد المكثف باستخدام الهواء يؤثر سلباً في تبلور الدارة كما في الشكل (5-5) حيث نلاحظ أنه بانخفاض درجة حرارة الوسط المحيط درجة مئوية واحدة خلال المجال من القيمة [°C] 50 إلى القيمة [°C] 49 نلاحظ أن ضغط التكاثف سينخفض من القيمة $12.35\ [kpa]$ إلى القيمة $11.75\ [kpa]$ وبالتالي فإن خط التركيز للمحلول سينزاح إلى منطقة التبلور, ويرتفع التركيز إلى القيمة 0.6573 وبالتالي يؤدي ذلك إلى حدوث تبلور في الدارة، ويمكن علاج هذا الأمر بتخفيض تدفق الهواء الوارد على المكثف, أو بتخفيض درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي الذي سينعكس سلباً على الإنتاجية التبريدية وبالنتيجة معامل أداء الدارة.




**الشكل(5-5) أثر انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط في التبلور**

### 5-2-2 زيادة التدفق الحراري في وعاء الفصل الرئيسي

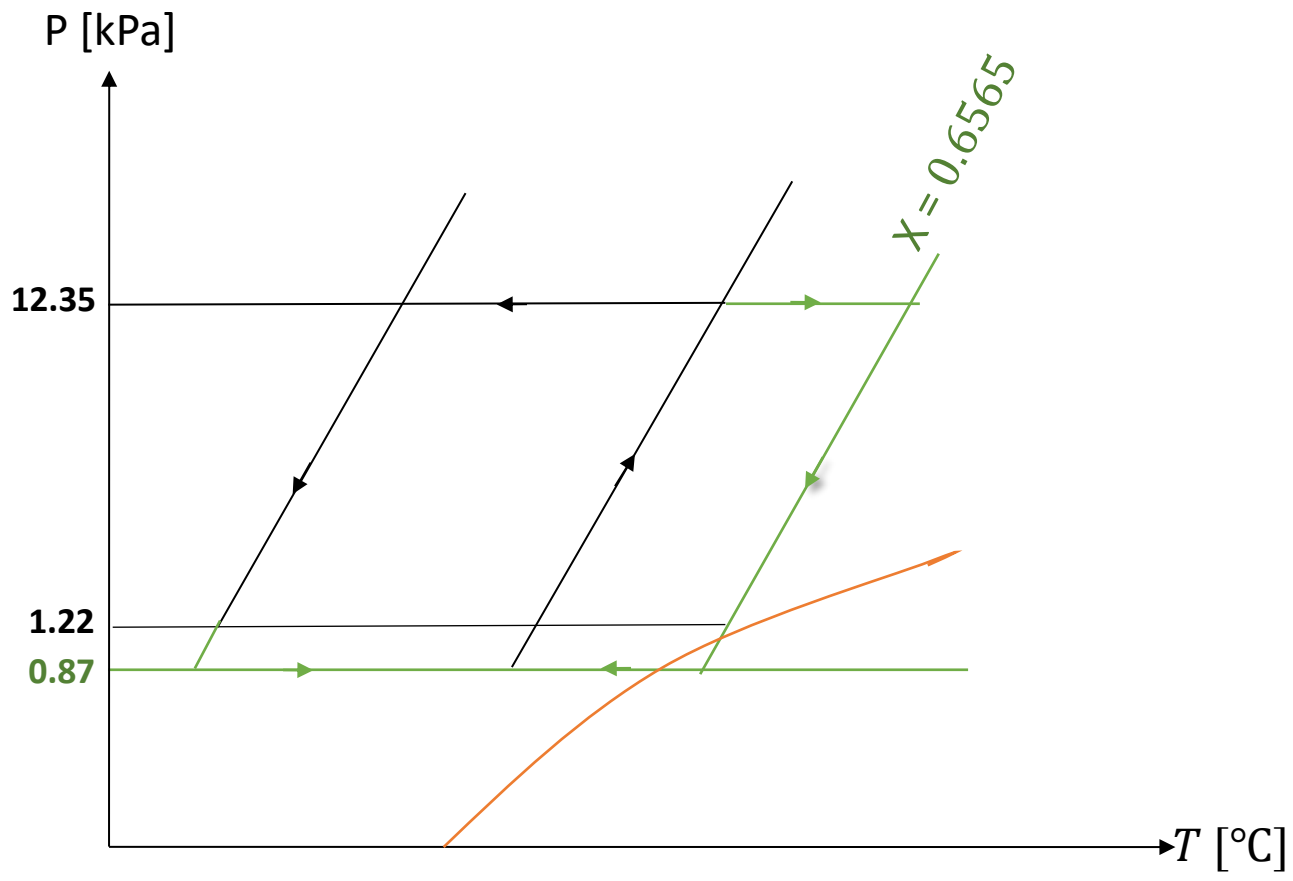
إن زيادة درجة الحرارة العاملة في وعاء الفصل الرئيسي يؤدي بدوره إلى ارتفاع في تركيز المحلول الخارج من وعاء الفصل الرئيسي, ويؤدي إلى تبلور في الدارة. وبالإمكان حل هذه المشكلة بتأمين تدفق حراري ثابت لوعاء الفصل (يمكننا تأمين تدفق حراري ثابت في حال استخدام مصدر تقليدي للطاقة. أما في حال استخدام مصادر طاقية متجددة كالشمس, فإن مخرجات الحقل الشمسي تكون غير ثابتة, وبالتالي من الضروري استخدام خزان حراري في المنظومة وتصميمه بالصورة المثالية لتأمين التدفق الحراري الثابت) والشكل (5-6) يوضح أثر تغير درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي في التبلور حيث نلاحظ أنه بارتفاع درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي درجة مئوية واحدة من الدرجة [°C] 110 إلى الدرجة [°C] 111 فإن تركيز المحلول سيرتفع من القيمة 0.653 إلى القيمة 0.6565 وبالتالي انزياح خط التركيز إلى منطقة التبلور.




**الشكل(5-6) أثر انخفاض درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي في التبلور**

### 5-2-3 انخفاض درجة حرارة التبخر

نلاحظ من الشكل (5-7) أن لانخفاض درجة حرارة التبخر أثراً كبيراً في حدوث التبلور، حيث إنه بانخفاض درجة حرارة التبخر من القيمة [°C] 10 إلى القيمة [°C] 5 نلاحظ أن ضغط التبخر يتناقص من القيمة 1.22 إلى القيمة 0.87




**الشكل(5-7) أثر انخفاض درجة حرارة التبخر في التبلور**

### 5-2-4 ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط

إن انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط أيضاً سينعكس سلباً على الدارة مما يؤدي إلى ارتفاع تركيز المحلول وحدوث التبلور، ويمكن علاج هذه المشكلة بزيادة تدفق الهواء الوارد على المكثف، ولكن سينعكس هذا الأمر سلباً على استهلاك الكهرباء.

### 5-2-5 حدوث تسرب للهواء في الدارة

إن حدوث تسرب للهواء في الدارة، يؤدي إلى انخفاض في الضغط العامل في الدارة، وبالنتيجة انخفاض قيمة معامل أداء الدارة COP واحتمالية تبلور أعلى في الدارة. ومن الممكن حل هذه المشكلة بجعل الأنابيب الواصلة بين جميع عناصر الدارة معزولة بشكل تام وبعزل المنظومة بشكل جيد.

## 5-3 معالجة مشكلة التبلور

في الحقيقة يوجد عدة طرق لحماية الدارة من التبلور، منها التسخين الموضعي في مكان حدوث التبلور, ومنها برمجة المعادلة الأساسية لحدوث التبلور, وهي النقطة الأساسية التي قمنا بها في بحثنا.

إن البرنامج الذي قمنا ببرمجته والمبين بالشكل(5-8) صحيح عند القيم $5 < T_{sol} < 175$ [°C]
$-15 < T_{ref} < 110$ [°C]

| calculate the concentration of LiBr-Water Solution<br>this equation is correct for this range<br>$5 < T_{sol} < 175$°C $-15 < T_{ref} < 110$°C | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| enter $T_{ref}$ [°C] | enter $T_{sol}$ [°C] | $T_{ref}$ [°F] | | | $T_{sol}$ [°F] | | |
| 50 | 111 | 122 | | | 231.8 | | |
| $A_0$ | $A_1$ | | $A_2$ | | $A_3$ | | |
| -2.00755 | 0.16976 | | -0.003133362 | | 1.97668E-05 | | |
| $B_0$ | $B_1$ | | $B_2$ | | $B_3$ | | |
| 321.128 | -19.322 | | 0.374382 | | -0.0020637 | | |
| $A_0 * T_{ref}$ | $A_1 * T_{ref}$ | $A_2 * T_{ref}$ | $A_3 * T_{ref}$ | $A_0 * T_{ref} + B_0 - T_{sol}$ | $A_1 * T_{ref} + B_1$ | $A_2 * T_{ref} + B_2$ | $A_3 * T_{ref} + B_3$ |
| -244.9211 | 20.71072 | -0.382270164 | 0.00241155 | -155.5931 | 1.38872 | -0.007888164 | 0.00034785 |
| the concentration = | 65.65 | note: the pink color means, there is a crystalisation | | | | | |
| crystalisation test | | | | | | | |
| enter evaporator temperature $T_e$ [°C] | x | y | | | | | |
| 5 | 65.65 | 0.75 | note: if y number is red there is a crystalisation, else there is not. | | | | |

Page 1

**الشكل(5-8) واجهة البرنامج المصمم في بحثنا**

يتم إدخال ثلاث بارامترات رئيسية وهي: درجة حرارة المحلول $T_{sol}$ ودرجة حرارة وسيط التبريد $T_{ref}$ ودرجة حرارة التبخر $T_e$ ويعمل البرنامج على تحويل درجة الحرارة من السيليزيوس إلى الفيهرينهايت ويتم حساب عدد لا بعدي $y$ والذي يعطى بالعلاقة التالية:

$$y = (A_3T_{ref} + B_3).X^3 + (A_2T_{ref} + B_2).X^2 + (A_1T_{ref} + B_1).X + A_0T_{ref} + B_0 - T_{sol} \quad (1-5)$$

حيث

$$A_0 = -2.007\,, A_1 = 0.169\,, A_2 = -0.003\,, A_3 = 1.97E-05$$
$$B_0 = 321.13\,, B_1 = -19.3\,, B_2 = 0.374\,, B_3 = -0.002$$

يعمل البرنامج على حساب قيمة $y$ عند قيم مختلفة للتركيز بخطوة $0.001$ وبعدها يقوم البرنامج بتحويل القيم السالبة للعدد $y$ إلى موجبة باستخدام الدالة ( $MIN$) وباستخدام الدالة ( $VLOOKUP$) يتم تحديد قيمة التركيز المحققة لأقل قيمة للعدد $y$ وبالتالي يتم تحديد قيمة تركيز محلول بروميد الليثيوم – ماء.

يعمل البرنامج أيضاً على برمجة الخلية الخاصة بالتركيز، بحيث تصبح باللون الزهر في حال أصبحت قيمة التركيز أكبر من $70\%$ أي ينبه بحدوث تبلور في الدارة ولون أخضر في الحالة الطبيعية.

قمنا أيضاً في هذا البرنامج ببرمجة المعادلة المسؤولة عن خط التبلور، كما في المعادلة التالية, وذلك بحساب عدد لا بعدي $y$ ، ففي حال كانت النقطة $y$ منطبقة على منحني التبلور أو تجاوزته، يصبح لونه أحمر أي ينبه بحدوث تبلور في الدارة، وفي الحالة الطبيعية يكون لونها أخضر أي لا يحدث تبلور في الدارة، ويتم حساب قيمة $y$ من العلاقة التالية:

$$y = T_e + 0.0463X^3 - 8.3214X^2 + 483.49X - 8982.7 \quad (2-5)$$

إن الهدف الرئيس لهذا البرنامج هو إدخاله إلى جهاز تحكم في دارة التبريد الامتصاصية بحيث إذا انخفضت درجة حرارة الوسط المحيط فإنه يرسل أمراً إلى المصدر المسؤول عن تغذية وعاء الفصل الرئيسي بتخفيض التدفق الحراري المقدم. وفي حال ارتفاع درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي، فإن جهاز التحكم يرسل أمراً إلى المبخر لرفع درجة حرارته. وفي حال انخفضت درجة حرارة التبخر، فإنه يرسل أمراً بتخفيض التدفق الحراري المقدم إلى وعاء الفصل الرئيسي.

## 5-4 بارامترات محلول بروميد الليثيوم – ماء [18]

يتميز هذا البرنامج أيضاً بأنه يتمكن من حساب معظم البارامترات الفيزيائية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء وهي من أكبر المشكلات التي يتعرض لها الباحث، نظراً لعدم وجود جداول خاصة بمحلول بروميد الليثيوم– ماء كحساب الإنتالبي, الموصلية الحرارية, اللزوجة, الكثافة, السعة الحرارية والتي تعطى بالعلاقات التالية:

### 5-4-1 الإنتالبي

لحساب قيمة الإنتالبي للمحلول يتم إدخال تركيزه بالإضافة إلى درجة حرارته ليقوم البرنامج بحساب ثلاثة أعداد *A,B,C* من العلاقات التالية:

$$A = A_oX^0 + A_1X^1 + A_2X^2 + A_3X^3 + A_4X^4 \qquad (3-5)$$

حيث

$$A_0 = -2024.33\,, A_1 = 163.309\,, A_2 = -4.88\,, A_3 = 0.063\,, A_4 = -0.0003$$

$$B = T_{sol}(B_oX^0 + B_1X^1 + B_2X^2 + B_3X^3 + B_4X^4) \qquad (4-5)$$

حيث

$$B_0 = 18.2\,, B_1 = -1.17\,, B_2 = 0.032\,, B_3 = -0.0004\,, B_4 = 18E-06$$

$$C = T_{sol}^2(C_oX^0 + C_1X^1 + C_2X^2 + C_3X^3 + C_4X^4) \qquad (5-5)$$

حيث

$$A_0 = -0.037\,, C_1 = 0.002\,, C_2 = -8.13E-05\,, C_3 = 9.9E-07\,,$$
$$C_4 = -4.44E-07$$

وبالنتيجة $h = A + B + C$

### 5-4-2 اللزوجة التحريكية

لحساب قيمة اللزوجة للمحلول، يتم إدخال تركيزه بالإضافة إلى درجة حرارته ليقوم البرنامج بتحويل درجة الحرارة إلى الكلفن، وبعدها يقوم بتطبيق المعادلة التالية لحساب اللزوجة $\mu$ وتقسيم الناتج على 1000

$$ln(\mu) = A_1X^2 + \frac{B_0}{T} + \frac{B_1X^2}{T} + \frac{C_0}{T^2} + \frac{C_1X^2}{T^2} \qquad (6-5)$$

حيث

$A_0 = -2.32\,, A_1 = 3.19$

$B_0 = -609.4\,, B_1 = 963.163$

$C_0 = 372997.8\,, C_1 = -35211.99$

### 5-4-3 الموصلية الحرارية

لحساب قيمة الموصلية الحرارية للمحلول يتم إدخال تركيزه بالإضافة إلى درجة حرارته، ليقوم البرنامج بتحويل درجة الحرارة إلى الكلفن، وبعدها يقوم بتطبيق المعادلة التالية لحساب الموصلية $k$

$$k = A_0 + A_1X + B_0T + B_1TX + C_0T^2 + C_1T^2X + D_0T^3 + D_1T^3X \qquad (7-5)$$

حيث

$A_0 = -0.88\,, A_1 = 0.884$

$B_0 = 0.0089\,, B_1 = -0.007$

$C_0 = -1.55E-05\,, C_1 = 1.39E-05$

$D_0 = 7.32E-09\,, D_1 = -6.32E-09$

### 5-4-4 الكثافة

لحساب قيمة الكثافة للمحلول، يتم إدخال تركيزه بالإضافة إلى درجة حرارته، ليقوم البرنامج بتحويل درجة الحرارة إلى الكلفن، وبعدها يقوم بتطبيق المعادلة التالية لحساب الموصلية $\rho$

$$\rho = (A_0 + B_0T + C_0T^2) + (A_1 + B_1T + C_1T^2)X + (A_2 + B_2T + C_2T^2)X^2 + (A_3 + B_3T + C_3T^2)X^3 \qquad (8-5)$$

حيث

$A_0 = -9040.9\,, A_1 = 55959.8, A_2 = -99497.1, A_3 = 59952.8$

$B_0 = 63.4\,,\ B_1 = -346.4,\ B_2 = 622.14,\ B_3 = -369.18$

$C_0 = -0.1\,,\ C_1 = 0.54,\ C_2 = -0.97,\ C_3 = 0.57$

### 5-4-5 السعة الحرارية

لحساب قيمة السعة الحرارية للمحلول يتم إدخال تركيزه بالإضافة إلى درجة حرارته، ليقوم البرنامج بتحويل درجة الحرارة إلى الكلفن، وبعدها يقوم بتطبيق المعادلة التالية لحساب الموصلية $C_p$

$$\begin{aligned} C_p = -2T(C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3X^3 + C_4X^{1.1}) \\ - 6T^2(D_0 + D_1X + D_2X^2 + D_4X^{1.1}) \\ - 12T^3(E_0 + E_1X) \\ - 2\frac{(F_0 + F_1X)T}{(T - T_0)^3} \\ - 2P_0T(V_6 + V_7X) \\ + \frac{1}{T}(L_0 + L_1X + L_2X^2 + L_3X^3 + L_4X^{1.1}) \\ - (M_0 + M_1X + M_2X^2 + M_3X^3 + CM_4X^{1.1} \end{aligned}$$

(9-5)

$C_0 = 2.56E - 02$ , $C_1 = -2.31E - 03$, $C_2 = 7.56E - 06$, $C_3 = -3.76E - 08$, $C_4 = 1.18E - 03$

$D_0 = -8.53E - 06$ , $D_1 = 1.32E - 06$, $D_2 = 2.79E - 11$, $D_4 = -8.51E - 07$

$E_0 = -3.84E - 11$ , $E_1 = 2.63E - 11$

$F_0 = -5.16E + 1$ , $F_1 = 1.1145$

$V_6 = 3.06E - 09$ , $V_7 = -5.13E - 11$

$L_0 = -2.18E + 03$ , $L_1 = -1.27E + 02$, $L_2 = -2.36$, $L_3 = -1.39E - 02$, $L_4 = 1.58E + 02$

$M_0 = -2.27E + 01$ , $M_1 = 2.98E - 01$, $M_2 = -1.26E - 02$, $M_3 = 6.85E - 05$, $M_4 = 2.77E - 01$

# الفصل السادس

## الأثر البيئي

# الفصل السادس: الأثر البيئي

**المخطط الانسيابي للفصل:**

1. مقدمة تعريفية بما سيشرحه الفصل.
2. استهلاك الطاقة الكهربائية بوساطة آلات التبريد الانضغاطية
3. حساب كمية ال Co2 المنطلقة في حال استخدام الوقود الأحفوري لتغذية الدارة
4. حساب كمية الماء المستهلكة في حال استخدام المكثف المائي في دارة التبريد الامتصاصي.

## 6-1 مقدمة

تُعَدُّ الطاقة الواردة إلينا من الشمس من أهم أنواع الطاقات التي يمكن للإنسان استغلالها، فهي طاقة دائمة لا ينتج عن استخدامها غازات أو نواتج ثانوية ضارة بالبيئة مقارنةً بمصادر طاقية أخرى، ولا تترك مخلفات على درجة من الخطورة مثل النفايات المشعة التي تتخلف عن استعمال الطاقة النووية.

ونظراً للاهتمام المطرد بتلوث البيئة، واقتراح حلول تساهم بشكل أو بآخر في حماية البيئة، فقد استأثرت دارة التبريد الامتصاصية باهتمام الباحثين وكذلك الشركات المصنعة, بالإضافة إلى كونها تستخدم وسائط تبريد لا تضر بالبيئة. فالدارة الامتصاصية تحتاج بشكل رئيسي إلى طاقة حرارية، يمكن تأمينها من الشمس أو من الحرارة المنطقلة من عوادم التطبيقات الصناعية.

## 6-2 استهلاك الطاقة الكهربائية بوساطة آلات التبريد الانضغاطية

يتم تعريف التبريد على أنَّه: المحافظة على درجة حرارة مكان مغلق عند قيمة ثابتة أقل من درجة حرارة الوسط المحيط. بالتالي فالتبريد وفق هذا التعريف هو عملية غير تلقائية، فلا بد من صرف طاقة لأجل تحقيقها. إنَّ آلة التبريد الأكثر استخداماً على مستوى العالم هي العاملة على مبدأ دارة التبريد الانضغاطية. تُعَدُّ هذه الآلات مستهلكة كبيرة للطاقة الكهربائية، وقد بينت دراسة أنجزت بين دبي في الإمارات العربية ومعهد شتوتكارت في ألمانيا أنَّ 50% من الخرج الكهربائية لمحطات توليد الطاقة الكهربائية في المناطق الحارَّة يتم استجراره من قبل أجهزة التكييف ذات مبدأ التبريد الانضغاطي. بالإضافة إلى ذلك فإنَّ وسائط

التبريد العاملة ضمنها تملك تأثيراً ضاراً، وحتى وسائط التبريد الحديثة –التي لا تساهم في نضوب طبقة الأوزون– تساهم في الاحتباس الحراريّ.

في دارة التبريد الانضغاطية تكون الطاقة المستهلكة هي الطاقة الكهربائية، والجدير بالذكر أنّ الطاقة الكهربائية هي طاقة ثانوية، وأنّ معامل الأداء لا يأخذ بعين الاعتبار المراديد العديدة المتراكمة جرّاء عملية تحويل الطاقة الأولية (الناتجة عن احتراق غاز الميتان مثلاً) إلى طاقة ثانوية (الطاقة الكهربائية). وبالتالي فإنّ القيمة المرتفعة لمعامل الأداء الحراري في الدارة لا تشكل أي إغراء ولا تعدّ نقطة مقارنة مقبولة بينها وبين دارات التبريد الأخرى. حيث نلاحظ من الشكل (2–2) أن قيمة العمل الحقيقية [kW] 44 في حال افترضنا أن معامل أداء الدارة 4 والإنتاجية التبريدية طنّ تبريدي واحد وليست [kW] 0.88 وبالتالي فإن قيمة معامل الأداء الحقيقي 0.08 وهي قيمة متدنية جداً.

## 6–3 حساب كمية Co2 المنطلقة في حال استخدام الوقود الأحفوري لتغذية الدارة

بما أن دارة التبريد الامتصاصية تعتمد في عملها بشكل أساسي على الطاقة الحرارية، فإنه يمكن تأمين هذه الطاقة بالحرق المباشر للوقود الأحفوري، ولكن هذا يؤدي إلى انبعاث كميات من غاز ثاني أوكسيد الكربون يمكن حسابها تبعاً للوقود المستخدم.

### 6–3–1 استخدام وقود الديزل $C_{12}H_{26}$

يعتبر الديزل من أكثر الوقود استخداماً في سورية وبخاصة في التطبيقات الصناعية والنقل وقطاعات التدفئة وتسخين المياه المنزلية نظراً لتوفره وانخفاض تكلفته نسبياً. ولكنه من جهة أخرى يعد واحداً من أهم مصادر التلوث الحراري والبيئي في القطر، نظراً لكمية غازات الاحتباس الحراري الصادرة عن عملية حرق هذا الوقود ولا سيما غاز ثاني أوكسيد الكربون.

يتم حساب كمية الطاقة بالاعتماد على قيمة استهلاك الوقود والكهرباء. وهناك عدة أنواع من الوقود تختلف عن بعضها البعض بعدة خواص من أهمها القيمة الحرارية النوعية للاحتراق.

لذلك –ولأجل إنجاز هذه الحسابات مع الأخذ بعين الاعتبار هذا التنوع بالوقود– فمن المناسب اعتماد وحدة قياس مشتركة يتم تحويل كل نوع من الوقود إليها. هذه الوحدة هي طن من النفط المكافئ ton of oil ( equivalent: TOE)

الاعتبار الحسابي الأساسي للقيمة الحرارية النوعية للاحتراق [kg] 1 من النفط المكافئ هي:

$$H.V\ of\ kg\ OE = 10000\ \left[{}^{kcal}/_{kg}\right]$$

القيمة الحرارية لوقود الديزل $LHV_f = 9600\ \left[{}^{kcal}/_{kg}\right]$

كمية الاستهلاك الإضافية [kg] 1000

المكافئ الحراري [kg] 1000 لوقود ثقيل (الديزل) هي:

$$\frac{1000 \times 9600}{10000} = 960kgEo$$

إن كمية الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود هي:

$$\dot{Q}_{G1} = \eta_b \times LHV_f \times \dot{m}_f \qquad (1-6)$$

$\dot{m}_f\ \left[{}^{kg}/_{sec}\right]$ التدفق الكتلي للوقود

$\eta_b$ مردود الحراق المستخدم وتكون قيمته عادةً 0.85

$\dot{Q}_{G1}[w]$ التدفق الطاقي في وعاء الفصل الرئيسي

من المعادلة (1−6) يتم حساب تدفق الوقود اللازم لتأمين كمية الحرارة المطلوبة لعمل الدارة

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_{G1}}{\eta_b \times LHV_f} = \frac{14.391}{0.85 \times 9600 \times 4.186} = 0.4213 \times 10^{-3}\ \left[{}^{kg}/_{sec}\right]$$

وبالتالي تكون كمية الاستهلاك الساعي للوقود:

$$\dot{m}_f == 0.4213 \times 10^{-3} \times 3600 = 1.5167\ \left[{}^{kg}/_{hr}\right]$$

وبالتالي تكون كمية النفط المكافئ النفطي

المكافئ النفطي حرارياً $1000kg\ heavy\ fuel \leftrightarrow 960kgEo$

$$1.5167 \quad \leftrightarrow \quad meo$$

$$meo = 1.456\ [kgEo]$$

وعليه تكون كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنطلقة نتيجة عملية الاحتراق

$$1000kgEo \leftrightarrow 3109.4kgEo$$

$$1.456 \quad \leftrightarrow \quad mco_2$$

$$mco_2 = 4.53 \left[\frac{kgco_2}{hr}\right]$$

### 6-3-2 استخدام الغاز الطبيعي CH4

إن كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنطلقة عند حرق الغاز الطبيعي تكون أقل من باقي أنواع الوقود الأحفوري الأخرى. وبذلك تكون مساهمته في التلوث البيئي أقل. وهذا ما سيبينه المثال الرقمي التالي ومقارنته مع وقود الديزل.

القيمة الحرارية للغاز الطبيعي $LHV_G = 13255 \left[{kcal}/{kg}\right]$

كمية الاستهلاك الإضافية [kg] 1000

المكافئ الحراري ل [kg] 1000 من الغاز الطبيعي هي:

$$\frac{1000 \times 13255}{10000} = 1325.5\ [kgEo]$$

إن كمية الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود هي:

$$\dot{Q}_{G1} = \eta_b \times LHV_G \times \dot{m}_G$$

$\dot{m}_G \left[{kg}/{sec}\right]$ التدفق الكتلي للغاز الطبيعي

$\eta_b$ مردود الحراق المستخدم وتكون قيمته عادةً 0.9

$\dot{Q}_{G1}[W]$ التدفق الطاقي في وعاء الفصل الرئيسي

من المعادلة (6-1) يتم حساب تدفق الوقود اللازم لتأمين كمية الحرارة المطلوبة لعمل الدارة

$$\dot{m}_G = \frac{\dot{Q}_{G1}}{\eta_b \times LHV_G} = \frac{14.391}{0.9 \times 13255 \times 4.186} = 0.2882 * 10^{-3} \left[{kg}/{sec}\right]$$

وبالتالي تكون كمية الاستهلاك الساعي للوقود:

$$\dot{m}_f = 0.2882 \times 10^{-3} \times 3600 = 1.0375 \left[{kg}/{hr}\right]$$

وبالتالي تكون كمية النفط المكافئ النفطي

المكافئ النفطي حرارياً $1000kg\ heavy\ fuel \leftrightarrow 1325.5kgEo$

$$1.0375 \quad \leftrightarrow \quad meo$$

$$meo = 1.375\ [kgEo]$$

وعليه تكون كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنطلقة نتيجة عملية الاحتراق

$$1000kgEo \leftrightarrow 3109.4kgEo$$

$$1.375 \quad \leftrightarrow \quad mco_2$$

$$meo = 4.276\ \left[\frac{kgco_2}{h}\right]$$

بالمقارنة بين كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون باستخدام غاز الميتان والديزل نجد أن كمية غاز $Co_2$ المنطلقة في حال استخدام الغاز الطبيعي أقل من كميته المنطلقة عند استخدام وقود الديزل.

ولكن عندما ربطنا الدارة المستخدمة مع الطاقة الشمسية فإننا وفرنا ما لا يقل عن $4.276\ [kgco_2]$ ساعياً.

## 6-4 حساب كمية الماء المستهلكة في حال استخدام المكثف المائي في دارة التبريد الامتصاصي

كما نعلم يوجد نوعان من المكثفات المستخدمة في دارة التبريد الامتصاصية منها المكثف المائي أو الهوائي. ففي حالة استخدام المكثف المائي، وبإجراء حساب يسير لكمية الماء المستهلكة للدارة ذات إنتاجية تبريدية $\dot{Q}_e = 1\ [RT]$ ودرجة حرارة تبخر $5\ [°C]$ وتكاثف $40\ [°C]$ نجد أن كمية الماء المستهلكة في الدارة, والتي تذهب على شكل ضياع في برج التبريد 10 أطنان لكل ثلاثة شهور, وهو رقم كبير مقارنة بحجم دارة التبريد الذي يتطلب وجود مصدر مائي دائم قرب الدارة كنهر أو بحر، ولكن هذا يعد أثراً سلبياً في البيئة كونه يسبب هدراً في الماء، مما يستوجب علينا اللجوء إلى استخدام المكثف الهوائي مع الأخذ بعين الاعتبار بعض التدابير اللازمة لحماية الدارة من التبلور وبالتالي خروجها عن العمل.

# الفصل السابع

## النتائج والتوصيات

# الفصل السابع: النتائج والتوصيات

## 7-1 نتائج البحث

1. معامل أداء دارة التبريد مضاعفة التأثير 1.086 بينما معامل الأداء في أحادية التأثير 0.79 وبالتالي زيادة بنسبة 37%.

2. درجة حرارة وعاء الفصل الثانوي غير ثابتة وتتعلق بدرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي وفق العلاقة:

$$T_{g2} = 0.6277 \times T_{g1} + 5.1298$$

3. لتحديد درجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي يجب دراسة متغيرات عديدة (مردود الإكسيرجي – ضياعات الإكسيرجي في الدارة وبشكل خاص في وعاء الفصل الرئيسي) والأهم هو دراسة التبلور في الدارة.

4. درجة الحرارة المناسبة لعمل وعاء الفصل الرئيسي [°C] 140 وعندها يكون معامل الأداء $COP =$ 1.086 وقيمة مردود الأكسيرجي $\eta = 0.26$ وضياع إكسيرجي في الدارة ككل $[W]$ 4.1146

5. مساحة حقل المجمعات الشمسية $100\text{m}^2$ باستخدام طريقة $\overline{\emptyset}, \text{f chart}$ لتغطية الحمل الحراري صيفا [W] 17200 والتي تحقق قيمة لمعامل الفائدة الشمسية 92.5%.

6. زاوية الميلان المناسبة لعمل حقل المجمعات الشمسية °10 صيفاً و°50 شتاءً.

7. تزداد مساحة حقل المجمعات الشمسية بمقدار 20% بالأخذ بعين الاعتبار أثر التظليل.

8. تم اقتراح طريقة مختلفة لتوزع حقل المجمعات الشمسية؛ وهي وضع المجمعات على وتر مثلث (المسقط الجانبي لهيكل معدني) مائل بزاوية الميلان المحسوبة °10 وبالتالي تم تخفيض مساحة الأرض بمقدار 7%

9. حجم الخزان الحراري صيفاً $5m^3$ باستخدام طريقة $\overline{\emptyset}, f\ chart$ ومتوسط معامل الفائدة الشمسية خلال فصل الصيف 0.734

10. يمكننا الاستفادة من المنظومة في فصل الشتاء، حيث توصلنا إلى أن حجم الخزان $[m^3]$ 1.6 ومتوسط الفائدة الشمسية 0.61

11. درجة حرارة الوسيط الناقل للحرارة الداخل إلى حقل المجمعات الشمسية يجب أن تكون ثابتة، وبالتالي يجب تأمين مصدر مستقر لدرجة حرارة الدخول.

12. يحدث التبلور في الدارة لعدة أسباب: كتغير درجة حرارة الوسط المحيط, ودرجة حرارة وعاء الفصل الرئيسي, والتبخر.

13. يوجد عدة حلول لمعالجة التبلور منها: التسخين الموضعي في منطقة التبلور, ومنها استخدام نظام تحكم للدارة.

14. تم في هذا البحث برمجة المعادلة المسؤولة عن التحكم كما في القرص المضغوط المرفق.

15. بالإضافة إلى برمجة معظم البارامترات الفيزيائية لمحلول بروميد الليثيوم – ماء والتي سيحتاجها الباحثون مستقبلا عند تصميم الدارة كما في القرص المضغوط المرفق.

## 7-2 التوصيات

1. تصميم المبادلات الحرارية في الدارة الأمر الذي يقودنا إلى تصنيع الدارة (بالاستفادة من البرنامج الذي توصلنا إليه).

2. دراسة الخزان الحراري الكامن واختيار مادة متغيرة الطور مناسبة لتطبيقات دارة التبريد الامتصاصية والتي تتطلب درجات حرارة مرتفعة.

3. دراسة دارة التحكم في دارة التبريد الامتصاصية والاستفادة من برمجة المعادلات التي توصلنا إليها فيما يخص تركيز محلول بروميد الليثوم – ماء.

# المراجع العلمية

# المراجع العلمية

## المراجع الأجنبية


1- American Society of heating, refrigerating and air-conditioning Engineers. (2008). ASHRAE handbook.

2- Ahmad Khan, Suhail. (2016, March). COMPARATIVE ANALYSIS OF SINGLE AND DOUBLE EFFECT LiBr-WATER ABSORPTION SYSTEM. 4th International Conference on Recent Innovations in Sciences Engineering and Management.

3- Nasreldin Abdalla, Kamal. (2015, February). DESIGN AND TESTING OF AN ABSORBTION REFRIGERATION SYSTEM. Researchgate.

4- Borzou, B. Sadeghpour, F. (2009, May). System design and optimization of a water-lithium bromide double-effect absorption system. International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning.

5- Hamzehpour, Azad. Badrang Bouyeh, Saman. Aghanajafi, Cyrus. Shokouhmand, Hossein. (2017, June). Genetic algorithm approach to optimize double-effect absorption chiller with parabolic through solar collector in Tehran. Applied Research Journal, NO.3, 188-197.

6- Al-Tahaineh, H. Frihat, M. Al-Rahdan, M. (2013). Exergy Analysis of a Single-Effect Water-Lithium Bromide Absorption Chiller Powered by Waste Energy Source for Different Cooling Capacities. Energy and Power, 106-118.

7- Karaali, Rabi. (2016, December). EXERGY ANALYSIS OF DOUBLE-EFFECT ABSORBTION CYCLES. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY.

8- Yang Hu., Laura Schaefer., Volker Hartkopf. (2011). ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF DOUBLE EFFECT (PARALLEL AND SERIES FLOW) ABSORBTION CHILLER SYSTEMS" Heat Pump Conference.

9- Kiran Naik,B. Varshney, A. Muthukumar,P. Somayaji, C. (2015). Modelling and Performance Analysis of U Type Evacuated Tube Solar Collector Using Different Working Fluids. International Conference on Advances in Energy Research, 227-237.

10- A. CENGEL, YUNUS. HEAT TRANSFERS A PRACTICAL APPROACH (2nd ed.).

11- R. Moslemi, Hamid. M. Keshtkar, Mohammad. (2018, December). Sensitivity analysis and thermal performance optimization of evacuated U-tupe solar collector using genetic algorithm. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY, No.36, 1193-1202.

12- Bin Hj Mohd Yakup, Mohd Azmi. Malik, A.Q. (2011). Optimum tilt angel and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. Elsevier, 223-234.

13- Al-Mohamad, Ali. (2004). Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria. Applied Energy, No.36, 191-200.

14- J.A, Duffie. W.A,Beckman. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.

15- Ani, Farid Nasir. (2012, December). DOUBLE-EFFECT SOLAR ABSORPTION THERMAL ENERGY STORAGE. Journal Mekanikal, No.35, 38-53.

16- Garousi Farshi, L. Seyed Mahmoudi,S.M. Rosen,M.A. Analysis of crystallization risk in double effect absorption refrigeration systems. Applied Thermal Engineering, 1712-1717.

17- Liao, Xiaohong. Radermacher, Reinhard. (2007, January). Absorption chiller crystallization control strategies for integrated cooling heating and power systems. International Journal of Refrigeration, 904-911.

18- WANG, Kai. ABDELAZIZ, Omar. A. VINEYARD, Edward. (2012, July). Thermophysical Properties of Lithium Bromide +1,2-Propanediol Aqueous Solutions-Solubility, Density and Viscosity. International Refrigeration and air Conditioning Conference at Purdue.

**المراجع العربية**

19 –فارس، أمينة. –كتاب أنظمة التسخين الشمسي

## Abstract

In the current research, we conducted a study to calculate the air-conditioning of a villa located in Damascus city by using the double-effect absorption refrigeration machine (DEARM) works on Lithium bromide-water solution (LiBr-$H_2O$ solution). The DEARM is supplied with heat from a solar field based on U-Pipe evacuated-tube solar thermal collectors.

By using the RTS software, we found that the summer and the winter conditioning loads to be 17200 [W] and 9160 [W], respectively.

During the thermal calculations of the DEARM we found that the temperature of the secondary desorber is not fixed but changes with the temperature of the main desorber. Therefore, we calculated the coefficient of performance (COP) as a function of the main desorber temperature and draw this relation, where we found that COP increases with the increase of the main desorber temperature until reaching a maximum value then decreases. We represented this value on the thermodynamic charts of LiBr-$H_2O$ solution and found that crystallization takes place. Also, we found that the critical safe value that avoids crystallization is 144 [ºC]. To determine the design value of the main desorber temperature, we calculated its exergy loss for different values of the main desorber temperature and found that the lowest value corresponds to the temperature 140 [ºC], and thus we considered it as the design value.

During the thermal calculations of the solar field, we found that the overall heat loss coefficient is $3.06[W/(m^2.°C)]$, and the heat removal factor is 0.79. Besides, we carried out the detailed calculations of the change of solar radiation incident on a tilted surface as a function of the solar collector tilt angle for different months in the year and found that the best tilt angle in summer is 10º, and that in winter is 50º. We applied the $\bar{\phi}, f\ chart$ method to calculate the solar collectors area and the sensible heat storage tank volume and found that their values for summer are 100 [$m^2$] and 5 [$m^3$], respectively, which correspond to 92.5% solar fraction.

Finally, we conducted an analysis of the crystallization phenomenon, and suggested a solution for this problem through preparing an Excel program for the crystallization equation. In addition to this, we prepared an Excel program for most of the thermo-physical properties of the LiBr-$H_2O$ solution, which makes it easy to find the properties of any state of the solution.



## Keywords

Double effect absorption refrigeration machine – LiBr-$H_2O$ solution – U-Pipe evacuated-tube solar thermal collectors – Sensible heat storage tank – Crystallization phenomenon.

**Syrian Arab Republic**

**Ministry of Higher Education and Scientific Research**

**Damascus University**

**Faculty of Mechanical and Electrical Engineering**

**General Mechanics Engineering Department**

**Renewable Energies Engineering Section**

# Performance analysis of solar system for heating and cooling of a building using double effect absorption refrigeration machine

**Study prepared to attain a Master degree in Renewable Energies Engineering**

## Prepared by

## Eng. Feras Al gogo

## Supervised by

## Dr. Eng. Issa Mahmoud

**Assistant Professor at General Mechanical Engineering Department – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University**

**Academic Year 2020-2021**