الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مـــــــــرباح ورقلة

كلـيـة الرياضيات وعلوم المـادة

قســم الفـيـزيـاء

تخصص: فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

مذكرة تخرج مـاستر أكاديمي

بـعنوان:

دراسة المواد الماصة للحرارة لتبريد الخلايا الكهروضوئية في أنظمة التركيز الكهروشمسي الهجينة HCPV

من إعداد الطالبين:

- بهاز عبد العزيز
- زروالي إلياس

نـوقشت يوم: **13 جـوان 2026**

أمـام اللجنة المكونة من الســادة:

لـزهر بن مبروك	أستاذ محاضر. ب	جـامعة قاصدي مرباح – ورقلة	رئـيسا
عـاشوري إنتصار	دكتور	جـامعة قاصدي مرباح – ورقلة	مـناقشا
بـــوعنان رابـح	أستاذ محاضر. ب	جـامعة قاصدي مرباح – ورقلة	مـشرفا

السنة الجامعية:2026/2025

بسم الله الرحمن الرحيم

شكر و عرفان:

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين

سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين

وبعد إتمام هذا العمل، يسعدني أن أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان

لكل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا التقرير،

ولكل من مدّ لي يد العون وقدم لي النصيحة والتوجيه

وأخصّ بالذكر الأستاذ القدير بوعنان رابح ، الذي كان خير موجّه وداعم،

فلم يبخل عليّ بعلمه ونصائحه القيّمة، فله مني جزيل الشكر والتقدير

على كل ما قدمه من جهود،

كما أتقدم بالشكر الجزيل إلى أساتذة الجامعة،

الذين كانوا مثالا في التعاون والتوجيه،

أسأل الله أن يحفظهم ويطيل في عمرهم.

ولا يفوتني أن أشكر كل من ساهم في إنجاح هذا العمل،

ولو بكلمة طيبة أو دعم معنوي

وفي الختام، نسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم،

وأن يوفقنا جميعًا لما فيه الخير

"وإن تعدوا نعمة الله لا تحصوها"

إهـداء

إلى من علمتني أن الطموح لا حدود له،

...وأن النجاح طريقه تعب وصبر

إلى من كان دعاؤهم سر قوتي، ونور دربي،

إلى أغلى ما أملك في هذا الوجود

أبي وأمي حفظهما الله وأطال في عمرهما

إلى من شاركوني لحظات الفرح والتعب،

إلى إخوتي وأخواتي، سندي في هذه الحياة

إلى أصدقائي الذين كانوا إلى جانبي دائما،

بكلمة طيبة، بدعم صادق، وبابتسامة أمل

إلى كل من علّمني حرفًا،

وإلى كل من ساهم في توجيهي ولو بنصيحة بسيطة

إليكم جميعًا أهدي ثمرة جهدي،

راجيا من الله أن يكون هذا العمل بداية لطريق مليء بالنجاحات.

عبد العزيز

الاهداء :

إلى من علّمتني أن الأحلام لا تتحقق إلا بالصبر،
...وأن التعب طريق النجاح
إلى من كانت دعواتها تسبقني في كل خطوة،
...وحنانها يرافقني في كل لحظة
أمي الغالية، يا نبض قلبي وسر قوتي،
أهديكِ هذا العمل، فكل حرف فيه يحمل شيئًا منكِ
إلى من علّمني معنى المسؤولية،
...ومنحني القوة لأواجه الحياة بثبات
أبي العزيز رحمة الله عليه، يا سندي وفخري،
.أهديك ثمرة جهدي، راجيًا أن أكون كما عهدتني عند حسن ظنك
إلى من كانوا معي في كل الظروف،
...يشاركونني التعب قبل الفرح
إخوتي وأحبتي، أنتم النور الذي لا ينطفئ في حياتي
وإلى كل من آمن بي حين ضعفت،
...ووقف بجانبي حين تعثرت
أهديكم هذا الإنجاز المتواضع،
الذي لم يكن ليرى النور لولا دعمكم
...إلى أرواحٍ أحببتها وغابت، لكنها ما زالت تسكن قلبي.

إلياس.

ملخص

تناول هذا البحث دراسة تحليلية لأداء الخلايا الكهروضوئية تحت تأثير المتغيرات البيئية، مع التركيز على دور المواد الماصة للحرارة كحل تقني لتبريد الخلايا في أنظمة التركيز الكهروضوئية الهجينة (HCPV)أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink أن شدة الإشعاع الشمسي هي العامل الأكثر تأثيراً في رفع القدرة المنتجة. وفي المقابل، كشفت الدراسة عن التأثير السلبي لارتفاع درجة الحرارة، حيث تسببت زيادة حرارة الخلية في انخفاض القدرة بسبب تراجع الجهد. وعليه، فإن دمج المواد الماصة للحرارة يعد ضرورة حتمية في أنظمة التركيز للحفاظ على كفاءة الخلايا ومنع تدهور أدائها الحراري، مما يساهم في تعظيم الاستفادة من الطاقة الشمسية في البيئات الحارة.

الكلمات المفتاحية :الطاقة الشمسية المركزية(CPV) ، الخلايا الكهروضوئية الهجينة، التبريد بالمواد الماصة للحرارة، النمذجة والمحاكاة(MATLAB/Simulink) ، كفاءة التحويل الطاقوي.

Résumé

Cette recherche présente une étude analytique des performances des cellules photovoltaïques sous l'influence de variables environnementales, en mettant l'accent sur le rôle des matériaux absorbant la chaleur comme solution technique pour le refroidissement des cellules dans les systèmes photovoltaïques à concentration hybrides (HCPV). Les résultats de la simulation via l'environnement MATLAB/Simulink ont démontré que l'intensité du rayonnement solaire est le facteur le plus influent sur l'augmentation de la puissance produite. En revanche, l'étude a révélé l'effet négatif de l'élévation de la température, où l'augmentation de la chaleur de la cellule a entraîné une baisse de puissance due à la chute de tension. Par conséquent, l'intégration de matériaux absorbant la chaleur est une nécessité impérative dans les systèmes à concentration pour maintenir l'efficacité des cellules et prévenir la dégradation de leurs performances thermiques, contribuant ainsi à maximiser l'exploitation de l'énergie solaire dans les environnements chauds.

Mots-clés : Solaire photovoltaïque à concentration (CPV), Cellules photovoltaïques hybrides, Refroidissement par matériaux absorbant la chaleur, Modélisation et simulation (MATLAB/Simulink), Efficacité de conversion énergétique.

Abstract

This research presents an analytical study of photovoltaic cell performance under the influence of environmental variables, focusing on the role of heat-absorbing materials as a technical solution for cell cooling in Hybrid Concentrated Photovoltaic (HCPV) systems. Simulation results using the MATLAB/Simulink environment demonstrated that solar radiation intensity is the most significant factor in increasing power output. Conversely, the study revealed the negative impact of rising temperatures, where increased cell heat led to a decline in power due to voltage drop. Consequently, the integration of heat-absorbing materials is an imperative necessity in concentrated systems to maintain cell efficiency and prevent thermal performance degradation, thereby contributing to maximizing solar energy utilization in hot environments.

Keywords: Concentrated Photovoltaics (CPV), Hybrid Photovoltaic Cells, Cooling with Heat-Absorbing Materials, Modeling and Simulation (MATLAB/Simulink), Energy Conversion Efficiency.

قائمة المحتويات

شكر و عرفان

الاهداء

الملخص

Résumé

Abstract

قائمة المحتويات

قائمة الرموز و المختصرات

الملاحق

مقدمة عامة 18

1-فرضيات البحث 19

2-المنهجية المعتمدة 19

الفصل الأول: الطاقة الشمسية و الخلايا الكهروضوئية

ا-مقدمة..... 20

ا-1-تعريف الأشعة الشمسية 20

ا-2-الاشعاع الشمسي و وظيفته 20

ا-3- إستخدامات الطاقة الشمسية 21

ا-4-الخلايا الشمسية و الألواح الشمسية 22

ا-4-1- الخلايا الشمسية(Photovoltaic Cells) 22

ا-4-2 الألواح الشمسية (Solar Panels)..... 25

ا-5 تجميع الخلايا 28

ا-5-1-تجميع الالواح على التسلسل (Modules in serie) 29

ا-5-2- تجميع الالواح على التفرع..... 29

I-5-2- تجميع الالواح على التسلسل و التفرع..... 30
I-6 مقومات تأهيل الطاقة الشمسية في الجزائر 31
I-7 إمكانيات الطاقة الشمسية 31

الفصل الثاني: المركزات الشمسية و الموازنة الحرارية

II-مقدمة..... 33
II-1المركزات الشمسية 33
II-3أنواع المركزات 33
مركزات البؤرة النقطية..... 33
-نظام برج الطاقة المركزي (CRS)..... 34
-نظام الصحن ذي القطع المكافئ(Dish Parabolic System DP) 34
-مركزات البؤرة الخطية 35
-نظام مركزات فرينل (Linear Fresnel Reflectors) 35
-المركز الأسطواني ذي القطع المكافئ:(Parabolic Trough Collector – PTC) 36
-العنصر الجامع للحرارة(Heat Collector Element – HCE) 38
-المائع الناقل للحرارة (Heat Transfer Fluid – HTF) 38
II- 4هندسة المجمعات الشمسية الأسطوانية ذي القطع المكافئ (PTC) 39
II- 5المردود الضوئي ηop (Optical Efficiency) 42
II-6 النمذجة الحرارية(Thermal Modeling) 43
II- 8 الكفاءة الحرارية η (Thermal Efficiency) 43

الفصل الثالث: المواد ذات الموصلية الحرارية

III-1-مفهوم الموصلية الحرارية 48
III-2-الموصلات(Conductors) 48
III-3-العوازل(Insulators) 49

III_4-أشباه الموصلات(Semiconductors) 49
III-4-1-المواد شبه الموصلة النقية 50
III-4-2- المواد شبه الموصلة غير النقية(Extrinsic Semiconductors) 52
-شباه الموصلات من النوع الموجب(P-type semiconductor) 52
-أشباه الموصلات من النوع السالب:(N-type semiconductor) 53
III-5-البلورة الدخيلة 54
أ) المستويات الواهبة (Donor Levels) وتشكيل النوع:n-type 55
ب) المستويات القابلة (Acceptor Levels) وتشكيل النوع:p-type 55

الفصل الرابع : أنظمة التبريد لرفع كفاءة الخلايا تحت التركيز العالي

IV-مقدمة 57
IV-1- تقنيات التبريد بواسطة الطاقة الشمسية 57
IV-2- التبريد الشمسي باستخدام الأنظمة الكهروضوئية 58
IV-3- التبريد الشمسي باستخدام الأنظمة الحرارية 59
IV-4- المبادلات الحرارية 60
أ) أنظمة تبريد ذات دورة مفتوحة(Les systèmes frigorifiques à cycle ouvert) 60
ب) أنظمة تبريد ذات دورة مغلقة:(Les systèmes frigorifiques à cycle fermé) 61
IV-5- نظام التبريد الشمسي بالامتزاز 61
IV-5-1- مفهوم ظاهرة الامتزاز (Adsorption) 61
أ) معايير اختيار المادة المازة(Adsorbent) 62
ب) معايير اختيار السائل الممتز (Adsorbate) 62
IV-5-2- مكونات ومبدأ عمل آلة التبريد بالامتزاز 63
IV-5-3- تحليل مخطط عمل آلة التبريد بالامتزاز 64
IV-6 -نظام التبريد الشمسي بالامتصاص 67
مفهوم ظاهرة الامتصاص 67

IV-6-1 الشروط الواجب توافرها في أزواج العمل 68
IV-6-2 بنية ومبدأ عمل آلة التبريد بالامتصاص 68
IV-6-2 آلية عمل الدورة 69
IV-7- تصنيف أنظمة التبريد بالامتصاص الشمسي 69
IV-7-1 آلية العمل والأداء 70
IV-7-2 مسار العمليات الحرارية..... 71

الفصل الخامس: إستخدامMatlab/ Simulink لدراسة التأثير الاشعاعي الشمسي على درجة حرارة الخلايا

V-مقدمة 76
V-1- نظرة عامة حول برنامج الماتلابMatlab 76
V-2نظرة عامة حول برنامجSimulink 77
V-1- نمذجة الخلية الكهروضوئية 78
V-1-1- الدائرة المكافئة للخلية الكهروضوئية..... 78
V-2- اختيار الوحدة الكهروضوئية المدروسة..... 79
V-3- محاكاة أداء الخلية الكهروضوئية تحت تأثير المتغيرات البيئية باستخدامMATLAB 82
V-4- مخرجات المحاكاة..... 83
V-4- التحليل و المناقشة..... 88
V-4-1- تحليل نتائج المحاكاة 88
V-4-2 حدود الدراسة 91
V-4-3 الخلاصة 92

الخاتمة العامة.....93
الملاحق.....95

قائمة الاشكال:

الشكل	الصفحة
الشكل (I–1) مكونات الاشعاع الشمسي الكلي	21
الشكل (I–2) : خلايا أحادية البلورة و متعددة البلورات	23
الشكل (I–3) : الخلايا ذات الفيلم الرقيق	24
الشكل (I–4) : خلايا البيروفسكايت الشمسية	24
الشكل (I–5) : الألواح الشمسية الأحادية البلورة	25
الشكل (I–6) : الشمسية ذات نصف الخلية	26
الشكل (I–7): اللوح الكهروضوئي المصنوع محليا في مؤسسة زرقون للطاقة الخضراء – الرويسات، (ورقلة – الجزائر)	27
الشكل (I–8): الخاصية المثالية للالواح الكهروشمسية المربوطة على التسلسل	29
الشكل (I–9): الخاصية المثالية للألواح الكهروشمسية المربوطة على التفرع	30
الشكل (I–10): تجميع الخلايا علي التسلسل و علي التفرع	30
الشكل (II–1): يوضح نظام برج الطاقة المركز	34
الشكل (II–2): يوضح نظام الصحن ذي القطع المكافئ.	35
الشكل (II–3): مركزات أشعة فرينل	36
الشكل (II–4): المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ	37
الشكل (II–5): المخطط العام للمجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ لptc	39
الشكل (II–6): يوضّح زاوية الحافة وزاوية القبول للمجمع الشمسي	40
الشكل (III–1): مخطط الطاقة للعناصر الكهربائية ،أ– العوازل ، ب –النواقل ، ج – أنصاف النواقل	50
الشكل(III–2): مستوي فيرمي لشبه الموصل النقي	51
الشكل(III–3) : تطعيم الجاليوم النقي بالذرة الآخذة	52
شكل (III–4): تطعيم الجاليوم النقي بالذرة المانحة	54
الشكل(III–5) : مستوي فيرمي لأشباه الموصلات النقية من النوع (n) والنوع(p) a : النقية ،b : المطعمة(n type) ،c : المطعمة(p –type)	56

الشكل (IV–1): دورة التبريد الكلاسيكية	57
الشكل(IV–2): مخطط توضيحي لأنظمة التبريد بالطاقة الشمسية	58
الشكل(IV–3): رسم تخطيطي لنظام التبريد الكهروضوئي	59
الشكل(IV–4): نظام التبريد بالميكانيكا الحرارية	60
الشكل(IV–5): مبدأ نظام التبريد الشمسي ذات دورة مغلقة	61
الشكل(IV–6): نظام التبريد الشمسي بالامتزاز	64
الشكل(IV–7): مخطط كلابيرون لعمليات دارة التبريد الامتزازية الشمسية	65
الشكل(IV–8): مخطط توضيحي لمكونات وعمل آلة التبريد بالامتصاص	68
الشكل(IV–9): نظام التبريد الشمسي أحادي الامتصاص.	71
الشكل(IV–10) : نظام التبريد لامتصاص الشمسي مزدوج الامتصاص	72
الشكل(IV–11): نظام التبريد الشمسي ثلاثي التأثير	74
الشكل (V–1): الدارة المكافئة للخلايا الكهروضوئية	78
الشكل (V–2) :منحنيات(I–V) و(P–V) للوحدة الكهروضوئية عند مستويات مختلفة من الاشعاع الشمسي	81
الشكل (V–3):منحنيات(P–V) و(I–V) للوحدة الكهروضوئية عند درجات حرارة مختلفة	81
الشكل (V–4): نموذج وحدة الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام Simulink	83
الشكل (V–5): يوضح العلاقة بين الجهد (V) والتيار (I) والقدرة(P) وشدة الاشعاع الشمسي (G)عند درجات حرارة مختلفة	85

قائمة الجداول:

جدول	الصفحة
الجدول (I. 1): إمكانيات الطاقة الشمسية في مختلف ولايات الجزائر	31
الجدول (1.IV): أزواج العمل المختارة في ظاهرة الامتصاص	67
الجدول (2.VI): استعراض لأهم إيجابيات وسلبيات أنظمة التبريد الامتصاصي	75
الجدول (V-1) : المواصفات الكهربائية للوحدة الكهروضوئية SunPower SPR-415E-WHT-D عند STC	80
الجدول (V-2) ::جدول أقصى التغيرات في الجهد للوحة الطاقة الشمسية	84
الجدول (V-3) : أقصى التغيرات في التيار للوحة الطاقة الشمسية	84
الجدول (V-4) : أقصى التغيرات في القدرة للوحة الطاقة الشمسية	85
الجدول (V-5) : أثر تغير الاشعاع على مؤشرات الأداء عند $T = 15C^{\circ}$	87
الجدول (V-6) : أثر تغير درجة الحرارة على مؤشرات الأداء عند $G=1000\ w/m^2$	88
جدول (V-7): مواد مقترحة للخلايا الكهرو شمسية بمعاملات حرارية مختلفة	90

قائمة الرموز و المختصرات

الرموز:

الرمز	المقدار الفيزيائي	الوحدة
COP	معامل الأداء الكلي	/
COP_{ref}	معامل الأداء الحراري لنظام التبريد بالامتزاز	/
COP_{Th}	معامل الأداء الحراري	/
E_{COP}	معامل كفاءة الطاقة	/
H	الأنتالبي الحراري النوعي	**kJ/kg**
$h_{fg,con}$	أنتالبي التكثيف	**kJ/kg**
$h_{fg,eva}$	أنتالبي التبخير	**kJ/kg**
k_{AC}	معامل التوصيل الحراري	**W/m.K**
M	الكتلة	**kg**
P_c	ضغط المكثف	**Pa**
P_e	ضغط المبخر	**Pa**
Q_A	استطاعة العنصر الماص	**kW**
Q_C	استطاعة المكثف	**kW**
Qa	كمية الحرارة المقدمة لتسخين الوسيط في جهاز الامتزاز	**kJ/h**
Q_H	كمية الحرارة الساخنة المطروحة من المكثف لنظام الامتصاص	**kJ/kg**
Q_L	كمية حرارة الباردة المكتسبة من المبخر لنظام الامتصاص	**kJ/kg**
Q_{Utile}	طاقة الكلية للوحدة	**MJ**
Qc	كمية الحرارة داخل المكثف	**kJ/h**
Qe	كمية الحرارة داخل المبخر (كمية البرد)	**kJ/h**
q_{12}	كمية الحرارة الممتصة خلال المرحلة (1−2) (كمية حرارة التسخين)	**kJ/h**
q_{23}	كمية الحرارة الممتصة المرحلة (2−3) (كمية حرارة توليد مع تكثيف)	**kJ/h**
T_a	درجة حرارة المادة المازة (درجة حرارة الجو)	**C°**

T_c	درجة حرارة المكثف	C°
T_d	درجة حرارة التجديد	C°
T_e	درجة حرارة المبخر	C°
T_{sa}	درجة حرارة اللاقط بعد مرحلة التبريد	C°
T_{ad}	درجة حرارة الامتصاص	C°
W_p	استطاعة المضخة	kW
x_{max}	التركيز الأعظمي للامتزاز	kg/kg
x_{min}	التركيز الأصغري للتوليد	kg/kg
Δx	الفرق بين التركيزين الأعظمي والأصغري	kg/kg

المختصرات

الاختصار	المعنى بالعربية	المعنى بالإنجليزية
S	الإشعاع المباشر	Direct radiation
D	الإشعاع المنتشر (المبعثر)	Diffuse radiationScatter
A	الإشعاع المنعكس (الألبيدو)	Reflected radiation albedo
G	الإشعاع الشمسي الكلي	Global solar radiation
PV	الألواح الكهروضوئية	Photovoltaic
PT	الألواح الحرارية الضوئية	Photothermic
DC	تيار مستمر	Direct Current
AC	تيار متناوب	Alternative Current
HPG	مولد الضغط العالي	High pressure generator
LPG	مولد الضغط المنخفض	Low pressure generator
PTC	المجمع الأسطواني القطع المكافئ	Parabolic Trough Collector
EAHT	المحول الحراري للامتصاص الطرد	heat transformer by absorption ejection
PCM	مواد متغيرة الطور	Phase-changing materials

الملاحق

الملحق	الرقم
الملحق1: مقارنة الموائع المتقدمة لتبريد خلايا نظام الـCPVT	95
الملحق 2: مقارنة المواد الملتصقة بالخلايا لتبريد نظام الـ CPVT	96
الملحق3: مقارنة الأملاح متغيرة الطور (PCMs) في عملية تبريد الألواح الشمسية	97
الملحق 4:مقارنة أنواع الأملاح الذائبة متغيرة الطور(Molten Salts PCMs)	98

مقدمة عامة

تتجلي قدرة الله وحكمته في خلق الشمس كأداة دالة على كمال سلطانه حيث جعلها مصدرا للضياء والدفء و الرحمة للأرض لقوله تعالى: ("وسخر لكم الشمس و القمر دائبين وسخر لكم الليل و النهار") [سورة إبراهيم : الآية 33] ، وتتحرك الشمس و الأرض في مدارات محسوبة بدقة متناهية ، إذ أن أي انحراف بسيط في مسار الأرض قد يؤدي الى كوارث بيئة ومناخية تهدد بقاء الحياة.

تعتبر الطاقة الشمسية المصدر الأساسي و الرئيسي الذي يمد كوكب الأرض بالطاقة، كما أن معظم مصادر الطاقة المتجددة المتوفرة ويعود أصلها الي الاشعاعات الشمسية ، فجميع أنواع الطاقة بما فيها البترول و الغاز و الفحم تكونت بسبب أشعة الشمس و ما تلى على ذلك من حرارة وضغط عبر الأحقاب الزمنية كما تعتبر الركيزة الأساسية في التحول العالمي نحو الطاقة المتجددة، ومع ذلك، تواجه الألواح الكهروضوئية التقليدية تحديات تتعلق بانخفاض الكفاءة والمساحات الكبيرة المطلوبة للتركيب. ومن هنا برزت أنظمة التركيز الشمسي الهجينة كحل مبتكر يهدف إلى دمج تقنيات تركيز الضوء مع الخلايا الكهروضوئية المتطورة.[1]

تعتمد هذه الأنظمة على استخدام عدسات أو مرايا لتركيز أشعة الشمس على مساحة صغيرة تحتوي على خلايا كهروضوئية عالية الكفاءة ، ولا يقتصر دور هذه الأنظمة على توليد الكهرباء فحسب، بل يتم استغلال الحرارة الناتجة عن التبريد في تطبيقات حرارية أخرى، مما يرفع الكفاءة الكلية للنظام.

إن جوهر نجاح هذه الأنظمة يعتمد بشكل جذري على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الكهروضوئية المستخدمة، ومدى قدرتها على تحمل الإشعاع المكثف ودرجات الحرارة المرتفعة دون فقدان خصائصها التحويلية[2].

وعليه فإن تحويل الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية أصبح في الوقت الحالي من المصادر الهامة في مناطق كثيرة من العالم ، في حين أن الدراسات والبحوث لازالت متواصلة في تحسين مردود الخلية وتقليل تكاليفها من خلال مختلف العوامل المؤثرة [3] ، ولهذا فإننا نلجأ الي طرح الإشكالية الموالية:

ماهي الخصائص الحرارية و الكهروضوئية لمختلف المواد من أجل خفض درجات الحرارة العالية وتحسين مردودية الخلايا الكهروضوئية؟

1-فرضيات البحث

1. يمكن تحسين أداء الخلايا الكهروضوئية عبر اختيار مواد ذات معامل حراري منخفض.
2. المواد ذات الموصلية الحرارية العالية تساعد على استقرار درجة الحرارة التشغيلية.
3. دمج أنظمة تبريد نشطة أو سلبية يساهم في رفع الكفاءة الكلية للخلايا تحت التركيز العالي.

2-المنهجية المعتمدة

سيتم اعتماد منهجية مزدوجة تجمع بين الدراسة النظرية والتحليل العددي ,تبدأ المرحلة الأولى بدراسة الخصائص الحرارية والكهروضوئية للمواد المذكورة، ثم الانتقال إلى المحاكاة العددية باستخدام برمجيات مثل Simulink أو MATLAB لدراسة تأثير الإشعاع المكثف على درجة حرارة الخلايا.

ونظرا لأهمية الدراسة تطرقنا الي تقسيم البحث الى دراسة نظرية تتضمن أربعة فصول ودراسة تطبيقية تضمنت ما يلي:

يتناول الفصل الأول الأسس العامة لأنظمة الطاقة الشمسية، مع التركيز على الخلايا الكهروضوئية من حيث مبدأ عملها، أنواعها، والعوامل المؤثرة على كفاءتها.

أما الفصل الثاني فيعالج أنظمة التركيز الشمسي والمركزات المستخدمة فيها، إضافة إلى مفهوم الموازنة الحرارية ودورها في تحليل انتقال الحرارة داخل الخلايا تحت تأثير الإشعاع الشمسي.

ويخصص الفصل الثالث لدراسة المواد ذات الموصلية الحرارية، من خلال عرض خصائصها الفيزيائية وأنواعها المختلفة، خاصة تلك المستخدمة في تحسين التبريد.

في حين يناقش الفصل الرابع تقنيات وأنظمة التبريد المعتمدة لرفع كفاءة الخلايا الكهروضوئية تحت ظروف التركيز العالي، مع إبراز تأثير درجة الحرارة على الأداء وفعالية الحلول المقترحة.

وأخيرا، يتناول الفصل الخامس الجانب التطبيقي من خلال استخدام برنامج Simulink و Matlab لمحاكاة تأثير الإشعاع الشمسي على درجة حرارة الخلايا، وتحليل النتائج بهدف تقييم أداء أنظمة التبريد المقترحة. وبذلك يشكل هذا التقسيم إطارا متكاملا يجمع بين الدراسة النظرية والتحليل العددي لتحقيق أهداف البحث.

[1] موسوعة الطاقة المستدامة (القدرة الشمسية)، احمد شفيق الخطيب–يوسف سليمان خير الله، مكتبة لبنان ناشرون– برقم 99531483 العام 2002م".

[2]Jacob, J. (2022). "Concentrated Photovoltaic Thermal (CPVT) systems". الشمسي التركيز لأنظمة الحرارية الإدارة تقنيات حول مراجعة. (ScienceDirect).

[3]Tang, L. (2024). "Thermal-Management Performance of Phase-Change Materials (PCM) for PV cooling". Energies. (MDPI).

الفصل الأول:
أنظمة الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

I-مقدمة

تعتبر الطاقة أحد أشكال الوجود وهي عبارة عن كمية فيزيائية تظهر على شكل حرارة أو حركة ميكانيكية ، او يمكن التبسيط والقول أنها قدرة الجملة الوظيفية على إعطاء قوة لإنجاز عمل معين.[1]

تنقسم الطاقة بحد ذاتها الى طاقة غير متجددة والتي تشمل الفحم والبترول والغاز الطبيعي [2] والنوع الثاني يمثل الطاقة المتجددة التي تستمد من الطبيعة وتعد الطاقة الشمسية اهم مصادر الطاقات المتجددة حيث تتميز بالوفرة و الاستدامة وتعتبر طاقة نظيفة تعتمد أساسا على تحويل الاشعاع الشمسي الى طاقة كهربائية او حرارية.

I-1-تعريف الأشعة الشمسية

يمكن تعريف الشمس بأنها كرة غازية ضخمة يبلغ قطرها 1.4 مليون كيلومتر، وتتكون كيميائيا من غاز الهيدروجين (70%) والهيليوم (27%)، بالإضافة إلى عناصر أخرى بنسب ضئيلة. وتتولد طاقتها الهائلة في باطنها نتيجة تفاعلات اندماجية نووية تحدث تحت ظروف من الكثافة والحرارة الشديدة التي تصل إلى 16 مليون كلفن، حيث تندمج نويات الهيدروجين لتكوين الهيليوم مخلفة طاقة تظهر على شكل ضوء وحرارة. [3]

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم المصادر المتجددة والنظيفة؛ إذ تفوق الطاقة التي تزودنا بها الشمس في ساعة واحدة إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة في سنة كاملة. وقد استخدمت قديما في تسخين المياه وتجفيف المحاصيل، بينما تركز الأبحاث الحالية على تحويلها إلى كهرباء وتطبيقات التدفئة والتكييف [4]

I-2-الاشعاع الشمسي و وظيفته

ينقسم الاشعاع الشمسي الى عدة أنواع ونذكر منها:

- ✓ **الأشعة المباشرة:** يعتبر الاشعاع الساقط من الشمس على شكل حزم ضوئية بدون أي انتشار.
- ✓ **الاشعة المنتشرة:** هو الاشعاع الساقط من الشمس ويتبعثر خلال مروره الغلاف الجوي وبعدها ينقسم الى جزئين الأول يعتبر المنتشر في السماء والثاني المنعكس في المحيط،

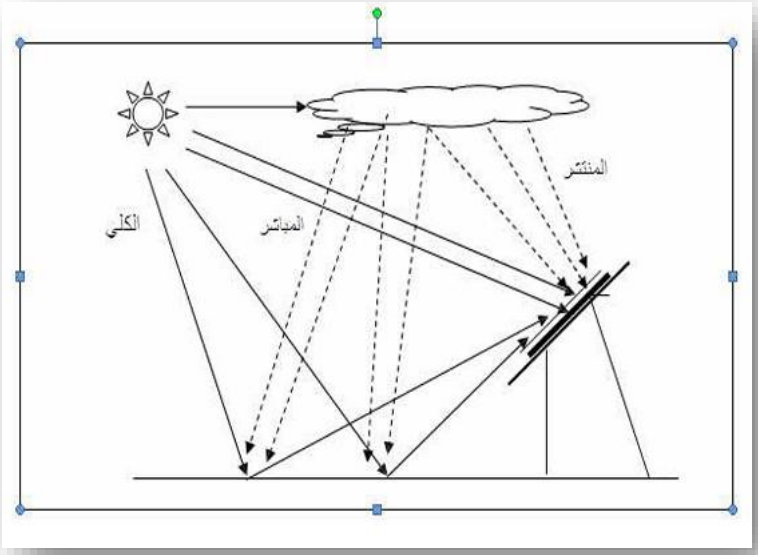
- ✓ **الاشعة الكلية :** هو مجموع الاشعاع الشمسي الذي يشمل المباشر و المنتشر.[5]

هذا الاشعاع الشمسي يتكون من أطباق ذو موجات كهرومغناطيسية تنقسم حسب أطوال الموجة إذ نميز ثلاث أنواع:

الاشعة فوق البنفسجية : تحتوي على موجات قصيرة حتى طول 0,4 ميكرون .

الاشعة المرئية : يتراوح طول موجتها 0,4 –0,75 ميكرون

الاشعة تحت الحمراء : حيث يزيد طول موجتها عن 0,75 ميكرون[6]



الشكل (1–1) : مكونات الاشعاع الشمسي الكلي [7]

I-3- إستخدامات الطاقة الشمسية

الطاقة الشمسية هي مصدر متجدِّد للطاقة يُستمد من أشعة الشمس، ويمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية أو حرارية باستخدام تقنيات متعددة.

- ✓ **الاستخدامات الحرارية:** تستغل الطاقة الشمسية حراريا بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية عبر المجمعات الشمسية والمواد الماصة للحرارة [8].

- ✓ **أنظمة التدفئة الشمسية: تُستخدم** لتدفئة المنازل والمباني من خلال تجميع الحرارة بواسطة المجمعات الشمسية الحرارية، مما يقلّل الحاجة إلى الوقود الأحفوري لتسخين المياه أو الهواء. وفي بعض التطبيقات، تُستخدم المجمعات الشمسية مباشرة لتسخين الهواء داخل المباني أو المساحات المفتوحة.
- ✓ **أنظمة الري الشمسية:** تُستعمل الطاقة الشمسية لتشغيل مضخات المياه المستخدمة في الري الزراعي، خاصة في المناطق النائية.
- ✓ **الإضاءة الشمسية:** تعتمد العديد من المدن والمناطق الريفية على أنظمة إضاءة الشوارع الشمسية، حيث تقوم الألواح الشمسية بتوليد الكهرباء وتخزينها لاستخدامها في الليل.
- ✓ **الاستخدامات الصناعية:** يمكن توظيف الطاقة الشمسية في تطبيقات صناعية متعددة، مثل تحلية مياه البحر، وإنتاج الهيدروجين الأخضر، وتجفيف المواد.
- ✓ **الاستخدامات الكهربائية والحرارية المزدوجة** : يتم فيها تحويل الطاقة الشمسية من خلال الآلية الكهروضوئية لإنتاج الكهرباء، أو الحرارية لإنتاج الحرارة، أو الجمع بينهما في نظام واحد [8].
- ✓ **أنظمة الطاقة الشمسية المركزة** : في هذه الأنظمة، يتم استخدام المرايا أو العدسات او المركزات لتركيز أشعة الشمس على نقطة معينة، وبالتالي بتم تسخين سائل حراري (مثل الزيت أو الماء) لتحويله إلى بخار يدير توربينًا لتوليد الكهرباء.
- ✓ **أنظمة الطاقة الشمسية المركزة**(CSP) : تعتمد على المرايا أو العدسات لتركيز أشعة الشمس على نقطة محددة، حيث تستخدم الحرارة الناتجة لتسخين سائل حراري (كالزيت أو الماء)، ثم تحويله إلى بخار يدير توربينًا لتوليد الكهرباء.
- ✓ **أنظمة الطاقة الشمسية المركزة الهجينة** : وهي الأنظمة التي تجمع بين إنتاج الحرارة والكهرباء في آن واحد، لتحقيق كفاءة أعلى في استغلال الطاقة الشمسية.

I-4-الخلايا الشمسية و الألواح الشمسية

الخلايا الشمسية والألواح الشمسية تعتبران الوحدات الأساسية المسؤولة عن تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام.

I-4-1- الخلايا الشمسية(Photovoltaic Cells)

تعتبر الخلية الشمسية الوحدة الجوهرية لتحويل الضوء إلى كهرباء عبر عملية تعرف بـ **التأثير**

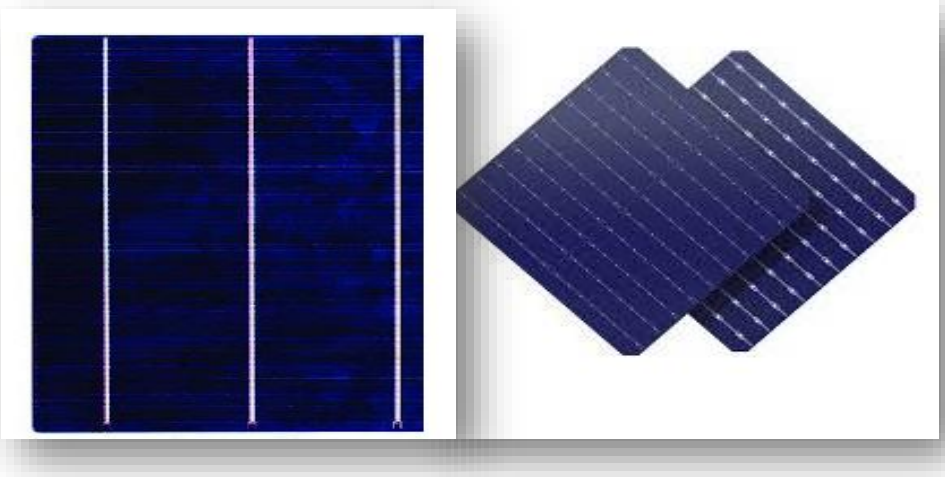
الكهروضوئي، حيث تمتص مادة شبه موصلة مثل السيلكون الضوء الساقط عليها، مما يؤدي إلى تحرير الإلكترونات وتوليد تيار كهربائي[9].

-أنواع الخلايا الشمسية

- **الخلايا الشمسية السيليكونية(Silicon Solar Cells)**

تنقسم إلى نوعين رئيسيين:

- **الخلايا أحادية البلورة (Monocrystalline)** : تعد الأكثر كفاءة بين الخلايا الشمسية، إذ تتراوح كفاءتها بين 20% و22%[9].
- **الخلايا متعددة البلورات(Polycrystalline)** : تصنع من السيليكون متعدد البلورات، وتكون أقل كفاءة من النوع الأول، إذ تتراوح كفاءتها بين 15% و18%.[9]



الشكل (I-2) : خلايا أحادية البلورة و متعددة البلورات [9]

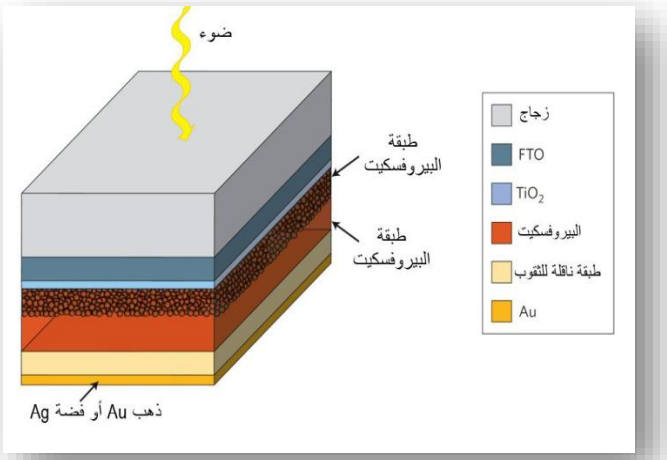
- **الخلايا ذات الفيلم الرقيق:(Thin-Film Solar Cells)**

مادتها الأولية من مواد شبه موصلة مثل كادميوم تلوريد (CdTe) أو السيليكون غير المتبلور (a-Si)، وتمتاز بخفة وزنها وسهولة تركيبها، لكنها أقل كفاءة نسبيا.

الشكل (I-3) : الخلايا ذات الفيلم الرقيق[9]

- **خلايا البيروفسكايت الشمسية(Perovskite Solar Cells)**

تعد من أحدث الابتكارات في مجال الطاقة الشمسية، وتمتاز بكفاءتها العالية وتكلفتها المنخفضة مقارنة بالخلايا السيليكونية. ورغم أنها لا تزال قيد البحث والتطوير، إلا أنها تُعدّ واعدة جدًا في تطبيقات الطاقة المتجددة المستقبلية.



الشكل (I-4) : خلايا البيروفسكايت الشمسية[9]

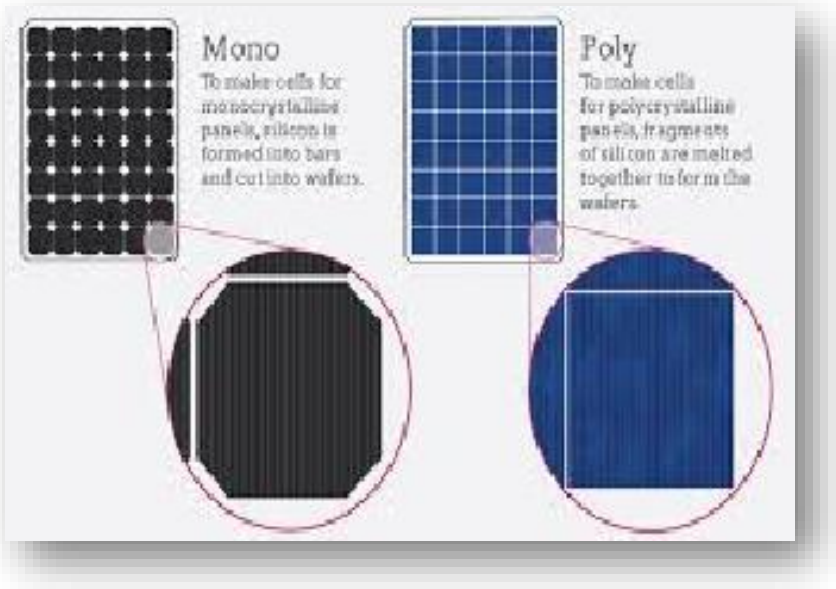
I-4-2 الألواح الشمسية (Solar Panels)

تتكون من مجموعات من الخلايا الشمسية الموصولة معًا لتشكيل وحدة متكاملة قادرة على توليد كميات أكبر من الطاقة الكهربائية.[10]

- **أنواع الألواح الشمسية**

- **الألواح الشمسية الأحادية البلورة (Monocrystalline Solar Panels)**

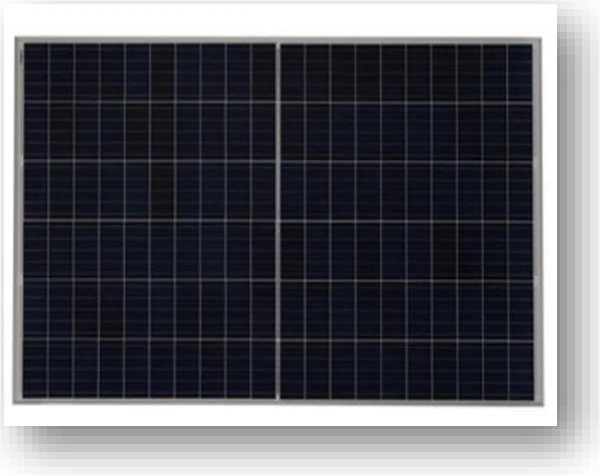
تتكوّن من خلايا مصنوعة من السيليكون أحادي البلورة، وتتميّز بكفاءتها العالية التي تتراوح بين 18% و22%، وبمظهرها الأسود المتجانس. تعتبر من أكثر الأنواع شيوعا في الأنظمة السكنية والتجارية [11].



الشكل (I-5) : الألواح الشمسية الأحادية البلورة[11]

- **الألواح الشمسية ذات نصف الخلية (Half-Cell Solar Panels)**

تصمم هذه الألواح بخلايا شمسية مقطّعة إلى نصفين، مما يقلل من الفاقد الكهربائي ويزيد من كفاءة إنتاج الطاقة، خصوصًا في الظروف ذات الظل الجزئي أو ارتفاع درجات الحرارة.



الشكل (I-6) : الألواح الشمسية ذات نصف الخلية[12]

- **الألواح الشمسية المدمجة في المباني (BIPV – Building Integrated Photovoltaics)**

تدمج هذه الألواح في هيكل المبنى نفسه، مثل الأسقف أو الواجهات الزجاجية، لتشكل جزءا من التصميم المعماري، وتعتبر حل فعال في المناطق الحضرية التي يصعب فيها تركيب الأنظمة التقليدية.

- **الألواح الشمسية متعددة الطبقات:(Multi-Junction Solar Panels)**

تعتمد هذه الألواح على تقنيات متقدّمة من خلال دمج طبقات متعددة من الخلايا الشمسية، كل طبقة منها تمتص جزءًا مختلفًا من طيف الضوء الشمسي، ما يزيد من كفاءتها التي قد تتجاوز 40% في بعض الأنظمة الحديثة والمتقدمة [13].

- **الخلايا الشمسية المتطورة**

الخلايا الشمسية المتطورة تمثل الجيل الجديد من تقنيات تحويل الطاقة الشمسية، إذ تهدف إلى رفع الكفاءة وتقليل التكلفة وتحسين الأداء في ظروف التشغيل المختلفة [13] .

- **الخلايا الشمسية النانوية (Nano Solar Cells)**

تستخدم في هذه الخلايا مواد نانوية لتعزيز كفاءة تحويل الضوء إلى كهرباء، حيث تسمح البنية النانوية بامتصاص أكبر لكمية الإشعاع وتحسين حركة الإلكترونات داخل الخلية[13].

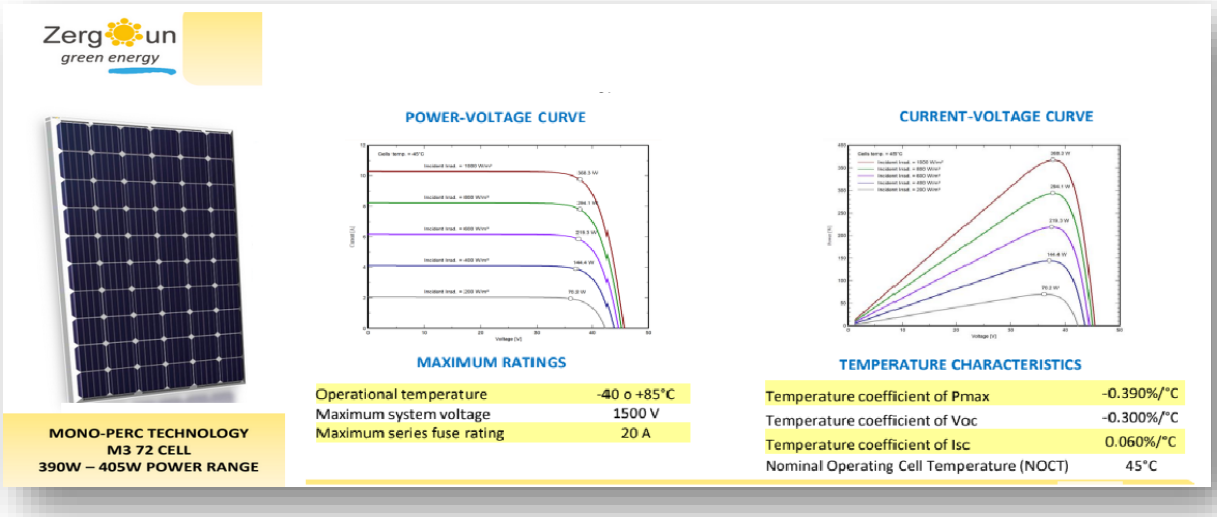
- **خلايا البيروفسكايت الشمسية:(Perovskite Solar Cells)**

تعد من أحدث الابتكارات في مجال الطاقة الشمسية، وتمتاز بقدرتها الكبيرة على امتصاص الضوء، إضافة إلى كفاءتها العالية مقارنة بالخلايا السيليكونية التقليدية. كما تمتاز بإمكانية تصنيعها بتكلفة منخفضة نسبيا، مما يجعلها خيارا واعدا لتقنيات المستقبل[14].

- **الخلايا الشمسية عالية الكفاءة** (High-Efficiency Solar Cells)

تشمل هذا النوع من الخلايا متعددة الطبقات القادرة على امتصاص نطاق أوسع من طيف الإشعاع الشمسي، ما يتيح تحقيق كفاءة أعلى بكثير من الخلايا التقليدية أحادية الطبقة[14],

- نموذج لخصائص صناعية للوح كهروشمسي مصنوع محليا



الشكل (I-7): اللوح الكهروضوئي المصنوع محليا في مؤسسة زرقون للطاقة الخضراء – الرويسات، (ورقلة – الجزائر)[14],

تنتج هذه الألواح في مؤسسة زرقون للطاقة الخضراء، حيث يركب في كل لوح 72 خلية شمسية لتوليد قدرة كهربائية تصل إلى 400 واط بجهد 48 فولط وتيار 10 أمبير.

تعمل هذه الألواح ضمن مدى حراري يتراوح بين °40− إلى °85 مئوية، ما يجعلها مناسبة للظروف المناخية القاسية في المناطق الصحراوي.

- **مميزات الطاقة الشمسية**

تتمتع الطاقة الشمسية بمجموعة من الخصائص والمزايا التي تجعلها خيارا مفضلا ومستداما مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، وتتلخص أبرز هذه المميزات وفقا لما يلي:

- تعد طاقة متجددة غير قابلة للنضوب ومتاحة مجانا، كما أنها لا تخضع لسيطرة النظم السياسية الدولية أو المحلية التي قد تعيق استخدامها.
- لا يتطلب تحويل واستغلال الطاقة الشمسية تكنولوجيات معقدة للغاية، كما أنها لا تشكل أي خطورة على العاملين في هذا المجال أو غيرهم.
- تمتاز بتوفرها في كافة الأماكن تقريبا، مما يقلل من الحاجة لوسائل النقل المعقدة.
- تساهم في الحد من تلوث البيئة الذي يهدد حياة الإنسان، كما أن منظوماتها تعمل بهدوء تام دون إحداث تلوث ضوضائي.
- تتلقى الأرض سنويا مقدارا ضخما من الإشعاعات الشمسية يصل إلى 750.10^{15} كيلو واط في الساعة.[15]
- **تعدد أشكال التحويل** :يمكن تحويل الطاقة الشمسية إلى عدة صور تشمل:
  - **طاقة حرارية** :وتعتبر من أبسط عمليات التحويل.
  - **طاقة كهربائية** :من خلال استخدام الخلايا الفوتوفولطية.
  - **تحويل كيمياوي** :كما يحدث في عملية التركيب الضوئي للنباتات.

I-5 تجميع الخلايا

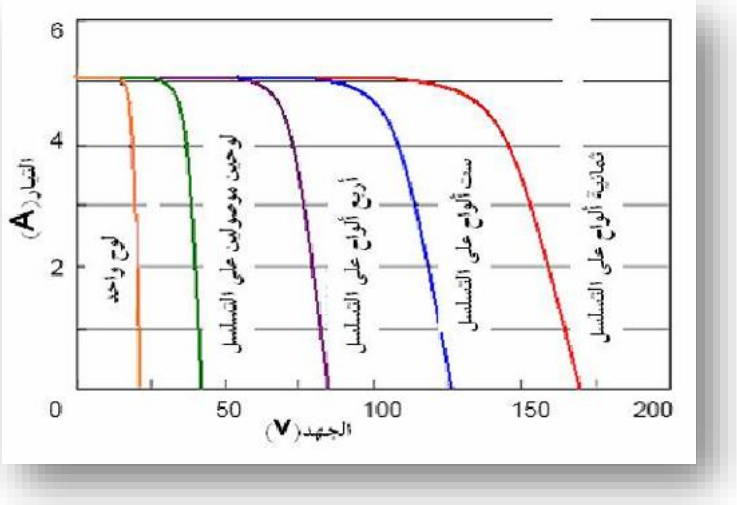
بحكم أن الجهد وتيار الخلية ضعيف جدا فيتم توصيل عدد كبير من الخلايا على التوالي وعلى التوازي للحصول على الجهد والتيار اللازمين، فعند توصيل الخلايا على التسلسل يكون الجهد الحاصل هو مجموع جهد هذه الخلايا ولكن التيار يكون تيار الخلية الواحدة، وعند توصيل الخلايا بالتوازي يكون الجهد مساوياً لجهد الخلية الواحدة والتيار مجموع تيارات الخلايا الموصلة على التفرع

I-5-1-تجميع الالواح على التسلسل (Modules in serie)

عند ربط مجموعة من الألواح الكهروضوئية المتماثلة عددها n على التسلسل فإن فرق جهد الدارة المفتوحة يساوي عدد الألواح مضروبا بفولت لوح واحد[16] [18]:

$V_{sg} = V = n \cdot V_{oc1} = n. V_{oc2} = n. V_{oc3} = n \cdot V_{ocn}$.. (I=0) .....(1)

$V_{sg} = \sum V_n = V1+V2+V3+... = V_n$ (I supérieur a 0) .....(2)



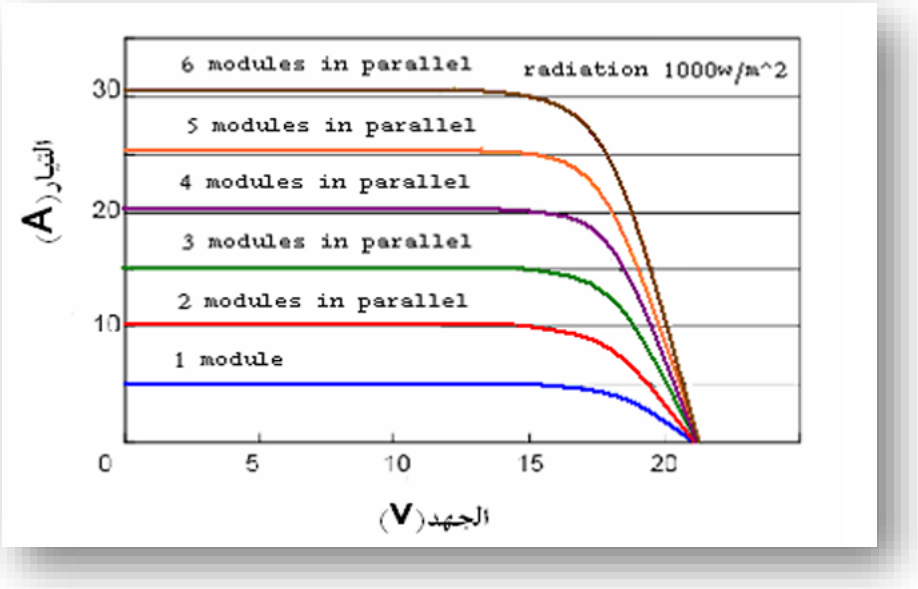
الشكل (I-8): الخاصية المثالية للألواح الكهرو شمسية المربوطة على التسلسل [16]

I-5-2- تجميع الالواح على التفرع

في حال ربط عدد (n) من الألواح الشمسية المتماثلة على التفرع فإن الفولط الناتج يساوي الفولط للوح واحد والتيار الناتج يساوي مجموع التيارات الخاصة لكل لوح(n ... 1) [17] [18]

$I_{sg} = \sum In = I_1 + I_2 + I_3 + ... + In$ .....(3)

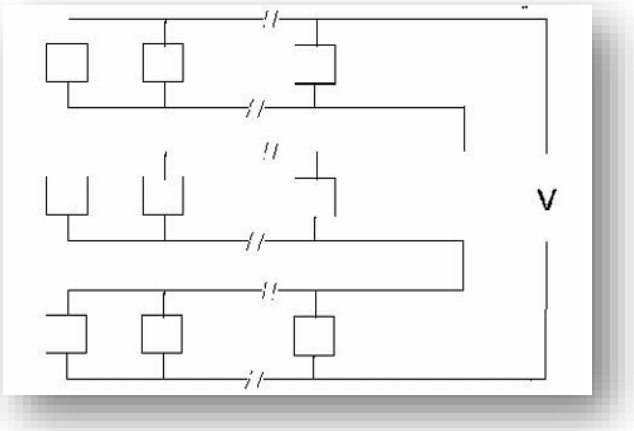
$V_{sg} = \sum V_n = V_1+V_2+V_3+... = V_n$ .....(4)



الشكل (I-9): الخاصية المثالية للألواح الكهرو شمسية المربوطة على التفرع[17]

I-5-2- تجميع الالواح على التسلسل و التفرع

وللحصول على قدرة أكبر يتم تجميع الخلايا على التفرع وعلى التسلسل في وقت واحد. فعند ربط الخلايا بهذه الطريقة نحصل ميزات الوصل التفرعي والوصل التسلسلي في نفس الوقت فبذلك نحصل على توتر مرتفع نسبيا وتيار كبير نسبيا وهذه الطريقة هي الأكثر استعمالا ويكون التوصيل كما في الشكل التالي :



الشكل (I-10): تجميع الخلايا على التسلسل وعلى التفرع [18]

I-6 مقومات تأهيل الطاقة الشمسية في الجزائر

تتمتع الجزائر بخصائص جغرافية وطبيعية تجعلها رائدة في مجال الطاقة المتجددة، ومن أبرز هذه المقومات:

- **المناخ الصحراوي** :تمتاز الصحراء الجزائرية بارتفاع درجات الحرارة التي قد تصل إلى 60 **درجة مئوية** خلال فصل الصيف.
- **المساحة الشاسعة:** بصفتها أكبر دولة إفريقية من حيث المساحة، توفر الجزائر فضاءات هائلة تسمح بتشييد أضخم المنشآت التقنية ومحطات الألواح الشمسية.
- **الطبيعة الجيولوجية** :تتوفر الرمال بكميات ضخمة، وهي المادة الأساسية التي تدخل في صناعة الخلايا الشمسية.[19]
- **التحديات التنموية** :وجود مناطق نائية ومشتتة يصعب ربطها بالشبكة الكهربائية الوطنية، مما يجعل الحلول الشمسية الخيار الأمثل لتزويد تلك المناطق بالطاقة[20].

I-7 إمكانيات الطاقة الشمسية

يمتلك بلد الجزائر واحدا من أعلى حقول التشميس في العالم، وتتوزع هذه القدرات وفقا للمناطق الجغرافية التي تتوزع كتالي:

الجدول (I .1): إمكانيات الطاقة الشمسية في مختلف ولايات الجزائر.

المنطقة	النسبة من المساحة الكلية	مدة التعرض للشمس (ساعة/سنة)	الطاقة الممكنة (كيلو واط ساعي/متر مربع)
الصحراء	%86	3500	2650
الهضاب العليا	%10	3000	1900
الساحل	%4	2650	1700

- **معدلات التشميس** : تتجاوز مدة التشميس في كامل التراب الوطني 2000 ساعة سنويا، وقد تصل في المناطق الصحراوية والهضاب العليا إلى 3900 ساعة. وعليه فيمكن اعتبارها انها ذو انتاج طاقوي معتبر بحيث تقدر الطاقة التي تستقبلها مساحة متر مربع واحد بنحو 5 كيلو واط ساعي يوميا في معظم مناطق البلاد وإنتاج هذا المردود الطاقوي يؤول الى استغلاله على شكل طاقة كهروضوئية وهي الأكثر استخداما في الجزائر حاليا، بينما تظل التقنيات الأخرى مثل الحرارية والديناميكية في مراحلها التجريبية.[21]

[1] د. مهندس كاميليا يوسف محمد –كتاب تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية.

[2] تكنولوجيا الطاقة البديلة تأليف د. سعود يوسف عياش – المجلس الوطني للثقافة والعلوم الكويت 1990 م"

[3] محمد رأفت إسماعيل رمضان علي جمعات الشكيل، " الطاقات المتجددة " ط1، بيروت، كلية العلوم، دار الشروق، 1986، ص 31.

[4] سعود يوسف عياش، " تكنولوجيا الطاقة البديلة "، المجلس الوطني للثقافة والعلوم، الكويت 1990.

[5] مذكرة دراسة وتنفيذ وتحسين أداء محطة ضخ مياه تعمل بالطاقة الشمسية – علي تاجي حمودي . جامعة تشرين كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم القوى الميكانيكية 2008 – 2009"

[6]الطاقة الشمسية واستخداماتها – محمد أحمد سيد خليل – دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع القاهرة.

[7] محمد مصطفى محمد الخياط، " الطاقة مصادرها – أنواعها – استخداماتها "، وزارة الكهرباء والطاقة، القاهرة – مصر، بريد الالكتروني: (ت 0020128090810)، 2006.

[8] Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd , United Kingdom,2011.

[9] مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الثامن والعشرون – العدد الثاني – 2012 ادريس – الرمحين – القادري نمذجة ومحاكاة لاقط كهروضوئي في بيئة الحزمة البرمجية"LABVIEW

[10] محمد أحمد السيد خليل ، الطاقة الشمسية واستخداماتها– –دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع القاهرة،2004

[11] فراح هاجر –مهوبي خولة – مركزات الشمسية وأنظمة تخزين الطاقة الحرارية مذكرة ماستر أكاديمي تخصص فيزياء طاقوية جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018.

[12] د كاميليا يوسف محمد ، الطاقة الكهرو شمسية ، الإسكندرية – جمهورية مصر العربية– أكتوبر

2016

[13] Tom Markvart, Concentrating Solar Power: A Review of the Technology, Elsevier- Woodhead Publishing, United Kingdom,2005

[14] James P. Dunlop, Photovoltaic Systems, American Technical Publishers, Inc. (ATP), Orland Park, Illinois, la troisième édition,2017

[15] عيادي عائشة، دراسة المركز الشمسي لضخ الإشعاع الشمسي لغرض التطبيقات الإلكترونية الضوئية تخصص كاشف وبصريات إلكترونية، جامعة قاصدي مرباح ورقلة,2023.

[16] عبد الباسط علي صالح كرمان، توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية "أنظمة الطاقة الفولتضوئية" مركز الدراسات العربية (2011)

[17] محمد فيصل سعيد، نحو استخدام أمثل للطاقة الشمسية في اليمن، مؤسسة قرار للإعلام والتنمية المستدامة (2014)

[18] بسام حمود نظم الطاقات المتجددة "التكنولوجيا – الحسابات" دمشق (2004)

[19] سليمان كعوان، جابة أحمد، " تجربة الجزائر في استغلال الطاقة الشمسية وطاقة الرياح "، (مجلة العلوم الاقتصادية والتسيير والعلوم التجارية، العدد 14، جامعة المسيلة، 2015".

[20] لباد، & رشدي. (2025). الأمن الطاقوي الجزائري بين توفر المقومات وتعقد التحديات والمتطلبات التنموية. مجلة الحقوق والعلوم السياسية, 12(2), 130-141.

[21] بوسيس، سليم. (2014). الآثار الاقتصادية للاستثمار في الطاقة البديلة: دراسة حالة الطاقة الشمسية في الجزائر.

الفصل الثاني:

المركبات الشمسية و الموازنة الحرارية

II-مقدمة

تعد المركزات الشمسية من التقنيات الاستراتيجية لاستغلال الإشعاع الشمسي المباشر وتجميعه في مساحة استقبال صغيرة لرفع كثافة الطاقة وتوليد درجات حرارة عالية. ويهدف تصميم هذه الأنظمة إلى تحسين الموازنة الحرارية عبر تقليل الضياعات المتمثلة في الحمل والإشعاع والتوصيل لضمان تحويل أكبر قدر من الطاقة الممتصة إلى طاقة مفيدة. وتبرز أهمية هذه التكنولوجيا في الجزائر التي تمتلك مساحات شاسعة ورمالا وفيرة إضافة الى اعلى حقول التشميس عالميا تدخل في صناعة الخلايا الشمسية. وهذا ما يجعل الموازنة الحرارية الدقيقة للمركزات ركيزة أساسية لرفع كفاءة الإنتاج الطاقوي وتطوير المنظومات المتجددة في الجزائر.

II-1المركزات الشمسية

المركزات الشمسية هي أنظمة متخصصة تُستخدم لتركيز الإشعاع الشمسي وتحويله إلى طاقة حرارية أو كهربائية، وذلك بفضل أسطحها العاكسة التي تقوم بتجميع الأشعة الشمسية وتوجيهها نحو نقطة أو خط بؤري محدد. تعتمد هذه الأنظمة على المرايا أو العدسات لتركيز أشعة الشمس على سائل حراري (مثل الماء أو الزيت)، حيث يتم تسخين هذا السائل بدرجات حرارة مرتفعة ثم تحويله إلى بخار لتشغيل توربينات توليد الكهرباء. تمكّن هذه التقنية من تركيز كمية كبيرة من ضوء الشمس على مساحة صغيرة، مما ينتج حرارة عالية تُستعمل في تطبيقات متعددة مثل توليد الكهرباء، وتسخين المياه، والتحلية، والتطبيقات الصناعية الحرارية، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع[1] .

II-3 أنواع المركزات

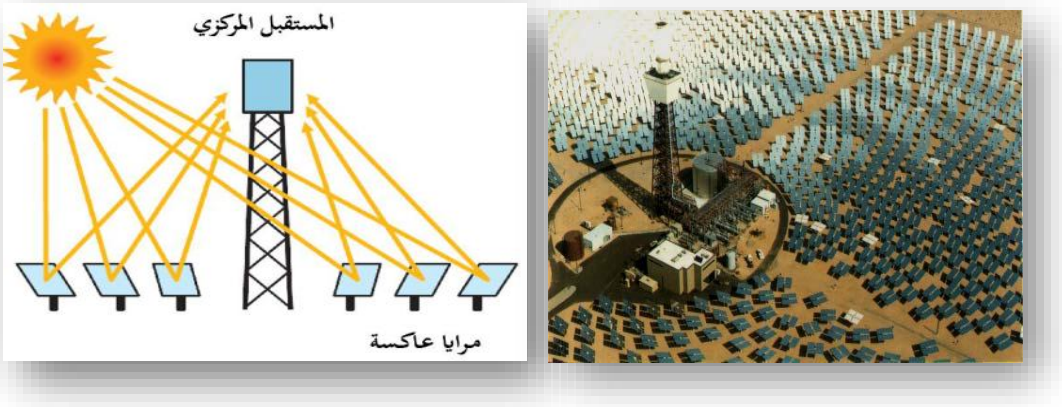
مركزات البؤرة النقطية

هي المركزات التي توجه فيها الأشعة الشمسية نحو بؤرة نقطية واحدة، حيث يثبت فيها المستقبل الذي يقوم بتحويل الطاقة الشمسية المركّزة إلى طاقة حرارية.

- **نظام برج الطاقة المركزي (CRS)**

يتكون هذا النظام من مرايا مستوية (Heliostats) موزعة على مساحة واسعة، تُوجَّه بشكل متزامن لتعكس الإشعاع الشمسي نحو مستقبِل مركزي يقع في قمة برج عالٍ.

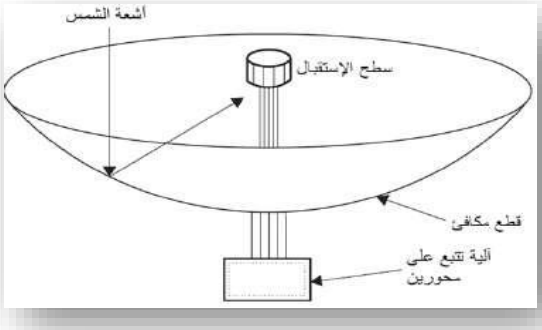
تزود هذه المرايا بنظام تتبّع شمسي مزدوج المحور لضمان توجيه مثالي لأشعة الشمس على مدار اليوم الطاقة الشمسية المركزة في المستقبل إلى حرارة تنتقل إلى مائع ناقل للحرارة ، يستخدم بدوره لتوليد بخار يُدير توربينًا لإنتاج الطاقة الكهربائية عبر دورة حرارية (تيرموديناميكية).



الشكل (II-1): يوضح نظام برج الطاقة المركزي [1،2]

- **نظام الصحن ذي القطع المكافئ (Dish Parabolic System DP)**

يتكون هذا النظام من سطح عاكس مقعّر على شكل **قطع مكافئ**، يركّز الأشعة الشمسية نحو **مستقبِل حراري** يقع في البؤرة النقطية. يعتمد النظام على تتبّع شمسي ثنائي المحور لضمان أقصى تركيز للطاقة، حيث تُحوَّل الأشعة الشمسية إلى حرارة مرتفعة داخل المستقبل، تُستخدم عادة لتسخين غاز يقوم بتشغيل توربين صغير أو محرك حراري. يمكن أن تصل درجة الحرارة في هذا النظام إلى نحو 1500 درجة مئوية، مما يجعله من أكثر تقنيات التركيز الشمسي كفاءة من حيث تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية [3].



الشكل (II–2): يوضح نظام الصحن ذي القطع المكافئ.[3]

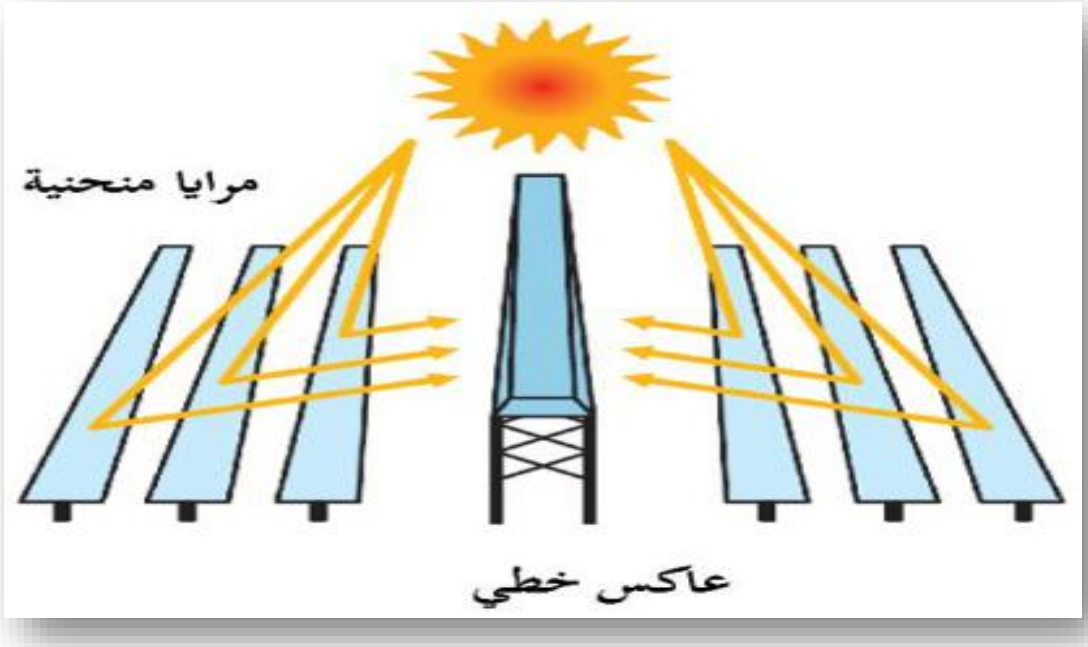
–مركزات البؤرة الخطية

هي المركزات التي تُوجَّه فيها الأشعة الشمسية نحو خط بؤري يمتد على طول النظام، حيث يُثبَّت أنبوب ماص يحتوي على مائع ناقل للحرارة يقوم بامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية. [4]

- **نظام مركزات فرينل (Linear Fresnel Reflectors)**

مركزات فرينل الخطية من التقنيات الحديثة في مجال الطاقة الشمسية المركزة، حيث تستخدم مرايا مستوية ضيقة تُرتَّب على شكل صفوف لتعكس ضوء الشمس نحو أنبوب استقبال ثابت موجود في بؤرة النظام.

تتيح هذه التقنية تركيز الإشعاع الشمسي على مساحة صغيرة، مما يرفع من كثافة الطاقة وبالتالي من كفاءة التحويل إلى طاقة حرارية أو كهربائية. كما تتميّز ببساطة التصميم وانخفاض التكلفة مقارنة بالأنظمة المقعرة التقليدية.



الشكل (II–3): مركزات أشعة فرينل [4]

- **المجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ (Parabolic Trough Collector – PTC)**

المجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ أحد أكثر أنظمة التركيز الشمسي انتشارًا، حيث يستخدم لتسخين السوائل بواسطة الإشعاع الشمسي المركّز .يتكون النظام من سطح عاكس على شكل قطع مكافئ أسطواني يقوم بتجميع الأشعة المنعكسة نحو أنبوب استقبال يمتد على طول المحور البؤري، يحتوي على مائع ناقل للحرارة، تصل درجة حرارة السائل داخل الأنبوب إلى نحو 400 درجة مئوية، مما يجعله مناسبًا لتوليد البخار وتشغيل التوربينات الحرارية [5] [6].

- **المركز الأسطواني ذي القطع المكافئ:(PTC – Parabolic Trough Collector)**

المركز القطع المكافئ الأسطواني (PTC) هو أحد أهم أنواع المجمعات الشمسية الحرارية، ويُستخدم لتسخين السوائل بواسطة الطاقة الشمسية المركّزة.

الشكل (II-4): المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ.[6]

-المكونات الأساسية لـ (PTC)

يتكون المجمع الأسطواني ذي القطع المكافئ (PTC) من عدة عناصر رئيسية:

- **السطح العاكس الأسطواني** :وهو هيكل على شكل قطع مكافئ يقوم بعكس الأشعة الشمسية وتركيزها على محور بؤري محدد.
- **العنصر الجامع للحرارة (HCE):** وهو أنبوب مُستقبل يُثبَّت على المحور البؤري للعاكس، يمرّ بداخله **المائع الناقل للحرارة.(HTF)**
- تنتقل الحرارة الممتصة من الأنبوب الماص إلى المائع، الذي يقوم بنقلها إلى منظومة التخزين الحراري أو إلى مولد الطاقة الحرارية.
- يتميز نظام (PTC) بأبعاد هندسية أساسية تشمل:

الطول	L
عرض الفتحة	w
البعد البؤري	F
الارتفاع	H

- **العاكس**

يتكون السطح العاكس من مرآة زجاجية أو صفائح من الفولاذ المقاوم للصدأ (Inox) أو الألمنيوم المصقول، على شكل قطع مكافئ أسطواني .يتميّز العاكس بمعامل انعكاس مرتفع يتجاوز 88%، ويُثبّت بدقة على هيكل الدعم لضمان التوجيه الأمثل للأشعة نحو البؤرة.

- **العنصر الجامع للحرارة(Heat Collector Element – HCE)**

الأنبوب الجامع للحرارة أحد أهم مكونات النظام، إذ يوضع على الخط البؤري للعاكس ويصنع عادة من النحاس أو الفولاذ المقاوم للصدأ. يغطى سطحه الخارجي بطبقة انتقائية لتحسين الامتصاصية الضوئية وتقليل الخسائر الحرارية الناتجة عن الإشعاع أو الحمل [1].

- **المائع الناقل للحرارة (Heat Transfer Fluid – HTF)**

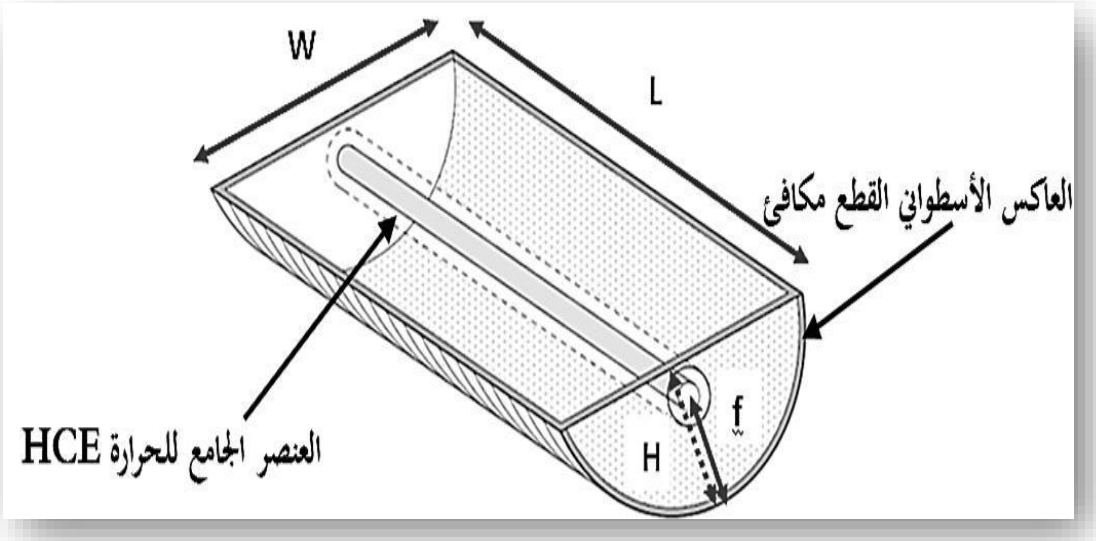
يعتبر المائع الناقل للحرارة مكونا أساسيا في أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية، حيث يقوم بنقل الطاقة من المجمع الشمسي إلى نظام إنتاج الكهرباء أو التخزين الحراري .تشمل الموائع الأكثر استخداما : الهواء، الماء، الأملاح المنصهرة، الزيوت الهيدروكربونية، وأخيرا الموائع النانوية الحديثة.

عند اختيار المائع، ينبغي مراعاة مجموعة من الخصائص الحرارية والفيزيائية، من أهمها:

- السعة الحرارية النوعية العالية،
- درجة غليان مرتفعة،
- نقطة تجمد منخفضة،
- معامل تمدد حراري مناسب،
- ولزوجة منخفضة لتقليل مقاومة الجريان.

II- 4هندسة المجمعات الشمسية الأسطوانية ذي القطع المكافئ (PTC)

تشمل هندسة المجمعات الشمسية الأسطوانية ذات القطع المكافئ (PTC) بدراسة الجوانب المختلفة لتصميمها وتحليل أدائها وتصنيع مكوناتها. وتشمل هذه الجوانب الشكل الهندسي للمجمع، المواد المستخدمة في تركيبه، وطريقة توجيهه للحصول على أعلى مردود ممكن [7]



الشكل (II-5): المخطط العام للمجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ لptc[7]

معادلة الشكل:

تعطى معادلة الشكل للقطع المكافئ بالمعادلة التالية:[1]

$$\mathbf{y = \frac{1}{4.f}} \quad \text{.....(5)}$$

حيث f : البعد البؤري

تحدد أبعاد المجمع (PTC) بالمعاملات التالية:

- الطول L
- عرض الفتحة w
- ارتفاع حافة العاكس h_c

و حافتي العاكس تتميز بالإحداثيات الديكارتية $\left(\mathbf{x}= \pm\frac{w}{2}, y = h_c\right)$

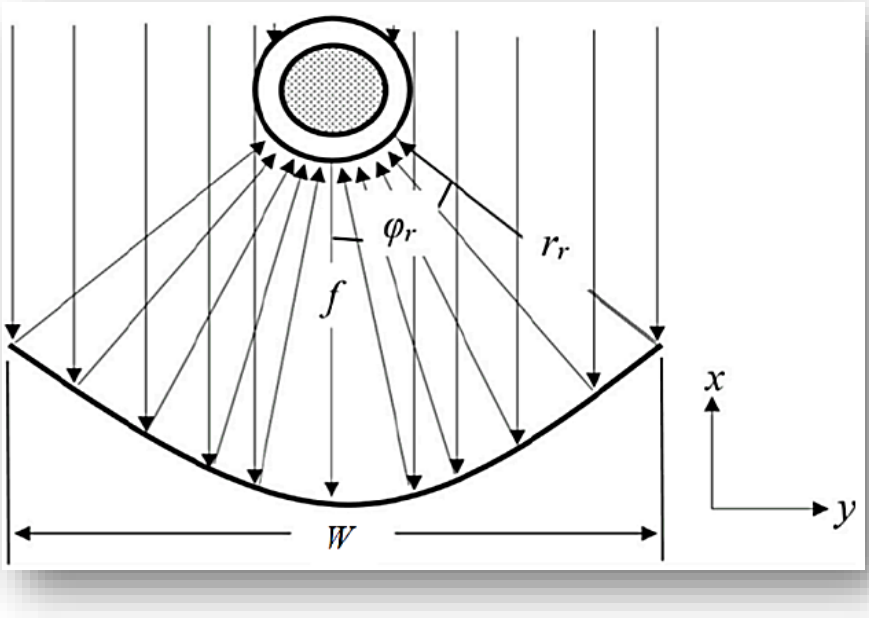
البعد البؤري f

عند تعويض إحداثيات الحافة في المعادلة الديكارتية، يمكن اشتقاق تعبير البعد البؤري **f** بدلالة أبعاد المجمع [7]

يُكتب البعد البؤري بطريقتين رياضيتين مختلفتين

$$f = \frac{w^2}{16h_c} \quad \text{..... (6)}$$

$$f = \frac{w}{4.\tan\left(\frac{\emptyset r}{2}\right)} \quad \text{.....(7)}$$



الشكل (II–6): يوضّح زاوية الحافة وزاوية القبول للمجمع الشمسي [8]

حيث $\emptyset_r$: زاوية الحافة الزاوية المحصورة بين محور التناظر (Oy) والخط الواصل بين البؤرة وحافة العاكس، وتُحسب بالعلاقة التالية: [9]

$$\emptyset_r = \sin^{-1}\left(\frac{w}{2.r_r}\right) \quad \text{.....(8)}$$

نصف قطر العاكس (r) عند أي نقطة فيُحسب وفق العلاقة:

$$r = \frac{2f}{1+\cos\emptyset_r} \quad \text{.....(9)}$$

تتحصل على نصف قطر الحافة عندما $\emptyset = \emptyset_r$.

$$r_r = \frac{2f}{1+\cos\emptyset_r} \quad \text{.....(10)}$$

- **مساحة الفتحة A_{ap}**

مساحة الفتحة تعرف بأنها المساحة التي تستقبل الإشعاع الشمسي المباشر، وهي تتعلق بطول المجمع وعرض الفتحة، وتُحسب بالعلاقة **[10]:**

$$A_{ap} = W.L \quad \text{.....(11)}$$

تحسب المساحة الخارجية للأنبوب الماص بالعلاقة:

$$A_{ro} = \pi.D_{ro}.L \quad \text{.....(12)}$$

- **التركيز الهندسي (Geometric Concentration)**

التركيز الهندسي هو النسبة بين شدة الإشعاع الشمسي المركّز على الخط البؤري وشدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على فتحة المجمع **[1]**.

$$CR = \frac{A_{ac}}{A_{ro}} \quad \text{.....(13)}$$

II- 5المردود الضوئي η_{op} (Optical Efficiency)

يعتمد المردود الضوئي للمجمع الشمسي على مجموعة من العوامل البصرية والهندسية التي تحدد قدرة النظام على استقبال وتركيز الإشعاع الشمسي بكفاءة.

من أهم هذه العوامل:

- **معامل الاعتراض(Intercept Factor)** ، الذي يعبّر عن نسبة الأشعة المنعكسة من السطح العاكس والتي تصل فعليًا إلى الأنبوب الماص.
- **معامل التراجع الهندسي(Geometrical Factor)** ، المتعلق بتصميم المجمع وشكل العاكس.
- **زاوية الورود(Angle of Incidence)** ، التي تؤثر على كمية الإشعاع الساقط على السطح.

كما يعتمد المردود الضوئي على الخواص البصرية لمكونات النظام، مثل:

- **انعكاسية سطح العاكس** (Reflectivity)
- **نفاذية الغلاف الزجاجي** (Transmissivity)
- **امتصاصية الأنبوب الماص** (Absorptivity)

ويعبر عن المردود الضوئي بالعلاقة التالية [1]

$$\eta_{op} = \rho^{\circ}.\tau_c.\tau_e.a_r.\gamma\left[1 - A_f.\tan\theta\right]\cos\theta \quad \text{.....(14)}$$

II-6 النمذجة الحرارية (Thermal Modeling)

تهدف النمذجة الحرارية إلى تحليل الأداء الحراري للمجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ **(PTC)** من خلال دراسة انتقال الحرارة بين مكوناته الأساسية والمائع الناقل للحرارة**(HTF)** ، لتقدير كمية الطاقة الحرارية المستفاد منها.

- **الحرارة المفيدة Q_u (Useful Heat)**

الحرارة المفيدة هي التي يكتسبها المجمعPTC من خلال الفرق بين درجات حرارة المائع عند المخرج والمدخلHTF، أي كمية الحرارة المنتقلة إلى المائع أثناء مروره داخل الأنبوب الماص**[1]**

$$Q_u = m_f . C_p . (T_{out} - T_{int}) \quad \text{.....(15)}$$

II-7 الإشعاع الشمسي المعترض(Incident Solar Radiation)

هي كمية الإشعاع الشمسي المباشر التي تسقط على فتحة المجمع الشمسي (PTC) خلال فترة التشغيل، وتُحسب بالعلاقة التالية [1]:

$$Q_s = A_{ac} . G_B \quad \text{.....(16)}$$

II- 8 الكفاءة الحرارية η (Thermal Efficiency)

تعرف الكفاءة الحرارية بأنها النسبة بين الحرارة المفيدة المكتسبة من المجمع الشمسي والإشعاع الشمسي المباشر الساقط على فتحة المجمع، ويعبَّر عنها بالعلاقة **[1]**

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s . \eta_{op}} \quad \text{.....(17)}$$

- **معادلات الموازنة الحرارية (Thermal Balance Equations)**

تحدث تبادلات حرارية مستمرة بين الهواء الجوي ومكونات المجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ(PTC) ، وتشمل هذه المكونات : الغطاء الزجاجي ، الأنبوب الماص، والمائع الناقل للحرارة.(HTF)

تعتمد دراسة هذه التبادلات على القانون الأول للديناميكا الحرارية، حيث تُكتب معادلات الموازنة الحرارية لكل سطح من مكونات النظام ضمن مقطع عرضي [11] [7]

$$\emptyset_{\mathrm{st}} = \emptyset_{\mathrm{e}} - \emptyset_{\mathrm{s}} + \emptyset_{g} \quad \text{.....(18)}$$

حيث:

$\emptyset_{\mathbf{st}}$: التدفق الحراري المخزن

$\emptyset_{\mathrm{s}}$: التدفق الحراري الخارجي

$\emptyset_{\mathrm{e}}$: التدفق الحراري الداخلي

$\emptyset_{g}$: التدفق الحراري المتوالد

- **معادلة موازنة الطاقة للأنبوب الماص**

تنتقل الحرارة من الأنبوب الماص إلى المائع بالحمل القسري، ومن الغلاف الزجاجي إلى الأنبوب بالإشعاع والحمل الحراري. وتُعبَّر معادلة الموازنة الحرارية للأنبوب كما يلي:[7] [12]

$$\rho_r . A_r . Cp_r . \frac{dT_r}{dt} = I . C_g . \tau_e . \rho^{\circ} . \tau_e . a_r . \pi . D_{ext}$$
$$+\left(h_{conv(r\to f)} + h_{conv(r\to e)}\right)(T_e - T_r)\pi . Dr_{ext}$$
$$+h_{conv(r\to f)}\left(T_f - T_r\right)\pi . Dr_{int} \quad \text{.....(19)}$$

A_r : مساحة مقطع جدار الأنبوب الماص

$$A_r = \frac{\pi}{4}\left(Dr_{ext}^{2} - Dr_{int}^{2}\right) \quad \text{.....(20)}$$

معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الأنبوب الماص والظرف الزجاجي يُعطى بـ:

$$h_{rad(e\to r)} = \frac{\sigma(T_r+T_e)\left(T_r^{2}+T_e^{2}\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_e}\left(\frac{Dr_{ext}}{De_{int}}\right)} \quad \text{.....(21)}$$

- **معادلة موازنة الطاقة للمائع**

يتم تبادل الحرارة بين المائع والأنبوب الماص بواسطة الحمل القسري، ويعتمد نوع التبادل على طبيعة السريان (رقائقي أو مضطرب. تُخزَّن الحرارة في المائع على شكل حرارة محسوسة (Sensible Heat) مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته، وتُكتب معادلة الموازنة الحرارية كما يلي [7]

$$\rho_f . A_f . Cp_f \frac{dT_f}{dt} = h_{conv(r\to f)}(T_r - T_f)\pi . Dr_{int} \quad \text{.....(22)}$$

A_f : مساحة مقطع الأنبوب الماص

$$A_f = \frac{\pi}{4} Dr_{int}^{2} \quad \text{.....(23)}$$

معامل انتقال الحرارة بين الأنبوب الماص والمائع HTF

$$h_{\mathrm{conv(r\to f)}} = \frac{\mathrm{Nu_{rf}\lambda f}}{\mathrm{Dr_i}} \quad \text{.....(23)}$$

مساحة التبادل الحراري بينهما :

$$Ar_{int} = \pi . Dr_{int} . L \quad \text{.....(24)}$$

- في حالة **السريان الرقائقي** :(Laminar Flow) يستخدم عدد رينولدز (Re) لتحديد طبيعة الجريان.

$$Re_{\mathrm{D}} \leq 2300$$
$$Nu_{\mathrm{f}} = 4.36$$

- أما في حالة **السريان المضطرب** (Turbulent Flow) أو الانتقالي، فيُحسب معامل انتقال الحرارة:

بـــ $\mathrm{Re_D} \geq 2300$ و 5.10^6 و $2000 \geq P_{\mathrm{r}} \geq 0.5$ وفق العلاقة :

$$\mathrm{Nu_f} = \frac{\left(\frac{c_f}{2}\right)(R_{eD}-1000)P_r}{1+12.7\left(\frac{\mathrm{c_f}}{\acute{\mathrm{e}}}\right)^{1/2}\left(\mathrm{P_r^{2/3}}-1\right)}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)0.11 \quad \text{.....(25)}$$

تعطى عبارة رينولدز عند قطر الأنبوب الماص:

$$\mathrm{Re_D} = \frac{V_f . \rho_{\mathrm{f}} . \mathrm{Dr_i}}{\mu_{\mathrm{f}}} \quad \text{.....(26)}$$

يمكن حساب الخواص الحرارية عند متوسط درجة الحرارة بين الأنبوب الماص والمائع.

معامل الاحتكاك c_{f} في حالة أنابيب ملساء:

$$C_{\mathrm{f}} = (1.58 \ln Re_D - 3.28)^{-2} \quad \text{.....(27)}$$

- **معادلة موازنة الظرف الزجاجي**

يستقبل الغلاف الزجاجي الإشعاع الشمسي المنعكس بعد مروره عبر الغطاء الزجاجي المسطح، كما يتبادل الحرارة بالحمل والإشعاع مع الأنبوب الماص من جهة، ومع الغلاف الخارجي من جهة أخرى. تُكتب معادلة الموازنة الحرارية للغلاف الزجاجي كما يلي: [13] [1]

$$\rho_e . A_e . Cp_e \frac{dT_e}{dt} = I . c_g a_e \rho^{\circ} \pi . De_{ext} + \left(h_{rad(e\to r)}\right)(T_r - T_e)\pi . De_{int} + h_{conv(e\to amb)}(T_{amb} - T_e)\pi . De_{ext} + h_{rad(e\to c)}(T_c - T_e)\pi . De_{ext} \quad \text{.....(28)}$$

تحسب كل من:

مساحة مقطع جدار الظرف الزجاجي.

$$\mathrm{A_e} = \frac{\pi}{4}\left(De_{ext}^{2} - \mathrm{De_{int}^{2}}\right) \quad \text{.....(29)}$$

درجة حرارة السماء بالعلاقة :

$$\mathrm{T_c} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad \text{.....(30)}$$

درجة حرارة الجو المحيط بالعلاقة :

$$\mathrm{T_a} = \left[\frac{T_{aMax} - T_{aMin}}{2}\right]\sin\left[\frac{(t-8)\pi}{12}\right] + \left[\frac{T_{aMax} + T_{aMin}}{2}\right] \quad \text{.....(40)}$$

T_{aMax} : درجة حرارة الجو المحيط القصوى

$\mathrm{T_{aMin}}$: درجة حرارة الجو المحيط الدنيا

t : التوقيت المحلي معبر عنه بالساعات ، نعتبر درجة حرارة الهيكل المعدني هي درجة حرارة الجو المحيط. [7]

[1]عاشوري إنتصار ، دراسة فعالية التخزين الحراري للطاقة الشمسية المجموعة بواسطة المركز الشمسي الأسطواني القطع مكافئ (PTC) في منطقة ورقلة، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2023.

[2] Jessica Leo, Modélisation et conduite optimale d'un cycle combiné hybride avec
Source solaire et stockage. Automatique – Robotique, Université Grenoble Alpes,2015.

[3] H. P. Garg و J. Prakash , Solar Energy: Fundamentals and Applications, Tata McGraw-Hill,INDIA,2000

[4]عيادي عائشة، دراسة المركز الشمسي لضخ الإشعاع الشمسي لغرض التطبيقات الإلكترونية الضوئية تخصص كاشف وبصريات إلكترونية ،جامعة قاصدي مرباح ورقلة,2023

[5] بن عبد الله نجاح – طقيع سامية،المساهمة في تعميم المركزات الشمسية الكهروضوئية الحوضية عبر كامل الولايات الجزائرية ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة
2019.

[6]Godfrey Boyle , Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, Oxford University Press,UK,2004

[7] سوداني محمد البار، تحقيق عملي لمركز شمسي أسطواني مكافئ ذي غطاء زجاجي، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018

[8] A. M. El Feky, M. M. El-Sisi, H. E. S. Helal, & al ,Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough sola, Journal):Applied Energy,2018.

[9] رحماني حنان – تايه فاطمة الزهراء ،المحاكاة العددية لمركز قطع مكافئ اسطواني قائم على الموائع النانوية ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2020.

[10] سهيلة بن زاهي – سهيلة بلخير ، دراسة مقارنة أنظمة التتبع الشمسي لمركز قطع مكافئ أسطواني ،.جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2016

[11] Eric K. D. Clark, Solar Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business, New Society Publishers,USA ,2006.

[12] Tom Markvart , Solar Energy: The Power with the Future, Elsevier- Wood head Publishing, United Kingdom,2005

[13] Godfrey Boyle, Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, United Kingdom ,2018

الفصل الثالث:

المواد ذات الموصلية الحوارية

III-مقدمة

تواصل الاهتمام بدراسة المواد الموصلة للحرارة منذ أوائل القرن التاسع عشر ، حيث أصبح لها دور مهم وكبير في التطبيقات التكنولوجية الحديثة، وتم تحديد العديد من الخواص الفيزيائية و الالكترونية لتحديد استخداماتها في التطبيقات العلمية المختلفة بحكم أنها تطورت في العديد من المجالات ذات الأهمية التكنولوجية والتقنية ويتضمن هذا الفصل دراسة شاملة عن الموصلات المسؤولة عن امتصاص الاشعة الشمسية.

III-1-مفهوم الموصلية الحرارية

يتم تعريف الموصلية الحرارية على أنها قدرة المادة على نقل وتوصيل الطاقة الحرارية من نقطة لأخرى داخل المادة. ويحدث ذلك نتيجة لتغيرات في الطاقة داخلها بسبب تحرك الإلكترونات بعد اكتسابها طاقة حرارية في مستويات الطاقة المختلفة.

وتنتقل الحرارة فيها داخل المادة الواحدة من منطقة ذات حرارة عالية وطاقة عالية للجزيئات إلى منطقة ذات حرارة منخفضة وطاقة منخفضة للجزيئات، وهي إحدى الطرق المعروفة لانتقال الحرارة بالحمل.[1]

III-2-الموصلات(Conductors)

تتميز الموصلات بتداخل حزمتي التكافؤ والتوصيل وانعدام فجوة الطاقة بينهما، مما يسمح للإلكترونات بالتحرك بحرية. ومع أن الإلكترونات تكون مقيدة عند الصفر المطلق وتظل حزمة التوصيل فارغة، إلا أن أي ارتفاع بسيط في درجة الحرارة يمنح الإلكترونات طاقة حرارية تمكنها من الإفلات والانتقال إلى حزمة التوصيل، لتتحرك بشكل عشوائي وتساهم في عملية التوصيل الكهربائي [1].

III-3-العوازل(Insulators)

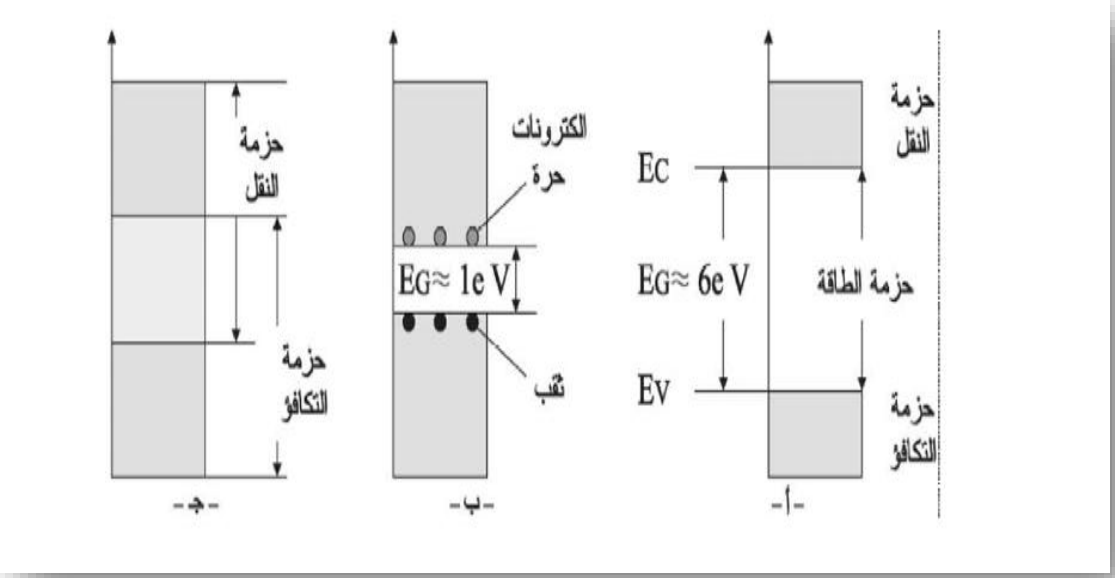
تتسم المواد العازلة بوجود فجوة طاقة واسعة جداً تصل إلى حوالي 6 eV تفصل بين حزمتي التكافؤ والتوصيل. ونظرا لضخامة هذه الفجوة، تعجز الإلكترونات في درجات الحرارة العادية عن اكتساب طاقة كافية للعبور؛ مما يترك حزمة التوصيل فارغة تماماً وحزمة التكافؤ مشغولة بشحنات مقيدة بقوى ذرية وجزيئية، وهذا ما يفسر انعدام قدرتها على نقل التيار الكهربائي [1].

III_4-أشباه الموصلات(Semiconductors)

تتكون هذه المواد من عناصر رباعية التكافؤ، كالسيليكون والجرمانيوم، ترتبط ذراتها ببعضها عبر روابط تساهمية متينة. وفي حين تسلك سلوك العوازل التامة عند درجة الصفر المطلق لامتلاء حزمة التكافؤ وخلو حزمة التوصيل من الإلكترونات الحرة، إلا أن فجوة طاقتها الضيقة (التي لا تتجاوز 3eV) تسمح لها بالتحول إلى موصلات عند اكتساب طاقة حرارية أو ضوئية كافية؛ حيث تتحطم الروابط التساهمية محررةً إلكترونات ونشوء "فجوات" موجبة تساهم في نقل التيار، وتتراوح مقاومتها النوعية بين $\Omega=10^{-2}$ و $\Omega=10^{5}$ ، [2] [3]

توجد أشباه الموصلات في حالات المادة الثلاث (الصلبة، السائلة، والغازية)، وتتخذ في بنيتها الصلبة أشكالا بلورية أو غير بلورية. وتنقسم تقنيا إلى نوعين رئيسيين:

1. أنصاف نواقل ذاتية (Intrinsic).
2. أنصاف نواقل غير ذاتية (Extrinsic).[4]



الشكل (III-1): مخطط الطاقة للعناصر الكهربائية ،أ– العوازل ، ب –النواقل ، ج – أنصاف النواقل[4]

III-4-1-المواد شبه الموصلة النقية

تعرف أشباه الموصلات النقية (الذاتية) بأنها مواد تسلك سلوك العوازل التامة عند درجة الصفر المطلق، بينما تكتسب قدرة تدريجية على التوصيل الكهربائي مع ارتفاع درجات الحرارة، أو عند إضافة شوائب، أو إحداث عيوب في تركيبها البلوري.

واستنادا إلى نظرية الحزم، تمتلك هذه المواد حزمتين رئيسيتين للطاقة:

1. **حزمة التكافؤ :(Valence band)** وتكون مشغولة بالكامل بالإلكترونات عند الصفر المطلق.
2. **حزمة التوصيل :(Conduction band)** وتكون خالية تماما من الإلكترونات في تلك الدرجة.

عند رفع درجة حرارة المادة فوق الصفر المطلق، يكتسب عدد من الإلكترونات طاقة كافية تعادل أو تتجاوز فجوة الطاقة، مما يسمح لها بالانتقال من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. ينتج عن هذا الانتقال ترك "فجوات (Holes) "في حزمة التكافؤ، وتتميز أشباه الموصلات النقية بوجود أعداد متساوية تماماً من حاملات الشحنة السالبة وحاملات الشحنة الموجبة [5].

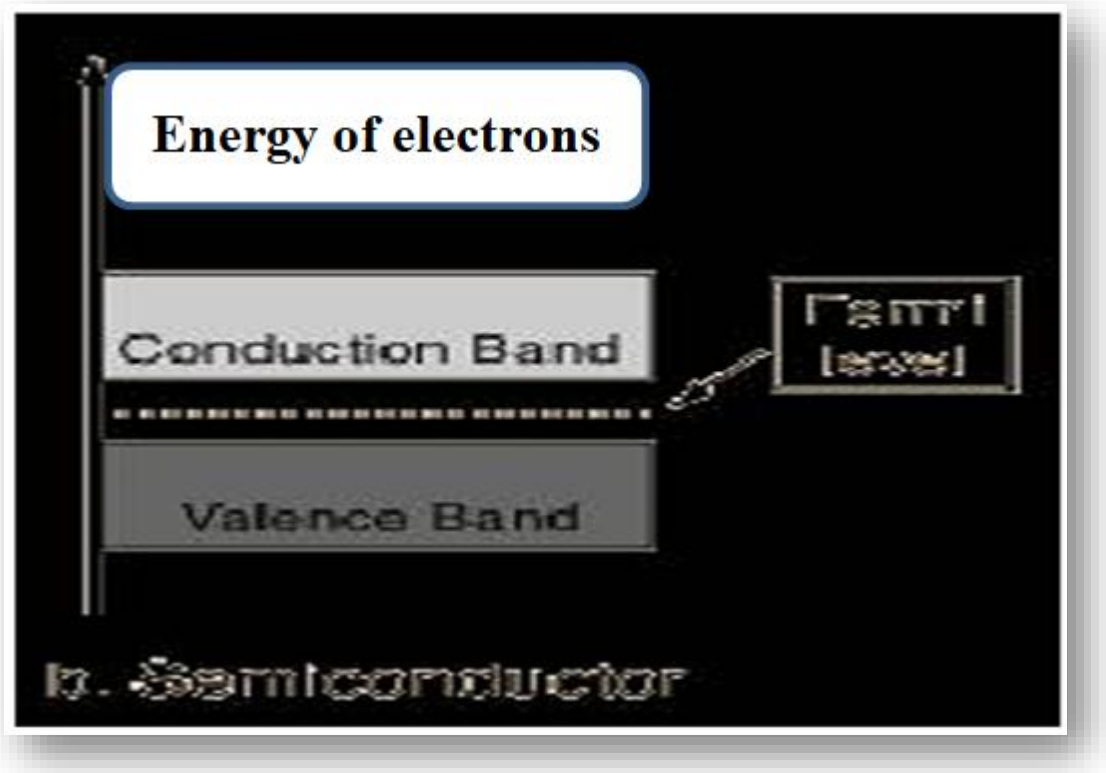
- **مستوى فيرمي في شبه الموصل النقي**

يمثل مستوى فيرمي (E_f) المستوى الطاقي الذي تكون فيه احتمالية وجود الإلكترونات مساوية للنصف (50%) عند درجات الحرارة التي تعلو الصفر المطلق. وفي حالة أشباه الموصلات النقية، يتمركز هذا المستوى في منتصف فجوة الطاقة تقريباً، ويُعبر عنه رياضياً بالعلاقة التالية [6]:

$$E_f = \frac{E_C + E_V}{2} + K_B\, TL_n\left(\frac{m_h}{m_e}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (41)$$

حيث:

- **Ec**: مستوى الطاقة عند حافة حزمة التوصيل.
- **Ev** : مستوى الطاقة عند حافة حزمة التكافؤ.
- **kB** : ثابت بولتزمان.
- **T** : درجة الحرارة المطلقة.
- **mh, me**: الكتلة الفعالة لكل من الفجوات والإلكترونات على التوالي.



الشكل(III-2): مستوى فيرمي لشبه الموصل النقي [6].

III-2-4- المواد شبه الموصلة غير النقية (Extrinsic Semiconductors)

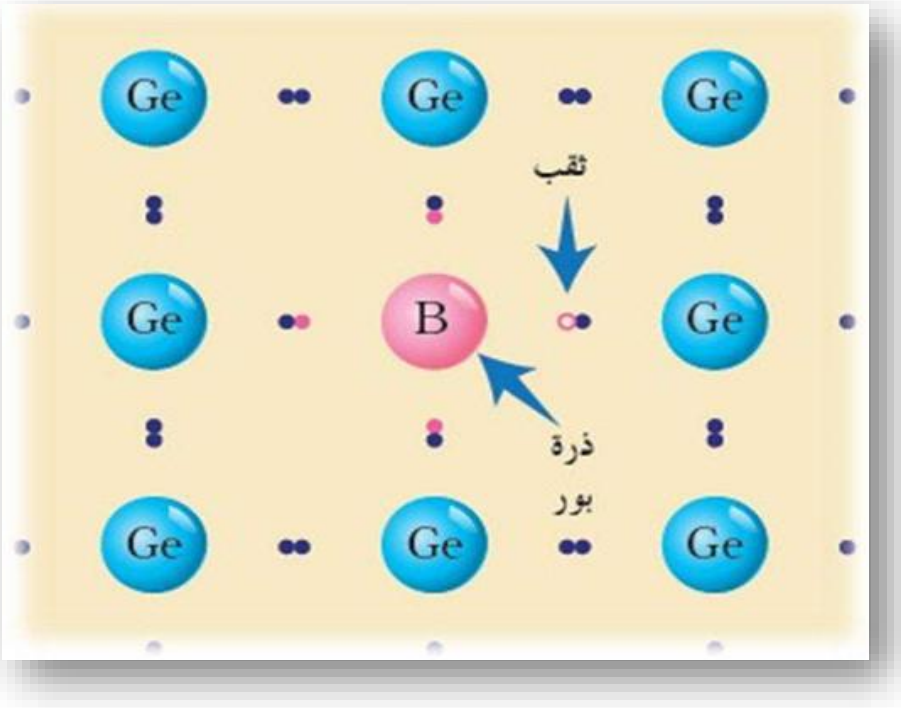
تعرف أشباه الموصلات غير النقية بأنها مواد يتم الحصول عليها عبر إضافة كميات دقيقة ومدروسة من ذرات عناصر أخرى إلى أشباه الموصلات النقية، وهي عملية تسمى بـ "التطعيم " (Doping)؛ وذلك بهدف زيادة ناقليتها الكهربائية والتحكم في خصائصها.

وتنقسم هذه المواد إلى نوعين رئيسيين حسب نوع الشوائب المضافة ونذكر منها:

- **أشباه الموصلات من النوع الموجب (P-type semiconductor)**

تنتج هذه الفئة عند إضافة شوائب من عناصر المجموعة الثالثة (كالبورون، الألمنيوم، أو الإنديوم) أو كمية قليلة من البورون مع الجاليوم.

- **آلية التشكيل** :تمتلك ذرات هذه الشوائب ثلاث إلكترونات تكافؤ فقط، مما يجعلها قادرة على تكوين ثلاث روابط تساهمية كاملة مع ذرات السيليكون المجاورة، بينما تظل الرابطة الرابعة ناقصة وتحتوي على فراغ يعرف بـ "الفجوة "[2].(Hole)
- **حاملات الشحنة** :تعمل هذه الفجوات كمراكز لاقتناص الإلكترونات من الروابط المجاورة بسهولة، مما يؤدي إلى توليد تيار من الفجوات الموجبة التي تُمثل حاملات الشحنة الأغلبية، ومن هنا جاءت تسميته بالنوع الموجب.(p)

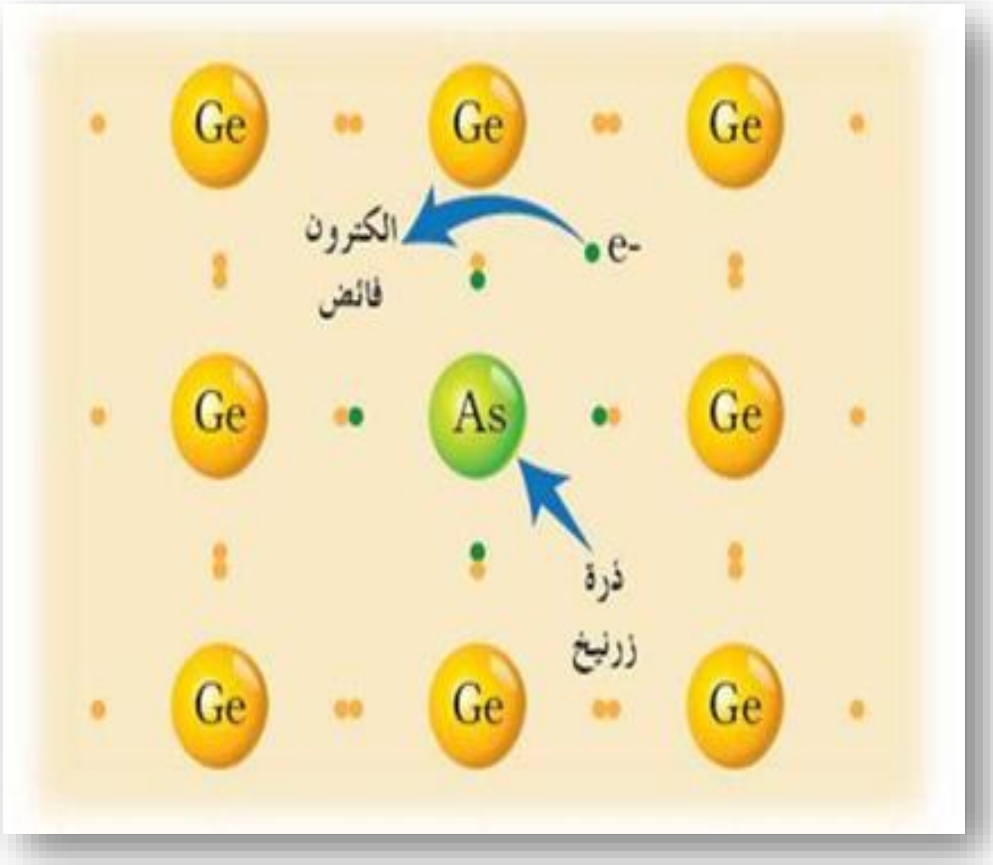


الشكل(III-3) : تطعيم الجاليوم النقي بالذرة الآخذة [7]

- **أشباه الموصلات من النوع السالب:(N-type semiconductor)**

يتم الحصول على هذا النوع عند تطعيم أشباه الموصلات النقية (مثل دمج الجليوم مع السيليكون) بعناصر من المجموعة الخامسة في الجدول الدوري (كالفسفور، الزرنيخ، أو الأنتيمون)

- **آلية التشكيل** :تمتلك ذرات الشوائب خمس إلكترونات تكافؤ؛ ترتبط أربعة منها بروابط تساهمية مع ذرات السيليكون المحيطة، بينما يبقى الإلكترون الخامس حرا (ضعيف الارتباط بنواته)، مما يسهل انتقاله إلى حزمة التوصيل بطاقة أقل بكثير من تلك المطلوبة في الحالة النقية.
- **حاملات الشحنة** :تصبح الإلكترونات هي حاملات الشحنة الأغلبية، ولذلك يُطلق عليه النوع السالب(n) [3]



شكل (III-4): تطعيم الجاليوم النقي بالذرة المانحة [7]

III-5-البلورة الدخيلة

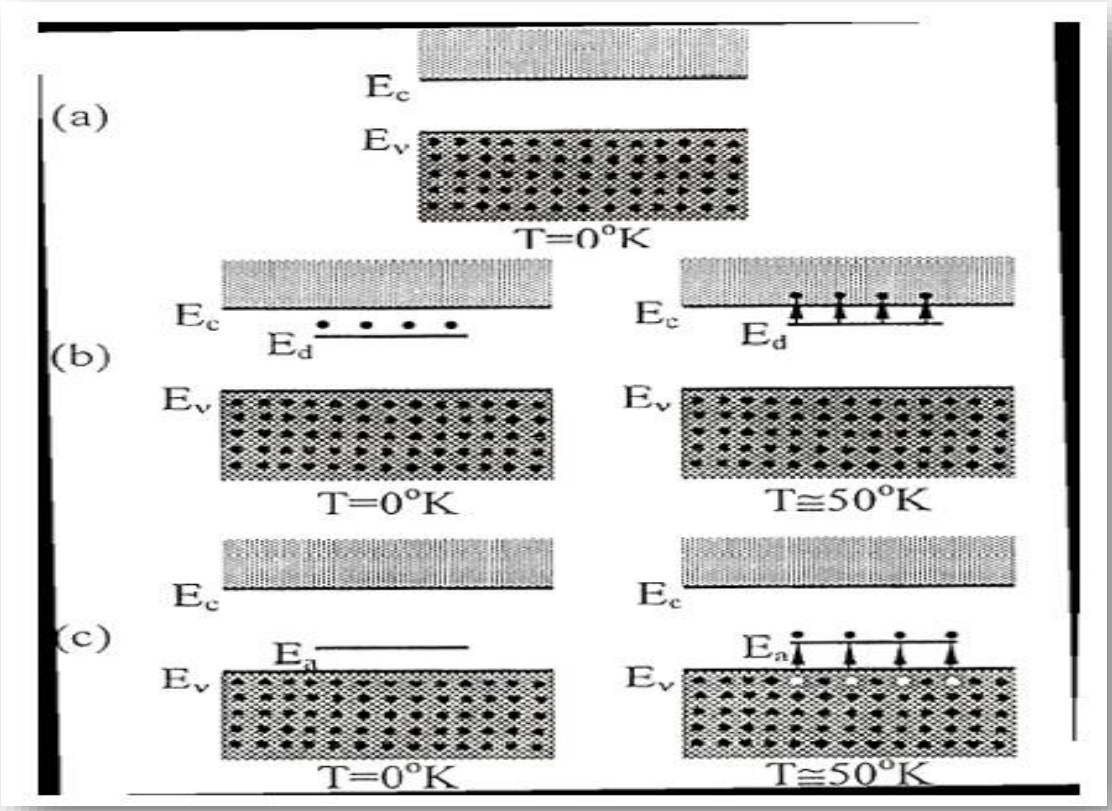
تتشابه بنية حزم الطاقة في أشباه الموصلات المطعمة مع تلك الموجودة في الحالة النقية عند درجة الصفر المطلق، إلا أن عملية التطعيم تُحدث تغييراً جوهرياً في "فجوة الطاقة" عبر إضافة مستويات طاقة جزئية ناتجة عن الشوائب [8].

أ) المستويات الواهبة (Donor Levels) وتشكيل النوع:n-type

تقع هذه المستويات مباشرة تحت حافة حزمة التوصيل. وبما أنها تكون مشغولة كليا بالإلكترونات، فإنها تعمل على رفع إلكتروناتها بسهولة إلى حزمة التوصيل عند ارتفاع درجات الحرارة، دون أن يرافق ذلك ظهور فجوات في حزمة التكافؤ. في هذه الحالة، يرتفع مستوى فيرمي ليقترب من حافة حزمة التوصيل، ويُعرف هذا المركب بشبه الموصل من النوع السالب.(n-type)

ب) المستويات القابلة (Acceptor Levels) وتشكيل النوع:p-type

تتموضع هذه المستويات فوق حافة حزمة التكافؤ مباشرة. تتميز بقدرتها على استقبال (تقبل) الإلكترونات الصاعدة من حزمة التكافؤ، مما يترك خلفها فجوات (Holes) دون توليد إلكترونات حرة في حزمة التوصيل. في هذا التكوين، ينزاح مستوى فيرمي للأسفل ليقترب من حزمة التكافؤ، ويُطلق على المادة شبه موصل من النوع الموجب.(p-type)



الشكل(III-5) : مستوي فيرمي لأشباه الموصلات النقية من النوع (n) والنوع (p)

a: النقية b: المطعمة(n–type) c: المطعمة(p–type) (8)

[1]- Introduction a la physique des semi Conduture- Jérôme faist. Meuchatel mais -2001"

[2] ناصر بن عبد الله الرشيد، الترانزستور، مجلة العلوم والتقنية "كيف تعمل الأشياء" العدد السادس وستون (1424هـ)

[3] كمال قرقوري، فيزياء أنصاف النواقل "تطبيق على الموصلات"، منشورات جامعة منتوري – قسنطينة (1999)

[4] احمد الحصيري، جهاد أبو النعناج، عمر طه، الفيزياء العلمية "تجارب ومسائل"، ديوان المطبوعات الجامعية – الجزائر رقم النشر 3570,03,2"

[5] كتاب اشباه الموصلات – م مؤيد فايز القواسمة – مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع – عمان 2006 م

[6].S. O. Kasap, “Principles of Electronic Materials and Devices”, 2nd ed .(McGraw-Hill, New York, (2002")

[7] فوزي غالب العوض، خضر محمد عبد الرحمان الشباني، عادل مجدوب علي حسيب، تطبيقات فيزياء الجوامد الطبعة الأولى جامعة المالك سعود (1992)

[8] دراسة الخصائص التركيبية والبصرية لأغشية Ni(1-x) Znx O المحضرة بطريقة التحلل الكيميائي الحراري رسالة تقدمت بها ردينه صديق عبد الستار الدليمي وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم الفيزياء 2013 م"

الفصل الرابع:

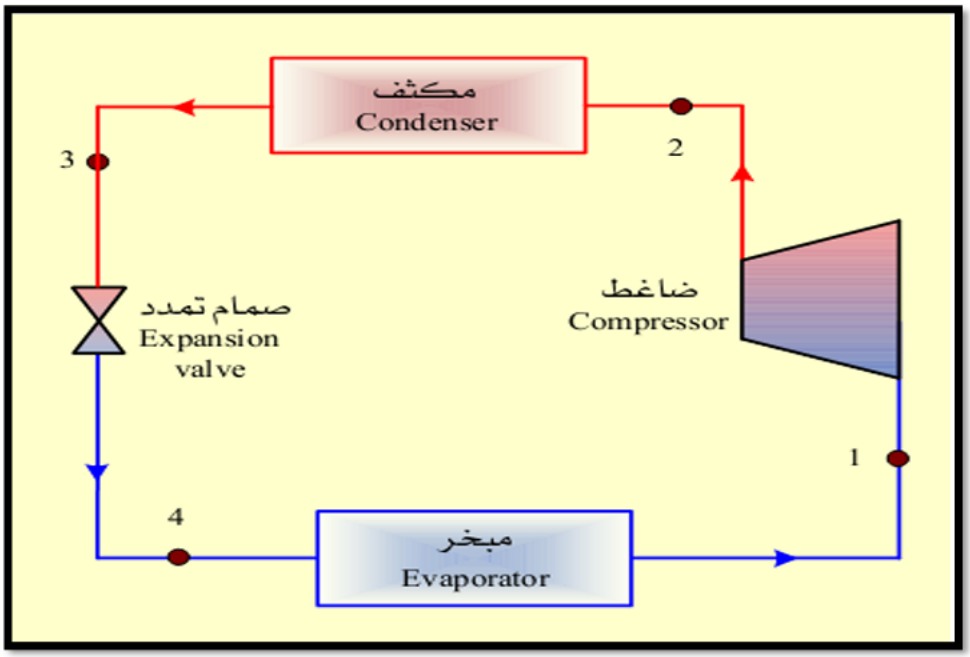
أنظمة التبريد لرفع كفاءة الخلايا تحت التركيز العالي

IV-مقدمة

تعتبر تكنولوجيا الخلايا الشمسية المركزة (CPV) من الحلول الواعدة لرفع كفاءة استغلال الطاقة الشمسية، حيث تعتمد على استخدام عدسات أو مرايا لتجميع أشعة الشمس وتسليطها على خلايا صغيرة الحجم وعالية الكفاءة. إلا أن هذا التركيز العالي للضوء يرافقه ارتفاع كبير ومركز في درجات الحرارة، مما يمثل تحدياً تقنياً كبيراً؛ فالحرارة الزائدة لا تؤدي فقط إلى تراجع الكفاءة الكهربائية للخلية، بل قد تسبب تلفاً في أشباه الموصلات والروابط الميكانيكية.

IV-1- تقنيات التبريد بواسطة الطاقة الشمسية

يعرف التبريد التقليدي أو الكلاسيكي بأنه تركيب ترموديناميكي يعتمد بشكل أساسي على الطاقة الكهربائية لتشغيلها، كما هو الحال في الأجهزة المنزلية الشائعة كالثلاجات والمكيفات. تهدف هذه المنظومة إلى سحب الطاقة الحرارية من حيز معين يراد تبريده، وذلك باستخدام وسائط تبريد يتم تدويرها وضخها عبر النظام بواسطة ضاغط ميكانيكي (Compressor) لامتصاص الحرارة وتصريفها.[1]

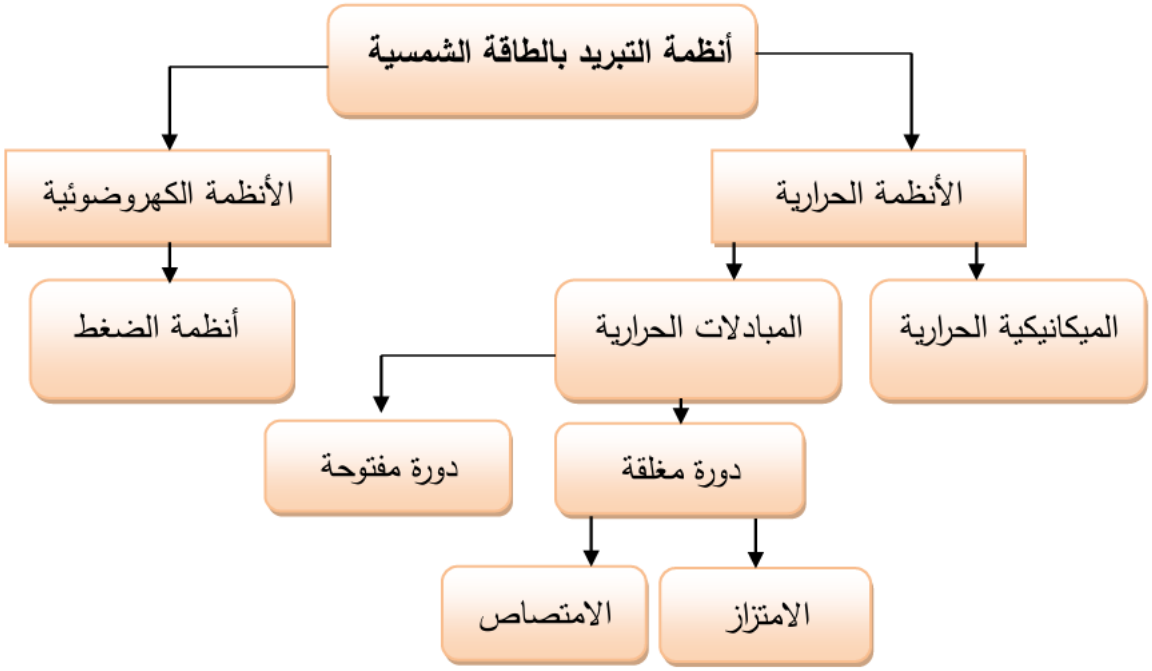


الشكل (IV-1) : دورة التبريد الكلاسيكية [2]

يعد دمج الطاقة الشمسية في عمليات التبريد توجها استراتيجيا يساهم في خفض استهلاك الطاقة التقليدية، وهو حل مثالي لتلبية الاحتياجات المتزايدة في الدول النامية. وتتعدد الطرق المعتمدة تقنيا

لتسخير الإشعاع الشمسي في هذا المجال، ومن أبرزها:

- **التحويل الكهروضوئي (PV)** : ويتم فيه استخدام الكهرباء المولدة من الألواح الشمسية لتشغيل ضواغط أنظمة التبريد التقليدية.
- **التحويل الحراري الضوئي** (**PT**): ويعتمد على استغلال الطاقة الحرارية المباشرة الناتجة عن المجمعات الشمسية لتشغيل دورات تبريد حرارية.[3]



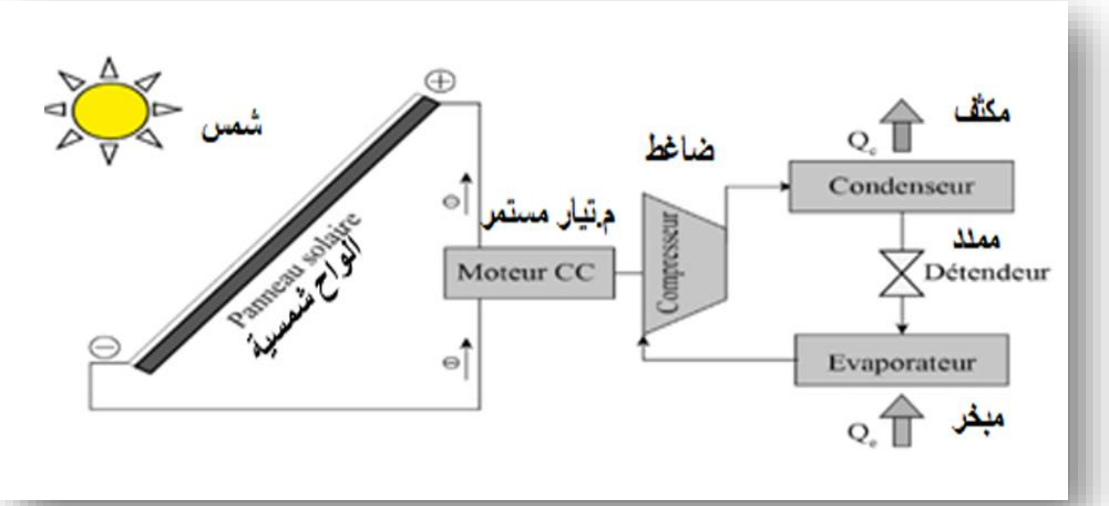
الشكل(2-IV) : مخطط توضيحي لأنظمة التبريد بالطاقة الشمسية [4]

2-IV- التبريد الشمسي باستخدام الأنظمة الكهروضوئية

تعتمد تقنيات التبريد الشمسي باستخدام الأنظمة الكهروضوئية بشكل أساسي على مبدأ تحويل الإشعاع الشمسي مباشرة إلى طاقة كهربائية عبر الخلايا الشمسية، وهي تكنولوجيا شائعة الاستخدام في المشاريع التجارية والسكينة الصغيرة التي لا تتجاوز سعتها 5 ميغا واط/ أمبير [5].

ومن الناحية التقنية، تنتج الألواح الكهروضوئية تيارا مستمرا(DC) ، بينما تعمل معظم أجهزة التبريد والضغط الكلاسيكية بالتيار المتناوب(AC) ، مما يتطلب دمج عواكس كهربائية (Convertisseur DC-AC) في النظام، بالإضافة إلى وحدة تحكم لحماية البطاريات من التلف. ومع

ذلك، فقد أدت التطورات الحديثة إلى تصنيع أنظمة ضغط تعمل مباشرة بالتيار المستمر، مما أتاح إمكانية ربطها بالألواح الكهروضوئية بشكل مباشر لتبسيط المنظومة ورفع كفاءتها.[6]



الشكل(IV-3): رسم تخطيطي لنظام التبريد الكهروضوئي [7]

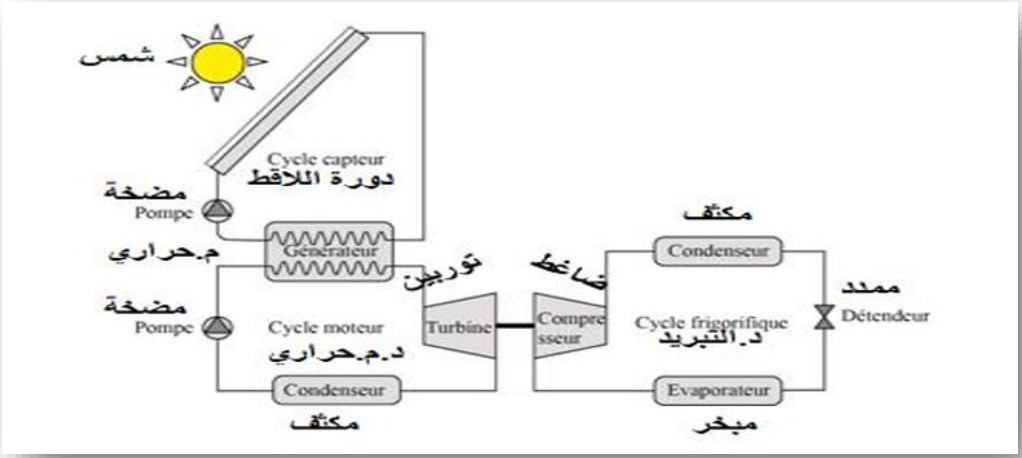
IV-3- التبريد الشمسي باستخدام الأنظمة الحرارية

يبرز التبريد الحراري الشمسي كبديل فعال للأنظمة الكهروضوئية، حيث تعتمد هذه التقنية على توظيف المجمعات الشمسية الحرارية لتوليد البرودة مباشرة. ويصنف هذا النوع من الأنظمة وفقا لآلية العمل ضمن العديد من الفئات، أهمها:

- **الميكانيكية الحرارية (Thermomecanique)**

تعتمد هذه التقنية على تحويل الطاقة الحرارية المجمعة من الإشعاع الشمسي إلى طاقة ميكانيكية عبر استخدام محرك حراري. حيث تستغل هذه الطاقة الحركية الناتجة في تشغيل ضاغط آلة التبريد التي تعمل بنظام ضغط البخار.

وترتبط الكفاءة الإجمالية لهذا النظام بشكل عضوي بمستوى أداء ثلاث مراحل متكاملة وهي: كفاءة المجمع الشمسي في امتصاص الحرارة، وكفاءة المحرك الحراري في التحويل، وكفاءة جهاز التبريد نفسه. حيث تستند عملية إنتاج الطاقة بشكل أساسي إلى دورات ترموديناميكية معروفة مثل دورة "رانكن"، ودورة "ستيرلنغ"، والدورة النفاثة.[8]



الشكل(IV-4): نظام التبريد الميكانيكا الحرارية [8]

IV-4- المبادلات الحرارية

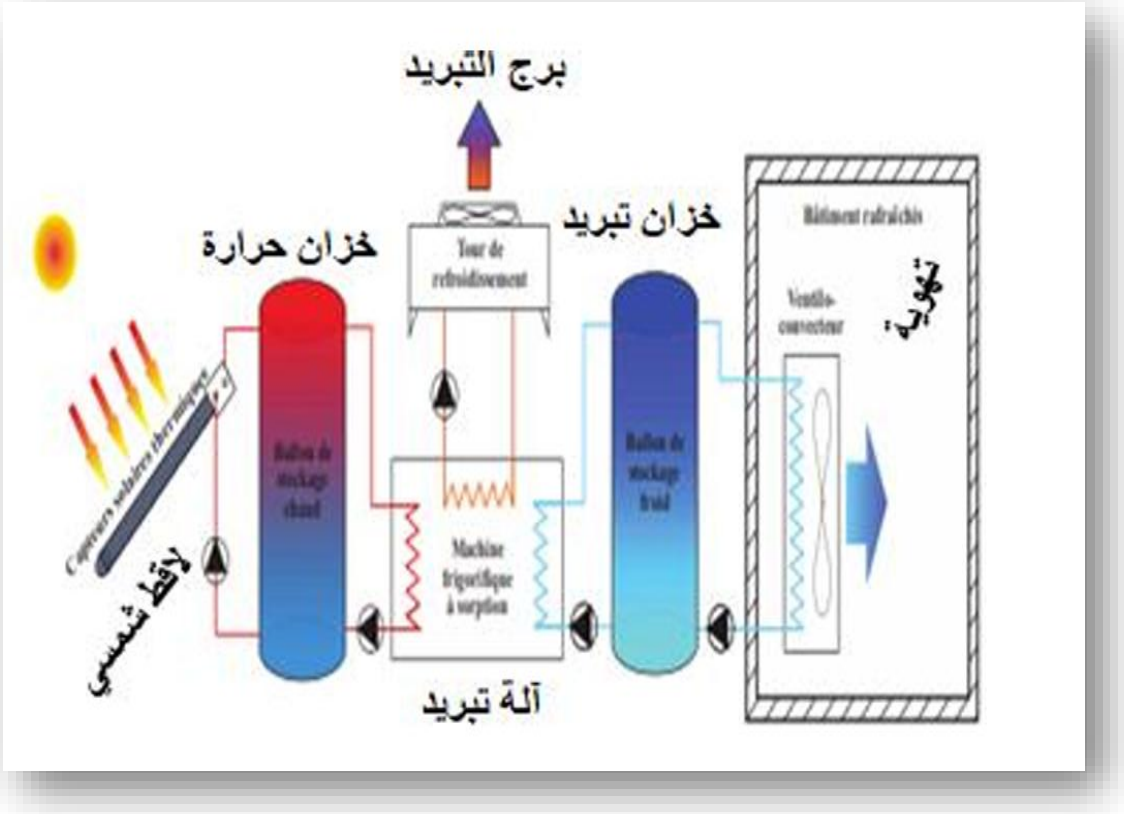
يختص هذا العلم بدراسة آليات انتقال الحرارة من مكان إلى آخر، ويرتكز على خاصية تغير درجة حرارة المائع سواء بالارتفاع أو الانخفاض عند انتقاله بين الأوساط المختلفة. وتُصنف أنظمة التبريد بناءً على ذلك إلى قسمين رئيسيين:

أ) أنظمة تبريد ذات دورة مفتوحة(Les systèmes frigorifiques à cycle ouvert)

تتميز هذه الأنظمة بخروج وسيط التبريد من الآلة كناتج مفيد، ومن أمثلتها آلات تمييع الهواء. يعتمد مبدأ عملها على ترطيب الهواء لخفض درجة حرارته الجافة، حيث يتم مزج الماء في الهواء ليقوم الأخير بامتصاص الحرارة اللازمة لتبخير الماء. ويشترط لهذه الظاهرة أن يكون الهواء الأولي جافا وبدرجة حرارة مرتفعة بما يكفي لإتمام عملية التبخير.

ب) أنظمة تبريد ذات دورة مغلقة:(Les systèmes frigorifiques à cycle fermé)

تعتمد الدورات الديناميكية الحرارية في هذه الأنظمة على العمل بين مصدر ساخن ومصدر بارد. وفي هذه الحالة، يظل وسيط التبريد محصورا داخل النظام، حيث يجتاز الأجهزة بشكل دوري وتتغير درجة حرارته باستمرار بين درجتي حرارة المنبعين. ومن أبرز الأمثلة على هذه الفئة آلات "الامتزاز" و"الامتصاص"، وهما التقنيتان الأساسيتان في موضوع الدراسة [9].



الشكل(IV-5): مبدأ نظام التبريد الشمسي ذات دورة مغلقة [9]

IV-5- نظام التبريد الشمسي بالامتزاز

IV-5-1- مفهوم ظاهرة الامتزاز(Adsorption)

تعرف ظاهرة الامتزاز بأنها عملية فيزيائية كيميائية تعتمد على ارتباط جزيئات مادة سائلة أو غازية بسطح مادة صلبة، مكونة ما يعرف بـ "زوج العمل (sorption–solide) "وتتم هذه العملية نتيجة

لقوى التجاذب بين الجزيئات (قوى فان دير فالس)، حيث يرافقها تغير في الحالة الفيزيائية للمادة من السائل إلى الغاز [10].

يطلق على المادة السائلة اسم "المادة الممتزة (adsorbate) "، بينما تسمى المادة الصلبة بـ "المادة المازة (adsorbent) "وتنقسم هذه الظاهرة إلى نوعين:

- **امتزاز أحادي الطبقة** :عندما يقتصر الامتزاز على تكوين طبقة جزيئية واحدة على السطح.
- **امتزاز متعدد الطبقات** :عندما يمتد الامتزاز ليشمل عدة طبقات جزيئية متراكمة.[11]

تعتمد كفاءة هذه العملية على طبيعة زوج العمل المختار، حيث يعمل كل زوج ضمن ظروف محددة من الضغط ودرجة الحرارة والتركيز.

أ) معايير اختيار المادة المازة(Adsorbent)

يتوقف نجاح نظام التبريد على جودة المادة المازة المستخدمة، والتي يجب أن تستوفي المعايير التالية:

- **المساحة السطحية** :استخدام مواد ذات مساحة نوعية كبيرة جدا لزيادة قدرة الامتزاز.
- **سعة الامتصاص** :امتلاك قدرة عالية على الامتصاص في درجات الحرارة المنخفضة، مع انخفاض هذه القدرة عند درجات الحرارة العالية لضمان تحرير أكبر كمية من سائل التبريد.
- **الخصائص الحرارية** :يفضل أن تتميز بحرارة نوعية منخفضة لتقليل الطاقة اللازمة للتسخين، وتوصيل حراري مرتفع لتحسين انتقال الحرارة.[12]
- **السلامة والاستقرار** :أن تكون المادة غير سامة، غير مسببة للتآكل، ومستقرة كيميائياً مع المادة الممتزة.
- **التوافر الاقتصادي** :أن تكون المادة متاحة تجاريا بتكلفة معقولة.

ب) معايير اختيار السائل الممتز(Adsorbate)

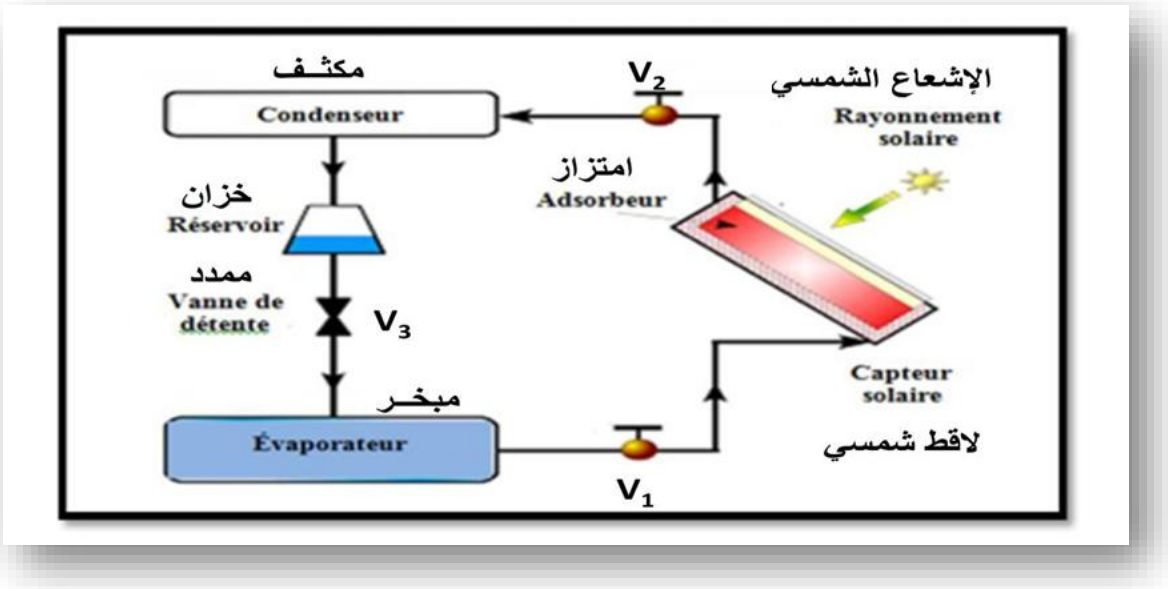
يتم اختيار مائع التبريد بناءً على الخصائص التقنية التالية:

- يجب أن يتمتع بحرارة كامنة عالية للتبخير لإنتاج أقصى قدر من البرودة داخل المبخر.
- سهولة الامتزاز بواسطة المادة الصلبة، مع لزوجة منخفضة وموصلية حرارية عالية لتعزيز كفاءة التبادل.
- الثبات الكيميائي في مختلف درجات الحرارة، مع ضرورة أن يكون ضغط التشغيل أعلى من الضغط الجوي لتجنب تسرب الهواء للنظام.
- من أبرز الأزواج المستخدمة في أنظمة التبريد الشمسي: (الكربون المنشط/الميثانول)، (الكربون المنشط/الأمونيا)، (الزيوليت /الماء)، و(هلام السيليكا /الماء) [13]

IV-5-2- مكونات ومبدأ عمل آلة التبريد بالامتزاز

يتكون النظام الموضح في الشكل أسفل من خمسة أجزاء رئيسية:

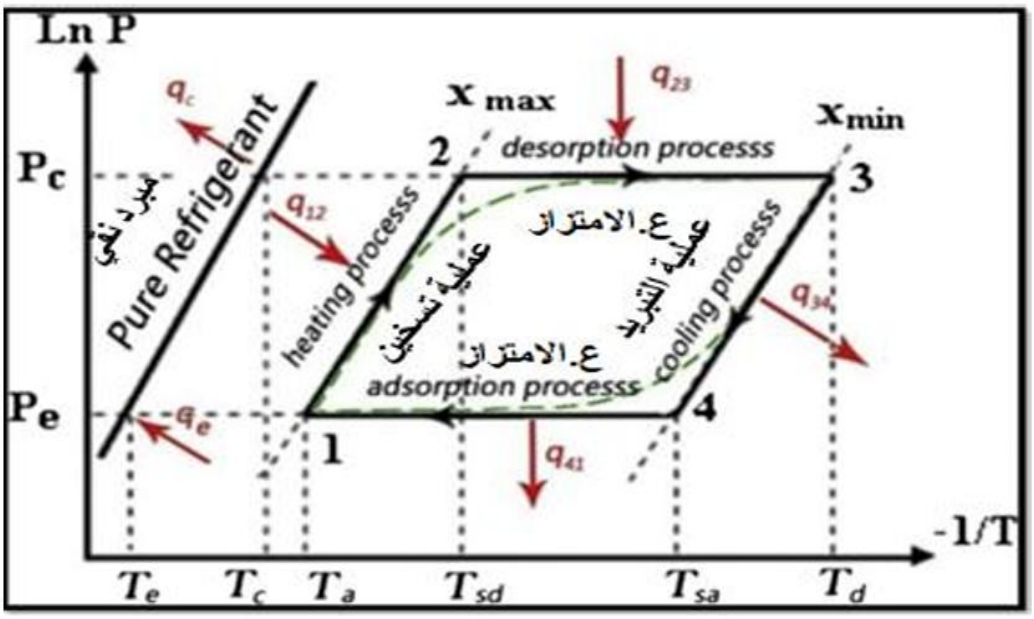
1. **اللاقط الشمسي (capteur solaire)** : وهو المكون المحوري الذي يقوم مقام الضاغط في الأنظمة التقليدية، حيث يحتوي على زوج العمل (الماز/الممتز)
2. **المكثف (condenseur)** : مبادل حراري يعمل على تحويل أبخرة سائل التبريد إلى سائل عن طريق طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي.
3. **الخزان (réservoir)** :يعمل كمستودع لتخزين سائل التبريد القادم من المكثف.
4. **صمام التمدد (vanne de détente)** : يقوم بخفض ضغط سائل التبريد قبل دخوله إلى المبخر.
5. **المبخر (évaporateur)** : مبادل حراري يتم فيه تبخير سائل التبريد لامتصاص الحرارة من الوسط المراد تبريده، مما ينتج الأثر التبريدي المطلوب.[14]



الشكل(IV-6): نظام التبريد الشمسي بالامتزاز [15]

IV-5-3- تحليل مخطط عمل آلة التبريد بالامتزاز

تعتمد دورة التبريد بالامتزاز في عملها على مخطط **كلابيرون (Clapeyron)** الممثل في الشكل، والذي يوضح العلاقة بين الضغط والحرارة (P, T) ، يحدد هذا المخطط نقاط الدورة الفعلية ومجالات التراكيز، حيث يبرز خطوط الضغط الثابت، خط الإشباع، والتركيز الأعظمي (x_{max}) والأصغري (x_{min}) للمادة الممتزة.[46]



الشكل(IV-7): مخطط كلابيرون لعمليات دارة التبريد الامتزازية الشمسية [47]

- **مرحلة التسخين ورفع الضغط (Heating) من النقطة (1 إلى 2)**

يبدأ جهاز الامتزاز بامتصاص الحرارة من اللاقط الشمسي، مما يؤدي لارتفاع درجة حرارة المادة المازة. في هذه المرحلة، يرتفع الضغط من ضغط التبخير إلى ضغط التكثيف مع بقاء الجهاز مغلقاً وثبات كمية المادة الممتزة عند حد الإشباع الخاص بها.

1. **مرحلة التوليد والتكثيف (Desorption) من النقطة (2 إلى3)**

مع استمرار التسخين تحت ضغط التكثيف الثابت، تبدأ المادة الممتزة بالانفصال عن المادة المازة. يفتح صمام التحكم (V_2) لينتقل البخار نحو المكثف، وتستمر هذه العملية حتى تصل المادة إلى درجة حرارة محددة وتصل نسبة التركيز إلى حدها الأدنى(x_{max})

2. **مرحلة التبريد الأولية (Cooling) من النقطة (3 الى4)**

يتوقف التزويد بالحرارة ويبدأ الجهاز بطرح الحرارة للوسط الخارجي وهو في حالة إغلاق تام. يؤدي ذلك إلى انخفاض درجة حرارة جهاز الامتزاز، وبالتالي ينخفض الضغط من مستوى التكثيف ليصل إلى مستوى ضغط التبخير.

3. **مرحلة التبخير والامتزاز :(Adsorption) من النقطة (4 الى 1)**

عند وصول الضغط إلى مستوى ضغط المبخر، يفتح الصمام .(V_1) يبدأ سائل التبريد بالتبخر في المبخر ، ويقوم جهاز الامتزاز بسحب هذا البخار وامتزازه مجددا، مما يؤدي لزيادة التركيز حتى العودة إلى نقطة البداية(x_{max})

- التحليل الحراري للمكثف والمبخر

- **كمية الحرارة المطروحة في المكثف (Q_{con})**

هي الطاقة الحرارية التي يفقدها وسيط التبريد ليتحول إلى سائل، وتُحسب بالعلاقة:

$$Q_{con} = m\ \Delta x.\ h_{fg,con} \quad \ldots\ldots(42)$$

حيث أن $\Delta x = x_{max} - x_{min}$ تمثل الفرق بين التركيزين الأعظمي والأصغري، و $h_{fg,con}$ هو أنتالبي التكثيف.

- **كمية الحرارة الممتصة في المبخر Q_{ev}**

هي كمية الحرارة اللازمة لتبخير وسيط التبريد وإنتاج البرودة، وتحسب بالعلاقة:

$$Q_{ev} = m\ \Delta x\ h_{fg,eva} \quad \ldots\ldots(43)$$

- **معامل الأداء الحراري لنظام التبريد الامتزازي(COP_{ref})**

يعد معامل الأداء مقياساً لكفاءة النظام، وهو النسبة بين الأثر التبريدي الناتج في المبخر (Q_{eva})وإجمالي الطاقة الحرارية المقدمة للجهاز :(Q_a)

$$COP_{ref} = \frac{Q_{eva}}{Q_a} \quad \ldots\ldots(44)$$

حيث أن إجمالي الحرارة المقدمة (Qa) تشمل:

$$Q_a = q_{12} + q_{23} \quad \text{.....(45)}$$

- q_{12} : كمية حرارة التسخين الأولية.
- q_{23}: كمية حرارة التوليد المرافقة للتكثيف.

IV-6 –نظام التبريد الشمسي بالامتصاص

مفهوم ظاهرة الامتصاص

تعتمد أنظمة التبريد بالامتصاص على قدرة بعض السوائل على استيعاب أبخرة مائع التبريد. وتتم تحت مستويين من الضغط:[8]

1. **مستوى منخفض:** حيث يتم امتصاص أبخرة مائع التبريد القادمة من المبخر بواسطة السائل الممتص.
2. **مستوى مرتفع:** يتم فيه فصل مائع التبريد عن الممتص بالحرارة وإرساله إلى المكثف باستخدام مضخة لرفع الضغط.

ويتم اختيار أزواج العمل بناء على شروط التشغيل وكفاءة الأداء، ومن أبرزه :

الجدول (1.IV): أزواج العمل المختارة في ظاهرة الامتصاص [18] [19]

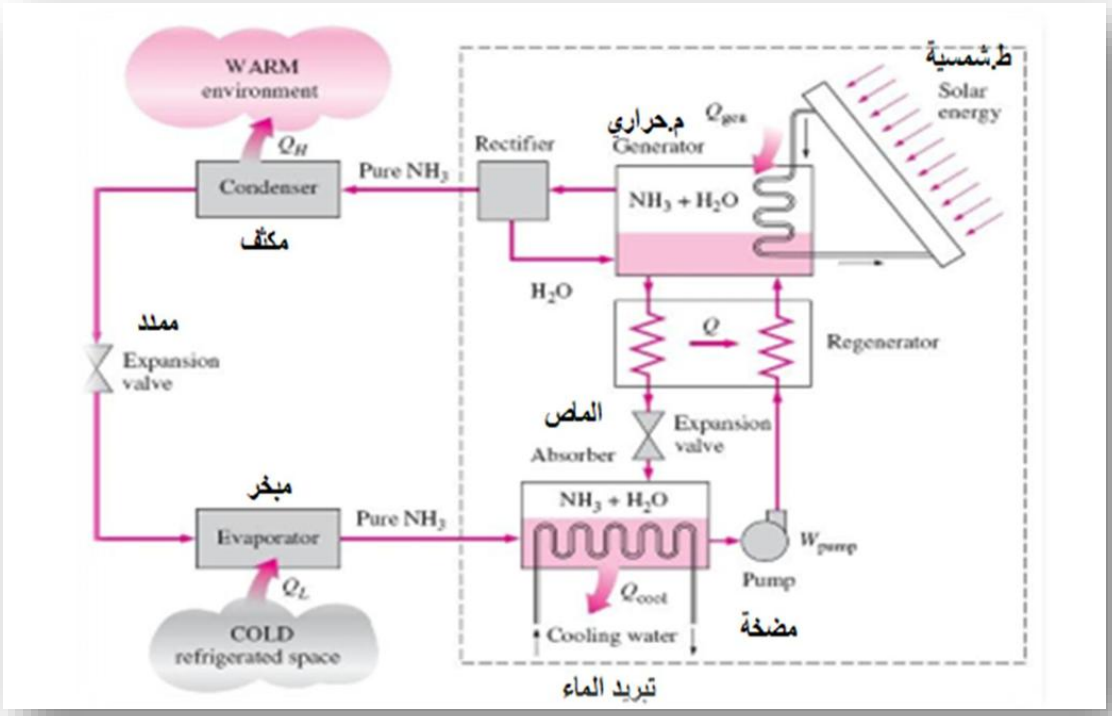
المبرد (Refrigerant)	الممتص (Absorbent)
الماء (H_2O)	بروميد الليثيوم (LiBr)
ميثانول (CH_3OH)	بروميد الليثيوم (LiBr)
ميثيل أمين (CH_3NH_3)	الماء (H_2O)
رباعي فلورو إيثان R22($CHCLF_2$)	رباعي إيثلين جلايكول ثنائي مثييل الأثير
الأمونيا (NH_3)	الماء (H_2O)

IV-6-1 الشروط الواجب توافرها في أزواج العمل

- استقرار حراري وكيميائي عال للدورة.
- عدم التسبب في تآكل أجزاء النظام ومكوناته.
- لزوجة منخفضة لتسهيل عملية التدفق.
- درجة حرارة تجمد منخفضة جدا لمائع التبريد.
- غير سام وغير قابل للاشتعال.[20]

IV-6-2 بنية ومبدأ عمل آلة التبريد بالامتصاص

يتكون النظام من عدة أجزاء رئيسية تعمل بشكل متكامل كما يوضحه المخطط الشكل(IV-8):[20]



الشكل(IV-8): مخطط توضيحي لمكونات وعمل آلة التبريد بالامتصاص [8]

1. **المولد الحراري (Generator)** : مبادل حراري يتم تزويده بالحرارة لفصل مائع التبريد عن المحلول بتبخيره عند ضغط مرتفع.

2. **المبخر (Evaporator)** يتم فيه تبخير سائل التبريد تحت ضغط منخفض لسحب الحرارة من الوسط المراد تبريده.
3. **الممتص (Absorber)** وعاء يحتوي على المحلول الفقير الذي يعمل على جذب وامتصاص أبخرة مائع التبريد القادمة من المبخر.
4. **المكثف (Condenser)** مبادل حراري يعمل على تكثيف مائع التبريد وتحويله من الحالة الغازية إلى السائلة عن طريق طرح الحرارة.
5. **المضخة (Pump)** تستخدم لرفع ضغط المحلول الغني من مستوى الضغط المنخفض (في الممتص) إلى مستوى الضغط المرتفع في المولد.
6. **المبادل الحراري للمحلول** :يعمل على تحسين كفاءة الدورة عبر تبادل الحرارة بين المحلول الغني المتجه للمولد والمحلول الفقير العائد للممتص.
7. **صمام التمدد (Expansion Valve)** يعمل على خفض ضغط سائل التبريد قبل دخوله للمبخر.

IV-6-2 آلية عمل الدورة

- يبدأ مائع التبريد في المولد حيث ينفصل عن المحلول بفعل الحرارة الشمسية تحت ضغط عال، ثم ينتقل إلى المكثف ليتحول إلى سائل.
- يمر السائل عبر صمام التمدد حيث ينخفض ضغطه، ليدخل المبخر ويمتص الحرارة من الحيز المبرد ويتحول إلى بخار.
- يسحب هذا البخار في الممتص بواسطة المحلول، ثم تقوم المضخة بإرسال المحلول الغني بمائع التبريد مرة أخرى إلى المولد عبر المبادل الحراري، لتستمر الدورة في إنتاج البرودة بشكل مستمر. [20]

IV-7- تصنيف أنظمة التبريد بالامتصاص الشمسي

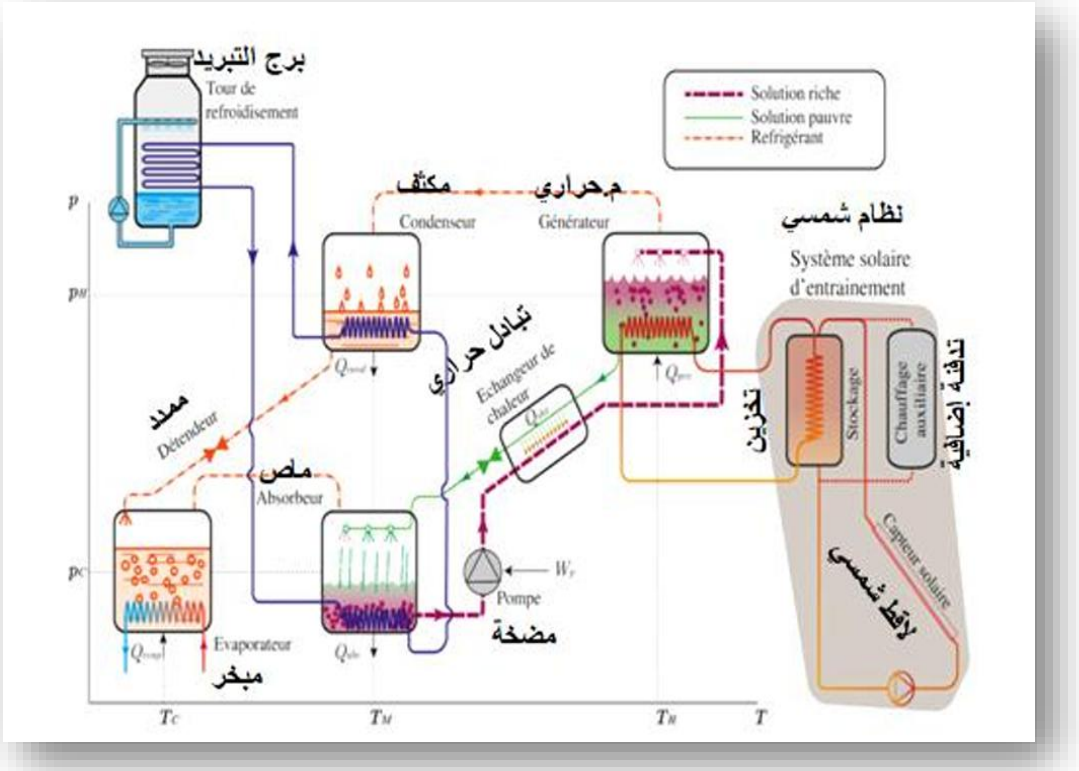
تقسم دورات التبريد بالامتصاص إلى ثلاث فئات رئيسية، نورد تفصيل النوع الأول منها فيما يلي:

أ) نظام التبريد بالامتصاص أحادي الامتصاص (Single Effect)

تعد دورة الامتصاص أحادية التأثير من أكثر التقنيات بساطة ضمن أنظمة الامتصاص العاملة بالطاقة الشمسية. يتألف هذا النظام من المكونات التقليدية لدورة الامتصاص، مضافا إليها مجمع شمسي وخزان حراري الشكل(IV-9) [8]

1-7-IV آلية العمل والأداء

- **إدارة الفائض الحراري** :عند توليد كميات زائدة من الحرارة، يتم الاحتفاظ بها في خزان التخزين؛ لاستخدامها لاحقا عبر تفعيل سخان إضافي في الفترات التي يغيب فيها الإشعاع الشمسي.
- **الوسط العامل** :تعتمد معظم الأنظمة المتاحة تجاريا على زوج الموائع(H_2O/ LiBr) ، حيث يتم تزويد النظام بالحرارة اللازمة عبر مجمعات شمسية ذات أنابيب مسطحة أو مفرغة.
- **مؤشرات الكفاءة** :يتراوح معامل أداء هذا النظام (COP) ما بين **0,6** الى 0,8، بينما تتطلب الدورة درجات حرارة تشغيلية تتراوح ما بين 80°C و 100°C



الشكل(IV-9): نظام التبريد الشمسي أحادي الامتصاص.[8]

ب) نظام التبريد بالامتصاص مزدوج التأثير(Double Effect)

يدمج هذا النظام في بعض تطبيقات التبريد الشمسي المتطورة، حيث يُنظر إليه كدورة إضافية تُعزز من أداء دورات الامتصاص أحادية التأثير. يتميز هذا النظام بوجود مرحلتين لتوليد البخار، وتتراوح درجات حرارة تشغيله ما بين 140°C و 180°C، مما يمنحه معامل أداء (COP) أعلى مقارنة بالنظام أحادي التأثير [21].

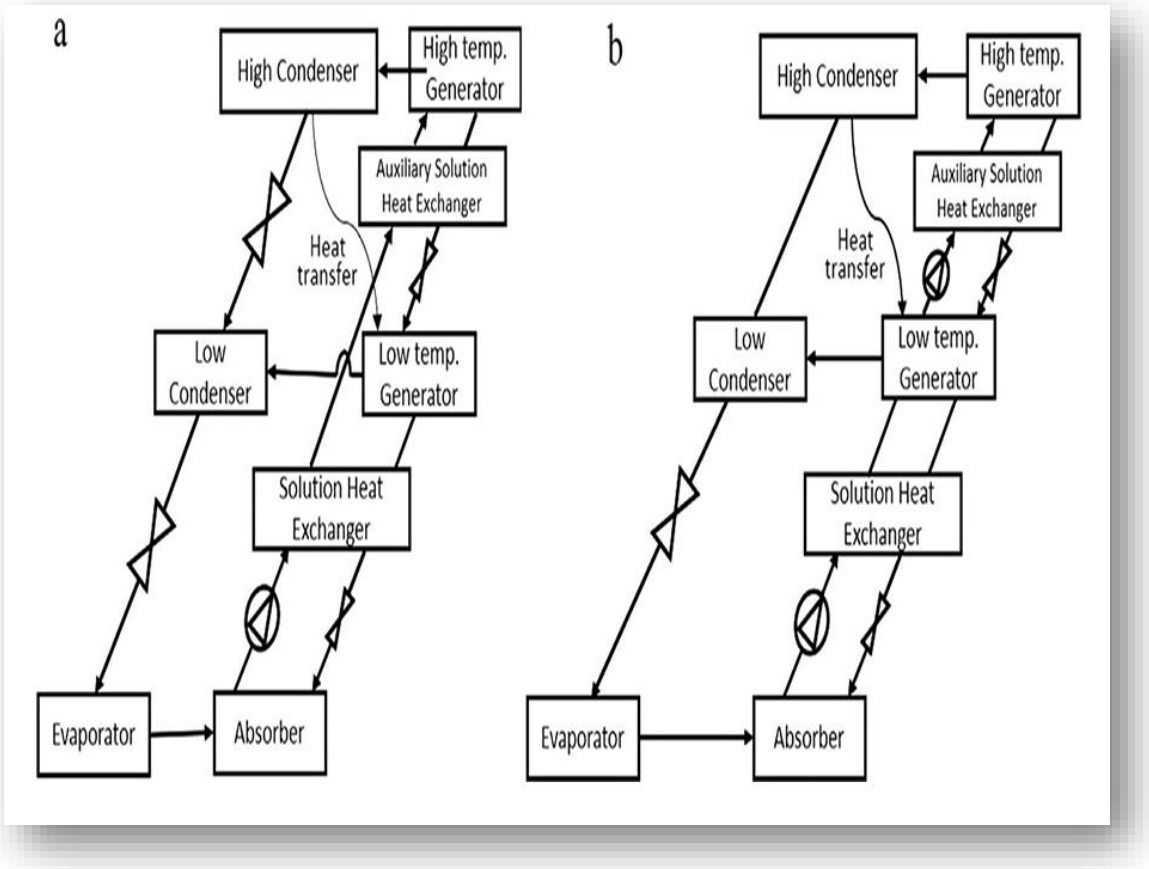
مبدأ العمل

حسب الشكل(IV-10)، تتكون هذه الدورة من مولدين حراريين يعملان عند مستويات ضغط وحرارة مختلفة:

- **المولد عالي الضغط (HPG)** :يعمل عند درجات حرارة مرتفعة.
- **المولد منخفض الضغط (LPG)** :يعمل عند درجات حرارة أقل.

IV-6-2 مسار العمليات الحرارية

1. ينتقل البخار الناتج من المولد ذي الحرارة الأعلى ويمر عبر المولد ذي الحرارة المنخفضة.
2. في هذه المرحلة، يعمل المولد المنخفض كـ "مكثف" للبخار الأولي الناتج من المولد العالي، وفي الوقت ذاته يعمل كـ "مولد حراري" بحد ذاته.
3. تُستغل الحرارة المنبعثة من عملية التكثيف لتسخين وسيط التبريد في مولد الLPG ، مما يساهم في تقليل استهلاك المصدر الحراري الخارجي وزيادة كفاءة النظام.
4. في النهاية، يخرج البخار من المولدين باتجاه مكثف مشترك، ثم يتابع وسيط التبريد دورته نحو المبخر ومنه إلى الماص، مع ملاحظة استخدام مبادلين حراريين في هذه الدورة لرفع الكفاءة بدلا من مبادل واحد كما في الأنظمة الأحادية.



الشكل(IV-10) : نظام التبريد لامتصاص الشمسي مزدوج الامتصاص [53]

ج) نظام التبريد بالامتصاص ثلاثي التأثير(Triple Effect)

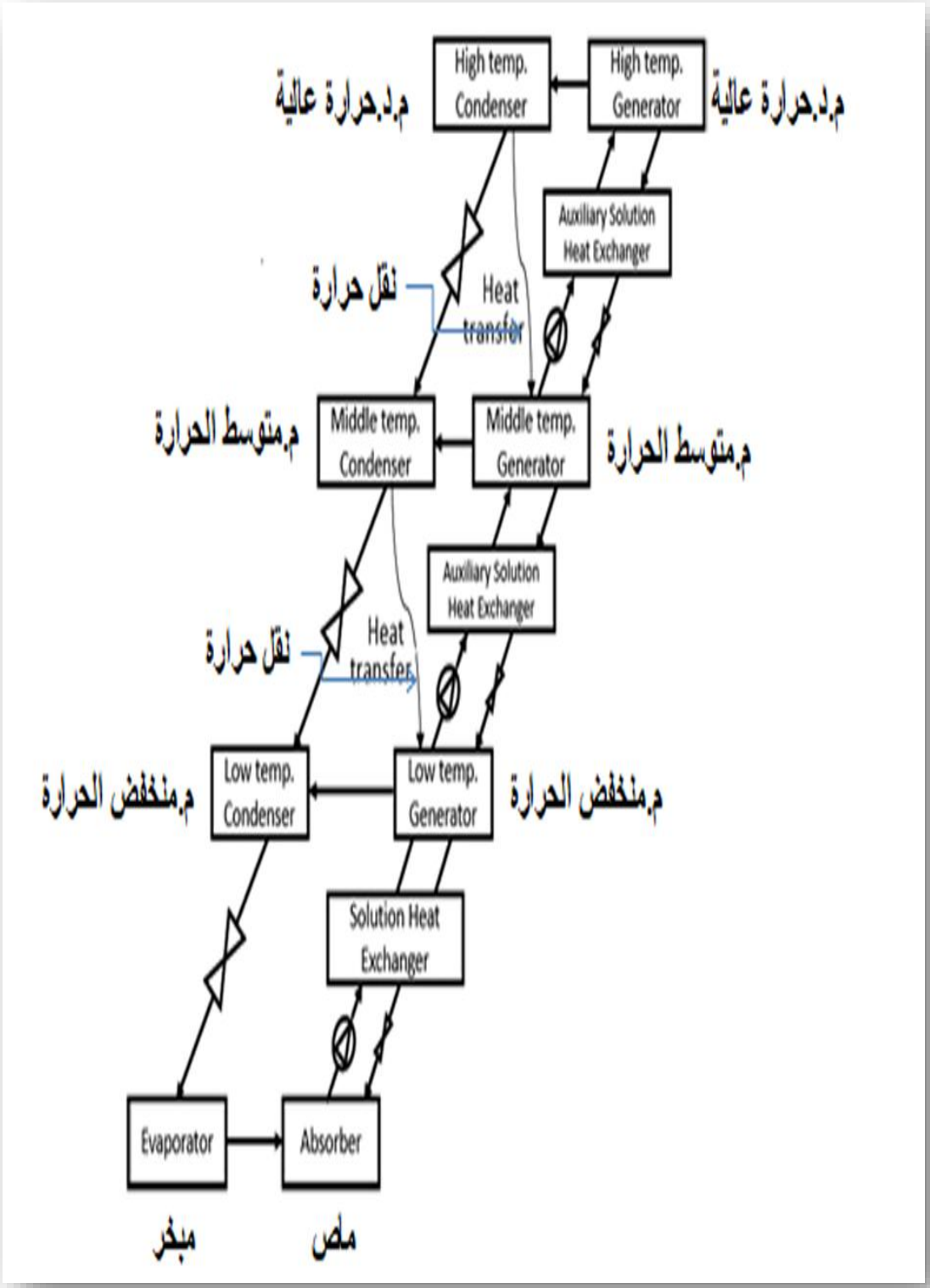
يمثل هذا النظام تطورا تقنيا لدورة الامتصاص مزدوجة التأثير، حيث يمكن وصفه بأنه دمج لدورتين أحاديتي المفعول تعملان معاً ضمن أربعة مستويات مختلفة من الضغط، كما يظهر في المخطط الشكل(IV-11)

- **المكونات والآلية التشغيلية**

- **بنية النظام:** يتألف النظام من ثلاث مولدات وثلاثة مكثفات تعمل بتناغم يشبه آلية النظام المزدوج.
- **التبادل الحراري الداخلي** :يعتمد التشغيل على عمليتين حراريتين داخليتين تشملان

- ✓ مكثف عالي مع مولد متوسط
- ✓ مكثف متوسط مع مولد منخفض

- **استغلال الطاقة:** يتم تكثيف مادة التبريد الناتجة من المولدين واستخدام الحرارة المستخلصة منهما لتشغيل المولد المنخفض، مما يرفع من كفاءة استهلاك الطاقة.
- **دورة التبريد:** يتدفق وسيط التبريد من المكثفات الثلاثة نحو المبخر لإتمام عملية التبريد المطلوبة.[23]



الشكل(IV-11): نظام التبريد الشمسي ثلاثي التأثير [23]

الجدول (2.VI): استعراض لأهم إيجابيات وسلبيات أنظمة التبريد الامتصاصي [24]

وجه المقارنة	التفاصيل التقنية والتشغيلية
المزايا (Pros)	* تتميز الأنظمة بسهولة إجراءات الصيانة الدورية. * لا تعتمد على سوائل تبريد ذات آثار بيئية ضارة. * غياب الضواغط الميكانيكية يؤدي إلى انعدام الضجيج والاهتزازات أثناء التشغيل. * تتمتع بعمر افتراضي طويل يتراوح ما بين 25 إلى 30 عاما، وهو ما يتجاوز بمراحل العمر التشغيلي لآلات الضغط الميكانيكي.
العيوب (Cons)	* يُعد معامل الأداء منخفضا نسبيا، حيث يتراوح غالبا ما بين **0.5 و 0.8**. * تستلزم وجود حد أدنى من درجة حرارة التشغيل لضمان عمل الدورة. * تتسم هذه الأنظمة بتكلفة استثمارية أولية مرتفعة. * يقتصر توظيفها حالياً بشكل أساسي على المشاريع التي تتطلب سعات تبريدية ضخمة. * تحتاج إلى مساحات شاسعة لتركيب اللواقط الشمسية اللازمة لتشغيلها.

[1] رمضان أحمد محمود، " أنظمة التبريد "، منشأة المعارف، الإسكندرية، ص 9-17.

[2]المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني، " أساسيات تقنية التبريد والتكييف – عملي" pdf ، الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، المملكة العربية السعودية، ص 20-66.

[3]- HADJ AMMAR Mohammed Ali, "Étude et dimensionnement d'un réfrigérateur solaire à adsorption dans la région saharienne d'Algérie", thèse de doctorat En physique Énergétique, université Kasdi Merbah, Ouargla (2020).

[4]- Le Pierres. N, "Procédé solaire de production de froid basse température (-28 °C) par sorption solide – gaz," Thèse de Doctorat énergétique et génie de procédés, Université de Perpignan, pp.1-208, (2005).

[5]- Mohamed H.B. Abdul Jalil, "Simulation of Performance of Air Conditioning System", Faculty of Mechanical Engineering University Malaysia Pahang, 2012.

[6]- Otanicar T, Taylor R.A, Phelan P.E, " Prospects for solar cooling-an economic and environmental assessment ", Solar Energy 86 (2012) 1287-1299.

[7]- Ullah K. R, Saidur R, Ping H. W, Akikur R. K, N. H. Shuvo, A review of solar thermal refrigeration and cooling methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013) 499-513.

[8] بوعشة أسمهان، " جدوى استغلال الطاقة الشمسية كطاقة متجددة وإمكانية استخدامها في التبادلات التجارية الخارجية – دراسة حالة الجزائر –" مذكرة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم التجارية، جامعة محمد خيضر بسكرة، 2019.

[9]- Guillaume ANIES, Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Exactes et leurs Applications, Université de Pau et des Pays de l'Adour (2011).

[10]أيوب عيسى حسن، معد إسماعيل عثمان، " تصميم ونمذجة دارة تبريد ادمصاصية عاملة بالطاقة الشمسية "، مجلة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد (35)، العدد (3)، سوريا، 2013.

[11]- U. Borel, D. Favrat, thermodynamique et énergétique, 1 De l'énergie à l'exergie, Presses Polytechnique et universitaires romandes, 2005.

[12]- L. Wang, R. Wang, R. Oliveira, A review on adsorption working pairs for refrigeration, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 518-34.

[13]- C. Wassila, Étude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, thèse de doctorat, Constantine, 2008.

[14]- R. E. Critoph, Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling, Solar energy, 41 (1988) 21-31.

[15]- Hassan H, Mohamad A. A, A review on solar cold production through absorption technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5331-5348.

[16]- A.ELFADAR, A. MIMET; PE 'REZ-DARCI', M. Modeling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector, Solar Energy 83, Spain, (2009), 850-861 .

[17]- Naef A.A. Qasem, Maged A.I. El-Shaarawi, Thermal analysis and modeling study of an activated carbon solar adsorption icemaker: Dhahran case study Energy Conversion and Management 100 (2015) 310-323.

[18]- Le goff P, Energétique industrielle, Technique et documentation, 1, Paris (1979).

[19]- Kang Y. T, Akisawa A, Kashiwagi T, Experimental correlation of combined heat and mass transfer for NH_3-H_2O falling film absorption, Int. Journal of Refrigeration, 22 (1999) 250-262.

[20]جابر ديبة، "دراسة تجريبية لآلة تبريد امتصاصية شمسية صغيرة الاستطاعة"، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد (32)، العدد (5)، 2010.

[21]علي كرنو وآخرون، "نمذجة وموازنة أداء دارة التبريد الامتصاصية ثنائية المرحلة مع الدارة أحادية المرحلة"، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33)، العدد (7)، 2011.

[22]كتاب التبريد وتكييف الهواء، "نظم ومعدات التبريد"، قسم الهندسة الميكانيكية، طبعة 1429هـ، تاريخ الإنشاء 26 سبتمبر 2008.

[23]- Rasoul Nikbakhti, Xiaolin Wang...ect, Absorption cooling systems-review of various techniques for energy performance enhancement in Australia, Alexandria Engineering Journal 59 (2020) 707-738.

[24]- A. Brigitte, M. Nouadje, combinaison du solaire et de modules Peltier pour production de froid au SAHEL, Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, pp 18, (2011).

الفصل الخامس:

إستخدام

Matlab/Simulink

لدراسة التأثير الاشعاعي الشمسي على درجة حرارة الخلايا

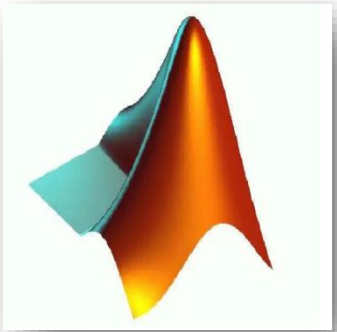
V- مقدمة

تمثل الطاقة الشمسية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة التي تلعب دورا محوريا في دعم الانتقال نحو أنظمة طاقة نظيفة ومنخفضة الانبعاثات. غير أن أداء الأنظمة الكهروضوئية لا يعتمد فقط على توفر الإشعاع الشمسي، بل يتأثر بشكل كبير بمجموعة من العوامل التشغيلية، وعلى رأسها شدة الإشعاع ودرجة حرارة الخلايا.

في هذا السياق، أظهرت دراسات النمذجة والمحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink أن زيادة شدة الإشعاع الشمسي تؤدي إلى تحسين التيار الكهربائي والقدرة المنتجة من النظام الكهروضوئي. في المقابل، فإن ارتفاع درجة حرارة الخلايا ينعكس سلبًا على أدائها، حيث يسبب انخفاض الجهد عند نقطة القدرة العظمى، مما يؤدي إلى تراجع الكفاءة الإجمالية للنظام.

وعليه، يهدف هذا الفصل إلى دراسة تأثير الإشعاع الشمسي على درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، وتحليل انعكاسات ذلك على الأداء الكهربائي للنظام، بالاعتماد على النمذجة والمحاكاة كأداة لفهم هذه الظواهر وتفسيرها.

V-1- نظرة عامة حول برنامج الماتلاب Matlab



الماتلاب هي لغة ذات مستوى عالي للحسابات والبرمجة وتمتاز بوجود برامج تسهل عملية التعامل مع هذه اللغة، وتشمل البرامج على:

يشمل الماتلاب على مجموعة من البرامج والتي تدعى (toolbox) مما يتيح لك التعامل مع التطبيقات المتخصصة وهذه الأدوات عبارة عن برامج في صورة (M-files).[1]

تطبيقات الماتلاب (Matlab)

تكمن تطبيقات البرنامج في المجال النظري و المجالات التطبيقية:

1. أنظمة التحكم في جميع المجالات الهندسية(Control System)
2. معالجة الصور
3. محاكاة الإلكترونات
4. مجال صناعة السيارات
5. مجال الطيران والدفاع الجوي
6. مجال الروبوت
7. وهناك الكثير والكثير من التطبيقات الهندسية.[1]

V-2 نظرة عامة حول برنامج Simulink

Simulink هو برنامج يستخدم لإنشاء ومحاكاة الأنظمة الديناميكية باستعمال مخططات كتلية بدل كتابة المعادلات أو الأكواد .

أمثلة عن استخداماته : أنظمة التحكم (PID) ، محركات كهربائية، دوائر الكترونية، أنظمة طيران وسيارات ، محاكاة العمليات الصناعية والتوربينات .

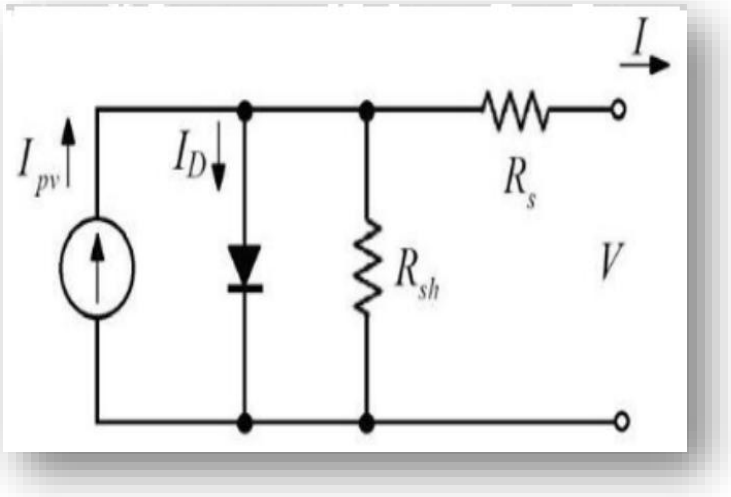
V-1- نمذجة الخلية الكهروضوئية

V-1-1- الدائرة المكافئة للخلية الكهروضوئية

تعتبر الخلايا الكهروضوئية العنصر الأساسي في أنظمة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. ومن أجل دراسة أدائها بشكل دقيق، يتم تمثيلها باستخدام نموذج رياضي يعتمد على الدائرة المكافئة، مما يسمح بتحليل سلوكها تحت تأثير مختلف العوامل البيئية.

ويعتمد في ذلك غالبًا على نموذج الدايود الواحد، الذي يعبر عن خصائص الوصلة شبه الموصلة بين طبقتي(p–n). يتكون هذا النموذج من مصدر تيار ضوئي يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي، ودايود يعكس السلوك غير الخطي للخلية، بالإضافة إلى مقاومة تسلسلي R_s ومقاومة تفرعيهR_{sh} تمثلان مختلف الخسائر الداخلية داخل الخلية.

كما يستخدم منحنى التيار بدلالة الجهد (I–V) لتمثيل العلاقة بين التيار والجهد عند مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي، بينما يوضح منحنى القدرة بدلالة الجهد (P–V) تغير القدرة مع الجهد، مما يتيح تحديد نقطة القدرة العظمى(Maximum Power Point) ، والتي تعبّر عن أفضل حالة تشغيل للخلية من حيث الكفاءة.



الشكل (V-1): الدارة المكافئة للخلايا الكهروضوئية

يمكن تمثيل التيار الخارج من الخلية الكهروضوئية رياضيًا بالعلاقة التالية:

$$I = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{vIRs}{nVT}} - 1\right) - \frac{v+IRs}{Rsh} \quad \text{.....(46)}$$

حيث ان:

I : تيار الخلية الخارج

I_{p_h} :التيار الضوئي ويعتمد على الاشعاع الشمسي

I_0 : تيار التشبع للدايود

V :جهد الخلية

R_s :المقاومة التسلسلية

R_{sh} :المقاومة التفرعية

n :عامل المثالية (ideality factor)

V_T :الجهد الحراري

تبرز هذه المعادلة بشكل واضح تأثير كل من شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة على سلوك الخلية الكهروضوئية، مما يتيح تحديد نقطة التشغيل المثلى وتحقيق أفضل كفاءة ممكنة في تحويل الطاقة خلال التطبيقات العملية.

وبصفة عامة، يعد الربط بين الأساسيات الفيزيائية للتأثير الكهروضوئي والنمذجة الرياضية والدائرة المكافئة عنصرا أساسيًا في تطوير أنظمة الطاقة الشمسية ذات الكفاءة العالية. كما يساهم تحليل منحنيي (I–V) و(P–V) في فهم خصائص الخلية بشكل أعمق، ويساعد في اختيار ظروف التشغيل والتصميم الأنسب، بهدف استغلال الطاقة الشمسية المتاحة بأقصى فعالية ممكنة.

V-2- اختيار الوحدة الكهروضوئية المدروسة

في إطار هذه الدراسة تم اعتماد وحدة كهروضوئية أحادية البلورة من نوع MONOCRYSTALLINE

Sun Power SPR-415 E-WHT-D بقدرة 415W

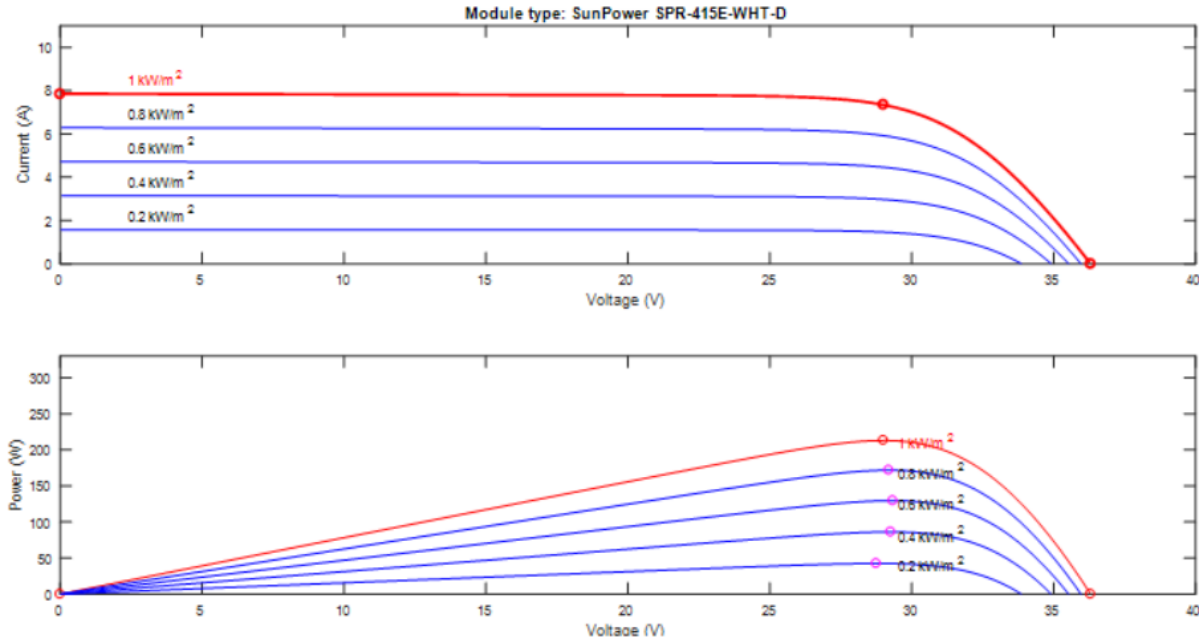
وقد تم اختيار هذه الوحدة نظرًا لكفاءتها العالية وأدائها المستقر في مختلف الظروف البيئية، مما يجعلها مناسبة لإجراء تحليل دقيق باستخدام بيئة MATLAB/Simulink.

يعرض الجدول (1) الخصائص الكهربائية الأساسية لهذه الوحدة تحت شروط الاختبار القياسية STC، والتي تتمثل في إشعاع شمسي قدره 1000 W/m² ودرجة حرارة مقدارها 25°C.

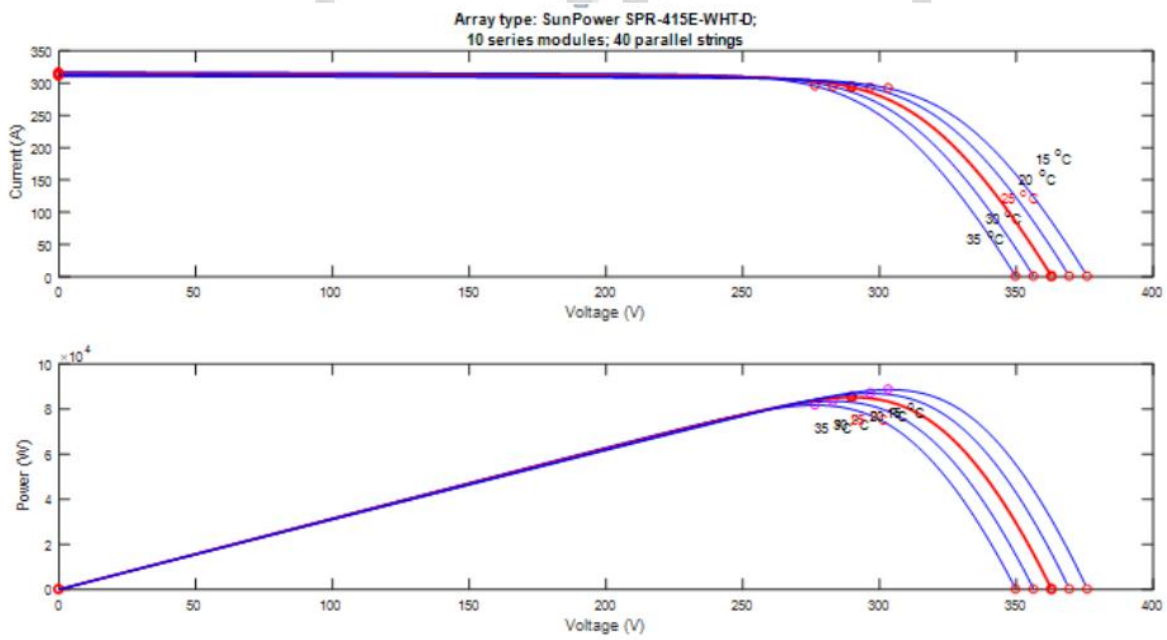
الجدول (V-1) : المواصفات الكهربائية للوحدة الكهروضوئية SunPower SPR-415E-WHT-D عند STC

MODULE: SunPower SPR-415E-WHT-D	
Maximum Power (W) : 414.801	Cells per module (Ncell) :128
Open Circuit Voltage (V) :85.3	Short-circuit cuirent Isc (A) : 6.09
Voltage maximum power point Vmp (V) : 72.9	Curent at maximum power point Imp. (A) : 5.69
Température coefficient of voc (deg.c) : -0.229	Température coefficient of Isc (deg.c) : 0.0030706

لغرض التحقق من صحة النموذج، تم الاعتماد على منحنيات الأداء الكهربائي للوحدة. يوضح الشكل (2) منحنيات التيار–الجهد (I–V) والقدرة–الجهد (P–V) عند مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة، بينما يبين الشكل (3) تأثير تغير درجة الحرارة مع ثبات الإشعاع على نفس المنحنيات.



الشكل (2-V) : منحنيات(I–V) و(P–V) للوحدة الكهروضوئية عند مستويات مختلفة من الاشعاع الشمسي



الشكل (3-V): منحنيات(P–V) و(I–V) للوحدة الكهروضوئية عند درجات حرارة مختلفة

يوضح الشكل (2) منحنيات التيار–الجهد (I–V) والقدرة–الجهد (P–V) عند مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي مع ثبات درجة الحرارة. حيث يلاحظ أن التيار يزداد بارتفاع شدة الإشعاع، في حين يتأثر الجهد بشكل طفيف فقط. ويشير ذلك إلى أن أداء الخلايا الكهروضوئية يعتمد بشكل أساسي على

شدة الإشعاع الشمسي. كما تُظهر النتائج انخفاضًا بسيطًا في الجهد مع زيادة الإشعاع.

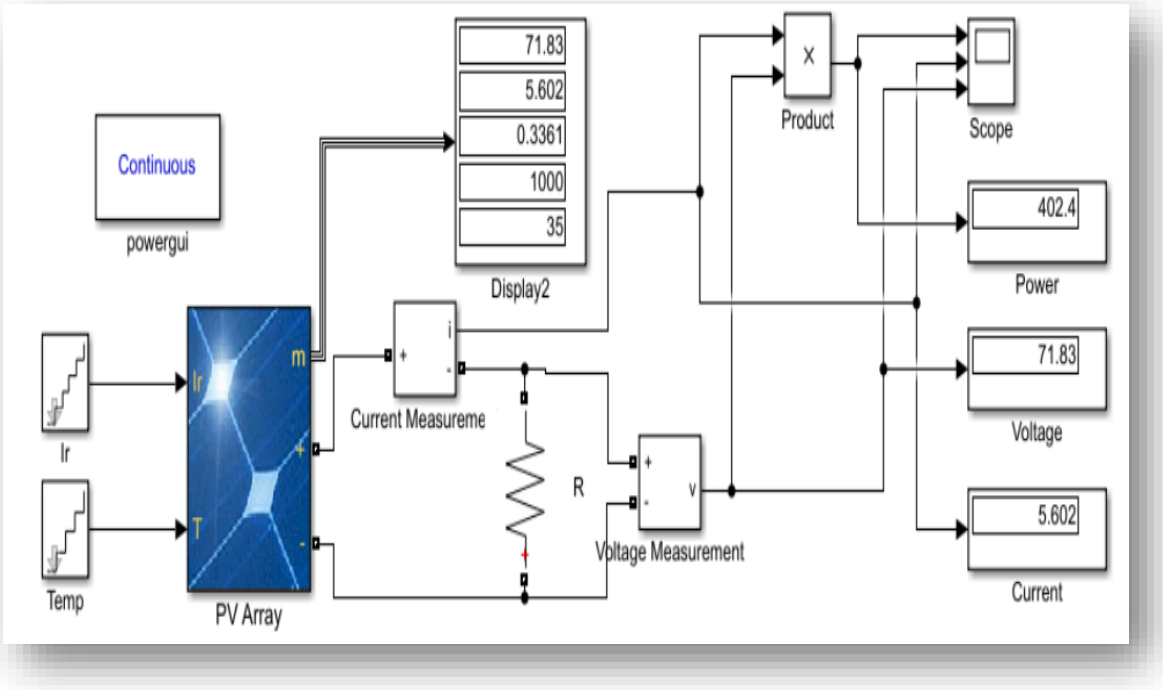
أما الشكل (3) فيبين منحنيات (I–V) و (P–V)عند درجات حرارة مختلفة، مما يؤكد تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية. إذ يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى انخفاض في الجهد وبالتالي تراجع القدرة القصوى، مما يؤكد أهمية التحكم في كل من الإشعاع ودرجة الحرارة لتحسين كفاءة الوحدة الكهروضوئية.

وتستخدم هذه النتائج في التحقق من دقة النموذج الرياضي وتقييم أداء اللوحة تحت ظروف التشغيل الحرجة، خاصة في البيئات ذات درجات الحرارة المرتفعة.

V-3- محاكاة أداء الخلية الكهروضوئية تحت تأثير المتغيرات البيئية باستخدامMATLAB

تم بناء نموذج المحاكاة الموضح في الشكل (4) باستخدام برنامجMATLAB/Simulink ، حيث تتضمن المنظومة تمثيلاً للدائرة المكافئة للخلية الشمسية. كما تم إدراج مصادر متغيرة لكل من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، بالإضافة إلى منافذ لقياس التيار الخارج (I) والجهد الطرفي(V) .

أجريت المحاكاة ضمن مدى إشعاعي يتراوح بين 200 و1000 W/m² ، وبدرجات حرارة تتراوح بين 15 °C و35 °C وقد تم تسجيل قيم الجهد والتيار والقدرة عند كل حالة تشغيل، مع تحليل منحنيات (I–V) و(P–V) ، إضافة إلى حساب مؤشرات الأداء اعتمادًا على التغير النسبي في القدرة والتيار والجهد، وذلك بهدف تقييم تأثير الظروف البيئية على كفاءة الخلية الشمسية.



الشكل (V-4): نموذج وحدة الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام Simulink

V-4- مخرجات المحاكاة

تم تسجيل التغيرات التي طرأت على كل من الجهد والتيار والقدرة بهدف تحليل تأثير العوامل البيئية على منحنيات التيار–الجهد (I–V) ومنحنيات القدرة–الجهد (P–V) ، مما يتيح تقييما شاملا للأداء الكهربائي للخلية الكهروضوئية.

وتظهر بيانات الجداول والرسوم البيانية العلاقة بين شدة الإشعاع الشمسي (W/m^2) ودرجة الحرارة (°C) وتأثيرهما المباشر على التيار والجهد والقدرة الناتجة، مما يوفر فهماً واضحاً لكيفية تأثر كفاءة الطاقة المستخرجة من الخلية بالظروف البيئية المختلفة.

الجدول (V-2) ::جدول أقصى التغيرات في الجهد للوحة الطاقة الشمسية

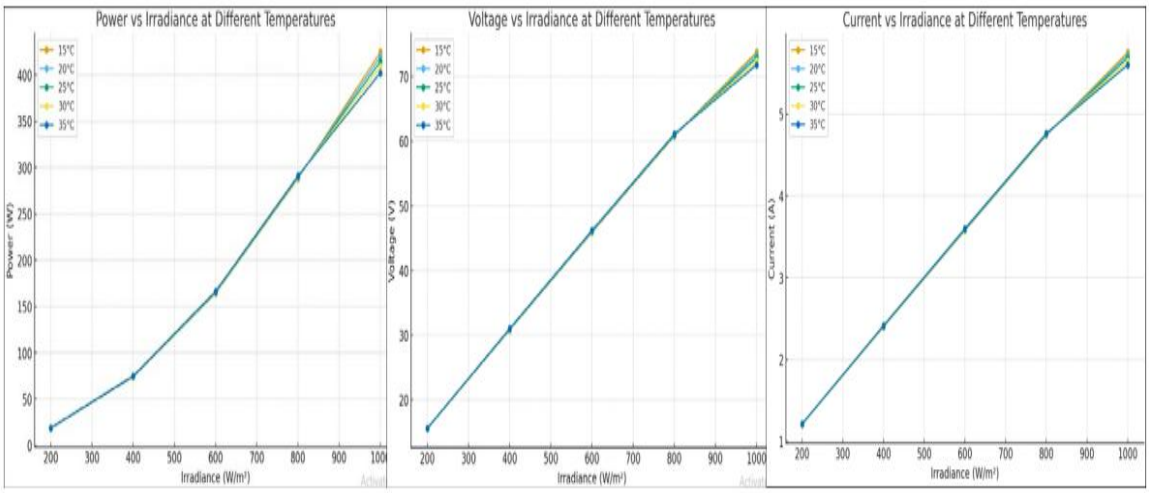
نتائج محاكاة الماتلاب						
(V) اقصى جهد	الاشعاع الشمسي (W/m^2)					درجة الحرارة
	200	400	600	800	1000	^0C
V_{max}	15.49	30.79	45.89	60.80	73.8	15
V_{max}	15.51	30.83	45.96	60.88	73.4	20
V_{max}	15.54	30.88	46.03	60.96	72.93	25
V_{max}	15.56	30.93	46.10	61.03	72.4	30
V_{max}	15.59	30,98	46.17	61.09	71.83	35

الجدول (V-3) : أقصى التغيرات في التيار للوحة الطاقة الشمسية

نتائج محاكاة الماتلاب						
(A) اقصى	الاشعاع الشمسي (W/m^2)					درجة الحرارة
التيار	200	400	600	800	1000	^0C
I_{max}	1.208	2.401	3.579	4.742	5.756	15
I_{max}	1.21	2.405	3.585	4.748	5.724	20
I_{max}	1.212	2.408	3.59	4.754	5.688	25
I_{max}	1.214	2.412	3.596	4.76	5.647	30
I_{max}	1.216	2.416	3.601	4.764	5.602	35

الجدول (V-4) : أقصى التغيرات في القدرة للوحة الطاقة الشمسية

نتائج محاكاة الماتلاب						
درجة الحرارة	الاشعاع الشمسي (W/m^2)					(W) اقصى
^0C	1000	800	600	400	200	جهد
15	424.8	288.3	164.3	73.92	18.71	P_{max}
20	420.1	289.1	164.8	74.15	18.77	P_{max}
25	414.8	289.8	165.3	74.38	18.83	P_{max}
30	408.8	290.5	165.8	74.6	18.89	P_{max}
35	402.4	291.0	166.3	74.83	18.95	P_{max}



الشكل (V-5): يوضح العلاقة بين الجهد (V) والتيار (I) والقدرة(P) وشدة الاشعاع الشمسي (G) عند درجات حرارة مختلفة

مؤشرات نسبة التغير(مؤشر أداء (Performance Indicator)

تأثير تغير الإشعاع الشمسي(مقارنة بين G=200 وW/m^2 G=1000 عند $T=15^{\circ}C$)

من خلال تحليل نتائج المحاكاة عند درجة حرارة ثابتة قدرها 15°C، تمت دراسة تأثير تغيّر شدة الإشعاع الشمسي من 200W/m² إلى1000 W/m²على الخصائص الكهربائية للوحدة الكهروضوئية.

❖ القدرة العظمى P_{max}

التغير النسبي

$$\sim 21{,}71\% = 100 \times \frac{424.8 - 18.71}{18.71}$$

تظهر النتائج أن القدرة العظمى P_{max} تعرف زيادة كبيرة، حيث تنتقل من 18.7W إلى 424.8W، أي بزيادة نسبية تقدر بحوالي 2171%، وهو ما يعادل تقريبا 22 ضعف القيمة الابتدائية. ويفسر ذلك بالعلاقة المباشرة بين القدرة وشدة الإشعاع الشمسي.

❖ التيار الاعظمي I_{max}

التغير النسبي

$$\sim 376.7\% = 100 \times \frac{5.756 - 1.208}{1{,}208}$$

بالنسبة للتيار الأعظميI_{max} ، فقد ارتفع من 1.208A إلى 5.756A مسجلا زيادة نسبية تقارب 376.7%، مما يعكس التأثير المباشر للإشعاع على التيار الناتج.

❖ الجهد الأعظمي V_{max}

التغير النسبي

$$\sim 376.5\% = 100 \times \frac{73.8 - 15.49}{15.49}$$

يلاحظ أن الجهد الأعظمي V_{max} يزداد من 15.49V إلى 73.8V بنسبة تغير تقدر بحوالي 376.5%. ورغم هذا الارتفاع، يبقى تأثير الإشعاع على الجهد أقل حدة مقارنة بتأثيره على التيار.

الجدول (V-5) : أثر تغير الاشعاع على مؤشرات الأداء عند $T = 15C^{\circ}$

المؤشر	عند $200\ w/m^2$	عند $1000\ w/m^2$	نسبة التغير %
$P_{max}(W)$	18.71	424.8	+2171%
$I_{max}(A)$	1.208	5.756	+376.7%
$V_{max}(V)$	15.49	73.8	+376.5%

ترجع الزيادة الكبيرة في القدرة أساسا إلى الارتفاع الملحوظ في شدة التيار مع زيادة الإشعاع الشمسي، في حين أن الجهد يزداد بشكل أقل حدة. وبالتالي، فإن القدرة تتضاعف نتيجة التأثير المشترك لكلٍّ من التيار والجهد.

أثر تغير درجة الحرار(مقارنة بين $T=15^{\circ}C$ و $T=35^{\circ}C$ عند $G=1000W/m^2$)

❖ **القدرة العظمى P_{max}**

من W=424.8 الى W= 402,4

التغير النسبي:

$$\sim -5.27\% = 100 \times \frac{402.4 - 424.8}{424.8}$$

❖ **الجهد الأعظمي V_{max}**

من V= 73.8 الى V =71.83

التغير النسبي:

$$\sim -2.67\% = 100 \times \frac{71.83 - 73.8}{73.8}$$

❖ **التيار الأعظمي I_{max}**

من A=73.8 الى A=71.83

التغير النسبي:

$$\sim -2.68\% = 100 \times \frac{5.602 - 5.757}{5.757}$$

يلاحظ أن لدرجة الحرارة تأثيرا سلبيا على أداء الخلية الكهروضوئية عند ثبات الإشعاع الشمسي $G=1000W/m^2$، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة من $T=15^{\circ}C$ إلى $T=35^{\circ}C$ إلى انخفاض القدرة العظمى P_{max} بنسبة تقدر بحوالي 5.27% ويعزى هذا التراجع أساسا إلى الانخفاض الملحوظ في الجهد الأعظمي V_{max}، الذي يتأثر بدرجة الحرارة بشكل أكبر مقارنة بالتيار.

كما يسجل انخفاض طفيف في كل من الجهد والتيار الأعظمين، حيث بلغت نسبة التراجع حوالي 2.67% و2.68 %على التوالي، إلا أن تأثير انخفاض الجهد يبقى العامل الحاسم في تقليص القدرة الكلية. وعليه، تؤكد هذه النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة يُضعف مردودية النظام الكهروضوئي، مما يستدعي أخذ التأثيرات الحرارية بعين الاعتبار عند التصميم والتشغيل، خاصة في المناطق ذات المناخ الحار، مع ضرورة اعتماد تقنيات تبريد مناسبة للحد من هذا التأثير.

الجدول (V-6) : أثر تغير درجة الحرارة على مؤشرات الأداء عند $G=1000\ w/m^2$

المؤشر	عند $15^{\circ}C$	عند $35^{\circ}C$	نسبة التغير%
P_{max} (w)	424.8	402.4	−5.27%
I_{max} (A)	73.8	71.83	−2.67%
V_{max} (V)	5.756	5.602	−2.68%

يتضح من نتائج المحاكاة أن الإشعاع الشمسي يعد العامل الأكثر تأثيرا في رفع القدرة المستخرجة، حيث ارتفعت القدرة العظمى P_{max} بنحو 22.7 ضعفا عند زيادة الإشعاع من 200 إلى 1000 W/m²عند درجة حرارة 15°C وذلك نتيجة الزيادة الكبيرة في التيار والجهد على حد سواء.

في المقابل، أظهرت الحرارة تأثيرا عكسيا، حيث أدى ارتفاع درجة الحرارة من 15°C إلى°C 35 إلى انخفاض القدرة بنسبة حوالي 5.27% بسبب الانخفاض الملحوظ في الجهد. وتبرز هذه المؤشرات أهمية الاعتبارات الحرارية عند تصميم وتشغيل الأنظمة الكهروضوئية في البيئات الحارة، وضرورة استخدام حلول التبريد المناسبة لتقليل الخسائر الحرارية وتحسين الأداء العام.

V-4- التحليل و المناقشة

V-4-1- تحليل نتائج المحاكاة

أظهرت نتائج المحاكاة أن الإشعاع الشمسي يعد العامل الأكثر تأثيرا على الأداء الكهربائي

للخلية الكهروضوئية، حيث ارتفعت القدرة القصوى من 18.71 W إلى 424.8 W عند زيادة الإشعاع من 200 إلى 1000 W/m² وعند درجة حرارة ثابتة قدرها 15°C ، أي بزيادة نسبية تقارب 376.5%.

ويعود هذا الارتفاع أساسا إلى الزيادة الكبيرة في التيار، مع مساهمة أقل للجهد، مما يعكس التأثير المشترك لكل من التيار والجهد على القدرة الناتجة.

في المقابل، أدى رفع درجة الحرارة من 15 إلى 35°C عند إشعاع ثابت قدره 1000 W/m²إلى انخفاض القدرة من 424.8 إلى 402.4 (واط) ، أي بنسبة تراجع تقارب 5.27%. كما لوحظ انخفاض طفيف في كل من الجهد والتيار، مما يوضح أن ارتفاع درجة الحرارة يؤثر سلبًا على أداء الخلية الكهروضوئية.

وتؤكد هذه النتائج أهمية التحكم في الظروف الحرارية عند تصميم وتشغيل الأنظمة الكهروضوئية، بالإضافة إلى اعتماد حلول التبريد لتحسين الكفاءة وتقليل الخسائر الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة.

استخدام خلايا كهروضوئية ملائمة لأنظمة التركيز العالي

تعد الخلايا متعددة الوصلات (Multi–junction Cells) نموذجاً متطورا صمِم لاستغلال نطاقات واسعة من الطيف الشمسي، مما يرفع من كفاءة التحويل الطاقي. وتتميز هذه الخلايا بتفوق أدائها في بيئات الإشعاع الشمسي المركز مقارنة بالخلايا السيليكونية التقليدية التي تفتقر لنفس القدرة على التحمل والكفاءة في تلك الظروف.

الجدول (V-7)، يوضح أنواع المواد الخافضة للحرارة بتركيبتها الكيمائية وكفاءتها في تخفيض حرارة الالواح ورفع مردودية الطاقة لديها:

جدول (V-7): مواد مقترحة للخلايا الكهروشمية بمعاملات حرارية مختلفة

مادة الخلية الكهروضوئية	الرمز	معامل درجة الحرارة للكفاءة (C°/%)	درجة حرارة التشغيل القصوى الموصى بها (C°)	درجة حرارة التلف الحراري (C°)
أرسينيد الغاليوم	GaAs(خلايا متعددة الوصلات)	0.05-إلى -0.15	150 - 250 مصممة لـ(CPV)	> 300 - 400 (تعتمد على التصميم)
الطبقات الرقيقة (أشكال أخرى مثل a-Si)	Thin-Film	0.15- إلى 0.25 -(متغيرة حسب النوع)	80 - 90 للمكونات	120 - 150 (أكثر حساسية للحرارة)
تلوريد الكادميوم	CdTe	0.20-إلى -0.30	85 - 100 للمكونات	> 150 - 200
سيلينيد النحاس والإنديوم الغاليوم	CIGS	0.25-إلى -0.35	85 - 100 للمكونات	> 150 - 200
السيليكون أحادي البلورة	c-Si	0.35-إلى -0.45	85 - 100 للمكونات	150 (تدهور المواد، لحام)
السيليكون متعدد البلورات	p-Si	0.38- إلى0.48-	85 - 100 للمكونات	150 (تدهور المواد، لحام)
الخلايا الشمسية البيروفسكايت	Perovskite	0.25-إلى 0.45 -(متغيرة، لا يزال البحث جارياً)	60 - 85 للمكونات	> 100 - 120 حساسة للرطوبة

- **مناقشة معطيات الجدول:**

- يظهر الجدول علاقة عكسية واضحة بين درجة الحرارة والكفاءة لجميع المواد. ومع ذلك، تبرز مادة أرسينيد الغاليوم (GaAs) كأفضل مادة من حيث الاستقرار، حيث تمتلك أدنى معامل انخفاض (0,05 الي 15 %/°C)هذا يعني أنها الأقل تأثراً بارتفاع درجات الحرارة، مما يجعلها المرجعية الذهبية في تطبيقات الفضاء والتركيز العالي.
- يلاحظ أن السيليكون c–Si وp–Si ، رغم كونه الأكثر انتشارا تجاريا، إلا أنه الأكثر حساسية للحرارة بمعامل يصل إلى −0.48 %/°C كما أن درجة حرارة التلف لديه منخفضة نسبيا (150°C)، مما يجعله خيارا "صعباً" في أنظمة التركيز ما لم يتم توفير نظام تبريد عالي الفعالية.
- رغم أن البيروفسكايت مادة واعدة جدا من حيث الكفاءة المخبرية، إلا أن الجدول يكشف عن نقطة ضعفها القاتلة درجة حرارة فهي تبدأ في التدهور عند درجات حرارة منخفضة جدا تتراوح بين (60–85C°) مقارنة بالمواد الأخرى، مما يحد من استخدامها في البيئات الصحراوية أو مع أنظمة التركيز حاليا.
- الجدول يوضح بوضوح لماذا تستخدم الخلايا متعددة الوصلات (GaAs) في أنظمة التركيز؛ فهي ليست فقط أكثر كفاءة، بل هي المصممة تقنيا لتحمل تشغيل يصل إلى 250°C دون أن تنهار المادة، بينما المواد الأخرى مثل Thin–Film و CdTe تظل محدودة في نطاق الـ 100°C.

- من خلال مقارنة معاملات درجة الحرارة في الجدول، نستنتج أن الحاجة إلى أنظمة تبريد هجينة تزداد إلحاحاً عند استخدام خلايا السيليكون والبيروفسكايت، بينما تمنح مادة GaAs مرونة أكبر في إدارة الحرارة نظراً لخصائصها البنيوية التي تقاوم التدهور الحراري.

V–4–2 حدود الدراسة

على الرغم من النتائج المهمة التي تم الحصول عليها، فإن هذه الدراسة تقتصر على النمذجة والمحاكاة الرقمية باستخدام MATLAB/Simulink دون إجراء تجارب ميدانية فعلية، مما قد يؤثر على

دقة التنبؤ بالأداء في ظروف تشغيل حقيقية ومتغيرة. كما تم حصر تحليل الإشعاع الشمسي ضمن المجال (200–1000 W/m²) ودرجة الحرارة بين (15°C–35°C) فقط، في حين قد تتجاوز هذه القيم أو تختلف في البيئات الطبيعية المختلفة.

V-4-3 الخلاصة

استجابة لمشكلة البحث المتمثلة في محدودية النماذج التي تقيم أداء الوحدات الكهروضوئية ضمن نطاق واسع من الظروف البيئية، قدمت هذه الدراسة نموذجًا عدديًا لوحدة Sun Power الكهروضوئية بهدف تحليل تأثير كل من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة بشكل كمي، باستخدام بيئة . MATLAB/Simulink

وقد بينت النتائج أن الإشعاع الشمسي يُعد العامل الأكثر تأثيرًا في رفع القدرة المستخرجة، حيث أدى ارتفاعه من 200 إلى 1000 W/m² إلى زيادة كبيرة في القدرة القصوى نتيجة الزيادة شبه الخطية في التيار المتولد. في المقابل، أظهرت المحاكاة أن ارتفاع درجة الحرارة من 15°C إلى 35 °C يؤدي إلى انخفاض القدرة بنسبة 5.27%، ويعزى ذلك أساسا إلى انخفاض جهد الدائرة المفتوحة نتيجة تأثيرات الدايود داخل الخلية.

وتعكس هذه النتائج بوضوح إشكالية البحث، مؤكدة أن تحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية في البيئات الحارة يتطلب تقليل التأثير السلبي لارتفاع درجة الحرارة عبر اعتماد حلول تنظيم حراري فعالة، إضافة إلى دمج خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) لضمان تشغيل مستقر وكفء.

ومن ثم، توفر هذه الدراسة أساسا عمليا لتطوير نماذج أكثر واقعية ودعم قرارات تصميم وتشغيل الأنظمة الشمسية في المناطق ذات الإشعاع المرتفع ودرجات الحرارة العالية.

المراجع

[1] صفحة électronics GO ، تحرير نور شريفة ، الماتلاب تاريخ تطوره و بعض تطبيقاته ، متوفر علي الرابط Why You Should Use MATLAB in Your Next Automation Project - PLCnext Community ، آخر تحديث :05 أكتوبر 2021

[3] صفحة Mediaket ، دروس تعليمية حول كيفية استخدام Comsol Multiphysics، متواجد علي الرابط: دروس تعليمية حول كيفية استخدامCOMSOL Multiphysics ، أخر تحديث 27 أفريل 2025

الخاتمة

لخصت هذه الدراسة إلى تحليل معمق وتفصيلي لأداء الوحدات الكهروضوئية تحت تأثير المتغيرات البيئية، وبالتحديد شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة التشغيل، باستخدام بيئة النمذجة والمحاكاة MATLAB/Simulink. وقد مكنتنا هذه الدراسة من الوصول إلى استنتاجات جوهرية تشكل حجر الأساس لمعالجة إشكالية البحث في أنظمة التركيز الشمسي الهجينة.

أثبتت نتائج المحاكاة أن شدة الإشعاع الشمسي هي المحرك الأساسي لرفع القدرة الإنتاجية للنظام، حيث أدت زيادة الإشعاع إلى تضاعف القدرة القصوى بشكل كبير نتيجة الارتفاع المباشر في شدة التيار. ومع ذلك، برزت درجة الحرارة كعامل حرج ومثبط للأداء؛ إذ أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة حرارة الخلايا يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في الجهد، مما يتسبب في تراجع الكفاءة الإجمالية للتحويل الكهربائي بنسبة تجاوزت 5% عند فروقات حرارية بسيطة.

هذه النتيجة تكتسي أهمية بالغة عند الحديث عن أنظمة التركيز الكهرو شمسية(CPV) ، حيث تتضاعف شدة الإشعاع الساقط على الخلية بمئات المرات، مما يؤدي بالضرورة إلى تراكم حراري هائل قد يتجاوز الحدود التشغيلية الآمنة للخلايا ويؤدي إلى تلفها أو انهيار مردوديتها.

ومن هذا المنطلق، تبرز أهمية المواد الماصة للحرارة كحل تقني استراتيجي ضمن الأنظمة الهجينة. فبدلا من اعتبار الحرارة ضياعا طاقوياً ومؤثرا سلبا على الأداء، تفتح هذه المواد آفاقاً لامتصاص الفائض الحراري وتبريد الخلايا للحفاظ على كفاءتها الكهربائية، مع إمكانية استغلال تلك الطاقة الحرارية الممتصة في تطبيقات أخرى (نظام هجين حراري–كهربائي)

في الختام، تؤكد الدراسة أن الانتقال من المحاكاة الرقمية إلى التطبيق الفعلي في أنظمة التركيز يتطلب بالضرورة دمج تقنيات تبريد متقدمة ومواد مبتكرة ذات سعة حرارية عالية.

وتوصي الدراسة بضرورة التوسع في البحث التجريبي لاختبار أنواع مختلفة من المواد الماصة للحرارة وتأثيرها المباشر على استقرار نقطة القدرة العظمى مما يساهم في تطوير أنظمة طاقة شمسية أكثر استدامة وكفاءة في المناطق ذات الإشعاع العالي والمناخ الحار.

الملاحق

الملحق1: مقارنة الموائع المتقدمة لتبريد خلايا نظام الـCPVT

نوع المائع المتقدم (Coolant)	التركيب / الآلية الفيزيائية	معدل خفض حرارة الخلايا (ΔT_{cell})	نسبة رفع الكفاءة والقدرة الكهربائية (Δ_{Pel})	نسبة رفع الاستطاعة الحرارية مفيدة(Δ_{Qth})	التحديات والعيوب التقنية
الماء النقي المرجع	مائع كلاسيكي تقليدي.	0 °C المعيار الأساسي	0% المرجع الأساسي	0% المرجع الأساسي	لزوجة منخفضة لكن موصليته الحرارية ضعيفة مقارنة بالمعادن.
مائع نانوي أكسيد الألومنيوم Al_2O_3 + Water	جزيئات نانوية سيراميكية بنسبة 3%مع الماء.	12 °Cإلى 15 °C	+10% to +12%	+15% to +18%	ترسيب الجزيئات على المدى الطويل (بحاجة لمواد تشتيت)
مائع نانوي أكسيد النحاس CuO Water	جزيئات نانوية معدنية بنسبة 2% إلى 3%	14 °Cإلى 17 °C	+12% to +14%	+18% to +22%	تكلفة أعلى قليلاً من أكسيد الألومنيوم، وزيادة طفيفة في لزوجة المائع.
مائع نانوي يعتمد على الغرافين + Graphene Water	صفائح نانوية من الكربون (الغرافين) فائقة الموصلية بنسبة .1%	18 °Cإلى 22 °C	+15% to +18%	+25% to +30%	تكلفة اقتصادية عالية جداً، وصعوبة في الحفاظ على استقرار المعلق النانوي.
مائع نانوي هجين Al_2O_3 – MWCNT + Water	خليط من أكسيد الألومنيوم وأنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران.	16 °C إلى 20 °C	+13% to +16\%	+22% to +27%	تعقيد في التحضير الكيميائي للمائع لضمان تجانس الخليط الهجين.
مائع ذو تغير طوري دقيق (Microencapsulated PCM Slurry)	ماء مخلط بحبيبات مجهرية مغلفة من مواد متغيرة الطور (مثل الشمع)	20 °C إلى25 °C ممتاز جداً وقت الذروة	+16% to +20%		

الملحق 2: مقارنة المواد الملتصقة بالخلايا لتبريد نظام الـ CPVT

اسم المادة / التقنية	طريقة التطبيق والالتصاق	معدل خفض حرارة الخلايا (ΔT_{cell})	التأثير على الكفاءة والقدرة الكهروضوئية	المميزات الفنية	التحديات والعيوب
الشحم الحراري السيليكوني (Thermal Grease / Paste)	يوضع كطبقة رقيقة جداً بين اللوح والأنبوب الماص قبل التثبيت المحكم .	4 °C إلى 6 °C	تحسن نسبته +5% 3%	*موصلية حرارية جيدة1.5 – 5 W/mK يملأ الفراغات الهوائية المجهرية تماماً.	جفاف الشحم بمرور الوقت تحت حرارة ورقلة المرتفعة، مما يتطلب صيانة .
المواد متغيرة الطور الشمعية (Paraffin Wax PCM)	تلصق في كبسولات أو قنوات مغلقة خلف الخلايا مباشرة ومحيطة بالأنبوب.	15 °Cإلى 20 °C’ (فعالية قصوى ظهراً)	تحسن ضخم يصل إلى +12% to +15%	*تمتص الحرارة الكامنة عند التحول الطوري. *تحافظ على حرارة ثابتة للخلايا لساعات طويلة.	موصلية حرارية ضعيفة للمادة نفسها (تحتاج إضافة جزيئات معدنية لرفع نقل الحرارة)
الأشرطة الحرارية اللاصقة ثنائية الوجه (Thermal Conductive Tapes)	شريط لاصق مرن يربط اللوح الشمسي بجدار الأنبوب مباشرة .	3 °C إلى 5 °C	تحسن نسبته +2% to +4%	*سهلة التطبيق والتركيب جداً. *توفر تثبيتاً ميكانيكياً ورابطاً حرارياً في آن واحد.	موصليتها الحرارية أقل من الشحم الحراري السائل.
المواد النانوية المركبة متغيرة الطور(NePCM)	شمع بارافين مطعم بجزيئات نانوية كربونية أو معدنية، يلصق خلف الخلايا.	18 °Cإلى 24 °C	تحسن ممتاز يتجاوز +14% to +18%	*تجمع بين التخزين الحراري العالي والموصلية الفائقة. *مثالية للمناخ الصحراوي القاسي .	تكلفة تحضيرها مخبرياً مرتفعة نسبياً.
الراتنجات الإيبوكسية الناقلة للحرارة (Thermal Conductive Epoxy)	صمغ حراري قوي يجف ليصبح صلباً، يلصق الخلايا بالأنبوب بشكل دائم.	5 °C إلى 8°C	تحسن نسبته +4% to +6%		

الملحق3: مقارنة الأملاح متغيرة الطور (PCMs) في عملية تبريد الألواح الشمسية

المادة الملصقة بالخلايا	صيغتها / تركيبها الكيميائي	درجة حرارة الانصهار (تثبيت حرارة اللوح)	السعة الحرارية الكامنة (طاقة التبريد)	معدل خفض حرارة الخلايا وقت الذروة	نسبة رفع الكفاءة والقدرة الكهربائية	التقييم والتوصية لعملية التبريد المباشر
كلوريد الكالسيوم سداسي الهيدرات	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29.7 °C	190kJ/kg	20 °C إلى 24°C	+14% to +16%	ممتاز جداً وموصى به :يبدأ التبريد مبكراً ويحافظ على الخلايا قريبة جداً من حرارة الشروط القياسية.(25°C)
كبريتات الصوديوم عشاري الهيدرات (ملح غلاوبر)	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4 °C	251kJ/kg	22 °C إلى 25°C	+15% to +18%	أعلى طاقة تبريد :يمتلك حرارة كامنة فائقة، مما يجعله يمتص كميات ضخمة من حرارة الشمس قبل أن ترتفع درجة حرارة اللوح.
نترات المغنيسيوم سداسي الهيدرات	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	89.0 °C	163kJ/kg	ضئيل جداً	شبه منعدم	غير مناسب للتبريد المباشر :نقطة انصهاره (89°C) تتجاوز الحد الأقصى لتشغيل اللوح (85°C)، مما يعني أن الخلايا ستتلف قبل أن تبدأ المادة بالانصهار والتبريد.
الخلائط الملحية سهلة الانصهار (Eutectic Salts)	$LiNO_3+NH_4NO_3$	40.0 °C	120kJ/kg	12 °C إلى 15°C	+8% to +11%	جيد ومستقر: يوفر تبريداً متوازناً عند درجة حرارة آمنة جداً تمنع التدهور السريع للكفاءة الكهربائية.

الملحق 4:مقارنة أنواع الأملاح الذائبة متغيرة الطور **(Molten Salts PCMs)**

نوع الملح / الخليط الملحي	التركيب الكيميائي المشهور	درجة حرارة الانصهار (Melting Point)	الحرارة الكامنة للانصهار (Latent Heat)	معدل خفض حرارة الخلايا وقت الذروة	نسبة رفع القدرة الكهربائية(P_{el})	التقييم التقني لدمجه في نظامكم
ملح النترات الثنائي (Solar Salt)	$60\%NaNO_3$ $+40\%KNO_3$	220 °C	~ 110kJ/kg	منخفض في هذا النظام المحدد	ضئيل جداً في هذا التطبيق	غير مناسب كملح ملاصق للخلايا؛ لأن درجة انصهاره (220°C) أعلى بكثير من درجة الحرارة القصوى لتحمل الخلايا (85°C) ولكنه ممتاز لتخزين الحرارة بشكل مستقل بعد خروج المائع الساخن.
ملح النترات الثلاثي الهجين (Hitec Salt)	$53\%\ KNO_3$ $+40\%NaNO_2$ $+7\%\ NaNO_3$	142 °C	~ 80kJ/kg	متوسط	ضعيف	درجة انصهاره لا تزال مرتفعة نوعاً ما بالنسبة للخلايا الكهروضوئية مباشرة، ولكنه يمتلك لزوجة واستقرارية ممتازة لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة من الأنبوب الماص.
الأملاح الهيدراتية المنخفضة (Salt Hydrates)	$CaCl_2{\cdot}6H_2O$ أو $Na_2SO_4{\cdot}10H_2O$	29 °C إلى 32 °C	~ 190 to 250kJ/kg	22 °C إلى 26°C	+15% to +18%	ممتاز جداً للصق خلف الخلايا مباشرة؛ تنصهر هذه الأملاح في درجة حرارة قريبة جداً من الشروط القياسية (25°C)، مما يثبت حرارة اللوح بشكل مثالي ويمنع تدهور الكفاءة الاسمية خلال الساعات الحارة في ورقلة.
خليط النترات سهل الانصهار (Eutectic Nitrate mixture)	$18\%NaNO_3$ $+45\%KNO_3$ $+37\%LiNO_3$	120 °C	~ 132kJ/kg			