

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة قاصدي مرباح ورقلة  
كلية الرياضيات وعلوم المادة  
قسم الفيزياء

أطروحة: لنيل شهادة الدكتوراه

تخصص: فيزياء طاقوية

من طرف: عاشوري انتصار

تحت عنوان:

دراسة فعالية التخزين الحراري للطاقة الشمسية المجمعـة بواسطة المركز الشمسي

الأسطوانـي القطع مكافئ (PTC) في منطقة ورقلة

نوقشت علنا بتاريخ 2023/12/20 من طرف اللجنة المكونة من :

|        |                                  |                   |
|--------|----------------------------------|-------------------|
| رئيسا  | أستاذ التعليم العالي-جامعة ورقلة | بشكي جمال         |
| مشرفا  | أستاذ محاضر-أ-جامعة ورقلة        | سوداني محمد البار |
| مناقشا | أستاذ التعليم العالي-جامعة ورقلة | بن مبروك لزهـر    |
| مناقشا | استاد محاضر-أ جامعة ورقلة        | بالحاج مصطفى      |
| مناقشا | أستاذ محاضر-أ- المدرسة العليا    | سويقات عبد القادر |
| مناقشا | مدير بحث -وحدة البحث غرداية      | قدور عبد المجيد   |

الموسم الجامعي 2024/2023

# إهداء

إلى من أرى التفاؤل بعينه... من كلت أنامله لي أقدم لي لحظة السعادة... وحصد الأشواك عن دربي... صاحب القلب الطيب والنوايا الصادقة... إلى أبي الغالي من أفنى عمره وسنين حياته ثمنا لكي يرانا في أعلى المراتب إلى الغالية... وحببية قلبي سندي ومسندي واتكائي أمي الغالية.... قدوتي ذات القلب الطيب.... من غمرتنا بحبها وتضحياتها وسهرت على راحتنا وتربيتنا وزرع القيم فينا.....أسعدها الله وحفظها من كل سوء وأطال في عمرها ورزقها أضعاف ما منحتني إياه من السعادة والحب وجبر خاطرها.

إلى إخوتي وأخواتي سندي ومسندي وضلعي الثابت الذي لا يميل من تقاسموا معي الحياة بجلوها ومرها....

إلى قطعتي السكر في عائلتي وحببينا قلبي رودينا وغفران

إلى كل صديقاتي الغاليات من كن سندي في أوقات ضعفي وشدتي... مريم، تكريم، عائشة، نعيمة، أمال، يسرا، ندى، زهرة وثوبية، كما لا أنسى هناء، نصيرة، الزهرة، مروة، أمينة، زهور، مبروكة، فطيمة، الضاوية، نعيمة وسلوى....

إلى صديقات الطفولة تيزيري وأمينة.

إلى زميلتي ورفيقتي صديقات الدرب والعمل الغاليات..... حياة ودليلة

إلى من كانوا قطعة من قلبي وفقدتهم.....

إلى روح "الجدين الغاليين" رحمها الله وأسكنهما فسيح الجنان.

إلى روح خالتي الغالية رحمها الله وأبدلها دارا خيرا من دارها وأهلا خيرا من أهلها.

إلى روح عمي مصطفى أسأل الله له الرحمة والمغفرة...

إلى "معلماتي وأساتذتي" الأجلاء في جميع الأطوار، الذين كانت لهم بصمة، في مشواري الدراسي

إلى كل من ساهم من قريب أو من بعيد في وصولي إلى ما وصلت إليه اليوم.

## إنتصار

## التشكرات

تم بحمد الله تعالى إتمام هذا العمل في إطار الحصول على شهادة الدكتوراه LMD، تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة بكلية الرياضيات وعلوم المادة جامعة قاصدي مرباح ورقلة، وبالتعاون مع مخبر تطوير الطاقات الجديدة والمتجددة بالمناطق الجافة والصحراوية L.E.N.R.E.Z.A.

بداية أتوجه بجزيل الشكر والإمتنان إلى الأستاذ المشرف على هذه الأطروحة، الأستاذ الدكتور محمد البار سوداني الذي كان أبا وسندا موجها وداعما لي في مختلف جوانب هذا العمل، منذ البداية. لم ييخني يوما بالإرشاد والتوجيه والنصح، مما كان يسهل لي إيجاد الحلول المناسبة لكثير من العقبات التي اعترضت مسار البحث، وبالتالي إتمام هذا المشروع في أحسن الظروف. كما أود أيضا، أن أشكر الأستاذ البروفيسور جمال بشكي على مساعدته لي ونصحه وتوجيهاته التي لم ييخني بها يوما وكذا تشجيعه وحرصه على إتمام هذا العمل فلهما مني أسمى عبارات الامتنان والشكر والتقدير، جزاهم الله عني خير الجزاء.

كما أتقدم بالشكر الجزيل لجميع أساتذتي في كلية الرياضيات وعلوم المادة كل باسمه ووسمه ورتبته بن مبروك لزهر، عاشوري عبد الرحيم، بن طويلة عمر، بلحاج مصطفى، شيحي إسماعيل، بوقطاية حمزة، بوغالي سليمان، تحة محمد، رابح بوحنان، معرف يسين، الزين عبد الله، محسن حسين وبن حميدة سفيان فلهم مني كل الشكر والتقدير جميعهم لم ييخلوا علي بالنصح والتوجيه جزاهم الله خير الجزاء

كما أتقدم بالشكر الجزيل للأستاذ البروفيسور بشكي جمال لقبوله رئاسة لجنة مناقشة هذه الأطروحة.

كما أتقدم بالشكر الجزيل لكل أعضاء لجنة المناقشة وهم على التوالي: الأستاذ الدكتور سويقات عبد القادر المدرسة العليا للأساتذة، الأستاذ البروفيسور قدور عبد المجيد مركز البحث غرداية، الأستاذ البروفيسور بن مبروك لزهر من جامعة ورقلة، الأستاذ الدكتور بالحاج مصطفى من جامعة ورقلة، أشكرهم على قبولهم المشاركة بأوقاتهم الثمينة في تقييم هذا العمل، فلهم مني أسمى عبارات الامتنان والشكر والتقدير.

الشكر موصول لموظفي وموظفات جامعة قاصدي مرباح ورقلة على كل تعاون ولو بالدعاء، فلهم مني جزيل الشكر والثناء.

## الملخص

المجمع الشمسي الأسطواناني القطع مكافئ PTC من أهم أنظمة التركيز الشمسي. ومن أجل زيادة فعالية PTC قمنا بدراسة تجريبية إعتقادا على تصميم وإنجاز مجمع شمسي PTC ذي أبعاد (2m x 1.8m) مقترن مع خزان للتخزين الحراري. وفقا للإشعاع الشمسي والظروف المناخية لمدينة ورقلة قمنا بتسجيل درجة حرارة خروج الماء في حالة عدم استخدام مادة التخزين و في حالة استخدام مادة التخزين (شمع البرافين)، و ذلك من أجل تعويض التقطع أثناء غياب الشمس، حيث أظهرت الدراسة فعالية تأثير شمع البرافين على تشغيل هذا النظام الشمسي و يظهر ذلك أثناء مرحلة تغيير الطور في مرحلة الشحن. ومن ثم حساب كسب الحرارة المفيدة، والطاقة الشمسية التي تم جمعها كل ساعة، الطاقة الشمسية المخزنة بالساعة للمجمع الشمسي و كفاءة الشحن خلال اليوم، حيث أظهرت النتائج التجريبية فعالية وجود مادة التخزين في زيادة الكفاءة بـ 24% في حالة استخدام شمع البرافين. ولأجل توسيع النتائج قمنا بإعداد محاكاة عددية للنموذج التجريبي للتأكد من صدقية هذا النموذج من خلال مقارنة نتائج المحاكاة العددية بالنتائج التجريبية، وبذلك نستطيع تحديد أبعاد PTC المناسبة و درجة حرارة (الانصهار- التجمد) لشمع البرافين للحصول على درجة حرارة الماء المطلوبة للاستغلال المنزلي أثناء غياب الشمس.

**الكلمات المفتاحية :** الإشعاع الشمسي، المركز الشمسي الاسطواناني القطع مكافئ، التخزين الحراري، المواد متغيرة

الطور، كفاءة الشحن.

## **Abstract**

The Parabolic Trough Collector (PTC) is one of the most important solar concentration systems. To enhance the efficiency of PTC, we conducted an experimental study based on the design and implementation of a PTC solar collector with dimensions (2m x 1.8m) coupled with a thermal storage tank. In accordance with the solar radiation and climatic conditions of Ouargla city, we recorded the outlet water temperature both without using a phase change material (PCM) and when using paraffin wax as a PCM. This was done to compensate for interruptions during periods of sunlight absence. The study demonstrated the effectiveness of the paraffin wax in operating this solar system, especially during the phase change process in the charging stage. Subsequently, we calculated the useful heat gain, solar energy collected per hour, hourly solar energy stored in the solar collector, and the charging efficiency throughout the day. The experimental results showed that using a phase change material, such as paraffin wax, increased the efficiency by approximately 24%. To validate our findings, we conducted a numerical simulation of the experimental model, comparing the numerical simulation results with the experimental findings. This allowed us to determine the appropriate dimensions of the PTC and the melting/freezing temperature of the paraffin wax to achieve the desired water temperature for household use during periods of sunlight absence.

**Keywords:** *Solar radiation, Parabolic Trough Collector (PTC), thermal storage, phase change materials, charging efficiency.*

## فهرس المحتويات

|          |  |
|----------|--|
| -        | إهداء  |
| -        | تشكرات                                       |
| -        | ملخص   |
| vi-i     | فهرس المحتويات                               |
| viii-vii | قائمة الأشكال                                |
| Ix       | قائمة الجداول                                |
| xiii-x   | قائمة الرموز والاختصارات                     |
| 8-1      | المقدمة العامة                               |
| 35-9     | الفصل الأول الإشعاع الشمسي والمركزات الشمسية |
| 10       | مقدمة  |
| 10       | 1.1. الإشعاع الشمسي                          |
| 12       | 1.1.1. الثابت الشمسي                         |
| 12       | 2.1. الزوايا الشمسية                         |
| 12       | 1.2.1. زاوية الميل الشمسي                    |
| 13       | 2.2.1. زاوية الارتفاع h                      |
| 14       | 3.2.1. زاوية الذروة $\theta_z$               |
| 14       | 4.2.1. زاوية السمات الرأسية a                |
| 15       | 5.2.1. زاوية الساعة الشمسية w                |
| 15       | 6.2.1. زاوية دائرة العرض للمنطقة             |
| 16       | 3.1. معادلة التصحيح الزمني Et                |
| 17       | 4.1. الكتلة الهوائية الضوئية AM              |
| 18       | 5.1. الإشعاع الشمسي على سطح الأرض            |

## فهرس المحتويات

|       |  |
|-------|--|
| 18    | 1.5.I. الإشعاع المباشر   |
| 19    | 2.5.I. الإشعاع الشمسي المنتشر  |
| 19    | 3.5.I. الإشعاع الكلي   |
| 20    | 6.I. التتبع الشمسي   |
| 21    | 1.6.I. التتبع الشمسي بمحوري دوران  |
| 21    | 2.6.I. التتبع الشمسي بمحور دوران واحد  |
| 24    | 3.6.I. حالة تثبيت المجمع الشمسي (عدم التتبع)   |
| 25    | 4.6.I. آليات التتبع للمجمعات الشمسية   |
| 25    | 7.I. مجمعات الطاقة الشمسية CSPs  |
| 27    | 1.7.I. التقنيات الرئيسية للطاقة الشمسية المركزة  |
| 27    | 1.1.7.I. نظام عاكس فرينل الخطي ( LFR )   |
| 28    | 2.1.7.I. نظام برج الطاقة المركزي (CRS)   |
| 28    | 3.1.7.I. نظام الصحن القطع المكافئ  |
| 29    | 4.1.7.I. النظام الشمسي ذو القطع المكافئ  |
| 30    | 2.7.I. مقارنة بين التقنيات المختلفة  |
| 32    | 3.7.I. مبدأ عمل المركزات الشمسية   |
| 32    | الخاتمة  |
| 35-33 | المراجع  |
| 56-36 | <b>الفصل الثاني المجمع الأسطواني القطع مكافئ PTC</b>                                       |
| 37    | مقدمة  |
| 37    | 1.II. نظرة عامة حول محطات الطاقة الشمسية المركزة التجارية الأسطوانية ذات القطع المكافئ PTC |
| 42    | 2.II. المجمع الشمسي الأسطواني لقطع مكافئ PTC   |

## فهرس المحتويات

|       |  |
|-------|--|
| 42    | 1.2.II مكونات الـ PTC  |
| 43    | 1.1.2.II المائع الناقل للحرارة HTF                                     |
| 43    | 2.1.2.II العنصر الجامع للحرارة (HCE)                                   |
| 43    | 3.1.2.II العاكس  |
| 44    | 3.II هندسة الـ PTC   |
| 44    | 1.3.II معادلة الشكل  |
| 44    | 2.3.II البعد البؤري $f$  |
| 45    | 3.3.II مساحة الفتحة $A_p$  |
| 46    | 4.3.II المردود الضوئي $\eta_{op}$                                      |
| 46    | 4.II النمذجة الحرارية  |
| 46    | 1.4.II الحرارة المفيدة $Q_u$   |
| 46    | 2.4.II الإشعاع الشمسي المعترض $Q_s$                                    |
| 46    | 3.4.II الكفاءة الحرارية $\eta_{th}$                                    |
| 47    | 4.4.II الضياعات الحرارية   |
| 47    | 1.4.4.II الضياعات الحرارية لأنبوب الامتصاص $Q_{loss}$                  |
| 47    | 2.4.4.II درجة حرارة السماء $T_{sky}$                                   |
| 47    | 3.4.4.II الطاقة الحرارية الممتصة $Q_{abs}$                             |
| 48    | الخاتمة  |
| 56-49 | المراجع  |
| 84-57 | الفصل الثالث التخزين الحراري   |
| 58    | مقدمة  |
| 58    | 1.III أهمية أنظمة تخزين الحرارة في تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP) |



## فهرس المحتويات

|        |   |
|--------|---|
| 59     | 2.III. وسائط التخزين  |
| 59     | 3.III. تطبيق تخزين الحرارة على CSPs   |
| 60     | 1.3.III. تخزين الحرارة المحسوس (SHS)  |
| 63     | 2.3.III. التخزين الكيميائي الحراري THS  |
| 64     | 3.3.III. تخزين الحرارة الكامنة (LHS)  |
| 67     | 4.III. تصنيف مواد تخزين الطاقة  |
| 68     | 1.4.III. معايير اختيار المواد متغيرة الطور  |
| 70     | 2.4.III. مفاهيم واستخدام المواد متغيرة الطور (PCMs)                               |
| 71     | 3.4.III. المواد متغيرة الطور (PCMs)   |
| 72     | 4.4.III. تصنيف المواد متغيرة الطور (PCMs)   |
| 73     | 1.4.4.III. PCMs غير العضوية inorganiques  |
| 74     | 2.4.4.III. PCMs العضوية organiques  |
| 76     | الخاتمة   |
| 83-77  | المراجع   |
| 511-84 | الفصل الرابع الدراسة التجريبية والنمذجة   |
| 85     | مقدمة   |
| 85     | 1.IV. الدراسات المرجعية السابقة   |
| 89     | 2.IV. تصميم المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC)                             |
| 90     | 3.IV. مراحل تصميم وإنجاز المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ                      |
| 93     | 4.IV. المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ مقترن مع التخزين الكامن للطاقة الحرارية |
| 93     | 1.4.IV. مراحل الإعداد التجريبي  |
| 94     | 2.4.IV. وصف النظام أثناء مرحلة الشحن  |

## فهرس المحتويات

|         |  |
|---------|--|
| 95      | 5.IV. الموازنة الحرارية للـ PTC المنجز تجريبيا   |
| 96      | 6.IV. الدراسة التحليلية ونمذجة التخزين الحراري   |
| 96      | 1.6.IV. الموازنة الطاقوية لمكونات الـ PTC  |
| 96      | 1.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة لمائع نقل الحرارة $f$   |
| 98      | 2.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة للأنبوب الماص $r$   |
| 100     | 3.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة للظرف الزجاجي $e$   |
| 102     | 7.IV. الإشعاع الحراري  |
| 103     | 8.IV. المماثلة الكهربائية للنظام المدرس  |
| 104     | 9.IV. المعالجة الرقمية للمعادلات التفاضلية   |
| 109     | الخاتمة  |
| 115-110 | المراجع  |
| 137-116 | الفصل الخامس مناقشة النتائج  |
| 117     | مقدمة  |
| 117     | 1.V. الحل العددي لجملة المعادلات   |
| 118     | 2.V. تأكيد صدقية برنامج المحاكاة   |
| 119     | 3.V. تغيرات درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص (التجريبية) خلال مرحلة الشحن  |
| 120     | 4.V. النتائج التجريبية   |
| 120     | 5.V. مرحلة الشحن   |
| 120     | 1.5.V. تغيرات درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص (التجريبية) خلال مرحلة الشحن  |
| 122     | 2.5.V. تغيرات درجات حرارة الماء و الهواء داخل خزان التخزين الحراري التجريبية خلال مرحلة الشحن في حالة عدم استعمال مواد التخزين (وجود الهواء) |
| 122     | 3.5.V. تأثير التدفق الكتلي للماء على درجات الحرارة خلال مرحلة الشحن (المحاكات)   |

## فهرس المحتويات

|         |  |
|---------|--|
| 131     | 6.V. مرحلة التفريغ   |
| 131     | 1.6.V. تغيرات درجات حرارة الماء (التجريبية) في الخزان أثناء مرحلة التفريغ في حالة عدم استعمال مواد التخزين (وجود الهواء) |
| 132     | 2.6.V. تأثير استخدام الحصى على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ                                    |
| 133     | 3.6.V. تأثير استخدام الرمل على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ                                    |
| 134     | 4.6.V. تأثير استخدام شمع البرافين على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ                             |
| 135     | 5.6.V. مقارنة تأثير استخدام مختلف المواد على تغيرات درجات حرارة الماء (التجريبية) أثناء مرحلة التفريغ                    |
| 136     | الخاتمة  |
| 137     | المراجع  |
| 140-138 | الخاتمة العامة والتوصيات   |
| -       | الملاحق  |

## قائمة الأشكال

| الصفحة | عنوان الشكل  | رقم الشكل |
|--------|--|-----------|
| 11     | أبعاد وموضع الشمس والأرض [1].  | 1-1       |
| 13     | حركة الأرض بالنسبة للشمس [1].  | 2-1       |
| 14     | زاوية الارتفاع الشمسي و الذروة و السميت الرأسى (معلم سطح أرضي) [1].          | 3-1       |
| 15     | زاوية الساعة الشمسية و دائرة العرض للمنطقة [4].                              | 4-1       |
| 16     | بيان تغيرات التصحيح الزمني خلال أيام السنة [8].                              | 5-1       |
| 17     | الكتلة الهوائية الضوئية [1].   | 6-1       |
| 20     | مخطط يوضح وصول الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض [1].                             | 7-1       |
| 21     | التشبع الشمسي: (أ)- بمحور ( شرق - غرب )، (ب)- بمحور ( شمال - جنوب ) .        | 8-1       |
| 22     | زاوية ورود الشمس على سطح الفتحة.   | 9-1       |
| 22     | إسقاطات الشعاع الوارد للشمس على سطح الفتحة (التتبع بمحور دوران واحد).        | 10-1      |
| 23     | التحويل من محور التتبع إلى المعلم السطح ارضي.                                | 11-1      |
| 27     | تقنيات الطاقة الشمسية المركزة المختلفة ونسب التثبيت المرتبطة بها [13]، [14]. | 12-1      |
| 27     | نظام عاكس فرينل الخطي.   | 13-1      |
| 28     | نظام برج الطاقة المركزي.   | 14-1      |
| 29     | نظام الصحن القطع مكافئ.  | 15-1      |
| 30     | المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC) .                                  | 16-1      |
| 42     | مخطط ال PTC  | 1-2       |
| 44     | زاوية الحافة و زاوية القبول ل PTC [16]                                       | 2-2       |
| 61     | تغير الطاقة المخزنة بدلالة درجة الحرارة.                                     | 1-3       |
| 63     | آلية التخزين الكيميائي الحراري.  | 2-3       |
| 65     | آلية التخزين الحراري الكامن.   | 3-3       |
| 67     | تصنيف مواد تخزين الطاقة [10]، [11].  | 4-3       |

## قائمة الأشكال

|     |   |      |
|-----|---|------|
| 68  | مبدأ عمل PCM [12].  | 5-3  |
| 73  | 3 تصنيف المواد متغيرة الطور (PCMs).   | 6-3  |
| 90  | تصميم ال PTC المنجز.  | 1-4  |
| 91  | (أ) شمع البرافين المستخدم، (ب) خزان التخزين الحراري.  | 2-4  |
| 94  | التركيب التجريبي للمجمع الشمسي PTC المقترن بخزان التخزين الحراري لتعزيز تخزين الطاقة الحرارية الكامنة: (أ) الإعداد التجريبي، (ب) الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي. | 3-4  |
| 95  | مخطط التبادلات الحرارية للمجمع (PTC).   | 4-4  |
| 103 | مخطط الدارة المماثلة الكهربائية للنظام الحراري المدروس للمجمع (PTC).  | 5-4  |
| 108 | المخطط الأنسيابي للبرنامج العددي.   | 6-4  |
| 118 | قيم الإشعاع الشمسي التجريبي وقيم المحاكاة.  | 1-5  |
| 119 | تغيرات درجة حرارة مخرج الأنبوب الماص التجريبية والمحاكاة.   | 2-5  |
| 121 | تغيرات درجة حرارة مخرج الأنبوب الماص.   | 3-5  |
| 122 | تغيرات درجات حرارة الماء و الهواء.  | 4-5  |
| 123 | تأثير التدفق الكتلي على تغيرات درجات الحرارة: (أ) $kg/s0.1$ و (ب) $kg/s0.05$ .  | 5-5  |
| 124 | مقارنة تغيرات درجات حرارة الماء بالنسبة لتدفقين مختلفين.  | 6-5  |
| 125 | تغيرات كسب الحرارة المفيدة مع مرور الزمن في غياب مادة التخزين (وجود الهواء).  | 7-5  |
| 126 | تغيرات كسب الحرارة المفيدة مع مرور الزمن في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).   | 8-5  |
| 127 | تباين الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة مع مرور الوقت: (أ) في غياب مادة التخزين (وجود الهواء) و (ب) في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).                             | 9-5  |
| 128 | تغيرات الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).  | 10-5 |
| 129 | تباين كفاءة الشحن مع مرور الوقت في غياب مادة التخزين (وجود الهواء).   | 11-5 |
| 130 | تباين كفاءة الشحن مع مرور الوقت في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).  | 12-5 |
| 131 | تباين درجات الحرارة مع مرور الزمن في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).  | 13-5 |
| 132 | تأثير استخدام الهواء على تغيرات القيم التجريبية لدرجات حرارة الماء أثناء مرحلة التفريغ.   | 14-5 |
| 132 | تأثير استخدام الحصى على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.   | 15-5 |
| 133 | تأثير استخدام الرمل على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.   | 16-5 |
| 134 | تأثير استخدام شمع البرافين على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.  | 17-5 |
| 135 | مقارنة تأثير استخدام مختلف المواد على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.   | 18-5 |

## قائمة الجداول

| الصفحة | عنوان الجدول   | رقم الجدول |
|--------|--|------------|
| 12     | الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض [12].  | 1-1        |
| 19     | قيم معامل الاضطراب وارتفاع الماء المكثف.   | 2-1        |
| 31     | مقارنة بين مختلف تقنيات الطاقة الشمسية المركزة [17].   | 3-1        |
| 64     | الخصائص الأساسية لمواد التخزين المحسوس الصلبة [2].   | 1-3        |
| 64     | الخصائص الأساسية لمواد التخزين المحسوس السائلة [2].  | 2-3        |
| 66     | مواد التخزين الحراري الكيميائي و التفاعلات [2]، [6].   | 3-3        |
| 77     | الخصائص الحرارية والفيزيائية لبعض المواد ذات تغيير الطور غير العضوية inorganiques.           | 4-3        |
| 78     | مواد عضوية ذات استخدام محتمل كمواد تخزين الحرارة (PCM).                                      | 5-3        |
| 78     | الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض البارافينات.   | 6-3        |
| 91     | الخصائص الحرارية والفيزيائية ل PCM المستعمل ومائع التشغيل [16].                              | 1-4        |
| 92     | أبعاد ومعلمات PTC.   | 2-4        |
| 92     | أبعاد الخزان الحراري.  | 3-4        |
| 136    | مدة استغلال الماء عند مجال الاستخدام المنزلي أثناء مرحلة التفريغ باستخدام مواد تخزين مختلفة. | 1-5        |

## قائمة الرموز والاختصارات

### قائمة الرموز

| الرمز                 | المقدار الفيزيائي             | الوحدة في النظام الدولي |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <b>A<sub>ap</sub></b> | مساحة الفتحة                  | m <sup>2</sup>          |
| <b>A</b>              | زاوية السميت الرأسي           | °                       |
| <b>A<sub>f</sub></b>  | معامل التراجع الهندسي         | /                       |
| <b>AM</b>             | الكتلة الهوائية الضوئية       | /                       |
| <b>C<sub>f</sub></b>  | معامل الاحتكاك                | /                       |
| <b>C<sub>g</sub></b>  | التركيز الهندسي للمركز الشمسي | /                       |
| <b>C<sub>p</sub></b>  | السعة الحرارية                | $\frac{J}{K \cdot kg}$  |
| <b>D</b>              | القطر                         | m                       |
| <b>Et</b>             | معادلة التصحيح الزمني         | min                     |
| <b>E</b>              | السمك                         | m                       |
| <b>F</b>              | معامل الشكل                   | /                       |
| <b>F</b>              | البعد البؤري                  | m                       |
| <b>G</b>              | شدة الإشعاع الشمسي الكلي      | W/m <sup>2</sup>        |
| <b>H</b>              | زاوية الإرتفاع الشمسي         | درجة°                   |
| <b>h<sub>c</sub></b>  | معامل إنتقال الحرارة          | W/(m <sup>2</sup> ·K)   |
| <b>I</b>              | شدة الإشعاع الشمسي المباشر    | W/m <sup>2</sup>        |
| <b>L</b>              | زاوية خط الطول للمنطقة        | °                       |
| <b>m·</b>             | التدفق الكتلي                 | Kg/s                    |
| <b>N<sub>j</sub></b>  | رقم اليوم من السنة            | /                       |
| <b>Nu</b>             | رقم نوسلت اللابعدي            | /                       |
| <b>Pr</b>             | رقم برانتل اللابعدي           | /                       |
| <b>Q</b>              | التدفق الحراري                | W                       |
| <b>Ra</b>             | رقم رايلي اللابعدي            | /                       |
| <b>Re</b>             | رقم رينولدز اللابعدي          | /                       |
| <b>R</b>              | المقاومة الحرارية             | m <sup>2</sup> ·K/W     |
| <b>T</b>              | درجة الحرارة                  | °C                      |

## قائمة الرموز والاختصارات

|                                  |                             |                                |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| h                                | التوقيت الشمسي الحقيقي      | <b>TVS</b>                     |
| h                                | التوقيت العالمي             | <b>TU</b>                      |
| W/(m <sup>2</sup> .K)            | معامل الضياع الحراري        | <b>U<sub>L</sub></b>           |
| m/s                              | سرعة الرياح                 | <b>V</b>                       |
| m                                | عرض فتحة المجمع الشمسي      | <b>W</b>                       |
| /                                | معامل الامتصاص              | <b><math>\alpha</math></b>     |
| °                                | زاوية ميلان المجمع عن الأفق | <b><math>\beta</math></b>      |
| /                                | معامل الاعتراض              | <b><math>\gamma</math></b>     |
| °                                | زاوية الميل الشمسي          | <b><math>\delta</math></b>     |
| /                                | معامل الانبعاث              | <b><math>\epsilon</math></b>   |
| °                                | زاوية الذروة                | <b><math>\theta_Z</math></b>   |
| °                                | زاوية الحافة                | <b><math>\theta_R</math></b>   |
| m <sup>2</sup> /s                | اللزوجة الحركية للمائع      | <b><math>\vartheta</math></b>  |
| Kg/m.s                           | اللزوجة التحريكية للمائع    | <b><math>\mu</math></b>        |
| Kg/m <sup>3</sup>                | الكتلة الحجمية              | <b><math>\rho</math></b>       |
| /                                | معامل الانعكاس              | <b><math>\rho^\circ</math></b> |
| W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> | ثابت بولتزمان               | <b><math>\sigma</math></b>     |
| /                                | معامل النفاذية              | <b><math>\tau</math></b>       |
| °                                | زاوية دائرة العرض للمنطقة   | <b><math>\varphi</math></b>    |
| /                                | المردود                     | <b><math>\eta</math></b>       |
| W/m.K                            | معامل التوصيل الحراري       | <b><math>\lambda</math></b>    |
| J                                | كمية الحرارة                | <b><math>\phi</math></b>       |



## قائمة الرموز والاختصارات

### الإختصارات

| الاختصار    | المعنى بالعربية                | المعنى بالانجليزية               |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>CFD</b>  | تحليل حسابي لديناميك الموائع   | Computational fluid dynamics     |
| <b>CRS</b>  | نظام المستقبل المركزي          | Central Receiver Systems         |
| <b>CSP</b>  | مركزات الطاقة الشمسية          | Concentrating Solar Power        |
| <b>DP</b>   | الصحن القطع مكافئ              | Parabolic Dish                   |
| <b>DSG</b>  | توليد البخار المباشر           | Direct Steam Generation          |
| <b>HCE</b>  | العنصر الجامع للحرارة          | Heat Collection Element          |
| <b>HTF</b>  | المائع الناقل للحرارة          | Heat Transfer Fluid              |
| <b>IR</b>   | تحت الحمراء                    | Infrared                         |
| <b>LFR</b>  | عاكس فرينل الخطي               | Linear Fresnel Reflector         |
| <b>MCRT</b> | طريقة مونتج كارلو لتتبع الأشعة | Monte Carlo Rays Tracking        |
| <b>PTC</b>  | المجمع الأسطواني القطع مكافئ   | Parabolic Trough Collector       |
| <b>PV</b>   | الكهروضوئية                    | Photovoltaic                     |
| <b>SEGS</b> | نظام توليد الكهرباء الشمسية    | Solar Electric Generating System |
| <b>SWH</b>  | تسخين المياه بالطاقة الشمسية   | Solar Water Heating              |
| <b>UV</b>   | الفوق بنفسجي                   | Ultraviolet                      |

## قائمة الرموز والاختصارات

### الدليل (الأحرف السفلية)

| الرمز          | المعنى                |
|----------------|-----------------------|
| <b>A</b>       | الهواء                |
| <b>Amb</b>     | الهواء الجوي المحيط   |
| <b>Ap</b>      | فتحة المجمع الشمسي    |
| <b>C</b>       | الغطاء الزجاجي المسطح |
| <b>Conv</b>    | الحمل الحراري         |
| <b>Cond</b>    | التوصيل الحراري       |
| <b>E</b>       | الظرف الزجاجي         |
| <b>Eff</b>     | الفعال                |
| <b>Ext</b>     | الخارجي               |
| <b>F</b>       | المائع                |
| <b>G</b>       | الغاز                 |
| <b>I</b>       | الداخل                |
| <b>Int</b>     | الداخلي               |
| <b>Loss</b>    | الضياع الحراري        |
| <b>O</b>       | الخارج                |
| <b>Op</b>      | الضوئي                |
| <b>R</b>       | الأنبوب الماص         |
| <b>Rad</b>     | الإشعاع الحراري       |
| <b>Ref</b>     | العاكس                |
| <b>Sky</b>     | السماء                |
| <b>Support</b> | هيكل الدعم المعدني    |
| <b>Th</b>      | الحراري               |
| <b>U</b>       | المفيدة               |

المقدمة

العامّة

يعد الاحتباس الحراري أحد أكبر التحديات التي يواجهها العالم والبشرية حاليًا. ونظراً لخطورته، فقد تم توجيه الدراسات و الجهود في الأوساط الأكاديمية العلمية، الصناعية، السياسية وصناع القرار لمعالجة هذه المشكلة. أحد الإجراءات هو اتفاق باريس لعام 2016 [1] تنص المادة 2 من الاتفاقية على ما يلي:

- الحفاظ على زيادة الحرارة العالمية العامة دون 2°C درجة مئوية، فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية، والسعي للحد من زيادة الحرارة إلى 1.5 درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية، مدركين أن ذلك سيقبل بشكل كبير من مخاطر وتأثيرات التغير المناخي و الإحتباس الحراري.
- زيادة القدرة على التكيف مع الاثار السلبية للتغير المناخي وتعزيز القدرة على التكيف مع تغير المناخ. من خلال خفض انبعاثات الغازات الدفيئة بحيث لا تهدد إنتاج الغذاء.
- جعل التدفقات المالية متسقة مع الخطط و الإستراتيجيات المؤدية إلى خفض انبعاثات الغازات الدفيئة وقادرة على الصمود في وجه تغير المناخ.

وقد تم اعتبار زيادة استخدام الطاقة المتجددة طريقاً واضحاً لتحقيق أهداف تغير المناخ. ولتحقيق هذه الغاية، حددت وكالة الطاقة الدولية (IEA)، والوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) ولجان الطاقة الأخرى [1]، [4]. بعض التقنيات التمكينية الرئيسية لتنفيذ أهداف الطاقة المتجددة بما في ذلك تحسين توليد الطاقة بفعالية من حيث التكلفة. ومن بين تقنيات الطاقة المتجددة، تم استهداف الطاقة الشمسية باعتبارها واحدة من أكثر تقنيات الطاقة المتجددة الواعدة و المتمثلة في الطاقة الكهروضوئية أو الطاقة الشمسية الحرارية المركزة. لقد تطورت تقنيات الطاقة الشمسية منذ بداية استغلال الطاقة المتجددة في السبعينيات. حيث تمكنت محطات الطاقة الكهروضوئية (PV) من خفض التكلفة، والسعي للحصول على المزيد من الطاقة بواسطة الخلايا الشمسية الفعالة من حيث المردود و التكلفة، مما يسمح بتسريع فترات تركيب وتشغيل المحطة [5]. و ظهر ذلك من خلال النمو السريع خلال القرن الماضي، خاصة في آسيا وأوروبا [6]. وعلى العكس من ذلك، ارتفع سوق الطاقة الشمسية

المركزة تدريجيًا في السنوات الأخيرة، خاصة في إسبانيا والولايات المتحدة [6]. تعتبر الطاقة الكهروضوئية أكثر فعالية من حيث التكلفة وكفاءة من محطات الطاقة الشمسية المركزة [5]، إلا أن محطات الطاقة الشمسية المركزة CSP يمكنها توفير طاقة إضافية وتوفير طاقة قابلة للتوزيع حسب الطلب باستخدام الحرارة المخزنة في أنظمتها المتكاملة مع تخزين الطاقة الحرارية من أجل انبعاثات أقل لثاني أكسيد الكربون.

استهدفت وكالة الطاقة الدولية (IEA) الطاقة الشمسية المركزة CSP باعتبارها تقنية ستلعب دورًا

كبيرًا في تطوير التقنيات المستقبلية لتوليد الطاقة [5]. وكما هو مذكور في خارطة وكالة الطاقة الدولية IEA.

يمكن أن توفر تكنولوجيا CSP 11.3% من الكهرباء العالمية، منها 9.6% من الطاقة الشمسية

و1.7% من الوقود الاحتياطي. وفقًا للمخططات والتقارير الأكثر تأثيرًا [6]، [7] التي نُشرت في العقود الأخيرة،

يجب أن تركز الجهود الرئيسية في مجال الطاقة الشمسية المركزة على تحسين قدرتها على تحويل الطلب على الحرارة

على مدار أيام أو أسابيع أو فصول. ويجب أن يتم هذا التحول بطريقة فعالة، من خلال مواد تخزين الطاقة الحرارية

TES، وإنشاء تكنولوجيا أنظمة TES فعالة من حيث التكلفة [3]. إن المعطيات الواردة في هذه التقارير

مشجعة و تدل على أهمية TES في تطوير CSP المستقبلية، مما أدى إلى تطوير تكنولوجيا قادرة على سد الفجوة

بين العرض / الطلب على الطاقة وتحسين إدارة الطاقة و كذلك أثناء غياب الشمس [8]. ويمكن أيضًا استخدام

أنظمة تخزين أخرى لمنح الطاقة الشمسية المركزة الإمكانيات اللازمة، مثل التخزين الكهربائي. إلا أن التخزين الكهربائي

(البطاريات) لم يصل بعد إلى حالة الجدوى الاقتصادية لتكوين السعات الكبيرة [9].

يتم التركيز في الوقت الحالي على مراجعة التقنيات المطبقة على أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES)

المتعلقة بالطاقة الشمسية المركزة [10]، تمت مراجعة تقنيات TES التي تستخدم مواد تغيير الطور لتوليد الطاقة

الشمسية المركزة، والتي تضم خمسة جوانب مختلفة وهي المواد المستخدمة، حالة البحث الحالية، النمذجة، دمج المواد

متغيرة الطور PCM والتكلفة. وأجرى Liu et al دراسات حول مواد تغيير الطور [11]، [12]. قاموا بدراسة

وفحص المواد المنشورة لتطبيقات درجات الحرارة المرتفعة، بما في ذلك CSP. كما قام J. Khan و [13] و M.H Arsalan. مراجعة تقنيات توليد الكهرباء بواسطة الطاقة الشمسية بشكل مستدام، وأشاروا إلى أن تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة، على الرغم من تكلفتها العالية، يمكن أن تحقق عوائد اقتصادية أعلى من التكنولوجيا الكهروضوئية [14].

الجزائر تمتلك موقعًا جغرافيًا مثاليًا من حيث إمكانية الاستفادة من الإشعاع الشمسي، حيث يتجاوز متوسط تدفق الطاقة الشمسية على سطح أفقي في الجنوب (الصحراء)  $2650\text{KWh/an/m}^2$ ، وتبلغ حوالي 3500 ساعة من التشميس في السنة. وتتميز هذه المنطقة بقلة عدد الأيام التي يكون فيها الطقس غائمًا (الملحق أ)، بالإضافة إلى انخفاض الرطوبة وندرة هطول الأمطار. وتوجد مساحات واسعة من الأراضي المستوية غير المستخدمة بالقرب من شبكة النقل والطرق.

البيئة الصحراوية لمنطقة ورقلة لها مناخ خاص، تهب فيها الرياح لفترات طويلة خلال السنة (الملحق أ)، ونتيجة لهذه الظروف، تعتبر تطبيقات CSPs هي الأقل تأثيرًا بهذا النوع من المناخ مقارنة بتطبيقات الطاقة الشمسية الكهروضوئية حيث تعتمد الخلايا الكهروضوئية على الإشعاع الشمسي المرئي وجزء صغير من الأشعة تحت الحمراء (IR). حيث تتأثر الخلايا الكهروضوئية بشكل كبير بالغبار المتواجد في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى تراجع مردودها إلى 50% [15].

أما تطبيقات الطاقة الشمسية الحرارية، فتعتمد على الأمواج الطويلة (تحت الحمراء) في توليد الطاقة الحرارية، وهذه الأمواج تكون أقل تأثيرًا بالغبار في الغلاف الجوي. ومع ذلك، يمكن أن يؤدي تواجد الغبار والأتربة إلى تراجع في الخواص الضوئية للعاكس والعنصر الجامع للحرارة (HCE) في هذه التطبيقات.

تستطيع محطات CSP إنتاج الطاقة الكهربائية وتغطية الطلب المحلي كمثال محطة الأغواط تنتج ما يفوق  $280\text{MWh}$  كمتوسط من الكهرباء بإستطاعة  $60\text{MW}$  يوميًا، لكن عند غياب الشمس في الليل أو

بسبب الغيوم فأنها تشتغل بالطاقة الأحفورية مما يجعلها محطات هجينة. ومن أجل تفادي ذلك توجهت الدراسات إلى التخزين الحراري للطاقة الشمسية خلال فترة سطوع الشمس قصد استغلالها في غياب الشمس.

في هذه الأطروحة، تم إنشاء وتركيب العمل التجريبي المتكون من مركز أسطواني مكافئ مقترن بخزان ذو جدار مزدوج للتخزين الحراري. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم الأداء الحراري للمجمع الشمسي الأسطواني القطع المكافئ في حالة غياب التخزين أو في حالة إقترانه بالتخزين الحراري باستخدام مواد مختلفة (الحصى، الرمل، شمع البرافين). حيث يتم ملء التجويف الموجود داخل الخزان في كل مرة بمادة التخزين الحراري. تمتص مادة التخزين الحرارة من الماء الذي يدور وفق دورة مغلقة من المجمع إلى الخزان والعكس خلال النهار وفق تدفق محدد لسائل نقل الحرارة لتخزين الطاقة الشمسية للاستخدام مرة أخرى لتعويض التقطع أثناء غياب الشمس.

بالإضافة إلى ذلك قمنا بإعداد نموذج للمحاكاة العددية للـ (PTC)، وقمنا بتأكيد صحة النموذج بمقارنة النتائج النظرية مع التجريبية، ثم من خلال النموذج الرياضي قمنا بتسجيل درجات حرارة خروج الماء، لاستغلالها للأغراض المنزلية، وذلك من أجل أبعاد PTC مناسبة و مادة تخزين مناسبة.

وتضمنت هذه الدراسة خمسة فصول، خصصنا الفصل الأول للإشعاع الشمسي، حيث تطرقنا إلى المركبات الشمسية عموماً والمقارنة بينها بالإضافة إلى الزوايا الشمسية و التتبع الشمسي، معادلات تقديرشدة الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض، ثم في الفصل الثاني تطرقنا للمركز الأسطواني القطع مكافئ PTC حيث عرضنا نظرة عامة حول محطات الطاقة الشمسية المركزة التجارية الأسطوانية ذات القطع المكافئ PTC، ثم التعرف على مختلف مكونات الـ PTC وهندسته ثم النمذجة الحرارية لمختلف مكوناته وفي الأخير الدراسة التحليلية ونمذجة التخزين الحراري، ثم خصصنا الفصل الثالث للتخزين الحراري، حيث تطرقنا إلى أهمية أنظمة التخزين في تقنيات CSPs، وسائط التخزين وكذا تطبيق تخزين الحرارة مع CSP وأنواع التخزين بالإضافة إلى تصنيف مواد التخزين وفي الأخير تطرقنا إلى المواد متغيرة الطور (مفهومها، إستخداماتها وتصنيفها)، ثم في الفصل الرابع تطرقنا للدراسة التجريبية، حيث

## المقدمة العامة

---

بدأنا بدراسة مرجعية سابقة تستعرض أهم النتائج التي توصلت لها مختلف الدراسات في إطار تحسين أداء PTC المقترن بالتخزين الحراري، ثم تطرقنا الى التصميم والإنجاز التجريبي للـ PTC، وتم فيه إظهار كيفية التصميم والإنجاز وآلية العمل التجريبي وأخذ القياسات، تناولنا في الفصل الخامس والأخير مناقشة النتائج التجريبية بعد تأكيد صدقيتها مع النتائج النظرية، ثم الخروج بخلاصة وآفاق وتوصيات.



- [1] R. S. Dimitrov, “The Paris Agreement on Climate Change.” 2016, doi: [https://doi.org/10.1162/GLEP\\_a\\_00361](https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00361).
- [2] R. G. Dolf Gielen, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D. Bazilian, Nicholas Wagner, “Dolf Gielen2019.pdf,” *Energy Strateg. Rev. J.*, vol. 24, pp. 38–50, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
- [3] “study on the dual-use potential of key enabling technologies (KETs),” 2017.
- [4] G. Christiansen, B. Murray, *Energy Storage Study (A storage market review and recommendations for funding and knowledge sharing priorities)*. 2015.
- [5] “IEA Technology Roadmaps Agence Internationale de l’Energie.” pp. 1–52, 2010, doi: <https://doi.org/10.1787/9789264088139-en>.
- [6] G. Brinkman et al., “Grid Modeling for the SunShot Vision Study,” 2012.
- [7] M. Mehos et al. “Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap,” Nrel/Tp-5500-67464. pp. 1–140, 2017, doi: 10.2172/1338899.
- [8] H. Zhang et al., “Stable colloids in molten inorganic salts,” *Nature*, vol. 542, no. 7641. pp. 328–331, 2017, doi: 10.1038/nature21041.
- [9] D. O. Akinyele and R. K. Rayudu, “Review of energy storage technologies for sustainable power networks,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 8, pp. 74–91, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.07.004.
- [10] B. Xu, P. Li, and C. Chan, “Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments,” *Applied Energy*, vol. 160. Elsevier Ltd, pp. 286–307, 15–Dec-2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.016.
- [11] M. Liu et al., “Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1411–1432, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>.
- [12] M. M. Kenisarin, “High-temperature phase change materials for thermal energy storage,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3. pp. 955–970, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.011.
- [13] J. Khan, “Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55. pp. 414–425,

- 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.135.
- [14] A. Hussain, S. M. Arif, and M. Aslam, “Renewable and Sustainable Energy Reviews journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser) Emerging,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 71, no. June 2015. pp. 12–28, 2017.
- [15] . N. L. and R. Shaharin A. Sulaiman, “Effects of Dust on the Performance of PV Panels,” World Academy of Science, Engineering and Technology . pp. 588–593, 2011.

الفصل الأول

الإشعاع الشمسي

والمركبات الشمسية

مقدمة

تتميز أنظمة الطاقة الشمسية المركزة (CSP) بتركيز الإشعاع الشمسي باستخدام مجموعة من المرايا على مستقبل، حيث يتم امتصاص الإشعاع وتحويله إلى حرارة. يعد استخدام تقنية CSP لإنتاج الكهرباء هو التطبيق الأكثر نضجًا.

سنتعرف في هذا الفصل على تقدير الإشعاع الشمسي من خلال الزوايا الشمسية واحداثيات المنطقة والمعاملات الجوية والفلكية للمركبات الشمسية التي تشتغل من خلال تركيز الإشعاع الشمسي نحو سطح استقبال (البؤرة) يمتص الحرارة، وبذلك ترتفع درجة حرارة المائع الناقل للحرارة (HTF). حيث سنتعرف في هذا الفصل على مختلف أنواع المركبات الشمسية والمقارنة بينها من حيث درجات حرارة التشغيل والتركيز الهندسي والمردود، كما سنتعرف بالتفصيل على المركز الأسطواني القطع مكافئ مكوناته وطريقة عمله وهندسة بنائه.

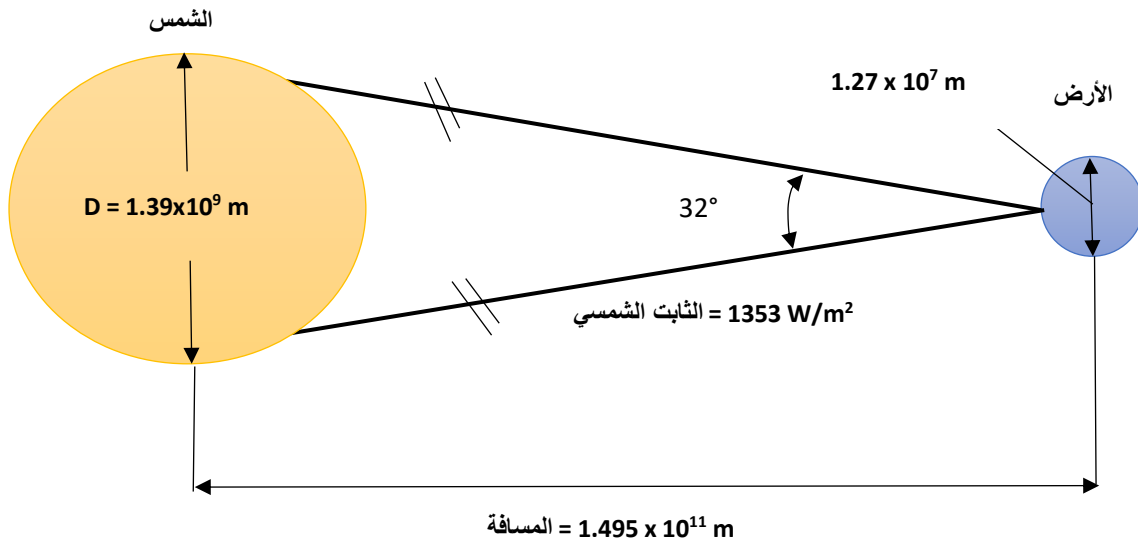
### 1.1. الإشعاع الشمسي

تعتبر الشمس مصدر معظم الطاقات على الأرض إن توليد الطاقة الشمسية يحدث نتيجة لعملية الاندماج الحراري في أنوية الهيدروجين حيث تتحول إلى أنوية هيليوم بفقدان كتلي يبلغ حوالي 4 مليون طن في الثانية. ونتيجة لهذه العملية، تنتج كمية هائلة من الطاقة تقدر بـ  $3.8 \times 10^{26}$  W، والتي توافق كثافة طاقة تقدر بحوالي  $63 \text{ MW/m}^2$ . القرص الأرضي يعترض هذا التدفق الإشعاعي بمتوسط يبلغ 1360 واط/متر مربع في الجزء العلوي من الغلاف الجوي، ويتم انعكاس جزء من هذا الإشعاع أو امتصاصه بواسطة الغلاف الجوي، و يصل جزء من هذه الطاقة إلى سطح الأرض بمعدل حوالي  $1 \text{ KW/m}^2$  ويستغرق الوصول إليها حوالي 8 دقائق و20 ثانية [1]. يمكن تقسيم الإشعاع الشمسي المتساقط على الأرض إلى نوعين: الأول يأتي مباشرة من القرص الشمسي ويُعرف بالإشعاع المباشر، والثاني ينتج عن تشتت الإشعاع بواسطة السحب أو الجسيمات العالقة في الهواء ويُعرف بالإشعاع المنتشر [18]. يمكن اعتبار الشمس جسمًا أسود درجة حرارة سطحها تقدر بحوالي

5000K ، في حين أن درجة حرارة مركزها تتراوح بين  $(8 \times 10^6 - 40 \times 10^6)$  درجة مئوية. الشمس تشع بالطاقة (باعتبارها جسم أسود) ووفق علاقة قانون ستيفن [1].

$$\phi = \sigma T_S^4 4\pi R_S^2 \quad (1 - 1)$$

حيث  $R_S$  نصف قطرها و  $T_S$  درجة حرارة سطحها.



الشكل 1-1: أبعاد وموضع الشمس والأرض [1]

ويقدر القطر الظاهري للشمس من سطح الأرض  $32$  درجة كما هو موضح في الشكل 1-1

وتصل الطاقة الشمسية إلى الأرض على شكل إشعاع كهرومغناطيسي ذي أطوال موجية تتراوح بين  $(0.3 - 3)$

$\mu\text{m}$ ، الأشعة فوق بنفسجية (أقل من  $0.38 \mu\text{m}$ ) والأشعة المرئية  $(0.38 - 0.78 \mu\text{m})$  والأشعة تحت

الحمراء (أكثر من  $0.78 \mu\text{m}$ ). معظم هذه الطاقة تتركز في الإشعاع المرئي والأشعة تحت الحمراء ذات الطول

الموجي القريب من المرئي كما يوضح الجدول 1-1:

الجدول 1-1: الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض [12].

| المجال                  | الطول الموجي (μm) | النسبة % | شدة الإشعاع الشمسي W/m <sup>2</sup> |
|-------------------------|-------------------|----------|-------------------------------------|
| الأشعة فوق البنفسجية UV | > 0.38            | 7        | 95                                  |
| الأشعة المرئية Visible  | 0.78 - 0.38       | 47.29    | 640                                 |
| الأشعة تحت الحمراء IR   | 3.0 - 0.78        | 45.71    | 618                                 |

### 1.1.1.I. الثابت الشمسي

هو شدة تدفق الإشعاع الشمسي التي يتلقاها كل 1m<sup>2</sup> خارج الغلاف الجوي للأرض، بحيث تكون عمودية على أشعة الشمس والمسافة بين الأرض والشمس. عند قيمتها المتوسطة خلال السنة والمقدرة بحوالي 1.5×10<sup>8</sup> Km تعطى قيمة الثابت الشمسي المقاسة من طرف Gueymard في 2004 [2]. بـ

$$I_0 = 1366.1 \text{ W/m}^2$$

بينما تعطى خلال أيام السنة بعلاقة التصحيح للثابت الشمسي [3]، [4]:

$$I = I_0 \left[ 1 + 0.034 \cos \left[ (N_j - 2) \frac{360}{365} \right] \right] \quad (1 - 2)$$

حيث: N<sub>j</sub> يمثل رقم اليوم من السنة الشمسية (N<sub>j</sub> = 1, 2, ..., 365).

### 2.I. الزوايا الشمسية

شدة الإشعاع الشمسي في نقطة معينة على سطح الأرض تتأثر بحركة الأرض النسبية حول الشمس

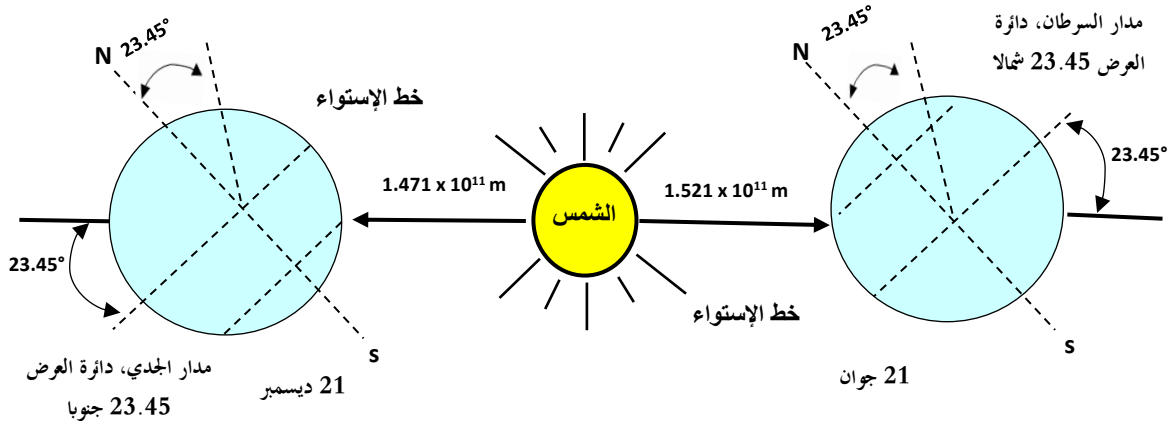
وهذا يتم تحديده بواسطة الزوايا الشمسية:

#### 1.2.I. زاوية الميل الشمسي

تدور الأرض حول الشمس في مسار إهليلجي، حيث تستغرق دورة كاملة حوالي 365.25 يوماً.

وفي تاريخ 21 ديسمبر، تكون المسافة بين الأرض والشمس في أدنى قيمتها، والتي تبلغ حوالي 1.47×10<sup>11</sup>m.

بينما تبلغ المسافة الأقصى في 21 جوان، وتكون قيمتها حوالي 1.52 × 10<sup>11</sup>m [5].



الشكل 1-2: حركة الأرض بالنسبة للشمس [1]

يصنع محور دوران الأرض حول نفسها مع الناظم على المستوى الاهليلجي (مستوى دوران الأرض

حول الشمس) زاوية ميل  $\delta$  تتغير قيمتها بين  $23.45^\circ$  و  $-23.45^\circ$  على مدار السنة الشكل 1-2:

تعطى عبارة زاوية الميل الشمسي بدلالة أيام السنة بالعلاقة [4]:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \frac{360}{365} (284 + N_J) \quad (1 - 3)$$

حيث تكون في أقصى قيمة لها في الانقلابين  $23.45^\circ$  (في 21 جوان الانقلاب صيفي) و  $-23.45^\circ$

(في 21 ديسمبر الانقلاب شتوي). بينما تكون معدومة  $(\delta) = 0$  في الاعتدالين الخريفي في 21 سبتمبر و الربيعي

في 21 مارس. كما يمكن تتبع حركة الشمس من الشروق للغروب في نقطة ما من سطح الأرض من خلال زاويتي

الارتفاع  $h$  والسمت  $a$ .

### 2.2.1. زاوية الارتفاع $h$

هي الزاوية التي يصنعها الشعاع الشمسي الوارد إلى نقطة من سطح الأرض مع المستوى الأفقي المار

بها حيث تكون  $h=0$  عند الشروق والغروب كما يبين الشكل 1-4 وتعطى بالعلاقة:

$$\sin h = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos w \quad (1 - 4)$$

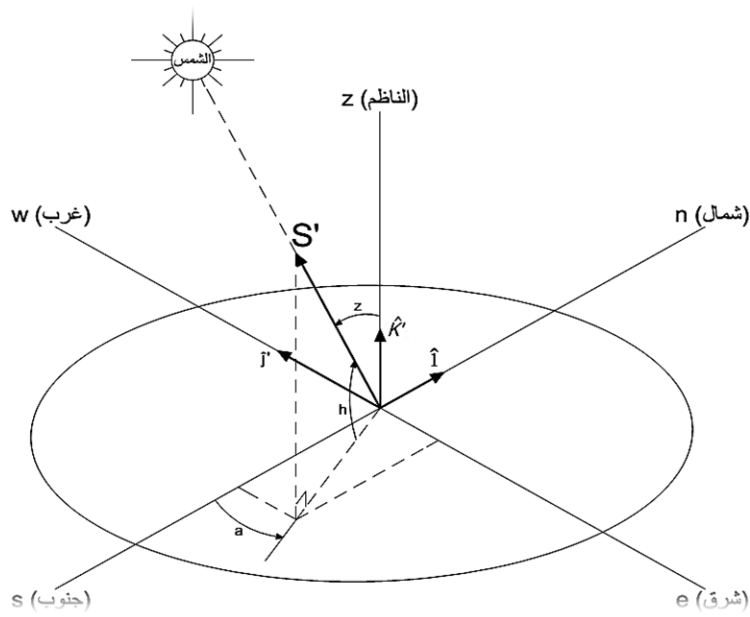
حيث  $\varphi$  زاوية خط العرض للمنطقة و  $w$  زاوية الساعة الشمسية.

### 3.2.I. زاوية الذروة $\theta_z$

هي الزاوية بين الشعاع الشمسي الوارد للنقطة من سطح الأرض والناظم على المستوى الأفقي في

تلك النقطة كما يبين الشكل 3-1 حيث:

$$\theta_z + h = 90^\circ \quad (1 - 5)$$



الشكل 3-1: زاوية الارتفاع الشمسي و الذروة و السميت الرأسية (معلم سطح أرضي) [1].

### 4.2.I. زاوية السميت الرأسية $a$

هي الزاوية التي يصنعها مسقط الشعاع الوارد للنقطة من سطح الأرض على المستوى الأفقي مع

المحور المتجه للجنوب عند هذه النقطة، تكون هذه الزاوية موجبة إذا كانت نحو الغرب وتكون سالبة إذا كانت نحو

الشرق كما يبين الشكل 3-1، وتعطى بالعلاقة [6]:

$$\cos a = \frac{\sin h * \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h * \cos \varphi} \quad (1 - 6)$$



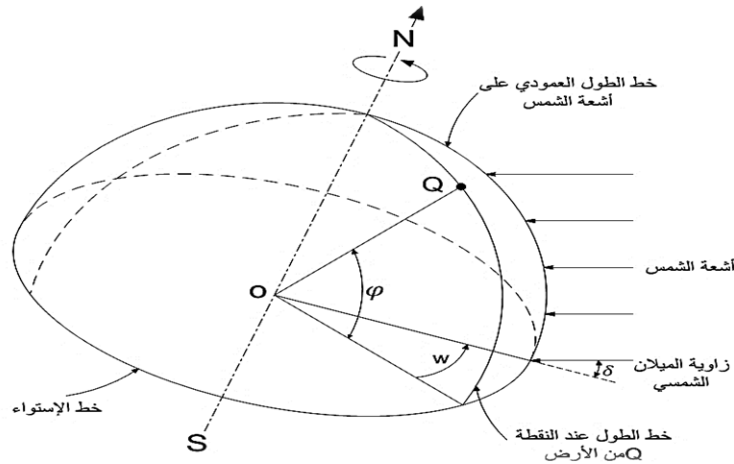
5.2.I. زاوية الساعة الشمسية  $w$

دوران الأرض حول نفسها يجعل الإشعاع الشمسي يمسح دورة كاملة حول الأرض خلال 24h وفق دائرة العرض، أي  $15^\circ$  لكل ساعة، مع اعتبار الزوال هو المبدأ ( $w=0$ )، وتعطى عبارة زاوية الساعة الشمسية بالعلاقة:

$$w = 15(TV_s - 12) \quad (1 - 7)$$

حيث  $TV_s$  يمثل التوقيت الشمسي الحقيقي الذي يعتمد الزوال الشمسي في المنطقة ( $w=0$ ) عند الساعة

12:00 زوالاً. وتكون  $w > 0$  مساءً بينما تكون  $w < 0$  صباحاً، الشكل 4-1.



الشكل 4-1: زاوية الساعة الشمسية و دائرة العرض للمنطقة [4].

6.2.I. زاوية دائرة العرض للمنطقة  $\phi$

وتمثل الزاوية التي يصنعها الإشعاع الناظم على سطح الأرض في المنطقة مع الإشعاع الناظم على سطح الأرض في خط الاستواء المتواجد في نفس خط الطول مع المنطقة. حيث تكون الزاوية موجبة إذا كانت المنطقة شمال خط الاستواء بينما تكون سالبة إذا كانت المنطقة جنوب خط الاستواء الشكل 4-1.

حيث التوقيت الشمسي الحقيقي ( $TV_s$ ) يتعلق بالتوقيت المحلي للمنطقة ويظهر ذلك في العلاقة التالية:

$$TV_s = TU + E_t + \frac{L}{15} \quad (1 - 8)$$

TU: التوقيت العالمي (خط الزوال المار عبر غرينيتش greenwich)

$E_t$ : معادلة التصحيح الزمني

L: خط الطول للمنطقة حيث  $L > 0$  شرقاً و  $L < 0$  غرباً .

### 3.I معادلة التصحيح الزمني $E_t$

بسبب العوامل المرتبطة بمدار الأرض حول الشمس، تختلف السرعة المدارية للأرض على مدار العام،

لذلك يختلف التوقيت الشمسي الظاهري قليلاً عن متوسط الوقت الذي تحتفظ به الساعة التي تعمل بمعدل

منتظم. ويسمى الاختلاف معادلة التصحيح الزمني ( $E_t$ ). لأن طول اليوم، أي الزمن الذي تحتاجه الأرض

لإكمال دورة واحدة حول محورها بالنسبة إلى الشمس، ليس منتظماً على مدار العام [7]. يمكن الحصول على قيم

معادلة التصحيح الزمني كدالة بدلالة مختلف أيام السنة ( $N_j$ ) تقريباً من المعادلات التالية

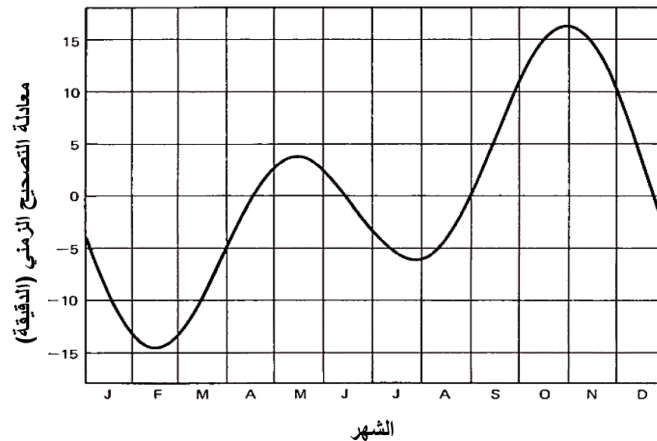
حيث تعطى بدقة 30 ثانية خلال النهار بالدقائق:

$$E_t = 0.258 \cos B - 7.416 \sin B - 3.648 \cos 2B - 9.228 \sin 2B \quad (1 - 9)$$

والزاوية  $B$  مقدرة بالدرجات.

$$B = \frac{360(N_j - 1)}{365.242} \quad (1 - 10)$$

يوضح البيان الشكل 1-5 تغيرات التصحيح الزمني بدلالة أيام السنة



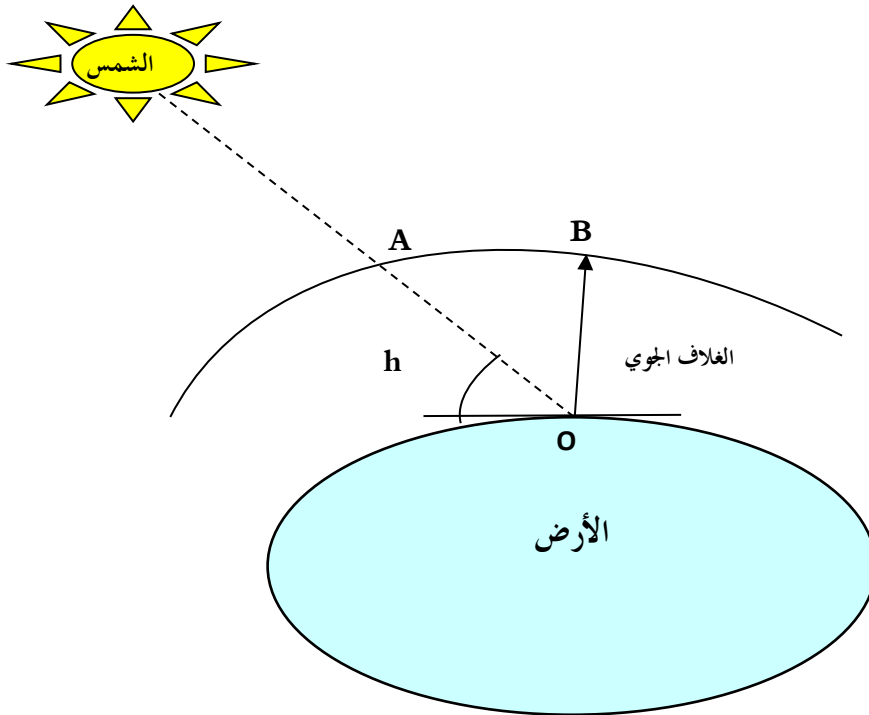
الشكل 1-5: بيان تغيرات التصحيح الزمني خلال أيام السنة [8].

### 4.I. الكتلة الهوائية الضوئية AM

الكتلة الهوائية الضوئية هي النسبة بين المسافة التي يسلكها الضوء داخل الغلاف الجوي للوصول إلى سطح الأرض والمسافة عندما تكون الشمس ناضمية على الموقع، وذلك باعتبار الموقع على مستوى سطح البحر كما هو موضح في الشكل 1-6. تكون AM=1 عندما تكون الشمس عمودية على الموقع ( $h=90^\circ$ ) ويتم حسابها وفقاً

للعلاقة التالية:

$$AM = \frac{OA}{OB} = \frac{1}{\sin h} \quad (1 - 11)$$



الشكل 1-6: الكتلة الهوائية الضوئية [1].

### I.5. الإشعاع الشمسي على سطح الأرض

الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض يتم امتصاص جزء منه من قبل مكونات الغلاف الجوي، ويتناثر جزء آخر بسبب الانعكاسات على السحب والعوالق الصلبة مثل الغبار. وبهذا يصل الجزء الباقي من الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض مباشرة، كما هو موضح في الشكل 1-7.

#### I.5.1. الإشعاع المباشر

تعطى عبارة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد من الشمس إلى سطح الأرض ناظميا بعد اختراقه

للغلاف الجوي بالعلاقة [21]:

$$I_b = I[a_0 + a_1 e^{-K \cdot AM}] \quad (1 - 12)$$

حيث  $a_0$  و  $a_1$  و  $K$  ثوابت تجريبية تعطى من طرف Duffie و Beckman بالعلاقات التالية [8]:

$$a_0 = 0.94[0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2] \quad (1 - 13)$$

$$a_1 = 0.98[0.5055 - 0.00595(6.5 - Z)^2] \quad (1 - 14)$$

$$K = 1.02[0.2711 - 0.01858(2.5 - Z)^2] \quad (1 - 15)$$

حيث:

$Z$ : ارتفاع المنطقة فوق سطح البحر معبرا عنها بـ Km.

$AM$ : الكتلة الهوائية الضوئية.

$I$ : الثابت الشمسي.

في حالة الإشعاع الشمسي المباشر الذي يرد بزاوية  $i$  على سطح مائل تعطى عبارته بالعلاقة:

$$I_{bt} = I_b \cos i \quad (1 - 16)$$

### 2.5.I. الإشعاع الشمسي المنتشر

ينتج عن تشتت الإشعاع الشمسي بفعل مكونات الغلاف الجوي وتعطى عبارته في حالة سطح

أفقي بالعلاقة [1]:

$$I_d = I \sin h [0.2710 - 0.2939(a_0 + a_1 e^{-K.AM})] \quad (1 - 17)$$

الإشعاع المنتشر لا يتأثر بتصميم وتركيز PTC بخلاف الإشعاع المباشر.

### 3.5.I. الإشعاع الكلي

هو مجموع الإشعاع المباشر والمنتشر ويحسب في حالة الإشعاع ناظمي  $i = 0$  بالعلاقة:

$$G = (1270 - 56T_L)(\sin h)^{\frac{T_L+36}{33}} \quad (1 - 18)$$

$T_L$ : معامل عكورة الجو وتعطى صيغته:

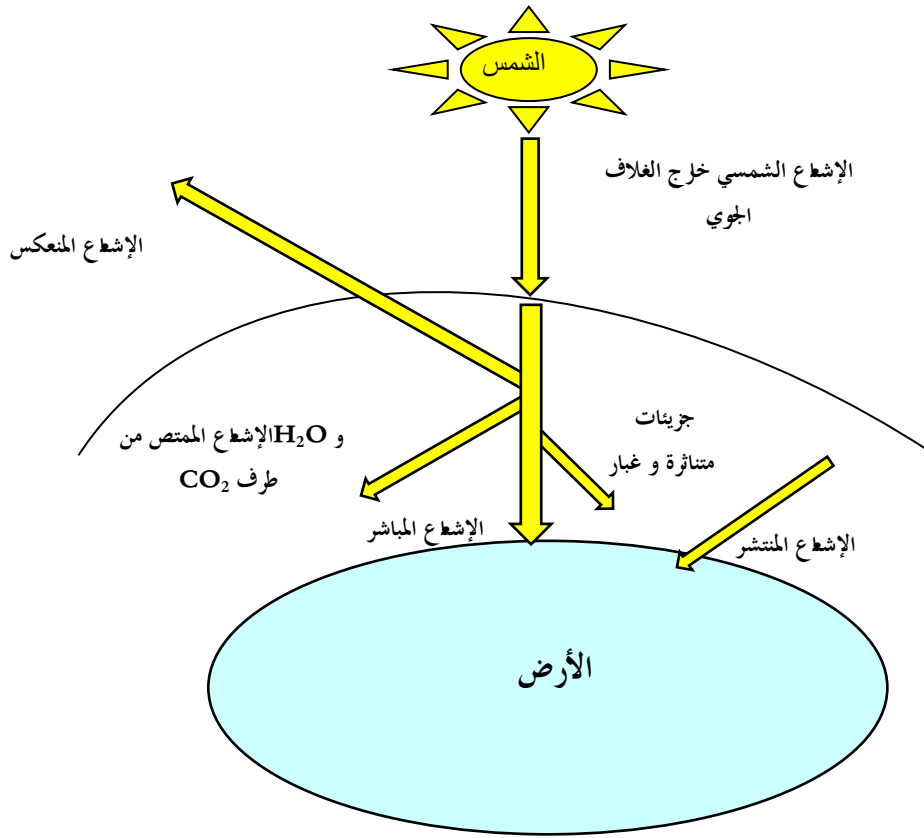
$$T_L = 2.5 + 16\beta_A + 0.5 \ln \omega \quad (1 - 19)$$

$\beta_A$ : معامل أنغيشتروم و  $\omega$  ارتفاع الماء المكثف وقيمهما تتغير حسب الحالة الجوية

كما هو موضح في الجدول 2-1.

الجدول 2-1: قيم معامل الاضطراب وارتفاع الماء المكثف.

| سما مضطربة | سما صافية | سما متوسطة |           |
|------------|-----------|------------|-----------|
| 0.2        | 0.05      | 0.1        | $\beta_A$ |
| 5 cm       | 1 cm      | 2 cm       | $\omega$  |



الشكل 1-7: مخطط يوضح وصول الإشعاع الشمسي الى سطح الارض [1].

## 6.I. التتبع الشمسي

نظرًا لتغير موقع الشمس بالنسبة لسطح الأرض خلال اليوم وخلال أيام السنة، فإنه علينا تتبع توجيه سطح الفتحة باستمرار لتوجيهه نحو الإشعاع الشمسي للحصول على أقصى تدفق للطاقة الشمسية، وذلك لزيادة أداء النظام الشمسي والمردود الضوئي  $\eta_{op}$ . يوجد نوعان من التتبع:

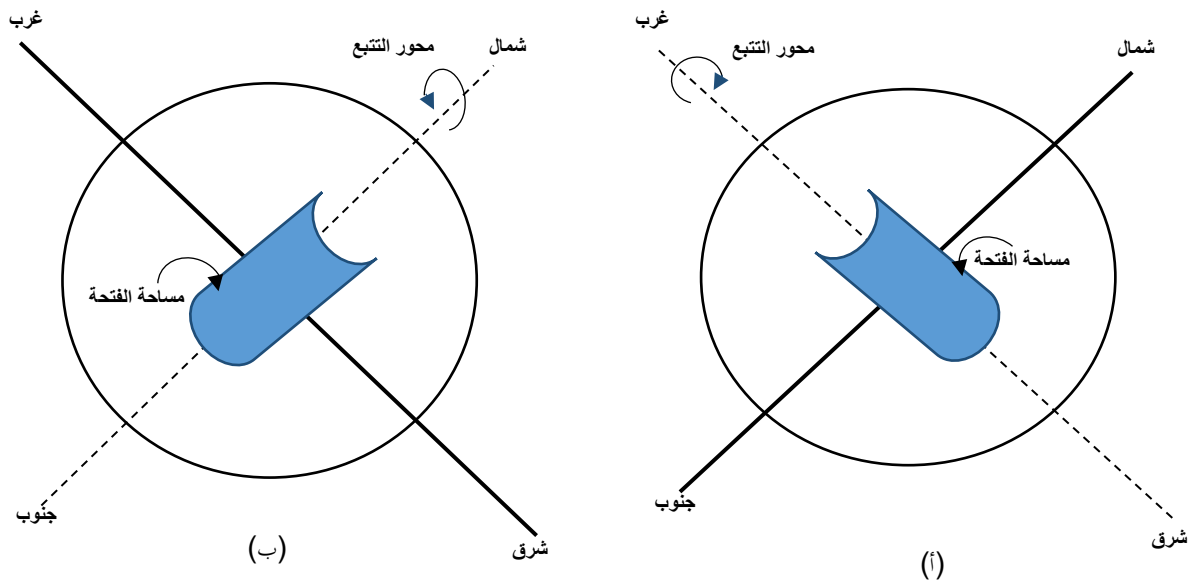
### 1.6.I. التتبع الشمسي بمحوري دوران

حيث يتم تحريك المجمع أفقياً نحو سمت الشمس وعمودياً نحو ارتفاع الشمس، بحيث تبقى أشعة الشمس دوماً ناظمية على سطح الفتحة، وبالتالي يكون المردود الضوئي  $\eta_{op}$  في قيمته العظمى. لكن هذه الحالة

لا تستخدم في أنظمة (PTC) نظرا لكونها تتطلب طول كبير مما يعيق إمكانية الحركة أفقيا، كما أن هذا النوع من التتبع يستهلك طاقة غير مبررة [9]، [10].

### 2.6.I. التتبع الشمسي بمحور دوران واحد

فيها يتم تحريك المجموع عموديا نحو ارتفاع الشمس بحيث تبقى أشعة الشمس دوما تقع في المستوى الناظمي على سطح الفتحة، وبذلك تحسین وزيادة قيمة المردود الضوئي  $\eta_{op}$  وهي المستعملة في أنظمة (PTC)، لكونها غير مكلفة وهناك نوعين (شمال - جنوب) أو (شرق - غرب) كما يوضحه الشكل 8-1 أدناه. يتم التتبع بحيث تكون أشعة الشمس واقعة في المستوي العمودي على سطح فتحة المجموع والذي يشمل محور التتبع.

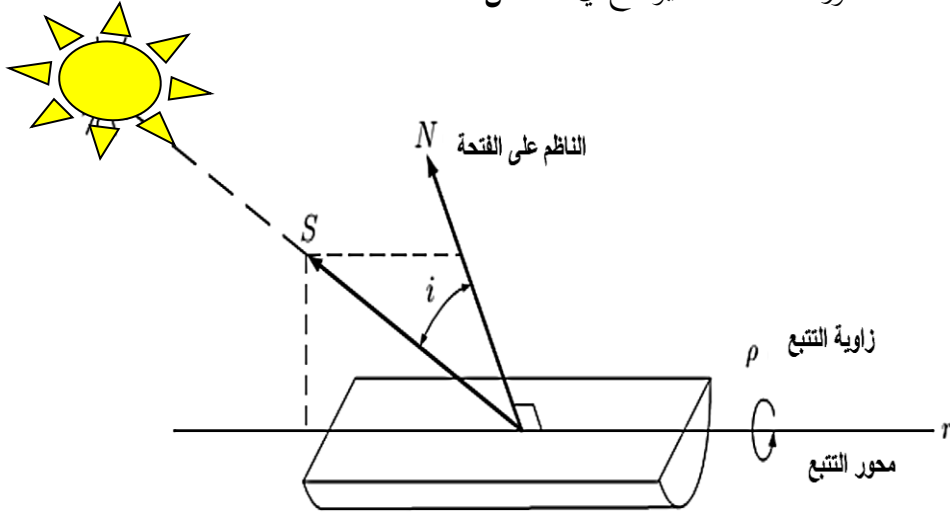


الشكل 8-1: التتبع الشمسي: (أ) - بمحور (شرق - غرب)، (ب) - بمحور (شمال - جنوب).

يتم التتبع بحيث تكون أشعة الشمس واقعة في المستوي العمودي على سطح فتحة المجموع والذي يشمل محور التتبع.

للتعبير عن زاوية التتبع ( $\rho$ ) وزاوية الورود ( $i$ ) في كل لحظة، يتعين علينا التحول إلى نظام إحداثيات حيث يكون

محور التتبع ( $r$ ) أحد المحاور الثلاثة، كما يُوضح في الشكل 9-1.



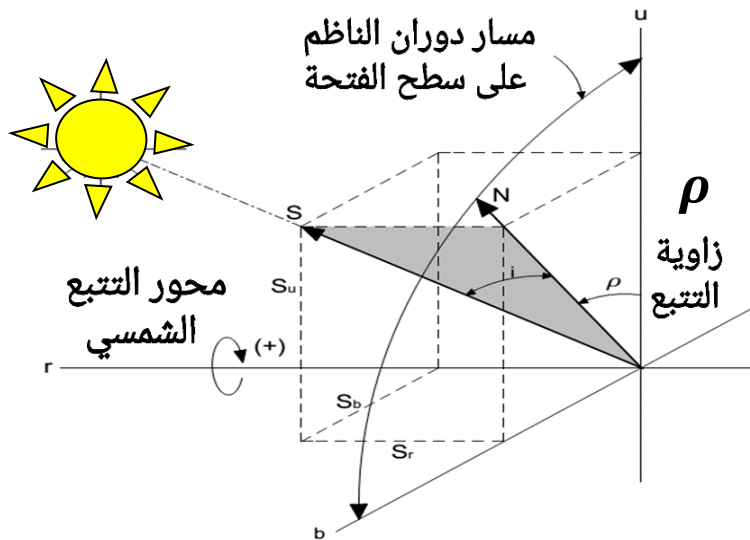
الشكل 9-1: زاوية ورود الشمس على سطح الفتحة.

في حالة محور التتبع الأفقي ( $r$ ) وعند اعتماد المحور ( $b$ ) كمحور موازي لسطح الأرض والعمودي

على المحور ( $r$ )، بينما المحور ( $u$ ) هو المحور العمودي على مستوى هذين المحورين، كما يُوضح ذلك في

الشكل 10-1. نلاحظ أن الشعاع الناظمي على سطح الفتحة ( $N$ ) تقوم بالدوران أثناء عملية التتبع في

المستوى ( $U-b$ ).



الشكل 10-1: إسقاطات الشعاع الوارد للشمس على سطح الفتحة (التتبع بمحور دوران واحد).



ومن خلال الشكل 10-1 تكتب عبارتي زاوية الورود  $i$  وزاوية التتبع  $\rho$  كما يلي:

$$\tan \rho = -\frac{S_b}{S_u} \quad (1 - 20)$$

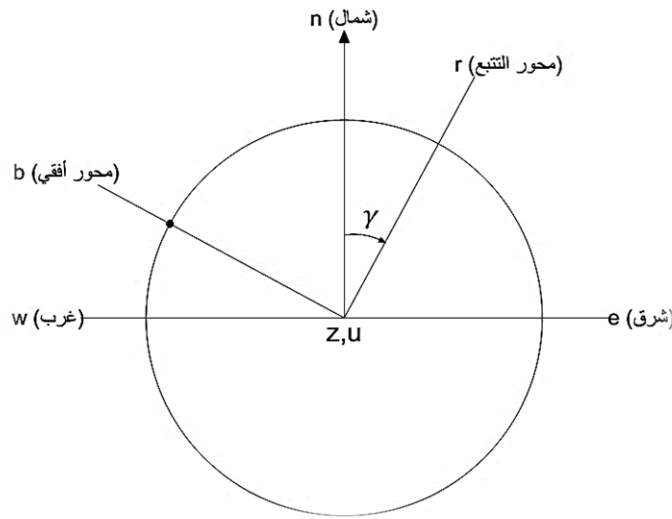
$$\cos i = \sqrt{S_b^2 + S_u^2} \quad (1 - 21)$$

$$\cos i = \sqrt{1 - S_r^2} \quad (1 - 22)$$

في حالة محور التتبع (شمال - جنوب) أفقي مائل عن المحور بزاوية  $\gamma$ .

لوصف هذه الحالة نقوم بتدوير المعلم  $(r, b, u)$  بزاوية  $\gamma$  بالنسبة للمعلم  $(n, w, z)$  بحيث يبقى المحورين  $z$  و  $u$

منطبقين كما يبين الشكل 11-1.



الشكل 11-1: التحويل من محور التتبع الى المعلم السطح ارضي.

من (الشكل 11-1) نكتب علاقة التحويل بين المعلمين حيث محور التتبع أفقي:

$$\begin{vmatrix} S_r \\ S_b \\ S_u \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} S'_i \\ S'_j \\ S'_k \end{vmatrix} \quad (1 - 23)$$

ثم نتحصل على عبارة زاوية التتبع ( $\rho$ ) التالية:

$$\tan \rho = \frac{\sin(\gamma - a)}{\tan h} \quad (1 - 24)$$

زاوية الورود (i) بالنسبة للتتبع الأفقي بمحور دوران واحد تعطى بالعلاقة التالية:

$$\cos i = \sqrt{1 - \cos^2 h \cos^2(\gamma - a)} \quad (1 - 25)$$

في حالة محور التتبع (شمال - جنوب) أي أن الزاوية  $\gamma = 0$ . تصبح العلاقات السابقة كما يلي:

$$\tan \rho = -\frac{\sin a}{\tan h} \quad (1 - 26)$$

$$\cos i = \sqrt{1 - \cos^2 h \cos^2 a} \quad (1 - 27)$$

في حالة محور التتبع (شرق - غرب) أي أن  $\gamma = 90^\circ$ . تصبح العلاقات السابقة كما يلي:

$$\tan \rho = \frac{\cos a}{\tan h} \quad (1 - 28)$$

$$\cos i = \sqrt{1 - \cos^2 h * \sin^2 a} \quad (1 - 29)$$

### I.3.6. حالة تثبيت المجموع الشمسي (عدم التتبع)

في هذه الحالة، يمكن التعبير عن زاوية الورود (i) بين الشعاع الشمسي والناظم الواقع على سطح

فتحة المجموع الشمسي باستخدام مجموعة من الزوايا. تتمثل هذه الزوايا في: دائرة خط العرض للمنطقة، زاوية

الميلان الشمسي، وزاوية السميت، وزاوية الساعة الشمسية، وزاوية ميلان سطح المجموع الشمسي عن الأفق ( $\beta$ ).

يتم حساب هذه الزوايا وفقاً للمعادلة (1-30) أسفله [8].

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin \varphi (\sin \delta * \cos \beta + \cos \delta * \cos a * \cos w * \sin \beta) \\ & + \cos \varphi (\cos \delta * \cos w * \cos \beta - \sin \delta * \sin a * \sin \beta) \\ & + (\cos \delta * \sin a * \sin w * \sin \beta) \end{aligned} \quad (1 - 30)$$

في حالة ما إذا كان سطح الفتحة أفقي  $\beta = 0$  تصبح عبارة زاوية الورود:

$$\cos i = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos w \quad (1 - 31)$$

في حالة توجيه المجمع الشمسي نحو الجنوب (زاوية سمت المجمع معدومة  $a = 0$ ) حيث يميل عن

الأفق بزاوية  $\beta$ :

$$\cos i = \sin(\varphi - \beta) * \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) * \cos \delta * \cos \omega \quad (1 - 32)$$

في حالة امالة المجمع ومن أجل ميلان سطح اللاقط عن الأفق بزاوية  $(\beta = \varphi)$  ، و هي الزاوية

المناسبة للتثبيت على طول السنة تصبح العلاقة

$$\cos i = \cos \delta * \cos \omega \quad (1 - 33)$$

#### 4.6.I آليات التتبع للمجمعات الشمسية

هناك 3 آليات [11]:

- التتبع اليدوي: بالاعتماد على الظل.
- التتبع باستعمال برامج وحدة التحكم Control unit software: باستعمال صيغ رياضية للتنبؤ بحركة الشمس خلال مدة التشميس وبرمجتها من خلال برنامج لوغاريتمية يتم ربطها بدارات إلكترونية.
- التتبع باستخدام الألواح الكهروضوئية: وذلك من خلال لواقط استشعار لتقدير وضع الشمس خلال مدة التشميس.

#### 7.I مجمعات الطاقة الشمسية المركزة CSPs

هي نوع خاص من المجمعات الشمسية التي تحول طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة داخلية لوسيلة

النقل. المكون الرئيسي لأي نظام شمسي هو مجمع الطاقة الشمسية. هذا جهاز يمتص الإشعاع الشمسي الوارد،

ويجوله إلى حرارة، وينقل هذه الحرارة إلى سائل (عادة هواء، ماء، أو زيت) يتدفق عبر المجمع. يتم نقل الطاقة

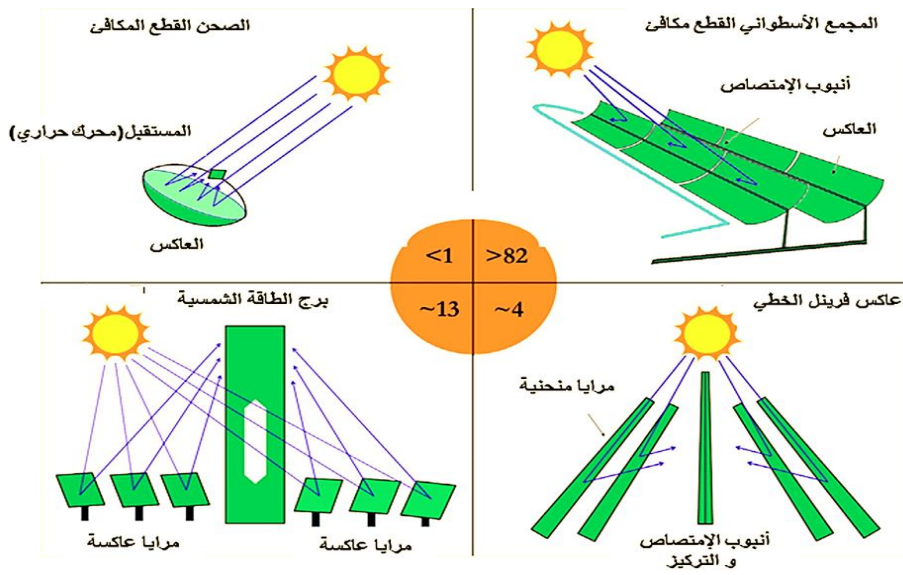
الشمسية التي يتم تجميعها بهذه الطريقة من السائل المتداول إما مباشرة إلى الماء الساخن أو معدات التكييف

(التبريد أو التسخين) أو إلى خزان تخزين الطاقة الحرارية التي يمكن سحبها لاستخدامها في الليل و/أو الأيام الملبدة بالغيوم.

هناك نوعان أساسيان من مجمعات الطاقة الشمسية: غير مركزة أو مركزة. يحتوي المجموع غير المركز على نفس المنطقة لاعتراض الإشعاع الشمسي وامتصاصه ، في حين أن المجموع الشمسي الذي يركز على تتبع الشمس عادةً ما يكون له أسطح عاكسة مقعرة لاعتراض وتركيز إشعاع حزمة الشمس على منطقة استقبال أصغر، وبالتالي زيادة تدفق الإشعاع [12].

نظرا لانخفاض كثافة الطاقة الشمسية على سطح الأرض يتم استخدام مساحة واسعة لتجميع تدفق الطاقة الشمسية، ثم تركيز الإشعاع الشمسي المباشر عن طريق عملية الانعكاس من قبل مجمعات الطاقة الشمسية على جهاز الاستقبال، الذي يمتص الطاقة الشمسية على شكل حرارة ثم يحولها إلى المائع الناقل للحرارة (HTF) ليتم إنتاج البخار المضغوط إما بشكل مباشر أو غير مباشر بواسطة المبادلات الحرارية ومن ثم يتم تدوير العنفات لتوليد الطاقة الكهربائية، وتشمل تكنولوجيات الطاقة الشمسية المركزة CSP، المركبات الشمسية الاسطوانية القطع مكافئة PTC، الأبراج الشمسية CRS، الصحن القطع مكافئ DP وعاكس فرينل الخطي LFR وتستخدم في هذه الأنظمة الزيوت الاصطناعية، الأملاح المنصهرة، البخار أو الهواء المضغوط كموائع نقل الحرارة.

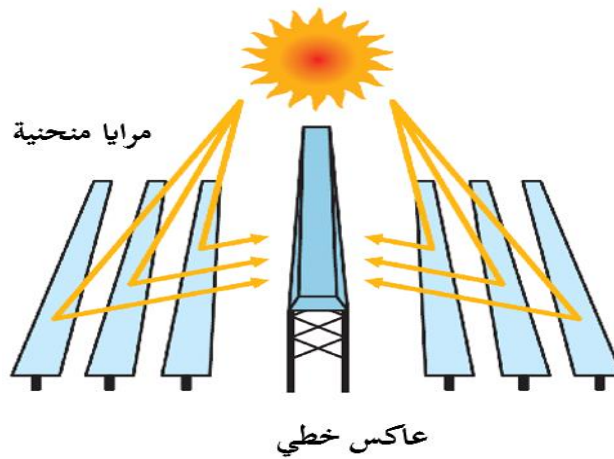
التقنيات الأربعة الرئيسية للطاقة الشمسية المركزة: الحوض الأسطواني القطع مكافئ، أنظمة فرينل الخطية، أنظمة البرج وأنظمة الأطباق. يتم عرض لمحة عامة عنها في الشكل 1-12، حيث تفوق نسبة استخدام تكنولوجيا PTC أكثر من 82% وهي الأعلى قيمة من بين التكنولوجيات الأخرى وتليه تكنولوجيا أبراج الطاقة بنسبة 13% ثم عاكس فرينل بـ 4% وأخيرا الصحن القطع مكافئ بأقل من 1% [13]، [14].



الشكل 1-12: تقنيات الطاقة الشمسية المركزة المختلفة ونسب التثبيت المرتبطة بها [13]، [14].

### 1.7.I. التقنيات الرئيسية للطاقة الشمسية المركزة

#### 1.1.7.I. نظام عاكس فريزل الخطي (LFR)



الشكل 1-13: نظام عاكس فريزل الخطي.

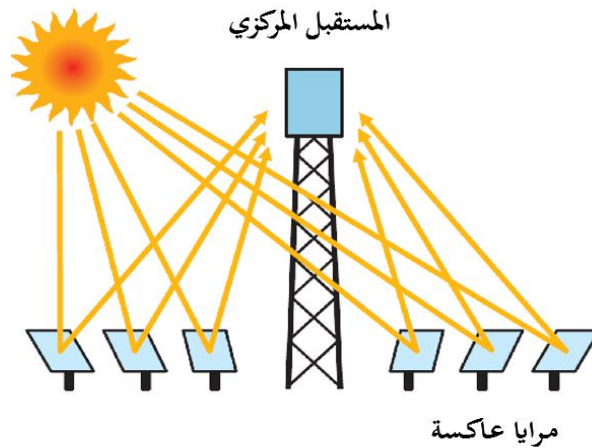
يتكون هذا النظام من مرايا مسطحة تعمل على توجيه وتركيز الإشعاع الشمسي نحو جهاز استقبال

خطي يقع على بعد بضعة أمتار فوق مجموعة المرايا الأولية. ولتحقيق هذا، يكون هناك حاجة إلى وجود مرآة

ثانوية فوق جهاز الاستقبال لإعادة توجيه الأشعة الضائعة. بدلاً لذلك، يمكن زيادة عرض جهاز الاستقبال عن طريق جعله يتكون من عدة أنابيب متوازية، ويمكن رؤية هذا في الشكل 1-13 [14].

### 2.1.7.I. نظام برج الطاقة المركزي (CRS)

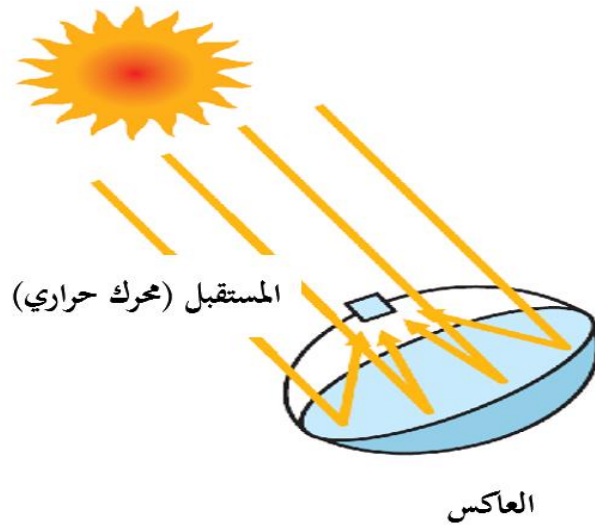
هذا النظام يتكون من مرايا مسطحة تغطي مساحات واسعة، وتوجه بدقة لتركيز الإشعاع الشمسي المباشر نحو جهاز استقبال مركزي. تكون هذه المرايا مزودة بنظام تتبع شمسي يعمل على توجيهها بشكل مستمر وفق محوري دوران. الطاقة الشمسية تتحول إلى حرارة عن طريق المستقبل المركزي، ومن ثم تنتقل إلى مائع نقل الحرارة (HTF) الذي عادةً ما يكون مزيج من الأملاح المنصهرة. يتم توليد البخار باستخدام مبادلات حرارية، وبعد ذلك يتم إنتاج الطاقة الكهربائية عن طريق دورة حرارية، وهذا موضح في الشكل 1-14 [14].



الشكل 1-14: نظام برج الطاقة المركزي.

### 3.1.7.I. نظام الصحن القطع المكافئ

هذا النظام يتضمن صحنًا عاكسًا بشكل قطع مكافئ، ويتم تثبيت جهاز الاستقبال في نقطة البؤرة النقطية للصحن. يتم تتبع حركة الشمس على محورين، حيث يتم تحويل الإشعاع الشمسي إلى حرارة بواسطة جهاز الاستقبال. هذا الجهاز يحتوي عادةً على غاز لتشغيل توربينات غازية، وذلك كما هو موضح أدناه في الشكل 1-15 [14].

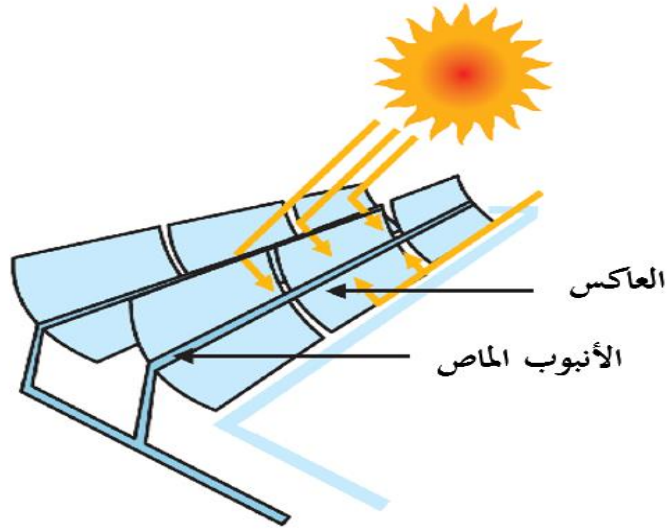


الشكل 1-15: نظام الصحن القطع مكافئ.

#### I.4.1.7.1 النظام الشمسي الأسطواني ذو القطع المكافئ

نظام الـ PTC يتكون من عاكسات طويلة ذات مقطع عرضي مكافئ، حيث تقوم بتركيز الإشعاع الشمسي على المحور البؤري الخطي الذي يُثبت عليه أنبوب امتصاص يصنع غالباً من النحاس أو الفولاذ المقاوم للصدأ، ويتم طليه بطبقة انتقائية. يُحاط هذا الأنبوب بأنبوب زجاجي، وفي بعض الأحيان يتم إفراغه من الهواء للحد من فقدان الحرارة. ويتم تزويد هذا النظام بنظام لتتبع الشمس على محور دوران واحد.

هذا النوع من المجمعات هي أنظمة ذات تكنولوجيا منخفضة التكلفة توفر درجات حرارة عالية بكفاءة جيدة. يتم وضع أنبوب معدني، مغطى بأنبوب زجاجي لتقليل فقد الحرارة، على طول الخط البؤري لجهاز الاستقبال الشكل 1-16. تم تصنيع العديد من النماذج الأولية وPTCs التجارية خلال العقود الأربعة الماضية وأجريت العديد من الدراسات التجريبية عليه [14].



الشكل 1-16: المجمع الشمسي الاسطواناني القطع مكافئ (PTC).

### 2.7.I. مقارنة بين التقنيات المختلفة

يعرض الجدول 3-1 مقارنة بين التقنيات المختلفة لمحطات الطاقة الشمسية المركزة. تُعدُّ محطات

توليد الطاقة البرجية ثاني أكثر التقنيات نضجًا وبدليًا للأسطوانانية القطع المكافئ [15]. تتمثل تكاليف تطوير

الطاقة الشمسية المركزة حاليًا في أن محطات الطاقة البرجية ومحطات الـ PTC هي الأكثر تكلفة، ومع ذلك،

يمكن أن تتغير هذه التكاليف في المستقبل بسبب التحسينات المستقبلية [16].

يوضح الجدول 3-1 مقارنة بين مختلف أنظمة التركيز الشمسي من حيث المميزات التشغيلية

بالإضافة إلى الإيجابيات والسلبيات لكل نظام.



الجدول 1-3: مقارنة بين مختلف تقنيات الطاقة الشمسية المركزة [17].

| نظام الصحن القطع المكافئ   | نظام عاكس فريزل الخطي                                   | نظام برج الطاقة المركزي  | الأسطواني القطع مكافئ   |                                 |
|--|---|--|---|---------------------------------|
| 1-0.01   | 250-5   | 100-10   | 250-10  | الاستطاعة (MW)                  |
| 300-1500   | 150-400   | 300-1200   | 300-550   | درجة حرارة التشغيل (°C)         |
| 3000   | 35-170  | 60-1000  | 50-90   | معامل التركيز الشمسي            |
| 16-29  | 08-12   | 10-22  | 10-16   | الكفاءة الكهربائية الشمسية (%)  |
| مرتفعة جدا   | مرتفعة  | مرتفعة   | ضعيفة   | التكلفة النسبية                 |
| ضعيفة  | متوسطة  | متوسطة   | مرتفعة  | قابلية الاستخدام الفعلي         |
| ضعيفة  | جد معتبرة   | جد معتبرة  | محدودة  | إمكانية التحسين (النضج التجاري) |
| . كفاءة عالية جدا<br>. قابلية فصل وتجميع مكوناته                               | . هيكل بسيط وسهل التنفيذ<br>. قابلية فصل وتجميع مكوناته | . أداء عالي<br>. درجة حرارة التشغيل مرتفعة<br>. تكلفة استثمار وصيانة عالية | . موثوقية ومتانة مثبتة على المدى الطويل<br>. قابلية فصل وتجميع مكوناته    | الايجابيات                      |
| . التخزين الحراري غير متاح بعد<br>. يحتاج الى التحسين<br>. يحتاج الماء لتنظيفه | . أداء ضعيف<br>. درجة حرارة تشغيل محدودة                | . يحتاج الماء لتنظيفه<br>. هيكل معقد                                       | . درجة حرارة تشغيل محدودة (400°C)<br>. هيكل معقد<br>. يحتاج الماء لتنظيفه | السلبيات                        |

توجد عدة مشاريع حول العالم تشتغل و أخرى قيد الإنشاء لاستغلال هذا النوع من الطاقة الشمسية المركزة [16] (الملحق ب).

### I.3.7. مبدأ عمل المركبات الشمسية.

الإشعاع الشمسي الساقط باتجاه الفتحة يتركز باستخدام سطح العاكس نحو سطح الامتصاص كجسم أسود. فيمتصه على شكل حرارة، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته. فتنقل هذه الحرارة إلى المائع الناقل للحرارة (HTF) عن طريق الحمل الحراري على شكل حرارة مفيدة. وفي الوقت نفسه، يتم فقد جزء من هذه الحرارة إلى الهواء الجوي المحيط عن طريق التوصيل والإشعاع على شكل ضياعات حرارية. وتتكون المجمعات الشمسية من ثلاثة أجزاء رئيسية:

- 1 - أداة تركيز الإشعاع الضوئي.
- 2 - أداة امتصاص الإشعاع.
- 3 - نظام لتتبع حركة الشمس للحفاظ على التوجيه والتركيز الأمثل.

### الخاتمة

يمكن زيادة شدة الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض ومضاعفته آلاف المرات من خلال المركبات الشمسية ذات التركيز الخطي أو النقطي من شروق الشمس إلى غروبها. بعد ذلك، يتم تحويل هذا الإشعاع الحراري باستخدام تقنيات CSP وذلك عن طريق عملية امتصاص الحرارة وتحويلها إلى المائع الناقل للحرارة. كما يمكن استغلال هذا المائع للاستعمال المنزلي. سنتعرف على المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ المدروس في الفصل القادم.

## المراجع

- [1] J. Goswami, D. Yogi, Kreith, Frank, Kreider, Principles of Solar Engineering, Third edit. Taylor & Francis, 2000.
- [2] C. A. Gueymard, “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models,” Sol. Energy, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>. vol. 76, pp. 423–453, 2004,
- [3] Y. B. et A. K.Mefti, “Analyse Critique du Modèle de l’Atlas Solaire de l’Algérie,” Renew. Energy, vol. 2, pp. 69–85, 1999.
- [4] N. AL-Rousan, M. Isa, and M. K. Desa, “Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82. pp. 2548–2569, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.077.
- [5] Zekai.Sen, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. 2008.
- [6] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edi. 2014.
- [7] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press, 2014.
- [8] E. Iqbal, “thermodynamic analysis of integrated renewable energy systems for sustainable building operation,” 2014.
- [9] H. Mousazadeh, A. J. , Alireza Keyhani, K. A. Hossein Mobli, and A. Sharif, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 13, pp. 1800–1818, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.01.022.
- [10] S. Koussa, A. Cheknane, S. Hadji, M. Haddadi, “M. Koussa2011.pdf,” Appl. Energy, vol. 88, pp. 1756–1771, 2011,

- doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.002.
- [11] M.F.R. Rubio, M. Ortega, F. Gordillo and Depto., “Application of new control strategy for sun tracking,” *Energy Convers. Manag.*, doi: 10.1016/j.enconman.2006.12.020.vol. 48, pp. 21–2184, 2007,
- [12] S. Kalogirou, “The potential of solar industrial process heat applications Soteris,” *Appl. Energy*, vol. 76, pp. 337–361, 2003, doi: doi:10.1016/S0306-2619(02)00176-9.
- [13] A. Vignarooban, Xinhai Xu, A. Arvay, K. Hsu, “Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review,” doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.125>. *Appl. Energy*, vol. 146, pp. 383–396, 2015,
- [14] A. Xinhai Xu, K. Vignarooban, Ben Xu, K. Hsu, “Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.015>. vol. 53, pp. 1106–1131, 2016,
- [15] G. Zhang, J. Baeyens, J. Degreve, “Concentrated solar power plants: Review and design methodology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* oi: [doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032). vol. 22, pp. 466–481, 2013.
- [16] J. Hernández-Moro and J. M. Martínez-Duart, “CSP electricity cost evolution and grid parities based on the IEA roadmaps,” *Energy Policy*, Doi: 10.1016/j.enpol.2011.10.032. vol. 41. pp. 184–192, 2012,
- [17] Xu, K. Vignarooban, B. Xu, K. Hsu, and A. M. Kannan, “Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions,”

Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 53. pp. 1106–1131, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.015.

- [18] A. Arousseau, “Modélisation dynamique et régulation des centrales solaires thermodynamiques linéaires à génération directe de vapeur To cite this version : HAL Id : tel-01373286,” École Nationale Supérieure des Mines d’Albi-Carmaux conjointement avec l’INP Toulouse, 2016.

# الفصل الثاني

## المجمع الأسطواني القطع

مكافئ PTC

## مقدمة

في هذا الفصل، سنتطرق الى نظرة عامة حول محطات الطاقة الشمسية الأسطوانية ذات القطع المكافئ (PTC) ذات التركيز الخطي موضوع دراستنا، حيث سوف نتطرق بالتفصيل إليه والتعرف على مختلف مكونات الـ PTC وهندسته ثم النمذجة الحرارية لمختلف مكوناته الشكل الهندسي له، التعرف على طرق التتبع المتبعة وتأثير زاوية الورود عليها مع مراعات الإمكانيات المتوفرة والتكاليف الناجمة عن تصنيعه وفي الأخير الدراسة التحليلية.

## 1.II. نظرة عامة حول محطات الطاقة الشمسية المركزة التجارية الأسطوانية ذات القطع

## المكافئ PTC

يتزايد الطلب على الطاقة في العالم بوتيرة سريعة بسبب التحضر والنمو الصناعي والسكاني [1] المصادر الرئيسية لإمدادات الطاقة هي الوقود الأحفوري ويتم تلبية ما يزيد عن 80% من احتياجات الطاقة في العالم من خلالها، إلا أن الوقود الأحفوري آخذ في النضوب وهو أيضاً المصدر الرئيسي لانبعاثات غازات الدفينة الكارثية [2]. حيث بلغت مساهمة الوقود الأحفوري في إمدادات الطاقة الأولية إلى 90% بحلول سنة 2020. [3]. إن استخدام الوقود الأحفوري في النقل وتوليد الكهرباء مسؤول عن حوالي 90% من ثاني أكسيد الكربون لانبعاثات [4] وسيساعد إدراج موارد الطاقة المتجددة في تقليل هذه الانبعاثات الكارثية بنسبة 30% بحلول عام 2050 مقارنة بعام 2012 [1]. زاد الإهتمام البحثي العالمي بتطوير تقنيات الطاقة المتجددة كونها صديقة للبيئة ومستدامة [5]، [6] من الممكن تلبية الطلب العالمي على الطاقة باستخدام مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2050، ولكنه يحتاج إلى اهتمام خاص من صناع السياسات [7]. تعتبر الطاقة الشمسية، نظراً لتوافرها بكثرة، مصدراً بديلاً محتملاً للطاقة الخضراء [8] يمكن استغلال الطاقة الشمسية باستخدام تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP) أو الخلايا الكهروضوئية [2]. إمكانية تخزين الطاقة الحرارية لتقنيات الطاقة

الشمسية المركزة يجعلها قابلة للتوزيع وبالتالي يمكن تحويل ساعات تشغيل المحطة أو تمديدتها بعد غروب الشمس أثناء ذروة الطلب على الأحمال [9].

تعمل محطات الطاقة الشمسية المركزة منذ عام 1980 [10]. وقد اكتسبت هذه التقنيات إنتشاراً واسعاً في السنوات الأخيرة، وكان من المتوقع أن يصل توليد الكهرباء السنوي من هذه التقنيات إلى 85 تيراواط ساعة بحلول عام 2020 [11]. وفقاً للسياسة الحالية لستة دول أوروبية بشأن تطوير تقنيات الطاقة الشمسية المركزة، من المتوقع أن تنتج إسبانيا والبرتغال وإيطاليا واليونان وفرنسا وقبرص 20 تيراواط ساعة من الكهرباء بحلول نهاية عام 2020 [11]. إن تقنيات الطاقة الشمسية المركزة قادرة على إنتاج الكهرباء على نطاق المرافق، لتوفير قدرة ثابتة وطاقة قابلة للتوزيع عند الطلب من خلال تكامل نظام تخزين الطاقة الحرارية (TES)، ونظراً لتحسن الكفاءة، فمن المتوقع أن تساهم محطات الطاقة الشمسية المركزة بنسبة 7% و25% بحلول عامي 2030 و2050 على التوالي [12] ومن المتوقع أن تصل القدرة الإجمالية لمشاريع الطاقة الشمسية المركزة إلى 83 جيجاوات بحلول عام 2030 و342 جيجاوات بحلول عام 2050، وستأتي الحصة الكبرى من ذلك من مناطق حزام الشمس مثل 50% من الشرق الأوسط، و30% من شمال أفريقيا، و15% من أوروبا [12] وفي عام 2012، أجرى البنك الدولي دراسة تفصيلية لمعرفة الإمكانيات المتاحة للطاقة الشمسية المركزة بناءً على المعايير الفنية والمالية [13]. واستناداً إلى سوق الطاقة وموارد الطاقة الشمسية المتاحة، حددوا جنوب أفريقيا والهند ومنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا كمنافسين جديدين لمشاريع الطاقة الشمسية المركزة. ومن المعتقد أنه سيتم استخدام تقنيات الطاقة الشمسية في المستقبل القريب لتصدير الكهرباء من منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا إلى أوروبا [11].

يُعد مجمع الحوض المكافئ (PTC) أكثر تقنيات الطاقة الشمسية المركزة نضجاً يعود تاريخ PTC إلى القرن التاسع عشر عندما تم تصميم أول مجمع عملي في عام 1870 لقيادة محرك صغير. لقد كان



نظامًا لتوليد البخار المباشر (DSG) حيث تم توليد البخار مباشرة في المجال الشمسي [14]. تعتمد معظم محطات الطاقة الشمسية المركزة الموجودة على تقنية PTC. تكتسب محطات الطاقة الشمسية المركزة القائمة على أبراج الطاقة الشمسية أيضًا سوقًا بفضل الأداء الحراري الأفضل [15] تحظى تقنية PTC بإنتشار واسع في محطات الطاقة الشمسية المركزة التجارية. لقد حققت تطورًا كبيرًا في جهاز الاستقبال والمكثف، واستخدام أنظمة TES واستخدام سوائل نقل الحرارة البديلة (HTFs) [16]. يتم تحديد كفاءة تقنية PTC من خلال المكثفات ذات الشكل المكافئ، وأنبوب الامتصاص.

في محطات PTC، تقوم المكثفات الكبيرة على شكل حرف U، والتي تسمى أحواض القطع المكافئ، بتركيز الإشعاع الشمسي على أنبوب الاستقبال لنقل الطاقة الحرارية إلى HTF مثل الزيت أو الهواء أو الماء.

إن مكثف الحوض المكافئ هو عبارة عن سطح من الألومنيوم أو زجاج مصقول للغاية يتمتع بكفاءة عاكسة تبلغ 88% أو 95% على التوالي [17]. يتم تثبيت هذه الأحواض (ألواح الألومنيوم أو المرايا) بواسطة هيكل دعم من الألومنيوم أو الفولاذ الطري [18].

يعتمد تصميم وحدة الحوض المكافئ الفردية على طول المرآة ومنطقة الفتحة. يتم ترتيب عدة وحدات في سلسلة لتكوين مجمع كبير جدًا. يتكون المجال الشمسي من عدة أحواض مكافئة مرتبة في صفوف متوازية موجهة عادة في المحور الشمالي الجنوبي. ويساعد هذا الترتيب الأحواض المكافئة على متابعة الشمس طوال الوقت باستخدام نظام تتبع أحادي المحور [2]. يعتمد عدد الصفوف المتوازية لهذه المجمعات الكبيرة على المساحة المتاحة للمجال الشمسي، وقدرة التعامل مع عزم الدوران في نظام التتبع، ومتطلبات الطاقة.

بشكل عام، تُستخدم أجهزة الاستقبال ذات الأنابيب المفرغة في محطات توليد الطاقة PTC. قام

M J Brooks و آخرون [19] بتقييم أداء PTC بنموذجين من أنابيب المستقبل، مع أنبوب مفرغ وآخر

غير مفرغ، وجد أن مستقبل الأنبوب المفرغ كان أكثر كفاءة بنسبة 1.4%. يعتمد أداء المجال الشمسي بشكل أساسي على نسبة الحرارة المنقولة إلى HTF والحرارة الساقطة على أنبوب الاستقبال على شكل إشعاع شمسي مركّز.

يركز العديد من الباحثين على تقنيات تحسين الأداء الحراري لزيادة نسبة نقل الحرارة من جهاز الاستقبال إلى HTF. بالإضافة إلى، تحقيق توزيع موحد للحرارة داخل أنبوب الامتصاص للحد من احتمالية الفشل بسبب الإجهاد الحراري خاصة في القسم السفلي من أنبوب الامتصاص. تتمثل أكثر أساليب زيادة الأداء الحراري مثمرة في إضافة إدخلات مختلفة ومحركات دوارة واستخدام السوائل النانوية. في حالة السوائل النانوية، يتم تشتيت الجسيمات النانوية في HTF لتعزيز التوصيل الحراري [20]. ومع ذلك، هناك العديد من التحديات المرتبطة بالتطبيق العملي للسوائل النانوية في المصانع التجارية مثل مشاكل التكتل وصعوبات التحضير والتكلفة العالية. لذلك، تبدو تقنيات إدراج التدفق والتعديل الهندسي خيارات أفضل وأكثر موثوقية لزيادة الأداء الحراري لـ PTC. أكثر إدراجات التدفق شيوعًا هي لفائف الأسلاك [21]، والإضافات المسامية مثل الأقراص والألواح والرغاوي [22].

تمت أيضًا دراسة التغيرات الهندسية في الجزء الداخلي من أنبوب الامتصاص في العديد من الدراسات البحثية. يقوم معظمهم بدراسة التعديلات في القسم السفلي من أنبوب الاستقبال لأن تركيز التدفق الحراري مرتفع جدًا في هذا الجزء وبالتالي هناك حاجة إلى معدل نقل حرارة أعلى في هذه المنطقة. التعديلات الشائعة هي الزعانف الطولية [23]. من أجل زيادة نسبة تركيز الإشعاعات الشمسية المنعكسة من المرايا ذات القطع المكافئ، يعد نظام تتبع الشمس ضروريًا. يساعد نظام التتبع على الحد من تأثير جيب التمام. ويتكون من أجهزة استشعار للكشف عن موضع الشمس ونظام ميكانيكي أو هيدروليكي لتتبع الشمس بشكل مستمر وهي تعمل في دائرة مغلقة الحلقة [24]. بناءً على أوضاع التتبع، يمكن تصنيف أنظمة التتبع إلى نوعين. التتبع بين

الشرق والغرب، حيث تتم محاذاة PTCs في المحور الشمالي الجنوبي وتتبع الشمال والجنوب حيث تتم محاذاة PTCs في المحور الشرقي الغربي [17].

وبما أن موارد الطاقة الشمسية متقطعة، فإن دمجها في نظام إمدادات الكهرباء الحالي يمثل تحديًا كبيرًا. لتحقيق فائدة عالية من توليد الطاقة الشمسية، من المهم جدًا أن تتزامن ساعات ذروة التوليد مع ساعات ذروة الطلب على الأحمال. نظرًا لأن ساعات ذروة التحميل تحدث عادةً في المساء، فإن خيار TES ضروري للاستفادة الكاملة من الطاقة الشمسية في ساعات عدم وجود شمس أو في ساعات ذروة التحميل. قام الباحثون في [25] بتحليل ملاءمة الطلب على الكهرباء (منحنى الحمل) مع توليد الطاقة الشمسية على أساس يومي وسنوي. وخلصوا إلى أن تخزين الطاقة مهم جدًا لتلبية الطلب اليومي على الكهرباء وله أيضًا تأثير إيجابي على ربط توفر الطاقة الشمسية ومنحنى الحمل السنوي. إحدى المزايا الرئيسية لتقنية CSP هو نظام TES الذي يعد خيارًا أفضل من تخزين الطاقة الكهربائية [26]. يجعل TES الطاقة الشمسية المركزة قابلة للتطبيق مقارنة ببدائل توليد الطاقة المتجددة الأخرى. يمكن لنظام TES أن يساعد في إطالة وتحويل ساعات توليد الطاقة وتخفيف تقلبات الحمل القصيرة. معظم مصانع PTC الحالية لديها خيار TES، نظرًا لنضج تقنية TES القائمة على الملح المنصهر، فإن أكثر من 80% من محطات PTC قيد الإنشاء لديها نظام تخزين الملح المنصهر. تتمتع محطات PTC المزودة بنظام TES بميزة اقتصادية تتمثل في إنتاج الكهرباء في ساعات التحميل القصوى والتي عادةً ما تكون لها تكلفة كهرباء أعلى [27].

الجزء الرئيسي الثالث من محطة PTC هو وحدة الطاقة ويؤثر أدائها بشكل كبير على الإنتاجية الإجمالية لمحطة PTC. هناك نوعان رئيسيان من دورات الطاقة الممكنة لمحطات PTC. الأول هو محطة توليد الطاقة بنظام دورة رانكين المعتمدة على PTC والثاني هو محطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة (CC) المعتمدة على PTC يتم تصنيف محطة توليد الطاقة بنظام دورة رانكين المعتمدة على PTC أيضًا على أنها محطة طاقة

حرارية تعمل بالطاقة الشمسية فقط حيث يعتمد توليد البخار بشكل كامل على الطاقة الشمسية دون حرق الوقود الأحفوري من خلال نظام DSG أو نظام ISG بينما هناك نوع آخر هو الطاقة الشمسية الحرارية المتكاملة مع محطة توليد الكهرباء التي يمكن فيها توليد البخار من خلال المساهمة المشتركة للطاقة الشمسية والوقود الأحفوري. إن CC المستندة إلى PTC هي عبارة عن دمج لدورة Brayton و PTC القائمة على دورة Rankine [27].

يعتمد أداء محطة PTC على أداء مكوناته المختلفة. يلعب تحسين المردود الضوئي والحراري دوراً رئيسياً في كفاءة المحطة. يمكن أن تسهم التحسينات في تصميم العاكسات وأنايب الاستقبال أن تعزز بشكل كبير أداء المجال الشمسي من خلال تحسين المردود الضوئي وتحسين نقل الحرارة بفضل التحسينات في أنبوب الامتصاص مثل التحسينات الهندسية وتغيير التدفق. يمكن أن يساعد على اختيار التصميم المناسب لجميع مكونات الأقسام الثلاثة (المجال الشمسي solar field، TES ودورة الطاقة) في تحقيق الأداء المتفوق لمحطة توليد الطاقة PTC والتي يمكن أن تحل المشكلات المرتبطة بتكلفة الكهرباء المرتفعة نسبياً من هذه التكنولوجيا.

لقد تم إجراء أبحاث مكثفة حول تقنيات الطاقة الشمسية المركزة في السنوات الأخيرة وتعد تقنية PTC هي تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة الأكثر نضجاً والأكثر استخداماً على نطاق واسع. وقد ركزت أوراق البحث الحالية حول هذه التكنولوجيا بشكل مستقل على موضوعات بحثية معينة. ومع ذلك، فإن المنظور الشامل للبحث من أجل تحسين الأداء في جميع مكونات محطة PTC يحتاج إلى توضيح دراسة وتطوير [27].

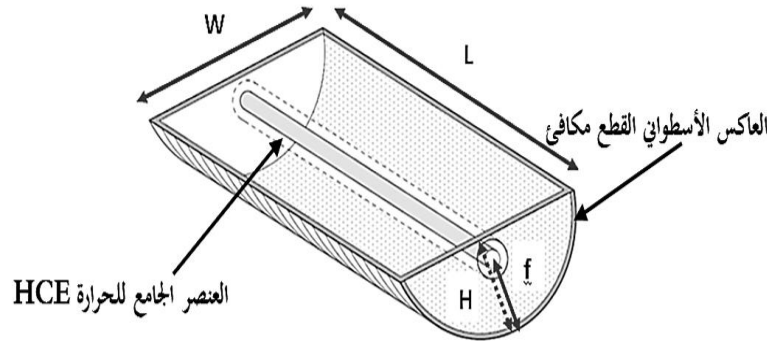
## 2.II. المجمع الشمسي الأسطواني لقطع مكافئ PTC

### 1.2.II. مكونات PTC

نظام PTC هو نظام يتكون من سطح عاكس أسطواني قطع مكافئ. يتم توجيه الإشعاع الشمسي نحو العنصر الجامع للحرارة HCE الذي يتم تثبيته في المحور البؤري للسطح الأسطواني. يتدفق داخل

HCE مائع نقل الحرارة HTF الذي يمتص الحرارة (على شكل حرارة مفيدة) وينقلها إلى وسيط التخزين.

يتميز ال PTC بأبعاد محددة تشمل الطول  $L$  وعرض الفتحة  $w$  والبعد البؤري  $f$  والارتفاع  $H$ .



الشكل 1-2: مخطط ال PTC.

## 1.1.2.II المائع الناقل للحرارة HTF

الموائع الأكثر شيوعاً هي الماء، الزيوت الهيدروكربونية والأملاح المنصهرة. يجب مراعاة عدة معايير من

أجل إختيار الأنسب نذكر أهمها: معاملات التمدد واللزوجة منخفضة، السعة الحرارية ونقطة الغليان مرتفعة، ونقطة التجمد منخفضة.

## 2.1.2.II العنصر الجامع للحرارة (HCE)

العنصر الجامع للحرارة (HCE) يتواجد في الخط البؤري للسطح العاكس الذي يكون له قطع

مكافئ. يتكون HCE من أنبوب امتصاص عادة مصنوع من النحاس أو الفولاذ المقاوم للصدأ، ويكون سطحه

الخارجي مغطى بطبقة انتقائية لتحسين خصائصه الضوئية. تشمل هذه الخصائص امتصاصية عالية للضوء المرئي

ومعامل انبعاث ضعيف جداً للأشعة تحت الحمراء عند درجات الحرارة المرتفعة السطح. بفضل هذه الخصائص،

يتم امتصاص جزء كبير من الإشعاع الشمسي الوارد مع التقليل من الضياعات الحرارية.

### II.3.1.2.3. العاكس

المجمع الشمسي يتضمن عاكسًا مصنوعًا من مواد مثل الزجاج المصقول أو الألمنيوم المصقول أو Inox والذي يتميز بمعامل انعكاس عالٍ يصل إلى 88%، خاصة في مجال الضوء المرئي. يتم تثبيت هذا العاكس بشكل أسطواني يتميز بمقطع عرضي قطع مكافئ. يجب أن تكون هذه المادة عاكسة متينة وقادرة على الاحتفاظ بمعامل انعكاسها لفترة طويلة تحت مختلف الظروف والمناخ. يتم تثبيت العاكس بعناية من خلال هيكل الدعم الذي يجب أن يكون قويًا لتحمل وزن نظام PTC والحفاظ على الشكل الأسطواني القطع مكافئ بدقة في مختلف الظروف. ويتميز أيضًا بخفة الوزن لسهولة حركة التتبع الشمسي.

### II.3. هندسة PTC

#### II.1.3.1. معادلة الشكل

تعطى معادلة الشكل للقطع المكافئ بالمعادلة التالية [28]:

$$y = \frac{1}{4.f}x^2 \quad (2 - 1)$$

حيث  $f$ : البعد البؤري، وأبعاد PTC المتمثلة في الطول  $L$  والعرض  $W$  وارتفاع حافة العاكس  $h_c$  حيث حافتي

$$\text{العاكس تتميز بالإحداثيات الديكارتية } (x = \pm \frac{W}{2}, y = h_c)$$

#### II.2.3.1. البعد البؤري $f$

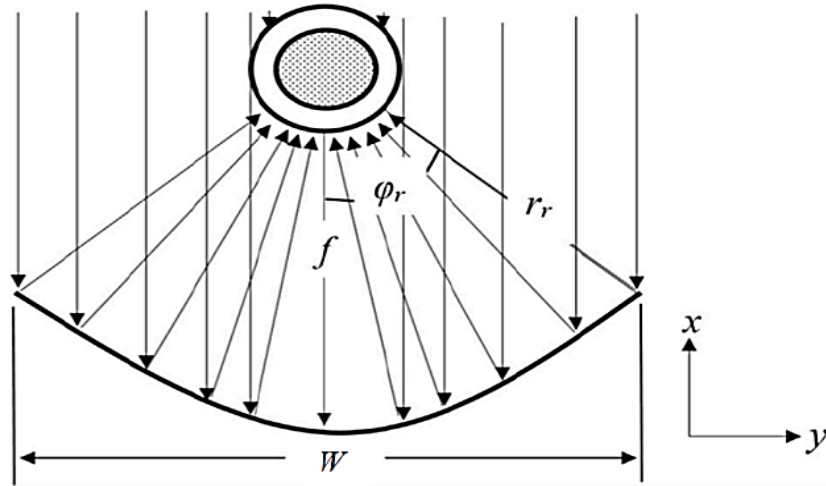
بتعويض إحداثيات الحافة في المعادلة الديكارتية نحصل على عبارة البعد البؤري  $f$  بدلالة أبعاد

ال PTC [16].

$$f = \frac{W^2}{16.h_c} \quad (2 - 2)$$

كما يمكن كتابته بالعلاقة التالية [16]:

$$f = \frac{W}{4.\tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right)} \quad (2 - 3)$$



الشكل 2-2: زاوية الحافة و زاوية القبول ل PTC [16].

حيث:  $\phi_r$  زاوية الحافة فهي تؤثر على عدد الأشعة التي تعترض PTC ونسبة التركيز [29] تعتمد زاوية الحافة على مسافة الخط البؤري وعرض فتحة المجمع  $W$ ، هي الزاوية المحصورة بين محور الترتيب - محور تناظر المنحنى القطع مكافئ (Oy) والخط الرابط بين نقطة البؤرة وحافة العاكس كما في الشكل 2-2 أعلاه.

$$\phi_r = \arctan \left[ \frac{8(f/w)}{16(f/w)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left( \frac{w}{2r_r} \right) \quad (2 - 4)$$

يتم حساب نصف قطر العاكس ( $r$ ) عند أي نقطة على النحو التالي [16]:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos\phi} \quad (2 - 5)$$

نتحصل على نصف قطر الحافة عندما يتحقق  $\phi = \phi_r$  [16]:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos\phi_r} \quad (2 - 6)$$

### 3.3. II مساحة الفتحة $A_{ap}$

المساحة الكلية لفتحة المجمع [28]:

$$A_{ap} = W.L \quad (2 - 7)$$

و هي المساحة التي تستقبل الإشعاع الشمسي المباشر و تتعلق بطول المجمع الشمسي L وعرض الفتحة W.

المساحة الخارجية لأنبوب الاستقبال هي [28]:

$$A_{ro} = \pi \cdot D_{ro} \cdot L \quad (2 - 8)$$

التركيز الهندسي هي النسبة بين شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الخط البؤري - بعد التركيز -

وشدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على فتحة المجمع ويعطى بالعلاقة التالية [28]:

$$CR = \frac{A_{ap}}{A_{ro}} \quad (2 - 9)$$

### II.4.3. المردود الضوئي $\eta_{op}$

يتعلق المردود الضوئي للمجمع الشمسي بالخواص الضوئية للمواد (الانعكاسية للسطح العاكس ،

النفذية  $\tau$  للظرف الزجاجي، الامتصاصية  $\alpha$  للأنبوب الماص) كما يتعلق بمعامل الاعتراض  $\gamma$  ومعامل التراجع

الهندسي  $A_f$  وزاوية ورود الإشعاع الشمسي  $i$ ، حيث تؤثر زاوية ورود الإشعاع الشمسي على المردود الضوئي

ويمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$\eta_{op} = \rho^{\circ} * \tau_e * \alpha_r * \gamma [1 - A_f * \tan i] \cos i \quad (2 - 10)$$

### II.4. النمذجة الحرارية

#### II.1.4. الحرارة المفيدة $Q_u$

يتم حساب الحرارة المفيدة لل PTC من خلال الفرق في درجات حرارة المخرج والمدخل ل HTF

المتدفق في أنبوب الاستقبال [28]:

$$Q_u = m_f \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{int}) \quad (2 - 11)$$

#### II.2.4. الإشعاع الشمسي المعترض $Q_s$

الإشعاع الشمسي الذي يعترض فتحة PTC هو [30]:

$$Q_s = A_{ap} \cdot G_B \quad (2 - 12)$$



### 3.4.II. الكفاءة الحرارية $\eta_{th}$

إن النسبة بين الحرارة المفيدة للـ PTC والإشعاع المباشر المتاحة تحدد الكفاءة الحرارية للـ PTC [30]:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s \cdot \eta_{op}} \quad (2 - 13)$$

### 4.4.II. الضياعات الحرارية

#### 1.4.4.II. الضياعات الحرارية لأنبوب الامتصاص $Q_{loss}$

يتم حساب الضياعات الحرارية لأنبوب الامتصاص على النحو التالي:

$$Q_{loss} = A_{ro} \cdot U_L (T_{rm} - T_{amb}) \quad (2 - 14)$$

إن ضياعات الامتصاص الحراري للظرف الزجاجي هي في الأساس ضياعات الإشعاع من جهاز الامتصاص إلى الظرف الزجاجي:

$$Q_{loss} = A_{ro} \cdot \sigma \cdot \left( \frac{T_{rm}^4 - T_e^4}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_e}{\epsilon_e} \cdot \frac{A_{ri}}{A_e}} \right) \quad (2 - 15)$$

في الحالات الثابتة، تكون الضياعات من الظرف الزجاجي إلى المحيط مكافئة لضياعات أنبوب الامتصاص إلى الظرف الزجاجي. تشمل الضياعات الحرارية من الظرف الزجاجي إلى المحيط الضياعات بواسطة الحمل والإشعاع.

$$Q_{loss} = A_e \cdot \sigma \cdot \epsilon_e (T_e^4 - T_{sky}^4) + A_e \cdot h_{out} \cdot (T_{rm} - T_{amb}) \quad (2 - 16)$$

يتم التعبير عن معامل انتقال الحرارة من الظرف الزجاجي إلى المحيط  $h_{out}$  بالعلاقة التالية:

$$h_{out} = 4 \cdot V_{wind}^{0.58} \cdot D_e^{-0.48} \quad (2 - 17)$$

#### 2.4.4.II. درجة حرارة السماء $T_{sky}$

تعطى درجة حرارة السماء  $T_{sky}$  بواسطة العبارة التالية:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (2 - 18)$$

### 3.4.4.II الطاقة الحرارية الممتصة $Q_{abs}$

معادلة توازن الطاقة هذه تعبر عن الطاقة الحرارية الممتصة ( $Q_{abs}$ ) كحرارة مفيدة و الضياعات

حرارية:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} \quad (2 - 19)$$

تعتمد الطاقة الحرارية الممتصة على الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى المجمع وعلى المردود الضوئي للمجمع

$$Q_{abs} = Q_s \cdot \eta_{opt} \quad (2 - 20)$$

### الخاتمة

تُعتبر أنظمة PTC من بين التكنولوجيات الرئيسية في إنشاء محطات توليد الطاقة الشمسية المركزة CSP، وهذه التكنولوجيا تعتبر بديلاً مهمًا للطاقة الأحفورية لتوليد الكهرباء. وتمثل هذه البديل تحديًا عالميًا لمكافحة التدهور البيئي والتأثيرات الضارة على صحة الإنسان والتوازن البيئي. لذلك، تم توجيه الاهتمام في الدراسات الحالية نحو تحسين كفاءة وأداء أنظمة PTC ودمجها بالتخزين الحراري لتعويض فترات التقطع (غياب الشمس بفعل الظروف الجوية أو أثناء الليل)، من خلال تقليل الضياعات الضوئية والحرارية وتحسين كفاءتها وإستغلالها أثناء غياب الشمس. يتضمن ذلك اختيار التصميم المناسب لتجنب العيوب الهندسية واستخدام مواد ذات خصائص بصرية وحرارية ممتازة ودمجها مع خزانات التخزين الحراري. مع مراعاة تقليل تكاليف التنفيذ والصيانة. سيتم استكشاف هذه الجوانب في الفصل القادم.

## المراجع

- [1] W. E. O. 2016, Ed., “Energy and Air Pollution,” international energy agency, 2016.
- [2] B. Awan, “Comparative analysis of 100 MW concentrated solar power plant and photovoltaic plant” in 5th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5115363>.
- [3] S. Islam, Md. Tasbirul, S.A. Shahir, T.M. Iftakhar Uddin, “Current energy scenario and future prospect of renewable energy in Bangladesh,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1074–1088, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.149>.
- [4] K. M. Omar Behar, A.Khellaf, “A review of studies on central receiver solar thermal power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017>. vol. 23, pp. 12–39, 2013,
- [5] N. AL-Rousan, N. Isa, and K. Desa, “Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi: [10.1016/j.rser.2017.09.077](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077). vol. 82. pp. 2548–2569, 2018.

- 
- [6] A. Muhammad Zubair, Ahmed Bilal Awan, R. P. Praveen, “Solar energy export prospects of the Kingdom of Saudi Arabia,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, 2018, doi: 10.1063/1.5098016.
- [7] S. Pramanik and R. V. Ravikrishna, “A review of concentrated solar power hybrid technologies,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 602–637, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.038.
- [8] B. A. and M. Z. Praveen R, Mohammad Abdul Baseer, “Performance Analysis and Optimization of a Parabolic Trough Solar Power Plant in the Middle East Region,” *Energies*, vol. 11, 2018, doi: doi:10.3390/en11040741.
- [9] b. awan, m. zubair, and k.v. chandra mouli, “design, optimization and performance comparison of solar tower and photovoltaic power plants,” *energy*, vol. 199, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117450.
- [10] P. B. Jay Prakash Bijarniya, K. Sudhakar, “Concentrated solar power technology in India: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.064>. vol. 63, pp. 593–603, 2016, doi:
- [11] S. Md Tasbirul Islam, Nazmul Huda, A.B. Abdullah, “A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power

---

(CSP) technologies: Current status and research trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 987–1018, 2018, doi: .  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>.

[12] S. Izquierdo, C. Montañs, C. Dopazo, and N. Fueyo, “Analysis of CSP plants for the definition of energy policies: The influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage,” *Energy Policy*, oi: 10.1016/j.enpol.2010.06.009. vol. 38, no. 10. pp. 6215–6221, 2010, d

[13] A. Kassem, K. Al-Haddad, and D. Komljenovic, “Concentrated solar thermal power in Saudi Arabia: Definition and simulation of alternative scenarios,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80. pp. 75–91, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.157.

[14] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez, “Parabolic-trough solar collectors and their applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 1695–1721, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.012.

[15] K. S. Deepak Bishoyi, “Modeling and performance simulation of 100 MW PTC based solar thermal power plant in Udaipur India,” *Case*

Stud. Therm. Eng, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2017.05.005>.

vol. 10, pp. 216–226, 2017.

[16] A. M. İbrahim Halil Yılmaz, “Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review,” Appl. Energy, vol. 225, pp. 135–174, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.014>.

[17] R. G. G.K. Manikandan, S. Iniyar, “Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review,” Appl. Energy J., doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.048>. vol. 235, pp. 1524–1540, 2019.

[18] M. I. Syed Ameen Murtuza, H.V. Byregowda, Mohammed Mohsin Ali H, “Experimental and simulation studies of parabolic trough collector design for obtaining solar energy,” Resour. Technol., , doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.03.0>. vol. 3, pp. 414–421, 2017.

[19] T. M. H. Brooks, M J, I Mills, “Performance of a parabolic trough solar collector,” Energy South. Africa, vol. 17, pp. 71–80, 2006, doi: [10.17159/2413-3051/2006/v17i3a3291](https://doi.org/10.17159/2413-3051/2006/v17i3a3291).

- [20] I. P. Alibakhsh Kasaeian , Reza Danesh Azarian , Omid Mahian , Lioua Kolsi , Ali J. Chamkha , Somchai Wongwises, “Nanofluid flow and heat transfer in porous media: A review of the latest developments,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 107, pp. 778–791, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.074>.
- [21] M. S. S. Ketan Diwan, “Heat Transfer Enhancement in Absorber Tube of Parabolic Trough Concentrators Using Wire-Coils Inserts,” *Univers. J. Mech. Eng.*, doi: 10.13189/ujme.2015.030305 vol. 3, pp. 107–112, 2015.
- [22] M.A.Milad Tajik Jamal-Abad, Seyfollah Saedodin, “Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media,” *Renew. Energy*, vol.107, pp.156–163, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.02.004.
- [23] Q.T. Zhen Huang, Zeng-Yao Li ,Guang-Lei Yu, “Numerical investigations on fully-developed mixed turbulent convection in dimpled parabolic trough receiver tubes,” *Appl. Therm. Eng. J.*, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.012>.
- [24] X. C. Walter Nsengiyumva, Shi Guo Chen, Lihua Hu, “Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A

review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 250–279, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>.

[25] A.S.P. de Jong and E. A. T. , K. Esquerre, R.A. Kalid, “Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil,” doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.050> *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.23, pp.526–535, 2013,.

[26] P. D. and M. Mehos, “Enabling Greater Penetration of Solar Power via the Use of CSP with Thermal Energy Storage,” 2011.

[27] M. Liu et al., “Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi: [10.1016/j.rser.2015.09.026](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026). vol. 53. Elsevier Ltd, pp. 1411–1432, 01–Jan–2016,

[28] C. T. Evangelos Bellos, “Alternative designs of parabolic trough solar collectors Evangelos,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 71, pp. 81–117, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.11.001>.

[29] M. Billy Anak Sup, Mohd. Farid Zainudin, Tanti Zanariah ShamsirAli, Rosli Abu Bakar, “Effect of rim angle to the flux



distribution diameter in solar parabolic dish collector Billy,” Science Direct, vol. 68, pp. 45–52, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.231.

[30] C. T. Evangelos Bellos, Ilias Daniil and Thermal, “Multiple cylindrical inserts for parabolic trough solar collector Evangelos,” doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.086>. Appl. Therm. Eng., 2018,

[31] Yunus A Çengel, Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, 2nd ed. McGraw–Hill, Year: 2008, 2008.

[32] A. K. Omar Behar and Mohammedi, “A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES),” 2015.09.045. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman>. Energy Convers. Manag., vol. 106, 2015,

[33] R. Forristall, “Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver,” 2003.

[34] D. R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics, vol. 85. CRC press, 2004.

- [35] G.D. Raithby, “G. D. Raithby1975.pdf,” Adv. Heat Transf. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70076-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70076-5).vol. 11, pp. 265–315, 1975.
- [36] W. Churchill, “A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow,” J. Heat Transf. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3450685>. vol. 99, pp. 300–306, 1977.
- [37] I. S. and H. G. Egbo, “Analysis of Rim Angle Effect on the Geometric Dimensions of SolarParabolic–Trough Collector In Bauchi, Nigeria.,” Int. J. PURE Appl. Sci., vol. 2, pp. 11–20, 2008.
- [38] S. Kalogirou, “Parabolic trough collector system for low temperature steam generation: Design and performance characteristics,” Appl. Energy, vol. 55, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(96\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(96)00008-6).

# الفصل الثالث

## التخزين الحراري

مقدمة

في هذا الفصل، سنتطرق الى أهمية أنظمة تخزين الحرارة في تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP)، بالإضافة الى وسائط التخزين وتطبيقاته على CSPs، أنواع التخزين، تصنيف مواد التخزين وكذا معايير اختيار المواد، المواد متغيرة الطور وتصنيفاتها.

### 1.III. أهمية أنظمة تخزين الحرارة في تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP)

على الرغم من أن بعض المكونات الرئيسية لتقنية الطاقة الشمسية المركزة (مثل المجال، والمستقبلات) تعتبر اليوم ناضجة، إلا أن التقنية محدودة بسبب عدم وجود نظام تخزين مناسب. يمثل تخزين الطاقة الحرارية (TES) اليوم محورًا أساسيًا للبحث من أجل تطوير وتحسين تقنية الطاقة الشمسية المركزة (CSP).

تضم معظم محطات الطاقة الحالية نظام تخزين حراري والذي يعمل بشكل خاص على إطالة مدة الإنتاج، وبالتالي يقلل من تكلفة الطاقة المنتجة.

أهم مزايا تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP) هي إمكانية تخزين الحرارة، والتي تُعتبر ضرورية لاسترجاع الطاقة واستعمالها عند غياب الشمس. في الواقع، تُعد أنظمة التخزين الحراري المدججة مع تقنيات الطاقة الشمسية المركزة أقل تكلفة وأكثر كفاءة (بكفاءة تزيد عن 95%)، مقارنةً ببعض التقنيات الغير مدججة التي تصل الى حوالي 80%) من تخزين البطاريات وتخزين الطاقة بالمضخات الكهرومائية [1]، وفي الواقع نظرًا لأن الإشعاع يتم تحويله أولاً إلى حرارة، يمكن تخزين هذه الحرارة مباشرة لإنتاج الكهرباء لاحقًا. وبالتالي، تصبح تقنيات تخزين الحرارة ذات أهمية بالغة وضرورية للاستخدام الفعال للطاقة الشمسية المركزة.

### III.2. وسائط التخزين

يمكن تصنيف التخزين ذو درجات الحرارة العالية في محطات الطاقة الشمسية إلى أنظمة نشطة وغير نشطة [2]. يتميز نظام التخزين النشط في المقام الأول بتدفق وسائط التخزين عبر مبادل حراري، باستخدام خزان واحد أو خزائين كوسائط تخزين. تنقسم الأنظمة النشطة إلى أنظمة مباشرة وأخرى غير مباشرة [2]. إن أبسط طريقة لتخزين الحرارة في محطة الطاقة الشمسية المركزة هي أيضاً استخدام مائع نقل الحرارة الأساسي (HTF) كوسيلة تخزين، وهو ما يسمى بنظام التخزين المباشر النشط [3]. وعلى العكس من ذلك، في طريقة التخزين النشط غير المباشر، يتم استخدام وسيط ثانٍ لتخزين الحرارة. وفي النظام الغير نشط، يمر سائل نقل الحرارة عبر المجموع فقط لشحن أو تفريغ مادة التخزين (النظام المزدوج). الطريقة الأكثر شيوعاً وتسويقاً تجارياً لتنفيذ أنظمة TES هي تكوين الخزائين: أحدهما للتخزين الساخن والآخر للتخزين البارد. بينما من أجل تقليل تكلفة TES يتم استخدام خزان واحد تفصل فيه وسائط التخزين باستخدام الخط الحراري (الفصل بفعل اختلافات الكثافة) [3].

### III.3. تطبيق تخزين الحرارة على CSPs

نظراً لأن مادة التخزين جزء لا يتجزأ من النظام، فإن اختيارها يتضمن بالضرورة اختيار نظام التخزين. لذلك، من المهم تقديم ومناقشة أنظمة تخزين الحرارة المختلفة المستخدمة في CSPs، وإبراز تلك التي تبدو أكثر ملائمة لسياق دراستنا.

يتم تخزين الحرارة عن طريق استغلال الظواهر التي تحدث داخل المادة تحت تأثير التغير في طاقتها الداخلية عن طريق التسخين أو التبريد. وهذا ينتج عنه أشكال مختلفة من التخزين.

يمكن تعريف تخزين الطاقة الحرارية على أنها تراكم للطاقة الحرارية عندما تكون وفيرة من أجل استعادتها بعد ذلك عند غيابها. معظم الأنظمة لديها عدم تطابق بين العرض والطلب على الطاقة. التخزين الحراري يعوض هذا الفارق بين العرض والطلب. هناك ثلاثة أنواع من التخزين الحراري [4]:

- تخزين الحرارة المحسوس.
- التخزين الكيميائي الحراري ويكون باستخدام الحرارة المنبعثة أثناء تفاعل كيميائي.
- تخزين الحرارة الكامنة.

تتطلب أنظمة الطاقة الشمسية المركزة ظروف عمل وتشغيل محددة للسماح بإمكانية توزيع الطاقة في

أي وقت من اليوم. بغض النظر عن نوع التخزين المستخدم.

### III.1.3.1.3. تخزين الحرارة المحسوس (SHS)

تخزين الحرارة المحسوس هو أبسط وأقدم طريقة تخزين، يتم فيه تخزين الطاقة ثم تحريرها عن طريق رفع

أو خفض درجة حرارة مادة التخزين الصلبة أو السائلة. حيث يعتمد هذا النوع من التخزين الحراري على التغيير

في الأنتالي الناتج عن تغيير درجة حرارة المادة في الحالة الصلبة أو السائلة أو الغازية. وتعطى بالعلاقة التالية [4]:

$$Q_{\text{المحسوس}} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p(T) dT \quad (3 - 1)$$

إذا كانت السعة الحرارية النوعية للمادة مستقلة عن درجة الحرارة خلال الفترة  $[T_1 - T_2]$ ، أو كان

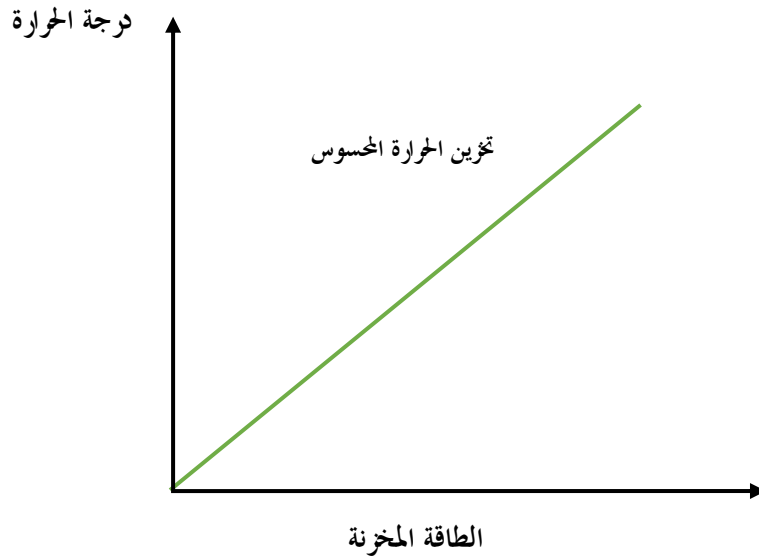
التغيير ضئيلاً خلال هذه الفترة، تصبح المعادلة السابقة من الشكل:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3 - 2)$$

ثم تعتمد كمية الطاقة المخزنة عند ضغط ثابت على السعة الحرارية للجسم، والفرق بين درجة حرارته

الأولية والنهائية ( $\Delta T$ ). المعيار الأول لاختيار مادة للتخزين المحسوس للحرارة هو السعة الحرارية. يتأثر اختيار

مادة لتطبيق معين أيضاً بعوامل أخرى مثل نطاق درجة حرارة التطبيق والحجم والكتلة اللازمة للمادة [4].



الشكل 1-3: تغير الطاقة المخزنة بدلالة درجة الحرارة.

يمكن تصنيف أنظمة SHS على أساس مواد التخزين كما يلي:

- التخزين المحسوس للمواد السائلة (مثل الماء والزيت والأملاح المنصهرة وما إلى ذلك).
- التخزين المحسوس للمواد الصلبة (مثل الصخور والمعادن).

تستخدم جميع تقنيات تخزين الطاقة الحرارية TES المثبتة حاليًا في محطات الطاقة الشمسية المركزة

مواد التخزين المحسوس مثل السيراميك والجرافيت. ترد قائمة بمواد تخزين الحرارة الصلبة والسائلة الأكثر استخدامًا

في الجدولين 1-3 و 2-3 الموالين.

الجدول 3-1: الخصائص الأساسية لمواد التخزين المحسوس الصلبة [2].

| سعة حرارية محددة<br>للحجم<br>(kWht/m <sup>3</sup> ) | متوسط الحرارة<br>النوعية<br>(kJ/kg.K) | متوسط<br>الموصلية<br>الحرارية<br>(W/m.K) | متوسط<br>الكثافة<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | درجة الحرارة    |                 | وسائط التخزين         |
|---|---------------------------------------|--|--|-----------------|-----------------|-----------------------|
|   |                                       |  |  | الساخنة<br>(°C) | الباردة<br>(°C) |                       |
| -   | -                                     | -  | -  | 133             | 120             | HITEC<br>الملح الشمسي |
| 55  | 2.6                                   | 0.12                                     | 770                                      | 300             | 200             | زيوت معدنية           |
| 57  | 2.3                                   | 0.11                                     | 900                                      | 350             | 250             | النفط الاصطناعي       |
| 52  | 2.1                                   | 0.10                                     | 900                                      | 400             | 300             | زيت السيليكون         |
| 152   | 1.5                                   | 0.57                                     | 1825                                     | 450             | 250             | أملاح النتريت         |
| 250   | 1.6                                   | 0.52                                     | 1870                                     | 565             | 265             | أملاح النترات         |
| 430   | 1.8                                   | 2.0                                      | 2100                                     | 850             | 450             | أملاح الكربونات       |
| 80  | 1.3                                   | 71.0                                     | 850                                      | 530             | 270             | الصوديوم السائل       |

الجدول 3-2: الخصائص الأساسية لمواد التخزين المحسوس السائلة [2].

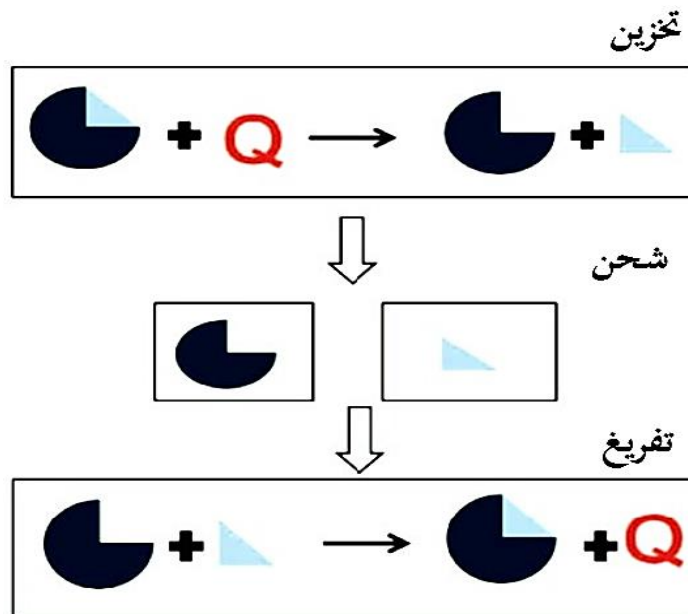
| سعة حرارية محددة<br>للحجم<br>(kWht/m <sup>3</sup> ) | متوسط الحرارة<br>النوعية<br>(kJ/kg.K) | متوسط الموصلية<br>الحرارية<br>(W/m.K) | متوسط<br>الكثافة<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | درجة الحرارة    |                 | وسائط التخزين                      |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------|-----------------|------------------------------------|
|   |                                       |                                       |  | الساخنة<br>(°C) | الباردة<br>(°C) |                                    |
| 60  | 1.30                                  | 1.0                                   | 1700                                     | 300             | 200             | الزيوت المعدنية<br>الصخرية الرملية |
| 100   | 0.85                                  | 1.5                                   | 2200                                     | 400             | 200             | الخرسانة المسلحة                   |
| 150   | 0.85                                  | 7.0                                   | 2160                                     | 500             | 200             | كلور الصوديوم                      |
| 160   | 0.56                                  | 37.0                                  | 7200                                     | 400             | 200             | الحديد الصلب                       |
| 450   | 0.60                                  | 40.0                                  | 7800                                     | 700             | 200             | الفولاذ الصلب                      |
| 150   | 1.00                                  | 1.5                                   | 1820                                     | 700             | 200             | طوب السيليكات<br>الحراري           |
| 600   | 1.15                                  | 5.0                                   | 3000                                     | 1200            | 200             | طوب مغنيسيا<br>الحراري             |



III.2.3. التخزين الكيميائي الحراري THS

يستند التخزين الحراري الكيميائي على استخدام تفاعل حراري للحرارة عكوس. تُعرف عمليات التخزين الحراري الكيميائي وفقًا لمعيارين: هل العملية مفتوحة أم مغلقة، وهل يتم دمج المفاعل في نظام التخزين أم منفصل عنه. يعد هذا النوع من التخزين أكثر تعقيدًا بكثير مقارنةً بالأنواع الأخرى. يجب فصل النواتج أثناء عملية التخزين، وأن تكون متصلة أثناء عملية التفريغ لتحرير الطاقة المخزنة فيها. ونظرًا لأن هذه الطاقة يتم تخزينها عن طريق تفاعل كيميائي، فيمكن تخزينها في درجة حرارة الغرفة [4].

يعتمد هذا النوع من التخزين على استخدام التفاعل الكيميائي-الامتزاز بين غاز وصلب، والامتصاص الفيزيائي أو الامتزاز للغاز بواسطة سائل أو صلب [5]. يمكن وصف آلية التخزين الحراري عن طريق الامتزاز أو بالطريقة الكيميائية الحرارية باستخدام المعادلة 3-3.



الشكل 3-2: آلية التخزين الكيميائي الحراري.

أثناء هذه العملية، تقوم الحرارة الموفرة لزوج الامتصاص AB بفصلها عن طريق امتصاص الحرارة لتكوين مركبين A و B يمكن تخزينهما بشكل منفصل هذه هي ظاهرة ماصة للحرارة. وعندما يتم التلامس بين هذين المنتجين، تحدث الظاهرة الطاردة للحرارة لتكوين المركب AB مرة أخرى عن طريق إطلاق الحرارة.

الجدول 3-3: مواد التخزين الحراري الكيميائي والتفاعلات [2]، [6].

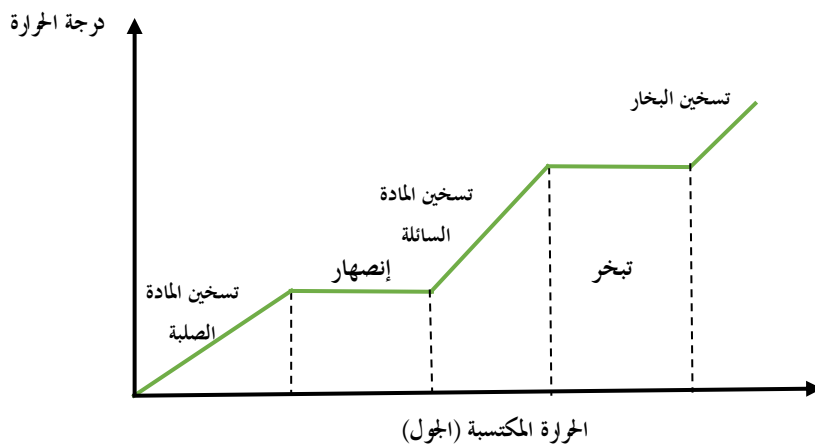
| درجة حرارة التفاعل °C | كثافة الطاقة المادية  | التفاعل   | المادة                        |
|-----------------------|-----------------------|---|-------------------------------|
| 400–500               | 67 kJ/mol             | $NH_3 + \Delta H \leftrightarrow \frac{1}{2} N_2 + \frac{3}{2} H_2$ | الأمونيا                      |
| 500–1000              | n.a.                  | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$                             | الميثان / الماء               |
| 500                   | 3 GJ/m <sup>3</sup>   | $CO(OH_2) \leftrightarrow CaO + H_2O$                               | هيدروكسيدات، على سبيل المثال. |
| 800–900               | 4.4 GJ/m <sup>3</sup> | $CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2$                                 | كربونات الكالسيوم             |
| 180                   | 2.6 GJ/m <sup>3</sup> | $FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$                                 | كربونات الحديد                |
| 200–300               | 4 GJ/m <sup>3</sup>   | $Metal XH_2 \leftrightarrow Metal YH_2 + (X - Y)H_2$                | هيدريدات المعادن              |
| 2100–2300             | غير متاح              | غير متاح  | الألومينا خام الألومنيوم      |
| 200–250               | غير متاح              | $CH_3OH \leftrightarrow CO + 2H_2$                                  | الميثانول - إزالة الميثانول   |
| 250–400               | 3.3 GJ/m <sup>3</sup> | $MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$                               | أكسيد المغنيسيوم              |

### III.3.3. تخزين الحرارة الكامنة (LHS)

في حالة تخزين الحرارة الكامنة، يتم تخزين الطاقة على شكل تغيير في الحالة الفيزيائية (الصلبة-السائلة). في الواقع، عندما يتغير طور المادة عند درجة حرارة تسمى درجة حرارة الانصهار ( $T_f$ ) أو تغير طفيف قريب منها، يتم امتصاص كمية معينة من الطاقة أثناء هذه العملية. من خلال إجراء العملية العكسية، يتم تحرير الطاقة وتعود المادة إلى حالتها الفيزيائية الأولية. تسمى الطاقة الممتصة بالحرارة الكامنة للانصهار ( $L_f$ ) والطاقة المنبعثة هي الحرارة الكامنة للتصلب ( $L_s$ ). عادة ما تكون الحرارة الكامنة أعلى بكثير من السعة الحرارية، مما

يسمح بتخزين المزيد من الحرارة في حجم أصغر مقارنة بالتخزين الحراري المحسوس. يمكن أن يكون هذا النوع من التخزين فعالاً للفروق الصغيرة جداً في درجات الحرارة. يحدث تغيير طور المادة النقية عند درجة حرارة محددة جداً [4]. في حالة تغيير الطور لخليط متجانس، يمكن أن يحدث تغيير الطور في نطاق درجات حرارة متفاوتة وذلك استناداً إلى خصائص هذا المزيج، ويكون ذلك بوجود مرحلتين صلبة وسائلة في التوازن.

يوضح الشكل 3-3 آلية التخزين الحراري الكامن بشكل أفضل؛ حيث تبدأ درجة حرارة المادة الصلبة في الارتفاع بشكل محسوس حتى تصل إلى درجة الانصهار. وبعد هذه النقطة، تتوقف الطاقة المستقبلية عن رفع درجة الحرارة وتُستخدم بدلاً من ذلك لتغيير الحالة الفيزيائية من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة (الحرارة الكامنة)، وهذا يعني أن المادة تخزن الطاقة في ثبوت درجات الحرارة. بمجرد أن يكتمل التحول وتصبح المادة بالكامل في الحالة السائلة، تبدأ درجة الحرارة في الارتفاع مرة أخرى مع اكتساب الحرارة حتى تصل إلى نقطة التبخر حيث يتم تكرار نفس الية التغيير التي حدثت في المرحلة الأولى. تعمل عملية التسخين بنفس الطريقة عند التبريد، مما يعني أنه من الممكن استخراج الطاقة المخزنة على شكل حرارة كامنة عند درجة حرارة ثابتة (الشكل 3-3 أسفله) [6].



الشكل 3-3: آلية التخزين الحراري الكامن.

كما أنه لا يمكن عملياً تخزين الحرارة الكامنة بشكل منفرد، لأنه للوصول إلى نقطة تغير الطور، لابد

للمادة من أن تخضع للتغير في درجة الحرارة مما يمثل تخزيناً محسوساً للحرارة.

غالباً ما يتم استخدام المواد متغيرة الطور من الحالة الصلبة إلى السائلة في هذا النوع من التخزين.

تحدد المعادلة 3-4 كمية الطاقة المخزنة في المواد متغيرة الطور:

$$E = \int_{T_{\text{الباردة}}}^{T_{\text{انصهار}}} m C_{ps} dT + m \cdot L + \int_{T_{\text{الانصهار}}}^{T_{\text{الساخنة}}} m C_{pl} dT \quad (3 - 4)$$

إذا كانت السعة الحرارية النوعية للمادة مستقلة عن درجة الحرارة خلال فترة التحول، أو كان التغير

ضئيلاً خلال هذه الفترة، تصبح المعادلة السابقة من الشكل:

$$Q = m \cdot C_{pl} \cdot \Delta T_l + m \cdot \Delta h_{s-l} + m \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s \quad (3 - 5)$$

$C_{ps}$  و  $C_{pl}$ : السعة الحرارية الكتلية في الحالة السائلة والحالة الصلبة على التوالي.

$\Delta h_{s-l}$ : الانتالبي الحراري لتغير الطور السائل / الصلب.

$\Delta T_l$ : الفرق في درجات الحرارة بين درجة حرارة التخزين الأدنى ودرجة حرارة تغير الطور للمادة.

$\Delta T_s$ : الفرق بين درجة حرارة تغير الطور للمادة ودرجة حرارة التخزين المرتفعة.

يمثل الحد الأول من المعادلة الحرارة المحسوسة المخزنة أثناء زيادة درجة حرارة المادة من درجة حرارتها

الأولية إلى درجة حرارة تغير الطور، ويمثل الحد الثاني الطاقة المخزنة بواسطة الحرارة الكامنة للمادة أثناء تغير الطور،

وهي كمية الطاقة المخزنة يعتمد على كمية المادة ودرجة الحرارة الكامنة المحددة ونسبة من المادة التي تعرضت للتحول. إذا

تم تسخين المادة أكثر بعد تغير الطور، فسيظهر الحد الثالث في المعادلة لحساب تخزين الحرارة المحسوسة مرة أخرى.

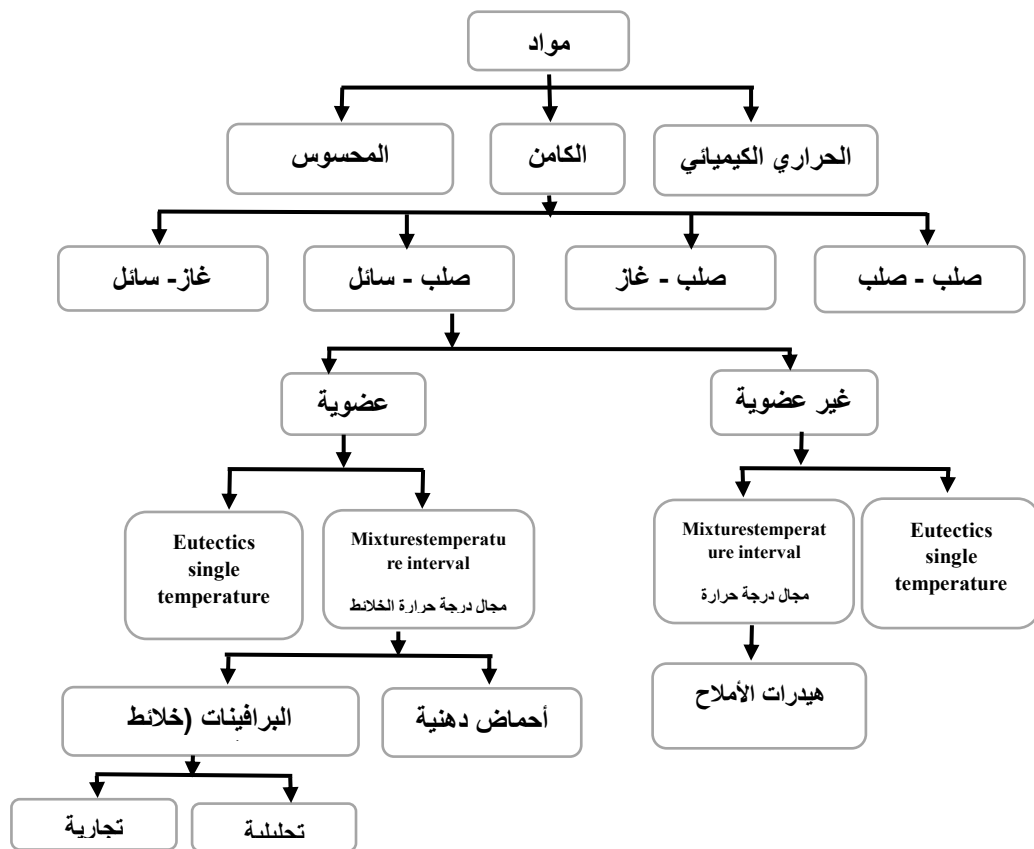
الطاقة المنتشرة أو الممتصة أثناء تغيير الطور لهذه المواد تكون غالباً أكبر بعشر مرات من تلك

الموجودة في مواد التخزين المحسوس للحرارة، مما يتيح إمكانية تقليل حجم مواد التخزين المطلوبة. من ناحية أخرى،

فإن التقنيات المستخدمة في نقل الحرارة واختيار المواد أكثر تعقيداً. حدد العديد من الباحثين مجموعة متنوعة من مواد تغيير الطور.

يوفر التخزين الحراري الكامن عموماً كثافة تخزين أعلى من التخزين الحراري المحسوس. وبالتالي فإن تخزين الحرارة المحسوس هو الخيار الأقل ملاءمة من حيث كثافة الطاقة. لوحظت أعلى قيم الكثافة للتخزين الكيميائي الحراري. على الرغم من أن عدد التطبيقات التجارية القائمة على مواد تغيير الطور محدود حالياً، إلا أن تخزين الحرارة الكامنة له العديد من المزايا مقارنة بالتخزين الحراري المحسوس. من بينها، كثافة أكبر لطاقة التخزين ودرجة حرارة تشغيل ثابتة تقريباً. إلا أنه لا يزال التخزين الكيميائي الحراري وتخزين الحرارة الكامنة قيد التطوير [7]، [8].

### 4.III. تصنيف مواد تخزين الطاقة



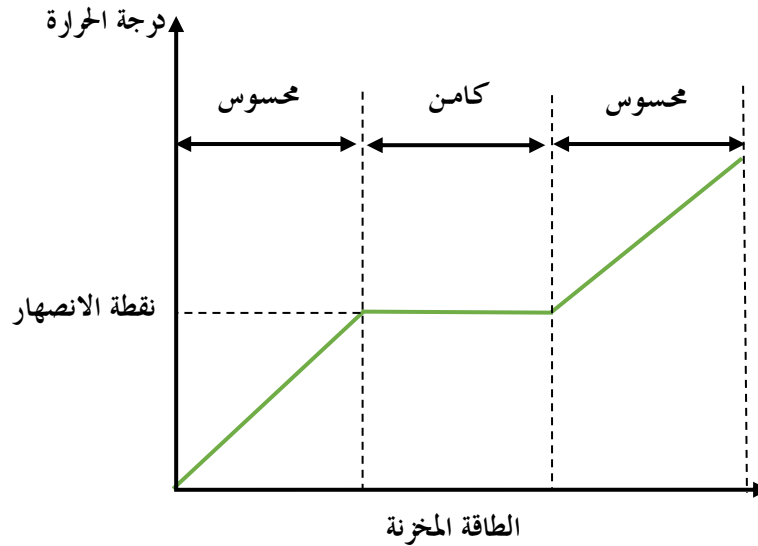
الشكل 3-4: تصنيف مواد تخزين الطاقة [10]، [11].

### III.1.4. معايير اختيار المواد متغيرة الطور

توفر المواد المتغيرة الطور (PCM) إمكانية تخزين وتحرير كمية كبيرة من الحرارة عند تغيير الطور في

حجوم منخفضة. يتأثر اختيار PCM لتطبيق معين بمعايير نذكر منها:

- الحرارة الكامنة
- درجة حرارة الانصهار Melting temperature تعتبر درجة حرارة الانصهار مهمة جداً في اختيار PCM لتطبيق صناعي محدد. يجب أن تتوافق درجة حرارة الانصهار مع درجة حرارة تشغيل النظام. يمكن أن يؤدي اختيار PCM دون مراعات هذا المعيار إلى عدم استغلال التحول أثناء مرحلة تغير الطور وبالتالي العمل فقط في وضع التخزين المحسوس. يعد التحديد المسبق لدرجة حرارة تشغيل النظام ضروري في اختيار PCM المناسب. يظهر الشكل 3-5 مبدأ عمل PCM.



الشكل 3-5: مبدأ عمل PCM [12].

• الموصلية الحرارية Thermal conductivity

يتم استخدام PCM في العديد من التطبيقات لتخزين/استرجاع الطاقة الحرارية في فترة زمنية محددة. حيث تعمل الموصلية الحرارية العالية على تسريع تغيير الطور.

• التبريد الفائق Supercooling

على عكس عملية الانصهار التي تبدأ دائماً عند نفس درجة الحرارة، فإن التبلور لا يحدث عند درجة حرارة التوازن بين السائل والصلب (درجة حرارة الانصهار)، ولكنها تحدث عند درجة حرارة أقل تعرف بدرجة التبلور. إنه الفرق بين درجة حرارة الانصهار ودرجة حرارة التبلور The crystallization temperature . ومن ثم يتم تبريد السائل بشكل فائق أو شبه مستقر. تسمى عملية تبلور السائل شبه المستقر وأيضاً، ويمكن أن يتم ذلك عن طريق عمل ميكانيكي (اهتزازات، صدمات)، أو عن طريق الوصول إلى درجة حرارة النواة التي تظهر عندها أول تبلور للمادة الصلبة. يعد تقليل التبريد الفائق أمراً ضرورياً لتقليل تحول الطور بين دورات التخزين/الاسترجاع.

• الاستقرار أثناء الدورة الحرارية Thermal cycling stability

تشير دورات التغيير الحراري إلى الدورات المتتالية للتخزين/الاسترجاع (الانصهار/التجمد). يمكن أن يؤدي ذلك إلى تدهور الخواص الحرارية والفيزيائية للـ PCM وتقليل فعاليتها. من المهم للغاية دراسة تأثير الدورات (الانصهار/التجمد) على درجة حرارة الانصهار والحرارة النوعية والحرارة الكامنة للـ PCM. درس S. D. Sharma وآخرون [3] استقرار وتدهور الخواص الحرارية للبرافين. وجدوا أنه بعد 300 دورة يفقد بارافين 53 حوالي 10% من حرارته الكامنة وحافظ على حرارته النوعية. أظهرت النتائج بشكل عام استقراراً جيداً للبرافين وتدهوراً ضئيلاً جداً في خواصه الحرارية الفيزيائية. حيث تُعدُّ 300 دورة منخفضة نسبياً بالمقارنة مع التطبيقات الصناعية.

• التمدد الحجمي Volume expansion

يشير إلى زيادة الحجم أثناء التغيير من الطور الصلب إلى الطور السائل. وهذا يعتبر مشكلة في تصميم وحدة التخزين، خاصة عند استخدام حاوية مغلقة. يجب توفير حجم أكبر من حجم مادة التغيير الطوري في الحالة الصلبة لاحتواء مادة التغيير الطوري في الحالة السائلة. التمدد الحجمي الضعيف يتيح تخزين المرحلتين في نفس الحجم.

• الاستقرار الكيميائي Chemical stability

سيتم وضع PCM المستخدم في وحدة التخزين الحراري حيث يكون على اتصال مع مادة صنع حزان التخزين وبالتالي من الضروري التأكد من توافق PCM المستخدم مع مادة صنع الحزان.

• التكاليف والوفرة Costs and availability

استخدام PCM للتطبيق الصناعي يتطلب وفرتها بشكل كبير. بالإضافة إلى ذلك، ونظرًا لكمياتها، فإن السعر أمر مهم أيضًا حيث يؤثر بشكل مباشر على فترة استرداد الاستثمار. فترات استرداد الاستثمار الطويلة تقيد جاذبية استخدام PCM.

III.2.4. مفاهيم واستخدام المواد متغيرة الطور (PCMs)

تُستخدم المواد متغيرة الطور بشكل خاص كوسط لتخزين الطاقة الحرارية وقد تم اكتشافها بشكل أساسي خلال الثلاثين سنة الماضية. تمتاز هذه المواد بثلاث تحولات، وهي التصلب، الانصهار والتحول إلى غاز حيث تعتبر عمليات الانصهار والتصلب هي الأكثر انتشارًا. خلال هذه العمليات تكون للمواد القدرة على تخزين وتفريغ كمية كبيرة من الطاقة. مع الأخذ بعين الاعتبار هذه الخصائص، يتم استخدام PCMs لتخزين الطاقة الحرارية في العديد من التطبيقات العملية فهي لديها القدرة على تغيير طورها عند درجة حرارة معينة من الحالة الصلبة إلى السائلة أو العكس. تمتاز بامتلاكها حرارة انصهار عالية،، مثل الذوبان والتصلب عند درجة



حرارة معينة [9] كما تمتاز أيضا بالقدرة على تخزين وتفريغ كمية هائلة من الطاقة الحرارية. تنقسم الـ PCMs الى ثلاثة أنواع: وهي PCMs العضوية وغير العضوية والخلائط سهلة الانصهار [9]، [10]، [11].

- العضوية مثل شموع البرافين والأحماض الدهنية والإسترات والكحول.
  - غير العضوية مثل الأملاح وهيدرات الملح والمركبات المعدنية والسبائك المعدنية
  - الخلائط سهلة الانصهار: (مخاليط عضوية - عضوية)، (عضوية - غير عضوية)، (غير عضوية - غير عضوية).
- عضوية). يمكن تخزين الطاقة الحرارية في PCM في شكل حرارة معقولة وحرارة كامنة [7].

### III.3.4. المواد متغيرة الطور (PCMs)

يجب أن يكون PCM المستخدم لتخزين الطاقة الحرارية (TES) موصلية حرارية عالية وحرارة كامنة كبيرة. ويلاحظ أيضًا أن طريقة تخزين الحرارة الكامنة توفر كثافة تخزين أعلى بكثير مقارنة بطريقة تخزين الحرارة المحسوسة، مع تغير طفيف في درجة الحرارة بين عملية تخزين الحرارة وإطلاقها [12]. بدأ تطوير PCM لتخزين الطاقة الحرارية في أواخر القرن العشرين، حيث استندت معايير اختيار PCM لتطبيقات TES على تكلفة المواد ونقطة انصهارها. وكذلك عدم سميتها في الطبيعة وأن تكون نسبة تبخرها منخفضة في حدود 0-70 درجة مئوية [13].

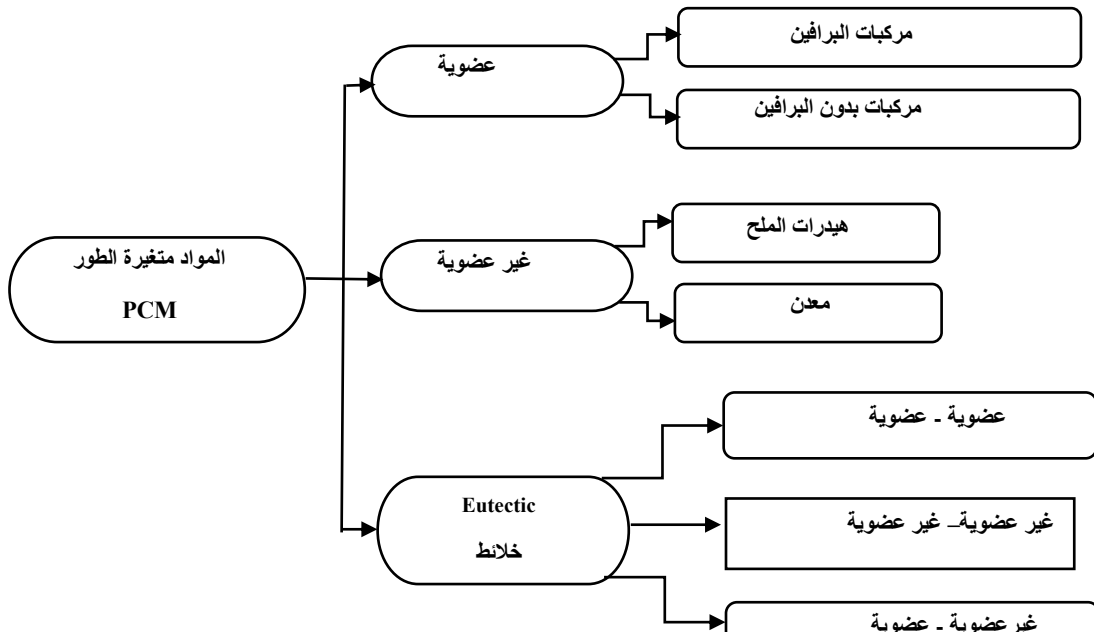
تستخدم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) مواد عضوية وغير عضوية استنادًا إلى درجة حرارة انصهارها ضمن نطاق درجات حرارة 0-120 درجة مئوية. تعتبر PCMs العضوية مناسبة لتطبيقات تخزين الطاقة ذات درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة، بينما تستخدم PCMs غير العضوية لتخزين الطاقة عند درجات حرارة عالية [14]. تكون PCMs غير العضوية فعالة لتطبيقات TES ضمن نطاق درجات حرارة 100-900 درجة مئوية [10]. بينما تُستخدم الخلائط سهلة الانصهار على نطاق واسع في التطبيقات ذات درجات الحرارة المنخفضة إلى المتوسطة، حيث تتراوح درجات انصهارها عادة بين 12-600 درجة مئوية [15].

تستخدم الخلائط سهلة الانصهار العضوية-غير العضوية في تطبيقات TES لدرجات حرارة متوسطة (درجة انصهار أقل من 220 درجة مئوية)، بينما تُستخدم غير العضوية-غير العضوية ذات درجات انصهار أعلى قليلاً في الأنظمة ذات درجات حرارة عالية. تظهر هذه الخلائط خصائص لتخزين الطاقة الحرارية في نطاق درجات الحرارة من درجة حرارة الغرفة إلى  $75^{\circ}\text{C}$ . مما يتيح دمجها في تطبيقات مختلفة. من أجل تقليل الطلب على الطاقة، واستخدام الطاقة الشمسية أثناء عدم توفرها؛ يتم تهجين أنظمة TES بالطاقة الشمسية [16]، [17].

يمكن تخزين الطاقة الحرارية بواسطة أنظمة تخزين الحرارة المحسوسة أو الكامنة أو الحرارية الكيميائية. في الآونة الأخيرة، تحسن تطبيق تخزين الحرارة الكامنة نظرًا لمرونته العالية. كما ذكر سابقاً، تخزن PCM الطاقة في شكل حرارة كامنة. حيث تمتص الطاقة الحرارية لتغيير حالتها الفيزيائية من الصلبة إلى السائلة، و يكون هذا عادة أثناء مرحلة الشحن؛ يتم تحرير الطاقة أثناء مرحلة التفريغ، يتغير طورها من السائلة إلى الصلبة [15]. يتم تصنيف التحول الطوري لمواد PCM لتخزين الحرارة الكامنة كالتالي: الصلبة-الغاز، الصلبة - السائلة، من الصلبة إلى الصلبة، من السائلة إلى الغاز والعكس صحيح. تحول الطور من الصلبة إلى السائلة ومن السائلة إلى الصلبة هما الأكثر استخداماً و شيوعا بسبب كثافة تخزين الطاقة العالية ونقطة الانصهار العالية [18]. بينما لا يتم استخدام التحولات من الصلبة إلى الغاز ومن السائلة إلى الغاز بسبب التغير الحجمي الكبير الذي يحدث أثناء مرحلة تغير الطور. تمتاز المواد التي تتحول من الصلبة إلى السائلة بالعديد من المزايا، مثل كونها صديقة للبيئة؛ غير سامة؛ ضغط بخار منخفض وموثوقية ووفرة في الطبيعة، ما يجعلها الأكثر موثوقية لتطبيقات التخزين [19].

III.4.4.4. تصنيف المواد متغيرة الطور (PCMs)

هناك العديد من المواد العضوية واللاعضوية في المواد متغيرة الطور التي يمكن تمييزها من خلال حرارة انصهارها الكامنة ودرجة حرارة الذوبان. من الضروري تحديد نقطة الذوبان لأن معظم PCMs لا تلي متطلبات وسائط التخزين المطلوبة بشكل كاف. يُظهر الشكل 3-6 تصنيف PCMs [20]. لا يمكن لمادة واحدة أن تتمتع بجميع الخصائص المطلوبة لوسط تخزين حراري مثالي. يجب على الشخص استخدام المواد المتاحة ومحاولة تعويض الخواص الفيزيائية الضعيفة من خلال تصميم نظام ملائم.



الشكل 3-6: تصنيف المواد متغيرة الطور (PCMs) [14].

III.4.4.4.1. PCM غير العضوية inorganic

تتكون عائلة PCM غير العضوية بشكل أساسي من: الأملاح وهيدرات الأملاح (الأملاح المائية) والمعادن. مركبات هيدرات الملح هي أولى المواد المستخدمة كـ PCM لتخزين الطاقة الحرارية عن طريق تغيير الطور [21]-[23] وهي مركبات ملحية غير عضوية تحتوي على الماء. يتم الحصول عليها عن طريق خلط

المالح وكمية محددة من الماء. تتميز هيدرات الملح بشكل عام بكثافة طاقة عالية (ضعف كثافة الطاقة في مركبات PCM العضوية)، وتمدد حجمي منخفض أثناء تغيير الطور وموصلية حرارية جيدة مقارنة بمركبات PCM الأخرى. يمكننا التمييز بين ثلاثة أنواع من سلوك الأملاح المائية أثناء الانصهار وهي: الانصهار المتطابق، الانصهار شبه المتطابق، والانصهار غير المتطابق.

يحدث الانصهار المتطابق عندما يذوب الملح تمامًا في ماء الترطيب عند درجة حرارة انصهار الملح. السلوك الثاني، وهو سلوك الانصهار شبه المتطابق، يحدث في حالة وجود توازن بين الطور الصلب والسائل أثناء التحول. ويحدث السلوك الأخير في حالة عدم ذوبان الملح بشكل كامل في الماء. تواجه الأملاح المائية مشاكل في تغيير الطور، وتراجع الحرارة الكامنة بعد آلاف الدورات (انخفاض يمكن أن يصل إلى أكثر من 74% لبعض PCMs) والتبريد الفائق (Supercooling).

تشمل المعادن في الأساس المعادن ذات درجة انصهار منخفضة. لم يتم النظر بجديّة حتى الآن في هذا النوع من المواد ذات تغيير الطور لتطبيقات تخزين الطاقة الحرارية بسبب الثقل الزائد.

الجدول 3-4: الخصائص الحرارية والفيزيائية لبعض المواد ذات تغيير الطور غير العضوية *inorganic*.

| PCM   | $T_{\text{fusion}}$ | $K_{\text{PCM}}$ | $L_f$   |
|---|---------------------|------------------|---------|
|   | °C                  | w/(m.K)          | kJ/kg   |
| $\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [24]           | 08                  | -                | 253     |
| $\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [25], [26]          | 18.5-19             | -                | 231     |
| $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [25], [26]      | 28-30               | 1.08-0.54        | 190-200 |
| $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [26] | 35-45               | 0.514-0.476      | 279.6   |
| $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [27] | 36                  | 0.476            | 146.9   |

organic PCMs.2.4.4.III العضوية

يمكن تصنيف PCMs العضوية إلى فئتين: البرافينات وغير البرافينات [28]-[30] البرافينات [31]-[34] هي مشتقات ثانوية لتقطير البترول. وهي عبارة عن مزيج من الألكانات من C1 إلى C24. هذه جزيئات لها الصيغة  $C_nH_{2n+2}$  والصيغة البنائية  $CH_3(CH_2)_n-CH_3$ . البرافينات الموجودة بين C5 وC15 هي سوائل والباقي مواد صلبة شمعية. تجدر الإشارة إلى خاصية مهمة للبرافينات: كلما كانت سلسلة الكربون أطول ارتفعت درجة حرارة الانصهار. البرافينات غير سامة، ومستقرة كيميائياً، وخاملة عند درجة حرارة أقل من 500 درجة مئوية [35].

الجدول 3-5: مواد عضوية ذات استخدام محتمل كمواد تخزين الحرارة (PCM).

| حرارة الإنصهار<br>kJ/kg | درجة حرارة<br>الانصهار | المادة  |
|-------------------------|------------------------|---|
| 275                     | 147                    | Isomalt ((C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>11</sub> .2H <sub>2</sub> O) + (C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>11</sub> )) |
| 247                     | 152                    | Adipic acid   |
| 275                     | 153                    | Dimethylol propionic acid   |
| 255                     | 187                    | Pentaerythritol   |
| 28.5                    | 112                    | AMPL ((NH <sub>2</sub> )(CH <sub>3</sub> )C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> )  |
| 27.6                    | 172                    | TRIS ((NH <sub>2</sub> ) C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> )   |
| 44.3                    | 126                    | NPG ((CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> )   |
| 36.9                    | 260                    | PE (C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>4</sub> )  |

يعرض الجدول 3-6 الخواص الفيزيائية الحرارية thermophysiques لبعض البرافينات.

الجدول 3-6: الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض البرافينات.

| PCM                         | الصيغة الكيميائية | $T_{\text{fusion}}$ | $K_{\text{PCM}}$ | $L_f$   |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|------------------|---------|
|                             |                   | °C                  | w/(m.K)          | kJ/kg   |
| n-Hexadecane [36],[37]      | $C_{16}H_{34}$    | 18.0                | 0.2              | 210-238 |
| n-Heptadecane [36],[37]     | $C_{17}H_{36}$    | 19.0                | 0.2              | 240     |
| Paraffine [38]              | $C_{16}-C_{18}$   | 20.0                | -                | 152     |
| Paraffine [39],[38]         | $C_{17}$          | 21.7                | -                | 213     |
| Paraffine[39],[38]          | $C_{18}$          | -90                 | 0.2              | 189     |
| n-Octadecane [31],[36],[37] | $C_{18}H_{38}$    | 28.0                | 0.15             | 200-245 |
| n-Nonadecane [31][36][37]   | $C_{19}H_{40}$    | 28.0                | 0.36             | 245-250 |
| n-Eicosane [31][36][37]     | $C_{20}H_{42}$    | 36                  | -                | 247.0   |
| n-Henelcosane [31][36][37]  | $C_{21}H_{44}$    | 39.0                | 0.15             | 201.0   |

### الختامة

يعتبر التخزين الحراري مهم جدا لأنظمة التركيز الشمسي، بهدف التزود بالطاقة الحرارية و تعويض التقطع أثناء غياب الإشعاع الشمسي ( الليل، الغيوم....)، للموازنة بين العرض والطلب وتلبية الاحتياجات الطاقوية الحرارية، ومن أجل ذلك سوف نتطرق في الفصل القادم الى دراسة تجريبية حول نظام الPTC المقترن مع خزان التخزين الحراري.

## المراجع

- [1] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rha, and Y. Zeraouli, “Solar Energy Materials & Solar Cells Energy storage : Applications and challenges,” doi: 10.1016/j.solmat.2013.08.015. 2013.
- [2] L. Antoni Gil , Marc Medrano, Ingrid Martorell , Ana Lazaro , Pablo Dolado, Belen Zalba, “State ofthe art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, 2010, doi: doi:10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [3] L. Heller, “Literature Review on Heat Transfer Fluids and Thermal Energy Storage Systems in CSP Plants.” 2013.
- [4] Y. Dutil, D. R. Rousse, N. Ben Salah, S. Lassue, and L. Zalewski, “A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1. pp. 112–130, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.06.011.
- [5] L.K. Edem N’Tsoukpoe, Hui Liu, Nolwenn Le Pierre` s, “A review on long-term sorption solar energy storage K.,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi: 10.1016/j.rser.2009.05.008. vol. 13, 2009,
- [6] B. Cárdenas and N. León, “High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27. pp. 724–737, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [7] B. Cárdenas and N. León, “High temperature latent heat thermal

- energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27. Elsevier Ltd, pp. 724–737, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [8] N. Soares, J. Costa, A.R. Gaspar, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>. *Energy Build.*, vol. 59, 2013,
- [9] A. Pandey, M. Hossain, V. Tyagi, Nasrudin Abd Rahim, Jeyraj A./L. Selvaraj, “Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.043>.
- [10] C. Ben Xu, Peiwen Li, “Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments,” *Appl. Energy*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.016>.  
vol. 160, pp. 286–307, 2015.
- [11] A. Hassan Nazir, Mariah Batool, Francisco J. Bolivar Osorio, Marlory Isaza–Ruiz, Xinhai Xu, K. VignaroobanPatrick Phelan f, Inamuddin, “Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>. vol. 129, pp. 491–523, 2019.
- [12] S. Mohammed M. Farid , Amar M. Khudhair , Siddique Ali K. Razack, “A review on phase change energy storage: materials and



- applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, pp. 1597–1615, 2004, doi: doi:10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- [13] M.S. and D. FELDMAN, “organic phase change materials for thermal energy storage,” *Sol. energy Mater.*, vol. 13, pp. 1–10, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(86\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0165-1633(86)90023-7).
- [14] S. M. Sameer Khare, Mark Dell’Amico, Chris Knight, “Selection of materials for high temperature latent heat energy storage,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 107, pp. 20–27, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.020>.
- [15] H. Nazir, M. Batool, M. Ali, and A. M. Kannan, “Fatty acids based eutectic phase change system for thermal energy storage applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 142, pp. 466–475, 2018.
- [16] M. Abokersh, M. Osman, O. El-Baz, M. El-Morsi, and O. Sharaf, “Review of the phase change material (PCM) usage for solar domestic water heating systems (SDWHS),” *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 2. pp. 329–357, 2018, doi: 10.1002/er.3765.
- [17] G. Alva, L. Liu, X. Huang, and G. Fang, “Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68. pp. 693–706, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.021.
- [18] K. Sharma , P. Ganesan ,V. Tyagi , C. Metselaar, “Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage,” *Energy Convers. Manag.* doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084>. vol. 95,

- pp. 193–228, 2015.
- [19] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, Feb. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
- [20] D. Atul Sharma , V. Tyagi , R. Chen, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Science Direct*, doi:10.1016/j.rser.2007.10.005. vol.13,pp.318–345,2009.
- [21] S. Henri Schmit, Christoph Rathgeber, Peter Hooek, “Critical review on measured phase transition enthalpies of salt hydrates in the context of solid-liquid phase change materials Henri,” *J. Pre-proof*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178477>.
- [22] G. Navin Kumar, Jason Hirsche, Tim J. LaClair and S. Graham, “Review of stability and thermal conductivity enhancements for salt hydrates,” *J. Energy Storage*, vol. 24, p. 100794, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100794>.
- [23] S. Liey Si ,W .Pinto, Y. Milian, “Progress on use of nanoparticles in salt hydrates as phase change materials,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109727>. vol. 122, 2020.
- [24] R. Naumann and H. Emons, “results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials,” *J. Therm. Anal.*, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02057256>. vol. 35, pp. 1009–1031, 1989.
- [25] F. Amar M. Khudhair, “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using

- phase change materials Amar,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, pp. 263–275, 2004, doi: 10.1016/S0196-8904(03)00131-6.
- [26] M. F. & C. JEAN PARIS, “Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings,” *Energy and sources*, doi: 10.1080/00908319308909014. vol. 15, pp. 85–93, 1993.
- [27] I. Dincer, “On thermal energy storage systems and applications in buildings,” *Energy Build.*, vol. 34, pp. 377–388, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00126-8).
- [28] R. Suhanyaa S. Magendran, Fahad Saleem Ahmed Khan, N.M. Mubarak, Mahesh Vaka, Rashmi Walvekar, Mohammad Khalid, E.C. Abdullah, Sabzoi Nizamuddin and Karri, “Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review,” *Nano-Structures Nano-Objects J.*, vol. 20, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399>.
- [29] X. F. Fangxian Wang, Wenzhu Lin, Ziyue Ling, “A comprehensive review on phase change material emulsions: Fabrication, characteristics, and heat transfer performance,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.016>. vol. 191, pp. 218–234, 2019.
- [30] O. Shin Yiing Kee, Yamuna Munusamy, “Review of Solar Water Heaters Incorporating Solid- Liquid Organic Phase Change Materials as Thermal Storage Shin,” vol. 131, pp. 455–471, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.032>. *Appl. Therm. Eng.*
- [31] K. H. M. Sarra Drissi, Tung-Chai Ling, “Thermal efficiency and

- durability performances of paraffinic phase change materials with enhanced thermal conductivity – A review,” *Thermochim. Acta J.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.01.020>. vol. 673, pp. 198–210, 2019.
- [32] Z. M. Raza Gulfam, Peng Zhang, “Raza Gulfam2019.pdf,” *Appl. Energy*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.114>. vol. 238, pp. 582–611, 2019.
- [33] M. Kaja Kalinowska, Paweł Lenartowicz, Jacek Namieśnik, “Analytical procedures for short chain chlorinated paraffins determination - How to make them greener?” *Sci. Total Environ.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.312>. vol. 671, pp. 309–323, 2019.
- [34] F. Xia Wang, Jianbo Zhu, Zimeng Xue, Xini Jin, Yuanxiang Jin, “The environmental distribution and toxicity of short-chain chlorinated paraffins and underlying mechanisms: Implications for further toxicological investigation,” *Sci. Total Environ.*, vol. 695, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133834>.
- [35] G. Himran, a. Suwono, “Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium,” *Energy Sources*, vol. 16, pp. 117–128, 1994, doi: <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>.
- [36] N. Sarier and E. Onder, “Organic phase change materials and their textile applications: An overview,” *Thermochim. Acta*, vol. 540, pp. 7–60, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>.
- [37] L.H. Mehling, “Determination of physical and technical properties,” doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9_3).

---

*Springer*, pp. 57–104, 2008.

- [38] A.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Graciaa, “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 1675–1695, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [39] A. Abhat, “Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,” *Sol. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313–332, 1983, doi: 10.1016/0038-092X(83)90186-X.

الفصل الرابع

الدراسة التجريبية

والنمذجة

مقدمة

من أجل دراسة واختبار كفاءة التخزين الحراري للطاقة الشمسية المجمعة بواسطة المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC) المقترن بالتخزين الحراري وقصد استغلالها عند غياب الاشعاع الشمسي، تم اقتراح، تصميم وإنجاز نموذج تجريبي للمجمع الشمسي وكذا الخزان التخزين بأبعاد محددة. اعتمدت هذه الدراسة التجريبية على استخدام مادة شمع البرافين والتي تعتبر غير مكلفة نسبياً كمادة للتخزين. في هذا الفصل سنتعرف على طريقة التصميم والانجاز، واختيار المواد وخواصها الفيزيائية كما سنتطرق إلى طريقة العمل المتبعة للحصول على النتائج التجريبية.

#### 1.IV. الدراسات المرجعية السابقة

شهد الوقود الأحفوري خلال العقد الماضي استهلاكاً كبيراً ومفرطاً بسبب الطلب المتزايد على الطاقة، مما أثر سلباً على البيئة وسبب الاحترار العالمي [1]. فأصبح من الضروري التقليل من استخداماتها للحفاظ على حياة الكائنات الحية من مخاطر التلوث البيئي، وأوجب البحث عن مصادر جديدة ومتجددة للطاقة.

الطاقة الشمسية هي واحدة من أضخم وأوفر وأرخص أنواع الطاقة المتجددة في العالم [2]، [3]، حيث تعد من أهم مصادر الطاقة المتجددة والخيار الواعد والبديل الأنسب كونها مصدر طاقة نظيف ومتوفر، لها استخدامات عديدة في التطبيقات الحرارية التي تحظى بالكثير من الاهتمام.

الطاقة الشمسية المركزة (CSP) تعتمد أساساً على تركيز الاشعاع الشمسي المباشر لتسخين سائل وتوليد الكهرباء [4]، حيث يتم الاستفادة من هذه التقنيات بشكل جيد في المناطق التي تتلقى اشعاعاً شمسياً مباشراً عالياً. وتتم هذه العملية وفق مرحلتين. المرحلة الأولى يتم فيها امتصاص وتركيز الطاقة الشمسية وتحويلها إلى حرارة، بينما في المرحلة الثانية تحول هذه الحرارة إلى كهرباء.

يعد توافر الاشعاع الشمسي على مدار اليوم والمساحة الواسعة ووجود مصدر للمياه لتبريد وتنظيف العاكسات أمراً ضرورياً لتطوير هذه التقنيات. حيث من المتوقع أن تشهد محطات CSP تطوراً كبيراً في جميع أنحاء العالم ، على غرار شمال إفريقيا و ذلك لتوفرها على ما ذكر فيما سبق [5]. هناك أربعة أنواع من هذه المحطات و هي نظام الصحن، نظام عاكس فرينل الخطي، نظام برج الطاقة والمجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ يعتبر المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC) من بين أهم أنظمة تركيز الطاقة الشمسية (CSP) [6] المستخدمة في التطبيقات الصناعية لإنتاج الماء الساخن و البخار.

حيث تبلغ المساهمة العالمية لنظام PTC في توليد الطاقة حوالي 73.58% ومن المتوقع أن تصل الى ما يقارب 800GW وبذلك تمنع انبعاث 1.2 مليار طن من غاز CO<sub>2</sub> سنويا بحلول سنة 2050 [7]، [8].

تقع مدينة ورقلة في الجنوب الشرقي للجزائر، على ارتفاع 164 متراً، على دائرة عرض 31.57° شمالاً وخط طول 5.21° [9]. مناخها من النوع الصحراوي، تتميز بدرجات حرارة منخفضة في الشتاء، ودرجات حرارة شديدة الارتفاع في الصيف. موقعها الجغرافي ومناخها المميز يجعلها من بين المناطق التي تمتاز بوفرة في الاشعاع الشمسي، فمتوسط تدفق الطاقة الشمسية على سطح أفقي في الجنوب (الصحراء) يبلغ 2650 KWh/an/m<sup>2</sup> مع حوالي 3500 ساعة من التشميس في السنة [8].

إلا أن الطبيعة المتقطعة للإشعاع الشمسي دفعت الباحثين و العلماء إلى البحث عن حلول لسد ثغرة التقطع، أحد أهم الخيارات والحلول المتاحة هو تطوير تقنيات التخزين الحراري للطاقة (TES) [3] والتي لا تقل أهمية عن تطوير مصادر جديدة للطاقة. حيث توفر أنظمة (TES) إمكانية تحقيق وفرة في الطاقة، في غياب الشمس (أثناء الليل و في الأيام الغائمة) [5]، [10].



أشكال تخزين الطاقة الحرارية هي ثلاثة، المحسوس، الكامن والكيميائي الحراري. من بين أنظمة TES، حظي التخزين الحراري الكامن (LHS) باهتمام كبير لأنه يتطلب حجماً أقل لتخزين الطاقة الحرارية ويحدث ذلك عند درجة حرارة ثابتة تقريباً [11]-[13].

يستخدم LHS على نطاق واسع في تحويل واستخدام الطاقة الشمسية، الطاقات المتجددة الأخرى، أنظمة استرداد الحرارة المختلفة، وتخزين الكهرباء خارج فترات الذروة [14]، [15].

كما يعد تخزين (LHS) باستخدام المواد متغيرة الطور (PCM) من بين التقنيات الأكثر فعالية لتخزين الطاقة الحرارية أثناء توفر الإشعاع الشمسي واستخدامها عند غياب الشمس (غيوم أو ليلاً) [16] وذلك نظرًا لمزاياها (كثافة تخزين الطاقة العالية وخصائصها التشغيلية المتساوية أثناء عمليات التصلب والذوبان) [16]، [17].

نظرًا للمزايا المتعددة للطاقة الشمسية اقتصادياً وبيئياً، ومن أجل استخدامها في غياب الشمس (الليل) أو في الظروف الجوية الغائمة، يتم دراسة استخدام طرق مفيدة لتخزين الحرارة لزيادة كفاءة PTCs من قبل الباحثين مثل التخزين الحراري الكامن باستخدام PCM كنظام تخزين للطاقة [18]-[25].

قامت Djemaa Guerraiche et al في سنة 2020 بدراسة تجريبية عديدة لتأثير استخدام خليط كمادة متغيرة الطور PCM في PTC يتكون من 60% من  $\text{NaNO}_3$  و 40% من  $\text{KNO}_3$  [25] حيث أظهرت نتائج هذه الدراسة أن استخدام PCM يزيد من كفاءة PTC بنسبة تصل إلى 15%.

في سنة 2015 وجد M.A. Kibria et al في دراستهم أن الجمع بين PCM والجسيمات النانوية يمكن أن يزيد من الأداء الحراري لـ PCM [26].

توصل Hussain H. Al-Kayiem و Saw C. Lin سنة 2016 في دراستهم أن إضافة 1% من النحاس إلى شمع البرافين أدت إلى زيادة الأداء الحراري لنظام تخزين الحرارة الشمسية [27]. أجرى S. Babu Sasi Kumar et al سنة 2018 دراسة تجريبية، استقصائية لوعاء الطهي المباشر من وحدة تجميع الأحواض المكافئة (PTC) مقترن مع PCM لتخزين الحرارة. حيث حقق استخدام معدل التدفق الكتلي 0.035 Kg/s (MFT). نتائج أفضل من 0.045MFT Kg/s و 0.065، وبالتالي تحقيق طاقة أكبر [28].

سنة 2020، قام Guangjian Peng et al بإجراء مراجعة شاملة ومناقشة خمسة جوانب لكبسولات PCM (تصنيف PCMs، المواد المستخدمة في تغليف الكبسولات تقنيات الكبسولة الدقيقة، توصيفات كبسولات PCM الدقيقة والتطبيقات الحرارية)، وذلك من أجل مساعدة الباحثين في استخدام هذه التقنية لتخزين الطاقة الحرارية في المستقبل، توصلوا إلى أنها تقنية واعدة إلا أنه لا بد من إجراء تحسينات لتخطي بعض العقبات. أهم عقبة أمام التطبيق الصناعي لكبسولات PCM الدقيقة والتي تستوجب معالجتها هي ظاهرة التبريد الفائق التي تحدث عندما يتم تبريد السائل إلى ما دون نقطة تجميده العادية دون أن يتحول كلياً إلى الحالة صلبة [29].

Hazim Jassim Jaber et al سنة 2021، استخدموا PCM، في دراسة تجريبية لمقطرات ثابتة للطاقة الشمسية مقترنة أو غير مقترنة بمجمع الطاقة الشمسية الأسطواني القطع مكافئ. وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة، فإن اللواقط الشمسية المزودة بمجمع أسطواني قطع مكافئ PTC لها درجات حرارة أعلى وإنتاجية أعلى من المقطرات الشمسية التي لا تحتوي على PTC، فضلاً عن القدرة على تخزين الطاقة الحرارية الكامنة في وحدة التقطير الشمسية، مما يسمح بتكثيف المياه العذبة حتى بعد غروب الشمس. حيث يساعد استخدام مادة متغيرة الطور لتخزين الحرارة في الحفاظ على حوض الماء ساخناً، مما يسمح

بعملية التكتيف لفترة أطول وبالتالي زيادة معدل تبخر المياه المالحة في الحوض ومعدل تكتيف الماء المتبخر في منطقة الهواء الرطب يحسن إنتاجية الطاقة الشمسية بنسبة تصل إلى 42% [29].

تم إجراء تحقيق تجريبي سنة 2021 في الهند من قبل Virendra Vishnu Bhagwat et al

من أجل دراسة أداء أنبوب حراري بمساعدة مجمع حوض القطع المكافئ (PTC) مقترن مع مادة متغيرة الطور (PCM) قائمة على شمع البرافين، قاموا بالمقارنة بين نظام التخزين مع وبدون زعانف. حيث قدر الحد الأقصى لمتوسط درجات الحرارة لل PCM بـ  $63^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  مع وبدون زعانف على التوالي. وبلغت كفاءة الشحن ومتوسط كفاءة التفريغ في وجود الزعانف 44.7% و 32.7% على التوالي وهو أعلى بالمقارنة مع غياب الزعانف بالإضافة إلى ذلك وجدوا أن وجود الزعانف يقلل من فترة استرداد الطاقة لجهاز التخزين الحراري. و أنه يمكن مساعدة استخدام PCM وأنابيب الحرارة والزعنفة لتحقيق أعلى كفاءة حرارية ممكنة في تحويل الطاقة الشمسية للحصول على الماء الساخن [16].

يُفضل اختيار مادة تغير الطور PCM التي تتغير من صلب إلى سائل أو سائل إلى صلب لأنها تعمل بضغط منخفض عند مقارنتها بسائل إلى غاز أو غاز إلى سائل [30]، تم اختيار شمع البرافين كمادة LHS نظرًا لنطاق درجة حرارة انصهاره المناسبة، بالإضافة إلى حرارته الكامنة المرتفعة نسبيًا. حيث يوفر البرافين خاصية ذوبان متطابقة (تغير الطور مع حفاظ المادة على نفس خصائصها الكيميائية) [31]. كما أن البرافين مستقر كيميائيًا وغير سام وغير قابل للتآكل [16]، [32].

#### 2.IV. تصميم المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC)

اعتمدنا في هذا العمل التجريبي والمتمثل في تصميم وتصنيع نموذج PTC مقترن مع خزان التخزين

الحراري بغرض استغلال الاشعاع الشمسي المباشر للاستفادة منه لتخزين الحرارة أثناء وجود الشمس واستغلالها في

غيابها ( أثناء الليل أو الغيوم) وفقا للظروف الفلكية والجوية لمدينة ورقلة وفق ما يلي:

1. التصميم.
2. اختيار المواد المناسبة والأقل تكلفة والمتوفرة في السوق المحلي.
3. إنجاز وتصنيع ال PTC المقترن بخزان التخزين الحراري.
4. اختبار التجريب ومقارنتها بقيم المحاكاة ثم بدأ تسجيل نتائج القياس التجريبية ثم معالجتها بيانيا من خلال برنامج Origin.

### 3.IV. مراحل تصميم وإنجاز المجمع الأسطواني القطع مكافئ

وقد تم تصميم وتنفيذ واختبار نظام PTC المقترن بالخزان بمخبر LENREZA بجامعة قاصدي مرباح ورقلة.

يعتبر شمع البرافين من المواد متغيرة الطور PCM المناسبة لتطبيقات الطاقة الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة بسبب نطاق انصهارها المنخفض (البرافين المستعمل  $52^{\circ}\text{C}$ - $54^{\circ}\text{C}$ ). يوضح الشكل 1-4 تصميم ال PTC المنجز ويوضح الشكل 2-4 (أ) والشكل 2-4 (ب) شمع البرافين المستخدم في العمل التجريبي والخزان الحراري الذي يحوي المادة متغيرة الطور (شمع البرافين) على التوالي.



الشكل 1-4: تصميم ال PTC المنجز.



(أ)



(ب)

الشكل 4-2: (أ) شمع البرافين المستخدم، (ب) خزان التخزين الحراري.

الجدول 4-1: الخصائص الحرارية والفيزيائية لـ PCM المستعمل ومائع التشغيل [16].

| الخصائص          | المادة       | اللزوجة<br>(Pa s)      | الحرارة<br>اللاطية<br>(kJ/kg) | الحرارة النوعية<br>(kJ/kgK) | الموصلية الحرارية<br>(W/mK) | الكثافة<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| PCM<br>54°C-52°C | شمع البرافين | $3.09 \times 10^{-3}$  | 190                           | 2.29 (السائل)               | 0.39 (الصلب)                | 876 (الصلب)                     |
|                  |              |                        |                               | 2.1 (الصلب)                 | 0.21 (السائل)               | 795 (السائل)                    |
| مائع التشغيل     | الماء (سائل) | $8.614 \times 10^{-4}$ | 2434.9                        | 4.18                        | 0.6132                      | 996.6                           |

المكونات الرئيسية التي تم استخدامها والاعتماد عليها هي خزان أسطوانتي لتعبئة PCM من أجل

التخزين الحراري. والمجمع PTC لتسخين المياه.

يستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ أو الالينوكس كمادة لتصنيع PTC بسبب موصليته الحرارية العالية [16]، ويتم

استخدام حامل حديدي لدعم التركيب. تم ذكر أبعاد ومزايا PTC والخزان في الجدولين 2-4 و 3-4 أدناه:

الجدول 2-4: أبعاد ومعلومات PTC.

| مادة الصنع                               | الفولاذ المقاوم للصدأ<br>(inox) |
|--|---------------------------------|
| معادلة القطع المكافئ (m)                 | $y = \frac{1}{4 \cdot f} x^2$   |
| الطول L (m)                              | 2                               |
| العرض W (m)                              | 1.8                             |
| مساحة الفتحة $A_{app}$ (m <sup>2</sup> ) | 3.6                             |

الجدول 3-4: أبعاد الخزان الحراري.

| مادة الصنع                              | الفولاذ المقاوم للصدأ<br>(inox) |
|---|---------------------------------|
| $r_2$ القطر الخارجي (m)                 | 0.30                            |
| $r_1$ القطر الداخلي (m)                 | 0.26                            |
| $(r_2 - r_1) / 2 = e$<br>سمك الجدار (m) | 0.02                            |
| $h_1$ طول الخزان الداخلي (m)            | 0.25                            |
| $h_2$ طول الخزان الخارجي (m)            | 0.27                            |

#### 4.IV. المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ مقترن مع التخزين الكامن للطاقة الحرارية

##### 1.4.IV. مراحل الإعداد التجريبي

مكونات الإعداد التجريبي المنجز هي خزان تخزين حراري (thermal storage tank)

أسطواني الشكل يحتوي على شمع البرافين وذلك من اجل تعزيز التخزين الحراري، مجمع حوض مكافئ (PTC)،

مضخة للماء وجهاز لقياس تدفق الماء BAMO.

يتم تعبئة شمع البرافين والماء كمائع لنقل الحرارة HTF في خزان التخزين المكون من الفولاذ المقاوم

للصدأ بقطر خارجي  $\sim 0.30\text{m}$ ، وقطر داخلي  $\sim 0.26\text{m}$  وارتفاع  $\sim 0.25\text{m}$ ، وسماكة جدار  $\sim 0.02\text{m}$ .

يتم تعبئة الماء في خزان التخزين الداخلي وملاً الفراغ الموجود بين الخزائين (الداخلي والخارجي) بشمع البرافين،

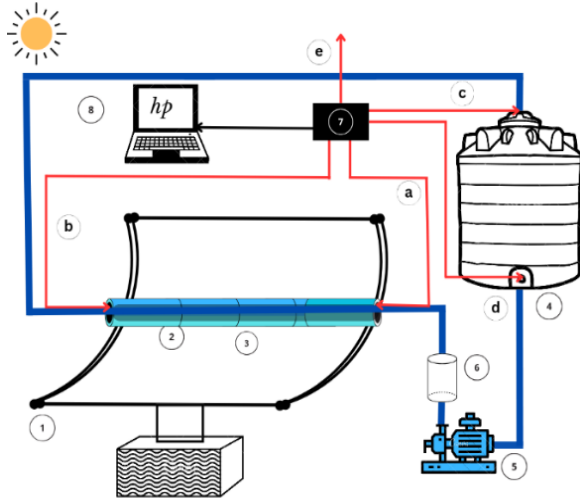
يحدث تركيز للإشعاع الشمسي من خلال التتبع الشمسي للـ PTC بمحور دوران (شرق-غرب) نتيجة للتوجه

بين شرق غرب الشمس. على مستوى أنبوب الامتصاص المثبت في المحور الخطي للمجمع PTC ذو السطح

العاكس الذي يسري بداخله HTF والذي يمتص الحرارة من أنبوب الامتصاص، بعد خروجه من الخزان

نحو PTC ثم يعود الى الخزان مرة أخرى وتستمر هذه العملية وفق دورة مغلقة من شروق الشمس الى غروبها

(الشكل 4-3).



1. المركز الأسطواناني القطع المكافئ، 2. الأنبوب الماص، 3. طرف زجاجي، 4. خزان تخزين المياه، 5. مضخة، 6. جهاز قياس التدفق، 7. أردوينو
8. الحاسوب، a-b-c-d-e المزدوجات الحرارية.

(ب)

(أ)

الشكل 3-4: التركيب التجريبي للمجمع الشمسي PTC المقترن بخزان التخزين الحراري لتعزيز تخزين الطاقة الحرارية الكامنة: (أ) الاعداد التجريبي، (ب) الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي.

#### 2.4.IV. وصف النظام أثناء مرحلة الشحن

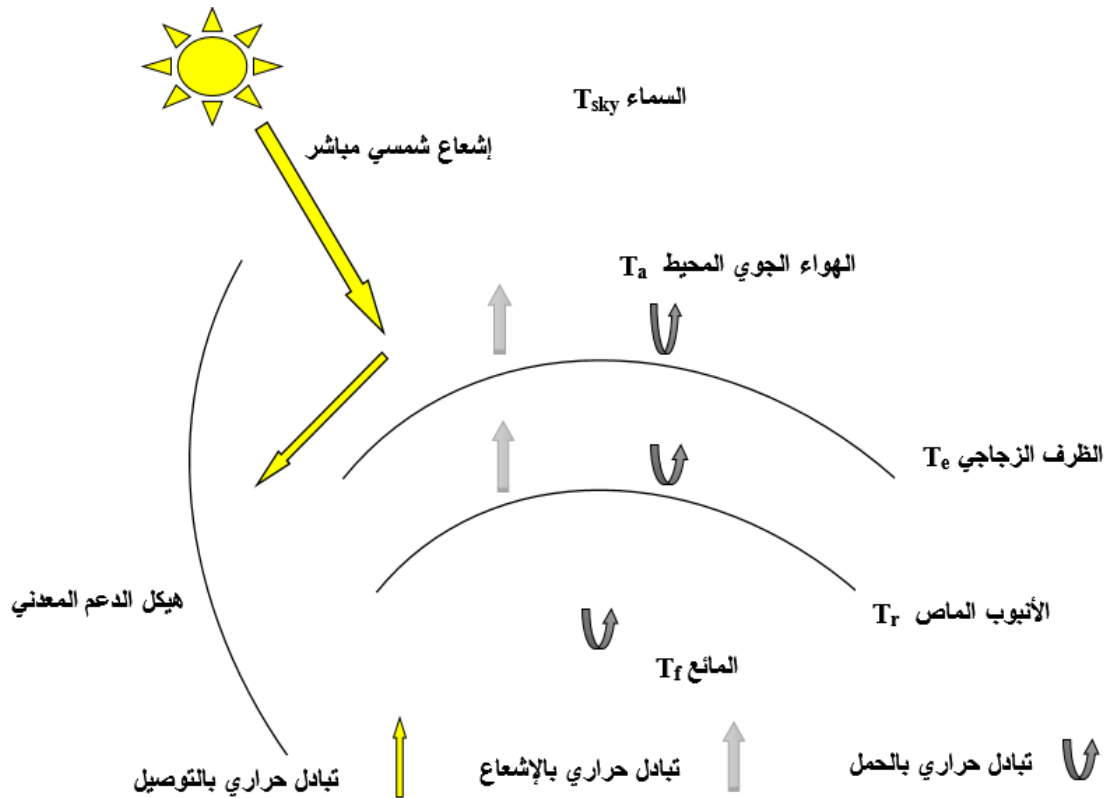
يمر هذا النظام أثناء مرحلة الشحن بما يلي:

يتدفق الماء الذي يخرج من الخزان في الانبوب الماص الموجود في الخط البؤري أين يتركز الاشعاع الشمسي فتنتقل الحرارة الى الماء فيسخن ثم ينقل الحرارة الى المادة متغيرة الطور (شمع البرافين) المتواجدة في الخزان والمحيطه به مما يؤدي الى رفع درجة حرارته تدريجيا ومن ثم يبدأ بالذوبان أثناء مرحلة تغير الطور فيتم تخزين الطاقة الحرارية على مستواه على شكل حرارة محسوسة وكامنة، تبلغ أقصى قيم لها عند الظهيرة وتستمر هذه المرحلة من الشروق الى الغروب، في نهاية هذه المرحلة يتحول شمع البرافين كلياً الى الحالة السائلة.



#### 5.IV. الموازنة الحرارية للـ PTC المنجز تجريبيا

الإشعاع الشمسي المباشر الذي يرد على سطح الفتحة ينعكس على العاكس الأسطواني القطع مكافئ، ويتم تركيز الإشعاع الذي ينفذ نحو العنصر الجامع للحرارة، فيمتص الظرف الزجاجي جزء  $Q_{abs \rightarrow e}$  والباقي ينفذ إلى الأنبوب الماص، حيث يتم امتصاص الإشعاع على شكل حرارة  $Q_{abs \rightarrow r}$ ، كما أنه ينفذ جزء من الحرارة الممتصة إلى المائع الناقل للحرارة (HTF) عن طريق الحمل الحراري (حرارة مفيدة)  $Q_{net \rightarrow f}$ . بينما الباقي ينتقل إلى الظرف الزجاجي بواسطة الحمل الطبيعي والإشعاع، بالإضافة إلى الحرارة التي امتصها الظرف، ومن الظرف الزجاجي نحو الهواء الجوي المحيط بالحمل الحراري، ونحو السماء بالإشعاع، على شكل ضياعات كما يوضحه الشكل 4-4.



الشكل 4-4: مخطط التبادلات الحرارية للمجمع (PTC).

وسنقوم بكتابة معادلات الموازنة الحرارية لكل أسطح مكونات ال PTC ، وذلك اعتمادا على

القانون الأول للترموديناميك.

$$\dot{Q}_{st} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s + \dot{Q}_g \quad (4 - 1)$$

حيث

$\dot{Q}_e$ : التدفق الحراري الداخل.

$\dot{Q}_s$ : التدفق الحراري الخارج.

$\dot{Q}_g$ : التدفق الحراري المتوالد.

$\dot{Q}_g$ : التدفق الحراري المخزن.

نفترض في هذه الدراسة الافتراضات التالية أثناء مرحلة التخزين والتفريغ:

- يوم صحو بدون غيوم.
- خصائص المواد متماثلة في الطبيعة.
- يتم الحفاظ على حالة شبه مستقرة أثناء انتقال الحرارة.
- يتم إهمال التوصيل المحوري الطولي في أنبوب الحرارة.

## 6.IV. الدراسة التحليلية ونمذجة التخزين الحراري

### 1.6.IV. الموازنة الطاقوية لمكونات ال PTC

#### 1.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة لمائع نقل الحرارة f

يستقبل HTF الحرارة من الأنبوب الماص عبر سطح التبادل الحراري بواسطة الحمل القسري

حسب طبيعة تدفق المائع (رقائقي أو مضطرب). ثم يتم تخزينها من طرف HTF على شكل حرارة محسوسة (في

غياب التغير الطوري لمائع التشغيل) مما يؤدي الى رفع درجة حرارته حيث تكتب معادلة الموازنة كما يلي:

$$m_f C_{pf} \frac{dT_f}{dt} = h_{\text{conv}(r \rightarrow f)} (T_r - T_f) \cdot A_{r_{\text{int}}} \quad (4 - 2)$$

المساحة الجانبية (مساحة التبادل).

$$A_{r_{\text{int}}} = \pi D_{r_{\text{int}}} \cdot L \quad (4 - 3)$$

$$m_f = \rho_f \cdot v_f = \rho_f A_f L \quad (4 - 4)$$

حيث مساحة مقطع الأنبوب الماص.

$$A_f = \frac{\pi}{4} D_{r_{\text{int}}}^2 \quad (4 - 5)$$

ومنه نكتب:

$$\rho_f \frac{D_{r_{\text{int}}}}{4} C_{Pf} \frac{dT_f}{dt} = h_{\text{conv}(r \rightarrow f)} (T_r - T_f) \quad (4 - 6)$$

ويعطى معامل انتقال الحرارة بين الأنبوب الماص والمائع:

$$h_{\text{conv}(r \rightarrow f)} = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{D_{r_{\text{int}}}} \quad (4 - 7)$$

في حالة السريان الرقائقي للمائع  $Re_D \leq 2300$  فان رقم نوسلت لا يتعلق برقم رينولدز ولا برقم برانتل

ويعطى بالعلاقة [31]:

$$Nu_f = 4.36 \quad (4 - 8)$$

في حالة السريان المضطرب أو الانتقالي من أجل:

$$2300 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6$$

و

$$0.5 \leq Pr \leq 2000$$

تعطى عبارة نوسلت بصيغة Gnielinski [31]:

$$Nu_f = \frac{\left(\frac{C_f}{2}\right) \cdot (Re_D - 1000) \cdot Pr_{\infty}}{1 + 12.7 \left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left(\frac{Pr_{\infty}}{Pr_s}\right)^{0.11} \quad (4 - 9)$$

$$Re_D = \frac{v_f \rho_f D_{r_{int}}}{\mu_f} \quad (4 - 10)$$

$$v_f = \frac{4\dot{m}}{\rho_f \pi D_{r_{int}}^2} \quad (4 - 11)$$

تُحسب الخصائص الحرارية عند  $T_{moy} = \frac{T_f + T_r}{2}$  ما عدا  $Pr_W$  فإنها تُحسب عند درجة حرارة الأنبوب الماص. ونُحسب معامل الاحتكاك  $C_f$  في حالة الأنابيب الملساء بعلاقة Filonenko.

$$C_f = (1.58 \ln Re_D - 3.28)^{-2} \quad (4 - 12)$$

#### 2.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة للأنبوب الماص $r$

يستقبل الأنبوب الماص الإشعاع الشمسي بعد نفاذه من الظرف الزجاجي الأسطواني ثم الانعكاس،

ثم يتم تخزينه على شكل حرارة، وتنتقل الحرارة منه إلى المائع بالحمل القسري وإلى الظرف الزجاجي بالحمل والإشعاع، ونكتب معادلة الموازنة بالشكل التالي:

$$\rho_r A_r C_{pr} \frac{dT_r}{dt} = IC_g \tau_e \alpha_r \rho^{\circ} \pi D_{r_{ext}} + (h_{conv(r \rightarrow e)} + h_{rad(r \rightarrow e)}) \cdot (T_e - T_r) \pi D_{r_{ext}} + h_{conv(r \rightarrow f)} \cdot (T_f - T_r) \pi \cdot D_{r_{int}} \quad (4 - 13)$$

حيث مساحة مقطع جدار الأنبوب الماص

$$A_r = \frac{\pi}{4} (D_{r_{ext}}^2 - D_{r_{int}}^2) \quad (4 - 14)$$

يتم انتقال الحرارة بين الأنبوب الماص والظرف الزجاجي بالحمل الحراري الجزيئي الحر في حالة تفرغ

الظرف الزجاجي، يكون الضغط داخل الظرف  $(P < 1 \text{ mm Hg})$  [32]، حيث يعطى معامل الانتقال في

هذه الحالة بالعلاقة [33]:

$$h_{conv(e-r)} = \frac{\lambda_g}{\frac{D_{r_{ext}}}{2 \ln\left(\frac{D_{r_{int}}}{D_{r_{ext}}}\right)} + bK \left(\frac{D_{r_{int}}}{D_{r_{ext}}} + 1\right)} \quad (4 - 15)$$

حيث الثوابت  $b$  و  $K$  تعطى بالعلاقات:

$$b = \frac{(2 - a)(9\gamma - 5)}{2a(\gamma + 1)} \quad (4 - 16)$$

$$k = \frac{2.331 \cdot 10^{-20} \left[ \left( \frac{T_r - T_e}{2} \right) + 273.15 \right]}{P\delta^2} \quad (4 - 17)$$

$\lambda_g$ : متوسط معامل انتقال الحرارة للغاز داخل الظرف الزجاجي في الظروف القياسية عند متوسط درجة الحرارة بين الأنبوب الماص والظرف الزجاجي ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ).

$K$ : متوسط المسار الحر للجزيئات الغاز داخل الظرف (m)

$b$ : معامل التأثير المتبادل للجزيئات الغاز

$a$ : معامل الموضع الحراري للجزيئات الغاز وتتراوح قيمته من 0.01 إلى 1، حسب لزوجة الغاز، وفي حالة التفاعل (غاز - صلب) فإنه يمكن اعتبار ( $a=1$ ) تقريبا.

$\gamma$ : نسبة الحرارة النوعية للغاز داخل الظرف

$P$ : الضغط داخل الظرف (mm Hg)

$\delta$ : القطر الجزيئي للغاز داخل الظرف (cm). بالنسبة للهواء يعطى  $\delta = 3.66 \times 10^8 [34]$ .

بينما يكون الانتقال بالحمل الحراري الحر (الطبيعي) في حالة عدم تفرغ الظرف من الهواء، ويعطى

معامل انتقال الحرارة في هذه الحالة بالعلاقة [35]:

$$h_{conv (e-r)} = \frac{2\pi\lambda_{eff}L}{\ln \frac{D_{r_{int}}}{D_{r_{ext}}}} \quad (4 - 18)$$

حيث:

$$\lambda_{eff} = 0.386 \lambda_a \left( \frac{Pr_a}{8.61 + Pr_a} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cil} Ra_a)^{\frac{1}{4}} \quad (4 - 19)$$

$$F_{cil} = \frac{\left( \ln \left( \frac{D_{e_{int}}}{D_{r_{ext}}} \right) \right)^4}{\left( \frac{D_{r_{int}} - D_{r_{ext}}}{2} \right)^3 \left( D_{e_{int}}^{-3/5} + D_{r_{ext}}^{-3/5} \right)^5} \quad (4 - 20)$$

حيث:

$\lambda_{eff}$ : معامل انتقال الحرارة الفعال ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ).

$L$ : طول الأنبوب الماص  $m$ .

$\lambda_a$ : معامل الانتقال بالحمل الحراري للهواء عند متوسط درجة الحرارة بين الظرف الزجاجي والأنبوب الماص ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ).

$F_{cil}$ : معامل الشكل الهندسي لأسطوانتين متمحورتين.

$Ra_a$  و  $Pr_a$  رقمي برانتل ورايلي من أجل متوسط درجة الحرارة بين الظرف والأنبوب الماص وعند البعد

$$\frac{D_{e_{int}} + D_{r_{ext}}}{2} \text{ المتوسط.}$$

مع ضرورة أخذ  $\lambda_{eff} = \lambda_a$  في حالة ما إذا كانت  $\lambda_{eff} < \lambda_a$ .

حيث معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الأنبوب الماص و الظرف الزجاجي يعطى بالعلاقة [31]:

$$h_{rad (e-r)} = \frac{\sigma(T_r + T_e)(T_r^2 + T_e^2)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1-\epsilon_e}{\epsilon_e} * \left( \frac{D_{r_{ext}}}{D_{r_{int}}} \right)} \quad (4 - 21)$$

#### 3.1.6.IV. معادلة موازنة الطاقة للظرف الزجاجي e

يستقبل الظرف الزجاجي الإشعاع الشمسي ويتبادل الحرارة مع الأنبوب الماص بالحمل والإشعاع،

وكذلك مع السماء والهواء الجوي بالحمل والإشعاع على الترتيب، ونكتب معادلة الموازنة على الشكل التالي:

$$\begin{aligned} \rho_e A_e C_{pe} \frac{dT_e}{dt} &= IC_g \alpha_e \rho \pi D_{e_{ext}} + \left( h_{conv(e \rightarrow r)} + h_{rad(e \rightarrow r)} \right) \cdot \pi D_{e_{ext}} (T_r - T_e) \\ &+ \left[ \left( h_{conv(e \rightarrow amb)} (T_{amb} - T_e) \right. \right. \\ &\left. \left. + h_{rad(e \rightarrow sky)} \cdot (T_{sky} - T_e) \right) \right] \pi \cdot D_{e_{ext}} \end{aligned} \quad (4 - 22)$$

حيث مساحة مقطع جدار الظرف الزجاجي:

$$A_e = \frac{\pi}{4} (De_{ext}^2 - De_{int}^2) \quad (4 - 23)$$

يعطى معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري مع الهواء الجوي المحيط كما يلي:

في حالة الحمل الطبيعي

في حالة سرعة الرياح معدومة، نستخدم علاقة chu و churchill [36] للحمل الحراري محاط بأسطوانة

أفقية يعطى معامل الحمل الحراري بالعلاقة التالية:

$$h_{conv(e-amb)} = \left[ 0.6 + 0.387 * \left[ \frac{Ra_{air}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr_{air}} \right)^{9/16} \right)^{16/9}} \right]^{1/6} \right]^2 * \frac{K_{air}}{De_{ext}} \quad (4 - 24)$$

الخصائص الفيزيائية للهواء تحسب عند درجة الحرارة المتوسطة:

$$T_{m_{ext}} = \frac{T_{amb} + T_e}{2}$$

في حالة الحمل القسري

في حالة سرعة الرياح غير معدومة حسب علاقة zhukauskas يعطى معامل الحمل الحراري بالعلاقة التالية:

$$h_{conv(e-amb)} = C Re_{air}^n Pr_{air}^m \left( \frac{Pr_{air}}{Pr_e} \right)^{1/4} * \frac{K_{air}}{De_{ext}} \quad (4 - 25)$$

تعطى قيم  $C$ ،  $n$  و  $m$  بالعلاقات التالية:

$$\begin{aligned} 1 < Re_{air} \leq 40 & \rightarrow C = 0.75 \quad n = 0.4 \\ 40 < Re_{air} \leq 10^3 & \rightarrow C = 0.51 \quad n = 0.5 \\ 10^3 < Re_{air} \leq 2 * 10^5 & \rightarrow C = 0.26 \quad n = 0.6 \\ 2 * 10^5 < Re_{air} \leq 10^6 & \rightarrow C = 0.076 \quad n = 0.7 \end{aligned}$$

مع

$$m = \begin{cases} 0.37 & Pr_{air} \leq 10 \\ 0.36 & Pr_{air} > 10 \end{cases}$$

في هذه الحالة الخصائص الفيزيائية للهواء الخارجي تحسب عند درجة حرارة المحيط  $Pr_e$  و  $T_{amb}$

تحتسب عند درجة حرارة الظرف الزجاجي.

#### 7.IV. الإشعاع الحراري

السطح الخارجي للظرف الزجاجي يشع نحو السماء (نعتبر الشمس جسم أسود) عن طريق الأشعة

تحت الحمراء، ويعطى هذا الإشعاع بموجب قانون ستيفان بولتزمان:

$$\begin{aligned} h_{rad(e-sky)} &= \epsilon_e \sigma \left[ (T_{sky} + 273)^2 + (T_e + 273)^2 \right] \\ &* (T_{sky} + T_e + 546) \end{aligned} \quad (4 - 26)$$

تدفق انتقال الحرارة الخارجية  $Q_{(ext)}$  يعطى بالعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} Q_{(ext)} &= Q_{conv(ext)} + Q_{ray(ext)} \\ &= A_{e(ext)} \left[ h_{conv(e-amb)} (T_e - T_a) \right. \\ &\left. + h_{ray(e-sky)} (T_e - T_{sky}) \right] \end{aligned} \quad (4 - 27)$$

وتعطى درجة حرارة السماء بالعلاقة:

$$T_{sky} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (4 - 28)$$

كما تحسب درجة حرارة الجو المحيط بالعلاقة [37]:



$$T_a = \left[ \frac{T_{a \text{ Max}} - T_{a \text{ Min}}}{2} \right] \sin \left[ \frac{(t - 8)\pi}{12} \right] + \left[ \frac{T_{a \text{ Max}} + T_{a \text{ Min}}}{2} \right] \quad (4 - 29)$$

حيث  $T_{a \text{ Max}}$  و  $T_{a \text{ Min}}$  درجتى حرارة الجو المحيط القصى والدنيا في الشهر محل الدراسة (الملحق أ).

t : التوقيت المحلي معبرا عنه بالساعات.

#### 8.IV. المماثلة الكهربائية للنظام المدرس

يمكن مماثلة شدة التدفق الحراري مع شدة التيار الكهربائي كما يلي:

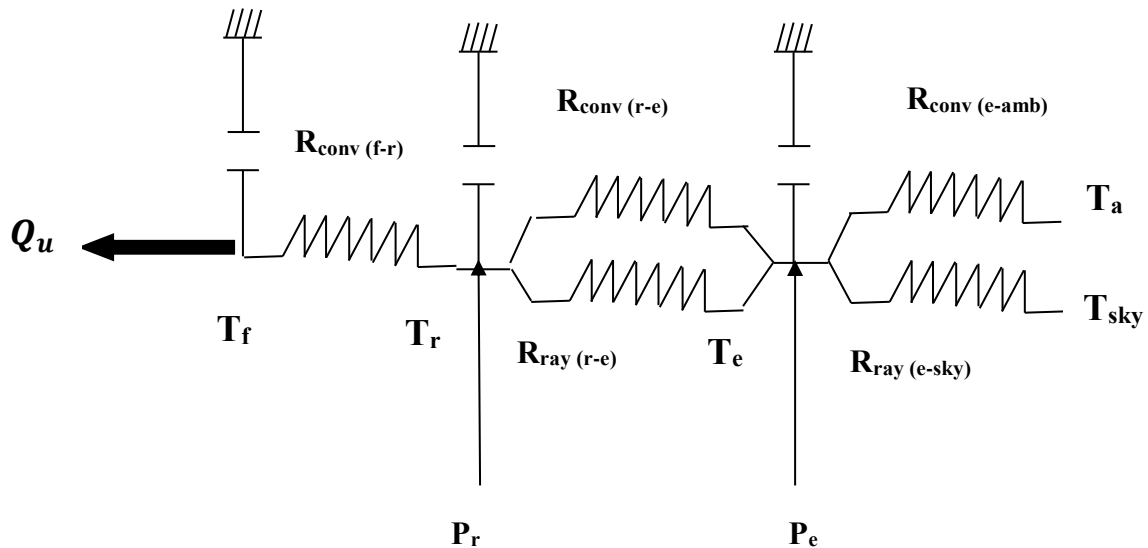
$$Q_{\text{conv, ray}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] = h_{\text{conv, ray}} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \cdot \Delta T [^\circ C] \quad (4 - 30)$$

$$I [A] = \frac{\Delta V}{R} \left[ \frac{V}{\Omega} \right] \quad (4 - 31)$$

ان فرق الجهد الكهربائي الذي بسببه ينتقل التيار الكهربائي من الكمون المرتفع إلى الكمون

المنخفض، يماثله في النظام الحراري الفرق في درجة الحرارة، والتي بسببها ينتقل التدفق الحراري من المصدر الأعلى

إلى المصدر الأقل درجة حرارة، حيث يمكننا تمثيل مخطط الدارة الكهربائية المكافئة كما في الشكل 4-5.



الشكل 4-5: مخطط المماثلة الكهربائية للنظام الحراري المدرس للمجمع (PTC).

ومنه فإن المقاومة الحرارية تعطى بالعلاقة

$$R_{\text{conv, ray, cond}} = \frac{1}{h_{\text{conv, ray, cond}}} \quad (4 - 32)$$

P تمثل شدة تدفق الإشعاع الشمسي الممتص لكل عنصر وتعطى عبارة كل منها:

$$P_r = I * C_g * \eta_{op} \quad (4 - 33)$$

$$P_e = I * C_g * \rho^\circ * \tau_c * \alpha_e \quad (4 - 34)$$

$$P_c = I * \alpha_c \quad (4 - 35)$$

تعطى عبارة التدفق الحراري المفقود على مستوى الأنبوب الماص نحو الهواء الجوي المحيط

(بالحمل والإشعاع الحراري) مع الظرف الزجاجي، بالعلاقة التالية:

$$Q_{\text{loss}} = U_L * A_r (T_r - T_a) \quad (4 - 36)$$

حيث  $U_L$ : معامل متوسط الضياع الحراري للأنبوب الماص.

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{conv}}(r \rightarrow e) + Q_r(r \rightarrow e) = U_L * A_{r_{\text{ext}}} (T_r - T_a) \quad (4 - 37)$$

$$A_{r_{\text{ext}}} = \pi * D_{r_{\text{ext}}} \quad (4 - 38)$$

ومنه نكتب معادلة الموازنة الكلية للنظام [38]:

$$I * \rho^\circ * \tau_c * \tau_e * \alpha_r * \gamma(1 - A_f)w * L = Q_\mu + U_L * A_r (T_r - T_a) \quad (4 - 39)$$

#### 9.IV. المعالجة الرقمية للمعادلات التفاضلية

جملة المعادلات التفاضلية الجزئية الثلاثة المتحصل عليها على مختلف مكونات المجمع PTC

(المائع، الأنبوب الماص، الظرف الزجاجي)، بدلالة درجات الحرارة  $T_e$ ،  $T_r$ ،  $T_f$  يمكن التعبير عنها بعد

التبسيط العددي:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T^t - T^{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \quad (4 - 40)$$

ومنه نكتب المعادلات

$$\begin{aligned} \dot{m}_f C_{pf} (T_f^t(j) - T_f^t(j-1)) \\ = h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x * T_r - h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x \\ * T_f \end{aligned} \quad (4-41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_r A_r C_{pr}}{\Delta t} * (T_r^t(j) - T_r^{t-\Delta t}(j)) \\ = IC_g \tau_e \alpha_r \rho^\circ \pi D_{r_{\text{ext}}} + [(h_{\text{conv}(r-e)} + h_{\text{rad}(r-e)}) * \pi * D_{r_{\text{ext}}}] * T_e \\ - [(h_{\text{conv}(r-e)} + h_{\text{rad}(r-e)}) * D_{r_{\text{ext}}} + h_{\text{conv}(r-f)} * D_{r_{\text{int}}}] * \pi * T_e \\ + h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} T_f \end{aligned} \quad (4-42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_e A_e C_{pe}}{\Delta t} * (T_e^t(j) - T_e^{t-\Delta t}(j)) \\ = IC_g \rho^\circ \alpha_e \pi D_{e_{\text{ext}}} + (h_{\text{conv}(e-r)} + h_{\text{rad}(e-r)}) * \pi * D_{e_{\text{int}}} T_r \\ - [(h_{\text{conv}(e-r)} + h_{\text{rad}(e-r)}) * D_{e_{\text{int}}} + h_{\text{conv}(e-amb)} * D_{e_{\text{ext}}}] \\ + h_{\text{rad}(e-sky)} * D_{e_{\text{ext}}}] * T_e \\ + [(h_{\text{conv}(e-amb)} * T_{\text{amb}}) + (h_{\text{rad}(e-sky)} * T_{\text{sky}})] * \pi \\ * D_{e_{\text{ext}}} \end{aligned} \quad (4-43)$$

بعد تبسيط معادلات الموازنة السابقة نكتب:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f C_{pf} T_f^t(j-1) \\ = (\dot{m}_f C_{pf} + h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x) T_f^t(j) - h_{\text{conv}(r-f)} * \pi \\ * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x T_r^t(j) \end{aligned} \quad (4-44)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\rho_r A_r C_{pr}}{\Delta t} * T_r^{t-\Delta t}(j) + IC_g \tau_e \alpha_r \rho^\circ \pi D r_{ext} \\
 & = \left[ \frac{\rho_r A_r C_{pr}}{\Delta t} \right. \\
 & + \left. \left[ (h_{conv(r-e)} + h_{rad(r-e)}) * D r_{ext} + h_{conv(r-f)} * D r_{int} \right] \pi \right] T_r^t(j) \\
 & - (h_{conv(r-e)} + h_{rad(r-e)}) * \pi * D r_{ext} T_e^t(j) - h_{conv(r-f)} * \pi \\
 & * D r_{int} T_f^t(j) \tag{4-45}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\rho_e A_e C_{pe}}{\Delta t} * T_e^{t-\Delta t}(j) + IC_g \rho^\circ \alpha_e \pi D e_{ext} \\
 & + \left[ (h_{conv(e-amb)} * T_{amb}) + (h_{rad(e-sky)} * T_{sky}) \right] * \pi * D e_{ext} \\
 & = \left[ \frac{\rho_e A_e C_{pe}}{\Delta t} \right. \\
 & + \left. \left[ (h_{conv(e-r)} + h_{rad(e-r)}) * D e_{int} + h_{conv(e-amb)} * D e_{ext} \right. \right. \\
 & \left. \left. + h_{rad(e-sky)} * D e_{ext} \right] * \pi \right] T_e^t(j) - (h_{conv(e-r)} + h_{rad(e-r)}) * \pi \\
 & * D e_{int} T_r^t(j) \tag{4-46}
 \end{aligned}$$

ونعبر عن جملة المعادلات لدرجات الحرارة لمكونات الـ PTC،  $(T_e, T_r, T_f)$ ، بالمصفوفة

التالية:

$$A T_i = B$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_e \\ T_r \\ T_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

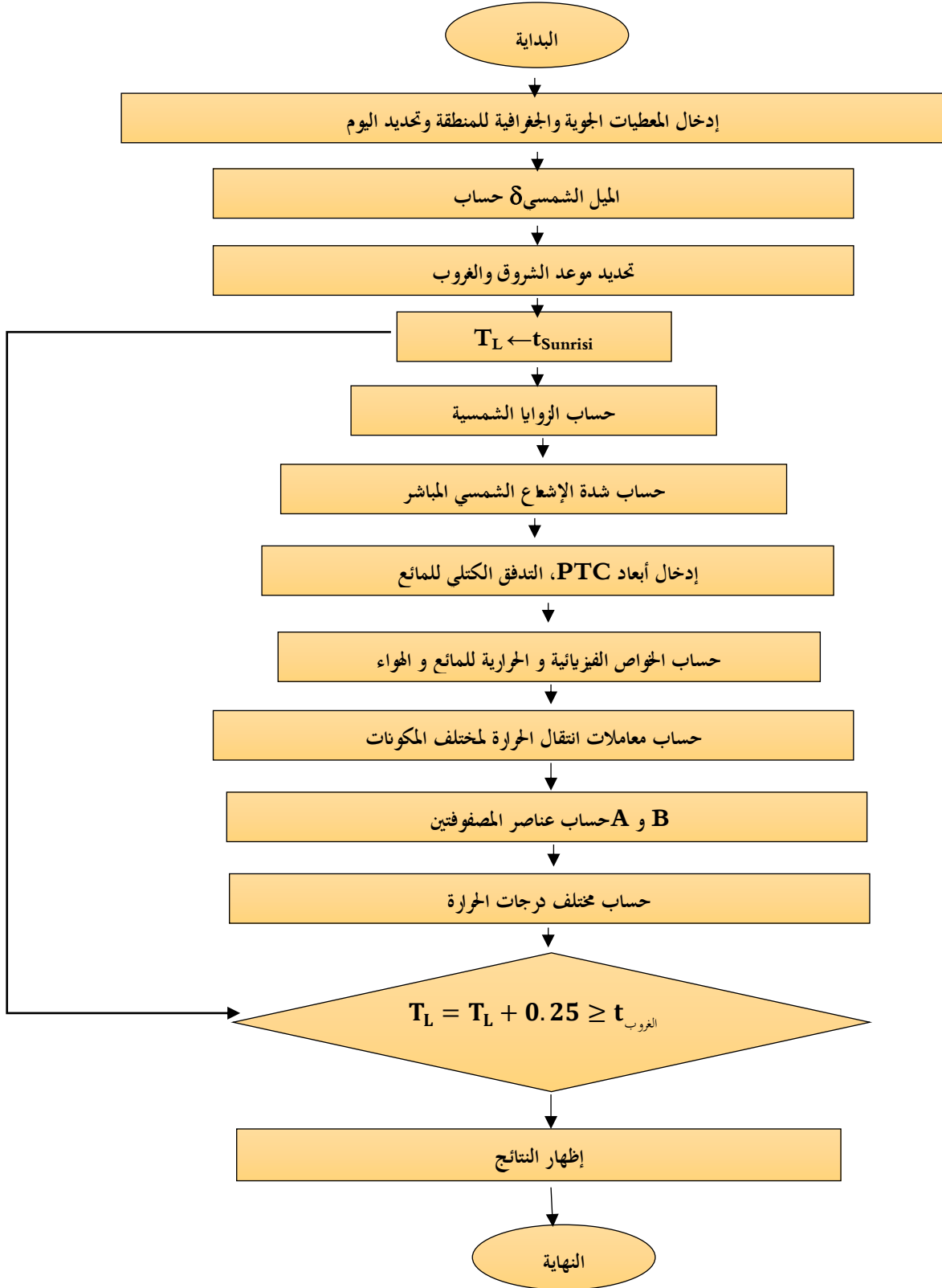
حيث قيم عناصر المصفوفة A:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{\rho_e A_e C_{pe}}{\Delta t} \\
 &\quad + [(h_{\text{conv}(e-r)} + h_{\text{rad}(e-r)}) * D_{e_{\text{int}}} + h_{\text{conv}(e-amb)} * D_{e_{\text{ext}}} \\
 &\quad + h_{\text{rad}(e-sky)} * D_{e_{\text{ext}}}] * \pi \\
 a_{12} &= - (h_{\text{conv}(e-r)} + h_{\text{rad}(e-r)}) * \pi * D_{e_{\text{int}}} \\
 a_{13} &= 0 \\
 a_{21} &= (h_{\text{conv}(r-e)} + h_{\text{rad}(r-e)}) * \pi * D_{r_{\text{ext}}} \\
 a_{22} &= \frac{\rho_r A_r C_{pr}}{\Delta t} + [(h_{\text{conv}(r-e)} + h_{\text{rad}(r-e)}) * D_{r_{\text{ext}}} + h_{\text{conv}(r-f)} * D_{r_{\text{int}}}] * \pi \\
 a_{23} &= - h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} \\
 a_{31} &= 0 \\
 a_{32} &= - h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x \\
 a_{33} &= \dot{m}_f C_{pf} + h_{\text{conv}(r-f)} * \pi * D_{r_{\text{int}}} * \Delta x
 \end{aligned}$$

حيث قيم عناصر المصفوفة B:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\rho_e A_e C_{pe}}{\Delta t} * T_e^{t-\Delta t}(j) + IC_g \rho^\circ \alpha_e \pi D_{e_{\text{ext}}} \\
 &\quad + [(h_{\text{conv}(e-amb)} * T_{\text{amb}}) + (h_{\text{rad}(e-sky)} * T_{\text{sky}})] * \pi * D_{e_{\text{ext}}} \\
 b_2 &= \frac{\rho_r A_r C_{pr}}{\Delta t} * T_r^{t-\Delta t}(j) + IC_g \tau_e \alpha_r \rho^\circ \pi D_{r_{\text{ext}}} \\
 b_3 &= \dot{m}_f C_{pf} T_f^t(j-1)
 \end{aligned}$$

بعد تبسيط المعادلات والمعالجة الرقمية باستخدام برنامج الماتلاب المبينة وفق المخطط الانسيابي التالي:



الشكل 4-6: المخطط الانسيابي للبرنامج العددي.

## الخاتمة

قمنا بتصميم وإنجاز نموذج لمجمع شمسي أسطواني قطع مكافئ (PTC)، ومن ثم القيام بالعمل التجريبي للحصول على المردود الحراري، ومن أجل التتبع الشمسي، وباستخدام مواد تخزين مختلفة وتسجيل النتائج أثناء مرحلة الشحن. ولتعميم النتائج وتوسيعها، قمنا بإعداد نمذجة رياضية للمجمع تراعي أهم ما توصلت له الدراسات السابقة وتعتمد على فرضيات تبسيطية للظواهر الفيزيائية الحادثة، ثم نسجل نتائج المحاكاة العددية بعد التأكد من صدقيتها بمقارنتها بالنتائج التجريبية وسنقوم في الفصل القادم بمناقشة وتحليل هذه النتائج التجريبية والنظرية.

## المراجع

- [1] S. Panwar and Surendra Kothari., “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- [2] Weston A. Hermann, “Quantifying global exergy resources,” *Energy*, vol. 31, pp. 1685–1702, 2006, doi: doi:10.1016/j.energy.2005.09.006.
- [3] R. Elarem *et al.*, “Numerical study of an Evacuated Tube Solar Collector incorporating a Nano-PCM as a latent heat storage system,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 24, p. 100859, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100859.
- [4] HANS MÜLLER-STEINHAGEN FReNg AND FRANZ TRIEB, Concentrating solar power A review of the technology. Institute of Technical Thermodynamics, German Aerospace Centre: Stuttgart, Germany, 2004; p. 9. Quarterly of the Royal Academy of Engineering Ingenua 18, February/March 2004.
- [5] Tasbirul Islam, Nazmul Huda, A.B. Abdullah, “A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 987–1018, 2018, doi: . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>.
- [6] M. E. Soudani, K. E. Aiadi, and D. Bechki, “Water heating by Parabolic Trough Collector with storage in the Ouargla region of Algerian Sahara,” *Mater. Today Proc.*, vol. 24, no. xxxx, pp. 137–139, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.707.



- [7] N. L. and M. S.R. Shaharin A. Sulaiman, “Effects of Dust on the Performance of PV Panels,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*. pp. 588–593, 2011.
- [8] Mohammed Elbar Soudani, Kamal Eddine Aiadi, Djamel Bechki, “Experimental and theoretical study of Parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of algerian sahara (Ouargla),” *Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 4003–4009, 2017.
- [9] BECHKI Djamel, “Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d ’ eau potable dans les zones arides sahariennes,” University HADJ LAKHDAR BATNA, 2011.
- [10] I. Onder Kizilkan, Ahmet Kabul, “Development and performance assessment of a parabolic trough solar collector–based integrated system for an ice–cream factory Onder,” *Energy*, vol. 100, pp. 167–176, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.098>.
- [11] M. Shalaby, “Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium,” *Energy Convers. Manag.*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043>, vol. 83, pp. 1–8, 2014,
- [12] D. G. kamel. Azzouz, D. Leducq, “Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage,” *ScienceDirect*, vol. 31, pp. 892–901, 2008, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.09.007.
- [13] R. Pandiyarajan , M. Chinna Pandian , E. Malan , R. Velraj, “Experimental

- investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system,” *Appl. Energy*, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.023. vol. 88, pp. 77–87, 2011,
- [14] Zhongliang Liu, Zengyi Wang, “An experimental study on heat transfer characteristics of heat pipe heat exchanger with latent heat storage. Part I: Charging only and discharging only modes,” *Energy Convers. Manag.*, doi: 10.1016/j.enconman.2005.06.004.vol. 47, pp. 944–966, 2006,
- [15] M. Jeroen Mol, “Numerical Modeling of Thermal Storage Performance of Encapsulated PCM Particles in an Unstructured Packed Bed,” *ener*, 2020, doi: doi:10.3390/en13236413.
- [16] A. Virendra Vishnu Bhagwat a, Sujit Roy a, Biplab Das a, b, Nikhilkumar Shah b, “Performance of finned heat pipe assisted parabolic trough solar collector system under the climatic condition of North East India,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, p. 101171, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101171>.
- [17] A. Sarri, D. Bechki, S. Boughali, and H. Bouguettaia, “review on thermal insulation of buildings with phase change materials: incorporation methods and applications,” doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v11i1.17>. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2019,
- [18] V. Bhagwat, S. Roy, B. Das, N. Shah, and A. Chowdhury, “Performance of finned heat pipe assisted parabolic trough solar collector system under the climatic condition of North East India,” *Sustain. Energy Technol.*

- Assessments*, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101171. vol. 45, p. 101171, Jun. 2021,
- [19] M. Khodadadi, Seyyed Ali Farshad, Z. Ebrahimpour, “Thermal performance of nanofluid with employing of NEPCM in a PVT-LFR system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 47, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101340>.
- [20] R. Bayón, E. Rojas, L. Valenzuela, E. Zarza, and J. León, “Analysis of the experimental behaviour of a 100 kWth latent heat storage system for direct steam generation in solar thermal power plants,” *Appl. Therm. Eng.*, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.07.011. vol. 30, no. 17–18, pp. 2643–2651, 2010,
- [21] M. Eleni Douvi, Christos Pagkalos, George Dogkas, Maria K. Koukou, Vassilis N. Stathopoulos, Yiannis Caouris, “Phase change materials in solar domestic hot water systems: A review,” *Int. J. of Thermofluid*, vol. 10, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100075>.
- [22] S. Vikrant P. Katekar, “A Review on Research Trends in Solar Still Designs for Domestic and Industrial Applications,” *J. Pre-proof*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120544>.
- [23] K. Pandey, Imtiaz Ali Laghari, R. Reji Kumar, Kapil Chopra, M. Samykano, Abdullah M. Abusorrah, Kamal Sharma, “Energy, exergy, exergoeconomic and enviroeconomic (4-E) assessment of solar water heater with/without phase change material for building and other applications: A

- comprehensive review,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101139>.
- [24] M. Senthil, “Enhancement of the thermal energy storage capacity of a parabolic dish concentrated solar receiver using phase change materials,” *J. Energy Storage J.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100841>. vol. 25, 2019.
- [25] Djemaa Guerraiche, Cherif Bougriou, Khelifa Guerraiche, Loreto Valenzuela, “Experimental and numerical study of a solar collector using phase change material as heat storage Djemaa,” *J. Energy Storage*, vol. 27, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101133> Received.
- [26] I. Kibria, M. Anisur, H. Mahfuz, R. Saidur, “A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials,” doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.028>. *Energy Convers. Manag.*, vol. 95, 2015.
- [27] H. Saw C. Lin, “Evaluation of copper nanoparticles – Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage,” *ScienceDirect*, vol. 132, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.004>.
- [28] Babu Sasi Kumar, “investigational study for direct cook pot from parabolic trough collector (ptc) assisted pcms (phase change materials) heat storage. 1s.babu,” *Int. J. Pure Appl. Math.*, vol. 118, no. Special Issue, pp. 425–437, 2018.

- 
- [29] Q.A.Hazim Jassim Jaber, Qais A. Rishak, "Using PCM an experimental study on solar stills coupled with and without a parabolic trough solar collector," doi:10.33971/bjes.21.2.7 *Basrah J. Eng. Sci.*, vol. 21, pp. 45–52, 2021,
- [30] M. Beemkumar Nagappan, Karthikeyan Alagu, Yuvarajan Devarajan, "Energy and Exergy Analysis of Multi-Temperature PCMs Employed in a Latent Heat Storage System and Parabolic Trough Collector," 2018, doi: <https://doi.org/10.1515/jnet-2017-0066>.
- [31] D. B. Atul Sharma, V. Tyagi, R. Chen, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *ScienceDirect*, vol. 13, pp. 318–345, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [32] S. L. Daniel. R. Rouse, Nizar Ben Salah, "An Overview of Phase Change Materials and their Implication on Power Demand," in *IEEE Electr. Power Energy Conf. (EPEC-2009)*, 2009, pp. 1–6.

# الفصل الخامس

## مناقشة النتائج

مقدمة

يتم عرض ومناقشة نتائج التجارب التي أجريت في منطقة ورقلة في شهر ديسمبر بحكم أن الحاجة إلى استعمال الماء الساخن تكون أكثر في فصل الشتاء. في هذا القسم يتم تحديد الفاصل الزمني اليومي المعتاد لكل تجربة بين الساعة 07:00 صباحا والساعة 17:00 مساء بالتوقيت المحلي. بلغت ذروة كثافة الإشعاع الشمسي ما يقارب  $690 \text{w/m}^2$  خلال أيام الدراسة. تم إجراء التجربة في الهواء الطلق في وجود وفي غياب PCM في خزان التخزين الحراري حيث تم ضبط معدل تدفق الماء الذي يعتبر مائع نقل حرارة HTF. بعد القيام بالدراسة النظرية، المحاكات والدراسة التجريبية تم تسجيل قيم شدة الإشعاع الشمسي  $I_d$ . تغيرات درجات الحرارة للأنبوب الماص  $T_{ob}$  درجة حرارة كل من المائع  $T_f$ ، الظرف الزجاجي  $T_e$  وكسب الحرارة المفيدة  $U_h$ ، الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة  $EC_h$ ، الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة  $Est_h$ ، كفاءة الشحن  $\eta_{ch}$ ، مدخل الماء داخل الخزان  $T_{f_{int}}$ ، مخرج الماء داخل الخزان  $T_{f_{out}}$ ، درجة حرارة مادة التخزين  $T_{PCM}$  (شمع البرافين)، درجة حرارة الماء المخزن داخل الخزان  $T_{fst_{PCM}}$ .

1.V. الحل العددي لجملة المعادلات

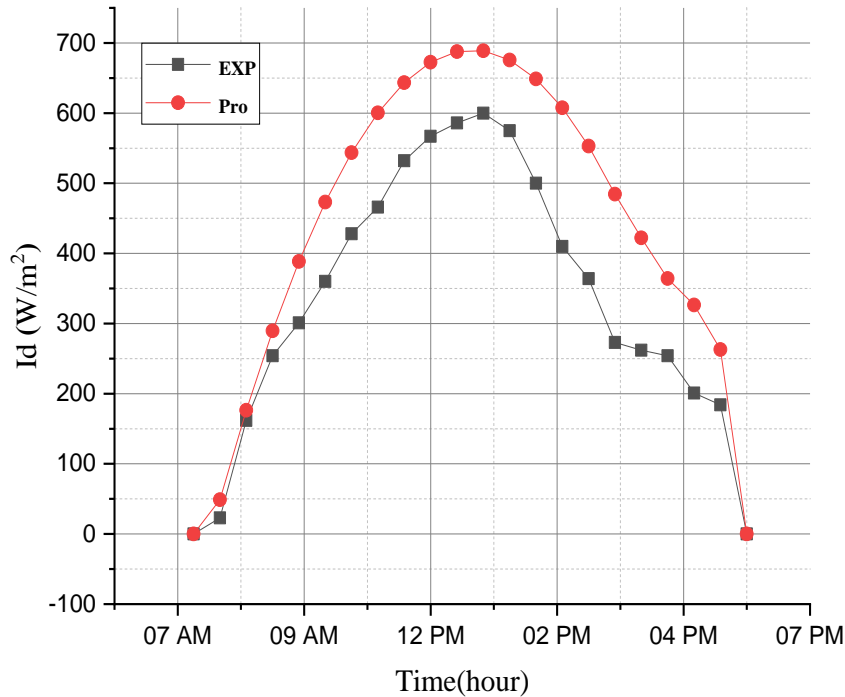
من خلال إعداد برنامج بلغة الماتلاب يتم إدخال اليوم المحدد من السنة  $N_j$ ، واحداثيات منطقة ورقلة (زاويتي دائرة العرض وخط الطول)، درجة حرارة الجو وسرعة الرياح، حيث يقوم البرنامج بتقدير شدة الإشعاع الشمسي كل 5 دقائق من شروق الشمس إلى غروبها انطلاقا من معادلات الإشعاع الشمسي، ونمط التتبع الشمسي وكذا أبعاد PTC والخواص الضوئية والحرارية للمواد والتدفق الكتلي للمائع ودرجة حرارة الدخول للمائع، حيث ينطلق البرنامج في الحساب من درجات حرارة ابتدائية لمكونات ال PTC، ( $T_f$ ،  $T_r$ ،  $T_e$ ) تكون في حدود درجة الحرارة  $T_{amb}$ ، ثم يقوم البرنامج بحساب عناصر المصفوفتين  $A$  و  $B$  ومن ثم الحل العددي

باستعمال طريقة (Gauss)، ومنه تسجيل درجات الحرارة عند اللحظة  $t$  اعتمادا على درجات الحرارة المحسوبة في اللحظة  $t-\Delta t$  وتعاد العملية بصورة تكرارية إلى غاية الغروب.

من أجل التأكد من صدقية النتائج التي تحصلنا عليها بناءً على النموذج الرياضي المعتمد، ومن خلال الحل العددي للمعادلات التفاضلية الجزئية، قمنا بمقارنة قيمة الاشعاع الحراري المباشر ودرجات حرارة مخرج الأنبوب الماص خلال يوم 28 ديسمبر 2022 (من شروق الشمس إلى غروبها) المحصل عليها تجريبيا بالنتائج النظرية، وذلك من أجل نفس الشروط (التدفق الكتلي للمائع، أبعاد المجمع، اليوم المدروس)، وهذا من أجل التتبع بمحوري دوران ونسجل البيانات في الشكلين 1-5 و 2-5.

## 2.V. تأكيد صدقية برنامج المحاكاة

يظهر الشكل 1-5 تباين قيم الاشعاع الشمسي التجريبية وقيم المحاكاة ليوم 28 ديسمبر [3].



الشكل 1-5: قيم الاشعاع الشمسي التجريبي وقيم المحاكاة.

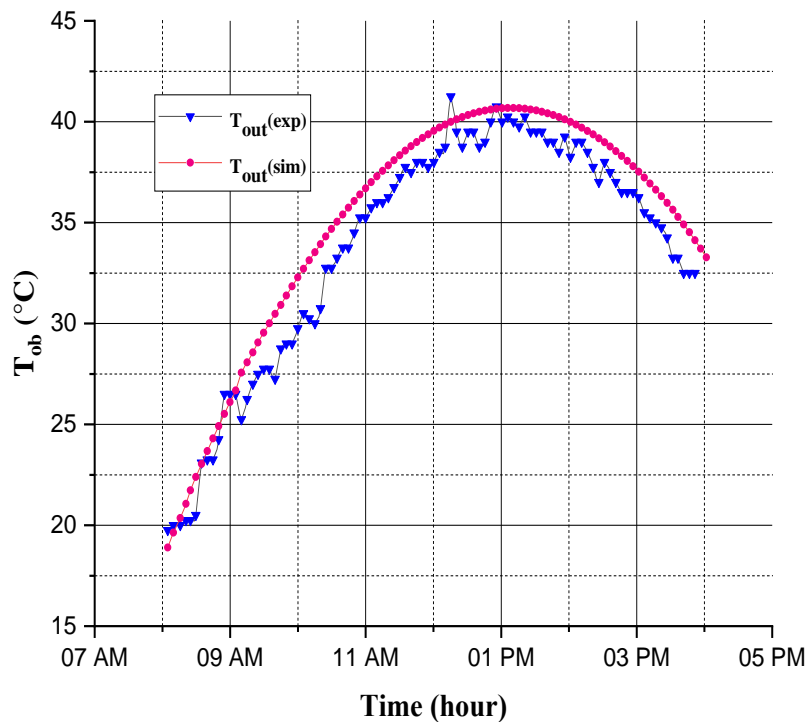


يزداد الإشعاع الشمسي المركز أين بلغ قيمته القصوى (الذروة) عند الزوال  $600 \text{ w/m}^2$  و  $688 \text{ w/m}^2$  بالنسبة للتجريبي والمحاكاة على الترتيب. وذلك بفارق يصل الى حوالي  $88 \text{ w/m}^2$  والذي يعود الى الظروف الجوية في يوم الدراسة التجريبية (يوم غائم) ثم يتناقص بعد الساعة  $13:00$  الى غاية الغروب بسبب المنحنى اليومي لقيم الإشعاع الشمسي وأيضاً بسبب تأثير زاوية السقوط عند الظهيرة. حيث تصبح  $0^\circ$  والتي تسمح بأقصى تجميع للإشعاع على المجمع PTC.

### 3.V. تغيرات درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص (التجريبية) خلال مرحلة الشحن

يظهر الشكل 5-2 تباين درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص بالنسبة للقيم التجريبية وقيم المحاكاة

خلال فترة الشحن، حيث تزداد درجات حرارة المخرج من  $08:00$  صباحاً الى غاية الظهيرة [3].



الشكل 5-2: تغيرات درجة حرارة مخرج الأنبوب الماص التجريبية والمحاكاة.

بلغت أقصى قيمة لها في حدود  $40^\circ\text{C}$  عند الزوال في الحالتين، مع وجود فرق طفيف ناتج عن الفرق في شدة الاشعاع الشمسي بين النظري والتجريبي خلال فترة الشحن. لوحظ أنها تتبع مسار تغير الاشعاع الشمسي الذي

يبلغ أقصى قيمة له أيضا عند الزوال، ثم تتراجع بعد ذلك الى أن تصل الى أدنى قيمة لها وهي في حدود  $32.5^{\circ}\text{C}$  عند الغروب.

من خلال الشكلين 1-5 و 2-5 السابقين نلاحظ تطابق النتائج النظرية مع التجريبية تقريبا، بينما تكون النتائج النظرية أكبر بقليل وذلك راجع الى الضياعات الحرارية التي أهملنا جزءا منها في الفرضيات التبسيطية المقترحة في النموذج الرياضي. وبذلك وفي حدود الأخطاء المسموحة، فإننا نؤكد مصداقية النتائج المتحصل عليها مع برنامج المحاكاة [3].

#### 4.V. النتائج التجريبية

اعتمادا على النتائج التجريبية المسجلة بالاعتماد على المجمع الشمسي (PTC) المنجز ووفقا للإشعاع الشمسي بمنطقة ورقلة، نسجل تغيرات درجة حرارة دخول وخروج الماء، درجة حرارة مدخل الماء داخل الخزان، مخرج الماء داخل الخزان، درجة حرارة شمع البرافين، درجة حرارة الماء المخزن داخل الخزان ودرجة حرارة الجو المحيط وشدة تدفق الإشعاع الشمسي، باستخدام أجهزة القياس، وذلك خلال فترة التشميس كل 5 دقائق ثم نقوم برسم المنحنيات البيانية الموافقة لها.

#### 5.V. مرحلة الشحن

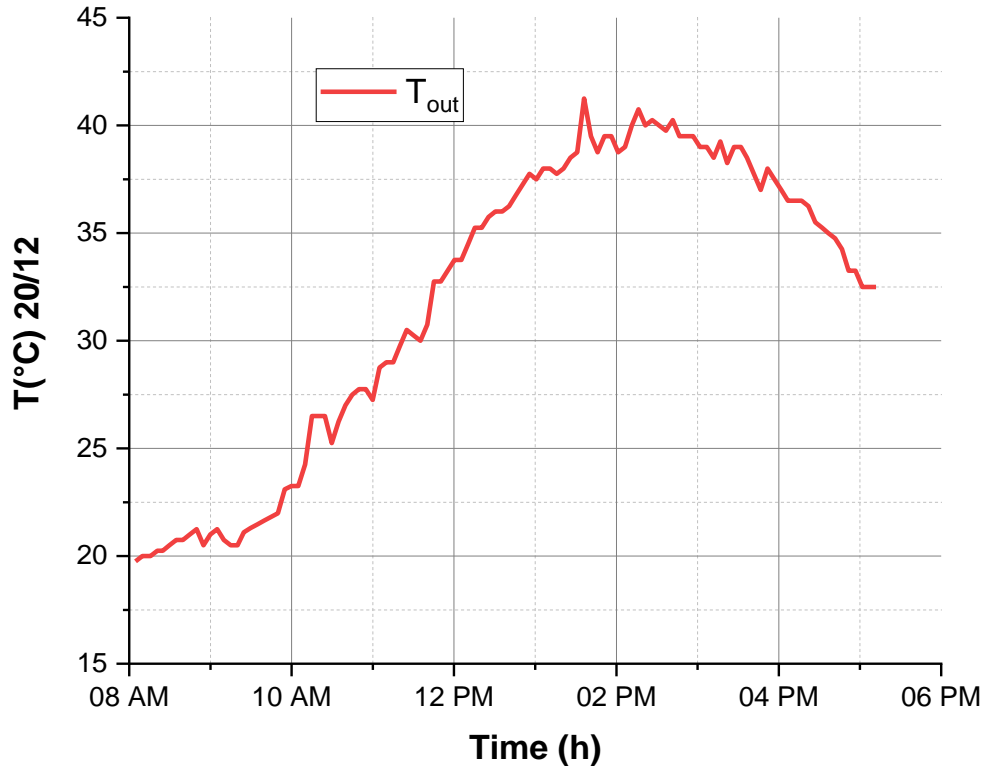
##### 1.5.V. تغيرات درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص (التجريبية) خلال مرحلة الشحن

يظهر الشكل 3-5 تغيرات درجات حرارة مخرج الأنبوب الماص خلال فترة الشحن، حيث تزداد

درجات حرارة المخرج من 08:00 صباحا الى غاية الظهيرة، بلغت أقصى قيمة لها وهي  $41^{\circ}\text{C}$  عند الزوال

( لوحظ أنها تتبع مسار تغير الإشعاع الشمسي الذي يبلغ أقصى قيمة له أيضا عند الزوال). ثم تتراجع بعد ذلك

الى أن تصل  $32.5^{\circ}\text{C}$  عند الغروب [3].



الشكل 5-3: تغيرات درجة حرارة مخرج الأنبوب الماص.

2.5.V. تغيرات درجات حرارة الماء و الهواء داخل خزان التخزين الحراري التجريبية خلال مرحلة الشحن في حالة عدم استعمال مواد التخزين (وجود الهواء)

يظهر الشكل 4-5 تغيرات درجات حرارة الماء والهواء داخل خزان التخزين الحراري خلال مرحلة

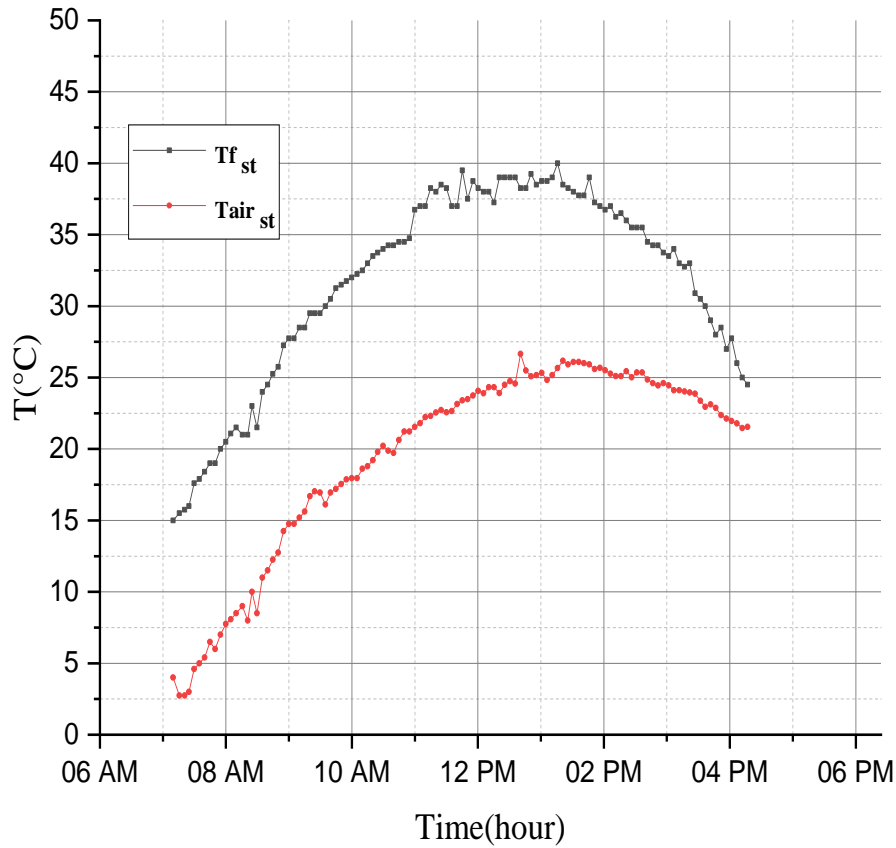
الشحن، حيث تزداد درجات حرارة المخرج من 07:00 صباحا الى غاية الظهيرة أين بلغت أقصى قيمة لها

27°C و 38°C لكل من الهواء والماء على الترتيب (بفارق 11°C) ثم تتراجع بعد ذلك الى أن تصل 22°C

و 24.5°C على نفس الترتيب وبفارق أقل وهو 2.5°C عند 16:45 مساء.

يعود الفارق في درجات الحرارة كون معامل الحمل الحراري للهواء أقل من معامل الحمل الحراري

للماء و بالتالي الهواء يفقد الحرارة أسرع.



الشكل 5-4: تغيرات درجات حرارة الماء و الهواء.

### 3.5.V تأثير التدفق الكتلي للماء على درجات الحرارة خلال مرحلة الشحن (المحاكات)

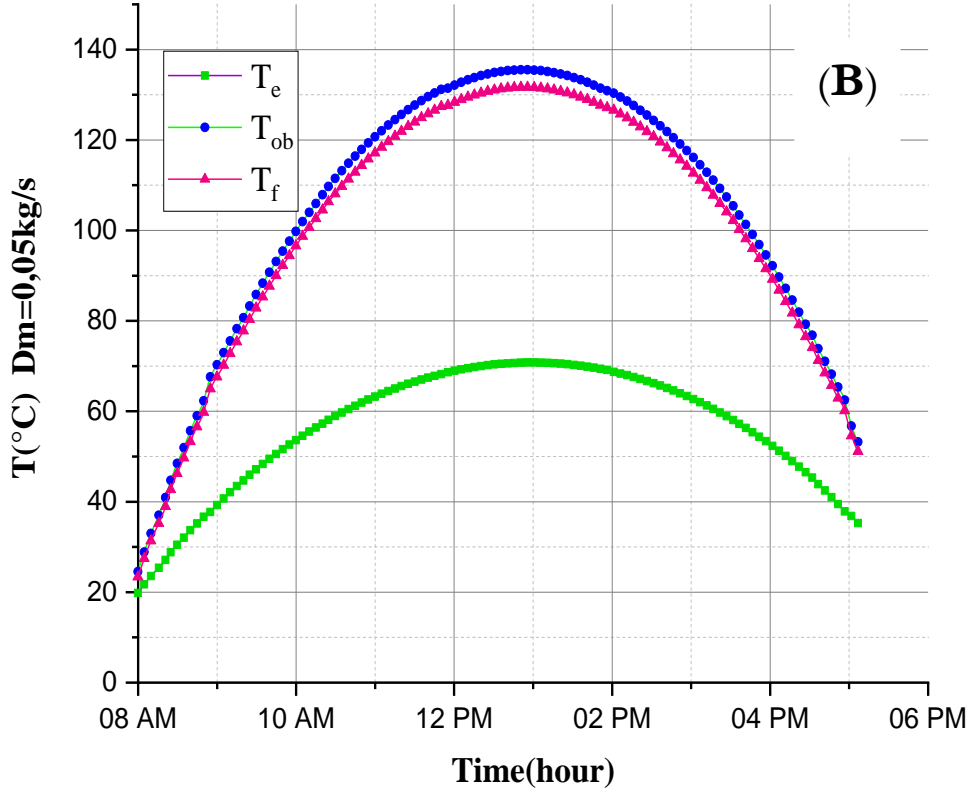
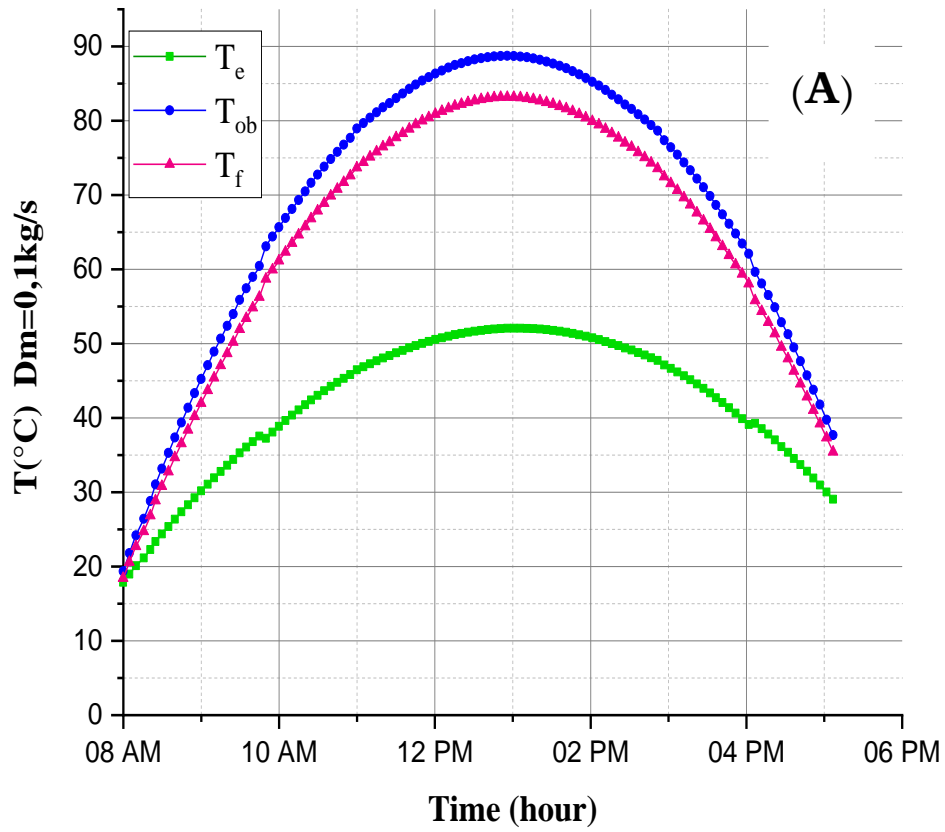
تُظهر المنحنيات في الشكلين 5-5 (A) و (B) تأثير تغيير التدفق الكتلي لمائع التشغيل (الماء)

على درجات حرارة كل من الطرف الزجاجي  $T_e$ ، الماء  $T_f$  والأنبوب الماص  $T_{ob}$  للـ PTC ذو الأبعاد

$6m \times 3m$ . حيث تزداد درجات الحرارة الى أن تبلغ أقصى قيمة لها عند الظهيرة (عند الزوال). حيث تكون درجة

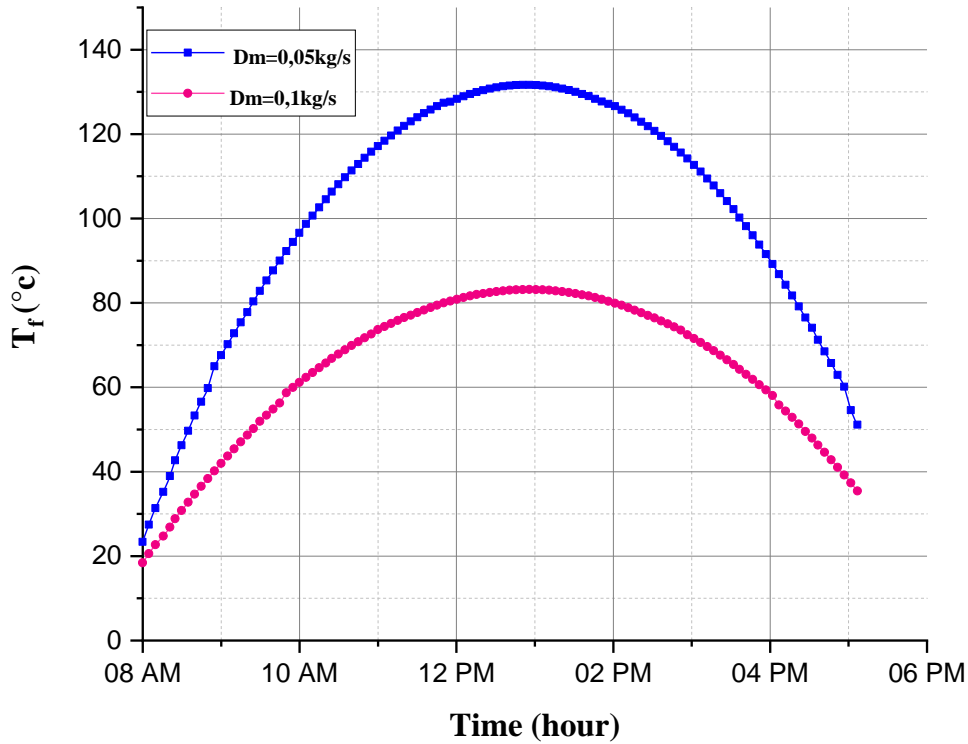
حرارة الانبوب الماص هي الأعلى ثم الماء ثم الطرف الزجاجي. هذا التباين بين قيم درجات الحرارة هو بسبب

الضياعات الحرارية نحو الهواء الجوي [3].



الشكل 5-5: تأثير التدفق الكتلي على تغيرات درجات الحرارة:  $0.1\text{kg/s}$  (A) و  $0.05\text{kg/s}$  (B).

كما يظهر الشكل 5-6 مقارنة تغيرات درجات الحرارة للماء بالنسبة لتدفقين مختلفين حيث تبين أنه عند التدفق 0.05 Kg/s بلغت درجة حرارة الماء 132.6°C بينما عند التدفق 0.1 Kg/s لم تتجاوز 83.16°C أي أقل بنسبة 37.28 % وهذا لأن الماء في حالة التدفق الأقل يستغرق مدة أطول للانتقال عبر الأنبوب الماص وبالتالي يمتص حرارة أكبر على طول المركز الشمسي.



الشكل 5-6: مقارنة تغيرات درجات حرارة الماء بالنسبة لتدفقين مختلفين.

كسب الحرارة المفيد هو تدفق الطاقة الشمسية التي يقوم بامتصاصها الماء المتداول عبر الأنبوب

الماص ويتم حسابه بالعلاقة التالية (5-1) على النحو التالي [1]:

$$U_h = m \cdot C_p (T_0 - T_i) \quad (1 - 5)$$

الطاقة الشمسية التي يتم جمعها كل ساعة هي اكتساب الطاقة الشمسية خلال فترة زمنية مقدارها

ساعة واحدة [2] تم حسابها باستخدام العلاقة (5-2) التالية:

$$E_{Ch} = \left[ \frac{m \cdot C_p (T_0 - T_i)_{j+1} + m \cdot C_p (T_0 - T_i)_j}{2} \right] \cdot 3600 \quad (2 - 5)$$

الطاقة الشمسية المخزنة بالساعة هي الطاقة المخزنة في خزان تخزين المياه خلال فترة زمنية و المقدرة

بساعة واحدة [2] تحسب باستخدام العلاقة (3-5) التالية:

$$Est_h = m_{st} \cdot C_{p,st} \cdot (T_{st,t+1} - T_{st,t}) \quad (3 - 5)$$

كفاءة الشحن هي النسبة بين الطاقة الشمسية المخزنة بالساعة في خزان تخزين المياه و الطاقة

الشمسية المجمعة كل ساعة [2] وهي حسب العلاقة (4-5) التالية:

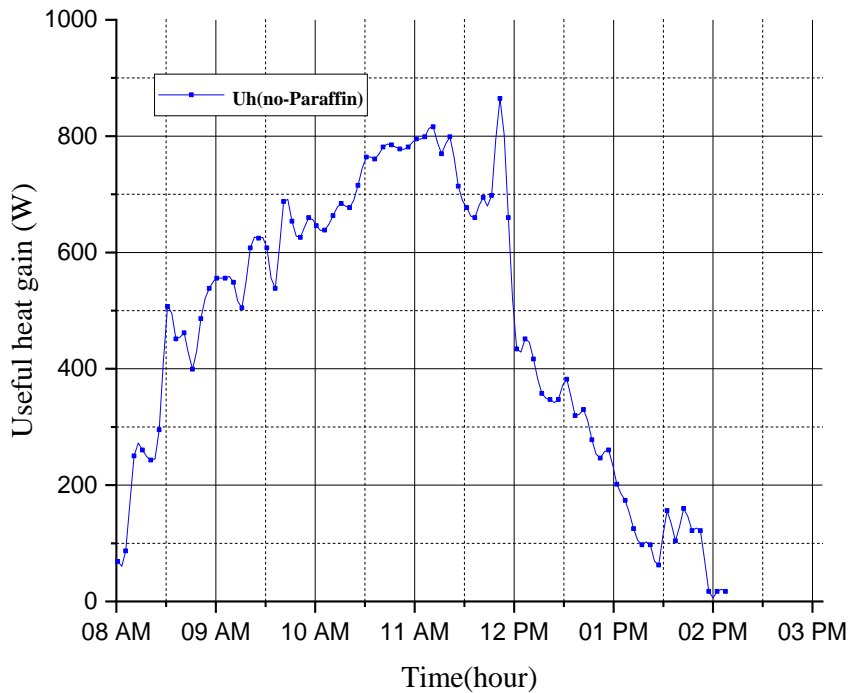
$$\eta_{ch} = \frac{E_{st}}{E_{ch}} \quad (4 - 5)$$

يظهر الشكلين 5-7 و 5-8 تباين (تغيرات) كسب الحرارة المفيدة بمرور الوقت لأنبوب الامتصاص في غياب

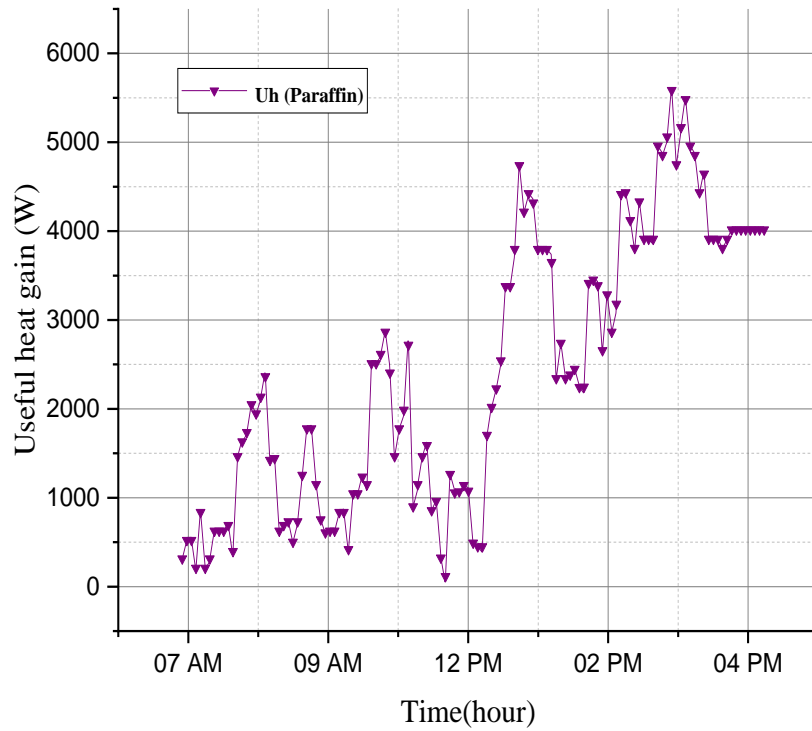
وفي وجود مادة التخزين (شمع البرافين) على التوالي. في غياب مادة التخزين نلاحظ تزايد اكتساب الحرارة المفيد

تدرجياً بمرور الوقت من الساعة 07:00 إلى غاية الظهيرة حيث يبلغ الذروة 864.70 W ثم يبدأ في التناقص

بعد ذلك الى غاية الغروب وذلك بسبب الضياعات الحرارية [3].



الشكل 5-7: تغيرات كسب الحرارة المفيدة مع مرور الزمن في غياب مادة التخزين (وجود الهواء).



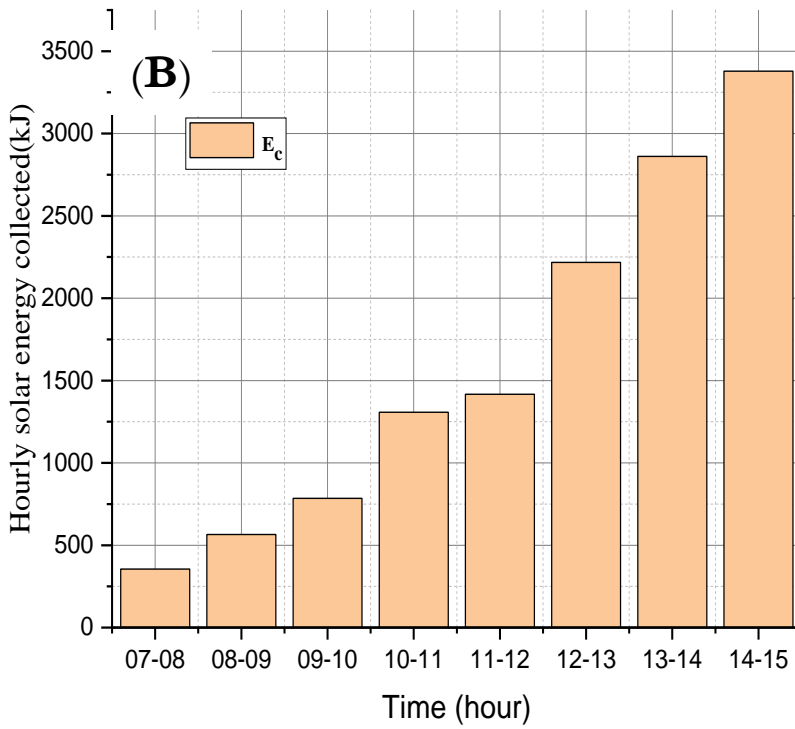
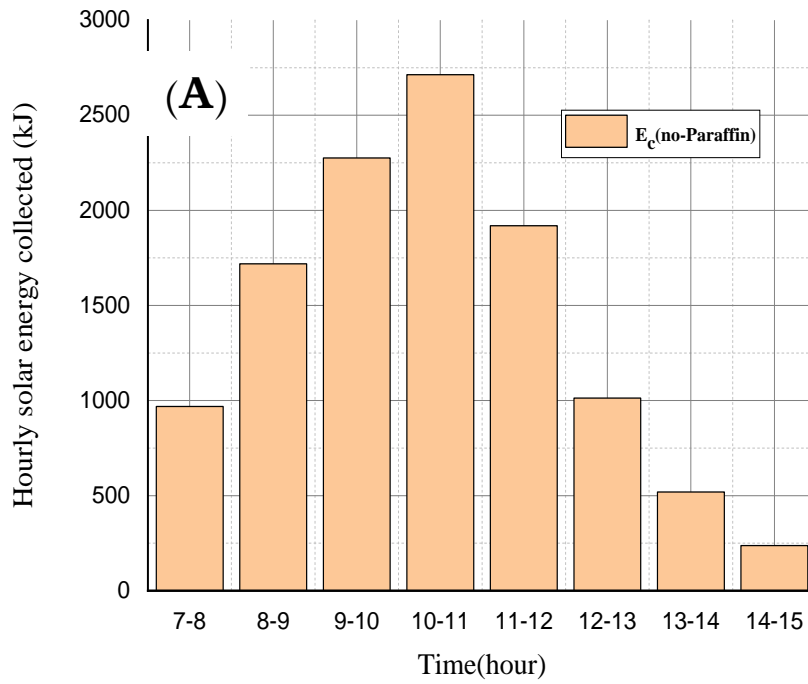
الشكل 5-8: تغيرات كسب الحرارة المفيدة مع مرور الزمن في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).

بينما في وجود مادة التخزين نلاحظ تباين اكتساب الحرارة المفيدة بمرور الوقت، مع تذبذب في القيم بين قيم دنيا وقيم قصوى، بسبب انتقال الحرارة المفيدة من الطاقة الشمسية المجمعة الى المائع أولا ثم اعادة تحولها من المائع نحو مادة التخزين ثانيا الى غاية حدوث التوازن الحراري بينهما وتكرر العملية باستمرار الى غاية الزوال كما نلاحظ أن القيم الأولية لاكتساب الحرارة المفيدة منخفضة نسبياً وتزداد تدريجياً بمرور الوقت. حيث يصل كسب الحرارة إلى قيم أعلى، عند 12:52 زوالا بلغت  $4738.38 \text{ W}$  و  $5585.64 \text{ W}$  عند الساعة 15:29 بعد الزوال، وذلك بسبب انتقال الحرارة المفيدة للمائع من الطاقة الشمسية المجمعة من جهة ومن مادة التخزين من جهة ثانية بعد الوصول إلى الذروة يتناقص اكتساب الحرارة المفيدة بسبب الضياعات الحرارية ولكنه يظل مرتفعاً نسبياً مقارنة بالقيم الأولية التي كانت قبل الزوال.

يوضح الشكل 5-9 تغير الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة مع مرور الوقت في غياب مادة

التخزين (وجود الهواء) وفي وجود مادة التخزين (شمع البرافين) على الترتيب.



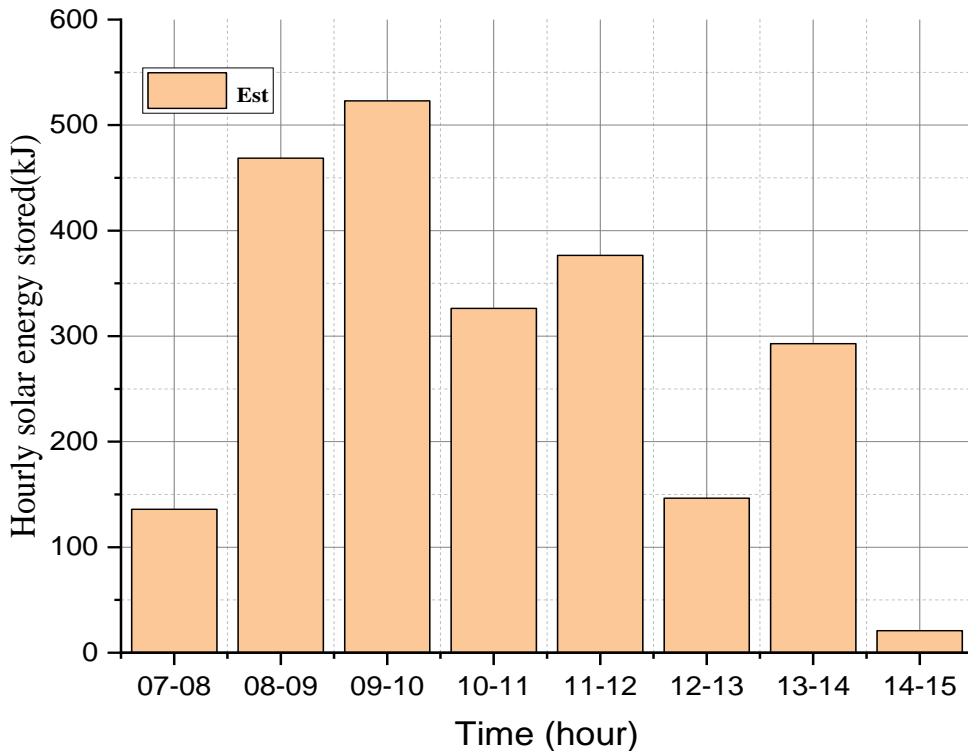


الشكل 5-9: تباين الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة مع مرور الوقت: (A) في غياب مادة التخزين (وجود الهواء) و (B) في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).

نلاحظ في حالة غياب شمع البرافين تزداد الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة من الساعة 7:00 إلى أن تصل إلى ذروتها عند الساعة 11:00 والمقدرة بـ 2712.88 kJ، ثم بعدها تنخفض قيمتها. وبالتالي فإن الطاقة الشمسية التي يتم جمعها كل ساعة تتبع مسار تغير الإشعاع الشمسي الساقط واكتساب الحرارة المفيد أيضا. بينما في وجود شمع البرافين نلاحظ تباين الطاقة الشمسية التي يتم جمعها كل ساعة من الوقت. حيث تزداد الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة من الساعة 7:00 إلى أن تصل إلى ذروتها خلال الفترة الزمنية بين الساعة 14:00 و 15:00 والمقدرة بـ 3378.58 kJ، وبالتالي فإن الطاقة الشمسية التي يتم جمعها كل ساعة تتبع مسار اكتساب الحرارة المفيد أيضا.

يوضح الشكل 5-10 تباين الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة من الوقت في وجود مادة التخزين

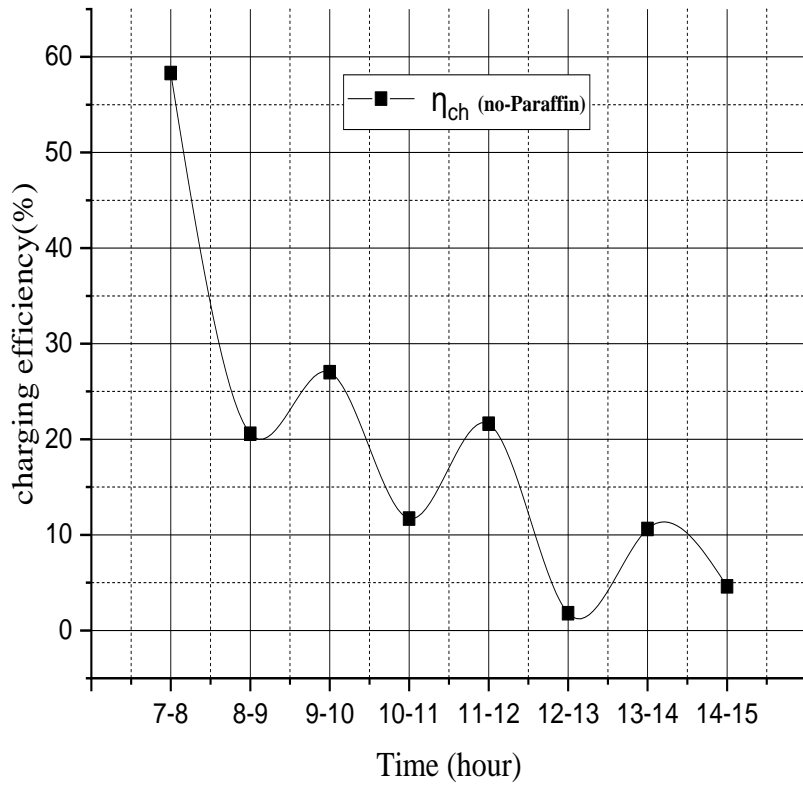
(شمع البرافين) [3].



الشكل 5-10: تغيرات الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).

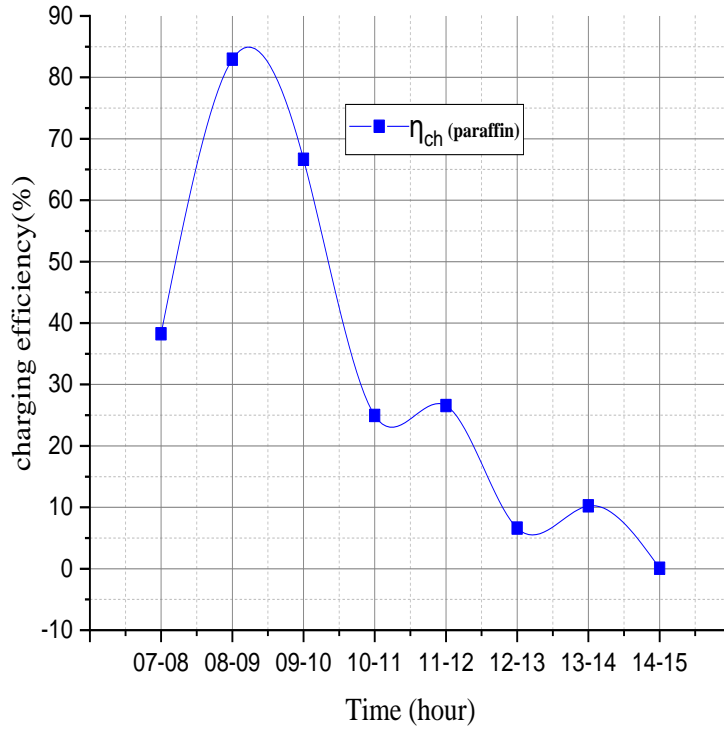
حيث تزداد الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة من الساعة 7:00 إلى الساعة 09:00 بمعدل أسرع. وتصل إلى الذروة عند 10:00 صباحا والمقدرة بـ 523 kJ. ثم تتناقص بعد ذلك وتصل الى أدنى قيمة لها عند 15:00 والمقدرة بـ 20,92 kJ. يلاحظ أن الطاقة الشمسية التي يتم تخزينها كل ساعة تتغير بنفس اتجاه مسار تغير اكتساب الحرارة المفيدة.

نلاحظ من الشكل 5-11 أن كفاءة الشحن في حالة غياب مادة التخزين في البداية بلغت أقصى قيمة لها و هي 58.29%. وذلك نظرا لقلة الضياعات الحرارية (بسبب قلة الفرق في درجة حرارة المائع والهواء الجوي المحيط) وتتناقص بمرور الوقت بسبب زيادة الضياعات الحرارية.



الشكل 5-11: تباين كفاءة الشحن مع مرور الوقت في غياب مادة التخزين (وجود الهواء).

بينما في حالة وجود مادة التخزين كما هو موضح في الشكل 5-12، تتزايد كفاءة الشحن لتصل الى قيمة عظمى وهي 82.96% وذلك بسبب بلوغ حالة التوازن الحراري بين المائع ومادة التخزين، ثم تتراجع بعدها بمرور الزمن وذلك بسبب التبادل الحراري بين المائع ومادة التخزين [3].



الشكل 5-12: تباين كفاءة الشحن مع مرور الوقت في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).

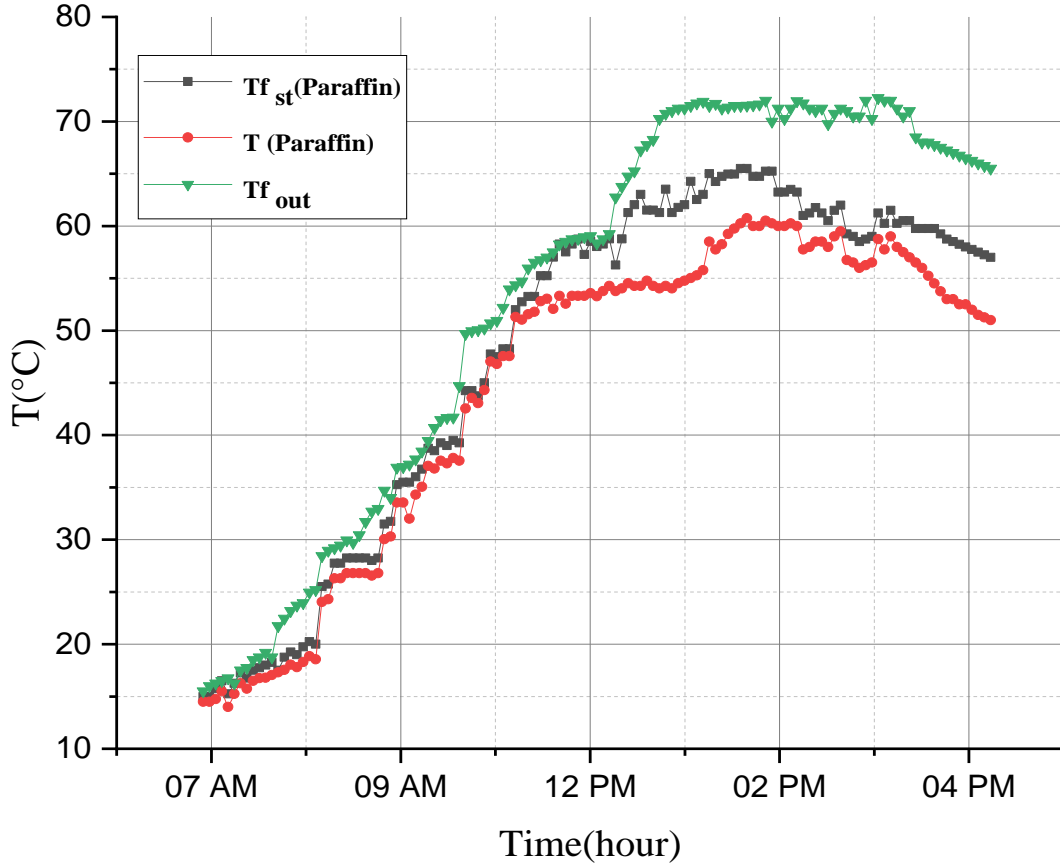
يظهر الشكل 5-13 تغيرات درجات حرارة مخرج الماء،  $T_{f_{out}}$  وشمع البرافين  $T_{(Paraffin)}$  ودرجة

حرارة الماء المخزن داخل خزان التخزين الحراري  $T_{f_{st(Paraffin)}}$  في وجود مادة التخزين (شمع البرافين) خلال مرحلة الشحن.

تزداد درجات الحرارة من 07:00 صباحا الى غاية الظهيرة أين بلغت أقصى قيم لها، ثم تتراجع بعد

ذلك. بينما نلاحظ زيادة ثم شبه ثبات تقريبا في درجات الحرارة لشمع البرافين  $T_{Paraffin}$  في حدود القيمة

54°C وذلك من الساعة 11:36 الى الساعة 13:11 يعود هذا الثبات إلى تغير الطور لشمع البرافين من الحالة الصلبة الى السائلة.



الشكل 5-13: تباين درجات الحرارة مع مرور الزمن في وجود مادة التخزين (شمع البرافين).

## 6.V. مرحلة التفريغ

1.6.V. تغيرات درجات حرارة الماء (التجريبية) في الخزان أثناء مرحلة التفريغ في حالة عدم استعمال مواد

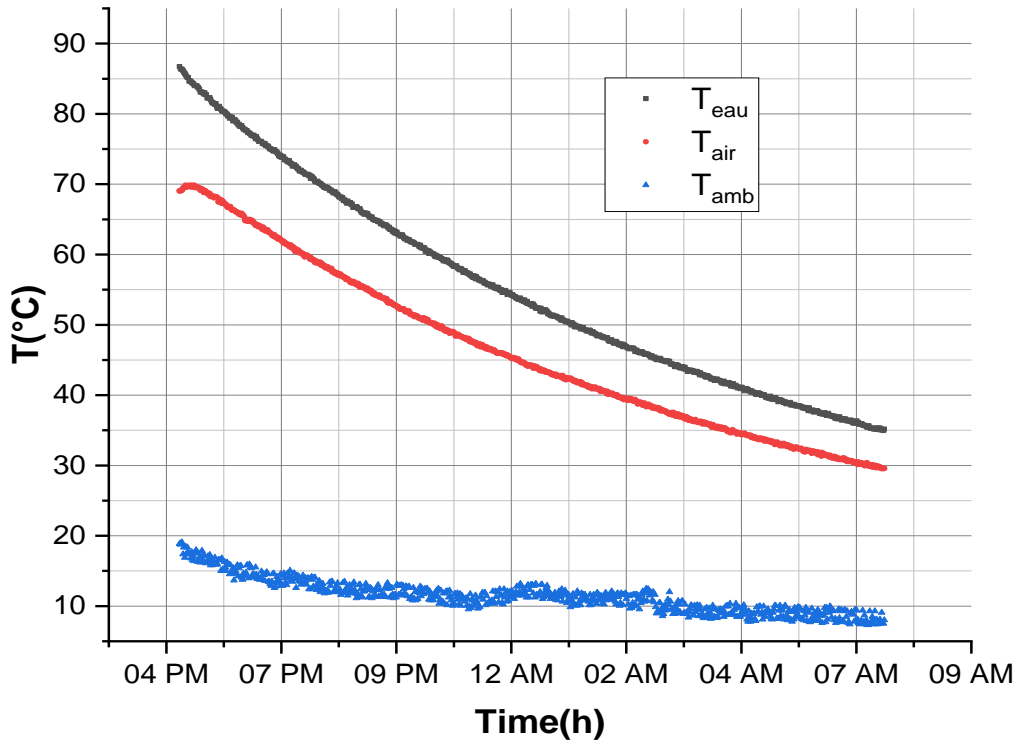
التخزين (وجود الهواء)

من خلال الشكل 5-14 نلاحظ أن درجة حرارة الماء في الخزان عند نهاية الشحن (عند الغروب)،

تصل إلى 88°C ثم تتناقص تدريجياً خلال الليل (فترة التفريغ) إلى أن تبلغ أدنى قيمة لها 35.15°C عند

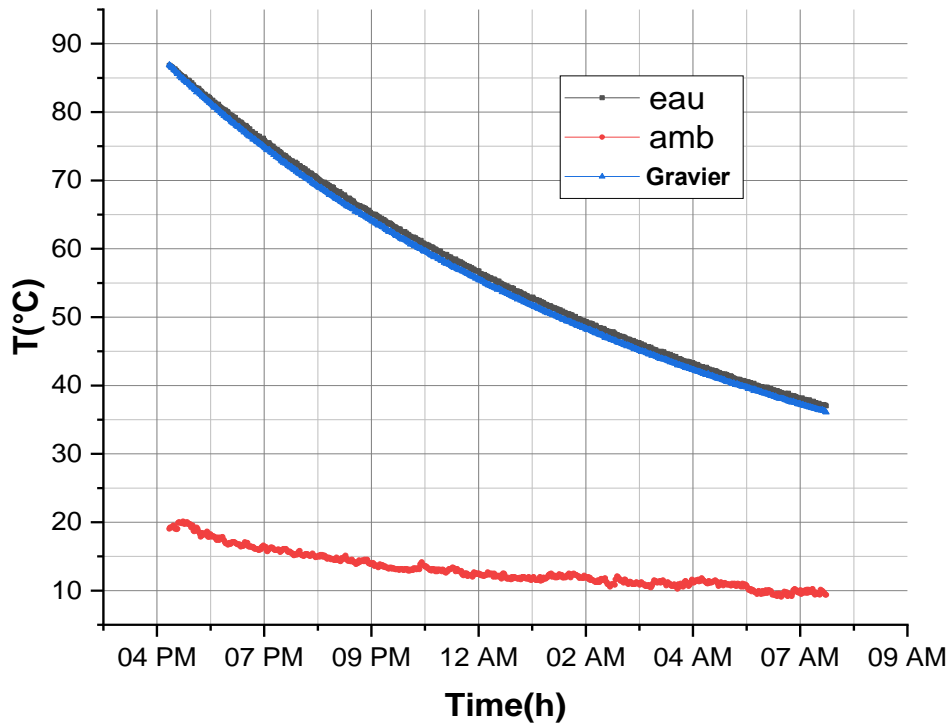
07:00 صباحاً من اليوم الموالي (الشروق)، وكانت درجة حرارة المحيط  $T_{amb}$  بالتقريب 8°C (تفوق درجة

حرارة الماء في الخزان درجة حرارة  $T_{amb}$  بـ 27.15°C).



الشكل 5-14: تأثير استخدام الهواء على تغيرات القيم التجريبية لدرجات حرارة الماء أثناء مرحلة التفريغ.

2.6.V. تأثير استخدام الحصى على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ

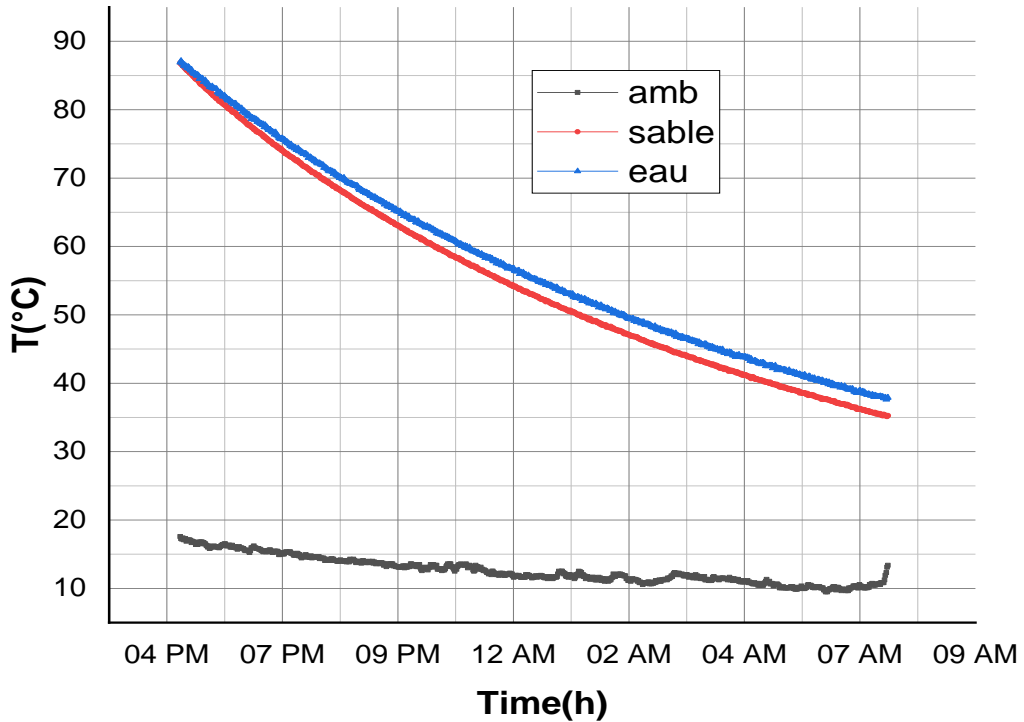


الشكل 5-15: تأثير استخدام الحصى على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.

من خلال الشكل 5-15 نلاحظ أنه تصل درجة حرارة الماء في الخزان عند نهاية الشحن (عند الغروب) الى  $88^{\circ}\text{C}$  ثم تفقدتها تدريجياً خلال الليل على شكل حرارة محسوسة الى الماء الى أن تصل الى أدنى قيمة لها  $36.47^{\circ}\text{C}$  حوالي 07:00 صباحاً لليوم الموالي (الشروق) في حين كانت درجة حرارة الهواء الجوي المحيط  $T_{\text{amb}}$  في حدود  $9.37^{\circ}\text{C}$ ، أي تفوق درجة حرارة الماء في الخزان درجة حرارة  $T_{\text{amb}}$  بـ  $27.1^{\circ}\text{C}$ .

كما نلاحظ تقارب في درجة حرارة الماء داخل الخزان مع درجة حرارة الحصى، بينما كان هناك فرق في درجات الحرارة في حالة استخدام الهواء (حوالي 5 درجات)، مما يجعل الحصى مادة تخزين محسوس مناسبة و خاصة أنها موجودة و متوفرة في المنطقة.

### 3.6.V تأثير استخدام الرمل على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ



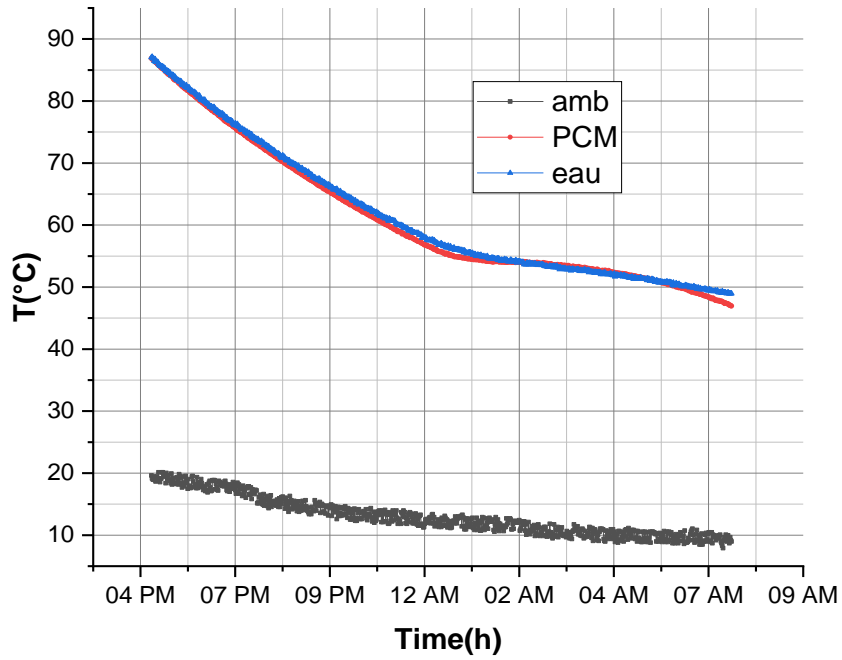
الشكل 5-16: تأثير استخدام الرمل على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.

يوضح الشكل 5-16 درجة حرارة الماء في الخزان عند نهاية الشحن (عند الغروب) تصل الى  $88^{\circ}\text{C}$  ثم تفقدها تدريجيا خلال الليل أثناء مرحلة التفريغ على شكل حرارة محسوسة الى الماء الى أن تصل الى أدنى قيمة لها  $37.62^{\circ}\text{C}$  حوالي 07:00 صباحا لليوم الموالي (الشروق) في حين كانت درجة حرارة المحيط  $T_{\text{amb}}$  في حدود  $13^{\circ}\text{C}$ ، أي تفوق درجة حرارة الماء في الخزان درجة حرارة  $T_{\text{amb}}$  بـ  $24.62^{\circ}\text{C}$ . كما نلاحظ تقارب (تقريبا تطابق) درجة حرارة الماء في الخزان مع درجة حرارة الرمل هو الاخر مادة تخزين محسوس مناسبة و خاصة أنها مادة محلية و متوفرة في المنطقة.

#### V.4.6. تأثير استخدام شمع البرافين على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ

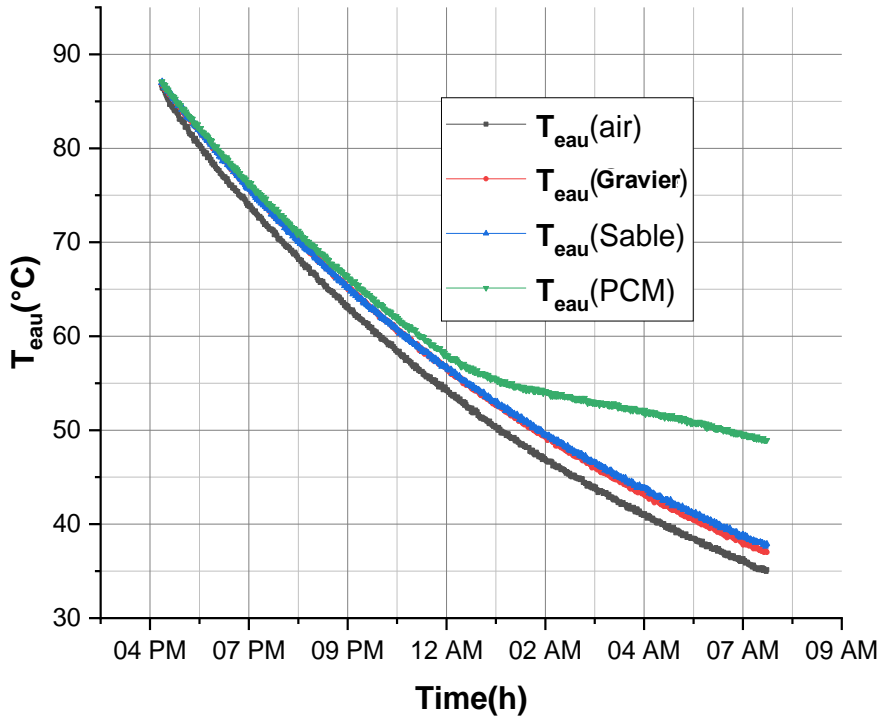
من خلال الشكل 5-17 نلاحظ أنه تصل درجة حرارة الماء في الخزان عند نهاية الشحن (عند الغروب) الى  $88^{\circ}\text{C}$  ثم تفقدها تدريجيا خلال الليل أثناء مرحلة التفريغ على شكل حرارة محسوسة الى الماء الى أن تصل الى  $54^{\circ}\text{C}$  في حدود الساعة 12:00 بعد منتصف الليل ثم تبدأ بعد ذلك تفقد الحرارة على شكل حرارة كامنة الى الماء الموجود في الخزان و يكون التغيير في درجة الحرارة طفيف جدا (شبه ثابت) بسبب الضياعات الحرارية الى أن تصل درجة حرارة الماء  $50^{\circ}\text{C}$  عند الشروق، و ذلك بفارق  $40^{\circ}\text{C}$  عن درجة حرارة الهواء الجوي  $T_{\text{amb}}$





الشكل 5-17: تأثير استخدام شمع البرافين على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.

5.6.V. مقارنة تأثير استخدام مختلف المواد على تغيرات درجات حرارة الماء (التجريبية) أثناء مرحلة التفريغ



الشكل 5-18: مقارنة تأثير استخدام مختلف المواد على تغيرات درجات حرارة الماء التجريبية أثناء مرحلة التفريغ.

من خلال الشكل 5-18 نلاحظ في حالة استخدام مواد التخزين SHS (الرمل والحصى) أفضل من استخدام الهواء مع كون الرمل أحسن بقليل من الحصى. بينما في حالة استخدام شمع البرافين في LHS حققت نتائج أحسن بكثير ويظهر ذلك خاصة في مرحلة التغيير الطوري حيث تكون درجة الحرار تقريبا ثابتة لعدة ساعات (تغيير طفيف) وتصل عند الشروق الى حوالي  $50^{\circ}\text{C}$  أي بزيادة تصل الى  $12^{\circ}\text{C}$  عند استخدام الرمل والحصى و  $15^{\circ}\text{C}$  في حالة الهواء.

الجدول 5-1: مدة إستغلال الماء عند مجال الإستخدام المنزلي أثناء مرحلة التفريغ باستخدام مواد تخزين مختلفة.

| $T_f \geq 50^{\circ}\text{C}$                                      |                              |
|--|------------------------------|
| مدة الاستغلال  | مادة التخزين                 |
| الى غاية 01:17am بعد منتصف الليل من اليوم الموالي (حوالي 08 ساعات) | عدم وجود مادة تخزين (الهواء) |
| الى غاية 02:07am بعد منتصف الليل من اليوم الموالي (حوالي 09 ساعات) | الحصى                        |
| الى غاية 02:00am بعد منتصف الليل من اليوم الموالي (حوالي 09 ساعات) | الرمل                        |
| الى غاية 06:49am صباحا من اليوم الموالي (حوالي 14 ساعة)            | البرافين                     |

### الختامة

في هذه الدراسة، تم دمج PTC مع نظام تخزين حراري وإجراء دراسة نظرية وتجريبية لتقييم أداء وفعالية التخزين الحراري باستخدام الرمل والحصى والهواء (كتخزين محسوس)، واستخدام شمع البرافين كمادة متغيرة الطور (PCM) وذلك على شكل حرارة كامنة تم تنفيذ هذا النظام باستخدام خزان مقترن بالمجمع الشمسي PTC لتعويض التقطع في توريد الطاقة أثناء غياب الشمس، بعد تحليل ومناقشة النتائج التجريبية ثم النظرية تم استخلاص الاستنتاجات التالية:

- الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة تتعلق بتغيرات الاشعاع الشمسي.

- استخدام مواد التخزين المحسوس (الرمل والحصى) أفضل من استخدام الهواء، مع كون الرمل أحسن بقليل من الحصى بفارق طفيف.
- من خلال دراستنا التجريبية والنظرية يمكننا اختيار مادة التخزين المناسبة حسب درجة الحرارة المطلوبة وذلك من خلال نطاق انصهارها وتجمدها.

## المراجع

- [1] A. K. Bhakta, N. K. Panday, and S. N. Singh, "Performance study of a cylindrical parabolic concentrating solar water heater with nail type twisted tape inserts in the copper absorber tube," *Energies*, vol. 11, no. 1, 2018, doi: 10.3390/en11010204.
- [2] G. Kumaresan, R. Sridhar, and R. Velraj, "Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 395–402, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.09.036.
- [3] I. Achouri, M. E. Soudani, D. Bechki, Y. Marif "Thermal Storage by Parabolic Trough Solar Collector in Ouargla Region" ISSN 2333-9748, *Tobacco Regulatory Science (TRS)*, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 4085-4103 doi.org/10.18001/TRS.9.286

الخاتمة

العامّة والتوصيات

أنظمة المجمعات الشمسية (PTC) المدججة مع أنظمة التخزين الحراري من أهم أنظمة التركيز الشمسي الحراري من حيث الفعالية، ولقد اهتمت الدراسات السابقة بدراسة مختلف طرق ومواد التخزين، من أجل اختيار المواد المناسبة وطرق التخزين المناسبة لكل نظام حسب الحاجة من أجل الموازنة بين العرض والطلب على الطاقة وخاصة أثناء غياب الشمس (الليل) أو عندما يكون الجو غائم مع مراعاة التكلفة وزيادة عمر الإشتغال.

في هذه الدراسة، تم دمج PTC مع نظام تخزين حراري وإجراء دراسة نظرية وتجريبية لتقييم أداء وفعالية التخزين الحراري باستخدام الرمل والحصى والهواء (كتخزين محسوس)، واستخدام شمع البرافين كمادة متغيرة الطور (PCM) و ذلك على شكل حرارة كامنة تم تنفيذ هذا النظام باستخدام خزان مقترن بالمجمع الشمسي PTC لتعويض التقطع في توريد الطاقة أثناء غياب الشمس، تم استخلاص الاستنتاجات التالية:

- تغيرات درجات الحرارة للماء أثناء مرحلة الشحن بالنسبة للتدفق  $0.05\text{Kg/s}$  بلغت  $132.6^\circ\text{C}$ ، بينما عند التدفق  $0.1\text{Kg/s}$  لم تتجاوز  $83.16^\circ\text{C}$  أي أقل بنسبة  $37.28\%$ .
- لوحظ أن كسب الحرارة المفيدة في حالة عدم وجود مادة التخزين يصل الى أقصى قيمة وهي  $864.70\text{ w}$  عند  $12:15$  ثم يبدأ في التراجع بعد الزوال. بينما في وجود مادة التخزين يستمر تزايد كسب الحرارة المفيدة بعد الزوال ويصل للقيمة  $5585.64\text{ w}$ .
- في حالة عدم استخدام شمع البرافين كمادة تخزين، الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة بلغت أقصى قيمة لها وهي  $2712.88\text{ kJ}$  من  $10:00$  الى  $11:00$ ، بينما عند استخدام مادة التخزين بلغت  $3378.58\text{ kJ}$  في الفترة الزمنية من  $14:00$  الى  $15:00$ .
- بلغت الطاقة الشمسية المخزنة كل ساعة في حالة استخدام الشمع  $523\text{ kJ}$  من  $09:00$  الى  $10:00$ .
- بلغت كفاءة الشحن في حالة عدم استخدام البرافين أقصى قيمة لها وهي  $58.29\%$ ، بينما كانت أقصى قيمة في حالة استخدام البرافين هي  $82.96\%$  و بالتالي استخدام شمع البرافين أحسن بكثير.

- عند استخدام شمع البرافين كمادة تخزين بلغت القيمة القصوى لدرجة حرارة مخرج الماء  $72.65^{\circ}\text{C}$  ودرجة حرارة الماء في خزان تخزين المياه  $65.5^{\circ}\text{C}$ .
- الطاقة الشمسية المجمعة كل ساعة تتعلق بتغيرات الاشعاع الشمسي.
- استخدام مواد التخزين المحسوس (الرمل والحصى) أفضل من استخدام الهواء، مع كون الرمل أحسن بقليل من الحصى بفارق طفيف.
- حقق استخدام شمع البرافين من أجل التخزين الكامن نتائج أحسن بكثير من استخدام الرمل والحصى، ويظهر ذلك في مرحلة التغيير الطوري أثناء مرحلة التفريغ، حيث دامت درجة حرارة الماء المرغوبة للاستعمال ( $T_f \geq 50^{\circ}\text{C}$ ) لحوالي 14 ساعة في حالة استخدام البرافين. بينما دامت في حالة استعمال الرمل والحصى لمدة 09 ساعات وذلك بفارق 05 ساعات كاملة.
- من خلال دراستنا التجريبية والنظرية يمكننا اختيار مادة التخزين المناسبة حسب درجة الحرارة المطلوبة وذلك من خلال نطاق انصهارها وتجمدها.

## التوصيات

نسجل التوصيات والآفاق التالية لتكون محل دراسة وتحليل وبحث في مشاريع الدراسات المستقبلية:

1. تحويل سطح الامتصاص إلى سطح حلزوني، من أجل زيادة معامل الاعتراض بالشكل الذي يجعلنا نتخلى عن التتبع الشمسي، بالإضافة الى زيادة سطح التبادل الحراري واستغراق المائع وقت أطول داخل أنبوب الامتصاص وبالتالي يمتص حرارة أكثر.
2. دراسة واختيار المواد متغيرة الطور المناسبة حسب الاستخدامات
3. احاطة الأنبوب الماص بمادة متغيرة الطور

الملاحق



## الملحق -أ-

الجدول 1: عدد ساعات التشميس الشهري والمتوسط اليومي لكل شهر خلال سنة (2018) بورقلة

مصدر المعلومات: المديرية الجهوية للأرصاد الجوية للجنوب الشرقي بورقلة.

| الشهر          | عدد ساعات التشميس الشهري | متوسط عدد ساعات التشميس اليومي |
|----------------|--------------------------|--------------------------------|
| جانفي          | 246.7                    | 07.96                          |
| فيفري          | 244.4                    | 08.73                          |
| مارس           | 252.5                    | 08.14                          |
| أفريل          | 309.5                    | 10.32                          |
| ماي            | 316.9                    | 10.22                          |
| جون            | 225.3                    | 07.51                          |
| جويلية         | 298.5                    | 09.63                          |
| أوت            | 320.8                    | 10.35                          |
| سبتمبر         | 259.5                    | 08.65                          |
| أكتوبر         | 288.3                    | 09.30                          |
| نوفمبر         | 224.2                    | 07.47                          |
| ديسمبر         | 249.8                    | 08.06                          |
| المجموع السنوي | <b>3236.4</b>            | <b>08.87</b>                   |

الجدول 2: الطاقة الشمسية ومدة التشميس في مختلف أنحاء الجزائر.

| الصحراء | الهضاب العليا | الساحلية | المناطق                                   |
|---------|---------------|----------|---|
| 86%     | 10%           | 4%       | نسبة المنطقة                              |
| 3500    | 3000          | 2650     | مدة التشميس في السنة                      |
| 2650    | 1900          | 1700     | الطاقة المتوسطة<br>KWh/m <sup>2</sup> /an |

الجدول 3: متوسط درجات الحرارة الدنيا والقصوى وسرعة الرياح خلال سنة (2018) بورقلة

الملحق -أ-

مصدر المعلومات: المديرية الجهوية للأرصاد الجوية للجنوب الشرقي بورقلة.

| سرعة الرياح القصوى<br>Km/h | متوسط درجة الحرارة<br>القصوى<br>T <sub>max</sub> °C | متوسط درجة الحرارة<br>الدنيا<br>T <sub>min</sub> °C | الشهر  |
|----------------------------|---|---|--------|
| 14                         | 19.4  | 06.2  | جانفي  |
| 20                         | 22.8  | 08.2  | فيفري  |
| 26                         | 23.8  | 10.1  | مارس   |
| 14                         | 31.4  | 15.1  | أفريل  |
| 29                         | 35.2  | 20.2  | ماي    |
| 20                         | 39.7  | 23.8  | جوان   |
| 15                         | 44.6  | 28.5  | جويلية |
| 16                         | 44.1  | 27.9  | أوت    |
| 16                         | 40.6  | 25.8  | سبتمبر |
| 14                         | 32.9  | 17.0  | أكتوبر |
| 20                         | 25.7  | 12.1  | نوفمبر |
| 20                         | 19.0  | 05.9  | ديسمبر |

الجدول 4: المقادير الجغرافية والجوية لمدينة ورقلة

| القيمة            | المقادير الجغرافية والجوية |
|-------------------|----------------------------|
| $\varphi=31.57^0$ | زاوية خط العرض             |
| $L=5.24^0$        | زاوية خط الطول             |
| $Z=141m$          | الارتفاع عن سطح البحر      |
| $a=0.35$          | الألبدو (النورانية)        |

الملحق -ب-

مشاريع CSPs في أنحاء العالم (المصدر Solarpaces المختبر الوطني للطاقة المتجددة)

| سنة البدء | الحالة  | تكنولوجيا  | مساحة المجال الشمسي (m <sup>2</sup> ) | الإستطاعة (MW) | الأشعاع الشمسي (kWh/m <sup>2</sup> .year) | خط الطول | دائرة العرض | الموقع    | محطة توليد الكهرباء  |
|-----------|---------|------------|---------------------------------------|----------------|---|----------|-------------|-----------|----------------------|
| 2011      | تعمل    | PTC        | 183.860                               | 20             | 2159                                      | 3.35     | 33.12       | الجزائر   | ISCC حاسي الرمل      |
| 2011      | لا تعمل | برج الطاقة | 6080                                  | 3              | -   | 146.4    | 33.31<br>-  | أستراليا  | Lake Cargelligo      |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 130,800                               | 20             | 2154                                      | 31.24    | 29.27       | مصر       | KuraymatI SCC        |
| 2011      | تعمل    | برج الطاقة | 16.222                                | 2.5            | -   | 73.24    | 28.18       | الهند     | ACME                 |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 510,120                               | 50             | 2260                                      | -3.06    | 37.22       | إسبانيا   | Andasol 3            |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 510,120                               | 50             | 2007                                      | -5.83    | 36.66       | إسبانيا   | Arcosol 50           |
| 2011      | تعمل    | برج الطاقة | 304,750                               | 20             | 2072                                      | - 5.33   | 37.56       | إسبانيا   | Gemasolar            |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 300,000                               | 50             | 2159                                      | - 5.11   | 37.58       | إسبانيا   | Helioenergy 1        |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 552,750                               | 50             | 2069                                      | -6.46    | 38.95       | إسبانيا   | La Dehesa            |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 510,120                               | 50             | 2107                                      | -3.30    | 39.18       | إسبانيا   | Manchasol 1          |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 412,020                               | 50             | 2065                                      | - 6.04   | 37.00       | إسبانيا   | Lebrija 1            |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 510,120                               | 50             | 2107                                      | -3.31    | 39.18       | إسبانيا   | Manchasol 2          |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 372,240                               | 50             | 2064                                      | 5.25     | 37.64       | إسبانيا   | Palma del Río I      |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 510,120                               | 50             | 2007                                      | -5.84    | 36.66       | إسبانيا   | Termesol 50          |
| 2011      | تعمل    | PTC        | 183,120                               | 20             | 2072                                      | -2.1     | 34.06       | المغرب    | ISCC Ain Beni Mathar |
| 2012      | لا تعمل | فرنيل      | 18,490                                | 3              | -   | 150.9    | 32.37       | أستراليا  | Liddell              |
| 2012      | تعمل    | برج الطاقة | 40.38                                 | 10,000         | 1   | 1290     | 115.9<br>3  | 40.3<br>8 | Badaling Dahan       |

الملحق -ب-

|      |      |            |         |      |      |        |       |         |  |
|------|------|------------|---------|------|------|--------|-------|---------|--|
| 2012 | تعمل | فرينل      | 400     | 0.3  | 1800 | 1.97   | 42.50 | فرنسا   | <b>Augustin</b>                              |
| 2012 | تعمل | PTC        | 8000    | 1    | -    | 77.15  | 28.42 | الهند   | <b>National Solar Thermal Power Facility</b> |
| 2011 | تعمل | PTC        | 510,120 | 50   | 2104 | -3.23  | 39.17 | إسبانيا | <b>Aste 1A</b>                               |
| 2012 | تعمل | PTC        | 510,120 | 50   | 2104 | -3.26  | 39.17 | إسبانيا | <b>Aste 1B</b>                               |
| 2012 | تعمل | PTC        | 510,120 | 50   | 2055 | -7.05  | 38.81 | إسبانيا | <b>Astexol II</b>                            |
| 2012 | تعمل | PTC        | 183,120 | 22.5 | 1878 | 0.8    | 41.52 | إسبانيا | <b>Borges Termosolar</b>                     |
| 2012 | تعمل | برج الطاقة | 10,560  | 5    | -    | -      | -     | إسبانيا | <b>CRS</b>                                   |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2068 | - 5.11 | 37.58 | إسبانيا | <b>Helioenergy 2</b>                         |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2092 | - 3.47 | 39.24 | إسبانيا | <b>Helios I</b>                              |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2092 | - 3.47 | 39.24 | إسبانيا | <b>Helios II</b>                             |
| 2012 | تعمل | PTC        | 550,000 | 50   | 2062 | - 5.05 | 37.75 | إسبانيا | <b>La Africana</b>                           |
| 2012 | تعمل | PTC        | 380,000 | 50   | 2068 | - 5.47 | 37.14 | إسبانيا | <b>Moron</b>                                 |
| 2012 | تعمل | PTC        | 402,210 | 50   | 2053 | - 7.05 | 38.81 | إسبانيا | <b>Olivenza 1</b>                            |
| 2012 | تعمل | PTC        | 405,500 | 50   | 2074 | - 5.54 | 38.99 | إسبانيا | <b>Orellana</b>                              |
| 2012 | تعمل | فرينل      | 302,000 | 30   | 1996 | - 1.6  | 38.27 | إسبانيا | <b>Puerto Errado 2</b>                       |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2076 | - 5.39 | 39.22 | إسبانيا | <b>Solaben 2</b>                             |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2076 | - 5.3  | 39.22 | إسبانيا | <b>Solaben 3</b>                             |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2042 | -4.49  | 37.95 | إسبانيا | <b>Solacor 1</b>                             |
| 2012 | تعمل | PTC        | 300,000 | 50   | 2042 | -4.49  | 37.95 | إسبانيا | <b>Solacor 2</b>                             |
| 2012 | تعمل | PTC        | 45,000  | 5    | -    | 99.70  | 14.33 | تايلندا | <b>Thai Solar Energy 1</b>                   |
| 2012 | تعمل | برج الطاقة | -       | 1.4  | -    | 34.61  | 36.86 | تركيا   | <b>Greenway CSP</b>                          |

الملحق -ب-

|      |            |            |          |     |      |            |       |                     |   |
|------|------------|------------|----------|-----|------|------------|-------|---------------------|---|
| 2013 | تعمل       | برج الطاقة | 63,000   | 10  | 2043 | 97.29      | 37.36 | الصين               | <b>SUPCON<br/>Delingha</b>                              |
| 2013 | لا<br>تعمل | PTC        | -        | 100 | 1940 | 71.77      | 27.38 | الهند               | <b>KVK<br/>Energy<br/>Solar</b>                         |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 3398     | 0.4 | 1527 | 12.52      | 42.73 | إيطاليا             | <b>ASE Demo<br/>Plant</b>                               |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 3398     | 0.4 | 1527 | 12.52      | 42.73 | إيطاليا             | <b>ASE Demo<br/>Plant</b>                               |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 510,120  | 50  | 2064 | - 5.54     | 37.16 | إسبانيا             | <b>Arenales</b>   |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 510,120  | 50  | 2064 | - 5.31     | 39.23 | إسبانيا             | <b>Casablanca</b>                                       |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 339,506  | 50  | 1992 | - 0.92     | 38.72 | إسبانيا             | <b>Enerstar</b>   |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 300,000  | 50  | 2076 | - 5.39     | 39.22 | إسبانيا             | <b>Solaben 1</b>  |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 300,000  | 50  | 2076 | - 5.3      | 39.22 | إسبانيا             | <b>Solaben 6</b>  |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 523,200  | 50  | 2077 | - 5.57     | 39.19 | إسبانيا             | <b>Termesol 1</b>                                       |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 523,200  | 50  | 2077 | - 5.57     | 39.19 | إسبانيا             | <b>Termesol 2</b>                                       |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 627,840  | 100 | 2019 | 53.71      | 23.57 | الإمارات<br>المتحدة | <b>Shams 1</b>  |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 2200,000 | 250 | 2784 | -<br>112.9 | 32.91 | الولايات<br>المتحدة | <b>Solana</b>   |
| 2013 | تعمل       | PTC        | 392,400  | 50  | 1667 | 72.22      | 27.60 | الهند               | <b>Godawari</b>   |
| 2014 | تعمل       | PTC        | 5248     | 1.1 | -    | -<br>110.7 | 50.04 | كندا                | <b>City of<br/>Medicine<br/>Hat<br/>ISCC</b>            |
| 2014 | تعمل       | فرينيل     | -        | 125 | 1742 | 72.00      | 26.78 | الهند               | <b>Dhursar</b>  |
| 2014 | تعمل       | PTC        | 366,240  | 50  | 1476 | 77.68      | 14.94 | الهند               | <b>Megha</b>  |
| 2014 | تعمل       | فرينيل     | 9780     | 1   | -    | 16.24      | 39.37 | إيطاليا             | <b>Rende</b>  |
| 2014 | تعمل       | PTC        | 6159     | 3   | 2200 | - 9.14     | 30.21 | المغرب              | <b>Airlight<br/>Energy<br/>Ait-Baha<br/>Pilot Plant</b> |

الملحق -ب-

|      |      |            |          |     |      |            |            |                          |  |
|------|------|------------|----------|-----|------|------------|------------|--------------------------|--|
| 2014 | تعمل | برج الطاقة | 2600,000 | 377 | 2768 | -<br>115.4 | 35.55      | الولاية<br>ات<br>المتحدة | <b>Ivanpah</b>                               |
| 2014 | تعمل | PTC        | 1559,347 | 280 | 2888 | -<br>117.3 | 35.01      | الولاية<br>ات<br>المتحدة | <b>Mojave</b>                                |
| 2014 | تعمل | PTC        | 1928,320 | 250 | 2676 | -<br>114.9 | 33.66      | الولاية<br>ات<br>المتحدة | <b>Genesis</b>                               |
| 2015 | تعمل | PTC        | 1308,000 | 160 | 2497 | - 6.86     | 30.99      | المغرب                   | <b>NOOR I</b>                                |
| 2015 | تعمل | PTC        | 800,000  | 100 | 2963 | 19.62      | -<br>28.90 | جنوب<br>إفريقيا          | <b>KaXu<br/>Solar One</b>                    |
| 2015 | تعمل | برج الطاقة | 1197,148 | 110 | 2734 | -<br>117.3 | 38.23      | الولاية<br>ات<br>المتحدة | <b>Crescent<br/>Dunes</b>                    |
| 2015 | تعمل | PTC        | -        | 2   | -    | -<br>118.5 | 39.54      | الولاية<br>ات<br>المتحدة | <b>Stillwater<br/>GeoSolar</b>               |
| 2016 | تعمل | برج الطاقة | 51,505   | 1.5 | -    | 137.8      | -<br>32.59 | أستراليا                 | <b>Sundrop</b>                               |
| 2016 | تعمل | فرينل      | -        | 10  | 1786 | 94.42      | 40.08      | الصين                    | <b>Lanzhou<br/>Dacheng<br/>Dunhuang</b>      |
| 2016 | تعمل | برج الطاقة | 175,375  | 10  | 1777 | 94.43      | 40.08      | الصين                    | <b>Shouhang<br/>Dunhuang<br/>Phase I</b>     |
| 2016 | تعمل | PTC        | 26,929   | 5.5 | 1025 | 9.98       | 57.25      | دانمارك                  | <b>Aalborg<br/>CSP-<br/>Brøndersle<br/>v</b> |
| 2016 | تعمل | PTC        | 588,600  | 50  | 2949 | 21.99      | -<br>28.74 | جنوب<br>إفريقيا          | <b>Bokpoort</b>                              |
| 2016 | تعمل | برج الطاقة | 576,800  | 50  | 2952 | 21.07      | -<br>28.53 | جنوب<br>إفريقيا          | <b>Khi Solar<br/>One</b>                     |
| 2017 | تعمل | برج الطاقة | 15,000   | 1.1 | -    | 148.1      | - 33.4     | أستراليا                 | <b>Jemalong</b>                              |

الملحق -ب-

|      |      |            |          |     |      |            |            |                          |                                   |
|------|------|------------|----------|-----|------|------------|------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 2017 | تعمل | PTC        | 85,000   | 12  | -    | -<br>109.5 | 31.32      | المكسيك                  | <b>Agua Prieta II</b>             |
| 2018 | تعمل | PTC        | 620,000  | 50  | 1950 | 97.27      | 37.35      | الصين                    | <b>CGN Delingha</b>               |
| 2018 | تعمل | فرينل      | 170,000  | 15  | -    | 114.5      | 41.21      | الصين                    | <b>Huaqiang TeraSolar</b>         |
| 2018 | تعمل | برج الطاقة | 1400,000 | 100 | 1777 | 94.42      | 40.06      | الصين                    | <b>Shouhang Dunhuang Phase II</b> |
| 2018 | تعمل | برج الطاقة | 542,700  | 50  | 2043 | 97.29      | 37.36      | الصين                    | <b>SUPCON Delingha</b>            |
| 2018 | تعمل | PTC        | 1779,900 | 200 | 2503 | -          | -          | المغرب                   | <b>NOOR II</b>                    |
| 2018 | تعمل | برج الطاقة | 1312,000 | 150 | 2508 | - 6.87     | 31.06      | المغرب                   | <b>NOOR III</b>                   |
| 2018 | تعمل | PTC        | -        | 50  | 2521 | 38.87      | 31.63      | المملكة العربية السعودية | <b>ISCC Waad Al Shamal</b>        |
| 2018 | تعمل | PTC        | 869,800  | 100 | 2937 | 21.54      | -<br>28.49 | جنوب افريقيا             | <b>Ilanga I</b>                   |
| 2018 | تعمل | PTC        | -        | 100 | 2960 | 19.59      | -<br>28.89 | جنوب إفريقيا             | <b>Xina Solar One</b>             |
| 2019 | تعمل | برج الطاقة | 696,751  | 50  | 1789 | 94.95      | 43.61      | الصين                    | <b>CEEC Hami</b>                  |
| 2019 | تعمل | فرينل      | 1270,000 | 50  | 1649 | 94.42      | 40.08      | الصين                    | <b>Lanzhou Dacheng Dunhuang</b>   |
| 2019 | تعمل | برج الطاقة | 610,000  | 50  | 1945 | 95.22      | 36.39      | الصين                    | <b>LuNeng Haixi</b>               |
| 2019 | تعمل | فرينل      | 153,000  | 9   | 1930 | 2.06       | 42.46      | فرنسا                    | <b>eLLO</b>                       |
| 2019 | تعمل | فرينل      | 33,000   | 14  | 1223 | 77.63      | 28.57      | الهند                    | <b>Dadri ISCC</b>                 |
| 2019 | تعمل | PTC        | -        | 50  | -    | 47.01      | 29.13      | الكويت                   | <b>Shagaya</b>                    |
| 2019 | تعمل | PTC        | -        | 100 | 2830 | 23.06      | -<br>27.73 | جنوب إفريقيا             | <b>Kathu Solar Park</b>           |
| 2020 | تعمل | PTC        | 1150,000 | 100 | 2170 | 108.5<br>8 | 41.50      | الصين                    | <b>CSNP Urat</b>                  |

الملحق -ب-

|      |             |            |          |      |       |            |                 |                          |                                    |
|------|-------------|------------|----------|------|-------|------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------|
| 2020 | تعمل        | برج الطاقة | 516,000  | 50   | 1883  | 100.6      | 36.10           | الصين                    | <b>Power China Qinghai Gonghe</b>  |
| 2021 | تعمل        | برج الطاقة | 1484,000 | 110  | 3186  | -<br>69.47 | -<br>22.77      | شيلي                     | <b>Atacama I / Cerro Dominador</b> |
| 2021 | تعمل        | برج        | 208,240  | 50   | 1641  | 97.27      | 40.33           | الصين                    | <b>Yumen Xinneng / Xinchen</b>     |
| 2022 | قيد الإنشاء | فرينل      | 83,200   | 4.26 | 1800  | -          | -               | إيطاليا                  | <b>Partanna MS-LFR</b>             |
| 2022 | قيد الإنشاء | برج الطاقة | -        | 100  | 1967  | 55.36      | 24.76           | الإمارات العربية المتحدة | <b>Noor Energy 1</b>               |
| 2022 | قيد الإنشاء | PTC        | -        | 600  | 1967  | 55.36      | 24.76           | الإمارات العربية المتحدة | <b>Noor Energy 1</b>               |
| 2023 | قيد الإنشاء | فرينل      | -        | 100  | 1649  | -          | -               | الصين                    | <b>CEIC Dunhuang</b>               |
| 2023 | قيد الإنشاء | برج        | -        | 110  | -     | -          | -               | الصين                    | <b>Huidong</b>                     |
| 2023 | قيد الإنشاء | برج الطاقة | -        | 100  | -     | -          | -               | الصين                    | <b>Jinta Zhongguang</b>            |
| 2023 | قيد الإنشاء | PTC        | -        | 2469 | 35.45 | 27.74      | ISCC<br>Dubai 1 | المملكة العربية السعودية | <b>ISCC Dubai 1</b>                |
| 2023 | قيد الإنشاء | برج الطاقة | 850,000  | 100  | -     | -          | -               | جنوب إفريقيا             | <b>Redstone</b>                    |



## الملحق - ج -

### قائمة المنشورات والملتقيات

#### • مساهمة في النشر في مجلة علمية دولية صنف "A"

1. *ISSN 2333-9748, Tobacco Regulatory Science (TRS), 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 4085-4103.*

#### • مشاركة في ملتقيات دولية

1. International Conference on Advanced Energy Materials and Research (ICAEMR) held in Kuwait City, 2020.
2. Materials Chemistry International Symposium Virtual Scientific Meeting ISyMC'2021 in Boumerdas, 2021.
3. 1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA.
4. The 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI 2021)
5. DZPOWER 21 International Conference Power and Energy Engineering (DZPOWER'21)06
6. The first International Conference on Energy, Thermofluids and Materials Engineering, ICETME 2021 held online from 18 to 20 December 2021.
7. The 1st International Conference on Chemical matters and Environment Preservation IC-CMEP'22 March 09-10, 2022, Ouargla – Algeria.
8. Algerian Symposium on Renewable Energy and Materials ASREM2022, March 16-17, 2022 Médéa – Algeria

الملحق -ج-

9. The 1st International Conference on Renewable Materials and Energies ICRME 2022 October 26-27, 2022, Ouargla-Algeria.